

# 東海大学紀要

## 情報通信学部

PROCEEDINGS OF  
THE SCHOOL OF INFORMATION AND  
TELECOMMUNICATION ENGINEERING  
TOKAI UNIVERSITY



**Vol.13 No.1 2020**

# 東海大学紀要

## 情報通信学部

PROCEEDINGS OF  
THE SCHOOL OF INFORMATION AND  
TELECOMMUNICATION ENGINEERING  
TOKAI UNIVERSITY



**Vol.13 No.1 2020**

# 東海大学紀要

## 情報通信学部

Vol.13 No.1 2020

---

### 目次

#### 論文

- 地域と連携した教育的宿泊行事に関する一考察 – スクールメリットを活用して –  
.....北濱幹士..... 1
- ベイジアンネットワークと行動生起確率による行動認識方法の提案とその評価  
.....竹中一秀・撫中達司..... 8
- 帰り荷と時間枠を考慮した選択型運搬経路問題に対する列生成法  
.....胡 津閣・森山弘海..... 16

#### トピックス

- 大学初年次における数学教材の提案（その33）～1階線形常微分方程式～  
.....貴田研司..... 23
- 大学初年次における数学教材の提案（その34）～ガロア対応の例～  
.....貴田研司..... 32

PROCEEDINGS  
OF THE  
SCHOOL OF INFORMATION  
AND TELECOMMUNICATION ENGINEERING  
TOKAI UNIVERSITY  
CONTENTS

---

**Vol.13 No.1 2020**

---

**Papers**

- Overnight Educational Field Trip in Cooperation with the Community – Taking Advantage of School Benefits –  
..... Kanji KITAHAMA... 1
- Proposal and Evaluation of Life Activity Recognition Method based on a Bayesian Network with Activity Occurrence Probability  
..... Kazuhide TAKENAKA and Tatsuji MUNAKA... 8
- A Column Generation Algorithm for a Selective Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows  
..... Jinge HU and Hiroumi MORIYAMA... 16

**Topics**

- A Suggestion on Mathematical Materials for Freshman Education Vol. 33  
~ The Linear Ordinary Differential Equation of the First Order ~  
..... Kenshi KIDA... 23
- A Suggestion on Mathematical Materials for Freshman Education Vol. 34  
~ Examples of the Galois Correspondence ~  
..... Kenshi KIDA... 32

# 地域と連携した教育的宿泊行事に関する一考察 — スクールメリットを活用して —

北濱 幹士\*<sup>1</sup>

## Overnight Educational Field Trip in Cooperation with the Community — Taking Advantage of School Benefits —

by

Kanji KITAHAMA\*<sup>1</sup>

(received on Mar. 19, 2020 & accepted on Aug. 3, 2020)

### あらまし

本研究では、地域と連携した「たかなわ子どもカレッジ」事業に基づいて実施した、宿泊行事〈海洋調査研修船「望星丸」を見に行こう〉を振り返ると共に、参加者及び保護者から感想、満足度・期待度、そしてどのようなプログラムを求めているのか、またその教育的効果についてアンケート調査から探った。本プログラムは「海洋」をテーマとし、大学のスクールメリットを活かした独自のプログラム構成をした（海洋調査研修船、海洋科学博物館見学）。参加者からは宿泊行事の企画目的に合致した回答を得る事ができ、同様に保護者からも肯定的な回答を得る事ができた。また、参加者だけでなく、引率補助者においても教育的効果を確認することができた。

### Abstract

This study is to summarize the overnight educational field trip as <Let's go to see the Research and Training Vessel *BOSEIMARU*>, and analyze the satisfaction, expectation, free description and so on from participants, and their parents using questionnaire survey. The theme of this program as "OCEAN" and visited *BOSEIMARU* and Marine Science Museum which are belong to Tokai University. In the result of survey, there are many positive answers to match to the theme, and their parents, too. Although this kind of experienced programs are already recognized taking important roles within the participants, but also there are educational effects to the sub-leaders who are university students.

キーワード：地域連携，宿泊行事，教育活動

Keywords: Regional Cooperation, Overnight Educational Field Trip, Educational Activity

## 1. はじめに

「可愛い子には旅をさせよ」と称されるよう、以前より、子どもの時に様々な体験を得ておくことが重要とされている。特に昨今の価値観やライフスタイルの多様化、或いは子どもの社会性の欠如や意欲の低下等に対して、「体験」プログラムの必要性が高まっている。文部科学省は小学校学習指導要領の中で、総合的な学習の時間として体験活動などを積極的に取り入れること、また異年齢集団による学習などの多様な学習形態についても言及している<sup>1)</sup>。「体験」する事も目的の一つではあるが、様々な活動を通じて、自立心や主体性を育み、規範意識、人間関係構築力、問題解決能力等を高めることにその重要性が見出されている。現状では、各種学校主催の他、地域（コミュニティーセンターなど）やスポーツ団体等が主催する多種多様な体験プログラムが各地にて展開されている。

高等教育機関が青少年・少女のプログラムを実施する場合は、いくつかのカテゴリーに分ける事ができる。各専門分野を活かした独自のプログラムやその効果・評価を測る教育学部系、地域交流も含め実践的な体験ができる各種センター系、或いは地域連携を含め教育委員会等からの委託事業系、そして短期大学や生涯学習センター等が実施して

いる地域連携・協働の目的を持った「地域学・地元学」などである。実践的な体験ができるセンター系の場合、小学生の親子を対象とした野菜や草花の栽培体験教室が挙げられ、幼少期に自然体験（植物栽培）をすると情操及び社会性の向上がみられるとの報告がされている<sup>2)</sup>。委託事業系の場合、交流モデル事業期間が終了、或いは委託支給金が無くなった時点で活動が終了する事も少なくはない。しかし、事業として始まった活動を終えるのではなく、新たな活動目的を持って地域に根ざした活動を継続していく団体もある<sup>3)</sup>。地方の大学・短期大学や生涯学習センターは、地域連携・交流・協働として地域に根ざした地域開催のプログラムを実施している。教育プログラムの一環として授業に組み込み、地域に出て、地域の方々に教を乞い、協働で何かをする事が多く、その多くは地域活性を目論んでいる<sup>4)5)6)7)</sup>。

小学校学習指導要領内に総合的な学習の時間を含めている以上、各種体験プログラムは益々計画・実施されていくと考えられる。しかし、プログラム実施に至っては様々な問題が存在しているのも事実である。文部科学省は、「一般的に宿泊を伴う体験活動においては3泊4日以上での体験日数を確保することが望ましく、これを宿泊体験活動のモデル的な期間とすべき」と示している。岡山県の小学校長期間宿泊体験活動推進プロジェクトでは、3泊4日で異なったテーマを持つ5つのモデルプログラム（困難克服型・海モデル、困難克服型・山モデル、ふるさと探求型モデル、海の

\*1 高輪教養教育センター 准教授

Liberal Arts Education Center, Takanawa Campus,  
Associate Professor

生活体験型モデル、そして自立生活型モデル)を設定、実施している (Table 1 参照). 各プログラムでは「ねらい」が達成できるよう、テーマに沿った活動が行われており、調査結果からは、参加児童及び保護者ともに肯定的な回答が示されている<sup>8)</sup>. しかし、長期休暇を除いては、3泊4日の活動日数を確保する事は困難であり、多くの小学校では週末等を利用した1泊2日の宿泊体験活動が中心となっているのが現状である. 1泊2日での開催をしている小・中学校は約半数であり (小学校 59.6%, 中学校 41.5%), 1泊2日と2泊3日を併せた割合は、小学校が 92.7%, 中学校が 95.1%である<sup>9)</sup>. つまり、文部科学省が推奨する3泊4日の集団宿泊活動の実施は現状に見合わないが、日数が短くとも集団宿泊活動のプログラムの重要性は認知されているものと思われる.

本稿では、港区と東海大学との連携事業「たかなわ子どもカレッジ」と共催した「東海大学清水キャンパス宿泊行事<海洋調査研修船「望星丸」を見に行こう>」について振り返ると共に、参加者及び保護者に対して行ったアンケートより以下の事柄を探る (プログラムへの期待度、満足度、参加者の変容、今後の体験プログラムについて). 本研究の目的は、今後の体験プログラムの妥当性を含み、参加者と保護者それぞれがプログラムに対して何を希求しているのかについて探ると共に、その教育的効果を確認することにある.

Table 1 Five Different Themes of Model Programs

プログラム名称	プログラム設定概要
困難克服型 海モデル	無人島を目指してチャレンジする カッター訓練を2回設定
困難克服型 山モデル	20kmウォークで友達同士が 助け合える場を設定
ふるさと探求型 モデル	今まで知らなかった地域の良さを 探求する活動を設定
海の生活体験型 モデル	山間地域の児童が 海を満喫する活動を多く設定
自立生活型 モデル	自分たちで考え、自分たちで行動する 時間と場所を設定

## 2. 清水キャンパス宿泊行事

### 2.1 概要及び目的

「たかなわ子どもカレッジ事業」の目的<sup>+1)</sup>に則り、東海大学のスクールメリットを活かした「専門的なテーマを学ぶ機会を提供」として「海洋」をテーマとして掲げた. 昨年度は、「親子 de 歩育」(東海大学高輪キャンパスから代々木キャンパスまで親子で歩く企画<sup>10)</sup>)をたかなわ子どもカレッジ及び Takanawa 共有プロジェクト<sup>+2)</sup>の学生と共に実

+1 東海大学と連携して同大学内の学校施設等を活用し、児童が放課後に過ごせる居場所を設置し、学習、スポーツ、遊びなどの活動を行うとともに、同大学の知的・人的資源を活用して専門的なテーマを学ぶ機会を提供することで、児童の自主性、社会性及び創造性を養い、地域交流や多世代間交流を推進します

+2 東海大学チャレンジセンター Takanawa 共有プロジェクト：  
<http://deka.challe.u-tokai.ac.jp/tpk/index.html> (2020.3.13 閲覧確認)

施しており、今回は2回目の企画である.

本企画を計画する上で、教科等の学習に関連づけることで高まる集団宿泊活動の教育効果に示されている「社会に開かれた教育課程の実現<sup>11)</sup>」を参考に、「教育プログラム」として以下の3点に注視した (①何を学ぶか、②どのように学ぶか、③何ができるようになるか). つまり、能動的に学ぶアクティブラーニングを意識した. 一つ目の「何を学ぶか」については、「海洋」をテーマとし、東海大学が有する海洋調査研修船「望星丸」の乗船及び見学、海洋科学博物館の特別見学(夜の水族館)である。「どのように学ぶか」は、「お楽しみの宿泊行事」にならぬ様、参加者がテーマに沿った明確な学びの意思を持つことである. これは、事前説明会の中で訪問先についての説明時間を設け (2.2にて詳細説明)、出発前までに事前調査し、質問事項を作成しておくよう宿題を課した. アクティブラーニングの実践には、受け身で与えられる「体験」だけで留めず、積極的に学ぶ環境づくりを各家庭から構築していくことが大切であり、家庭の協力無しでは難しい. 最後の「何ができるようになるか」は、宿泊研修を通じて参加者各々の成長を促す事である. 主観的かつ単発的な「体験」だけではなく、体験を契機に中長期間的に向けた継続的で発展的な変化を促すと共に、連続的・進歩的に「経験」へと繋げ・繋がる事である<sup>12)</sup>. 例えば、今回の宿泊研修で、「海洋」に興味を持ち、将来的には海洋学部へと進学して海に携わる職業に就く、或いは魚に興味を持ち釣りを一生涯の趣味にするなど「何ができるようになるか」は様々である.

能動的に学ぶ事を意識し、たかなわ子どもカレッジ担当者が、本行事の「しおり」を「乗船券」として作成した (Fig. 1 参照). 目的、約束事、クルー (引率者)、持ち物、タイムスケジュール、活動にあたっての注意点、連絡先等が記載されている. なお、本乗船券は、参加者用、引率者用、そして保護者用と3種類あり、記載内容は使用者によって多少異なっている.

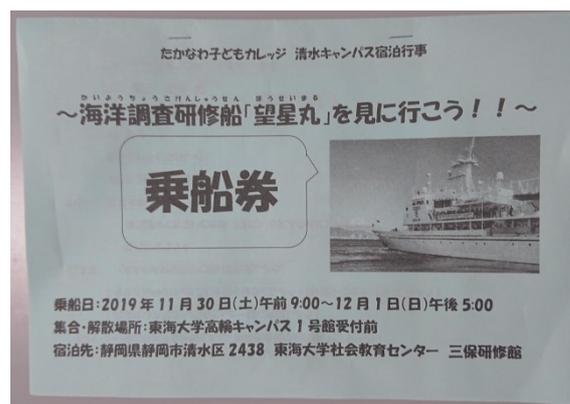


Fig. 1 Boarding Pass as Program Guide

### 2.2 プログラム

上記した概要及び目的を踏まえ、たかなわ子どもカレッジ担当者に本宿泊行事を提案し、実施予定日の約6ヶ月前に当たる2019年6月に現地を下見訪問し、東海大学清水キャンパス清水事務課企画調整担当者、東海大学海洋科学博物館担当者、そして三保研修館の担当者と綿密な打ち合わせを行い、プログラムの確定へと至った. 同日程中には、海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が保有する地球深部探査船「ちきゅう」の一般公開を含むイベントが清水港日の出ふ

頭で開催されていたが、本行事中は人混みを避けて非日常的な環境で多くの大人に囲まれて、ゆっくりゆったりのおんびりと共に過ごす事を最優先とした。

2019年11月14日、参加希望者は親子で参加必須の事前説明会を実施した。事前説明会では、参加希望の親子に概要と目的、訪問場所、宿泊施設等の説明、そして、参加者と引率者(補助の大学生を含む)の紹介の場とした。

本研修とした1泊2日の清水キャンパス宿泊行事の実施プログラムは下記のとおりである(Table 2 参照)。1日目は、望星丸と海洋科学博物館(夜の水族館)、2日目は海洋科学博物館をメインプログラムとし、子ども達の体調及び天候次第で世界文化遺産の構成資産でもある三保の松原及び東海大学清水キャンパスへの訪問をサブプログラムとして予定していた。しかし、1日目の港区から清水市までの移動時間が交通渋滞により予想以上に長く費やす事となり、望星丸の見学時間の変更は余儀なくされた。移動のバス車内では、参加者の体調を最優先にサービスエリアでの休憩を増やし、学生によるバス内レクリエーションなどで楽しく過ごし、体調不良の子どもは皆無であった。

メインプログラムの1つである望星丸の見学は、係留されている岸壁(通称:鉄道岸壁)より船内の食堂へと入り、望星丸事務長より船内の諸注意及び船内見学の説明を受けた後、船内見学とロープワークの2つのグループに分かれた。更に、船内での怪我や迷子防止の為3つの小グループ(1グループが3~4名)を形成し船内見学を行った。海洋学部航海工学科航海学専攻の学生(以後、練習学生)2名がグループの前後を歩き、参加者に質問をしたり、質問を受けたりしながら船内を巡った。参加者の興奮の音が聞けたのは、ブリッジ(艦橋)である。ブリッジの外へ出て、借用した双眼鏡で周囲の眺望を満喫し、ブリッジでは練習学生より様々な計器の説明を受け、最後は1人ずつラダー(舵)を握って記念撮影を行った。また、食堂で行ったロープワークでは、乗組員や練習学生と共に短めに用意されたロープを結んだり解いたりを繰り返し船舶独特の結び方を学んだ。後部甲板にて富士山を背景とした集合写真を撮影し、下船した(Fig. 2 参照)。

海洋科学博物館のプログラム(夜の水族館)は、入館後別室にて魚の発光、集団行動などについて学んだ後、残りの時間が自由見学となった(1部制限区間有)。館内は照明が落とされて薄暗くされており、博物館スタッフが設置した点滅赤色灯の下、発光している魚を確認したり、海洋水槽に、或いはクラゲギャラリーにくぎ付けになったりして参加者それぞれが満喫していた。自由時間終了後は別室に戻り、発光や集団行動に関する振り返りや質問時間となり、各自が準備してきた様々な質問を博物館スタッフに問いかけた。また、夕食後の学生による夜の集いでは、海洋に関するクイズゲームで知識と交流を更に深めた。

2日目は、夜の水族館では行く事ができなかった2階の科学博物館へと上がり、展示物を見たり、実験装置を動かしたりして海洋に関する知識を広げた。当日は、12月にも関わらず非常に暖かく、朝から雲一つない快晴で富士山が綺麗に見えた事もあり、海洋科学博物館の自由見学を1時間で切り上げ、三保の松原で過ごす時間を長めに取り砂浜での遊びを楽しんだ(Fig. 3 参照)。三保の松原での昼食を予定していたが、早めに清水を出発して昼食は休憩も含めて途中のサービスエリアで取った。帰路も交通渋滞に巻き込まれ、当初の予定より少し遅れての到着、そして解散となった。

Table 2 The Program of Let's Go to See  
The Research and Training Vessel *BOSEIMARU*

時間	プログラム概要
<b>1日目 (2019年11月30日)</b>	
9:00	東海大学高輪キャンパス 集合・出発
12:20	昼食(富士川SA)
14:15	望星丸見学(鉄道岸壁停泊)
16:00	三保研修館へ移動
17:30	東海大学海洋科学博物館(夜の水族館)
18:30	夕食
19:30	学生による夜の集い
20:15	入浴・就寝準備
21:30	消灯(22時よりスタッフ会議)
<b>2日目 (2019年12月1日)</b>	
7:00	起床
7:15	体操・朝の集い
7:30	朝食
8:15	部屋の片づけ
9:00	三保研修館出発 東海大学海洋科学博物館見学
10:00	三保の松原へ移動
11:30	三保の松原出発
13:30	昼食(富士川SA)
17:30	東海大学高輪キャンパス 到着・解散

交通渋滞などにより、予定を変更せざるを得なかったため、予定ではなく実際のスケジュールを掲載する



Fig. 2 Group Photo at *BOSEIMARU*



Fig. 3 Group Photo at *MIHO-NO-MATSUBARA*

## 2.3 参加者

高輪地区総合支所管内に在住または高輪地区総合支所区域内の小学校に在籍する児童を対象とした。宿泊が伴うため、たかなわ子どもカレッジ担当者との協議し、1人で身の回りの事ができる年齢として、参加条件を小学校3年生以上とした。半分の公立小学校が登校日などの事情もあり、参加小学生は22名であった（Table 3 参照）。引率者は、Takanawa 共育プロジェクト所属の大学生が男女3名ずつの計6名（3年生1名、1年生5名）、たかなわ子どもカレッジより女性が1名、高輪子ども中高生プラザより男女1名ずつ、そして東海大学教職員の男性2名の総勢33名である。参加者の男女比は男子が7名、女子が15名と女子が約3分の2を占めた。学年別では、3年生が約過半数を占め、4年生と合わせるとほぼ総数に近い数である。兄妹で参加した1組を除くと、1人での参加が多く、異なった小学校からの参加である。

各所での移動の際には、参加者の年齢層を基本として、4つのグループを形成し（3年生2グループ、4年生・6年生1グループ）、引率者2名及び引率補助の学生6名が各グループと共に行動した。

Table 3 Profile of Participants

学年	男子	女子	合計
3年生	3	9	12
4年生	2	4	6
5年生	0	0	0
6年生	2	2	4
合計	男子 7名	女子 15名	総数 22名

## 2.4 宿泊及び食事

宿泊及び食事にもスクールメリットを活用し、東海大学三保研修館を利用した。参加者や保護者が懸念するであろう宿泊と食事については、事前説明会の際にホームページや写真を用いて紹介をした。具体的には、ホテルではなく研修施設である事を前提に、布団の上げ下ろしやTVが設置されていない等である。宿泊部屋は、男子全員で1部屋、女子は3年生部屋と4・6年生部屋に分かれ、引率補助の学生が参加者と同部屋にて就寝した。

食事に関しては、1日目夕食と2日目の朝食はバイキング形式とした。食事前はグループごとに着席し、自らが節度を持って食品を装い・食すことなどを伝えた。移動を伴う1日目昼食は家庭から持参とし、2日目昼食は弁当とした。なお、事前に食物アレルギーチェックを行い、投薬などの徹底管理を行った。

## 3. アンケート調査

調査対象者は、参加者とその保護者であり、それぞれ設問が異なったアンケート調査を実施し、その回答を取りまとめた。アンケートの回収率は、子供向けが100%<sup>+3</sup>（N=22）、保護者向けが23%<sup>+4</sup>（N=22）である。各アンケートの質問項目については下記に別途記す。なお、本調査は

+3 帰路のバスの中で収集した

+4 解散時に配布し、2019年12月9日までにたかなわ子どもカレッジまたは高輪子ども中高生プラザ受付までの持参をお願いした

たかなわ子どもカレッジが実施し、了承を得た後、本稿での使用に至る。

### 3.1 子ども向けアンケート

全6問で構成されており、重要視している設問は自由記述欄が設けられている。以下の3問が自由記述である「このキャンプに参加した理由」、「何が楽しかった？楽しくなかった」、「今後、どのような体験プログラムをしたいか？」。その他、「満足度」は5段階評価、「食事」及び「大学生と一緒にいけるかどうか」は4段階評価である。

### 3.2 保護者向けアンケート

全7問で構成されており、行事に関する情報入手先から今後のプログラムまで設問内容は多岐に渡る。最初の2つの質問は宿泊行事前の事柄として、「行事を知った媒体」（4項目より該当項目へのチェック）、「宿泊研修前、保護者が子どもに期待した事柄」（11項目より選択）がある。次に、「保護者の満足度」及び「子どもの変容」を4段階評価と自由記述である。最後に子ども向けアンケート同様に、今後のプログラムについての自由記述欄が設けられている。

## 4. アンケート調査結果

### 4.1 子ども向けアンケート

最初の設問は、自由記述の「このキャンプに参加した理由」である。諸種の理由であるが、「面白そうだったから」「楽しそうだから」「お泊りが好き」「船に乗れるから」「水族館にいける」「親と離れてのキャンプだから」などであり、プログラム内容に興味を持って参加したように見受けられた。

参加者の満足度は、5段階評価で一番高くとても楽しかったが21名であり、その内1名は「楽しすぎた来年もあつたら絶対行きたい」と設問の横に記されていた。残りの1名はくふつうに記しが付けられていた（Table 4 参照）。「何が楽しかった・楽しくなかった」の理由（自由記述）では、「みんなと風呂に入ったり、とにかく色々な事が楽しかった」「全部」「夜の水族館」「船に乗ったこと、お土産、お泊り（全体的に楽しかった）」「お部屋で新しい友達と遊べたこと、船を見学したこと、海に行ったこと」など挙げられていた。

キャンプ中の食事については、くとてもおいしかったが19名、くおいしかったが2名、そしてくふつうが1名の結果であった（Table 4 参照）。

大学生と一緒にいけるかどうかでは、くとてもよかったが19名、くよかったが2名、そしてくふつうが1名であった（Table 4 参照）。

最後の設問は、「今後、どのような体験プログラムをしたいか（自由記述）」とした。「親と離れてキャンプしたい」「キャンプやバスハイクに行きたくて楽しい一日を過ごしたい」「バーベキューやマッシュマロ焼き、夜の映画館」「富士山に登りたい」「山形で鮎の掴み取り」「また、大学生と行きたい」「スキー・スケート」「3泊4日が良い」「何かの体験」「動いている船に乗りたい」「望星丸のエンジンルーム」と1問目同様に様々な意見が収集できた。

Table 4 The Scale Questions for Children (N=22)

参加者の満足度	
21	とても楽しかった
0	楽しかった
1	ふつう
0	あまり楽しくなかった
0	全然楽しくなかった
キャンプ中の食事	
19	とてもおいしかった
2	おいしかった
1	ふつう
0	まずかった
大学生と一緒にいけてどうだった	
19	とてもよかった
2	よかった
1	ふつう
0	あまりよくなかった

#### 4.2 保護者向けアンケート

最初の設問では、本プログラムの広報認知度である。「この行事の企画を何で知りましたか（複数回答可）」は、1) カレッジ通信3名、2) ポスター掲示1名、3) チラシ3名、4) 口コミ0名、「学校からも配布されました」と別記もあった。

選択設問である「宿泊研修前、保護者が子どもに期待した事柄（複数回答可）」では、いろいろな体験が100%を占め、友達づくり、友達との交流・異年齢集団交流と続いた（Table 5 参照）。

保護者の満足度調査（4段階評価）では、<とてもよかった>が3名、<よかった>が2名となり（Table 6 参照）、その理由（自由記述）では、「自宅に戻ってから、行事中にあった出来事を次から次へと楽しそうに話しておりました」、「普段入ることができない大学のキャンパス（船）や夜の水族館などに大学の先生・生徒の方々と一緒に行くことができた」、「短すぎてもっと泊まりたかったと言っていたので、ととても楽しかったようです」などが記入されていた。

子どもの変容調査は4択とし、その理由は自由記述とした（Table 6 参照）。4段階中上位2つの<期待通りに成長>が3名（「友達どうし仲良く楽しく過ごせたようで良かった」）、<まあ成長>が2名（「荷物は整理できていなかったが、忘れ物がなく持ち帰れたので自立性が育ったと思う」）であった。

最後に「今後、どのような体験プログラムを希望されていますか」の次回へと繋がる設問を設けた。「普段行けないような場所で、気づきがあるような楽しいプログラム」、「大学生と一緒に体験できるプログラム。宿泊や遠足は家族ではなく、友達や先生と行くことで新しい出会いや色々な経験する事により成長できると思う」、「J-Crew プロジェクトのDVDを観ており、船舶関係に興味があった」などの答えが得られた。この3つの回答は、今回のプログラム自体が示唆されているが、今後も同様の「海洋」をテーマと

したプログラムが求められているのではないかと示唆される回答であった。

Table 5 What Parents Expected of their Children before the Program (N=5)

回答数	設問
5	いろいろな体験
4	友達づくり、友達との交流
4	異年齢集団交流
2	協力しあう心、協調性の向上
2	積極性、自主性の向上
2	強い精神力、忍耐力向上
3	集団行動体験（社会性の会得）
3	自立心育成
2	自律心向上
3	優しさや思いやりの醸成
0	「期待する事」は特にない

Table 6 The Scale Questions for Children (N=5)

満足度	
3	とてもよかった
2	よかった
0	ふつう
0	よくなかった
子どもの変容	
3	期待以上に成長
2	期待通りに成長
0	まあ成長
0	変化はみられない

#### 4.3 学生向けアンケート<sup>+5</sup>

たかなわ子どもカレッジが引率補助をした大学生に対し、「子どもと関わる活動についてのアンケート」を行った。本アンケートは、全7問で構成されており、<はい・いいえ・どちらでもない>の回答に対しての理由を記載する設問体系である。なお、参加した6名全員より無記名でのアンケート回答を得た。

最初の設問である「子どもたちと関わる活動は楽しいですか」は、全員が<はい>と答え、その理由として「子どもが好き、一緒に盛り上がることができると楽しい、色々な子どもたちの姿をみるのが楽しい、同年代の弟が居て関わることが楽しい」である。次に「子どもたちと関わる活動は自分のためになっていると感じますか」でも全員が<はい>と回答した。その理由は、「心が豊かになりそう、人に優しくなれそう、子どもたちと関わるのが新しいことに気付ける、子どもの目線ならではの観点を知れるので楽しい、自分も学べる事が多い、子どもがどんな事が好きなのか知れる、将来的に自分の子どもに対する言動の基礎になる」である。「実際に子どもたちに関わって困ったことや疑問に思った事」の設問では、「子どもたちのしている危ないことをどこまでいったら止めるべきか、氏名を覚えるのが難しかった、子どもとの距離感が難しい、一度に話しかけられたときの対処が難しい」と引率補助としての責任感を感じさせる回答が見受けられた。「今後も機会があれば子どもたちと関わりたいですか」でも、全員が<はい>と回答した。最後に「子どもたちと関わっての感想」では、「子

<sup>+5</sup> 子どもと関わる活動についてのアンケート：たかなわ子どもカレッジが東海大学の学生用に作成したアンケートであり、授業や共催プログラム後に収集されている

どもと関われる場をありがとうございます、子どものテンションが上がるポイントが予想と異なっていて驚いた、若さから元気がもらえた」などの回答である。

## 5. 考察

行事企画名を「海洋調査研修船「望星丸」を見に行こう」と明確な目的を記したことで、「海洋」に意識が高い小学生が集まった。事前説明会では、概要・目的、宿泊・食事施設の他、望星丸について（教育・研究活動）、「海のはくぶつかん」としての海洋科学博物館、水圧と水深についての講話を含め、参加者・引率者全体が集った事で、保護者への理解も高く「教育プログラム」としての意義を持つことができたように思われる。事前説明会終了時には、「親子で参加するプログラムには成りえないでしょうか」との質問を受け、親子を対象にしても「海洋」のテーマは需要があるのではないかと感じた。

本アンケートで得られた肯定的結果には、外的要因が大きく関係していると考えられる。実施した1泊2日は冬晴れの好天に恵まれ、12月にも関わらず海水に触る事もできた。また、参加者に22名対して引率者が11名と非常に多く、参加者が1人で行動するなど寂しい気持ちになる事は無かったと思われる。望星丸の船内では、多くの練習生が全ての行動に対してサポートをし、下船時には船外まで出て見送りをしてくれた。プログラム全体としても当初の予定通り、人混みも慌ただしい時間もなく、非日常的な環境で多くの大人に囲まれて、ゆっくりゆったりのんびりと過ごすことができた。

参加者の年齢層は、高学年が多いと予想していたが、それに反して最低学年の小学校3年生が半数の12名、そして4年生が6名を占めた。従って、全ての行動は3年生の体力、行動力に合わせざるを得なかった。最上級生の6年生4名にとっては、少し物足りないプログラムであったと推測されるが、食事の準備・片付け、布団の出し入れ、就寝・起床、集合・出発等において模範的かつ下級生をリード・サポートする姿が多く見受けられ、3・4年生にとって大きな存在であった事は間違いないだろう。また、引率者側にとっても非常に頼れる6年生の存在であった。

問題点の1つとして移動時間が挙げられる。往路・復路共に移動時間は十分に確保していたが、天候が良かった事もあり、思いのほか交通渋滞がひどかった。しかし、訪問先は本学が有する「望星丸」であり、事務長に事情を伝え臨機応変に対応して頂くことができた事は、スクールメリットの1つである。勿論、本学最寄りの品川駅より東海道新幹線で静岡駅、そして清水駅の交通手段も思案したが、金銭的、現地での交通手段的、そして何より多くの小学生を引率する場合において最適手段とは考えにくい。今後は、出発時間を早める事で可能な限り渋滞を回避する事を踏まえたスケジューリングを提案する。次の問題点は予算である。本プログラムは、幾つかの組織が連携した事業の一環である。つまり、参加者の自費清算ではなく、区の補助金等を含めた上での清算をしなければならない。また、宿泊行事における区の参加費が設定されており、より良いプログラムを提案したとしても予算超過する場合はプログラムの取捨選択をせざるを得ない。

最後に本アンケート調査であるが、数的評価としては十分なサンプル数とは言えないが、宿泊行事（体験活動）そのものを評価する事も難しい<sup>13)</sup>。本研究の目的は数値的評

価ではなく、プログラムの妥当性また教育的効果の認識であり、参加者、保護者、そして学生の率直な回答・意見を率直に捉えたい。

### 5.1 子ども向けアンケートより

「船・水族館（魚）・海」のキーワードが複数回挙げられており、本プログラムの企画に合致した満足感が得られたことが確認できた。食事及び大学生の同行の質問からは、大勢で食事や行動を共にすることが少ない現代の子どもたちを象徴しているように思われた。

アンケート全体としては、全体的に肯定的な結果を示す中、1名のみが全ての段階の評価にて「ふつう」を記し、最後の自由記述設問では、「気が向いたら」と書き込んでいた。あくまでも「ふつう」であり、否定的な意見・記述ではないが気になる回答ではあった。

### 5.2 保護者向けアンケートより

本プログラムの情報は、カレッジ通信及びチラシで得た事が明確になり、高輪地区で子ども向け企画の広報は、なかなか子どもカレッジからの情報（カレッジ通信及びチラシ）が有意である事がわかった。

保護者の期待は、「いろいろな体験をさせたい」が多く非日常的、或いは珍しい体験プログラムを期待している事がわかった。また、友達（異年齢）との交流、集団行動体験も期待度が高く、核家族化が著しい高輪地区ならではの回答と示唆される。

参加者の満足度が高かった事が保護者としても満足度の肯定に繋がったと思われる。保護者としては当然の事かもしれないが、子どもが笑顔で帰宅し、2日間に渡っての出来事を話してくれる事が何よりも保護者の満足感であると考えられる。

今後のプログラムに関しては、子ども同様に様々ではあるが、特殊性を持ったプログラムに興味がある事がわかった。「船舶関係に興味がある」と回答されていた保護者の最後は、「今は船員になりたいと言っています」で締めくくられている。影響を受けやすい子どもだからこそ、様々な体験を得て、夢を現実へと中長期的に発展する「経験」に繋がっていく事を切に願う。

### 5.3 学生向けアンケートより

本プログラムが大学生へ与える教育的効果は、アンケートの回答からも垣間見えた。今後、引率補助を体験した大学生に本プログラムの本質的な教育的効果が多く表れると思われる。本プログラムの趣旨に賛同して参加している大学生であるが故に、肯定的な回答が得られる事は当然の事である。しかし、大学生自身が子どもたちと接する中で、色々と考え、悩んでいた事がわかった。まず、子どもたちと関わることで「心が豊かになりなりそう、人に優しくなれそう」との回答は情操教育的効果の表れだと考える。「子どもたちのしている危険な行動をどこまでいったら止めるべきか」の回答の中には、学生の心の格闘が見え隠れしている。その場の状況によって「取るべき行動」、つまり正解は異なってくるであろう。全てを管理するのではなく、危険の範囲を見定め、「どこまでいったら止めるべきか」を勘案し、事故や怪我へと至る前に行動を止めさせる状況判断は非常に難しい。リスクマネジメント上の危機管理や事故防止も経験に裏付けされる事も多々ある。つまり、怪我や事故に限らず、自らが触れ、体験し、理解する事を通して

学び取る参加型の学習法（実学）である<sup>14)</sup>。

小中学校での集団宿泊活動の日数縮小、或いは中高等学校での課外活動（合宿）の減少、更には核家族化等の現状を踏まえると、現在の大学生にとっても集団宿泊研修は重要な意味があり価値が高いと思われる。ある程度の責任を持った立場（補助）で参加することによって社会性が得られる他、協調性、規範意識、人間関係構築力、問題解決能力等の多種雑多な「生きる力」を育むと共に高める事ができる「実学」へと繋げる事が可能となる<sup>15)</sup>。従って、大学生には青少年・少女団体の諸活動に参画し、異年齢集団等の中で多くの人と接する「実学」を通じて、多様な学びを深める事を強く推奨する。

## 6. まとめ

地域と連携して実施した「東海大学清水キャンパス宿泊行事〈海洋調査研修船「望星丸」を見に行こう〉」を振り返ると共に、参加者・保護者のアンケート調査から体験プログラムの妥当性及び今後のプログラム、そして引率補助学生からも教育的効果を確認する事ができた。参加者からは、多くの肯定的な意見が見られ、保護者の満足度も有意であった。また、保護者は様々な体験を友人と共にさせたいと願っている事もわかった。このようなプログラムは参加者のみならず、引率者側を担当した大学生にも多くの事柄を学ぶ「実学」の場としての重要性も認識できた。そして何よりも喜ばしい事は、参加者・引率補助者・引率者の全員が病気や怪我も無く、元気に笑顔で助け合いながら1泊2日を過ごせた事である。今後も東海大学のスクールメリットを活かし高輪地区の子どもたち及び保護者に対して「専門的なテーマを学ぶ機会を提供」できるよう関係各所と協働して、より良い「教育体験プログラム」を展開していく予定である。

## 7. 謝辞

今回のプログラムは、関係各所の協力体制無しでは実施が考えられない。たかなわ子どもカレッジ、港区立高輪子ども中高生プラザ、そして引率補助として2日間子どもの生活面を担当した Takanawa 共育プロジェクトの学生。現地での受け入れサポートにご尽力頂いた東海大学清水キャンパス清水事務課企画調整担当の石田課長と課員の皆様、望星丸の見学については、船舶管理室の野陳課長、玉井技術員、住吉望星丸事務長、当直乗組員、そして海洋学部航海工学科航海学専攻の学生諸君、東海大学海洋科学博物館の皆様。本企画に関してのアドバイス頂いた東海大学地域連携センター地域連携課の近藤課長補佐、最後に企画立案から引率まで全面的に協力して頂いた高輪キャンパス地域連携推進委員会に厚く御礼する。

## 参考文献

- 1) 小学校 学習指導要領（平成29年告示）文部省  
[https://www.mext.go.jp/content/1413522\\_001.pdf](https://www.mext.go.jp/content/1413522_001.pdf)（2020.3.13 閲覧）

確認)

- 2) 三田雅江・梁川正，“栽培経験を通じた「生きる力」の育成 京都教育大学環境教育実践センターにおける小学生の親子を対象とした栽培体験教室での活動から，” 京都教育大学環境教育研究年報, 23, pp.69-77, 2015  
<https://www.kyokyo-u.ac.jp/cee/23-7.pdf>（2020.3.13 閲覧確認）
- 3) 吉原さちえ・知念嘉史，“学生有志による地域の子どもたちを対象とした遊びの活動—6年間の活動の振り返りと今後の課題—，” 東海大学体育学部紀要, 第48号, pp.47-57, 2018  
[https://www.u-tokai.ac.jp/academics/undergraduate/physical\\_education/kiyou/pdf/2018\\_048/06.pdf](https://www.u-tokai.ac.jp/academics/undergraduate/physical_education/kiyou/pdf/2018_048/06.pdf)（2020.3.13 閲覧確認）
- 4) 長崎食育学, 長崎女子短期大学  
<http://www3.nagasaki-joshi.ac.jp/~web10la/30/>（2020.3.13 閲覧確認）
- 5) 公益財団法人 山形県生涯学習文化財団 山形生涯学習センター>遊学館>地域学へのいざない>「山形学」への招待  
[https://www.gakushubunka.jp/yugakukan/chiikigaku/chiikigaku\\_shotai.html](https://www.gakushubunka.jp/yugakukan/chiikigaku/chiikigaku_shotai.html)（2020.3.13 閲覧確認）
- 6) 北濱幹士・宮川幹平，“特別講座「宗像学」の報告，” 東海大学短期大学紀要, Vol.50, pp.87-91, 2016
- 7) 北濱幹士・宮川幹平・八尋剛規，“特別講座「宗像学」の報告2，” 東海大学短期大学紀要, Vol.51, pp.1-8, 2017
- 8) 小学校長期宿泊体験活動推進プロジェクト 5年間の取組と成果～モデル校の事例をもとに～ 岡山県教育庁義務教育課 平成31年2月  
[https://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/590681\\_4929755\\_misc.pdf](https://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/590681_4929755_misc.pdf)（2020.3.13 閲覧確認）
- 9) 「小中学校集団宿泊活動に関する全国調査」報告書〔概要〕 国立青少年教育振興機構 平成31年3月  
[https://www.niye.go.jp/kanri/upload/editor/136/File/report\\_summary.pdf](https://www.niye.go.jp/kanri/upload/editor/136/File/report_summary.pdf)（2020.3.13 閲覧確認）
- 10) 北濱幹士，“地域・キャンパス・学生・教職員間連携交流活動の報告，” 東海大学紀要情報通信学部, Vol.12, No.1, pp.49-52, 2019  
[https://www.u-tokai.ac.jp/academics/undergraduate/information\\_and\\_telecommu/kiyou/index/pdf/vol\\_12\\_001/PP49-52.pdf](https://www.u-tokai.ac.jp/academics/undergraduate/information_and_telecommu/kiyou/index/pdf/vol_12_001/PP49-52.pdf)（2020.3.13 閲覧確認）
- 11) 集団宿泊活動サポートガイド，“教科等の学習に関連付けることで高まる集団宿泊活動の教育効果，” 国立青少年教育振興機構, 平成30年  
[https://www.niye.go.jp/files/items/877/File/supportguide\\_180119.pdf](https://www.niye.go.jp/files/items/877/File/supportguide_180119.pdf)（2020.3.13 閲覧確認）
- 12) 石村秀登，“「体験的な学習活動」に関する一考察—体験と経験の可能性—，” 熊本県立大学文学部紀要, 第16巻, pp.77-87, 2010
- 13) 時代・明石要一，“体験活動の効果及び評価のあり方に関する一考察 —子どもの体験活動事例を追って—，” 千葉大学教育学部研究紀要, 第59巻, pp.167-173, 2011
- 14) 松前達郎：「雑記帖 自然・文明・教育・外交をめぐる」, 松前達郎の会, 昭和59年発行, pp.64
- 15) 山本俊光，“子ども向け宿泊型農業体験プログラムに参加した若者の社会性，” 甲子園短期大学紀要, Vol.35, pp.9-16, 2017

# ベイジアンネットワークと行動生起確率による 行動認識方法の提案とその評価

竹中 一秀<sup>\*1</sup>, 撫中 達司<sup>\*2</sup>

## Proposal and Evaluation of Life Activity Recognition Method based on a Bayesian Network with Activity Occurrence Probability

by

Kazuhide TAKENAKA<sup>\*1</sup> and Tatsuji MUNAKA<sup>\*2</sup>

(received on Mar. 23, 2020 & accepted on Jun. 8, 2020)

### あらまし

認知症患者の増加は大きな社会問題となりつつあるが、初期段階であれば薬の投与により症状進行の遅延が可能であり、早期発見が重要となる。認知症の発症は、同居者が生活の変化により気づくことが多いが、一人住まいの高齢者の場合、その発見は非常に困難となる。本研究は、高齢者の日常生活動作の変化を発見するための行動認識を目的とする。まず、センサデータによってモデル化されたベイジアンネットワークにより行動の候補を推定する。次に、前後の行動の関連性の強さを表現した行動生起確率を用いて行動を特定する。本稿では、ハイブリッド型の行動認識方法の提案と、その評価結果について報告する。

### Abstract

The increase in dementia is becoming a social problem. However, early detection is essential because the administration of drugs can delay the progression of symptoms in the early stages. It is often found when a cohabitant notices a change in daily life. However, it is difficult for elderly people who live alone. The purpose of this study is to detect the change by monitoring the daily life of the elderly. We firstly recognize activities by the Bayesian network modeled by collected sensor data. Then, an activity is identified using the activity occurrence probability calculated by daily life. In this paper, we propose the method and show the evaluation results.

**キーワード:** 認知症の早期発見, ベイジアンネットワーク, オントロジー, 行動生起確率表

**Keywords:** Early detection of dementia, Bayesian networks, Ontology-based modeling, Activity occurrence probability

## 1. はじめに

近年、日本の認知症患者は増加傾向にある。2025年には700万人に達すると言われており、65歳以上の人口の約20%になると予想されている<sup>1)</sup>。認知症は初期の段階であれば薬の投与により症状の進行を遅らせることが可能であり、このため早期発見が重要になる。早期発見のためには、認知症の発症により生じる生活の変化を検知することが重要である。高齢者の身体能力や日常生活レベルを測るための重要な指標としてADL(Activities of Daily Living)とIADL(instrumental ADL)がある。ADLは日常生活における基本的な「食事、更衣、排泄、入浴、起立」などの動作のことを指す。またIADLはADLよりも高い自律した日常生活をするための動作であり、「料理・掃除・買い物などの家事、交通機関の利用、電話対応などのコミュニケーション、趣味」などの複雑な日常生活動作のことを指す。この2つの指標となる生活行動を認識し、評価することは高齢者の生活を見守る上で重要とされている<sup>2)3)</sup>。例えば、認知症の症状である物忘れの影響で食事の回数が増えるといったケースである。規則正しく日に3回食事を取っていた高齢者が、認知症による物忘れが進み、食事をしたことを忘れることで

食事の回数が増える。本稿ではADLとIADLを対象とした行動認識手段として、日々の生活のセンサデータによってモデル化されたベイジアンネットワークにより行動の候補を推定し、前後の行動の関連性の強さを表現した行動生起確率を用いて、行動の特定を行う方法を提案し、その評価結果につき報告する。

## 2. 先行研究

Rafferty<sup>4)</sup>らは、行動認識手法のアプローチをData driven approachesとKnowledge driven approachesに大別している。Data driven approachesは、Generative approachesとDiscriminative approachesに分類される。Generative approachesは、収集したデータを用いてモデルを作成する方法であり<sup>5)9)</sup>、代表的なものとしてベイジアンネットワークやHMM(Hidden Markov Model)がある。Discriminative approachesは、収集したデータにラベルを付け、識別対象を分類する方法であり<sup>10)13)</sup>、代表的なものとしてSVM(Support Vector Machine)やK-NN(K-nearest neighbor algorithm)などがある。

一方、Knowledge driven approachesはLogical based approachesとOntological approachesに分類されており、Logical based approachesはドメインの知識を収集して、行動とそのパフォーマンスを論理表現した知識モデルを定義する。推論アルゴリズムにより、事象を知識モデルにマッピングし、発生する行動を判断する。実現方法として、主にEvent Calculus等の手法が使用される。

\*1 情報通信学研究科

Graduate School of Information and Telecommunication Engineering

\*2 情報通信学研究科 教授

Graduate School of Information and Telecommunication Engineering, Professor

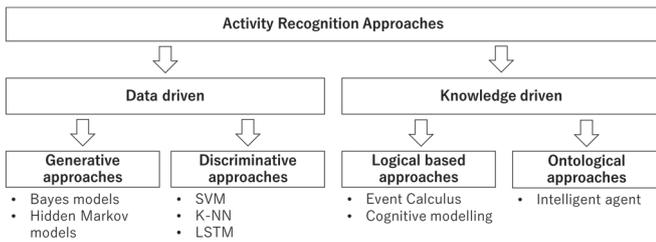


Fig. 1 Activity Recognition Approaches

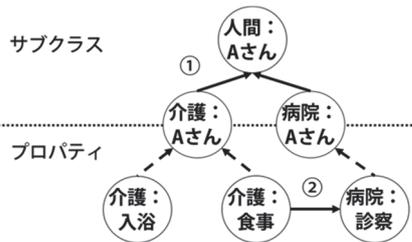


Fig. 2 Example of an ontology model for an elderly person

Ontological approaches はドメインの知識を収集して、行動を概念とクラスの階層に構造化する。概念とクラスにはプロパティ、関係、制限事項を設定することができるため、推論と知識抽出が可能である。オントロジーの利点は、行動表現（ルール）の再利用が可能なことであり、Logical based approaches のように厳格な行動表現を用いることにより直面する柔軟性の問題を解決することができる。一方で、不確実性の表現や個人化を提供する比較的厳格なモデリングは難しい (Fig. 1)。

ここで、オントロジーとは「概念化の仕様」として提唱されたデータの表現方法の1つである<sup>14)</sup>。独立したデータ間の関係をグラフ構造で明らかにすることにより、コンピュータがデータを知識として解釈し、より高度に活用することを実現する。例えば Fig. 2①の様[人間:Aさん]のサブクラスとして[介護:Aさん]と[病院:Aさん]を紐づけると、それぞれが独立したドメインである介護施設と病院それぞれで管理していた入浴、食事のデータや診察のデータを同一人物のデータであると意味的に表現することができる。また、これにより②の様に診察において食事に関するデータを参照(共有)するといった活用が可能になる。W3Cでは Web 上でデータの利活用を目的として、オントロジーを記述する為のフレームワーク RDF(Resource Description Framework)<sup>15)</sup>や RDF で用いる用語や関係を定義した OWL(Web Ontology Language)<sup>16)</sup>を規格化している。これらは具体的に RDF/XML や Turtle といった形式で記述され、その処理系として Python では RDFLib<sup>17)</sup>、Java では Apache Jena<sup>18)</sup>などが提供されている。

行動のオントロジー構築に関する研究として、中村ら<sup>19)</sup>はライフログサービス向けに高次行動を抽出する基盤の構築を目的として、低次行動や環境音、場所など様々な情報の組合せを高次行動として紐づけ記述するオントロジーを定義している。例えば、“映画を見ている”という高次行動は、低次行動として“座っている”、環境音として“音楽が流れている”、場所として“映画館にいる”という情報と紐付けることで表現される (Fig. 3)。しかし、この場合“映画を見ている”という高次行動は、“寝ながら、立ちながら、

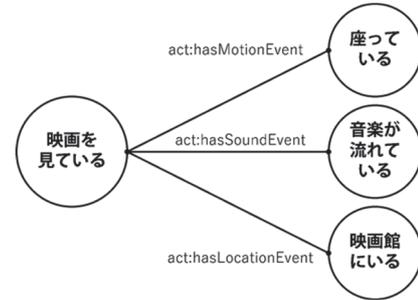


Fig. 3 Example of an ontology model for extracting activities

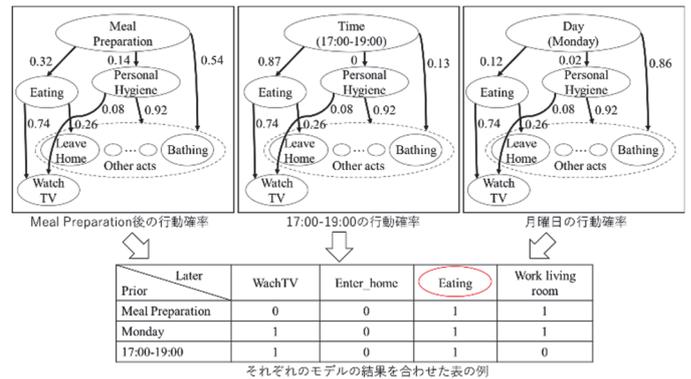


Fig. 4 Activity Recognition method using a Bayesian network

歩きながら”など様々な状況が想定され、また自宅にいらなくても行えるため必ずしも場所を“映画館”と限定することはできず、高次行動を表現するための低次行動の組合せは、個々の利用者に依存して無数に存在することから実用的なオントロジーを構築するには、その目的に応じて低次行動の組合せの定義を行う必要がある。中村らは、対象者の限定、あるいは ADL や IADL などの行動の限定をしておらず、また概念の提案のみであり、オントロジーの構築までは至っていない。

Wu ら<sup>20)</sup>は、スマートホームシステムがユーザを支援するためにどのようなサービスを提供するべきかという問題に対して、ユーザの行動を把握することを目的として Generative approaches のベイジアンネットワークを用いた行動認識に取り組んでいる。この方法では、「ある行動の後の行動」、「範囲時間内での行動」、「曜日内での行動」の確率をそれぞれ算出し、それらを条件付確率として用いて3つのベイジアンネットワークを作成する。それぞれに発生する確率が高い行動を抽出し、その結果を合算して、数多く示された行動を選択する (Fig. 4)。評価実験では CASAS(Center for Advanced Studies in Adaptive Systems)プロジェクト<sup>21)</sup>のデータセットを用いて、「日(曜日)」、「時刻」、「場所」の3つのパラメータを追加してモデル構築を行い、ある行動の次に起こる行動の予測において認識率 81.3%を達成している。この手法の課題として、記録された情報「日(曜日)」、「時刻」、「場所」が類似する行動、あるいは前後に発生する行動の関係性がなく、習慣として表現できない行動は判別が難しいことがあげられる。例えば、TV を見るという行動は前後に発生する行動とは関連性が少なく、また個人によって発生する日(曜日)、時刻が異なるという特性を持つ。Wu らの結果は、Rafferty<sup>4)</sup>らが示している、センサデータを用いた行動認識である Data driven approaches

Table 1 Examples of activities having similar recorded information

	時刻	時間	曜日	場所	月
テレビ視聴	12:00	30分	日	リビング	10月
食事	12:00	30分	日	リビング	11月

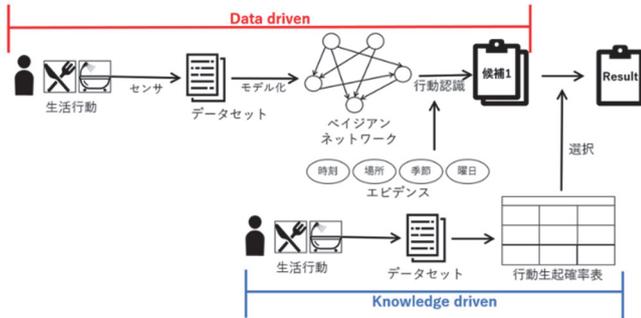


Fig. 5 Overview of the proposed method

だけではある程度以上の認識が難しいという指摘に合致した結果となっている。

本研究では、Data driven approaches としてベイジアンネットワークを用い、その結果に対して Knowledge driven approaches として行動間の関係性を数値化した行動生起確率を適用するハイブリッド型の認識方法につき提案する。

### 3. ベイジアンネットワークと生活行動習慣(行動生起確率)を組合せた行動認識方法

#### 3.1 提案方法の概要

本研究の提案方法では、まず Data driven approaches の一つであるベイジアンネットワークを用いて、発生した可能性が高いと推定される行動の候補を挙げる。次に Knowledge driven approaches である行動の習慣を表現した行動生起確率を用いて、複数の候補の中から行動を特定する (Fig. 5)。例えば、音、加速度などのセンサを用いて収集されたデータを用いてモデル化されたベイジアンネットワークによって「食事をする」、「テレビを見る」という2つの候補が抽出されたとする。この際、「料理した後はすぐに食事をする」という対象者の生活行動習慣を表現した行動生起確率を用いれば、「料理した」後に高い確率で現れる「食事をする」が特定可能となり (Fig. 6, Fig. 7)、行動認識の精度を高めることが期待できる。

#### 3.2 ベイジアンネットワークによる行動認証

「年」、「季節」、「曜日」、「時間」、「時刻」、「場所」、「行動」の情報を持つデータセットを用いて、ベイジアンネットワークを構築し、同じデータセットを入力データとして用いて行動の起こる確率を求め、実験の結果設定した閾値 30%を超えた行動を候補とする。

#### 3.3 日常生活行動のオントロジー

日常生活の行動の習慣を知識とするために、まずは生活において習慣として行なわれる行動をオントロジーとして表現した。公開された生活行動のオントロジーが存在せず、このため本評価では手作業で日常生活行動のオントロジーを作成した。まず ADL に定義されている主要な行動、例え

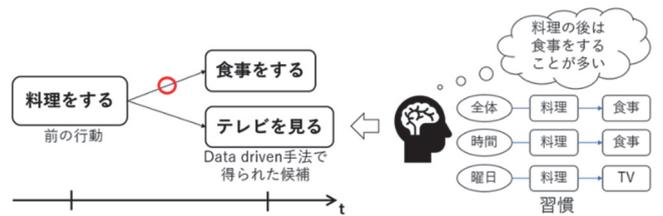


Fig. 6 Activity recognition method based on personal habits

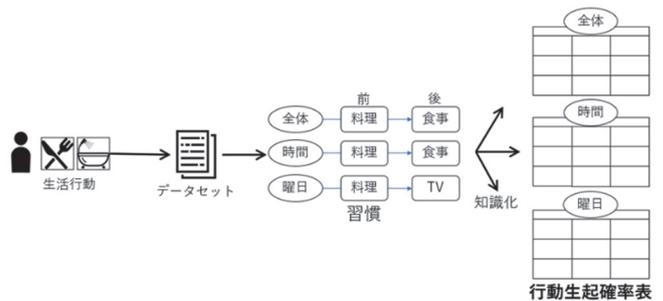


Fig. 7 Activity Occurrence Probability of ontology model

食事		調理		食事をする		洗い物	
目的	食事	目的	調理	目的	食事	目的	洗い物
行為	調理	行為	調理、用意	行為	食事	行為	食器を洗う
前の行為	調理	前の行為	調理、用意	前の行為	調理、用意	前の行為	食事
後の行為	食事	後の行為	洗い物、歯磨き、排便	後の行為	洗い物、歯磨き、排便	後の行為	洗い物
時間	朝、昼、夜	時間	朝、昼、夜	時間	朝、昼、夜	時間	—
場所	キッチン	場所	キッチン	場所	キッチン	場所	キッチン
①冷蔵庫から食材を取り出す		料理を食べる		①水を出す			
目的	食事	目的	食事	目的	食事		
行為	調理	行為	食事をする	行為	食器を洗う		
作業	①冷蔵庫から食材を取り出す	作業	料理を食べる	作業	水を出す		
時間	朝、昼、夜	時間	朝、昼、夜	時間	朝、昼、夜		
場所	キッチン	場所	食事	場所	キッチン		

Fig. 8 Example of an ontology description of daily activities

ば「食事」を階層構造のルートに配置し、その行動の前後に発生する行動となる「調理」、「食事をする」、「洗い物」などを階層化して詳細化した (Fig. 8)。作成に際しては、農作業に関する幅広い知識を持つ農作業オントロジー AAO (Agriculture Activity Ontology) <sup>22)</sup>を参考とした。AAO は AGROVOC と呼ばれる農林水産、食糧、環境などの専門用語を 32,000 語以上網羅する世界標準のシソーラスデータや内閣府が農作物名称の標準化のために提案したガイドラインをもとに語彙の追加や階層構造の修正を施し構築されたオントロジーである。

#### 3.4 行動生起確率による行動認証

行動生起確率は、一般的な知識として作成したオントロジーから行動の発生順序を抽出し、後述する CASAS のデータセットに記録された行動順序に基づき求めた。行動生起確率は、発生した行動の次に発生する行動の確率を示しており、行動間の関係性の強さを表現したものになる (Fig. 7)。

オントロジーに対応する「全体」の表は過去に行われた行動が記録されているデータセットのすべてを範囲として行動の生起確率を算出した。「時間」の表は一定時間ごとに、「曜日」の表は曜日ごとに行動の生起確率を算出し、それをまとめたものである。Table 2 は CASAS のデータセットすべてを用いて作成した全体の行動生起確率表である。

Table 2 Activity Occurrence Probability Table calculated by CASAS data set

後に起きる可能性のある生活行動

	Bathing	Bed_Toile	Eating	Enter_Hor	Leave_Ho	Meal_Pre	Personal_	R1_Sleepi	R2_Sleepi	Wash_Dis	Watch_TV	Work_Bed	Work_Bed	Work_Livi	Work_Tab	Yoga	横合計
Bathing	2.487562	0	5.472637	0	2.487562	5.472637	36.81592	3.482587	1.492537	0	2.985075	5.472637	31.34328	1.492537	0.497512	0.497512	100
Bed_Toile	5.960265	32.45033	3.311258	0	0	7.284768	34.43709	1.986755	0	0	0.662252	0.662252	11.92053	0.662252	0	0.662252	100
Eating	2.985075	0.895522	0.597015	0.298507	5.970149	2.985075	18.80597	0.298507	0	5.970149	12.53731	3.58209	11.64179	20	12.83582	0.597015	100
Enter_Hor	0.917431	0	1.834862	1.834862	1.834862	13.76147	23.85321	0.917431	0	0	11.92661	5.504587	11.00917	12.84404	13.76147	0	100
Leave_Ho	0.877193	0	0	92.10526	0.877193	0	0	0.877193	0.877193	0	0.877193	0.877193	1.754386	0	0.877193	0	100
Meal_Pre	1.36612	31.96721	0	0.819672	1.36612	11.20219	0.273224	0	0	7.103825	9.562842	8.469945	16.66667	10.92896	0.273224	0	100
Personal_	5.39484	0.156372	5.009909	0	1.79828	6.645817	24.62862	4.612979	1.016419	1.094605	1.954652	8.9914	29.47615	4.691165	4.222048	0.312744	100
R1_Sleepi	0.729927	0.729927	0	0.729927	0	0.729927	8.029197	0	66.42336	0	0.729927	0.729927	21.16788	0	0	0	100
R2_Sleepi	1.526718	71.75573	0	0	0	1.526718	19.84733	1.526718	0	0	0	0	3.816794	0	0	0	100
Wash_Dis	2.816901	0	0	0	1.408451	2.816901	21.12676	0	0	8.450704	5.633803	9.859155	2.816901	45.07042	0	0	100
Watch_TV	0.938967	0	13.61502	0	3.755869	15.49296	18.30986	1.408451	0.469484	2.347418	0.938967	3.286385	22.06573	1.877934	15.49296	0	100
Work_Bed	1.221996	0	2.03666	0	1.221996	4.887984	25.05092	2.443992	0.203666	0.610998	1.832994	12.42363	36.65988	3.665988	7.739308	0	100
Work_Bed	5.998357	0.164339	3.204601	0	1.396878	4.437141	29.58094	3.697617	1.643385	0.575185	2.711586	13.31142	24.65078	3.122432	5.423172	0.082169	100
Work_Livi	0.905797	0	8.152174	0	2.173913	10.68841	11.41304	0	0	0.543478	4.166667	3.985507	5.072464	37.5	15.03623	0.362319	100
Work_Tab	1.49925	0	1.649175	0	2.548726	7.796102	10.34483	0.149925	0.149925	2.848576	3.298351	7.946027	11.54423	10.94453	39.13043	0.149925	100
Yoga	0	0	0	0	0	15.38462	15.38462	0	0	0	23.07692	0	15.38462	30.76923	0	0	100

前に起きた生活行動

Table 2 の実線○で囲った部分は、「Meal\_Preparation」の後に発生する「Eating」の確率が約 32%であることを示している。行動生起確率による行動認証は、ベイジアンネットワークにより推定された複数の候補の直前行動との関係性が強い、すなわち行動生起確率の高い行動を選択する。

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 実験に用いるデータセットとソフトウェア

データセットはワシントン州立大学の CASAS プロジェクト<sup>21)</sup>のものを使用した。ベイジアンネットワーク構築はニュージーランドのワイカト大学で開発されたソフトウェアである Weka<sup>23)</sup>を用いた。CASAS プロジェクトのデータセットには R1, R2 と記載された 2 名が大学内の評価施設に実際に 6 ヶ月間生活した際のデータが記録されており、日付、時刻、センサ名、センサ値、行動ラベル、行動状態 (begin・end) が含まれている。記録された行動ラベルは Table 3 に示す 16 種類である。なお、2 名の行動の区別ができるのは決められたベッドを使用した場合のみであり、その他の行動は区別ができない。データセットの中には、同じ行動が続けて記録されているが、これは異なる人物が順番に行ったのか、ある時間間隔をあけて同一人物が再度行ったのかは区別がつかない。先行研究<sup>20)</sup>ではこの点について言及していないため、本評価でもデータセットに記録されたものを変更することなく使用することとした。

##### 4.2 データセットの前処理

評価を行うために、データセットに記録された情報を「時刻」、「時間」、「場所」に変換する前処理を行った。行動状態が begin の時の時刻を行動が開始された「時刻」、行動状態が begin から end までを行動に要する「時間」とし、「時間」、「時刻」の単位は「秒」とする。また行動が行なわれた「場所」を特定するために、行動状態が begin の時に反応したセンサが設置されている位置を「場所」とした。データセットの情報から作成した行動ごとに要する「時間」の分布を確認した結果、極端に外れた値の存在を確認した。外れ値はモデルの信頼性を欠く要因となるため、これらを除く処理を行った。本評価では、箱ひげ図を用いて外れ値

Table 3 Activities recorded in the CASAS dataset

Bed_Toilet_Transition	Bathing
Eating	Wash_Dishes
Enter_Home	Watch_TV
Leave_Home	Work_BedRm_1
Meal_Preparation	Work_BedRm_2
Pesronal_Hygiene	Work_LivingRm
R1_Sleeping_in_Bed	Work_table
R2_Sleeping_in_Bed	Yoga

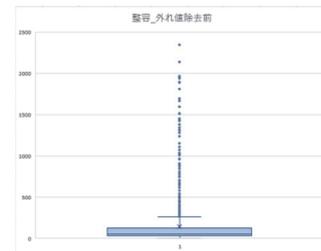


Fig. 9 The box-and-whisker plots of shape adjustment

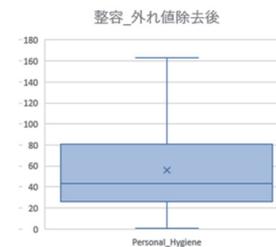


Fig. 10 The box-and-whisker plots except outlier

を確認した。Fig. 9 は「整容」の箱ひげ図の結果である。青い四角で表された部分が、データを昇順で並べた時のデータ数 25%~75%の部分である。つまり、データの中央値付近の 50%が密集した部分であり、行動の傾向を示すのに有効的な部分となり、プロットされている点が外れ値となる。×印は平均時間を示すが、外れ値によって大きく偏っていることがわかる。この外れ値を除いた後の箱ひげ図 (Fig. 10)

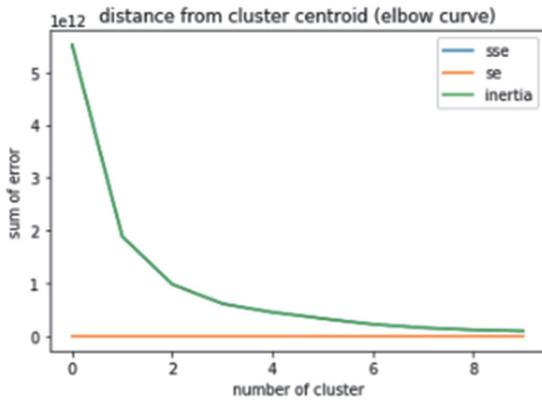


Fig. 11 Result of the elbow method to determine the time-division

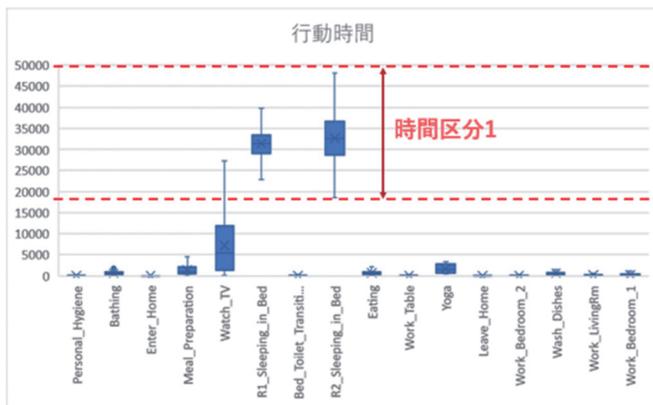


Fig. 12 Time-division considering time required for each activity

Table 4 Activities belonging to Time-division (sec)

区分	時間範囲	行動
区分1	18488-50000	R1_Sleeping_in_Bed, R2_Sleeping_in_Bed
区分2	4496-18487	WatchTV
区分3	1250-4495	WatchTV, Meal_Preparation, Yoga
区分4	240-1249	Bathing, Eating, Wash_dishes
区分5	135-239	Work_LivingRm, Work_BedRm1
区分6	13-134	Personal_Hygiene, Bed_Toilet_Transition, Work_Table, Work_BedRm2
区分7	0-12	Enter_home, Leave_home

では、×印で示された平均点と、有効的な部分を表す青四角が重なっており、データが一定の範囲に収まっていることが確認できる。外れ値を除去することにより「整容には約30~80秒を要する」といった行動に要する時間を把握することができる。

次に、データセット中では連続値で記録されている「時間」、「時刻」、「日付」をベイジアンネットワークで扱えるようにクラスタリングアルゴリズムを用いて離散化する。行動に要する時間は、「整容」の様に短いもので数秒、「睡眠」の様に長いもので数時間というように時間幅が広く、一定の時間単位で扱うことが難しい。そこで、行動の開始時刻と時間を組合せて2次元のデータとして表し、K-means法を用いてクラスタリングを試みた。例えば、2次元のデータとして(時刻, 時間)で表した時、(早, 短), (早, 長),

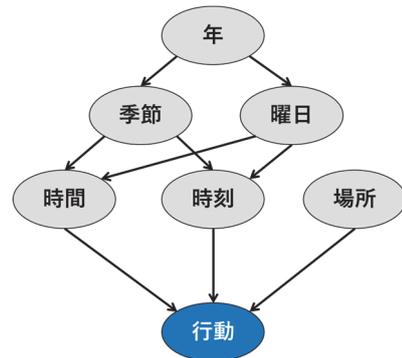


Fig. 13 A Bayesian network generated by Waka

(遅, 短), (遅, 長)の結果が得られる。ベイジアンネットワークに用いる場合、クラスタ数が多くなることにより、ノードの状態数が多くなり、適切なモデルとならない場合がある。K-means法はクラスタ数を決定する方法であり、各クラスタの時間や時刻の傾向を視覚的に把握することが容易であることからこの手法を選択した。クラスタ数を適切に設定するため、エルボー法を用いて最適なクラスタ数の評価を行った (Fig. 11)。エルボー法はデータポイントと重心の距離の2乗和 (SSE; Sum of Square) をプロットした図であり、グラフがひじの様に曲がる箇所が最適クラスタ数になる。Fig. 11は、縦軸をSSE、横軸をクラスタ数としているが、クラスタ数が7付近で折れ曲がったグラフが収束しているのが確認できる。この結果から本評価ではクラスタ数を7に設定した。

全体の区分数をクラスタ数7とし、それぞれの行動に要する時間をCASASのデータセットから集計し、各行動の時間に合わせて「時間区分」を作成した (Fig. 12)。縦軸が時間(秒)、横軸が行動である。「R1\_Sleeping in Bed」と「R2\_Sleeping in Bed」が他の行動に比べて、行動に要する時間が非常に長いことが分かる。中でも、「R2\_Sleeping in Bed」に要する時間が長いため、これを基準としてSleepingの時間区分を設定した。残りの行動についても同様に時間区分の処理を行った。結果として、すべての行動をその時間幅で分類し、整理したものをTable 4に示す。また、離散化した他のデータとして、「日付」の「月」の3~5月を春、6~8月を夏、9~11月を秋、12~2月を冬とする「季節」に変換し、「日」を対応する「曜日」に変換している。

#### 4.3 ベイジアンネットワークの構築

前節で説明した前処理を行って作成したデータセットには「年」、「季節」、「曜日」、「時間」、「時刻」、「場所」、「行動」が記録されている。これらをノードとしてWakaを用いてベイジアンネットワークを構築した (Fig. 13)。構築の際、Wekaのパラメータは以下を用いた。

- Estimator : SimpleEstimatorを使用。  
SimpleEstimatorはベイジアンネットワークの条件付き確率を推定するために使用され、データから直接確率の推定を行う方式であり、デフォルトに設定された方式である。
- SearchAlgorithm : K2を使用。  
ベイジアンネットワークの構造学習アルゴリズムは良

く知られている K2 アルゴリズムを使用した。K2 アルゴリズムは、あらかじめノード間に全順序関係を与え、その全順序関係の制約を用いて、あるノードに対する親ノードの組合せを探索する方法である。

- maxNrOfParents : 100 に設定。  
あるノードの親となるノードの数。親の数に制限を持たせないため、ネットワーク内のノード数よりも十分大きい値として本評価では 100 に設定した。

#### 4.4 ベイジアンネットワークによる行動候補の抽出

Fig. 14 は、場所、時刻、時間、日付（年、季節、曜日）を入力データとしたベイジアンネットワーク（Fig. 13）の結果の出力例を示したものである。この例では、「Eating」と「Watch\_TV」が 50%前後の確率で発生すると推定されているが、結果としてベイジアンネットワークでは行動を特定するには至らず、この 2 つ行動が候補となる。なお、複数の候補が推定された場合、本評価では発生確率が 30%を超えた上位 2 つの行動を候補とすることとした。

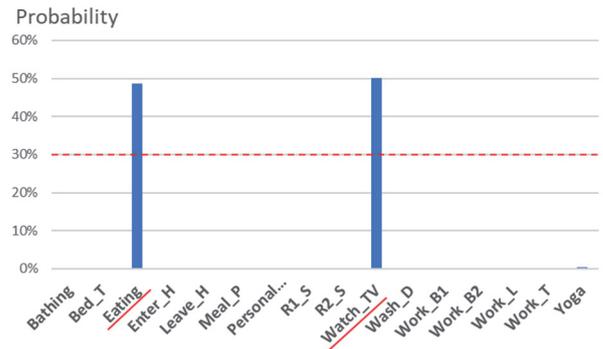


Fig. 14 Example of recognized activities by the Bayesian network

#### 4.5 ベイジアンネットワークによる行動認識の結果

構築したベイジアンネットワークに、CASAS のデータセットから離散化して作成した時刻、時間、場所、日付（年、季節、曜日）を入力データとして 16 の行動についての交差検証を行った（Fig. 15）。交差する箇所が正しく認識された行動の数を示しており、その他の箇所は誤認識した行動の数が記載されている。約 4,600 件の交差検証の結果、認識率は 89.9%であり、同じ CASAS のデータセットを使用している先行研究<sup>20)</sup>の認識率 81.3%に比べて 8%程度向上している。しかし、時刻、時間、場所といった情報が類似している「d: Enter\_Home」と「e: Leave\_Home」は半分近く誤認識している（Fig. 15 実線○）。また、「c: Eating」についても、時刻、時間、場所が類似している「j: Watch\_TV」や「n: Work\_LivingRm」と誤認識している（Fig. 15 破線○）。この結果から、データセットで扱う時刻、時間、場所、日付などの行動に関するデータの前処理を行うことで、Data driven approaches の一つであるベイジアンネットワークによる行動認識率が向上したことは確認できたが、先行研究<sup>4)</sup>が示唆している Data driven approaches の課題である認識率の限界は依然として解決されていない結果となっている。

```

=== Confusion Matrix ===
  a  b  c  d  e  f  g  h  i  j  k  l  m  n  o  p  <-- classified as
190  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | a = Bathing
  0 145  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | b = Bed_Toilet_Transition
  0  0 212  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | c = Eating
  0  0  0 45 49  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | d = Enter_Home
  0  0  0 44 61  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | e = Leave_Home
  0  0  0  0  0 310  0  0  0  0  0  7  0  0  0  42  | f = Meal_Preparation
  0  0  0  0  0  0 1059  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | g = Personal_Hygiene
  0  0  0  0  0  0  0 121  0  0  0  0  0  0  0  0  | h = R1_Sleeping_in_Bed
  0  0  0  0  0  0  0  0 130  0  0  0  0  0  0  0  | i = R2_Sleeping_in_Bed
  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 148  0  0  0  10  1  | j = Watch_TV
  0  0  0  0  0  0  43  0  0  0  0  0  6  0  0  22  | k = Wash_Dishes
  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  329  0  0  | l = Work_Bedroom_1
  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  636  0  | m = Work_Bedroom_2
  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0  282  | n = Work_LivingRm
  0  0  0  0  0  0  34  0  0  0  0  0  5  0  0  478  | o = Work_Table
  0  0  8  0  0  0  0  0  0  0  2  0  0  0  3  0  | p = Yoga
    
```

Fig. 15 Confusion matrix using the Bayesian network with all activities recorded in CASAS data set

```

=== Confusion Matrix ===
  a  b  c  d  e  f  g  h  i  j  k  l  m  n  o  p  <-- classified as
50  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | a = Bathing
  0 50  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | b = Bed_Toilet_Transition
  0  0 32  0  0  0  0  0  0  0 10  0  0  0  8  0  | c = Eating
  0  0  0 25 25  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | d = Enter_Home
  0  1  0 18 31  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | e = Leave_Home
  0  0  0  0  0 43  0  0  0  0  0  0  0  0  7  0  | f = Meal_Preparation
  0  0  2  0  0  0 47  0  0  0  0  0  0  0  0  1  | g = Personal_Hygiene
  0  0  0  0  0  0  0 48  0  0  0  2  0  0  0  0  | h = R1_Sleeping_in_Bed
  0  0  0  0  0  0  0  0 50  0  0  0  0  0  0  0  | i = R2_Sleeping_in_Bed
  0  0  7  0  0  0  0  0  0 39  0  0  0  4  0  0  | j = Watch_TV
  0  0  0  0  0  28  0  0  0  0  4  0  0  0  18  0  | k = Wash_Dishes
  0  0  0  0  0  0  0 15  0  0  0  35  0  0  0  0  | l = Work_Bedroom_1
  1  0  3  0  0  0  0  0 13  0  0  0  32  0  0  1  | m = Work_Bedroom_2
  0  0 13  0  0  0  0  0  0  9  0  0  0  28  0  0  | n = Work_LivingRm
  0  0  0  0  0 16  0  0  0  0  2  0  0  0  32  0  | o = Work_Table
  0  0  6  0  0  0  0  0  0  6  0  0  0  1  0  0  | p = Yoga
    
```

Fig. 16 Confusion matrix using the Bayesian network with randomly selected activities recorded in CASA data set

```

=== Confusion Matrix ===
  a  b  c  d  e  f  g  h  i  j  k  l  m  n  o  p  <-- classified as
50  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | a = Bathing
  0 50  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | b = Bed_Toilet_Transition
  0  0 32  0  0  0  0  0  0  0 11  0  0  0  7  0  | c = Eating
  0  0  0 50  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | d = Enter_Home
  0  0  0  0 1 49  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  | e = Leave_Home
  0  0  0  0  0  0 44  0  0  0  0  0  0  0  0  6  | f = Meal_Preparation
  0  0  2  0  0  0  0 47  0  0  0  0  0  0  0  0  | g = Personal_Hygiene
  0  0  0  0  0  0  0  0 48  0  0  0  2  0  0  0  | h = R1_Sleeping_in_Bed
  0  0  0  0  0  0  0  0  0 50  0  0  0  0  0  0  | i = R2_Sleeping_in_Bed
  0  0  8  0  0  0  0  0  0  0 38  0  0  0  4  0  | j = Watch_TV
  0  0  0  0  0  28  0  0  0  0  4  0  0  0  18  0  | k = Wash_Dishes
  0  0  0  0  0  0  0  0 13  0  0  0  0  37  0  0  | l = Work_Bedroom_1
  1  0  3  0  0  0  0  0 13  0  0  0  0  32  0  0  | m = Work_Bedroom_2
  0  0  7  0  0  0  0  0  0  9  0  0  0  0  34  0  | n = Work_LivingRm
  0  0  0  0  0 13  0  0  0  0  2  0  0  0  0  35  | o = Work_Table
  0  0  6  0  0  0  0  0  0  6  0  0  0  1  0  0  | p = Yoga
    
```

Fig. 17 Confusion matrix using the Bayesian network with activity occurrence probability

#### 4.6 行動生起確率表を適用した評価結果

Fig. 16 は、ランダムに選択した 50 の行動に対するベイジアンネットワークの交差検証結果を示したものである。誤認識の傾向などはデータセット全体を用いた交差検証結果である Fig. 15 と同様であることが確認できる。Fig. 17 は、ベイジアンネットワークの結果（Fig. 16）に対して、行動生起確率を適用した交差検証の結果を示している。「d: Enter\_Home」、「e: Leave\_Home」の認識率は、大きく改善されていることが確認できる（Fig. 17 実線○）。「d: Leave\_Home」の後に発生する「e: Enter\_Home」は、行動の順序性が明確で、かつ関係性が強いいため、行動生起確率

(Table 2 実線□) を用いることにより、ベイジアンネットワークだけでは識別が難しかった行動が正しく識別できている。また、「d: Enter\_Home」の認識率が向上したことにより、「c: Enter\_Home」と関係性が強い「n: Working\_LivingRm」、「o: Work\_Table」、「f: Meal\_Preparation」の認識率がわずかではあるが改善されている (Fig. 16 二重線○, Table 2 破線□)。一方、「c: Eating」は、直前行動の「f: Meal\_Preparation」と強い関係性を持つが (Table 2 実線○), 行動生起確率を適用した効果があまり見られない結果となった (Fig. 17 破線○)。

## 5. 考察

### 5.1 認識対象の直前行動の行動生起確率を用いて誤認識する例

Table 4 はデータセットの中から「c: Eating」の前後のデータを一部抜き出したものであり、上から順に時系列に行動が起きたことを示している。この例では、「c: Eating」と「o: Work\_Table」がベイジアンネットワークにより推定された候補であり、どちらが実際に発生した行動であるかを行動生起確率によって特定する。ここでは「c: Eating」が認識すべき行動と仮定する。Fig. 18 は Table 4 の内容を図示したものであるが、認識すべき行動である「c: Eating」の直前行動は、「c: Eating」と強い関係性をもつ「f: Meal\_Preparation」ではなく、「o: Work\_Table」と判断したため、「o: Work\_Table」と強い関係性を持つ「o: Work\_Table」を選択し (Table 2, 二重○), 誤認識したことになる。データセットには、開始した時刻順に行動が記録されているが、「f: Meal\_Preparation」の後に「o: Work\_Table」が発生しているため、「f: Meal\_Preparation」が「c: Eating」の直前に終了しているが、直前行動としては「o: Work\_Table」になる。結果として、「o: Work\_Table」と関係性の強い「o: Work\_Table」が選択され、誤認識となった。なお、「o: Work\_Table」は食事の準備や、テーブルでの作業など多くの動作が含まれ、一定の間隔を空けて連続して発生する行動である。また、先にも述べたように、CASAS には 2 人の居住者の行動が区別されず記録されており、本結果もこの点が影響を及ぼしている可能性がある。行動の発生時刻ではなく、終了時刻による行動順の変更などデータセットのデータ処理を行った上での再評価が必要であるが、この例の結果から、データセットに記録された直前行動と関係性の強い行動を選択するという単純な方法では、実際の複雑な環境下では正しく認識することが難しいと考えられる。このような状況はテレビを見ながら料理する等、ある行動の間に別の行動が発生するという日常的に起こり得る現象であり、解決すべき今後の課題である。

### 5.2 認識対象の行動の前に関係の強い行動がなく、行動生起確率の適用が有効ではない例

本実験で用いたデータセットでは、「p: Yoga」のサンプル数が全体の約 4,600 件に対して、13 件と非常に少なく、ベイジアンネットワークを用いるためのサンプル数が十分ではなかった。また、「p: Yoga」は Table 2 で示されている様に、「p: Yoga」の前に行われるすべての行動との行動生起確率が 1%以下と低く、このため行動生起確率が効率的に働く行動とはならない。直前行動に習慣として強い関係性の

Table 4 Example of discretized activity records

行動	開始 時間	場所	年 曜日	季節	時間区分	時刻
Meal_Preparation	42491	2365 Kitchen	2010 日	冬	区分7	9~11
Work_Table	44464	97 Kitchen	2010 日	冬	区分4	12~14
Eating	44944	1157 LivingRoom	2010 日	冬	区分6	12~14

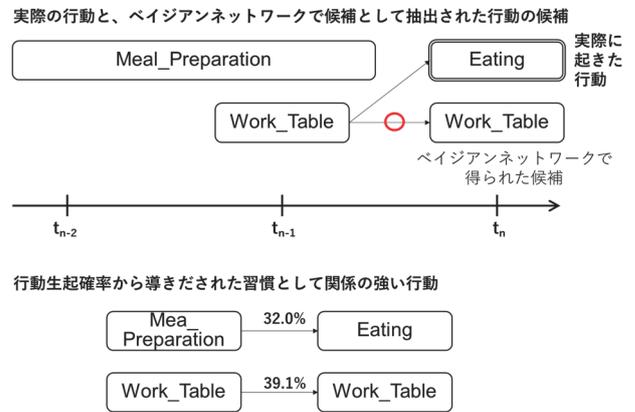


Fig. 18 Example of a misrecognition estimated using the last activity

持つ行動を持たない場合、本方法で行動を認識することは難しい。しかし、「p: Yoga」などの趣味の行動は、個人の習慣として「時刻」、「場所」、「曜日」が比較的固定されている可能性があり、これら行動はベイジアンネットワークで行動認識できる可能性が高く、今後の評価の中で ADL の行動とは区別して評価を行っていく必要がある。

## 6. まとめと今後の課題

### 6.1 まとめ

本研究では、Data driven approaches の一手法であるベイジアンネットワークと Knowledge driven approaches として考案した行動生起確率を組合せた行動認識方法を提案し、その評価を行った。ワシントン州立大学が公開する CASAS データセットを用いて、ADL や IADL に定義された行動を含む 16 種類の行動を対象にした評価実験を行った結果、ベイジアンネットワークに使用するデータセットの前処理を行うことで同じデータセットを用いた先行研究に比べて 8%程度認識率が向上することが確認できた。また、ベイジアンネットワークのみの認識結果では誤認識されていた「d: Enter\_Home」と「e: Leave\_Home」は、行動の関係性を数値化した行動生起確率によって正しく認識することができた。しかしながら、2 つの行動の間に強い関係性を持つ「f: Meal\_Preparation」と「c: Eating」については、比較的行動に要する時間の長い「f: Meal\_Preparation」の間に異なる行動が行われた場合、「f: Meal\_Preparation」以外の行動と強い関係性を持つ行動が選択され、誤認識という結果になった。この解決方法として、発生した行動の単純な順序を用いるのではなく、最後に終了した行動を直前に発生した行動として順序関係を変更するなどのデータの前処理を追加すれば、行動生起確率を用いて選択される行動の認識率向上が見込めると考える。

## 6.2 今後の課題

本稿では、Knowledge driven approaches として、行動生起確率を用いて Data driven approaches で候補として抽出された行動の中から、データセットに記録された直前行動から習慣として関係の強い行動を選択する方法を提案した。この方法では、特定する行動の前に発生した行動との関係性の強さを表現した行動生起確率を用いているが、この際前提となるのは、直前行動が精度高く認識されていることである。今回の評価においても、5.2 節で述べたようにこの問題が明らかとなっている。直前行動だけに限らず、過去の行動の認識率を考慮して、行動生起確率の適用候補となる行動の抽出方法を検討する必要がある。また、本稿では Data driven approaches としてベイジアンネットワークを用いたが、もう一つの代表的な方法である HMM を含めて、先行研究で行われている様々な方法との組み合わせを評価する必要がある。

また、今回のアルゴリズムは ADL と IADL の行動の区別をせずに同一レベルの行動として扱ったが、ベイジアンネットワークで出力された候補の中に ADL に含まれる行動があった場合には、直前行動だけではなく、ある一定時間の中で行動生起確率を適用する対象となる行動の候補を選択するなど、ADL に対象を限定した決定方法の検討が考えられる。

加えて、考察でも述べたように、実際の生活環境においては、習慣とは異なる行動を取る、あるいは同時に複数の行動を行うなどの状況が発生する。今回の方法ではこの状況においては、行動を正しく認識することができない。改善する一つの方法は、一般的な行動の前後関係を網羅的に構造化し、それぞれに時間や回数などのプロパティを定め、習慣の生起条件を表現する方法が挙げられる。

## 参考文献

- 1) “高齢者の家族と世帯”，平成 29 年版高齢社会白書(全体版)-内閣府，[https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2017/zenbun/29pdf\\_index](https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2017/zenbun/29pdf_index)，2017（最終閲覧日 2020 年 7 月 20 日）
- 2) 総論参考資料 | 厚生労働省，[https://www.mhlw.go.jp/www1/topics/kenko21\\_11/s1.html](https://www.mhlw.go.jp/www1/topics/kenko21_11/s1.html)，2017（最終閲覧日 2020 年 7 月 20 日）
- 3) 自立生活の指標：日常生活動作(ADL)とは 健康長寿ネット，<https://www.tyojyu.or.jp/net/kenkou-tyoju/kenkou-undou/jiritu.html>，2019（最終閲覧日 2020 年 7 月 20 日）
- 4) J. Rafferty, C. D. Nugent, J. Liu, and L. Chen, “From Activity Recognition to Intention Recognition for Assisted Living Within Smart Homes,” *IEEE Transaction on human-machine systems*, Vol. 47, No. 3, pp.368-379, 2017
- 5) L. Bao and S. Intille, “Activity recognition from user-annotated acceleration data,” *Pervasive Comput.*, vol. 3001, pp. 1–17, 2004
- 6) E. Tapia, S. S. Intille, and K. Larson, “Activity recognition in the home using simple and ubiquitous sensors pervasive computing,” in *Pervasive Computing*, vol. 3001, A. Ferscha and F. Mattern Eds. Berlin, Germany: Springer, pp. 158–175, 2004
- 7) D. J. Cook and M. Schmitter-Edgecombe, “Assessing the quality of activities in a smart environment,” *Methods Inf. Med.*, vol. 48, no. 5, pp. 480–485, 2009
- 8) T. van Kasteren and B. Krose, “Bayesian activity recognition in residence for elders,” in *Proc. 3rd IET Int. Conf. Intell. Environ.*, vol. 2007, pp. 209–212, 2007
- 9) U. Maurer, A. Rowe, A. Smailagic, and D. Siewiorek, “Location and activity recognition using ewatch: A wearable sensor platform,” in *Ambient Intelligence in Everyday Life*, Y. Cai and J. Abascal Eds. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 86–102, 2006
- 10) N. Ravi, N. Dandekar, P. Mysore, and M. L. Littman, “Activity recognition from accelerometer data,” in *Proc. 17th Conf. Innovative Appl. Artif. Intell.*, vol. 3, pp. 1541–1546, 2005
- 11) M. Stikic and B. Schiele, “Activity recognition from sparsely labeled data using multi-instance learning,” *Location Context Awareness*, vol. 5561, pp. 156–173, 2009
- 12) D. L. Vail, M. M. Veloso, and J. D. Lafferty, “Conditional random fields for activity recognition,” in *Proc. 6th Int. Joint Conf. Auton. Agents Multiagent Syst.*, pp. 235:1–235:8, 2007
- 13) C. Sutton, A. McCallum, and K. Rohanimanesh, “Dynamic conditional random fields: Factorized probabilistic models for labeling and segmenting sequence data,” *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 8, pp. 693–723, 2007
- 14) T. R. Gruber, “Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing?” *International Journal of Human-Computer Studies* Volume 43, Issues 5–6, 1995.
- 15) W3C, “RDF - Semantic Web Standards,” Available: <https://www.w3.org/RDF/>（最終閲覧日 2020 年 7 月 20 日）
- 16) W3C, “OWL - Semantic Web Standards,” Available: <https://www.w3.org/OWL/>（最終閲覧日 2020 年 7 月 20 日）
- 17) GitHub, “GitHub - RDFLib/rdflib: RDFLib is a Python library for working with RDF, a simple yet powerful language for representing information,” Available: <https://github.com/RDFLib/rdflib>（最終閲覧日 2020 年 7 月 20 日）
- 18) apache, “Apache Jena,” Available: <https://jena.apache.org/>（最終閲覧日 2020 年 7 月 20 日）
- 19) 中村亮, 石川佳治, 杉浦健人, 脇田佑希子, “ライフログサービスのためのオントロジーに基づく行動イベント処理,” *DEIM Forum*, I5-1, 2017.
- 20) Zong-Hong Wu, Alan Liu, Pei-Chuan Zhou, Yen Feng Su, “A Bayesian Network Based Method for Activity Prediction in a Smart Home System,” *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) IEEE*, pp. 1496-1501, 2016
- 21) Washington State University, “The CASAS Smart Home project” <http://casas.wsu.edu/smart-homes>（最終閲覧日 2020 年 7 月 20 日）
- 22) 朱成敏, 武田英明, 法隆大輔, 竹崎あかね, 吉田智一, “農業 IT システム間データ連携のための農作業基本オントロジーの構築,” *信学技報*, vol.115, no. 290, pp. 149-154, 2015
- 23) WEKA, The workbench for machine learning, <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>（最終閲覧日 2020 年 7 月 20 日）

# 帰り荷と時間枠を考慮した選択型運搬経路問題に対する列生成法

胡 津閣<sup>\*1</sup>, 森山 弘海<sup>\*2</sup>

## A Column Generation Algorithm for a Selective Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows

by

Jinge HU<sup>\*1</sup> and Hiroumi MORIYAMA<sup>\*2</sup>

(received on Mar. 27, 2020 & accepted on Aug. 3, 2020)

### あらまし

運搬経路問題においては、通常、所与である全ての顧客の荷物を運搬するための各運搬車のルートを求める。しかし実務においては、所与の顧客の中から荷物を運搬すべき顧客を選択しなければならない場合も多い。また、実際の運搬現場においては、帰り荷や時間枠を考慮しなければならない場合も存在する。そこで本研究では、帰り荷と時間枠を考慮した選択型運搬経路問題を取り上げ、列生成法に基づくその近似解法を提案する。

### Abstract

The classical vehicle routing problem consists of finding a set of routes to serve all given customers. However, in practice, it is often necessary to select some customers from a set of potential customers and to find a set of routes to serve them. Also, there exists practical cases where backhauls and time windows must be taken into account. In this paper, we consider a selective vehicle routing problem with backhauls and time windows and propose a column generation-based algorithm to solve the problem.

**キーワード:** 選択型運搬経路問題, 帰り荷, 時間枠, 列生成法

**Keywords:** *Selective Vehicle Routing Problem, Backhauls, Time Windows, Column Generation*

## 1. はじめに

運搬経路問題においては、通常、所与である全ての顧客の荷物を運搬するための各運搬車のルートを求める。しかし実務においては、所与である顧客の中から荷物を運搬すべき顧客を選択し、それらの顧客のみの荷物を運搬するための各運搬車のルートを求めなければならない場合も多い。例えば、物流会社においては、荷主からの自社の運搬規模を超える運搬依頼に対して、自社で荷物を運搬する顧客を選択しなければならない状況が頻繁に発生する。また、自社の運搬業務（の一部）を外部委託することを検討している企業においては、外部委託すべき（自社で運搬すべきではない）顧客を選択したいという要望がしばしば現れる。

他方、運搬経路問題に関するこれまでの研究の多くは、(a)デポで荷物の積み込みを行い、それを顧客に運搬して積み下ろしを行う場合（配送の場合）、もしくは、(b)顧客で荷物の積み込みを行い、それをデポに運搬して積み下ろしを行う場合（集荷の場合）

のいずれかを想定している<sup>1)2)</sup>。しかし、実務においては、(a)と(b)が混在している場合も存在する。そして、そのような場合の運搬現場においては、各運搬車が荷物の積み下ろしを行う顧客（以下では単に配達先という）をすべて巡回したあとに、荷物の積み込みを行う顧客（以下では単に集荷先という）を巡回する運搬方法がしばしば用いられている<sup>3)4)</sup>。それゆえ、各運搬車が配達先をすべて巡回したあとに集荷先を巡回することを特に帰り荷とよぶと、この帰り荷を考慮することも実務上重要であると思われる。加えて、そのような実際の運搬現場においては、各顧客の荷物を運搬する時刻が所与の時間枠（何時から何時までの間）に入っていないなければならないという条件を考慮しなければならない場合<sup>5)</sup>も存在する。

そこで本研究では、顧客選択、帰り荷および時間枠を考慮した上で、応用範囲が広いと考えられる運搬収益から運搬費用を差し引いた利益の最大化を目的関数とした場合の運搬経路問題を特に、帰り荷と時間枠を考慮した選択型運搬経路問題とよび、列生成法に基づくその近似解法を提案する。

荷物を運搬すべき顧客の選択を考慮した運搬経路問題に関しては、これまでいくつかの研究がある（2014年までの研究は文献<sup>6)</sup>に、2016年度までの研究は文献<sup>7)</sup>にサーベイされている）。例えば、基本的な（各運搬車の最大積載量制約を考慮しない場合の）問題については、Boulyら<sup>8)</sup>が遺伝的局所探索法に基づく、Dangら<sup>9)</sup>が粒子群最適化に基づく、Lin<sup>10)</sup>がア

\*1 情報通信学研究科情報通信学専攻 修士課程  
Graduate School of Information and  
Telecommunication Engineering, Course of  
Information and Telecommunication Engineering,  
Master's Program

\*2 情報通信学部経営システム工学科 教授  
School of Information and Telecommunication  
Engineering, Department of Management Systems  
Engineering, Professor

ニーリング法に基づく近似解法を, Keshtkaranら<sup>11)</sup>が分枝価格法に基づく, El-Hajjら<sup>12)</sup>が切除平面法に基づく, Bianchessiら<sup>13)</sup>が分枝カット法に基づく最適解法を提案している. また, 各運搬車の最大積載量制約を考慮した場合の問題については, Archettiら<sup>14)</sup>がタブーサーチ法に基づく, Gunawanら<sup>15)</sup>が反復局所探索法に基づく近似解法を, Archettiら<sup>16)</sup>が分枝価格法に基づく最適解法を提案している. さらに, 各顧客の時間枠を考慮した場合の問題については, Linら<sup>17)</sup>がアニーリング法に基づく, Huら<sup>18)</sup>が局所探索法とアニーリング法に基づく, Cura<sup>19)</sup>が人工蜂群生法に基づく近似解法を提案している. しかしながら, これらを含む従来研究で取り上げている問題はいずれも帰り荷と時間枠を同時に考慮していない. これに対して当研究では, 帰り荷と時間枠を考慮した選択型運搬経路問題を取り上げる. そして, 列生成法に基づくその近似解法を構築し, それで求まる解の精度を数値実験で検証する.

## 2. 0-1整数計画問題への定式化

運搬車数を  $K$ , 顧客の集合を  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ , ルート (デポを出発したあといくつかの顧客を巡回し, 再びデポに戻る閉路) の集合を  $R = \{1, 2, \dots, r\}$  とする. ここで, ルートは通常の積載量制約とともに, 既述の帰り荷と時間枠の制約を満たしているものとする. また, ルート  $h \in R$  の運搬費用 (固定費用と移動費用の総和) を  $c_h$ , 顧客  $i \in N$  の荷物を運搬した場合の運搬収益を  $f_i$  とする. さらに, ルートと顧客の関係を次で定義する.

$$\alpha_{hi} = \begin{cases} 1, & \text{ルート } h \text{ に顧客 } i \text{ が含まれる場合} \\ 0, & \text{その他} \end{cases}, \quad h \in R, i \in N \quad (1)$$

このとき, 変数  $x_h$  を

$$x_h = \begin{cases} 1, & \text{ルート } h \text{ を選択する場合} \\ 0, & \text{その他} \end{cases}, \quad h \in R$$

とすると, 帰り荷と時間枠を考慮した選択型運搬経路問題は次のような 0-1整数計画問題に定式化される.

$$(P) \quad \max. \quad \sum_{h \in R} \left( \sum_{i \in N} f_i \alpha_{hi} - c_h \right) x_h \quad (2)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{h \in R} \alpha_{hi} x_h \leq 1, \quad i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{h \in R} x_h \leq K \quad (4)$$

$$x_h \in \{0, 1\}, \quad h \in R \quad (5)$$

ここで, 式(2)は目的関数で総運搬収益から総運搬費用を差し引いた総利益を最大化することを表す. また, 式(3)は運搬車が各顧客をたかだか 1 度巡回することを規定する. そして, 式(4)は使用する運搬車が所与の運搬車台数以下であることを規定する.

なお, 既述した外部委託すべき顧客を選択したいという要望においては, 外部委託費用と自社運搬費

用の総和を最小化することが望まれるが, その最適値は, 顧客  $i \in N$  の荷物を外部委託した場合の費用を  $e_i$  とおくと,  $f_i = e_i, i \in N$  とした場合の (P) の最適値を求め, それを  $\sum_{j \in N} e_j$  から差し引くことで定まることを付記しておく.

## 3. 列生成法に基づく近似解法

上述の (P) を明確に設定するためには, 考えられる全てのルートを列挙する必要があるが, その数は一般に膨大な数になる. そのため, 全てのルートを列挙することは, それ自身が極めて多くの計算量を必要とするため実際的でない. そこでここでは, ルートを逐次列挙しながら (P) の上界値を求める列生成法を提案し, その列生成法で列挙したルートを用いて (P) の下界値 (実行可能解) を求める近似解法を構築する.

いま, (P) の式(5)を  $x_h \geq 0, h \in R$  に緩和した連続緩和問題:

$$(\bar{P}) \quad \max. \quad \sum_{h \in R} \left( \sum_{i \in N} f_i \alpha_{hi} - c_h \right) x_h \quad (6)$$

$$\text{s. t.} \quad \begin{array}{l} \text{式(3),(4)} \\ x_h \geq 0, \quad h \in R \end{array} \quad (7)$$

を考える. ここで, 問題 (P) の最適値を  $z(P)$  と記すと, 緩和法の原理より,  $z(P) \leq z(\bar{P})$  である. よって,  $(\bar{P})$  を解けば (P) の上界値が求まる. さらに,  $R$  のある部分集合  $\bar{R}$  を考え,  $(\bar{P})$  におけるルートの集合  $R$  を  $\bar{R}$  に限定した限定主問題  $(\bar{P}_{\bar{R}})$  と, その双対問題:

$$(\bar{D}_{\bar{R}}) \quad \min. \quad \sum_{i \in N} u_i + K u_0 \quad (8)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i \in N} \alpha_{hi} u_i + u_0 \geq \sum_{i \in N} f_i \alpha_{hi} - c_h, \quad h \in \bar{R} \quad (9)$$

$$u_i \geq 0, \quad i \in N \quad (10)$$

$$u_0 \geq 0 \quad (11)$$

を考える. ここで,  $(\bar{D}_{\bar{R}})$  の  $u_i, i \in N$  と  $u_0$  はそれぞれ  $(\bar{P}_{\bar{R}})$  の式(3)と式(4)に対応する双対変数であり, 双対定理より  $z(\bar{P}_{\bar{R}}) = z(\bar{D}_{\bar{R}})$  である. そこで  $(\bar{P}_{\bar{R}})$  の最適解を  $(\bar{x}_h)$ ,  $(\bar{D}_{\bar{R}})$  の最適解を  $(\bar{u}_i), \bar{u}_0$  とし,

$$c_h^* = c_h + \sum_{i \in N} \alpha_{hi} (\bar{u}_i - f_i) + \bar{u}_0, \quad h \in R \quad (12)$$

とおく. このとき,

$$c^* = \min_{h \in R} c_h^* \quad (13)$$

である  $c^*$  を定めると,  $c^* \geq 0$  ならば,  $(\bar{D}_{\bar{R}})$  の最適解は  $(\bar{P})$  の双対問題の最適解となり,

$$x_h^* = \begin{cases} \bar{x}_h, & h \in \bar{R} \\ 0, & \text{その他} \end{cases}, \quad h \in R \quad (14)$$

である  $(x_h^*)$  は  $(\bar{P})$  の最適解となる.

以上の準備の下, 当研究では, 概略, 次のような手順で (P) の実行可能解を求めるものとする. ただし, 次の手順の S0, S2, S4 を実行する方法については後述する.

**手順** 列生成法に基づく近似解法

- S0. 初期ルートを生成し、それらの集合を $\bar{R}$ とおく。  
 S1.  $(\bar{P}_R)$ の最適解 $(\bar{x}_h)$ と $(\bar{D}_R)$ の最適解 $(\bar{u}_i)$ 、 $\bar{u}_0$ を求める。  
 S2.  $c^* \geq 0$ ならばS4へ。  
 S3.  $c_h^* < 0$ であるルートの集合 $R_{\bar{u}_0}$ を求め、 $\bar{R} := \bar{R} \cup R_{\bar{u}_0}$ としてS1へ。  
 S4.  $(\bar{P}_{\bar{R}})$ に $x_h \in \{0, 1\}$ ,  $h \in \bar{R}$ を追加した問題 $(P_{\bar{R}})$ を解いて $(P)$ の実行可能解 $(x_h^*)$ を求める。

この手順のS0においては、初期ルートを求める必要があるが、ここでは、 $(0 \rightarrow i \rightarrow 0)$ ,  $i \in N$ である $n$ 個のルートを初期ルートとする。また、S4においては $(P_{\bar{R}})$ の最適解を数理計画ソルバーで求めるものとする。さらに、この手順のS2においては、式(13)の $c^*$ を求める必要があるが、そのための問題（価格付け問題という）については次節で確認する。

#### 4. 価格付け問題の定式化

ここでは、前述した価格付け問題（式(13)の $c^*$ を求める問題）を混合0-1整数計画問題に定式化する。

配送先の集合を $L = \{1, 2, \dots, l\}$ 、集荷先の集合を $M = \{l+1, l+2, \dots, l+m\}$ 、配送先と集荷先を併せた顧客の集合を $N = L \cup M = \{1, 2, \dots, n\}$ とする。ただし、 $n = l + m$ である。また、デポ（運搬車の発地）を $0$ 、ダミーのデポ（運搬車の着地）を $n+1$ で表し、 $N$ に $0$ を加えた集合を $N_0 = N \cup \{0\}$ とし、 $N$ に $n+1$ を加えた集合を $N_{n+1} = N \cup \{n+1\}$ とする。さらに、

- $a_0$  : デポ $0$ における運搬車の最早出発時刻  
 $b_0$  : デポ $0$ における運搬車の最遅到着時刻  
 $a_{n+1}$  : デポ $0$ における運搬車の最早到着時刻  
 $b_{n+1}$  : デポ $0$ における運搬車の最遅到着時刻  
 $a_i$  : 顧客 $i \in N$ の最早サービス開始時刻  
 $b_i$  : 顧客 $i \in N$ の最遅サービス開始時刻  
 $q_i$  : 顧客 $i \in N$ の需要量（配送量と集荷量）  
 $Q$  : 運搬車の最大積載量  
 $c_{ij}$  : 顧客（デポを含む） $i \in N_0$ から顧客（デポを含む） $j \in N_0$ への移動費用  
 $c_0$  : 運搬車の固定費用  
 $t_{ij}$  : 顧客（デポを含む） $i \in N_0$ から顧客（デポを含む） $j \in N_0$ への移動時間  
 $s_i$  : 顧客 $i \in N$ のサービス時間

とする。加えて、 $A_1 = \{(0, j) \mid j \in N\}$ 、 $A_2 = \{(i, j) \in N \times N \mid i \neq j\}$ 、 $A_3 = \{(i, n+1) \mid i \in N\}$ 、 $A = A_1 \cup A_2 \cup A_3$ とし、

$$\bar{c}_{ij} = \begin{cases} c_{ij} + \bar{u}_0/2 + (\bar{u}_j - f_j)/2, & (0, j) \in A_1 \\ c_{ij} + (\bar{u}_i - f_i)/2 + (\bar{u}_j - f_j)/2, & (i, j) \in A_2 \\ c_{ij} + (\bar{u}_i - f_i)/2 + \bar{u}_0/2, & (i, n+1) \in A_3 \end{cases}, \quad (i, j) \in A \quad (15)$$

$$d_{ij} = \begin{cases} t_{0j}, & (0, j) \in A_1 \\ s_i + t_{ij}, & (i, j) \in A_2 \\ s_i + t_{i0}, & (i, n+1) \in A_3 \end{cases}, \quad (i, j) \in A \quad (16)$$

とする。このとき、変数 $x_{ij}$ と $t_i$ を

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{運搬車が顧客（デポを含む）} i \text{から顧客（デポを含む）} j \text{へ直接移動する場合,} \\ 0, & \text{その他} \end{cases} \quad (i, j) \in A$$

- $t_0$  : デポ $0$ からの運搬車の出発時刻  
 $t_i$  : 顧客 $i \in N$ におけるサービス開始時刻  
 $t_{n+1}$  : デポ $0$ への運搬車の到着時刻

と定義すると、前述した価格付け問題は、次のような混合0-1整数計画問題に定式化される。ただし、 $B$ は十分に大きな数である。

$$(S_{\bar{u}_0}) \quad \min. \quad \sum_{(i,j) \in A} \bar{c}_{ij} x_{ij} + c_0 \quad (17)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j \in N} x_{0j} = 1 \quad (18)$$

$$\sum_{j \in N_0 \setminus \{i\}} x_{ji} = \sum_{j \in N_{n+1} \setminus \{i\}} x_{ij}, \quad i \in N \quad (19)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i, n+1} = 1 \quad (20)$$

$$\sum_{i \in L} \sum_{j \in M} x_{ij} \leq 1 \quad (21)$$

$$\sum_{i \in M} \sum_{j \in L} x_{ij} = 0 \quad (22)$$

$$\sum_{i \in N_0 \setminus \{j\}} \sum_{j \in L} q_j x_{ij} \leq Q \quad (23)$$

$$\sum_{i \in M} \sum_{j \in N_{n+1} \setminus \{i\}} q_i x_{ij} \leq Q \quad (24)$$

$$t_i + d_{ij} - B(1 - x_{ij}) \leq t_j, \quad (i, j) \in A \quad (25)$$

$$a_i \leq t_i \leq b_i, \quad i \in N \cup \{0, n+1\} \quad (26)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad (i, j) \in A \quad (27)$$

ここで、式(17)は目的関数で最適値が式(13)の $c^*$ になることを表す。そして式(18), (19), (20)はルートが生成されることを規定する。また、式(21), (22)は、ルートが(a)配送先だけを巡回する、(b)集荷先だけを巡回する、(c)配送先と集荷先を巡回する場合に配送先をすべて巡回したあとに集荷先を巡回する、のいずれかになることを規定する。また、式(23)は運搬車が巡回する配送先の需要量の総和が最大積載量以下であることを、式(24)は運搬車が巡回する集荷先の需要量の総和が最大積載量以下であることを規定する。そして式(25), (26)は、デポ $0$ における運搬車の出発時刻と到着時刻および巡回する顧客におけるサービス開始時刻が所与の時間枠を満たすことを規定する。

当研究では、この $(S_{\bar{u}_0})$ を数理計画ソルバーで解いて $c^*$ を求めるが、式(25)のような十分に大きな数 $B$ を含んだ定式化は一般に多くの計算時間を必要とするため、 $B$ の値をできる限り小さい値に変更することで式(25)を強化することを考える。

式(25)は $x_{ij} = 0$ であるとき、 $t_i + d_{ij} - t_j \leq B$ ,  $(i, j) \in A$ となるが、式(26)より $t_i \leq b_i$ であり $t_j \geq a_j$ であるため、式(25)の $B$ の値を $b_i + d_{ij} - a_j$ に設定しても、式(25)はすべての実行可能解に対して成立する。よって、式(25)は $B > 0$ である場合のみ意味があることに注意すると、式(25)の $B$ を $\max\{0, b_i + d_{ij} - a_j\}$ で置き換えることができる。さらに、式(25)の $(i, j) \in A_2$ に対応した制約式、式(26)の $i \in N_{n+1}$ に対応した下限制約式、式(26)の $i \in N_0$ に対応した上限制約式は、持ち上げ(lifting)操作<sup>20)</sup>を適用することにより、次のような強化した制約式にそれぞれ書き換えることができる。ただし、 $N_i^- = \{j \in N \mid (j, i) \in A\}$ 、 $N_i^+ = \{j \in N \mid (i, j) \in A\}$ である。

$$t_i + d_{ij} - \max\{0, b_i + d_{ij} - a_j\}(1 - x_{ij}) + \max\{0, \min\{a_j - a_i, -d_{ji}\} + b_i - a_j\}x_{ji} \leq t_j, \quad (i, j) \in A_2 \quad (28)$$

$$a_i + \sum_{j \in N_i^-} \max\{0, a_j + d_{ji} - a_i\}x_{ji} \leq t_i, \quad i \in N_{n+1} \quad (29)$$

$$t_i \leq b_i - \sum_{j \in N_i^+} \max\{0, b_i - b_j + d_{ij}\}x_{ij}, \quad i \in N_0 \quad (30)$$

そこで本研究では、以上のように強化された問題 ( $S_{\bar{u}\bar{u}_0}$ ) を数理計画ソルバーで解いて  $c^*$  を求めるが、列生成法に基づく近似解法の S2 においては、常に  $c^*$  を求める必要はなく、 $c_h^* < 0, \exists h \in R$  であるルート  $h$  が求まれば S3 へ計算を進めることができる。また、S3 においても、常に  $c_h^* < 0$  である全てのルートの集合を求める必要はなく、 $c_h^* < 0, \exists h \in R$  であるルート  $h$  を  $R_{\bar{u}\bar{u}_0} = \{h\}$  とすることができる。そこでここでは、( $S_{\bar{u}\bar{u}_0}$ ) の最適解を常に求めるのではなく、目的関数値が負の実行可能解が求まった時点で ( $S_{\bar{u}\bar{u}_0}$ ) の計算を終了するものとする。

## 5. 数値実験による検証

以上、帰り荷と時間枠を考慮した選択型運搬経路問題に対する列生成法を提案したが、その有効性を検証するために数値実験を実施した。ただし、数値実験で使用した実験データの作成方法と実験環境に関しては以下の通りである。

(1) 通常的时间枠付き運搬経路問題に対する代表的なベンチマーク問題<sup>21)</sup>を基に、帰り荷と時間枠を考慮した選択型運搬経路問題の問題例を作成した。使用したベンチマーク問題に関しては以下の通りである。

- 顧客数  $n$  は  $n = 100$  である。
- 顧客 (デポを含む)  $i \in N_0$  から顧客 (デポを含む)  $j \in N_0$  への移動費用  $c_{ij}$  と移動時間  $t_{ij}$  は、顧客 (デポを含む)  $i \in N_0$  の2次元平面上の座標  $(X_i, Y_i)$  を与え、次式で定めている。

$$c_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}, \quad i, j \in N_0 \quad (31)$$

$$t_{ij} = c_{ij}, \quad i, j \in N_0 \quad (32)$$

- 顧客  $i \in N$  の最早サービス開始時刻  $a_i$  と最遅サービス開始時刻  $b_i$  は、パラメータ  $f (0 < f \leq 1)$  を与えて  $|\bar{N}| = nf$  である顧客の部分集合  $\bar{N} (\subseteq N)$  をランダムに選択するとともに、デポ 0 における運搬車の最早出発 (到着) 時刻  $a_0 (= a_{n+1})$  と最遅出発 (到着) 時刻  $b_0 (= b_{n+1})$  とを与え、次式で定めている。

$$a_i = \begin{cases} U[a_0 + t_{0i}, b_0 - t_{i0} - s_i] - h_i, & i \in \bar{N} \\ 0, & \text{その他} \end{cases}, \quad i \in N \quad (33)$$

$$b_i = \begin{cases} U[a_0 + t_{0i}, b_0 - t_{i0} - s_i] + h_i, & i \in \bar{N} \\ b_0 - t_{i0} - s_i, & \text{その他} \end{cases}, \quad i \in N \quad (34)$$

ただし、 $U[a_0 + t_{0i}, b_0 - t_{i0} - s_i]$  は  $[a_0 + t_{0i}, b_0 - t_{i0} - s_i]$  の一様整数乱数であり、 $h_i$  はある正

Table 1 Characteristics of the benchmark problems

Type	$b_0$	$\max q_i$	$\sum q_i$	$Q$	$s$
R1	1236	50	1458	200	10
R2	3390	50	1458	1000	10
C1	230	41	1810	200	90
C2	1000	41	1810	700	90
RC1	240	40	1724	200	10
RC2	960	40	1724	1000	10

規分布 (文献<sup>21)</sup>ではこの正規分布の平均と分散を明示していない) で定めた値である。

- デポ 0 における運搬車の最早出発 (到着) 時刻  $a_0 (= a_{n+1})$  は 0 である。
- サービス時間  $s_i, i \in N$  はすべて等しく、 $s_i = s, i \in N$  である  $s$  を定めている。
- ベンチマーク問題は Table 1 の 6 タイプに分類されている。ただし、Table 1 の  $\max q_i$  は  $\max_{i \in N} q_i$  であり、 $\sum q_i$  は  $\sum_{i \in N} q_i$  である。

- (2) 運搬車数  $K$  は  $K = 5, 10$  の 2 通りとした。
- (3) 上記ベンチマーク問題の最初の  $l = n/2$  個の顧客を配達先、残りの  $m = n - l$  個の顧客を集荷先とし、最大積載量  $Q$  は  $Q/2$  とした。
- (4) 顧客  $i \in N$  の運搬収益  $f_i$  は次式で定めた。

$$f_i = 0.1c_{0i}q_i, \quad i \in N \quad (35)$$

- (5) 運搬車の固定費用  $c_0$  は  $c_0 = 10$  とした。
- (6) 使用計算機は Intel® Core™ i7-7700T CPU 2.90GHz (4-core) の CPU と 16GB のメモリを搭載した PC (OS: Windows 10 professional 64bit) で、使用言語は C# (処理系: Microsoft Visual Studio Community 2017) である。
- (7) 列生成法に基づく近似解法に使用した数理計画ソルバーは Gurobi Optimizer Version 8.1.0<sup>22)</sup> である。
- (8) 列生成法 (手順の S0~S3) の計算は、S3 の終了時点の計算時間が 1800 秒以上となれば打ち切りとした。

以上の実験データと実験環境の下で実施した数値実験の結果をベンチマーク問題の 6 タイプごとにそれぞれ Table 2~7 に示す。ただし、Table 2~7 に関しては以下の通りである。

- (1) Table 2~7 の Name はベンチマーク問題の問題名である。
- (2) Table 2~7 の  $f$  は上述した顧客  $i \in N$  の最早サービス開始時刻  $a_i$  と最遅サービス開始時刻  $b_i$  を定める場合のパラメータで  $0 < f \leq 1$  である。
- (3) Table 2~7 の  $z_L$  と  $z_U$  はそれぞれ求めた下界値と上界値である。ただし、「-」は計算打ち切りまでに上界値が求まらなかった場合である。
- (4) Table 2~7 の  $n_c$  は求めた実行可能解の運搬顧客数である。
- (5) Table 2~7 の Cols は生成した列数である。
- (6) Table 2~7 の time<sup>(1)</sup> は列生成法 (手順の S0~S3) の計算時間 (単位は秒) で、time<sup>(2)</sup> は列生成法に基づく近似解法 (手順の S0~S4) の計算時間 (単

位は秒) である。

また、上界値が求まった問題例については、相対誤差  $\varepsilon = (z_U - z_L)/z_U$  を Table 8 に示す。

この数値実験では、全ての問題例で実行可能解（下界値）を求めることができたが、多くの問題例においてその精度を（計算打ち切りまでに上界値が求まらなかったため）検証できなかった。しかしながら、上界値が求まった問題例においては、相対誤差0.035以下の解が求まっており（Table 8参照）、提案法を用いて高い精度の実行可能解が求まることを検証できた。

また、この数値実験の結果は、 $f$  が1.00より小さい全ての問題例と、タイプがR2, C2, RC2の多くの問題例は、上界値を求めることができなかったことを示している。この理由としては、 $f$  が小さい問題例ほど時間枠制限のある顧客数が少なくなるとともに、タイプがR2, C2, RC2の問題例は（R1, C1, RC1の問題例よりも）時間枠の幅が広がることから、そのような問題例は、実行可能なルートの組み合わせが増加し、上界値を求めるのに必要な列の求解に時間を要するためと考えられる。さらに、この数値実験の結果は、同じ問題名ならば、 $K = 5$  よりも  $K = 10$  の

Table 2 Computational results (Type R1)

Name	f	K = 5						K = 10					
		$z_L$	$z_U$	$n_C$	Cols	time <sup>(1)</sup>	time <sup>(2)</sup>	$z_L$	$z_U$	$n_C$	Cols	time <sup>(1)</sup>	time <sup>(2)</sup>
R101	1.00	1112.760	1112.760	25	131	10.0	10.0	1685.504	1696.128	52	251	56.6	56.7
R102	0.75	1428.724	—	34	244	1822.1	1822.1	1879.747	—	65	482	1821.1	1821.4
R103	0.50	1579.006	—	40	244	2059.7	2059.7	2073.624	—	68	482	1813.9	1814.0
R104	0.25	1727.620	—	45	298	2733.2	2733.2	2118.298	—	73	649	1854.5	1855.5
R105	1.00	1329.330	1376.203	34	201	59.7	59.7	1943.958	1950.706	60	433	136.8	136.9
R106	0.75	1557.884	—	39	270	2138.6	2138.7	2065.480	—	70	572	2011.4	2011.6
R107	0.50	1721.797	—	42	303	1823.6	1823.6	2158.181	—	75	668	1841.4	1841.8
R108	0.25	1751.254	—	43	338	1803.7	1803.7	2234.728	—	78	736	1820.8	1821.6
R109	1.00	1366.204	—	32	225	1975.1	1975.1	1979.373	—	61	505	1959.5	1959.6
R110	1.00	1544.040	—	38	240	2157.2	2157.2	2091.193	—	69	485	1829.0	1829.1
R111	1.00	1637.657	—	38	228	1839.1	1839.1	2028.195	—	68	462	1831.3	1831.5
R112	1.00	1731.566	—	39	262	2036.6	2036.7	2169.861	—	71	585	1802.4	1803.0

Table 3 Computational results (Type R2)

Name	f	K = 5						K = 10					
		$z_L$	$z_U$	$n_C$	Cols	time <sup>(1)</sup>	time <sup>(2)</sup>	$z_L$	$z_U$	$n_C$	Cols	time <sup>(1)</sup>	time <sup>(2)</sup>
R201	1.00	2143.158	—	78	1282	1800.1	1800.5	2242.014	—	86	842	778.3	778.4
R202	0.75	2137.523	—	73	909	2355.7	2356.9	2260.984	—	79	1020	1915.4	1918.3
R203	0.50	2143.594	—	70	978	1801.5	1803.2	2422.646	—	89	881	1802.2	1802.7
R204	0.25	2359.658	—	75	1182	1801.4	1803.1	2411.985	—	81	1152	1802.2	1805.9
R205	1.00	2220.226	—	75	1088	1804.3	1804.8	2419.569	—	88	1180	1967.2	1967.5
R206	0.75	2232.034	—	67	1227	1800.4	1802.1	2453.697	—	84	1234	1800.9	1802.0
R207	0.50	2198.664	—	68	1289	1800.7	1803.6	2372.486	—	83	995	1858.5	1862.5
R208	0.25	2359.849	—	78	1400	1801.4	1812.1	2506.566	—	80	1336	1801.8	1805.2
R209	1.00	2199.352	—	70	881	1896.2	1896.9	2355.743	—	87	1057	1836.2	1838.0
R210	1.00	2157.304	—	76	926	2043.1	2044.9	2400.948	—	77	974	1807.5	1809.2
R211	1.00	2199.943	—	67	938	1832.3	1835.2	2431.080	—	83	978	1951.9	1955.1

Table 4 Computational results (Type C1)

Name	f	K = 5						K = 10					
		$z_L$	$z_U$	$n_C$	Cols	time <sup>(1)</sup>	time <sup>(2)</sup>	$z_L$	$z_U$	$n_C$	Cols	time <sup>(1)</sup>	time <sup>(2)</sup>
C101	1.00	2215.401	2245.713	37	249	65.1	65.2	3353.590	3457.379	66	466	125.1	125.2
C102	0.75	2318.126	—	40	268	2328.7	2328.7	3425.226	—	71	654	3513.2	3513.4
C103	0.50	2577.873	—	39	340	2003.9	2003.9	3436.250	—	66	711	1875.7	1876.8
C104	0.25	2569.014	—	44	499	1927.5	1927.6	3517.126	—	78	718	1823.7	1824.2
C105	1.00	2282.907	2365.199	38	285	140.1	140.2	3470.680	3556.030	68	589	346.3	346.5
C106	1.00	2341.559	2393.869	38	407	1642.9	1642.9	3523.252	—	73	695	1822.2	1822.4
C107	1.00	2459.705	2511.391	40	323	318.6	318.7	3552.776	3630.186	69	599	706.5	706.6
C108	1.00	2397.715	—	40	360	1823.8	1823.9	3632.999	—	74	679	1808.7	1808.8
C109	1.00	2482.150	—	39	377	1834.3	1834.4	3438.845	—	71	643	1827.6	1827.8

Table 5 Computational results (Type C2)

Name	f	K = 5						K = 10					
		$z_L$	$z_U$	$n_C$	Cols	time <sup>(1)</sup>	time <sup>(2)</sup>	$z_L$	$z_U$	$n_C$	Cols	time <sup>(1)</sup>	time <sup>(2)</sup>
C201	1.00	4616.510	4698.352	92	2341	481.5	482.1	4633.582	4732.639	95	2802	491.8	492.8
C202	0.75	4145.106	—	82	1388	1802.0	1802.7	4518.105	—	94	1785	1803.6	1804.7
C203	0.50	3910.374	—	79	1114	1802.1	1802.7	4419.673	—	94	1562	1834.4	1835.0
C204	0.25	3815.727	—	81	1294	1800.2	1800.9	4320.233	—	94	1593	1800.6	1801.9
C205	1.00	4598.378	—	92	1823	1824.7	1825.1	4574.330	—	96	2182	1922.4	1923.0
C206	1.00	4297.118	—	87	1649	1802.5	1802.9	4485.557	—	91	2053	1800.4	1801.0
C207	1.00	4151.891	—	83	1574	1800.2	1800.6	4332.178	—	96	1799	1800.5	1802.1
C208	1.00	4073.884	—	86	1327	1800.7	1801.1	4466.735	—	91	1643	1800.4	1800.9

Table 6 Computational results (Type RC1)

Name	f	K = 5						K = 10					
		$z_L$	$z_U$	$n_C$	Cols	time <sup>(1)</sup>	time <sup>(2)</sup>	$z_L$	$z_U$	$n_C$	Cols	time <sup>(1)</sup>	time <sup>(2)</sup>
RC101	1.00	2119.297	2121.167	34	224	98.4	98.4	3356.711	3455.795	64	480	253.8	253.9
RC102	0.75	2306.489	—	36	258	2447.1	2447.1	3557.083	—	69	485	1846.7	1846.8
RC103	0.50	2388.170	—	44	337	1940.4	1940.4	3637.563	—	72	558	1806.4	1806.5
RC104	0.25	2252.773	—	38	271	1931.6	1931.6	3769.909	—	68	528	1808.7	1808.8
RC105	1.00	2118.420	—	38	286	1806.9	1806.9	3420.146	—	62	449	2588.5	2588.6
RC106	1.00	2265.120	—	32	305	1946.6	1946.7	3559.426	—	65	530	1808.7	1808.7
RC107	1.00	2393.268	—	37	749	1874.4	1874.4	3756.876	—	63	537	1960.4	1960.5
RC108	1.00	2370.963	—	39	292	1802.1	1802.1	3855.973	—	69	529	2450.6	2450.6

Table 7 Computational results (Type RC2)

Name	f	K = 5						K = 10					
		$z_L$	$z_U$	$n_C$	Cols	time <sup>(1)</sup>	time <sup>(2)</sup>	$z_L$	$z_U$	$n_C$	Cols	time <sup>(1)</sup>	time <sup>(2)</sup>
RC201	1.00	4238.314	—	82	1783	1814.7	1814.9	4498.474	—	94	1500	1824.4	1824.5
RC202	0.75	3915.139	—	71	1067	1856.0	1856.9	4610.419	—	96	1183	2069.3	2069.4
RC203	0.50	3948.842	—	66	1064	1865.0	1865.6	4316.583	—	90	1121	1827.0	1827.3
RC204	0.25	4263.031	—	82	1126	1803.9	1804.4	4250.040	—	93	1403	1802.4	1803.5
RC205	1.00	4060.455	—	74	1059	1829.2	1829.5	4465.257	—	95	1116	1800.1	1800.3
RC206	1.00	4022.818	—	71	1303	1825.0	1826.8	4575.669	—	95	1356	1835.1	1835.5
RC207	1.00	4047.205	—	77	1181	1941.8	1942.6	4508.778	—	93	1250	1801.8	1802.1
RC208	1.00	4010.867	—	70	855	1802.6	1803.0	4372.123	—	87	1292	1802.3	1802.9

Table 8 Relative errors

Name	K	$z_L$	$z_U$	$\varepsilon$
R101	5	1112.760	1112.760	0.000
R101	10	3915.139	3915.139	0.000
R105	5	1329.330	1376.203	0.034
R105	10	1943.958	1950.706	0.003
C101	5	2215.401	2245.713	0.013
C101	10	3353.590	3457.379	0.030
C105	5	2282.907	2365.199	0.035
C105	10	3470.680	3556.030	0.024
C106	5	2341.559	2393.869	0.022
C107	5	2459.705	2511.391	0.021
C107	10	3552.776	3630.186	0.021
C201	5	4616.510	4698.352	0.019
C201	10	4612.626	4732.639	0.021
RC101	5	2119.297	2121.167	0.001
RC101	10	3356.711	3455.795	0.029

問題例の方が（多くの顧客を巡回できる可能性が高まるため当然のことであるが）求まった実行可能解の運

搬顧客数  $n_C$  が増加することを示している。

加えて、この数値実験の結果は、提案法の計算時の大部分が列生成法（手順の S0~S3）の計算時間  $time^{(1)}$  であることを示しているため、計算時間の短縮化のためには、今後、効果的な列の生成法や価格付け問題に対する効率的な解法の開発が必要であることを示唆している。

## 6. おわりに

当研究では、帰り荷と時間枠を考慮した選択型運搬経路問題を取り上げ、列生成法に基づくその近似解法を提案した。そして、提案した解法の有効性を検証するための数値実験を実施した。数値実験では、提案した解法を用いて全ての問題例で実行可能解を求めることができた。また、上界値が求まった問題例においては、相対誤差0.035以下の解が求まることを確認し、提案法を用いて高い精度の実行可能解が求まることを検証した。

しかしながら、当研究では価格付け問題の求解に数理計画ソルバーを用いていることもあり、多くの問題例で上界値を求めることができなかつた。それゆえ、今後、効果的な初期列の生成方法や、価格付け問題に対する効率的な解法を開発し、提案法の一層の高速化を図り、求まる解の精度を検証する必要がある。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K04617 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) G. Laporte, “The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms,” *European Journal of Operational research*, Vol. 59, pp. 345-358, 1992
- 2) P. Toth and D. Vigo, “Models Relaxation and Exact Approaches for the Capacitated Vehicle Routing Problem”, *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 123, pp. 345-358, 2002
- 3) M. O. Yano, T. J. Chan, L. K. Richter, T. Cutler, K. G. Murty and D. McGettigan, “Vehicle Routing at Quality Stores”, *Interfaces*, Vol. 17, No. 2, pp. 52-63, 1987
- 4) Ç. Koç, and G. Laporte, “Vehicle Routing with Backhauls: Review and Research Perspectives”, *Computers and Operations Research*, Vol. 91, pp. 79-91, 2018
- 5) M. M. Solomon and J. Desrosiers, “Time Windows Constrained Routing and Scheduling Problems,” *Transportation Science*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-13, 1988
- 6) C. Archetti, M. G. Speranza and D. Vigo, “Vehicle Routing Problems with Profits”, In: P. Toth and D. Vigo (Eds.), *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*, pp. 273-298, Philadelphia: SIAM, 2014
- 7) A. Gunawan, H. C. Lau and P. Vansteenwegen, “Orienteering Problem: A Survey of Recent Variants, Solution Approaches and Applications,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 255, pp. 345-358, 2016
- 8) H. Bouly, D. -C. Dang and A. Moukrim, “A Memetic Algorithm for the Team Orienteering Problem,” *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, Vol. 8, Issue 1, pp. 49-70, 2010
- 9) D. -C. Dang, R. N. Guibadj and A. Moukrim, “An Effective PSO-inspired Algorithm for the Team Orienteering Problem,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 229, Issue 2, pp. 332-344, 2013
- 10) S. W. Lin, “Solving the Team Orienteering Problem Using Effective Multi-start Simulated Annealing,” *Applied Soft Computing*, Vol. 13, Issue 2, pp. 1064-1073, 2013
- 11) M. Keshkaran, K. Ziarati, A. Bettinelli and D. Vigo, “Enhanced Exact Solution Methods for the Team Orienteering Problem,” *International Journal of Production Research*, Vol. 54, Issue 2, pp. 591-601, 2016
- 12) R. El-Hajj, D. -C. Dang and A. Moukrim, “Solving the Team Orienteering Problem with Cutting Planes,” *Computers and Operations Research*, Vol. 74, pp. 21-30, 2016
- 13) N. Bianchessi, R. Mansini and M. G. Speranza, “A Branch-and-cut Algorithm for the Team Orienteering Problem,” *International Transactions in Operational Research*, Vol. 25, Issue 2, pp. 627-635, 2018
- 14) C. Archetti, D. Feillet, A. Hertz and M. G. Speranza, “The Capacitated Team Orienteering and Profitable Tour Problems,” *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 60, Issue 6, pp. 831-842, 2009
- 15) A. Gunawan, K. M. Ng, V. F. Yu, G. Adiprasetyo and H. C. Lau, “The Capacitated Team Orienteering Problem,” *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Bangkok, Thailand, March 5-7*, pp. 1630-1638, 2019
- 16) C. Archetti, N. Bianchessi, M.G. Speranza, “Optimal Solutions for Routing Problems with Profits,” *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 161, Issues 4-5, pp. 547-557, 2013
- 17) S. W. Lin and V. F. Yu, “A Simulated Annealing Heuristic for the Team Orienteering Problem with Time Windows,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 217, Issue 1, pp. 94-107, 2012
- 18) Q. Hu and A. Lim, “An Iterative Three-component Heuristic for the Team Orienteering Problem with Time Windows,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 232, Issue 2, pp. 276-286, 2014
- 19) T. Cura, “An Artificial Bee Colony Algorithm Approach for the Team Orienteering Problem with Time Windows,” *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 74, pp. 270-290, 2014
- 20) M. Desrochers and G. Laporte, “Improvements and Extensions to the Miller-Tucker-Zemlin Subtour Elimination Constraints,” *Operations Research Letters*, Vol.10, pp.27-36, 1991
- 21) M. M. Solomon, “Algorithm for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Windows Constraints,” *Operations Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 254-265, 1987
- 22) Gurobi Optimization, Inc. Gurobi Optimizer Reference Manual Version 8.1.0, 2018

## 大学初年次における数学教材の提案（その 33）

### ～1 階線形常微分方程式～

貴田研司\*<sup>1</sup>

## A Suggestion on Mathematical Materials for Freshman Education Vol. 33 ～ The Linear Ordinary Differential Equation of the First Order ～

by

Kenshi KIDA \*<sup>1</sup>

(received on May. 29, 2020 & accepted on Aug. 3, 2020)

#### あらまし

1 階線形常微分方程式の解法の証明について、積分因子を用いた手法や定数変化法による方法などを述べる。そして、具体的な計算例を挙げて理解を助け、さらに応用例の紹介も行う。

#### Abstract

The purpose of this paper is to present proofs of solutions of the linear differential equations of the first order by means of the variation of constants and integrating factors. Further, we afford several concrete calculation examples.

キーワード：1 階線形常微分方程式，定数変化法，積分因子

*Keywords: Linear Differential Equation of the First Order, Variation of Constants, Integrating Factor*

## 1. はじめに

大学初年次の微分積分または微分方程式において、1 階線形常微分方程式

$$\frac{dy}{dx} + P(x)y = Q(x) \quad (\text{ただし, } P(x), Q(x) \text{ は, } x \text{ のみの関数とする.})$$

について学ぶ。微分方程式の中でも基本的であり、重要なものと考えられる。

本論文ではまず、1 階線形常微分方程式の解法について 3 通りの証明を紹介する。積分因子を用いたもの、定数変化法によるもの、解を  $y = u(x)v(x)$  と積に分解する手法の 3 通りである。積分因子、定数変化法、変数分離法の紹介をするという意味合いを兼ねる。そして、具体的な計算例と応用例を挙げる。

本論文の執筆にあたっては、古田孝之著「明解講義 微分方程式」<sup>1)</sup>と長崎憲一、中村正彰、横山利章共著「明解 微分方程式 改訂版」<sup>2)</sup>を大いに参考にした。

## 2. 1 階線形常微分方程式の解法

### 定理

1 階線形常微分方程式

$$\frac{dy}{dx} + P(x)y = Q(x) \quad (\text{ただし, } P(x), Q(x) \text{ は, } x \text{ のみの関数とする.}) \quad (2.1)$$

\*1 高輪教養教育センター 教授

Liberal Arts Education Center, Takanawa Campus,  
Professor

の解は次のように与えられる.

$$y = e^{-\int P(x)dx} \left\{ \int e^{\int P(x)dx} Q(x) dx + C \right\} \quad (C \text{ は任意定数}) \quad (2.2)$$

$$= e^{-\int P(x)dx} \cdot \int Q(x) e^{\int P(x)dx} dx + C e^{-\int P(x)dx}$$

■

上記の定理について、3通りの証明方法を紹介することにする. まず、準備として以下の変数分離形方程式を解いておく.

『変数分離形方程式からの準備』

$$\frac{dy}{dx} + R(x)y = 0$$

を解くことを考える.

$$\frac{dy}{y} = -R(x)dx$$

と変形できるので

$$\int \frac{1}{y} dy = -\int R(x) dx$$

となる. よって

$$\log|y| = -\int R(x) dx + C_1 \quad (C_1 \text{ は任意定数})$$

だから

$$|y| = e^{-\int R(x)dx + C_1} = e^{C_1} e^{-\int R(x)dx}$$

すなわち

$$y = C e^{-\int R(x)dx} \quad (C \text{ は任意定数, } C = \pm e^{C_1} )$$

が得られる.

■

(証明1) 【積分因子を用いた手法 (Bernoulli)】

(2.1) の両辺に  $m(x)$  をかけたとき、左辺が  $\{m(x)y\}'$  に等しくなる、すなわち

$$m(x) \left\{ \frac{dy}{dx} + P(x)y \right\} = \{m(x)y\}' \quad (2.3)$$

となるような  $m(x)$  を見つけたい. (2.3) を変形すると

$$m(x) \frac{dy}{dx} + m(x)P(x)y = m'(x)y + m(x) \frac{dy}{dx}$$

$$m'(x) = m(x)P(x)$$

$$m'(x) - P(x)m(x) = 0$$

となるが、『変数分離形方程式からの準備』の  $R(x) = -P(x)$  の場合だから

$$m(x) = Ce^{\int P(x)dx} \quad (C \text{ は任意定数})$$

である。特に、 $C = 1$  として

$$m(x) = e^{\int P(x)dx}$$

が得られる。

(2.1) の両辺に  $m(x) = e^{\int P(x)dx}$  をかけると

$$e^{\int P(x)dx} \left\{ \frac{dy}{dx} + P(x)y \right\} = e^{\int P(x)dx} Q(x)$$

(2.3) により

$$\frac{d}{dx} \{ e^{\int P(x)dx} y \} = e^{\int P(x)dx} Q(x) \tag{2.4}$$

と書き換えられる。(2.4) を  $x$  で積分すると

$$e^{\int P(x)dx} y = \int e^{\int P(x)dx} Q(x) dx + C \quad (C \text{ は任意定数})$$

すなわち

$$y = e^{-\int P(x)dx} \left\{ \int e^{\int P(x)dx} Q(x) dx + C \right\} \tag{2.2}$$

が得られる。

■

上記の  $m(x)$  のことを、積分因子と呼ぶ。積分因子については、古田孝之著「明解講義 微分方程式」<sup>1)</sup> (pp. 78-88) を参照されたい。

(証明 2) 【定数変化法を用いた手法 (Lagrange)】

同次方程式

$$\frac{dy}{dx} + P(x)y = 0 \tag{2.5}$$

の一般解を利用する方法を用いる。

『変数分離形方程式からの準備』により、一般解

$$y = Ae^{-\int P(x)dx} \quad (A \text{ は任意定数})$$

が得られる。

ここで、(2.5)に含まれる任意定数  $A$  を  $x$  の関数  $C(x)$  に置き換えて得られる関数

$$y = C(x)e^{-\int P(x)dx} \quad (2.6)$$

が(2.1)の一般解であると想定する.

$Y(x) = e^{-\int P(x)dx}$  において,  $y = C(x)Y(x)$  を(2.1)に代入すると

$$\{C'(x)Y(x) + C(x)Y'(x)\} + P(x)C(x)Y(x) = Q(x)$$

$$C'(x)Y(x) + C(x)\{Y'(x) + P(x)Y(x)\} = Q(x)$$

となるが,  $Y(x)$  は(2.5)の解であり  $Y'(x) + P(x)Y(x) = 0$  を満たすので

$$C'(x)Y(x) = Q(x)$$

$$C'(x)e^{-\int P(x)dx} = Q(x)$$

となる.

したがって,  $C'(x) = e^{\int P(x)dx}Q(x)$  であるから

$$C(x) = \int e^{\int P(x)dx}Q(x)dx + C \quad (C \text{ は任意定数}) \quad (2.7)$$

が, 関数  $C(x)$  の満たすべき条件である. (2.7)を(2.6)に代入して

$$y = e^{-\int P(x)dx} \left\{ \int e^{\int P(x)dx}Q(x)dx + C \right\} \quad (2.2)$$

が得られる.

■

与えられた微分方程式の特殊な場合について解き, さらにその一般解の任意定数  $C$  のところを関数  $C(x)$  で置き換えて  $C(x)$  の満たすべき微分方程式を解くことにより, 元の微分方程式の一般解を求める方法を定数変化法という<sup>3)</sup>.

(証明3) 【 $y = u(x)v(x)$  と積に分解する手法(Leibniz)】

$y = u(x)v(x)$  と分解して(2.1)に代入すると

$$\{u'(x)v(x) + u(x)v'(x)\} + P(x)u(x)v(x) = Q(x)$$

$$\{u'(x) + P(x)u(x)\}v(x) + u(x)v'(x) = Q(x) \quad (2.8)$$

まず,  $u'(x) + P(x)u(x) = 0$  を満たすような関数  $u(x)$  を求めたい. 証明2と同様にして, 『変数分離形方程式からの準備』により,

$$u(x) = C_1 e^{-\int P(x)dx} \quad (C_1 \text{ は任意定数}) \quad (2.9)$$

であることがわかる.

このとき、(2.8)は、 $u(x)v'(x) = Q(x)$  となっているので(2.9)と合わせて

$$v'(x) = \frac{1}{u(x)}Q(x) = \frac{1}{C_1} e^{\int P(x)dx} Q(x)$$

だから

$$v(x) = \frac{1}{C_1} \int e^{\int P(x)dx} Q(x) dx + C \quad (C \text{ は任意定数}) \quad (2.10)$$

となっている。(2.9)と(2.10)を  $y = u(x)v(x)$  に代入すれば

$$y = u(x)v(x) = C_1 e^{-\int P(x)dx} \left\{ \frac{1}{C_1} \int e^{\int P(x)dx} Q(x) dx + C \right\}$$

すなわち

$$y = e^{-\int P(x)dx} \left\{ \int e^{\int P(x)dx} Q(x) dx + C \right\} \quad (C \text{ は任意定数}) \quad (2.2)$$

が得られる。

■

### 3. 1 階線形常微分方程式の計算例

#### 例題 1 <sup>1)4)5)6)</sup>

次の微分方程式を解け。

$$(1) \quad \frac{dy}{dx} - \frac{1}{x}y = 1 + 2x^2$$

$$(2) \quad \frac{dy}{dx} + \frac{1}{x}y = \cos x$$

(解答) 第 2 章の定理を用いる。

(1)

$$P(x) = -\frac{1}{x}, \quad Q(x) = 1 + 2x^2$$

とおく。

$$\int P(x)dx = \int \left(-\frac{1}{x}\right) dx = -\log|x| = \log|x|^{-1} = \log \frac{1}{|x|}$$

であるから

$$e^{\int P(x)dx} = e^{\log \frac{1}{|x|}} = \frac{1}{|x|}.$$

よって、(2.2)により

$$\begin{aligned}
 y &= e^{-\int P(x)dx} \left\{ \int e^{\int P(x)dx} Q(x)dx + C \right\} \quad (C \text{ は任意定数}) \\
 &= |x| \left\{ \int \frac{1}{|x|} (1 + 2x^2) dx + C \right\} \\
 &= \pm x \left\{ \int \frac{1}{\pm x} (1 + 2x^2) dx + C \right\} \quad (\text{複号同順}) \\
 &= x \left\{ \int \frac{1}{x} (1 + 2x^2) dx + C \right\} \\
 &= x \left\{ \int \left( \frac{1}{x} + 2x \right) dx + C \right\} \\
 &= x(\log|x| + x^2 + C) \\
 &= x \log|x| + x^3 + Cx.
 \end{aligned}$$

■

(2)

$$P(x) = \frac{1}{x}, \quad Q(x) = \cos x$$

とおく.

$$\int P(x)dx = \int \frac{1}{x} dx = \log|x|$$

だから

$$e^{\int P(x)dx} = e^{\log|x|} = |x|.$$

よって, (2.2) により

$$\begin{aligned}
 y &= e^{-\int P(x)dx} \left\{ \int e^{\int P(x)dx} Q(x)dx + C \right\} \quad (C \text{ は任意定数}) \\
 &= \frac{1}{|x|} \left\{ \int |x| \cos x dx + C \right\} \\
 &= \frac{1}{\pm x} \left\{ \int \pm x \cos x dx + C \right\} \quad (\text{複号同順}) \\
 &= \frac{1}{x} \left\{ \int x \cos x dx + C \right\} \\
 &= \frac{1}{x} \left( x \sin x - \int \sin x dx + C \right) \\
 &= \frac{1}{x} (x \sin x + \cos x + C) \\
 &= \sin x + \frac{1}{x} \cos x + \frac{C}{x}.
 \end{aligned}$$

■

(2)の別解

積分因子を用いる.

$P(x) = \frac{1}{x}$ の場合であるから

$$m'(x) = m(x)P(x)$$

すなわち

$$m'(x) = \frac{1}{x} \cdot m(x)$$

を満たす関数の一つとして,  $m(x) = x$ が見つかる.

$$\frac{dy}{dx} + \frac{1}{x}y = \cos x$$

の両辺に  $m(x) = x$  をかけると

$$x \frac{dy}{dx} + y = x \cos x$$

すなわち

$$(xy)' = x \cos x$$

が得られる. したがって

$$xy = \int x \cos x \, dx + C \quad (C \text{ は任意定数})$$

$$= x \sin x - \int \sin x \, dx + C$$

$$= x \sin x + \cos x + C$$

である. よって

$$y = \sin x + \frac{1}{x} \cos x + \frac{C}{x}.$$

■

### 例題 2<sup>7)</sup>

動物の呼吸作用による肺の体積変化を考える.  $V(t)$ は時刻 $t$ における肺の体積 (ただし,  $t$ は最大呼吸の後の時刻を表す),  $r$ は肺の残気量を表す定数とする. “ $V$ の時間に対する変化率は $V - r$ に比例する”ことが知られている. そこで比例定数を $\alpha$  ( $\alpha$ は空気の推進力,  $-\alpha$ は気管の抵抗を表す) とすれば

$$\frac{dV}{dt} = -\alpha(V - r) \quad (\alpha > 0) \tag{3.1}$$

がモデル化された微分方程式となる.

(3.1)を変形すると

$$\frac{dV}{dt} + \alpha V = \alpha r$$

となるが、第2章の定理を用いて解くことにする.

$$P(x) = \alpha, \quad Q(x) = \alpha r$$

とおく.

$$\int P(t)dt = \int \alpha dt = \alpha t$$

だから

$$e^{\int P(t)dt} = e^{\alpha t}.$$

よって、(2.2)により

$$V(t) = e^{-\int P(t)dt} \left\{ \int e^{\int P(t)dt} Q(t)dt + C \right\} \quad (C \text{ は任意定数})$$

$$= \frac{1}{e^{\alpha t}} \left( \int e^{\alpha t} \cdot \alpha r dt + C \right)$$

$$= \frac{1}{e^{\alpha t}} (r e^{\alpha t} + C)$$

$$= r + \frac{C}{e^{\alpha t}}$$

となることが示される.

■

(別解) 以下のように変数分離形として解く方法もある.

(3.1)は

$$\frac{1}{V-r} dV = -\alpha dt$$

と変形できるので

$$\int \frac{1}{V-r} dV = - \int \alpha dt$$

である. したがって

$$\log|V-r| = -\alpha t + C_1 \quad (C_1 \text{ は任意定数})$$

だから

$$|V-r| = e^{-\alpha t + C_1} = e^{C_1} e^{-\alpha t}$$

である.

よって

$$V - r = \pm e^{C_1} e^{-\alpha t}$$

が得られる。したがって

$$V = r + C e^{-\alpha t} \quad (C \text{は任意定数}, C = \pm e^{C_1})$$

すなわち

$$V = r + \frac{C}{e^{\alpha t}}$$

■

## 参考文献

- 1) 古田孝之「明解講義 微分方程式」培風館，2002
- 2) 長崎憲一，中村正彰，横山利章共著「明解 微分方程式 改訂版」培風館，2003
- 3) 田代嘉宏「微分方程式要論」森北出版，1982
- 4) 矢野健太郎，石原繁共著「基礎解析コース 微分方程式」裳華房，1994
- 5) 石原繁，浅野重初共著「理工系入門 微分積分」裳華房，1999
- 6) 三宅敏恒「微分方程式—やさしい解き方—」培風館，2007
- 7) 垣田高夫「応用解析セミナー 微分方程式」培風館，1996

# 大学初年次における数学教材の提案（その 34）

## ～ガロア対応の例～

貴田研司\*<sup>1</sup>

### A Suggestion on Mathematical Materials for Freshman Education Vol. 34

#### ～ Examples of the Galois Correspondence ～

by

Kenshi KIDA \*<sup>1</sup>

(received on May. 29, 2020 & accepted on Aug. 3, 2020)

#### あらまし

ガロア理論の基本定理として知られているガロア対応すなわちガロア群  $G$  の部分群の全体からなる集合と有限次ガロア拡大  $L/K$  の中間体  $M$  の全体からなる集合との間の 1 対 1 の対応の具体例を挙げるにより、ガロア理論の理解の一助としたい。

#### Abstract

The purpose of this paper is to present a concrete example of the Galois correspondence. Further, we afford a summary account of the Fundamental Theorem of Galois Theory.

**キーワード:** ガロア対応, ガロア理論の基本定理, 束論的図式

**Keywords:** Galois Correspondence, Fundamental Theorem of Galois Theory, Lattice Diagram

## 1. はじめに

拙著「大学初年次における数学教材の提案（その 30）～ガロア群～」<sup>1)</sup>において、ガロア群の概念の解説を行い、そして分離多項式のガロア群を具体的に求めた。本論文では、ガロア対応の具体例を挙げる。このガロア対応は以下のような図によって表すこともある<sup>2)</sup>。

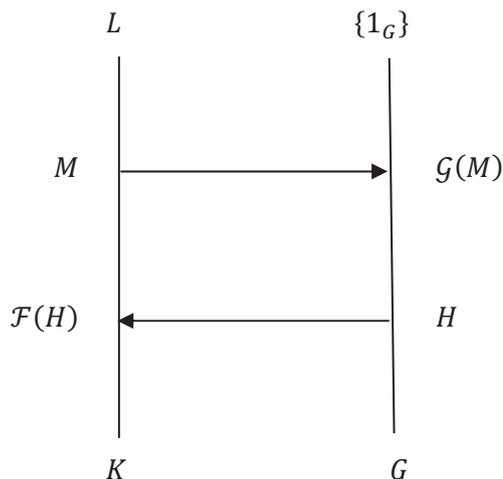


Fig. 1 Galois correspondence

本論文の執筆にあたっては、増田真郎「応用のための代数系入門」<sup>3)</sup>を含めて多くの文献を大いに参考にした<sup>2)4)5)6)7)8)</sup>。

\*1 高輪教養教育センター 教授  
Liberal Arts Education Center, Takanawa Campus,  
Professor

## 2. ガロア理論の基本定理

体  $L$  の部分集合  $K$  が,  $L$  と同じ演算で体をなすとき,  $L$  を  $K$  の拡大体,  $K$  を  $L$  の部分体といい,  $L/K$  で表す. 体の拡大  $L/K$  を有限次ガロア拡大,  $G = \text{Gal}(L/K)$  をそのガロア群とする.  $H \subset \text{Gal}(L/K)$  のとき

$$\mathcal{F}(H) = \{a \in L \mid \sigma(a) = a \quad (\text{任意の } \sigma \in H)\}$$

とおく.  $\mathcal{F}(H)$  は  $H$  の不変体(または, 固定体)と呼ばれ  $L^H$  と表すこともある. また,  $L$  の部分体  $M$  に対して

$$\mathcal{G}(M) = \{\sigma \in \text{Gal}(L/K) \mid \sigma(a) = a \quad (\text{任意の } a \in M)\}$$

とおく.  $\mathcal{G}(M)$  は  $G^M$  と書くこともある.

### 定理 (ガロア理論の基本定理)

$L/K$  を有限次ガロア拡大とし,  $G = \text{Gal}(L/K)$  を  $L/K$  のガロア群とする.

(1)  $G$  の部分群  $H$  に対して  $\mathcal{G}\{\mathcal{F}(H)\} = H$  である.

(2)  $L/K$  の中間体  $M$  に対して  $\mathcal{F}\{\mathcal{G}(M)\} = M$  である.

すなわち,  $G$  の部分群の全体からなる集合と  $L/K$  の中間体  $M$  の全体からなる集合との間の 1 対 1 の対応 (全単射) を与える.

### 定理

$M, M'$  を  $L/K$  の中間体,  $H, H'$  は,  $G$  の部分群とするとき

(1)  $M \subset M' \Leftrightarrow \mathcal{G}(M) \supset \mathcal{G}(M')$

(2)  $H \subset H' \Leftrightarrow \mathcal{F}(H) \supset \mathcal{F}(H')$

が成り立つ.

## 3. ガロア対応の例

拙著「大学初年次における数学教材の提案 (その 30) ～ガロア群～」<sup>1)</sup>において以下のことを述べた.

分離多項式

$$p(x) = x^3 - 2 = (x - a)(x - a\omega)(x - a\omega^2) \in \mathbb{Q}[x] \quad (a = \sqrt[3]{2}, \omega \text{ は } 1 \text{ の原始 } 3 \text{ 乗根})$$

の  $\mathbb{Q}$  上の最小分解体は

$$L = \mathbb{Q}(a, \omega) = \{k_0 + k_1a + k_2a^2 + k_3\omega + k_4a\omega + k_5a^2\omega \mid k_0, k_1, \dots, k_5 \in \mathbb{Q}\}$$

である.  $p(x)$  のガロア群は, 3 次対称群  $S_3$  (または, 二面体群  $D_3$ ) に同型であり,  $K = \mathbb{Q}$  とおけば

$$G = \text{Gal}(L/K) \cong \langle \sigma, \tau \mid \sigma^3 = 1_G, \tau^2 = 1_G, \tau\sigma\tau^{-1} = \sigma^{-1} \rangle = \{1_G, \sigma, \sigma^2, \tau, \sigma\tau, \sigma^2\tau\}$$

となっている. 但し

$$1_G : a \mapsto a, \omega \mapsto \omega,$$

$$\sigma : a \mapsto a\omega, \omega \mapsto \omega,$$

$$\sigma^2 : a \mapsto a\omega^2, \omega \mapsto \omega,$$

$$\tau : a \mapsto a, \omega \mapsto \omega^2,$$

$$\sigma\tau : a \mapsto a\omega, \omega \mapsto \omega^2,$$

$$\sigma^2\tau : a \mapsto a\omega^2, \omega \mapsto \omega^2$$

とおいた.

そして,  $p(x) = x^3 - 2 = (x - a)(x - a\omega)(x - a\omega^2)$  の根の置換群として表せば

$$1_G = \begin{pmatrix} a & a\omega & a\omega^2 \\ a & a\omega & a\omega^2 \end{pmatrix} = (1),$$

$$\sigma = \begin{pmatrix} a & a\omega & a\omega^2 \\ a\omega & a\omega^2 & a \end{pmatrix} = (1\ 2\ 3),$$

$$\sigma^2 = \begin{pmatrix} a & a\omega & a\omega^2 \\ a\omega^2 & a & a\omega \end{pmatrix} = (1\ 3\ 2),$$

$$\tau = \begin{pmatrix} a & a\omega & a\omega^2 \\ a & a\omega^2 & a\omega \end{pmatrix} = (2\ 3),$$

$$\sigma\tau = \begin{pmatrix} a & a\omega & a\omega^2 \\ a\omega & a & a\omega^2 \end{pmatrix} = (1\ 2),$$

$$\sigma^2\tau = \begin{pmatrix} a & a\omega & a\omega^2 \\ a\omega^2 & a\omega & a \end{pmatrix} = (1\ 3)$$

となる.

以上であるが, ガロア対応すなわちガロア群  $G$  の部分群の全体からなる集合と有限次ガロア拡大  $L/K$  の中間体  $M$  の全体からなる集合との間の 1 対 1 の対応のあることが, ガロア理論の基本定理として知られているのでこれを求めたい.

ガロア群  $G$  の部分群をすべて挙げると

$$\text{位数 } 6 : G \cong D_3 (\text{または } S_3)$$

$$\text{位数 } 3 : S = \{1_G, \sigma, \sigma^2\} \cong C_3 (\text{: 位数 } 3 \text{ の巡回群})$$

$$\text{位数 } 2 : A = \{1_G, \tau\} \cong C_2 (\text{: 位数 } 2 \text{ の巡回群})$$

$$B = \{1_G, \sigma\tau\} \cong C_2 (\text{: 位数 } 2 \text{ の巡回群})$$

$$C = \{1_G, \sigma^2\tau\} \cong C_2 (\text{: 位数 } 2 \text{ の巡回群})$$

$$\text{位数 } 1 : I = \{1_G\}$$

である.

まず, 明らかに  $L^G = K = \mathbb{Q}$ ,  $L^I = L = \mathbb{Q}(a, \omega)$  である.

$L = \mathbb{Q}(a, \omega)$  の任意の元は  $x = k_0 + k_1a + k_2a^2 + k_3\omega + k_4a\omega + k_5a^2\omega$  の形に表される. また,  $\omega$  は 1 の原始 3 乗根であり,  $\omega^2 + \omega + 1 = 0$  であることに留意しておく.

①  $L^S$  を求める.

$$\begin{aligned}
 \sigma(x) &= k_0 + k_1\sigma(a) + k_2\sigma(a^2) + k_3\sigma(\omega) + k_4\sigma(a\omega) + k_5\sigma(a^2\omega) \\
 &= k_0 + k_1a\omega + k_2a^2\omega^2 + k_3\omega + k_4a\omega^2 + k_5a^2 \\
 &= k_0 + k_1a\omega + k_2a^2(-1 - \omega) + k_3\omega + k_4a(-1 - \omega) + k_5a^2 \\
 &= k_0 - k_4a + (-k_2 + k_5)a^2 + k_3\omega + (k_1 - k_4)a\omega - k_2a^2\omega
 \end{aligned}$$

である。よって、 $x$  が  $\sigma$  で (よって、 $S$  で) 固定されるための必要十分条件は

$$k_0 = k_0, \quad k_1 = -k_4, \quad k_2 = -k_2 + k_5, \quad k_3 = k_3, \quad k_4 = k_1 - k_4, \quad k_5 = -k_2$$

である。したがって  $k_0$  と  $k_3$  は任意であるが  $k_1 = 0, k_2 = 0, k_4 = 0, k_5 = 0$  なので  $x = k_0 + k_3\omega$  だから

$$L^S = \mathbb{Q}(\omega)$$

である。

②  $L^A$  を求める。

$$\begin{aligned}
 \tau(x) &= k_0 + k_1\tau(a) + k_2\tau(a^2) + k_3\tau(\omega) + k_4\tau(a\omega) + k_5\tau(a^2\omega) \\
 &= k_0 + k_1a + k_2a^2 + k_3\omega^2 + k_4a\omega^2 + k_5a^2\omega^2 \\
 &= k_0 + k_1a + k_2a^2 + k_3(-1 - \omega) + k_4a(-1 - \omega) + k_5a^2(-1 - \omega) \\
 &= (k_0 - k_3) + (k_1 - k_4)a + (k_2 - k_5)a^2 - k_3\omega - k_4a\omega - k_5a^2\omega
 \end{aligned}$$

である。よって、 $x$  が  $\tau$  で (よって、 $A$  で) 固定されるための必要十分条件は

$$k_0 = k_0 - k_3, \quad k_1 = k_1 - k_4, \quad k_2 = k_2 - k_5, \quad k_3 = -k_3, \quad k_4 = -k_4, \quad k_5 = -k_5$$

である。したがって  $k_0, k_1, k_2$  は任意であるが  $k_3 = 0, k_4 = 0, k_5 = 0$  なので  $x = k_0 + k_1a + k_2a^2$  だから

$$L^A = \mathbb{Q}(a)$$

である。

③  $L^B$  を求める。

$$\begin{aligned}
 \sigma\tau(x) &= k_0 + k_1\sigma\tau(a) + k_2\sigma\tau(a^2) + k_3\sigma\tau(\omega) + k_4\sigma\tau(a\omega) + k_5\sigma\tau(a^2\omega) \\
 &= k_0 + k_1a\omega + k_2a^2\omega^2 + k_3\omega^2 + k_4a + k_5a^2\omega \\
 &= k_0 + k_1a\omega + k_2a^2(-1 - \omega) + k_3(-1 - \omega) + k_4a + k_5a^2\omega \\
 &= (k_0 - k_3) + k_4a - k_2a^2 - k_3\omega + k_1a\omega + (-k_2 + k_5)a^2\omega
 \end{aligned}$$

である。よって、 $x$  が  $\sigma\tau$  で (よって、 $B$  で) 固定されるための必要十分条件は

$$k_0 = k_0 - k_3, \quad k_1 = k_4, \quad k_2 = -k_2, \quad k_3 = -k_3, \quad k_4 = k_1, \quad k_5 = -k_2 + k_5$$

である。したがって、 $k_0, k_5$  は任意であるが  $k_1 = k_4$  そして  $k_2 = 0, k_3 = 0$  である。よって

$$x = k_0 + k_1a + k_1a\omega + k_5a^2\omega = k_0 + k_1a(1 + \omega) + k_5a^2\omega = k_0 - k_1a\omega^2 + k_5(a\omega^2)^2$$

だから

$$L^B = \mathbb{Q}(a\omega^2)$$

である.

④  $L^C$ を求める.

$$\begin{aligned} \sigma^2\tau(x) &= k_0 + k_1\sigma^2\tau(a) + k_2\sigma^2\tau(a^2) + k_3\sigma^2\tau(\omega) + k_4\sigma^2\tau(a\omega) + k_5\sigma^2\tau(a^2\omega) \\ &= k_0 + k_1a\omega^2 + k_2a^2\omega + k_3\omega^2 + k_4a\omega + k_5a^2 \\ &= k_0 + k_1a(-1 - \omega) + k_2a^2\omega + k_3(-1 - \omega) + k_4a\omega + k_5a^2 \\ &= (k_0 - k_3) - k_1a + k_5a^2 - k_3\omega + (-k_1 + k_4)a\omega + k_2a^2\omega \end{aligned}$$

である. したがって,  $x$  が  $\sigma^2\tau$  で (よって,  $C$  で) 固定されるための必要十分条件は

$$k_0 = k_0 - k_3, k_1 = -k_1, k_2 = k_5, k_3 = -k_3, k_4 = -k_1 + k_4, k_5 = k_2$$

である. したがって,  $k_0, k_4$  は任意であるが  $k_2 = k_5$  そして  $k_1 = 0, k_3 = 0$  である. よって

$$x = k_0 + k_2a^2 + k_4a\omega + k_2a^2\omega = k_0 + k_4a\omega + k_2a^2(1 + \omega) = k_0 + k_4a\omega - k_2a^2\omega^2 = k_0 + k_4a\omega - k_2(a\omega)^2$$

だから

$$L^C = \mathbb{Q}(a\omega)$$

である.

以上の結果を束論的図式にまとめておく.

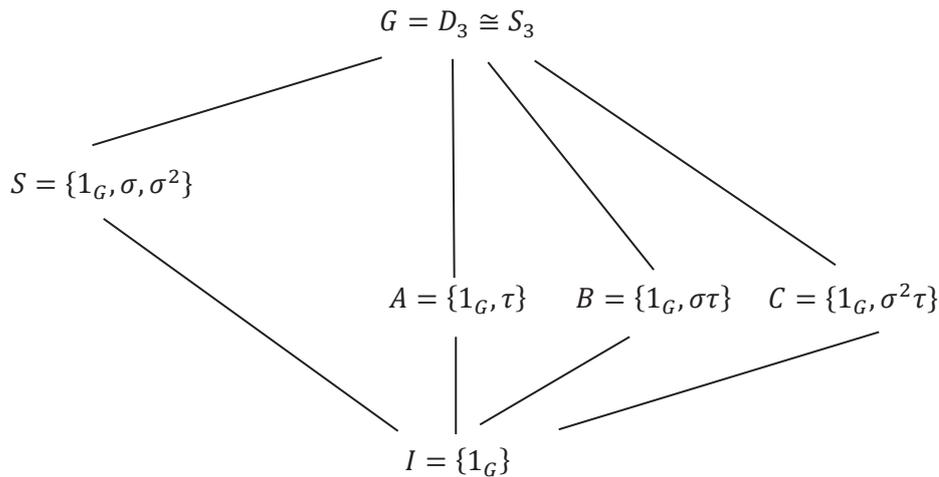


Fig. 2 Lattice of subgroups

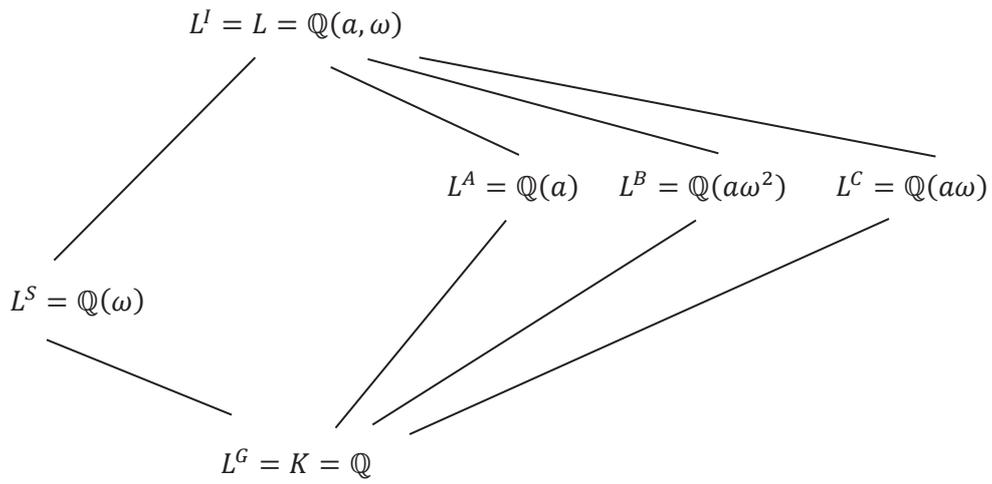


Fig. 3 Lattice of subfields

**参考文献**

- 1) 貴田研司, “大学初年次における数学教材の提案 (その 30) ～ガロア群～,” 東海大学紀要情報通信学部, Vol. 12, No. 2, 2019, pp. 32-39
- 2) 三宅敏恒「入門代数学」培風館, 1999
- 3) 増田真郎「応用のための代数系入門」サイエンス社, 1981
- 4) 横井秀夫, 裕野敏博共著「代数演習」サイエンス社, 1989
- 5) I. スチュワート著, 永尾汎監訳, 新関章三訳「ガロアの理論」共立全書, 1979
- 6) イアン・スチュワート著, 並木雅俊, 鈴木治郎訳「明解ガロア理論[原著第3版]」講談社, 2008
- 7) Ian Stewart 「GALOIS THEORY Fourth Edition」CRC Press, 2014
- 8) 松坂和夫「代数系入門」岩波書店, 1976

---

東海大学情報通信学部紀要委員会

---

委員長 大川 猛  
委員 山田 光穂  
金子 雅明  
山本 宙  
ファイン ゲーリー スコット

---

EDITORIAL COMMITTEE OF PROCEEDINGS OF  
THE SCHOOL OF INFORMATION  
AND TELECOMMUNICATION  
ENGINEERING  
TOKAI UNIVERSITY

Chairman Takeshi OHKAWA  
Member Mitsuho YAMADA  
Masaaki KANEKO  
Hiroshi YAMAMOTO  
Gary Scott FINE

---

本紀要の論文は、情報通信学部紀要委員会で  
査読・審査を受け、掲載可と判定された原著  
論文である。

---

東海大学紀要 情報通信学部

Vol. 13 No. 1 2020

2020年9月30日 発行

発行所 東海大学情報通信学部

〒108-8619 東京都港区高輪2-3-23

tel 03-3441-1171

---

(港北出版印刷株式会社)

