



北海道情報大学紀要

ISSN 0915-6658

Memoirs of Hokkaido Information University Vol.27 No.2 March 2016

27-2

Memoirs of Hokkaido Information University

北海道情報大学紀要

第27巻 第2号

2016年3月



北海道情報大学

目 次

〈論 文〉

教科を通したキャリア教育に関する研究 —高校数学における教育実践のために—	椿 達	1
Information-Theoretic Document Clustering using Skew Divergence	内山 俊郎	19
タブレット端末用電子書籍リーダーを活用した学習効果改善への 学習分析的アプローチ	ソーラ・サイモン 広奥 暢 奥山 尚史	27
大学生の日本語文章力向上を目的とした提出文章の要改善箇所指摘システム	三浦 智美 中島 潤	35
集合間の距離に基づく重み付きカーネルk-平均法のパラメータ探索法	柳 信一	51

〈研究ノート〉

I C Tを活用したプロジェクトベース学習 —日本とタイにおける短期集中国際交流プログラムを通じた、共通言語としての英語の役割—	ライアン ジョエル P.	73
北海道情報大学高血圧者の現状および特徴についての検討	佐藤 浩樹 佐藤 裕二 西平 順	87
患者視点に立った北海道の医療機関のセカンドオピニオンに関する調査	船越 幻夢 高橋 文	93
高校数学の微積分の実践としてのKeplerの法則の証明	松井 伸也	107
作図問題とGalois理論に関する教材作成の試み	林 雄一郎	115
セレンディピティを体験させることを意図したアプリケーションの開発	斎藤 一 新谷 渚	133

〈資 料〉

デジタルカメラにおける各種パラメータの相互関係 カメラの振動と大判カメラについて	守 啓祐	139
---	------	-----

〈報 告〉

プロジェクトを通じたグローバル人材育成の試み	竹内 典彦 サイモン ソーラ 三浦 洋 川上 正博 安田 光孝	153
------------------------	---	-----

〈論 文〉

教科を通したキャリア教育に関する研究

—高校数学における教育実践のために—

椿 達*

A Study of Career Education through a Subject —Concerning Practices of Education in High School Mathematics—

Toru TSUBAKI*

要旨

我が国のキャリア教育は「普及段階」に入っているものの、教育現場では、本来のキャリア教育の実践が進んでいない。今日のキャリア教育の柱は、学校の教育活動全体でキャリア教育を実践することであり、その核となるのは教科を通した実践である。本稿は、高校数学における「教科を通したキャリア教育」の促進に資する基礎研究であり、キャリア教育の「断片」を見出し、それらを相互につなぐための方法についても論考する。

Abstract

Although career education in our country has been in “a stage of development”, the implementation of career education has not advanced greatly in educational institutions. The focus of today’s career education is to practice career education in various educational activities in schools and the core is to practice it through subjects. This paper constitutes a basic research on facilitating “career education through subjects” in high school mathematics and discusses methods of finding “components” of career education and connecting them.

キーワード

キャリア教育 (career education) 数学教育 (mathematics education) 教科教育 (education through subjects) 教育実践 (practice of education) 教育方法 (educational method) 学習内容 (learning content)

* 北海道情報大学経営情報学部准教授 Associate Professor, Department of Business and Information Systems, HIU

1. 研究の目的

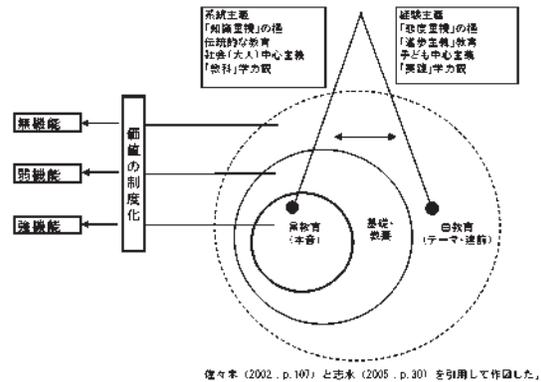
1-1 問題意識

筆者は、子どもの学力低下が問題になり、論争までになっていたころ、普通科高校における生徒の多様性に応じた数学教育について、「平等」と「効率」を共に引き上げることを目指した仕組みと実践を通して、教育思想的な考察を加えた研究を発表した（拙稿 2006）。この研究の問題意識は、当時、数学の研究サイドからは、大学生の学力低下の実態の指摘や数学の危機については力強く訴えてくるものの、なぜ高校などの教育現場に有効打（方向性や方法など）が繰り出されないのか、それは数学教育界全体にある種の「動揺」があり、それが一因になっているのではないか、というところにあった。

その「動揺」については、「教育の白黒論争」論（佐々木 2002）や「振り子モデル」（志水 2005）を頼りにモデル（図 1 参照）を作成して、数学はその教科特性から本質的に、二項対立する教育の主義や理念の両極に向かって揺れてしまうこと、と説明した。そして、松下の「楽しい授業・学校づくり」を根底で支えている「子ども中心主義」の教育理念の空虚さや欺瞞性を指摘した論文（松下 2003）を踏まえて、「数学教育の目指す方向性として、振り子論上のバランスの問題を越えていくための第三の道（これからの時代にふさわしい教育・授業の理念や方法）を模索し、構築すること」と指摘した。

それから 10 年余りが経過し、もはやこのようなモデルを使って、学力観や教育観などについて「どちら側に振り子が振れたか」

の視点は、分かりやすいものの、そんな単純な議論ではなくなっている感がある。



佐々木 (2002, p.107) と志水 (2005, p.30) を引用して作成した。

図1 「白教育VS黒教育」と振り子論

しかし、松下が『子ども中心 VS. 社会中心』『楽しい VS. 辛い』といった不毛な二項対立を乗り越える教育や学びの理論を構築し、それを基礎にして時代にふさわしい新たな学校の理念を構想すること、これは戦後の教育学が見失ってきた、未だほとんど手つかずの課題なのである」（松下 2003, p.165）と指摘していた「新たな学校の理念の構想」は、管見の限り、明らかにされてはいない。

本研究は、キャリア教育の理念が「新たな学校の理念」になり得るのではないか、その実践が「振り子論上のバランスの問題を乗り越えていくための第三の道へのアプローチ」となるのではないか、との問題意識に基づくものである。

また、苅谷がかつて指摘していた「…ここで教育にとって難しいのは、子どもがそれをどこまで耐えられるか、ということです。すぐには意味が見えないわけだから。狭い範囲で算数なら算数の教科のなかでの理解が、子ども自身にとって実体験とは結びつかないし、ましてや世界経験を可能にする方というふうにはわかるか」というと、これまた子どもの段階だと難しい。ここをどう凌

ぐかが、教育にとって一つの急所だと思えます。面白いことでないとなかなか子どもは学ばなくなってしまうし、学びたくないことは学ばなくてもいいということにもなりかねない」(荻谷 2005, pp.147-148) と言うところの「どう凌ぐか」という課題に対しても、一灯を照らすことになるのではないかと、とも見立てている。

1-2 研究の目的

本研究の目的は、次の3点とする。

- (1) 我が国のキャリア教育は「普及段階」に入ったとされているが、教育現場では、本来のキャリア教育の実践が進んでいないとの認識に立ち、「今日のキャリア教育」の実践の原則などの要諦をまとめる。
- (2) 教科を通したキャリア教育は、キャリア教育の「断片」を見出していくことと、それを相互につなぐことが求められている。「断片」をどのように切り取るかという課題があることから、「断片」を見出すための座標例を示す。
- (3) 高校数学における「教科を通したキャリア教育」について考察し、これからの授業実践の促進に資する基礎研究とする。

2. 教科におけるキャリア教育

2-1 今日のキャリア教育

「キャリア教育」という言葉が文部科学省の行政文書のなかに初めて登場したのは、1999(平成11)年12月の中央教育審議会による「初等中等教育と高等教育との接続の改善について(答申)」であり、その答申

において「小学校段階から発達段階に応じてキャリア教育を実施する必要がある」ことが提言された。我が国のキャリア教育は、この答申を直接的な契機としてスタートし、この答申やその前後に公にされた報告等の趣旨・内容を具現するための施策、事業や活動が全国的に繰り広げられていった。仙崎は「こうしたキャリア教育の“波”は、文部科学省はもとより、経済産業省、厚生労働省、内閣政府等関係省府の横断的協力、地方教育行政による推進体制の拡充、地域指定を受けた各都道府県市の公立学校での先導的施行、関係企業、NPO等民間団体での取り組み等々により、キャリア教育は、いまや『教育再生』を目指す一種の国民運動となっている感がある」と述懐するとともに、「これまでの、どちらかと言えば、行政主導で第一ステージ『立ち上げ段階』を終えたキャリア教育は、これからの第二ステージの『普及段階』に差し掛かろうとしている」と、我が国のキャリア教育がその「草創期」を経て、実践を積み上げていく新しい段階に入ったと、2008(平成19)年時点で述べている(仙崎 2008, p.3)。

この「草創期のキャリア教育」という表現は、2008(平成20)年から五年間、文部科学省国立教育政策研究所キャリア教育担当総括研究官を務めた藤田晃之の著書からの引用である(藤田 2014)。藤田は「草創期のキャリア教育」が、若年者雇用問題への緊急対策の一環であったと位置づけており、その中核的な期待が「若者を職に就かせることであった」ことや、「今日求められるキャリア教育から見れば、一部の側面に限定し、かつ、特定の方策に偏ったキャリア教育の姿ですし、それは若年者雇用問題への緊急

対応策ゆえに生じた『歪み』だったと言えるでしょう」と、説明している（藤田 2014, pp.54-56）。

当時、政策としてのキャリア教育に対しては、複数の論者からの洞察があった（児美川 2007, 本田 2009, 森岡 2011 など）。その論者の一人は、最近の論考において「…ファーストステージのキャリア教育は、学校と社会との疎隔を何とか修正しようとしたことは言える。しかし、そこでの学校と社会とのつなぎ方は、『夢』か『現実（適応）』かの片方の極に振り子のように軸が揺れてしまい、両者の接点（折り合い）を探るものではなかったと言わざるをえない」として『夢』と『現実（適応）』の間に揺れるキャリア教育は、しっかりと地に足の着いた教育への改革されていく必要がある。それが、次の10年（セカンドステージ）のキャリア教育の緊要な課題であろう」と、これまでのキャリア教育政策を踏まえて、これからの実践の課題を指摘している（児美川 2015, p.12）。この指摘は、政策側というよりも、教育委員会などの教育行政の牽引者や学校や教員の直接的な実践主体に届けるべきメッセージである。

さて、今日の学校における実践を支えるキャリア教育の概念は、2011（平成23）年1月の中央教育審議会答申「今後の学校におけるキャリア教育・職業教育の在り方について」において示されたものである。その答申において、キャリア教育は「一人一人の社会的・職業的自立に向け、必要な基盤となる能力や態度を育てることを通して、キャリア発達を促す教育」と再定義され、「幼児期の教育から高等教育に至るまで」体系的に推進すべきものとして構想された。また

「特定の活動や指導方法に限定されるものではなく、様々な教育活動を通して実践される」ことを大原則として、キャリア教育の方法原理を、「学校の教育活動全体を通じた指導」と「職場における体験活動の推進」としたのである（第一章1）。

筆者は、公立高校に勤務していたことから、キャリア教育の実践が、学校段階でも、個別の学校ごと、さらには学年ごとでも異なるし、教員にも意識や意欲に温度差があることを、身をもって知っている。我が国のキャリア教育が「普及段階」の新たなステージに入った認識がないことや、その新たな定義や方法原理などの内容はもちろん、政策側のキャリア教育の推進にかけるデータに裏付けられたその想いがしっかりと教育現場には届いていないのが、主たるその理由と考える。そこで、藤田の著書（藤田 2014）を頼りに、その引用と要約などをベースにして、今日のキャリア教育の要諦を、箇条書きにしてまとめておく。

- ① 今日のキャリア教育の大原則は、「特定の活動や指導方法に限定されるものではなく、様々な教育活動を通して実践する」ことである。
- ② 学校の教育活動全体を通じたキャリア教育の実践において最も大切なポイントは、それぞれの教育活動の中にすでにあるキャリア教育の要素である「キャリア教育の断片」を見出すことであり、新たに「キャリア教育的な何か」をつけ加えることではない。何か新しいことを、本来の教科指導の時間を削ってやらねばならないと身構えるのは、この大前提を見落としている。
- ③ 「キャリア教育の断片」は、相互につ

なぎ、体系的・系統的な指導へと転換していく必要がある。その役割を担うのは、学級（ホームルーム）担任である。

- ④ 「草創期のキャリア教育」において中核的な位置にあった「勤労観・職業観の醸成（形成）」について、今回の答申で「『働くこと』にどれだけの重要性や意味を持たせるのかは、最終的に自分で決めること」と指摘されたように、たとえ子どもであっても、職業観・勤労観を含む価値観は本人が自ら形成するものであるとされた。つまり、教師などの他者が子どもの職業観・勤労観を形成するという前提自体が、大きく転換したのである。ただし、キャリア教育における「勤労観・職業観」の相対的な重要性が低下したのではなく、その形成主体の捉え方が転換したのである。

- ⑤ 進路指導とキャリア教育は、目指すところや実践の在り方に違いはない。では、なぜ「キャリア教育」を登場させたのか。一つは、進路指導が中学校・高等学校における教育活動としての位置づけであったが、この第二ステージでは、幼児期の保育や教育を担う機関から、大学院を含む高等教育機関までを一貫する教育活動として構想されたからである（図2のようなイメージ）。もう一つは、多くの学校には進路指導の役割として、出口指導に特化する実践が未だに残っていることから、「キャリア教育」という新たな「看板」を採用し、心機一転の実践を促すことが目指された（推測）。

- ⑥ 学校におけるキャリア教育推進の秘訣は、「キャリア教育を通して身につけさせたい力」が先生方の間で共有されてい

て、その力を育てるための「キャリア教育の断片」が、どの教育活動において、いつ頃実践されるのかが了解されていることである。すなわちキャリア教育の年間指導計画が作成され、全教員に周知されてこそ、「断片」相互をつなぐことが可能になる。



図2 進路指導とキャリア教育との関係（概念図）

〔出典：藤田晃之（2014）「キャリア教育基礎論」p.86. 図4〕

- ⑦ キャリア教育の年間指導計画は、キャリア教育に関連しそうな単元等が全て盛り込まれた美しく緻密な一覧表（ペーパープラン）が求められているのではない。我が校の、この学年の、この子どもたちに身につけさせたい力を育てるために、キャリア教育の一環としても必ず実践する予定の単元等を見出し、その実践に無理が生じないかを検討して上で作成した表こそが求められている。
- ⑧ 中央教育審議会答申において「社会的・職業的自立，社会・職業への円滑な移行に必要な力」の要素のうち、キャリア教育が中核的に担うべきものとして「基礎的・汎用的能力」を提示された。これらの能力は、包括的な能力概念であり、それぞれが独立したものではなく、相互に関連・依存した関係である。それは各学校に創意工夫を求めつつ、「ゼロからの創出」の負担を伴わないようにするために作成された参考資料である。

⑨ キャリア教育は、教育活動全体を通じて実践するものであるが、職場における体験活動が、重要でなくなったわけではなく、一層の拡充が求められていく。リアルな体験を通して、働くことの喜びと世の中の厳しさの双方を伝え、自分もこうありたいと思える大人に出会う機会を提供したい。事前指導と事後指導がその成否を決する。

⑩ 現行の学習指導要領において、キャリア教育に対して「学校での学習」と「自分の将来」とがつながっていることに気づかせるという重要な役割を期待していることから、今回の答申に示されているキャリア教育の「学習意欲を喚起させること」の意義は鮮明になった。

⑪ TIMSS（国際数学理科動向調査）や PISA（生徒の学習到達度調査）の調査結果から、我が国の小中学生の「確かな学力」は世界的にみて上位にあるのに、学習意欲の脆弱性が明らかになった。また、数学・理科に興味を抱いておらず、将来役に立つとも思っていない。読書全般に対しても国際的に興味の低さが目立つ。しかし成績は向上してきている。そのギャップはなぜか。日本の子どもたち、とりわけ中学生・高校生は、受験での合格を勝ち取るために、苦役としての学習を重ねているのではないか。入学試験を通過したのち、習得した知は、剥落する可能性が極めて高い。子どもたちが知識基盤社会に生きる上での重大な危機の一つがここにある。

2-2 教科におけるキャリア教育

2-2-1 「キャリア教育の断片」を見出す

ここで、キャリア教育の発祥国である米国における 1970 年代からの足跡をたどり、教科を通じたキャリア教育の実践のポイントである教育活動の中にすでにある「キャリア教育の断片」を見出すことについて考察する。

米国におけるキャリア教育（キャリア教育運動）は、1971 年、全米中等学校長協会の年次大会の席上において、連邦教育局マーランド長官が、職業にかかわる教育を「職業教育」と呼ぶのをやめて、「キャリア・エデュケーション」と呼び代えることを提案したことからスタートした。その後、連邦教育局によるキャリア教育の定義に基づいてキャリア教育を促進する様々な計画・企画・モデルが立案され、連邦助成を使う大型の教育法案「キャリア教育奨励法」（1977 年）制定に至った（仙崎・藤田 2008, p.27）。

当時の米国においてキャリア教育に期待されたのが、まさに「学校での学習」と「自分の将来」を結びつけることであった（藤田 2014, p.120）。藤田は「40 年以上の時を隔てて、アメリカの状況が日本に伝播してきたと錯覚しそうなほどです」と捉え、米国の実践を「他山の石」とすべく「学校での学習（あるいは学習成果）の職業的な応用の側面を強調しすぎると失敗する」と警笛を鳴らす（藤田 2014, p.120）。その「他山の石」とすべき実践として、ある学校の数学における一次関数の単元での最後の授業の例を取り上げている。

その授業の流れは、[トラックの走行距離とガソリン消費量との関係に関する練習問題を出題する]→[生徒が解き、答えあわせをする]→[ゲストスピーカーとして長距離トラック運転手の登場]→[トラック輸送に

においては、ガソリンの残量をもとにあらかじめ給油の場所とタイミンを把握しておくことも重要であることを説明し、一次関数の知識とそれを活用する力がトラック運転手としても必須であることを強調する] → [長距離トラック輸送の果たしている役割、運転手になるために必要な資格、平均給与、勤務の実態、プロとしてのやり甲斐等を説明する] → [質疑応答] となる。

仙崎も表 1 のような授業が、当時の米国で展開されたことを紹介している。ただし、その実践は教科の担当教師だけではなく、ガイダンス・カウンセラーを中心に学校内外の全教育活動を通じて実践されていたと、解説している (仙崎 2008, p.23)。

表 1 米国における「各教科」の中でのキャリア教育の学習活動例

英語	職業に関連ある家族名について話し合う。希望進路の中で言語技能がどう生かせるか調べる。小グループで、文学作品やテレビ番組を通じ職業情報を学ぶ。コミュニケーション技能の受容性を明らかにするために、監督者と従業員の人間関係を示すフィルムを見て話し合う。
数学	製菓産業の中で、メートル法がどう使われているか調べる。保護者の仕事の中で、数学的スキルがどう生かされているかを調べて発表する。数学的判断が必要な仕事をリストアップする。家族旅行のスケジュールを作り、旅行に関する職業のリストを作る。不動産業者、保険代理店、車のセールスマンなどにインタビューし、仕事の中の数学的知識、スキルについては話を聞く。
音楽	音楽系上級学校のリストを作り、自分に合った教育コースを選択する。学校やクラス内で自分の音楽的役割を選び、貢献度を分析する。過去の音楽経験を調べ、進路選択に役立つよう評価・分析する。音楽領域の伝統・習慣を調べ発表する。
体育	体育関係の職業を調べる。公開練習を観察し、コーチ、トレーナー、セラピスト、医師などの役割について記録する。平素気付かない体育分野の職業(スカウト、グラウンドキーパー等)のリストを作る。野外活動に参加し、関連職業への理解を広げる。体育分野の職業人にインタビューし、教育・訓練コース、資格免許、入職時期、当該職業の将来性・安定性・生きがい・悩みなどをまとめる。

出典：仙崎・藤田 (2008) p.23から引用し、作意した。
 米国におけるキャリア教育試行州・学区であったカリフォルニア州オレンジ郡のプログラム(中・高校)の一例である。

このような実践は、「優れたキャリア教育の取り組み」として、全ての教科の全ての単元での実践が奨励されるようになったものの、1970年代末頃から、「学力低下を招く」との批判が出されるようになり、

1980年代に入ってから、「学力向上」を強調する教育改革の舵取りと同時に、急速に衰退した (藤田 2014, p.121)。

藤田は、米国の教育実践は「過剰なつけ加え」の側面を多分に有していたゆえに失敗したという教訓を通して、学校の教育活動全体を通じた教育の大原則は、既存の教育活動に「キャリア教育的な何か」をつけ加えることではなく、それぞれの教育活動の中にある「キャリア教育の断片」を見出し、その価値を子どもたちに伝えることであると導く (藤田 2014, pp.122-123)。

また、児美川は「個々の教育活動の展開において、つねにキャリア教育が意識されている必要は必ずしもないし、教科をはじめとしたそれぞれの教育活動には、それ固有の教育目標がある以上、そうした目標をねじ曲げたり、修正したりしてまで、各教育活動を『キャリア教育化』することが求められているわけでもない」「子どもたちはいずれ学校を卒業する、その卒業『後』への準備という視点を意識して日常の教育実践をしていけば、それは立派な『キャリア教育』になるのである」「学校におけるさまざまな教育活動が、子どもと若者の、彼らが将来担うことになる『役割』の遂行能力の育成に資するものとなっていれば、それがキャリア教育である」「キャリア教育は、学校教育の中のひとつの『領域』や『分野』ではない。ひとつの『機能』である」(児美川 2007) などと説明や解釈をしているが、「キャリア教育の断片」を見出すという行為やその発想を補完するものとも読み取れる。

以上の論考から、本稿 4 頁で今日のキャリア教育の要諦とした「②学校の教育活動全体を通じたキャリア教育の実践において

最も大切なポイントは、それぞれの教育活動の中にすでにあるキャリア教育の要素である『キャリア教育の断片』を見出すことであり、新たに『キャリア教育的な何か』をつけ加えることではない」について具体的な実践に落とし込むための、教育現場にとって有効と思われる観点を列挙しておく。

- ① 「断片」が、それぞれの学校が目指す「キャリア教育を通して身につけさせたい力」を育成するに資するかどうか「断片」であるかどうかの判断である。
- ② それぞれの教育活動には、固有の教育目標があることから、目標をねじ曲げたり、修正したりしてまで、各教育活動を「キャリア教育化」することが求められているわけではない。
- ③ 高校段階の普通教科において「この知識はこの仕事に生かされる」という情報を提供する場合も、そこに長時間を割くようであれば『過剰なつけ加え』に接近してしまう。
- ④ 子どもたちが「どうして〇〇なんて勉強するんだろう」と疑問に思いがちな単元を扱うタイミングを狙って、年に数回程度、職業的応用の現実を紹介し、子どもたちの認識を新たにする契機にすることも求められている。

2-2-2 「断片」を整理する

「キャリア教育の断片」を見出してから、次に求められるのは、キャリア教育の年間指導計画を作成することである。その際には、「キャリア教育を通して身につけさせたい力」が教職員の間で共有されていること、その力を育てるための「キャリア教育の断片」が、どの教育活動においていつ頃実践さ

れるのか明らかにして、「断片」相互につながり、全校的に了解されていること、が実践が確かな実を結ぶための秘訣である。

「断片」相互を上手くつなぐためには、「断片」を整理（分類）する指標（軸）が必要となる。その指標（軸）とは何であろうか。

2014（平成26）年11月20日、文部科学大臣から中央教育審議会に対しての諮問「初等中等教育における教育課程の基準等の在り方について」を受けて、2015（平成27）年8月、中央教育審議会・教育課程企画特別部会が、「論点整理」をまとめ、報告したが、次期学習指導要領の改訂に向けては「何を学ぶか」「どのように学ぶか」「何ができるようになるか」の3つの視点から「子供たちの具体的な学びの姿」を考える必要があるとしている。

キャリア教育の年間指導計画を作成するときの秘訣であった、教職員の間で共有する「キャリア教育を通して身につけさせたい力」は、この「何ができるようになるか」の視点である。

谷川は小学校の理科教育で取り組むキャリア教育の研究において、理科教育とキャリア教育の視点の取り入れ方について、「学習内容」と「学習方法」に分けて、事例案を提示しているが（谷川2011）、その「学習内容」「学習方法」は、「論点整理」における「何を学ぶか」「どのように学ぶか」と同値とみなすことができる。

さらに、現在、文科省の教科調査官と生徒指導調査官及び国立教育政策研究所総括研究官の任にある長田徹は「正しいキャリア教育の理解が進んでいる学校では次の4つの視点から『学び』と『仕事』をつなぐ実践が行われている」（長田2015, pp.8・9）とし

て、4つの視点を「学習内容」「指導の方法」「学習のルール」「体験活動」とする。これらのことを根拠として「キャリア教育の断片」を整理(分類)するときの指標(軸)を、「学習内容」と「学習方法」とすることが、妥当と考える。

次に、それぞれの指標(軸)において、どのように整理(分類)するかについての検討である。

まず「学習内容」である。

学校教育には、家庭科や公民科などのように、「生き方・働き方」に焦点を当てた学習内容を含み、直接的なキャリア教育を実施する核となる教科がある。それに対して、外国語や数学、理科などのように、キャリア教育との直接的なつながりは見えなくても、間接的にどこかで子どもの「キャリア発達」に資する教科がある。「学習内容」は、狭義(直接的)と広義(間接的)に分類することができる。

次に「学習方法」である。

2015(平成27)年8月、中央教育審議会・教育課程企画特別部会の「論点整理」は、次期学習指導要領改訂が目指すべき資質・能力を育むためには、学びの量とともに、質や深まりが重要であり、子供たちが「どのように学ぶか」についても光を当てる必要がある」との認識のもとに、「アクティブ・ラーニング」についての検討を重ねたと報告し、「変化を見通せないこれからの時代において、新しい社会の在り方を自ら創造することができる資質・能力を子供たちに育むためには、教員自身が習得・活用・探求といった学習過程全体を見渡し、個々の内容事項を指導することによって育まれる思考力、判断力、表現力等を自覚的に認識しながら、

子供たちの変化等を踏まえつつ自らの指導方法を不断に見直し、改善していくことが求められる」とした(pp.17-18)。

その部会で主査を務めた羽入は「アクティブ・ラーニングという用語が独り歩きして、それが目的のように理解されたり、あるいは、全く新しいことを始めるべきだ、ととらえたりしないかという危惧」があるとしながらも、「…アクティブ・ラーニングという視点から指導方法を見直していただくということです」「…これまでの教育は、先生が子供に知識を教えるということでした。この、教える—教わるという関係は前提としつつ、さらにそれを超えて、先生の方も新しい考えや新しい視点を学ぶ、というようなダイナミックな教育の姿が実現することを期待しています」と述べている(羽入2015, pp.3-7)。

個別の学校が目指す「キャリア教育を通して身につけさせたい力」があって、それを育成するに資する「キャリア教育の断片」を見出して教科の中で指導するならば、当然、そこに指導方法の見直しが伴い、工夫や改善が生まれるであろう。

すなわちその授業において、講義形式のような従来型のスタイルがふさわしいのか、課題の発見・解決に向けた主体的・協働的な学び(アクティブ・ラーニング)を授業で実現するためにペア・ワークやグループ・ワークなどの指導方法を取り入れるべきかどうか、という観点である。「学習方法」の指標(軸)を、従来型と工夫型に分類することができる。

もちろん「狭義(直接)」と「広義(間接)」のどちらがより重要であるということではないし、「従来型」と「工夫型」のどちらが

優れているということではない。この点について「論点整理」においても、指導方法の工夫や改善が「本来の目的を見失い、特定の学習や指導の『型』に拘泥する事態を招きかねないのではないか」との指摘を踏まえて、「…教員一人一人が、子供たちの発達の段階や発達の特性、子供の学習スタイルの多様性や教育ニーズと教科等の学習内容、単元の構成や学習の場面等に応じた方法について研究を重ね、ふさわしい方法を選択しながら、工夫して実践できるようにすることが重要である」と説明する (pp.17-18)。

なお、「学習方法」と「学習内容」の2つの指標（軸）によって4つにカテゴライズされる象限に、便宜上、ⅠからⅣの番号を付しておく（図3参照）。

		学習内容	
		広義の実践 (間接的)	狭義の実践 (直接的)
学習方法	工夫型	Ⅱ	Ⅰ
	従来型	Ⅲ	Ⅳ

図3 キャリア教育の「断片」の整理（分類）座標

3. 高校数学における教科を通じたキャリア教育の実践

3-1 はじめに

長田は「正しいキャリア教育の理解が進んでいる学校」での授業実践として、「パスタメジャー（直径が異なる複数の穴にパスタを通し人数分の量をはかる調理器具）を自作することで、『比』について学ぶ」中学校における数学の事例を紹介している（長田 2015, p. 9）。

この実践が単元の中にどう位置づくものか、単発で終わる実践だったのか、さらには

どのような指導方法で行い、教師は何を教えようとして、生徒に何を学ばせようとしたのかは、明らかにされてない。おそらくは紙面の都合であろうが、そのことを踏まえても、パスタメジャーを授業に導入し、それを生徒に自作させる必要があるのだろうか。もしも「キャリア教育的な何か」をつけ加えた実践であれば、それは今日のキャリア教育の方向性とは異なるものである

この度の中央教育審議会・教育課程企画特別部会がまとめた「論点整理」において、「育成すべき資質・能力」を、学校教育法第30条第2項の学力の3要素に照らし合わせて、「何を知っているか、何ができるか（個別の知識・技能）」「知っていること・できることをどう使うか（思考力・判断力・表現力等）」「どのように社会・世界と関わり、よりよい人生を送るか（学びに向かう力、人間性等）」という「三つの柱」で整理している。

奈須は「…近年、コンピテンシー・ベースでカリキュラムを編み直せないかとの模索が活況を呈している」「それは、教育に関する主要な問いを『何を知っているか』から『何ができるようになるのか』、より正確には『どのような問題解決を現に成し遂げるか』あるいは『知っていることを使ってどのように社会・世界とかかわり、よりよい人生を送るか』へと転換する。この動きは、学校教育の守備範囲を知識・技能の習得にとどめることなく、それらを初めて出合う問題場面で効果的に活用する思考力・判断力・表現力など汎用性のある認知スキルまで高め、さらに粘り強く問題解決に取り組む意欲や自己調整能力、直面する対人関係の困難を乗り越える社会スキルの育成にまで拡充すること、すなわち学力論の大幅な拡張と刷

新を否定なしに求める」(奈須 2015, p. 20) という。

このコンテンツ・ベースからコンピテンシー・ベースによるカリキュラムの編み直しや、学校教育の守備範囲を知識・技能の習得から認知スキルや社会スキルの育成にまで拡張・刷新するというダイナミックな発想は、次期学習指導要領における教科の内容や、さらにはその存在にも影響を及ぼすかもしれない。

たとえば「パスタメジャーの自作」を授業時間を割いて取り入れた場合には、その授業を通して子どもたちに「何を身に付けさせたいのか」、さらには「何ができるようになるのか」という問いに対して答えることができなければならない。

そのことを踏まえて、高校数学における教科を通したキャリア教育の実践のあり様について、具体的な事例を検討することによって、アプローチする。

3-2 「学習方法」の視点から

松井は『教科の学び』と『キャリア教育』は別物ではなく、本来、生徒は教科の授業で、社会で生きていくために不可欠なことを多く学んでいる」との視点に立ち、社会とのつながりを明確に意識した授業を実践している高校教師（クリエイティブティーチャー）を取材し、雑誌上で紹介する記事を連載をしている。

その第3回で取り上げたのが、A 教諭である(松井 2012)。A 教諭は協同学習を取り入れ、演習問題などをグループで話し合わせながら解かせる授業形態をとっている。

A 教諭は、1951 年生まれ、取材時には還暦を超える年齢であった。57 歳の時に、自

分の授業が「独善的だった」と気づいたという。そして「数年前に協同学習と出会い、目からウロコが落ちた状態です。それまでは講義形式で、数学の問題の多様な解き方を、私が説明していました。おもしろがってくれた生徒もいましたが、結局は知識の押し付け。その知識を受け取るだけで、自分で考えるところまではいけない生徒もいました。けれども協同学習で、生徒一人ひとりに考えをしゃべらすようにすると、おのおのが頭を使うようになり、まわりと意見交換するなかで多様な考えにもふれられるようになったのです」と述懐している。

A 教諭は「教科観は『こんな力をつけたい』ではなくて、『純粋に数学を楽しんでほしい』でもいいんです。ただし『その楽しさとは?』と突っ込まれても何も答えられないのなら、それはだだの方便。問題をどう料理しようとするのが楽しい、自力で解けたときの達成観がいい、などと、具体的な掘り下げまでできていてこそ、そこを生徒に届けるために授業をどう工夫すればいいかも見えてきます。教科観が曖昧なまま、流行の教材や手法を取り入れても、生徒に何も残りません。私たちは、もっと本質的なことから教育談義をすべきだと思うのです」「教科観は、途中で変わってもいいし、全員が同じでなくてもいいと思うんです。大事なことは『数学とは何か』『教育とは何か』を私たち教員が自問自答し続けること。そこを起点に授業を組み立てて、生徒の力を伸ばしていきたいです」などと、まず「この教科を通して生徒たちに何を届けたいのか」と教師にその数学の指導の基盤としての教科観を問う。

A 教諭とは研修会で意気投合したという

仲間の一人は「...社会や地域で自立できる人を育てたい。そこでキャリア教育となるわけですが、特別なプログラムの導入には限界がある。ならば『普通の授業を通してのキャリア教育』が大事じゃないかと。では授業で何をさせるのか。このときはこうして、このときはこうしなさい、などと個別の対処を教えていてもキリがない。『自分で考えていける力』が必要だよ、と...考えるための基礎となる聴く力や読む力、整理する力。生徒同士の学び合いで講義以上の気づきをもたらすこと。担当教科は違っても、お互いに学べることはたくさんありました」と述べており、A 教諭が「普通の授業を通してのキャリア教育」を行うこととなった理由（動機）を説明している。

すなわち、A 教諭には「社会や地域で自立できる人を育てたい」という思いがあり、さらに「社会に出てからぶつかる課題に対して、『自分で考えて』踏み出せるような人になってほしい」と願い、そういう人を育てることを目指している。そして「考える」ということを「今ある知識を組み直して新しい発見につなげること」と定義して、数学は「いくつか覚えた定義をうまく組み合わせれば、解き方を知らなかった問題も自力で解けて、自分でひたすら考えられる学問」であることから、「高校の学習で『考える』ことをさせるのには最適」とする。

まさに、「我が校の子どもたちに身につけさせたい力」を明らかにして、その力を育てるための大きな断片として教科を捉えているのである。

また「何を知っているのか」から「何ができるようになるのか」の「育成すべき資質・能力」の捉え方が変わって、指導方法（授業

スタイル）に「協同学習」を取り入れたという。これは、「論点整理」にある教科の本質的な意義に立ち返って、その主要な問いである「育成すべき資質・能力」の転換が教師に指導方法の刷新を求めるという一例とみなすことができよう。

しかも A 教諭の教育実践には、厳しさがある。その厳しさは、数学を教える目的が明確であるからではないだろうか。だからこそ「このグループ学習は基本的には個人でやるもので、教え合いっこではないです。初めから『教えてもらおう』ではダメ。まずは自分で本気で考えてください。そこで壁にぶつかると、壁を越えたくくなります。そのときに『自分はこう思ったけど』と、隣の人と話し合ってください。間違ってもいいから、怖がらずに自分の考えをしゃべってみる。正しければ自信になりますし、話すなかで考えが整理されて答えが見えてくることもあります」「問題の解き方にはいろいろな切り口がありますし、君たちはすでに多くの知識を身につけています。それなのに君たちは、学んできた知識を漬物のように漬けたままにして、頭の中から取り出していない。今の力を信じて、『自分で考える』ことを限界までしてみてください」と、繰り返して生徒に「自分で考える」ことを求めることができるのである。

指導に厳しさがあっても、ぶれない柱（指導観）があれば生徒たちは支持するものである。

A 教諭の教育実践を取材した松井は、生徒へのインタビューを通して、「先生の授業は怖いけど楽しい。解説は手品の種明かしのようにわくわくする」「嫌でも自分の頭で考えさせられるので、授業中にすぐく頭を

使います」「みんなと話すと、たとえ正解ではなくても自分にはない考えに気づかされず」「口に出してみると、自分の考えに意外とほころびがあることがわかりました」「受験数学ではない『本当の数学』を知ることができた」という声を引き出している。

A 教諭はその「学習内容」についても、高校数学の教科を通してのキャリア教育の実践に対して、参考となる工夫がある。以下に箇条書きにまとめておく。

- ・ 新しい単元に入ると、定義やポイントを説明したうえで、「ベクトルとは？」などとお題を出し、生徒同士で話し合わせる。
- ・ 2 次関数と図形が合わさった入試問題を、一般の解説とは別のやり方で解いてみよう、という協同学習を行った。
- ・ 大学入試問題も頻繁に活用する。「難関大学の入試ほど、エレガントに解ける問題が多い。そうした問題を解かせて、あとでネタばらしすると、「入試は難しい」という先入観が消える。

さらに、A 教諭の授業にかける想いは、教科の壁を越えた連携への原動力にもなり、校内で教員 30 人近くが集まる月例研修会を立ち上げて、「教科観」「教育観」について話し合っているという。

3-3 「学習内容」の視点から

A 教諭の授業実践の例は、数学という教科自体が大きな「キャリア教育の断片」という捉え方であった。では「学習内容」から光を当ててみると、どのような教科を通したキャリア教育の実践のあり様が浮かび上がるのであろうか。

ここで取り上げる実践事例は、筆者のも

のである（拙稿、1995）。この授業のねらいは「問題解き終始する授業を離れ、入試に必要なだから数学を学ぶといったような狭義化された数学のイメージを払拭すること」であった（巻末資料参照）。

その授業の終わりに、筆者は生徒に次のような話をした。

「皆さんにとって、数学の計算や問題ができるということは、もちろん大切なことですが、数学を学ぶということを通して知らず知らずではあるけれども、事実を正しく見ていこうとする態度や考え方が身についていくこと、それが数学を学ぶことにおいては、もっと大切なことであると思います。事実を科学的に正しく判断できる、またそうしようとすることによって、人間は社会や個々の生き方をより幸福な状態へとしようとしてきたのだと思います。ですから『数学は人や社会が成長するために必要な学問である』ということになります。

だからこそ皆さんは小学校から高校卒業まで、12 年余りも数学を学んで行くのだと思います。数学が不得意であったり、嫌いであったりする人は多いかと思いますが、それは当然個人の好みや適性が様々であることを考えると当然なことです。

しかし、今まで言ってきましたように、自分なりに理解していこう、学んでいこうとすることが数学では大切なんだということを心に留めてください。自分は数学が『不得意だから』とか『きらいだから』とかで、数学を学ばないときっぱり言いきって自分を規定しないで、『数学を、学ばないということは、自分が人間として成長する手段の一つ、みすみす捨ててしまうことになる』と考えてほしいのです。

さきほど、問題解きだけが数学ではないといいましたが、数学をしっかり理解するためには、高校までで学ぶ数学が基礎になります。すなわち、スポーツでいいますと、競技前のウォーミングアップといえるでしょう。

また大学入試というハードルを越えるためには、問題をいかにして解くかという現実問題もあります。確かに、おもしろくないところもあり『辛抱、辛抱』の人もいるかと思うのですが、今日の授業で、数学の世界をぼんやりとつかんだ人は、この問題の向こうには数学の世界が広がっているのだとイメージして、がんばってほしいと思います。

藤田は、高校の普通教科を通してのキャリア教育には、学習と自分の将来とが繋がっていることを実感させる重要な役割があるという。そして、学習と自分の将来とが繋がっていることを実感させる方策として、「世の中の全てのモノやサービスは何らかの学問の成果によって生み出されており、私たちがそれらを楽しんで日々生活をしている、という事実を再認識させることを通して、将来の自分はこういったモノやサービスを支える側に回ろうとしているかを考えさせる契機とする」と述べ、「知は、人の手によって蓄積されてきたもの」であり、「私たちの快適な暮らしは、何十万、何百万、あるいは、何千万という単位の人々が、長い歴史の中で様々な分野の知を積み重ね、洗練し続けた結果によって成り立っています。それを享受して日々の生活を営んでいる以上、私たちには、知の蓄積のバトンを引き受け、次の世代に向けてさらなる蓄積を続ける道義的責任」があることから、「君は、どのバトンを引き継ぐんだろう？」という

視点で、普通教科の学習と「自分の将来」との接点を捉えさせたい、と述べている(藤田 2014, p.123-25)。筆者の授業では、高校数学は数学という学問の「入口」であることを伝えることはできたのではないだろうか。

さらに藤田は、「全ての単元でこういった『気づき』を提示することは、時間的な制約から困難なことが想定されます。そこは、個々の教師の得意分野や大学時代の専門等を生かして、年に一回でもよいと思います。『今、君たちが学んでいることは、世の中を、そして、君自身を支えている知の入り口だよ』と伝える機会を設けてください。そして、その知の世界には、さらなる発展を遂げるべき分野やテーマがあること、今まさに、それに取り組んでいる人がいること、そして、『君たちの世代の誰かが、それを引き継いでくれることが渴望されており、それが君の将来の生活を、君の子どもたちの世代を支えることになる』という事実をお伝えください。年に一回。そういった実践が各教科で行われるとすれば、将来役に立ちそうとも思えず、興味もない対象を苦役として学ぶような状況は、きっと変わるのではないか。そう信じています」とも述べている(藤田 2014, p.126)。

さて、筆者の実践事例は数学史の活用であったが、数学という教科は広義のキャリア教育を担う教科であることから、その「断片」はどの単元にも埋もれているはずである。その「断片」を見出して、「自分が置かれた状況」そのものが学問と切り離し得ないものであるとの「気づき」を生徒に提供することは、キャリア教育の重要な役割の一つであり、それは、教科教育の本質的な役割の一つである。

4. まとめ

4-1 本研究のまとめ

本研究では、まず、教育現場では本来のキャリア教育の実践が進んでいないとの認識に立ち、我が国の政策としてのキャリア教育の経緯を振り返り、「今日のキャリア教育」、すなわち「普及段階」での実践の原則などの要諦をまとめた。

次に、教科を通したキャリア教育は、米国の実践を踏まえて、「過剰なつけ加え」ではなく「断片」を見出すこと、そして「断片」相互をつなぐことであることを確認した。また、そのためにはどのように「断片」を見出すのか、その指標（軸）は何かを考察し、「断片」を整理（分類）する座標例を示した。

最後に、高校数学における「教科を通したキャリア教育」について、「学習方法」と「学習内容」から、それぞれの具体的な実践例を通して考察した。本研究は、引き継ぎ積み上げていけるような先行研究がない新しい教育実践へのアプローチであったことから、本研究をこれからの授業実践を促進し、実践研究していくための基礎研究に資するものとなる。

4-2 今後の課題

今後の課題は、次の通りである。

- (1) 教科を通してのキャリア教育に対する分析は不十分である。今後は、数学ばかりではなく他の教科にまで範囲を広げて、優れた実践事例を集めるとともに、さらなる理論研究を行い、このテーマについて論究していく。
- (2) 「キャリア教育」の理念が「新たな学校の理念」になり得るのではないかと

その実践が「振り子論上のバランスの問題を乗り越えていくための第三の道へのアプローチ」となるのではないかと、さらには「どう凌ぐか」という課題に対して、一灯を照らすことになるのではないかと、という問題意識に対して、明確に答えることができていない。このことについて、次期学習指導要領の改訂に向けて進んでいる中央教育審議会の議論、たとえばコンテンツ・ベースからコンピテンシー・ベースでカリキュラムを編み直すことが検討されていることなどをヒントにして、(1)の課題への探求と合わせることによって、この問題意識に対する答えを導いていかなければならない。

引用・参考文献

- 大村はま・苅谷剛彦・苅谷夏子 (2003) 「教えることの復権」ちくま新書。
- 小川直也 (2014) 「教科で取り組むキャリア教育に関する研究-小学校における理科教育とキャリア教育-」『岐阜聖徳学園大学紀要. 教育学部編』岐阜聖徳学園大学, pp. 167-180。
- 長田徹 (2015) 「キャリア教育の現状と課題 -『学び』と『仕事』をつなぐということ」『日本教育』2015年12月号(No. 451) 日本教育会, pp. 6-9。
- 苅谷剛彦 (2005) 「考えあう技術-教育と社会を哲学する」ちくま新書。
- 児美川孝一郎 (2007) 「権利としてのキャリア教育」明石書店。
- 児美川孝一郎 (2015) 『『夢と現実の振り子』から一歩踏み出したキャリア教育を』『Between』2015年10-11月号(通巻

- 264号) ベネッセコーポレーション・進研アド, pp. 10-13。
- 佐々木賢 (2002) 「親と教師が少し楽になる本」 北斗出版。
- 志水宏吉 (2005) 「学力を育てる」 岩波新書。
- 仙崎武 (2008) 「はじめに-本書刊行にあたって」 仙崎武ほか編著『教育再生のためのグランド・レビュー キュリア教育の系譜と展開』 雇用問題研究会。
- 仙崎武・藤田晃之 (2008) 「欧米諸国におけるキュリア教育の理念と推進」 仙崎武ほか編著『教育再生のためのグランド・レビュー キュリア教育の系譜と展開』 雇用問題研究会。
- 椿達 (1995) 「数学的な考え方・態度の回復を図るための指導の研究-ガイダンス「現代数学」の実践-」 北海道高等学校教育研究会数学部会研究発表。
- 椿達 (2006) 「高校数学における『平等』と『効率』を共に引き上げる仕組みと実践の研究」 第61回北海道算数数学教育研究大会発表。
- 苫野一徳 (2014) 「教育の力」 講談社現代新書。
- 奈須正裕 (2015) 「『育成すべき資質・能力』とは何か」 『教職研修』 (2015年11月) 教育開発研究所, pp. 20-23。
- 広田照幸・川西琢也 (2007) 「こんなに役立つ数学入門-高校数学で解く社会問題」 ちくま新書。
- 藤田晃之 (2014) 「キュリア教育基礎論-正しい理解と実践のために-」 実業之日本社。
- 本田由紀 (2009) 「教育の職業的意義-若者, 学校, 社会をつなぐ」 ちくま新書。
- 羽入佐和子 (2015) 「学習指導要領はどう改訂されるのか-めざすのは, 『社会に開かれた教育課程』 『教職研修』 (2015年11月) 教育開発研究所, pp. 3-7。
- 松井大助 (2012) 「クリエイティブティーチャーに学ぶ! 教科でキャリア教育」 『キャリアガイダンス』 2012年10月号 (No. 43) リクルート, p. 40-43。
- 松下良平 (2003) 「楽しい授業・学校論の系譜学-子ども中心主義的教育理念のアイロニー-」 森田尚人ほか編著『教育と政治/戦後教育史を読みなおす』 勁草書房。
- 森岡孝二 (2011) 「就職とは何か」 岩波新書。

謝辞

本稿のタイトル及び要旨の英訳に関してご助言いただきました, 北海道情報大学の竹内 典彦先生とチャールズ マクラレーティ先生に, 心より感謝申し上げます。

資料 ガイダンス「現代数学」の実践について（要約）

1. はじめに

高校に入学して半年がたち、中学校の数学とのギャップから「難しい」と感じたり、数学が嫌いになってきてはいないだろうか。また、毎日の授業で、問題解きに終始していると、これが数学という学問なのかと勘違いしてしまわないだろうか。

そんな思いから、本時では、数学という学問の発展の歴史やその世界がとても広いことを説明したい。数学全体のイメージができて、数学を学ぶ意欲が少しでも高まることを期待する。

2. 展開1（第1部 数学の歴史）

数学の歴史を学ぶ上での動機付けとして、「アルキメデス」の絵画をスクリーンに写し、これは誰かの問いかけから、「なぜアルキメデスは自分の死より数学の問題を解こうとしたのか」と発問した。数学の発展の歴史において、項目を極力絞り、人間生活の必要性から数学が生まれ、発展し、「動くものをとらえる」ことから科学の発展に大きく貢献していったというおおまかな説明を行った。そして、最後に、高校数学が微分積分の理解を最終目標とするのなら、それは高々17世紀までの数学に過ぎないこと、さらにそれ以降の現代数学の発展から数学の世界の広大さを説明した。

3. 展開2（第2部 現代数学に迫る）

ギリシャの三大作図問題が、「作図不可能」であるということが証明されたのは、19世紀に入ってからで、その間の数学者たちの2000年以上もの努力と、「作図不可能」ということが、代数的に証明されたこと、すなわち、作図という図形の問題を、違う角度で考えることで新しい展開があったことを説明した。そして、そこで登場した「超越数」という新しい世界へ少し強引であったが話を持っていき、集合が実は有限の世界ではなく無限の世界でその力を発揮することを、「自然数と有理数の個数が同じである」といった今までの常識がくつがえすような証明を説明した。そして超越数について、現在でもわかっていない謎に迫ってみた。

4. さいごに

「数学とは何か」を、今までの説明の中から「高校数学がごく限られた時代までのものであるということ」と「問題解きだけではなく、数学の世界は多くの数学者が築いてきた広い世界があり、いまだに未解決な問題がある」ということを確認し、数学が、理系の人だけにとって必要なのではなく、数学を学ぶことは人間をよりよく人間らしく成長するために必要なんだということを結論として説明した。

〈論文〉

Information-Theoretic Document Clustering using Skew Divergence

TOSHIO UCHIYAMA*

Abstract

Information-theoretic clustering (ITC) and the divergence algorithm for ITC have been proposed for analyzing text data, but only in cases where ITC was applied to feature/word clustering to reduce dimensionality. Therefore, the effectiveness and usefulness of ITC for document clustering, such as finding topics in documents, have not been well evaluated. Moreover, the divergence algorithm for ITC can be affected by the zero-frequency problem, because it uses Kullback-Leibler (KL) divergences. This paper proposes novel algorithms for ITC to solve the problem and evaluate ITC as a document clustering method. The proposed algorithms use skew divergence instead of KL-divergence to avoid the zero-frequency problem. Internal and external evaluation measures, such as purity and Normalized Mutual Information (NMI), are used to compare ITC with spherical clustering. This paper further shows competitive learning algorithms that outperform the k-means algorithm using skew divergence. Experimental results for text data sets are presented to show the effectiveness and usefulness of ITC and proposed algorithms.

要旨

文書データの分析などに用いられる、情報理論的クラスタリング (ITC) およびその学習アルゴリズムであるダイバージェンスアルゴリズムが提案されている。しかし、ITC は次元削減のために特徴あるいは単語に対して適用されている。したがって、文書群に存在するトピックの発見など、文書クラスタリングとしての有用性については、十分に評価されて来なかった。さらに、ダイバージェンスアルゴリズムは、Kullback-Leibler (KL) ダイバージェンスを用いるため、ゼロ頻度問題の悪影響を受けるという問題がある。本論文は、この問題を解決するためのアルゴリズムを提案し、ITC をドキュメントクラスタリング手法として評価する。提案アルゴリズムは、KL ダイバージェンスの代わりに歪ダイバージェンスを用い、ゼロ頻度問題を回避する。内部および外部基準 (たとえば純度や正規化相互情報量 (NMI)) に基づき、球面クラスタリングとの比較により ITC を評価する。さらに、同じく歪ダイバージェンスを用いた競合学習アルゴリズムが、前述の k-means タイプのアルゴリズムよりも優れることを示す。文書データセットに対する実験により、ITC と提案アルゴリズムの有効性と有用性を示す。

Keywords

Information-Theoretic Clustering, Skew Divergence, Document Clustering, Competitive Learning

1. Introduction

Clustering is the task of partitioning objects into clusters on the basis of certain criteria so that objects in the same cluster are similar. It is a fundamental procedure to analyze data [Jain et al. (1999); Jain (2010)], such as images and text. Since clustering results depend on criteria and algorithms for optimization, appropriately selecting them is an essential problem. When focusing on partitioning documents into disjoint clusters, cosine similarity (spherical clustering) and the spherical k-means algorithm [Dhillon and Modha (2001)] are known

to be successful. On the other hand, information-theoretic clustering (ITC) and the divergence algorithm were also proposed for analyzing text data, but ITC was applied to feature/word clustering [Dhillon et al. (2003)] to reduce dimensionality. Therefore, effectiveness and usefulness of ITC for document clustering, such as finding topics in documents, have not been well evaluated. Moreover, the divergence algorithm for ITC can be affected by the **zero-frequency problem**, because it uses Kullback-Leibler (KL) divergences. This suggests that smoothing is necessary, but an appropriate method for ITC is not easy to find. For example, adding some value to probability distributions to be clustered does not work well. Without solving

* Department of Systems and Informatics, Hokkaido Information University

this problem, it is impossible to reveal any characteristics of ITC as a document clustering method.

This paper proposes novel algorithms for ITC to solve this problem and evaluate ITC as a document clustering method. The proposed algorithms use skew divergence [Lee (1999)] instead of KL-divergence to avoid the zero-frequency problem. Internal and external evaluation measures, such as purity and Normalized Mutual Information (NMI), are used to compare ITC with spherical clustering. This paper further introduces competitive learning algorithms that outperform the k-means algorithm using skew divergence. Experimental results for text data sets are presented to show the effectiveness and usefulness of ITC and proposed algorithms.

2. Related Work

Information-theoretic clustering (ITC) [Dhillon et al. (2003)] is closely related to works about “distributional clustering” [Pereira et al. (1993); Baker and McCallum (1998); Slonim and Tishby (2000)] and uses “within-cluster Jensen-Shannon divergence” as objective functions. In those works, objects are grouped by similarity of distribution (KL-divergence). Since a multinomial Naive Bayes classifier distinguishes objects on the basis of cross entropy decomposed into entropy (constant) and KL-divergence, ITC and Naive Bayes have a close relationship [McCallum and Nigam (1998)]. Although Naive Bayes simply assumes independence of features in a given class, it is a successful classifier.

Skew divergence [Lee (1999)] enables ITC to avoid the zero-frequency problem by smoothing probability distributions and seems to be indispensable for document clustering, although at least one KL-divergence of clusters is guaranteed to be finite [Dhillon et al. (2003)].

This paper uses competitive learning for the clustering, with additional mechanisms to improve its performance, referring to the algorithm based on the least sum of squares criterion Uchiyama and Arbib (1994).

The main contributions of this paper are as follows:

- (1) It proposes k-means and competitive learning algorithms for ITC to overcome the zero-frequency problem.
- (2) It provides empirical evidence of the effectiveness and usefulness of ITC as a document clustering method and the proposed algorithms.

3. Information-theoretic Clustering

Let m ($m = 1, \dots, M$) be a finite number of features (words) of data (documents), P and Q be

probability distributions of a discrete random variable, and p_m and q_m be probabilities of when a random variable equals m . The Kullback-Leibler (KL) divergence to Q from P is defined to be

$$D_{\text{KL}}(P||Q) = \sum_{m=1}^M p_m \log \frac{p_m}{q_m}, \quad (1)$$

and the generalized Jensen-Shannon (JS) divergence of a finite set of probability distributions $\{P^i : i = 1, \dots, n\}$ can be expressed as the weighted sum of KL-divergences to the (weighted) mean [Dhillon et al. (2003)]:

$$D_{\text{JS}}(\{P^i : i = 1, \dots, n\}) = \sum_{i=1}^n \pi^i D_{\text{KL}}(P^i | \bar{P}), \quad (2)$$

where π^i is the probability of P^i to be selected and \bar{P} shows the (weighted) mean distribution $\sum_{i=1}^n \pi^i P^i$.

Let P^i ($i = 1, \dots, N$), C^k ($k = 1, \dots, K$), and Q^k ($k = 1, \dots, K$) be finite numbers of probability distributions \mathcal{P} corresponding to data (document), clusters, and probability distributions \mathcal{Q} corresponding to the mean distribution of cluster C^k , respectively. The “within-cluster” Jensen-Shannon divergence is defined to be

$$\mathcal{J}_W = \sum_{k=1}^K \frac{N_k}{N} D_{\text{JS}}(\{P^i | P^i \in C^k\}), \quad (3)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{P^i \in C^k} D_{\text{KL}}(P^i || Q^k), \quad (4)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{P^i \in C^k} \sum_{m=1}^M p_m^i \log \frac{p_m^i}{q_m^k}, \quad (5)$$

where N_k is the number of distributions P^i ($P^i \in C^k$), and \mathcal{J}_W is the objective function of information-theoretic clustering (ITC) to be minimized [Dhillon et al. (2003)]. Using the relation $\sum_{P^i \in C^k} p_m = N_k q_m^k$, we have

$$\mathcal{J}_W = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K N_k \sum_{m=1}^M -q_m^k \log q_m^k - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M -p_m^i \log p_m^i \right). \quad (6)$$

Since the second term is constant for any partitioning, the optimization depends on the first term, which is the weighted sum of entropies for the mean probability distribution of cluster Q^k . Therefore, the objective of ITC can be considered to be minimizing those entropies for clusters. It may also be to show the characteristic of ITC on the basis of the information theory.

4. Algorithms

This section first shows a k-means algorithm for ITC. As the equation (4) and the divergence algorithm [Dhillon et al. (2003)] show, the k-means algorithm can be modified for ITC when KL-divergence is used to update the cluster labels. The main difference from the divergence algorithm is to use the skew-divergence [Lee (1999)] instead of KL-divergence to avoid the zero-frequency problem. The skew-divergence is defined as

$$s_\alpha(P, Q) = \text{KL}(P \| \alpha Q + (1 - \alpha)P), \quad (7)$$

where $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ is the mixture ratio of distributions. The skew divergence is exactly the KL divergence at $\alpha = 1$. The skew-divergence is very simple to use, but it works well for reducing the objective function \mathcal{J}_W . For example, use of $\alpha = 0.99$ may produce a good performance [Lee (1999)].

Algorithm 1 describes the skew-divergence k-means (sdKM) algorithm. In the initialization step, cluster label $k (1 \leq k \leq K)$ is randomly assigned to each distribution P^i . This initialization results in setting the mean distributions $Q^k (k = 1, \dots, K)$ near the global mean distribution in M dimensional space, and JS-divergence \mathcal{J}_W is large. Note that distributions P^i and Q^k are also treated as vectors, and vice versa. The situation can be considered to be far from all local minima. Since it is impossible to choose good local minima at the beginning, this can be a good strategy for optimization algorithms. Additionally, this initialization guarantees at least one KL-divergence of clusters is finite. This may not affect algorithms using skew divergence.

The mixture ratio (coefficient) for skew divergence $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ should be close to 1 when considering reducing distortion from the true objective. However, larger $\alpha (< 1)$ accidentally causes a large penalty for $s_\alpha(P, Q)$ to mean distributions of clusters Q that do not have certain features and makes algorithms stop quickly at bad solutions. By taking these features of α into account, the proposed algorithm 1 includes a mechanism, “gradual change of α ”, such as 0.99, 0.999, 0.9999, . . . , to improve its performance. The initial ratio $\alpha = 0.99$ and the maximum ratio $\alpha_{\max} = 0.999999$ are used in the experiments.

The condition of convergence for a certain α is

$$\frac{\text{previous } \mathcal{J}_W - \text{current } \mathcal{J}_W}{\text{current } \mathcal{J}_W} < \text{epsilon}, \quad (8)$$

where the small value “epsilon” is 10^{-8} , for example.

Algorithm 2 describes a simple skew-divergence competitive learning (sdCL) algorithm, which has no additional mechanism. In the initialization step,

cluster label $k (1 \leq k \leq K)$ is randomly assigned to each distribution P^i in the same way as the k-means algorithm, and the mean probability distributions of clusters Q^k are computed. In each repetition, a winner is decided from \mathcal{Q} for randomly selected distribution P , and only the winner’s distribution Q^c is updated. In the update-step, it uses the learning rate γ . In the experiments, the skew-divergence k-means algorithm (sdKM) with $\alpha = 0.999$ is applied for post-processing to remove fluctuation caused by stochastic procedures. Note that sdCL itself can derive better results than sdKM.

For further improvement, this paper proposes a skew-divergence competitive learning algorithm with an additional mechanisms [Uchiyama and Arbib (1994)], which gradually generates units (= probability distributions Q of clusters) on the basis of *wincount*, which shows how many times each distribution Q wins. Details are shown in Algorithm 3. Since the added rule generates or splits distributions Q where the density of distributions P^i is high and it is reasonable to optimize the objective function, we can expect it to outperform usual initialization, which easily drops into bad solutions [Uchiyama and Arbib (1994)].

Algorithm 1 Skew-divergence k-means (sdKM)

Input: \mathcal{P} : the set of probability distributions,

K : the number of clusters,

α : the initial ratio for skew divergence.

Output: \mathcal{C} : the set of document clusters.

Initialization For each distribution P^i , randomly assign P^i cluster label $k (1 \leq k \leq K)$, to which P^i belongs.

while $\alpha \leq \alpha_{\max}$ **do**

repeat

 For each cluster C^k , compute its mean probability distribution Q^k as

$$Q^k \leftarrow \frac{1}{N_k} \sum_{P^i \in C^k} P^i, \quad (9)$$

 where N_k is the number of distributions $P^i (\in C^k)$.

 For each distribution P^i , update the cluster label, to which P^i belongs, on the basis of the skew divergences:

$$\arg \min_k s_\alpha(P^i, Q^k). \quad (10)$$

 If there are several candidates, select the smallest k .

until the change of JS-divergence \mathcal{J}_W is small.

 Update α by

$$\alpha \leftarrow 1 - (1 - \alpha)/10. \quad (11)$$

end while

5. Experiments

This section provides empirical evidence of the effectiveness and usefulness of ITC as a docu-

Algorithm 2 Skew-divergence competitive learning (sdCL)

Input: \mathcal{P} : the set of probability distributions,

K : the number of clusters,

α : the mixture ratio for skew divergence,

γ : the learning rate of competitive learning,

N_r is the number of repetitions.

Output: \mathcal{C} : the set of document clusters.

Initialization For each distribution P^i , assign P^i cluster label k randomly. Compute the mean probability distributions of clusters Q^k by ($Q^k \leftarrow \frac{1}{N_k} \sum_{P^i \in C^k} P^i$).

for $r = 1$ to N_r **do**

Select one distribution P randomly from \mathcal{P} and decide a winner Q^c from \mathcal{Q} by

$$c \leftarrow \arg \min_k s_\alpha(P, Q^k). \quad (12)$$

If there are several candidates, select the smallest k .

Update the winner's distribution Q^c as

$$Q^c \leftarrow (1 - \gamma)Q^c + \gamma P. \quad (13)$$

end for

For each distribution P^i , compute the cluster label by the equation (12).

Algorithm 3 Skew-divergence competitive learning with splitting

Input: \mathcal{P} : the set of probability distributions,

K : the number of clusters,

α : the mixture ratio for skew divergence,

γ : the learning rate of competitive learning,

N_r is the number of repetitions,

θ : the threshold of times.

Output: \mathcal{C} : the set of document clusters.

Initialization Set one probability distribution Q^1 of C^1 by randomly selecting distribution P and attach a variable *wincount* to Q^1 that is initialized to 0 and that shows how many times each distribution wins. Consider a subset of distributions \mathcal{Q}' , where $\mathcal{Q}' \subseteq \mathcal{Q}$ and $Q^1 \in \mathcal{Q}'$. Let u be the number of elements in \mathcal{Q}' .

for $r = 1$ to N_r **do**

Select one distribution P randomly from \mathcal{P} and decide a winner Q^c from \mathcal{Q}' by

$$c \leftarrow \arg \min_k s_\alpha(P, Q^k).$$

If there are several candidates, select the smallest k .

Update the winner's distribution Q^c as

$$Q^c \leftarrow (1 - \gamma)Q^c + \gamma P.$$

Add 1 to *wincount* of the winner.

If the winner's *wincount* equals θ and $u < K$, then add a new distribution Q^{u+1} ($= Q^c$) to \mathcal{Q}' and clear the *wincount* of both to 0.

end for

For each distribution P^i , compute the cluster label by the equation (12).

ment clustering method and the proposed algorithms. Results of a spherical k-means algorithm [Dhillon and Modha (2001)] (spKM), which uses the same initialization step as skew-divergence k-means (sdKM), are shown for comparison. For each experiment, an operation was iterated 30 times with different initial random seeds for a given set of parameters. For competitive learning algorithms, the learning rate $\gamma = 0.01$, the number of maximum repetitions $N_r = 1,000,000$ and the threshold of times $\theta = 1000$ are used.

5-1 Data Sets

Two data sets are used for experiments. The properties of text data sets are shown in Table 1. Words in the "stop list" [Lewis et al. (2004)] are eliminated.

20Newsgroups data set contains about 20,000 articles evenly divided among 20 UseNet Discussion groups ¹⁾.

RCV1 (Reuters Corpus Volume1) data set [Lewis et al. (2004)] contains about 800,000 news articles. I used the second level of RCV1 topic hierarchy as the class label and removed multi-labeled documents.

Table 1 Properties of text data sets

Data	Size(N)	Feature(M)	Class(K)
20Newsgroups	18,774	60,698	20
RCV1	534,135	216,503	53

5-2 Evaluation Measures

In the experiments, I set the number of clusters K to equal the true number of classes in Table 1. I compare the clusters generated by algorithms with the true classes, produced on the basis of human judges, by computing the following two external evaluation measures.

Purity is measured by counting the number of documents from the most frequent class in each cluster. Purity can be computed as

$$\text{purity} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \max_j T(C^k, A^j), \quad (14)$$

where A^j denotes the j -th class, $T(C^k, A^j)$ is the number of documents that belong to C^k and A^j , and N is the number of documents.

NMI (Normalized Mutual Information) [Manning et al. (2008)] is defined as

$$\text{NMI} = \frac{I(C; A)}{(H(C) + H(A)) / 2}, \quad (15)$$

where, $I(C; A)$ is mutual information and $H()$ is entropy.

¹⁾ <http://qwone.com/~jason/20Newsgroups/>

I also used objective functions of clustering algorithms as an internal evaluation measure. These are “within-cluster Jensen-Shannon divergence” JS_W (3) and cosine similarity:

$$\begin{aligned} \text{cosine} &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in C^k} x_i \cdot \frac{\mu_k}{\|\mu_k\|}, \\ \mu_k &= \frac{1}{N_k} \sum_{x_i \in C^k} x_i, \end{aligned} \quad (16)$$

where x is a vector representation of a document (M dimensional vector) and N_k is the number of documents $x(\in C^k)$.

5-3 Experimental Results

Figures 1-2 display relationships between purity and internal criteria for k-means algorithms. Tables 2-3 show averages of internal and external evaluation measures, where spKM, sdKM, sdCL, and sdCLS correspond to “spherical k-means”, “skew-divergence k-means”, “skew-divergence competitive learning”, and “skew-divergence competitive learning with splitting mechanism”, respectively. These figures and tables illustrate the following:

- (1) Skew-divergence algorithms yield better solutions in terms of JS-divergence than spherical clustering algorithms (spKM). Hence, the proposed algorithms work for optimizing the objective function of information-theoretic clustering (ITC) as a document clustering method.
- (2) Skew-divergence algorithms yield better solutions in terms of purity and NMI than spherical clustering.
- (3) Among skew-divergence algorithms, competitive learning algorithms (sdCL and sdCLS) can outperform spKM in most cases.

Figures 1 and 2 clearly show that ITC outperforms spherical clustering in terms of purity. These figures illustrate the usefulness of ITC. Furthermore, we can find a correlation between external evaluation measures (purity and NMI) and JS-divergence in Figure 3. Here, the correlation coefficient between purity and JS-divergence is -0.982 and that between NMI and JS-divergence is -0.985. Therefore, the smaller the JS-divergence a solution has, the larger its external evaluation measures become. Although limited in 20Newsgroups data, the relationships suggest that JS-divergence can be an important factor for the quality of document clustering. For RCV1 data, there is no obvious correlation in results of skew-divergence algorithms (Figure 4), but Figure 2 and Table 3, which include results of spKM, illustrate the effectiveness of JS-divergence at least.

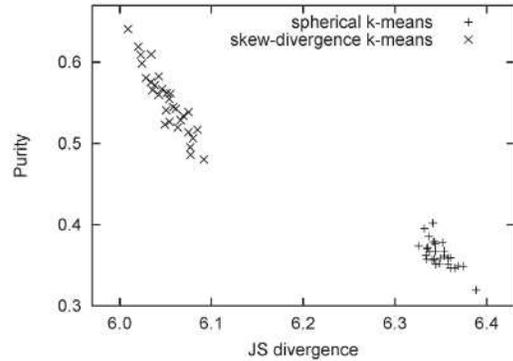
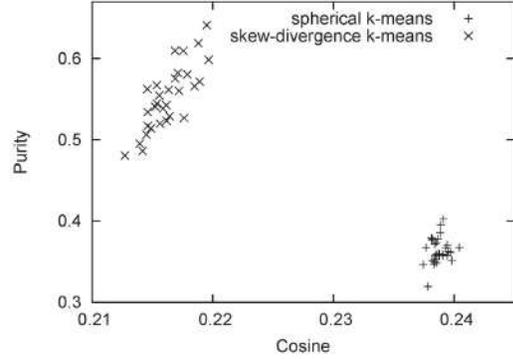


Figure 1 Purity vs. cosine (upper) and JS-divergence (lower) for 20Newsgroups data.

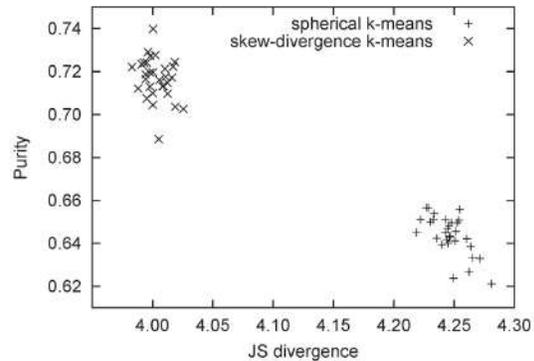
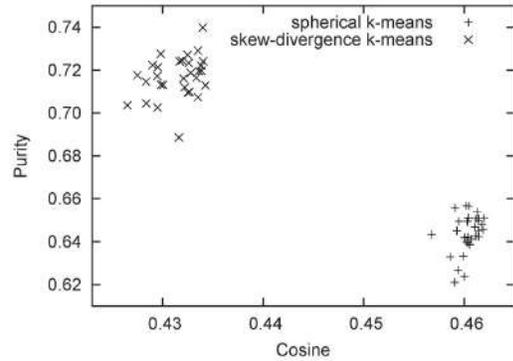


Figure 2 Purity vs. cosine (upper) and JS-divergence (lower) for RCV1 data.

6. Discussion

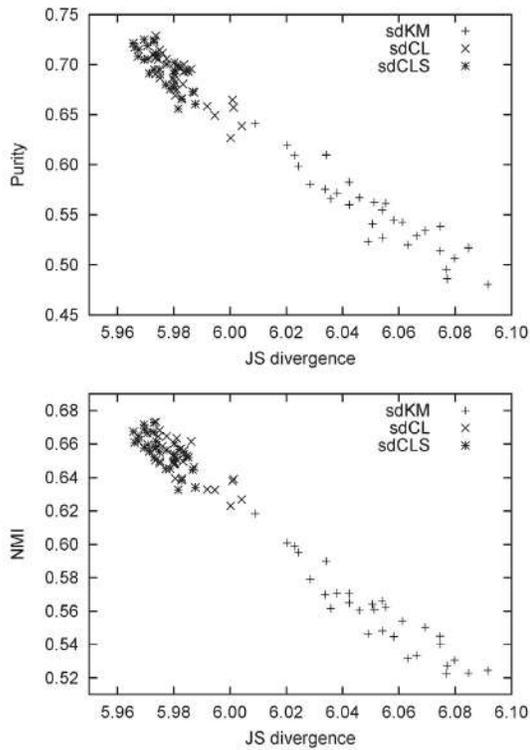
Figures 1-2 and Tables 2-3 show that skew-

Table 2 Results of evaluation measures for 20Newsgroups data

Algorithm	cosine	JS div.	purity	NMI
spKM	0.2387	6.348	0.3650	0.3259
sdKM	0.2153	6.052	0.5520	0.5585
sdCL	0.2200	5.983	0.6839	0.6503
sdCLS	0.2204	5.976	0.6982	0.6558

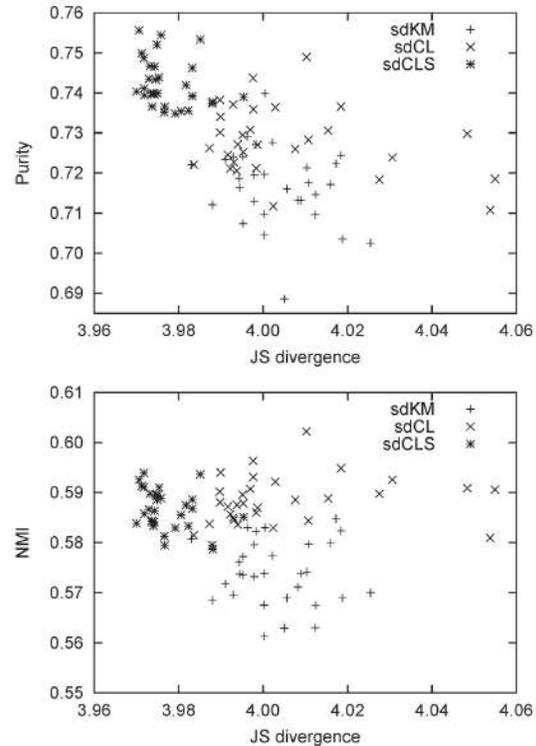
Table 3 Results of evaluation measures for Rcv1 data

Algorithm	cosine	JS div.	purity	NMI
spKM	0.4604	4.246	0.6439	0.4765
sdKM	0.4315	4.003	0.7167	0.5740
sdCL	0.4264	4.005	0.7279	0.5887
sdCLS	0.4351	3.977	0.7424	0.5866

**Figure 3** Relationship between external evaluation measures and JS-divergence for 20Newsgroups data.

divergence algorithms outperform a spherical k-means algorithm (spKM). These algorithms drastically improve purity (0.365 to 0.698, 0.643 to 0.742) and NMI. For example, purities yielded by spKM and sdCLS for 20Newsgroups are 0.365 and 0.698, respectively. To reveal such an important characteristic of ITC, the proposed algorithms play an indispensable role. These show the effectiveness and usefulness of ITC and the proposed algorithms. As a document clustering method, ITC may be much more useful than spherical clustering. I believe the effectiveness of ITC should be derived from Naive Bayes related to ITC.

There are obvious correlations in Figure 3, but no such correlation can be found in Figure 4, where a correlation coefficient between purity and JS-divergence is -0.595 and that between NMI and JS-

**Figure 4** Relationship between external evaluation measures and JS-divergence for Rcv1 data.

divergence is -0.174. This difference may come from the complexity of the clustering problem for RCV1 data. As shown in Table 1, the numbers of documents (18,774 vs. 534,135) and features (60,698 vs. 215,603) are much bigger than those of 20Newsgroups data. CPU time of ICT for RCV1 data is about 2 to 4 hours, where that for 20Newsgroups data is within a few minutes (using a core i7-4770). Clustering problems with large scale data likely have a lot of local minima to which algorithms converge. It is possible that they take various values for internal and external evaluation measures, as shown in Figure 4. These figures also suggest that there are factors that have not been analyzed. I believe analyzing these factors is an important future pursuit.

7. Conclusion

This paper proposed novel algorithms for information-theoretic clustering (ITC) to utilize ITC as a document clustering method. The proposed algorithms use skew divergence instead of KL-divergence to avoid the zero-frequency problem. Internal and external evaluation measures were used to compare ITC with spherical clustering. This paper further introduced competitive learning algorithms that outperform the k-means algorithm using skew-divergence. Experimental results for text data sets were presented to show the effec-

tiveness and usefulness of ITC and the proposed algorithms.

References

- [1] Baker, L Douglas and Andrew Kachites McCallum (1998) "Distributional clustering of words for text classification," in *Proceedings of the 21st annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*, pp. 96–103, ACM.
- [2] Dhillon, Inderjit S, Subramanyam Mallela, and Rahul Kumar (2003) "A divisive information theoretic feature clustering algorithm for text classification," *The Journal of Machine Learning Research*, Vol. 3, pp. 1265–1287.
- [3] Dhillon, Inderjit S and Dharmendra S Modha (2001) "Concept decompositions for large sparse text data using clustering," *Machine learning*, Vol. 42, No. 1-2, pp. 143–175.
- [4] Jain, Anil K (2010) "Data clustering: 50 years beyond K-means," *Pattern recognition letters*, Vol. 31, No. 8, pp. 651–666.
- [5] Jain, Anil K, M Narasimha Murty, and Patrick J Flynn (1999) "Data clustering: a review," *ACM computing surveys (CSUR)*, Vol. 31, No. 3, pp. 264–323.
- [6] Lee, Lillian (1999) "Measures of distributional similarity," in *Proceedings of the 37th annual meeting of the Association for Computational Linguistics on Computational Linguistics*, pp. 25–32, Association for Computational Linguistics.
- [7] Lewis, David D, Yiming Yang, Tony G Rose, and Fan Li (2004) "Rcv1: A new benchmark collection for text categorization research," *The Journal of Machine Learning Research*, Vol. 5, pp. 361–397.
- [8] Manning, Christopher D, Prabhakar Raghavan, and Hinrich Schütze (2008) *Introduction to information retrieval*, Vol. 1: Cambridge university press Cambridge.
- [9] McCallum, Andrew and Kamal Nigam (1998) "A comparison of event models for naive bayes text classification," in *AAAI-98 workshop on learning for text categorization*, Vol. 752, pp. 41–48, Citeseer.
- [10] Pereira, Fernando, Naftali Tishby, and Lillian Lee (1993) "Distributional clustering of English words," in *Proceedings of the 31st annual meeting on Association for Computational Linguistics*, pp. 183–190, Association for Computational Linguistics.
- [11] Slonim, Noam and Naftali Tishby (2000) "Document clustering using word clusters via the information bottleneck method," in *Proceedings of the 23rd annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*, pp. 208–215, ACM.
- [12] Uchiyama, Toshio and Michael Arbib (1994) "Color image segmentation using competitive learning," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, Vol. 16, No. 12, pp. 1197–1206.

Acknowledgments This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number 26330259.

〈論文〉

A Learning Analytics Approach to Improving Learning Outcomes Using
Tablets as e-book Readers

Simon THOLLAR* Tohru HIROHKU† Naofumi OKUYAMA‡

タブレット端末用電子書籍リーダーを活用した学習効果改善への学
習分析的アプローチ

ソーラ・サイモン* 廣奥 暢† 奥山 尚史‡

Abstract

Over the last several years, tablet computers have become very common in the classroom. In particular, the Apple iPad series of tablets has become a popular choice from early to higher education. One growing use is their application as electronic book (e-book) readers. The effectiveness of such utilization however is difficult to measure. Taking a Learning Analytics approach, this research aims to develop a way to log student data when using the iPad as an educational tool, with the aim of analyzing and assessing student progress as well as utilizing the data to improve the electronic educational material (especially e-books). Being able to visualize student usage and frequency will allow better educational material design, in addition to indicating the degree of participation on the part of the students, while allowing data-driven decision making on the part of the educator.

要旨

ここ数年、タブレット型コンピューターは授業において一般的になってきた。とりわけApple社のタブレット端末iPadシリーズは、高等教育機関において早期から第一の選択肢となってきた。その使用が増大した理由の一つが、電子書籍 (e-book) の閲覧のためのソフトウェア (電子書籍リーダー) の存在である。しかしながら、それを用いることの効果を測定するのは難しい。本研究では、学習分析の観点を取り入れ、iPadを教育ツールとして使用する際に、学生の進捗を分析、評価すると同時に、電子的教材 (とりわけ、e-book) を改善するためのデータとともに学生の学習記録を行う方法を開発すること目的とする。学生の使用方法、使用頻度を可視化することができれば、より良い教材設計につながるのに加えて、学生の側からは、授業への参加の度合いを示すことができ、もう一方の教育者側では、データに基づいた意志決定を行えるようになると思う。

Key Words:

Learning Analytics, tablets, e-book readers

* 経営情報学部情報システム学科教授 Professor, Department of Systems and Informatics.

† メディア情報学部情報メディア学科准教授 Associate Professor, Department of Information Media

‡ メディア教育センターディレクター Director, Media Education Center

1 Introduction

Mobile tablet computers have been on the market for many years, but after the arrival of the iPad in April 2010, many schools and colleges began trialling iPads in the classroom. While PDFs were in common use, there were few e-books available, leading to many schools employing iPads as course management devices, presentation tools or media viewers. However, as tablets both decreased in price and increased in popularity, they became more ubiquitous in the classroom, leading to an increased use as e-book readers.

Since its initial use in education, the iPad has been the subject of both acclaim and criticism. It has variously been praised as a motivator, a cheap alternative and compact solution to printed matter, and a way to promote autonomous learning through inquiry. Conversely, it has been derided as a fad, a distraction, and inappropriate for note taking (Mueller & Oppenheimer, 2014). While some of the areas of concern will likely be, or are being, addressed, such as higher resolution screens yielding improved readability, or note-taking software becoming easier to use, there still remains a critical obstacle to effectively using iPads in education: There is no facility for Learning Analytics.

Learning Analytics is defined as “the measurement, collection, analysis, and reporting of data about learners and their contexts, for purposes of understanding and optimizing learning and the environments in which it occurs” (Long & Siemens, 2011, p. 34). It is important for the teacher because, not only does it allow an ongoing evaluation of the course material and monitoring of the student, it also allows teacher to suggest and provide new learning opportunities or different courses of action to the students (Campbell, DeBlois, & Oblinger, 2007). Established e-learning programs and/or LMSs readily provide such data for the teacher, allowing the teacher to tailor or modify the learning experience to suit the students. By monitoring student performance and participation in a course, as well as examining how this relates to grades, faculty can potentially target areas of the course (and course material) to improve.

In this research, the authors developed and implemented a way to log and collect data concerning individual student use of educational iPad applications and e-books. By utilizing Learning Analytics, learning material, or the course itself, is able to be revised to better allow learning objectives to be met, in addition to improving monitoring of student progress and initiating timely educational intervention when appropriate.

2 Books, PCs or Tablets

Ferguson (2012) notes that the appearance of

Learning Analytics in education closely follows the increase of universities instituting online learning. Learning online, especially using a portable device such as a tablet, offers numerous advantages summed up in the term *ubiquitous learning*; the learner can study anywhere, at any time, and without a teacher.

This is summarized in *Diagram 1* below, where the educational classroom utility of textbooks, PC notebooks and tablets (as e-book readers) is compared, according to six different criteria; motivation, ability to engage, cost, interactivity, portability and analyzability. The table is a synthesis from a number of studies, specifically research by Li and Pow (2011), Morrone, Gosney and Engel (2012), Goodwin (2012), Weisberg (2011) and Enriquez (2010). As can be seen, newer technologies tend to outweigh more traditional teaching tools, with the tablet being the preferable option.

Diagram 1: Lesson Delivery Comparison

	Text 	PC 	Tablet 
Motivation	×	○	○
Ability to Engage	×	○	◎
Cost	△	△	○
Interactivity	×	○	○
Portability	△	△	○
Analytics	×	○	×

Li and Pow (2011, p.325) noted that students felt the “impact of technology on enhancing their learning motivation, developing their cognitive skills and planning for their learning in their daily learning activities was significantly higher in the Tablet-PC classes”. This was reiterated by Morrone, Gosney and Engel (2012, p.1) who added that “iPads were found to increase student engagement by providing innovative and creating learning environments”, and by Geist (2011, p.8) noting that students “did not want to sit at a desk” and study when they could enjoy more mobile alternatives, adding that “it was cheaper . . . [to] buy so many [digital] books” (p.8).

The apparent advantages of using a tablet are also statistically supported by various studies. One of the first universities to pioneer the use of iPads in university classes, Lynn University in Florida, USA, noted in a student survey that 94 percent of students (fall semester, 2014) said they felt the tablet contributed to their learning experience (Straumsheim, 2014). Of these, 9 out of 10 mentioned that they used the tablet in courses that didn’t require it. Furthermore, possibly due to recognizing the advantages of new technologies, 61 percent said the prospect of receiving their own

iPad (mini) significantly influenced their decision to attend Lynn. Director of Faculty Development and Active Learning, Mike Petroski (Straumsheim, 2014), further added that he had noticed the largest performance jump to date among students in the first trialled course, personal finance. Chief Information Officer Chris Boniforti further supported this finding, pointing out that students using iPads outperformed those who didn't, and just over three-quarters of students preferred the e-book used in the course over a traditional textbook, that number rising from approximately 65 percent at the beginning of the course.

As of 2015, Lynn University has gone one step further, phasing out its Blackboard Learn learning management system, managing all daytime undergraduate courses through Apple's course management software, iTunes U.

3 Potential Disadvantages

While using tablets in class seems to offer many benefits, such usage has also been associated with a number of problems by several researchers, especially when applied to online learning. Mazza and Dimitrova (2004) note that students may feel isolated due to a lack of, or diminished, contact with teachers or peers. They may also lose focus, experience technical problems or lose their motivation.

An early study carried out by Reed University and fifteen other North American universities (Marmarelli & Ringle, 2010) found that students preferred using books to e-book readers, given the price and lack of simultaneous multi-book access.

Furthermore, depending on how the tablet is used, the teacher can also feel removed from the learning. Online education, for example, doesn't provide teachers with the visual, oral or aural cues that may indicate when students are bored, confused, overwhelmed, unengaged or even absent. Dringus and Ellis (2005) note that lack of a conventional teaching space and/or evaluation system may also lead teachers to struggle in decoding and evaluating what learning has taken place, or in assessing the degree of individual participation exhibited by students over the course.

4 Using Learning Analytics

It could be argued that Learning Analytics resulted from the recognition of a need to address some of these difficulties. It is no coincidence that the appearance of Learning Analytics in education followed the rise of online learning. Ferguson (2012, p.305) notes while "the measurement, collection, analysis, and reporting of data about learners and their contexts, for purposes of understanding and optimizing learning and the environments in which it occurs" is an appropriate definition, it should be realized that there are two assumptions included: that Learning Analytics

make use of preexisting, machine-readable data, and that its techniques can be used to handle 'big data', large sets of data that would not be practicable to deal with manually.

In a higher education setting, practical applications of Learning Analytics are multifarious. Macfadyen and Dawson (2010, pp. 588-99) note that at-risk learners can more easily be identified, and appropriate intervention to help learning outcomes can be implemented in a timely manner. Analysis may range from messages posted, to assignments completed, to LMS messages read.

Long and Siemens (2011, p.36) further add that Learning Analytics can provide learners with insights into their own learning practices, and in doing so, can suggest recommendations for improvement, as demonstrated in a system used by the University of Maryland, which allows "learners to compare their own activity . . . against an anonymous summary of their peers" (Fritz, 2011).

Learning Analytics has been in use at Hokkaido Information University since 2003. This is demonstrated in both *Mugendai Campus*, an e-learning system for off-campus students, and also in *POLITE* (Portfolio Oriented eLearning for IT Education), the on-campus e-learning portal site.

Mugendai Campus is primarily designed for students studying off-campus. Typically, such students choose to study from an combination of 4 different learning modalities: studying with a book by themselves, studying online by computer (*Mugendai Campus*), studying by attending intensive courses, or studying via a live class broadcast to an affiliated educational center. The first is the cheapest option and can be undertaken in any of four quarters over the academic year; the second includes only a limited number of courses, but is available year round; the third includes a more limited number of classes, and each intensive class will only be held in one of over 10 possible cities throughout Japan; and the fourth is only available to students enrolled full-time at an affiliated school.

Given the alternatives, although *Mugendai Campus* does not offer live interaction with the instructor, it does offer a selection of analytics, both for the benefit of the teacher and learner. This is seen in *Diagrams 2, 3 and 4* below.

Diagram 2: Total Time Online/Problems Completed



Diagram 3: Mistakes and Number Correct

問題	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
正解	b	b	c	c	d	a	a	d	d	c
回答(1)	a ×	b ○	c ○	d ×	a ×	b ×	c ×	d ○	a ×	b ×
回答(2)	b ○	b ○	c ○	a ×	b ×	c ×	d ×	d ○	b ×	c ○
回答(3)	b ○	b ○	c ○	a ×	b ×	c ×	d ×	d ○	b ×	c ○



Diagram 4: Access Time Log

No	access_time	unit	kind	correct
497	2014-02-08 16:08:29	chapter14	Circle	10 correct=10;answer=T,F,T,T
496	2014-02-08 16:08:18	chapter14	Circle	9 correct=9;answer=T,F,T,T
495	2014-02-08 16:07:53	chapter14	Circle	8 correct=8;answer=T,F,T,T
494	2014-02-08 16:07:43	chapter14	Circle	8 correct=8;answer=F,F,T,T
493	2014-02-08 16:07:33	chapter14	Circle	9 correct=9;answer=T,F,T,T

Diagrams 2 and 3 provide valuable information to both the teacher and the learner. Diagram 2 logs the time studied for each chapter (or lesson), the number of attempts at each problem, the maximum, average and minimum scores, the number of times accessed and the total study time for the unit or course. Diagram 3 lists the learner's number of correct and incorrect responses in a multiple choice exercise in each chapter. It also includes a motivational message indicating the progress, or ranking, of the learner. Diagram 4 is accessible only by the teacher administering the course, and displays each keyboard input from the learner, the time it was made, and the duration of time that was spent by the learner on each page, or in each section.

Data logging on POLITE reflects its purpose as an aid to on-campus students, showing other numeric elements, such as the number and date of papers submitted and grades awarded (Diagram 5), the comparative length of time spent studying (Diagram 6), and detailed answers to problems set in class, or as homework (Diagram 7).

Diagram 5: Date, Score & Number of Papers Submitted



提出日時	得点	総数	再提出率	フィードバック
2014年 02月 08日 16:08:29	10	10	0%	
2014年 02月 08日 16:08:18	9	9	0%	
2014年 02月 08日 16:07:53	8	8	0%	
2014年 02月 08日 16:07:43	8	8	0%	
2014年 02月 08日 16:07:33	9	9	0%	

Diagram 6: Study Time

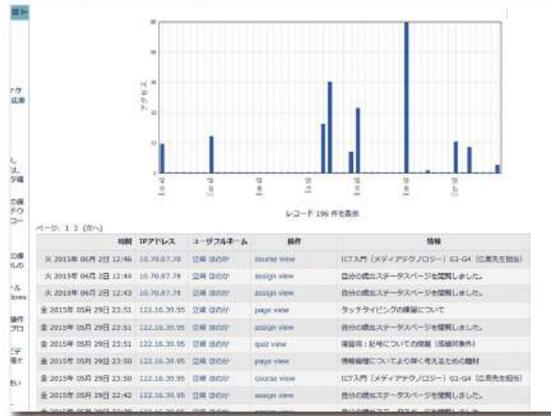


Diagram 7: Detailed Answers



2014年 02月 08日 16:08:29

問題 8/10

正解: 9/10 (90%)

不正解: 1/10 (10%)

不正解: 1/10 (10%)

問題 1

問題文: 1. フォントの色を変更する
2. 背景の色を変更する
3. フォントのサイズを変更する
4. フォントのスタイルを変更する
5. 文字の色を変更する
6. 文字のサイズを変更する

正解: フォントの色を変更する

不正解: 背景の色を変更する

不正解: フォントのサイズを変更する

不正解: フォントのスタイルを変更する

不正解: 文字の色を変更する

不正解: 文字のサイズを変更する

問題 2

問題文: 1. フォントの色を変更する
2. 背景の色を変更する
3. フォントのサイズを変更する
4. フォントのスタイルを変更する
5. 文字の色を変更する
6. 文字のサイズを変更する

正解: フォントの色を変更する

不正解: 背景の色を変更する

不正解: フォントのサイズを変更する

不正解: フォントのスタイルを変更する

不正解: 文字の色を変更する

不正解: 文字のサイズを変更する

5 Learning Analytics and e-book Readers

In all of these examples, it is easy to see how access to data logged is both beneficial to the student and the teacher alike. The server hosting the e-learning site, or portal site, naturally records the data as part of its hosting function. An appropriate interface accesses the data and expresses it in a way that is easily understood by the learner, and valuable for the teacher. It can be analyzed and examined to meet a variety of needs. Fields ranging from study duration, completion rates, success rates, incidences of repetition or revision, preferred study times, rates of progress or problematic areas, to name but a few, can all be scrutinized with the aim to improve learning by collecting and analyzing data. Additional information, such as answers to questions, or advice in problematic areas can be added accordingly.

However, it needs to be pointed out that such access to data can only be carried out when the computer (or tablet) is online. As noted by Ferguson (2012, p.306), significant amounts of learner activity take place externally, making records or data logging very important, if the teacher wants to utilize data reflecting student learning patterns to improve learning outcomes.

Diagram 1, which compares the utility of educational delivery modalities, also demonstrates this point very clearly: while tablets are motivating, reasonably priced, engaging, interactive and portable, they offer few advantages concerning analytics.

Thus, when the learner is using an iPad as an offline e-book reader, it is difficult to collect such data. There are fundamentally two reasons for this: The first is that while e-books can embed problems or exercises, they typically do not log data. Secondly, when the iPad is offline, or not in a WiFi zone (such as at the learner's home or while commuting to school), there is no way to send or receive any data to or from the hosting server. Finding a way to accurately record the data, and upload the data to an appropriate server for collection and analysis when the tablet is used on campus, is the essence of this research.

6 Using e-book Readers on Campus

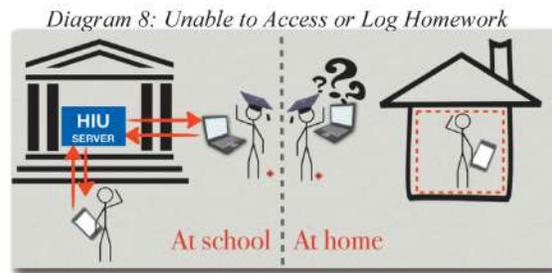
Hokkaido Information University has made a firm commitment to using tablets on campus. This is demonstrated by the fact that there are now more than 1200 iPads in use by all faculties, with all students (except final year students) being loaned an iPad by the university. They are an intrinsic, ubiquitous part of the learning process, both by students and faculty alike, and are utilized daily.

Their uses include student response system interfaces (including one developed in-house by HIU and the other commercially), an enrollment interface, an email reader, an internet browser, a note taking device and a media viewer, amongst other things. They are also increasingly being used as e-books in several subjects, and that usage is not expected to dwindle, with FD workshops on how to design and construct e-books being held several times a year.

However, as noted, one of the problems is that faculty have no way to verify whether set work has been completed. Whether the learner has accessed the e-book, how much time has been spent, how well the material was understood, and how much of the e-book has been read largely remains unknown to faculty. *Diagram 8* illustrates the situation. On campus, all data can be automatically logged using the campus WiFi network. Data is sent to the *POLITE* server, which is used to host learning material and also has a robust analytic capability, being able to collect, collate, analyze and display data. However, when the student is off-campus, and/or not logged into the campus WiFi system, any activity by the student is unable to be monitored, verified or checked by the faculty.

This is clearly not just a problem purely concerning e-book usage, rather a realization that when a student is using any PC or tablet offline, it is difficult to know what study the student has done, and there is no evidence or data reflecting

what learning may have taken place.

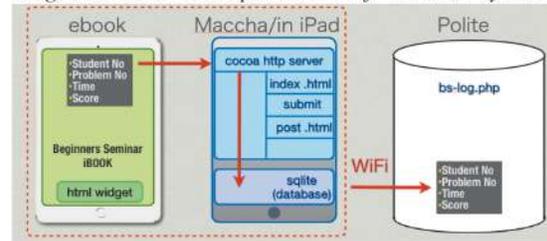


7 Creating a Proxy Server to Run Under iOS

To address this problem, the authors devised an iPad application called “maccha”. *Maccha* fundamentally has two functions: to collect and log data, and to upload the data to a campus server, in this case, *POLITE*.

In the system, a widget is embedded into the e-book, and all input from the student goes to a cocoa proxy server, whereupon it is sent to a Sqlite data base, which is stored until the iPad is able to contact the designated hosting server (*POLITE*), and upload the data. When the iPad is in the campus WiFi zone, the data is automatically uploaded upon the student's logging in. In this way, the study habits and data of students can be recorded and accessed by both faculty and students. This is shown below, in *Diagram 9*.

Diagram 9: Schematic Representation of “Maccha” System



8 Challenges and Evolution in the System

In the initial version, which was primarily designed to test the viability of the idea, logged data included only the student number, problem number, time and score. Furthermore, up till the end of 2014, students were unable to log on to the school *POLITE* server from their own home, or any other non campus WiFi hotspot, hence the need for a built-in proxy server and database. However, from 2015, with improved security measures, this dramatically changed, allowing students to access the *POLITE* server from any external Internet connection.

To some extent, this made the development of *Maccha* partially redundant as the student's logging in to the *POLITE* server from any external hotspot automatically uploaded all analytics data. As noted, prior to 2014, the student was unable to access the school server outside the school WiFi zone.

However, there are two critical points that need to be considered: firstly, if the student does not log in before accessing the e-book, even using the 2015 system, data would not be automatically uploaded; and secondly, e-books do not readily support analytics, so the embedding of an HTML widget into the e-book, thereby allowing data to be represented as HTML files, fulfills the vital function of allowing data input by the student to be mined and later analyzed.

9 Discussion

As noted by Siemens et al. (2011, p.5), Learning Analytics is a “means to provide stakeholders (learners, educators, administrators, and funders) with better information and deep insight into the factors within the learning process that contribute to learner success”. In other words, Learning Analytics is about the learning process. Analytics can help guide decision making about educational, curriculum or course reform by faculty, and identify where help might be needed for at-risk, or under-performing students. Faculty can implement intelligent curriculum design, and patterns of success or failure will also become clear. In this way, it is beneficial for teachers and administrators while simultaneously providing learners with information to empower and monitor their learning, and increase their responsibility for their learning activity.

It has been conclusively shown that if students don’t enjoy or can’t succeed in a subject, they may become “turned off, disengaged, or uninvolved” (Sosa & Casanave, 2007). The field of Learning Analytics is largely concerned with improving learner success by finding ways to express the progress of the learner by measuring, collecting and analyzing data concerning the student’s study.

While using an iPad in an educational setting has been shown to initially engage students (Li & Pow 2011, Enriquez 2010, Goodwin 2012, Morrone, Gosney, & Engel 2012), not knowing how well students are progressing, or what sections in the course material are causing problems, will likely hinder the learning process. This is borne out by Gee’s (2003) premise that “without motivation, there is no learning”. Thus, if students are not engaged by the material they are using, they will likely be demotivated, resulting in minimal or no learning. Clearly, to evaluate how the student is learning, what the student is learning, and whether in fact learning is taking place, data expressing the student’s study habits is needed.

This research proposal argues that students using iPads as e-book readers would likely benefit by allowing their study habits and the course material to be objectively logged and examined, something which can only be achieved by analyzing student access data. Gaining such access

not only allows course material to be modified to meet student demands, but also allows student progress to be followed on an individual basis. Improved material and student monitoring is expected to lead to greater motivation and improved autonomous learning.

10 Analytics and Privacy

One potential problem that needs to be considered in this research is the issue of data privacy and data use in Learning Analytics. Ethical and legal issues, such as Japan’s Educational Records Release regulations, need to be understood before teachers make use of any data, just as data ownership and access rights also need to be considered. Furthermore, it has been noted that some students may not like the feeling (or reality) of (their data) being watched or tracked around campus (Campbell, DeBlois, & Oblinger, 2007), just as some researchers have noted that there is also a potential danger of creating a profile of successful and unsuccessful students, and that Learning Analytics targets course completion more than measuring student learning (Watters, 2012).

However, research in role theory applied to SNS usage (Bruneel, De Wit, Verhoeven & Elen, 2013) tends to show that students clearly differentiate between privacy issues inside and outside schools, implying that data mining for course improvement and student monitoring will likely be accepted. Moreover, as noted, provision to access private course data not only by the faculty but the student allows student self-monitoring, which research shows leads students to become more cognizant of their actions, study habits and progress (Dietz-Uhler & Hum, 2013).

Nevertheless, supervision and ownership of the data does remain an issue. There has been no directive on what rights learners have in relation to their data, just as there has been no agreed or accepted method for teachers and/or researchers to obtain consent to collect and use the data. Perhaps more importantly, there is no mechanism whereby learners can opt out of having their data collected, or ensure their records are erased when a given course has finished. Ethically, it seems questionable for the institution to mine data from students just to analyze study progress, develop trends and even award grades.

11 Conclusion

In this research, we attempted to develop and create a method to apply Learning Analytics to iPads used as e-book readers. Learning Analytics ultimately aims to provide value to learners. Data is obtained from a learning event, expressed in an easily comprehensible manner, and employed to understand and optimize both the learning and the environments within which it takes place.

While we initially constructed an application named *Maccha*, comprised of a proxy server and database, able to store data until the iPad was within reach of the campus server, the major value in this research lies in the idea of finding a way to collect user data from an interactive e-book, and expressing that data to gain insight on a participant's behaviors and productions. It allows both teachers and learners to know "what is going on" (Schneider, 2015).

With over one billion people now owning and using tablets, more than doubling the number just 3 years ago, it follows that tablet use will rapidly increase in education. That means that not only will all tiers of education likely be using tablets, but they will likely be the primary educational interface, after the teacher. This further implies that as tablet usage increases in class, the importance of Learning Analytics in education will proportionately increase.

As Siemens *et al.* (2011) note, there are seven significant benefits from utilizing Learning Analytics: namely (i) reduction of attrition by early detection of at-risk students; (ii) ability to adapt learning processes and contents to suit individual's needs; (iii) ability to provide timely information to extend and enhance learner achievement, motivation, and confidence; (iv) better use of teacher time and effort by access to information on which students need additional help; (v) higher quality learning design and improved curriculum development processes; (vi) provision of comprehensive, interactive visualizations of complex information (dashboards) resulting in better meeting needs; and (vii) faster achievement of learning goals by giving learners access to monitoring tools.

Given these advantages and the impending ubiquity of tablets in all tiers of education, further pursuing the application of Learning Analytics to improve learning outcomes in e-books seems like a valid and valuable research topic, something which the authors plan to further develop and refine.

References -

- (1) Bruneel, S., De Wit, K., Verhoeven, J. & Elen, A. (2013). Facebook: When Education Meets Privacy. *Interdisciplinary Journal of E-Learning and Learning Objects*, 9, pp. 125-148.
- (2) Campbell, J. P., DeBlois, P. B., & Oblinger, D. (2007). Academic analytics: A new tool for a new era. *EDUCAUSE Review*, 42(4), pp. 40-57.
- (3) Dawson, S., Heathcote, L. and Poole, G. (2010). Harnessing ICT Potential: The Adoption and Analysis of ICT Systems for Enhancing the Student Learning Experience. *The International Journal of Educational Management*, 24(2), pp. 116-129.
- (4) Dietz-Uhler, B & Hurn, J. (2013). Using Learning Analytics to Predict (and Improve) Student Success: A Faculty Perspective. *Journal of Interactive Online Learning*, 12(1), pp. 17-26.
- (5) Dyer, C.J. (2013). Examining College Students' Perceptions of iPad Usage On Motivation, Organization and Cognitive Skills. Bowling Green State University, Graduate School of Bowling Green State University, Thesis. www.books.google.co.jp/books/about/EXAMINING_COLLEGE_STUDENTS_PERCEPTIONS_O.html?id=ETa5ngEACAAJ&hl=en Retrieved 11/30/2015.
- (6) Dringus, L.P. and Ellis, T. (2005). 'Using data mining as a strategy for assessing asynchronous discussion forums', *Computers & Education*, 45, pp. 141-160.
- (7) Enriquez, A. G. (2010). Enhancing student performance using tablet computers. *College Teaching*, 58, pp. 77-84.
- (8) Ferguson, R. (2012). Learning analytics: drivers, developments and challenges. *International Journal of Technology Enhanced Learning*, 4(5/6) pp. 304-317.
- (9) Fritz, J. (2010). Video demo of UMBC's 'Check My Activity' tool for students. *Educause Quarterly*, 33(4), www.educause.edu/library/EQM1049 Retrieved 11/30/2015.
- (10) Gee, J. P. (2003). *What video games have to teach us about learning and literacy*. New York: Palgrave Macmillan.
- (11) Goodwin, K. (2012). Use of tablet technology (iPads) in the classroom. Department of Education and Communities, State of New South Wales. www.tale.edu.au/tale/live/teachers/shared/next_practice/iPad_Evaluation_Sydney_Region.pdf Retrieved 11/30/2015.

- (12) Li, S. C., & Pow, J. W. C. (2011). Affordance of deep infusion of one-to-one tablet-PCs into and beyond classroom. *International Journal of Instructional Media*, 39 (4), pp. 319-325.
- (13) Long, P. D. & Siemens, G. (2011). Penetrating the fog: Analytics in learning and education. *EDUCAUSE Review Online*. www.educause.edu/ero/article/penetrating-fog-analytics-learning-and-education Retrieved 11/30/2015.
- (14) Macfadyen, L.P. & Dawson, S. (2010). "Mining LMS Data to Develop an 'Early Warning System' for Educators: A Proof of Concept," *Computers & Education*, 54(2), pp. 588-599.
- (15) Marmarelli, I. & Ringle, M. (2010). The Reed College Kindle Study. www.reed.edu/cis/about/kindle_pilot/Reed_Kindle_report.pdf Retrieved 11/30/2015.
- (16) Mazza R., and Dimitrova, V. (2004). Visualising student tracking data to support instructors in web-based distance education, *13th International World Wide Web on Alternate Track Conference*, New York, NY, USA: ACM Press, pp. 154-161.
- (17) Morrone, A., Gosney, J., & Engel, S. (2012). Empowering students and instructors: Reflections on the effectiveness of iPads for teaching and learning. *Educause- Learning Initiative*. net.educause.edu/ir/library/pdf/ELIB1201.pdf Retrieved 11/30/2015.
- (18) Mueller, P & Oppenheimer, D. (2014). The Pen Is Mightier Than the Keyboard: Advantages of Longhand Over Laptop Note Taking. *Psychological Science*, 25(6), pp. 1159-1168.
- (19) Schneider, K. (2015). *Learning Analytics*. www.edutechwiki.unige.ch/en/Learning_analytics#Trace_analysis Retrieved 11/30/2015.
- (20) Siemens, G., Dragan, G., Haythornthwaite, C., Dawson, G., Buckingham Shum, S., Ferguson, R., Duval, E., Verbert, K & Baker, R. (2011). Open Learning Analytics: an integrated & modularized platform proposal to design, implement and evaluate an open platform to integrate heterogeneous learning analytics techniques. *Society for Learning Analytics*. www.learningace.com/doc/4905135/ba01ee91cebb3f1a764065f7fc993940/openlearninganalytics Retrieved 11/30/2015.
- (21) Sosa, M., & Casanave, C. P. (2007). Difficult students: Who, why, and responses. In K. Bradford-Watts (Ed.), *JALT2006 Conference Proceedings*. Tokyo: JALT, pp. 280-289.
- (22) Straumsheim, C. (2014). iTunes U. *Inside Higher Ed*, www.insidehighered.com/news/2014/01/08/lynn-university-drop-blackboard-learn-favor-itunes-u Retrieved 11/30/2015.
- (23) Watters, A. (2012). Learning analytics: Lot of education data...Now what? *Hack Education*. www.hackeducation.com/2012/05/04/learning-analytics-lak12/ Retrieved 11/30/2015.
- (24) Weisberg, M. (2011). Student Attitudes and Behaviors Towards Digital Textbooks *Publishing Research Quarterly*, 27(2), pp. 188-196
-

〈論 文〉

大学生の日本語文章力向上を目的とした
提出文章の要改善箇所指摘システム

三浦智美* 中島 潤†

The improvement point indication system for advancement of
Japanese writing ability for college student.

Tomomi Miura* Jun Nakajima†

要旨

大学生の日本語能力が問題視されるようになって久しいが、授業等の課題として学生が提出したレポートについて、日本語文章として問題がある箇所を細部にわたりチェックし、コメントを残して返却することは現実的に難しい。そこで本論文では、大学生の日本語文章作成能力を向上させるために、文章の改善箇所を機械処理により自動的に指摘することで、自発的に文章の推敲を促すためのシステムを提案し、またその有効性を評価するために提案したシステムを試作し検証したので報告する。

Abstract

A decline of Japanese writing ability of Japanese college student is considered to be a problem. In this article, we propose a system for making the elaboration of a report in voluntarily basis to improve Japanese writing ability of college students, and verified its effectiveness by experimental systems.

キーワード

日本語文章 文章作成能力 言語処理 教育システム

* 北海道情報大学大学院経営情報学研究科, Graduate School of Business and Information Systems (Grad. of BIS), HIU

† 北海道情報大学経営情報学部准教授, Associate Professor, Dept. of BIS, HIU

1. はじめに

1-1 本研究の背景

大学生の日本語力の低下が問題視されるようになり、大学生の「書く力」をめぐり、1990年代後半から、「文章表現」「日本語表現法」などといった日本人学生に対する日本語科目を設置する大学が増え始めた^[1]。2011年7月に読売新聞より発表された「第4回『大学の實力』調査(623校)^[2]」によれば、47%の大学で、「日本語を学び直す特別授業」が行われ、レポートの書き方などの文章作法の授業が添削指導という形で実施されている^[3]。

しかし、添削指導を行う授業は、学習者の文章作成能力の向上には有効であるが、評価を行う教員の負担は大きく、特に学生数が多いと、個別の学生に対して指導すること自体が困難になる^[4]。実際、本学の「日本語表現」の授業でもレポートを書く場面が前後期合わせて3、4回あり、教員は1度に100人以上から提出されるレポートを添削しなければならない、1人のレポートにつき20分以上の時間をかけて添削を行っている場合もある。また、添削も1度で終わらず、再提出といった形となることも多いため、教員にかかる負担がうかがえる。

そこで本研究は、本学学生の日本語文章力向上のために、文章の改善箇所を機械処理により自動的に指摘することで、自発的に文章の推敲を促すためのシステムを提案し、またその有効性を評価するために提案システムを試作し検証した。

1-2 本研究の目的

本研究では、本学学生の日本語文章力向上を目的とし、そのために2つの方法を選んだ。1つは、学生が自ら改善箇所を確認し自発的に推敲をすることで、同様の問題

を繰り返させないようにすることである。もう1つは、教員が従来、基本的な形式・文法の誤りといった箇所の指摘に割かれていた時間を軽減することである。これにより、標題に沿った論理展開や内容をよりわかりやすくするための文章構成の指導・採点、学生の意識問題に対する改善の取り組みなど、学生への個別対応が取りやすくなると考えた。

本研究における日本語文章力とは、レポートを執筆するにあたって、語彙・語法などといった基本的な日本語表現を理解し、論理的でわかりやすい文章を書くことを指す。

本稿では、第2章で大学生の日本語力の現状とその現状解決に向けた先行研究について述べる。第3章では、本学学生の日本語文章力向上に向けたシステムの提案を行う。第4章では、提案システムを試作するにあたって、本学学生の提出レポートにおける文章の質低下要因を分析・明確化し、質低下の主要な原因となる指摘項目の指摘指標を統計的手法によって分析を行い決定した。さらに、第5章では、Webアプリケーションによるシステムの試作開発について述べ、第6章では、本学教員によるレポートの添削結果と試作システムの指摘を比較することにより、指摘の精度による提案の有効性を評価した。

2. 提出文章の要改善箇所を指摘するシステムの提案

本提案システムは、インストールや動作環境を整える煩わしさを避けるためにWebアプリケーションとした。学生がレポートを完成させ提出する前にWebを介して、レポートの形式・文章のルールといった誤りの指摘をする。またそれと同時に、一文が

長すぎるといった文章の質の低下要因となる項目も指標を基に指摘を行う。これにより、学生は指摘を基に自ら文章を推敲し、また教師の負担を軽減することで、学生の日本語文章力の向上を図る。ただし本提案システムは、Tomarigi¹⁾のような細部までのチェックをするようなものでなく、本学教員へのヒアリング調査によって、優先的に挙げられた項目を含む基本的な文章の形式・文法の誤りと、一般的に読みづらいとされる文章の主要原因を中心に指摘するものとした。またここでいう指標とは、本学学生の基準に合わせたものとするために、本学学生の提出レポートを基に文章の質を低下させている要因を分析・明確化し、決定したものである。

本提案システムを試作するにあたって、まず文献調査 [5][6][7][8][9] 及び教員へのヒアリング調査を通じて、文法・形式的な誤りといった基本的な指摘項目を洗い出した。またそれと同時に、本学学生の提出レポートについて、文章の質低下要因を分析し明確化し、質低下の主要な原因となる指摘項目の指摘指標を統計的手法によって分析を行い決定した。これらを基に、システムの試作を行い、その有効性について評価・検証を行った。

3. 学生のレポートの分析

3-1 分析対象

本研究では、提案システムを試作するにあたって、文章の質低下の要因を分析・明確化し、指摘する指標を本学学生に合わせ

たものに決定するために、計 377 部の本学学生のレポートの収集を行った。

3-2 分析結果

本研究では、文法・形式的な誤りといった要因以外の、文章の質を低下させている要因について分析を行った。本研究ではその要因を、本学教員の評価、添削・指摘コメントを基に、指摘率の高いものを主要要因として 5 項目に分けた。

3-2-1 内容の把握しづらさ

本項目は、「一文の長さ」「主語と述語の不一致」といった文章の意図を伝えるにあたって最も核となる部分を取り扱う。

● 一文の長さ

一文の長さは、読み手に文意を伝えるにあたって重要な役割を担っている [10]。長い一文は、それだけで正しい文章で書いてあっても意図を読み取ることの困難さ、後述にもある主語と述語の不一致、文意が読み取れなくなるほどの文章崩壊を引き起こす。ただし、内容の把握しづらさと一文の長短とは本質的に関係がないという意見もある [11]。事実、一文が短ければ必ずしも良いというわけでもなく、極端に短い文章は、箇条書きが並んでいるような単調な文章になりがちである。しかし、この問題においては、書き手の実力に依存するため、書き手が日本語に通じていない場合、短い方が無難であるとされている。

本分析においての一文の長さの指摘は、全体の 3 割以上とする中、高評価を得ているレポートは一切の指摘が見受けられなかった。また、評価が低くなるほどされる人数も多くなっており、E ランクでは 7 人のうち 5 人が指摘を受けている(表 1)。更に、指導教員からのコメントにおいても、正確な文意を取れるものとするために、できる

¹⁾ Tomarigi (校正・推敲ツール) は、入力文章に対して、校正・推敲対象となる指摘箇所をマークし、指摘理由や修正候補を提示する事で、文章校正の支援を行う。

だけ短い文を書くように指摘されているものもあった。

表 1. 一文の長さの指摘人数と指摘率

評価	A	B	C	D	E	計
人数	3	3	22	8	7	43
一文の長さの指摘人数	0	0	7	3	5	15
指摘率	0	0	0.318	0.375	0.714	0.349

● 主語と述語の不一致

主語と述語の不一致は、一般的にねじれ文と呼ばれるものであり、主語と述語の関係が意味的に繋がらなくなるものである。また、ねじれ文の中には、本分析においても、一文の長さの指摘と同等数の指摘が見受けられ、評価の低い文章は、殆どが指摘を受けていた。また、指摘の中には、「強いて述べるなら～と述べる。」「そういったことを考えていくと～と考える。」といった文頭と文末で同じ表現を使っている二重表現が見受けられた。更に、文頭と文末の不一致に関しては、理由を述べるにあたって使われる「なぜなら」が、「～からである。」と文末で締めくくられていない者がいた。

3-2-2 読みづらさ

本項目では、「改行の過不足」「漢字の使用率」といった、文章を読むにあたって文法が正しくても読みにくいと判断される部分を取り扱う。

● 改行の過不足

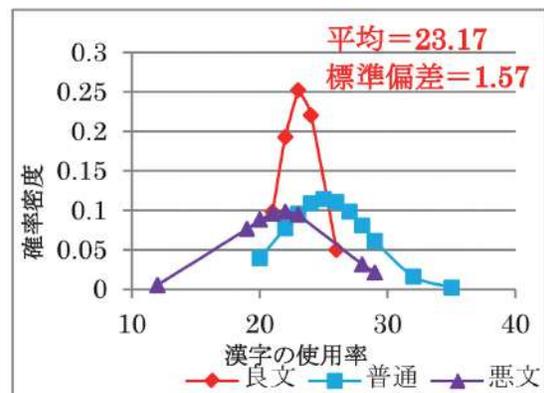
段落は、文章全体を構成する要素である^[12]。段落のない文章は、内容の切れ目を判断しづらく、文章の展開や主要な情報、考えが把握しづらくなる。また、その逆で、メールと同感覚で句点がくるたびに改行が行われる段落の多すぎる文章も、内容の切れ目が判断しづらい。

ただし、本分析に使用したレポートにおいては、手書きの文章であるためか極端に改行された文章も段落わけが全くされていない文章も殆ど見当たらなかった。また、1字下げにおいても、手書きの文章では段落ごとに正確に行われていた。

● 漢字使用率

文章を読むにあたって、極端にひらがなだけが羅列している文章は、たとえ文法がすべて正確であったとしても、多くの場合非常に時間を要する。また、漢字使用率が少ない文章は、稚拙文にもみられやすい。本研究では、漢字使用率についても文章の質を落とす要因として考えた。

そこで評価ごとにおける漢字使用率の分布を出した(グラフ 1)。グラフから、良文は普通文に比べ全体的に漢字の使用率が低いことになっているが、これはサンプル数の差によるものであると推測した。しかし、普通文と悪文を比べてみると、漢字の使用率の違いが明らかにわかるものとなっている。



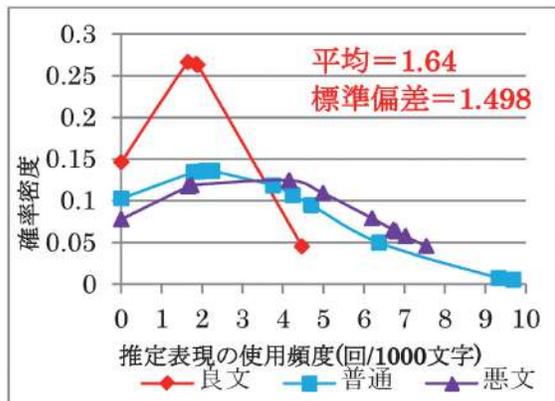
グラフ 1. 評価ごとにおける漢字の使用率

3-2-3 根拠のなさ

次に、文章の質を低下させる要因として挙げられるのが、「思う」「だろう」などの推定表現を使用することによる根拠のなさである。また、一般的にも、レポートでの

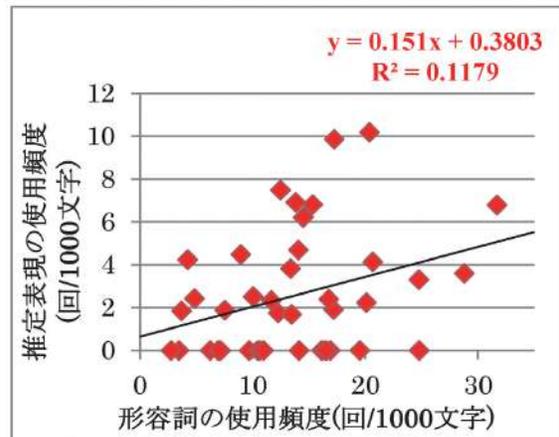
「思う」「感じる」といった表現は、主張を弱めてしまうため好ましくないとされている。

そこで、提出レポートの評価ごとにおける推定表現の使用率について分析した。ここでは、文章量による差異も考え、1000文字ごとにおける推定表現の使用頻度を出した(グラフ2)。その結果、やはり良質な文章であるほど、推定表現の使用頻度は少なかった。普通文と悪文における差異が殆どみられないのは、本レポートにおける課題が自分の体験談を踏まえて述べたものであるためと推測した。



グラフ2. 評価ごとにおける推定表現の使用頻度

また、形容詞は、情緒的表現が多いことから、推定表現の使用頻度と形容詞の使用頻度における相関関係について調べた(グラフ3)。その結果、有意水準5%において、推定表現の使用頻度と形容詞の使用頻度における相関関係はほぼないことがわかった。

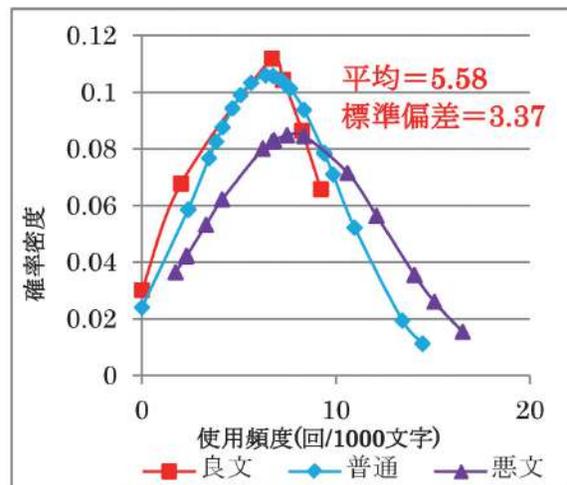


グラフ3. 推定表現と形容詞の使用頻度の相関

3-2-4 曖昧さ

文章を書くにあたって、同じ言葉を使わないというものがある [13]。それが最も顕著に現れているのが英語であるが、日本語においても文章作法としてそのように捉えられている。この同じ言葉が並ばないようにするための方法の1つとして、指示代名詞の使用が挙げられるが、指示代名詞の乱用は文意を曖昧にしてしまう。

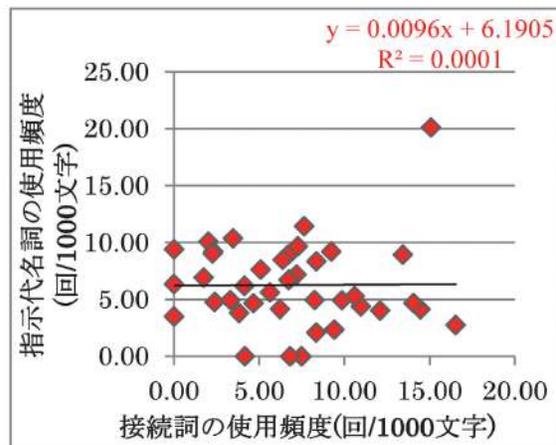
そこで評価ごとにおける指示代名詞の使用頻度について分析した(グラフ4)。その結果、良文であるほど指示代名詞の使用頻度は少ないことがわかった。ただし、良文と普通文における差異があまり見られないことから、サンプル数が増えた場合、双方間の差異はない可能性が考えられる。



グラフ4. 評価ごとにおける指示代名詞の使用頻度

しかしながら、指示代名詞は、接続詞の代用としても使用することができるという意見もある [14][15]。つまり、指示代名詞の使用頻度が少なくなることで、逆に接続詞の使用頻度が増えている可能性がある。接続詞が極端に少ない文章も理論構成が崩れるため問題であるが、多用は稚拙な文章に見えてしまう。

そこで、指示代名詞の使用頻度と接続詞の使用頻度について、相関関係があるか分析した(グラフ5)。その結果、有意水準5%において、有意差がなかったため、指示代名詞の使用頻度による接続詞の使用頻度の差があるのかどうか判定できなかった。



グラフ5. 指示代名詞と接続詞の使用頻度の相関

また、曖昧表現の要素として、「色々な機能がある」「色々な面がある」といった具体例がない表現や「～〇〇等」「～〇〇とかがある」といった具体的な例が1つしか挙げられていないのに、複数要素あるような曖昧表現が見受けられた。

3-2-5 文脈の繋がらなさ

最後に、本項目では、本学学生が文章を書くにあたって、不用意に用いやすい語句を洗い出した。不用意に用いやすい語句は、「たしかに」「ある意味」「いわゆる」と文頭に意味のない不要な装飾がされる場合と、

「具体的には」と書いてあるのに具体性がない、例文に対する例文といった「例を挙げると」の多用、「次に」といった繋がらないのに「まず」という表現が出てくるといったものが挙げられた。

4. 提案システムの設計・実装

4-1 提案システムの設計

4-1-1 形式的な誤り

- 文字数の指摘

本提案システムでは、送られてきた文章が指定文字数の8割以下であった場合、指定文字数を満たしていないと指摘することにした。

- 全角英数と半角カナ文字の指摘

本提案システムでは、半角カナ文字をレポートに不適切な文字とし指摘することにした。また、全角英数字についても、レポートにおいては半角英数字を推奨される [16] 場合が多いため、推奨項目として指摘することにした。

指摘の基準は、MeCab²⁾で形態素解析された単語を正規表現によりマッチさせ、全角英数字や半角カナ文字が混ざっていた場合とした。

- 1字下げの指摘

本提案システムでは、段落ごとに1字下げが行われているか確認する。段落ごとに文章解析を行った際に、改行しかない段落は、そのまま改行の表示をする。次に、文頭が空白文字(1字下げ)から始まり、その後に空白文字が連続しなかった場合、1字下げがされているため、解析した文章をそのまま表示する。空白文字が連続した場合は、

2) オープンソースの形態素解析エンジン

正しく1字下げがされていないため、1字下げができていないことを指摘する。また、文頭に空白文字(1字下げ)がなかった場合でも、文末に句点がない場合、見出しや参考文献などの可能性が高いため、例外として指摘を行わないようにする。句点がきていた場合の多くは、1字下げがされていないため、1字下げができていないことを指摘する。

4-1-2 文法の誤り

● である体・ですます体の混合の指摘

本提案システムでは、である体・ですます体の混在があった場合、レポートを書くにあたって一般的に推奨されている「である体」^[17]に直すよう指摘する。そのため、本提案システムでは、「ですます体」で統一された文章の指摘も行うことにした。

● 体言止めの指摘

本提案システムでは、形態素解析により句点の前の単語が名詞であった場合、体言止めであると判定し指摘する。

● 話し言葉の指摘

本提案システムでは、話し言葉や幼稚表現など、レポートにふさわしくない単語があった場合、csvファイルに登録した単語を読み込み、正規表現によりマッチさせることにより指摘する。

● ら抜き言葉の指摘

本提案システムでは、ら抜き言葉を形態素解析に従い指摘する。ら抜き言葉は、基本的に上一段または下一段活用の動詞+接尾語の「れる」によって成り立つため、その法則に従って指摘する。

1. 活用形の確認

形態素解析により、活用形が上一段または下一段活用の動詞の場合、ら抜き言葉の

可能性があるフラグを立てる。

2. 接尾語「れる」があるかどうか

次の単語を見ていく時、1でら抜き言葉のフラグが立っていた場合、接尾語「れる」があるかどうかを確認する。接尾語「れる」がある場合、ら抜き言葉である指摘をする。

また、否定形の場合は、接尾語「れる」の判定部分で、助動詞・活用形「特殊・ナイ」及び「特殊・ヌ」の判定を行い当てはまった場合、ら抜き言葉である指摘をする。

● い抜き言葉の指摘

本提案システムでは、ら抜き言葉を形態素解析に従い指摘する。い抜き言葉は、基本的に自立動詞+非自立動詞「てる」及び「でる」の基本形で成り立つため、その法則に従って指摘する。

1. 品詞の確認

形態素解析により、品詞が自立動詞の場合、い抜き言葉の可能性のあるフラグを立てる。

2. 活用形及び単語の確認

次の単語を取り出した時、その単語が非自立動詞の基本形で且つ「(立)てる」「(読)んでる」という単語であった場合、い抜き言葉の指摘を行う。

また、本提案システムでは、い抜き言葉の否定形の指摘は不可能である。い抜き言葉の否定形は、現在進行形か完了形かの違いで判定が異なってくるためである。例えば、「並べている」の否定形は「並べていない」であり、「並べてない」と書いた場合、い抜き言葉となる。しかし、「並べてある」の否定形の場合、「並べてない」となり、これは正しい文法である。この現在進行形か完了形かという判定は、形態素解析では不可能であるため、本提案システムでは未実装である。

● 単語の不統一の指摘

本提案システムでは、「こと」と「事」と

いった単語や「当たる」と「当る」といった送り仮名の不統一を指摘する。本研究では、単語の不統一は名詞、送り仮名の不統一は動詞で主に出現するものとしたため、それ以外の品詞での単語統一は指摘を行わない。

まず、形態素解析したファイルを読み込み重複単語の除外をした後、単語のソートを行う。単語のソートを行った後、それぞれの処理を以下の通りを行う。

1. 単語(名詞)の不統一

本研究では、単語の不統一を名詞に限定しているため、ソート後は名詞の抽出をし、前後の単語を比較する。この比較した単語の読みが同じだった場合、表層形(単語そのもの)が同じであるかどうか判定する。これが異なった場合、比較単語が双方とも漢字であるかどうかを判定する。これは、例えば「以降」と「移行」といったような全く違った意味であるが、読みが同じである単語の指摘を防ぐためである。双方とも漢字でなかった場合は、本提案システムでは単語の不統一と判定し、指摘を行う。

2. 送り仮名の不統一

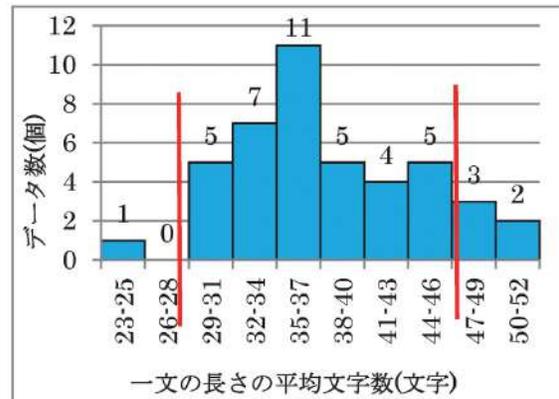
送り仮名の不統一は、多くの場合動詞において出現するため、ソート後は動詞の抽出をし、前後の単語を比較する。この比較した単語の読みが同じだった場合、単語の原形が同じであるかどうか判定する。これが異なる場合、本提案システムでは送り仮名の不統一と判定し、指摘を行う。

4-2 指摘指標の決定

指摘指標は、日本語表現 I のレポートを用いたヒストグラムによる分析で決定した。

● 一文の長さ(平均)

提案システムでは、1つの文章に対する一文の長さの平均についてグラフ6の結果から下限と上限の決定をおこなった。



グラフ6. 一文の長さの平均

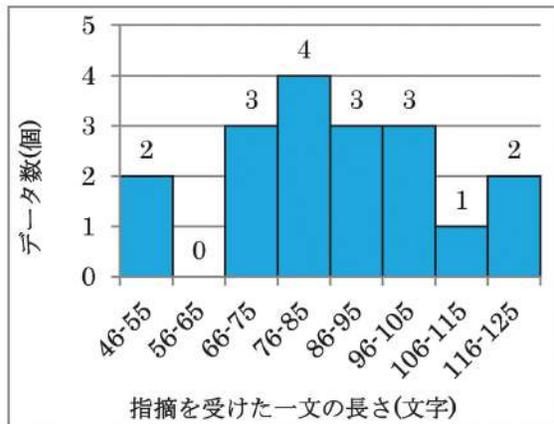
下限の指摘は、各一文が単文及び箇条書きであったり、word文章での体裁を整えるために不自然な改行が入ったりする可能性を示唆するために行う。決定方法としては、まず文献調査を行った。その結果、一文の文字数平均で、最も少ない文字数を挙げていたのが30文字から35文字¹¹⁸⁾であったことから一般的に30文字程度が限度であるとし、下限30文字を仮指標とした。次に、本分析に使用したレポートにおいてこの仮指標に該当した人数は、3人であった。このうち平均文字数が23文字であったレポートを分析すると、多くの単文が修正されていたことから本指摘は、正しいものとした。しかしながら、残り2人の平均文字数が29文字のレポートは、それぞれ評価がAとCであり、仮指標の数値があまり適切ではないと判断した。これらの結果から、本提案システムでは、一文の長さの平均下限は、28文字を本指標として決定した。

また、上限の指摘は、読み手にわかりやすい文章にするための重要な項目である。決定方法は、文献調査と本学教員へのヒアリング調査によるものとし、上限は、本学日本語表現の講義でも指導されている40文字を仮指標とした。次に、本分析に使用したレポートにおいてこの仮指標に該当した人数は、全体の約1/3である14人であった。更に、該当レポートの分析を行った結

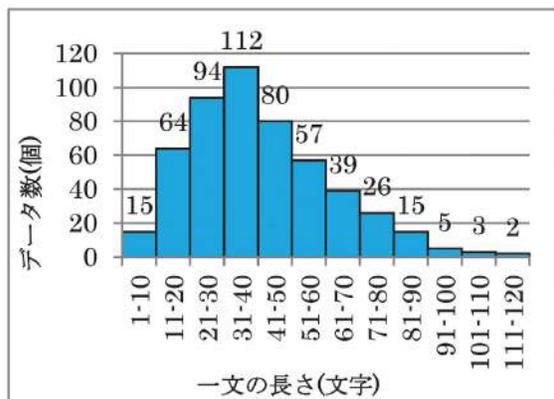
果、一文の平均文字数が41文字から45文字のレポート8部において、A及びBの評価を得ているレポートが3部あった。これは、良文のレポートのうち半数が指摘されることとなる。また、一文の平均文字数が41文字から45文字のレポート8部のうち、実際に一文が長いと指摘を受けているレポートは、1部のみであった。これらの結果から、仮指標の値はあまり適切ではないと判断し、本提案システムでは、一文の長さの平均上限は、46文字を本指標として決定した。

● 一文の長さ

一文の平均文字数の下限と上限が決まったところで、次に一文ごとの長さを指摘する指標をグラフ7、8の結果から決定した。



グラフ7. 指摘を受けた一文の長さ



グラフ8. 一文の長さ

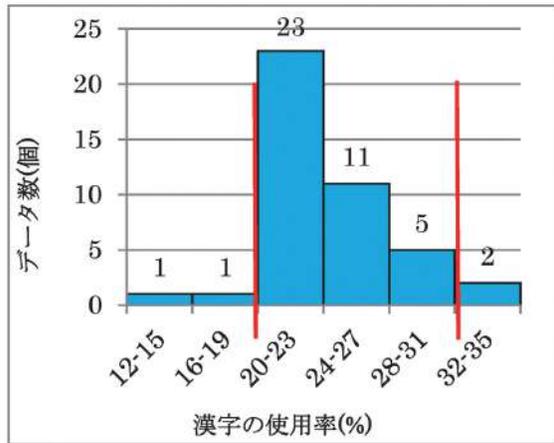
レポートの中で一文が長いと指摘を受けた一文を抽出した結果、18個のデータが得られた。そのデータから長さを分析すると最低が46文字、最高が118文字であった。一文の長さは、60文字を超えるとわかりにくくなる^[19]とされていることから、上限の仮指標を60文字とした。この仮指標を適用した場合、すべての一文のうち約2割、そして全レポートのうち約8割が指摘を受けることになった。更に、良文の分析を行った結果、65文字前後の一文も複数見受けられたため、これらの結果を踏まえ本提案システムでは、一文の長さを指摘する上限指標を65文字とした。

● 漢字の使用率

本提案システムでは、漢字使用率の指摘も行う。これは、漢字の使用率が少ない場合、ひらがなの羅列といったような読みづらい文章となっている可能性が高いためである。またその逆に、多すぎる場合も、過度な漢字変換をしている可能性があるため指摘を行うことにした。

漢字使用率の下限と上限は、グラフ9の結果から決定した。まず、漢字の使用率の下限について、文献では20%以下の文章は締まりがない文章とされている^[20]こと、また、レポート分析により良文の評価を得ている文章でも漢字使用率が20%であることから、20%を本指標とした。また、上限については、文字数と漢字使用率を同時にチェックするWEBライティング用ツール^[21]の基準を使用することにした。本ツールでは、漢字の使用率の基準を、新聞の社説(約50%)>マニュアル(約40%)>教科書(約30%)>雑誌(約30%)>WEB(約25%)であるとし、一般文章における判定基準を、20%以下は少ない、20%を超えて30%以下は適切、30%を超えると多いとしている。この

基準から、漢字使用率の上限は30%を本指標とした。

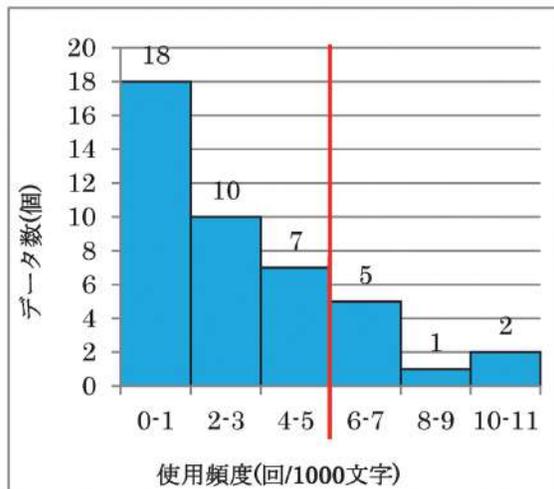


グラフ 9. 漢字の使用率

- 推定表現の使用頻度

本提案システムにおける推定表現の使用頻度の指摘は、グラフ 10 の結果から決定した。グラフにおける推定表現の使用回数は、1000 文字中出现する回数である。

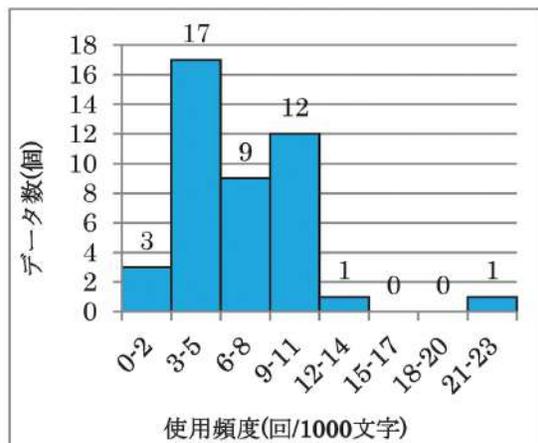
本分析で使用したレポートは、課題が自分の体験談を踏まえて述べたものであるため、「思う」「感じる」といった推定表現が通常より多いものと考えた。そのため、推定表現の使用回数の上限は、良文における最高使用回数の 5 回とした。



グラフ 10. 推定表現の使用頻度

- 指示代名詞の使用頻度

本提案システムにおける指示代名詞の使用頻度の指摘は、グラフ 11 の結果から決定した。指示代名詞の使用は、一文の中で 2 回以上あると好ましくないものとされている^[22]。本提案システムでは、一文の長さの平均上限が 46 文字であることから、一文で 1 度ずつ指示代名詞が使われるとして、1000 文字中 12 回以上の指示代名詞が出現した場合、指摘するものとした。



グラフ 11. 指示代名詞の使用頻度

4-3 提案システムの実装

本提案システムは、学生の煩わしさを少しでも解消するため Web アプリケーションとした。提案システムは、図 1 のように Web を経由して文章を投稿すると、MeCab による形態素解析と一文の長さ、漢字の使用率といった文章や先ほど形態素解析を行った単語の解析を行う。そしてこれらの解析を基に、指摘画面の生成を行い、結果画面を返すようになっている。

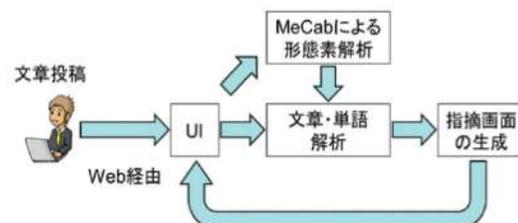


図 1. 提案システムの指摘画面の生成

5. 試作システムの評価・検証

本項目では、試作システムの指摘と教員による指摘の比較を行い、本試作システムの指摘の有効性と教員の負担軽減に対する有効性を検証した。

比較対象は、分析にも使用した日本語表現Ⅰのレポート計43部である。試作システムの指摘率*は、下記の式(1)によって算出する。

$$\text{指摘率} = \frac{\text{教員による指摘総数のうち、本ツールによる指摘総数}}{\text{教員による指摘総数}} * 100$$

・・・(1)

5-1 形式的な誤り

文章量、氏名の記載不備、見出しの欠落などのレポートの形式について、本試作システムにおける指摘は、20.0%可能だった。詳細は、次の通りである。

- 文章量(指定の文字数)

本試作システムでは、指定の文字数の基準を8割以上とした。この基準における教員の指摘に対する指摘率は、100%であった。

また、本試作システムの指摘結果は、43のサンプルのうち23のレポートにおいて指定文字数が足りなくなつた。しかしながら、教員による添削で明確に文章量について指摘しているのは、2部である。本項目に関しての考察は、2つ挙げられる。1つは、訂正箇所や削除箇所が多く、完成されたレポートではないためである。つまり、文章量以前の問題であり、これから修正が入ることを考慮し、現時点での文章量指摘は重要性が低いものとされていると考えた。もう1つは、明確に文章量についての指摘がされていないだけで、具体性をもっていない内容について更なる説明を促す指摘があるためである。この具体性をもっていな

い内容に説明を付け足すことで、文章量が足りると判断され、指摘されていないものであると考えた。

- 課題内容に不適切な見出し

本項目は、文章内容に携わるものであるため、試作システムでの指摘は不可能であった。レポートの形式における誤りのうち、文章量以外の指摘は、すべてこれに当てはまる。

- 全角英数字・半角カタカナ

本検証で使用したレポートは、手書きの文章であるため、全角英数字及び半角カタカナの判別は、困難であった。ただし、原稿用紙上におけるアルファベットの書き方を誤っているレポートは多数見受けられた。

- 段落の一字下げ

提出レポートにおいて段落の1字下げは、正確にされていたため、試作システムでも指摘はなかった。本検証において手書きの文章は、段落の1字下げの意識が強いということが考察される。

5-2 文章ルール(文法)の誤り

ですます体・である体の混在、体言止めなどの基本的な文法の誤りについて、本試作システムにおける指摘は、98.2%可能だった。詳細は、次の通りである。

- ですます体・である体の混在

提出レポートにおいて、ですます体・である体の混在は見受けられなかった。また、ですます体の文体で書かれたレポートも見受けられなかった。

- 体言止め

提出レポートの体言止めについて、教員の指摘に対する指摘率は、100%であった。

- 話し言葉

話し言葉については、教員の指摘コメントを基にしたため、教員の指摘に対する指摘率は、100%であった。しかし、話し言葉のコーパスは、一般的にレポートに適していないとされる基本的な用語と本レポートにおける教員の指摘コメントを基にしているため、その指摘は完全とは言えない。

- ら抜き言葉

提出レポートのら抜き言葉について、教員の指摘に対する指摘率は、100%であった。

- い抜き言葉

提出レポートにおいて、い抜き言葉は見受けられなかった。しかしながら、試作システムは、い抜き言葉の否定形の指摘が不可能であることから、100%の指摘は難しいものであると考える。

- 単語の不一致

提出レポートにおいて、単語の不一致を指摘されているコメントは、数字が漢字とアラビア数字が混ざっていたレポートにしかされていなかった。そのため、本項目における教員の指摘に対する指摘率は、100%となった。しかしながら、本試作システムでの指摘の結果は、「こと」と「事」、「とき」と「時」、「できる」と「出来る」などの単語表記の不一致が24のレポートで見受けられるようになった。本検証における考察としては、本検証に使用したレポートは手書きの文章であるため、非常に漢字の誤字が目立っていた。そのため、誤字の修正の優先度が高く、単語の不一致に対する優先度は低いものなのではないかと考えた。

- その他

検証で使用したレポートの文章ルールにおける誤りのうち、上記の項目以外にカギ括弧の使い方の誤りが指摘されていた。カギ括弧の使い方は、文章内容によって変わってくるため、本試作システムでの指摘は不可能であった。

5-3 文章の質の低下要因

本試作システムでは、一文の長さ、主述のねじれ、曖昧表現の多用といった文章の質の低下要因の指摘が55.0%可能だった。詳細は、次の通りである。

- 一文の長さ(平均)

検証に使用したレポートでは、一文の長さの平均についての指摘はなかったため、有効性は検証不可能である。しかし、本試作システムにより、不自然な改行が入った文章や箇条書きが多い文章の数は、減るのではないかと予測する。また、分布図からも一文の長さの平均が悪文では2極化していることから、本項目は有効性があるものだと考えた。

- 一文の長さ

提出レポートの一文の長さについて、教員の指摘に対する指摘率は、9割弱であった。また、本試作システムの指摘結果は、すべてのレポートから約80箇所において一文が長いとなった。これは、教員による指摘の4倍以上を本試作システムにおいて指摘していることになる。一文の長さについては、諸説が多く存在するため、本研究でもまだ改善の必要がみられた。

- 述語のねじれ

主述のねじれは、文章内容に携わるものであるため、本試作システムにおける指摘はほぼ不可能であった。本試作システムで

は、「私の考えは～考える。」といった二重表現の指摘のみ可能である。また、主述のねじれを指摘された一文は同時に、一文の長さについても指摘されているため、本試作システムによる一文の長さの指摘により改善がみられる可能性があると考えた。

● 漢字の使用率

本検証に使用したレポートでは、漢字の使用率についての指摘はなかったため、有効性は検証不可能である。ただし、漢字使用率の分布を見ても、極端に漢字使用率が低い文章は低い評価となっているため、本項目は有効性があるものだと考えた。

● 推定表現の使用頻度

提出レポートの推定表現の使用頻度について、教員の指摘に対する指摘率は、100%であった。また、本試作システムの指摘結果は、提出レポート43部のうち8部が推定表現の使用頻度について指摘を受けているとなった。ただし、本検証に使用したレポートは、自分の体験談を踏まえて述べたものであるため、本レポートに対しては妥当であると考えた。

● 指示代名詞の使用頻度

本検証に使用したレポートでは、指示代名詞の使用頻度についての指摘はなかったため、有効性は検証不可能である。

これらの結果から、本試作システムは、教員による指摘総数のうち約5割を指摘したこととなった。これにより、本試作システムは教員の負担軽減が可能であり、本学学生の文章力向上に寄与するものであると考えた。

6. まとめ

本稿では、本学学生の日本語力及び提出レポートの問題点について挙げ、これによる本学教員の悩みと負担について述べた上で、本学学生の日本語文章力向上を本研究の目的とした。この目的を達成するために、本研究では2つの方法を選んだ。1つは、学生が自ら改善箇所を確認し、自発的に推敲をすることで、同様の問題を繰り返させないようにすることである。もう1つは、教員が従来、基本的な形式・文法の誤りといった箇所の指摘に割かれていた時間を軽減することである。

第2章では、既存類似システムの比較と有効性についての確認を行った。その結果、これら既存のシステムは、指摘精度が低いものか、指摘精度が高くても本学学生が利用するにあたって問題点があった。そこで、本学学生の日本語文章力向上のために、機械処理による文章の改善箇所を自動的に指摘する本学学生に向けた自発的に文章の推敲を促すためのシステムを提案した。また、提案システムを試作するにあたって、本学学生に向けたシステムとするために、文献調査及び教員へのヒアリング調査を通じて文法・形式的な誤りといった基本的な指摘項目を洗い出した。それと同時に、本学学生の提出レポートについて、文章の質低下要因を分析し明確化し、質低下の主要な原因となる指摘項目を挙げた。

第4章では、提案システムを実装するための処理内容について述べた。また、前章で挙げた質低下の主要な原因となる指摘項目の指摘指標を統計的手法によって分析を行い決定した。試作システムをWebアプリケーションの形で実装し、これらの指標をもとにシステムの指摘画面を生成し、結果をブラウザ上に表示する構造とした。

さいごに、既存システムの比較・評価・検証を行った。また、本試作システムの指摘と教員による指摘の比較によって、本試

作システムの指摘の有効性と教員の負担軽減に対する有効性を検証した。その結果、本試作システムは、教員による指摘総数のうち約5割が指摘可能であり、教員の負担を軽減することができるものと考えた。また、これにより少なくとも本学学生の文章力向上に寄与可能であることを確認した。

「日本語文章表現授業に対する作文支援システム導入手法の開発」『日本教育工学会研究報告集』10(1), pp.93-100, 日本教育工学会

[5] 吉岡 友治(2013)『いい文章には型がある』PHP 研究所.

[6] 野口 悠紀雄(2002)『「超」文章法』中央公論新社.

[7] 山内 志郎(2001)『ぎりぎり合格への論文マニュアル』平凡社.

[8] 木下是雄(1994)『レポートの組み立て方』筑摩書房.

[9] 村岡 貴子・因 京子・仁科 喜久子(2013)『論文作成のための文章力向上プログラム—アカデミック・ライティングの核心をつかむ』大阪大学出版会

[10] 斎藤 美奈子(2002)『文章読本さん江』筑摩書房.

[11] 久恒 啓一(2008)『図で考えれば文章がうまくなる』PHP 研究所.

[12] 三省堂編修所(1995)『何でもわかることばの知識百科』三省堂.

[13] 山内 志郎(2001)『ぎりぎり合格への論文マニュアル』平凡社.

[14] 高山 瞭「文章力アップの方法／無料講座&原稿添削リライト案内」,
<<http://bunsyounet.net/kouza1/09syoryaku.html>> 2015年1月7日最終アクセス

[15] 石黒 圭著(2008)『文章は接続詞で決まる』光文社.

[16] 関西学院大学総合政策学部(2012)『基礎演習ハンドブック—さあ、大学での学びをはじめよう！(改訂新版)』関西学院大学出版会.

[17] 金沢大学 共通教育機構「レポート作成

参考文献

[1] 下條 正純(2010)「論述式答案に見る日本人大学生の日本語諸問題」『佐賀大学留学生センター紀要』9, pp.47-59, 佐賀大学

[2] 『東京読売新聞』記事「大学の實力 教育力向上の取り組み(上)」(2011年7月6日)

[3] 日本語検定委員会『「大学生の日本語力」第1期・第2期調査レポート』(2012年3月1日)

[4] 山口 昌也, 北村 雅則, 棚橋 尚子(2010)

の手引き」,
<<http://www.kanazawa-u.ac.jp/faculty/kiiko/students/report.pdf>>2015年1月7日最終アクセス

[18] 辰濃 和男(1994)『文章の書き方』岩波書店.

[19] 樺島 忠夫(1980)『文章構成法』講談社.

[20] 『東京読売新聞』記事「編集手帳」(2010年11月27日)

[21] 文字数と漢字使用率を同時にチェック
| WEB ライティング用ツール
<http://www.gal-moji.com/moji/kanji_ritsu.asp>2015年1月7日最終アクセス

[22] 又平 恵美子, 竹内 純人, 大野 博之
(2010)「文章作成支援ツールによる日本語文章力育成」『論文誌 ICT 活用教育方法研究』13(1), pp.16-20, 私立大学情報教育協会

〈論 文〉

集合間の距離に基づく重み付きカーネル k -平均法のパラメータ探索法

柳 信一*

A Search Algorithm for Gaussian Parameter of Weighted Kernel k -means Method Based on the Distance between the Set

YANAGI SHINICHI*

要旨

本論文では、集合間の距離に基づき重み付きカーネル k -平均法のガウス関数のパラメータを逐次的に計算する手法を提案する。重み付きカーネル k -平均法は、代表的なクラスタリング手法である k -平均法に基づいており、クラスタ同士の境界が非線形であるデータの分類が可能である。しかし、計算結果は距離計算に用いるガウス関数のパラメータに強く依存し、パラメータ調整が難しいという問題点がある。提案手法は、集合間の距離に基づき初期クラスタを決定し、その初期クラスタを用いてパラメータの探索を行う。いくつかの人工データと実データを用いて計算機実験を行い、クラスタ間が十分な距離で分離しているデータに対する提案手法の有効性を示す。

Abstract

This paper proposes a weighted kernel k -means algorithm to compute a Gaussian parameter based on the distance between the set. The weighted kernel k -means algorithm is based on the k -means algorithm which is a well known clustering algorithm, and makes it possible to identify clusters that are non-linearly separable in input space. However, a conclusion identifying clusters with kernel k -means depends heavily on chosen Gaussian parameters which are used for computing distance between data and determining an optimal Gaussian parameter is difficult. The proposed algorithm identifies clusters with the original weighted kernel k -means algorithm after making a initial clusters based on the distance between the set and searching a Gaussian parameter. An experimental comparison in some artificial and real data set shows that a performance of the proposed algorithm is efficient for a data in which each cluster is separated with adequate gap.

キーワード

クラスタリング, k -平均法, カーネル法, ガウス関数, パラメータ

1. まえがき

クラスタリングとは、データ集合をある基準によって分類することである。 k -平均法 (MacQueen, 1967) は代表的なクラスタリング手法であり、アルゴリズムが単純で、事前に必要とするパラメータがクラスタ数のみであるという利点のため、クラスタリングを必要とする計

算過程において利用されることが多い。しかし、距離計算にユークリッド距離を使用するため、各クラスタの分離境界が非線形となるデータの分類に適していない。

カーネル k -平均法 (Girolami, 2002) は、 k -平均法に対してカーネル法 (Muller, Mika, Ratsch, Tsuda and Scholkopf, 2001) を適用した手法であり、非線形に分離されているクラスタの分類が可能である。しかし、計算結果が距離計算に使用するカーネル関数のパラメータに敏感であり、カーネル関数のパラメータの調

* 北海道情報大学経営情報学部システム情報学科講師,
Lecturer, Department of Business and Information Systems, HIU

整が困難であるという問題点がある。

一方で、与えられたデータ集合をデータ間の類似度を定義することでグラフとみなし、クラスタリングをグラフのカット問題に帰着するスペクトラルクラスタリング (Ng, Jordan and Weiss, 2002) がある。スペクトラルクラスタリングは計算過程で k -平均法を利用する手法であり、カーネル k -平均法同様、非線形に分離されているクラスタの分類が可能であるものの、類似度の設計が結果を大きく左右するため類似度のパラメータ依存度が高い。さらに、固有値問題を解く必要があるため、数値計算を必要とする。これに対して、Dhillon (Dhillon, Guan and Kulis, 2004) らは、カーネル k -平均法の距離計算に重み付き距離を適用した重み付きカーネル k -平均法 (Dhillon, Guan and Kulis, 2004) を提案している。重み付きカーネル k -平均法の最適化問題は数学的にスペクトラルクラスタリングと等価であり、数値計算を必要とせず距離計算のみで計算可能な手法として有効性を示している。

上記の手法で使用するカーネル関数、および類似度関数は、ほとんどの場合がガウス関数であり、パラメータはデータ間の距離に関するスケール調整の意味を持つ。適切なパラメータを選択する手法としては、Zelnik-Manor ら (Zelnik-Manor and Perona, 2004) が、スペクトラルクラスタリングにおいて各データの類似度に対して、同一のパラメータではなく、それぞれのデータの近傍距離を利用する手法を提案し有効性を示しているものの、近傍の度合いに関する根拠が十分に示されていない。また、Yu ら (Yu, Tranchevent, De Moor and Moreau, 2011) は、スペクトラルクラスタリングとパラメータの最適化を交互に行う手法を提案しているが、事前に解となるパラメータの有限列を用意する必要があり、依然としてパラメータ選択の困難さが残る。スペクトラルクラスタリング以外では、文献 (柳, 2014) において、Yu らの手法と同様、カーネル k -平均法とパラメータの更新を交互に行う手法を提案し、計算機実験によりいくつかのデータに対して有効性を示しているものの、クラスタ数やデータの分布形状によっては結果が不安定となる場合がある。

本論文では、文献 (柳, 2014) の手法において、まず集合間の距離を基に初期クラスタを作成し、初期クラスタを利用してカーネル関数のパ

ラメータを計算するように改良したアルゴリズムを提案する。いくつかの人工データと実データを用いて比較実験を行い、提案手法はクラスタ間が十分な距離で分離しているデータに対しては有効であることを示す。

以下、本論文は次のように構成されている。2章で従来の重み付きカーネル k -平均法を説明する。また、3章で重み付きカーネル k -平均法の従来のパラメータ決定に関する研究を述べる。4章では新たに重み付きカーネル k -平均法のパラメータ決定法を提案し、5章では従来手法と提案手法の比較実験を行い、提案手法の有効性を検討する。6章では本論文のまとめを行う。

2. 重み付きカーネル k -平均法

クラスタリングとは、対象とする n 個のデータからなるデータ集合 $X = \{x_i \mid i = 1, 2, \dots, n, \forall x_i \in R^d\}$ を何らかの基準により k 個の部分集合 $C_j = \{x \mid \forall x \in X\}$ に分類することであり、この部分集合 $C_j (j = 1, 2, \dots, k)$ をクラスタと呼ぶ。一般的にクラスタリングを必要とする場面では、データ集合のみが与えられ、クラスタ数 k は未知であることもあるが、本論文では k を既知のものとして取り扱う。

2-1 k -平均法

k -平均法は各データ $x_i \in X (i = 1, 2, \dots, n)$ と、クラスタの中心 $m_j \in R^d (j = 1, 2, \dots, k)$ との距離の総和を最小とする最適化問題として式 (1) で定式化される。

$$\begin{aligned} \min_{C_j} & \sum_{j=1}^k \sum_{x_i \in C_j} \|x_i - m_j\|^2, \\ \text{s.t.} & \bigcup_{j=1}^k C_j = X, \\ & C_j \cap C_l = \emptyset, 1 \leq j, l \leq k, j \neq l. \end{aligned} \quad (1)$$

式 (1) の $\|\cdot\|$ は L_2 ノルムである。式 (1) の解はクラスタ $C_j (j = 1, 2, \dots, k)$ であり、クラスタ中心 m_j は式 (1) より、 C_j に属するデータ数 $|C_j|$ を用いて式 (2) のように求まる。

$$m_j = \frac{1}{|C_j|} \sum_{x \in C_j} x, (j = 1, 2, \dots, k). \quad (2)$$

式 (1) の定式化は暗に各クラスタが凸形状となっていることを仮定しているため、線形分離不可能なクラスタからなるデータの分類に

適していない。

2-2 カーネル k-平均法

カーネル k-平均法 (Girolami, 2002) は k-平均法にカーネル法を適用した手法である。カーネル法は、無限次元まで含めた、現在の空間の次元数 d よりはるかに大きい $D (\gg d)$ 次元空間上に、写像 ϕ により $x \in R^d$ を非線形写像し、空間 R^D 上でデータの線形分離を試みる方法である。最大の特徴は、計算量削減のため実際の写像 $\phi(x)$ 自体の計算は行わず、式 (3) のカーネル関数を利用して $\phi(x)$ と $\phi(x')$ の内積のみを使用することで問題を解くことである。

$$K(x, x') = \phi(x) \cdot \phi(x'). \quad (3)$$

具体的なカーネル関数としては、カーネル関数が高次元空間における内積となっていることを保証するマールセルカーネル (Máté, 1989) が望ましく、特に多くの研究では、代表的なマールセルカーネルである式 (4) のガウスクーネルが使用されている。

$$K(x, x') = \exp\left(\frac{-\|x - x'\|^2}{\delta^2}\right). \quad (4)$$

式 (4) において、 δ はスケールパラメータを表す。カーネル k-平均法では、式 (1) の最適化問題は式 (5) のように表現される。

$$\begin{aligned} \min_{C_j} & \sum_{j=1}^k \sum_{x_i \in C_j} \|\phi(x_i) - M_j\|^2, \\ \text{s.t.} & \bigcup_{j=1}^k C_j = X, \\ & C_j \cap C_l = \emptyset, 1 \leq j, l \leq k, j \neq l. \end{aligned} \quad (5)$$

また、式 (2) のクラスタ中心は式 (6) のように表現される。

$$M_j = \frac{1}{|C_j|} \sum_{x \in C_j} \phi(x), M_j \in R^D (j = 1, 2, \dots, k). \quad (6)$$

写像 ϕ が未定義の場合、式 (6) のクラスタ中心を計算することはできないが、クラスタ中心 $M_j \in R^D$ とデータ $\phi(x) \in R^D$ の距離は式 (7) で計算することができる。

$$\begin{aligned} & \|M_j - \phi(x)\|^2 \\ &= \|M_j\|^2 - 2M_j \cdot \phi(x) + \phi(x) \cdot \phi(x) \\ &= \frac{1}{|C_j|^2} \sum_{x'', x' \in C_j} K(x'', x') - \frac{2}{|C_j|} \sum_{x' \in C_j} K(x, x') \\ & \quad + K(x, x), (j = 1, 2, \dots, k). \end{aligned} \quad (7)$$

2-3 スペクトラルクラスタリング

カーネル k-平均法は線形分離不可能なクラスタからなるデータの分類が可能であるものの、高次元空間上のデータ分布が球形状であることを仮定しているため分類能力には限界がある。一方で、スペクトラルクラスタリングはデータ $x \in X$ をグラフの節点とみなし、データ間の類似度を定義することで、クラスタリングをグラフのカット問題に帰着させる手法である。具体的には、目的関数を定義し、与えられたグラフの節点集合 V を目的関数が最小となるような部分グラフ V_1, V_2, \dots, V_k への分割を求める問題である。様々な目的関数が提案されており (Chan, Schlag and Zien, 1994; Shi and Malik, 2000; Yu and Shi, 2003), 式 (8) の Normalized Cut (Shi and Malik, 2000; Yu and Shi, 2003) が代表的である。

$$NCut(V, K) = \min_{V_1, V_2, \dots, V_k} \sum_{j=1}^k \frac{\text{links}(V_j, V - V_j)}{\text{links}(V_j, V)}. \quad (8)$$

ここで、 $K = [k_{ij}]$ は節点 v_i と v_j の類似度 k_{ij} を要素とする類似度行列である。類似度としては、式 (4) のガウス関数がよく使われる。そのため、パラメータ δ が分割に大きな影響を与える。類似度行列 K の要素をカーネル関数としたときはカーネル行列とも呼ばれる。また、 $\text{links}(A, B)$ は節点 $a \in A$ と節点 $b \in B$ の類似度の総和である。部分グラフの割り当ては離散最適化であるため、k-平均法同様 NP 困難であるが、Ncut は式 (9) の行列の固有値問題に緩和できる。

$$D^{-1/2}(D - K)D^{-1/2}. \quad (9)$$

ここで、式 (9) の行列 D は、節点 v_i の次数 $d_i = \sum_{j=1}^n k_{ij}$ を対角成分とする対角行列である。式 (9) の上位 k 個の固有値に対応する固有ベクトル $z_j (j = 1, 2, \dots, k)$ を求め、第 j 列を z_j とする行列 $Z = [z_1, z_2, \dots, z_k]$ の第 i 行をデータとみなして k-平均法を行いクラスタリングを達成する。

2-4 重み付きカーネル k -平均法

スペクトラルクラスタリングは、うまく類似度行列の設計ができていれば、最終的に分類を行う k -平均法における初期クラスタへの依存が低くなり、さらに、線形分離不可能なクラスタからなるデータの分類にも適している。一方で、固有値問題を解く必要があるため数値計算を必要とする。これに対して、Dhillon(Dhillon et al., 2007) らは、データ間の距離計算のみで問題を解くことができる重み付きカーネル k -平均法を提案した。重み付きカーネル k -平均法は式 (5) の最適化問題の目的関数を式 (10) のように、各データ x_i の重み w_i を考慮した形式に変換した手法である。

$$\begin{aligned} \min_{C_j} & \sum_{j=1}^k \sum_{x_i \in C_j} w_i \| \phi(x_i) - M_j \|^2, \\ \text{s.t.} & \bigcup_{j=1}^k C_j = X, \\ & C_j \cap C_l = \emptyset, 1 \leq j, l \leq k, j \neq l. \end{aligned} \quad (10)$$

したがって、式 (10) よりクラスタ中心は式 (11) となる。

$$M_j = \frac{\sum_{x_i \in C_j} w_i \phi(x_i)}{\sum_{x_i \in C_j} w_i}, M_j \in R^D (j = 1, 2, \dots, k). \quad (11)$$

式 (11) より、クラスタ中心 $M_j \in R^D$ とデータ $\phi(x_i) \in R^D$ の距離は式 (12) で計算できる。

$$\begin{aligned} & \| M_j - \phi(x_i) \|^2 \\ &= \| M_j \|^2 - 2M_j \cdot \phi(x_i) + \phi(x_i) \cdot \phi(x_i) \\ &= \frac{\sum_{x_t, x_l \in C_j} w_t w_l K(x_t, x_l)}{(\sum_{x_i \in C_j} w_i)^2} - \frac{2 \sum_{x \in C_j} w_i K(x_i, x)}{\sum_{x_i \in C_j} w_i} \\ & \quad + K(x_i, x_i), (j = 1, 2, \dots, k). \end{aligned} \quad (12)$$

式 (10) の問題は、重み w_i と $K(x_i, x_j)$ を i 行 j 列の要素とするカーネル行列 K を適切に設定することにより、いくつかの種類目的関数のスペクトラルクラスタリングと数学的に等価になることが証明されている(Dhillon et al., 2007)。本論文で扱う Ncut の場合は、 x_i の次数 $d_i = \sum_{j=1}^n K(x_i, x_j)$ を対角成分とする対角行列 D と式 (4) のガウス関数を要素とする類似度行列 A により、式 (12) の $K(x_i, x_j) (1 \leq i, j \leq n)$ を要素とするカーネル

行列 K を $K = D^{-1}AD^{-1}$ とし、各データの重みを対角成分とする対角行列 W を $W = D$ としなければならない。すなわち、 $w_i = d_i$ とする。ただし、実際には $D^{-1}AD^{-1}$ の正定値性を保証するため正の実数値 σ を用いた正則化項を加え $K = \sigma D^{-1} + D^{-1}AD^{-1}$ とする必要がある。 σ は原則として正の値であるがデータの分布形状によっては負の値にした方が良好な結果を得る場合もあり(Dhillon, Guan and Kulis, 2004) 調整が難しい。そこで本論文では、厳密には等価とならないとされているが(Dhillon, Guan and Kulis, 2007), $W = D^{-1}, K = A$ とした。

式 (10) の問題は、可能な C_j の選択に関して組合せ的な探索を必要とする離散最適化であるため NP 困難となる。したがって、局所解の出力を認める以下の発見的アルゴリズムを用いて計算する。

Algorithm 1 入力: $X, k, \delta, C_1^{(1)}, C_2^{(1)}, \dots, C_k^{(1)}$

- 1 繰返し番号 t を $t = 1$ で初期化する。
 - 2 各データに対して各クラスタ $C_j^{(t)}$ の中心との距離を式 (12) により計算し、最も近いクラスタ中心のクラスタに割り当てる。
 - 3 2の結果から式 (10) の目的関数を再計算し、変化が無ければ $C_j^{(t)} (j = 1, 2, \dots, k)$ を出力して計算を終了する。そうでなければ $t = t + 1$ として 2へ戻る。
-

Algorithm 1 の入力 $C_j^{(1)} (j = 1, 2, \dots, k)$ は初期クラスタである。 k -平均法とカーネル k -平均法も基本的には Algorithm 1 で計算を行い、初期クラスタは、対象データ $x \in X$ をランダムに割り当てることが多い。しかし、重み付きカーネル k -平均法は初期クラスタ依存度が高く、初期クラスタとして、対象データ $x \in X$ をランダムに割り当ててもうまく分類できない。そこで、Dhillon らは、データをグラフの節点とみなし適切な枝でグラフを構成した後、グラフの粗大化(Karypis and Kumar, 1998) と局所探索(Dhillon, Guan and Kogan, 2002) により初期クラスタを決定している。

グラフの粗大化は、節点集合 V 、枝集合 E 、類似度行列 K からなるグラフ $G(V, E, K)$ が入力として与えられたとき、グラフ G の規模が小さくなるように粗く表現したグラフ

$G'(V', E', K')(|V| > |V'|)$ を作成し、問題を解く手法である。データ集合 X を節点集合 V とみなし、類似度行列 K をカーネル行列とする。ランダムに選択した $x \in V$ に対して式 (13) を満たす探索済みではない節点 $y \in V$ を選択し、 x と y を一つの節点としてまとめる。

$$\max_{(x,y) \in E} \frac{e(x,y)}{w(x)} + \frac{e(x,y)}{w(y)} \quad (13)$$

ここで、式 (13) の $e(x,y)$ は x と y の類似度で、 x と y が複数個の節点からなるときはそれらの類似度の和となる。 $w(x_i)$ は重み w_i と等価であり、複数個の節点のときには、やはり重みの和となる。式 (13) を満たす y が見つければ探索済みとし、 x はいずれにしても探索済みとする。全ての節点が探索済みとなった時点で、粗大化した節点を新しい節点とし、同じ操作を段階的に繰返す。ある段階における節点、つまりデータ集合の数が $5k$ 以下であれば、その節点集合をデータ集合とみなして重み付きカーネル k -平均法を実行する。次に、得られたクラスタリング結果に関して、粗大化を一段階解除する。節点の数は $5k$ よりおおきくなり、その節点集合をデータ集合、前段階のクラスタリング結果を初期クラスタとして、再び重み付きカーネル k -平均法を実行する。以下、粗大化が全て解除され、元のデータ集合が復元されるまで繰り返す。

さらに、各段階で粗大化を解除し、重み付きカーネル k -平均法を実行した後、局所探索を行う。局所探索は、ある一つのデータを現在のクラスタから他の異なるクラスタに割り当て変更した場合の式 (10) の目的関数の変化を観察する手法である。全データに対して評価を行い、最終的に目的関数が最小となるデータのみの割り当て変更を行う。この処理を目的関数が減少しなくなるまで繰返し行い、結果として得られたクラスタを、次の粗大化解除後の初期クラスタとする。

3. パラメータ選択に関する研究

3-1 Zelnik-Manor らの手法

Zelnik-Manor (Zelnik-Manor and Perona, 2004) らは、スペクトラルクラスタリングにおいて、ガウス関数を類似度としたときのパラメータを自動的に決定する方法を提案している。データの分布における局所的なスケールを考慮する方法であり、カーネル行列の各要素

$k_{ij}(1 \leq i, j \leq n)$ を式 (14) で決定する。

$$k_{ij} = \exp \left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{\sigma_i(m)\sigma_j(m)} \right). \quad (14)$$

ここで、式 (14) の $\sigma_i(m)$ は x_i の m 近傍点までの距離である。Zelnik-Manor らは、 m は次数に考慮して決定する必要があるとしているものの、詳細な議論はしていない。しかし、実験では $m = 7$ と固定して良好な結果を得ている。

3-2 Yu らの手法

Yu ら (Yu, Tranchevent, De Moor and Moreau, 2011) は、スペクトラルクラスタリングにおけるカーネル行列を、一種類のパラメータを用いて一つ用意するのではなく、式 (15) のように複数のパラメータを用いて用意した各カーネル行列の線形和とすることで、パラメータ推定の困難さを緩和する手法を提案している。

$$\Omega = \sum_{r=1}^p \theta_r G_r, \forall \theta_r \geq 0, \sum_{r=1}^p \theta_r = 1. \quad (15)$$

ここで、式 (15) の G_r は $G_r = PK_rP$ であり、 K_r は r 番目のカーネルパラメータを用いて用意したカーネル行列、 P は $P = I - (1/n)zz^T$ によりデータの中心を原点に強制する行列で、 I は単位行列、 z は要素が全て 1 の列ベクトルである。また、 δ は問題調整のパラメータである。式 (15) より、事前に p 個のカーネルパラメータを用意した後、 $\theta_r (r = 1, 2, \dots, p)$ を推定する必要があるが、Yu らは、まずスペクトラルクラスタリングを行い、得られたクラスタリング結果を教師ラベルとして多クラスに対するカーネル判別分析 (Mika, Ratsch, Weston, Scholkopf and Mullers, 1999) を行うことで θ_r を推定している。任意の判別軸に対してクラス間の散布を最大にするよう、適当な判別軸から始めて、その判別軸に対する θ_r を推定し、得られた θ_r で構築しなおしたデータに対して最適となる新しい判別軸を推定することを、クラス間散布が変化しなくなるまで繰り返す。正則化項 $G_{p+1} = I$ も加え、連続量である任意の判別軸に対して有限個の $\theta_r (r = 1, 2, \dots, p+1)$ を決定する半無限計画問題として、式 (16) で定式化される。

$$\begin{aligned}
& \max_{\theta, u} u, \\
& \text{s.t. } \theta_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, p+1, \\
& \sum_{r=1}^{p+1} \theta_r^\delta \leq 1, \delta \geq 1, \\
& \sum_{r=1}^{p+1} \theta_r f_r(\beta) \geq u, \forall \beta, \\
& f_r(\beta) = \sum_{q=1}^k \left(\frac{1}{2} \beta_q^T G_r \beta_q - \beta_q - \beta_q Y_q^{-1} b \right), \\
& r = 1, 2, \dots, p+1. \tag{16}
\end{aligned}$$

ここで、式(16)の β は判別軸を定める変数で判別分析における最適化問題の解である。また、 Y_q は q 番目とそれ以外のクラスを1と-1で分類する n 個の教師ラベルを対角成分とする対角行列である。 δ は問題を調整するパラメータでYuらは $\delta = 1$ として線形計画問題で定式化している。式(16)の解き方は、まず、固定した任意の β に対して式(16)の線形計画問題を解き θ を求める。次に、得られた θ を用いて1対他法で多クラスに拡張した最小二乗サポートベクターマシン(Suykens, Van Gestel, De Moor and Vandewalle, 2002)により β を求める。最小二乗サポートベクターマシンは各2組のクラスに対して式(17)の連立方程式を解くことと等価である。

$$\begin{bmatrix} 0 & z^T \\ z & \Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y^{-1}z \end{bmatrix}. \tag{17}$$

以下、線形計画問題と連立方程式を繰り返し計算するが、任意の β に対して式(16)を最適化する θ を求める必要があるため、式(16)の4行目の β に関する制約式は1回の繰り返し毎に1つずつ増えていくことになる。Yuらは式(16)の解 θ は10回程程度の繰り返しで求まるとしている。求めた θ を用いて再びスペクトラルクラスタリングを行い、以下、式(16)の半無限計画問題とスペクトラルクラスタリングをクラスが変化しなくなるまで交互に繰り返す。

3-3 文献(柳, 2014)の手法

文献(柳, 2014)の手法は、初期パラメータ δ を入力として、2対のクラス間の距離が最大になるように強制的にクラスの変更を行い、その変更を満たすようにパラメータの更新を行う。そして、カーネル k -平均法を行い、以下目的関数の値が変化しなくなるまで、上記の3

過程を繰り返す方法である。クラスの変更は2対のクラス C_a, C_b に対して、移動データの集合を $X_a \subset C_a$ とすると、 $\forall x \in C_a - X_a$ と C_b との距離が $\forall x' \in X_a$ と C_b との距離より小さくならず、かつ、 $C_a - X_a$ と $C_b \cup X_a$ の距離が最大になるように決定する。さらに、 $\forall x \in C_a - X_a$ と $\forall x' \in C_b \cup X_a$ が互いに k 近傍とならないようにする。このとき、クラス $C_a^{\text{new}} = C_a - X_a$ と $C_b^{\text{new}} = C_b \cup X_a$ の各中心、および、 C_b^{new} の最近傍点 $x_a \in C_a^{\text{new}}$ 、 C_a^{new} の最近傍点 $x_b \in C_b^{\text{new}}$ との距離に関して以下の式が成立するように δ^{new} を決定する。

$$\|M_a^{\text{new}} - \phi(x_a)\|^2 \leq \|M_b^{\text{new}} - \phi(x_a)\|^2, \tag{18}$$

$$\|M_a^{\text{new}} - \phi(x_b)\|^2 \geq \|M_b^{\text{new}} - \phi(x_b)\|^2. \tag{19}$$

ここで、 M_a^{new} はクラス C_a^{new} の中心点であり、カーネル関数により M_a^{new} が関わる計算をするときは δ^{new} を用いる。パラメータ δ は式(20)、式(21)により逐次更新を行う。

$$\delta^{\text{new}} = \rho \delta. \tag{20}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{\left(1 + s \cdot \frac{\|M_a^{(\text{new})}, x_a\|^2 - \|M_b^{(\text{new})} - x_a\|^2}{\left(\frac{(|C_b^{\text{new}}| - 1)}{|C_b^{\text{new}}|} + 2 \frac{(|C_a^{\text{new}}| - 1)}{|C_a^{\text{new}}|} \right)} \right)}. \tag{21}$$

式(21)の $M_a^{(\text{new})}$ はクラス C_a^{new} の中心点であり、カーネル関数により $M_a^{(\text{new})}$ が関わる計算をするときは δ^{new} ではなく δ を用いる。 s は $s \in \{-1, 1\}$ で探索方向が正方向なら-1、負方向なら+1をとる。正方向と負方向の切り替えには、データ X の二点間の距離の分布情報を利用する。クラス C_b の任意の二点間の距離、および、クラス C_a の任意の点と x_a の距離の最大値、最小値、中央値を、それぞれ、 $d_{b,\max}, d_{b,\min}, d_{b,\text{med}}$ 、および、 $d_{a,\max}, d_{a,\min}, d_{a,\text{med}}$ とする。もし、 $d_{b,\max} \leq d_{a,\max}$ なら δ の探索区間を $[d_{b,\min}, d_{b,\max}]$ とし、 $\delta \leq d_{b,\text{med}}$ なら正方向、そうでなければ負方向を探索する。また、 $d_{b,\max} > d_{a,\max}$ なら δ の探索区間を $[d_{a,\min}, d_{a,\max}]$ とし、 $\delta \leq d_{a,\text{med}}$ なら正方向、そうでなければ負方向を探索する。

4. 提案法

従来法である文献(柳, 2014)の手法はクラスタ間の距離が十分に離れていて、2つのクラスタからなるデータに対しては有効であるものの、クラスタ間の距離が十分離れていてもクラスタ数が増えるとクラスタリング結果の精度が落ち、また、クラスタ間の距離が十分離れていないときはクラスタが含むデータ数が極端に偏るなどの問題点がある。本論文では、上記の問題点の改良を検討する。基本的には、従来法と同様の考え方により、ガウスカーネルのパラメータを探索するが、従来法のようにパラメータ探索とカーネルk-平均法を交互に繰り返すのではない。従来法は、ランダムに決めた初期クラスタに対してカーネルk-平均法を行い、得られた結果から距離を基準にクラスタ内の部分集合を入れ換えるという処理をしているため、クラスタ数が増えると計算結果が不安定になる。そこで、本論文では、以下の各手順を1回ずつ計算する。

- (1) 集合間の距離を基準に初期クラスタを作成する。
- (2) 初期クラスタを分離するカーネルパラメータを探索する。
- (3) 重み付きカーネルk-平均法によりクラスタリングを行う。

上記の(3)にあるように、スペクトラルクラスタリングとの比較も行うため、クラスタリング手法として重み付きカーネルk-平均法を採用する。

4-1 初期クラスタの決定

まず、任意の有限集合 $A = \{a \mid a \in R^d\}$ と $B = \{b \mid b \in R^d\}$ の集合間の距離 $d(A, B)$ を式(22)により定式化する。

$$d(A, B) = \min_{\forall a \in A, \forall b \in B} \|a - b\|^2. \quad (22)$$

式(22)で要素が一つの集合、つまり、 $A = \{a\}, B = \{b\}$ のときは、通常の L_2 ノルム $d(A, B) = d(\{a\}, \{b\}) = d(a, b) = \|a - b\|^2$ となる。また、特殊な場合として、空集合との距離を0、つまり、 $d(A, \emptyset) = 0$ と定義する。式(22)より、 R^d 上の集合 A, B, C, D 、に関して、式(23)の性質が成り立つ。

$$\begin{aligned} d(A \cup B, C \cup D) = \\ \min\{d(A, C), d(A, D), d(B, C), d(B, D)\}. \end{aligned} \quad (23)$$

次に、本論文で使用する、クラスタ間の距離が十分に離れているデータ集合という基準を定義1により定量化する。

定義1. 式(24)を満たすデータ集合 X の $k(\geq 2)$ 個の部分集合を要素とする集合を $disjoint(X, k)$ と定義する。

$$\begin{aligned} disjoint(X, k) = \{X_i \mid \cup_{i=1}^k X_i = X, \\ X_i \cap X_j = \emptyset, \\ \max_{\forall A \subseteq X_i} d(A, X_i - A) \leq d(X_j, X_t), \\ 1 \leq i, j, t \leq k, j \neq t\}. \end{aligned} \quad (24)$$

式(24)は $disjoint(X, k)$ の要素を任意に2分割した部分集合同士の距離が、 $disjoint(X, k)$ の要素同士の距離より小さいことを意味する。まず、集合を2分割したときの部分集合同士の距離の性質を示す。

定理1. $|X| \geq 2$ となる有限のデータ集合 $X = \{x \mid x \in R^d\}$ の部分集合 Y と Z が式(25)を満たすとき、式(26)と式(27)を満たす少なくとも1組の Y, Z が存在する。

$$\begin{aligned} Y = \arg \max_{A \subseteq X} d(A, X - A), \\ Z = X - Y. \end{aligned} \quad (25)$$

$$\max_{\forall B \subseteq Y} d(B, Y - B) \leq d(Y, Z). \quad (26)$$

$$\max_{\forall C \subseteq Z} d(C, Z - C) \leq d(Y, Z). \quad (27)$$

証明. まず、 X の任意の二つの要素の距離 $d(x, x') (\forall x, x' \in X)$ が全て異なる場合を考え、式(26)が成立することを証明する。仮に式(28)を満たす Y_1, Y_2 が存在するとする。

$$\begin{aligned} d(Y_1, Y_2) > d(Y, Z), \\ Y_1 \cup Y_2 = Y, Y_1 \cap Y_2 = \emptyset. \end{aligned} \quad (28)$$

X の任意の二つの要素の距離が全て異なるという仮定より、一般性を失わず $d(Y, Z) = d(Y_1, Z) < d(Y_2, Z)$ と仮定することで、式(23)より、式(29)が成立する。

$$d(Y_1 \cup Z, Y_2) = \min\{d(Y_1, Y_2), d(Z, Y_2)\}. \quad (29)$$

式(29)において、もし、 $d(Y_1 \cup Z, Y_2) = d(Y_1, Y_2)$ ならば式(25)に矛盾する。また、

$d(Y_1 \cup Z, Y_2) = d(Z, Y_2)$ ならば, $d(Y_1 \cup Z, Y_2) = d(Z, Y_2) > d(Y, Z)$ となり, やはり, 式 (25) に矛盾する。したがって, 式 (28) を満たす Y_1, Y_2 は存在せず, 式 (26) が成立する。式 (27) についても, 同様に証明できる。

次に, X の任意の二つの要素の距離に同じものがある場合を考える。式 (25) を満たす任意の Y, Z において, もし, 式 (26) を満たさない Y の部分集合 Y_1, Y_2 が存在する場合, すなわち, $d(Y_1, Y_2) > d(Y, Z)$ を満たす Y_1, Y_2 が存在する場合, 式 (30) を満たす必要がある。

$$\begin{aligned} d(Y_1, Z) &= d(Y, Z), \\ d(Y_2, Z) &= d(Y, Z). \end{aligned} \quad (30)$$

なぜなら, 新たに $Y = Y_1, Z = Z \cup Y_2$ としても, 式 (31) より式 (25) が成立するためである。

$$\begin{aligned} d(Y_1, Z \cup Y_2) &= \min\{d(Y_1, Z), d(Y_1, Y_2)\} \\ &= d(Y, Z). \end{aligned} \quad (31)$$

式 (26) を満たさない Y_1, Y_2 に関して, 式 (30) の性質は再帰的に成立するため, 以下 Y が式 (26) を満たすまで, Y の分割と Z と Y の部分集合の結合を繰り返すことで, 式 (25) と式 (26) を満たす Y, Z を見つけることができる。

上記で見つけた Y, Z に関して, 式 (27) を満たさない Z の部分集合 Z_1, Z_2 が存在する場合, すなわち, $d(Z_1, Z_2) > d(Y, Z)$ を満たす Z_1, Z_2 が存在する場合, 式 (32) を満たす必要がある。

$$\begin{aligned} d(Z_1, Y) &= d(Y, Z), \\ d(Z_2, Y) &= d(Y, Z). \end{aligned} \quad (32)$$

さらに, 式 (33) を満たす Z_1 の部分集合 ZZ_1, ZZ_2 が存在すると仮定する。

$$\begin{aligned} d(ZZ_1, ZZ_2) &> d(Y, Z), \\ ZZ_1 \cup ZZ_2 &= Z_1, \\ ZZ_1 \cap ZZ_2 &= \emptyset. \end{aligned} \quad (33)$$

この場合, ZZ_1, ZZ_2 は式 (34) を満たす必要がある。

$$\begin{aligned} d(ZZ_1, Y) &= d(Z_1, Y), \\ d(ZZ_2, Y) &= d(Z_1, Y). \end{aligned} \quad (34)$$

何故なら, 仮に $d(ZZ_2, Y) > d(Z_1, Y)$ であれば, 式 (35) より, 式 (25) に矛盾するためである。

$$\begin{aligned} d(Y \cup ZZ_1 \cup Z_2, ZZ_2) \\ &= \min\{d(Y, ZZ_2), d(ZZ_1, ZZ_2), d(Z_2, ZZ_2)\} \\ &> d(Y, Z). \end{aligned} \quad (35)$$

同様に, $d(ZZ_1, Y) > d(Z_1, Y)$ ならば, $d(Y \cup ZZ_2 \cup Z_2, ZZ_1) > d(Y, Z)$ となり, やはり, 式 (25) に矛盾する。したがって, Z_1 部分の任意の 2 分割, および, Y の任意の 2 分割 $Y_1, Y_2 (Y_1 \cup Y_2 = Y, Y_1 \cap Y_2 = \emptyset)$ に関わる距離に関して式 (36) が成立する。

$$\begin{aligned} d(Y_1 \cup ZZ_1, Y_2 \cup ZZ_2) &= \\ &\min\{d(Y_1, Y_2), d(Y_1, ZZ_2), d(ZZ_1, Y_2), \\ &\quad d(ZZ_1, ZZ_2)\} \leq d(Y, Z), \\ d(Y, ZZ_1 \cup ZZ_2) &= \\ &\min\{d(Y, ZZ_1), d(Y, ZZ_2)\} \leq d(Y, Z). \end{aligned} \quad (36)$$

式 (36) より, Y, Z を $Y = Y \cup Z_1, Z = Z_2$ と置き換えても Y に関して式 (26) が成立しており, 式 (27) を満たさない Z に関する式 (32) の性質, および, その Z の部分集合が式 (33) を満たす場合の式 (34) の性質は再帰的に成立する。したがって, 以下, Z が式 (27) を満たすまで, Z の分割と Y と Z の部分集合の結合を繰り返すことで, 式 (25), 式 (26), 式 (27) を満たす Y, Z を見つけることができる。□

次に, 定理 1 を用いて, $\text{disjoint}(X, k)$ の存在可能性を示す。

定理 2. 有限のデータ集合 $X = \{x \mid x \in R^d\}$ と整数 k が与えられ, $|X| \geq k$ を満たすとき, 少なくとも一つの $\text{disjoint}(X, k)$ が存在する。

証明. まず, $k = 2$ のときは, 定理 1 より, $\text{disjoint}(X, 2)$ が存在する。次に, $\text{disjoint}(X, k-1)$ が存在すると仮定して, $\text{disjoint}(X, k)$ の存在可能性を考える。 $\text{disjoint}(X, k-1) = \{X_1, X_2, \dots, X_{k-1}\}$ とし, 各 $X_i (1 \leq i \leq k-1)$ の $\text{disjoint}(X_i, 2) = \{A_i, B_i\}$ に対して, $\arg \max_i d(A_i, B_i) = k-1$ とする。このとき, $A_{k-1} = S \cup T, S \cap T = \emptyset$ を満たす任意の S, T , および, $B_{k-1} = U \cup V, U \cap V = \emptyset$ を満たす任意の U, V は式 (37) を満たす。

$$\begin{aligned} d(S, T) &\leq d(A_{k-1}, B_{k-1}) \leq \min_{1 \leq i, j \leq k-1, i \neq j} d(X_i, X_j), \\ d(U, V) &\leq d(A_{k-1}, B_{k-1}) \leq \min_{1 \leq i, j \leq k-1, i \neq j} d(X_i, X_j). \end{aligned} \quad (37)$$

また, $X_i (1 \leq i \leq k-2)$ に関して, 式 (38) が成立する。

$$\begin{aligned} d(X_{k-1}, X_t) &\leq d(A_{k-1}, X_t), \\ d(X_{k-1}, X_t) &\leq d(B_{k-1}, X_t). \end{aligned} \quad (38)$$

従って $\{X_1, X_2, \dots, X_{k-2}, A_{k-1}, B_{k-1}\} = disjoint(X, k)$ となる。□

ここで、集合を要素とする集合 $Z = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ があたえられたとき、 $\forall Y \in Z$ の最近傍要素 $NN(Y)$ を式 (39) で定義する。

$$NN(Y) = S = \arg \min_{\forall S \in Z - \{Y\}} d(Y, S). \quad (39)$$

定理 2 の証明の考え方より系 1 が得られる。

系 1. $disjoint(X, k) = \{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ において $\arg \min_i d(X_i, NN(X_i)) = t$ のとき式 (40) が成立する。

$$\begin{aligned} disjoint(X, k-1) = &(\{X_1, X_2, \dots, X_k\} \\ &- \{X_t, NN(X_t)\}) \\ &\cup \{X_t \cup NN(X_t)\}. \end{aligned} \quad (40)$$

証明. 一般性を失わず $t = k, NN(X_k) = X_{k-1}$ とする。このとき、 $disjoint(X, k) = \{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ の仮定より $\forall A \subseteq X_k, \forall B \subseteq X_{k-1}$ に対して式 (41) が成立する。

$$\begin{aligned} d(A, X_k - A) &\leq d(X_{k-1}, X_k), \\ d(B, X_{k-1} - B) &\leq d(X_{k-1}, X_k), \\ d(A, B) &\geq d(X_{k-1}, X_k), \\ d(X_k - A, X_{k-1} - B) &\geq d(X_{k-1}, X_k). \end{aligned} \quad (41)$$

また、 $S \cup T = X_k \cup X_{k-1}, S \cap T = \emptyset$ を満たす任意の S, T を $S = A \cup (X_{k-1} - B), T = B \cup (X_k - A)$ と表現できる。式 (41) より、 $d(S, T)$ に関して式 (42) が成立する。

$$\begin{aligned} d(S, T) = \min\{d(A, B), d(A, X_k - A), \\ d(B, X_{k-1} - B), d(X_k - A, X_{k-1} - B)\} \\ \leq d(X_{k-1}, X_k). \end{aligned} \quad (42)$$

さらに、任意の $X_t (1 \leq t \leq k-2)$ に関して、式 (43) が成立する。

$$\begin{aligned} d(X_t, X_{k-1} \cup X_k) = \min\{d(X_t, X_{k-1}), d(X_t, X_k)\} \\ \geq d(X_{k-1}, X_k). \end{aligned} \quad (43)$$

式 (42) と式 (43) より、 $X_{k-1} \cup X_k$ は $\{X_1, X_2, \dots, X_{k-2}\}$ に対して $disjoint(X, k-1)$ の条件を満たしてい

る。また、 $S \cup T = X_t, S \cap T = \emptyset$ を満たす任意の S, T に関して式 (44) が成立する。

$$\begin{aligned} d(S, T) &\leq d(X_t, X_{k-1}), \\ d(S, T) &\leq d(X_t, X_k). \end{aligned} \quad (44)$$

式 (44) より式 (45) が成立する。

$$\begin{aligned} d(S, T) &\leq \min\{d(X_t, X_{k-1}), d(X_t, X_k)\} \\ &\leq d(X_t, X_{k-1} \cup X_k). \end{aligned} \quad (45)$$

式 (45) より、 $\{X_1, X_2, \dots, X_{k-2}\}$ は $X_{k-1} \cup X_k$ に対して $disjoint(X, k-1)$ の条件を満たしている。さらに、 $disjoint(X, k) = \{X_1, X_2, \dots, X_{k-2}, X_{k-1}, X_k\}$ より、 X_1, X_2, \dots, X_{k-2} に関しては相互に条件を満たしている。したがって、 $disjoint(X, k-1) = \{X_1, X_2, \dots, X_{k-1} \cup X_k\}$ となる。□

定理 3. データ集合 X の任意の二つの要素 x, x' の距離が全て異なるとき、 $disjoint(X, k)$ は一意に定まる。

証明. まず、 $k=2$ のとき一意に定まらないと仮定し、2組の $disjoint(X, 2)$ が存在するものとする。2組を $\{A, B\}, \{Y, Z\}$ とすると式 (46) を満たす。

$$\begin{aligned} X &= A \cup B, A \cap B = \emptyset, \\ X &= Y \cup Z, Y \cap Z = \emptyset, \\ \{A, B\} &\neq \{Y, Z\}. \end{aligned} \quad (46)$$

また、任意の A_1, A_2, B_1, B_2 を用意し、 $\{A, B\}, \{Y, Z\}$ 間の関係を式 (47) とする。

$$\begin{aligned} A &= A_1 \cup A_2, A_1 \cap A_2 = \emptyset, \\ B &= B_1 \cup B_2, B_1 \cap B_2 = \emptyset, \\ A_1 \cup B_1 &= Y, \\ A_2 \cup B_2 &= Z. \end{aligned} \quad (47)$$

このとき、 $d(A, B) = d(Y, Z)$ と仮定すると、 $disjoint(X, 2) = \{A, B\}$ および X の任意の2点間の距離が全て異なる仮定より、 $d(A, B) < d(A_2, B_2)$ または $d(A, B) < d(A_1, B_1)$ を満たさなければならない。仮に $d(A, B) < d(A_2, B_2)$ とすると、一方で $A_2 \cup B_2 = Z$ かつ $disjoint(X, 2) = \{Y, Z\}$ の仮定より $d(A, B) = d(Y, Z) \geq d(A_2, B_2)$ を満たさなければならず矛盾する。また、 $d(A, B) \neq d(Y, Z)$ かつ $d(A, B) < d(Y, Z)$ と仮定すると $d(Y, Z)$ は式

(48)~式(51)のいずれかを満たさなければならない。

$$d(Y, Z) = d(A_1, A_2). \quad (48)$$

$$d(Y, Z) = d(B_1, B_2). \quad (49)$$

$$d(Y, Z) = d(A_1, B_2). \quad (50)$$

$$d(Y, Z) = d(B_1, A_2). \quad (51)$$

式(48)は $d(A_1, A_2) \leq d(A, B) < d(Y, Z)$ より矛盾する。式(49)も同様である。式(50)は $d(B_1, B_2) < d(A, B) < d(A_1, B_2) = d(Y, Z)$ を満たさなければならない。一方で $B_1 \subseteq Y, B_2 \subseteq Z$ より $d(B_1, B_2) \geq d(Y, Z)$ も満たす必要があり、やはり矛盾する。式(51)も同様である。したがって、異なる $\text{disjoint}(X, 2)$ は存在せず一意に定まる。

次に、 $\text{disjoint}(X, k-1)$ が一意に定まると仮定する。 $\text{disjoint}(X, k)$ が一意に定まらないと仮定し、2組の $\{A_1, A_2, \dots, A_k\}, \{B_1, B_2, \dots, B_k\}$ が共に $\text{disjoint}(X, k)$ であるとする。一般性を失わず $\arg \min_{1 \leq i \leq k} d(A_i, NN(A_i)) = k$, $\arg \min_{1 \leq i \leq k} d(B_i, NN(B_i)) = k$ とすると系1より式(52)が成立する。

$$\begin{aligned} \text{disjoint}(X, k-1) &= \{A_1, A_2, \dots, A_{k-1} \cup A_k\} \\ &= \{B_1, B_2, \dots, B_{k-1} \cup B_k\}. \end{aligned} \quad (52)$$

$A_{k-1} \cup A_k \neq B_{k-1} \cup B_k$ とすると式(52)より、 $A_{k-1} \cup A_k = B_t (1 \leq t < k-2), B_{k-1} \cup B_k = A_u (1 \leq u < k-2), t \neq u$ を満たす t, u が存在し、 X の要素の二点間の距離が全て異なるという仮定より、 $d(A_{k-1}, A_k) \neq d(B_{k-1}, B_k)$ となる。一般性を失わず、 $d(A_{k-1}, A_k) > d(B_{k-1}, B_k)$ とすると、 $S \cup T = B_t, S \cap T = \emptyset$ を満たすある S, T に対して $d(S, T) = d(A_{k-1}, A_k) > d(B_{k-1}, B_k)$ が成立するため $\{B_1, B_2, \dots, B_k\} = \text{disjoint}(X, k)$ に矛盾する。また、 $A_{k-1} \cup A_k = B_{k-1} \cup B_k$ かつ $\{A_{k-1}, A_k\} \neq \{B_{k-1}, B_k\}$ とすると $\text{disjoint}(A_{k-1} \cup A_k, 2) \neq \text{disjoint}(B_{k-1} \cup B_k, 2)$ となり、 $k=2$ で $\text{disjoint}(X, 2)$ が一意に定まることに反する。したがって、 $\{A_1, A_2, \dots, A_k\} = \{B_1, B_2, \dots, B_k\}$ であり、 $\text{disjoint}(X, k)$ も一意に定まる。□

次に、提案手法の初期クラスタを定義するための準備をする。 X の部分集合 $T \subseteq X$ からなる

集合 $N = \{T \mid T \subseteq X, T \cap T' = \emptyset, \forall T' \in N\}$ が与えられたとき、 N の部分集合からなる集合 S を式(53)のように定義する。

$$\begin{aligned} S &= \{T \mid T \in N, \\ &(\exists NN(T) \in S) \vee (\exists T' \in S, NN(T') = T)\}. \end{aligned} \quad (53)$$

一般的に、 $NN(S)$ は必ずしも対称性を満たすとは限らない、つまり、 $S = NN(S')$ かつ $NN(NN(S')) = S$ とは限らない。式(53)は S の要素となる条件が、他の S の要素の最近傍要素であるか、または、自身の最近傍要素が S の要素であることを示す。つまり、ある $T \in N$ が $T \in S$ となるならば、 T と S は式(54)または式(55)を満たす必要がある。

$$\exists NN(T) \in S. \quad (54)$$

$$\exists T' \in S, NN(T') = T. \quad (55)$$

したがって、 N から適当な要素 T を一つ選択し、 $S = \{T\}$ とした後、 S の全要素と N の全要素に対して式(54)と式(55)を繰返し評価し、いずれかを満たした T' に対して、 $S = S \cup \{T'\}, N = N - \{T'\}$ とすることで、 T を含む S を一つ作成できる。また、この操作を $N = \emptyset$ となるまで繰り返すことで、 N の部分集合の集合 S を要素とする集合を作成できる。そのような集合 $D(N)$ を式(56)で定義する。

$$\begin{aligned} D(N) &= \{S \mid S = \{T \mid T \in N, \\ &(\exists NN(T) \in S) \vee (\exists T' \in S, NN(T') = T)\}, \\ &\cup_{S \in D(N)} S = N\}. \end{aligned} \quad (56)$$

S の性質より、明らかに $\forall S, S' \in D(N), S \cap S' = \emptyset$ が成立する。また、 N の各要素の最近傍要素に関して距離が大きい上位 k 個の要素からなる集合を式(57)のように $NN_k(N)$ と定義する。

$$\begin{aligned} NN_k(N) &= \{T \mid |NN_k(N)| = k, \\ &d(T, NN(T)) \geq d(T', NN(T')), \\ &\forall T' \in N - NN_k(N)\}. \end{aligned} \quad (57)$$

式(57)を用いて、式(56)を最近傍要素との距離が大きい上位 k 個の $T \in N$ に式(55)を適用しないように拡張する。すなわち、 X の部分集合 $T \subseteq X$ からなる集合 $N = \{T \mid T \subseteq X, T \cap T' = \emptyset, \forall T' \in N\}$ が与えられたとき、 N の部分集合の S を要素とする集合 $D_k(N)$ を式(58)で定

義する。

$$\begin{aligned}
 D_k(N) = \{S \mid S = \{T \mid T \in N, \\
 (NN(T) \in S) \vee \\
 ((\exists T' \in S) \wedge (T' \notin NN_k(N)), \\
 NN(T') = T)\}, \\
 \cup_{\forall S \in D_k(N)} S = N\}. \quad (58)
 \end{aligned}$$

式 (58) は $T \in S$ が $NN_k(N)$ の要素のときは、 $NN(T)$ を S の要素としないことを意味する。

式 (58) を用いて X の部分集合を要素とする集合 $D_{i,k}$ を式 (59) のように再帰的に定義する。

$$D_{i,k} = \begin{cases} D_k(X) & (i = 1) \\ D_k(D_{i-1,k}) & (i > 1) \end{cases} \quad (59)$$

最終的に、 $|D_{i,k}| = k$ を満たすとき、 $D_{i,k} = D_k$ と定義し、提案手法における初期クラスタとする。 D_k の性質を示すため、 $D_{i,k}$ の各要素とその最近傍点との距離からなる集合 $Dist_i$ を式 (60) で定義する。

$$Dist_i = \{d(D, NN(D)) \mid \forall D \in D_{i,k}\}. \quad (60)$$

また、 $D_{i,k}$ の各要素とその最近傍点との距離の大きい上位 k 個の集合を $Dist_{i,k} \subseteq Dist_i$ と定義し、 $Dist_{i,k}$ の最小値を $\min(Dist_{i,k})$ と定義する。このとき、以下の定理が成立する。

定理 4. データ集合 X の任意の二つの要素 x, x' の距離が全て異なるとき、 $NN_k(D_{i-1,k})$ の要素 D の中で $\min(Dist_{i-1,k}) = d(D, NN(D))$ を満たす要素 D は $\{D\} \in D_{i,k}$ 、または、 $\{D \cup NN(D)\} \in D_{i,k}$ となる。さらに、 $NN_k(D_{i-1,k})$ の D 以外の要素集合 $NN_k(D_{i-1,k}) - \{D\}$ は $NN_k(D_{i-1,k}) - \{D\} \subseteq D_{i,k}$ となる。

証明. $NN_k(D_{i-1,k}) = \{D_1, D_2, \dots, D_k\}$ とし、一般性を失わず $\min(Dist_{i-1,k}) = d(D_1, NN(D_1))$ とする。まず、 $D_j (2 \leq j \leq k)$ が $\{D_j\} \in D_{i,k}$ となることを示す。これは、 $D_j (2 \leq j \leq k)$ が式 (54) と式 (55) を満たさないことを示せばよいが、 $D_{i,k}$ の定義より、 $D_j (2 \leq j \leq k)$ に対して式 (55) の評価は行わない。つまり、 $S = \{D_j\}$ に関して、 $S = S \cup \{NN(D_j)\}$ とはしないため、式 (54) を満たさないことを示せばよい。したがって、 $D_j \notin S$ となる S に対して、 $S = S \cup \{D_j\}$ という評価が発生しないよう、 $NN(D) = D_j$ を満たす $D \in D_{i-1,k} - NN_k(D_{i-1,k})$ が存在しないことを示せばよい。仮に、そのような D が存

在するならば $d(D, NN(D)) \leq \min(Dist_{i-1,k})$ となるため $2 \leq j \leq k$ に対して式 (61) を満たさなければならない。

$$\begin{aligned}
 d(D, NN(D)) &\leq \min(Dist_{i-1,k}) \\
 &< d(D_j, NN(D_j)) \\
 &\leq d(D_j, D). \quad (61)
 \end{aligned}$$

一方で、もし、 $d(D, D_j) = d(D, NN(D)) \notin Dist_{i-1,k} (2 \leq j \leq k)$ ならば式 (62) を満たす必要があり式 (61) に矛盾する。

$$d(D, D_j) = d(D, NN(D)) < \min(Dist_{i-1,k}). \quad (62)$$

次に、 D_1 が $\{D_1\} \in D_{i,k}$ 、または、 $\{D_1 \cup NN(D_1)\} \in D_{i,k}$ となることを示す。 $\{D_1\} \in D_{i,k}$ に関しては、 $d(D_1, NN(D_1)) \notin Dist_{i-1,k} - Dist_{i-1,k}$ 、つまり、 $NN(D) = D_1$ を満たす $D \in D_{i-1,k} - NN_k(D_{i-1,k})$ が存在しない場合であり、 $D_j (2 \leq j \leq k)$ の場合と同じように証明できる。 $\{D_1 \cup NN(D_1)\} \in D_{i,k}$ に関しては、 $NN(D) = D_1$ を満たす $D \in D_{i-1,k} - NN_k(D_{i-1,k})$ が存在する場合である。このような D に対しては式 (55) が一回だけ評価される。つまり、 $D \in S$ となる $S \in D_{i,k}$ が存在するならば、 $S = S \cup \{D_1\}$ は評価されるが、 $D_1 \in S$ に対しては式 (55) は評価されない。したがって、 $\{D \cup D_1\} \in D_{i,k}$ であるためには、式 (54) が評価されないよう、 $D = NN(A), D_1 = NN(B)$ を満たす $A, B \in D_{i-1,k} - NN_k(D_{i-1,k})$ が存在しないことを示せばよい。仮に、そのような A, B が存在するのであれば、 $NN(D_1) = D$ 、かつ、 $NN(D) = D_1$ より式 (63) が成立する。

$$\begin{aligned}
 d(A, NN(A)) &= d(A, D) > d(NN(D), D) \\
 &= d(D_1, D), \\
 d(B, NN(B)) &= d(B, D_1) > d(NN(D_1), D_1) \\
 &= d(D, D_1). \quad (63)
 \end{aligned}$$

式 (63) より、もし、 A, B が存在するのであれば $d(A, NN(A)), d(B, NN(B)) \in Dist_{i-1,k}$ とならなければならないが、 $A, B \in D_{i-1,k} - NN_k(D_{i-1,k})$ に矛盾する。□

定理 5. データ集合 X の任意の二つの要素 x, x' の距離が全て異なるとき、式 (64) の関係が成立する。

$$\min(Dist_{i-1,k}) \leq \min(Dist_{i,k}), (i \geq 2). \quad (64)$$

証明. まず, 任意の $D \in NN_k(D_{i-1,k})$ と $s (\geq 1)$ 個の $\{A_1, A_2, \dots, A_s\} \subseteq D_{i-1,k}$ に關して式 (65) が成立する.

$$d(D, A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_s) \geq d(D, NN(D)). \quad (65)$$

また, $NN_k(D_{i-1,k}) = \{D_1, D_2, \dots, D_k\}$ として, 一般性を失わず $\min(Dist_{i-1,k}) = d(D_1, NN(D_1))$ とすると, 定理4より, $D_j \in D_{i,k}$, ($2 \leq j \leq k$) となるので, $NN(D_j) \in D_{i-1,k}$ を含む $D_{i,k}$ の要素を $S \in D_{i,k}$ とすると, 式 (65) より, 式 (66) が成立する.

$$\begin{aligned} d(D_j, S) &= d(D_j, NN(D_j)) \\ &\leq \min_{S' \in D_{i,k} - \{S\}} d(D_j, S'). \end{aligned} \quad (66)$$

したがって, S は $D_{i,k}$ における D_j の最近傍要素 $S = NN(D_j)$ となり, $Dist_{i-1,k} - \{\min(Dist_{i-1,k})\} \subseteq Dist_i$ を満たす. 次に, D_1 に関して, D_1 が $D_{i,k}$ の要素となった場合は, D_j ($2 \leq j \leq k$) と同様, $NN(D_1) \in D_{i-1,k}$ に対して $d(D_1, S) = d(D_1, NN(D_1))$ を満たす $S \in D_{i,k}$ が存在し, S は $D_{i,k}$ における D_1 の最近傍要素 $S = NN(D_1)$ となり, $d(D_1, NN(D_1)) \in Dist_i$ となる. 一方で, $\{D_1 \cup NN(D_1)\}$ が $D_{i,k}$ の要素となった場合, $NN(NN(D_1)) = D_1$ が成立するため, 式 (65) より, $\{D_1 \cup NN(D_1)\}$ の最近傍要素 S に関して式 (67) が成立する.

$$\begin{aligned} d(D_1 \cup NN(D_1), S) &= \min\{d(D_1, S), d(NN(D_1), S)\} \\ &\geq \min\{d(D_1, NN(D_1)), \\ &\quad d(NN(D_1), NN(NN(D_1)))\} \\ &= d(D_1, NN(D_1)). \end{aligned} \quad (67)$$

したがって, 式 (67) より, $D_1 \cup NN(D_1)$ とその最近傍要素 S との距離 d' は $d' \in Dist_i$ かつ $d' \geq d(D_1, NN(D_1))$ となる. もし, $d < \min(Dist_{i-1,k})$ を満たす d が $d \in Dist_{i,k}$ ならば上記の k 個が $Dist_{i,k}$ に含まれなければならないため $|Dist_{i,k}| > k$ となり矛盾する. \square

最終的に D_k に関する以下の定理が得られる. 定理6. データ集合 X の任意の二つの要素 x, x' の距離が全て異なるとき, $D_k = disjoint(X, k)$ である.

証明. D_k の定義より, $\forall D, D' \in D_k$ に関して $D \cap D' = \emptyset$ となるので, $A \cup B = D, A \cap B =$

\emptyset を満たす任意の A, B の距離 $d(A, B)$ の最大値 $d_{D,max}$ が式 (68) を満たすことを示せばよい.

$$\forall D, d_{D,max} < \min_{\forall D' \in D_k} d(D', NN(D')). \quad (68)$$

D_k が n 回の式 (59) の操作で得られる, すなわち, $D_k = D_{n,k}$ とすると, $D = A \cup B$ ならば, ある $x \in A$ と $x' \in B$ の距離 $d(x, x')$ が $d(x, x') \in Dist_{t,k}$ ($1 \leq t \leq n-1$) を満たす必要がある. したがって, 定理5と合わせることで式 (69) が得られ, 式 (68) が成立する.

$$\begin{aligned} d_{D,max} = d(A, B) &\leq \min_{x \in A, x' \in B} d(x, x') \\ &\leq \min_{\exists t, 1 \leq t \leq n-1} \{Dist_{t,k}\} \leq \min\{Dist_{n,k}\} \\ &= \min_{\forall D' \in D_k} d(D', NN(D')). \end{aligned} \quad (69)$$

\square

もし X の任意の2点間の距離が全て異なるのであれば, 定理6より D_k は一意に定まる. したがって, D_k を初期クラスタとしてガウスカネルのパラメータを推定することで, $disjoint(X, k) = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ を満たす δ が存在すれば, クラスタリング結果も C_1, C_2, \dots, C_k となり一意に定まる. 一方で X が外れ値を含んでいたり, クラスタ内の分布が極端に異なるようなデータ集合の場合, $disjoint(X, k)$ がクラスタリングの意味で適切な分割とはならない可能性がある. そこで, 上記のような状況に対応できるよう, 整数値 r を用いて $D_{i,k}$ を式 (70) のように $D_{i,k}^r$ に緩和する.

$$D_{i,k}^r = \begin{cases} D(X) & (i=1, r>1) \\ D_k(X) & (i=1, r=1) \\ D(D_{i-1,k}^r) & (i < r) \\ D_k(D_{i-1,k}^r) & (i \geq r) \end{cases}. \quad (70)$$

式 (70) の $D_{i,k}^r$ が $|D_{i,k}^r| = k$ を満たすとき, $D_{i,k}^r = D_k^r$ と定義する. $r=1$ のときは, $D_k^r = D_k$ となる. また, $r=2$ のときは, 一つのデータが D_k^r の要素となること, すなわち, $\exists \{x\} \in D_k^r$ となることを避けることができるため, 外れ値対策となる. $D \in D_{r-1,k}^r$ ならば $D \in D_{r,k}^r$ とはならないため, 以下 r が増加するにつれて距離が大きい集合間の結合が速くなると考えられる. 本論文では $r=3$ とする. D_k^r を求めるアルゴリズムを Algorithm 2 に示す.

Algorithm 2 入力: $r, k, X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

- 1 $j \leftarrow 1$ とする。
- 2 一つのデータを初期クラスタとしてクラスタ集合 $D_k = \{C_i \mid C_i = \{x_i\}, i = 1, 2, \dots, n\}$ を作成する。
- 3 $|D_k| = k$ なら D_k を出力して終了する。
- 4 $NN_k \leftarrow \emptyset$ とする。
- 5 $T \leftarrow \emptyset$ とする。
- 6 $\forall C \in D_k$ に対して $NN(C)$ を求める。
- 7 $j \geq r$ ならば, $d(C, NN(C))$ が大きい上位 k 個の C を NN_k の要素として加え, $D_k \leftarrow D_k - NN_k$ とする。
- 8 $D \leftarrow \emptyset$ とする。
- 9 D_k の中から C を一つ選択し以下の更新を行う。

$$\begin{aligned} D_k &\leftarrow D_k - \{C\} \\ D &\leftarrow D \cup \{C\} \end{aligned}$$

- 10 $NN(C) \notin D_k \cup NN_k$ ならば 12 へ進む。
- 11 以下の更新を行い 10 へ戻る。

$$\begin{aligned} D &\leftarrow D \cup \{NN(C)\} \\ D_k &\leftarrow D_k - \{NN(C)\} \\ NN_k &\leftarrow NN_k - \{NN(C)\} \\ C &\leftarrow NN(C) \end{aligned}$$

- 12 $NNTMP \leftarrow D, D \leftarrow \emptyset$ とする。
- 13 $NNTMP$ の中から C を一つ選択し以下の更新を行う。

$$\begin{aligned} NNTMP &\leftarrow NNTMP - \{C\} \\ D &\leftarrow D \cup \{C\} \end{aligned}$$

- 14 $\forall C' \in D_k$ に対して $NN(C') = C$ ならば以下を行う。

$$\begin{aligned} NNTMP &\leftarrow NNTMP \cup \{C'\} \\ D_k &\leftarrow D_k - \{C'\} \end{aligned}$$

- 15 $NNTMP \neq \emptyset$ ならば 13 へ戻る。
 - 16 もし $D_k \neq \emptyset$ ならば $T \leftarrow T \cup \{D\}$ とし 8 へ戻る。
 - 17 $D_k \leftarrow NN_k \cup T, j \leftarrow j + 1$ とし 3 へ戻る。
-

4-2 パラメータの推定

D_k^r の各 2 対に対して, 文献 (柳, 2014) の方

法で δ を推定する。ただし, 文献 (柳, 2014) の方法とは異なり, k 個の初期クラスタを一度決定してしまえば変更することはなく, パラメータ探索と重み付きカーネル k -平均法の計算は各一回ずつ行う。そのため, パラメータの探索方向は正方向のみに限定することで計算回数の安定化を計る。さらに, 式 (21) を重み付きカーネル k -平均法の距離計算に適した式に変更する必要がある。まず, パラメータの探索区間について考える。初期クラスタに対して式 (18) を満たす δ が存在しない可能性もあるため, 事前に探索区間 $[d_{min}, d_{max}]$ を決めておき有限回の計算により δ を推定する。 d_{min} に関しては, 正方向のみの探索であるため, 十分小さい任意の正の実数 $\epsilon > 0$ を採用する。 d_{max} に関しては, Zelnik-Manor ら (Zelnik-Manor and Perona, 2004) が計算対象データの m 近傍点との距離を採用していること, および, 文献 (柳, 2014) の実験結果より, 2 対のクラスタ $C_i, C_j, 1 \leq i, j \leq k, i \neq j$ を覆う超球の半径の最大値をとれば十分であると推測する。したがって, 式 (71) のように区間 $[d_{min}, d_{max}]$ を決定する。

$$\begin{aligned} d_{min} &= \epsilon (> 0), \\ d_{max} &= \max_{\forall x, x' \in C_i \cup C_j, 1 \leq i, j \leq k, i \neq j} \frac{\sqrt{d(x, x')}}{2}. \end{aligned} \quad (71)$$

次に, パラメータの更新比率 ρ を文献 (柳, 2014) と同じ考え方にに基づき式 (18) から導出すると式 (72) が得られる。

$$\rho_q = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{\|M_a^{(q-1)} - x_a\|^2 - \|M_b^{(q-1)} - x_a\|^2}{3}}}. \quad (72)$$

式 (72) における $M_a^{(q-1)}$ と $M_b^{(q-1)}$ は, $q-1$ 番目のカーネルパラメータ $\delta_{q-1} = \rho_{q-2} \delta_{q-2}$ を用いて M_a および M_b のカーネル関数を計算することを意味する。また, 式 (72) は探索幅の比率を定めるパラメータであり, 多少の誤差は許容できるため重み w_i の変化は無視した。以上より, δ を更新するためのアルゴリズムを Algorithm 3 に示す。

4-3 提案手法のアルゴリズム

前節より, Algorithm 2 で決定した初期クラスタの各 2 対に対して, まず式 (71) により探索区間 $[d_{min}, d_{max}]$ を決定した後, Algorithm

3によりパラメータ δ を推定する。

Algorithm 3 入力: $C_a, C_b, d_{\min}, d_{\max}$

- 1 繰返し番号を $q = 1$ とし, $\delta_q = d_{\min}$ とする。
 - 2 C_b に対して式 (12) を最小とする $x_a \in C_a$ を求める。
 - 3 C_a, C_b, x_a, δ_q より式 (72) で ρ_q を計算する。
 - 4 以下のいずれかであれば, δ_q を出力し計算を終了する。
 - 式 (18) と式 (19) を同時に満たす
 - $\rho_q = 1$
 - $\delta_q \geq d_{\max}$
 - 5 $\delta_q = \rho_q \delta_q, q = q + 1$ とし, 2へ戻る。
-

そこで, まず各 $\delta_{i,j} (1 \leq i, j \leq k, i \neq j)$ の統合に関して考える。全てのクラスタ C_1, C_2, \dots, C_k に対して, 式 (73) を満たす δ の集合 Δ が存在するならば, 各2対のクラスタ $C_i, C_j, 1 \leq i, j \leq k, i \neq j$ に対して式 (73) を満たす $\delta_{i,j}$ の集合 $\Delta_{i,j}$ が存在し $\Delta \subseteq \Delta_{i,j}$ を満たす。

$$\forall x \in C_i, i = \arg \min_{1 \leq i \leq k} \|M_i - x\|^2. \quad (73)$$

したがって, $\delta \in \Delta$ の最小値を δ_{\min} , 最大値を δ_{\max} , $\delta_{i,j} \in \Delta_{i,j}$ の最小値を $\delta_{i,j,\min}$, 最大値を $\delta_{i,j,\max}$ とすると, 式 (74) より, 式 (75) が成立する。

$$\Delta \subseteq \bigcap_{1 \leq i, j \leq k, i \neq j} \Delta_{i,j}. \quad (74)$$

$$\begin{aligned} \max_{1 \leq i, j \leq k, i \neq j} \delta_{i,j,\min} &\leq \delta_{\min}, \\ \delta_{\max} &\leq \min_{1 \leq i, j \leq k, i \neq j} \delta_{i,j,\max}. \end{aligned} \quad (75)$$

式 (75) より, 本論文では, Algorithm 2 により計算した各2対の初期クラスタ $C_i, C_j, 1 \leq i, j \leq k, i \neq j$ に対して, $\delta_{i,j} \in \Delta_{i,j}$ を計算し, その最大値を δ と決定する。ただし, Algorithm 2 で決定した初期クラスタに対して $\Delta = \emptyset$ の場合もあり, 必ずしも式 (18) を満たす δ が存在する保証はないため, その場合 $\delta = d_{\max}$ となる。特に, クラスタが分離していないようなデータに関しては, この傾向が強くなると考えられる。一般的にガウス関数のパラメータは距離のスケールを調整する役割があり, 式 (4) より, δ が小さいときは距離の変化に敏感で, δ の増加に伴い距離の変化に対して鈍感になっていく。つまり, δ の増加にしたがって

カーネル k -平均法は通常の k -平均法の性質に近くなっていくと考えられる。仮に, クラスタが分離していないデータであれば, 提案手法は初期クラスタに分割する手がかりがないため, むしろ, 通常の k -平均法の分割基準に委ねるのが妥当であると考ええる。一方で, 全てのクラスタが分離していないデータであれば, そのような基準は妥当であると考えられるが, クラスタの一部が分離していて, それ以外が分離していないような場合は, $k(k-1)/2$ 個の δ の一部が $d_{\min} < \delta < d_{\max}$ を満たし, それ以外が $\delta = d_{\max}$ となる可能性がある。この場合, 分離可能と思われる $d_{\min} < \delta < d_{\max}$ を満たしたもののの中から最大値を選択し δ の推定値とするのか, または, $\delta = d_{\max}$ とするのかの判断が難しい。もし, $k(k-1)/2$ 個の δ のうちの $k-1$ 個以上が d_{\max} となっている場合は, 一つのクラスタに他のクラスタが結合してしまっている可能性が高いと考えられるので, 本論文では $k(k-1)/2$ 個の δ のうち $\delta \geq d_{\max}$ となる個数を n_δ とし, n_δ の値によって式 (76) の基準で最終的な δ を推定する。

$$\delta = \begin{cases} d_{\max} & (n_\delta \geq k-1) \\ \max_{1 \leq i, j \leq k, i \neq j} \delta_{i,j} & (\text{otherwise}) \end{cases}. \quad (76)$$

最終的な提案法のアルゴリズムを Algorithm 4 に示す。

Algorithm 4 入力: X, k, r

- 1 X, k, r を入力とし, Algorithm 2 により初期クラスタ C_1, C_2, \dots, C_k を求める。
 - 2 式 (71) より δ の探索区間 $[d_{\min}, d_{\max}]$ を決定する。
 - 3 全ての2対の初期クラスタ $C_i, C_j, (1 \leq i, j \leq k, i \neq j)$ に対して, $C_i, C_j, [d_{\min}, d_{\max}]$ を入力として, Algorithm 3 により $\delta_{i,j}$ を求める。
 - 4 $\delta_{i,j} (1 \leq i, j \leq k, i \neq j)$ と $[d_{\min}, d_{\max}]$ を用いて, 式 (76) より δ を決定する。
 - 5 $X, k, C_1, C_2, \dots, C_k, \delta$ を入力として Algorithm 1 を実行し, クラスタ C_1, C_2, \dots, C_k を再計算する。
 - 6 C_1, C_2, \dots, C_k を出力して計算を終了する。
-

4-4 計算量

Algorithm 1 の重み付きカーネル k -平均法の

計算量のオーダーは Algorithm 1 の繰返し数 t , クラスタ数 k , データ数 n , データの次元数 d を用いて $O(tkn^3d)$ と表すことができる。Algorithm 2 の計算量のオーダーは $O(dn^3 \log n)$, Algorithm 3 の計算量のオーダーは Algorithm 3 の繰返し数 q を q_p とすると, そのオーダーは $O(q_p n^2 d)$ となる。したがって, Algorithm 4 の計算量のオーダーは $O(dn^3 \log n + q_p n^2 d + tkn^3 d)$ となり, $\log n > tk$ とならない限りは重み付きカーネル k 平均法の計算オーダーとなる。一方で, 従来法の計算量のオーダーは, カーネル k -平均法を複数回実行する必要があるため, その繰返し数を l とすると $O(lk^2 q_p n^2 d + lk^2 n^2 d(1 + ndk \log k) + ltkn^3 d)$ となり (柳, 2014), $l > \log n$ となる状況において, 提案法は従来法に比較して効率化できていると考えられる。

5. 実験

実験は, 教師ラベル付きの人工データと実データに対して行う。実験環境は, Intel Xeon 2.00 GHz 4 コア \times 2 のデュアルプロセッサ, および, 24GB RAM のワークステーションで, OS は 64 ビット版 Linux を使用した。Matlab v 8.5.0 上で提案手法, 文献 (柳, 2014) の手法, スペクトラルクラスタリング (以下スペクトラル法), そして, 重み付きカーネル k -平均法を実装した。また, Yu らの手法 (以下 OKKC と表記) に関しては著者らが提供している Matlab 用のスクリプト (Yu, Tranchevent, De Moor and Moreau, 2011) をそのまま利用した。

5-1 クラスタリング結果の評価方法

教師ラベル付きのデータのクラスタリング結果に対して評価を行う代表的な指標として, Adjusted Rand Index (ARI) (Hubert and Arabie, 1985) や Normalized Mutual Information (NMI) (Strehl and Ghosh, 2003) がある。本論文では NMI を評価指標として用いる。あらかじめ教師ラベルにより決定されている k 個のクラスタ集合を $C^t = \{C_1^t, C_2^t, \dots, C_k^t\}$, 実際にクラスタリングすることにより得られる k 個のクラスタ集合を $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$, そして, $n = |C_1^t \cup C_2^t \cup \dots \cup C_k^t| = |C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_k|$ をデータ数とするとき, C^t と C のエントロピーは式 (77) で定義される。

$$\begin{aligned}
 H(C^t) &= - \sum_{j=1}^k \frac{|C_j^t|}{n} \log \frac{|C_j^t|}{n}, \\
 H(C) &= - \sum_{i=1}^k \frac{|C_i|}{n} \log \frac{|C_i|}{n}. \quad (77)
 \end{aligned}$$

以降, 本論文では C^t を正解クラスタ集合と呼ぶことにする。また, C^t と C の結合エントロピーは式 (78) で定義される。

$$H(C^t, C) = - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{|C_i \cap C_j^t|}{n} \log \frac{|C_i \cap C_j^t|}{n}. \quad (78)$$

NMI の計算式は式 (77) と式 (78) を用いて, 式 (79) により定義される。

$$\text{NMI} = \frac{H(C^t) + H(C) - H(C^t, C)}{\sqrt{H(C^t)H(C)}}. \quad (79)$$

NMI は 0 と 1 の間の値をとり, 正解クラスタと実際に得られたクラスタが完全に一致するとき, $H(C^t) = H(C) = H(C^t, C)$ より, 最大値の 1 をとる。

5-2 実験条件

まず, 提案手法と文献 (柳, 2014) のパラメータ推定における最大繰返し数を 300 とし 300 を越えても計算を終了しない場合は強制的に計算を終了するようにした。ガウスパラメータに関して, 提案手法の探索区間の左端点と, 従来手法の初期値は文献 (柳, 2014) 同様, ガウス関数の値が計算可能な有効桁以上となるように, Matlab における倍精度浮動小数型変数の正の最小値である 2.25074×10^{-308} , 計算対象データのデータ間の最大距離 D_{\max} を用いて式 (80) とした。

$$d_{\min} = \frac{D_{\max}}{\sqrt{308 \log_e 10 - 1}}. \quad (80)$$

提案手法の D_k^t のパラメータは $r = 3$ とした。文献 (柳, 2014) の従来手法に関しては, 2 つの新しいクラスタの任意のデータ同士が互いに k 近傍とはならないという条件があるが, $k > 1$ に関しては有効性を確認出来なかったため (柳, 2014), $k = 1$ とした。また, 全体の繰返し数 l の最大繰返し回数を 20 回とし, 20 回の繰返しを越えても計算を終了しない場合は強制的に計算を終了するようにした。スペクトラル法のカーネルパラメータに関しては, Zelnik-Manor らの手法を採用し, 近傍のレバ

ル m を $m=7$ とした。重み付きカーネル k -平均法に関しては、パラメータを自動設定できないため、スペクトラル法と同様の方法を採用した。OKKC に関しては、事前に複数のカーネルパラメータを用意する必要があるため、Yu らの実験と同様 c をデータの共分散行列の要素の平均とし、 $\{\frac{1}{4}c, \frac{1}{2}c, c, 2c, 3c, 4c, 5c, 6c, 7c, 8c\}$ を用いてカーネル行列を用意した。各手法における k -平均法、カーネル k -平均法、重み付きカーネル k -平均法の最大繰返し数を 100 回とし、100 回の繰返しを越えても計算を終了しない場合は強制的に計算を終了するようにした。

5-3 使用データの詳細

人工データは全て 2 次元とし、Kuncheva ら (Kuncheva and Vetrov, 2006) の実験を参考に分類精度の評価に適していると思われるものを 19 種類用意した。表 1 に各データの詳細を示し、図 1～19 に各データの分布状態を示す。

表 1 人工データの詳細

データ名	図番号	サンプル数	クラスタ数
データ1	図 1	400	2
データ2	図 2	300	3
データ3	図 3	400	2
データ4	図 4	600	3
データ5	図 5	600	3
データ6	図 6	601	2
データ7	図 7	800	4
データ8	図 8	600	2
データ9	図 9	400	2
データ10	図 10	400	2
データ11	図 11	600	3
データ12	図 12	400	2
データ13	図 13	400	2
データ14	図 14	600	3
データ15	図 15	400	4
データ16	図 16	900	9
データ17	図 17	900	9
データ18	図 18	500	5
データ19	図 19	500	5

実データに関しては UCI machine learning repository (Frank and Asuncion, 2010) より、iris, wine, ionosphere, glass, soybeans-small, satimage, pen digit の 7 つのデータを使用した。satimage と pen digit に関しては、元のデータのデータ数が非常に多いため、各クラスタからランダムに 80 個を選択した。各

データの詳細を表 2 に示す。

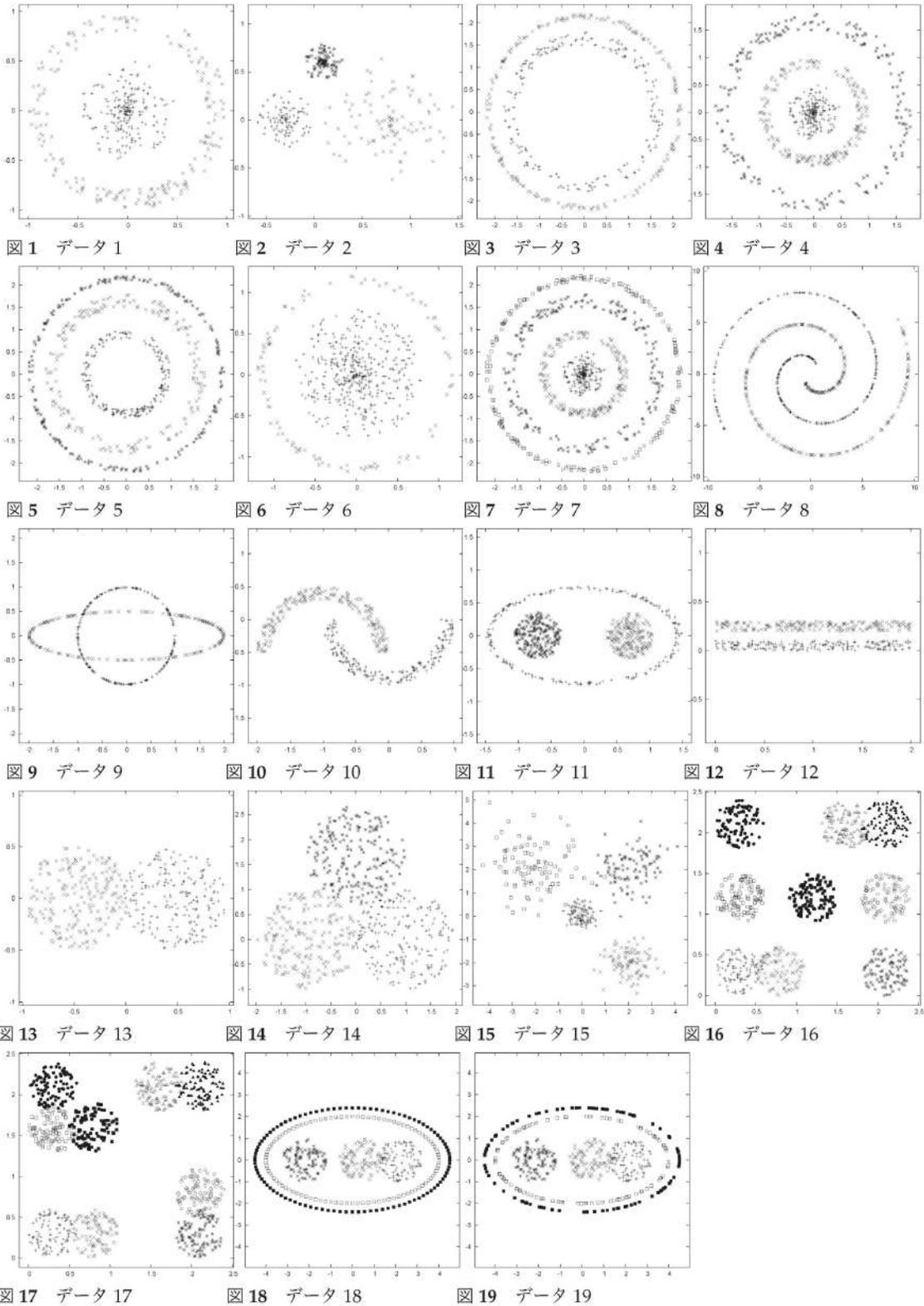
表 2 実データの詳細

データ名	次元数	サンプル数	クラスタ数
iris	4	150	3
wine	13	178	3
ionosphere	35	351	2
glass	9	214	6
soybean-small	35	47	4
satimage	36	480	6
pen digit	16	800	10

5-4 5 つの手法のクラスタリング精度の比較

5 つの手法を用いて各データに対して 30 回の試行を行い、計算時間の平均と最小と最大、および、NMI 値を調べた。表 3 に NMI 値の実験結果を示し、表 4 に計算時間の実験結果を示す。表 3 において、提案手法は 30 回の試行全てにおいて同じ値となったため、1 つの値のみ示している。これは、初期クラスタが全て同じ値となったためであり、Algorithm 2 が一意の結果を出力することを実験的に確認できた。また、重み付きカーネル k -平均法とスペクトラル法は、ガウスパラメータを固定しており、式 (10) および式 (8) の目的関数を最小とする結果を採用することができるため、30 回の試行において目的関数の最小値に対応する NMI 値、NMI 値の最小値と最大値、そして、目的関数が最小となった回数を調べた。表 3 では対応する手法の列において、括弧内が (最小, 最大) を示し、最後の列が回数を示している。従来法と OKKC に関しては、NMI 値の平均と最小と最大を調べた。表 3 の対応する手法の列において、括弧内が (最小, 最大) を示している。

データ 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12 は対応する図 1～12 の形状より、クラスタ数 k に関して $disjoint(X, k)$ と推測できる。これらのデータは表 3 より、提案法の NMI が全て 1 となっており、データ集合 X の分布形状やクラスタ数が異なっても $disjoint(X, k)$ を満たしていれば、提案法は従来法と比較して安定して正解クラスタを見つけることができると考えられる。上記のデータに対しては重み付きカーネル k -平均法とスペクトラル法はデータ 3, 5, 6, 7, 12 の結果がやや悪い。データ 3, 5, 7, 12 は初期クラスタへの依存が大きい形状であるためと考えられる。データ 6 に関しては、二つのクラスタ



数が異なり、ガウスパラメータを固定しているため、うまく分離できなかったと考えられる。また、計算時間については表4より、若干の入れかわりはあるものの、概ねスペクト

ラル法、提案法、従来法、重み付きカーネルk-平均法、OKKCの順になっている。スペクトラル法はデータのサイズ n に対して3乗の計算オーダーとなるものの、MATLAB上の行列

表3 各データに対する5つの手法の比較

データ	提案法	従来法	OKKC	重み付き	スペクトラル	
1	1.000	1.000 (1.000, 1.000)	0.250 (0.013, 0.684)	1.000 (0.430, 1.000)	27 1.000 (1.000, 1.000)	30
2	1.000	0.979 (0.653, 1.000)	1.000 (1.000, 1.000)	1.000 (0.846, 1.000)	27 1.000 (1.000, 1.000)	30
3	1.000	1.000 (1.000, 1.000)	2.1e-3 (1.8e-5, 4.1e-3)	0.000 (0.000, 0.016)	1 8.9e-4 (8.9e-4, 8.9e-4)	30
4	1.000	0.916 (0.221, 1.000)	0.504 (0.361, 0.597)	1.000 (0.768, 1.000)	29 1.000 (1.000, 1.000)	30
5	1.000	0.620 (0.353, 1.000)	0.067 (7.4e-3, 0.289)	0.579 (0.341, 0.590)	3 0.653 (0.653, 0.653)	30
6	1.000	0.053 (0.053, 0.053)	0.079 (1.4e-3, 0.218)	0.505 (0.032, 1.000)	9 0.454 (0.454, 0.454)	30
7	1.000	0.661 (0.359, 1.000)	0.357 (0.147, 0.533)	0.804 (0.605, 0.804)	1 0.804 (0.630, 0.804)	26
8	1.000	1.000 (1.000, 1.000)	0.032 (9.8e-4, 0.065)	1.000 (0.350, 1.000)	28 1.000 (1.000, 1.000)	30
9	2.2e-3	0.024 (0.022, 0.024)	0.030 (7.3e-5, 0.089)	1.2e-3 (1.8e-5, 0.262)	11 8.8e-4 (8.8e-4, 8.8e-4)	30
10	1.000	1.000 (1.000, 1.000)	0.158 (0.014, 0.371)	1.000 (1.000, 1.000)	30 1.000 (1.000, 1.000)	30
11	1.000	1.000 (1.000, 1.000)	0.463 (0.169, 0.567)	1.000 (1.000, 1.000)	30 1.000 (1.000, 1.000)	30
12	1.000	1.000 (1.000, 1.000)	4.3e-4 (2.2e-16, 1.7e-3)	0.162 (0.011, 1.000)	15 2.9e-4 (2.9e-4, 2.9e-4)	30
13	0.915	0.016 (0.016, 0.016)	0.427 (8.9e-4, 0.902)	0.567 (0.426, 0.919)	9 0.902 (0.902, 0.902)	30
14	0.944	0.506 (0.140, 0.861)	0.488 (0.406, 0.879)	0.845 (0.471, 0.899)	4 0.902 (0.902, 0.902)	30
15	0.951	0.743 (0.489, 0.951)	0.823 (0.721, 0.951)	0.951 (0.852, 0.951)	28 0.958 (0.958, 0.958)	30
16	0.971	0.912 (0.842, 0.972)	0.736 (0.442, 0.961)	0.961 (0.933, 0.968)	18 0.974 (0.914, 0.974)	9
17	0.888	0.857 (0.774, 0.941)	0.679 (0.373, 0.921)	0.901 (0.837, 0.912)	8 0.927 (0.872, 0.927)	22
18	0.953	0.477 (0.360, 0.830)	0.487 (0.373, 0.620)	0.776 (0.737, 0.787)	10 0.646 (0.646, 0.696)	26
19	0.686	0.677 (0.412, 0.807)	0.457 (0.361, 0.578)	0.778 (0.620, 0.798)	5 0.664 (0.560, 0.706)	26
sat.	0.518	0.139 (0.050, 0.365)	0.579 (0.520, 0.628)	0.569 (0.543, 0.663)	1 0.624 (0.524, 0.624)	7
pen.	0.777	0.216 (0.066, 0.461)	0.682 (0.641, 0.724)	0.794 (0.726, 0.852)	1 0.765 (0.738, 0.788)	12
iris	0.798	0.662 (0.050, 0.758)	0.474 (0.222, 0.798)	0.798 (0.722, 0.885)	18 0.786 (0.786, 0.786)	30
wine	0.432	0.091 (0.091, 0.091)	0.394 (0.210, 0.430)	0.395 (0.232, 0.429)	15 0.420 (0.420, 0.420)	30
glass	0.418	0.344 (0.120, 0.443)	0.116 (0.103, 0.123)	0.422 (0.275, 0.428)	1 0.404 (0.303, 0.414)	2
iono.	0.018	0.026 (0.026, 0.026)	0.125 (0.081, 0.198)	0.136 (0.103, 0.182)	5 0.221 (0.221, 0.221)	30
soy.	0.848	0.652 (0.543, 0.848)	0.301 (0.206, 0.365)	0.716 (0.716, 1.000)	12 0.723 (0.723, 0.723)	30

演算が高速であることが大きな理由と考えられる。また、重み付きカーネル k -平均法はC言語で実装された Graclus が公開されており (Dhillon, Guan and Kulis, 2007), 入力である行列の疎行列化が必要ではあるものの、かなり高速であるため、全てC言語で実装した場合は必ずしもこの順位にはならない可能性がある。C言語またはC++言語での実装による提案手法と Graclus およびスペクトラル法との計算時間に関する厳密な比較は今後の課題としたい。OKKC に関しては表3のデータのほとんどの結果が他の手法より悪く、また、表4より、計算時間も突出して長くなっている。計算時間に関してはOKKCにおける半無限計画問題の計算の不安定さに原因があると考えられる。実際に半無限計画問題の計算過程において収束せずに計算を破棄する事が多々あったため、実験では半無限計画問題の計算で収束しなかったときは、そこで全体の計算を破棄するのではなく、収束しなかった計算過程のみ再計算して次の計算過程へ進むようにした。

各データの再計算数は多くても4~5回程度であった。実際に計算する際に結果を得るためには再計算を考慮しなくてはならないことから、再計算の時間も比較対象とすることは公平性の意味で妥当であると考えられる。

データ9は二つの環状のクラスタが重なっている土星型の分布のデータであり、全ての手法のNMI値が低い。OKKC以外の手法の平均または目的関数を最小とするNMI値は $10^{-3} \sim 10^{-4}$ のオーダーであり、ほぼ0とみなせる。OKKCのみ平均が、かろうじて0.03と相対的に高くなっているものの、最大値は0.1程度であり良好な結果とはいえない。重み付きカーネル k -平均法およびスペクトラル法で正解クラスタを得るのは困難であると考えられる。

データ2とデータ15は各クラスタの分散が異なり、特にデータ2は図2における右下のクラスタの右上部分にあるデータ間の距離が最大となるため、そのデータがいわゆる外れ値となり、正解クラスタが $disjoint(X, 3)$ とはな

表4 各データに対する5つの手法の計算時間(秒)の比較

	提案法	従来法	OKKC	重み付き	スペクトラル
1	0.55 (0.53, 0.59)	0.48 (0.45, 0.51)	183.8 (33.81, 537.8)	2.65 (2.59, 2.73)	0.37 (0.36, 0.38)
2	0.39 (0.37, 0.47)	0.45 (0.28, 0.71)	132.9 (37.45, 469.8)	1.81 (1.71, 2.07)	0.22 (0.22, 0.23)
3	0.86 (0.84, 0.89)	0.66 (0.54, 0.77)	70.24 (29.20, 151.2)	2.97 (2.71, 3.41)	0.38 (0.37, 0.39)
4	1.41 (1.34, 1.46)	5.41 (1.18, 19.66)	502.2 (64.38, 1268.4)	5.43 (5.27, 5.56)	0.85 (0.84, 0.90)
5	1.85 (1.78, 1.91)	13.06 (2.50, 16.99)	364.6 (92.62, 1021.9)	5.78 (5.42, 6.59)	0.86 (0.85, 0.90)
6	0.79 (0.76, 0.82)	5.88 (5.70, 6.15)	206.1 (56.25, 580.4)	4.20 (3.93, 5.69)	0.61 (0.59, 0.64)
7	3.34 (3.06, 3.44)	24.39 (3.43, 38.09)	1226.8 (210.8, 2166.3)	9.74 (9.27, 10.53)	1.56 (1.54, 1.57)
8	1.81 (1.78, 1.86)	1.59 (1.07, 3.28)	208.3 (101.2, 391.7)	5.34 (5.21, 5.51)	0.85 (0.84, 0.87)
9	0.69 (0.67, 0.73)	2.16 (2.11, 2.20)	106.6 (52.39, 202.1)	2.84 (2.59, 3.24)	0.37 (0.36, 0.39)
10	0.74 (0.71, 0.78)	0.49 (0.47, 0.54)	96.56 (27.23, 208.2)	2.67 (2.55, 2.76)	0.37 (0.36, 0.38)
11	2.00 (1.91, 2.09)	1.59 (1.04, 2.71)	135.0 (63.01, 297.6)	5.35 (5.23, 5.46)	0.87 (0.85, 0.89)
12	0.84 (0.82, 0.86)	0.56 (0.55, 0.58)	128.9 (32.70, 416.5)	2.68 (2.59, 2.80)	0.37 (0.37, 0.38)
13	1.20 (1.14, 1.27)	0.42 (0.41, 0.44)	72.88 (32.52, 280.8)	3.29 (2.71, 4.04)	0.37 (0.36, 0.39)
14	5.28 (5.15, 5.42)	5.26 (1.16, 8.37)	148.8 (65.29, 430.9)	7.25 (5.98, 9.48)	0.85 (0.83, 0.88)
15	1.26 (1.19, 1.38)	2.46 (0.61, 4.76)	157.8 (48.49, 467.9)	3.15 (2.74, 4.47)	0.37 (0.36, 0.38)
16	15.61 (14.79, 17.64)	52.91 (10.89, 59.05)	3136.7 (246.2, 8242.6)	15.36 (14.50, 16.87)	2.05 (2.03, 2.12)
17	28.09 (21.91, 37.40)	59.68 (55.68, 63.63)	2376.2 (354.8, 4358.3)	17.07 (14.77, 18.92)	2.06 (2.04, 2.08)
18	1.39 (1.23, 1.57)	7.60 (1.79, 17.61)	432.8 (49.70, 1914.1)	4.77 (4.27, 5.54)	0.52 (0.47, 0.60)
19	1.43 (1.37, 1.52)	11.72 (4.05, 14.33)	607.0 (71.92, 1303.4)	4.65 (4.19, 5.44)	0.51 (0.42, 0.68)
sat.	7.01 (6.72, 7.38)	2.34 (1.37, 6.46)	232.3 (59.75, 409.3)	12.82 (10.35, 15.92)	0.75 (0.73, 0.84)
pen.	6.90 (5.82, 7.90)	10.76 (5.10, 20.95)	160.8 (71.20, 310.3)	18.77 (15.92, 23.84)	1.83 (1.80, 1.87)
iris	0.17 (0.15, 0.19)	0.42 (0.10, 0.78)	22.07 (3.26, 99.3)	0.95 (0.76, 1.14)	0.07 (0.07, 0.08)
wine	0.24 (0.22, 0.28)	1.22 (1.17, 1.25)	101.6 (24.04, 221.0)	0.93 (0.88, 1.08)	0.10 (0.10, 0.10)
glass	0.86 (0.61, 0.99)	0.64 (0.35, 1.13)	5.05 (1.45, 18.15)	3.33 (2.27, 4.24)	0.14 (0.13, 0.16)
iono.	1.43 (1.27, 1.59)	0.43 (0.39, 0.50)	54.93 (17.13, 158.4)	4.19 (2.93, 5.85)	0.39 (0.38, 0.42)
soy.	0.05 (0.05, 0.05)	0.07 (0.05, 0.11)	0.52 (0.31, 0.98)	0.44 (0.34, 0.70)	0.02 (0.02, 0.02)

らないと考えられる。提案手法は D_k を D_k' に緩和した効果により正解クラスタを得ている。データ 15 はクラスタ同士の分布が重なっているため提案手法で完全に分離する初期クラスタを得ることは困難であるが、 δ の範囲の決め方と k -平均法における球状のクラスタの境界は中心点を二等分する超平面となる特性により、スペクトラル法の結果には若干劣るものの良好な結果を得ている。

データ 13 とデータ 14 は各クラスタの分布が完全に重なっており、完全に分離はできない。データ 13 の NMI 値に関しては提案手法の結果が最も良く、データ 14 に関しては一番高評価であったスペクトラル法の結果にはやや劣るもののほぼ同等の結果が得られている。ただし、表 4 より、提案手法の計算時間がスペクトラル法と比較して長くなっている。これは、データ 13 とデータ 14 の初期クラスタに関して各中心点を垂直 2 等分するような境界で分離できず、結果として Algorithm 3 では、初期クラスタ間のパラメータを最大値まで探

索することになったため、その計算時間に依存していると考えられる。

データ 16 とデータ 17 はクラスタ数が共に 9 であり、クラスタ全てではなく、部分的に分布が重なっているデータ形状である。図 16 より、データ 16 は 2 対のクラスタが 2 種類、合計 4 つのクラスタの分布が重なっている。分布が重なっているクラスタ数が半数以下であるため、NMI 値に関してはスペクトラル法には劣るもののほぼ同等の値で良好な結果となっている。計算時間はスペクトラル法に比較してかなり長い、一方でスペクトラル法において目的関数が最小となった回数が 1/3 以下となっているため、精度と計算時間を総合して考慮すると著しく劣っているわけではないと考える。また、図 17 より、データ 17 は全てのクラスタがいずれかのクラスタと分布が重なっており、4 つのデータ集合の塊に分離しているように見える形状である。提案手法の NMI 値はスペクトラル法と重み付きカーネル k -平均法より小さな値となっており、提案手法が苦手とする

データ形状であると考えられる。表4より、計算時間に関しても、データ14と同じ理由により、スペクトラル法および重み付きカーネル k -平均法と比較してかなり長くなっている。

データ18とデータ19は、図18および図19より、球状と環状のクラスタが混合しているデータ分布であり、内側の3つのクラスタのうち2つの分布が重なっている。また、2つのデータ集合は、外側の環状のクラスタの密度が異なっており、データ18が密集しているのに対して、データ19は、やや散在した分布となっている。データ18に関しては提案手法のNMI値が最も大きかったのに対して、データ19では重み付きカーネル k -平均法よりもかなり低い値となっている。また、重み付きカーネル k -平均法とスペクトラル法のデータ18とデータ19におけるNMI値が僅差であるのに対して、提案手法はかなり離れている。これは、外側の2つのクラスタの分布の密度に原因があると考えられる。データ18では外側のクラスタのデータ同士が互いに最近傍点となっており、Algorithm 2において、比較的早めにクラスタを形成した後、各クラスタとの距離が十分離れているため、そのまま結合することなく最終的なクラスタとなったのに対して、データ19は外側の2つのクラスタの結合速度が遅く、外側の2つのクラスタの部分集合同士が互いに結合してしまったと考えられる。正解クラスタ内の任意の2点間の距離が他のクラスタとの距離より大きいデータ集合の分布は、データ17と同様、提案手法が苦手とする形状であると考えられる。

実データのNMI値に関しては、表3より、satimageは2番目に低い値であったが極端な差はなかった。pen digitとglassに関しては、重み付きカーネル k -平均法の結果に次いで2位であったが、重み付きカーネル k -平均法において目的関数が最小となった回数が30回中1回であることを考慮するとNMI値の値がそれほど離れていないことからほぼ同等と見なせる。irisに関しては重み付きカーネル k -平均法と同じ値で共に最も高評価であった。wineとsoybeansに関しては、提案手法の評価が最も高かった。ionosphereに関しては最も結果が芳しくなく、下から2番目に低い評価結果であった。初期クラスタの構成が正解クラスタと大きく異なっていたためと考えられるが、最も評価が高かったスペクトラル法のNMI値

が0.22程度であることから、スペクトラル法の分類の妥当性にもやや疑問が残る。総合的にみて、提案手法は、ionosphere以外は概ね良好な結果であり、 $disjoint(X, k)$ を基準にパラメータを決定しているものの、 $disjoint(X, k)$ を満たしていないであろう実データにも適用可能であると考えられる。

6. むすび

本論文では、文献(柳, 2014)の手法を基に、データ集合間の距離を基準に初期クラスタを構成して、重み付きカーネル k -平均法のガウスカーネルの適切なパラメータを探索するアルゴリズムを提案した。いくつかの人工データと実データを用いて、4つの手法との比較実験を行い、クラスタ間が十分な距離で分離しているデータに関してはクラスタ数や形状に依存せず提案手法が有効であることを示した。一方で、クラスタが部分的に分離していたり内部が密集していないクラスタが混在しているデータに関しては有効性を確認できなかった。今後の課題として、上記の分布形状を持つデータに対する基準の検討がある。

参考文献

- [1] Chan, Pak K, Martine DF Schlag, and Jason Y Zien (1994) "Spectral k-way ratio-cut partitioning and clustering," *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 13, No. 9, pp. 1088–1096.
- [2] Dhillon, Inderjit S, Yuqiang Guan, and Jacob Kogan (2002) "Iterative clustering of high dimensional text data augmented by local search," in *Data Mining, 2002. ICDM 2003. Proceedings. 2002 IEEE International Conference on*, pp. 131–138, IEEE.
- [3] Dhillon, Inderjit S, Yuqiang Guan, and Brian Kulis (2004) "A unified view of kernel k-means, spectral clustering and graph cuts," *University of Texas at Austin, Tech. Rep.*, Vol. TR-04-25.
- [4] Dhillon, I.S., Y. Guan, and B. Kulis (2004) "Kernel k-means: spectral clus-

- tering and normalized cuts," in *Proceedings of the tenth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, pp. 551–556, ACM.
- [5] Dhillon, I.S., Y. Guan, and B. Kulis (2007) "Weighted graph cuts without eigenvectors a multilevel approach," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, Vol. 29, No. 11, pp. 1944–1957.
- [6] Frank, A. and A. Asuncion (2010) "UCI Machine Learning Repository," <http://archive.ics.uci.edu/ml>.
- [7] Girolami, M. (2002) "Mercer kernel-based clustering in feature space," *Neural Networks, IEEE Transactions on*, Vol. 13, No. 3, pp. 780–784.
- [8] Hubert, L. and P. Arabie (1985) "Comparing partitions," *Journal of classification*, Vol. 2, No. 1, pp. 193–218.
- [9] Karypis, George and Vipin Kumar (1998) "A fast and high quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs," *SIAM Journal on scientific Computing*, Vol. 20, No. 1, pp. 359–392.
- [10] Kuncheva, L.I. and D.P. Vetrov (2006) "Evaluation of stability of k-means cluster ensembles with respect to random initialization," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, Vol. 28, No. 11, pp. 1798–1808.
- [11] MacQueen, J. (1967) "Some methods for classification and analysis of multivariate observations," in *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, pp. 281–297.
- [12] Máté, L. (1989) *Hilbert space methods in science and engineering*: Hilger.
- [13] Mika, S., G. Ratsch, J. Weston, B. Scholkopf, and KR Mullers (1999) "Fisher discriminant analysis with kernels," in *Neural Networks for Signal Processing IX, 1999. Proceedings of the 1999 IEEE Signal Processing Society Workshop*, pp. 41–48, IEEE.
- [14] Muller, K.R., S. Mika, G. Ratsch, K. Tsuda, and B. Scholkopf (2001) "An introduction to kernel-based learning algorithms," *Neural Networks, IEEE Transactions on*, Vol. 12, No. 2, pp. 181–201.
- [15] Ng, A.Y., M.I. Jordan, and Y. Weiss (2002) "On spectral clustering: Analysis and an algorithm," *Advances in neural information processing systems*, Vol. 2, pp. 849–856.
- [16] Shi, J. and J. Malik (2000) "Normalized cuts and image segmentation," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, Vol. 22, No. 8, pp. 888–905.
- [17] Strehl, A. and J. Ghosh (2003) "Cluster ensembles—a knowledge reuse framework for combining multiple partitions," *The Journal of Machine Learning Research*, Vol. 3, pp. 583–617.
- [18] Suykens, Johan AK, Tony Van Gestel, Bart De Moor, and Joos Vandewalle (2002) "Basic Methods of Least Squares Support Vector Machines," in *Least Squares Support Vector Machines*: World Scientific.
- [19] Yu, S., L.C. Tranchevent, B. De Moor, and Y. Moreau (2011) "Optimized data fusion for kernel k-means clustering," *Kernel-based Data Fusion for Machine Learning*, pp. 89–107.
- [20] Yu, Stella X and Jianbo Shi (2003) "Multiclass spectral clustering," in *Computer Vision, 2003. Proceedings. Ninth IEEE International Conference on*, pp. 313–319, IEEE.
- [21] Zelnik-Manor, Lihí and Pietro Perona (2004) "Self-tuning spectral clustering," in *Advances in neural information processing systems*, pp. 1601–1608.
- [22] 柳信一 (2014) 「距離の分布に基づくカーネルk-平均法のパラメータ探索法」, 『北海道情報大学紀要』, 第26巻, 第1号, pp.87–107, 11月。

〈研究ノート〉

The roles of English as a lingua franca in a short-term ICT task-based Japan-Thailand exchange program

Joel P. Rian*

Abstract

This paper examines the multiple roles that the English language plays in a two-week exchange program between two universities: one in Thailand and one in Japan. The program centers on task-based collaboration between three teams of students from each university: A Web design team, a short film team, and a computer program team. The teams spend a total of two weeks working together—one week in each country—to produce Web pages, short films and computer applications. Throughout the program, English is the common language.

In order to improve the program, the kinds of English encountered and used by participants need to be identified and considered in order to ascertain what kinds of training and support can be provided by instructors, and what level of English can be feasibly achieved in students' work within a two-week timeframe. Primarily the roles of English on the exchange program are: (1) English for general communication (conversation); (2) English for student projects: (a) Web pages, (b) short films, and (c) computer applications; and (3) English for short presentations. Problems inherent in all roles include: (1) the generally low proficiency level of students; (2) the consequent temptation to use machine translation injudiciously; and (3) reading machine-translated script from text-heavy slideshows as a style of presentation. Suggestions for coping with these problems are offered herein.

ICTを活用したプロジェクトベース学習

—日本とタイにおける短期集中国際交流プログラムを通じた、共通言語としての英語の役割—

ライアン ジョエル P. *

要旨

本研究は、日本とタイにおける大学で開催される短期集中プログラムにおける共通言語としての英語の役割を検討するものである。参加学生はウェブデザイン、ショートフィルム、プログラミングに分かれ、日本人2名タイ人2名の1チームを編成し、日本とタイの両国に約1週間滞在し、ワークショップ形式で作品制作する。プログラム期間英語が共通言語である。

プログラムを改善するに当たり、教員によってどのような英語支援が適切か、またわずか2週間でどれぐらいの英語レベルが実現可能か把握するために、参加学生が使用する英語を事前に確認する必要がある。英語は主として：(1) 一般会話、(2) ウェブページ、ショートフィルム、プログラミングの作品、(3) 短いプレゼンテーションで使われる。問題点は、主に、学生による(1) 低い英語運用能力、(2) 翻訳ソフトに任せがちな傾向、(3) 翻訳ソフトに訳されたままのテキストをパワーポイントなどに載せ、そのまま読み上げるプレゼンテーションに集約される。本稿はこの3つの問題点を改善するための対策を提案する。

Keywords: short-term exchange program English as a lingua franca (ELF)

*経営情報学部講師 Lecturer, Faculty of Business Administration & Information Science

1. Purpose of this Research

This paper has two main purposes:

(1) Identify and explain the ways the English language comes into play on a short-term exchange program between non-native, non-English-major Thai and Japanese students of limited proficiency, and (2) offer suggestions for several issues with regard to how English is used.

Between non-native speakers of limited proficiency, basic communication presents a number of challenges. However, the role of English on the program detailed in this paper goes beyond language for basic oral communication. Students must deal with English text used in Web pages, in dialogue and subtitles for short films, and in words and phrases used in computer applications. While instructors are available for guidance, students are largely responsible for the content, planning and construction of these projects. The specific content of these projects and the English necessary for them are somewhat unpredictable. Further, teams must present their projects in English to an audience of peers and teachers. The English they use depends on how presentations are given—in particular, whether they are scripted or unscripted. Instructors must also deal with a tendency for students to over-rely on machine translation (MT).

While none of these problems can be completely eliminated, a review of how and where they arise and what can be done about them is a step toward improving the program, toward validating its purpose of increasing participants' awareness of how the English language works in a real-world setting.

2. English and the HIU-RMUTT Exchange Program

The short-term exchange program at the focus of this paper occurs annually between



Figure 1. A Thai-Japanese group working on a short film, HIU-RMUTT exchange program, 2015

Hokkaido Information University (HIU), near Sapporo, Japan, and Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), near Bangkok, Thailand. English comes into play in three main ways: (1) for general communication; (2) for student project contents, namely: (a) Web pages, (b) short films, and (c) computer applications; and (3) for short presentations by students to peers and instructors. Generally, problems arise as a result of (1) low proficiency levels among students from both universities; (2) a habit of over-relying on machine translation (MT), mostly in the form of online translation sites; and (3) a tendency to read scripted presentations, which scripts are often derived from translation software. Suggestions for coping with these three issues are offered herein.

2-1 English for General Communication

Braj Kachru (1985) posited a model of three realms, or circles, that attempt to broadly categorize countries by “the type of spread, the patterns of acquisition and the functional domains in which English is used across cultures and languages” (p.12). Both Japan and Thailand are “expanding circle” countries, where English tends to be widely studied but hardly used in society. For language learners whose experience with English in their home countries is limited to classrooms, the concept of English as a global language (Crystal, 2003) likely remains abstract.

The HIU-RMUTT exchange program provides firsthand experience with a real-world need to use English as a common L2. The interaction between the Thai and Japanese participants in this program (Figure 1) is a prime example of an emerging type of English: ELF, or English as a *lingua franca*. This, as Mollin (2006, p.42) observes, involves conversations taking place between speakers who do not share a common L1, regardless of country or location. On this program, that interaction in English takes place in both Thailand and Japan, between Thai and Japanese participants, students and instructors alike.

The program is relatively new. Collaboration between the two universities began formally in 2007 with the signing of a memorandum of understanding. Both universities offer courses in media design, and both hold Web

page design contests for their students. Web design was the first of the three genres of ICT-based project learning, followed by short film-making and computer programming. Collaboration on these projects between the two universities began with the establishment of:

- (a) a unified process for production of work in in-school contests at each university, including lectures and workshops before and during the exchange program;
- (b) criteria for choosing international contest participants, as well as how many participants can be accommodated; and
- (c) a general process by which both universities agree to conduct the program.

A more detailed history of the program is offered in Anada (2015) in Japanese, however, an updated version of the program process is given in the Appendix (adapted from Anada, 2015, p. 22, my translation).

2-1-1 Problem: Low General Proficiency among Students

English is the common language throughout the program. However, although participants from both universities are generally highly motivated and eager to interact with each other, they generally have only rudimentary L2 linguistic means to do so. A formal analysis has not been conducted, however, based on averages of HIU students who have taken the TOEIC test, scores averaging 300 seem likely. I am unaware of RMUTT students' estimated scores, however, during my experience with the program in 2015—which I was privileged to join in its entirety both in Thailand and Japan—I did not note any discernible advantage between Thai students and Japanese students in terms of general communicative ability. A few students reported a similar perception to me, that neither group seemed significantly better than the other, and that they found this comforting. The similarity in Thai and Japanese English ability seems corroborated by data from the Educational Testing Service (ETS), the makers of the TOEFL and TOEIC tests, in its 2014 Report on TOEIC Test Takers Worldwide: Out of a possible 990, Thai takers averaged a total score of 481 and Japan takers averaged 512.⁽¹⁾

2-1-2 Suggestion: Encourage Communication Strategy Use

Most people can remember their first time in a foreign country. It is all at once thrilling and, in some cases, nervewracking. For most HIU students on this program, this is their

first experience travelling outside of Japan. The prospect of having to work closely with other non-Japanese students in a foreign language, with a tenuous and untested grasp of that language, is doubtlessly intimidating. Further, the time between when students are chosen as participants and when the program begins is short, offering little opportunity to brush up whatever skills they might have.

Ultimately, students must make do with what ability they do have. For many students, that ability—what it is and isn't capable of—is unknown to them. Zoltan Dörnyei offers an encouraging observation about successful communication by those with low L2 proficiency: "Some people can communicate effectively in an L2 with only 100 words. How do they do it? They use their hands, they imitate the sound or movement of things, they mix languages, they create new words, they describe or circumlocute something they don't know the word for—in short, they use communication strategies" (1995, p.56). Low TOEIC scores notwithstanding, we can assume that participants have a ready English vocabulary of more than 100 words. Using these devices to compensate for L2 linguistic deficiency may seem like common sense. However, students whose English classroom experience has largely focused on the study and mastery of "correct" English language forms may harbor the sense that it is not OK to use "incorrect" English when trying to communicate. And they may never have been told in the classroom that communication strategies are OK—even desirable—to use.

Research suggests that communication strategy training in the EFL classroom can benefit low-proficiency learners (Dörnyei, 1995; Faucette, 2001; Nakatani, 2010a, 2010b; Rost & Ross, 1991; Willems, 1987). However, pre-program workshop (see Appendix) time is limited and cannot accommodate more than a topical treatment of communication strategies, among other things. One strategy that can be easily highlighted, however, is known as the *appeal for assistance*, or *asking for help*. This strategy involves actively interrupting an interlocutor ("Excuse me") in order to ask for repetition, slower delivery, or explanation of an utterance ("Could you say that again please?" or "What does _____ mean?") I have used modified and abridged versions of classroom activities outlined in Maybin and Bergschneider (1992) that specifically train learners to use these phrases. I use a laminated "STOP" sign with *ask for help*

phrases on the back (Figure 2). This activity



Figure 2. STOP sign (obverse and reverse) for communication strategy training

helps students practice the art of actively asking an interlocutor for help in negotiating a conversation. A fuller description of these activities implemented in university EFL classrooms at HIU is offered in Rian (2016).

Japanese learners in particular tend toward shyness both in and out of the language classroom (Doyon, 2000). Their pre-university English classroom experience typically lacks conversation practice, and is teacher-centered and language-form-focused. It may be reassuring for students to learn that appeals for assistance are not an admission of fault for not having achieved better proficiency after six or more years of compulsory pre-university English study, but rather that they represent an active step toward overcoming communication breakdowns that will inevitably happen between lower-proficiency speakers.

A specific example from the 2015 program occurred when the output of translation devices failed. One of the Japanese students was trying to say to a Thai student that he felt *だるい* [darui], which is a casual expression for feeling tired or worn out. A smartphone translation rendered *だるい* [darui] as *languid*. The Japanese student couldn't pronounce it, and showed her his smartphone. The Thai student responded

with, "What does that mean?" The Japanese student then used body language and a facial expression to indicate tiredness.

Another example I observed was when a Japanese student described the arduousness of the program schedule using the Japanese word *辛い*, which has two meanings and can be read two ways: [karai], and [tsurai]. The first means *spicy* while the second means *hard* or *difficult*. The smartphone translator had only brought back the first meaning, *spicy*. The Thai student asked, "Spicy? What do you mean?" The Japanese student then restated it: ハード [ha-do], the Japanese transliteration of 'hard'. The Thai student still didn't understand, so I interjected and offered another word: *busy*. The Japanese student liked this alternative, smiled, and said emphatically, "Yes yes, very very busy!"

In another instance, a Japanese student was trying to convey to his two Thai teammates that the other Japanese team member was not present because she had been called away to a 交流パーティー [kouryuu paatii], or an informal social get-together, by some other Thai students. The word 交流 [kouryuu] has a variety of meanings, including *social get-together*, *interchange*, *transaction*, and *alternating current*. The Thai students were bewildered when the Japanese student held up his smartphone. The screen read, *alternating current party*. I suggested to him that he simply rephrase the entire statement to: "She is busy, she will be back soon." I mentioned that this act of restatement was a communication strategy, which was advice that no translation device anywhere could provide.

While communication strategies cannot completely compensate for an acute lack of vocabulary and basic grammar, an awareness of them can at least offer the potential for recovery in some misunderstandings. What degree to raise students' awareness of communication strategies as compensatory devices must ultimately be left to the discretion of individual English instructors, whose availability for participation in the program may vary by year. However, the implication of communication strategies, and the philosophy of "interlanguage" (Selinker, 1972) on which they are founded, seem clear: in any conversation, if an English utterance makes sense to a listener, then that English is good enough. And if it doesn't make sense, then seeking clarification is acceptable, and encourageable, until meaning is successfully negotiated.

2-2 English for Projects: Web Pages, Short Films, and Computer Applications

Types of English and the range of vocabulary needed for projects that students produce on the program vary. Students need language necessary to put together Web page text, short film subtitles, and computer application content. Following are accounts of several language problems that were apparent in the 2015 program.

2-2-1 Problem: Tendency to Defer to Translation Software

For low English proficiency students whose major is ICT-related, the allure of machine translation (MT) may be irresistible. The ubiquity of smartphones and a multitude of convenient online translators seem to offer convenient fixes for L2 deficiency. However, while MT has made considerable advances as technology constantly develops, it still has significant limits. For example, most online translators can provide grammatically correct renditions of simple sentences like “I went to school yesterday.” But they would have trouble with: “I would have considered going to school yesterday, if it weren’t for the fact that I had a high fever and two feet of snow had fallen.” Some simple examples of the limits of MT are offered by Harris (2010, p. 27). These were converted from English (A) into Japanese (B) and then back-translated to English (C) through a popular online translation site, Yahoo! BabelFish:

- A. Bob loves Clara, who loves Bill.
- B. ボブはビルを愛するクララを愛する。
- C. The hob loves [kurara] which loves the building.

- A. Sam broke down and cried.
- B. サムは破壊し、叫んだ。
- C. It destroyed sum, shouted.

Harris states, “Simply put, MT does not work well unless there is sufficient world knowledge (knowledge of the relationship between things) and controlled language (p. 26). He cites Melby (1995, p. 4), who observes, “computers are very likely to produce atrocious results [unless the text treats] a very narrow topic in a rather dry and monotonous style.” In the case of language used by students in their projects, they are often unaware of how complex it is, and how limited MT is in terms of rendering it accurately from one language to another. Text is a necessary part of Web page design. Without at least some longer text passages, a Web page might appear as a repository of images and pictures with short captions.

For the 2015 program, a Web page contest entry by an HIU team featured a comparison of various deities. Each deity featured a hand-drawn illustration in *manga* style accompanied by a brief “profile” summary in Japanese (Figure 3). In order to be submitted for the International Contest, the Web page had to be converted to English. The translation provided to me for editing was obviously straight from an online translator. It read as follows.

Profile

Birthplace: Greece

Greek myth is appearance
“Intelligence” “Art” “Crafts” strategy
to govern a Goddess.

World heritage in the Parthenon is
her should Enshrined was and Current



Figure 3. Excerpt from an in-school Web Design Contest (WDC) entry

of the Greece Capital to name said to from the her name. Also her the hide of a goat and monster Medusa the neck made aegis hold a shield against a person Rejected this shield.

This shield name current Warship is mounted 「Aegis System」 has been passed down. This modern society at first name learn God.

「Because I am defeated by nobody...」

I edited this to the following, changing some of the content in the process:

Profile

From: Greece

Goddess of arts, crafts, intelligence and strategy.

Said to live in the Parthenon in Athens, the capital of Greece, which borrows her name. She wears an ‘aegis’, made from goat hide, and has a shield made the neck of a monster called Medusa. With these she defeats enemies.

Japanese warships use a missile defense system called the “Aegis System.” So, Greek Mythology is alive, even in Japan.

“Second to None...”

In cases like these, students generate complex sentences and paragraphs in their L1, run them through an online translator, and then copy and paste the result into the English version of their Web page. While teachers may perceive this action as lazy, it may simply reflect an inability by students to appreciate the shortcomings of the translation engines. The output looks like English to them, and in their mind that is good enough. The problem lies in the fact that they do not have—or they *think* they do not have—sufficient language ability to question it. Ultimately, however, it is what Dougill (1987, 2008) aptly termed “decorative English.” To the untrained, it looks good, but in the eyes anyone of higher proficiency, it cheapens the product it adorns.

2-2-2 Suggestion: Show Students How to Use Translation Software Judiciously, and Why

Students need to understand the limits of online translator output, and that their input is needed in order to give their text substance. Total deference to translation software is a means of escape, an attempt to avoid responsibility. To guard against this, instructors can tell students directly about the pitfalls of MT. Better, they can show them

by pointing out examples of effective and ineffective MT use, in real time.

Some instructors try to sweep the MT issue under the rug. They would rather ban the use of translation devices altogether. But for all their shortcomings, online translators need not be denigrated, nor should they be prohibited outright. Rather, they should be shown for what they are, and demonstrated for how they can contribute to student learning. In the specific setting of the HIU-RMUTT exchange program, which revolves around computers and technology, banning MT is virtually unfeasible. In fact, it would deprive students of the opportunity to experiment with and learn about how MT works, as well as how it doesn’t work.

Regarding the MT issue, Niño (2009) offers some balanced advice:

In the language class students, especially those with a low proficiency of the target language, can be shown instances of what free online MT can and cannot translate so that they are made aware of the uncertainty of relying on these systems as the only online resource for their foreign language written production. At the same time students can be shown good examples of writing and translation into the target language and can be presented with more reliable online resources to check the correctness of their work. This can send them the message that free online MT output is often of a worse linguistic quality than what they are capable of doing. All in all, students should also be educated in the belief that only by getting fully involved intellectually and by adding some creativity to their tasks will they learn properly how to communicate themselves in the target language. (p. 246)

One solution to the MT issue, then, is to explicitly and concretely show students the reality and limits of translation software, and where possible, to point out alternatives. A variety of online translation resources is available, and each has merits and demerits. The ones at issue are those that attempt to handle chunks of text, like long sentences or entire paragraphs. Others, such as online dictionaries, deal with words and phrases only. With these resources, students can research the meanings of individual words and phrases, and then string them together using their own knowledge of basic grammar. For Japanese learners of English and English learners of Japanese, www.alc.co.jp brings up a list of example sentences in addition to simple definitions of words and phrases. It is an excellent resource for understanding how words and phrases are used in context.

Inevitably, some students will copy and paste online translator gibberish, thinking or hoping that it is a faithful translation from an L1. Here are two ways of providing feedback:

(1) Ask students to read the translation aloud. If it appears that they stumble to pronounce unknown words or language forms, they can be told that if *they themselves* appear not to understand the text, their audience is unlikely to understand it either.

(2) Indicate the complexity of the source L1 text. Provide a simplified rendition in L2, and suggest simplifying the L1. Alternatively they can be told to back-translate the simplified version of the English into their L1. This act can demonstrate the effectiveness of starting off with concise, clear language.

Simplifying the source language may seem limiting to students. As young adults, students have achieved a level of proficiency in their L1 that often vastly outstrips what they can do in an L2. They are often unaware how vast that gap may be. They may have never considered their own L1 proficiency, or the ways they construct text in their own language. They may discover unexpected complexity in their own L1, or that there are more direct ways of expressing complex ideas. Ideally, they will become aware of their audience. On this program it is mostly non-native English speakers, just like them, who appreciate it when the other person keeps things simple for them.

Additionally, students may think that translating from an L1 to an L2 is just the same as translating from an L2 to an L1. In fact, L2 to L1 is much easier because of stronger lexical association (Fujii, 2007): the amount of L1 words and language forms at the translator's disposal is usually far greater than their L2. This is why professional translation agencies often employ translators to translate from an L2 to their L1, rather than vice versa.

On the other hand, translating from an L1 to an L2 can be a useful tool for learning vocabulary and language forms (Fernandez-Guerra, 2014), especially for students of higher-level proficiency (Stern, 1992). However, this can occur only when sufficient teacher guidance is provided. Depending on the volume and nature of the text, and considering the lower proficiency level of the students, adequate guidance may not always be available. This is doubly true in the case of some projects. For example, short film teams often travel on short notice

to various locations in order to shoot scenes. They may create or adjust dialogue on on-site. A proficient English speaker is not likely to be available to accompany and advise every short film team on-site.

On the same note, expecting students to come up with their own English without using any resources would invite frustration. When students ask for help with English phrasing for conversation, for projects or for presentations, instructors can offer their own input on how it *could* be rendered. They might put it to students like this: "Well, I might say it this way, but now how do *you* want to say it?"

Ultimately, a balanced attitude among both instructors and students toward the use of MT will likely prove the most useful. The key is fostering among students a sense of ownership of the English texts they create. If asked, can students explain in their own best English why they said what they said and how they said it? It is an achievement if they can. If they have difficulty, then the text can be rephrased and simplified until they can. And while examples of rephrasings should be offered, it is important to show them the validity of their own English voice, however imperfect; of not allowing others, especially machines, free license to put words in their mouths, on their Web pages or in their subtitles.

2-2-3 Problem: Culture-Specific Humor

Currently there are no limits on what students can submit for contest entry. For the HIU in-school contest, many students submit entries whose contents are entirely in Japanese. Perhaps they expect to convert them to English only if they are accepted to the international program. And perhaps they are unaware of how complicated that conversion to English may be.

An example from the 2015 program was a short film entry titled "Assassin from Future" [sic]. It included a personification of the days of the week. The film director cleverly personified the five weekdays as members of a *dantaisen*—a term for a team of competitors of three to five people commonly used in the Japanese martial arts of *kendo*, *judo* and *sumo*. Several terms refer to each competitor's rank or ability within the team. These are 先鋒 [senpou], 次鋒 [jihou], 中堅 [chuuken], 副将 [fukushou], and 大将 [taishou], respectively.

In Japanese, each day of the week is represented by a certain Japanese character. The weekdays are, 月曜日 [getsuyoubi],

Monday; 火曜日 [kayoubi], Tuesday; 水曜日 [suiyoubi], Wednesday; 木曜日 [mokuyoubi], Thursday, and 金曜日, [kinyoubi], Friday. The first character in each set of three is an astronomical reference. These are some similarities in English. “Mon” in English, or 月 in Japanese, refers to the moon. Hence Monday is literally “moon day” in both English and Japanese. On the other hand, Wednesday derives its name in English from the Norse god Odin, also spelled Woden or Woden. Hence, Woden’s Day, or spelled with the Old English possessive, *Wedenes Daeg*. The Japanese reference follows the Latin reference to the Roman god Mercury, hence *Mercurii Dies* in Latin, or *Mercredi* in French. In Japanese, the planet Mercury is represented as 水星 [suisei]. The character 水 [sui] also means simply *water*. The producer of the film touched on this double meaning in his short film (Figure 4), where Wednesday could be interpreted as “water day.”

While the references are clever, they are lost on an audience without Japanese proficiency. Without considerable background explanation, a direct rendering of the Japanese could be awkward or confusing. This is particularly true in the case of subtitles, where time and screen space are very limited. As an example of direct translation, consider the script for the scene in Figure 4:

Original Japanese:

次に！まだ半分という絶望！激流の中堅、水曜日！

(My) direct translation:

Next, the middleweight champion of half-way hopelessness, Wednesday!

(My) revised translation:

Then there’s Wednesday, also known as “hump day”—a virtual mountain to get over!



Figure 4. Still capture from a Web Design Contest (In-School) short film entry: Wednesday as “water day.”

While both of these translations are plausible, the reference to the Japanese 中堅 [chuuken], or middleweight team member, and to water for Wednesday (水曜日 [suiyoubi]) are lost on an international audience. A contemporaneous subtitle explanation would require too much text.

Arguably, in this case what is lost in translation might not necessarily detract from the finished product. However, it is an example of unanticipated challenges in communicating content from one language and one culture to another. While putting together ideas for their projects in their L1, contest entrants may not have their mind on how the L1 will render into L2. In this particular case, the entrant had done his homework: He had provided a partial English translation for his subtitles, using his own words as much as possible, when he submitted it to me for review. He explicitly admitted that he ran into trouble with the scenes about the days of the week.

2-2-4 Suggestion: Encourage L1 Clarity in Order to Foster L2 Clarity

The same rule of thumb applies to short film subtitles and to computer applications as it does to Web page text: the clearer it is in L1, the easier it can be rendered into L2. It is not necessary to limit the content of student projects merely for the sake of easy translation, but it is helpful to bear in mind the question, “How would I explain this in English?” while producing L1 content, for two reasons. First, it will be necessary to do this when co-producing material with foreign counterparts, whose proficiency is roughly the same. Second, the finished product will need to be explained in English in a final presentation at the end of the program, to an audience of peers and staff. And while some staff may be more proficient than their students, they will no doubt appreciate simplicity and clarity just the same.

2-3 English for Short Presentations

Of all program tasks, the “simple is best” rule of thumb applies most aptly to short presentations. Of all tasks on the program, presentations may be the most challenging. Speaking at the front of classrooms may be second nature to veteran instructors, who may have forgotten how terrifying the act may feel to their students. According to de

Becker (1997), a deathly fear of public speaking may literally be well founded:

Surveys have shown that ranking very close to the fear of death is the fear of public speaking. Why would someone feel profound fear, deep in his or her stomach, about public speaking, which is so far from death? Because it isn't so far from death when we link it. Those who fear public speaking actually fear the loss of identity that attaches to performing badly, and that is firmly rooted in our survival needs. (p. 297).

This fear of identity loss may be high in Japan, whose society traditionally puts great importance on saving face. Typically Japanese excel at working in groups, but are terrified of standing out of one. Perhaps this fear is even more acute among college-age young adults with little or no experience giving effective and lively presentations in front of peers and teachers. Low proficiency in English—the prospect of fumbling with unfamiliar words in an unfamiliar L2—lifts the hurdle of fear even higher, raising the stakes for messing things up in front of everyone, for all to see and judge, to astronomical levels. What happens as a result, and what can be done about it, is offered below.

2-3-1 Problem: Students Give Dull, Lackluster Oral Presentations

It is common for students who are not familiar with giving a presentation to fall into the trap of writing it out on paper and simply reading aloud to their audience. When accompanied by a slideshow like PowerPoint, some presenters insert blocks of text on any number of slides and then recite verbatim what is clearly in front of the eyes of the audience. Sometimes they face the projector screen or look down at the computer screen while they do this. Worse, sometimes they read in a soft, mumbly voice, in an effort to mask their poor pronunciation, or the fact that they cannot understand what they are reading. This is the presentation equivalent of “decorative English” mentioned before. It fulfills the form of talking in front of people, and not much more. Perhaps this is why some presenters end quickly and rush back to the safety of their seat, eager to escape the shame of burdening their audience with what they know is a boring presentation.

These actions are like surrendering to the whims of translation software: some students think they can do no better, bound fast by a low-English-proficiency straitjacket that clasps them into unrelenting mediocrity, restricting them from saying what they might

otherwise want to say.

Mumbling and terror aside, it is safe to say that reciting from script, memorized or not, is not an uncommon method of giving a presentation. In Japan, some students may be trained to do it this way, or, they may pick the habit up from witnessing some of their teachers. Unfortunately, the act of reading slides can be frequently observed in university classrooms. Reading polished language is not necessarily a bad thing. Some presenters can be engaging this way. In the case of low-proficiency presenters, however, polishing language is challenging, and reading it in a lively, confident and engaging manner is even more challenging.

A hypothetical worst-case scenario: in a final program presentation of a group's collaborative hard work, a student presenter gets up in front of an audience of classmates, teachers, and high-level university staff. He and his teammates are armed with a PowerPoint but have no sense of the main goal of a presentation: to engage the audience by being informative, persuasive and dynamic. One teammate reads the slides verbatim, while the others stand off to the side. He reads in a low, monotone voice, eyes cast down, body bent toward the computer, one arm on the lectern and the other on the computer mouse to advance the slides. The text is the product of rambling, needlessly prosaic Japanese text, thrown into and regurgitated by an online translator, whose output was copied and pasted directly into the slides.

If the program can be intended to improve presentation skills, participants who are allowed to present like this are being ill-served. They are denied an opportunity to garner recognition for the fruit of their hard work during the program. At worst, they are robbed of a chance to triumph over a fear of death.

2-3-2 Suggestion: Provide Practice with Unscripted Presentation, and Focus on Eye Contact, Body Language and Voice Volume

Disallowing the recitation of text during a presentation may seem cruel and unusual punishment for lower-proficiency students. It is something I did unabashedly during the 2015 program, and with good results. Because students are operating in an unfamiliar L2, it may seem like they need to polish what they will say in a written version. *Writing out* a presentation is fine, even helpful, so long as they do not *read* it. Unless students are unusually adept at preparing, memorizing and reciting a

well-polished text, they wind up becoming attached to the printed word, whether on slides or on paper. As a result, students come to feel that they cannot present without such a crutch. The result is an uttered text, which unless delivered by a skilled orator is typically cringe-worthy to any audience.

A viable alternative is to encourage written preparation of what *kinds of things to say*—an outline—but to disallow recitation from a complete, polished text. In other words, no holding or reading a paper of any kind, and allow only a small number of words on each slide. Sparsely worded slides are in line with best practices for effective oral presentation visuals (Sloboda, 2003), including the use of color, font size, and simple images, among other things. For students of Web design in particular, these elements should be familiar.

According to Al-Issa & Al-Qubtan (2010), currently there is limited literature on oral presentations in EFL classrooms. The existing literature deals with EFL oral presentation assessment (see e.g. Otoshi & Heffernen, 2008). Commonly among the criteria for assessment are the use of non-verbal elements, such as eye contact, voice volume, and body language and movement. For program participants, encouraging and practicing the use of these skills is a step toward compensating for limited oral proficiency. The philosophy: an imperfect but dynamic talk is more engaging than a polished, uttered text.

The conditions of the program are the same for oral presentations as they are for general oral communication: there is not enough time to significantly improve students' L2 linguistic ability. So, the same advice for students to use the best English they can muster in a conversation can be applied to the art of presenting: a lively presentation in simple, even broken English is more engaging—in particular to a non-native audience of similar proficiency levels—than a recitation of polished script. Again, an opportunity to point out to students the usefulness of communication strategies presents itself: paraphrase, circumlocution and mime (including facial expressions, body language and gestures) are as handy in presentations as they are in conversation to offset the numbing silence that can result from not being able to find the “right” words.

It should be noted that some instructors prefer polished, scripted presentations, and may not be comfortable with advocating this presentation style, fearing that it may provide too great a temptation for some students to

do slipshod preparation. A worst-case scenario would be a student who presents with a poor slideshow and one-word utterances before quickly retreating to his seat, and excuses his performance with the claim that “English is difficult.” This temptation can, however, be identified and stemmed before it becomes a problem.

From what I observed, no problems occurred with presentations during the 2015 program. On the contrary, university staff commented positively on them, compared to previous years. This success is, I believe, in part due to presentation practice sessions held once during pre-program mini-workshops, once at the beginning of Workshop 1 (see Appendix), and at the two presentation rehearsals just before the final presentations at the end of Workshop 2: one on the day before, in the classroom, and one on the day of, on the actual stage. During these practice sessions, participating instructors gave direct and specific feedback and suggestions to students, who then took the advice. Continuation and, if feasible, expansion of this presentation training—underscoring to students the connection between good preparation and good presentation—would seem to bode well for continued success. Just as a poor presentation seems to risk a desperate loss of face in front of others, a successful, engaging one may stand as a significant psychological achievement, a large boost to self-confidence, for any student to take away from the program.

3. English, the HIU-RMUTT Exchange Program, and “Global Human Resources”

The HIU-RMUTT program bills itself as an answer to a call by the Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science & Technology (MEXT) to develop “global human resources.” This term sounds good, but it deserves some background and clarification.

In 2012 the Central Council for Education, one of a number of bodies that advise MEXT, advocated the development of *global human resources*, citing a trend among Japanese towards insularism and introversion (sometimes referred to as *uchimuki*) in addition to the generally accepted view that Japanese have comparatively poor abilities with foreign language. The Central Council's final recommendations to MEXT appear in Japanese only⁽²⁾, but are detailed in, and

based largely on, an interim report by another related entity, the Council on Promotion of Human Resource [sic] for Globalization Development⁽³⁾, for which an English translation is available⁽⁴⁾. The interim report coins the term *global human resources*, stating that:

In order for Japan to reemerge as a country with a growing economy ... while it continues to face the issues of decreasing population and drastically aging society, it is an urgent issue to cultivate members of the young generation who possess creativity and vitality. As globalization gathers speed for the international economy of the 21st century, it is of great necessity to continuously develop "global human resources" who possess rich linguistic and communication skills and intercultural experiences, and thrive internationally. (p.3)

The interim report continues:

The concept of "global human resources," which Japan must develop and utilize as it goes forth in this globalized economy and society, can be, generally speaking, consisted [sic] of the following factors:

Factor I: Linguistic and communication skills

Factor II: Self-direction and positiveness, a spirit for challenge, cooperativeness and flexibility, a sense of responsibility and mission

Factor III: Understanding of other cultures and a sense of identity as a Japanese.

In addition to the above, qualities that are commonly required not only of "global human resources" but also of core individuals for future Japanese society include: broad and well cultivated mind and profound expertise, willingness to find and solve problems, team-work and leadership skills (to bring together persons of various backgrounds), public-mindedness, moral sensibilities, and media-literacy. (p.7)

It is notable that the report lists the first factor necessary for global human resources as *linguistic and communication skills*. It explains:

Considering the wide-range of factors included in the concept of "global human resources," the required qualities and skills cannot be measured with a single yardstick.

However, if the qualification standards were to be presented in levels (from primary to advanced) based mainly on Factor I (linguistic and communication skills as "tools"), which are relatively easy to measure (expecting that other factors will entail in line with such skills), the following may be one example:

- (1) Communication skills for travels abroad.
- (2) Communication skills for daily life abroad interactions.
- (3) Communication skills for business conversation and paperworks. [sic]
- (4) Linguistic skills for bilateral negotiations.

(5) Linguistic skills for multilateral negotiations.

Of the above, it can be said in Japan that there has been a steady increase in "global human resources" who are at the (1),(2), and (3) levels in Japan. From now on, we must go further to develop those who are in (4) and (5) levels (p.7-8)

It is unclear what is meant by bilateral and multilateral negotiations, however, the word *negotiations* seems to evoke an image of high-level English proficiency.

Immediately following, the report cites low Japanese TOEFL scores compared to those of other countries. It is intriguing to note that this claim was called into question in 1993 by J.D. Brown, an expert in testing, who, as Davidson (1998) informs us,

pointed out that Japan's average TOEFL score proved nothing about the English abilities of Japanese people as compared with other Asian nations. This is because Japan also has by far the highest number of people taking the TOEFL test. In many nations, only a very small number take the TOEFL test. Usually they are proficient English language users definitely planning to study or do research abroad. In Japan, many without such definite plans take the test as a measure of their English language achievement. So naturally a lower national average results. (p. 46).

TOEFL arguments aside, it is clear is that the report reflects a commonly accepted understanding that Japanese are generally poor at English, and that it argues for measures to be taken to raise English ability among Japanese. It would seem, then, that MEXT's ideal "global human resource" is one with high-level English proficiency.

Unfortunately, a two-week exchange program has negligible value in measurably boosting the English level—specifically the linguistic competence—of its participants. However, the program makes an invaluable contribution to its participants: most come away from the program with a sense of achievement and a modicum of confidence toward the *idea* of communicating with foreign people in English. Thus, while the program cannot afford participants significant improvements in linguistic competency, it provides the quintessential element, in particular for low-proficiency learners, for language learning to begin. Participants get a sense of achievement from the experience of having collaborated and communicated in English with real foreign people on real projects, and hopefully, a resulting positive attitude toward language learning.

4. Conclusion and Recommendations

A number of faculty members from HIU and RMUTT participate in this program every year, and there is general agreement to the basic framework. However, while the English language plays such a crucial role in participant success, very little has been discussed in terms of how to best bring out and utilize the English that students already know. This is important because, as mentioned before, a two-week timeframe is simply not enough to raise general linguistic ability. In other words, students need to tap into the ability they already have, and learn to make do with that. At minimum, students will experience what a genuine need for L2 competence means. They may realize through participation on the program the limitations of what they can express and understand in an L2 versus their L1. Hopefully, however, they will realize not what they *cannot* do but what they *can* do in an L2; that at very least it is enough to function; and that their years of compulsory study have yielded them something more than preparation to take tests.

A brief set of principles, or guidelines, for handy reference regarding the use of English in each of the roles treated in this paper—general communication, collaborative projects, and short presentations—might be helpful for current and future participating staff. While some staff are more proficient in English than their students, they likely share some of the same apprehensions when it comes to using English for actual communication. This is a good thing, because it means they can empathize with the struggles of the learners.

A set of guidelines as to how to approach English use would be helpful so that students and staff embarking on the program at both universities abide by a similar philosophy—in specific, that imperfect English is not necessarily bad English. The three main issues to work into these guidelines are:

- (1) Best practices for judicious use of translation software;
- (2) Best practices for effective short presentations; and
- (3) Tolerance and acknowledgement of imperfect English as *interlanguage*; that is, embracing the idea that any English that makes sense to the other person is good English, or at very least, good enough.

I would caution, however, that any guidelines established should remain just that—guidelines. They should not become

prescriptions or proscriptions. For example, some English teachers may feel uncomfortable encouraging “broken” English or unscripted presentations. If instructors can make students feel at ease through mastering language forms and by using written scripts to produce engaging presentations, then they should unquestioningly be allowed to do so.

Finally, although English plays a crucial role in the program, it is barely accounted for in evaluation. The program is referred to as “international,” but the term refers to the interaction and collaboration by teams of students and instructors from two countries on projects using the best English they can. In the end projects are evaluated locally by teachers who are mostly non-native speakers. “English quality” is one criterion on the evaluation rubric, but counts for a tiny number of points. Presentations, too, are evaluated not by any language proficiency criteria but by their overall impact on an audience of mostly non-native speakers. The thought occurs that, if the term “international” is to refer to a true global audience, then the linguistic element of English language content should somehow be better supported in the project production process, and should carry greater weight in evaluation outcomes.

The improvement of English ability is one of MEXT’s ideals. However, it should be pointed out that while reports by the aforementioned councils strongly advocate a need to improve English linguistic competence in what they envision to be “global human resources,” the very first sentence of the final recommendation to MEXT by the Central Council for Education, set off by a bordered text box, states:

グローバル人材の育成については、これまでも政府内で様々な検討がなされてきた。その中で、「グローバル人材」に求められる要素として、語学力のみならず、相互理解や価値創造力、社会貢献意識など、様々な要素が想定されている。⁽²⁾ [Up to this point, there has been much discussion in government with regard to the development of global human resources. Amid this discussion, it is envisioned that the essential elements for “global human resources” include not only those of linguistic ability, but also the capacity to mutually understand, to add value, and to be conscious of making positive contributions to society.] (p.1)

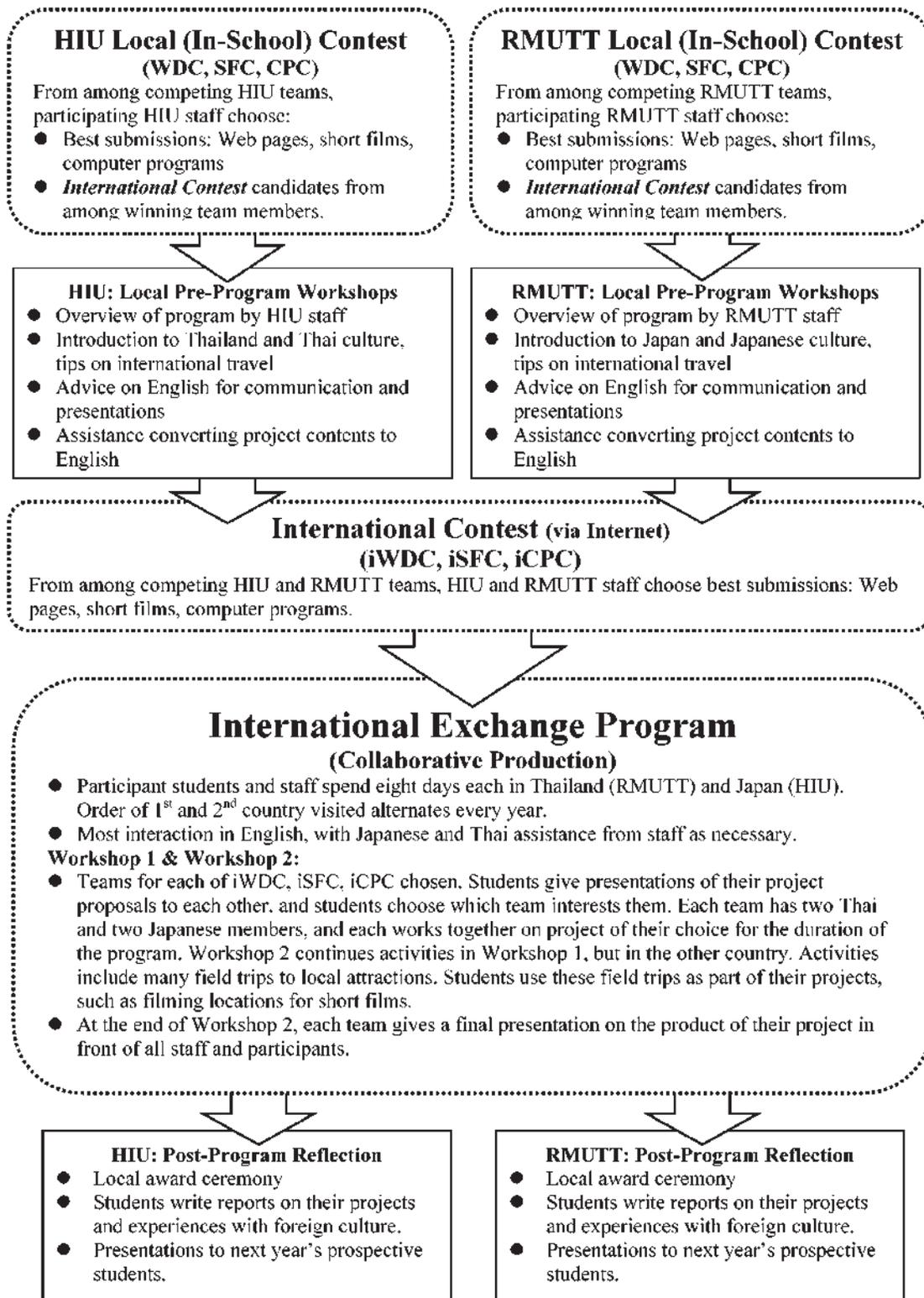
Mutual understanding, collaboration, and making social contributions can all be achieved with limited fluency in English. The value of the HIU-RMUTT program as a promoter of global human resources rests not in how well it can improve participants’ L2

linguistic performance, but in how well it can raise their awareness of how English works, what English ability they already have, and how well that ability can serve them despite its imperfectness. If the program can foster a positive attitude toward interacting with international partners using English, it has already attained a praiseworthy goal. This positive attitude is, perhaps, the essence of what the promotion of global human resources genuinely seeks to achieve.

References

- ⁽¹⁾ Educational Testing Service (ETS) Website: 2014 Report on Test Takers Worldwide: The TOEIC Listening and Reading Test. Retrieved from https://www.ets.org/s/toeic/pdf/ww_data_report_unlweb.pdf
- ⁽²⁾ MEXT Website: グローバル人材の育成について [Development of global human resources]. Retrieved from http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyokyo3/047/siryof_icsfiles/afiedfile/2012/02/14/1316067_01.pdf
- ⁽³⁾ Japanese Government Website: 「グローバル人材育成推進会議 中間まとめ」(2011年6月) [An Interim Report of The Council on Promotion of Human Resource for Globalization Development (June 2011)] [Japanese version] http://www.kantei.go.jp/jp/singi/global/110622chukan_matome.pdf
- ⁽⁴⁾ Japanese Government Website: An Interim Report of The Council on Promotion of Human Resource for Globalization Development [English version] http://www.kantei.go.jp/jp/singi/global/120601interim_report.pdf
- Al-Issa, A. & Al-Qubtan, R. (2010). Taking the Floor: Oral Presentations in EFL Classrooms. *TESOL Journal*, 1(2), 227-246.
- Anada, Y. (2015). ICTを活用したグローバル人材育成プログラム (Web 作品制作、ショートフィルム制作、コンピュータプログラミング) [Education program for fostering global person by utilizing ICT (Making Web work, short film and computer program)]. *グローバル人材育成教育研究 [Global Competency Education]* 2(1), 20-30.
- de Becker, G. (1999). *The Gift of Fear and other survival signals that protect us from violence*. New York: Dell Publishing.
- Brown, J.D. (1993). Language test hysteria in Japan? *The Language Teacher*, 17(12), 41-42.
- Crystal, D. (2003). *English as a global language (2nd ed.)*. Cambridge University Press.
- Davidson, B. (1998). The relevance of critical thinking to the teaching of the social sciences. *Hokusei Review (School of Social Welfare, Hokusei Gakuen University)*, 35, 41-51.
- Dörnyei, Z. (1995). On the teachability of communication strategies. *TESOL Quarterly*, 29(1), p.55-85.
- Dougill, J. (2008). Japan and English as an alien language. *English Today*, 24, 18-22.
- Dougill, J. (1987). English as a decorative language. *English Today*, 3, 33-35.
- Doyon, P. (2000). Shyness in the Japanese EFL class: Why it is a problem, what it is, what causes it, and what to do about it. *The Language Teacher*, 24(1), 11-16, 37.
- Faucette, P. (2001). A pedagogical perspective on communication strategies: Benefits of training and an analysis of English language teaching materials. *Second Language Studies* 19(2), 1-40.
- Fernandez-Guerra, A. (2014). The usefulness of translation in foreign language learning: Students' attitudes. *International Journal of English Language and Translation Studies*, 2(1), 153-170.
- Fujii, Y. (2007). Making the Most of Search Engines for Japanese to English Translation: Benefits and Challenges. *Asian EFL Journal*, 23, 1-36.
- Harris, H. (2010). Machine translations revisited: issues and treatment protocol. *The Language Teacher*, 34(3), 25-29.
- Kachru, B. (1985) Standards, codification, and sociolinguistic realism: The English language in the outer circle. In R. Quirk & H. Widdowson (eds.), *English in the world: Teaching and learning the language and the literature*. Cambridge University Press, 1985: 11-30.
- Maybin, D. & Bergsneider, L. (1992). Control: An independent learning model. *Cross Currents*, 19(2), 149-159.
- Melby, A.K. (1995). Why can't a computer translate more like a person? *Fortune City*. Retrieved from www.mt-archive.info/Melby-1995.pdf
- Mollin, S. (2006). English as a lingua franca: A new variety in the new Expanding Circle? *Nordic Journal of English Studies* 5(2), 41-57.
- Nakatani, Y. (2010a). Identifying strategies that facilitate EFL learners' oral communication: A classroom study using multiple data collection procedures. *The Modern Language Journal*, 94(i), 116-136.
- Nakatani, Y. (2010b). *Improving oral proficiency through strategy training*. Saarbrücken, Germany: Lambert Academic Publishing.
- Niño, A. (2009). Machine translation in foreign language learning: language learners' and tutors' perceptions of its advantages and disadvantages. *ReCALL*, 21, 241-258.
- Otoshi, J., & Heffernan, N. (2008). Factors predicting effective oral presentations in EFL classrooms. *Asian EFL Journal*, 10(1), 65-78.
- Rian, J.P. (2016). Teachable communication strategies: Asking for help in English conversations. *OnCUE Journal*, 10(2) (in press).
- Rost, M. & Ross, S. (1991). Learner use of strategies in interaction: Typology and teachability. *Language Learning* 41(2), 235-273.
- Selinker, L. (1972). Interlanguage. *International Review of Applied Linguistics*, 10, 219-231.
- Sloboda, B. (2003). Creating effective PowerPoint presentations. *Management Quarterly*, 44(1), 20-34.
- Stern, H.H. (1992). *Issues and options in language teaching*. (P. Allen & B. Harley, eds.) Oxford: Oxford University Press.
- Willems, G. (1987). Communication strategies and their significance in foreign language teaching. *System*, 15(3), 351-364.

Appendix: HIU-RMUTT Exchange Program Process (adapted and translated from Anada, 2015)



〈研究ノート〉

北海道情報大学高血圧者の現状および特徴についての検討

佐藤 浩樹*・佐藤 裕二*・西平 順*

**The examination of present conditions and characteristics in
Hokkaido Information University hypertensive students**

Hiroki SATOH*, Yuji SATO*, Jun NISHIHIRA*

要旨

平成 25 年の国民健康栄養調査によると、収縮期血圧が 140mmHg 以上の高血圧者の割合は男性 38.3%、女性 29.7%と報告された。高血圧は心血管疾患発症の重要な危険因子であるが自覚症状を認めることが少ないため放置される可能性が高い疾患の一つである。さらに、高血圧は罹病期間と心血管疾患発症増加率と密接な関係があり早期の介入が必要な疾患でもある。このような背景より、今回我々は平成 27 年度に行われた北海道情報大学生定期健康診断結果を利用して、高血圧者の現状および特徴について検討を行った。全学生 1,510 名のうち 104 名 (6.9%) に高血圧を認めた。性差では男性 1,276 名中 101 名 (7.9%)、女性 234 名中 3 名 (1.3%) であった。学年別の検討では 1 年生が最も多く 33 名 (31.7%) であり、4 年生、2 年生、3 年生の順に多かった。尿検査異常を認める対象者の割合は低かった。体型の検討では、高血圧者の Body mass index (BMI) の平均値±標準偏差は男性、女性それぞれ 27.8 ± 6.5 , 24.6 ± 6.8 (kg/m^2) であった。次に、高血圧の重症度により I 度 (収縮期血圧 140~159mmHg または /あるいは拡張期血圧 90~99 mm Hg) および II 度 (160~179 mmHg または /あるいは拡張期血圧 100~109 mmHg) に分けて検討を行った。I 度および II 度高血圧者の割合はそれぞれ 92 名 (88.5%)、12 名 (11.5%) であった。両群における BMI の平均±標準偏差は I 度および II 度高血圧者はそれぞれ、 27.2 ± 6.2 および 31.5 ± 7.2 (kg/m^2) であり、II 度高血圧者が高値であり有意差 ($P=0.03$) を認めた。以上の結果より、当大学の高血圧者において肥満が重要な因子であり食事を中心とした早期の介入の必要性が示唆された。

キーワード

高血圧 (hypertension) 大学生 (university student) Body mass index

北海道情報大学医療情報学部医療情報学科教授, Professor, Department of Medical Management and Informatics (Dept. of MMI), HIU

1.はじめに

中高年者と比較して、大学生は生活習慣病をはじめとする疾病の罹患率が低く、極めて健康な時期であるため健康についての関心が薄いのが現状である。しかしながら、現代社会においては、生活環境の変化による食生活の乱れ、嗜好重視による生活リズムの乱れ、便利な生活を望むための運動不足が懸念される現状である。このような状況を考慮すると、学校保健安全法に基づいて実施される大学生の定期健康診断は、病気の早期発見を含む健康の評価をするうえで重要な施策である。さらに、生活習慣病の有無を判断し早期に介入するための有効な手段であると考えられる。平成25年度の国民健康・栄養調査の報告によると、収縮期血圧が140mmHg以上の高血圧者の割合は男性38.3%、女性29.7%であり、経年的に男性の割合は上昇傾向にあることが明らかになり、高血圧は国民病となりつつある[1]。高血圧は罹病期間が長期間になるに従い、心血管疾患の発症を増加させることが報告されている[2,3]。しかしながら、高血圧者の中で自覚症状を有する者の割合は少ないため、適切な治療を受けることなく罹病期間が長期間になる可能性が示唆される。罹病期間を短縮させるためには、若年者の段階より高血圧の有無を診断し、高血圧であれば可能なかぎり早期に介入することが心血管疾患の発症を減少させる効率的かつ有効な手段であると考えられる。

このような背景より、今回我々は、若年者として大学生を対象とした検討を行った。本研究結果は予防医学的な啓蒙資料として広く学生に提供できるとともに、ヘルスリテラシーの概念と

しても利用可能と考えられる。

2.目的

平成27年度の定期健康診断を受診した北海道情報大学生を対象として、高血圧者の割合および特徴について検討することが本研究の目的である。

3.対象と方法

平成27年度に本学で行われた健康診断を受診した北海道情報大学生1,510名(男性1,276名、女性234名)を研究対象とした。定期健康診断時の安静時上腕部血圧測定において、収縮期血圧140 mmHg以上または/あるいは拡張期血圧90mmHg以上の者を高血圧者と定義し、全体および学年ごとの対象者数を検討した。さらに日本高血圧学会の診断基準[4]を用いて、収縮期血圧140~159mmHgまたは/あるいは拡張期血圧90~99 mmHgをI度高血圧、収縮期血圧160~179 mmHgまたは/あるいは拡張期血圧100~109 mmHgをII度高血圧と分類した更なる検討を行った。定期健康診断時に測定した身長および体重の実測値を用い、体重(kg)を身長(m)の二乗で除した計算により求められるBMI (body mass index)を体型の評価項目とした。その他、尿検査(蛋白、糖、潜血)異常者数を検討した。事前に配布した自記式質問票に喫煙および高血圧家族歴の有無を記載のうえ、定期健康診断時に提出してもらい対象者数を検討した。検査項目における実数は平均±標準偏差により表記した。統計学的検討について、群間比較における実数値は対応の無いt検定を用いた。以上の統計学的解析は全てSPSSソフト(Ver. 21.0)を用いP<0.05を有意差ありと判断した。

4. 結果

全対象者数 1,510 名中、高血圧者は 104 名 (6.9%) であった。性差の検討では、全男性学生 1,276 名中 101 名 (7.9%)、全女性学生 234 名中 3 名 (1.3%) が高血圧者であった。

4-1. 高血圧者の基本属性を表 1 に示す。

表 1

高血圧者(104名)の基本属性	
男性 人数 (%)	101 (97.1)
学年	
1年生 人数 (%)	33 (31.7)
2年生 人数 (%)	22 (21.2)
3年生 人数 (%)	19 (18.3)
4年生 人数 (%)	30 (28.8)
尿蛋白陽性 人数 (%)	1 (1.0)
尿糖陽性 人数 (%)	3 (2.9)
尿潜血陽性 人数 (%)	4 (3.8)
喫煙者 人数 (%)	6 (5.8)
高血圧家族歴あり 人数 (%)	16 (15.4)
Body mass index (kg/m ²)	
全体	27.7 ± 6.5
男性	27.8 ± 6.5
女性	24.6 ± 6.8

平均値±標準偏差

高血圧者 104 名中、男性は 101 名 (97.1%)、女性は 3 名 (2.9%) であった。学年別の検討では、1 年生が最も多く 33 名 (31.7%)、続いて、4 年生 30 名 (28.8%)、2 年生 22 名 (21.2%)、3 年生 19 名 (18.3%) の順に多い傾向であった。尿検査異常者は、蛋白、糖、潜血それぞれ、1 名 (1.0%)、3 名 (2.9%)、4 名 (3.8%) であった。喫煙者は 6 名 (5.8%) であった。高血圧家族歴を有する対象者は 16 名 (15.4%) であった。

BMI の平均値±標準偏差は男性、女性それぞれ 27.8±6.5、24.6±6.8kg/m²であり、全体は 27.7±6.5 kg/m²であった。

4-2. I 度高血圧者の基本属性を表 2 に示す。

表 2

I 度高血圧者(92名)の基本属性	
男性 人数 (%)	90 (97.8)
学年	
1年生 人数 (%)	31 (33.7)
2年生 人数 (%)	19 (20.7)
3年生 人数 (%)	19 (20.7)
4年生 人数 (%)	26 (28.3)
尿蛋白陽性 人数 (%)	1 (1.1)
尿糖陽性 人数 (%)	3 (3.3)
尿潜血陽性 人数 (%)	4 (4.3)
喫煙者 人数 (%)	5 (5.4)
高血圧家族歴あり 人数 (%)	16 (17.4)
Body mass index (kg/m ²)	
全体	27.2 ± 6.2
男性	27.4 ± 6.2
女性	21.3 ± 5.2

平均値±標準偏差

高血圧者 104 名中、I 度高血圧者は 92 名 (88.5%) であり、そのうち男性は 90 名 (97.8%) であった。学年別の検討では 1 年生が最も多く 31 名 (33.7%)、続いて、4 年生、2 および 3 年生の順に多い傾向であった。尿検査異常者は、蛋白、糖、潜血それぞれ、1 名 (1.1%)、3 名 (3.3%)、4 名 (4.3%) であった。喫煙者は 5 名 (5.4%) であった。高血圧家族歴を有する対象者は 16 名 (17.4%) であった。BMI の平均値±標準偏差は男性、女性それぞれ 27.4±6.2、21.3±5.2kg/m²であり、全体は 27.2±6.2kg/m²であった。

4-3. II 度高血圧者の基本属性を表 3

に示す。

表3

Ⅱ度高血圧者(12名)の基本属性

男性 人数 (%)	11 (91.7)
学年	
1年生 人数 (%)	2 (16.7)
2年生 人数 (%)	3 (25.0)
3年生 人数 (%)	3 (25.0)
4年生 人数 (%)	4 (33.3)
尿蛋白陽性 人数	0
尿糖陽性 人数	0
尿潜血陽性 人数	0
喫煙者 人数 (%)	1 (8.3)
高血圧家族歴あり 人数	0
Body mass index (kg/m ²)	
全体	31.5 ± 7.2
男性	31.5 ± 7.5
女性(1名)	31.2

平均値±標準偏差

高血圧者 104 名中、Ⅱ度高血圧者は 12 名 (11.5%) であり、そのうち男性は 11 名 (91.7%) であった。学年別の検討では 4 年生が最も多く 4 名 (33.3%)、3 および 2 年生、1 年生の順に多い傾向であった。尿検査異常者および高血圧の家族歴を有する対象者は認めなかった。喫煙者は 1 名 (8.3%) であった。男性における BMI の平均値±標準偏差は 31.5±7.5kg/m²であった。女性 (1 名) の BMI 値は 31.2kg/m²であり、全体は 31.5±7.2kg/m²であった。

4-4. 高血圧重症度と体型との関連を表 4 に示す。

I 度およびⅡ度高血圧者の年齢および BMI を比較検討した結果、年齢は有意差を認めなかった。BMI の平均±標準偏差は I 度およびⅡ度高血圧者はそれ

ぞれ、27.2±6.2 および 31.5±7.2kg/m² であり、Ⅱ度高血圧者は I 度高血圧者と比較して高値であり有意差 (P=0.03) を認めた。

表4

高血圧重症度と体型との関連

	I 度 (n=92)	Ⅱ 度 (n=12)	P 値
年齢 (才)	21 ± 1	21 ± 1	0.76
BMI (kg/m ²)	27.2 ± 6.2	31.5 ± 7.2	0.03

BMI: body mass index
平均値±標準偏差

5. 考察

今回の検討で、北海道情報大学生の 6.9% (男性 7.9%, 女性 1.3%) に高血圧を認め、肥満が重要な検討課題であることが明らかとなった。

2010 年度に発表された学生の健康白書によると収縮期血圧 140mmHg または /あるいは拡張期血圧 90mmHg 以上の対象者の割合は男性 10.1%, 女性 2.2% と報告されている [5]。本学の男性、女性の高血圧者の割合はそれぞれ 7.9%, 1.3% であり全国平均を下回る良好な結果であった。

高血圧は心血管疾患発症の重要な危険因子であるが、自覚症状が少ないため早期介入が難しい生活習慣病の 1 つである。最近になり Carlsson らは高血圧の罹病期間が長期であればあるほど心血管疾患発症を増加させることを報告した [6]。機序として、高血圧罹病期間が長い程、高血圧性臓器障害を引き起こす細胞外マトリックスの代謝回転に異常を来すこと、さらにリモデリングを反映するマーカーの 1 つであるエンドスタチン血中濃度が高値となり、血管障害を亢進させることを報告して

いる。

高血圧は一般的に、真性高血圧、白衣性高血圧、仮面高血圧の3つに分類されるが、本研究における高血圧者は初回の血圧測定において高血圧の基準を満たしていることより真性高血圧、白衣性高血圧の両疾患のいずれかに該当する。しかしながら、本研究における血圧測定は複数回ではなく単回のため両疾患の鑑別は不可能であり血圧診断の観点からは正確性に欠ける所がある。木鎌らは、大学生の定期健康診断における単回随時血圧測定で高血圧と診断された者の多くは白衣性高血圧であり真性高血圧の割合は少ないと報告している[7]。白衣性高血圧は家庭血圧が正常のため真性高血圧と比較して軽い病態であるとの考えがあるが、正常血圧者と比較して心血管疾患発症が1.2倍であり真性高血圧と同様に留意すべき病態である[8]。したがって、本研究において両疾患の鑑別はなされていないが、高血圧者の実態を明らかにしたことは心血管疾患発症予防の観点より意義は高いと考える。本研究対象者については家庭血圧を中心とした随時血圧の測定を実施し疾患の鑑別を行うとともに継続的なさらなる経過観察を行う必要性が示唆された。

2010年度に発表された健康白書によると日本人大学生のBMIの平均±標準偏差は、男性で $21.7 \pm 3.1 \text{ kg/m}^2$ 、女性で $20.8 \pm 2.6 \text{ kg/m}^2$ と報告されている[5]。本研究における高血圧対象者は男性で $27.8 \pm 6.5 \text{ kg/m}^2$ 、女性で $24.6 \pm 6.8 \text{ kg/m}^2$ と全国平均を明らかに上回る数値であった。さらに、BMIが 25 kg/m^2 以上の日本人大学生の肥満者の割合は男性11.8%、女性6.0%と報告されているが、本研究における高血圧者における肥満

者の割合は男性89.2%、女性33.3%であり、明らかに高値であることが明らかになった。肥満は脂肪細胞から分泌される悪玉サイトカインであるTNF- α 、インターロイキン6の増加を来し血管障害を惹起し血圧上昇を来すことが報告されている[9]。本結果においても同様な機序が影響している可能性が高いと考えられる。さらに高血圧重症度とBMIを検討した結果、高血圧重症度が悪化するに従いBMI値が高値になることから(表4)、肥満と血圧は若年者においても密接な関係があることが明らかになった。

以上の結果より、大学生の高血圧を予防するためにはBMIを低下させる体重コントロール対策が急務であり、食生活および運動習慣を含む総合的指導の必要性がある。大学時代にいかに適切な生活習慣を獲得し得るかが将来の健康を維持するうえで重要な課題であることは言うまでもない。本研究結果より、対象となった高血圧学生に対する日常生活の改善策を講じていく予定であるが、具体的には本研究対象者の中には寮生が多く含まれていることを加味し、集団的介入を実行していく予定である。

6.まとめ

高血圧を指摘された北海道情報大学生を検討した結果、肥満者の割合が高いこと、高血圧重症度が高くなると肥満度が高くなることが明らかとなった。以上の結果を踏まえ、学生時代に健康な身体を手に入れるように保健センターを中心とした体重コントロールに主眼をおいた新たな施策の必要性が示唆された。

[謝辞]

本研究にあたり、データ収集および整理に尽力してくれた、北海道情報大学 保健センター 柳沢佳子保健師に深謝致します。

inflammatory cytokines in serum of essential hypertension patients. *Int J Clin Exp Pathol* 8, pp.11356-63.

参考文献

- [1] 厚生労働省.(2013) 平成 25 年度 国民健康・栄養調査の概要
- [2] Lim SS, et al. (2012) A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet* 380, pp.2224-60.
- [3] Chobanian AV. (2011) Mixed messages on blood pressure goals. *Hypertension* 57, pp.1039-40.
- [4] 日本高血圧学会高血圧ガイドライン作成委員会.(2014) 高血圧ガイドライン2014.
- [5] 国立大学法人保健管理施設協議会.(2013) 学生の健康白書2010.
- [6] Carlsson AC, et al. (2013) Association between circulating endostatin, hypertension duration, and hypertensive target-organ damage. *Hypertension* 62, pp.1146-51.
- [7] 木鎌耕一郎 遠.(2011) 八戸大学学生の健康状況. *八戸大学紀要* 11, pp.51-57.
- [8] Bao X, et al. (2004) Simultaneous strain and temperature measurements with polarization-maintaining fibers and their error analysis by use of a distributed Brillouin loss system. *Opt Lett* 29, pp.1342-4.
- [9] Jian L, et al. (2015) Functional analysis of UMOD gene and its effect on

〈研究ノート〉

患者視点に立った北海道の医療機関のセカンドオピニオン に関する調査

船越 幻夢* 高橋 文†

Investigation of the second opinion into medical institutions of Hokkaido from the Viewpoint of Patients

Kenmu FUNAKOSHI Aya TAKAHASHI

要旨

北海道の歯科医院を除いた医療機関 3,918 件中,セカンドオピニオンに対応している医療機関は 1,001 件であった。そのうち 556 件で診察(相談)と情報提供を行っており,556 件のうち 63 件でセカンドオピニオンの情報をウェブサイトに掲載している。63 医療機関のウェブサイトのクリック回数,見易さ,診療科,金額情報,診察(相談)時間を評価した。1.6%の医療機関のみがウェブサイトに情報を掲載しており,患者が治療方針や医療機関を選択するには,十分とは言えない。

Abstract

In Hokkaido, 1,001 out of 3,918 medical institutions (excluding dental clinics) offer second opinions (SC) to patients. Of these, 556 conduct additional examinations and provide explanations to patients who have requested an SC. Only 63 of the 556 describe the SC process in any detail on their institutional web sites. The web sites were evaluated in terms of ease of access (by click count), visibility, number of departments, cost and examination time. With only 1.6% of such medical institutions making SC information available online, it is evident that prospective patients are unable to make informed decisions concerning treatment plans or choice of medical institutions.

キーワード

セカンドオピニオン 医療機能情報提供制度 医療情報ネット 診療情報提供

*北海道情報大学経営情報学部医療情報学科 4 年, B4, Department. of Medical Management and Informatics, HIU

†北海道情報大学医療情法学部医療情報学科教授, Professor, Department of Medical Management and Informatics, HIU

1. はじめに

セカンドオピニオンが米国で生まれた背景に保険会社の医療費の支出を抑制する目的で考え出されたといわれている。しかし、この理念は本来の枠組みを超えて、患者が自ら受ける治療方法を選択し、患者にとって最善と思える治療を患者と主治医と共有するという積極的な機能を担うようになった [1][2]。

セカンドオピニオンとは”個人が自分自身に関する、きわめて専門的な知識を必要とする内容の意思決定や選択をする際に、別の医師に独立した意見を求め、アドバイスを受けること”と考えられている [2]。主治医以外の医師の意見を聞くことは大切だがメリット、デメリットがあり、メリットとしては他の医師から異なる意見を聞いて良いところ悪いところを理解した上で治療方針、医療機関を決めることができる。また他の医師が主治医と同じ意見の場合、主治医の元で安心して治療に専念することができる。デメリットとしては、他の医師から主治医の意見と正反対の意見が述べられた場合どちらを信じれば良いか混乱してしまうことが考えられる。また医師が専門用語を使って説明した場合、患者は話の内容を理解できずにセカンドオピニオンの診察(相談)が終わってしまう可能性もある。そのような医師と患者の情報の非対称性を埋めるためにも、患者側はセカンドオピニオンを求める前に自分の疾患について知識を深める必要がある。インターネットの普及により、患者は治療方針やさまざまな医療機関についての情報をいつでも手軽に得ることができるようになった。そこで北海道の医療機関のセカンドオピニオンの対応状況を患者の視点から調査することを目的とした。

2. 対象と方法

厚生労働省から平成 19 年 4 月 1 日より施行された改正医療法により創設された医療機能情報提供制度 [3]、いわゆる医療情報ネットを使用し、データが得られた北海道の歯科医院を除く全医療機関 3,918 件を調査対象とした。調査期間は平成 27 年 2 月 16 日から 11 月 16 日である。調査項目は北海道の医療機関数、セカンドオピニオンの有無、診察(相談)料金、病床規模、各病院のウェブサイトの掲示状況とその評価、都道府県別の人口 [4]10 万人当たりのセカンドオピニオン対応病院数、支庁別の人口 10 万人当たりのセカンドオピニオン対応病院数 [5]である。評価方法は医療機関のウェブサイトを一覧ずつ検索し、セカンドオピニオン情報を「セカンドオピニオンのページまでのクリック数」について (1. とても悪い (クリック回数 4 回), 2. 悪い (クリック回数 3 回), 3. 良い (クリック回数 2 回), 4. とても良い (クリック回数 1 回)) で評価した。「見易さ」について (ウェブサイトの文字サイズ変更ボタンの有無), (ページレイアウト), (表や図での説明) を各 1 点とし合計点数を 4 段階 (1. とても悪い (0 点), 2. 悪い (1 点), 3. 良い (2 点), 4. とても良い (3 点)) で評価した。「診療科, 料金情報, 診察(相談)時間」については 1. とても悪い (掲載なし) 4. とても良い (掲載あり) の 2 段階で評価した。

3. 結果

3-1. 北海道のセカンドオピニオン対応医療機関数

医療情報ネットの検索の結果、表 1 に示すように北海道の全医療機関数 (歯科医院を除く) は 3,918 件であり、そのうち、セ

カンドオピニオン対応の掲示のない医療機関数は、2,917件（74.5%）、セカンドオピニオン対応を行っている医療機関数は1,001件（25.5%）であった。セカンドオピニオン対応を行っている医療機関のうち、情報提供のみにより「セカンドオピニオン対応あり」としている医療機関は445件であり、これら445件全ての医療機関では料金設定を医療情報ネットで認めることができなかった。次に、セカンドオピニオン対応時に「診察（相談）および情報提供」を行っている医療機関は556件であったが、これらの医療機関における料金情報が公表されているか否かを医療機関ごとのホームページで調べた。その結果、料金の設定がなされていない

医療機関数は375件認められ、料金設定のある医療機関は187件であった。

3-2. 北海道のセカンドオピニオン対応医療機関の料金設定状況

料金設定のある医療機関187件において、セカンドオピニオン受診時の料金を図1に示す。セカンドオピニオン診察（相談）料金は5,000円から10,000円未満が最も多く44.3%（85件）、次いで10,000円以上から20,000円未満で料金を設定している医療機関は29.7%（57件）であった。また、セカンドオピニオン診察（相談）料金の最高額は32,400円であり、最低額は0円であった。

表1 北海道のセカンドオピニオンに対応している医療機関の内訳

全医療機関	3,918件	100%
セカンドオピニオン対応の掲示なし	2,917件	74.5%
セカンドオピニオン対応あり	1,001件	25.5%
情報提供のみ	445件	11.4%
料金設定あり	0件	
料金設定なし	445件	
診察（相談）および情報提供あり	556件	14.2%
料金設定あり	187件	
料金設定なし	375件	

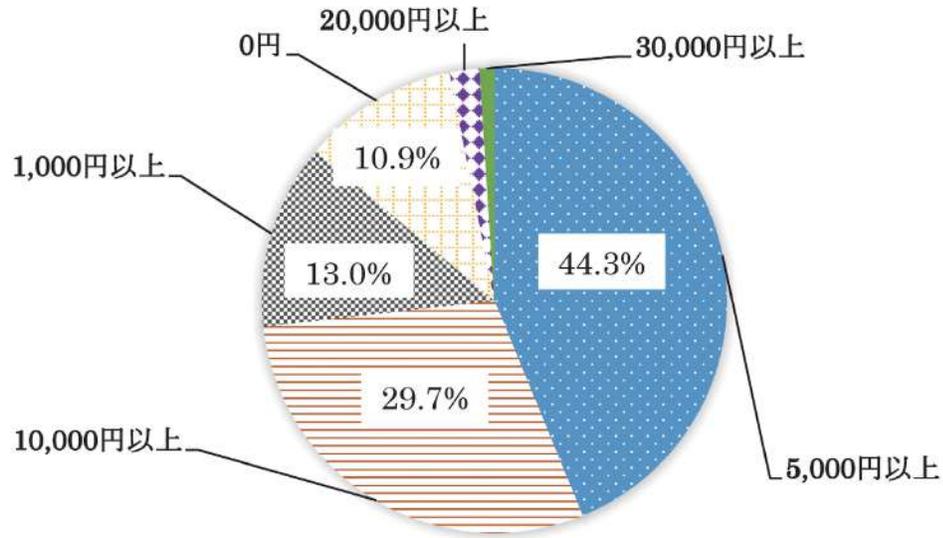


図1 セカンドオピニオン診察(相談)料金の内訳(n=187)

3-3. 北海道のセカンドオピニオン対応医療機関の病床数

3-3-1.

セカンドオピニオンについての診察(相談)を行わず「情報提供のみ」行っている445医療機関(表1)の病床規模を調べた。その結

果, 図2に示すように, 病床規模は0から19床の診療所が339件(76.2%), 20床から99床の病院が39件(8.8%)あり, 100床未満の小規模な医療機関が85%を占めていた。調査した445件の医療機関で最も病床数が多い医療機関は609床(1件)であった。

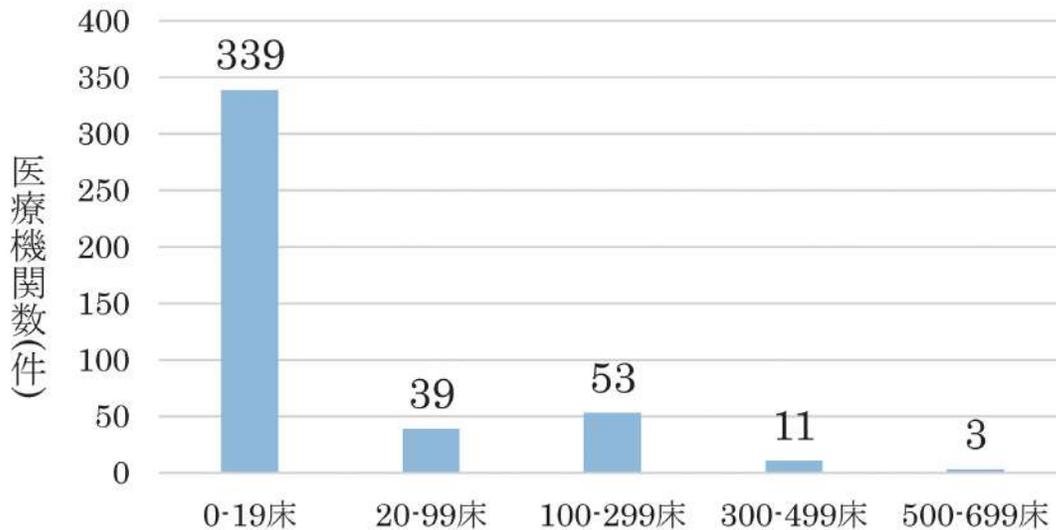


図2 「情報提供のみ」行っている医療機関の病床規模(n=445)

3-3-2.

図3は、セカンドオピニオンについて「診察(相談)および情報提供」を行っている医療機関556件の病床規模について表している。病床規模は0床から19床の診療所が401件(72.1%)と最も多い結果であった。20

床から99床の病院が54件(9.7%)あり、図2の結果と同様に100床未満の小規模な医療機関が8割を占めていた。調査した医療機関556件において、最も病床数が多い医療機関は946床(1件)であった。

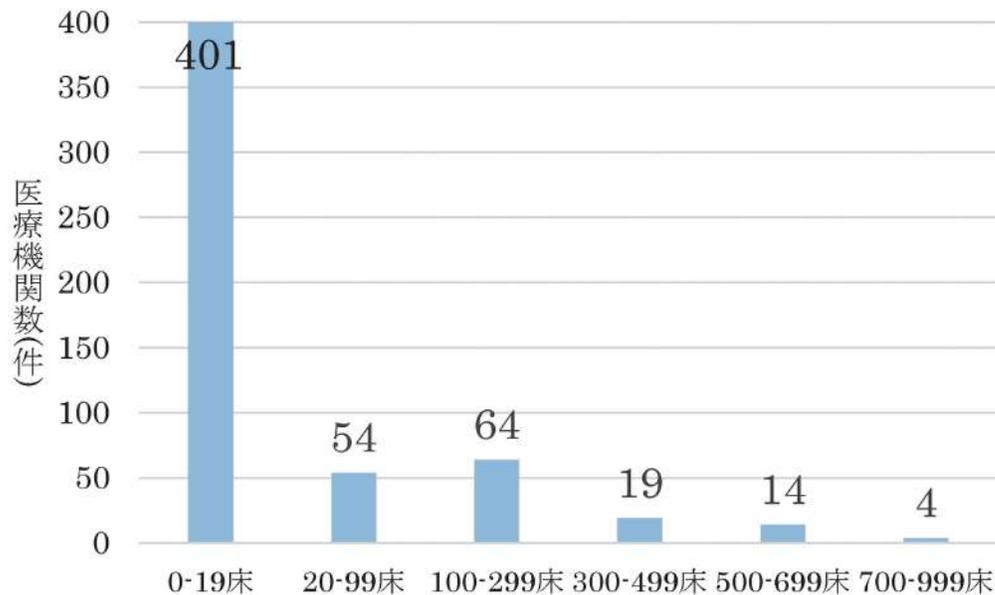


図3 「診察(相談)および情報提供」を行っている医療機関の病床規模(n=556)

3-4. 北海道のセカンドオピニオン対応医療機関のウェブサイトの評価

3-4-1.

セカンドオピニオンについての「情報提供のみ」を行っている医療機関445件のウェブサイト情報掲載状況について調べた。その結果、445件全ての医療機関においてセカ

ンドオピニオンの情報提供に関する詳細な情報の掲載を認めることはできず、また情報提供を行う際にかかる費用についての掲載も認めることができなかった。さらに、445件中131件(29.3%)の医療機関では自施設のウェブサイトを持たないことも明らかになった。(図4)

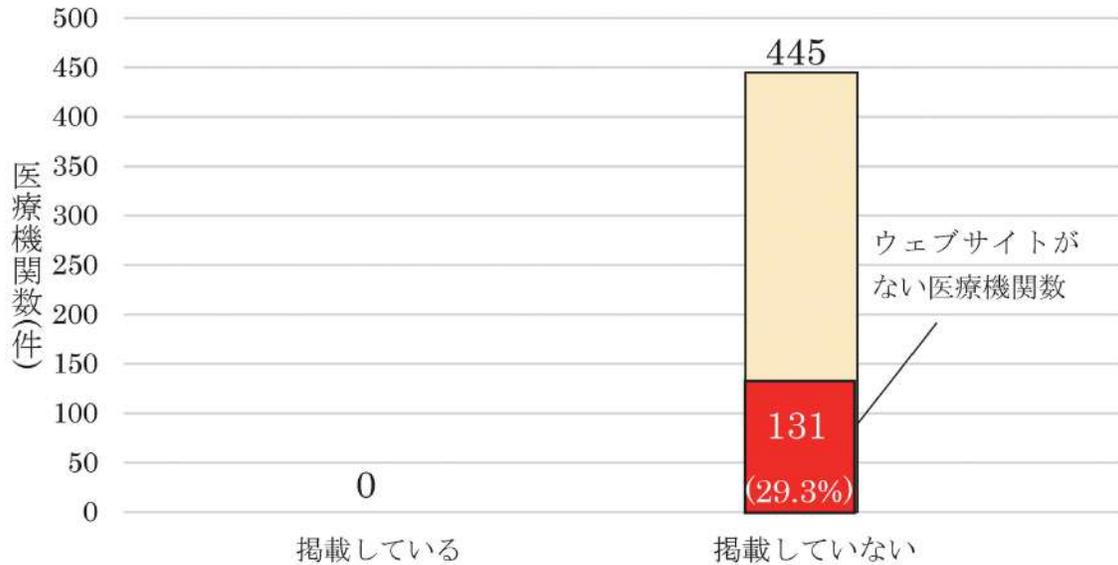


図4 セカンドオピニオンの情報提供に関するウェブサイト掲示状況 (n=445)

3-4-2.

図5はウェブサイトのセカンドオピニオンの「診察(相談)および情報提供」を行っている医療機関の情報掲示状況について表している。セカンドオピニオンについての情報を掲載している医療機関数は556件中63件(11.3%)と著しく少なく、掲載がない医療

機関のうち88件では自施設のウェブサイトを持たないことが認められた。

そこでセカンドオピニオンの情報を掲載している63件の医療機関のウェブサイトについて調査し、掲載内容について各項目ごとに評価した。(図6)

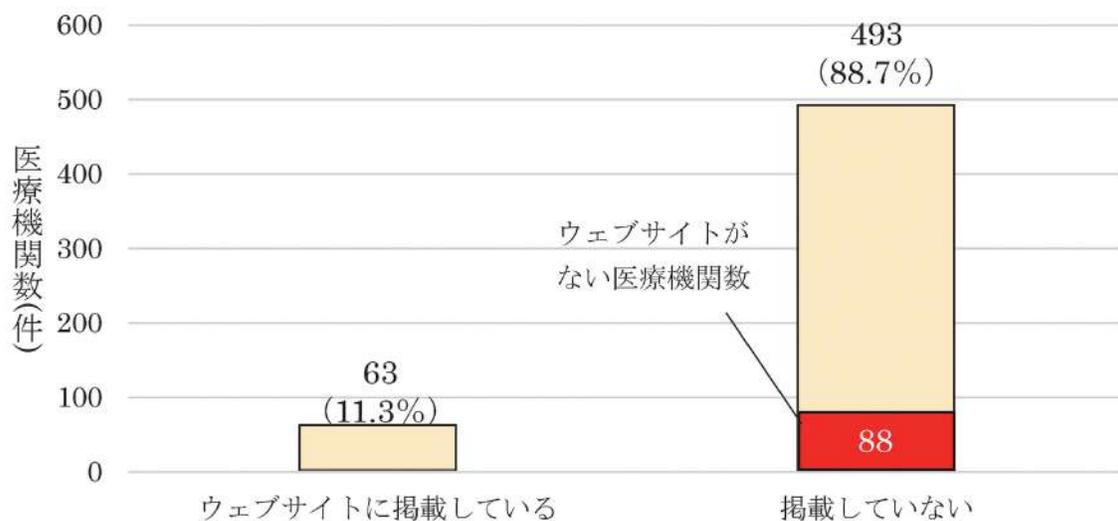


図5 セカンドオピニオンの診察(相談)に関するウェブサイト掲示状況 (n=556)

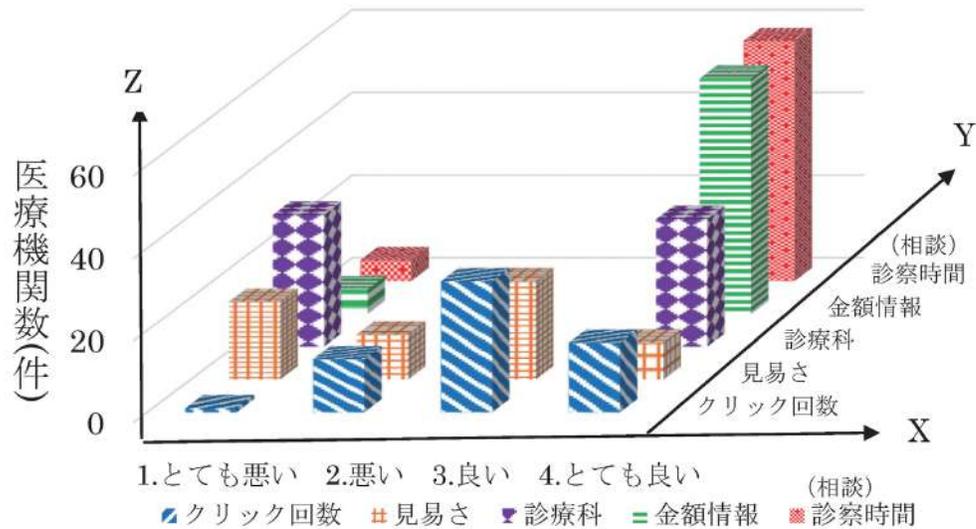


図6 ウェブサイト情報の評価(n=63)

図6は、ウェブサイトにも自施設のセカンドオピニオン情報を掲載している63医療機関における評価を示している。X軸に評価段階を、Y軸には評価項目(5項目)を、Z軸には医療機関数を表している。クリック回数について評価したところ、クリック回数2回でセカンドオピニオンのページに到達できる医療機関が最も多く32施設(50.8%)であり、次いでクリック回数が1回でセカンドオピニオンのページに到達できる医療機関が17施設(27.0%)であった。見やすさは3.良いが24施設(38.1%)であり次いで、1.とても悪いが19施設(30.2%)であった。診療科、金額情報、診察(相談)時間の三項目に

おいての評価では、診療科は31件(49.2%)、金額情報は57施設(90.5%)、診察(相談)時間は58施設(92.1%)で記載が認められた。

3-5. 道府県別人口10万人当たりのセカンドオピニオン対応医療機関数

道府県別の人口10万人当たりのセカンドオピニオン対応医療機関数を調べた結果を表2に示した。データが得られた28道府県の中で福岡県が67.6件と著しく多い結果であった。一方、北海道は21番目の18.5件と対応医療機関数は少なく、最も多い福岡県のおよそ1/3程度であった。

表2 道府県別10万人あたりのセカンドオピニオン対応病院数

	人口[4]	対応医療機関数	対応医療機関数/人口10万人
福岡	5,091,000	3,443	67.6
秋田	1,037,000	398	38.4
埼玉	7,239,000	2,776	38.3
福島	1,935,000	741	38.3
愛媛	1,395,000	470	33.7
京都	2,610,000	843	32.3
千葉	6,197,000	1,936	31.2
広島	2,833,000	865	30.5
山口	1,408,938	427	30.3
兵庫	5,541,000	1,601	28.9
富山	1,070,000	298	27.9
奈良	1,376,000	375	27.3
静岡	3,705,000	967	26.1
大阪	8,836,000	2,264	25.6
福井	790,000	185	23.4
岩手	1,284,000	299	23.3
新潟	2313000	528	22.8
三重	1825000	398	21.8
長野	2,109,000	429	20.3
鳥取	574,000	116	20.2
北海道	5,400,000	1,001	18.5
愛知	7,455,000	1,359	18.2
茨城	2,919,000	482	16.5
滋賀	1,416,000	200	14.1
石川	1,156,000	145	12.5
岐阜	2,041,000	247	12.1
大分	1,171,000	88	7.51
神奈川	9,096,000	360	3.96

3-6. 北海道支庁別人口10万人当たりのセカンドオピニオン対応医療機関数

3-6-1.

北海道の支庁別人口10万人当たりのセカンドオピニオン対応医療機関数を表3に示す。支庁別人口第2位の旭川市を含む上

川支庁が23件(11.3%)と最も多く、次いで支庁別人口第1位の札幌市を含む石狩支庁が21件(10.3%)であり、人口の多い旭川市、札幌市、小樽市を抱える支庁にセカンドオピニオン対応医療機関が多い結果であった。

表 3 北海道の支庁別人口 10 万人当たりのセカンドオピニオン対応医療機関数(平成 27 年 1 月 1 日現在)

支庁別	人口[5]	対応医療機関数	医療機関数/人口 10 万人
上川支庁	514,080	119	23.15
石狩支庁	2,360,304	493	20.89
後志支庁	221,917	46	20.73
渡島支庁	415,696	85	20.45
留萌支庁	49,694	10	20.12
空知支庁	315,732	50	15.84
胆振支庁	407,396	61	14.97
十勝支庁	348,574	51	14.63
宗谷支庁	68,512	10	14.60
網走支庁	297,037	39	13.13
釧路支庁	242,232	26	10.73
日高支庁	71,504	5	6.99
根室支庁	79,240	4	5.05
檜山支庁	39,740	2	5.03
合計	5,431,658	1,001	206.31

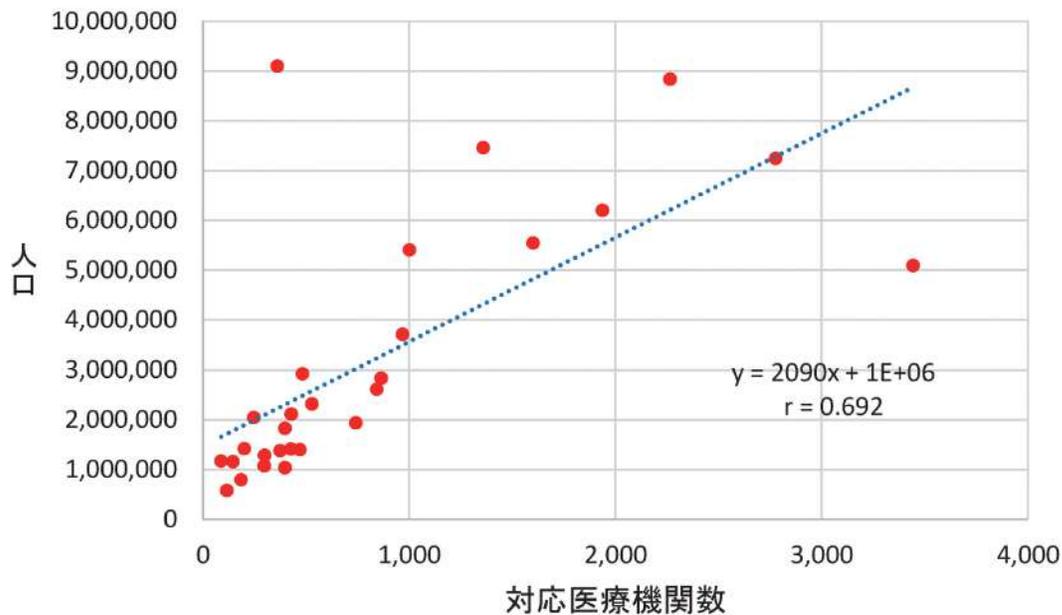


図 7A 28 道府県別の人口とセカンドオピニオン対応医療機関の相関関係

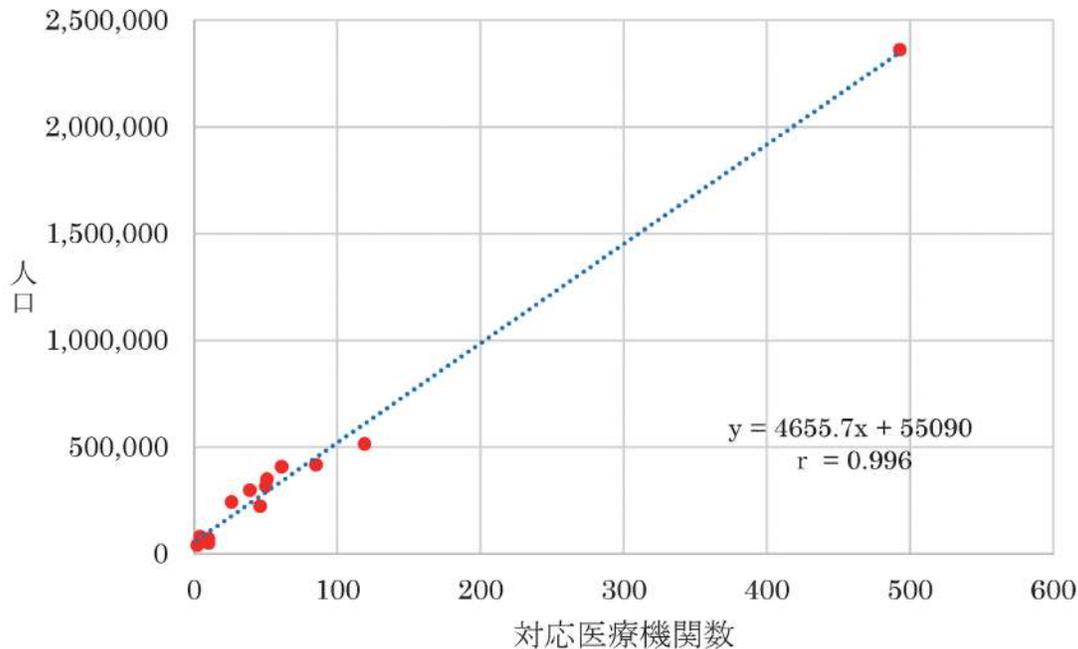


図 7B 北海道支庁別の人口とセカンドオピニオン対応医療機関の相関関係

3-6-2

28道府県の人口とセカンドオピニオン対応医療機関数を調べた結果(図 7A), 相関係数 $r=0.692$ を得た。福岡県は人口の割りにセカンドオピニオン対応医療機関数が顕著に多く、神奈川県は人口当たりのセカンドオピニオン対応医療機関が著しく少ない結果を得た。一方、北海道の各支庁別人口とセカンドオピニオン対応医療機関数の相関関係を調べたところ、相関係数 $r=0.996$ ときわめて高い値が算出された(図 7B)。北海道では、支庁別人口分布に比例してセカンドオピニオン対応医療機関が配置していることが認められた。

4. 考察

医療機能情報提供制度(医療情報ネット)は『医療機関の自発的な情報提供だけに委

ねるのではなく、医療機能に関する情報の報告を医療機関へ義務づけ、それを公表することによって、バラツキのない情報提供の仕組みを構築している』と記載されている[3]。しかし、セカンドオピニオンを行っている医療機関の料金設定や診療に関する情報提供についての料金設定が記載されていないなど、バラツキが多くセカンドオピニオンを求める患者にとって、医療情報ネットの情報は不十分であった。

田村らはセカンドオピニオンの料金設定が高いというデメリットを上げており[6]、また中央社会保険医療協議会(中医協)によるセカンドオピニオン外来実施機関の調査結果では、セカンドオピニオン外来の基本料金は『30分 10,000円～10,500円』が25.4%と最も多く、次いで『60分 10,000円～10,500円』が16.2%と報告している[7]。今回の分析結果では、5,000円から10,000円未満が44.3%と最も多く、次いで、10,000

円以上 20,000 円未満が 29.7%となり、忙しい診察のなか、医師の時間を 30 分～1 時間もセカンドオピニオン対応に充てるのは医師側、医療機関側からすれば料金設定は妥当もしくはもっと高くても良いのかもしれない。しかし、ただでさえ通院費、治療費、入院費、などを支払う患者にとって現行のセカンドオピニオンの料金は負担の大きいものと考えられる。

医療情報ネットより抽出した北海道の全医療機関 3,918 件（歯科医院を除く）のうちセカンドオピニオン対応の掲示をしているのは 1,001 件の医療施設であった（表 1）。2,917 件の医療施設ではセカンドオピニオン対応する専門窓口を設けず、「紹介状持参の初診」として扱っているものと推測される。前述した中医協による調査報告書によると、「セカンドオピニオン外来の専用窓口を設けて受け付けている」病院に限ってみると、大規模な病院（700 床以上）に多い傾向が見られると報告している[7]。しかし、今回の調査結果では「情報提供のみ」行っている、および「診察（相談）および情報提供」を行っている医療機関はいずれも 100 床未満の小規模の医療機関が約 8 割を占める結果（図 2、図 3）であり、中医協の報告とは全く反対の結果である。これは中医協の調査は「200 床以上の施設」を対象としたものであり、200 床未満の病院や無床の診療所は調査対象外であったことによる。

セカンドオピニオンの「情報提供のみ」行っている 445 件の医療機関のウェブサイトでは情報提供に関する詳細な情報はなく、セカンドオピニオンに関するページも無い結果であり、医療情報ネット同様セカンドオピニオンの情報提供の料金は掲載されていなかった。中医協による全国調査の結果、「ウェブサイトの掲示を行っている」病院が 75.7% [7]を占めていることに対し、北海道の医療機関においてウェブサイトの詳細

情報を掲載している医療機関は 1.60%（63/3918）と極めて低い結果であった（図 5）。

セカンドオピニオンの情報を掲載している医療機関のウェブサイト評価では、料金情報や診察（相談）時間は 63 施設のうちおよそ 9 割のウェブサイトで掲載されており、この 2 項目は重要視されていると考えられる（図 6）。クリック回数は少ない回数でページに到達できるが、セカンドオピニオンのページにたどり着くまでの経過で「医療関係者はこちら」の欄や「地域医療連携」の欄、「外来」の欄からセカンドオピニオンのページに行くことがあり患者側にとってまぎらわしく困難を感じると推測された。文字サイズ変更ボタンの設置や図や表を用いて説明すること、項目ごとに説明すること、セカンドオピニオンのページまでの経過を工夫すること等により、さらに見易いウェブサイトになると感じた。

図 7A、7B の結果より、28 道府県別人口とセカンドオピニオン対応医療機関数の間には高い相関 ($r=0.692$) がみられた。同様に、北海道の支庁別人口とセカンドオピニオン対応医療機関数においても高い相関を認め ($r=0.992$)、札幌市に偏在することなく、セカンドオピニオン対応医療機関が配置しているという結果を得た。しかし、全国的に見た場合、北海道のセカンドオピニオンに対応している医療機関は少ない（表 2）。

セカンドオピニオンの課題として、料金やウェブサイトの問題のみならず、医師側の意見として患者への説明が大変という報告もあり[8]、情報の非対称性も課題とされる。また、アメリカではセカンドオピニオンに保険が適用されており、30 年の歳月をかけてセカンドオピニオンの制度を定着させたという経緯がある[8]。しかし、日本では一部にしか保険が適用されておらず、未だにセカンドオピニオンの全てに保険が適用

されていない。患者が自覚と責任を持って医療を選択する一つの方法であるセカンドオピニオンの保険適用化はこれからの課題であると考えられる。

5. 結語

2002年の医療に関する広告規制の緩和でセカンドオピニオンの実施が広告可能となり13年経った今、患者が自ら納得のいく治療方針や医療機関を選択するための医療機能情報提供制度(医療情報ネット)であるはずがその情報はまだ十分とは言えず、セカンドオピニオンを求める患者にとってウェブサイト情報は極めて乏しいと感じた。

医療機関側の問題点としては、セカンドオピニオンの診察(相談)料金は高い料金設定となっていることや、高齢化が進む中で高齢者でもわかりやすいウェブサイト(図や音声、映像など)や検索しやすい環境を整えていかなければならないなどの点があげられる。一方、患者側もしっかりと疾患について知識を得て理解したうえでセカンドオピニオン診察(相談)を受ける必要がある。

(本研究内容は、平成27年度第41回日本診療情報管理学会(岡山)にて発表したものに追加した内容を第143回北海道診療情報管理研究会にて発表)

6. 参考文献

[1] 木原康樹(1999)「セカンドオピニオン」認定内科専門医会医療ビックバン検討委員会編『医療ビックバンの基礎知識—医

療の大変革を理解するために—』日本内科学会, pp58-60, 1999

[2] 西島英利(2002)「知っておくべき新しい診療理念 セカンドオピニオン(解説)」日本医師会雑誌 128 巻 6 号 pp902-903

[3] 厚生労働「医療情報提供制度(医療情報ネット)」

http://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/iryuu/teikyouseido/ (2015年11月)

[4] 総務省統計局「人口推計(平成26年10月1日現在)」

<http://www.stat.go.jp/data/jinsui/2014np/> (2015年11月)

[5] 北海道のホームページ「住民基本台帳・世帯数」(平成27年1月1日現在)

<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ss/tuk/900brr/index2.htm>(2015年11月)

[6] 田村浩一・土屋眞一・杉崎祐一(2004)「セカンドオピニオン外来における病理診断コンサルテーションの現状」『病理と臨床』Vol. 22 No. 11 pp1166-1171

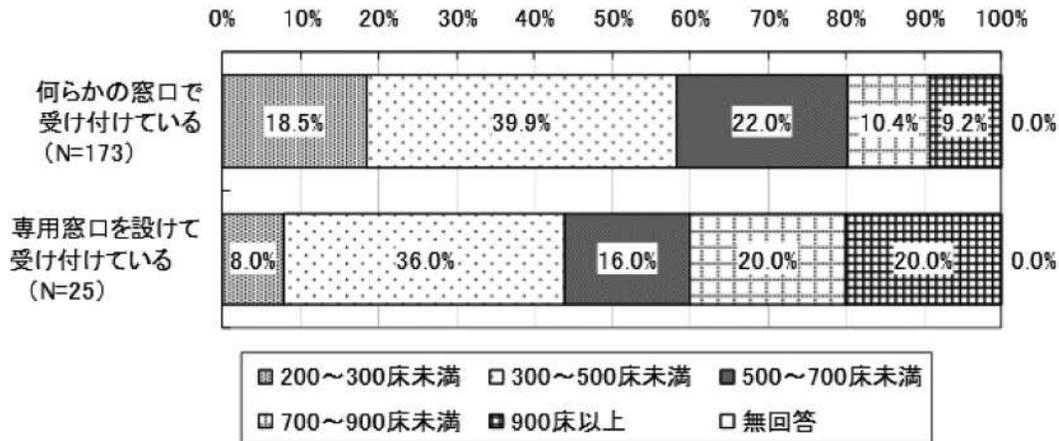
[7] 中央社会保険医療協議会(2008)「平成18年度診療報酬改定結果に係る調査 セカンドオピニオン外来実施医療機関の利用状況調査 報告書」

<http://www.mhlw.go.jp/shingi/2008/07/d1/s0709-7a.pdf>(2015年11月)

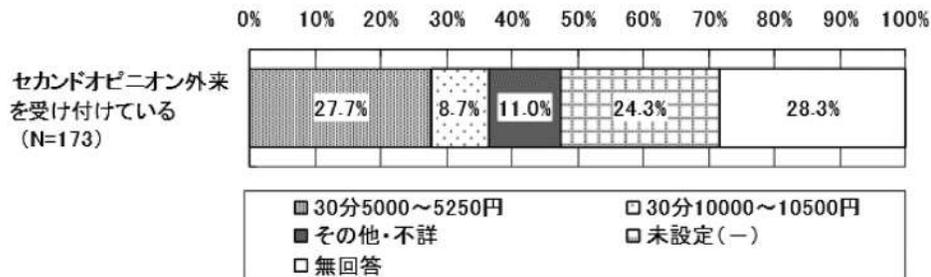
[8] 木原康樹・稲恒子(2006)「わが国におけるセカンドオピニオンの現状と展望」『医学のあゆみ』Vol. 218 No. 7. 8 pp683-686

追加資料 [7] 中央社会保健医療協議会総会資料

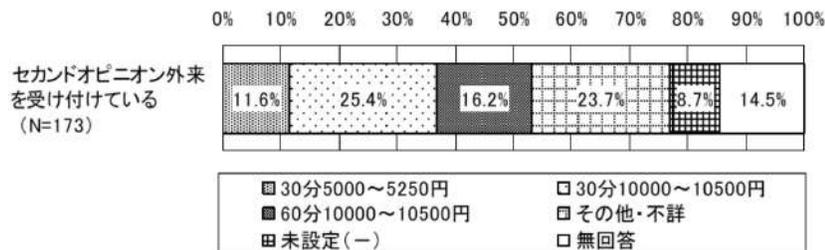
図表 11 セカンドオピニオン外来を受け付けている病院の病床規模



図表 22 セカンドオピニオン外来の延長料金



図表 21 セカンドオピニオン外来の基本料金



※「不詳」は、時間と料金のどちらかが無回答だったケース。

〈研究ノート〉

高校数学の微積分の実践としての Kepler の法則の証明

松井 伸也*

Proof of Kepler's planetary laws via applying the high school calculus

SHIN'YA MATSUI*

要旨

高校数学で学ぶ微積分の定理は、大学で行う1変数の微積分の内容と基本的に遜色ない。大学では議論に不確かさがないように定理を証明するが、高校ではそれは難しい。それにも関わらず、高校の微積分での議論にある程度目をつぶれば、それを応用し、本来の微積分の目的である「解析」が行える。本稿ではその実践として Kepler の法則の証明を行う事を目的とする。

キーワード

数学教育, 微積分の実践教育, 常微分方程式, Kepler の法則, Newton の万有引力の法則, 線形代数

1. はじめに

高校数学で学ぶ微積分の定理は、大学で行う1変数の微積分法と基本的に遜色ない。大学では議論に不確かさがないように定理を証明し、様々な定理を使う上での検証の必要性を説く。高校で同じことを行うのは難しいにも関わらず、ある程度の部分の議論に目をつぶれば、高校で学ぶ微積分は合成関数の微分法を含み([4])微積分の本来の目的である「解析」が行える。高校で扱う微積分の応用は、グラフ・不等式程度であるが、それらを教える教員は、如何なる仮定・定義・定理がその応用に含まれているかを常に説明できることが必要である。どの様な数学的内容にもそのバックボーンには、何らかの仮定・定義があり、それらを下に証明がある。授業等でそれらを逐一説明する必要はないと思うが、数学科教育を行う立場では常に心にとめておく必要がある。本稿では、数学科教育の一つの実践として、仮定・定義・定理を明確にし解析を行う場合、どの様な記述になるかを明確に示すことを目的とする。具体的な解析対象として、ベクトル、グラフの

極形式¹⁾などを使い内容の豊富な Kepler の法則の証明を行う。

Johannes Kepler (1571–1630) が与えた惑星の運動を表す法則 (Kepler の法則) は, Tycho Brahe (1546–1601) による火星の観測結果を元に得られたことは、よく知られている。この Kepler の法則は、Issac Newton (1643–1727) による運動方程式と万有引力の法則を用いることにより初等的に証明が可能である。この証明は、Newton 本人がその著「プリンキピア」(Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica) ([5]) で行っており、その逆、即ち、Kepler の法則から万有引力の法則が導かれるという解析も行っている。この辺の事情は、Vladimir I. Arnold (1937–2010) の著書 ([1]) に詳しい。なお [1] にも軌道が楕円になる我々とは異なる証明が載っている。また、KAM 理論²⁾として知られる軌道の安定性の理論への歴史としては、[3] をお勧めする。

本稿で取り扱う惑星と太陽の関係は、図 1 のような場合に限ることとする。

¹⁾ グラフ上の点 P の原点 O からの距離を r とし、ベクトル \overrightarrow{OP} が x 軸の正の部分とのなす角を θ としたとき、 $r = f(\theta)$ という形式でグラフを表現する方法である。

²⁾ Andrei N. Kolmogorov (1903–1987), Vladimir I. Arnold, Jürgen K. Moser (1928–1999)

* 北海道情報大学 情報メディア学部教授
Professor, Faculty of Information Media, HIU

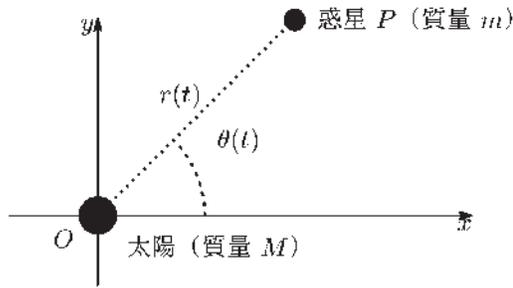


図 1 問題設定

この図 1 では、太陽 O (原点) と惑星 P を大きさのある物体として描いているが、これはわかりやすく表現しただけである。太陽と惑星はそれぞれ質点 (質量を持つ点) とし、それぞれの質量を $M > 0$, $m > 0$ とする。本稿では、高校数学程度の内容を仮定するので、そのために次のような設定 (仮定) をし、Kepler の法則の証明を行う。

仮定 1.

- 太陽は動かない。即ち $M \gg m$ ³⁾ を仮定する。
- 惑星は太陽を含む平面上を運動する。
- 惑星の運動は時刻 t のみで決まり、初期時刻を $t = 0$ とする。

質点 P の位置を解析するために、図 1 のように時刻 t での質点 P の極座標を設定する。 OP の距離を $r(t)$ とし、 x 軸の正の部分と線分 OP とのなす角を $\theta(t)$ とする。この二つの関数 $r(t)$ と $\theta(t)$ が本来ならば未知関数 (求めるべき関数) である。即ち $r(t)$ と $\theta(t)$ の満たす何らかの方程式 (後述) から、その存在を証明すべき関数達である。しかし高校の解析学の範囲を逸脱するので、解の存在は仮定する。さらに存在を仮定した解の解析をするためには、何らかの「滑らかさ (微分可能性)」は、必要である。必要とする微分可能性を次の仮定で与える。

仮定 2.

関数 $r(t)$ と $\theta(t)$ は、 $t \geq 0$ において C^2 級である⁴⁾。

Kepler の法則を与えておこう。なお正確な

³⁾ 記号 $a \gg b$ は、 a は b に比べて遙かに大きい事を表す。

⁴⁾ 関数が $t > 0$ において C^m 級であるとは、 $t > 0$ において連続かつ m 階微分可能であり、その m 階導関数も連続である、ことをいう。

定式化、言葉の定義などは次節に譲る。

第 1 法則 惑星は、太陽を 1 つの焦点とする楕円軌道を描く。

第 2 法則 惑星の面積速度は一定である。

第 3 法則 惑星の公転周期の 2 乗は、軌道の長半径の 3 乗に比例する。

2. Kepler の法則と証明の準備

Kepler の法則を定式化し、それを証明するための準備をこの章で行う。時刻 t での惑星の位置を $\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix}$ とおくと⁵⁾

$$\begin{cases} x(t) = r(t) \cos \theta(t) \\ y(t) = r(t) \sin \theta(t) \end{cases} \quad (1)$$

であるから、仮定 2 から $x(t)$ と $y(t)$ は $t \geq 0$ で共に C^2 級である。

ここでベクトルに関して、一般的な事項をまとめておこう。なお $f'(t)$ は、時間 t の関数 $f(t)$ の微分を表すことにする。

定義 1. (i) 平面上のベクトル $\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}$

と $\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$ の内積 $\mathbf{x} \cdot \mathbf{y}$ を $\mathbf{x} \cdot \mathbf{y} = x_1 y_1 + x_2 y_2$ と定義し、 $\|\mathbf{x}\| = \sqrt{\mathbf{x} \cdot \mathbf{x}}$ とおく。なお $\mathbf{x} \cdot \mathbf{y} = 0$ であるとき \mathbf{x} と \mathbf{y} は直交するといひ、 $\mathbf{x} \perp \mathbf{y}$ と書く。

(ii) 平面上のベクトル \mathbf{x} と \mathbf{y} が $\|\mathbf{x}\| = \|\mathbf{y}\| = 1$ かつ $\mathbf{x} \perp \mathbf{y}$ を満たすとき、 \mathbf{x} と \mathbf{y} を正規直交基底であるという。

(iii) C^1 級のベクトル⁶⁾ $\mathbf{P}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix}$ に対し、

$$\mathbf{P}'(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} (\mathbf{P}(t+h) - \mathbf{P}(t))$$

とする⁷⁾。高階の微分についても同様に定義する。

(iv) 平面上の質点 P の位置ベクトルが $\mathbf{P}(t)$ であるとき、ベクトル $\mathbf{P}'(t)$ およ

⁵⁾ 本稿では一般的な数学的表記に合わせて、ベクトルを列ベクトルで表すこととする。なお、すべての成分が、 C^m 級であるとき、そのベクトルを C^m 級であるという。

⁶⁾ 本来ならベクトル場というべきであるが、本稿では単にベクトルとよぶ。

⁷⁾ ベクトル $F(t)$ と F に対し $\lim_{t \rightarrow a} F(t) = F$ であるとは、 $\lim_{t \rightarrow a} \|F(t) - F\| = 0$ を満たすことをいう。

び $\mathbf{P}''(t) = (\mathbf{P}'(t))'$ をそれぞれ質点 P の速度ベクトル, 加速度ベクトルとよぶ.

本稿を通して必要な正規直交基底は

$$\mathbf{R}(t) = \begin{pmatrix} \cos \theta(t) \\ \sin \theta(t) \end{pmatrix}, \mathbf{\Theta}(t) = \begin{pmatrix} -\sin \theta(t) \\ \cos \theta(t) \end{pmatrix}$$

であり, $\mathbf{R}(t)$ を半径方向の単位ベクトルとよび, それに直交する $\mathbf{\Theta}(t)$ を偏角方向の単位ベクトルとよぶことにする. 本稿で必要な微分に関する事実を述べよう.

補題 1. ベクトル $\mathbf{F}(t) = \begin{pmatrix} f(t) \\ g(t) \end{pmatrix}$ を C^1 級とし, 仮定 2 を仮定する.

(i) $\mathbf{F}'(t) = \begin{pmatrix} f'(t) \\ g'(t) \end{pmatrix}$ である.

(ii) C^1 級の関数 $k(t)$ にたいして

$$\frac{d}{dt}(k(t)\mathbf{F}(t)) = k'(t)\mathbf{F}(t) + k(t)\mathbf{F}'(t)$$

が成立する.

(iii) $\mathbf{R}'(t) = \theta'(t)\mathbf{\Theta}(t)$, $\mathbf{\Theta}'(t) = -\theta'(t)\mathbf{R}(t)$.

(iv) $\mathbf{P}(t) = r(t)\mathbf{R}(t)$.

(v) $\mathbf{P}'(t) = r'(t)\mathbf{R}(t) + r(t)\theta'(t)\mathbf{\Theta}(t)$.

(vi) $\mathbf{P}''(t) = (r''(t) - r(t)(\theta'(t))^2)\mathbf{R}(t) + (2r'(t)\theta'(t) + r(t)\theta''(t))\mathbf{\Theta}(t)$.

証明 (i) を示す. $\mathbf{A}(t) = \begin{pmatrix} f'(t) \\ g'(t) \end{pmatrix}$ とおく.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{h}(\mathbf{F}(t+h) - \mathbf{F}(t)) - \mathbf{A}(t) \\ &= \begin{pmatrix} \frac{f(t+h) - f(t)}{h} - f'(t) \\ \frac{g(t+h) - g(t)}{h} - g'(t) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

よって各成分の微分可能性より,

$$\lim_{h \rightarrow 0} \left\| \frac{1}{h}(\mathbf{F}(t+h) - \mathbf{F}(t)) - \mathbf{A}(t) \right\| = 0$$

である. (ii) はベクトルの各成分ごとに積の微分法を使えば良い. (iii) を示す. 合成関数の微分法を使うと

$$\begin{aligned} \mathbf{R}'(t) &= \begin{pmatrix} \{\cos \theta(t)\}' \\ \{\sin \theta(t)\}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\theta'(t) \sin \theta(t) \\ \theta'(t) \cos \theta(t) \end{pmatrix} \\ &= \theta'(t) \begin{pmatrix} -\sin \theta(t) \\ \cos \theta(t) \end{pmatrix} = \theta'(t)\mathbf{\Theta}(t) \end{aligned}$$

を得る. 後半も同様に証明すれば良い. (iv) は (1) から明らかである. (v) を示そう. 煩雑さを避けて, 時間 t への依存を示す (t) を省略する. (ii), (iii) と (iv) より

$$\begin{aligned} \mathbf{P}' &= (r\mathbf{R})' = r'\mathbf{R} + r\mathbf{R}' \\ &= r'\mathbf{R} + r\theta'\mathbf{\Theta}. \end{aligned}$$

同様に (vi) を示す.

$$\begin{aligned} \mathbf{P}'' &= (r'\mathbf{R} + r\theta'\mathbf{\Theta})' \\ &= r''\mathbf{R} + r'\mathbf{R}' + r'\theta'\mathbf{\Theta} + r\theta''\mathbf{\Theta} + r\theta'\mathbf{\Theta}' \\ &= r''\mathbf{R} + r' \cdot \theta'\mathbf{\Theta} + r'\theta'\mathbf{\Theta} + r\theta''\mathbf{\Theta} \\ &\quad + r\theta' \cdot (-\theta'\mathbf{R}) \\ &= (r'' - r(\theta')^2)\mathbf{R} + (2r'\theta' + r\theta'')\mathbf{\Theta} \end{aligned}$$

証明すべきことは以上である.

Kepler の定理を記述する上で必要な楕円 (図 2) の極表示を計算しよう. なお数学 III で取り扱う内容である. 証明は必要ないと思われるが, 参考までに与えておこう.

補題 2. (i) 原点と点 $F_2 = (-2l, 0)$ を焦点とする楕円の極表示は

$$r = \frac{A^2 - l^2}{A + l \cos \theta}$$

である. ただし $A > l$ は正の定数であり, この楕円の中心は $C = (-l, 0)$ である.

(ii) 焦点を含む軸で $\|\overrightarrow{CP_a}\|$ を長半径とし, 短半径を $\|\overrightarrow{CP_b}\|$ とする. このとき長半径 $= A$, 短半径 $= \sqrt{A^2 - l^2}$ である.

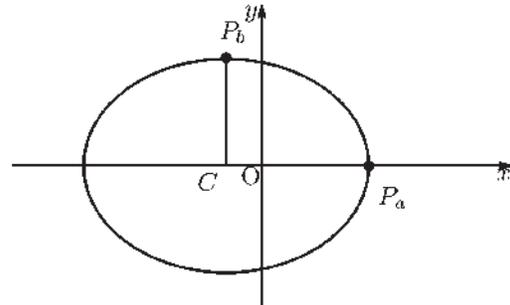


図 2 楕円

証明 (i) を示そう. 焦点を F_1, F_2 とする楕円上の点 P は $\|\overrightarrow{F_1P}\| + \|\overrightarrow{F_2P}\| = 2A$ を満たす. ただし $A > l$ であった. さて我々の設定では $F_1 = (0, 0)$, $F_2 = (-2l, 0)$ なので $P = (r \cos \theta, r \sin \theta)$ とおくと ($0 \leq r \leq 2A$)

$$\begin{aligned} \|\overrightarrow{F_1P}\| &= \sqrt{(r \cos \theta)^2 + (r \sin \theta)^2} = r, \\ \|\overrightarrow{F_2P}\| &= \sqrt{(r \cos \theta + 2l)^2 + (r \sin \theta)^2} \\ &= \sqrt{r^2 + 4rl \cos \theta + 4l^2} \end{aligned}$$

であるから $\sqrt{r^2 + 4rl \cos \theta + 4l^2} = 2A - r$ を得るが、右辺は 0 以上なので両辺を 2 乗し、まとめると

$$r = \frac{A^2 - l^2}{A + l \cos \theta}$$

を得る。次に (ii) を示す。 $P_a = (\alpha, 0)$ とおき、 $P_b = (-l, \beta)$ とおく。ここで α と β は正で求めるべき値である。

α の値を計算する。 $\|\overrightarrow{F_1 P_a}\| = \alpha$ 、 $\|\overrightarrow{F_2 P_a}\| = 2l + \alpha$ であるから、 $\alpha + (2l + \alpha) = 2A$ である。よって

$$\alpha = A - l$$

を得る。 β の値を計算する。三平方の定理を使うと $\|\overrightarrow{F_1 P_b}\| = \|\overrightarrow{F_2 P_b}\| = \sqrt{\beta^2 + l^2}$ であるから、 $2\sqrt{\beta^2 + l^2} = 2A$ である。よって

$$\beta = \sqrt{A^2 - l^2}$$

を得た。よって長半径 $= \alpha + l = A$ 、短半径 $= \beta = \sqrt{A^2 - l^2}$ を得た。証明終わり。

なお長半径 $>$ 短半径であり、離心率は

$$e = \sqrt{1 - \frac{\|\overrightarrow{CP_b}\|^2}{\|\overrightarrow{CP_a}\|^2}} = \frac{l}{A}$$

である。

Kepler の法則にある面積速度の計算を与えよう。1 変数の積分による計算は少々煩雑になるので、ここでは重積分の計算を与える。故に高校の数学を逸脱する。1 変数の積分による計算も高校の微積分の範囲を超える。どちらにしても、仮定しなくてはいけない数学的事実となる。ここでも参考までに、証明を与えることにしよう。

補題 3. 極形式 $r = f(\theta)$ で与えられる曲線を考える。ただし $f(\theta)$ は θ に関して連続であるとする。このとき、この曲線が $\theta_0 \leq \theta \leq \theta_1$ を満たす部分と 2 直線 $y = (\tan \theta_0)x$ 、 $y = (\tan \theta_1)x$ で囲まれる領域 D の面積 S は

$$S = \frac{1}{2} \int_{\theta_0}^{\theta_1} (f(\tau))^2 d\tau$$

である。

証明 極座標変換を使う。なお $E = \{(r, \theta) | 0 \leq r \leq f(\theta), \theta_0 \leq \theta \leq \theta_1\}$ である。

$$\begin{aligned} S &= \iint_D 1 dx dy = \iint_E r dr d\theta \\ &= \int_{\theta_0}^{\theta_1} \left(\int_0^{f(\theta)} r dr \right) d\theta \\ &= \int_{\theta_0}^{\theta_1} \frac{1}{2} (f(\theta))^2 d\theta. \end{aligned}$$

よって、面積が計算された。

定義 2. 惑星が太陽の周りをまわる軌道が極形式 $r(t) = f(\theta(t))$ と書けるとする。さらに $\theta(t)$ は単調増加関数であるとする。初期時刻 $t = 0$ から時刻 t の間に、太陽と惑星を結ぶ直線が作る領域の面積を $S(t)$ とおく。このとき $S'(t)$ を惑星の面積速度という。

存在を仮定した $\theta(t)$ は、 $\theta'(t)$ がどのような値をとっても微分方程式の問題としては成立する。しかし惑星の動きを考えると任意の $t \geq 0$ に対して $\theta'(t) > 0$ または $\theta'(t) < 0$ となるべきであろう。この単調性は、解 $\theta(t)$ に仮定するか、もしくは何らかの仮定の下で証明する必要がある。我々は $\theta(t)$ の初期値に仮定を与え、 $\theta'(t) > 0$ を証明することとする。なお単調性の証明は後ほど行い、次の補題では $\theta(t)$ の単調性を仮定し、面積速度 $S'(t)$ を計算しよう。

補題 4. 惑星が太陽の周りをまわる軌道が極形式 $r(t) = f(\theta(t))$ と書けるとする。さらに $f(\theta)$ の連続性を仮定し、 $\theta(t)$ は $t \geq 0$ で、 C^1 級とし、 $\theta'(t) > 0$ または $\theta'(t) < 0$ を仮定する。このとき

$$S'(t) = \frac{1}{2} [f(\theta(t))]^2 \cdot |\theta'(t)|$$

である。

証明 補題 3 より $\theta'(t) > 0$ のときは

$$S(t) = \frac{1}{2} \int_{\theta(0)}^{\theta(t)} (f(\tau))^2 d\tau$$

である。なお $\theta'(t) < 0$ のときは

$$S(t) = -\frac{1}{2} \int_{\theta(0)}^{\theta(t)} (f(\tau))^2 d\tau$$

である。以下 $\theta'(t) > 0$ のときの計算をしよう。 $\theta'(t) < 0$ のときも同様である。さて微積分の基本定理

$$G(x) = \int_a^x g(\tau) d\tau \Rightarrow G'(x) = g(x)$$

が成立する。ここで $g(\tau)$ は $a \leq \tau \leq x$ で連続である。よって

$$H(x) = \frac{1}{2} \int_{\theta(0)}^x (f(\tau))^2 d\tau \Rightarrow H'(x) = \frac{1}{2} (f(x))^2$$

である。故に合成関数の微分法を使うと

$$S'(t) = H'(\theta(t)) \cdot \theta'(t) = \frac{1}{2} [f(\theta(t))]^2 \cdot \theta'(t)$$

以上で補題を得た。

準備が整ったので、Keplerの法則の定式化を行う。なお公転周期とは、惑星が太陽の周りを1周するのに要する時間である。

Keplerの法則

1st law ある正定数 A と l ($A > l$) が存在し、

$$r(t) = \frac{A^2 - l^2}{A + l \cos \theta(t)}$$

が成立する。

2nd law 面積速度 $S'(t)$ は定数である。

3rd law 惑星の公転周期を T とし、長半径を R_a とする。このとき $T^2/(R_a)^3$ は、惑星 P に依存しない定数である。

この法則を Newton の万有引力の法則を使い証明するわけである。平面上の力学⁸⁾について、必要なことを述べておこう。

力学について

運動方程式 平面上を動く質点 P (質量 $m > 0$) の時刻 t での位置 (ベクトル) を $\mathbf{P}(t)$ とおく。このとき点 P に加わる力 (ベクトル) を \mathbf{F} とすると

$$m\mathbf{P}''(t) = \mathbf{F}$$

が成立する。

万有引力の法則 質量 $M > 0$, $m > 0$ の二つの物体は引き合う。その力の大きさは、二つの物体間の距離を R とすると

$$\frac{GMm}{R^2}$$

である。ただし $G > 0$ は万有引力定数である。

⁸⁾ 以下の話は平面に限ったことではない。

3. 惑星が満たす方程式と必要な仮定

前節の計算結果などから、惑星 P の位置ベクトル $\mathbf{P}(t)$ が満たす方程式を導出する。万有引力の法則と運動方程式から、次の常微分方程式を得る。初期値に関しては、後述する。また数学の慣例に従って、関数 $f(t)$ にたいして、 $(f(t))^m$ を $f^m(t)$ と書くことにする。

$$m\mathbf{P}''(t) = -\frac{GMm}{r^2(t)}\mathbf{R}(t) \quad \text{for } t > 0. \quad (e1)$$

ただし、力の向きは外向きを正とした。この方程式を補題1を使い、 $\Theta(t)$ と $\mathbf{R}(t)$ の成分の方程式に書き換えよう。(e1)の左辺は

$$m \left(r''(t) - r(t) (\theta')^2(t) \right) \mathbf{R}(t) + m (2r'(t)\theta'(t) + r(t)\theta''(t)) \Theta(t)$$

であった。また $\mathbf{R}(t)$ と $\Theta(t)$ は正規直交基底であるので、実数 $\alpha_R, \alpha_\theta, \beta_R, \beta_\theta$ にたいして、

$$\alpha_R \mathbf{R}(t) + \alpha_\theta \Theta(t) = \beta_R \mathbf{R}(t) + \beta_\theta \Theta(t)$$

が成立する為の必要十分条件は、 $\alpha_R = \beta_R$ かつ $\alpha_\theta = \beta_\theta$ であることは容易に分かる⁹⁾。よって (e1) より $t > 0$ のとき

$$m \left(r''(t) - r(t) (\theta')^2(t) \right) = -\frac{GMm}{r^2(t)} \quad (e2)$$

$$m (2r'(t)\theta'(t) + r(t)\theta''(t)) = 0 \quad (c3)$$

を得る。さて積の微分法を使うと

$$\begin{aligned} r(t) (2r'(t)\theta'(t) + r(t)\theta''(t)) &= 2r(t)r'(t)\theta'(t) + (r(t))^2 \theta''(t) \\ &= \{r^2(t)\}' \theta'(t) + r^2(t) (\theta'(t))' \\ &= \{r^2(t)\theta'(t)\}' \end{aligned}$$

よって (c2) および (c3) $\times r(t)$ より、未知関数 $r(t)$ と $\theta(t)$ にたいする初期値問題を得る。この極形式の方程式が、我々に必要な最終的な形である。なお時間 t の関数であることを示す (t) は省略した。ただし $B > 0$, $b > 0$ は定数である。

$$\begin{cases} m (r'' - r(\theta')^2) = -\frac{GMm}{r^2} & \text{for } t > 0 \quad (E1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} (r^2\theta')' = 0 & \text{for } t > 0 \quad (E2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} r(0) = B, \theta(0) = 0 \quad (E3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} r'(0) = 0, \theta'(0) = b \quad (E4) \end{cases}$$

⁹⁾ 両辺に $\mathbf{R}(t)$ と $\Theta(t)$ を内積すればよい

この連立常微分方程式系にたいする初期値問題 (E1), (E2), (E3), (E4) に次を仮定する. 以下この問題を (E) と書く. この初期問題の解の構成は本稿の目的ではない. あくまで Kepler の法則を示すことにある. 故に本稿では, 次は仮定しよう.

仮定 3. 初期値問題 (E) は, $t \geq 0$ で C^2 級の 1 意的な解 (古典解という) をもつ.

この仮定では, 特に「解の 1 意性」が重要である. 「解の 1 意性」が成立しないと, 例えば惑星の軌道を計算してもそれ以外の軌道は無いという保証ができないからである.

この仮定 3 と (E) から, 惑星の位置ベクトル $P(t)$ の初期値は

$$P(0) = \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix}, \quad P'(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ Bb \end{pmatrix}$$

である.

4. Kepler の定理の証明

本節で次の定理を証明しよう.

定理 1. 仮定 3 を仮定し, 初期値にたいして $B^3b^2 < 2GM$ を仮定する. このとき (E) の解 $r(t)$ と $\theta(t)$ は, Kepler の法則を満たす.

次の補題は, 定理を証明するために重要な役割を果たす.

補題 5. すべての $t \geq 0$ にたいし, 次が成立する.

- (i) $r^2(t)\theta'(t) = B^2b$.
- (ii) $r(t) > 0$ かつ $\theta'(t) > 0$.

証明 $t \geq 0$ を任意にとる. 方程式 (E2) と初期条件 (E3) と (E4) から, (i) は直ちにしたがう. またこれより $B^2b > 0$ なので, $r^2(t)\theta'(t) > 0$ である. よって $r(t) \neq 0$ かつ $\theta'(t) > 0$ を得る. よって (ii) の後半も証明された. 最後に $r(t) > 0$ を示そう. 初期条件 $r(0) = B > 0$ であり, 仮定 3 より $r(t)$ は $t \geq 0$ で連続である. ある時刻 $t_0 > 0$ が存在して $r(t_0) < 0$ を満たすとしよう. すると中間値の定理から $r(t_1) < 0$ を満たすある時刻 t_1 ($0 < t_1 < t_0$) が存在する. これは先に示した $r(t) \neq 0$ に反する. よってすべての $t \geq 0$ にたいして, $r(t) > 0$ である. 以上である.

つぎに $r(t) = f(\theta(t))$ となる関係があるか否かを計算しよう. Kepler の法則 1st law の

証明を行いたい.

命題 1. (1) 初期値が $2GM > B^3b^2$ を満たすとき, ある定数 A と l ($0 < l < A$) が存在して

$$r(t) = \frac{A^2 - l^2}{A + l \cos \theta(t)}$$

を満たす.

(2) 定数 A と l は, 次で与えられる.

$$A = \frac{BGM}{2GM - B^3b^2}, \quad l = \frac{B^4b^2 - BGM}{2GM - B^3b^2}.$$

証明 $r(t) = f(\theta(t))$ となる $f = f(p)$ が存在するか否かを $f(p)$ の方程式を作り解析しよう. (E1) から

$$r''(t) - r(t)(\theta'(t))^2 + \frac{GM}{r^2(t)} = 0 \quad (2)$$

である. この式に $r(t) = f(\theta(t))$ を代入し, 合成関数の微分法を使い計算しよう. 時間変数 t の微分 $\frac{d}{dt}$ と区別するため, 関数 $f(p)$ の変数 p に関する微分 $\frac{df}{dp}(p)$ を $\dot{f}(p)$, $\frac{d^2f}{dp^2}(p)$ を $\ddot{f}(p)$ で表す. 補題 5 の (i) から,

$$\theta'(t) = \frac{B^2b}{r^2(t)} = \frac{B^2b}{f^2(\theta(t))} \quad (3)$$

である. よって

$$r(t)(\theta'(t))^2 = \frac{B^4b^2}{f^3(\theta(t))}$$

を得る. 同様に (3) を使うと

$$\begin{aligned} r'(t) &= \dot{f}(\theta(t)) \cdot \theta'(t) \\ &= B^2b \frac{\dot{f}(\theta(t))}{f^2(\theta(t))} \\ &= -B^2b \frac{d}{dp} \left(\frac{1}{f(p)} \right) \Big|_{p=\theta(t)} \end{aligned}$$

が成立するので

$$r'(t) = -B^2b \frac{d}{dp} \left(\frac{1}{f(p)} \right) \Big|_{p=\theta(t)} \quad (4)$$

を得る. ここで $\frac{d}{dp} (F(p)) \Big|_{p=\theta}$ は, $F(p)$ を微分した後で $p = \theta$ を代入することを表す.

さらに (4) を l で微分し, (3) を使うと

$$\begin{aligned} r''(t) &= -B^2b \frac{d^2}{dp^2} \left(\frac{1}{f(p)} \right) \Big|_{p=\theta(t)} \cdot \theta'(t) \\ &= -\frac{B^4b^2}{f^2(\theta(t))} \cdot \frac{d^2}{dp^2} \left(\frac{1}{f(p)} \right) \Big|_{p=\theta(t)} \end{aligned}$$

を得る. よって (2) は

$$-\frac{B^4b^2}{f^2(\theta(t))} \cdot \frac{d^2}{dp^2} \left(\frac{1}{f(p)} \right) \Big|_{p=\theta(t)} - \frac{B^4b^2}{f^3(\theta(t))} + \frac{GM}{f^2(\theta(t))} = 0$$

となる. この両辺に $f^2(\theta(t))/(B^4b^2)$ をかけてまとめると

$$\left(\frac{d^2}{dp^2} \left(\frac{1}{f(p)} \right) + \frac{1}{f(p)} \right) \Big|_{p=\theta(t)} = \frac{GM}{B^4b^2}$$

を得る. さて補題 5 (ii) と初期条件より, $\theta'(t) > 0$ かつ $\theta(0) = 0$ である. よって $\theta(t)$ は 0 以上の任意の実数を値としてもつ. 以上の議論から, 未知関数 $f(p)$ は $p \geq 0$ で

$$\frac{d^2}{dp^2} \left(\frac{1}{f(p)} \right) + \frac{1}{f(p)} = \frac{GM}{B^4b^2} \quad (5)$$

を満たすことが分かった. $\theta(t)$ の単調性と $\theta(0) = 0$ から $\theta(t) = 0 \iff t = 0$ である. よって

$$f(0) = f(\theta(0)) = r(0) = B$$

を得る. さらに $\dot{f}(0) = \dot{f}(\theta(0))$ なので, (4) より

$$\begin{aligned} \dot{f}(0) &= \frac{f^2(0) \cdot r'(0)}{B^2b} = 0, \\ \left(\frac{\dot{1}}{f} \right)(0) &= \frac{-\dot{f}(0)}{f^2(0)} = 0 \end{aligned}$$

である. よって $1/f(p)$ の初期条件は,

$$\frac{1}{f(0)} = \frac{1}{B}, \quad \left(\frac{\dot{1}}{f} \right)(0) = 0 \quad (6)$$

である. この 2 階常微分方程式の初期値問題 (5), (6) は, 比較的簡単に解ける¹⁰⁾. 結果を認めても良いであろう. 簡単に述べよう. $\frac{1}{f(p)}$ の方程式とみて定係数 2 階常微分方程式である方程式 (5) の特性方程式は

$$\lambda^2 + 1 = 0$$

であり, 特性根は $\lambda = \pm\sqrt{-1}$ である. よって基本解として $\cos p$ と $\sin p$ がとれる¹¹⁾. よって

$$\frac{1}{f(p)} = \alpha \cos p + \beta \sin p + \gamma$$

¹⁰⁾ 例えば [2] 等.

¹¹⁾ $e^{\pm\sqrt{-1}p}$ としても良い.

とにおいて, 初期値問題 (5), (6) の解になるように定数 α, β, γ を決定すると

$$\frac{1}{f(p)} = \left(\frac{1}{B} - \frac{GM}{B^4b^2} \right) \cos p + \frac{GM}{B^4b^2} \quad (7)$$

を得る. よって

$$\begin{aligned} f(p) &= \frac{1}{\left(\frac{1}{B} - \frac{GM}{B^4b^2} \right) \cos p + \frac{GM}{B^4b^2}} \\ &= \frac{B^4b^2}{GM + (B^3b^2 - GM) \cos p} \end{aligned}$$

となるが³⁾, 分母と分子に $\frac{B}{2GM - B^3b^2}$ をかけ

$$f(p) = \frac{\frac{B^5b^2}{2GM - B^3b^2}}{\frac{BGM}{2GM - B^3b^2} + \left(\frac{B^4b^2 - BGM}{2GM - B^3b^2} \right) \cos p}$$

と変形する. ここで

$$A = \frac{BGM}{2GM - B^3b^2}, \quad l = \frac{B^4b^2 - BGM}{2GM - B^3b^2} \quad (8)$$

とおくと

$$\begin{aligned} A^2 - l^2 &= (A - l)(A + l) \\ &= \frac{2BGM - B^4b^2}{2GM - B^3b^2} \times \frac{B^4b^2}{2GM - B^3b^2} \\ &= \frac{B^5b^2(2GM - B^3b^2)}{(2GM - B^3b^2)^2} \\ &= \frac{B^5b^2}{2GM - B^3b^2} \end{aligned}$$

が成立する. 初期値の仮定 $2GM - B^3b^2 > 0$ により, 明らかに $0 < l < A$ であり,

$$f(p) = \frac{A^2 - l^2}{A + l \cos p}$$

を満たす. 解 $r(t)$ と $\theta(t)$ は一意であったから, 以上で命題 1 即ち 1st law が示された.

参考までに, (5) から次が従う. 高校数学 III の範囲で理解ができるので, 詳細は割愛する.

- 初期値が $2GM = B^3b^2$ を満たすとき

$$f(p) = \frac{2B}{1 + \cos p}$$

を満たす. 極表示で $r = 2B/(1 + \cos \theta)$ となる曲線は, 原点を焦点とする放物線を表す.

- 初期値が $2GM < B^3b^2$ を満たすとき, (8) において $\alpha = -A > 0$ と $\mu = -l > 0$

とおく、このとき、 $0 < \alpha < \mu$ であり

$$f(p) = \frac{\mu^2 - \alpha^2}{\alpha + \mu \cos p}$$

を満たす。極表示で $r = (\mu^2 - \alpha^2)/(\alpha + \mu \cos p)$ となる曲線は、原点を一つの焦点とする双曲線を表す。

さて、Kepler の法則の証明にもどらう。命題 1 の証明と補題 2 (ii) から、次の補題が直ちに従う。

補題 6. 惑星の軌道の長半径 R_a と短半径 R_b は、次で与えられる。

$$R_a = \frac{BGM}{2GM - B^3b^2}, R_b = \sqrt{\frac{B^5b^2}{2GM - B^3b^2}}$$

$\theta(t)$ が単調増加関数 (補題 5 (ii)) で、軌道が極表示ができることが分かった (命題 1)。さらに補題 4 を使い Kepler の法則の 2nd law を証明しよう。

命題 2. 面積速度 $S'(t)$ は

$$S'(t) = \frac{1}{2}B^2b$$

である。

証明 補題 5 (ii) と命題 1 から、補題 4 の仮定が成立することが分かる。よって補題 5 (i) から

$$S'(t) = \frac{1}{2}f^2(\theta(t))\theta'(t) = \frac{1}{2}r^2(t)\theta'(t) = \frac{1}{2}B^2b$$

が成立し、命題は証明される。即ち 2nd law が示された。

最後に 3rd law の証明を行う。最初に惑星 P の公転周期 T_P を計算する。

補題 7. 惑星 P が描く楕円の長半径を R_a 、短半径を R_b とする。このとき、 P が太陽の周りを 1 周するに要する公転周期 T_P は

$$T_P = \frac{2\pi R_a R_b}{B^2b}$$

である。

証明 惑星 P が描く楕円の面積は $S_P = \pi R_a R_b$ である。一方、 $S_P = S(T_P)$ であるから、補題 4 と命題 2 より

$$S_P = \int_0^{T_P} S'(\tau) d\tau = \int_0^{T_P} \frac{1}{2}B^2b d\tau = \frac{1}{2}B^2b T_P$$

である。よって

$$\frac{1}{2}B^2b T_P = \pi R_a R_b$$

である。よって補題を得る。

この公転周期 T_P を使い、3rd law を証明しよう。

命題 3. 次が成立する。

$$\frac{(T_P)^2}{(R_a)^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

である。

証明 補題 7 より

$$\frac{(T_P)^2}{(R_a)^3} = \left(\frac{2\pi R_a R_b}{B^2b}\right)^2 \cdot \frac{1}{(R_a)^3} = \frac{4\pi^2}{B^4b^2} \times \frac{(R_b)^2}{R_a}$$

である。補題 6 より

$$\frac{(R_b)^2}{R_a} = \frac{B^5b^2}{2GM - B^3b^2} = \frac{B^4b^2}{2GM - B^3b^2}$$

である。よって

$$\frac{(T_P)^2}{(R_a)^3} = \frac{4\pi^2}{GM}$$

を得る。よって 3rd law が示された。

5. 最後に

本稿では、Newton の万有引力の法則から Kepler の法則を高校数学の範囲で証明する場合、如何なる仮定が必要かを明確にすること目的とした。この逆、即ち Kepler の万有引力の法則から Newton の法則の高校数学を使った証明も稿を改めて行いたいと思う。

参考文献

- [1] Arnold, V., I. 著, 蟹江訳, 数理解析のバイオニアたち, シュプリンガー・フェアラーク東京 (1999).
- [2] Burghes, D. N. and Borrie, M.S. 著, 垣田・大町訳, 微分方程式で数学モデルを作ろう, 日本評論社 (1997).
- [3] Dyak, F. and Holmes, P. 著, 吉田訳, 天体力学のバイオニアたち 上・下, シュプリンガー・フェアラーク東京 (2004).
- [4] 文部科学省, 学習指導要領解説 数学編 (2009 年 11 月)
- [5] Newton, I. 著, 中野猿人訳, プリンシピア 自然哲学の数学的原理, 講談社 (1977)

〈研究ノート〉

作図問題と Galois 理論に関する教材作成の試み

林 雄一郎

A Trial of Preparation of the Teaching Materials
about the Construction Problems and the Galois Theory

Yuuichirou HAYASHI*

要 旨

正7角形は初等幾何学の作図法では描画不可能であるが、折り紙で折れる。学生がこの理由を数学的に学ぶことは、意義のあることである。この状況は代数方程式を冪根で解くことにも類似している。このように、限られた操作で何かを形成することが出来るか否かの数理的な決定問題は一般に興味深いことである。

本稿では、群論の初歩や体の拡大、円分多項式と1の n 乗根、正多角形の作図問題と Galois 理論、折紙による作図についての教材を提案する。

Abstract

Regular heptagon can't be drawn by construction method of elementary geometry, but it can be foled with ORIGAMI. It is meaningful that students can learn this reason mathematically. This situation is similar to the solution method of algebraic equations by roots. Like these, mathematical decision problems on whether or not we can make something by limited operations must be generally interesting.

In this paper, the author proposed teaching materials related to an introduction of group theory and extension of fields, cyclotomic polynomial and n -th root of unity, the problem of the geometric construction of regular polygon and the Galois theory, and drawing figures with ORIGAMI.

キーワード

回転, 群, Abel 群, 部分群, 巡回群, 位数, 正規部分群, 剰余群, 準同型, 同型, 可解群, 対称群, 交代群, 体, 自己同型, 添加した体, 拡大体, ベクトル空間, 拡大次数, 体の拡大, 中間体, 最小分解体, Galois 拡大, Galois 群, 固定体, Klein の四元群, 冪根拡大, 方程式の Galois 群, 代数的に解ける, 1 の n 乗根, 円分多項式, 円分体, 正7角形の作図不能, 折紙作画

*北海道情報大学情報メディア学部情報メディア学科特任教授

Specially appointed Professor, Department of Information Media, Faculty of Information Media

1 はじめに

正5角形には黄金比が隠れており、学校数学の刺激的な教材である。その幾何学的作図(以下、作図という)の一つは、直角を挟む2辺の長さが1、 $\frac{1}{2}$ となる直角三角形の斜辺

の長さ $\frac{\sqrt{5}}{2}$ に $\frac{1}{2}$ を加えて黄金比 $\frac{1+\sqrt{5}}{2}$ を

作図し、これを対角線とする5角形を描けばよい。正5角形となる証明も容易である。

次は正7角形の作図ということになる。だが、これは原理的にできない。しかし、正7角形は存在するし、折り紙の操作で折れる。

この事情は、複素係数 n 次代数方程式の根は複素数の範囲に n 個存在する(代数学の基本定理(Gauss,1799))にもかかわらず、 $n \geq 5$ の場合には一般的に方程式の根が代数的演算(加減乗除、冪根)で構成できない(Abel,1826)ということに似ている。

正 n 角形の作図について、ギリシャ人は $n = 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 16$ のとき可能であることを知っていた。これらはすべて $2^p 3^q 5^r$ ($p = 0, 1, 2, \dots, q = 0, 1, 2, r = 0, 1$)の形をした数である。そのため、この形の数しか作図できないと長らく信じられてきた。 $n = 17$ はこのような数で表せないから作図不能というわけである。

ところが、1796年3月30日の朝、19歳のGaussは、1の17乗根は開平だけで求められることを発見した。すなわち、「 p がFermat素数 $2^m + 1$ ならば、 m 回の二次方程式を解けば正 p 角形は作図可能である」ことを構造的に示した。 $17 = 2^4 + 1$ だから $p = 17$ の場合二次方程式を4回解けば作図可能である。この命題の逆、「正 p 角形が作図可能ならば、 p はFermat素数となる」は

比較的容易に示せる。この対偶命題より、正7角形の作図不能が示せる。

本稿は、数学教師を目指す学生向けの教材となるよう意図している。代数学において群と体の架け橋となるGalois理論は方程式の解法から発しているが、作図問題とも深くかかわっており、何とも美しい理論である。短時間で容易に概観できる教材は出来ないものかと思案していたところである。

1~5はGalois理論への入門教材、6~7は作図と体の拡大、8は正7角形の作図不能、9は他の作図問題、10はGalois理論を用いた命題「 p がFermat素数ならば、正 p 角形は作図可能である」の証明、そして11は折り紙を用いた正7角形、角の3等分線の作画について触れている。

2 群という考え

2.1 群の例

Galois(1811-1832)が提唱した群論の初歩的教材を提示する。身の回りの事象には様々な規則性が見出される。例えば、正3角形の美しさは、その対称性にあり、多くの数理が隠れている。対称性は、対象自体を回転軸や対称軸の周りに重ねる変換によって認識できる。そこで次の例1のように図形の移動を考察し群の概念を導入する。

例1 正葉曲線 $r = 3 \sin(3\theta - \pi)$ を、原点 O を中心に $120^\circ, 240^\circ$ 左回転させる移動をそれぞれ r_1, r_2 、 AA', BB', CC' (図1)を対称軸として折り返す移動をそれぞれ s_1, s_2, s_3 とし、これらと何も動かさない移動 e の集合を D_3 とする。このとき、移動の合成を考えよう。例えば、原点を中心に 120° 回転した後 AA' を対称軸として折り返す移動 $s_1 r_1$

の結果は BB' に対称の折り返し s_2 となる。合成の結果を表 1 に示す。この表から次の①～④が分かる。① D_3 の任意の移動 x, y の合成はまた D_3 のどれかの移動になる、② 3つの移動 x, y, z の合成 xyz は xy, yz の合成順に依らず同じになる、③ どの移動 x との合成もまた x になる移動 e がある、④ どの移動 x にも合成した結果が e となる移動 y がある。

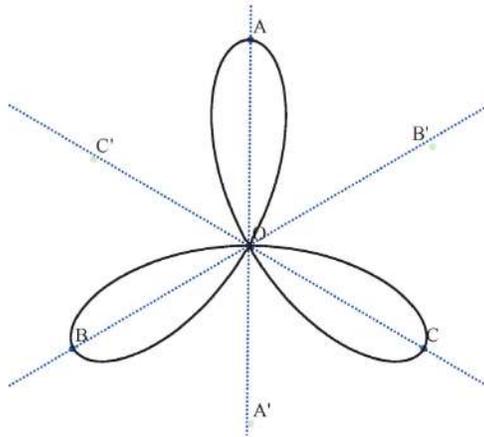


図 1 正葉曲線の回転・折り返し

D_3	e	r_1	r_2	s_1	s_2	s_3
e	e	r_1	r_2	s_1	s_2	s_3
r_1	r_1	r_2	e	s_3	s_1	s_2
r_2	r_2	e	r_1	s_2	s_3	s_1
s_1	s_1	s_2	s_3	e	r_1	r_2
s_2	s_2	s_3	s_1	r_2	e	r_1
s_3	s_3	s_1	s_2	r_1	r_2	e

表 1 群 D_3 の乗積表

2.2 群の定義

集合 G がその元 a, b に対して積と呼ばれる G の元 ab を対応させる演算をもち次の①～③を満たすとき G は群をなすという。

- ① $G \ni a, b, c$ に対して、次式が成り立つ【結合法則】
 $(ab)c = a(bc)$

- ② 単位元と呼ばれる元 e があり、 $G \ni a$ に対して $ae = ea = a$ となる
- ③ $G \ni a$ に対して逆元と呼ばれる元 a^{-1} が定まり $aa^{-1} = a^{-1}a = e$ となる

単位元、逆元は唯一つある。群の元の個数をその群の位数といい $|G|$ と記す。有限の位数を持つ群を有限群という。交換法則 $ab = ba$ が成り立つ群を Abel 群または加法群という。また、群 G の部分集合 H が G の積で群となるとき、 H は G の部分群という。

表 1 は移動の合成を演算とする積を表にしたものであり乗積表と呼ぶ。これより、 D_3 は群をなすことが分かる。有限群は乗積表で表される。 $R_3 = \{e, r_1, r_2\}$ は D_3 の部分群であり、Abel 群となる。

一般に、置換とは $\{1, 2, 3, \dots, n\}$ からそれ自身への 1:1, 上への対応である。図 1 で頂点 A, B, C を 1, 2, 3 とすると、 D_3 の回転、折り返しは次のような対応する置換で表現できる。この置換の集合を S_3 と記す。

$$r_1 \leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} = (123) \quad r_2 \leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} = (132)$$

$$s_1 \leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} = (23) \quad s_2 \leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} = (13)$$

$$s_3 \leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} = (12) \quad e \leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} = (1)$$

置換 $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ i & j & k \end{pmatrix}$ は対応 $\{1 \rightarrow i, 2 \rightarrow j, 3 \rightarrow k\}$ を表し、巡回置換 (ijk) は対応 $\{i \rightarrow j, j \rightarrow k, k \rightarrow i\}$ を表す。 (ij) を互換という。 n 文字の置換の群は n 次対称群といい S_n と記す。 S_3 の乗積表は D_3 と構造が同じになる

から群となる。 S_3 は 3 次対称群である。

$$(123) = (13)(12), (132) = (12)(13) \text{ のよう}$$

に偶数個の互換の積となる置換を偶置換という。 S_n の偶置換全体は部分群となる。これを n 次交代群といい A_n と記す。 R_3 に対応する $\{(1), (123), (132)\}$ は S_3 の部分群で 3 次交代群 A_3 となり Abel 群である。

$$\text{例 2 } F(x_1, x_2, x_3) = x_1x_2 + x_2x_3 + x_1x_3 \text{ とい}$$

う文字式の添数を S_3 の元の作用で動かしても不変である。この式は対称式といわれ、 $x_1 + x_2 + x_3$ や $x_1x_2x_3$ も同様である。

例 3 整数の集合 Z は加法群となる。単位元は 0、 a の逆元は $-a$ となる。有理数全体 Q 、実数全体 R 、複素数全体 C も加法に関して群になる。また、0 を除く有理数全体、実数全体、複素数全体は乘法に関して群(乘法群という)になる。このとき、単位元は 1、 a の逆元は $1/a$ である。

例 4 $\zeta_k = \cos\left(\frac{2k\pi}{3}\right) + i\sin\left(\frac{2k\pi}{3}\right)$ に対して、 $\{\zeta_0, \zeta_1, \zeta_2\}$ は乘法群になり、単位元は ζ_0 、 ζ_k の逆元は ζ_{-k} である。一般に、群 G のすべての元が、ある元 a の冪で表されるとき G を巡回群といい、 a をその生成元という。この群を $\langle a \rangle$ と記す。この例では $\zeta_2 = \zeta_1^2$ だから $\{\zeta_0, \zeta_1, \zeta_2\}$ は ζ_1 を生成元とする巡回群となり $\langle \zeta_1 \rangle = \mu_3$ と記す。 μ_3

は Abel 群で $|\mu_3| = 3$ となる。

2.3 剰余群、正規部分群、指数

H を群 G の部分群、 $G \ni a$ とする。

$aH = \{ah \mid h \in H\}$ とおく。このとき G の元はどれかの aH に属し、 $aH \cap bH = \phi$ と $aH \neq bH$ は同値だから G は部分集合 aH で類別される。 a_r を含む類 a_rH は H を法とする左剰余類という。右剰余類も同様に定義される。集合 A, B に対して $A \cap B = \phi$ のとき、 $A \cup B$ を $A+B$ と記し A と B の直和という。 $a_iH \cap a_jH = \phi, i \neq j$ だから、群 G は左剰余類の直和に分解される。

$$G = H + a_2H + a_3H + \cdots + a_rH.$$

このとき剰余類の個数 r は、 H の G に対する指数といい $(G:H)$ と記す。

任意の $a \in G$ に対して $aH = Ha$ が成り立つとき、 H を G の正規部分群といい $H \triangleleft G$ と記す。このとき、剰余類の集合 $\{H, aH, bH, \dots\}$ に積 $(aH)(bH) = abH$ を定義すれば群になる。単位元は H 、 aH の逆元は $a^{-1}H$ である。これを G の H による剰余群といい G/H と記す。

$G \supset M \supset H$ で H, M が G の部分群のとき、 $(G:H) = (G:M)(M:H)$ が成り立ち、部分群 M の位数は、 G の位数の約数となる(Lagrange)。

2.4 群の準同型、同型

群 G から群 G' への写像 f が次の条件を満たすとき準同型という。

$$G \ni a, b, f(ab) = f(a)f(b)$$

$G \triangleright H$ のとき、群 G から剰余群 G/H への

写像を $G \ni a, \psi(a) = aH$ と定義するとき

ψ は G から G/H への自然な準同型という。また、準同型 ψ が 1:1、上への対応のとき G の同型写像という。

二つの群 G, G' の間に同型な写像があるとき、 G と G' は同型といい $G \cong G'$ と記す。このとき 2 つの群は同じ構造を持つ。例えば一方が Abel 群ならば他方も Abel 群となるし、位数も同じとなる。

例 5 $D_3 \cong S_3, R_3 \cong A_3 \cong \mu_3$
 $D_3 = R_3 + s_i R_3 = R_3 + R_3 s_i, i = 1, 2, 3$
 より $s_i R_3 = R_3 s_i \therefore R_3 \triangleleft D_3$.

$s_i R_3 = \{s_1, s_2, s_3\}$ に $(12)A_3$ が対応する。
 $S_3 = A_3 + (12)A_3 = A_3 + A_3(12) \therefore A_3 \triangleleft S_3$
 $S_3 \supset A_3 \supset \{e\}, \{e\} \triangleleft A_3 \triangleleft S_3, \dots \textcircled{1}$

$S_3 / A_3 = \{A_3, (12)A_3\}, A_3 / \{e\}$ は Abel 群になる $\dots \textcircled{2}$

2.5 可解群とその例

次の条件を満たす部分群の列を持つ群 G を可解群という。

$$G = N_r \supset N_{r-1} \supset \dots \supset N_1 = \{e\}.$$

$N_i \triangleright N_{i-1}, N_i / N_{i-1}$ は Abel 群

2.4 の①, ②より 3 次対称群 S_3 は可解群になる。4 次対称群 S_4 も可解群となる。

3 体とその拡大

3.1 体という考え

加減乗除の演算で閉じている集合を考える。例えば、有理数全体は加法 $a+b$ と乗法 ab で閉じている。一般に、2 種類の演算

$a+b, a \cdot b$ が定義され、次の①～③を満たす集合を体という。これを K と記す。

- ① $a+b$ について加法群となる。
- ② $a \cdot b$ について、集合 $K' = K - \{0\}$ Abel 群となる。1: 乗法単位元
- ③ 分配法則が成り立つ。

$$a \cdot (b+c) = a \cdot b + a \cdot c$$

$$(a+b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c.$$

例 6 有理数全体 Q , 実数全体 R , 複素数全体 C は加法、乗法で体となる。

体 K から体 K' への写像 ψ が 1:1、上への対応で次の条件を満たすとき同型という。

$$\psi(x+y) = \psi(x) + \psi(y), \psi(xy) = \psi(x)\psi(y)$$

このとき K, K' は体の演算に関して同じ構造を持つ。また、 $K = K'$ のとき同型 ψ を K の自己同型という。

例 7 素数 p で割った余りが同じ整数の集合を p を法とする剰余類といい、その全体を F_p または Z/pZ と記す。このとき、

余りが $k (0 \leq k \leq p-1)$ の剰余類を \bar{k} と記す。

$$\bar{k} = \{a \mid a \equiv k \pmod{p}, a \in Z\}.$$

剰余類全体は $F_p = \{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \overline{p-1}\}$ となる。

F_p に加法 $+$ と乗法 \cdot を次のように定義する。

$$F_p \ni \bar{a}, \bar{b} \quad \bar{a} + \bar{b} = \overline{a+b} \quad \bar{a} \cdot \bar{b} = \overline{ab}$$

この定義が可能なのは

$$a \equiv a' \pmod{p}, b \equiv b' \pmod{p} \text{ から}$$

$$a+a' \equiv b+b' \pmod{p}, ab \equiv a'b' \pmod{p} \text{ が成}$$

り立つからである。

- ・加法に関して以下が成り立つ。

$$\overline{a} + \overline{0} = \overline{a+0} = \overline{0+a} = \overline{0} + \overline{a} = \overline{a}. \quad \overline{0}: \text{零元}$$

$$\overline{a} + \overline{-a} = \overline{a+(-a)} = \overline{0}, \quad \overline{-a} = \overline{-a}: \text{逆元}$$

したがって、 F_p は加法群になる。

- ・乗法に関して以下が成り立つ。

$$(\overline{a \cdot b}) \cdot \overline{c} = \overline{a \cdot b \cdot c} = \overline{a} \cdot (\overline{b \cdot c}).$$

$$\overline{a} \cdot \overline{b} = \overline{ab} = \overline{b} \cdot \overline{a}.$$

- ・ $\overline{1}$ を乗法の単位元とすると $\overline{a1} = \overline{1a} = \overline{a}$.
- ・ $\overline{a} \neq \overline{0}$ で a, p が互いに素のとき、不定方程式 $ax + py = 1$ は整数解をもつ。したがって、 $ax \equiv 1 \pmod{p}$ となり、これは $\overline{ax} = \overline{1}$ だから \overline{a} の逆元が存在する。

よって、 $F_p - \{\overline{0}\} = F_p^\times$ は乗法群になり

Abel 群である。これを法 p の既約剰余類群という。この群の位数は、Euler 関数

$\varphi(m)$ (m 以下の正整数で m と素なもの

の個数を表す)を用いると次のように表せる。

$$|F_p^\times| = \varphi(p) = p-1.$$

- ・分配法則が成り立つ。

$$\overline{a} \cdot (\overline{b} + \overline{c}) = \overline{a \cdot b + a \cdot c} = \overline{a} \cdot \overline{b} + \overline{a} \cdot \overline{c}.$$

$$(\overline{a} + \overline{b}) \cdot \overline{c} = \overline{a \cdot c + b \cdot c} = \overline{a} \cdot \overline{c} + \overline{b} \cdot \overline{c}.$$

以上から、 F_p は体(可換体)となる。

3.2 体の拡大

有理数体 Q に無理数 $\sqrt{2}$ を加えた数の集合 $\{a+b\sqrt{2} \mid a, b \in Q\}$ を考える。

$Q \ni a, a', b, b'$ のとき、この集合の元に対して加減乗除を考える。

$$(a+b\sqrt{2}) \pm (a'+b'\sqrt{2})$$

$$= (a \pm a') + (b \pm b')\sqrt{2}.$$

$$(a+b\sqrt{2})(a'+b'\sqrt{2})$$

$$= (aa' + 2bb') + (ab' + a'b)\sqrt{2}.$$

$$\frac{a+b\sqrt{2}}{a'+b'\sqrt{2}} = \frac{aa' - 2bb' + (a'b - ab')\sqrt{2}}{a'^2 - 2b'^2}$$

が成り立ち、四則演算で閉じていることが分かり、この数の集合は体となる。これは $\sqrt{2}$ を含む最小の体であり、 Q に $\sqrt{2}$ を添加した体といい $Q(\sqrt{2})$ と記す。

一般に、体 K と K に属さない数 α を含む最小の体を K に α を添加した体といい

$K(\alpha)$ と記す。また、 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ を添加し

た体は $K(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ と記す。体 L の部分集合 K が L における演算で体となるとき、 K は L の部分体、 L は K の拡大体といい、 L/K と記す。 $K(\alpha)$ は K の単純拡大といい、 $K(\alpha)/K$ と記す。

例 8 $Q(\sqrt{2})$ は Q の単純拡大、 Q は

$Q(\sqrt{2})$ の部分体である。複素数体は実数体

に $i = \sqrt{-1}$ を添加した拡大体である。

に $i = \sqrt{-1}$ を添加した拡大体である。

3.3 体の拡大と拡大次数

体 K と加法群 V において、 K の元 a と V の元 x の積 ax が定義され、次の条件を満たすとき V を K 上のベクトル空間という。

$$K \ni a, b \quad V \ni x, y$$

$$a(x+y) = ax+ay, (a+b)x = ax+bx.$$

$$(ab)x = a(bx), 1x = x.$$

$B = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ において、 $\sum_{i=1}^n a_i x_i = 0$ ならば $a_i = 0$ が成り立つとき B は 1 次独立という。さらに、 V の任意の元 x が 1 次結合 $\sum_{i=1}^n a_i x_i$ で表されるとき B は V の基底という。このとき、 $a_i (i=1, 2, \dots, n)$ は一意的に定まる。基底は必ず存在する。また、その個数 n も一意的に決まる。 n を V の次元という。

拡大 L/K において、体 L は体 K 上のベクトル空間になる。 L が n 個の元からなる基底を持つとき K は n 次拡大という。 n は拡大次数といい、 $[L:K]$ と記す。

M が L の部分体で K の拡大体のとき、 M は L と K の中間体という。このとき、 $[L:M][M:K] = [L:K]$ が成り立つ。

例 9 $L = Q(\sqrt{2})$ は、加法、積が定義され

Q 上のベクトル空間となる。 $\sqrt{2}$ が無理数より $Q \ni a, b, a \cdot 1 + b\sqrt{2} = 0 \Rightarrow a = b = 0$.

$\{1, \sqrt{2}\}$ は 1 次独立で L の基底となり、 L の元は $a \cdot 1 + b\sqrt{2}$ と一意的に表される。 $Q(\sqrt{2})$ は 2 次拡大で $[Q(\sqrt{2}):Q] = 2$.

例 10 $Q(\sqrt{2}, \sqrt{3})$ の基底は $\{1, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \sqrt{6}\}$ となる。その元は $a + b\sqrt{2} + c\sqrt{3} + d\sqrt{6}$ と一

意的に表される。これを確かめる。

$$Q(\sqrt{2}, \sqrt{3}) = Q(\sqrt{2})(\sqrt{3}) \ni x = y + z\sqrt{3} \text{ に対して}$$

$$y, z \in Q(\sqrt{2}) \text{ だから、} y, z \text{ は次のように書ける。}$$

$$y = a + b\sqrt{2}, z = c + d\sqrt{2} \quad a, b, c, d \in Q$$

$$\therefore x = (a + b\sqrt{2}) + (c + d\sqrt{2})\sqrt{3}$$

$$= a + b\sqrt{2} + c\sqrt{3} + d\sqrt{6}.$$

一意性は次が成り立つことをいえばよい。 $a + b\sqrt{2} + c\sqrt{3} + d\sqrt{6} = 0 \Rightarrow a = b = c = d = 0$ もし $c = d = 0$ でないとすると、式変形し $\frac{a + b\sqrt{2}}{c + d\sqrt{2}} = -\sqrt{3}$ 左辺は $Q(\sqrt{2})$ の元だから、 $\sqrt{3} \in Q(\sqrt{2})$ となり矛盾する。よって $c = d = 0$ となる。したがって、与式は $a + b\sqrt{2} = 0$ となるが、これは例 9 で考察している。よって $a = b = 0$ となる。

また、以下が成り立つことは明らか。

$$Q(\sqrt{2}, \sqrt{3}) \supset Q(\sqrt{2}) \supset Q.$$

$$Q(\sqrt{2}, \sqrt{3}) \supset Q(\sqrt{3}) \supset Q.$$

$$Q(\sqrt{2}, \sqrt{3}) \supset Q(\sqrt{6}) \supset Q.$$

$Q(\sqrt{2}), Q(\sqrt{3}), Q(\sqrt{6})$ は $Q(\sqrt{2}, \sqrt{3})$ と Q の中間体である。

4 Galois 拡大と Galois 群

4.1 Galois 拡大

有限次拡大 L/K が、体 K の元を係数とする重根のないある多項式 $F(x)$ のすべての根を K に添加した体 (K と根を含む最小の体、 $F(x)$ の最小分解体という。) であるとき K の Galois 拡大であるという。

このとき、 L の自己同型で K の元を動かさないもの全体は写像の合成で群となる。

これを L の Galois 群といい $Gal(L/K)$ と記す。

一般に、自己同型群 H の元で動かされない L の元の集合は部分体となり H による固定体という。これを L^H と記す。

$K = L^{Gal(L/K)}$ となるのは明らかである。

また、 $[L:K] = |Gal(L/K)|$ が成り立つ。

例 11 $Q(\sqrt{2})$ は $x^2 - 2$ の Q 上の最小分解体で、 Q の Galois 拡大となる。2つの根の置換から構成される自己同型写像を $\sigma: Q \ni a \rightarrow a, \sqrt{2} \rightarrow -\sqrt{2}$ とおく。

$G = \{e, \sigma\}$ は Galois 群となる。

例 12 $x^3 - 2$ の複素数の範囲の因数分解は

$$x^3 - 2 = (x - \sqrt[3]{2})(x - \sqrt[3]{2}\omega)(x - \sqrt[3]{2}\omega^2)$$

となる。ただし、 $\omega^2 + \omega + 1 = 0$ 。

$Q(\sqrt[3]{2}) = \{a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{2}^2 \mid a, b, c \in Q\}$ は、根 $\sqrt[3]{2}\omega, \sqrt[3]{2}\omega^2$ を含まないので $x^3 - 2$ の最小分解体ではないから、Galois 拡大ではない。

$Q(\sqrt[3]{2}, \omega)$ は Galois 拡大となる。Galois 群

は3つの根の置換で構成される自己同型全体であり、 S_3 と同型となる。

4.2 Galois の基本定理

「有限次 Galois 拡大 L/K において、 L と K の中間体 M に対して、 L/M は Galois

拡大となり、 $Gal(L/M)$ は $Gal(L/K)$ の部分

群になる。逆に、 $Gal(L/K)$ の部分群 H に対

して、 H による固定体 L^H は L と K の中間体になる。こうして、 L と K の中間体と

Galois 群 $Gal(L/K)$ の部分群とが 1:1 に対

応する (Galois 対応という)。」

このとき、 $[L:M] = |Gal(L/M)|$ が成り立つ。

例 13 $K = Q(\sqrt{2}, \sqrt{3})$ は Q 上で既約な2つ

の多項式 $x^2 - 2, x^2 - 3$ の最小分解体となり、Galois 拡大となる。 K の自己同型を

$$\sigma_1: Q(\sqrt{3}) \ni x \rightarrow x, \sqrt{2} \rightarrow -\sqrt{2}$$

$$\sigma_2: Q(\sqrt{2}) \ni x \rightarrow x, \sqrt{3} \rightarrow -\sqrt{3}$$

$$\sigma_3: Q(\sqrt{6}) \ni x \rightarrow x, \sqrt{2} \rightarrow -\sqrt{2}, \sqrt{3} \rightarrow -\sqrt{3}$$

$$e: K \ni x \rightarrow x$$

で与えると、乗積表は表 2 となる。

V_4	e	σ_1	σ_2	σ_3
e	e	σ_1	σ_2	σ_3
σ_1	σ_1	e	σ_3	σ_2
σ_2	σ_2	σ_3	e	σ_1
σ_3	σ_3	σ_2	σ_1	e

表 2 K の Q 上の Galois 群

表から、 $G = \{e, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}$ は Abel 群に

なる。 σ_i は Q の元を動かさないから、 G

は $Gal(K/Q)$ となり、部分群 $G_i = \{e, \sigma_i\}$

を持つ。Galois の基本定理にでてくる部分群 G_i に対応する中間体 M_i はどういう集合になるか考察する。

例えば、 M_3 を求める。 $Q \ni a, b, c, d$ として、 $K \ni x = a + b\sqrt{2} + c\sqrt{3} + d\sqrt{6}$ に対して $\sigma_3(x) = a - b\sqrt{2} - c\sqrt{3} + d\sqrt{6}$ となる。
 $\sigma_3(x) = x$ から $b = c = 0$ となる。

$$\therefore M_3 = Q(\sqrt{6}) = K^{G_3}$$

K/M_3 は Galois 拡大となり、 G_3 が Galois 群になる。

同様に M_1, M_2 についても

$$Gal(K/M_1) = Gal(K/Q(\sqrt{3})) = G_1$$

$$Gal(K/M_2) = Gal(K/Q(\sqrt{2})) = G_2$$

が成り立つ。

G_i, M_i の Galois 対応を図2で示す。

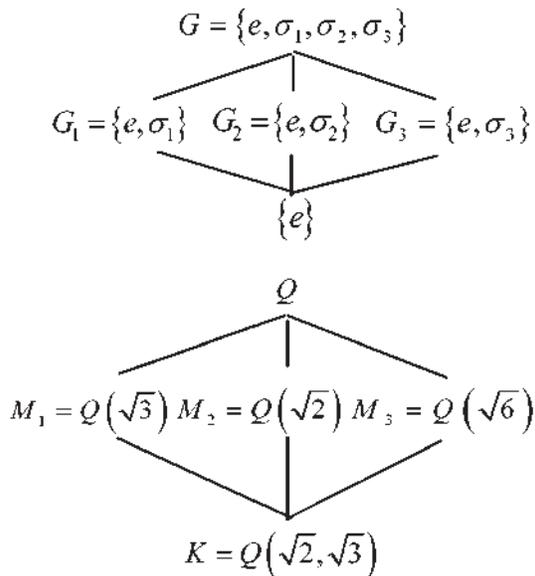


図2 中間体と Galois 群の Galois 対応

また、次式が成り立つ。

$$[K : M_i] = |G_i| = 2.$$

$$[K : Q] = |Gal(K/Q)| = 4.$$

5 代数方程式の Galois 群

5.1 方程式の Galois 群

L を K 上の重根を持たない多項式 $F(x)$ の最小分解体とすると、 L/K は Galois 拡大となる。このとき、 $Gal(L/K)$ を方程式 $F(x) = 0$ の Galois 群という。

例14 例11の $Gal(Q(\sqrt{2})/Q) = \{e, \sigma\}$ は方程式 $x^2 - 2 = 0$ の Galois 群である。

5.2 冪根拡大、代数的に解ける

一般に、体 L/K に対して次のような拡大列があるとき L/K を冪根拡大という。

$$K \subset L_1 \subset L_2 \subset \dots \subset L_r, L \subset L_r$$

$$L_i = L_{i-1}(\alpha_i), \alpha_i^{m_i} \in L_{i-1} (i=1, 2, \dots, r)$$

L を体 K 上の $F(x)$ の最小分解体とし、 L/K が冪根拡大とする。このとき、 $F(x)$ のすべての根は K の元の有理演算と冪根で構成される。このとき、 $F(x) = 0$ は代数的に解けるといふ。

例15 例12で触れたように $Q(\sqrt[3]{2}, \omega)$ は $x^3 - 2$ の最小分解体である。この冪根拡大は $Q \subset Q(\sqrt[3]{2}) \subset Q(\sqrt[3]{2}, \omega)$ となる。

よって、 $x^3 - 2 = 0$ は代数的に解ける。

5.3 代数方程式の不可解性

5次以上の一般の代数方程式が代数的に解けないことが次の命題1～3から分かる。

- 1 n 次代数方程式 $F(x) = 0$ が代数的に解けるためには、 $F(x) = 0$ の Galois 群が可解群となることが必要十分である。
- 2 n 次代数方程式の Galois 群は、 n 個の根のあらゆる置換から成り、対称群 S_n と同型である。
- 3 $n \geq 5$ のとき、 n 次対称群 S_n は可解群ではない。

すなわち、一般の n 次代数方程式は、その Galois 群 S_n が $n \geq 5$ では可解群ではないことから、代数的に解けないことになる。

6 作図と体の拡大

作図では、定規は与えられた2点を通る線分(直線)を引き、コンパスは1点を中心とし与えられた点を通る円を描く。座標平面上で作図をし、初めに与えられた点の座標はすべて有理数とする。定規を使って求めた新たな点の座標は有理数係数の連立二元1次方程式の解であるから有理数である。そこで有理数体 \mathbb{Q} を基礎体を選ぶ。コンパスを使って線分と円の交点、円と円の交点を求めた新たな座標は、二次方程式の解である。平方根が現れたときは \mathbb{Q} に平方根を添加した体を考える。

例えば、交点 S の座標が $(1+\sqrt{11}, -2-\sqrt{11})$ であれば、 $\sqrt{11}$ を \mathbb{Q} に添加した $\mathbb{Q}(\sqrt{11})$ を

考える。 $\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(\sqrt{11})$ $[\mathbb{Q}(\sqrt{11}):\mathbb{Q}] = 2$ である。さらなる作図で交点の座標に $\sqrt{5}$ が現れれば $\sqrt{5}$ を添加した体 $\mathbb{Q}(\sqrt{11}, \sqrt{5})$ を考える。

$$\mathbb{Q} \subset \mathbb{Q}(\sqrt{11}) \subset \mathbb{Q}(\sqrt{11}, \sqrt{5})$$

$$[\mathbb{Q}(\sqrt{11}, \sqrt{5}):\mathbb{Q}] = 2 \times 2 = 2^2$$

このように、作図によって生成する点の座標を表す数の集合を体の拡大で捉える。

有限回の作図により有理数体 \mathbb{Q} に含まれない実数 a_1, a_2, \dots, a_n を添加した体の拡大次数は $[\mathbb{Q}(a_1, a_2, \dots, a_n):\mathbb{Q}] = 2^n$ となる。

例 16 正五角形の作図における体の拡大

直線 CP の方程式は $y = 2x - 2$ 、円 P の方程式は $(x-1)^2 + y^2 = 1$ となり、これを連立させて点 Q の座標を求める。これから $CQ = \sqrt{5} - 1$ を得る。

次に、円 O 、円 C の二元二次方程式から点 F の座標を求める。

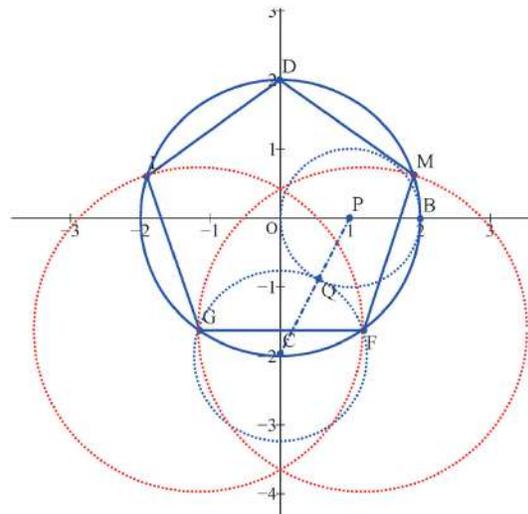


図 3 正五角形の作図

$$O: x^2 + y^2 = 4, C: x^2 + (y+2)^2 = (\sqrt{5}-1)^2.$$

これから $GF = \sqrt{10-2\sqrt{5}}$ を得る。

こうして、二次方程式を2回解いて拡大体 $Q(\sqrt{5}, \sqrt{10-2\sqrt{5}})$ を構成したことになる。

拡大次数は $2^2 = 4$ である。

7 円分多項式

7.1 1のn乗根、原始n乗根

複素数平面上の単位円に内接する正n角形を考える。各頂点は

$$\cos \frac{2\pi k}{n} + i \sin \frac{2\pi k}{n} \quad (k=0,1,2,\dots,n-1)$$

で与えられる。

$$\zeta_n = \cos \frac{2\pi}{n} + i \sin \frac{2\pi}{n} \text{ とおく。}$$

自然数kに対して

$$\zeta_n^k = \cos \frac{2\pi k}{n} + i \sin \frac{2\pi k}{n}.$$

$$\begin{aligned} (\zeta_n^k)^n &= \left(\cos \frac{2\pi k}{n} + i \sin \frac{2\pi k}{n} \right)^n \\ &= \cos 2\pi k + i \sin 2\pi k = 1 \end{aligned}$$

となる。

したがって、 ζ_n^k は方程式 $x^n - 1 = 0$ の根であり、これを1のn乗根という。1のn乗根の作る集合 $\mu_n = \{1, \zeta_n, \zeta_n^2, \dots, \zeta_n^{n-1}\}$ は、

ζ_n を生成元とする巡回群 $\mu_n = \langle \zeta_n \rangle$ となる。このうち、n乗して初めて1になる根を1の原始n乗根という。 ζ_n^k が1の原始n乗根となるための必要十分条件はk, nが互いに素であることである。1の原始n乗根は

$\varphi(n)$ 個ある。pが素数のとき、1の原始p

乗根は $\Phi_p(x) = x^{p-1} + x^{p-2} + \dots + x + 1$ の根で

ある。この多項式の次数は $\varphi(p) = p-1$ と

なる。

例 17 1の原始3乗根は次の2つの根であ

る。 $\Phi_3(x) = x^2 + x + 1$ 。

$$\zeta_3 = \cos \frac{2\pi}{3} + i \sin \frac{2\pi}{3} = \frac{-1 + \sqrt{3}i}{2}$$

$$\zeta_3^2 = \cos \frac{4\pi}{3} + i \sin \frac{4\pi}{3} = \frac{-1 - \sqrt{3}i}{2}$$

このとき、 $\varphi(3) = 2$

7.2 円分多項式

多項式 $\Phi_p(x)$ は、p次の円(周等)分多項式という。pが素数のとき、これは有理数体Q上で既約である。すなわちQでこれ以上因数分解できない。これを確かめるには $\Phi_p(x+1)$ の既約性がいえれば十分である。多項式の既約性の判定には次の定理を使う。

「pが素数のとき、整数係数の多項式において、最高次の項の係数はpの倍数でなく、それ以外の項の係数はpの倍数で、定数項はpの倍数だがp²の倍数でないとき、この多項式はQで既約である (Eisensteinの判定基準)」

$$\Phi_p(x+1) = \frac{(x+1)^p - 1}{(x+1) - 1} = x^{p-1} + px^{p-2} + \dots + p.$$

上式で最高次の項以外の項の係数は素数pの倍数だが、定数項はp²の倍数とならない。したがって、Eisensteinの判定基準から

上式は既約となる。

$\Phi_p(x)$ を複素数の範囲で因数分解すると、

$$\begin{aligned} \Phi_p(x) &= x^{p-1} + x^{p-2} + \cdots + x + 1 \\ &= (x - \zeta_p)(x - \zeta_p^2) \cdots (x - \zeta_p^{p-1}). \end{aligned} \quad \dots \textcircled{1}$$

$p=7$ のときは次式となる。

$$\begin{aligned} \Phi_7(x) &= x^6 + x^5 + \cdots + x + 1 \\ &= (x - \zeta_7)(x - \zeta_7^2) \cdots (x - \zeta_7^6). \end{aligned}$$

7.3 円分体

ζ_p を 1 の原始 p 乗根とすると、 $\mathcal{Q}(\zeta_p)$

は \mathcal{Q} 上の円分体という。これは $x^p - 1$ の最小分解体となるから、 \mathcal{Q} の Galois 拡大である。この Galois 群は 10.2 で示すように法 p の既約剰余類群と同型になる。

また、 $[\mathcal{Q}(\zeta_p) : \mathcal{Q}] = \varphi(p)$ となる。これは、

円分多項式 Φ_p の次数 $\varphi(p)$ が $\mathcal{Q}(\zeta_p)$ の拡大次数と等しいことを意味する。

なお、 $\mathcal{Q}(\zeta_p)$ の元は $a_0 + a_1\zeta_p + \cdots + a_{p-1}\zeta_p^{p-1}$,

$a_i \in \mathcal{Q}$ と一意的に表される。

$p=7$ のとき $[\mathcal{Q}(\zeta_7) : \mathcal{Q}] = \varphi(7) = 6$ となる。

8 正 7 角形の作図不能性

8.1 作図可能性の必要条件

1 で述べた $n = 2^r 3^q 5^s$ を一般化した式

$n = 2^e p_1^{e_1} p_2^{e_2} \cdots p_m^{e_m}$ (p_i は 2 以外の素数、

$i=1, 2, \dots, m$) を考える。

$$\begin{aligned} \varphi(n) &= \varphi(2^e) \varphi(p_1^{e_1}) \cdots \varphi(p_m^{e_m}) \\ &= (2^e - 2^{e-1}) \cdots (p_m^{e_m} - p_m^{e_m-1}) \\ &= 2^{e-1} p_1^{e_1-1} \cdots p_m^{e_m-1} (p_1 - 1) \cdots (p_m - 1). \end{aligned}$$

この式変形では p, q が素数のとき

$$\varphi(pq) = \varphi(p)\varphi(q), \varphi(p^e) = p^{e-1}(p-1)$$

が成り立つことを使っている。

$\varphi(n)$ が 2 の冪となるのは、 $p_i = 2^{f_i} + 1$ が

異なる Fermat 素数(現在、見つかった Fermat 素数は 3, 5, 17, 257, 65537)であって、 $e_i = 1$ となることである。このとき

$$n = 2^e p_1 p_2 \cdots p_m, \varphi(n) = 2^{e-1+f_1+f_2+\cdots+f_m} \dots \textcircled{2}$$

が成り立つ。これが円周の n 等分可能な必要条件である。以上をまとめると、

「正 n 角形が作図可能

$$\Rightarrow [\mathcal{Q}(\zeta_n) : \mathcal{Q}] = \varphi(n) \text{ が 2 の冪乗}$$

$$\Leftrightarrow \textcircled{2} \text{ が成り立つ}$$

この対偶を取れば、次のようになる。

「 $\varphi(n) \neq 2^r \Rightarrow$ 正 n 角形は作図不能」

8.2 正 7 角形の作図と体の拡大

$n=7$ のとき、 $\varphi(7)=6$ で 2 の冪ではない

から 8.1 で述べたことより作図不能がいえるが、その原因を体の拡大で探してみる。

複素数平面上の単位円 O に内接する正 7 角形を作図するため、7.1 で述べた ζ_7 の実部

$\alpha = \cos \frac{2\pi}{7}$ が作図できれば、数 $\sin \frac{2\pi}{7}$ は

式 $\sin \frac{2\pi}{7} = \sqrt{1 - \alpha^2}$ を用いれば作図でき

る。そこで α の作図を考える。その作図で扱う数は $Q(\alpha)$ に含まれるから、正7角形の作図のプロセスは有理数体 Q から円分体 $Q(\alpha)$ への体の拡大となる。

$Q(\alpha)/Q$ の拡大次数を求める。 ζ_7 を根に持つ $Q(\alpha)$ 上の既約多項式は

$$\zeta_7 + \zeta_7^{-1} = 2\alpha, \zeta_7 \zeta_7^{-1} = 1$$

なので $x^2 - 2\alpha x + 1$ である。

$$\therefore [Q(\zeta_7):Q(\alpha)] = 2.$$

これは、2次の拡大である。

他方、 $Q \subset Q(\alpha) \subset Q(\zeta_7)$ だから

$$[Q(\zeta_7):Q] = [Q(\zeta_7):Q(\alpha)][Q(\alpha):Q]$$

が成り立つ。7.3で述べたことから

$$[Q(\zeta_7):Q] = \varphi(7) = 6 \text{ なので、}$$

$$[Q(\alpha):Q] = \frac{\varphi(7)}{2} = 3.$$

すなわち、3次の拡大となる。3は2の冪乗ではないから α の作図は不能となる。以上から3次の拡大が作図不能の原因であることが分かった。

8.3 正7角形の作図と方程式

8.2で述べた体の拡大を、具体的な方程式で探してみる。 $\zeta_7 = \zeta$ とおく。

$$\eta_1 = \zeta + \zeta^6, \eta_2 = \zeta^2 + \zeta^5, \eta_3 = \zeta^3 + \zeta^4$$

という式 (Gaussの2項周期) を使えば、

$\{\zeta, \zeta^6\}, \{\zeta^2, \zeta^5\}, \{\zeta^3, \zeta^4\}$ はそれぞれ二

次方程式 $t^2 - \eta_i t + 1 = 0 \quad (i=1,2,3)$ の解となる。さらに $\eta_i (i=1,2,3)$ には

$$\begin{aligned} \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 &= -1, \\ \eta_1 \eta_2 + \eta_2 \eta_3 + \eta_3 \eta_1 &= -2 \\ \eta_1 \eta_2 \eta_3 &= 1 \end{aligned}$$

が成り立つことが確かめられるから η_1, η_2, η_3 は次の三次方程式の異なる解である。 $t^3 + t^2 - 2t - 1 = 0$ 。

したがって、正7角形の作図とは、 Q に三次方程式、二次方程式の解を添加して3次、2次の体の拡大を構成し $Q(\zeta_7)$ に至ることが分かる。

なお、 η_1, η_2, η_3 の値を求めると次式となる。

$$\eta_1 = 2 \cos \frac{2\pi}{7} > 0, \eta_2 = 2 \cos \frac{4\pi}{7} < 0$$

$$\eta_3 = 2 \cos \frac{6\pi}{7} < 0.$$

9 他の作図問題

9.1 角の3等分問題

一般の角が与えられたとき、これを3等分する問題が角の3等分問題である。

複素数平面において、単位円周上の点 $A(\cos 3\theta + i \sin 3\theta)$ が与えられたとき、3等分線との交点 $B(\cos \theta + i \sin \theta)$ を作図するには点 B の x 座標が作図できればよい。

$$x = \cos \theta, a = \cos 3\theta \text{ とおくと、}$$

$\cos 3\theta = 4 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta$ の公式を利用すれば $4x^3 - 3x - a = 0$ が成り立つ。例えば、

$$a = \frac{3}{5} \text{ となる角 } \theta \text{ を考えるとすれば方程式}$$

$20x^3 - 15x - 3 = 0$ を得る。左辺の多項式はEisensteinの判定基準から Q 上で既約であ

る。その根を α とすれば $[Q(\alpha):Q]=3$ となり、2 の冪になっていないので $\cos\theta$ は作図不能である。これがこの問題の反例となるから、一般の角の 3 等分は作図不能となる。

9.2 立方体倍積問題

デロス島の人々が疫病絶滅の祈願をしたとき、祭壇の大きさを 2 倍にせよと命じる神託が降った。これは $\sqrt[3]{2}$ の作図であり当時の数学者たちを悩ませた。問題は、 x^3-2 を満たす根を作図することである。例 11 で述べたようにこの多項式は Q 上で既約である。

作図には体の拡大 $Q(\sqrt[3]{2})$ が必要となるが、

$[Q(\sqrt[3]{2}):Q]=3$ となり 2 の冪でないため作図不可能である。

10 作図問題と Galois 理論

8.1 の条件②の十分性が証明できれば、 $\varphi(n)=2^r$ から数 ζ_n が作図可能となる。

例えば、 $n=17$ のときは $\varphi(17)=16=2^4$

なので正 17 角形の作図可能性がいえる。

Gauss は、1 の p 乗根 (p :Fermat 素数) が開平のみで求められることを二次方程式の構成によって証明した (高木,1931)。

ここでは、Gauss 以後に発展した Galois 理論を用いた証明を与える。Galois 拡大においては、Galois の基本定理から Galois 対応する中間体と Galois 群の関係が使える。

そこで次の命題の証明を考える。

「 p が Fermat 素数ならば、正 p 角形は作図可能である」

7.3 により円分体 $K=Q(\zeta_p)$ は Galois 拡大である。

次のような K の自己同型を定義する。

$$\sigma_m: Q \ni a \rightarrow a, \zeta_p \rightarrow \zeta_p^m, m \in Z.$$

この全体は K の Galois 群となる。この群を $Gal(K/Q)$ とおく。この群から F_p^\times への次のような写像 ψ を考える。

$$\psi: Gal(K/Q) \ni \sigma_m \rightarrow \bar{m} \in F_p^\times.$$

$\psi(\sigma_m) = \bar{m}$ は一意的に決まる。

$$\begin{aligned} (\sigma_m \sigma_n)(\zeta_p) &= \sigma_m(\sigma_n(\zeta_p)) = \sigma_m(\zeta_p^n) \\ &= (\sigma_m(\zeta_p))^n = (\zeta_p^m)^n = \zeta_p^{mn}. \end{aligned}$$

$$\therefore \psi(\sigma_m \sigma_n) = \overline{mn} = \bar{m}\bar{n} = \psi(\sigma_m)\psi(\sigma_n).$$

$$\psi(\sigma_m) = \psi(\sigma_n) \text{ ならば } \bar{m} = \bar{n} \therefore \sigma_m = \sigma_n$$

ψ は 1:1 で、上への対応は明らかとなるから同型となる。 $\therefore Gal(K/Q) \cong F_p^\times$.

すなわち、円分体の Galois 群は法 p の既約剰余類群と同型になる。

F_p^\times は位数 $p-1$ の Abel 群だから、

$Gal(K/Q)$ も位数 $p-1$ の Abel 群となる。

仮定から $p-1=2^r$ より $Gal(K/Q)$ の位数は 2^r となる。

ところで、有限 Abel 群は、その位数の任意の約数を位数とする部分群をもつ。

よって、 $Gal(K/Q)$ は位数 2^{r-1} の部分群

H_1 をもつ。このとき $(Gal(K/Q):H_1)=2$.

$r > 1$ ならば、同様に群 H_1 の部分群 H_2 で

$H_2 \subset H_1, (H_1 : H_2) = 2$ となるものがある。
これを繰り返し続けていくと、部分群 H_i ($i = 1, 2, \dots, r$) の列ができる。

$$H_1 \supset H_2 \supset \dots \supset H_r = \{e\}, (H_{i-1} : H_i) = 2.$$

これに対応する H_i の固定体を

$$K_i = K^{H_i} = \{x \mid x^\sigma = x, \sigma \in H_i\} \text{ とおく。}$$

K/Q に Galois の基本定理を適用すると、次の中間体の列が生成される。

$$Q \subset K_1 \subset K_2 \subset \dots \subset K_r = K.$$

$$[K_i : K_{i-1}] = (H_{i-1} : H_i) = 2.$$

よって、 Q から K への 2 次拡大の列を得るから、作図可能となる。□

1.1 折り紙による作図

11.1 折り紙による 3 次方程式の解法

折り紙の操作で任意の三次方程式の解が求められる(Geretschlagler, 2008)。すなわち、一般に $a > 0, d \neq 0$ のとき次の 2 つの放物線 C_1, C_2 の共通接線の傾き t は、三次方程式①の解となる。これを確かめる。

$$ax^3 + bx^2 + cx + d = 0 \quad \text{①}$$

$$C_1 : 4d(x+b) = (y-c)^2, C_2 : 4ay = x^2.$$

共通接線と C_1, C_2 の接点の座標をそれぞれ $(p, q), (r, s)$ とおくと次式が成り立つ。

$$s - q = t(r - p).$$

$$4d(p+b) = (q-c)^2, 4as = r^2.$$

$$C_1, C_2 \text{ を } x \text{ で微分し } t = \frac{2d}{(q-c)} = \frac{r}{2a} \neq 0 \text{ を}$$

得る。これから $q - c = \frac{2d}{t}, a = \frac{r}{2t},$

$$b = -p + \frac{(q-c)^2}{4d} = -p + \frac{d}{t^2}, c = q - \frac{2d}{t}.$$

$$a = \frac{r^2}{4s} = \frac{r}{2t} \text{ だから } 2s = tr \text{ となる。}$$

$$s - tr = q - pt \text{ より } q + s - pt = 0 \text{ となる。}$$

よって、次に示すように t は①の解となる。

$$at^3 + bt^2 + ct + d$$

$$= \frac{r}{2t} \cdot t^3 + \left(\frac{d}{t^2} - p\right)t^2 + \left(q - \frac{2d}{t}\right)t + d$$

$$= \left(\frac{r}{2} - p\right)t^2 + qt = t(q + s - pt) = 0.$$

正 7 角形を“折る”ためには、8.3 で述べた η_1 を 2 つの放物線の共通接線の傾きとして求めればよい。

11.2 正 7 角形の折り紙作図

図 4 で点 $A(-2, -1), B(0, 2)$ をそれぞれ

y 軸上と x 軸上に同時に乗るように折り返す。それぞれの点を U, T とする。このときできる折れ線 l は点 A が焦点で y 軸を準線とする放物線 C_1 と点 B が焦点で x 軸を準線とする放物線 C_2 の共通接線となることは容易にわかる。

l, C_1, C_2 の方程式を次のようにする。

$$l : y = tx + m$$

$$C_1 : -4(x+1) = (y+1)^2$$

$$C_2 : 4(y-1) = x^2.$$

l, C_1 の接点 (x_1, y_1) で l の傾き t を考えると

$$t = \frac{-2}{y_1+1}, \therefore x_1 = -1 - \frac{1}{t^2}, y_1 = -1 - \frac{2}{t}.$$

l, C_2 の接点 (x_2, y_2) で l の傾き t を考えると

$$t = \frac{x_2}{2}, \quad \therefore x_2 = 2t, y_2 = t^2 + 1.$$

$$m = y_1 - tx_1 = t - \frac{1}{t} - 1, m = y_2 - tx_2 = 1 - t^2.$$

これから、 $t^3 + t^2 - 2t - 1 = 0$ を得る。
この正の解を η_1 とおく。共通接線 l は
 $y = \eta_1 x + 1 - \eta_1^2$ となる。 l と x 軸との交点 D
の x 座標は $x = \eta_1 - \frac{1}{\eta_1}$ 。点 $(-4, 0)$ と点 D の

中点の座標は $\left(\frac{\eta_1}{2} - \frac{1}{2\eta_1} - 2, 0\right)$ となる。

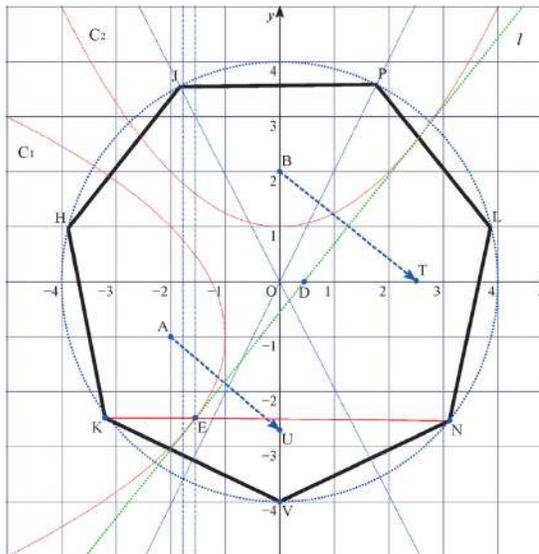


図4 正7角形の折り紙による作画

さらに、この中点に関して点 $(-2, 0)$ を折
り返した点の座標は $\left(\eta_1 - \frac{1}{\eta_1} - 2, 0\right)$ となる。
直線 $x = \eta_1 - \frac{1}{\eta_1} - 2$ と共通接線 l の交点を点
Eとする。この点の y 座標は $-2\eta_1$ とな
る。

$$-2\eta_1 = -4 \cos \frac{2\pi}{7}, \quad OU = 4 \cos \frac{2\pi}{7}.$$

これから点 K, N が決まり、正7角形が
描画できる。実際の作画は図5となる。

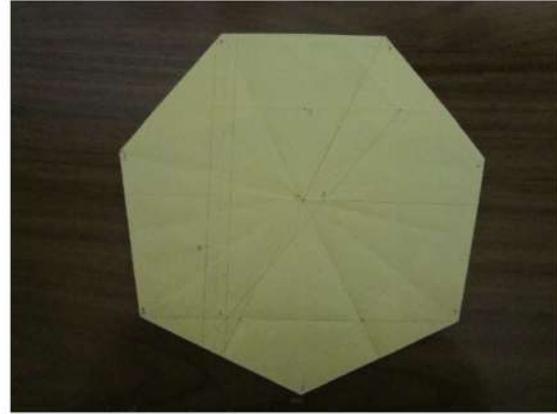


図5 折り紙作画による正7角形

11.3 角の3等分線の折り紙作画

折り紙の操作で任意の角の3等分線が引け
る(阿部,2003)。9.1で述べたことから

$t = \cos \theta$ とおけば $4t^3 - 3t - \cos 3\theta = 0$ と
なる。11.1で述べたように、任意の三次方程
式の解は折紙で求められる。角の3等分の数
学的議論は計算が複雑になるので割愛する。
折り紙操作と証明は次の通りとなる。

図6で、 $\angle TOB$ が与えられた任意の角と
する。 $\angle FOB = 90^\circ$ 、 G は FO の中点、 G
で OB に平行な線分 l を引く。

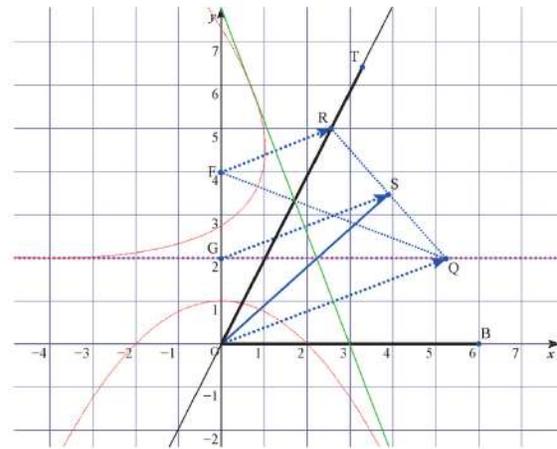


図6 任意の角の三等分の作画

次に、点 F, O を緑線を折れ線として折りそれぞれ TO, l 上に同時にくるように重ねる。それらを、それぞれ点 R, Q とする。点 G は線分 RQ 上にくる。この点を S とする。

$FG = OG, FO \perp GQ$ より $\triangle QOF$ は二等辺三角形となる。 $FR \parallel GS, GS \parallel OQ$ から

$RS = SQ, \angle OSQ = 90^\circ$ だから $\triangle OQR$ も二等辺三角形となる。

したがって、 $\angle ROS$ と $\angle QOS$ は等しい。また、 $\angle QOS = \angle GQO$ 、

$GQ \parallel OB$ より $\angle GQO = \angle QOB$ よって、線分 OS, OQ は $\angle TOB$ の 3 等分線になる。

実際の作画を図 7 に示す。

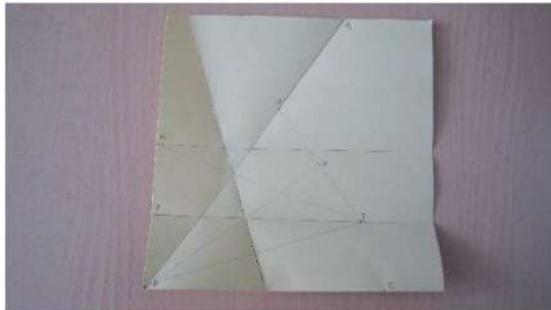


図 7 折り紙作画による角の三等分

12 おわりに

高校数学の代数的な教材の単元は、「数と式」(数学 I)、「いろいろな式」(数学 II)、「整数の性質」(数学 A)、「複素数平面」(数学 III) であるが、「いろいろな式」では高次方程式が、また「複素数平面」では 1 の n 乗根が扱われている。したがって、これらの高校代数にひき続く発展的な代数学を大学で学ばせる教材が必要となる。

本稿の教材は、幾何学的作図問題を発端にして、作図可能性を数学的に考察するものである。そのため、群、体、体の拡大、Galois

拡大、Galois 群、Galois の基本定理などの入門程度の知識を確認し、作図問題と体の関連や正 7 角形の作図不能、正多角形が作図可能な条件へと歩を進める。こうして、Galois 理論を頂点とする代数学のいろいろな概念と体系を概観できることになる。

数学に十分慣れていない学生も対象とするためいくつかの重要な定理や命題の煩雑な証明は避けている。その代り、概念理解のための例を多く提示するとともに、全体の概念構成の流れを重視した。数学の本質は証明にあるから証明を抜くことには異論があるかもしれないが、こういう学び方があっていいのではないかと考えられる。丁度、“微分積分は二度学ぶ。一度目は計算・応用の馴れ重視で学び、二度目は精密で体系的な概念構成を重視して学ぶ”方式と似ている。本稿での命題や定理の証明に興味を持った学生には参考文献に当たって本格的に学習するようになればよいと考える。

著者は、学生時代に恩師服部昭先生の整数論の講義で Galois 理論を学んだが、体論の separable, splitting field, normal extention などの概念を積み上げていく箇所は恥ずかしながら十分には理解できなかった。しかし、高校数学の教材研究で作図問題を考察するうち Galois 理論に目覚め、勉強し直すことになった。丁度、服部先生の御本がでた頃である。こうした経験から、数学の学習には初めから抽象的な内容に挑戦するよりも特殊な問題で十分イメージアップを図ったのちに、一般的な理論へと歩を進める「特殊から一般へ」は理解の早道であると考えている。

参考文献

- [1]阿部恒(2003):すごいぞ折り紙・折り紙の発想で幾何を楽しむ、日本評論社
- [2]稲葉栄次(1958):整数論,基礎数学講座、共立出版
- [3]彌永・布川(1968):代数学,現代数学演習叢書、岩波書店
- [4]彌永健一(1979):ガロア理論とは,代数学への招待、数学セミナー増刊,日本評論社
- [5]R.Geretschlager(2008):折紙の数学・ユークリッドの作図法を超えて、森北出版
- [6]高木貞治(1931):初等整数論講義,共立出版
- [7]服部昭(1975):初等ガロア理論,宝文館出版
- [8]J.B.FRALEIGH(1971):A FIRST COURSE IN ABSTRACT ALGEBRA, ADDISON-WESLEY PUBLISHING CO.
- [9]S.Lang(1970):ALGEBRA,ADDISON-WESLEY PUBLISHING CO.

〈研究ノート〉

セレンディピティを体験させることを意図した アプリケーションの開発

斎藤 一* 新谷 渚†

Development of Application Software for the Purpose of Serendipity Experience

Hajime Saito* Nagisa Sinya†

要旨

セレンディピティとは、思わぬものを偶然に発見する能力を指す。セレンディピティの体験者は一見関係のないと思われる事項から、偶然のひらめきにより、価値のある新しいアイデアを見出すことができる。本稿では、ユーザの Twitter でのつぶやきを利用することで、セレンディピティの発揮を促すことを意図したアプリケーションの開発について示す。

Abstract

Serendipity means when someone accidentally finds something good. We use the tweet in twitter to support feel serendipity. In this paper, we explain the application software for the purpose of serendipity experience.

キーワード

Serendipity Application 自然言語処理 Twitter

1. はじめに

近年、新たなアイデアを発見・発想する際のきっかけとして、「セレンディピティ」という言葉が注目されており、この事

象を活用した研究や、コンテンツの制作等が行われている[1][2]。セレンディピティ (serendipity) とは、「思わぬものを偶然に発見する才能 (能力) [3]」を指す。セレンディピティの体験者は一見関係のないと思

* 北海道情報大学情報メディア学部情報メディア学科, Associate Professor, Department of Information Media, Faculty of Information Media

† 北海道情報大学情報メディア学部情報メディア学科, 平成 26 年 3 月卒業

われる箇所から、偶然のひらめきにより、価値のある新しいアイデアを見出すことができると言われている。しかし、セレンディピティによる発見は、体験者がよく知らない分野においては起こりにくいとされる[4]。そのため、単にコンテンツを提示するのみでは、セレンディピティを促すことは難しい。

本稿では、ユーザの Twitter でのつぶやきを利用することで、セレンディピティの発揮を促すことを意図したアプリケーションの開発について示す。

2. セレンディピティ

2-1 セレンディピティとは

セレンディピティとは、英作家 H. Walpole が 1754 年に友人に宛てた手紙の中で用いた造語であり、「思いがけず価値のあるものを偶然によって発見する能力」を意味する[4]。セレンディピティの例として、リンゴの木からリンゴが落ちるのを見て、万有引力を発見したニュートン、黄色ブドウ球菌を培養していたペトリ皿に混入した青カビから、ペニシリンを発見した Fleming 等が知られている。

セレンディピティの発揮は、体験者にとって全く知らない事項よりも、その事項について詳しい、または、少なくとも何かしら知識のある事項についての方が、発揮される可能性が高いと言われている。

2-2 先行研究・事例

奥らは、ユーザにとって意外かつ有用な発見を促す書籍検索を目指して、セレンディピティ指向情報推薦のためのフェュージョンベース推薦システム[1]を開発した。このシステムでは、ユーザが任意の二つのアイテム（書籍）A、B を選択すると、それらの特徴を混ぜ合わせた特徴をもつ新たなアイテム C がユーザに提示される。この混ぜ

合わせるという行為を繰り返すことで、セレンディピティを向上させ、ユーザにとって有用なアイテム発見を支援する。

The Secret Door [2] は、イギリスのドアメーカー SafeStyle のプロモーションサイトで、ユーザにセレンディピティ的な発見を促すことを狙って制作されている。トップページにある中央のドアをクリックすると、GoogleMap で予め指定されている幾つかの風景のうち、一つの風景のページヘランダムにジャンプする。提示された風景の中を、ユーザはストリートビューを利用して自由に見て回ることができる。

3. アプリケーションの開発

3-1 アプリケーションの概要

澤泉[4]によると、セレンディピティは意図的に向上させることができる。具体的には、以下の二つのプロセスが有効である。

1. 体験者が興味のあることに出会う
2. そのことを気に留めておく

特に重要なのは 2 である。気に留めておくという行為は、擬似的にニュートンや Fleming と同じように、常にそのことについて考えている状況を作り出す。つまり、後日ヒントやアイデアのきっかけとなる事象を発見した際に、それを 1 で出会った「興味のあること」に結び付けやすくなり、セレンディピティを発揮する確率が高まると期待する。

本アプリケーションは、ユーザの Twitter でのつぶやきをもとに、セレンディピティの発揮を促す画像群を提示する。具体的には、ユーザのつぶやきを取得し、そこから名詞をキーワードとして抽出し、画像共有サイト Flickr[5]で画像を検索し、ユーザに提示する。

本研究では、Twitter でつぶやくことが、ユーザにとって興味のある出来事を気に留めることであり、そのつぶやきを元にしたコンテンツであれば、セレンディピティを発揮させやすいのではないかと考えた（図 1）。

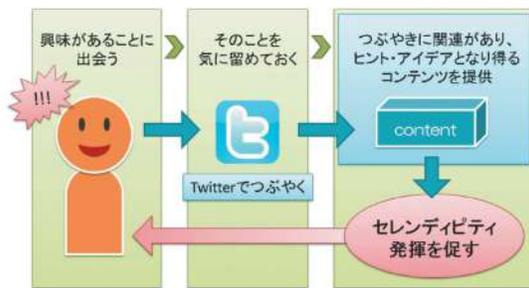


図1 セレンディピティを高めるプロセス

表1 開発環境

開発環境	HTML5 CSS3 XAMPP 1.8.3 ・ Apache 2.4.4 ・ PHP 5.5.3
使用技術	Twitter API 1.1 Yahoo API 1.0 Flickr API
使用ソフト	秀丸 Adobe Illustrator CS6 Adobe Photoshop CS6

3-2 インタフェース・開発環境

Webで公開するため、開発環境はHTML5, CSS3, PHP5.5.3とした。開発環境の詳細は表1に示す。アプリケーションは次の3つのページから構成されている。

- A) ユーザのTwitter IDを入力するページ
- B) ツイートから抽出したキーワード(名詞)を表示するページ
- C) Flickrで検索した画像を表示するページ

A. ユーザのTwitter IDを入力するページ

中央の入力画面にユーザのIDを入力し、「INPUT」ボタンを押すことで、コンテンツ側にIDが送信される(図2)。このとき入力されたIDのつぶやきを、Twitter API[6]を使って取得する。ただし、ユーザのアカウントに

鍵がかけられている場合、つぶやきの内容が保護されているため取得することはできない。また、ページ下部にはTwitter ID使用可能文字(半角英数字とアンダーバー)に対応したキーボード画面が用意されており、PCのキーボードでの入力だけでなく、これらのキーをクリックすることでも入力が可能である。キーボードのフォントには、Google Fonts「Orbitron」[7]を利用した。

B. 抽出されたキーワードを表示するページ

Yahoo! デベロッパーネットワークが公開している日本語形態素解析API[8]を利用し、ツイートから名詞をキーワードとして抽出する。本アプリケーションは、抽出したキーワードの中から、出現頻度が高かったキーワード2つと、ランダムで選択したキーワードを3つ、計5つを表示する(図3)。出現頻度の高いキーワードは、ユーザがその時考えている(興味を持っている)ことに近いと考えた。そして、意外性のあるアイデアを発見しやすくするために、残り3つをランダムとした。

キーワードが表示された後、ページ中央の「Serendipity」ボタンを押すことで、これらのキーワードを元に、画像共有サイトFlickrでの画像検索をすることができる。

C. Flickrで検索した画像を表示するページ

前ページで提示した5つのキーワードを用いて画像を検索し、ユーザに提示する。画像検索にはFlickr API[9]を利用する。各キーワードにつきそれぞれ画像を3枚検索し、合計15枚の画像をユーザに提示する(図4)。検索するキーワードによっては、画像がヒットしない場合もあり、その際の表示画像は15枚以下になる。また、提示する画像にはそれぞれFlickrでの画像元ページへのリンクが貼ってあり、興味を惹く画像があった場合、リンク先の詳細を見ることができるようにした。



図2 ユーザの Twitter ID 入力画面



図3 抽出したキーワードを表示する画面



図4 提示する Flickr で検索した画像

4. 利用実験と考察

2013年10月12日、13日の二日間、本学で行われた学校祭にて、本アプリケーションの利用実験とヒアリング調査を行った(表2)。

表2 利用実験とヒアリング調査の詳細

日時	2013年10月12日、13日
回答数	15
調査方法	実際にコンテンツを体験してもらい、横で手順・仕組み等を説明しながらヒアリングする。

ヒアリング調査では、ユーザの Twitter の利用方法やつぶやきの内容、利用頻度等の違いから、どのようなユーザに対して本アプリケーションが有用であるかを検討した。主なヒアリング内容は、以下のとおりである。

- 抽出されたキーワードに見覚えはあるか
- 普段 Twitter をどのように利用しているか
- 提示された画像の中に気になるものはあったか

調査の結果、15名中13名に対し、ユーザが興味を示す画像を提示することができた。また、6名については、提示された画像から、Flickr へのリンクを辿り詳細な情報を閲覧していた(図5)。提示された画像に興味を示すものはあったかとの問いで、「ない」と回答した被験者について、利用実験の際、教えていただいた Twitter ID を調査したところ、Twitter の利用頻度が低く、つぶやきの総数自体が少ないことがわかった。

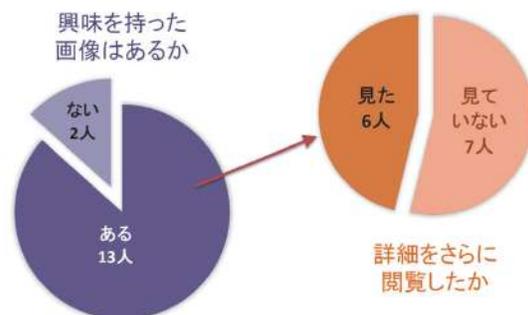


図5 提示された画像への興味について

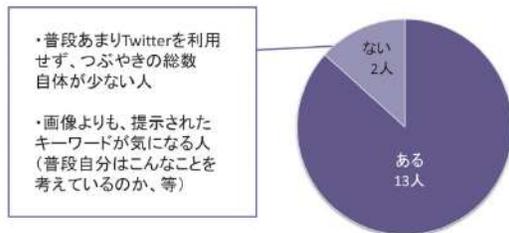


図6 提示された画像に興味を示すものはあったか

5. おわりに

本研究では、ユーザにセレンディピティの発揮を促すことを意図したアプリケーションの開発を行った。利用実験において、15名中13名の被験者に対して、興味を示す画像を提示することができた。また、6名の被験者は、さらに詳細なリンク先（Flickrでの元画像ページ）を閲覧していた。Twitterの利用頻度が低く、つぶやきの総数が少ない被験者には、興味を示す画像を提示できなかった。また、当初の開発目的である「ユーザにセレンディピティを発揮させる」ということに関しては、新しいアイデアの発見・発想を確認するまでには至らなかった。

現在、本アプリケーションは「セレンディピッター」という名称で公開されている[10]。今後の課題としては、より多くのユーザに対して有用な画像が提示されるよう、キーワードの抽出の精度を高める等の工夫が必要である。

参考文献

- [1] 奥健太,服部文夫, “セレンディピティ指向情報推薦のためのフュージョンベース推薦システム”, 知能と情報 Vol.25, No.1, pp.524-539, 2013.
- [2] SafeStyle, “The Secret Door,” SafeStyle, <http://www.safestyle-windows.co.uk/secret-door/>, 参照 Sep.5.2013.
- [3] 小稲義男(編),山川喜久男(編),竹林滋(編),吉川道夫(編),新英和中辞典 第5版,研究社,東京,1985.

- [4] 澤泉重一,偶然からモノを見つけだす能力ー「セレンディピティ」の活かし方,角川書店,東京,2002.
- [5] Yahoo! Inc, “Flickr,” Yahoo! Inc, <http://www.flickr.com/>, 参照 Dec.3.2013.
- [6] Twitter, “Twitter Developers,” Twitter, <https://dev.twitter.com/>, 参照 Sep.6.2013.
- [7] Google, “Google Fonts,” Google, <http://www.google.com/fonts>, 参照 Dec.3.2013.
- [8] Yahoo!Japan, “テキスト解析- Yahoo!デベロッパーネットワーク,” Yahoo!Japan, <http://developer.yahoo.co.jp/webapi/jlp/>, 参照 Sep.6.2013.
- [9] Yahoo! Inc, “The App Garden,” Yahoo! Inc, <http://www.flickr.com/services/api/>, 参照 Dec.3.2013.
- [10] セレンディピッター, <http://sherry.do-johodai.ac.jp/s/> 参照 Dec.7.2015.

〈資 料〉

デジタルカメラにおける各種パラメータの相互関係 カメラの振動と大判カメラについて

守 啓祐*

A study of the relationship between the various parameters of a digital camera

For camera vibration and large format camera

Keisuke Mori *

要旨

この論文ではデジタルカメラの各種パラメータの関係を考察し、目的に合った調整方法を検討した。まず撮像素子の特性と光学的な関係から基本的な特徴を考察した。次いで高精細撮像素子を使うに当たりミラーやシャッター等から発生する振動が撮影画像へ及ぼす影響について検討を行い、無視できないという結果を得た。最後に、大判カメラを用いて超高解像度撮影の手法と焦点面の制御法について実験を行った。

Abstract

In this paper, I described the relationship of the various parameters of the digital camera, and examined the optimal adjustment method of photography. I discuss the basic specifications of optics from the viewpoint of relation to the characteristics of image sensor.

Then, as a result of the measurement, with the high pixel image pickup device, the vibration which is generated from the mirror or the other (for example Shutters) can not be ignored. Finally, I examined the control of ultra-high resolution photography and the focal plane by the large format camera.

キーワード

レンズ 分解能(Resolution) 被写界深度(Depth of field) 錯乱円(Circle of confusion)
過焦点距離(Hyperfocal distance) 振動(vibration) 大判カメラ(Large format camera) あおり
(Movements)

* 北海道情報大学情報メディア学部情報メディア学科教授, Professor, Department of Information Media, Faculty of Information Media (Dept. of IM), HIU

1. はじめに

カメラ映像機器工業会 (Camera & Imaging Products Association:CIPA) [1]が行っている統計の国内出荷台数において、2001年にデジタルカメラが銀塩フィルム式カメラより多くなり、2008年2月からは銀塩フィルム式カメラの生産・出荷台数の統計発表を停止した。出荷台数が逆転して7年でカメラ市場を席卷したことになり非常に早い世代交代となった[2][3][4]。音楽記録がLP等のアナログディスクからコンパクトディスク(CD)に変わった時に、アナログ、デジタルの各メディアの特性を見直されたように、本稿でも映像の記録についての基本特性の関係を考察し用途に合わせた適切な使用法を検討した。撮像素子の高画素化に伴い画像の明瞭度に大きな影響を及ぼすと思われるカメラの振動について、いくつかの予備実験を行い、高精細な画像を得るために考慮すべき条件、無視できる条件について考察を行った。加えて、写真撮影の基本に忠実に焦点空間制御の自由度が高い大判カメラについて触れ、安価なカメラで高精細の画像を制御する方法について解説した。

2. カメラの基本パラメータ

2-1 レンズの解像度

カメラの基本となるパラメータをまず考察する[5]。カメラはレンズに導かれた光を撮像面で検出することで映像を取得する。まず撮影するレンズの基本的なパラメータを考える。像の解像能力を表すレンズの解像度は、天体望遠鏡で用いられるドーズ限界と呼ばれる経験則に基づき以下の式1で与えられる[6][7]。

$$\text{分解角 } \theta = 115.8 / D \quad \dots\dots\dots(1)$$

D: レンズ口径[mm]

式1より理想的なレンズでは口径が大きいほど分解角が小さく細かい線も分別でき、分解能が高いということになる。実際のレンズは光の波長により屈折率が異なるため、式1に光の波長によって変化する回折現象の項を追加したレイリー限界と呼ばれる式2を用いる。これは“点”である被写体が回折によって円盤状(エアリーディスク)に広がり隣接する点と分離できなくなる角度を表す。

$$\sin \theta = 1.22 \lambda / D \quad \dots\dots\dots(2)$$

D: レンズ口径[mm]
λ: 光の波長[mm]

エアリーディスクの次の暗部ピーク間の距離をxとすると以下のような式3になる。

$$x = 1.22 \lambda F \quad \dots\dots\dots(3)$$

F: F値 f/D
λ: 光の波長[mm]
f: 焦点距離[mm]
D: レンズ口径[mm]

この式3からレンズが無収差であってもこの式3以上に分解能が上がることはないということである。たとえば元素による吸収スペクトルであるブラウンホーファーのe線(546.1nm)に近い緑の光(550nm)、F値2.8のレンズでは $1.22 \times (550 \times 10^{-6} \text{ mm}) \times 2.8$ となり $1.879 \mu\text{m}$ となる。1mmあたり何本線が描けるかを計算すると約532本/mmである。これより細かい撮像素子間隔があってもレンズが解像できない。たとえば撮像素子サイズAPS-C(23.5mm×15.6mm)で6000画素×4000画素の解像度であったとすると1画素の間隔は $3.917 \mu\text{m}$ となる。線を1本表現するために黒白の線が1本ずつ合計2画素必要なので、理想のレンズであっても回折現象により絞りF11以上は必要な解像度が不足することになる。レンズ解像度の

実測には、ISO 規格 12233 準拠 CIPA チャートを用いる。この表では、2500 本まで測定できる[8]。

2-2 絞りと解像度

次に絞りと解像度の関係を考える。レンズの口径とは大きな口径を持つレンズを絞り機構で狭めた結果の大きさとなる。理想的なレンズであれば、口径は大きいほど解像度は高くなるが、現実にはレンズには収差と呼ばれる誤差が存在し、レンズ中心より周辺の解像度等の光学特性が低くなる。一般的に絞りを絞った場合、解像度が上がるのはF値の増加の影響よりレンズ周辺の収差の影響が強いという理由である。個々のレンズのデータはレンズメーカーが提供しているMTF特性と呼ばれるデータから解像度とコントラストの特性を読み取る。より正確に露出を制御するためシネレンズはレンズ透過率(Transmittance)を考慮したT値が用いられ、ローデンシュトック社のソフトフォーカスレンズであるイマゴンでは穴の開いたフィルタを変えることでH値(Helligkeit:輝度または明るさ)と呼ばれるF値の相当値が示されている。ただし、実際に使っているレンズを通った光量を撮像素子の部分で測定する露出計では考慮する必要はない。

2-3 撮像素子の大きさと焦点空間

焦点はある点(平面)に対して合わせるが、焦点が合う範囲はレンズの許容錯乱円の大きさに依存する。これはフィルムの場合感光材の粒子の直径、デジタルの場合撮像素子の間隔が錯乱円より小さければ焦点が合っていると見えるということになる。これはデジタルの場合で考えると同じ解像度であれば撮像素子が小さいほど焦点が合っている範囲が広く、つまり被写界深度が広いということになる。撮像素子やフィルムサイズが大きくなると、レンズに対して

必要とされる分解能が低くてもよいという関係となる。ただし、同じ画角で大きなフィルムサイズに対して焦点を結ぶためには相対的に大きな口径が必要となり工作精度が理想的なレンズより低下する現実がある[9][10]。一般的に135サイズ(フィルムサイズ:36mm×24mm)用のレンズ解像度の方がそれより大きな120サイズ(645:56mm×42mm)や4×5サイズ(102mm×127mm)と呼ばれるカメラで使用されるレンズ解像度より高い。(135,120という名称はKodak社のフィルムの名称であるが広く使われているので今回はKodak社のフィルムの名前で統一している。)

具体的には風景写真で近くから遠くまで焦点の合った写真を撮りたいのであれば撮像素子が小さく、焦点のより短いレンズを絞って使うこととなる。逆に一部にしか焦点を合わせないのであれば撮像素子が大きく、長い焦点距離を持つレンズを絞らず開放で使う方が焦点の合う範囲が狭い。ただし、レンズの特性により開放ではレンズ内の乱反射やレンズ周辺の収差等で解像度が落ちる、または小絞り時の回折現象で解像度が落ちるのでレンズにより適当な範囲が存在する。商品として出ている撮像素子の大きさが1/2.3型(6.2mm×4.6mm)はF8以上、135フルサイズ(36mm×24mm)と呼ばれるレンズはF22より大きな絞りの目盛がないのはそれ以上では撮像素子上で解像度が十分でないからである。たとえばフィルムサイズの大きな4×5サイズ(127mm×102mm)のレンズでは撮像素子のピッチを同じとすると1/3(36/127)程度のレンズ解像度で問題がないこととなる。つまり撮像素子サイズが大きくなるとレンズ解像度が低くても同様に撮影できる。同じレンズに対して撮像素子サイズを色々変えて利用するのであればレンズを焦点距離ではなく画角で区別する方が理解しやすいと思われる。また、被写界深度は焦点距離が長いと、浅い

とされているが正確ではない。同じ被写体を焦点距離が異なるレンズで同じ大きさに撮影する場合。例えば人間の顔の高さを200mmとしてこれが撮像素子上で様々な焦点距離のレンズを持って撮影するが撮像素子上20mmで撮影するように撮影距離を調整すると被写界深度はほぼ差がない。拡大率が同じ場合、拡大率が約1/50より小さな場合やF値が1に近く非常に小さな明るいレンズの場合以外はほとんど影響を受けない。現実には画角の違いによる近景、遠景の拡大率の差を利用し、撮影者が注目させる部分を強調していることになる。

撮像素子サイズは、大きく分けてフィルム由来の表現、ビデオ撮像素子（電子管）由来の表現がありそれぞれ縦横比率が異なる。また計量法の関係でインチ表現ができないため“型”という表現となっている。動画カメラのビデオ撮像素子はこの“型”の大きさと実際の撮像素子の大きさが異なる。これは1型の場合、1インチ（25.4mm）の電子管の中に撮像体があるので、外の電子管より小さく約12.8mm×9.6mmであり対角は16mmとなり1インチより小さい。動画を16mmフィルムで撮影していた時期（通常撮影範囲: 10.26mm×7.49mm）のCマウントで用いる撮像素子が代表的であろう。ただし同じ1型でも有効素子サイズは異なるので確認が必要である。一方135サイズの例では、フィルム幅が35mmで撮像範囲が36mm×24mmとなっている。このようにフィルム、ビデオ（電子的）または放送、映画で規格を表現する基準が異なるので解像度の計算には注意が必要である。1例として解像度はフィルムでは白黒1セットで1本、放送ではこの場合白黒1本ずつと数え2本となり解像度は2倍異なる。

2-4 デジタルカメラ内での処理と現像

デジタルカメラ内で行われている処理 [11]は入力に使う撮像素子はRGBの各色を

2×2のベイヤー配列で並べている素子が多い。1点あたりは1色の撮像素子から得られた情報を処理し色画像をつくる。この場合、偽信号やモアレを低減するためにアンチエイリアスフィルタとして光学ローパスフィルタを入れる。近年では撮像素子で撮影後、画像処理で偽信号対策やモアレ対策を行い、光学ローパスフィルタを省略するカメラが出てきている。一方、通常撮像素子の濃度の分解能は12または14ビット程度である。これを処理してJPEGで8ビットの画像を作成する。撮影の時に留意するのは撮像素子のダイナミックレンジを超えないことである。記録できない明るい光を入れるとサチュレーションを起こす。デジタルカメラでISO感度とっているのは単にこの撮像素子から得られた信号をどれだけ増幅するかである。通常は雑音も増幅するためカメラ内の映像処理で雑音他を軽減する。これをカメラ内で処理せずそのままの形で記録したものを、撮影後コンピュータで現像する方式がRAW画像である[12]。撮影時に明るすぎる、または暗すぎ階調が保存されていない場合以外は撮影後様々な処理ができる。一般に、カメラ内での処理よりPCでの処理の方が高度な処理ができるため画質は良くなる可能性が高い。加えてRAW画像記録しているものは、未来により良い現像処理が出た場合、その時代の技術で現像処理が可能となる。通常は各カメラ会社から出されている現像ソフトを使うが、各カメラ会社以外の会社からAdobe PhotoshopのCamera RawまたはLightroom、SILKYPIX、DxO OpticsPro等の様々な特徴を持つ現像ソフトがある。これまでも写真を銀塩プリントする際に暗室で輪郭の鮮鋭化を行うアンシャープマスク、コントラストの調整を行うブリーチバイパス等の処理を行ってきたので現像ソフトで同様に調整する事はフィルム処理と同様であるが、処理可能な範囲がレタッチソフトに近くなってきたのでコンテ

スト等ではどこまで適応してよいのかコンテストによって異なるため確認する必要がある。しかし商用写真は方法如何にかかわらず結果だけなのでどのような処理を行っても問題ないと思われる。撮影後に積極的な画像調整を行うか否かにかかわらずRAW画像記録が可能であれば、撮影時に決定するパラメータが減少するため撮影時の労力が軽減される。

映画の撮影のように、同一場所で周辺環境が異なった状態で撮影された映像をつなぐ必要がある場合にはより正確に露出やホワイトバランスを設定する必要がある。その場合は白と黒の中間の反射率をもつ標準反射板(通称18%グレーカード)を撮影し、撮像素子の測定値が中間値を示すように調整する。ホワイトバランスの調整は、IT8(ANSI)等もあるが旧マクベスチャートの販売会社 GretagMacbeth 社が X-Rite 社と経営統合(2006年)したので現在では x-rite カラーチェッカー・パスポートを利用する。これを撮影し添付ソフトで補正する。

デジタルカメラの評価には様々な試みが行われているが広範囲でデータ公開が行われているサイトとして DxO mark[13]がある。本来は自社の映像ソフトの評価のためのサイトであるが広範囲に客観的な評価しているので非常に参考になる。基本的に高価なカメラは合焦精度とその合焦までの速度、加えて合焦調整ができ、1秒間に撮影できる枚数と連続撮影枚数および高感度特性が高いカメラである。合焦精度は撮影者の感覚と合わないことも多く調整が必要な場合が多い。合焦調整はメーカーへ調整に出してもよいが自分でスケールを映して調整するためにツール[14]や最初から調整を前提としたレンズアダプタ[15]も出ている。ただしスポーツ撮影のような速写性を求めないのであればより安価なカメラでも十分な場合があることがこのサイトのデータから読み取れる。そのため先の DxO のサイトでも評価

を行う写真の分野を、ポートレート、ランドスケープおよびスポーツとしている。

2-5 フィルムとデジタル撮像素子の比較

フィルム解像度はデジタルカメラでは何画素相当であるか様々な議論がある。ここでは、資料から推定してみる[16][17]。フィルム等を読み込むドラムスキャナでは Linotype - Hell/ Heidelberg Chromagraph S3900 の最高解像度は 24000dpi であるので画素幅 $1.06\mu\text{m}$ である。135 サイズで換算すると 7.7 億画素となる。フィルムの粒子の大きさがデジタルの 1 画素になるわけではないが、資料[16]の図から粒子の平均的な大きさは $0.5\mu\text{m}$ となっている。この値とフィルムの大きさから計算すると 34.6 億画素である。ただしフィルムは RGB の色を検知する粒子が深さ方向に立体的に配列されているが、デジタルカメラは平面的に配置され 1 か所では通常 1 色しか検知されずこの点も同列に評価が困難である。デジタル撮像素子でも深さ方向に色を検知する FoveonX3[18]という素子もあるが主流とはなっていない。動画カメラの業務機種で用いられたダイクロイックプリズムで RGB に分離し 3 つの CCD で検知するモデルもあるが静止画用には業務の一部以外には普及していない。RGB 単独で 3 回撮影する方法も天文撮影には使われているが、一般撮影に適用された例は少ない(Leaf DCBII 他)。実際のデジタルカメラの撮像素子間隔は、撮像素子サイズが小さく画素数が多い機種 NIKON COOLPIX S9900 は約 $1.3\mu\text{m}$ 、135 サイズの業務機では $5\mu\text{m}$ 前後となっている。中判カメラのデジタルバックは $6\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ 程度で画素数の多いものは 8000 万画素程度である。この撮像素子間隔とレンズの解像度の関係を検討する。通常 135 サイズのレンズで解像度 150 本/mm は最高クラスのレンズである。これを画素間隔に換算すると $6.7\mu\text{m}$ となる。これより小さい

画素間隔が全く無駄というわけではないが理論値として解像度に影響を与える要素として全体のバランスを考慮する必要がある。一方レンズ解像度上げる試みとしてレンズ材質やレンズの中に液体を満し屈折率を上げ論理解像度を上げる試み[19]、レンズ内乱反射を低減する試み[20]および後処理としてデジタル処理で超解像を可能とする試みがされている。このように新しい方法が提案されると、目的とする画像を得るために用いる処理手法等が現在用いている手法と異なる新しい手法が必要となる。

3. カメラの振動

撮像素子が微細化するに伴い焦点の合焦精度や振動に留意しないと解像度の高い写真が得られない。手振れは、手振れ補正等の機構により担保し、焦点の合焦精度はオートフォーカスで担保するようになってきている。現実問題、現行の最高機種においても手動で焦点をファインダー内で合わせることは困難を極め再調整しないと厳密な焦点合わせはできない。加えてミラーの動きのある SLR(Single Lens Reflex:通称一眼レフ)はミラーの無いカメラと比較してミラーの振動が無視できないといわれ、上位機種には撮影時にミラーを上げてから撮影する機構、ミラーを上げてから一定時間露光開始を遅延させ振動を収束させてから撮影する、露出ディレイモード等の機構を持つカメラがある。今回は正確な測定のための予備実験として、無視できない程度振動をしているのか測定し、撮影への影響の可能性を検討した。比較的安価に振動測定ができる方法として2種類の方法を試みた。

1. アナログレコードのピックアップで検出する方法
2. ピエゾ素子(圧電素子)で検出する方法

対象とするデジタルカメラは NIKON D5300、防振シートの上に垂直に置いた状態で撮影時の振動測定を行った。アナログレコードのピックアップは高出力タイプの SHURE M44-7 を用いた。上下方向の振動を検出するために、ピックアップの支持は微動送り付きマグネットベースを用いて前方から固定した。測定位置は、撮像素子の位置を示す距離基準マークとできるだけ同一平面になるカメラ本体上面の水平な場所として D5300 の右肩の WiFi のマークの部分(前方より 49.3mm, 右方より 17.9mm) にスタイラスを水平に設置しリモートシャッター(1/20s)を用いて振動を測定した。増幅のためのプリアンプは Technics A6 を用い、rec out より出力された信号をオシロスコープ owon SDS6082 で測定・記録を行った。図1に測定結果を示す。振動は約1秒続き収束をしている。最初の振動周期は約45Hzであり、後半の振動周期は約10Hzとなっている。振幅は312 mVである。このピックアップの規格は1kHz 最大速度 50 mm/sec の時の出力電圧が 9.5 mV、プリアンプのゲインが 36dB であるので速度に対して比例して電圧が出ると仮定すると今回の振幅は 0.605mm となる。

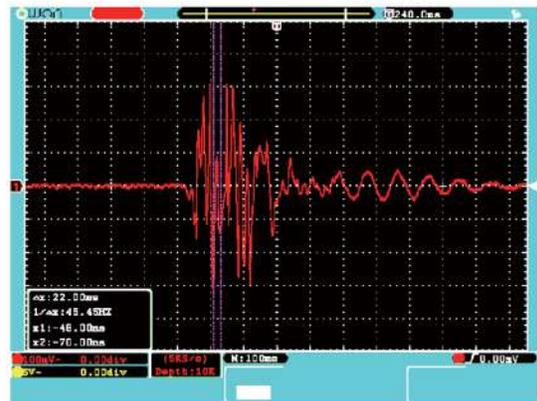


図1 シャッターを切った時の振動 ピックアップ (SHURE M44-7) 使用時

時間軸 100ms/div, 振幅軸 100mV/div

今回使用した増幅器はオーディオ用のプリアンプであるため 1KHz の入力に対しては係数がなくこの関係であるが、1KHz 以外の周波数では RIAA カーブ[21]で周波数特性を持ち、10Hz では 20dB であるので、補正を行った振幅は $6.05 \mu\text{m}$ となる。対して D5300 の撮像素子のサイズは $3.917 \mu\text{m}$ であるので振動幅は 1 画素を超えている。基準信号の調整を厳密に行っていないので、厳密な値としては評価できないが誤差を考慮しても無視できない振動幅であると思われる。

ただし、D5300 は光学ローパスフィルタがない機種で撮像素子はベイヤ配列であるので 2×2 画素で 1 セットとし、フルカラーの 1 色分とみなすと撮像素子の 2 画素分の大きさである約 $7.8 \mu\text{m}$ となる。単独の画素ではなくベイヤ配列 1 セット分を 1 要素とすると、振動が 1 要素以内になる最大振幅の半分程度に収束するまでの時間は約 300ms である。ベイヤ配列の 2×2 画素の 1 セット分の幅で振動周期が約 10Hz なので約 30 回振動していることになる。この状態で振動している場合と同様のデジタル処理は、直径 2 画素の移動平均となり画像の先鋭度が低下する効果がある。ただし影響を受けるのはシャッタースピードが約 $1/3\text{s}(333\text{ms})$ より長い場合である。シャッタースピードが短い場合は振動が最大振幅になる前にシャッターが閉まってしまうので影響が少ない。振動周期が約 10Hz なので振動の影響を受ける振動幅を撮像素子の画素間隔以下となるように、今回の最大振幅の半分程度とすると、その 1 周期の $1/8$ となるのでシャッタースピード $1/80(12.5\text{ms})$ より短時間の場合は影響が少ないことになる。通常のカメラ手持ち撮影において、フィルムサイズ 135 サイズの場合、一般論として使用したレンズの焦点距離分の 1 より速いシャッタースピードを選択すると手振れが目立たないと言われている。この条件で撮影する場

合は、カメラのミラー等の振動が先鋭度に影響の出るシャッタースピードより短時間であるので影響は少ないと予想される。

次にピエゾ素子圧力センサで振動を測定した。圧力センサは Measurement Specialties Inc. LDT0-028K を使用し、設置はカメラ背面、撮像素子の裏面付近へ固定用クランプで固定し前後方向の振動を検出した。図 2 にピエゾ素子圧力センサで検出した振動の測定結果を示す。

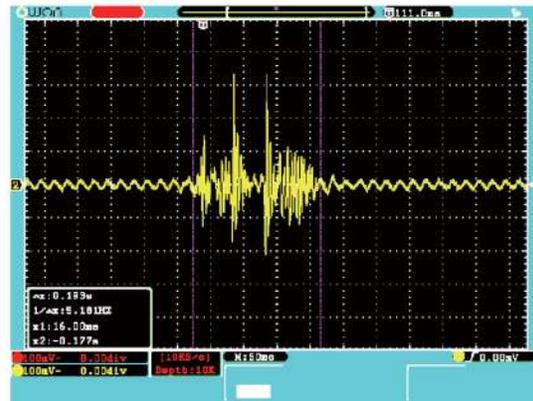


図 2 シャッターを切った時の振動 ピエゾ素子（圧電素子）使用時

時間軸 50ms/div, 振幅軸 100mV/div

図 2 より、紫のカーソルで測定した振動の持続時間は 0.193 sec であった。振幅は最大のピークピーク値で 544mV であったがこちらに関しては圧力に対して算定基礎データがないため時間軸方向の検討を行った。最初の振動が始まるまでは 12.4ms、次の始まりが 56.8ms、3 番目の始まりが 0.107s となっている。前後方向に振動は 0.2 秒程度で収束しているが、ピックアップで測定した上下方向には約 1 秒程度持続している様子が観察できる。カメラの動作の順番として、ミラーが上がり、シャッターが開閉し次の撮影のためシャッターをチャージする、最後にミラーが下りる順番で通常行われる。最初のピークはミラーアップ、2 番目のピークは

シャッターの開閉の始まり、3番目がミラーの下がる時間と予想される。カメラに搭載されている露出ディレイ機能の遅れ時間は1秒であるがこの計測結果から1秒待てばミラーの振動は十分収束すると思われる。ピックアップで測定した波形と比べると図1最初の0.2s程度の大きな振動の部分がミラー等の動作の部分で最後に残った低周波の振動はカメラ本体の残振動であると思われる。今回はカメラを防振シートの上に載せ慣性モーメントの小さい状態で測定したが、より低減するためには質量の高い三脚等に固定する等の対策がとれると思われる。

ミラーはファインダー内で撮影画像を直接見るためにあるのであるが、そこでフレーミングの確認はできるが合焦している場所と範囲は正確に確認できないとすると、機構的な複雑さや振動の問題を抱えるミラーは必要あるのか疑問が残る。ただし、背面ディスプレイや電子ビューファインダーの表示の時間遅れの問題があるのでどこでバランスを取るとよいのか利用者によって違いが出てくるのであろう。少なくとも速写性を必要としない撮影の場合はミラーの必要性は少ないと思われる。フィルムカメラの時代は現場で写り方が確認できないので焦点の範囲の確認のため絞り込みボタンやプレビューボタンと呼ばれるものがあつたがデジタルの時代では即時性が必要とされないのであれば試験撮影し、撮影画像を確認するほうが確実であろう。そうすると直視ファインダーの必要性がより減る。

4. 大判カメラを用いた超高解像度撮影の手法と焦点面の制御

通常の撮影については、ほぼデジタルカメラで撮影できるようになってきた。大判プリントについてもブロックノイズを低減する処理が一般化してきたので大きな問題はなくなってきた[22]。しかし合焦した焦点

空間を制御することはアオリ撮影のできるパースペクティブコントロール(PC)レンズが各メーカーで用意されている(例:NIKON PC-E NIKKOR 24mm f/3.5D ED シフト量:±11.5mm, ティルト量:±8.5°)が自由度という面ではモノレール型大判カメラ

(例:Sinar P シフト量:±30mm以上, ティルト量:±40°以上 レンズと撮影状態に依存)の代用はできないのが現実である。また、通常のレンズ装着面から撮像素子までの距離(フランジバック)が固定されているカメラは設定の自由度が制限されストップモーションのアニメーション等の近接撮影をする場合に制約が出る。

現在では、撮影後の現像処理またはタッチはほぼデジタルで行われるため、大判カメラでフィルム撮影しフィルムスキャナでデジタル化をすることも可能であるがコストがかかる。大判カメラで直接デジタル撮影するためのカメラバックは645サイズ(53.7mm×40.4mm)サイズまでしか通常出ておらず数百万円と高価である。フラットベットスキャナーを併用したタイプ[23]もあるが操作に時間がかかるためより撮影に困難さが伴う。

今回は安価に業務レベルの撮影が可能となる方法として、大判カメラのSinar Pタイプに比較的安価なSLRとして前出のD5300をカメラボードで接続し、高解像度撮影と商品撮影等の近接撮影を試みた。図3に撮影機材の右側面像の写真を示す。Sinar Pタイプ[24][25]は主に4×5サイズの大判フィルムを用いるカメラであり1970年代から発売されリアフレームを交換することでフィルムサイズ8×10サイズまで対応する。現在のモデルP3タイプも基本的な構造は同じでそのまま入れ替えて使える。本体だけで当時百万円を超える大判カメラ最高クラスであるが現在では写真館等、業務で利用しなくなった古いタイプの中古が安価に手に入る。古いタイプとはいえカメラの構造

は全く変わっていないため画質にはほとんど影響がない。大判カメラは主にフィルムサイズ 135 サイズのカメラと異なり国際規格があるのでどのメーカー製の周辺機器でも規格が合う範囲は利用可能である自由度がある。主要な 135 サイズカメラを取り付けるアダプタもほぼ全メーカー出ておりマイクロフォーサーズ(MFT または M4/3)サイズも対応可能である。ただし、アダプタの長さが付加されるため広角レンズでは無限遠に対して焦点が合わなくなる可能性が上がる。今回の組み合わせでは 105mm が無限遠に焦点の合う最も焦点距離の短いレンズであったが、この場合、中間の蛇腹にほとんど余裕がないためアオリの自由度はほぼない。



図 3 Sinar P と NIKON D5300 を設置した撮影機材の右側面像

今回利用するカメラが D5300 と撮像面が APS-C (23.5mm×15.6mm) サイズであるため 1 回では撮影できないが動きの少ない被写体であればカメラを平行移動し複数回撮影した画像を Adobe Photoshop の画像合成機能コマンドの Photomerge で合成することで高解像度の画像作成が可能となる。カメラ撮像素子の縦横比率を維持する 73.5mm

×48.6mm の範囲、縦横 4 枚ずつ 16 枚撮影し連結すると約 2.3 億画素となる。画像の比率は異なるがカメラの移動機構の動作限界である 73.5mm×95.6mm の範囲で撮影すると最大 4.6 億画素まで撮影が可能である。隣接する撮影画像間に重なりがあるように撮影し、画像を同じディレクトリに入れて Adobe Photoshop Photomerge 処理を行うと手で位置を調整しなくても自動的に画像が合成される。図 4 にその処理画面を示す。

処理は Windows 7 64bit, Intel i7 2.67GHz, メモリ 9G で Photoshop CS6 を用いて約 4 分であった。今回の画像は 10 から 20%程度重なるようにし、この例では出力が 2.4 億画素、ファイルサイズ 1.8GByte となった。図 4 の矢印の電柱接続部を拡大した画像を図 5 に示す。表示部分で約 60 万画素程度となっており撮影後の画像に行う出力に合わせた画像調整を適用してないのでまだコントラスト等が適性ではないが電柱の構造が判別できる解像度がある。デジタルカメラではこのような複数枚撮影することで高解像度や色方向にダイナミックレンジを上げる手法や焦点位置を変えて複数枚の画像を撮影し、焦点の合っている領域を合成し被写界深度を増やすといった手法も容易になる[22]。

焦点合わせは自動焦点ではないためカメラ側のライブビューを使って適宜拡大し手で調整をした。現在のデジタルカメラは HDMI の外部出力がついていることが多いためライブビューの出力を大きなディスプレイに映して確認しより正確な焦点合わせができる。この例では被写体まで約 30m で合焦位置のレンズから撮像素子までの距離を 1mm 動かすと被写体の合焦面は約 2.5m 動くこととなる。ただし錯乱円を考慮すると過焦点距離は焦点距離の平方距離より遠い場合を無限遠とみなして問題は少ない。フィルム撮影の場合、被写界深度を確保するため絞り込むとピントグラスでは冠布をかけても非常に暗くなりほとんど見えない

問題があったが、デジタル撮影の場合は、撮像素子の感度の向上や外部ディスプレイの設置等で焦点の調整が容易になっている。

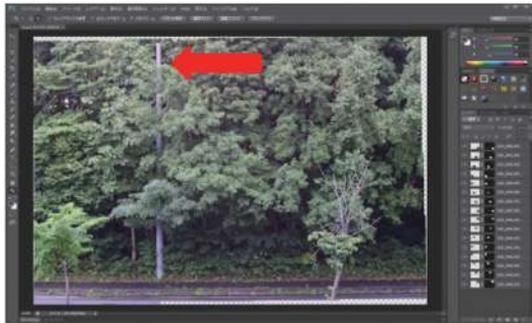


図 4 16枚の画像(2400万画素/枚)を統合している画面 レンズ：
Schneider Symmar-S F5.6/180mm
F22 シャッタスピード 1/10

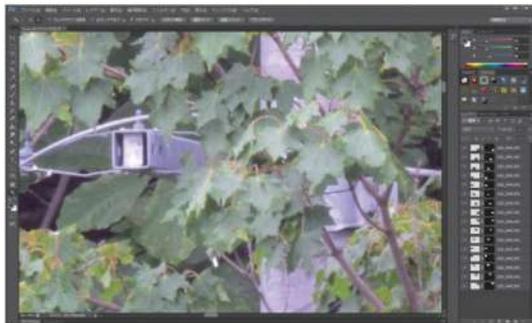


図 5 電柱の一部を拡大した画像

また今回対象としている動きの少ない被写体ではデジタルカメラのISO感度を高精細な低感度設定にし、十分な露光時間を与えることで雑音を低く抑えた状態で適正な露光が可能となる。加えて、フィルムでは長い露光時間では相反則不軌と呼ばれる感度の非線形性でカラーバランス等が乱れる問題があったが、デジタルカメラの撮像素子では基本的に露光時間による相反則不軌は発生しない。長時間露光というのが何秒であるかは時代やフィルムの種類により異なるが富士フィルム フジクローム PROVIA100F プロフェッショナル[RDPⅢ]では1/4000～128秒の範囲では補正の必要

はないとデータシートに書かれている。ただしデジタル撮影での長時間露光は別の問題が発生する。まず長時間のライブビューや露光でカメラ本体が過熱し熱雑音が発生しやすくなる問題である。ただし熱が発生しないように積極的に冷却するデジタルカメラを用いる場合は、熱雑音が無い状態で時間方向に同期加算が行われるのでランダムノイズはかえって低減する場合もある。一例として天体撮影用の冷却CCDがある。このようなデバイスを使わない場合の熱雑音対策として、30秒の露光を1回で行うのではなく、5秒ごと時間を空けてカメラを冷やして6回撮影したものをPhotoshop等でデジタル合成するという方法がある。また色再現性向上のため、RGB等の外部フィルタを交換して複数回撮影し、デジタル合成するマルチスペクトル画像撮影手法もある。加えて次の問題は長時間の露光のためバッテリー充電容量が十分でない問題である。対策には十分な充電を行った容量の大きなバッテリーを用いるか商用電源等から直接供給する。

次に、ティルト(レンズボードを傾ける)を行って焦点面の制御を行った例を示す。図6に撮影環境全景を示す。大判カメラはフランジバック長が固定されていないため蛇腹を伸ばすだけで高倍率近接撮影が可能となる。また、レンズから被写体までの距離(ワーキングディスタンス)がフィルムサイズ135より長く取れ、照明方法に自由度があり近接撮影や高倍率撮影は135サイズに対して優位性がある。

図7に撮像面とレンズ面が平行の場合の撮影例を示す。撮影対象として18%標準反射板の上に引き伸ばしレンズおよびノギスを設置し撮影した。次にティルト(レンズボード上部を前に傾ける)を行い焦点の制御を行った撮影例を図8に示す。図8では図7では焦点があっていない手前の枠線の部分まで焦点が合っている。撮影範囲はレ

レンズボードをティルトとすると移動するのでできるだけ同じ撮影範囲となるようにカメラの角度を調整している。またレンズをあおった場合はイメージサークルの周辺部を使うことになり光量が減少する。この光量減少（周辺減光）を調整し同じ露光状態とするためにシャッタースピードを長くしている。このように絞りを絞らず、回折現象による解像度劣化を抑えた状態で焦点の合った平面を移動させ、焦点を積極的に制御した画像を得ることが可能になる。



図 6 図 7, 8 の撮影環境全景

あおり機能のないカメラでは広い焦点範囲を得るには絞りの値を大きくし、概ね手前に 1, 奥に 2 の比率で被写界深度を広くする調整しかできない。大判カメラは机の表面等に焦点面を傾けることで絞りを絞らずに焦点の合う空間を調整できる。また逆に焦点が合わない方向に調整し独特な効果を得ることが可能で表現範囲が広がる。イメージサークルの大きさが撮像素子とほぼ同じ大きさである 135 サイズのカメラと違い、大判カメラ用のレンズを用いて APS-C の撮

像範囲で撮影することは 10 倍程度大きなイメージサークルを持つレンズの収差の少ない中心部を使っていることとなるので小絞りの影響を相対的に受けにくい利点もある。大判レンズに F45 や F64 まで絞りの目盛りがあるのはそのためであるが、今回のように撮像素子サイズが小さい場合は 4×5 フィルムに比べて小絞りの影響を早く受け、今回の例では F32 程度から影響があるようであった。



図 7 撮像面とレンズ面が平行の場合
絞り F8 シャッタースピード 1/125 s



図 8 撮像面とレンズ面のボードを前面にティルトした場合 絞り F8 シャッタースピード 1/30 s

5. まとめ

デジタルカメラについて考慮すべきパラメータとその関係を記し、カメラのミラー

やシャッター振動が撮影画像に及ぼす影響の予備実験を行った。先ず原理より風景写真のように広い範囲に焦点が合っていることが望ましい写真は撮像素子が小さい場合の方が有利であることを示した。また、SLR撮影時に考慮するミラーの振動はどの程度で、どのような場合に考慮する必要があるのかについて実験を行った結果、全く無視してよいわけではないことを示した。また大判カメラの複数枚撮影での超高画素化と焦点面の制御を示した。現在では、カメラ任せになっている部分をすべて手動で行うことで自分の意図にあった映像の制御方法の基本を学ぶには非常に助けになる。また今回は固定治具の関係で行わなかったが、レンズシャッターを使った振動測定実験を行いたい。大判カメラのシャッターは基本的にレンズにシャッターがある。Sinar社製が例外的に大判カメラボディ側（蛇腹の間、レンズの後ろ）に電子シャッターを搭載可能であるが撮像素子から遠いレンズ側にシャッターがあることで機械的振動が伝わりにくいと考えられるためである。実験はデジタルカメラ本体のシャッターを開け振動が止まったところでレンズシャッターを使って撮影し、その場合の振動を測定し、測定値より撮影画像への影響を検討する。加えてミラーレス機のシャッター開閉だけの振動や手振れの影響[26][27]の検討も合わせて行うことを計画している。

参考文献

- [1] http://www.cipa.jp/index_j.html, (2015年8月6日アクセス)。
- [2] 日本写真学会編集委員会(1995), 1994年の写真の進歩, 日本写真学会誌 Vol. 58 (1995) No. 3 P 209-241。
- [3] 日本写真学会編集委員会(2010), 2009年の写真の進歩, 日本写真学会誌 Vol. 73 (2010) No. 3 P 147-174。
- [4] 日本写真学会編集委員会(2011), 2010年の写真の進歩, 日本写真学会誌 Vol. 74 (2011) No. 3 p. 121-150。
- [5] 日本写真学会(1998)『改訂 写真工学の基礎』, コロナ社。
- [6] 日本写真学会(2001)『ファインイメージングとデジタル写真』, コロナ社。
- [7] 青野 康廣 (2010), デジタル写真の基礎 (5) 4. デジタルカメラの光学系 (I), 日本写真学会誌, Vol. 73 (2010) No. 3 P 175-179。
- [8] CIPA, 解像度チャート使用説明書, http://www.cipa.jp/dcs/hyres/parts/TCPF_070502_j.pdf, (2015年8月6日アクセス)。
- [9] 須川 成利(2009), デジタルカメラ用イメージセンサの最新技術, 日本写真学会誌 Vol. 72 (2009) No. 4 P 300-305。
- [10] 青野 康廣 (2010), デジタル写真の基礎 (6) 5. デジタルカメラの光学系 (II), 日本写真学会誌, Vol. 73 (2010) No. 4 P 211-217。
- [11] 乾谷 正史 (2009), デジタル写真基礎講座 3 デジタルカメラの信号処理技術 (I) 日本写真学会誌 Vol. 72 (2009) No. 5 P 360-365。
- [12] 市川 芳邦(2010), RAW現像で拓がる写真と撮影の可能性, 日本写真学会誌 Vol. 73 (2010) No. 5 P 249-251。
- [13] DxOMark's EXPLORE CAMERAS SCORES & REVIEWS, <http://www.dxomark.com/>, (2015年8月6日アクセス)。
- [14] Spyder Lenscal, <http://www.datacolor.jp/products/camerasolutions/spyderlenscal.html>, (2015年8月6日アクセス)。
- [15] USB DOCK, <http://www.sigma-global.com/jp/lenses/cas/product/accessories/usb-dock/>, (2015年8月6日アクセス)。
- [16] 原口 暢之, 長岡 克郎, 首藤 定伸, 池田 秀夫, 坂東 信介 (2000), 粒状性に優れた

- たカラーリバーサルフィルムの開発, 日本写真学会誌 Vol. 63 (2000) No. 6 P 283-290。
- [17] 豊田 堅二(2009), デジタル写真の基礎 1. 銀塩写真とデジタル写真, 日本写真学会誌 Vol. 72 (2009) No. 2 P 116-119。
- [18] Foveon X3 image sensor technology, <http://www.fovcon.com/>, (2015年8月6日アクセス)。
- [19] 富士写真フイルム株式会社, 岩戸 薫, 液浸露光用液浸液及びそれを用いたパターン形成方法, 特許登録番号 4377271, 2009登録。
- [20] 村田 剛(2010), ナノ粒子を用いた高性能反射防止膜“ナノクリスタルコート”の開発, 日本写真学会誌 Vol. 73 (2010) No. 5 P 243-248。
- [21] AES Standard Playback Curve, Audio(1951) Engineering, Vol. 35, No. 1, January 1951, pp. 22-45.
- [22] 杉山 徹 (2009), 「デジタルカメラ入稿ガイド」について—何故このガイドを作る必要があったか—, 日本写真学会誌 Vol. 72 (2009) No. 2 P 65-71。
- [23] Digital Scanning Backs for Large Format Photography, <http://www.betterlight.com/products4X5.html>, (2015年8月6日アクセス)。
- [24] ザ・ラージフォーマット, 絶版の書籍の flash 版, <http://www.a-stage.jp/sinar/lesson/lesson01.html>, (2015年8月6日アクセス)。
- [25] Creative Large Format / Volume1 (日本語版), 絶版の書籍の flash 版, <http://www.a-stage.jp/sinar/lesson/lesson02.html>, (2015年8月6日アクセス)。
- [26] 西 一樹(2007), 手ブレ補正向け測定技術を開発: 効果を定量的に評価, 日経エレクトロニクス 963(2007), pp.131-139。
- [27] Kazuki NISHI and Tsubasa ONDA(2010), Evaluation System for Camera Shake and Image stabilizers, Proc. of IEEE Int. Conf. on Multimedia & Expo (ICME) pp.926-931。

〈報告〉

〈学内共同研究報告〉

プロジェクトを通じたグローバル人材育成の試み

竹内 典彦* サイモン ソーラ† 三浦 洋‡

川上 正博§ 安田 光孝¶

Global Competency Education through Projects

Norihiko TAKEUCHI* Simon THOLLAR† Hiroshi MIURA‡

Masahiro KAWAKAMI§ Mitsutaka YASUDA¶

要旨

本稿は、2014年度学内共同研究として実施した「プロジェクトを通じたグローバル人材育成の試み」の成果について報告するものである。本学で実施されている様々なプログラムやプロジェクトをグローバル人材育成の観点から検証し、効果や課題と対策を探ってみた。研究は、主に参加した学生や、指導した教員のインタビューによって実施した。その結果、それぞれのプログラムやプロジェクトには、一定のグローバル人材育成の要素が盛り込まれていることがわかった。それでもそれぞれの活動における課題は残されている。今後はそれらの課題を克服していくことが望まれる。

キーワード

グローバル人材育成教育、プロジェクト、コミュニケーション能力、主体性、責任感

* 北海道情報大学経営情報学部先端経営学科教授, Professor, Department(Dept.) of Business and Information Systems, HIU

† 北海道情報大学経営情報学部システム情報学科教授, Professor, Dept. of Systems and Informatics, HIU

‡ 北海道情報大学情報メディア学部情報メディア学科教授, Professor, Dept. of Information Media(IM.), HIU

§ 北海道情報大学情報メディア学部情報メディア学科教授, Professor, Dept. of IM., HIU

¶ 北海道情報大学情報メディア学部情報メディア学科准教授, Associate Professor, Dept. of IM., HIU

1. はじめに（グローバル人材の定義）

グローバル人材の定義については、様々なものがあるが、文部科学省の2011年6月に出された「グローバル育成推進会議中間まとめ」には、グローバル人材の定義として、次の三つの要素があげられている。

要素Ⅰ：語学力・コミュニケーション能力
 要素Ⅱ：主体性・積極性、チャレンジ精神、協調性・柔軟性、責任感・使命感
 要素Ⅲ：異文化に対する理解と日本人としてのアイデンティティー

様々な要素をバランスよく取り入れたよいまとめとして、本研究ではこの定義に基づき、論を進めていきたい。翻って、本学で実施されている様々なグローバル人材育成のプログラムやプロジェクトとして、「海外事情」、「英語フォーラム」、「TEDxHIU」、「UNIPA」のネパールプロジェクト、「札幌インターナショナルナイト」、「英語プレゼンテーションコンテスト」、「留学生による日本語弁論人会」、等がある。本研究では、グローバル人材の観点から、本学の様々なプロジェクトを検証し、それぞれの効果や課題と対策を探ってみた。

2. プロジェクト（プログラム）と学生の変容

本研究では、上にあげたプログラムやプロジェクト参加者にインタビューを実施した。また指導に当たっている教員から話を聞いた。

2-1 海外事情

最初に「海外事情」についてだが、本学の海外事情には「米国編」と「中国編」があり、「米国編」については少ない年で10人程度から多い年では20人を超える年もあり、実際2014年は22人とこれまでで最多となった。ちなみにプログラム担当者は2014年度からソーラ教授に変更となっている。

一人の参加学生は、「海外事情」に参加後たいへん意識が変わった。彼は「グローバル人材」とは「知識が豊富で異文化に対して偏見がない人」というイメージだった。海外事情に参加して多くの現地の人と接するうちに、「グローバル人材」とは「積極的にコミュニケーションをとる人」であり、「主体的に物事を学ぼうとする行動力にあふれた人」という印象が変わった。

日本に来る外国人についても、「自分の意志を実現する（この場合は訪日すること）行動力がすごい」と思うようになった。また参加前は「英語が話せないとだめ」と思っていたが、参加後は「とにかく伝えること、つまりコミュニケーションそのものが大切」と考えるようになった。たとえば「ボディランゲージ」や「筆談」をしてでも、確実に自分の意志を相手に伝えることである。

帰国後は困っている外国人がいれば自分から話しかけて援助できることがないか聞いているそうだ。英語の面でも、参加前は「多少話せる」というレベルだったが、参加後は「相手の話を理解できて応答できるようになり、自信がついた」ということだ。

また「日常会話はそれほど難しい単語を使わない」ことに驚いたという。ホストファミリーとアメリカンフットボールの試合を観戦してルールについて質問したり、他にも自主的に外出して行動的になった。また現地のアジア系の人がいへん協調的であることに感銘を受け、自分もプロジェクト等で仲間の手助けをする等、以前より協調的になったということだ。

先にあげた「グローバル人材」の要素Ⅲにある「日本人としてのアイデンティティー」だが、これを誤解して「遠慮すること」や「必要な時以外は発言しない」等の「シャイな」日本人らしさは、国際的な場面では改めるべきであると、彼の話聞きながら感じた。

2-2 「海外事情」の指導教員の話

次に、「海外事情」を担当されているソーラ教授の話を紹介したい。

北海道情報大学は、「産学協同の精神の下、豊かな国際性、創造力ある人間性を涵養し、実学に裏付けられた実践的な専門教育を通して、我が国の国際情報通信社会の進展に貢献する高度情報通信技術者を育成する』ことを使命としている。本学の「海外事情」は、この本学の建学の理念を具現化した、たいへん重要なプログラムである。

「海外事情」は本学の英語教員が中心となって、15年以上実施されてきたプログラムである。これまでの研修先は、カリフォルニア州サンタクルーズやワシントン州シアトル近郊である。また2015年度からはオレゴン州ポートランドが研修地となった。この研修に参加した学生は、通信教育の学生も合わせると、これまで200名近くである。

参加した学生たちの多くにとって、この研修はまさに「人生を変える旅」となり、二年連続で参加した学生もいたし、自分一人でその地を再訪する学生もいる。

課題の一つとして、学生は研修の報告書を提出するのだが、まさに彼ら自身の言葉の中に、「海外事情」の重要性が語られている。典型的な文章の例をいくつかあげてみる。

学生 A「今回の研修での最大の成果は、アメリカに対して自分が抱いていた先入観を打破できたことだ。実際にアメリカの人々の暮らしぶりを目にして、日本の文化と比較することができた。いろいろと困難なこともあったけど、それも良い思い出である。悪い出来事も、時には自分のためになることを学んだ。」

学生 B「私は『ゼルダの伝説』というゲームが大好きだ。このゲームは、アメリカでは日本以上に人気があることがわかった。ポートランドでは関連のグッズがたくさん売られて

いて、私もそれらを買った。いろいろな人と『ゼルダの伝説』について話すことができ、英語の勉強にもなったし友達もたくさんできた。貴重な経験もたくさんできたし、本当に素晴らしい三週間だった。」

学生 C「英語は全然苦手だけど、英語を話せるようになりたいと思っていたので、ポートランドの研修に参加した。行く前は、自分の英語は通じないだろうと思ってとても不安だった。でも実際行ってみたらその心配は吹き飛んだ。みんなとても親切だった。だいたいのことは通じたので、話していてとても楽しかった。」

学生 D「ポートランドと札幌の違いにいくつか気づいた。その一つは、ポートランドでは、知らない人同士でもよく話をするといいことだ。自分が外国人だったせいもあるかもしれないが、知らない人によく話しかけられた。他の人はどう思うかはわからないが、少なくとも私は、知らない人とも話ができることを楽しく感じた。こうして他の文化と接することができたのは素晴らしい経験だった。」

学生 E「研修の最初の一週間はできるだけ礼儀正しくしようと思った。そうしたらホストファミリーに『あなたは謝りすぎですよ』と言われた。それからはなるべく冗談を言うようにしたら、ホストファミリーと、とても仲良くなれた。いっしょにたくさん笑って楽しかった。現地で経験したことは、自分のためになることばかりだった。」

このように「海外事情」は参加した学生たちにとって、たいへん価値のある経験となっている。「自信」と「自己肯定感」を身につけただけでなく、「国際性」を高めて、将来の仕事にも生かせるようになる。まさに本学の理念に沿った学生を育成しているプログラムと言える。

2-3 英語フォーラム

次にJ（自主）ゼミの一つとして、2014年度初の試みとして開催された「英語フォーラム」の参加学生にインタビューした。「英語フォーラム」では、三浦教授による「I'm Proud of Soseki」というタイトルによる英語講演が行われた。

参加した学生の一人は、米国留学経験があり、非常に英語ができる学生だ。講演の後に英語で質問していた。参加した理由は三浦教授の研究に興味があったということだった。やはり、「英語フォーラム」という英語で行われる講義の形式は、英語力のある学生を引きつけることが立証されたと感じた。

別な学生は「コミュニケーションが苦手なので、竹内教授に誘われたので参加した」という。「日本文学と英語の関わりが面白かった。次回も同種のものがあればしたい」という。英語が苦手な学生でも、テーマにさえ興味を持てれば、参加してもらえると感じた。

実際この催しは参加者にたいへん好評であった。学生の他に教職員も何人が参加されていた。その教職員も三浦教授の話すテーマに興味を持ったという。また英語の重要性を日頃から意識していることも参加の理由だった。つまり教職員にとっても、グローバル人材の要素である「英語力」への関心は強いものがある。

2-4 UNIPAの活動

次にとりあげるのは、学生団体 UNIPA（ユニパ）である。UNIPAは、「現代美術研究会」（顧問は安田准教授）のサークルの学生が中心になって、ネパールに行き、現地の子どもたちに「アート」を教えるプロジェクトである。2014年3月に三つの教育施設を訪れて、アート教育を実施した。その内容を「アートによるネパールの子どものための教育支援・

学生団体 UNIPA の活動報告から」として、グローバル人材育成教育学会第1回北海道支部大会と、同学会の第2回全国大会（秋田の国際教養大学で開催された）で学生が発表した。

ネパールや全国大会への引率を含めて、安田准教授が指導に尽力されている。彼らの取り組みは2014年度も継続されて、2015年3月に二度目の現地での教育支援が実施され、大きな成果を上げた。これらのプロジェクトに参加した学生は、「グローバル人材」としての要素をたくさん獲得した。

現地では「英語」を使用したがるが、子どもたちは英語が不慣れなので、現地の先生が英語をネパール語に通訳したり、英語の得意な安田准教授に、自分たちの日本語を通訳してもらったりしたという。英語だけでなく現地語を積極的に使用することの重要性を感じたと話している。

また英語学習へのモチベーションも高まり、TOEICを受験する学生もいた。行動もたいへん積極的になり、TEDxHIU2014のスピーカーになる者もいたし、そのオーガナイザーを務めた者もいた。

2-5 TEDxHIU

次に取り上げるのは「TEDxHIU」である。「TED」や「TEDx」は米国発のプレゼンテーションのイベントであり、本学では2013年、2014年と二年連続で「TEDxHIU」が実施された。テーマは「Building Global Vision」と「After Internet」であった

聴衆はほとんど全員が日本人だったが、グローバルイベントの趣旨を生かすために、2013年も2014年も1名の教員と1名の学生が英語で発表した。これらのイベントを通じて英語や留学に対する興味を持つ学生もいた。

このイベントに関りを持った学生の中には、J（自主）ゼミの英語講座に自主的に参加する者もいた。また TEDxHIU2013 のスピーカ

一を務めた後、UNIPA の活動に参加する者もいた。

TEDxHIU の顧問は竹内教授と安田准教授と島田准教授であり、留学生支援事務室の小黒職員や国際交流委員会の委員である穴田教授にも指導に加わっていただいている。

2-6 札幌インターナショナルナイト

次に「札幌インターナショナルナイト」であるが、この学外イベントは川上教授が窓口になり、本学の学生や留学生が多く参画している。2013年の「インターナショナルナイト」ではTEDxHIU2013スピーカーの学生が英語による司会を務めた。

またこのイベントに参加した学生がUNIPAの活動に参加したり、タイの大学への研修プログラムに参加する等、学生を「グローバル人材」に変身させるきっかけにもなる、たいへん貴重なイベントである。

2-7 英語プレゼンテーションコンテストの指導教員の話

そして「英語プレゼンテーションコンテスト」だが、これまで8回開催されて、授業でのプロジェクト課題として多数の学生が参加している。このコンテストを経験して、英語に興味を持ち、海外事情に参加する学生も少なくない。このコンテストを担当しているソーラ教授から話を聞いた。

このコンテストが最初スタートした時は、「ドラマ部門」と「スライドプレゼンテーション部門」の二つの部門だった。

「ドラマ部門」は日本の昔話をもとに、学生たちが話を作り、役を分担して映像にとり、編集をして動画を制作するというものである。こうしてたくさんの英語による日本の昔話の動画が制作されてきた。この部門は大変人気があり、毎年100人以上の参加者がいた。

学生の同意を得て、優秀な動画はインターネットに掲載して、日本だけでなく世界中の人たちから感想をもらっている。こうして学生たちは、日本文化の発信と同時に世界の人たちとコミュニケーション活動をしていることになる。たいへん意義のある部門であったが、財政的な問題もあり、この部門は廃止され学生も残念に思っている。

「スライドプレゼンテーション部門」は、まさに建学の理念に沿った、ITとコミュニケーションと英語力の向上を目的とした部門である。これまで600人以上が参加してきた部門であり、学生たちは5組に与えられる賞状と賞金を目指し、意欲的に取り組んでいる。

この部門は、画像や英語音声を含むスライド作成というITスキルの向上と、英語スキルの向上と、チームの仲間たちと協力し合い、また他のチームと競い合い、成績にも関係するのでたいへん熱心に取り組まれている。

教職員も表彰式でこれらの作品を見ることを楽しみにしてくれている。ドラマ部門と同様に、将来的には優秀作品をネット上に掲載しようと計画している。

こうしたコンテスト等の活動を通じて、学生たちには、英語が単なる「卒業のために必要な科目」ではなく、英語はまさに「国際語」であることを認識してもらいたいと我々英語教員は考えている。建学の理念を実現するためにも、学生たちには英語を習得して、国際的にも有為な人材となっていきたい。

2-8 留学生による日本語弁論大会

最後に「留学生による日本語弁論大会」はこれまで5回開催されてきたが、2014年、2015年と2年連続で最優秀賞を獲得した留学生は、本学の体育系の部活動に積極的に参加している。日本人学生との交流が多く、日本語の習得に役立っている。

3. 考察と結論

こうしたプロジェクトは、グローバル人材の要素と見事なくらい一致している。すなわち「要素Ⅰ」の「語学力・コミュニケーション能力」が必要であり、「要素Ⅱ」の「主体性・積極性、チャレンジ精神、協調性・柔軟性、責任感・使命感」がなければプロジェクトを成功させることはできず、「要素Ⅲ」の「異文化に対する理解と日本人（留学生の場合は中国人）としてのアイデンティティ」を実感することになるからである。

また各事例を見ていくと、一つの「経験」が、別のグローバルなプロジェクトやプログラムへの参加を「誘発」することが実に多いことに気づかされる。つまり同じ学生が、一つのプロジェクトで自信をつけて別なグローバルなプロジェクトに加わっている。

そしてこれらの事例から共通して見えることは、学生の「自信」である。学生が「経験」を通して様々なことを学び取るとともに、何より自分自身に対する「肯定感」、すなわち「自己効力感」を成長させることができるのである。

「自信」や「自己効力感」は「グローバル人材」特有の要素ではないが、本学の教育の柱である「全人教育」の根幹となるものと考えられる。したがってこの観点からも、グローバルなプロジェクトやプログラムは重要な役割を担っている。すなわちグローバルな取り組みに参加することで「自信」や「自己肯定感」を得られるのである。

また、これら全てのプロジェクトやプログラムには本学の教職員が様々な形で関わっている。もちろん本共同研究の教員（全員が異文化や留学の経験者）が大きな役割を担っているが、他の数多くの教職員も程度の多少はあるが、たいへん貴重な役割を担っている。活動を継続して積み重ねていくことで、学生の成長を促していることに、教職員も大いに「自信」と「誇り」をもってよいのではない

か。

こうして「グローバル」を含む口頃の教育活動にまい進することで、本学は益々、「グローバル人材」や「前途有為な人材」を多数輩出しつつ、今後も発展していくであろうと確信している。

4. 今後の課題

「海外事情（米国編）」に参加した学生の声だが、「もっと多くの学生が参加すべきだと思う。海外に行って得られるものはとても大きい。日本にはない文化に触れられる。何より雰囲気が違うので、自分も話そうという雰囲気になる。」と語っていたのがたいへん印象的だった。彼はまた「もっと話をする場面があってもよかった。」とも語っていた。我々教職員は、現在のプログラムに自信を持つとともに、学生の声にも耳を傾け、プログラムをさらによいものにしていく不断努力が必要であることを改めて感じた。

また、様々なプログラムの学生への情報提供をさらに推し進めることも課題である。留学を促す「トビタテ！留学 JAPAN」プログラムも始まった。教職員もより綿密に情報を共有し、留学を志す学生たちにそうした情報を提供して、「成長する機会」を逃がさない努力が重要である。

さらに、本学がこうして様々なプロジェクトに挑戦していることは、パンフレット等を通して学内外でも一定程度知られているが、教職員や学生自身がさらにPRすることで（UNIPAの活動はテレビに取り上げられた）、今以上に本学の名声を広められるのではないだろうか。

参考文献

- [1] 文部科学省 HP(2011)「グローバル育成推進会議中間まとめ」。
- [2] 三木谷浩史(2012)「たかが英語」講談社。

謝辞

本報告は2014年度学内共同研究をまとめたものである。研究にご協力をいただいた関係教職員と学生諸君にこの場をお借りして深謝したい。

平成27 (2015) 年度
大学院経営情報学研究科 (修士課程)
「学位論文等」 (概要)

〈修士論文概要〉

中国のフランチャイズビジネス市場におけるコンビニの経営に関する研究

— 日系コンビニの優れた経営手法を中国系コンビニに活かせるのか —

許 知秋*

1. はじめに

フランチャイズビジネス市場において、売上高全体の41%を占めるコンビニは小売業における中心的存在であり、フランチャイズビジネスの代表格である。

セブンイレブンが海を越えて、海外に輸出しようとする日本流の経営手法である「タンピンカンリ」とは何か。中国国民の欲望を掴めるためには、どのようにして特色のある日本コンビニの優れた経営手法を中国系コンビニ（蘇果）に導入したらいいのか。

これまで、このような議論が十分に行われてこなかった。そこで、本研究では、この問題を取り上げることとする。

2. 中国におけるフランチャイズ (FC) 事業について

中国では、FC事業は「商業特許経営」と呼ばれている。FC事業とは、製造企業の販社、卸売業、小売業、外食産業と各種サービスを含めた企業が自社の商品やブランド、ビジネス・フォーマットを複製することによって、迅速に事業規模を拡大させる有力な戦略である。

FC事業というビジネス形態が中国に導入されたのは、対外開放政策を実施した1984

* 北海道情報大学大学院経営情報学研究科、

Graduate School of Business Administration
and Information Science, HIU

年からである。30年以上を経た現在、中国のFC市場が新たな発展段階に入りつつある[1]。

3. 中日コンビニ事業について

3-1 コンビニ事業の定義

日本の経済産業省の商業統計での業態分類としての「コンビニエンスストア」の定義は、飲食料品を扱い、売り場面積30平方メートル以上250平方メートル未満、営業時間が1日で14時間以上のセルフサービス販売店を指す[2]。

3-2 中国におけるコンビニ事業の現状

中国系コンビニ企業は、国有企業と民営企業に大別される。国有企業で有力な企業としては、百聯集団や農工商超市集団などがある。一方、民営企業は国有企業と比較すると小規模であり、地方に密着した企業が多い[3]。

中国最初のコンビニは1987年広州市で地元資本により誕生した。が、2014では中国全土で約73000店舗を超えている小売業態にまで成長した[4]。

一方、中国メディアによるコンビニの紹介記事の多くは「サービスをはじめとして、日系コンビニと中国系コンビニの差は大きい」と分析しており、「日系のコンビニから学ぶべきことが多い」と日系のコンビニを絶賛している[5]。

3-3 日本におけるコンビニ事業の現状

日本小売業の成長の大きな要因は、コン

ビニの成長である。日本のフランチャイズチェーンの動向、特に小売業の動向はコンビニの動向に大きな影響を受けている[6]。

日本の大手コンビニ各社は、少子高齢化に伴う国内需要の頭打ち、減少という局面を打開するには成長が著しいアジアに活路を求めている。

一方、新興国の BRICS、特に、中国においては、消費市場の拡大につれ、外資系小売企業の進出が急速に増え、日系企業も積極的な店舗展開を進めている。

3-4 特色のある日本コンビニの優れた経営手法のまとめ

本論文は、特色のある日本コンビニの 9 つ優れた経営手法を以下のようにまとめた(表 1 参照)。

表 1 特色のある日本コンビニの 9 つ優れた経営手法

1	「タンピンカンリ」の経営手法
2	「一括生産」の経営手法
3	「日式(日本式)」の経営手法
4	「旬の野菜の販売による便利なサービスの提供」の経営手法
5	「多機能化」の経営手法
6	「カウンター脇での販売」の経営手法
7	「旅先で役立つコンビニグッズの販売」の経営手法
8	「ホットシェフ」の経営手法
9	時期、場所などによる「限定商品の販売」の経営手法

4. 中国系コンビニ蘇果便利について

4-1 蘇果便利の概要

蘇果便利(以下は蘇果と略称)の本拠地は南京市である。1999年2月14日、蘇果1号店が南京市でオープンした。蘇果は中国全土で1600(2013年現在)の店舗を展開し

ているが、南京市内には約400店舗を展開している。業界関係者は「蘇果が強い南京に、ほかのコンビニが入ってくるのは難しい」と語っている[7]。



図 1 蘇果店舗内の床が暗くて汚い(筆者撮影)

4-2 蘇果の問題点

筆者が撮影した南京市蘇果の店舗を日系コンビニの店舗と比較すれば、次のような問題を発見した。

- ①店内の床が暗くて汚いこと(図1参照)
- ②店員さんのサービス態度が悪いこと
- ③店内の照明が暗いこと

5. アンケート調査の実施とその結果分析

5-1 アンケート調査の概要

今回の店頭アンケート調査は南京市蘇果を利用する消費者を対象としたものである(図2参照)。店頭アンケート調査の内容は調査を受けた消費者の属性などを含み、調査質問を入れて13項目である。



図 2 調査の時の撮影

5-2 南京市蘇果で店頭アンケート調査の結果と分析のまとめ

5-2-1 利用者の属性

- (1) 男性の利用者は女性よりやや多かった (53.8%)。
- (2) 20～50 歳の利用者が最も多く、94%を占めている。
- (3) 低所得者の利用が多い (10 万元以下は 84.7%)。

5-2-2 利用者の態度

- (1) 利用頻度が非常に高い (週 1 回以上は 78.4%)。
- (2) よく買う品物は日常用品 (63.1%) やスイーツ (28.6%) などである。
- (3) 蘇果を利用する最大の理由は「立地がいい」(66.6%) である。
- (4) 南京蘇果への不満 (品物揃えが悪いなど) が非常に多い。

5-2-3 日系コンビニに対する期待

- (1) 南京市消費者の日系コンビニへの認知度 (39.7%) が高くない (図 3 参照)。

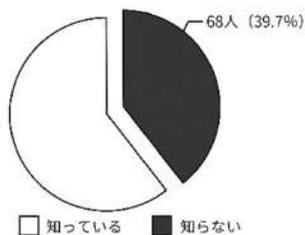


図 3 日系コンビニの知名度

- (2) 南京市の消費者は日系コンビニに好感度を持っている (77.9%)。
- (3) 南京市消費者が日系コンビニを利用したい主な理由は、「店内がきれい」(89.7%)、「品物の鮮度がいい」(61%)、「商品の品質がいい」(57.3%)。
- (4) 日系コンビニへの最大の不満は「立地が悪い」(35.2%) と「値段が高い」(19.1%)。
- (5) 南京市消費者が最も知っている日系コンビニの経営手法は「日式 (日本式) 経営」(47%) である。

- (6) 南京市消費者は日系コンビニの経営手法が南京市に導入される場合、歓迎される (78%)。
- (7) 南京市消費者が最も望ましい日系コンビニの経営手法は「限定販売の実施」(37.4%) と「日式 (日本式) 経営」(32.7%) である。

6. 結論

今後における南京市コンビニ経営の改善策として、次のような 3 つの示唆を与えることにしたい。

6-1 南京市コンビニ業界における競争メカニズムの導入が必要

現在、地元の蘇果企業が独占状態にあり、日系コンビニを含む他のコンビニ競合企業が進出していないので、コンビニ業界には、競争メカニズムが存在していない。

また、今回の調査から、「南京コンビニ業界では、日系コンビニのような優れた経営手法を有する競合企業が存在していないため、たとえ不満を持って、蘇果を利用するしかない」ことも分かった。

このような蘇果による独占状態を打破するために、日系コンビニを含む他のコンビニ競合企業が南京市に進出して、南京市コンビニ業界における競争メカニズムを導入する必要がある。

6-2 日系コンビニ企業の南京進出時期が到来

現在、中日民間関係が改善され、南京市民の日系企業に対する好感度も高まったため、南京に進出した日系企業が増加している。

また、中国メディアは日系コンビニ企業について、「日系のコンビニは日本の品質に近い高級感あるパン、おにぎり、弁当など

の食品を購入できるイメージがある」などと絶賛している。

今回の調査結果からも①日系コンビニの優れた経営手法が南京市に導入されれば、大いに歓迎されること②南京市の消費者は日系コンビニに好感度を持っていること③南京蘇果への不満（品物揃えが悪いなど）が非常に多いことが分かった。

上記のことから、日系コンビニ企業が南京市に進出する時期が熟しており、特色のある日本コンビニの優れた経営手法で南京市民のライフスタイルを変え、生活拠点の1つとなることができると考える。

6-3 蘇果は、日系企業の経営手法を学び、自己改善が必要

今回の調査から、「地元の蘇果は、品物揃えが悪いことや消費者へのサービス態度が悪い」といった問題が存在し、利用者離れ現象が起きていることが分かった。

また、今回の調査結果からも分かるように、南京市の消費者が最も望ましい日系コンビニ企業の経営手法は「日式（日本式）経営」と「限定販売の実施」である。

蘇果は「品物揃えが悪い」などの問題を解決し、生き残れるために、自己改善策を講じて、消費者が望ましい特色のある日本コンビニ企業の優れた経営手法、とりわけ「限定販売」などを早期に導入して、消費者の支持を取り戻す必要がある。

7. 今後の課題

今後の課題は、以下の2つである。

(1) 調査範囲の拡大

今回は南京市都市部の蘇果を対象にアンケート調査を実施したが、南京市全体の蘇果経営状況を把握するために、今後、南京市農村部の蘇果を対象にアンケート調査を

行う必要がある。

(2) 小売市場の開放による南京市優遇措置の整理

中国政府はWTO加盟時にFC事業形態を含めた小売市場の開放を約束したので、FC市場を外資企業に対して解禁された。

日系コンビニ企業が南京市に進出する場合、市政府が採用している奨励や優遇措置を整理することが今後の課題の1つである。

参考文献

- [1] 葛建華・黄磷「中国におけるフランチャイズ (FC) 市場の発展とFC事業の将来性」『流通情報』(2006年10月号)
- [2] 「日本標準産業分類」
www.stat.go.jp (2015年8月18日)
- [3] 山谷剛史「山谷剛史の中国トレンド通信、中国に日系コンビニが続々進出!!」
trendy.nikkeibp.co.jp(2015年1月15日)
- [4] 「ドミナント戦略のさらなる発展のためには」 <http://toyoblog.nakanoseminar.jp>
(2015年10月23日)
- [5] 中国に日系企業が続々進出、日本式サービスを中国人の生活を変えるか
<http://trendy.nikkeibp.co.jp/article/column>
(2015年4月6日)
- [6] 日本フランチャイズチェーン協会
www.jfa-fc.or.jp/ (2015年7月14日)
- [7] 「旺旺 南京のコンビニ事業から撤退」
<http://foodbiz.blog.fc2.com/blog-entry-7210.html> (2015年3月21日)

謝辞 本研究を進めるにあたり、終始丁寧な指導と励ましを頂いた田中英夫教授（主査）、浜瀬久志教授（副査）と尾崎博一教授（副査）に深く感謝するとともに、心より御礼申し上げます。

〈修士論文概要〉

中国における労働 CSR の実態と日系企業に求められる 対応に関する研究

～常州市に進出した日系企業へのアンケート調査を中心に～

喻躍波*

1. はじめに

CSR (Corporate Social Responsibility : 企業の社会的責任) は, 欧米社会で定着し, 最近では日本社会でもよく聞かれるようになった。中国社会でも, 中央政府を中心に企業の社会貢献が重視され始めている。

中国で CSR の普及が必要される最大の理由としては, 直面する深刻な環境社会問題, 例えば, 公害問題, 貧困問題, 人権問題, 労働問題, 法令遵守意識の低さなどの存在が挙げられる[1]。

近年, 日本のメディアでもよく取り上げられた日系企業で発生した一連の労働争議では, 日系自動車部品メーカーで賃上げを求めた労働争議の発生をきっかけとして, 各地に飛び火し, 賃上げや待遇改善を求めるデモやストライキが頻発した[2]。

今後, 中国において, 労働 CSR が益々重視される方向に向かうことは間違いなく, 進出した日系企業としても切迫感を持った対応が求められる。

2. 研究の目的

本研究では, まず, 中国における CSR, とりわけ労働 CSR の実態と特徴について, その社会, 経済的な背景を明らかにする。

次に, 近年, 自動車部品電気メーカーなどの日系製造業企業を取り巻く中国ビジネスリスクを踏まえ, ストライキ発生の経緯と日系企業に求められる対応に焦点を絞って研究すると同時に, 常州市に進出した日系企業の労働 CSR の実態に関するアンケート調査を実施し, その調査結果を分析する。

最後に, その調査結果を分析した上, 常州市の日系企業がどのようにして「誠実に現地社会に向き合う」のか。また, どのようにして「中国社会に貢献する良き市民となる」のか。筆者独自の視点から考察し, 今後における日系企業が中国での労働 CSR をどう対応したら良いのか, 示唆を与える。

3. 研究の手法

本論文の研究手法は 2 つに分けられている。1 つ目は, 先行文献と関連データの収集と精査を行うことである。2 つ目は常州市に進出した日系企業へのアンケート調査の実施とその結果分析である (図 1 参照)。

* 北海道情報大学院経営情報学研究科,
Graduate School of Business Administration
and Information Science, HIU

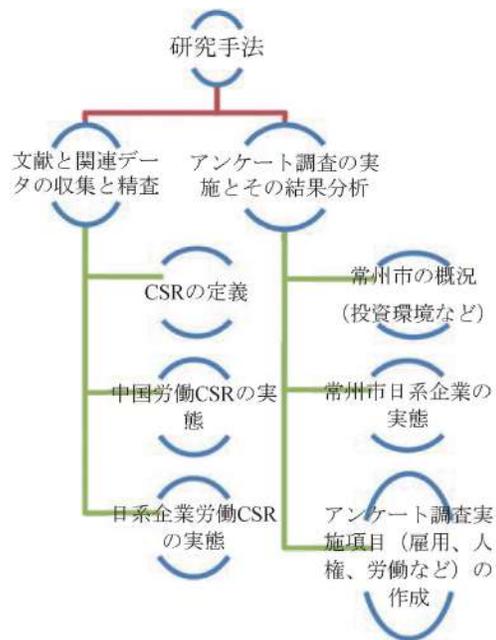


図1 研究手法

4. 労働CSRの定義と導入の意義

4-1 労働CSRの定義

労働CSRとは、労働問題をCSRとして扱うことである。その意味は、従来の労使交渉で決められてきたこと以外に、労使以外のステークホルダーへの責任を求められることになったという点もある[3]。

4-2 労働CSR導入の意義

近年、企業間競争の激化などにより、長時間労働やストレスが増大している。働き方の持続可能性などに照らして懸念される状況が見られる中で、CSRに関する取組が大きな潮流となっている。従業員などを含めた重要なステークホルダーへの十分な配慮を強調するCSRの考え方は、労働分野においても、社会の持続可能性を保持していく上で重要性が高まっている。

CSRの中でも、労働分野におけるCSRへの取組は、従業員の企業に対する満足度、信頼度を高めることにより、労働モラルを引

き上げ、優秀な従業員の定着や就業意欲の向上に資するものである[4]。

5. 中国日系企業の労働CSR問題

5-1 社長などの「現地化」が遅れる

日系企業は、労使間の対話が弱いと指摘されがちである。そのうち、最高責任者に関して、日系企業が28.6%に対して、欧米企業は76.9%と差が非常に大きい（表1参照）。

表1 管理職における現地化の比較

区分	日系 (%)	欧米系 (%)
最高責任者	28.6	76.9
販売部門	54.5	約92
仕入部門	63.1	約66

出所：鬼塚義弘（2008）「中国進出企業の経営比較」（一部）季刊『国際貿易と投資 Winter』P4を基に筆者作成

5-2 給与水準が安い

中国に進出した外資系企業における賃上げ要求ストは、日系や台湾と韓国系企業に集中していた。一方、欧米系企業では殆ど起こっていなかった。その背景と要因として、まず日系企業の賃金の低さが挙げられる（表2参照）。

表2 2010年中国沿海都市における製造業企業別月給

(単位:元)

	ワーカー	課長	部長
日系	1500~1800	4000~10000	7000~15000
欧米系	2500~3000	7000~15000	12000~20000
台湾・韓国系	1000~1800	3000~7000	7000~10000
中国国有	2000~3000	5000~8000	17000~25000
中国民間	1800~2500	5000~8000	10000~20000

出所：東洋経済オンライン（<http://toyokeizai.net> アクセス時期：2015年7月26日）のデータを基に筆者作成

5-3 「旧来型制度（工会）」の機能不全

各社に置かれた「工会」にはメンバーの多くは会社幹部が兼任しているので、会社の負担増につながりかねない賃上げや待遇改善の要求には立場上消極的になるため、労働者は自身の意思を表示するためにストライキといった直接的な行動を選択せざるを得なくなった部分もある[5]。

6. アンケート調査の実施と結果分析

6-1 アンケート調査の概要

- (1) 調査方法：
 - 託送によるアンケート調査
- (2) 対象企業：江蘇省常州市武進経済開発区の日本中小企業園区に入居する 55 社（回答者は社長か、副社長）
- (3) 調査項目：
 - ①現地化の状況
 - ②従業員の収入状況
 - ③日系企業の労働組合の比率
 - ④CSR に対する認識度
 - ⑤労働 CSR に対する認識度
 - ⑥日本国内企業が重視する労働 CSR 項目は常州市日系企業が重視しているか
 - ⑦日系企業の労働環境
 - ⑧従業員への奨励と罰則の状況
 - ⑨ストライキ皆無の主な理由
- (4) 調査期間：
 - 2015 年 8 月中旬～9 月下旬
- (5) 回収状況：
 - 発送総数：55 部
 - 有効回答数：51 部
 - 有効率：92.7%

6-2 アンケート調査の結果分析

6-2-1 回答企業のプロフィール

表 3 に示された通り、今回のアンケート調査を受けた日系企業のうち、製造業が 94.1%で最も多かったのである。

表 3 回答企業のプロフィール

	社数	構成比 (%)
回答企業全体	51	100
製造業	48	94.1
食品加工	1	2.0
繊維・靴・皮革	9	17.6
電子・電気設備	5	9.8
金属・機械設備	22	43.1
化学製品	4	7.8
医薬品	1	2.0
プラスチック製品	6	11.8
非製造業	3	5.9
農林	2	3.9
卸売	1	2.0

6-2-2 アンケート調査の結果分析のまとめ

今回のアンケート調査の結果と分析を表 4 にまとめたが、その表から常州市日系企業の労働 CSR に対する認識度の高さ (56.7%) が分かった。

表 4 アンケート調査の結果分析のまとめ(一部)

常州市に進出した日系企業の社長か、副社長は殆ど中国人であること	96% (49 社)
常州市日系企業に勤める課長および課長以上の管理職の中国人の割合が高いこと	100% (51 社)
常州市日系企業に勤める従業員の平均収入は 4000 元~6000 元で、沿	59%

海都市の中で高いこと	(30 社)
常州市日系企業の労働組合(工会)の比率が低いこと	4% (2 社)
常州市日系企業の CSR に対する認識度が高いこと	66.7% (34 社)
常州市日系企業の労働 CSR に対する認識度が半数を超えていること	56% (19/34 社)
常州市の日系企業が最も重視している労働 CSR 項目は、「人材育成」と「職場の安全」であること	82.4% (42 社) 90.2% (6 社)
常州市日系企業がスト皆無の主な理由は、①現地化が進んでいること、②賃金が高いこと、③福利厚生が完備されていること	96%(49 社) 63%(32 社) 49%(25 社)

7. 中国に進出した日系企業への示唆

筆者は今回のアンケート調査の実施結果と分析を参考に、今後における労働争議を未然に防ぐために、中国に進出した日系企業に対して、次のような示唆を与える。

(1)「現地化」のテンポを速め、優秀な中国人幹部を現地人社長や工場長などに登用し、企業経営を任せることが重要である。

(2)賃金を高めて、その伸び率を欧米や中国系企業と同様に設定することが重要である。

(3)「人材育成」、「障害者の雇用」、「職場の安全」などの労働 CSR 施策を導入することが重要である。

11. 今後の課題

まず、常州市開発区以外の日系企業および蘇南地区（蘇州市、無錫市、鎮江市、南京

市）、長江デルタ進出の日系企業へのアンケート調査を実施する。

次に、中国主要地域に進出した日系企業における労働 CSR の現状とその対応を把握すると同時に、欧米企業なみの昇給率の設定と「現地化」テンポを速める方法など、中国進出の日系企業がどのようにして労働 CSR を積極的に導入するかを考察する。

参考文献

- [1] 今津佳都子(2011)「中国における CSR の現状と日系企業に求められる今後の対応」東京海上日動リスクコンサルティング株式会社 CSR・環境グループ発行第 270 号, PP. 6~7。
- [2] 今津佳都子編著, 前掲書, P. 5。
- [3] 志野澄人(2010)『CSR 報告書における労働・人権項目のテキスト分析』商学研究第 50 巻第 2・3 号, P. 86。
- [4] 労働に関する CSR 推進研究会(2008)『労働に関する CSR 推進研究会報告書』(<http://www.mhlw.go.jp/shingi/2008/03/s0331-6.html> アクセス時期: 2015 年 6 月 8 日)
- [5] 「CSR トピックス中国進出日系工場で頻発したストライキの背景～労務リスクは拡大のおそれも、対策で一定の低減は可能～」(2010)『インターリスク総研特別号』No.2, P. 2。

謝辞 本論文を作成するにあたり、丁寧かつ熱心なご指導を頂いた指導教員である田中英夫教授、副審査である浜淵久志教授、山北隆典教授並びに今長室長（日本語添削）に深謝の意を表します。協力していただいた皆様へ心から感謝の気持ちと御礼を申し上げます。謝辞にかえさせていただきます。

< 修士論文概要 >

自己回避ランダムウォークのシミュレーションを使用した
Milgram「スモールワールド」実験の考察

史興*

1. はじめに

1960年代に行われたMilgramの「スモールワールド」実験は、1人の目標人物に対し、アメリカ中から数百名の参加者を選び、それらから目標人物に到達するまで特定のルールに従って手紙を送った場合、その経由数を調査するものであった[1, 2]。

実験のルール：

- (1) 封筒に添付した名簿に自分の名前を記入し、既に経由した参加者に手紙が送信されることを避ける。
- (2) 添付したポストカードを1枚取り出し、必要事項を記入した上Milgramに郵送し、手紙の追跡を可能にする。
- (3) 目標人物と直接知り合いであれば、目標人物に手紙を出す。
- (4) 目標人物とは直接の知り合いでなければ、自分の直接の知り合いの中からもっとも目標人物と知り合いそうな人物を1人選び、その人に手紙を出す。

実験の集計結果：

- 手紙を中継した人物の数は平均5.2人
- 辿り着いた手紙の割合は約22%
- 次の人へ伝送する平均確率が約82%

上記の「平均5.2人」は、「6次の隔たり」とも呼ばれる興味深い実験結果である。この結果を説明する数理モデルの作成と解析は、情報探索という大きな研究の流れの中で重要であると考えられる[3, 4]。2つ代表的な研究として、Kleinbergの正方格子モデル[5]と、Wattsらの階層構造モデルがある[6]。これらのモデルでは、ある程度スモールワールド実験を説明できるが、パラメータを少しでもずらすと結果が大きく変わるというパラメータ依存性がある。

また、全ての頂点が距離に関する情報を正確に持っている。しかし、人間関係がそれほど理想的な構造に従っているとは考えにくく、距離に関する情報も個人それぞれの経験、知恵に大きく影響されると考えられる。

本研究の目的は、精密なパラメータ設定に依存せずにスモールワールド実験を説明することである。そのため、適切なネットワークモデル及び伝搬モデルを使用し、コンピュータ上でスモールワールド実験のシミュレーションを行い、結果について考察する。

2. スモールワールド実験のモデル化

2-1 2つの代表的な複雑ネットワークモデル

2-1-1 Watts-Strogatz モデル [4, 7]

代表的なスモールワールドネットワークモデルであり、クラスタリング係数をコントロールするパラメータ（張り替え率 $p \in [0, 1]$ ）の調整により、高いクラスタリング係数と短い平均最短距離を同時に実現できる。張り替え率 p の値が0と1であるときは、それぞれ円環ネットワークとランダムネットワークに対応する。

2-1-2 Holme-Kim モデル [8]

スケールフリーネットワークモデルのBarabasi-Albertモデル[9]を元に、スケールフリー性を維持しながらクラスタリング係数を高めたモデルである。クラスタリング係数をコントロールするパラメータ（隣接選択率 $q \in [0, 1]$ ）が0のときはそのままBarabasi-Albertモデルとなる。このモデルの特徴として、ネットワークの中に非常に高い次数を持つ「ハブ」と呼ばれる頂点が存在する。

2-2 スモールワールド実験とランダムウォーク

前述の実験ルール(4)は最短経路を辿ることを目標に設定したが、実際の経路選択についての判断はすべて参加者個人に委ねられ、個人それぞれの経験、知恵に大きく影響される可能性

* 北海道情報大学大学院経営情報学研究科

が高い。よって、実際の伝搬では経路選択の基準が頂点ごとに変わるため、伝搬の状態は一種のランダムウォークと考えられる。

ランダムウォークとは、伝搬の行き先を完全にランダムで決定する伝搬モデルである。ランダムウォークの経路選択にいくつかの制限を加え、既に通過した頂点・経路を避けるように行き先を選択するものを自己回避ランダムウォークと呼ぶ [10, 11]。スモールワールド実験では、前述の実験ルール (1) に基づき、通過した頂点に戻ることはないため、厳密な自己回避ランダムウォーク [12] となる。

3. シミュレーション

3-1 ネットワークモデルの構築

Watts-Strogatz モデルでは、張り替え率 p を 0.001 から 1 まで $1000^{1/20}$ 倍ごとに設定し、21 通りのモデルでシミュレーションを行う。Holme-Kim モデルでは、隣接選択率 q を 0 から 1 まで 0.05 刻みで設定し、21 通りのモデルでシミュレーションを行う。それぞれのネットワークをサイズ $n = 1000, 3000, 10000$ の 3 パターン、サイズ毎に 4 パターンの平均次数 $\langle k \rangle$ (表 1 に示す) で構築する。

このように n と $\langle k \rangle$ を決めたのは、それが丁度スモールワールド実験をスケールダウンした値に対応していると考えられるためである。アメリカの人口 2×10^8 に対し、1 人あたりの知り合いの人数が 150 [13] だとすれば、 $\log_{150}(2 \times 10^8) \approx \log_{\langle k \rangle}(n) \approx 3.81$ が成立すると考えられる。よって、 n を 1000 とすれば、 $\langle k \rangle \approx 6$ となる。即ち、平均次数 $\langle k \rangle$ を 6 近辺の値に設定するのが妥当だと考えられる。同じ理由で、 $n = 3000, 10000$ の場合、 $\langle k \rangle$ をそれぞれ 8, 10 近辺の値に設定してある。

表 1 n と $\langle k \rangle$ の設定パターン

サイズ n	平均次数 $\langle k \rangle$			
1000	4	6	8	10
3000	6	8	10	12
10000	8	10	12	14

3-2 伝送率の設定

スモールワールド実験では、一定の割合の参加者が手紙の中継を放棄した。それを考察するため、手紙の中継を放棄せずに次ぎのステップへ伝送する確率を伝送率と定義する。プログラ

ミングでは、伝送率のパラメーター $r \in (0, 1]$ を設定し、伝搬の各ステップにおいてはこの確率に基づいて次へと伝搬する。

3-3 シミュレーションの手順

- (1) ネットワークから 1 つの頂点を以下の方法で選択し、ターゲットとする。
 - Watts-Strogatz モデル：次数 $k > 0$ の頂点からランダムに 1 つ選択する。
 - Holme-Kim モデル：ハブの存在が結果に影響すると考えられるため、最小/最大の次数 k^1 を持つ頂点を 1 つずつ選び、2 通りのシミュレーションを行う。
- (2) $k > 0$ のターゲット以外の頂点からランダムに 1 つの頂点を選び、スタート頂点とする。経由した頂点のリストを作成し、経由数を 0 と記録し、伝搬を開始する。
- (3) $[0, 1)$ 範囲内の乱数を発生させ、それが伝送率 r 以上の数値であれば、伝搬を終了し、結果を「放棄」と記録する。そうでなければステップ (4) を行う。
- (4) もし伝搬の現在位置の頂点が直接ターゲットと隣接するのであれば、伝搬を終了し、結果を「成功」と記録する。そうでなければステップ (5) を行う。
- (5) もし現在位置の頂点に直接隣接するすべての頂点が、経由した頂点のリストに存在するのであれば、伝搬を終了し、結果を「失敗」と記録する。そうでなければステップ (6) を行う。
- (6) 現在位置の頂点に隣接し、かつ経由した頂点のリストに存在しない頂点の中からランダムに 1 つを選び、その頂点を経由した頂点のリストに追加し、経由数に 1 を足し、選んだ頂点に伝搬する。
- (7) 伝搬が終了し、結果が「成功」、「失敗」、「放棄」のいずれかになるまで、ステップ (3)~(6) を繰り返す。
- (8) 精度を上げるため、ステップ (2)~(7) を 100 回繰り返し、結果の平均を記録する。
- (9) 更に精度を上げるため、ステップ (1)~(8) を 100 回繰り返し²⁾、その平均を最終結果とする。

¹⁾ この 2 つ以外にも、上位 1% の k を持つ頂点について考察したが、本概要ではスペースの都合上、 k が最小/最大の場合のみを説明する。

²⁾ Holme-Kim モデルで最大の k を持つ頂点をターゲットとして選んだ場合では、その性質上、1 回のみの計算とする。

4. シミュレーション結果

4-1 $r = 1$ の場合

伝送率が 100% の場合のシミュレーション結果を図 1 に示した。1 つの図における各曲線は、違う平均次数 $\langle k \rangle$ に対応している。

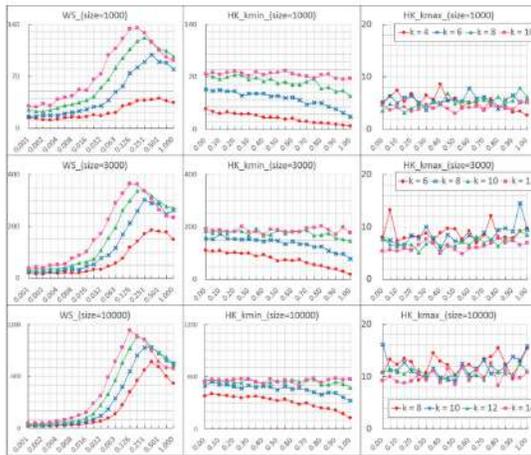
Watts-Strogatz モデル (図 1, 左列) では、張り替え率 p が高くなるにつれ、平均経路数と平均成功率両方の数値が上昇するが、 p が 1 に近づくと、平均経路数が低下する動きを見せた。平均成功率も $\langle k \rangle$ が高い場合を除き、 p の値とともに低下する動きを見せた。

Holme-Kim モデルでは、最小の k を持つ頂点をターゲットとした場合 (図 1, 真中の列)、隣接選択率 q が高くなるにつれ、平均経路数と平均成功率両方の数値が概ね低下する動きを見せた。一方、最大の k を持つ頂点をターゲット

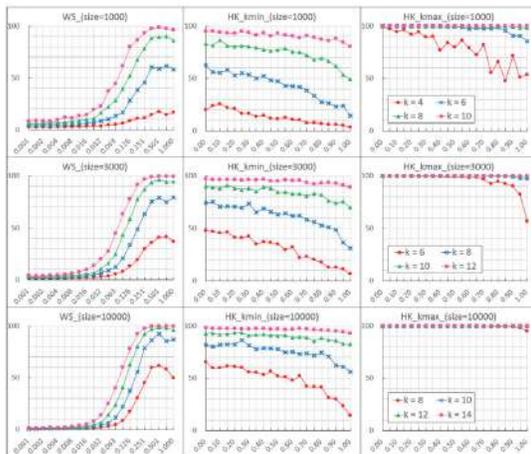
とした場合 (図 1, 右列), 平均経路数が q と $\langle k \rangle$ に関係なく、比較的安定な値を維持した上、ネットワークサイズによる影響も比較的少ない。平均成功率の方は $\langle k \rangle$ が高い場合では、ほぼ 100% を維持した。この現象からは、次数が伝搬において大きな影響を及ぼしていることを推測できる。

4-2 $0.8 \leq r \leq 1$ の場合

伝送率を 80% まで下げる場合のシミュレーション結果を図 2 に示した。図 2 のネットワークモデルは、Watts-Strogatz モデルでは $p = 0.1259$, Holme-Kim モデルでは $q = 0.7$ である。この p の値を採用したのは、前述 0.001 から 1 まで $1000^{1/20}$ 倍ごとと設定した値の中では、最もネットワークモデルのsmallワールド性が顕著となるからである。なお、違う q の

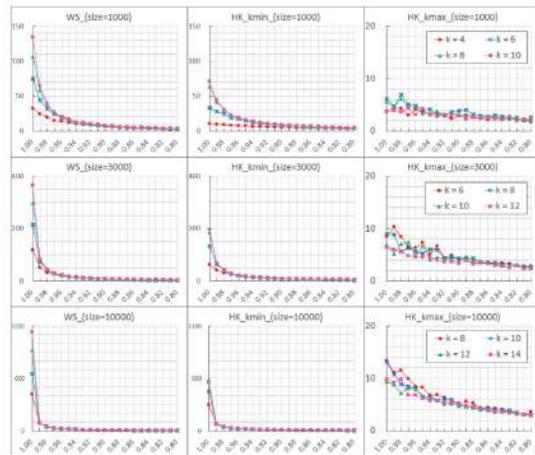


(a)

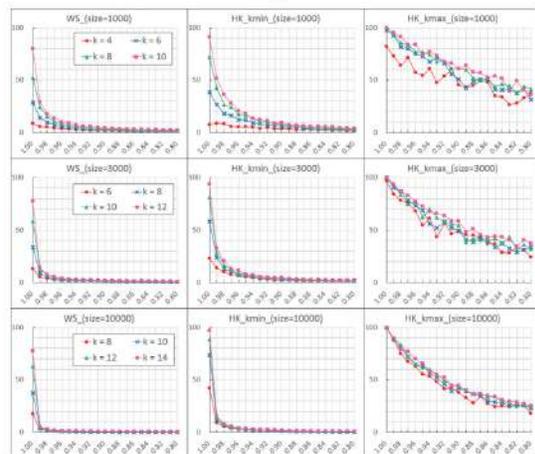


(b)

図 1 $r = 1$ の場合のシミュレーション結果。横軸はネットワークモデルのパラメータ p, q 。縦軸は (a) 平均経路数, (b) 平均成功率。



(a)



(b)

図 2 $0.8 \leq r \leq 1$ の場合のシミュレーション結果。横軸は伝送率 r 。縦軸は (a) 平均経路数, (b) 平均成功率。

値による結果は全て似たような振る舞いをしたため、ここでは適宜に1つの値を選択した。

伝送率 r がある程度低下すると、全てのモデルにおいては平均次数 $\langle k \rangle$ と関係なく、平均経路数と平均成功率の両方が一定した動きを見せた。 r がスモールワールド実験の82%に近い0.8になると、全てのモデルにおいての平均経路数が2~5ステップ程度となる。また、最大の k を持つ頂点をターゲットとした Holme-Kim モデルでは、平均成功率が20%~40%程度となる。平均経路数と平均成功率の両方ともスモールワールド実験に近い数値となった。

上記平均経路数のデータからは、スモールワールド実験の「平均5.2人」は伝送率の低さによって導き出された結果であると推測できる。また、伝送率の低さの割に22%にも及ぶスモールワールド実験の成功率は最大の k を持つ頂点をターゲットとした Holme-Kim モデルの結果と一致しており、そのような成功率を収めたのは、目標人物がある程度の人脈を持っている (k が高い) からである可能性を示唆している。

なお、図2に示したネットワークモデルは、特定の p, q 値を持つモデルであるが、以上の現象は図2に示したモデルだけでなく、全21通りの p, q 値のモデルで見られた。

5. まとめ

本研究では、1960年代に Milgram が実行したスモールワールド実験のシミュレーションを行い、結果について考察した。シミュレーションでは、ネットワークサイズおよび平均次数は、スモールワールド実験のスケールダウンに相当するように設定した。代表的な複雑ネットワークである Watts-Strogatz モデルと Holme-Kim モデルを使用し、それぞれのパラメータを変更しながらシミュレーションを行った。また、伝送率の概念を導入し、スモールワールド実験におけるドロップアウト行動を再現した。

シミュレーションの結果、「6次の隔たり」は伝送率の低さによって導き出された結果であり、伝送率の低さの割に22%にも及ぶ成功率は、目標人物がある程度の人脈を持っている (k が高い) からである可能性を示唆している。

また、伝送率をある程度下げた場合の結果は、ネットワークサイズ、平均次数、張り替え

率および隣接選択率などのパラメータによらずに、一定した動きを見せた。よって、本研究の目的である精密なパラメータ設定に依存せずにスモールワールド実験を説明することは、概ね達成できたと言える。

今後の課題として、シミュレーションの結果を裏付ける理論的な考察が待たれる。また、アルゴリズムの改良を通し、ネットワークサイズと平均次数のパターンを増やしたシミュレーション、および未検証の複雑ネットワークにおけるシミュレーションが考えられる。

参考文献

- [1] S. Milgram, "The Small-World Problem", *Psychology Today*, Vol.1 No.1 61-67, 1967.
- [2] J. Travers, S. Milgram, "An Experimental Study of the Small World Problem", *Sociometry*, Vol.32 No.4 425-443, 1969.
- [3] 増田 直紀, 今野 紀雄, 複雑ネットワーク 基礎から応用まで, 近代科学社, 2010.
- [4] M. E. J. Newman, *Networks: An Introduction*, Oxford University Press, 2010.
- [5] Jon M. Kleinberg, "Navigation in a small world", *Nature*, Vol.406 845, 2000.
- [6] D. J. Watts, P. S. Dodds, and M. E. J. Newman, "Identity and search in social networks", *Science*, Vol.296 1302-1305, 2002.
- [7] D. J. Watts, S. H. Strogatz, "Collective dynamics of 'small-world' networks", *Nature*, Vol.393 440-442, 1998.
- [8] P. Holme, B. J. Kim, "Growing scale-free networks with tunable clustering", *Phys. Rev. E*, Vol.65, 2002.
- [9] A. L. Barabasi, R. Albert, "Emergence of Scaling in Random Networks", *Science*, Vol.286 509-512, 1999.
- [10] V. M. L. Millan, V. Cholvi, L. Lopez, and A. F. Anta, "A Model of Self-Avoiding Random Walks for Searching Complex Networks", *Networks*, Vol.60 Issue 2 71-85, 2012.
- [11] S. J. Yang, "Exploring complex networks by walking on them", *Phys. Rev. E*, Vol.71, 2005.
- [12] Carlos P. Herrero, "Self-avoiding walks on scale-free networks", *Phys. Rev. E*, Vol.71, 2005.
- [13] R. A. Hill, R. I. M. Dunbar, "Social network size in humans", *Human Nature*, Vol.14 No.1 53-72, 2003.

謝辞 本研究を進めるにあたり、多大なご助力ご指導を頂いた豊田規人教授に感謝を申し上げます。

<修士論文概要>

プロパティ交換法における学習課題とカードゲームの組み合わせに関する研究

—学習用カードゲーム推薦システムの開発—

宋 爽*

1. はじめに

近年、学習者の動機付けのための学習用ゲーム開発のコストを下げるために、いくつかのゲーム作成法が議論されてきた。例として、梅津らが提案したプロパティ交換法が挙げられる。それは既存のカードゲームのカードを、演習問題が書かれたカードと交換することで学習用カードゲームへと作り変える手法である[1]。しかし、梅津らは作成した学習用ゲームの学習効果と面白さに対する検証は不足している。

本研究はプロパティ交換法で作成した学習用ゲームの学習効果と面白さを検証するための予備実験を行った。結果として、1)学習効果はある(事前・事後テストの平均得点に有意な差があった($t(18)=-6.57, p< .05$)), 2)同じ学習用ゲームに対して、「面白い」と「面白くない」と思う学習者が同時に存在する、3)学習課題と組み合わせるカードゲームを変えると、学習者が感じる面白さは変化することがわかった[2]。

本研究は、勉強が苦手であるが、ゲームは好きな学習者の動機付けを目的とする。そのために、既存研究で議論されてこなかった、カードゲームと学習課題の組み合わせに着目し、学習者の嗜好に合う組み合わせを提示する推薦システムを開発する。

2. 学習課題とカードゲームの特徴の明確化

本研究は Gardner が提唱した多重知能理論[3]

* 北海道情報大学大学院経営情報学研究科,
Graduate School of Business Administration
and Information Science, HIU

に基づき、学習課題とカードゲーム両方の特徴を表現する特徴モデル(図1)を提案した。提案した特徴モデルは、「言語・語学」「論理・数字」等の8つの領域において、各領域の能力がどれだけ必要であるかを0(使わない)から5(使う)の数字で表すモデルである。学習課題とカードゲームの特徴が、直感的に理解できるように、レーダーチャート形式(図2)で表示することにした。

領域	使わない		使う			
言語・語学	0	1	2	3	4	5
論理・数字	0	1	2	3	4	5
視覚・空間	0	1	2	3	4	5
音楽・リズム	0	1	2	3	4	5
身体・運動	0	1	2	3	4	5
自然学	0	1	2	3	4	5
対人的	0	1	2	3	4	5
内省的	0	1	2	3	4	5

図1 特徴モデル

本研究は提案した特徴モデルを使って学習課題とカードゲームの特徴を明確化することができるかを確認するために、2014年11月、12月に、北海道情報大学の学部生計26名を対象に、特徴モデルの評価実験を行った。

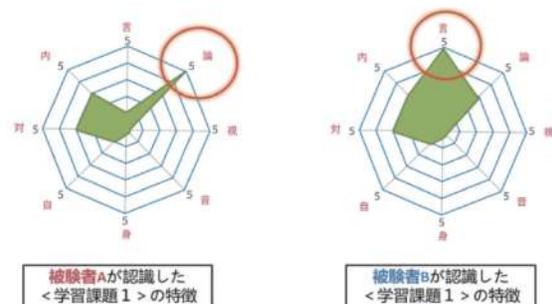


図2 同じ学習課題に対して被験者の認識の差

図2で示したように、特徴モデルを用いて、学

習者が認識している課題とゲームの特徴を表現することができる。しかし、被験者の間に認識の差が存在する事実が見られた。よって、学習者それぞれの能力を考慮して、その学習者が認識している特徴を予測する手段が望ましい。

3. 推薦システムの設計

3-1 推薦方法

本研究はユーザ間協調フィルタリング(被推薦者と似た趣味を持つユーザが好むアイテムを推薦する)と内容ベースフィルタリング(被推薦者の好みに似たアイテムを推薦する)を使用する[4]。

内容ベースフィルタリングにおいて、従来のキーワードではなく、特徴モデルを使用いて、学習用ゲームの特徴を表現する。また、cold start 問題において、本研究は直接に嗜好アンケート(表1)からユーザの嗜好を取得する方法にした。質問は0から5までの数字で回答させる。

表1 嗜好アンケート例

#	質問
1	言語・語学に興味があるか
2	論理・数学に興味があるか
9	普段カードゲームをプレイするか
10	カードゲームが好きか
12	勉強が得意か(点数が取れるか)
13	勉強が好きか(学ぶこと自体が好きか)

3-2 推薦手順

本研究の推薦システムは、ユーザが認識している課題とゲームの特徴を予測した結果とユーザ嗜好を用いて、内容ベースフィルタリングの計算を行う。同時に、ユーザ嗜好とユーザの評価を用いて、ユーザ間協調フィルタリングの計算を行う。最後に、2つの計算結果から、ユーザに推薦する組み合わせを決める。

4. 推薦システムの評価

本研究は、開発したシステムに対して、2015年6月と11月に、北海道情報大学の学生総計22人(のべ35人)を対象に、評価実験を行った。

結果として、本研究で開発した推薦システムは、初めての利用者にも推薦ができる、そして、勉強嫌い・ゲーム好きな学習者の学習支援において、面白い学習用カードゲームは有効な動機付け手段として考えられることを明らかにした。

5. 結論・今後の課題

本研究では、1)多重知能理論に基づき、学習課題とカードゲームの特徴を同一モデルで表現できる特徴モデルを提案した。2)ユーザ間協調フィルタリングと内容ベースフィルタリング両方を使用したハイブリッド推薦方法を設計した。3)学習用カードゲーム推薦システムの開発と評価を行った。

今後の課題として、内容ベースフィルタリングに使う計算式を改めるなどの検討が挙げられる。そのほか、本研究で開発した推薦システムを用いて、いつ学習者の嗜好に合わせた学習用ゲームを推薦できるかについての検証が必要である。さらに、嗜好アンケートを用いた推薦は精度を犠牲した可能性があるため、嗜好ベクトルに機械学習を用いた改良も課題の一つである。

参考文献

- [1] 梅津孝信・東卓弥・平嶋宗・竹内章 (2013)「学習用カードゲームのオーサリングシステムの開発と実験評価」『教育システム情報学誌』第30巻第2号, pp.148-159。
- [2] 宋爽・斎藤一・隼田尚彦・向田茂・安田光孝 (2014)「学習用カードゲーム作成のための学習課題の分類と考察」『教育システム情報学会 第39回全国大会論文集』, pp.293-294。
- [3] Howard Gardner(2001) *Intelligence Reframed: Multiple Intelligences for the 21st Century*, Basic Books.
- [4] Burke, Robin (2007) “Hybrid web recommender systems. In: The adaptive web,” *Springer Berlin Heidelberg*, pp. 377-408.

〈修士論文概要〉

中国における「中外合作弁学」に関する研究 ～日本の大学との合作弁学事例を道情報大に活用できるのか～

趙菁*

1. はじめに

1-1 研究の背景

北海道情報大学（以下は道情報大と略称）と南京大学との「IT・日本語クラス」共同事業終了後の入口戦略としての中国人留学生確保をいかに取り組んでいくのか。今後、どのような形式で中国の大学との共同事業を進めるのか。これは道情報大の中国人留学生確保における喫緊の課題である。

2018 年を境に、日本は 18 歳人口の減少が加速している。「超少子化」到来を前に、日本の大学は学生確保に知恵を絞る。その戦略の 1 つが留学生の受け入れ強化であるが、現地の大学と提携したりする動きが活発化している。

中国教育部（文科省に相当）は海外留学に関する報告書（『2014 年出国留学趨勢報告書』）を 2014 年 3 月 13 日に公表し、2013 年は過去最高となる 41.39 万人が中国から海外留学することが分かった。1978 年～2013 年の海外留学経験者数は約 305.86 万人で、世界一の留学生輩出国となっている。

道情報大も日本における 18 歳人口の減少に対応するための入口戦略として、留学生の確保を考えているが、最優先で取り組んでいるのが、道情報大のようにソフトウ

ェア企業が大学を設立している形態の大学からの優秀な留学生の確保である。既に、中国では東軟グループ（ソフトウェア企業）が設立した大連東軟信息学院とダブルディグリーに関する協定を結んでいる。

1-2 研究の目的

本研究の目的は「中外合作弁学」の形式（機構と項目）による日本の大学と中国の大学との協力事例（立命館大学事例など）を研究分析したうえ、道情報大と大連東軟信息学院との共同事業に活用させ、「安心・安全・安定」の中国人留学生受入体制の構築を提案し、その実現性を考察することである。

2. 「中外合作弁学」とは

「中外合作弁学」とは外国の教育機構と中国の教育機構とが協力し、中国境内で行う、主に中国公民を募集対象とした教育活動であり、機構（教育実体の設置）と項目（学科などの協力）形式から構成されている[1]。

3. 「中外合作弁学」の形式による中日協力の事例研究と分析

本研究はまず、道情報大と南京大学との「IT・日本語クラス」留学共同事業の成果（100 名以上の留学生を受入れたことなど）と問題点（学力による個人差が激しいことなど）をまとめた。次に、IT 関連の中国

* 北海道情報大学院経営情報学研究科、

Graduate School of Business Administration
and Information Science, HIU

国と日本の大学間の「中外合作弁学」の機構と項目形式による共同事業の事例を研究分析した。更に、他分野における中国と日本の大学間の「中外合作弁学」の項目形式による共同事業の事例も簡潔にまとめた。

3-1 立命館大学事例(「中外合作弁学」の機構形式利用)の研究と分析

2015年に立命館大学と大連理工大学との機構形式による共同学部を設置が中国教育部に認可された(表1参照)。

表1 共同学部(国際情報ソフトウェア学部)概要

教育機関(大学)名称	大連理工大学 立命館大学国際情報ソフトウェア学部 (DUT-RIE International School of Information Science & Engineering at DUT)	機構の組織	法人形態を有しない
実施機関(大学)住所	辽宁省大连市金州区软件园(大連理工大学金州校区キャンパス内)	中国側教育機関(大学)法人代表	中方側
中外の実施機関(大学)	中国側: 大連理工大学	代表者(学長)	副校長
	外国側: Ritsumei University, Japan (立命館大学)		
学部の種類	本科	学年	4年間
入学定員(毎年)	120名(毎年200名)	募集年度	2015年~2017年
出願資格	中国の大学統一入学試験合格者		
専攻	ソフトウェア工学、デジタルメディアテクノロジー、モノのインターネット (3攻)		
認可証書	中国側: 学士学位証書 外国側: 工科学士学位証書 (2年次に立命館大学への編入学生のみに)		
審査機関	教育部(文科部)担当		
認可証書番号	教高[2016]10000020113000		
認可証書有効期間	2016年12月31日		

同共同学部は、①ソフトウェア工学、デジタルメディアテクノロジー、モノのインターネット (IoT) などの3つの専攻が設けており、それぞれの専攻の入学定員は100名である。なお、ソフトウェア工学専攻に入学した学生のうち4割は、3年生の段階で日本に移り、立命館大学に編入する。また、共同学部に入学者は中国の大学統一入学試験で大連理工大の必要点数を超えた学生しか入学できないので、立命館大学は優秀な学生も確保できる。

3-2 吉備国際大学事例(「中外合作弁学」の項目形式利用)の研究と分析

日本の吉備国際大学が中国の黄岡師範学院と組んで、「中外合作弁学」による項目形式の共同事業(アニメーション本科)を実施している(表2参照)。

表2 教育部認可の共同事業の概要

共同事業の名称	黄岡師範学院と日本吉備国際大学との共同事業(アニメーション専攻)		
実施機関(大学)住所	湖北省黄冈市黄州区教港二路16号		
実施機関(大学)	中国側: 黄岡師範学院	中国側教育機関(大学)法人代表	董天
	外国側: Eiji International University, Japan (吉備国際大学)		
学部の種類	本科	学年	4年間
入学定員(毎年)	100名	募集年度	2011年~2014年、2015年~2017年
出願資格	中国側の大学統一入学試験合格者		
専攻	アニメーション		
認可証書	中国側: 学士学位証書 外国側: 工科学士学位証書 (2年次に吉備国際大学への編入学生のみに)		
審査機関	教育部(文科部)担当		
認可証書番号	教高[2010]11110000		
認可証書有効期間	2010年12月31日		

2014年に当該共同事業は中国教育部の実施経過評価(①合格、②条件付き合格、③不合格)を受けたが、合格となった。当該共同事業は合格という結果を得たことは、入学定員が確保できたばかりでなく、共同弁学のレベルが高く、教育質も保証されていることが証明されたといえよう。

4. 「中外合作弁学」形式の特徴

「中外合作弁学」は主として次のような特徴をもっている。

(1) 安心

全ての共同事業は中国教育部の許認可が必要なため、中外双方は合法性のある共同事業を安心して行うことが可能である。

(2) 安全

中国教育部は共同事業に対する行政管理と監督を強化するために、「二つの土台」と「二つの体制」を構築している(図1参照)ので、中外双方は監督と処罰が厳しい共同事業を安全面において行うことができる。



図1 「中外合作弁学」に対する行政管理と監督の体制

(3) 安定

共同事業は中国の大学統一入学試験に合格した学生しか入学できないし、入学定員も設けているので、優秀な学生の安定確保が可能である。

5. 提案

立命館大学事例などを道情報大と大連東軟情報学院との共同事業に活用させて、「安心・安全・安定」の中国人留学生受入れ制度を構築するために、筆者は「小さく生んで大きく育てる」方針を貫き、次のような実施段階（図2参照）を提案する。



図2 実施段階

①初期協力段階では、双方の信頼関係をつくるために、次のような相互理解と交流活動に力を入れる必要がある。すなわち、a. 双方の教育体制、およびIT専門分野を知るために、教職員間、特にIT専門の教員間の交流を頻繁に行うこと、b. 双方の社会と文化を知るために、学生同士の親睦と人的交流を促進し、短期と長期留学の実施を行うこと、などである。

②中期協力段階では、吉備国際大学事例を活用させ、大連東軟情報学院との「中外合作弁学」の項目形式による共同事業の実施を提案する。

③長期協力段階では、立命館大学事例を活用させ、大連東軟情報学院との「中外合作弁学」の機構形式による共同事業の実施を提案する。

5-1 大連東軟情報学院との共同事業における双方のメリット

道情報大側の主なメリットは、以下の通りである。

まず、項目形式に比べ、機構形式は1つの教育実体を作るため、多くの学科や専攻などにおいて、共同事業を同時進行に行うことができるので、多くの学科や専攻から優秀な中国人留学生をより多く安定的に確保できる。

次に、「立命館大学事例」などに紹介された出前授業の実施方法を参考に、道情報大教員派遣による出前授業の実施によって、日本に近い環境での学習が可能である。

更に、機構形式による共同事業は人的交流の規模が拡大できるので、教員間と学生間の交流を通して、IT関連の知識について切磋琢磨し、互いの短所と長所を発見して、互いに短所を補い、長所を取り入れることもできる。

一方、大連東軟情報学院側の主なメリットは以下の通りである。

まず、2年次修了生を道情報大の3年次から編入生として受け入れるダブルディグリー制度を利用しているので、日本語とともにソフトウェアの専門知識を道情報大のカリキュラムに沿って学習できるばかりでなく、両大学の学位をも取得できる。

次に、道情報大の「3つの教育・研究への取り組み」から高質なICT教育におけるノウハウを吸収することができる。

5-2 大連東軟情報学院との共同事業の実現性の考察

大連東軟情報学院との共同事業は現在の初期協力段階から中期協力段階（「中外合作弁学」の項目形式による共同事業の実施）に進む可能性があると思う。主な理由は、①IT教育に共通点が多いこと、②ライバル意識による共同発展が期待できること、

③東軟グループ所属の成都東軟学院との共同事業も実施できること、などである。

なお、将来、東軟グループ所属の大連東軟情報学院、および成都東軟学院との長期協力段階における「中外合作弁学」の機構形式による共同事業を実施する可能性もあるが、現段階では、先方校との交流がまだ初期協力段階にあり、実績もそれほど多くないので、機構形式による共同事業実現の可能性が高いとは断言できない。

6. 結論（まとめ）

本論文では、まず南京大学との「IT・日本語クラス」共同事業における問題点（学力に個人差があること）を発見した。次に、この問題を解決するために「中外合作弁学」の実態を紹介すると同時に、「中外合作弁学」の3大特徴をまとめた。更に、「中外合作弁学」の形式（項目と機構）による中国と日本の大学間の協力事例（立命館大学事例など）を研究分析した。最後に、「中外合作弁学」の3大特徴を参考に、中国人留学生の確保に役立つ中国の大学と日本の大学との協力事例を道情報大と大連東軟情報学院との共同事業に活用させて、「安心・安全・安定」の中国人留学生受け入れ体制の確立を提案し、その実現性を考察した。

7. 今後の課題

本論文の「中外合作弁学」による事例を研究分析する際に、中国側の大学も日本側の大学も実施の現状を紹介する資料が非常に乏しいので、限られた資料による分析を通して、その実施の現状を完全とは言えないが、少し明らかになっている。将来の課

題は追跡調査を通して、全ての事例の実施実態を把握することである。

また、将来、より多くの中国側協力校と共同事業を行い、「安心・安全・安定」の中国人留学生受け入れ体制を構築するために、道情報大と大連東軟情報学院との共同事業を実施すると同時に、新たな中国側の協力校を発見（発見方法は図3参照）し、「中外合作弁学」の形式による共同事業を推進することが道情報大の課題である。



図3 新たな中国側協力校の発見方法

参考文献

- [1] 周嵐、田中豊治「中外合作弁学に関する中国教育部の文件」佐賀大学機関リポジトリ（佐賀大学における教育研究活動の成果を公開するシステム）の紀要論文（佐賀大学文化教育学部研究論文集/文化教育学部
(<http://portal.dl.sagau.ac.jp/handle/123456789/117809>、アクセス日時：2015年8月12日)
- [2] 中国教育部ホームページ
(<http://www.jsj.edu.cn/>、アクセス日時：2015年6月18日)

謝辞

本研究を進めるにあたり、親切にご指導を頂いた指導教員の田中英夫教授、副査の浜淵久志教授、谷川健教授に厚く御礼申し上げます。最後に、激励を頂いた北海道情報大学の皆様に深謝致します。

CONTENTS

〈Papers〉

A Study of Career Education through A Subject — Concerning Practices of Education in High School Mathematics —	Toru TSUBAKI	1
Information-Theoretic Document Clustering using Skew Divergence	Toshio UCHIYAMA	19
A Learning Analytics Approach to Improving Learning Outcomes Using Tablets as e-book Readers	Simon THOLLAR Tohru HIROHKU Naofumi OKUYAMA	27
The improvement point indication system for advancement of Japanese writing ability for college student.	Tomomi MIURA Jun NAKAJIMA	35
A Search Algorithm for Gaussian Parameter of Weighted Kernel k-means Method Based on the Distance between the Set	Shinichi YANAGI	51

〈Notes〉

The roles of English as a lingua franca in a short-term ICT task-based Japan-Thailand exchange program	Joel P. RIAN	73
The examination of present conditions and characteristics in Hokkaido Information University hypertensive students	Hiroki SATOH Yuji SATO Jun NISHIHARA	87
Investigation of the second opinion into medical institutions of Hokkaido from the Viewpoint of Patients	Kenmu FUNAKOSHI Aya TAKAHASHI	93
Proof of Kepler's planetary laws via applying the high school calculus	Shin'ya MATSUI	107
A Trial of Preparation of the Teaching Materials about the Construction Problems and the Galois Theory	Yuuichirou HAYASHI	115
Development of Application Software for the Purpose of Serendipity Experience	Hajime SAITO Nagisa SINYA	133

〈Document〉

A study of the relationship between the various parameters of a digital camera For camera vibration and large format camera	Keisuke MORI	139
--	--------------	-----

〈Report〉

Global Competency Education through Projects	Norihiko TAKEUCHI Simon THOLLAR Hiroshi MIURA Masahiro KAWAKAMI Mitsutaka YASUDA	153
--	--	-----

執筆者紹介（掲載順）

氏 名		主たる専攻
椿 達	北海道情報大学経営情報学部 先端経営学科准教授	教育制度、数学教育、 進路指導・キャリア教育
内山 俊郎	北海道情報大学経営情報学部 システム情報学科教授	情報システムの設計、データ解析、 機械学習、レコメンド、 テキストマイニング
ソーラ・サイモン	北海道情報大学経営情報学部 システム情報学科教授	英会話、英語の発音、e-learning、 動機づけ
広奥 暢	北海道情報大学情報メディア学部 情報メディア学科准教授	音声情報処理、ソフトウェア開発、 コンピュータシステム運用、 コンピュータネットワーク等
奥山 尚史	メディア教育センターディレクタ	e-learning
三浦 智美	北海道情報大学大学院 経営情報学研究科修士課程	
中島 潤	北海道情報大学経営情報学部 システム情報学科准教授	情報通信ネットワーク、 情報セキュリティ、ITマネジメント
柳 信一	北海道情報大学経営情報学部 システム情報学科講師	パターン認識、計算論的学習理論
Joel P. RIAN	北海道情報大学経営情報学部 先端経営学科准教授	Applied Linguistics（応用言語学） Second Language Learning Motivation （第2言語学習に関する動機づけ） Interlanguage、Communication Strategies （中間言語、伝達方略）
佐藤 浩樹	北海道情報大学医療情報学部 医療情報学科教授	内科学（循環器内科学、総合内科）、 産業医学、医療統計学
佐藤 祐二	北海道情報大学医療情報学部 医療情報学科教授	消化器外科学、癌免疫学
西平 順	北海道情報大学医療情報学部 医療情報学科教授	内科学（糖尿病、代謝学、免疫アレルギー）、 医療情報学、分子生物学
船越 幻夢	北海道情報大学経営情報学部 医療情報学科4年	
高橋 文	北海道情報大学医療情報学部 医療情報学科教授	診療情報管理、死亡診断書の精度、 在宅医療、分子遺伝学、遺伝子工学、 分子生物学、免疫、アレルギー、化学
松井 伸也	北海道情報大学情報メディア学部 情報メディア学科教授	非線形現象の解析、 特に流体現象・気象現象・反応拡散系
林 雄一郎	北海道情報大学情報メディア学部 情報メディア学科特任教授	生徒指導、教育相談、数学教育、 学校経営論、教師養成教育

氏 名		主たる専攻
斎藤 一	北海道情報大学情報メディア学部 情報メディア学科准教授	観光情報学、教育システム情報工学
新谷 渚	北海道情報大学情報メディア学部 情報メディア学科、平成26年3月卒業	
守 啓祐	北海道情報大学情報メディア学部 情報メディア学科教授	音声・画像情報処理、医用情報処理、 コンピュータネットワーク、 ゲーム（理論）プログラミング、 組み込み機器
竹内 典彦	北海道情報大学経営情報学部 先端経営学科教授	グローバル人材育成教育、英語教育、 第2言語習得、英語語彙習得、 映画英語研究
三浦 洋	北海道情報大学情報メディア学部 情報メディア学科教授	哲学、倫理学、芸術学
川上 正博	北海道情報大学情報メディア学部 情報メディア学科教授	グラフィックデザイン、広告研究
安田 光孝	北海道情報大学情報メディア学部 情報メディア学科准教授	Webコンテンツプロデュース、 Webビジネス、創造性教育、 デザイン思考、教育工学

平成27年度北海道情報大学紀要委員会

(2015年4月～2016年3月)

委員長 佐藤 裕二 (教授：医療情報学科)
委員 坂本 英樹 (教授：先端経営学科)
委員 渡部 重十 (教授：システム情報学科)
委員 島田 英二 (准教授：情報メディア学科)
代理 広奥 暢 (准教授：情報メディア学科)
委員 ジョエル ライアン (講師：先端経営学科)

北海道情報大学紀要 第27巻 第2号

印刷 平成28年3月10日

発行 平成28年3月31日

編集者 北海道情報大学紀要委員会

委員長 佐藤 裕二

発行者 北海道情報大学

学長 富士 隆

発行所 北海道情報大学

〒069-8585 北海道江別市西野幌59番2

TEL 011-385-4411 FAX 011-384-0134

URL <http://www.do-johodai.ac.jp/>

印刷 株式会社松江印刷

〒060-0033 北海道札幌市中央区北3条東7丁目344番地1

TEL 011-206-7278 FAX 011-206-7268

