

*Research Reports of
National Institute of Technology, Tokyo College
No. 57, Mar. 2026*

東京工業高等専門学校
研究報告書



第 57 号

2026. 3

目 次

【査読なし論文】 若手研究者の雇用や分布に影響を与える要因の分析 — 政府統計の分析から見える傾向 —	樋口 聰 1
線形代数と量子力学	前段 眞治 9
実験レポートのやり直し実践における実験の背景からの再構築 — 誤概念の可視化と修正を促す操作的指示文を通して —	藤井 俊介 17
アクセシビリティを糸口とした差別に関する技術者倫理の授業 — 自分の作ったものがこの世界に存在してよいものであるために —	江藤 信暁 26
ナット駆動型ボールねじ位置決め機構の基礎的研究	堤 博貴 35
東京高専内での学術連携の事例紹介	武田 美咲 45
アーク溶接のデジタルツインに向けた3次元点群データを用いた計算領域の構築 根本 雄介, 長沢 東悟, 谷上 真緒	51
鉄道模型製作を通じた創造性と技術スキル向上の教育的研究	西村 亮, 堤 博貴 60
高専生に向けたコンピュータと分散ネットワーク教材の作製と実装 — コンピュータ, ネットワーク教育の発展に向けて — 田中 晶, 細川 翼, 小川 仁希, 梶 亮平, 渡辺 克樹	68
p -ニトロフェノールおよびその誘導体の淡水生態に及ぼす影響 — 誘導体との同時曝露による複合毒性評価 —	庄司 良, 工藤 洲瑛 79
Comparison of News Article Classification Models using Automated Machine Learning — A Case Study of the Changes of Defense Capability Debate in Asahi Shimbun Editorials — Hiroharu MATSUBARA, Masato NAKAHARA, Hodaka SAITO	85

CONTENTS

【Non-refereed Papers】

- Analysis of Factors affecting the Employment and Distribution of Young Researchers
— Trends Revealed from an Analysis of Official Government Statistics —
Akira HIGUCHI 1
- Linear Algebra and Quantum Mechanics
Shinji MAEDAN 9
- Instruction-guided revision of physics laboratory reports for reconstructing
systematic physical understanding from everyday experiences
— using feedback sheets designed for visualizing misconceptions and operational (procedural)
instructions that guide students in revising their reports —
Shunsuke FUJII 17
- Class of Engineering Ethics on Discrimination with a Focus on Accessibility
— Ensuring What We Create Deserves to Exist in the World —
Nobuaki ETO 26
- Fundamental Study on a Nut-Driven Ball Screw Positioning Mechanism
Hirotaka TSUTSUMI 35
- Case Study of Academic Collaboration at Tokyo KOSEN
Misaki TAKEDA 45
- Computational Domain for Digital Twin of Arc Welding Using 3D Point Cloud Data
Yusuke NEMOTO, Togo NAGASAWA, Mao TANIGAMI 51
- Educational Research on Enhancing Creativity and Technical Skills
through Railway Model Production
Makoto NISHIMURA, Hirotaka TSUTSUMI 60
- Design and Implementation of Computer and Distributed Network Educational Materials
for Students of National Institutes of Technology
— For the Evolution of Computer and Network Education —
Akira TANAKA, Tsubasa HOSOKAWA, Hitoki OGAWA
Ryohei KAJI, Katsuki WATANABE 68
- Evaluation of the Effects of *p*-Nitrophenol and its Derivatives on Aquatic Organisms
— Effects of Combined Toxicity of Simultaneous Exposure to Derivatives —
Ryo SHOJI, Shuei KUDO 79
- Comparison of News Article Classification Models Using Automated Machine Learning
— A Case Study of the Changes of Defense Capability Debate in Asahi Shimbun Editorials —
Hiroharu MATSUBARA, Masato NAKAHARA, Hodaka SAITO 85

若手研究者の雇用や分布に影響を与える要因の分析 —政府統計の分析から見える傾向—

樋口 聡*

本稿は、高等教育機関が抱えてきた内在的問題である若手研究者問題を、大学やその学部等の教育研究組織の全体像の中でとらえ、その規模や分野構成、人的・財務的構造、研究力、人材養成機能などの特性が、若手研究者の雇用や分布にいかに関与しているかを、大学を対象とした政府統計の個票データを連結することにより分析を試みたものである。この過程で、政府統計の連結手法や大学の教育研究組織の機能特性の分類手法の基礎を導くことができ、また、分析の結果から、教育研究組織やポストドクターの分布等の分野毎の特徴、研究大学の教育研究組織の特徴と若手研究者の分布等の関連などを確認することができた。

(キーワード: ポストドクター, 博士課程教育, 若手研究者, 大学教員組織, 大学財政)

Analysis of Factors affecting the Employment and Distribution of Young Researchers

—Trends Revealed from an Analysis of Official Government Statistics—

Akira HIGUCHI*

In this paper we attempt to analyze how characteristics of universities affect the employment and distribution of young researchers in the context of the overall picture of universities and their faculties, by linking micro data from multiple government statistics and examining such as size, field of research, composition of members, financial structure and degree-granting function. In this research process, we were able to derive a basic method for linking government statistics and classifying the functional characteristics of educational and research organizations, also we were able to confirm the correlation between the characteristics of organizations at research universities and the distribution of young researchers.

(Keywords: Postdoctoral researcher, doctoral education, young researcher, university faculty, university finances)

1. はじめに

“VUCAの時代”といわれるほど不確実性が高く予測困難な時代を迎える中、目覚ましく発展し続ける科学技術の社会課題解決への貢献は増大し続けており、科学技術は国力の源といえる。

科学技術の担い手は研究者であり、研究者数は欧米東アジア各国とも増加傾向にある。一方、統計上日本は人口当たりの研究者数は多いが近年横ばいにある。また、研究者への“パスポート”となる博士号の取得者も、これらの国々の増加傾向に対し少なく、横ばいであり、内訳も医学に偏る。

もちろん、各国それぞれに産学の研究機関の位置づけも研究者や高度人材の養成・雇用システムも異なるため、一概に比較することはできない。しかし、修士課程在籍者が就職を選択する理由と

して、博士課程に進学すると生活の経済的見通しが立たない」、「博士課程に進学すると修了後の就職が心配である」などネガティブな理由を挙げる者が多い^{*1}ことを考えると、ここにボトルネックがあることは否定できない。

博士号取得後のポストドクター等の若手研究者の時期は、将来P I (Principal Investigator: 研究主宰者)として研究を先導していくためにかげがえのない時期である。にもかかわらず、雇用の不安定さやキャリアパスの不透明さ、さらにこれらが短期的な研究業績への圧力を強めたことが、研究者を志すことを躊躇させる一因となっている。こうしたことを踏まえ、本研究は、若手研究者の雇用や分布などに影響を与えている要因は何かについて分析を試みることを通して、若手研究者の

^{*1} 文部科学省 科学技術・学術政策研究所 修士課程 (6 年制学科を含む) 在籍者を起点とした追跡調査, 2021 年 6 月

* 校長

キャリアの見通しを改善させるために何が必要か、何ができるかを考察することを狙いとした。

2. 若手研究者問題の背景

若手研究者のキャリアの不安定さは高等教育機関が抱えてきた内在的問題である。そのため、分析に先立って、これまでの政策の変遷が、若手研究者の雇用等に与えてきた影響を振り返る。

若手研究者をめぐる問題は、ポストドクターという言葉が一般化するはるか昔から存在する。

伝統的に日本の大学教員は、教授、助教授、助手に区分され、大学院を持つ大学は、教授・助教授・助手で構成する「講座」に、院生も配属され、これが教育研究の基本組織となっていた。かつての大学院は大学教員の養成を目的としていたため、この各大学の専門分野縦割りの講座制は後継者養成システムの役割を果たし、国立大学を中心に大学教員の需給を相当程度規定してきた。

しかし、1960年代の高度経済成長期の理工系学部をはじめとする大学の新增設、1970年前後に到来したベビーブームの波による大学の定員の量的拡大は、こうした需給構造を一変させた。特に、この時期の大学の量的拡大は若手非常勤講師を急増させたが、続く1980年代の定員抑制期に助手から教授への定員振替なども加わり若手研究者ポストが縮小しオーバードクター問題と呼ばれた。その後、1990年代の「ポストドクター等1万人支援計画」などで若手研究者への支援制度は拡充され、「大学院重点化」で大学院の強化が進められたが、倍増を目指した量的拡大は明確な需給予測に基づくものではなく、バブル崩壊下で博士の高度専門職業人としてのキャリアは限られ、ポストドクター問題に至った。しかも、厳しい財政状況で大学等の基盤的経費も削減され、競争的資金による若手研究者の任期付雇用が増え、ポストドクターの長期化、高齢化が進行した。

このように1970年代と1990年代の大学・大学院の量的拡大は若手研究者の有期・非正規雇用や経済的支援の強化を伴ったが、人材養成政策は政策実行から人材輩出までのタイムラグが長く、その間の雇用環境の鈍化で教員の年齢構成が上がり、新規採用が抑制され、博士号取得者のキャリアが不安定になることが繰り返されている。こうした人材養成政策とその効果のギャップが若手研究者問題の社会問題化の背景にあるといえる。

日本の博士号取得者は欧米と比べて少なく、大学・大学院の量的拡大に際しても企業の研究技術職の層は主に修士や学士で、博士課程は依然として大学などの研究者養成の性格が強かった。しかも、大学の正教授の「座」を意味する「講座」が、教授から助教、助手、大学院生、卒業研究の学部生までも含む「組織」を意味する日本の大学では、講座は恒常的な研究グループに近い。故に、外部の研究協力者や研究補助者の層が薄く、博士課程の学生や若手研究者の流動性も乏しかった。

もちろん、今日では大学院教育は学位プログラムとして組織化され、教員の昇任人事も公募制が広く採られている。しかし、日本の博士号取得者のキャリアの多様性に制約がある以上、博士号取得後の若手研究者の処遇が大学の基本組織の有り様に依存することは依然として否定できない。博士号取得者は専攻分野を持つ高度な専門人材であり、キャリアチェンジは簡単ではなくかつ社会的損失でもある。北野¹⁾は「ポストドク問題をポストドク本人の問題に帰する『自己責任論』を否定しつつ、日本の学術体制を支える若手研究者の養成と確保という『国家政策』として再検討する」立場から論を展開しているが、筆者は、高等教育・研究開発システムにおける位置づけが不明確なために、政府、大学、産業界等の各主体の行動のねじれにより歪みが凝縮された構造問題ととらえる。故に本稿は、伝統的な日本の大学の基本組織がその大学の教育研究機能や財政状況、分野などからどのような特徴を持ち、若手研究者の処遇等にどのように影響を与えているかを考察するものである。

3. 分析の方法

本稿は、学生、教職員で構成される大学の教育研究組織の全体像の中でポストドクターをとらえ、それぞれの組織の機能や特性の違いがポストドクターの雇用や分布等にいかに関与しているかを分析するものである。大学を機能別に分類した先行研究としては、科学技術・学術研究所³⁾が論文数の国内シェアにより大学を分類し論文生産性の推移等を分析し、光田(2004)²⁾が米国カーネギー教育振興財団の大学分類法を参考に日本の大学の学位授与状況を用いた分類を行い、山本(2013)⁴⁾が国立大学の財務諸表から常勤教員人件費の増減率等を分析するなどの取組がある。本稿では、これらの先行研究を参照しつつ、既存の統計調査

で継続的に分析できることを狙い、大学を対象とした政府統計の個票データを連結することにより、学生、教員、ポストドクター等の専門分野・年齢分布や雇用状況、財務構造を結び付けることを通じて、大学や学部等の規模や専門分野・職位構成、研究力、人材養成機能、立地、財務構造等が、若手研究者の雇用や分布等にいかに関与しているかの分析を試みた。

3.1. データ連結の方法

分析には、文部科学省「学校基本調査」、学校教員統計調査及び総務省「科学技術研究調査」の平成28年度、令和元年度対象の調査、文部科学省「ポストドクター等の雇用・進路に関する調査」

(以下「ポスドク調査」という。)2015年、2018年調査の個票データの提供許可を得て使用した*2。

分析に用いた統計調査の調査単位は、学校基本調査の学生状況調査が学科・専攻単位で、学校教員統計調査と科学技術研究調査は学部・研究科・研究所単位、ポスドク調査は大学単位と異なる。また、学校基本調査は学科・専攻自体の専門分野に全学生を集計させるのに対し他の3調査は個々の構成員の専門分野を集計する違いもある。このため、データの連結は学部・研究科単位で行うこととした。

この場合、ほとんどの研究科は学部を基礎に持ち、多くの教員は学部と研究科を兼担している。また、研究科の中には、理学部と工学部両方を基礎とする理工学研究科のような大括り研究科もある。これについて、学校教員統計調査はいずれか本務先でカウントし、科学技術研究調査は関連研究科を含めた学部を調査単位としていることから、科学技術研究調査が対象とする学部と独立研究科(以下「学部等」という。)の単位をベースに研究科と学部との対応関係を推定し、その上で、大括り研究科については、学生は専攻の専門分野をもとに、教員は個々の専門分野をもとにそれぞれ対応する学部等に配分した(例えば理工学研究科の場合、専攻の分野が理学の学生は理学部に、工学の学生は工学部に、教員は専門が理学の教員数は理学部に、工学の教員は工学部に振り分けた)。

また、ポスドク調査は大学単位で集計されてい

るが、科学技術研究調査上学部等単位で集計される「その他の研究員」がポストドクター数と関連すると考えられる。このため、「その他の研究員」の学部等・研究所毎のシェアに大学単位のポストドクター等総数を乗じた数を専門分野合計の上限として参照しながら、大学単位の専門分野別ポストドクター等数に当該専門分野の学部等・研究所毎の本務教員数のシェアを乗じて配分した数を専門分野別の学部等・研究所のポストドクター数として推計を行った。

これらに加え、文部科学省「全国大学一覧」や国立大学法人評価の評価単位、大学のホームページや設置認可に係る基本計画書などを参照し、学部と研究科の対応関係や改組等のあった学部等の対応関係を確認し、国立(86大学427学部等)、公立(93大学204学部等)、私立(607大学1866学部等)に整理し、データ連結を行った。

ただ実際には、調査回答時期、厳密な定義、調査実施機関とも異なる統計間の連結は難しく、学校基本調査の「博士課程学生数」や学校教員統計調査の「本務教員数」、ポスドク調査の「ポストドクター等数」と科学技術研究調査の「博士課程在籍者数」や「教員数」、「その他研究員数」との乖離が大きい学部等もあり、専門分野別「博士課程学生数」、専門分野別「本務教員数」、前述の方法で推計した専門分野別「ポストドクター数」の合計と科学技術研究調査の「研究本務者数」とを比較するなどし、学部等の範囲の設定や大括り研究科の教員数等の配分の妥当性、ポストドクター数の推計の妥当性等の検証を手作業で行った。

3.2. 専門分野の分類方法

連結の単位とした学部等は、理工学部のように理学工学という複数の大区分を括るものから、生命科学部のように大区分を異にする関連小区分に跨るもの、建築学部のように特定の小区分に絞られるものまで様々である。このため、分析に当たっては、学部等に属する構成員の専門分野毎の人数のみならず、このような領域の広さの違いも加味し各学部等を専門分野別に分類する必要がある。本稿では、本務教員数、研究本務者数が最大となる小区分をそれぞれ特定した上で、その小区分の

*2 ポスドク調査と学校基本調査等との調査年度が異なっている。ポスドク調査は調査年度にポストドクターであった全員を対象とし定点調査ではないため実態より多くなる傾向があるため、本務教員への職種変更者数を用い統計調査間の調整を試みる意図があった。

シェアが3割を超える場合は当該小区分名を、数理・情報系、物理・エネルギー系、化学・材料系、社会環境系、バイオ系、ライフ系、教育系など関連小区分群での集積がある場合は当該小区分名に“系”を付し、さらに、大区分レベルまで広がる場合は当該大区分名で専門分野を分類した。その際、学校基本調査・学校教員統計調査と科学技術研究調査・ポスドク調査で専門分野の区分が異なるため、工学を5つの群、農学を6つの群に集約しつつ、後者の調査のみにある小区分(情報科学、心理学)の研究本務者数シェアが3割を超える学部等はその小区分名で分類することとした。

各専門分野の分布は表1のとおりである。

表1 分析対象学部等の分野・設置者別割合

分野名	学部等数	設置者別割合			(参考)	
		国立	公立	私立	学校基本調査との対応関係	科学技術研究調査との対応関係
文学(系)	251	12.4%	7.6%	80.1%	文学	文学
法学(系)	16	6.3%	12.5%	81.3%	法学	法学
哲学(系)	21	0.0%	0.0%	100.0%	哲学	哲学
心理学(系)	53	1.9%	0.0%	98.1%	心理学(心理学系)	心理学
人文その他/人文系	47	14.9%	8.5%	76.6%	その他(人文)	その他(人文)
法学・政治学(系)	123	17.1%	3.3%	79.7%	法学・政治学	法学・政治
商学・経済学(系)	368	10.3%	7.3%	82.3%	商学・経済学	商学・経済
社会学(系)	112	2.7%	7.1%	90.2%	社会学	社会学
社会その他/社会系	42	14.3%	7.1%	78.6%	その他(社会)	その他(社会)
総合人文社会科学(系)	40	10.0%	10.0%	80.0%	総合人文・社会科学	芸術・その他へ
数学(系)	7	57.1%	0.0%	42.9%	数学	数学
物理学(系)	18	66.7%	0.0%	33.3%	物理学・原子力物理学	物理学
化学(系)	5	20.0%	20.0%	60.0%	化学	化学
生物(系)	32	46.9%	18.8%	34.4%	生物学	生物学
地学(系)	4	75.0%	0.0%	25.0%	地学	地学
理学その他/理学系	13	61.5%	0.0%	38.5%	その他(理学)	その他(理学)
機械・航空・船舶系工学(系)	27	14.8%	11.1%	74.1%	機械工学、船舶工学、航空工学、情報工学	機械・船舶、航空
電気電子系工学(系)	109	35.8%	9.2%	55.0%	電気通信工学	電気・通信
情報科学(系)	30	26.7%	13.3%	60.0%	情報科学	情報科学
物理・エネルギー系工学(系)	0				応用物理学、原子力	応用物理学、原子力
材料・化学・生物系工学(系)	16	56.3%	18.8%	25.0%	応用物理学、化学工学、船舶工学、情報工学	応用物理学、材料、繊維
建築・土木・社会系工学(系)	55	12.7%	10.9%	76.4%	土木建築工学、経営工学	土木・建築、経営工学
工学系/工学その他	54	44.4%	9.3%	46.3%	その他(工学)、工芸学	その他(工学)
総合自然科学(系)	14	35.7%	0.0%	64.3%	総合自然科学	芸術・その他へ
生産・資源系農学(系)	11	36.4%	18.2%	45.5%	農学	農学
化学系農学(系)	9	66.7%	11.1%	22.2%	農芸化学	農芸化学
社会・工学系農学(系)	7	71.4%	14.3%	14.3%	農業工学、農業経済学	農芸工学、農業経済
林学・林産学(系)	0				林学、林産学	林学、林産
獣医学畜産学(系)	18	44.4%	5.6%	50.0%	獣医学畜産学	獣医・畜産
水産学(系)	8	62.5%	12.5%	25.0%	水産学	水産
農学その他/農学系	22	50.0%	4.5%	45.5%	その他(農学)	その他(農学)
医学(系)	88	47.7%	9.1%	43.2%	医学	医学
歯学(系)	25	28.0%	4.0%	68.0%	歯学	歯学
薬学(系)	71	15.5%	5.6%	78.9%	薬学	薬学
看護(系)	199	1.0%	19.6%	79.4%	看護学・その他	看護
保健系/保健その他	107	3.7%	8.4%	87.9%	看護学・その他	その他(保健)
家政(系)	77	1.3%	5.2%	93.5%	家政	家政
教育(系)	265	20.4%	2.3%	77.4%	教育	教育
芸術(系)	100	9.0%	15.0%	76.0%	芸術	芸術・その他
その他/総合科学	33	21.2%	6.1%	72.7%	総合科学・その他	

3.3. 規模・機能の分類方法

連結データをもとに規模や分野構成、人的・財務的構造、研究力、人材養成機能などの特性を分析するために、基本的に、2か年(平成28年度ベースと令和元年度ベース)の数値の平均値を用い分析に供した。そのうち、表2及び表3の項目については同表記載の方法で分類し分析を試みた。

なお、計算はSPSS Staticsを用いた。

表2 学部等の規模・機能別分類方法

学位授与機能別分類	大学院が学部の1割以上の規模があり博士/修士比率が5割を超えるか博士課程修了者30人以上かつ2分野以上で博士課程修了者の全国シェア3%を超える学部等又は博士課程修了者50人以上の学部等を“博士授与機関”、修士課程修了者60人以上かつ2分野以上で博士課程修了者の全国シェア1%を超える学部等又は修士課程修了者100人以上の学部等を“修士等授与機関”それ以外を“学士授与機関”とする。 博士授与機関149, 修士等授与機関353, 学士授与機関1995
教員規模別分類	本務教員数25人未満を“1G”、25-50人を“2G”、50-75人を“3G”、75-100人を“4G”、100-125人を“5G”、125人以上を“6G”として分類。 “6G”254, “5G”99, “4G”192, “3G”391, “2G”938, “1G”623
研究者規模別分類	学生を除く研究本務者数が30人未満を“1G”、30-60人を“2G”、60-90人を“3G”、90-120人を“4G”、120-150人を“5G”、150人以上を“6G”として分類。 “6G”218, “5G”80, “4G”164, “3G”332, “2G”885, “1G”818
学部等規模別分類	学部研究科学生合計500人未満を“1G”、500-1000人を“2G”、1000-1500人を“3G”、1500-2000人を“4G”、2000-2500人を“5G”、2500人以上を“6G”として分類。 “6G”236, “5G”123, “4G”234, “3G”475, “2G”663, “1G”766
入学者広域性別分類	入学者の出身高校所在地で上位2位までに学部等所在地があり上位2県で全体の75%以上を占めるか学部等所在地が最大で全体の6割以上を占める学部等を“地域型”、出身高校所在地で上位2位までに所在地があり上位2地方で全体の85%以上を占めるか学部等所在地が最大で全体の75%以上を占める学部等を“広域型”、それ以外を“全国型”とし、また、学部等所在地が特別区又は政令指定都市の場合は“都市型”を付す。 都市型全国型338, 都市型広域型414, 都市型地域型328, 全国型455, 広域型500, 地域型462

表3 大学の規模・機能別分類方法

学位授与機能別分類	大学院が学部の1割以上の規模があり博士/修士比率が5割を超えるか博士課程修了者120人以上かつ2分野以上で博士課程修了者の全国シェア3%を超える大学又は博士課程修了者200人以上の大学を“博士授与機関”、修士課程修了者240人以上かつ2分野以上で博士課程修了者の全国シェア1%を超える大学又は修士課程修了者400人以上の大学を“修士等授与機関”それ以外を“学士授与機関”とする。 博士授与機関40, 修士等授与機関109, 学士授与機関637
教員規模別分類	本務教員数75人未満を“1G”、75-150人を“2G”、150-225人を“3G”、225-300人を“4G”、300-375人を“5G”、375人以上を“6G”として分類。 “6G”111, “5G”30, “4G”52, “3G”83, “2G”208, “1G”302
研究者規模別分類	学生を除く研究本務者数が90人未満を“1G”、90-180人を“2G”、180-270人を“3G”、270-360人を“4G”、360-450人を“5G”、450人以上を“6G”として分類。 “6G”100, “5G”21, “4G”42, “3G”69, “2G”171, “1G”383
大学規模別分類	学部研究科学生合計1500人未満を“1G”、1500-3000人を“2G”、3000-4500人を“3G”、4500-6000人を“4G”、6000-7500人を“5G”、7500人以上を“6G”として分類。 “6G”99, “5G”34, “4G”52, “3G”65, “2G”150, “1G”386
入学者広域性別分類	入学者の出身高校所在地で上位2位までに大学所在地があり上位2県で全体の75%以上を占めるか大学所在地が最大で全体の6割以上を占める大学を“地域型”、出身高校所在地で上位2位までに所在地があり上位2地方で全体の85%以上を占めるか大学所在地が最大で全体の75%以上を占める大学を“広域型”、それ以外を“全国型”とし、また、大学所在地が特別区又は政令指定都市の場合は“都市型”を付す。 都市型全国型74, 都市型広域型121, 都市型地域型98, 全国型147, 広域型152, 地域型194
論文数分類	Scopus収録の2011~2020年出版の論文(Article&Review)著者所属の大学の全国シェアが0.01%未満を“1G”、0.01-0.1%を“2G”、0.1-0.2%を“3G”、0.2-0.3%を“4G”、0.3-0.4%を“5G”、0.4-0.5%を“6G”、0.5%以上を“7G”、それ以外の不明な大学を“0G”として分類。 “7G”46, “6G”20, “5G”18, “4G”27, “3G”37, “2G”159, “1G”64, “0G”415

4. 分析の結果

4.1. 専門分野毎の大学研究者の構成

学部等の組織ごとの分析に先立ち、博士課程学生を含む大学の研究者の職位等ごとの年齢構成の概況は図1及び図2のとおりである。データは3.1.に記載の調査の令和元年対象のものを用い、グラフ左の博士課程学生数と右の教員・ポスドクター総数は第2軸、年齢別の教員・ポスドクター数は第1軸を使用している。

図1 設置者別大学の研究者の年齢構成

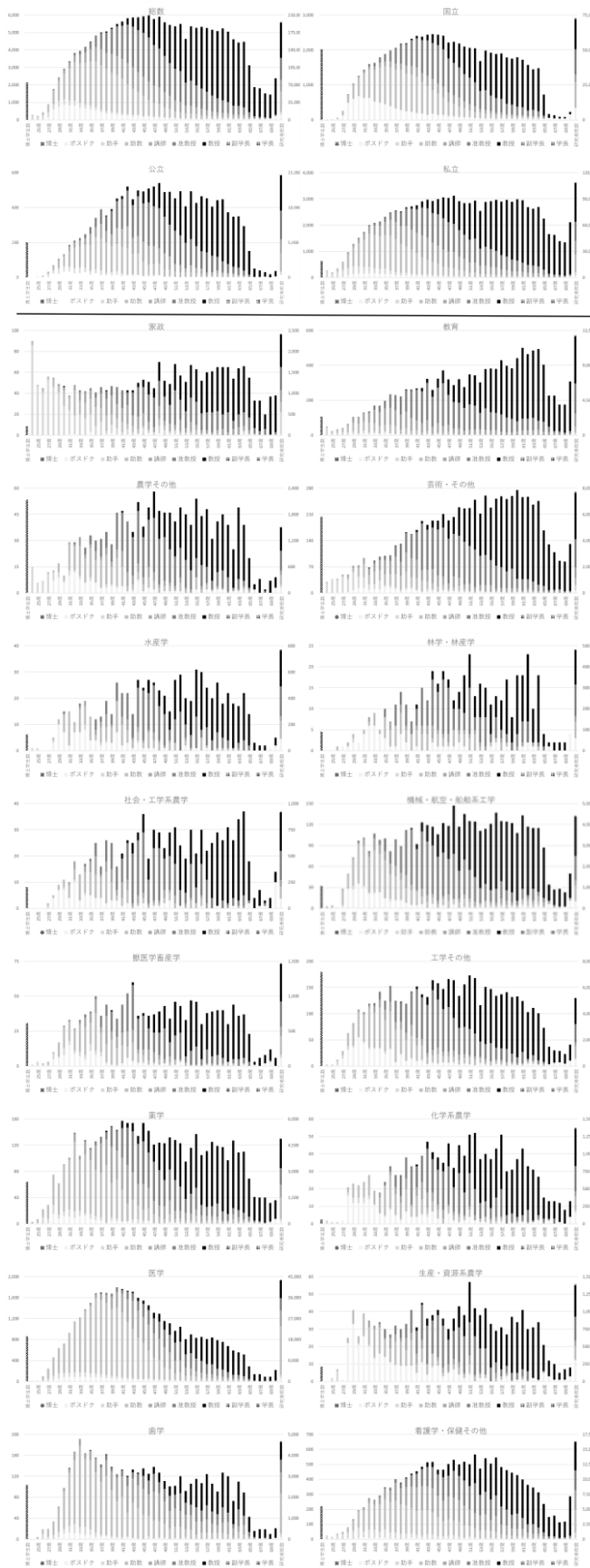
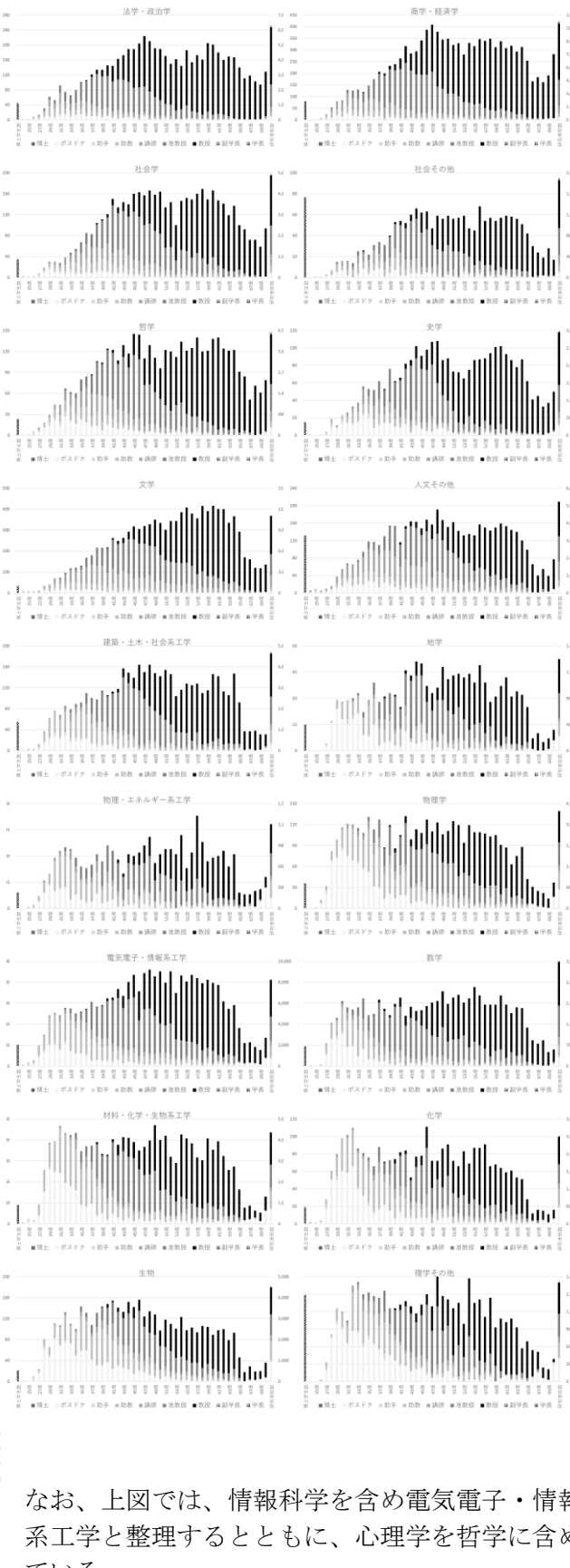


図2 専門分野別大学の研究者の年齢構成



なお、上図では、情報科学を含め電気電子・情報系工学と整理するとともに、心理学を哲学に含めている。

博士を含む大学の研究者の職位構成については(学科の専攻分野に全学生を算入する学校基本調査の特性上、各分野「その他」の博士課程学生数が多くなるが)、職位毎の人数の均衡がみられるのは医学をはじめとする保健分野である。大学病院勤務医と他機関等との流動性があるが故であるが、「講座」の構造を残しているといえる。一方、法学、経済学をはじめとする社会科学は高年齢の教員、教授の比率が高く、ポストドクターも助教・講師もともに比率が低い。これらの専門分野のシェアが高い私立も同様の傾向を示している。

理工農系は、生物、化学、物理、生産・資源系農学、材料・化学・生物系工学などは教授比率が低くポストドクター比率が高い一方、建築・土木・社会系、機械・航空・船舶系、電気電子・情報系の工学分野は高年齢の教員の比率、教授の比率が比較的高い。

大学の研究者に占める博士課程学生の比率が高い分野は、保健分野、工学分野、地学、物理学と続く。また、助教と教授の比率との間($r=-0.857$)、助教と准教授の比率との間($r=-0.767$)に負の相関がみられ、ポストドクターと教授の比率の間($r=-0.331$)にも一定の負の相関がみられるが、専門分野単位の比較では博士課程学生や各職位の教員とポストドクターの比率との関連は強くない。

4.2. 専門分野毎のポストドクターの状況

表4のとおり、大学に在籍するポストドクターの分布が最も多い専門分野は医学で、生物、物理、化学がこれに続き、これらの4分野で全体の3分の1以上を占める。このうち生物分野は40歳以上の割合が高く、農学分野にも同様の傾向がみられる。一方、工学分野は研究者に対するポストドクターの比率は高くないが、外部資金で雇用される比率が高く、博士課程修了から相当な期間を経過する者も多い。工学分野のポストドクターも含めキャリアパスが多様であることも影響しているといえる。また、人文社会科学分野は雇用関係のない者が多くなっている。

博士課程修了後の経過年数は、外部資金で雇用される者の割合との間に正の相関($r=0.518$)、調査年度にポストドクターから職種変更した者の割合との間に負の相関($r=-0.410$)がみられる一方、運営費交付金等で雇用される者の割合と40歳以上の者の割合との間に負の相関($r=-0.475$)、フェローシップで雇用される者の割合と平均年齢との

間にも負の相関($r=-0.449$)がみられる。

表4 専門分野別ポストドクターの状況

分野	人数	設置者別割合				平均年齢	ポストドクター					研究本拠者					
		40歳以上の割合	国立	公立	私立		博士課程修了後経過年数の平均	新たにポストドクターになった者の割合	外部資金	運営費交付金・フェローシップ	雇用関係なし	人数	国立	公立	私立		
文学	220	35.0%	44.1%	8.6%	47.3%	38.9	5.5	38.6%	34.5%	9.1%	15.0%	20.0%	55.9%	14,124	26.6%	5.6%	67.8%
法学	273	40.7%	61.2%	7.0%	31.9%	39.8	7.2	33.0%	21.6%	12.5%	14.7%	24.5%	48.4%	4,366	42.4%	4.9%	52.7%
医学	126	43.7%	53.2%	1.6%	45.2%	40.6	6.3	25.4%	30.2%	16.7%	18.3%	19.8%	45.2%	2,994	32.9%	3.3%	63.8%
人文その他	349	37.8%	59.3%	3.2%	37.5%	39.7	5.4	37.2%	24.1%	16.3%	15.8%	21.2%	48.7%	4,601	38.6%	8.3%	53.1%
法学・政治	178	35.4%	64.6%	2.8%	32.6%	38.6	5.7	33.7%	38.2%	17.4%	15.2%	51.7%	7,976	33.1%	4.4%	62.5%	
経済学	246	35.4%	64.6%	3.7%	31.7%	39.1	5.2	43.9%	35.4%	22.8%	11.8%	14.6%	50.8%	13,740	26.8%	7.2%	66.0%
農学	179	35.8%	44.7%	11.7%	43.6%	38.3	5.3	46.9%	34.1%	16.2%	24.6%	20.3%	38.5%	6,390	17.8%	8.9%	73.3%
社会学	99	49.5%	51.5%	7.1%	41.4%	41.2	6.2	31.3%	29.3%	25.3%	17.2%	26.3%	31.3%	3,402	36.4%	6.0%	57.6%
社会学その他	308	13.3%	80.2%	8.4%	11.4%	33.9	5.7	35.7%	25.0%	29.9%	27.6%	13.0%	29.5%	3,823	58.6%	5.5%	35.9%
社会科学	293	22.5%	80.2%	2.7%	17.1%	36.0	6.2	34.8%	32.4%	65.9%	10.2%	20.1%	3.8%	4,420	53.0%	9.9%	37.1%
情報科学	802	17.5%	75.9%	3.0%	21.1%	35.0	6.9	29.3%	30.2%	44.5%	15.7%	31.3%	8.6%	5,869	71.0%	4.4%	24.5%
物理	566	18.4%	76.1%	5.0%	18.9%	35.2	6.6	31.2%	30.4%	52.6%	16.5%	23.0%	8.0%	4,134	65.1%	7.4%	27.5%
化学	952	27.8%	65.7%	6.9%	27.4%	36.6	7.4	25.0%	27.5%	47.0%	13.2%	29.2%	10.6%	6,846	61.5%	7.6%	30.9%
生物学	220	26.8%	91.4%	4.1%	4.5%	36.8	7.2	34.5%	33.2%	40.1%	8.2%	22.3%	20.5%	2,007	82.0%	4.0%	14.1%
理学その他	391	27.2%	77.2%	1.5%	21.3%	37.6	6.4	29.0%	21.2%	14.4%	32.1%	6.4%	1,427	74.1%	5.3%	20.6%	
機械・船舶	231	23.4%	80.4%	1.0%	18.0%	37.5	7.4	29.9%	34.4%	60.8%	10.0%	21.3%	7.9%	6,000	65.3%	4.8%	30.0%
電気・通信	388	33.2%	84.8%	1.8%	13.4%	39.8	9.5	31.7%	29.4%	65.7%	15.7%	21.4%	5.4%	9,741	59.3%	7.8%	32.9%
土木・建築	271	22.9%	86.7%	1.1%	12.2%	36.5	5.5	37.3%	36.2%	56.8%	14.0%	16.6%	12.5%	6,844	57.2%	6.8%	36.0%
応用化学	409	18.3%	93.2%	1.5%	5.4%	35.7	6.5	32.8%	25.7%	67.7%	8.8%	20.5%	2.9%	5,149	77.1%	3.7%	17.8%
応用物理学	97	28.9%	88.7%	0.0%	11.3%	38.7	9.4	28.9%	37.1%	58.8%	6.2%	35.1%	0.0%	1,656	75.3%	2.5%	22.2%
電子学	45	42.2%	100.0%	0.0%	0.0%	43.4	11.6	40.0%	26.7%	82.2%	4.4%	11.1%	2.2%	848	87.7%	7.8%	4.6%
材料	282	24.1%	83.7%	1.1%	15.2%	37.7	7.8	24.1%	29.1%	59.9%	8.2%	29.4%	3.5%	2,919	80.7%	4.1%	15.2%
繊維	10	30.0%	100.0%	0.0%	0.0%	38.2	8.9	20.0%	30.0%	50.0%	0.0%	10.0%	0.0%	397	91.7%	0.0%	8.3%
航空	27	22.2%	100.0%	0.0%	0.0%	35.7	6.4	37.0%	59.3%	59.3%	22.2%	14.8%	3.7%	599	61.1%	7.0%	31.9%
経営工学	24	20.0%	83.3%	4.2%	12.5%	38.5	5.6	20.8%	33.3%	70.8%	8.3%	12.5%	8.3%	863	36.8%	7.6%	55.5%
工学その他	512	27.1%	80.7%	2.3%	17.0%	37.7	7.6	27.0%	30.5%	62.7%	10.5%	23.8%	2.9%	5,450	72.6%	4.1%	23.3%
農学	301	32.2%	90.6%	3.0%	7.0%	37.7	7.7	33.6%	26.6%	49.5%	16.9%	16.6%	16.9%	2,224	71.9%	9.0%	19.1%
農芸化学	169	34.3%	84.6%	4.1%	11.2%	38.1	8.9	30.2%	24.3%	60.9%	9.5%	19.5%	10.1%	2,336	66.1%	10.1%	23.8%
農業工学	52	32.7%	88.5%	3.8%	7.7%	40.6	8.4	42.3%	30.8%	44.2%	17.3%	17.3%	21.2%	679	88.0%	4.6%	7.4%
農業経済	40	42.5%	100.0%	0.0%	0.0%	42.6	5.5	35.0%	25.0%	35.0%	2.5%	12.5%	50.0%	716	66.2%	6.4%	27.4%
林学	41	26.8%	97.6%	2.4%	0.0%	38.2	6.8	17.1%	26.8%	55.1%	7.3%	22.0%	14.6%	576	87.2%	4.5%	8.3%
獣医学	19	63.2%	94.7%	0.0%	5.3%	49.9	14.1	26.3%	10.5%	66.4%	5.3%	10.5%	15.8%	348	94.0%	4.0%	2.0%
獣医・畜産	116	27.6%	72.4%	0.0%	27.6%	37.7	6.6	32.8%	32.8%	42.2%	12.9%	19.0%	35.9%	2,379	61.3%	5.3%	32.4%
歯学	97	31.0%	80.8%	0.0%	9.2%	37.2	8.0	39.1%	30.1%	50.1%	10.3%	10.3%	10.3%	1,059	77.4%	2.7%	19.8%
歯学その他	123	34.1%	88.0%	3.3%	8.1%	38.9	7.5	28.5%	29.3%	62.9%	8.1%	22.0%	13.0%	1,455	65.7%	5.1%	29.2%
歯学部	1,489	37.0%	79.1%	3.4%	17.6%	39.2	8.1	33.6%	29.7%	59.4%	8.1%	31.6%	7.5%	81,819	47.7%	8.1%	44.3%
歯学	104	18.3%	80.8%	0.0%	19.2%	36.2	5.9	51.9%	48.1%	72.9%	6.7%	43.2%	23.1%	8,780	44.0%	3.5%	52.6%
薬学	146	27.4%	65.1%	5.5%	29.5%	38.0	8.8	29.5%	32.9%	50.0%	7.5%	38.4%	4.1%	7,012	30.7%	7.7%	61.6%
薬学	6	83.3%	83.3%	0.0%	16.7%	42.2	4.8	50.0%	66.7%	83.3%	0.0%	0.0%	16.7%	10,795	20.4%	20.1%	59.5%
薬学その他	154	37.0%	81.2%	0.6%	18.2%	38.6	6.2	33.1%	31.2%	40.3%	31.1%	31.1%	8.74%	24.3%	10.7%	65.1%	
心理学	182	29.1%	59.9%	4.9%	35.2%	36.5	5.6	40.1%	28.6%	22.0%	17.6%	22.5%	37.9%	4,901	27.6%	4.4%	68.0%
音楽	13	57.9%	47.4%	15.8%	36.8%	43.2	6.3	52.6%	15.8%	15.8%	0.0%	15.8%	68.4%	1,991	15.3%	3.0%	79.6%
教育	126	31.7%	81.0%	3.2%	15.9%	38.9	5.5	40.9%	30.2%	23.0%	12.7%	31.0%	33.3%	13,944	37.1%	3.2%	59.7%
芸術その他	199	38.7%	55.8%	7.0%	37.2%	39.1	6.4	29.6%	27.6%	20.6%	13.1%	13.6%	32.8%	7,792	31.9%	9.9%	58.2%
計数	10,920	29.2%	75.5%	3.7%	20.8%	37.7	7.1	32.4%	29.6%	45.9%	12.2%	24.6%	17.3%	283,239	45.5%	7.3%	47.2%

4.3. 教育研究組織の機能特性との関連性

大学やその学部等の教育研究組織について、学生教職員の規模やその構成、入学者の広域性、学位授与機能、研究力、分野、財務構造等からその特性を分析した結果は表5・表6のとおりである。分析は、6段階以上の順序尺度の変数も含めピアソンの積率相関係数を用い、専門分野などの名義尺度の変数はダミー変数に置き換え分析を行った。なお、各専門分野のサンプルサイズを得るため、分析は、人文系、農学系などの系を単位に行うこととした。その際、前述の構成員の職位別年齢分布の類似性などに鑑み、人間系(心理学を含む哲学、社会学、教育、芸術)を独立させるとともに、理工学を学問領域毎に、機械環境社会系、電気電子情報系、物理系、物質系、生物系のまとまりで分析を行った。

表5 学部等の機能特性と人的, 財務的構造

	博士課程学生数	ポストドク等数	本務教員数	博士/研究者	ポストドク/研究者	教員/研究者	学部等規模別分類	研究者(学部等規模別分類)	40歳以上ポストドク等比率	40歳未満ポストドク等比率	60歳以上本務教員比率	大学院自校出身入学者比率	自校出身本務教員比率	女性ポストドク等比率	女性本務教員比率	外部資金雇用ポストドク等比率	研究支援者数	内部使用研究費	公的機関人内部使用研究費率
博士課程学生数	1	0.655**	0.635**	0.524**	0.242**	-0.528**	0.191**	0.512**	0.559**	0.010	0.312**	-0.346**	-0.023	0.502**	0.174**	0.053	0.609**	0.875**	0.247**
ポストドク等数	0.655**	1	0.303**	0.323**	0.553**	-0.432**	0.163**	0.325**	0.400**	0.011	0.216**	-0.192**	0.017	0.326**	-0.038	0.095**	0.635**	0.438**	0.458**
本務教員数	0.635**	0.303**	1	0.287**	0.118**	-0.283**	0.333**	0.689**	0.706**	-0.051	0.389**	-0.330**	0.068**	0.425**	0.023	-0.119**	0.609**	0.875**	0.247**
国立大	0.498**	0.287**	0.262**	0.524**	0.395**	-0.551**	0.133**	0.417**	0.453**	0.041	0.160**	-0.379**	0.040	0.324**	-0.021	-0.266**	0.348**	0.217**	0.399**
私立大	-0.412**	-0.260**	-0.225**	-0.491**	-0.325**	0.507**	-0.036	-0.381**	-0.404**	-0.063	-0.162**	0.467**	0.007	-0.279**	-0.017	0.201**	-0.305**	-0.175**	-0.308**
全国型大	0.243**	0.223**	0.172**	0.374**	0.284**	-0.394**	0.130**	0.245**	0.268**	-0.072**	0.138**	-0.209**	0.060**	0.285**	-0.002	-0.250**	0.096**	0.183**	0.158**
地域型大	-0.176**	-0.119**	-0.173**	-0.303**	-0.235**	0.320**	-0.254**	-0.253**	-0.271**	-0.173**	-0.103**	0.165**	-0.048**	-0.253**	-0.007	0.267**	-0.121**	-0.157**	-0.167**
博士授与大	0.649**	0.478**	0.435**	0.498**	0.290**	-0.507**	0.109**	0.381**	0.431**	-0.037	0.238**	-0.237**	0.004	0.411**	0.016	-0.133**	0.487**	0.419**	0.362**
学士授与大	-0.468**	-0.326**	-0.314**	-0.669**	-0.406**	0.684**	-0.173**	-0.439**	-0.481**	0.065**	-0.187**	0.299**	-0.063**	-0.417**	0.054	0.299**	-0.352**	-0.303**	-0.455**
人文系大	-0.038	-0.020	-0.070**	-0.003	0.028	-0.003	0.053**	-0.057**	-0.051**	0.125**	-0.172**	0.086**	-0.010	-0.088**	0.163**	0.052**	-0.107**	-0.063**	-0.074**
人間系大	-0.122**	-0.112**	-0.141**	-0.173**	-0.128**	0.181**	-0.147**	-0.174**	-0.188**	0.037	-0.087**	0.256**	0.022	-0.073**	0.075**	0.186**	-0.105**	-0.125**	-0.140**
社会系大	-0.164**	-0.138**	-0.144**	-0.097**	-0.115**	0.110**	0.131**	-0.193**	-0.202**	0.086**	-0.108**	0.101**	-0.374**	-0.143**	0.011	-0.249**	-0.138**	-0.119**	-0.111**
機械環境社会系大	-0.022	-0.018	0.014	0.036	0.019	-0.036	0.100**	0.068**	0.088**	-0.098**	-0.039	0.186**	0.009	-0.142**	-0.174**	0.035	-0.003	0.034	0.054**
電気電子情報系大	-0.011	-0.005	0.025	0.107**	0.107**	-0.118**	0.118**	0.115**	0.126**	-0.072**	0.023	-0.108**	0.249**	-0.002	-0.160**	0.131**	0.024	0.029	0.137**
物理系大	0.100**	0.228**	0.057**	0.098**	0.185**	-0.125**	0.055**	0.109**	0.120**	-0.025**	0.064**	0.097**	0.034	-0.023	-0.083**	0.011	0.091**	0.076**	0.051**
物質系大	0.050	0.074**	0.026	0.087**	0.073**	-0.093**	0.021	0.042**	0.052**	-0.029	0.040**	-0.066**	0.108**	0.033	-0.078**	0.086**	0.052**	0.045**	0.120**
生物系大	0.010	0.127**	0.003	0.095**	0.280**	-0.142**	-0.014	0.038	0.066**	-0.051	0.012	-0.082**	0.070**	0.009	0.019	-0.087**	0.038	0.038	0.173**
その他工学系大	0.086**	0.115**	0.058**	0.136**	0.152**	-0.153**	0.109**	0.116**	0.124**	-0.063**	0.049**	-0.098**	0.128**	0.046**	-0.074**	0.117**	0.072**	0.084**	0.177**
農学系大	0.012	0.046	0.026	0.098**	0.135**	-0.115**	0.038	0.101**	0.110**	-0.038	0.025	-0.097**	0.160**	0.115**	0.001	-0.128**	0.123**	0.054**	0.143**
医学系大	0.518**	0.106**	0.186**	0.186**	-0.008	-0.166**	0.048**	0.379**	0.408**	0.002	0.275**	-0.250**	-0.028	0.331**	0.054	-0.067**	0.032	0.539**	0.615**
歯学系大	0.046	-0.023	0.076**	0.109**	-0.013	-0.096**	-0.051**	0.169**	0.167**	-0.060	0.199**	-0.078**	0.040	0.216**	0.027	-0.012	-0.091**	-0.003	0.040**
薬学系大	-0.053	-0.058	-0.005	0.071**	-0.015	-0.061**	0.007	0.057**	0.055**	-0.039	0.196**	-0.102**	0.138**	0.099**	-0.042	-0.064**	-0.012	-0.031	0.005
看護保健系大	-0.095**	-0.065**	-0.063**	-0.128**	-0.145**	0.144**	-0.225**	-0.020	-0.059**	0.057	0.074**	-0.087**	-0.195**	-0.032	0.062	0.595**	0.000	-0.091**	-0.098**
人文科学系	-0.066**	-0.033	-0.096**	-0.001	0.028	-0.005	0.006	-0.108**	-0.098**	0.118**	-0.169**	0.118**	0.004	-0.071**	0.141**	0.059**	-0.119**	-0.083**	-0.082**
社会科学系	-0.183**	-0.147**	-0.168**	-0.099**	-0.126**	0.114**	0.109**	-0.230**	-0.241**	0.104**	-0.139**	0.121**	-0.383**	-0.167**	0.044	-0.206**	-0.159**	-0.140**	-0.133**
理学系	0.041	0.197**	0.018	0.169**	0.339**	-0.220**	-0.001	0.088**	0.114**	-0.073**	0.055**	-0.142**	0.166**	0.024	-0.082**	-0.186**	0.071**	0.057**	0.055**
工学系	0.050	0.064**	0.071**	0.151**	0.123**	-0.160**	0.201**	0.188**	0.212**	-0.140**	0.017	-0.125**	0.347**	0.035	-0.216**	0.182**	0.073**	0.098**	0.204**
農学系	0.012	0.046	0.026	0.098**	0.135**	-0.115**	0.038	0.101**	0.110**	-0.038	0.025	-0.097**	0.160**	0.115**	0.001	-0.128**	0.123**	0.054**	0.031
保健系	0.234**	0.002	0.307**	0.038	-0.133**	-0.007	-0.175**	0.226**	0.204**	-0.010	0.307**	-0.250**	0.223**	0.057	0.430**	-0.013	0.196**	0.217**	0.002
教育・芸術・家政系	-0.074**	-0.093**	-0.091**	-0.189**	-0.127**	0.196**	-0.111**	-0.088**	-0.105**	0.012	-0.044**	0.224**	0.049**	-0.055**	0.058	0.169**	-0.064**	-0.101**	-0.125**

** 相関係数は 1% 水準で有意 (両側)

* 相関係数は 5% 水準で有意 (両側)

表6 大学の機能特性と人的, 財務的構造

	博士課程学生数	ポストドク等数	本務教員数	博士/研究者	ポストドク/研究者	教員/研究者	学部等規模別分類	研究者(学部等規模別分類)	40歳以上ポストドク等比率	40歳未満ポストドク等比率	60歳以上本務教員比率	大学院自校出身入学者比率	自校出身本務教員比率	女性ポストドク等比率	女性本務教員比率	外部資金雇用ポストドク等比率	研究支援者数	内部使用研究費	公的機関人内部使用研究費率
博士課程学生数	1	0.916**	0.850**	0.512**	0.309**	-0.540**	0.418**	0.434**	0.349**	0.542**	0.020	0.218**	-0.266**	0.056	0.354**	-0.070	-0.202**	0.156**	0.953**
ポストドク等数	0.916**	1	0.707**	0.361**	0.357**	-0.439**	0.224**	0.344**	0.269**	0.341**	0.030	0.133**	-0.150**	-0.029	0.265**	-0.057	-0.162**	0.103	0.944**
本務教員数	0.850**	0.707**	1	0.522**	0.296**	-0.533**	0.716**	0.680**	0.580**	0.771**	-0.009	0.370**	-0.352**	0.195**	0.421**	-0.099	-0.247**	0.141**	0.809**
国立大	0.464**	0.269**	0.442**	0.545**	0.301**	-0.555**	0.458**	0.454**	0.319**	0.581**	0.090	0.124**	-0.333**	0.138**	0.258**	-0.072	-0.285**	0.215**	0.438**
私立大	-0.320**	-0.204**	-0.271**	-0.481**	-0.219**	0.479**	-0.295**	-0.287**	-0.113**	-0.436**	-0.169**	-0.129**	0.488**	-0.083**	-0.215**	0.072	0.150**	-0.179**	-0.228**
全国型大	0.274**	0.225**	0.268**	0.330**	0.220**	-0.345**	0.230**	0.221**	0.130**	0.295**	0.013	0.145**	-0.186**	0.140**	0.248**	-0.077	-0.247**	0.098	
地域型大	-0.160**	-0.106	-0.220**	-0.282**	-0.188**	0.295**	-0.294**	-0.242**	-0.268**	0.160**	-0.138**	0.147**	-0.122**	-0.243**	0.018	0.310**	-0.071	-0.156**	
博士授与大	0.616**	0.470**	0.540**	0.540**	0.386**	-0.571**	0.332**	0.327**	0.219**	0.482**	-0.021	0.240**	-0.252**	0.035	0.296**	-0.038	-0.161**	0.089	
学士授与大	-0.438**	-0.272**	-0.459**	-0.607**	-0.316**	0.613**	-0.475**	-0.465**	-0.576**	0.055	-0.141**	0.268**	-0.059	-0.331**	0.129**	0.315**	-0.252**	-0.383**	
人文科学系	-0.088	-0.064	-0.100**	-0.014	0.026	0.006	-0.090**	-0.086**	0.008	-0.130**	0.147**	-0.163**	0.073**	0.056	-0.070	0.186**	0.025	-0.174**	
社会科学系	-0.086	-0.074	-0.091**	-0.098**	-0.058	0.101**	-0.067	-0.058	0.103**	0.002	-0.105**	0.125**	-0.197**	-0.148**	0.052	-0.240**	-0.013	-0.073**	
理学系	-0.020	0.029	-0.028	0.061	0.359**	-0.140**	-0.029	0.021	-0.035	0.086**	-0.035	0.046	-0.032	-0.039	-0.021	-0.024	-0.086**	0.059	
工学系	0.051	-0.053	-0.040	0.089**	0.109**	-0.105**	0.006	0.032	0.039	0.104**	-0.077	-0.094**	-0.062	0.300**	-0.062	-0.243**	-0.300**	0.039	
農学系	-0.026	-0.034	-0.024	0.037	0.068	-0.049	-0.015	-0.012	-0.023	0.025	0.028	0.046	-0.015	0.102**	0.077**	0.080	-0.066	0.169**	
保健系	0.248**	0.170**	0.303**	0.169**	-0.039	-0.141**	0.251**	0.203**	-0.033	0.304**	-0.007	0.356**	-0.352**	-0.074	0.284**	-0.067	0.335**	0.020	
教育・芸術・家政系	-0.113**	-0.077	-0.172**	-0.214**	-0.104**	0.214**	-0.218**	-0.212**	-0.156**	-0.265**	-0.022	-0.132**	0.255**	-0.025	-0.074**	0.068	0.059	-0.011	

** 相関係数は 1% 水準で有意 (両側)

* 相関係数は 5% 水準で有意 (両側)

前述のとおり, 生物分野はポストドクターの比率と, 物理分野はその数と関連を有しているが, 全体としてポストドクターの数は所属組織の研究支援者数や研究費, 特に公的研究費と関連が強いことがわかる。これは絶対数の多い医学分野の影響を受けている可能性もあるが, 国立大学のシェアが高い分野にポストドクターが多く分布していることから, ポストドクターが研究体制の有り様に依存していることが伺われ, このことは外部資金で雇用されるポストドクターの比率と国立大学との相関とも整合的である。

一方, 大学やその学部の研究体制との関連は, ポストドクター数に比べ博士課程学生数や本務教員数の方が大きく, 博士課程学生数は公的研究費の割合や本務教員の年齢構成の若さと, 本務教員数は研究費や本務教員の年齢構成の若さに加え, 論文生産性の高さとの関連が比較的強い。

また, 博士課程学生数は国立大学との間で相関がみられることに加え, 本務教員や博士課程学生の多さは自大学出身の本務教員の割合と正の相関もみられ, 博士の養成に重点を置く大学, 学部等にも同様の傾向がみられる。これも教育研究組織の絶対的な規模の大きい医学分野の影響を受けている可能性もあるが, 大学などのアカデミックな研究者の人材流動性は高まる中でも, 博士の養成に重点を置くような研究大学の教育研究組織の人材流動性は相対的には低く, 研究費の多寡が教育研究組織の規模を規定し, その規模が当該組織の博士課程の規模を一定程度規定する中で, ポストドクターはそうした教育研究組織の中で博士課程学生と本務教員の間に挟まった位置付けになっているということもできる。

5. おわりに

本稿は、統計調査によって定義の異なる側面のある政府統計の個票データを連結することによって、学生教職員で構成される高等教育機関の教育研究組織の全体像を捉えた上で、その規模や分野、機能等の特性が、若手研究者の雇用や分布にいか

に影響を与えているかの分析を試みたものである。そして、分析の過程で、複数の政府統計の個票データを連結する手法や、大学の教育研究組織の機能特性を分類する手法を考察し、分析の基盤を築くことができた。EBPM (Evidence-based policy making)、証拠に基づく政策立案が求められる時代に、既存の統計データの効果的な活用は重要であり、現状ではデータの形式、定義ともに異なるものも多いが、その規格の標準化或いは連結の基盤が確立されることを通じて、統計データが政策決定や評価に有効に生かされることが期待される。

また、分析の結果として、大学の博士課程学生を含む研究者の職位別の年齢構成には専門分野、設置者毎の特徴があり、ポストドクターの分布にも偏りがあることを示し、ポストドクターの年齢や期間に雇用財源がプロジェクトに紐づく性格であるか否かが関わっていることが把握できた。

さらに、博士の養成に重点を置く研究大学をはじめ多額の研究費を確保する大学の学部等の教育研究組織は、多くの本務教員、博士課程学生を擁する反面、人材の流動性が相対的に低く、ポストドクターがこうした研究体制に依存した位置付けになっていることを指摘した。

確かにポストドクターは国立大学、或いは医学や生物等の特定の専門分野に多く属しているが、国立大学システムの問題なのか国立大学しか担い得ない研究システムの問題なのか明らかではなく、理学分野固有の問題なのか理工学全体の問題なのか教育研究組織自体の問題なのかを論じるにも至っていない。本稿は、大学を対象とした政府統計の分析から見える傾向を論じたものだが、ポストドクターをはじめとする若手研究者の雇用や分布に与える影響を論じるためには、就職、採用、転職も含めた大学外の労働市場の流動性も含めた研究者の需給全体、研究活動の財政構造の全体をとらえる必要があるが、この点は今後の課題とさせていただきます。

謝辞

本稿は、科学研究費助成事業基盤研究(C)「若手研究者に関する問題の分析とその将来推計に基づく持続可能な環境構築に関する研究」(JP20K02965)の助成を受けた研究の成果です。また、統計的分析は、総務省及び文部科学省から統計法の規定に基づき調査票情報の提供を受けたものです。筆者は行政職であったため研究経験は浅く、期間中の異動により行政職に専念せざるを得なくなったこともあり、当初の計画どおり研究が進捗できなかったことは否めませんが、関係者のご支援に心より感謝申し上げます。

なお、本稿に掲載した集計結果は調査票情報を利用して独自に作成したものであり、また、調査票情報を利用して作成した集計結果については著作権を主張しないことを申し添えます。

参考文献

- 1) 北野秋男：ポストドクター ―若手研究者養成の現状と課題―，東信堂，2015年1月
- 2) 光田好孝：日本の大学のカーネギー分類，大学財務経営研究，2004年7月
- 3) 文部科学省科学技術・学術研究所：科学研究のベンチマーキング 2025―論文分析でみる世界の研究活動の変化と日本の状況―，2025年8月
- 4) 山本清：大学の人事管理政策―国立大学法人の人員・人件費調査分析を通じて―，大学経営政策研究，2013年3月

(2025年12月4日 受理)

線形代数と量子力学

前段眞治*

量子力学の基礎を理解する上で必要となる線形代数を解説する。量子力学では、量子状態はベクトル空間の元であるベクトルに対応させ、物理量は線形写像に対応させる。線形代数の解説はベクトル空間の次元が有限の場合に限って行うが、無限次元の場合に比べて理解することはずっと容易であろう。量子力学を学び始めるとき波動関数の従うシュレーディンガー方程式から入る機会が多いが、しかし、波動関数は量子状態を表すベクトル（状態ベクトル）そのものではない。量子力学を学ぶ上では、物理量とその物理量の値（測定値）の関係を理解することは重要であり、そのため有限次元の線形代数の復習あるいは学習から始めるのも良い方法であると言えるかもしれない。

(キーワード: 量子力学, 線形代数, ベクトル空間, 線形写像, 物理量)

Linear Algebra and Quantum Mechanics

Shinji MAEDAN*

We provide an explanation of linear algebra which is necessary for understanding the basis of quantum mechanics. In quantum mechanics the states correspond to the vectors in a vector space and the observables correspond to the linear mappings. While the explanation is restricted to the case of a vector space of a finite number of dimensions, it is much easier to understand than an infinite number case.

(Keywords: Quantum mechanics, Linear algebra, Vector space, Linear mapping, Observable)

1 はじめに

今年 2025 年は量子力学 [1] が誕生してちょうど 100 年目にあたる年であり、ユネスコによって「国際量子科学技術年」と定められたように、量子力学が注目を浴びている。筆者は昨年、東京高専研究報告書に「物理的実在を学生にどう教えるか?」という題で報告を行い、量子力学 [2] と古典物理学とでは形式も考え方も大きく異なることを述べた [3]。例えば、量子力学では一般的に物理量を測定する前に確定した物理量の値をもつと考えることはできない、ということであった。報告では、物理量とその物理量の値（測定値）との関係は量子力学では以下のようになっていると

記した。

物理量は線形演算子で与えられる。ある状態で物理量が測定されると、状態は、その物理量（線形演算子）のいずれか 1 つの固有値（これが測定値に当たる）に属する固有ベクトルに突然変化する。

これを補足すると、量子状態はベクトル空間の元であるベクトルによって表され、物理量はベクトル空間から同じベクトル空間への線形写像で与えられる [1]。ベクトル空間や線形写像そのものを扱う分野は、数学の中の線形代数である。

本稿では、量子力学の基礎を理解する上で重要となる線形代数を解説する。実際の物理の問題を

*一般教育科

扱うには無限次元のベクトル空間が必要となることが多いのであるが、ここでは簡単のため有限次元のベクトル空間を考える。そして、2つの物理量が可換でない場合は、2つの物理量のそれぞれの値を同時に 100% の確率で予言することは不可能であることを 3 章で解説する。

2 有限次元の線形代数

ベクトル空間の元であるベクトルによって量子状態が表され、ベクトル空間から同じベクトル空間への線形写像によって物理量が表されるのであるから、量子力学を理解するにはベクトル空間の構造や線形写像のもつ特徴を知ることが必要となってくる。ところで、線形代数を扱ったある教科書に次のようなことが書いてある [4]。「線形代数では、ベクトル空間の構造や、ベクトル空間からベクトル空間への写像で、線形性を保つもの——線形写像——の性質を、行列表示を用いながら、徹底して調べていく。」抽象的なベクトル空間を調べるのに、具体的な行列を利用することが役立つ。そこで、本稿では行列に関することは既知として説明を進め、ベクトル空間の元であるベクトルや線形写像そのものに注目する。前の章で述べた通り、有限次元のベクトル空間を考え、基底としては正規直交基底のみ扱うこととする。この章では、物理のことは議論せず、純粋に線形代数について解説する [5]。

2.1 内積を導入した複素ベクトル空間と双対ベクトル空間

V を n 次元の複素ベクトル空間とする。 V の任意のベクトル \mathbf{a} と \mathbf{b} に対して複素数 \mathbf{C} の値をとる内積 (\mathbf{a}, \mathbf{b}) を次のように定義する。

$$(i) (\mathbf{a}, c_1 \mathbf{b}_1 + c_2 \mathbf{b}_2) = c_1 (\mathbf{a}, \mathbf{b}_1) + c_2 (\mathbf{a}, \mathbf{b}_2), \\ c_1, c_2 \in \mathbf{C}$$

$$(ii) \overline{(\mathbf{a}, \mathbf{b})} = (\mathbf{b}, \mathbf{a}), \\ (\bar{z} \text{ は複素数 } z \text{ の共役複素数を表す})$$

$$(iii) (\mathbf{a}, \mathbf{a}) \geq 0, \\ (\mathbf{a}, \mathbf{a}) = 0 \iff \mathbf{a} = \mathbf{0}.$$

この内積を用いて n 次元の複素ベクトル空間に長さや直交関係を導入する。 $\|\mathbf{a}\| = \sqrt{(\mathbf{a}, \mathbf{a})}$ と書いて、 $\|\mathbf{a}\|$ をベクトル \mathbf{a} の長さと言う。また、 $(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = 0$ のとき \mathbf{a} と \mathbf{b} は直交するという。

さて、 V の基底 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n$ で、すべてのベクトルの長さが 1 であり、かつすべてのベクトルがお互い直交しているとき、つまり

$$(\mathbf{a}_i, \mathbf{a}_j) = \delta_{ij}, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

を満たすとき、正規直交基底と呼ぶ。

ここで導入した内積を用いて、 V とは別のベクトル空間、双対ベクトル空間を考えることができる [4]。任意のベクトル $\mathbf{a} \in V$ に対し、

$$\varphi_{\mathbf{a}}(\mathbf{b}) \equiv (\mathbf{a}, \mathbf{b}), \quad (2)$$

とおく。内積の定義より、

$$\varphi_{\mathbf{a}}(c_1 \mathbf{b}_1 + c_2 \mathbf{b}_2) = c_1 \varphi_{\mathbf{a}}(\mathbf{b}_1) + c_2 \varphi_{\mathbf{a}}(\mathbf{b}_2), \quad (3)$$

が成り立つので、 $\varphi_{\mathbf{a}}$ はベクトル空間 V から \mathbf{C} への線形写像である。従って $\varphi_{\mathbf{a}}$ は V 上の線形汎関数である。ところで線形代数では、 V 上の線形汎関数全体をつくるベクトル空間を V の双対ベクトル空間と呼んでそれを V^* と表し、 V^* の次元はベクトル空間 V の次元と同じであることが知られている。すると、 $\varphi_{\mathbf{a}}$ は V の双対ベクトル空間 V^* の 1 つの元になっている： $\varphi_{\mathbf{a}} \in V^*$ 。ここで $\mathbf{a} \in V$ と $\varphi_{\mathbf{a}} \in V^*$ の対応を考える。

$$\mathbf{a} \longrightarrow \varphi_{\mathbf{a}}. \quad (4)$$

この対応を写像とみなすと線形写像であることが確認でき、さらにこの対応は V から V^* への 1 対 1 対応であることが示されている [4]。

2.2 ケット・ベクトルとブラ・ベクトル

ここからは、Dirac の記法 [1] であるケット・ベクトルとブラ・ベクトルを使って [6] 有限次元の

線形代数を記述する。\$n\$ 次元の複素ベクトル空間 \$V\$ の元であるベクトルをケット・ベクトルと呼ぶことにし、それを記号 \$| \rangle\$ で表す。ベクトル \$\mathbf{a}\$ をケット・ベクトルでは \$| \mathbf{a} \rangle\$ と表すことにする。また、ケット・ベクトル \$| \mathbf{a} \rangle\$ (\$\mathbf{a}\$ のこと) に対応する (4) 式の \$\varphi_{\mathbf{a}}\$ をブラ・ベクトルと呼ぶことにし、それを \$\langle \mathbf{a} |\$ で表す。

$$| \mathbf{a} \rangle \in V, \quad \langle \mathbf{a} | \in V^*. \quad (5)$$

ここで、複素数値をとる \$\varphi_{\mathbf{a}}(\mathbf{b})\$ をブラ・ベクトル \$\langle \mathbf{a} |\$ とケット・ベクトル \$| \mathbf{b} \rangle\$ のスカラー積とみなして \$\langle \mathbf{a} | \mathbf{b} \rangle\$ と書くことにすると

$$\langle \mathbf{a} | \mathbf{b} \rangle = \varphi_{\mathbf{a}}(\mathbf{b}). \quad (6)$$

ただしケット・ベクトルとブラ・ベクトルはそれぞれ異なる空間、\$V\$ と \$V^*\$ の元であることに注意する必要がある。\$| \mathbf{a} \rangle\$ を定数倍したケット・ベクトル \$c | \mathbf{a} \rangle\$ (\$c\$ は複素定数) に対応するブラ・ベクトルを求めておこう。

$$\varphi_{(c\mathbf{a})}(\mathbf{b}) = (c\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \bar{c}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \bar{c}\varphi_{\mathbf{a}}(\mathbf{b}), \quad (7)$$

より \$\varphi_{(c\mathbf{a})} = \bar{c}\varphi_{\mathbf{a}}\$、つまりケット・ベクトル \$c | \mathbf{a} \rangle\$ に対応するブラ・ベクトルは

$$\bar{c} \langle \mathbf{a} |, \quad (8)$$

である。また、

$$\overline{\langle \mathbf{a} | \mathbf{b} \rangle} = \overline{\varphi_{\mathbf{a}}(\mathbf{b})} = \overline{(\mathbf{a}, \mathbf{b})} = (\mathbf{b}, \mathbf{a}) = \varphi_{\mathbf{b}}(\mathbf{a}) = \langle \mathbf{b} | \mathbf{a} \rangle. \quad (9)$$

\$n\$ 次元複素ベクトル空間 \$V\$ の基底を正規直交基底 \$| v_1 \rangle, | v_2 \rangle, \dots, | v_n \rangle\$ にとったとき、次の関係式が成り立つ [1]。

$$\sum_{i=1}^n | v_i \rangle \langle v_i | = 1. \quad (10)$$

左辺は射影演算子 \$| v_i \rangle \langle v_i | \equiv P_i\$ の和を表し、右辺は恒等演算子を表す。実際、\$P_i\$ を 2 回かけると \$P_i P_i = (| v_i \rangle \langle v_i |)(| v_i \rangle \langle v_i |) = | v_i \rangle \langle v_i | v_i \rangle \langle v_i | = | v_i \rangle \langle v_i | = P_i\$ となる。また \$i \neq j\$ のとき \$P_i\$ と \$P_j\$ の積は \$P_i P_j = (| v_i \rangle \langle v_i |)(| v_j \rangle \langle v_j |) =

\$| v_i \rangle \langle v_i | v_j \rangle \langle v_j | = 0\$ となる。ここで、\$\langle v_i | v_j \rangle = \delta_{ij}\$ を用いた。\$P_i\$ と \$P_j\$ の積がゼロになるのは、射影演算子 \$P_i\$ と射影演算子 \$P_j\$ がお互い直交する方向へ射影するからである。射影演算子 \$P_i\$ をすべて加えると恒等演算子 1 になる理由は、正規直交基底 \$| v_1 \rangle, | v_2 \rangle, \dots, | v_n \rangle\$ が \$n\$ 次元複素ベクトル空間をくまなく張ることができるからである。この \$P_i\$ はケット・ベクトルの張る空間内の射影演算子であり、また、ブラ・ベクトルの張る空間内の射影演算子でもある。この関係式 (10) は極めて有用であり、計算の見通しを大変良くする。

\$n\$ 次元複素ベクトル空間 \$V\$ の正規直交基底 \$| v_1 \rangle, | v_2 \rangle, \dots, | v_n \rangle\$ から別の基底 \$| w_1 \rangle, | w_2 \rangle, \dots, | w_n \rangle\$ へ次の関係式によって基底を変換したとする。

$$| w_j \rangle = \sum_{i=1}^n p_{ij} | v_i \rangle, \quad (j = 1, 2, \dots, n). \quad (11)$$

係数 \$p_{ij}\$ を成分とする \$n \times n\$ 行列 \$U\$ を、基底 \$| v_1 \rangle, | v_2 \rangle, \dots, | v_n \rangle\$ から基底 \$| w_1 \rangle, | w_2 \rangle, \dots, | w_n \rangle\$ への基底変換の行列という；\$| w_j \rangle = \sum_{i=1}^n (U)_{ij} | v_i \rangle\$。さて今、変換行列 \$U\$ がユニタリ行列のとき \$U^\dagger U = U U^\dagger = E\$ (\$E\$ は単位行列)、変換された \$| w_1 \rangle, | w_2 \rangle, \dots, | w_n \rangle\$ は正規直交基底になることが次のようにして示される。

$$\begin{aligned} \langle w_j | &= \sum_{k=1}^n \overline{(U)_{kj}} \langle v_k | \\ &= \sum_{k=1}^n (U^\dagger)_{jk} \langle v_k | \end{aligned} \quad (12)$$

より、

$$\begin{aligned} \langle w_j | w_i \rangle &= \left\{ \sum_{k=1}^n (U^\dagger)_{jk} \langle v_k | \right\} \left\{ \sum_{l=1}^n (U)_{li} | v_l \rangle \right\} \\ &= \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n (U^\dagger)_{jk} (U)_{li} \langle v_k | v_l \rangle \\ &= \sum_{k=1}^n (U^\dagger)_{jk} (U)_{ki} = \delta_{ji} \end{aligned} \quad (13)$$

また, 正規直交基底 $|v_1\rangle, |v_2\rangle, \dots, |v_n\rangle$ から別の正規直交基底 $|v'_1\rangle, |v'_2\rangle, \dots, |v'_n\rangle$ へ基底を変換したとき, その基底変換の行列 P はユニタリ行列になることが以下のように示される。

$$\begin{aligned} |v'_j\rangle &= \left\{ \sum_{i=1}^n |v_i\rangle\langle v_i| \right\} |v'_j\rangle \\ &= \sum_{i=1}^n |v_i\rangle\langle v_i|v'_j\rangle, \end{aligned} \quad (14)$$

と書けるので, 基底変換の行列 P の ij 成分 $(P)_{ij}$ は

$$(P)_{ij} = \langle v_i|v'_j\rangle, \quad (15)$$

と表すことができ, これより

$$\begin{aligned} (P^\dagger)_{lm} &= \overline{(P)_{ml}} = \overline{\langle v_m|v'_l\rangle} \\ &= \langle v'_l|v_m\rangle. \end{aligned} \quad (16)$$

よって

$$\begin{aligned} (PP^\dagger)_{ik} &= \sum_{j=1}^n \langle v_i|v'_j\rangle\langle v'_j|v_k\rangle \\ &= \langle v_i| \left\{ \sum_{j=1}^n |v'_j\rangle\langle v'_j| \right\} |v_k\rangle \\ &= \langle v_i|v_k\rangle = \delta_{ik}. \end{aligned} \quad (17)$$

同様に $(P^\dagger P)_{ik} = \delta_{ik}$ が示される。

2.3 線形写像とその表現行列

n 次元ベクトル空間 V から V への線形写像 f を考える。

$$f: V \rightarrow V. \quad (18)$$

V の基底 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n$ を選んだとき,

$$\begin{aligned} f(\mathbf{a}_j) &= h_{1j}\mathbf{a}_1 + h_{2j}\mathbf{a}_2 + \dots + h_{nj}\mathbf{a}_n, \\ &\quad (j = 1, 2, \dots, n), \end{aligned} \quad (19)$$

によって定まる係数 h_{ij} を成分とする $n \times n$ 行列 $H = (h_{ij})$ を, 線形写像 f の基底 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_n$ による表現行列と呼ぶ。さて, この表現行列をケット・ベクトルとブラ・ベクトルを用いて書き表す。 V の基底として正規直交基底 $|v_1\rangle, |v_2\rangle$

$, \dots, |v_n\rangle$ をとったとき

$$\begin{aligned} f|v_j\rangle &= \left\{ \sum_{i=1}^n |v_i\rangle\langle v_i| \right\} f|v_j\rangle \\ &= \sum_{i=1}^n |v_i\rangle\langle v_i|f|v_j\rangle \\ &= |v_1\rangle\langle v_1|f|v_j\rangle + |v_2\rangle\langle v_2|f|v_j\rangle \\ &\quad + \dots + |v_n\rangle\langle v_n|f|v_j\rangle, \end{aligned} \quad (20)$$

と書けるので, 線形写像 f の正規直交基底 $|v_1\rangle, |v_2\rangle, \dots, |v_n\rangle$ による表現行列は

$$\langle v_i|f|v_j\rangle, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (21)$$

である。ここで, 線形写像 f の表現行列はベクトル空間 V の基底の取り方によって違ってくことに注意しなければならない。与えられた線形写像 f について, 基底が異なれば f の表現行列は異なる形をとる。本稿では, 上の正規直交基底による表現行列 $\langle v_i|f|v_j\rangle$ がエルミート行列の場合

$$\overline{\langle v_j|f|v_i\rangle} = \langle v_i|f|v_j\rangle, \quad (22)$$

を扱うことにする。

2.4 線形写像の固有値, 固有ベクトル

n 次元複素ベクトル空間 V から V への線形写像 $f: V \rightarrow V$ について,

$$f|v\rangle = \lambda|v\rangle, \quad (|v\rangle \in V, \lambda \in \mathbf{C}), \quad (23)$$

を満たす 0 でない $|v\rangle$ があるとき, λ を線形写像 f の固有値, $|v\rangle$ を固有値 λ に属する固有ベクトル (あるいは固有ケット・ベクトル) と言う。前述したように, 本稿では n 次元複素ベクトル空間 V の基底としては正規直交基底を扱い, 線形写像 f の正規直交基底による表現行列がエルミート行列であるような場合を考える。このような制限のもとで, f の固有値やその固有値に属する固有ベクトルがどのようにになっているのかをこれから調べることにする。まず, 次のことを示す。

「線形写像 f のある正規直交基底による表現行列がエルミート行列であるとき, 別の正規直交基底に変換することにより, その基底による表現行

列を対角行列にすることができる。また、その対角行列の対角成分はすべて実数である。」

証明では、エルミート行列は適当なユニタリ行列で対角化される、というよく知られた事実 [5] を用いることにする。

(証明)

n 次元複素ベクトル空間 V のある正規直交基底を $|w_1\rangle, |w_2\rangle, \dots, |w_n\rangle$ とし、行列 $\langle w_i|f|w_j\rangle$ はエルミート行列とする。

$$\langle w_i|f|w_j\rangle = (A)_{ij}, \quad (24)$$

と書くと、 $n \times n$ 行列 A はエルミート行列である。さて、エルミート行列 A は適当なユニタリ行列 U により対角化できるので、

$$(U^{-1}AU)_{ij} = \lambda_j \delta_{ij}, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n). \quad (25)$$

λ_j は対角行列の対角成分である。このユニタリ行列 U を基底変換の行列にとり、正規直交基底 $|w_1\rangle, |w_2\rangle, \dots, |w_n\rangle$ から別の基底 $|v_1\rangle, |v_2\rangle, \dots, |v_n\rangle$ へ変換する。この章の2節で、正規直交基底をユニタリ行列によって基底変換すると、変換された基底は正規直交基底になることを示した。従って $|v_1\rangle, |v_2\rangle, \dots, |v_n\rangle$ は正規直交基底である。

$$\begin{aligned} |v_j\rangle &= \left\{ \sum_{i=1}^n |w_i\rangle \langle w_i| \right\} |v_j\rangle \\ &= \sum_{i=1}^n |w_i\rangle \langle w_i|v_j\rangle, \end{aligned} \quad (26)$$

と書けるので、基底変換の行列であるユニタリ行列 U の ij 成分 $(U)_{ij}$ は

$$(U)_{ij} = \langle w_i|v_j\rangle, \quad (27)$$

と表すことができる。また、

$$(U^{-1})_{ij} = (U^\dagger)_{ij} = \overline{(U)_{ji}} = \langle v_i|w_j\rangle, \quad (28)$$

さて、 $(U^{-1}AU)_{ij} = \lambda_j \delta_{ij}$ の左辺へ式 (28), (24), (27) を代入すると、

$$(U^{-1}AU)_{ij}$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n \langle v_i|w_l\rangle \\ &\quad \times \langle w_l|f|w_m\rangle \langle w_m|v_j\rangle \\ &= \langle v_i| \left\{ \sum_{l=1}^n |w_l\rangle \langle w_l| \right\} \\ &\quad \times f \left\{ \sum_{m=1}^n |w_m\rangle \langle w_m| \right\} |v_j\rangle \\ &= \langle v_i|f|v_j\rangle. \end{aligned} \quad (29)$$

よって、

$$\langle v_i|f|v_j\rangle = \lambda_j \delta_{ij}. \quad (30)$$

これは、正規直交基底 $|v_1\rangle, |v_2\rangle, \dots, |v_n\rangle$ による f の表現行列が対角化されたことを示している。

次に、対角成分 λ_k ($k = 1, 2, \dots, n$) が実数であることを示す。

$$\langle v_k|f|v_k\rangle = \lambda_k. \quad (31)$$

式 (29) より

$$\begin{aligned} &\langle v_k|f|v_k\rangle \\ &= \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n \langle v_k|w_l\rangle \\ &\quad \times \langle w_l|f|w_m\rangle \langle w_m|v_k\rangle. \end{aligned} \quad (32)$$

また、

$$\begin{aligned} &\overline{\langle v_k|f|v_k\rangle} \\ &= \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n \overline{\langle v_k|w_l\rangle} \\ &\quad \times \overline{\langle w_l|f|w_m\rangle} \overline{\langle w_m|v_k\rangle} \\ &= \sum_{l=1}^n \sum_{m=1}^n \langle w_l|v_k\rangle \\ &\quad \times \langle w_m|f|w_l\rangle \langle v_k|w_m\rangle \\ &= \langle v_k|f|v_k\rangle \end{aligned} \quad (33)$$

よって $\langle v_k|f|v_k\rangle$ は実数でなければならないので、 λ_k は実数である。

(証明終わり)

すると、次のことを容易に示すことができる。

「線形写像 f のある正規直交基底 $|v_1\rangle, |v_2\rangle, \dots, |v_n\rangle$ による f の表現行列が対角行列であるとき、

$$\langle v_i | f | v_j \rangle = \lambda_j \delta_{ij}, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (34)$$

線形写像 f の固有値 λ_k ($k = 1, 2, \dots, n$) に属する固有ベクトルは $|v_k\rangle$ である。」

なぜなら

$$\begin{aligned} f | v_k \rangle &= \left\{ \sum_{l=1}^n | v_l \rangle \langle v_l | \right\} f | v_k \rangle \\ &= \sum_{l=1}^n | v_l \rangle \langle v_l | f | v_k \rangle \\ &= \sum_{l=1}^n | v_l \rangle (\lambda_k \delta_{lk}) \\ &= \lambda_k | v_k \rangle, \quad (k = 1, 2, \dots, n). \end{aligned} \quad (35)$$

以上より、次のことが言える。

「線形写像 f のある正規直交基底 $|w_1\rangle, |w_2\rangle, \dots, |w_n\rangle$ による表現行列 $\langle w_i | f | w_j \rangle$ がエルミート行列であるとする。別の正規直交基底 $|v_1\rangle, |v_2\rangle, \dots, |v_n\rangle$ へ変換することにより、その基底による表現行列を対角成分が実数となる対角行列

$$\langle v_i | f | v_j \rangle = \lambda_j \delta_{ij}, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (36)$$

にすることができて、しかも、線形写像 f の固有値は実数値をとる λ_k ($k = 1, 2, \dots, n$) で、 λ_k に属する固有ベクトルは $|v_k\rangle$ である。」

3 量子力学 —— ケットベクトルが有限次元の場合

3.1 物理量と量子状態

n 次元ベクトル空間 V から V への線形写像 f を考える。

$$f : V \rightarrow V. \quad (37)$$

量子状態はベクトル空間 V の元であるケット・ベクトル $| \rangle$ によって表され、一方、物理量は線

形写像 f によって与えられる。さて、ある量子状態 $|A\rangle$ に対して物理量 f が測定されると、測定結果は線形写像 f の固有値のいずれか 1 つに決まり、量子状態 $|A\rangle$ は測定した瞬間、その固有値に属する固有ベクトルに突然、飛び移る。測定による状態のこのような突然の変化を波束の収縮と呼ぶ。以下、簡単のため、固有ベクトルが縮退していない (1 つの固有値に属する固有ベクトルは 1 つしかない) 場合を扱うこととする。

任意の線形写像 f が物理量を表すわけではなく、 f の固有値 λ_k は測定値に対応するのだから実数値をとる必要がある。2 章の最後で述べたように、線形写像 f の表現行列 $\langle w_i | f | w_j \rangle$ がエルミート行列であるとき、線形写像 f の固有値 λ_k は実数値をとる。したがって量子力学では物理量として、 f の表現行列がエルミート行列であるような線形写像を考える。線形写像 f のある正規直交基底 $|w_1\rangle, |w_2\rangle, \dots, |w_n\rangle$ による表現行列 $\langle w_i | f | w_j \rangle$ がエルミート行列であるとき、別の正規直交基底 $|v_1\rangle, |v_2\rangle, \dots, |v_n\rangle$ へ変換することにより、

$$f | v_k \rangle = \lambda_k | v_k \rangle, \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (38)$$

と表すことができる。ここで、線形写像 f の固有値は実数値をとる λ_k ($k = 1, 2, \dots, n$) で、 λ_k に属する固有ベクトルは $|v_k\rangle$ である。物理量 f が与えられると、線形写像 f の固有値に属する固有ベクトル全体は正規直交基底を成すので、 n 次元ベクトル空間 V をくまなく張ることができる。さて、ある物理量を表す線形写像 f と別のある物理量を表す線形写像 g の 2 つを考えよう。 f の n 個の固有ベクトルと g の n 個の固有ベクトルが全く一致することはありうるであろうか。素朴に考えると、2 つの物理量の間には何か特殊な関係がないのであれば、全く一致することはないであろう。両者の物理量の固有ベクトルがどのような関係にあるのかということと両者の物理量の測定とが、どのように関連しているのか、次の節以降で調べる。

3.2 2つの物理量が可換でない場合

線形写像 f で与えられる物理量と線形写像 g で与えられる物理量が $fg \neq gf$ の場合である。線形写像 f のある正規直交基底による表現行列がエルミート行列であるとすると、2章の議論にあるように別の正規直交基底 $|v_i\rangle$ ($i = 1, \dots, n$) へ移ることにより

$$f|v_i\rangle = a_i|v_i\rangle, \quad (i = 1, \dots, n). \quad (39)$$

ここで、実数の固有値 a_i に属する固有ベクトル $|v_i\rangle$ は正規直交基底を成している。また、線形写像 g のある正規直交基底による表現行列がエルミート行列であるとすると、同様に別の正規直交基底 $|u_i\rangle$ ($i = 1, \dots, n$) へ移ることにより

$$g|u_i\rangle = b_i|u_i\rangle, \quad (i = 1, \dots, n). \quad (40)$$

ここで、実数の固有値 b_i に属する固有ベクトル $|u_i\rangle$ は正規直交基底を成している。さて、 g の1つの固有ベクトル $|u_j\rangle$ を、 f の固有ベクトル $|v_i\rangle$ で展開しよう。

$$\begin{aligned} |u_j\rangle &= \left\{ \sum_{i=1}^n |v_i\rangle \langle v_i| \right\} |u_j\rangle \\ &= \sum_{i=1}^n |v_i\rangle \langle v_i|u_j\rangle, \\ &\quad (j = 1, \dots, n). \end{aligned} \quad (41)$$

g の固有状態 $|u_j\rangle$ は、 f の固有状態 $|v_i\rangle$ の重ね合わせで表すことができ、重ね合わせの中で現れる $|v_i\rangle$ の振幅（展開係数）は $\langle v_i|u_j\rangle$ で表される。ここで、 $|v_i\rangle$ や $|u_j\rangle$ はそれぞれ正規直交基底を成していることに注意すると、 $n \times n$ 行列 $\langle v_i|u_j\rangle$ はユニタリ行列であり以下の式が成り立つ。

$$\sum_{i=1}^n |\langle v_i|u_j\rangle|^2 = 1, \quad (j = 1, \dots, n). \quad (42)$$

さて、物理量 g の固有値 b_j に属する固有ベクトルである状態 $|u_j\rangle$ に対し、物理量 f の測定を行うと測定結果は f の n 個の固有値、 a_1, \dots, a_n のいずれか1つに決まり、量子状態 $|u_j\rangle$ は f

を測定した瞬間、その固有値に属する固有ベクトルの状態に突然、飛び移る。量子力学では、測定したとき f のどの固有ベクトルの状態に突然、飛び移るのかは予言不可能である。しかし、 f のそれぞれの固有ベクトルに飛び移る確率を計算することは可能である。 f の測定結果が固有値 a_k で固有ベクトル $|v_k\rangle$ の状態に飛び移る確率は、式(41)で右辺の固有ベクトル $|v_k\rangle$ の展開係数の絶対値を自乗した値 $|\langle v_k|u_j\rangle|^2$ によって与えられる[1]。なお、 f を測定した結果は a_1, \dots, a_n のいずれかになるのであるから、全確率を足しあわせると式(42)により1となりコンシステントである。

従って、物理量 f と g が可換でない場合、 f の測定値と g の測定値を同時に100%の精度で予言することは不可能である。

3.3 2つの物理量が可換である場合

$fg = gf$ の場合である。(39)式と同様、

$$f|v_i\rangle = a_i|v_i\rangle, \quad (i = 1, \dots, n). \quad (43)$$

ここで、実数の固有値 a_i に属する固有ベクトル $|v_i\rangle$ は正規直交基底を成しているので $\langle v_i|v_j\rangle = \delta_{ij}$ であり、これと上式より

$$\langle v_i|f|v_j\rangle = a_j \delta_{ij}, \quad (i, j = 1, \dots, n). \quad (44)$$

ところで

$$\begin{aligned} \langle v_i|gf|v_j\rangle &= \langle v_i|g a_j|v_j\rangle \\ &= a_j \langle v_i|g|v_j\rangle. \end{aligned} \quad (45)$$

また、 f と g は可換であるので

$$\begin{aligned} \langle v_i|gf|v_j\rangle &= \langle v_i|f g|v_j\rangle \\ &= \sum_{k=1}^n \langle v_i|f|v_k\rangle \langle v_k|g|v_j\rangle \\ &= \sum_{k=1}^n (a_k \delta_{ik}) \langle v_k|g|v_j\rangle \\ &= a_i \langle v_i|g|v_j\rangle. \end{aligned} \quad (46)$$

(45)式と(46)式は等しいので

$$(a_j - a_i) \langle v_i|g|v_j\rangle = 0, \quad (i, j = 1, \dots, n). \quad (47)$$

固有ベクトルは縮退していないと仮定したので、 $i \neq j$ のとき $a_i \neq a_j$ であるから

$$\langle v_i | g | v_j \rangle = 0, \quad (i \neq j). \quad (48)$$

従って、 $n \times n$ 行列 $\langle v_i | g | v_j \rangle$ は対角行列である。一般に、線形写像の表現行列の満たす固有方程式は表現行列の取り方（即ちベクトル空間の基底の取り方）に依らずに決まる [5]。(40)式より $\langle u_i | g | u_j \rangle = b_j \delta_{ij}$ であるから、行列 $\langle v_i | g | v_j \rangle$ の固有値は行列 $\langle u_i | g | u_j \rangle$ の固有値 b_j と同じものになる。

$$\langle v_i | g | v_j \rangle = b_j \delta_{ij}, \quad (i, j = 1, \dots, n). \quad (49)$$

これを用いると

$$\begin{aligned} g|v_j\rangle &= \left\{ \sum_{i=1}^n |v_i\rangle \langle v_i| \right\} g|v_j\rangle \\ &= \sum_{i=1}^n |v_i\rangle \times (b_j \delta_{ij}) \\ &= b_j |v_j\rangle. \end{aligned} \quad (50)$$

つまり、 f の固有ベクトルと g の固有ベクトルは同一の正規直交基底 $|v_i\rangle$ ($i = 1, \dots, n$) にとることができる。 V の基底として $|v_i\rangle$ をとれば f の表現行列も g の表現行列も対角行列になる。 f と g が可換な場合、固有状態 $|v_j\rangle$ に対して g の測定を行うと確実に測定結果 b_j が得られ、同時に f の測定を行うと確実に測定結果 a_j が得られる。

従って f と g が可換な場合、同時に f と g を 100% の精度で測定することが可能である。

4 おわりに

量子力学の基礎を理解するのに必要となる線形代数の解説を行った。例えば電子のもつスピンのような物理量は 2 次元の複素ベクトル空間によって議論できるので、有限次元の線形代数を直接、応用することができる。一方、位置や運動量といった物理量を扱うには無限次元のベクトル空間が必要となる。従って 2 章で解説した有限

次元のベクトル空間をそのまま用いることはできず、議論を無限次元のベクトル空間へ拡張しなければならない。しかし、無限次元のベクトル空間を数学的に厳密に取り扱うのは大変、難しいので、物理的に自然と思われる仮定を置いて議論を進めることが量子力学では行われる [1]。

筆者が 2 章で解説した有限次元の線形代数は適用できる物理の範囲は狭いのであるが、しかし有限次元であるおかげでベクトル空間や線形写像そのものを理解しやすいことは言えるであろう。これらの概念は量子力学における物理量やその物理量の値（測定値）を議論する際に必要なものであった。

量子力学を学び始めるとき、波動関数の従うシュレーディンガー方程式から入る機会は多い。しかし、波動関数は量子状態を表すベクトル（状態ベクトル）そのものではない。量子力学を学ぶ上で、物理量とその物理量の値（測定値）の関係を理解することは大きな困難を伴うが、たとえ遠回りのように思えても有限次元の線形代数の復習あるいは学習から始めるのも良い方法であると言えるかもしれない。

参考文献

- [1] Dirac, P. A. M. *The Principles of Quantum Mechanics*, 4th ed., London: Oxford Univ. Press, 1958.
- [2] 高林武彦「量子論の発展史」中央公論社 1977 年
- [3] 前段眞治：物理的実在を学生にどう教えるか？東京工業高等専門学校研究報告書第 56 号, pp1-5, 2024
- [4] 志賀浩二「ベクトル解析 30 講」朝倉書店 1989 年
- [5] 石川暢洋, 鎌田正良「基礎線形代数」実教出版 1977 年
- [6] A. メシア「メシア量子力学 1」(小出昭一郎・田村二郎訳) 東京図書 1971 年

(2025年12月4日 受理)

実験レポートのやり直し実践における実験の背景からの再構築 —誤概念の可視化と修正を促す操作的指示文を通して—

藤井俊介*

物理の実験レポートを修正し論理的な文章に推敲していくこと(実験レポートのやり直し)は、誤概念の可視化と理解の再構築を促す指示文によって学生が直感・体験・実験と原理の間のつながりをなじませていく重要な機会となる。本稿ではこの機会を実現するため、3 学年全学科の学生に課した光の反射の実験レポートのやり直しを実例として物理的解釈とその背景となる数学(小学校の算数・中学校の数学を含む)を統合した物理の理解へ導く添削方法の検討を主題とした。具体的には、約 200 人の実験レポートの典型的な誤答パターンから理解促進の核になる部分を抽出し、修正のための操作的な指示文に翻訳・集約する。運用上、リスト化された指示文で一括管理が可能となり、添削の速さと状況整理及び考察を促す指示の質を両立できる。(キーワード: 物理教育, 実験レポート指導, 誤概念のパターン, 操作的指示文, 指示文のリスト化, 「逆変換」)

Instruction-guided revision of physics laboratory reports for reconstructing systematic physical understanding from everyday experiences —using feedback sheets designed for visualizing misconceptions and operational (procedural) instructions that guide students in revising their reports —

Shunsuke FUJII*

Modifying physics laboratory reports is an important opportunity for students to reconstruct everyday intuitions into systematic physical concepts. This study proposes a feedback method that guides students to recognize the mathematical basis of physical interpretation. By extracting and analyzing typical error patterns in laboratory reports, common misconceptions can be identified and translated into feedback instructions. These instructions are consolidated into a single instruction sheet, which reduces feedback workload without sacrificing feedback quality.

This paper presents a method for systematic reconstruction of students' understanding through visualization of misconceptions, small-step instructions leading toward proper physical reasoning.

(Keywords: Physics education, laboratory report revision, pattern of misconceptions, instructional prompts, list-based instructions, “inverse operation”)

1. 動機

「物理的思考力を高めてほしい」これは物理教師にとっての永遠の願いである。筆者が提唱している成績評価でC以上の学生に対する「やってみてから対応し学生の理解の地平を拓く」(DCAP的)取り組み¹⁾として、前提知識の確認(アンカー問題)を含む定期試験の誤答分析やその後の取組(補講プリント、授業内容のスマールステップ²⁾解説や授業で配付する共通の基礎演習プリント化)により、学生の学習の困難を授業設計の問題に帰着させて授業改善を行ってきた。今回、学生実験後

の実験レポートの質をあげるという観点での取り組みについてまとめる。特に、実験レポートで問題になるのは、書式の問題(目的、データシート、グラフ、課題、考察)がそろっていない問題、グラフに必要な情報が書かれていない問題(図脚注、座標軸に使う物理量の名称と単位)、課題の取り組み方の質の問題である。

実験レポートの添削作業では約 200 人分を一人一人確認する必要がある、多大な時間を要する。しかし、誤りを見つけた時には直ちに該当箇所を指摘することが、早期対応と学び直し効果の点で

*一般教育科

有効³⁾である。そこで、筆者は実験レポートの添削に時間がかかることは踏まえて、学生に内在する問題の解決に向けて添削に着手する。しかし、10人分ほど実験レポートを添削し終わると、そこには、ある種の繰り返しの誤答パターンが存在し、誤り方の種類は有限であることが見いだせる。指摘内容が扱いきれないほど拡大するものではないことを前向きにとらえれば添削対応の負荷が想定より限定的であることがわかる。すなわち、誤りをリストアップし、PCに、それぞれの誤った部分に対する指示を、実験レポートに書き込むイメージで、図1、図2のように「操作的」にまとめていくことにより、徐々に、多くの学生の誤った表現を修正するための指示書が出来上がっていく。ここで、操作的とは、学生が行うべき手順を中心にして思考を進めやすい形で表現する方向性のことであり、指示文とは、一つの誤答から分析・抽出された誤りの傾向をふまえてどのように考えればその誤答を正しい構造・論理に修正できるかを、具体的に指示している文のことである。根本的に正しい前提で考えられていない学生の理解を促す目的で用いることも多い。具体的には、図1、図2のように課題ごとに示された小項目から成り、学生に問いかける形式である。指示書とは、指示文の集まりのことで、指示書内の指示文の配置の仕方でも構造的・統合的理解を促す機能も持ち、学生の実験レポート修正に最適化した文章群となる。

2022年度

- 共通の指摘(主語がない)
- 課題1
 - 小項目 線対称の定義を問う
- 課題2
 - 小項目 実像・虚像の定義
 - 小項目 虚像の解説・訂正
 - 小項目 主述対応
 - 小項目 焦点の定義の解説

(個別の指摘として提示)

図 1 指示書の骨組み (2022 年度)

こうして指示文は、短期的には添削を進めるごとに更新され図1の形で、長期的には次年度に新

たに出てきた誤りに対する指示を前年度の指示書に追加することによって、誤りに対する指示書の構造化が添削作業の中で半自動的に進んでいく。図1と図2の具体的構成は1つにまとめて附録につけたので参照されたい。附録は、指示書の要約・抜粋であり、実際の実験レポートとは同一ではない。

そして、何人かの実験レポートを添削して新しい誤答があれば指示文を追加・更新し、指示書の更新が繰り返される。整ってきたら、指示書を大量印刷する部数を徐々に増やし添削作業を進める。最終的に添削作業は、該当する指示文を赤でチェックをするだけで、完了できるようになる。

2025年度

- 共通の指摘(主語がない)
- 課題1
 - 小項目 線対称の定義を問う
 - 小項目 主述・助詞の訂正
 - 小項目 まとめの穴埋め
 - 小項目 同音異義語の区別
- 課題2
 - 小項目 曖昧表現訂正
 - 小項目 実像・虚像表現
 - 小項目 虚像の解説・訂正
 - 小項目 主述対応
 - 小項目 焦点の定義の解説
- 考察
 - 小項目 実験からの結論要求
 - 小項目 主語・述語指定

(誤答パターンを整理して修正指示文として体系化)

図 2 構造化が進んだ指示書の骨組み (2025 年度)

通常、実験レポートを添削するとき、同じような誤りが大量に見られる場合、逐一、指摘し続けることになる。しかし、その繰り返し部分を印刷で置き換えることにより、添削作業の運用上の困難を回避できる。

まとめると、指示書は添削作業の効率を落としすぎず、問題の所在を学生に正確に伝え、物理概

念の構造的理解を促すことで教育効果を担保していく枠組みといえる。

3年生の実験は、物理V(光の反射・屈折、水波の実験、光の回折・干渉)、物理VI(身近な放射線、 β 線の吸収実験、比電荷の測定)であるが、分量が膨大となるため、本稿では、光の反射の実験の1テーマに絞って、添削の背後に潜む様々な教育上の着眼点や指導ポイント、学生が理解できていない部分を明示的に示し指示文に落とし込んでいく。

2. できていない部分の可視化と集約・統合

2.1. 典型的な誤った実験レポート解答の分析

3年生の物理の実験レポートを見ていると、いくつかの段階に分かれていることが分かる。第1に、学生が問題文を正確に読み取らず、問いに正しく答えていないもの、第2に作図はしたもののその作図の特徴を正しく表現できないものが挙げられる。すなわち、この第2の問題点は、小学校の算数(対称な図形)や中学校の幾何(平面図形)における線対称や点対称の区別という前提知識の補充が必要な場合と、断片的な前提知識はあっても活用できず、作図上の見た目の描写にとどまって線対称性の理解に至っていない場合がある。

課題の解答と誤答例を比べてみよう。

解答：「鏡を対称軸として、くぎAとその虚像A'が線対称の関係になる」

誤答1：線対称という文脈に限定できずに、作図の描写で終わる

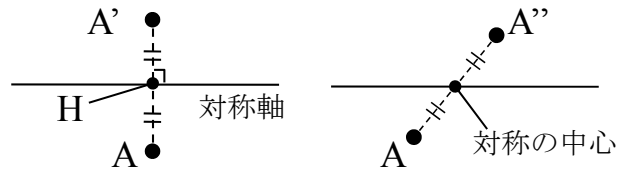
(例：「AとA'は直線関係である」)

誤答2：述語自体が違う。

(例：「AとA'が点対称である」)

誤答2はAとA'の配置が実際には、次の図3の図aのように線対称な配置になっているにも関わらず「点対称」と表現してしまっている問題である。線対称と点対称の違いは、図3の図aと図bのように対称軸について対称か、対称の中心(点)について対称かの違いであるが、この区別が誤答を書いた学生にとってあいまいであるという点がこの誤答の原因であろう。もっと極端な誤答の例を挙げる。2つの「点」A,A'が「対称」な位置にあ

るから「(2)点(が)対称」と表現し、正式な定義に基づいていない場合である。線対称と点対称以前に点対称の定義さえ説明できない点で問題は根深い。



図a 線対称

図b 点対称

図3 線対称と点対称

この誤答傾向は、直近の影響に限れば中学校での教育由来と考えられ、理科や数学は暗記科目であるという、入試対策での刷り込みや、意味を考えさせる授業実践が中学段階では難しい状況を物語っているのかもしれない。

以降、筆者によるこの誤答傾向の分析から、逆に「どういう指示文をつくれれば、正しい答えを学生が導くか」、という問い方を生成するための「逆問題」として、指示文を設計する方法を考える。次の2.2.の指示文では、線対称と点対称の区別をつけるために、対称軸を線対称性と併せて確認する意識を持たせる問い方をしてある。

このように、小学校の算数(対称な図形)・中学校の数学(平面図形)レベルの数学・理科の基礎を確認することは、実験で作図した光線の経路の特徴を文章化するという課題によって行える。文章化を要求することによって、既習の内容と知識の統合具合の程度を可視化するアンカー問題の役割をはたすことに気付く。

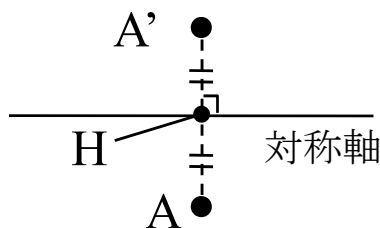
次の問いでは、鏡の像A'の物理的意味について問う。つまり、像A'は「虚像か実像かその他か」を自分で特徴づける課題である。この課題は、新たな消化不良「虚像と焦点の区別ができていない」点の実験レポートに現れる。虚像とは、一般に光の反射で光の経路が変わった結果、「まるでその1点から光が出ているように見えるが、実際の光源がそこにあるわけではない」点のことである。複数の観測点からの光線経路の交点として、あらわれるその1点は、光線が1点を通るという意味では、「焦点」と「絵としては」似ていると誤解す

るかもしれない。しかし、焦点は平行光線がレンズ等により 1 点に集まって来る点なのだから、主語の詳細「どんな光線が 1 点を通って来るのか」を識別する必要があるだろう。すなわち、「鏡の像と視線方向で一致するように打った何点かの針により決まる光線経路と、別方向から同じ鏡の像に対して同様に作った光線経路は、たがいに平行なのか」という点である。まとめると、鏡に入射する光線が互いに平行かどうかを考えさせて、焦点が焦点でないかを考えるように指示文に反映すればよい。こうして、問いを指示文として与え学生が再考する起点としている。具体的には、学生の思い込み(誤認知)「光が 1 点に集まれば、何でも焦点である」を筆者がまず抽出し、その誤答はどういう背景を問い直せば、誤概念が正しい概念に修正されるかの筋道を見出し、学生の思い込みを解除するように筆者は指示文を設定している。誤答パターンが複数あれば、誤答添削を行うたびに問を追加していけばよい。その詳細は、次節の中心的話題として挙げていく。

2.2. 修正のための指示文の内容

実験レポートの修正のための指示書の作成には、小学校の算数と中学校の数学と高専の物理との接続という理解の構造の再構築という観点と、その既習内容との接続が必要な部分を、どのようにこの実験で必要な「操作として翻訳し、落とし込んでいくか」を考えることが重要になる。

具体的に、筆者は 2.1. で扱ってきた誤答内容から推定される誤答の背景理解に基づいて、誤答パターンを指示として落とし込む。そこで、落とし込み過程の理解のために、修正指示文の設計の考え方について実例を通して以下にまとめる。



図a 線対称

図 4 図 3 の図 a の再掲

①線対称の特徴の抽出指示

(図 3 の図 a の線対称の定義)

A と A' を結んだ直線と境界 (= 鏡) の交点を H として、

①-1 2 つの線分を指定し角度関係の抽出。

①-2 指定した 2 つの線分の長さの測定に誘導。

①-3 書式を与え、考え方の着眼点を凝縮する。

問い方の例 1: これら 2 つの観点①-1, ①-2 を満たす性質を「A と A'」が「何対称」というか (誘導的問い)。

問い方の例 2: A と A' が対称となるのは、線についてか、点についてか (着眼点示唆型の問い)。

②焦点・虚像の区別の指示 (図 4 虚像の定義)。

②-1 焦点と虚像の定義の解説。

※レンズの文脈と鏡の文脈での焦点の定義を一般的観点として再導入・文脈整理。

②-2 実験設定に即した焦点と虚像の識別誘導

考える問の例: 実験で行った光線の経路の作図から、平行光線の部分があるか? (焦点と言える根拠の有無を得た作図から確認)。

②-3 穴埋め付きの文を用意して、考えるポイントを限定する。穴埋め部分には、「虚像」か「焦点」かを入れるように誘導、話の流れを自分で確定させる。

③実像と虚像の区別に関する指示。

(図 4 虚像の解説・訂正)

③-1 A' が実像か虚像かの識別誘導。

問い方の例: 光線が 1 点で交わった点 A' にスクリーンを置いたとして、像が写るか。(思考実験形式)

③-2 [対話的対応部分]③-1 の指示文について、学生が質問してきた場合。

考える問の例: 「鏡の後ろに光は届くのか」

作図上では複数の光線経路の交点に見えるのは仮想的な点にすぎないことを気付かせるように誘導しつつ問答を繰り返す。

※この対話の後、多くの学生は、「光線は鏡を突き抜けて延長して書いているが、実際は鏡での手前に反射する。だから、複数の延長した光線経路が 1 点 A' で交わって見えても、光線は A' に届いていないはず。だから A' 上でスクリーンを置いたとしても像が映るはずがない。」という認知に至る。

以上が、光の反射の実験の指示書の設計内容であり具体的には附録のような全体構造にし、個別の操作的な問いとして実装する。上記の設計で述べたように指示文の中には「読むだけで理解できる閉じた指示」と、思考のきっかけを与えるだけで「学生との対話を想定した開いた指示」がある。

実験レポートの指示文は、いくつかの機能を持たせているという形で以下のように整理できる。

機能 1：教員側が手動でやっている実験レポートの誤り箇所の指摘・列挙を高速化させる役割(あらかじめ列挙した部分に赤でチェックを入れるだけ)。

機能 2：学生の誤った概念の明示化(=認知促進)と修正。完全な修正は目指さず、この実験レポートに必要な最小限の定義だけを列挙し、誤った部分を修正するための出発点を与える。

機能 3：主語・述語の形式の欠損の指摘。

機能 4：機能 3 で指摘した主語の限定に役立つように着眼点を提示。文章の構成自体が難しい場合は、説明文により文脈を与え、その文脈から本当に見出すべき言葉を読みとらせる。最終的には()による穴埋め作業に帰着させる。

機能 5：機能 4 で作った例文をそのまま実験レポートの修正解答として、転記させる。

3. 実験レポートの改善に至るまでのプロセス

実験レポートは、筆者が提出物点の一部としてあつかっているもので、制度上の評価とひもづくため学生も実験レポートを仕上げることは動機づけをしやすい。その結果、集中的に実験レポートに取り組むことも行いやすい学習設定となる。一部の学生は、どうしても実験レポートの再提出を出しきれない学生もいるが、それはこれまでの提出物を出せない悪習慣によるものと筆者には思われる学生もいる。以降は、実験レポートを再提出する意思のある学生について限定して扱う。

この実験レポートの修正の指示書は、2.2.でも述べたように、学生が修正を行うきっかけにすぎない。学生によっては、指示文を見て腑に落ちて自律的に実験レポートの直しまで進めることができる学生もいる。また、指示文だけでは理解できなくても、筆者への直接質問・対話によって、実験

レポートを直す方針や自分の理解の何が間違っていたのかの気づきにつなげることができる学生もいる。実験レポートを直すときは、授業時間の一部を使って、学生の実験レポートのやり直しの個別対応の時間を設けている。この個別対応は約 40 人で授業時間内には終わらない場合、放課後に該当クラスの HR 教室に筆者が出向いて、引き続き実験レポートチェックを行い、必要に応じて個別解説を行うことも多い。しかし、よく吟味して実験レポートを書き直してくる学生もいて、学習効果が普段以上に上がっていることがわかる。実験レポートの修正を、指示文を通して個別対話を続けることで、普段物事を考えることが苦手な学生であっても、その苦手意識を下げるができる。多くの学生は具体的にどうすればよいかという指示を理解することによって、実験レポートの直しを最後まで完了させることができている。

この対話の過程は一見「非効率の極み」に見えるかもしれないが、教え方の改善に関する重要な示唆を得る機会といえる。具体的には、まず学生がどこを分かっているか、再提出時にまだ引っかかっているところはどこかを把握する。次に教員が学生との対話の場面を思い出しながら指導のアイデアを練る。そのアイデアを授業で扱いやすい形に一般化し、さらに直感的表現へと圧縮する。これは、授業における概念の導入方法の改善にも役立つ。さらに、指示書の問い方や着眼点は一定の型に整理され、問い方の具体的構成が固まっていく。こうして、誤答パターンの分析・対応や対話の蓄積により、自然に強調して教えるべき点や学生のあいまいにしている点が教員の中で意識化される。それらの内容を整理し、指示書に反映していく。その結果、言語化された内容に基づいて、新しい誤答傾向に対応する具体的な指示文の追加・修正を行い、より洗練・最適化した指示書へ更新していける。

指示書の修正の運用タイミングは、始めの 1 クラスについては約 10 人ごとに行っている。そして 1 クラス終わる頃には、約 40 人分の実験レポートに対する指摘が集約される。次のクラスの実験レポートチェックはより高速に行うことができる。新たな誤答パターンへの対応を繰り返す中で、指示書の完成度は徐々に上がっていく。添削の後半

には、ほとんど修正の必要がない指示書を手元に置き、高速に添削業務を進めることができる。

本指示書を用いた介入は、成績評価と関わる課題の一部であり運用上強い統制と捉えられる可能性はある。しかし、学生は提示された枠組みの中で自ら修正を行い主体的な学習行動が確認される。このため、本運用は物理の理解を目的とした学生との対話の一形態として機能していると考えられる。

4. 指示書を物理現象の説明に「逆変換」した場合

ここで指示文(または指示文の集まりとしての指示書)が実験レポートのやり直しに果たす役割について、次の図 5 で概観しておきたい。

次の図 5 のように、直感で見た物理現象が、正しく整理されていない場合は誤答を導く。この誤答を正答に導くためには、学生の誤答の構造(どの段階から分からなくなっているか)を分析して、正答に至るように学生の思考に働きかける必要がある。その学生への働きかけを担うのが指示文である(1.の指示文の説明の通り)。その指示文の内容は、一般に学生によって異なる。定義など、物理・数学(小学校の算数や中学校の数学を含む)の基礎概念の学び直しが必要な場合や、基礎概念を使った説明の流れを与える必要がある場合など、学生によって多種多様である。

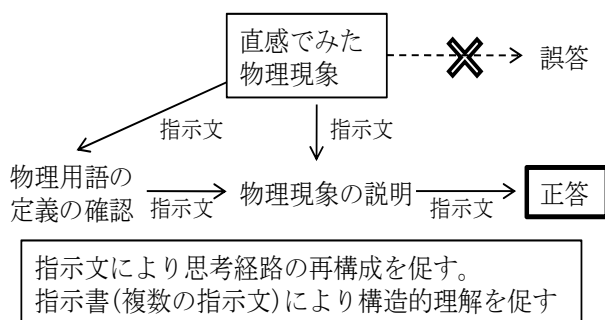


図 5 指示文(指示書)の果たす役割

図 5 のように、どのプロセスから考え直すかを与えるのが指示文で、図 5 では 2 とおりの思考経路をたどって正答にそれぞれ誘導する様子を表している。図 5 は指示文の途中段階での働き方を表したものであったが、最終的に基礎概念の理解が成立してくると、次の図 6 のように物理現象の説明から指示文のはたらきを通して正答へいたる思考

経路が単純化される。

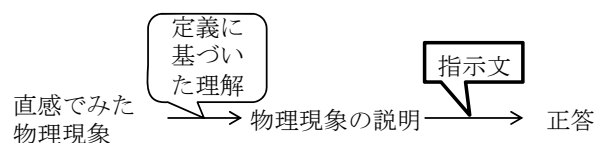


図 6 理解成立後の指示文と物理現象・正答の関係

指示書は、「どう直せばよいか」に最適化して網羅的に書かれているため、実際に実験レポートを直す学生にとっては修正点が明確な文書であるが、指示書全体を物理現象の説明文として読むことは難しい。言い換えると、実験レポートの修正という「操作の仕方」はわかるが、その操作の集まりを持ってきても、見ただけではその背後にある物理は読み取りづらい。

そこで、単独または複数の指示文がどのような物理的背景で書かれているかを「逆変換」して物理現象の説明に書き直してみよう。

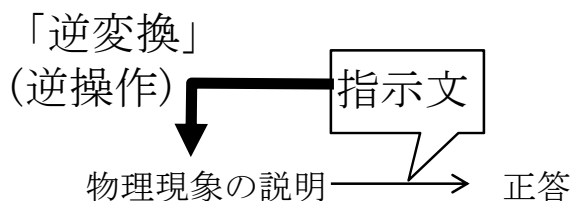


図 7 指示文から物理現象の説明を復元する逆操作としての「逆変換」

ここでの「逆変換」は教育上の操作的な概念を表し、数学的に厳密な 1 : 1 対応で指示文から物理現象の説明に戻せることは意味しない。本来の操作「物理現象の説明→指示文」という操作に対する逆操作「指示文→物理現象の説明」として論理を再構成するという意味である。実際はこの逆操作には、実験上の文脈、教育経験などが加味されて行われるため教員によって指示文から物理現象の説明へ逆操作したときに似たものはできても、ただ一つではない。その「逆変換」の一例を、今回の光の反射の話題に限定すると 2.2.の①～③の指示文(付録の指示文も参照)に対する物理現象の説明への「逆変換」は以下ようになる。次の図 8 は「逆変換」で復元された物理現象の説明を確認するための図である。

光の反射の部分

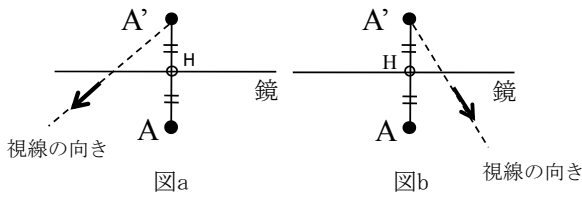


図 8 光の反射の実験で得られる光の経路(くぎ A から出た光は描いていない)

1. 光の光線経路は、鏡の前に置いたくぎ A から出た光線の経路上に 2 本の針を刺し、それら針の実物が鏡に映し出されたくぎ A の像と一致する(= 視差がない)ように実験して決めたものである。これにより、くぎ A を光源として出発した光が、鏡で反射し、反射光を目でとらえたときの光線の経路が一本決定する。図 8 の図 a や図 b のようにこれを複数回、別方向から観察することにより、異なる報告からくる光線の経路がとれる。
2. これらの経路を表す直線を、鏡を超えて延長すると、図 8 のように延長した直線が 1 か所に集まってくるように見える。これは、観測者にとって、まるでそこに光源があったかのように見える点(A')である。しかし、この点 A' の位置にスクリーンを置いたとしても、くぎ A から出た光は、すでに鏡で反射して光は鏡の裏の点 A' のある領域には届かない。つまり、点 A' から実際に光は出ているわけではなく、光源とは言えない。この意味で、光線の経路を延長することによって得られた鏡の点 A' は、実像ではなく虚像であることが分かる。また、集まってくる複数の光線の経路で平行光線だったことは反射の前後で一度もないから、点 A' が焦点であるという可能性は否定される。
3. 出来上がったくぎ A とその虚像 A' をみると鏡の位置について、次のような特徴があることが分かる。線分 AA' の中点に鏡が来ていること、そして線分 AA' と鏡は直交していることが分かる。この 2 点から、くぎ A と虚像 A' は鏡について線対称となる。

このように、指示文を逆操作によって復元した

実験の背後にある物理現象の説明は、複数の指示文(2.2.①～③)、または付録の指示文も参照)とは、目的が異なるため見た目も大きく異なる。複数の指示文は、上記 1～3 のような飛躍の少ない実験で見られた物理現象の説明が学生の頭の中で再現できるように、はたらきかける役割を果たす。課題別の指示文の集合体である指示書は、学生の実験レポート修正に最適化した文章群である(1.の指示書の説明の通り)が、筆者が学生に自ら「生成して」ほしい物理現象の説明は指示文の操作群の中に隠されているのである。

5. 実験レポートのやり直しの実態

実験レポートの修正に書かれている指示文や対話により、学生にとってこれまで分かっていた前提や、学生が難しいと思っていたよりも、もっと単純な論理で、物理現象を表現できることが学生の中で発見され、この直しを通して思考の整理をしていく経験が蓄積される。筆者に学生が何度でも質問できる機会を持つことで、実験レポートの直しの時間は、指示書を通して、学生が自分のペースで段階的に思考を深める時間として機能する。具体的には、理解度の異なる学生ごとに対応した指示文が提示され個別的に直しを学生が自分で進めるといふ、寺子屋的な形で学びを深める学習が進む。

実験レポートの再提出形態については、筆者に直接提出することを標準とし、それ以外に物理科内で設置された回収ポストに出す選択肢も提供している。回収ポストに入れる選択肢を含めた理由は、筆者に直接見てもらうまでの過程を避けたい学生のための選択肢として提供している。しかし、修正した実験レポートを筆者のチェックを受けずに提出するのであるから、修正が不完全になることはこのシステムの仕様上、起こりうる点である。そのため、学生が実験レポートの直しを直接回収ポストに入れた場合は、筆者は対面でチェックとやり直し指示ができなかった分、ゼロからチェックし直し、初見の実験レポートとして誤りを見つけていく。実験レポートの直しが完璧であれば減点はないが、不十分な理解のまま直しを行った学生は、誤りがあるごとに減点が積み重なり、大きな減点となることもある。このため、確実に実験

レポートで提出物点を確保したい学生は、自然に筆者との対話を何度も繰り返し、設定された理解レベルに達したときのみ筆者が受理し、学生も実験レポートの受理を通して目標達成を自覚できる。

このような、実験レポートの指示書・筆者による修正確認・正しく直るまでやり直し・やり直し完了後の受理までを一連の流れにすることで、学生は、自らの理解の不足と向き合うという姿勢を体験することになる。一方で、他人の実験レポートを写してくる学生もいる。しかし、多くの場合、対話の中で理解のあやしい部分が現れ、筆者から追加で実験レポートの課題をもらうことになる。このように、学生にとって実験レポートの直しを行うことは、学生の背景理解の修正の機会になるとともに、自分の分からないことと向き合い必要に応じて筆者に質問して対話するという過程が自然に生じる。結果として物理法則の理解を促される機会となるのである。

本実践により、実際の典型的な誤答の減少や記述の構造化が見られた。改善がみられるまで受理しなかったということもあるが、途中であきらめた学生を除いた約 190 人が何らかの形でレポートを受理されている。そのため、本実践には一定の効果が示唆されたといえる。

6. 結論：科学的思考力の形成に向けて

今回は、光の反射の実験を具体例として誤答を指示書としてフィードバックする試みを挙げたが、本稿の方法は他の実験テーマにも適用可能である。実際、3年生のほとんどの実験テーマ[物理 V(光の反射・屈折、水波の実験)、物理 VI(身近な放射線、 β 線の吸収実験、比電荷の測定)]に対して、筆者は指示書を作成・運用している。

筆者のこれまでの教育実践とひもづけて本報告を俯瞰してみる。本稿で扱った実験レポートのやり直しは、実験の締めくくりとしての役割と提出して終わりという評価の道具という側面から、学生の学びに筆者が関わる²⁾という点で一歩踏み込んだ教育といえる。指示書を通して実験設定を理解し、図的解釈と結びつけ、数式表現として対応させ、それを日本語の表現として、物理概念とひもづけていく過程を扱っている。これは誤概念から物理の理解を再構築する教育設計に基づいており、筆者がこれまで目指してきた、直感・体験・

実験、数学的表現、物理的理解(原理)を有機的につなげる試み^{1,4)}を、指示書を通じた実験レポートのやり直しとして再構築した上で具体化したものである。

この教育設計は、学生の思考を段階的に構造化する役割を果たし、物理だけでなく高専の数学・工学教育にも適用可能な方法として位置づけることができる可能性がある。

運用上の注意点を述べて締めくくる。実験レポートのチェックを甘くすると、学生が書いて終わりという「作業」と化し、実験内容の学びは形骸化し、理解を伴わない意味のないもの(学びにつながらずに忘れ去られるだけの情報)に変質してしまう。その変質を止められるように前向きに発展させたのが、今回の指示書を用いた実験レポートのやり直しといえる。

謝辞

物理の教育業務を通して、筆者にいろいろな助言や情報共有をしてくださる物理科の先生方、東京高専の担任の先生方、筆者を温かく見守ってくださっている他教科・他学科の先生方、筆者と関わって下さった過去の職場の先生方に感謝いたします。本稿の要となる重要ないくつかの観点の洗練と整理の助言をいただきました図書館長の 大野秀樹先生に感謝いたします。

参考文献

- 1) 藤井俊介: 学生との対話から再構築する物理の授業とその改善—DCAP サイクルから見えてくる学生の学びと教科指導のあり方—, 東京工業高等専門学校研究報告書 第54号, 2022年3月
- 2) 島宗理: インストラクショナルデザイン—教師のためのルールブック, 米田出版, 2004年11月
- 3) 吉田順: その手抜きが荒れをまねく—落ち着いているときにしておく生徒指導, 学事出版, 2016年
- 4) Fujii, H. Ohno: Introduction of trinity of science: Physics, experiment and mathematics for international students, ISATE2019 (13th International Symposium on Advances in Technology Education Engineering Education for Sustainable Development in 21st Century), pp149-154, Oct.2019

附録 光の反射に対する指示書の概要と構造

以下は、本文図1, 2の指示書のデザイン図や2.2.で示した指示文(または総体としての指示文)の設計の考え方をどのように実現しているかを、全体構成と個別の問いとそれらの問いの意図を明示しつつ、この附録で示す。

指示文の特徴：

実験テキストの各課題において、以下の内容を中心に要求している。

- 根本的に必要な課題・グラフがない
 - 不備を含む実験レポート説明文として指摘(不足形式・課題・グラフの列挙)
- 主語と述語を明示的に書くことを要求
- 漢字間違いの修正
- 中学校における前提知識や定義の確認・解説
- 実験レポート自体の修正指示

中心的話題は実験レポートの修正指示であるが、前提を確認・学び直すところまで、視野に入れて、本時の授業内容では手が回らない学生にも指導を試みているのが大きな特徴である。

(I) 不備を含む実験レポート[提出物としての必要要件を満たしていない場合]

必要書式「実験の目的、ワークシート、課題、グラフ、考察」において抜けている形式の列挙・確認

(II) 物理 V における指摘事項[必要要件は満たしている場合]

-光の反射の実験の場合-

基本的書式の修正項目

①主語がないものや漢字が間違っている部分ごとに、課題番号を列挙する。さらに、英単語と漢字の意味を対応させて印象付ける工夫を行った。

例：「線対称」「実像・虚像」の漢字間違い
対象=object, 対「称」=symmetry, 象=elephant, 「像」=image

※漢字や熟語の意味を英語表記することで、インパクトを増す。

②修正課題番号ごとに指示を列挙

③主語と述語が対応していないものは指摘

④別紙で追加した実験レポートの順序指定

→関連する課題のすぐ後ろにつける。

「光の反射の実験」指示項目の例

2.2.で示した①～③の設計内容と対応したものであるが、一部の項目では複数の設計要素にまたがる形で、実装された例となっている。

□光源の位置Aと鏡の虚像A'の位置関係について(2.2.①)

●AA'と鏡のなす角, A, A'からの最短距離について明示的に説明するように指示(2.2.①-1, ①-2)

●主語, 述語の指定[穴埋め問題化](2.2.①-3)

主語：「くぎAとくぎ()」

述語：「()対称である」

→この後、作図指示

□光が反射したときにできる虚像の位置を言語的に描写することを要求(2.2.③)

「視差がない」という条件の物理的意味の明示

●[誤答対応]不適切な主語の部分指定の例

同語反復系「光線の延長線が交わった点」

→「くぎ○の近傍」(2.2.③-1, ③-2)

※A'の位置を決める作業方法を描写のみで、実物のイメージをもって表現されていない。

●[誤答対応]述語の部分指定

くぎAの「実像」・「虚像」であるかの明示

●[誤答対応]中学校で出てきたはずの語句の定義・解(2.2.③-1, ③-2)

(i) 実像・虚像：実像はスクリーンを立てると像が映って見える点、虚像はスクリーンを立てても映らない点です。

鏡の後ろにできる像は、スクリーンを鏡の後ろに置いた時、実際に映って見えるのでしょうか？

(ii) 焦点：平行光線が1点に集まってくる点は「焦点」と言います。今は、この言葉は当てはまりません。(2.2.②-1, ②-2)

理由：虚像に集まってくる光線は互いに平行ではないから。

(2025年12月4日 受理)

アクセシビリティを糸口とした差別に関する技術者倫理の授業

—自分の作ったものがこの世界に存在してよいものであるために—

江藤信暁*

本稿では、東京高専の技術者倫理・工学倫理系科目で実施されている授業実践のひとつを紹介する。この授業では、アクセシビリティに焦点を当て、差別は技術／技術業においても生じうることを複数の事例の紹介や社会学等の知見の援用によって示しつつ、最後に人格の尊重に言及する。そのさい、具体的な事例や学問的知見によって、学生の思索や日常的な感覚と抽象度の高い倫理的な諸概念や理念の結合を試みる。そうすることで、倫理を自分ごととして捉えることの重要性と、倫理によって普遍妥当的な価値に適う人工物の開発が助けられることを学生が理解することを目指す。

(キーワード：東京高専，技術者倫理，差別，アクセシビリティ)

Class of Engineering Ethics on Discrimination

with a Focus on Accessibility

— Ensuring What We Create Deserves to Exist in the World —

Nobuaki ETO*

This paper presents a single session within an engineering ethics course at Tokyo KOSEN. The session focuses on accessibility, illustrating how discrimination can arise from technological industries, and concludes by addressing the principle of respect for person. By drawing on specific case studies and sociological insights, the session mediates between students' personal thoughts or everyday sensibilities and highly abstract ethical concepts and ideals. The primary goal is to help students view ethics as relevant to their own research and to understand how ethical considerations can foster technological innovation consistent with universally valid values.

(Keywords: Tokyo KOSEN, engineering ethics, discrimination, accessibility)

1. はじめに

倫理は技術の発展を妨げるものだと思う——これは、これまで本稿の筆者が高専の技術者倫理の授業においてたびたび耳にし、目にしてきた学生の言葉である。倫理の授業を担当する教員としては、この言葉はショックだった。倫理や倫理(学)的な思考は自分達の営みに必要ではない、むしろ邪魔をするものだ、という学生の見解を率直に表明した言葉だったからである。そして、自らのこれまでの授業の意義を学生に十分に伝えら

れていないことに焦りを感じた。同時に、倫理を欠いた技術によって造られたものが社会に出ていくことに対する危機感も抱いた。

冒頭の言葉は、学生による発表のさいに発せられたことも、リアクションペーパーに書かれていたこともあった。そのとき授業で扱われていた内容はさまざまだが、とくに、アクセシビリティというトピックから身体障害者や高齢者といった移動制約者という社会的マイノリティに焦点が当たる授業だったことが多い。学生——そのほとん

*一般教育科

どは移動制約者ではない——は、さまざまな考慮・配慮の必要性を説かれて、うんざりしていたのだろうか。だが、だからといって、そうした考慮・配慮を疎かにしてよい理由などない。

では、倫理的な思考が技術／技術業にとって不可欠であることを学生が理解するには、どのような授業を行うべきなのか。本稿が紹介する授業実践の目的は、倫理的な知識・知見が技術者にとってたんに服従を強いるだけの外的な指令・命令以上のものであることを学生に示すことにある。そうした知識・知見は、技術者のうみだすものを、この世界に存在してよいものとするよう後押しするはずのものなのである。

本稿は以下のようにすすむ。まず、第 2 章では技術者倫理教育における主な関心を指摘する。そのさい、技術者倫理教育一般と東京高専におけるその教育について触れる。続けて第 3 章では、前章で提示した関心をうけて、本稿で中心的に紹介する授業実践を設計するに至った問題意識を詳述する。第 4 章で実際の授業実践の流れを示したうえで、第 5 章では、第 3 章の問題意識にどのように対応したのかを確認する。

2. 授業実践の背景

ここでは、この授業実践の前提となる事柄について言及しておこう。

まずは、技術者倫理ないし工学倫理 (Engineering ethics, 本稿では「技術者倫理」という表記に統一する) についておおまかに説明しておきたい。技術者倫理は、1980 年代にアメリカ合衆国で専ら教育的な取り組みとして始まった (cf. Franssen et al. 2023¹⁾)。扱われるのは、「組織に雇われる者としての、あるいは公衆に対する責務をもったプロフェッションの一員としての技術者が有する倫理的責任」(ハリス 2012²⁾, 523 頁) である。すなわち、技術者倫理において問題となるのは、一組織人としての責任だけではない。また、製品の使用者や顧客への責任にもとどまらない。技術業というプロフェッション (専門職) に対して、一般の人々すなわち公衆は安全面などにおいて信頼と期待をかけるが、こうした信頼と期待への責任も技術者倫理の問題となるのである。したがって技術者倫理においては、公衆の生存や生活の権利を擁護する責任、公衆と技術者がとも

に属する社会全体の公正さへの責任という点が重視される。

続いて、東京高専における技術者倫理教育の現状について概略を示しておく。東京高専で本科生向けに開設されているのは、4 年生に向けて週 1 回行われる科目「技術者のための哲学・倫理」である^{※1}。この科目では半期をかけて、技術者倫理に関わる基礎的なトピックを扱っていく。現在この科目では、教科書として指定している書籍 (黒田ほか 2012³⁾) の講読と各トピックに関連する事例の調査・発表という、学生が積極的に参加する必要のある方式が中心となっている^{※2}。そして、これに加えて科目担当教員が数回にわたり講義を行っている。その時間にもワークや議論を行う時間を随所に設けることで、学生の積極的な参加を求める授業形態をとっている。

ここでの積極的な参加とは、簡単に言えば、学生自身が自ら考えることを意味する。これを学生に求めるのには、倫理的問題への関与のしかたに理由がある。倫理的問題に関わるさいには、たんに一定の規範や指針にしたがって行為すればよいわけではない。このことは倫理的問題一般に言えることではあるが、その理由には技術に特有のものがある。それは人工物の複雑性である^{※3}。たとえば自動車を見ればわかるように現代の人工物は極めて複雑なものなのだが、それゆえに、その人工物が原因となる将来の事故を完全に予測しコントロールすることは不可能である。また、ひとつの問題を解決するためのアプローチも、複雑性ゆえに多様なものとなりうる。つまり、技術者は科学的な合理性の外で、自らの意図や重視する価値の実現について思考しなければならない。こうした技術の特性ゆえに、技術者には既存の指針や規範にただ従うだけではなく、自ら考えることができることが要請されている。それゆえ、技術者倫理の授業においても、学生の時点から自ら考えることの重要性を理解し、また実際に体験することが必要となる。教員による一方的な教授は、とき

※1 なお、専攻科 2 年生向け科目「技術者倫理」も開設されている。この科目では一般教育科の教員がその授業数の複数を担当するものの、各学科の教員による輪講となっており、より各学科の専門に即したかたちで事例が扱われる。

※2 この授業形式は村瀬 2021⁴⁾をもとにしている。

※3 この点は齋藤 2019⁵⁾ (とくに 16 頁以下) に詳しい。

に「内容以前に、その形式が学生たちに受け身で他律的な態度を強いる」（村瀬 2021⁴⁾、50 頁）ことになる。それゆえ、教員による解説だけではなく、倫理的問題の内容を吟味・検討を経て理解に至る道筋を探ることを学生に求めるような授業形態が重要だといえる。

3. 授業実践に至る問題意識

前章では、技術者倫理の概要とその東京高専における実施形態を示した。そこで示したように、技術者倫理教育において取り組まれてきた課題（の一部）として、第一に、利害関係者にとどまらない倫理的考慮や社会的な公正を担保する必要性を学生が理解することであり、第二に、学生の主体的な思考を促進することを挙げることができる。

第二の点については、当然ながら技術者倫理教育のなかで当初から意識されてきた課題である。技術者倫理教育の教科書として嚆矢であり、また現在も版を重ね続けている *Enginerring Ethics: Concept and Cases* では事例を扱うことが重視されているが^{※4}、これには学生が自分ごととして考えられるという教育上の効果も期待されてのことといえる。このことは、この教科書で事例が重視されることが表明されている箇所において、既存の倫理規程が倫理上の疑問に既成の回答を与えるものではないことが言及され、また、事例が人々の想像力（「モラル想像力」、ハリスほか（2008）⁷⁾、18 頁）を刺激することが指摘されることからもうかがえる。つまり、多様な事例を見ることで、既存の解決策や防止策の適用できない事態に向き合い、自らの想像力を用いて思考することが可能になるというのである。

ただ、事例を扱うことが重要なのだとしても、それに加えてさらなる教育上の方策がないことには、技術者倫理教育の意義を十分に果たせないことがある。すなわち、利害関係者にとどまらない倫理的考慮や社会的な公正さの担保の必要性（先述の第一の点）が、学生に理解されない可能性が

あるのである。より具体的に言えば、事例に表れている問題を、技術者の責任によって考慮・解決されるべき問題として認識されないことがありうる。たとえば事故事例であれば、技術者がその事故の予防に責任があることが認められず、使用者に責任を帰すべきであるといった理解がなされる。障害者というマイノリティに関する事例であれば、マジョリティの便利さが損なわれる可能性があるという理由づけによって、障害者の移動や使用の便宜を図る人工物の導入の必要性に疑義が呈される。こうした理解や疑義においては、技術者が負うべき責任や課題が意図的に看過されたり、技術者以外の者が負うべき責任と見なされたりしている^{※5}。このようなとき、本稿冒頭で紹介したような趣旨のコメント・発言が学生から寄せられることになる。そうした学生にとって、技術者倫理は、技術者が関わる必要のない責任や課題を技術者に負わせようとしているものなのだろう。ではこのとき、倫理的な考慮や社会的な公正さの実現を自分たちの課題として引き受けることの重要性を学生が理解するには、どうすればよいのだろうか。

4. 実際の授業内容

前章末尾で述べた課題をひとつの具体的な方策として、筆者が授業の1時間分をあてているのが差別の構造や人格の尊重というテーマである。このテーマのために、具体的にはアクセシビリティに関する問題が入口となる。アクセシビリティに関しては、すでにこの授業の教科書のなかでも扱われている（黒田ほか 2012³⁾、166 頁以下参照）。それとは別にさらに1時間分をあてているのは、バリアフリーやユニバーサルデザインとして作られた人工物への注目を超えて、アクセシビリティに関わるデザインの設計思想や、さらには倫理的な理念的なところまで思考を及ぶことを学生に期

^{※4} 同書の第六版（Harris et. al. (2019) ⁶⁾ の p. 16 以下参照。また、日本語訳（ハリスほか（2008）⁷⁾）は同書第三版の翻訳であるが、こちらは18 頁以下参照。版によってその言及のしかたは異なるが、その詳細な内実の差異については、ここでは問題にしない。

^{※5} 同様の事態は上杉も指摘している。すなわち、様々な具体的な義務の根拠が説明されていない状態（上杉によればこれが「通常の技術者倫理教育」の現状である）では、学生は、提示された義務に疑義を呈し、自らの願望や傾向性に適合させようとするという。つまり、学生はカントの言う「自然的弁証論（die natürliche Dialektik）」を展開するのである。上杉はここから、カントが整理したような意味での普遍妥当的な規範の教授の重要性を指摘する。上杉 2023⁸⁾、72 頁以下、参照。Vgl. Kant 1785⁹⁾、IV 405.

待するからである。たとえば、ユニバーサルデザインの目指すこととして人間の「生活の質」や「経験の質」を高めることがあるのだが（黒田ほか 2012³⁾、166 頁以下参照）、それはたんに現状でもある程度生活や経験の質が担保されている状態からさらにそれを高めていくという意味に限られるのではない。障害者が不当にそれらの質を制限されていることがあるということを見逃してはならないのである。これは人格の尊重といったテーマにつながっていく。

では、以下にて具体的な授業実践の内容を見ていきたい。

この授業では、冒頭で以下のような文章を学生に見せている。

医師の佐藤氏は、ある大学病院に勤務する腕利きの外科医である。仕事中は常に冷静沈着で、大胆かつ慎重であり、難しい手術も手掛けると同時に、地元の市長からも厚い信頼を得ていた。その佐藤氏が夜勤をしていたある日、病院の元に緊急外来の電話がかかってきた。電話の内容は以下の通りである。少年とその父親がドライブしていたところ、父親がハンドルを誤り谷に転落。その怪我人を救急車で運び込むので、緊急手術をして欲しいとのこと。車は大破し、父親は即死、少年は重体を負ったと緊急隊員は告げた。その電話の 20 分後、重体の少年が運ばれてきた。

その少年を見て、佐藤氏は言った。「この少年は私の息子だ！」

授業では、プロジェクターでこの文章を投映し、整合的に理解できるかどうかを学生が考えたり、相談し合ったりする時間を短くとっている。学生のなかにはこれを知っている者もいるが、そうした学生には他の学生にさしあたり説明を行わないよう指示しつつ、周囲のまだ理解できていない学生に（ほどよい）ヒントを与えたりすることを勧めている。最終的に、学生に整合的な理解の説明を求めることで、この文章について考え相談する時間を終える。

この文章は、社会心理学で教材として用いられるものであり、とくに性別に関する偏見に焦点を

あてたものである^{※6}。すなわち、この文章を初めて読む一定数の者は、「佐藤氏」のことを男性だと思って読み進める。大学病院に所属する社会的地位の高い医師は男性に違いない、というバイアスがはたらいているのである。「佐藤氏」が男性でも女性でもありうるという可能性を維持して読めば、「佐藤氏」の最後の一言で混乱することはない。「佐藤氏」が即死した「父親」の妻であり、重体の「少年」の母親であるということに気づくことができるからである。

この文章を見せる意義は、読む者のうちにある偏見を自覚させるところにある。この文章の場合は性差別に焦点が当たっているが、こうしたタイプの偏見は性差別に限らない。すなわち、社会のなかで支配的な側がその支配を可能にするような構造を維持するタイプの偏見である。障害に関することでも、障害を持たない側を有利とするような社会構造が存在しているのであり、そこには同様の偏見やステレオタイプがある。これについては、このあと複数の事例で見ることになる。

続いて、いま述べた支配／被支配という点に着目するために、社会の権力構造についての解説を行う。このさい、先にマイノリティ／マジョリティという言葉を取りあげる。一般的な講義形式ではあるものの、積極的に学生に問いかけを行いつつ進めていく。

一般的な理解としては、マイノリティは少数派、マジョリティは多数派を意味するとされる。授業のさいには、学生にこれらの言葉が何を意味するのかを聞くのだが、ほぼ毎回一般的な理解と同様の返答がある。むろんそれで誤りではないのだが、この言葉を同じ属性をもつ者の人数としてのみ理解すると、差別の問題を十分に捉えきれないことがある。たとえば、日本国内における男性と女性の割合はほぼ同数だが、近年の大学医学部受験における点数操作にみられるように、女性は男性のように権利や尊厳を十分に擁護されているとはいえない。つまり、差別・被差別の関係に、二つの異なる集団の人数の多寡が必然的に作用しているわけではないのである。このことを踏まえると、マジョリティを「気づかずにいられる人」「気に

^{※6} この文章については唐沢 2023¹⁰⁾に紹介がある。授業で使用するさいは、日本に居住する者に身近に感じられるよう、登場人物の名前などを変更している。

しないでいられる人」、マイノリティを「気にせざるをえない人」「気にしないといけない人」として捉える見方が説得的だろう^{※7}。この見方では、人数の多寡よりも、個々の人が社会のなかで直面する問題の数に焦点が当たっている。医学部受験を例にあげれば、男性の志望者は自分の勉強に集中していればよいのだが、女性の志望者は勉強に加えて自分の点数を不当に切り下げられることへの危惧にも苛まれるかもしれない、ということになる。こうした事例は、じつはわれわれの身の回りに数多く存在している。身近なところとして、学生には、東京高専の授業教室から最寄り駅（京王高尾線狭間駅）までのルートを思い浮かべてみるように求めている。キャンパスが丘陵地の斜面に所在することを踏まえたとしても、校舎の出入口の段差、キャンパスの内外を行き来する通路にある大きな車止め、狭く凹凸の多い歩道など、移動制約者が「気にする」——もはや「気にする」という言葉では表せないほどであろう——ことを強いられる場所が多くある。

では、なぜマジョリティは「気にしない」ですむのか。マイノリティ／マジョリティ概念の理解を経ると、このような問いを通じて「気にしない」にひそむマジョリティの特権に焦点を当てることができる。ここでもまた、学生に具体的な例を想定することを促す。今年度の授業で紹介している事例としては、電気自動車やハイブリッド車の疑似走行音に関する報道がある^{※8}。この種の自動車は走行音が静かであるため、あえて疑似的な音を出している。ただ、この疑似音がメーカーごとに異なるために、視覚障害者がどの音が走行音かわからず、接触事故の危険があるというのである。この事例から明らかなのは、技術に関わる進歩が、ある特定の属性を持つ人に不利に働くことがあるということである。この事例で言えば、視覚を持つ者というマジョリティの基準で自動車の開発が進み、視覚障害者が置き去りにされてしまっている。技術革新による新たな人工物の出現とそれに伴う社会の変化はマジョリティを基準に行わ

れ、マイノリティが置き去りにされる^{※9}。社会は、基本的にマジョリティの支配のもとで変革や維持がなされる。つまり、マジョリティは社会的な特権を持っているのである。これが、マジョリティが「気にしない」ですむ理由なのである。

こうしたマジョリティの「気にしない」の内実に言及したうえで、以下のポイントを指摘している。第一に、これは障害者に関わるにかぎらないが、差別は悪意がなくとも行われうるということである。マジョリティが「気にしない」でいることで、社会内でマジョリティを基準とした制度や設備は維持され続ける。とくに悪意がなくともマジョリティを基準とした社会であり続けることで、そのなかでは差別が生じ続けることになる^{※10}。差別の広がりを防ぐのならば、こうした悪意のない差別にも意識的でなければならない。また第二のポイントとして、障害は社会的なものでもある、という点を指摘している。すなわち、障害者の生きづらさの原因をその人の医学的な欠損に求めるのではなく「健常者仕様で社会ができていて、多様な心身をもつ人たちのニーズを置き去りにしてきてしまったこと」（松波 2024¹⁷），101頁）にあると捉えるのである。前者は障害の医学モデル、後者は社会モデルと呼ばれている。後者は、社会内の制度や設備がマジョリティを基準に形成されてきたことを前提とした捉え方である。

ここまでのことを踏まえると、冒頭の「佐藤氏」についての文章を提示した意義を以下のように指摘できる。すなわち、「佐藤氏」を男性だとする思いこみによって暴露されたのは、男女間の特権上の不均衡を当然のものとしている我々の偏りである。こうした偏りによって、その不均衡は維持・強化され、不均衡の解消を遠ざける。なお、こうした意義を述べたさいに以下のことも付け加えている。たしかに、我々はそうした偏りのある社会に生まれてきたのであり、この偏りを持っていることは仕方のないことだと言える。この意味で、学生が個人で負い目や疚しさを抱え込む必要

※7 ケイン 2019¹¹参照。また、ケインほか 2019¹²（とくに 135 頁）も参照。

※8 東京新聞 2025a¹³参照。これについては後日のアンケートによって業界団体やメーカー側も問題として把握していると報道されている。東京新聞 2025b¹⁴参照。

※9 同様の事例としては、店舗のセルフレジ導入において、レジに設置されたタッチパネルの操作に視覚障害者が苦慮するというものもある。時事通信 2025¹⁵参照。

※10 社会的に特権を持つ集団が、その社会において「正常」と見なされることがある。このことは、たとえばアメリカにおける人種間の特権の有無を見るなかで明らかになってきた。グッドマン 2017¹⁶，17 頁参照。

はない。

授業では、さらにマイノリティが権利を担保されていないことへの具体的な対応策の事例にも触れていく。これまで見てきた問題への一応の解決方法を見よう、というわけである。紹介する事例は、駅のエレベーター周辺にある掲示である。近年、多くの駅で、障害者・高齢者・ベビーカーの利用者などの移動制約者がエレベーターを優先的に利用できるように要請するポスターを見ることができ。また、一部の駅では、エレベーター前にそうした移動制約者の並ぶ「優先レーン」を設けていることもある。たとえば、東京都内の地下鉄（東京メトロ）における取り組みが挙げられる（東京地下鉄 2025¹⁸⁾、参照）。これは一見すると、移動制約者にほかの人々よりも「優先的に」エレベーターを使用することを可能にする取り組みである。ただ、エレベーター前で移動制約者が優先される場所だけを見るのではなく、移動制約者の移動全体を見ると、これがたんに「優先」ではないことがわかる。というのも、移動制約者は、そうでない人々よりも移動に多くの時間がかかるからである。プラットホームに繋がる階段が複数あるのに対して、エレベーターはひとつしかないということや、（とくに車いすの場合）階の間を移動するために長時間待たされることもある（川内 2021¹⁹⁾、13 頁以下参照）。つまり、移動制約者のエレベーターの優先的使用は、こうした不均衡をその場にいる人々の対応で軽減しようという策なのである。「優先」というよりはむしろ「調整」と言ったほうが適切だとも言えよう。

ユニバーサルデザインやバリアフリーの設備も、マジョリティ／マイノリティの不均衡の解消を目指すものとも言える。全ての人と同じように施設や人工物を使用できるようにするためのものだからである。しかも、ただ使用できるだけでなく、自らの意志決定に沿って（時間帯による使用の制限などがなく）使用できることが求められている。この点を踏まえると、ユニバーサルデザインやバリアフリーは、社会的な不公正を正すものとも言える。すなわち取り組まれて当然のもの、取り組むべきものだというわけである。移動制約者への対応は、とかく日本国内においては、思いやりややさしさによって行われるものであるかのようにみなされがちだが、そうではない。健常者による

いわば温情によって、障害者が社会に参加させてもらっているわけではないのである^{*11)}。むしろ、社会のなかで人々が取り組むべき義務だと言えるだろう。そして、ここに技術者の果たすべき役割がある。というのも、人工物によって物理的な環境が整備されれば、人々がその場でアドリブ的に行う配慮や調整の必要性が低くなっていくからである（川内 2021¹⁹⁾、52 頁以下参照）。

このようにこの授業では、アクセシビリティを中心に、それにとどまらず多くの事例を引き合いに出しながら差別の構造について解説をする。そのうえで最後に強調するのは、以下の点である。すなわち、ここまでで学んだことは、技術者が人工物を制作するさいに考慮すべきことのひとつである。それは決して、技術的な営みの抑制を目的としたものではない。むしろ、この考慮すべきことに基づき思考し、開発に取り組むことで、その人工物は社会に存在してよいものとなる。というのも、人格の尊重という普遍的な価値に適ったものとなるからである。結局のところ、こうした倫理的な知識は、自分のつくったものがこの世界にあってよいものとなるための知なのである。

5. 学生の反応

この授業では、差別や特権性といった概念を具体的な事例を多く交えながら解説することで、学生にこれらの問題を自分ごととして捉えることを要請している。それゆえ、学生にとってこの授業は、ときに自分が特権的な立場にあると指摘される時間であったり、それに気づく時間であったりする。これが“わからないことがわかった”“知らないことを知ることができた”という知的な快さを引き起こすこともあるようだが、抵抗感や不快感を持つことも多いようである。というのも、一般に、差別やそれに伴う排除や抑圧を行うのは「悪いやつ」であり、自分達はそれにあたらないと思う者が多いからである^{*12)}。このとき、そう

^{*11)} 日本国内において、アクセシビリティに関していまだに思いやりやさしさの前面に出されている現状については、川内 2021¹⁹⁾による指摘と批判がある（とくに 16 頁以下ないし 23 頁以下）。また、思いやりやさしさのほらむ問題については、同書のとくに 38 頁に詳しい。

^{*12)} こうしたことは、マジョリティを対象とした社会的公正教育の現場ではよく見られる反応であるという。グッドマン 2017¹⁶⁾、42 頁参照。

した不快感をやわらげるケアに集中する必要はないだろう。この不快感こそが、自らの立場を認識できている証左であり、自らの現状認識を再考する機会だからである（グッドマン 2017¹⁶）、53 頁参照）。だが、だからといって、そうした不快感から生じる反発を指弾・叱責したり、裁いたりするのは得策ではない。あくまでこれは授業であり、学生がその場にマイノリティに対して差別的な言動をしたというわけではない。学生が技術者として人工物の開発に取り組む段になって、そうした差別に加担しないようにすることが目的なのである。たとえば「佐藤氏」についての文章について解説したさい、「佐藤氏」が男性であると思ひこむことは仕方の無いことであり、学生が個人で負目や疚しさを抱え込む必要はない、と学生に伝えていることを示した。こうすることで、個人を責めないようにしながら、社会の構造が人々に差別をさせる場合があるということを強調している。これは、人工物に関わる差別の問題を学習するさいにその妨げとなりうる反発への対応となっている（グッドマン 2017¹⁶）、98 頁参照）。

この授業の最終盤には、学生にリアクションペーパーを書かせている。学生の理解度や受け止め方を確認するためである。そこに書かれた反応には上記のような対応が必要なコメントもあれば、学習したことの新鮮さを表現したものもある。後者にあたるものとして多いタイプは、マイノリティへの配慮の理路を理解できたというものである。そうした配慮がなされるべきであると思っけていても、なぜなされねばならないかという理由を知らなかったという学生もいるが、そうした配慮への違和感がなくなった旨の記述もある。また、リアクションペーパーのほとんどが、自分の身の回りのことや経験を踏まえた記述である。たとえば、自分自身がマイノリティである（マイノリティあるときがあった）ことを踏まえながら、授業で紹介した概念を用いながら振り返るものがあったり、マジョリティとしての自分がマイノリティと言える人に関わったさいのことに言及するものがあったりする。こうした記述は、技術に関する差別の問題を自分ごととして捉えることのできた証左であろう。

なお、リアクションペーパーの主だったものには、次回の授業の冒頭でコメントを行っている。

学生の理解に修正を行う必要がある場合や、さらなる理解を促すことができる場合があるからである。そのさいには、学生の挙げた状況や表現・言葉づかいに基づきながら応答していくことが重要であろう。それによって、授業で扱われた概念や理論を学生の経験や視点、表現により整合的なものへと翻訳していくことができる。

6. 問題意識への応答

こうした授業実践は、本稿第 5 章で示したような問題意識があったからであった。すなわち、事例紹介にとどまらない授業を行うことで、社会的な公正への考慮の重要性を学生が理解する必要がある、ということである。この授業実践のなかでは、複数の事例を、できるかぎり近年のものを選んで紹介してきた。だが、この事例は、社会全体の構造としての差別の問題と社会的な構成の問題の文脈で、それに包括されるかたちで扱われたものである。このように、より抽象度の高いトピックと明確に結びつけて事例を紹介することで、社会的な公正への着目を誘導することができた。

ただし、こうした授業実践は、社会的な公正・差別という特定のトピックへの着目に資するのみではない。なぜなら、このトピックそのものが、人格の尊重の具体的事例であると言うことができるからである。実際にこのトピックを扱うなかで、差別の成立しない（少なくとも成立を助長しない）人工物の開発によって擁護・尊重されるものとして人格を挙げることができた^{※13}。なお、この点への着目を学生がより深く理解するためには、倫理的な規範の普遍妥当性についてあらかじめ学生が知っている状態が望ましいだろう。筆者の担当する授業では、授業回の序盤で義務論について言及する回を設けている^{※14}。また東京高専では、本科 1 年の高校倫理科目を包括する授業のなかで、一度は義務論についての基本的な知識を学習している。このように、他の授業回や他科目との連携

※13 差別がなぜ悪いのかという点について、近年哲学的に議論がなされている。これに深入りすることはかなわないが、本稿の授業実践では、人格への尊重のないことを差別の問題としつつ、多岐にわたる（多元的な）理由から差別が悪いものとされるとしている。池田ほか 2021²⁰、91 頁以下参照。

※14 この授業では、カントの道徳的法則に適用格率のための定式に言及している。Vgl. Kant 1785⁹, IV 421.

が、技術者倫理という倫理学における応用的科目にも意味を持つ。

7. おわりに

本稿では、東京高専で筆者が実施している授業を紹介した。差別や排除は技術／技術業によっても生じうるものだというところを、実際の事例を引きながら提示し、最終的に人格の尊重について言及するものであった。こうした具体的な事例と抽象度の高い理論の結合を試みるさいには、社会心理学や社会学における差別に関する研究の援用が有効なすべであった。そして、この結合によって、学生に倫理学を自分ごととして捉えることの重要性を理解するよう求めた。すなわち、技術者倫理は技術の発展を妨げるものではない。技術者倫理の学習を通じて得られた視点や知識は、普遍妥当的な価値に適う人工物の開発を助ける。つまり、倫理は人工物をこの世界に存在してよいものとするために必要なのである。

なお、繰り返しになるが、倫理においては自分ごととして考えることが重要である。すなわち、既存の規範に依存することは、倫理的な態度としては限界があるということである。それゆえ、具体的な事例と抽象的な事柄を行き来しながら、自分で考えることが肝要なのである。本稿で紹介した授業実践でもこの点を意識したが、この点については哲学対話の手法を用いた授業設計も有効であろう^{*15}。これについては稿を改めて報告したい。

参考文献

- Franssen, M.; G-J. Lockhorst; I. v. d. Poel: *Philosophy of Technology*, in: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2023, URL: <https://plato.stanford.edu/entries/technology/> (accessed: December 22, 2025).
- ハリス, C. E. Jr.; M. S. プリチャード; M. J. ラビンス; C. ディディエ; B. H. デュブルユ; J. A. Lynch (trans.); 小出泰士 (訳): 技術者倫理, 科学・技術・倫理百科事典, 科学・技術・倫理百科事典翻訳編集委員会 (監訳), 丸善出版, 2012 年, 523-533 頁。
- 黒田光太郎, 戸田山和久, 伊勢田哲治 (編著): 誇り高い技術者になろう, 第二版, 名古屋大学出版会, 2012 年。
- 村瀬智之: 学生の主体的活動を軸とした技術者倫理教育の試み, 工学教育, 第 69 巻第 5 号, 日本工学教育協会, 49-54 頁, 2021 年。
- 齋藤了文: 事故の哲学 ソーシャル・アクシデントと技術者倫理, 講談社選書メチエ, 2019 年。
- Harris E. C. Jr.; M. S. Pritchard; R. W. James, P. E.; E. E. Englehardt; M. J. Rabins, *Engineering Ethics: Concept and Cases*, 6th Edition, Cengage, 2019.
- ハリス, C. E. Jr.; M. S. プリチャード; M. J. ラビンス (著), 社団法人日本技術士会 (訳編); 第 3 版 科学技術者の倫理: その考え方と事例, 丸善株式会社, 平成 20 (2008) 年。
- 上杉敬子: カントと学ぶ技術者倫理 (共同討議 II——初学者向け哲学講義をデザインする), 日本カント研究第 24 号, 日本カント協会編, 2023 年, 70-77 頁。
- Kant, Immanuel: *Grundlegung zur Metaphysik der Sitten*. Kraft, B.; D. Schönecker (Hrsgs), Felix Meiner Verlag, 2016 (Original: 1785. 引用のさいは慣例に従いアカデミー版の巻数 (ローマ数字) + ページ数を示した).
- 唐沢かおり: 高校生に伝えたい 偏見の心理学, 心理ワールド, 第 101 号, 2023 年, 42-43 頁。
- ケイン樹里安: マジョリティとは「気にせずにする人々」——#ふれる社会学 のイベントから (ブログ記事), URL: <https://note.com/julinote/n/n1e83b80755cc> (参照日: 2025 年 12 月 22 日)。
- ケイン樹里安; 上原健太郎: ふれる社会学, 北樹出版, 2019 年。
- 東京新聞 a: EV, ハイブリッド, 電動キックボード…「走る音」に困っています 音を頼りに街を歩く人たちが「恐怖」の訴え, 2025 年 6 月 9 日, URL: <https://www.tokyo-np.co.jp/article/410019> (参照日: 2025

^{*15} (技術者倫理の科目内に限らず) 哲学対話を技術者教育の一環として行うことの意義については、たとえば小川ほか^{2024²¹⁾}などの議論がある。

年12月22日)。

- 14) 東京新聞 b：視覚障害者が求める「EV・HVの接近音の統一」 自動車業界はどうこたえるか アンケートで見た現在地, 2025年7月27日, URL : <https://www.tokyo-np.co.jp/article/424074> (参照日 : 2025年12月22日)。
- 15) 時事通信 (社会部)：視覚障害者, タッチパネルに困惑 広がるセルフレジ, 障壁多く—当事者団体「環境整備も進めて」, 2025年4月29日, URL : <https://www.jiji.com/jc/article?k=2025042800590&g=soc> (参照日 : 2025年12月22日)。
- 16) グッドマン, D. J. (著); 出口真紀子 (訳)：真のダイバーシティをめざして：特権に無自覚なマジョリティのための社会的公正教育, 上智大学出版, 2017年。
- 17) 松波めぐみ：「社会モデルで考える」ためのレッスン：障害者差別解消法と合理的配慮の理解と活用のために, 生活書院, 2024年。
- 18) 東京地下鉄株式会社：エレベーター優先利用について, 2025年4月14日, URL : https://www.tokyometro.jp/info/files/250414_info_ev.pdf (参照日 : 2025年12月22日)。
- 19) 川内美彦：尊厳なきバリアフリー：「心, やさしさ, 思いやり」に異議あり!, 現代書館, 2021年。
- 20) 池田喬・堀田義太郎：差別の哲学入門 (シリーズ・思考の道先案内1), アルパカ, 2021年。
- 21) 小川泰治・岩内章太郎：技術者教育における哲学対話の実践：「ネガティブ・ケイパビリティ」に注目して, 工学教育 (第72巻第4号), 公益社団法人日本工学教育協会, 2024年, 13-19頁。

(2025年12月22日 受理)

ナット駆動型ボールねじ位置決め機構の基礎的研究

堤博貴*

従来の軸回転型ボールねじは、ねじ軸の弾性変形や伝達経路の長さ起因して応答性が制限されることが課題であった。本研究では、これに対する解決策として、中空 DD モータによるナット直接駆動を採用した「ナット直接駆動型超精密位置決めステージ」を開発した。これにより、力点と作用点の距離を短縮し、系の剛性と応答性を高めた。理論解析の結果、機械固有振動数が従来構造比で約 1.5 倍に向上することを確認した。実機実験では、位置比例ゲイン 500,000 mrad/s という高ゲイン条件下でも安定応答を示し、約 3.9 nm の最小可動ステップに対して追従性を確認した。これにより、ナノメートル領域での高精度位置決めにおける本機構の可能性を実証した。

(キーワード: ボールねじ, DD モータ, フィードバック制御, 位置決め, 工作機械)

Fundamental Study on a Nut-Driven Ball Screw Positioning Mechanism

Hirota TSUTSUMI*

Conventional shaft-driven ball screws suffer from reduced stiffness and response delay inherent to "two-mass systems." This study developed a "Nut Direct Drive Ultra-Precision Positioning Stage" using a hollow DD motor to coaxially drive the nut, thereby greatly reducing compliance and allowing the system to be approximated as an effective single-mass system within the control bandwidth. Theoretical analysis indicated a 1.5-fold improvement in natural frequency compared to conventional types. Performance experiments demonstrated stable step response without overshoot even at an extremely high gain of 500,000 mrad/s. Furthermore, precise tracking was confirmed at approximately 3.9 nm, validating the mechanism's effectiveness for ultra-precision positioning toward the nanometer range.

(Keywords: Ball screw, DD motor, Feedback control, Positioning, Machine tool)

1. 緒言

1.1. 研究の背景と精密位置決め動向

近年、半導体製造ラインや電子部品の実装工程、光学機器の精密組立分野においては、製造スループットの向上と微細化への対応が急務となっている。このような装置には、ナノメートルオーダーの超精密な位置決め精度に加え、タクトタイム短縮のための高速駆動、さらにはクリーンルーム内での有効面積を最小限に抑えるための装置の小型化・省スペース化が強く求められている^{1~3)}。

このような直線運動機構の駆動源として、従来よりボールねじを用いた位置決めステージが広く利用されている^{4,5)}。ボールねじは、高い剛性と推力伝達効率を有し、信頼性の高い要素技術として確立されているためである^{6~11)}。一般的に、ボールねじ駆動ステージは、サーボモータがカップリングを介してねじ軸を回転させ、その回転運動をナットの直動運動に変換する「従来型(以下、「軸回転型」と呼称する。)」の構成をとる。

1.2. 軸回転型ボールねじ機構の課題

しかしながら、近年の要求仕様の高度化に伴い、軸回転型ボールねじ機構には構造的な限界が指摘されている。

第一に、長ストローク化に伴う危険速度と振動の問題である。ねじ軸を回転させる構造上、軸が長くなると自重によるたわみや偏心による遠心力が増大し、危険速度が低下するため、高速駆動が制限される^{8,12)}。

第二に、応答性の低下である。軸回転型では、駆動源であるサーボモータと作用点であるナットとの距離がストロークに応じて変化する。特に長尺のねじ軸においては、サーボモータのトルクがナットに伝達されるまでにねじり変形が生じ、これが制御帯域の向上を妨げ、整定時間の遅延を招く要因となる^{5,11)}。

第三に、慣性モーメントの影響である。ねじ軸全体が回転体となるため、軸径や長さが増すと回

* 機械工学科

転慣性が著しく増大する。これは加減速時のトルク損失につながり、俊敏な動作を阻害する^{4,6)}。また、高速駆動に伴う発熱がねじ軸の熱膨張を引き起こし、位置決め精度の低下を招くことも知られており^{14,15)}、これらが本研究が対象とする課題である。

1.3. ナット駆動方式の動向と本手法の新規性

これらの課題を解決する手段として、ねじ軸を固定しナットを回転させて推力を得る「ナット駆動型」が提案されている^{16~19)}。この方式は、ねじ軸が回転しないため危険速度の影響を受けず、長ストローク化に適している^{16,17)}。

産業界においては、例えば中空モータにボールねじスプラインを組み合わせたコンパクトなアクチュエータを開発しており¹⁷⁾、長ストローク用途向けに開発された製品も存在する¹⁸⁾。

また学術的にも、Wang らが中空サーボモータを用いたナット直動システムの動的モデリングを行い、軸回転型と比較して動的剛性が向上することを示している¹⁹⁾。しかし、従来の一般的なナット駆動機構においては、サーボモータの配置の自由度やコストの観点から、サーボモータをねじ軸と平行に配置し、タイミングベルト等を介してナットを回転させる「オフセット駆動方式」が採用される事例¹⁶⁾も多い。この方式では、ベルトの弾性変形が制御帯域の向上を阻害するほか、ベルト張力がねじ軸に対して常に横方向の偏荷重を与え、微細な運動精度を悪化させる要因となりえる。

これに対し、減速機やベルトを介さずに中空モータで負荷を直接駆動するダイレクトドライブ (DD) 方式^{20~22)}をナット駆動に適用すれば、機械的なバックラッシュとコンプライアンスを減らすことができると考えられる。すなわち、中空 DD モータのロータと同軸上にナットを直結することで、推力伝達ロスや偏荷重のない理想的な直動機構が実現可能となる^{18,19)}。

1.4. 本研究の目的

本研究では、DD モータによる同軸直結構造の優位性に着目し、小型・軽量な中空 DD モータを採用することで可動部質量の増大を抑えた「ナット直接駆動型超精密位置決めステージ」を設計・製作する (図 1)。これまでシミュレーションや搬送用途が主であったナット駆動方式に対し、本研究では「中空 DD モータ直結による完全な直動シ

ステム」としての実機を構築し、軸回転型と同一条件下での定量的な性能比較を行う点に特徴がある。具体的には、剛性や応答性の理論的優位性を検証するとともに、ナノメートルオーダーの微小位置決め領域における摩擦特性^{23~25)}やステップ応答を実測し、本方式が超精密位置決めに適用可能なプラットフォームであることを実証することを目的とする。

2. ナット駆動型の特徴と理論比較

2.1. 機構構成の比較

本研究で開発したナット直接駆動型超精密位置決めステージ (以下、「ナット駆動型」と呼称する。) と、一般的なモータ軸回転型ステージの機構構成の比較を 図 1 に示す。軸回転型 (図 1(a)) は、固定されたサーボモータがカップリングを介してねじ軸を回転させ、ナットを通じてテーブルを駆動する。この場合、ねじ軸の全長がトルク伝達経路となる。ねじ軸は細長い弾性体であるため、トルク負荷時にねじり変形が生じやすく、これが駆動系全体の剛性を低下させる主要因となる^{4,6)}。一方、提案するナット駆動型 (図 1(b)(c)) は、ねじ軸の両端を固定し、中空 DD モータのロータにナットを同軸上で直結して駆動する。トルクは中空 DD モータからナットへ直接伝達されるため、伝達経路に介在する弾性要素が構造的に排除される^{13,16)}。

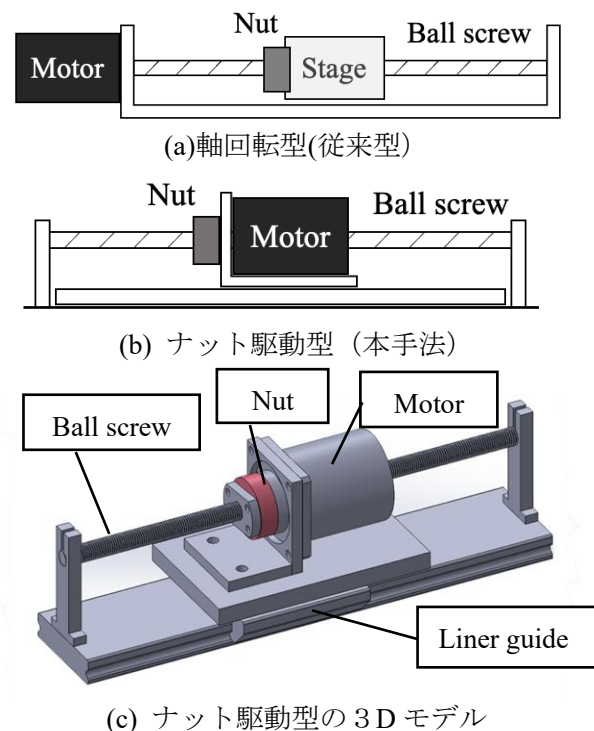


図 1 機構構成とトルク伝達経路の比較

2.2. 制御モデルによる考察 (1 慣性系と 2 慣性系モデルの比較)

2.2.1 2 慣性系モデル (軸回転型)

ボールねじ位置決め機構の制御モデルは、機構の構造に応じて「2 慣性系モデル」と「1 慣性系モデル」に大別される (図 2)。本節では、それぞれのモデルの運動方程式と物理的意味、および各パラメータの定義を明確にする。なお、ここでは、制御帯域 100 Hz 以下を対象とした。

2 慣性系モデルは、モータ側慣性 J_M と負荷側慣性 J_L が、有限のねじり剛性 K_θ と減衰 C_θ により接続されたモデルである。軸回転型ボールねじ機構に対する運動方程式は次式で表される。

$$J_M \ddot{\theta}_M + B_M \dot{\theta}_M + C_\theta (\dot{\theta}_M - \dot{\theta}_L) + K_\theta (\theta_M - \theta_L) = T_M \quad (1)$$

$$J_L \ddot{\theta}_L + B_L \dot{\theta}_L + C_\theta (\dot{\theta}_L - \dot{\theta}_M) + K_\theta (\theta_L - \theta_M) = -T_L \quad (2)$$

ここで、

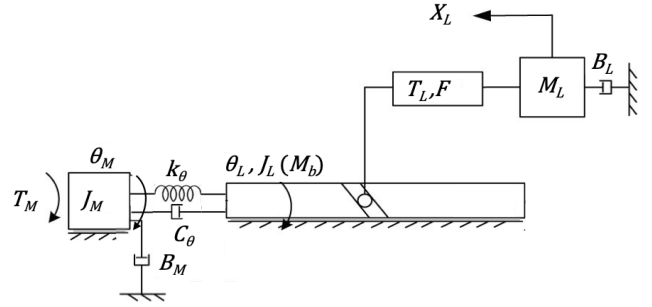
- J_M : モータ側慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
- J_L : 負荷側慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
- B_M : モータ側粘性係数 ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$)
- B_L : 負荷側粘性係数 ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$)
- C_θ : ねじり減衰係数 ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$)
- K_θ : ねじり剛性 ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$)
- θ_M : モータ側回転角 (rad)
- θ_L : 負荷側回転角 (rad)
- T_M : モータトルク ($\text{N}\cdot\text{m}$)
- T_L : 負荷トルク ($\text{N}\cdot\text{m}$, 摩擦や外乱トルクを等価的に表したもの)

である。ねじ軸のねじりバネ K_θ と慣性 J_M, J_L により決まるねじり共振角周波数 ω_c は、粘性項と負荷トルクを無視すると次式で与えられる。

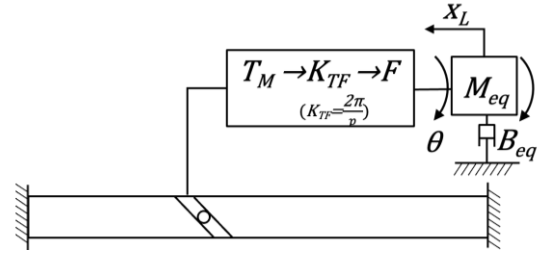
$$\omega_c = \sqrt{K_\theta \left(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L} \right)} \quad (3)$$

この系では、モータが回転しても負荷が動き出すまでにねじ軸のねじり変形に要する時間が存在し、位相遅れとして現れる。また、慣性比とばね定数で決まる特定の共振周波数 ω_c において機械共振が発生しやすい。この共振特性は、サーボ制御における位置比例ゲイン K_p の上限を制限し、

応答帯域のボトルネックとなる。



(a) 軸回転型 (2 慣性系モデル)



(b) ナット駆動型 (1 慣性系モデル)

図 2 制御モデルの概念比較

2.2.2 1 慣性系モデル (ナット駆動型)

1 慣性系モデル (図 2(b)) は、中空 DD モータと負荷 (ナット・テーブル) を一体の剛体として扱うモデルである。このとき、系の全慣性 J は次式で与えられる^{26,27)}。

$$J = J_M + J_L \quad (4)$$

ここで、

- J : 系の全慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
- J_M : モータ側慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
- J_L : 負荷側慣性モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

である。

本研究で対象とするナット駆動型では、中空 DD モータのロータとナットが同軸上で剛結されており、ねじ軸は両端固定で回転しない構造となっている。このとき、結合部のねじり剛性 K_θ は制御帯域内では十分大きいとみなすことができ、ねじ軸のねじり変形に起因する相対変位は無視できる。すなわち、中空 DD モータと負荷は一体となって回転する「1 慣性系」として近似する。

このときの運動方程式は、等価粘性係数 B を用いると次式で表される。

$$J \ddot{\theta} + B \dot{\theta} = T_M - T_L \quad (5)$$

ここで、

- θ : モータおよび負荷の共通回転角 (rad)
- B : 系全体の等価粘性係数 (N・m/s/rad)

である。本稿における「1 慣性系」とは、軸回転型において問題となるねじ軸ねじりモードに起因する低周波共振を設計帯域内では影響を無視するという意味である。なお、リニアガイドやベース構造の高次振動モードまでを完全に無視するものではない。

2.3. 理論性能の数値比較

本研究で開発した実験機のパラメータ (ねじ軸径 ϕ 8 mm, リード 1 mm, 有効ストローク 225 mm) に基づき、軸回転型とナット駆動型の物理特性を算出した結果を表 1 に示す。

2.3.1 剛性と固有振動数の向上

トルク伝達経路の短縮により、定格トルク負荷時の円周方向たわみ量 δ (剛性の逆数を表す指標) は、軸回転型の 0.0064 mm に対し、ナット駆動型では 0.0032 mm と約 50% に低減される。また、回転系の等価質量 M_{eq} は、ねじ軸の回転慣性が除外されるため、軸回転型 (9.02 kg) に対し約 12% 減の 7.90 kg に軽量化される。

これらの剛性 K の増加と等価質量 M_{eq} の減少から、応答性の物理的限界を示す機械固有振動数 f_n は次式の関係で表される。

$$f_n \propto \sqrt{\frac{K}{M_{eq}}} \quad (6)$$

試算の結果、ナット駆動型の固有振動数は軸回転型の約 1.51 倍に向上する。これは、構造的な応答遅れ要素 (時定数) が約 2/3 に短縮されることを意味する。

2.3.2 最大加速度の向上

等価質量の低減により、同一モータトルクにおける理論上の最大加速度 α_{max} は、28.8 m/s² から 32.9 m/s² へと約 14% 向上し、より俊敏な加減速動作が可能となる。

2.4. 制御系設計とパラメータ設定

本システムでは、1 慣性系の特性を最大限に活かすため、位置・速度・電流の 3 重カスケード制御を採用した。制御ブロック線図を図 3 に示す。位置制御ループには比例 (P) 制御を、速度および電流ループには比例積分 (PI) 制御を用いている。フィードバック信号はモータ内蔵の光学式エンコーダ (分解能 1,296,000 pulse/rev) から取得し、セミクローズドループを構成している。

前述の通り、本機構は機械的剛性が高く共振の影響が少ないため、軸回転型では発振に至るような高いサーボゲインを設定することが可能である。本研究で設計・設定した主要な制御ゲインを表 3 に示す。特に位置比例ゲイン $K_{pp} = 5.0 \times 10^5$ (位置誤差 [rad] に対する速度指令 [rad/s] の比例ゲイン) という高い値に設定されており、これが次章の実験における高応答・高剛性を実現する根拠となっている。なお、ゲインを上げると速度超過になりえたので、この数値に定めた。

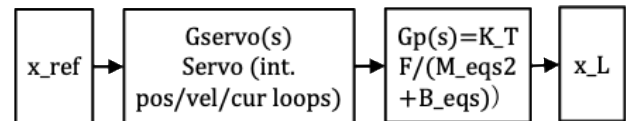


図 3 制御系のブロック線図

表 1 軸回転型とナット駆動型の運動性能に関する理論数値比較

Item	Conventional (Shaft-driven)	Nut-driven (Proposed)	Improvement	Equation / Basis (Plain Text)	Note
Equivalent Mass M_{eq}	9.02kg	7.90 kg	12 %	$M_{eq} = 4\pi^2 (J_M + J_L) / p^2$	Reduction
Max Acceleration α_{max}	28.8m/s ²	32.9 m/s ²	14 %	$\alpha_{max} = F / M_{eq}, F = 2\pi\eta T / p$	Improvement
Torsion angle at Max torque [deg]	0.0922	0.0461	50 %	$\theta = T L' / (G J p), L' = L/2 \text{ or } L$	Reduction
Circumferential Deflection δ	0.0064 mm	0.0032 mm	50 %	$J p = \pi d^4 / 32$	Reduction
Natural Frequency Ratio f_n	1.0 (Baseline)	1.51	1.51	$\delta = \theta \cdot (d / 2)$	Times Higher
Control Model Structure	2-Mass System	1-Mass System		$\sqrt{(K/M_{eq})}$	Stable at High Gain

3. システム構成と実験方法

3.1. 実験装置の構成

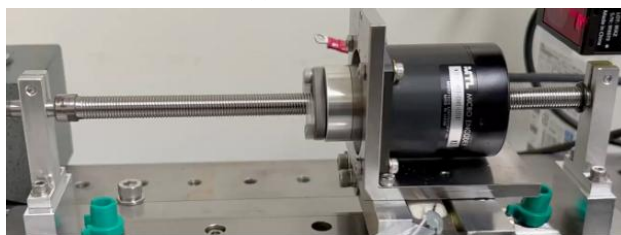
本研究で設計・開発したナット駆動型位置決めステージの外観を図4に示す。本装置は、ベースプレート上に固定されたボールねじ軸（軸径φ8 mm，リード1 mm，精度等級C3）と，これに直結された中空DDモータ（マイクロ・テックラボラトリー製 MDH-4018），および可動テーブルを支持するリニアガイドで構成される。

本装置の最大の特徴は，ねじ軸の両端が支持ユニットにより強固に固定されている点である。中空DDモータのロータ内径（φ12 mm）にはボールねじナットが挿入され，フランジを介して剛結されている。これにより，中空DDモータの回転力が機械的な遊び（バックラッシュ）を減少させて，直接推力へと変換される構造となっている。

使用した中空DDモータの主な仕様を表2に示す。エンコーダ分解能は1,296,000 pulse/rev（4 週倍時）であり，リード1 mm のボールねじと組み合わせることで，理論上の最小分解能は $1/1,296,000 \text{ mm} \approx 0.77 \text{ nm}$ に達する。



(a)軸回転型



(b) ナット駆動型

図4 開発したナット直接駆動型超精密位置決めステージの実験装置構成

表2 使用した中空DDモータの主要仕様²²⁾

Parameter	Value
Rated Torque	0.28 N·m
Max Speed	450 rpm
Encoder Resolution	1,296,000 pulse/rev
Rotor Inertia	$7.94 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Hollow Shaft Diameter	φ 12 mm

3.2. 制御システム

位置決め制御系は，中空DDモータ内蔵の光学式エンコーダを用いたセミクローズドループ制御を採用した。制御器にはPCを用い，モータドライバに対して指令値を与える構成とした。軸回転型との厳密な比較を行うため，制御則には基本的な比例（P）制御またはPI制御を用い，可能な限り同一のゲイン設定にて特性の差異を抽出する方針とした。具体的な制御パラメータの一例として，位置比例ゲイン，速度積分ゲイン等を調整し，発振しない範囲で高い応答性が得られるようにチューニングを行った。実験に使用した制御パラメータを表3に示す。

表3 実験に使用した制御パラメータ

Parameter		Symbol	Value	Unit
Loop	Gain			
Position	Proportional	K _{pp}	500,000	mrad/s
	Integral	K _{pi}	10,036	mrad/s
Speed	Proportional	K _{vp}	121	mA/(rad/s)
	Integral	K _{vi}	10,036	mA/rad
Current	Proportional	K _{cp}	2,088	mV/A
	Integral	K _{ci}	2,849,574	mV/(A·s)

3.3. 計測システムと評価方法

ステージの変位および挙動をナノメートルオーダーで評価するため，以下の計測機器を使用した。

① 変位測定

- ・ 静電容量型変位センサ：本研究では，ナノメートル応答の測定時には静電容量型センサのレンジを±5 μm に設定し，分解能 0.3 nm でサンプリングし，微小ステップ応答や整定時の振動を測定した。
- ・ レーザー変位計：ストローク全域（約 20cm）のマクロな挙動測定に使用した。

② 摩擦力測定

- ・ ロードセル：可動テーブルと固定壁の間に配置し，駆動時に発生する推力および摩擦力をダイレクトに測定した（定格容量 1.00 N，16bit A/D 変換）。

3.4. 実験条件

本研究では，第2章で述べた理論的優位性（高剛性・1慣性系特性）を実証するため，以下の4種類の実験を行った。

- ① ステップ応答特性：数 μm 程度のステップ指令を与え、立ち上がり時間、オーバーシュートの有無、整定時間を測定する。これにより制御系のダンピング特性と応答遅れを評価する。
- ② 長ストローク摩擦特性：ストローク 77mm の範囲を低速で往復駆動させ、位置による摩擦力の変動（うねり）や、往路・復路での対称性を評価する。これは機構の組立精度や芯出しの良否を確認する指標となる。
- ③ 微小ストロークヒステリシス：変位幅 $4\mu\text{m}$ の微小往復運動を行い、変位と駆動力のヒステリシスループ（摩擦ループ）を描画する。これにより、象限突起（スティックスリップ）や非線形摩擦の影響を調査する。
- ④ ナノメートルオーダー応答：本システムの限界性能を確認するため、エンコーダの 5 パルス分に相当する約 3.9nm のステップ指令を与え、実変位が階段状に追従するかを確認する。

4. 実験結果および考察

4.1. ステップ応答特性と剛性評価

開発したナット駆動型に対し、 $2.3\mu\text{m}$ のステップ指令を与えた際の位置応答および駆動力（推力）応答を図 5 に示す。制御ゲインは表 3 に示した高ゲイン設定 ($K_{pp} = 500,000\text{ mrad/s}$) を用いている。

時定数約 0.2 s 、 2% 整定時間約 0.8 秒、実位置は指令値に対して遅れなく追従しており、オーバーシュートや残留振動は一切確認されなかった。立ち上がり時間は極めて短く、目標位置到達後は即座に整定している。同時に測定した駆動力を見ると、加速時に鋭いピークを持ち、減速・整定時には速やかにゼロに収束している。

考察：通常、このような高ゲイン設定をボールねじ駆動系に適用すると、機械共振によるハンチングやオーバーシュートが発生しやすい。しかし本結果では、振動的な挙動が全く見られない。これは第 2 章で述べた通り、中空 DD モータ直結構造により系が「1 慣性系（剛体）」に近い剛体的な応答をしており、機械的なコンプライアンス（ばね要素）による位相遅れが大幅に抑制されたためであると考えられる。高いサーボ剛性が確保されていることがわかる。

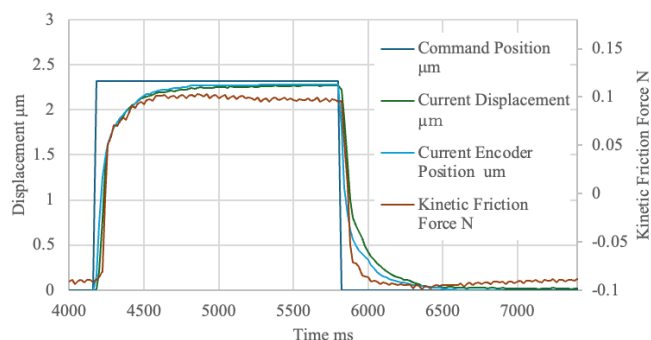
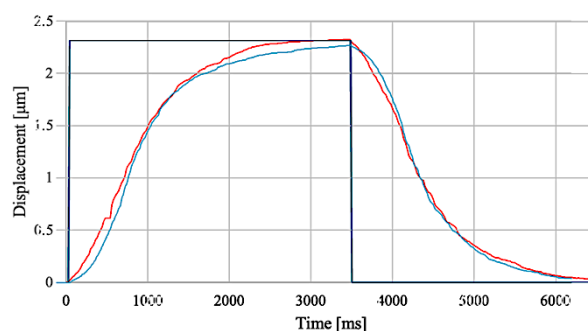


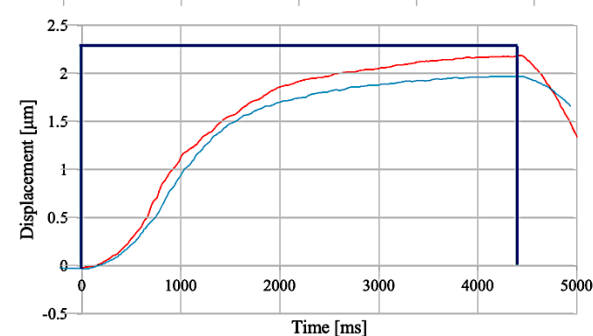
図 5 Step response waveform（位置と推力の同時プロット）（Command: $2.3\mu\text{m}$ step）

4.2. 軸回転型との応答性比較

次に、ナット駆動型の優位性を明確にするため、軸回転型との比較実験を行った。両者の条件を揃えるため、同一のねじ軸、同一の可動質量とし、制御パラメータ（P ゲイン等）も完全に同一に設定してステップ応答を取得した。比較結果を図 6 に示す。グラフにおいて、赤線がナット駆動型、青線が軸回転型の応答である。



(a) 軸駆動型



(b) ナット駆動型

図 6 軸駆動型とナット駆動型のステップ応答比較（同一 P ゲイン条件下）

時定数約 1 s 、 2% 整定時間約 3 秒であった。軸回転型は、立ち上がりが緩やかであり、目標位置に近づくとつれて収束が遅くなる傾向が見られる。

これはねじ軸のねじり変形やカップリングの弾性が「ばね」として作用し、エネルギーの充填に時間を要している（時定数が大きい）ためである。対してナット駆動型は、立ち上がりが急峻であり、軸回転型よりも明らかに速く目標位置に到達している。

考察：この差は、第2章の表1で算出した「固有振動数比 1.51 倍」および「ねじり剛性 2 倍」の理論予測と定性的に整合している。力点と作用点と同軸一体化したことで、応答遅れ要素が物理的に削減され、より高い帯域での追従が可能となったことを示している。すなわち、本機構は第2章で示した 1 慣性系モデルが示唆する高応答性を、実機レベルで実現していることが示唆される。

4.3. 摩擦特性と運動精度

4.3.1. 長ストローク駆動時の摩擦変動

ストローク全域（77 mm）を低速で往復駆動させた際の、位置と駆動力（摩擦力）の関係を図7に示す。結果より、往路（プラス方向）と復路（マイナス方向）で摩擦力の絶対値がほぼ等しく、対称性の高いプロファイルが得られている。また、位置による摩擦力の変動（うねり）も微小である。

考察：一般的なベルト駆動式の軸回転機構では、ベルト張力によってねじ軸に横方向の偏荷重（サイドフォース）がかかり、摩擦力が片効きしたり、場所によって変動したりする問題がある。本研究の中空 DD モータ直結方式では、摩擦特性が極めてフラットで対称であることから、サイドフォースの影響が小さいと考えられる良好な直動案内特性が得られている。これは組立精度の高さを示すとともに、精密制御を行う上で外乱補償を容易にする大きな利点である。

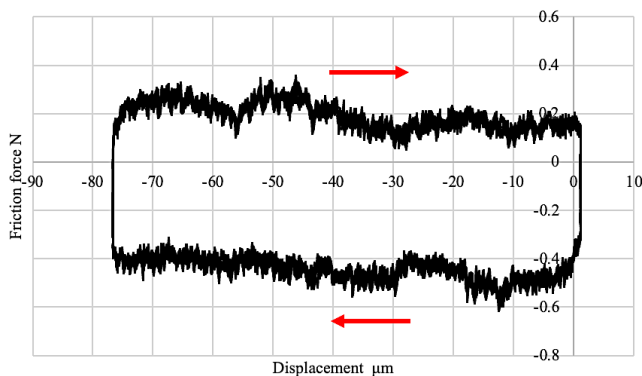


図7 長ストローク（77 mm）往復運動時の摩擦力特性

4.3.2. 微小変位領域のヒステリシス

さらに微小な領域での挙動を調べるため、変位幅 4 μm の往復運動における力と変位の関係を図8に示す。明確なヒステリシスループが観測され、動き出しの瞬間に最大静止摩擦力が作用し、動き出すと動摩擦に移行する非線形な摩擦挙動（スティックスリップ現象の前兆）が確認できる。

考察：このヒステリシスはボールねじ特有の転がり摩擦に起因するものであるが、重要な点は「ループの形状が安定しており、再現性が高い」ことである。バックラッシュやガタがある場合、ループ形状は崩れるが、本結果はきれいなループを描いている。これは中空 DD モータ直結により機械的結合が強固であることを裏付けており、この非線形性をモデル化できれば、さらなる高精度化が可能であることを示唆している。

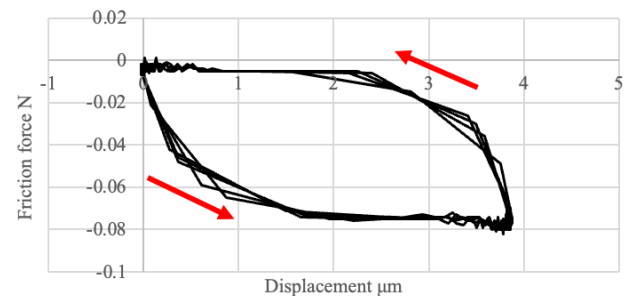


図8 微小ストローク（4 μm 範囲）における変位-力ヒステリシスループ

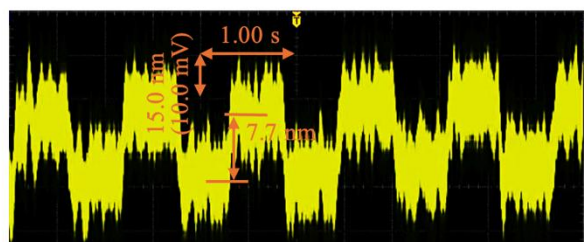
4.4. ナノメートルオーダーの位置決め分解能

最後に、本ステージの限界分解能を検証するため、エンコーダの 5 パルス分に相当する約 3.9 nm のステップ指令を与えた際の時間応答を図9に示す。図9(a)は 7.7 nm（10 パルス）、図9(b)は約 3.9 nm（5 パルス）のステップ応答である。オシロスコープの波形から、指令値の階段状の変化に対し、実変位が忠実に追従していることが明確に確認できる。ステップ間の定常偏差やふらつきは極めて小さく、ノイズに埋もれることなく数 nm オーダーの変位を制御できている。

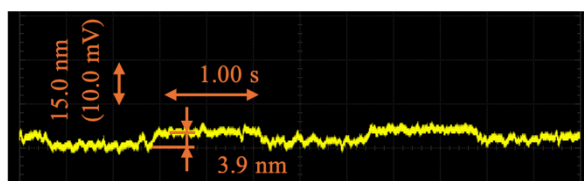
考察：一般的なボールねじ駆動では、ロストモーション（バックラッシュやねじれ）の影響で、微小指令を与えても出力が現れない「不感帯」が存在することが多い。しかし本実験では約 3.9 nm という極微小な指令に対して明確な変位が得られた。これは、(1) 中空 DD モータ直結によりバック

ラッシュが少なくなったこと、(2) 1 慣性系特性により高ゲイン制御が可能となり、静止摩擦の影響を即座にトルクで打ち消していること、の主に上記 2 点によるものと考えられる。以上より、本機構はナノメートルオーダーの超精密位置決めに適可能な性能を有していることが示された。

一方、本研究では中空 DD モータ発熱や長時間連続運転に伴う熱変位・ドリフトの影響については評価対象としておらず、これらの長期安定性に関する検討は今後の課題である。



(a) 7.7 nm step (10 pulses)



(b) 3.9 nm step (5 pulses)

図 9 ナノメートルスケールのステップ応答
(オシロスコープ測定)

5. 結言

本研究では、「ナット直接駆動型超精密位置決めステージ」を開発し、その性能を評価した。中空 DD モータとナットを同軸上で直結することで機械的バックラッシュと弾性要素を減じた本機構は、理論および実験の両面から以下の有用性が確認された。

- ① 高応答・高剛性の実証：本機構は制御モデル上「1 慣性系」として振る舞い、軸回転型に比べてねじり剛性が約 2 倍、機械固有振動数が約 1.5 倍に向上することを理論的に示した。実機実験においても、極めて高いサーボゲイン設定下で安定した応答を実現し、この理論的優位性を実証した。
- ② ナノメートルオーダーの位置決め：約 3.9 nm (5 パルス相当) の微小ステップ応答において、遅れのない追従動作を確認した。中空 DD モータ直結構造により静止摩擦の影響を抑制でき、ナノメートルオーダーの超精密位置

決めに適可能可能性が示された。

- ③ 理想的な直動特性：長ストローク駆動においても摩擦力が一定かつ対称的であり、サイドフォース（偏荷重）のない理想的な直動案内が実現されていることを確認した。

今後は、モータ発熱による熱変位の定量的評価や、長時間連続運転時のドリフト挙動の把握、さらに外乱オブザーバ等を適用した更なる制御性能の向上について検討を進めたい。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、DD モータの提供および技術的なご助言をいただきました、マイクロ・テックラボラトリー株式会社の合田英樹氏、青柳雄大氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉田達矢, 中島龍太, 富田良幸: 半導体製造装置における超精密位置決め技術の動向, トライボロジスト, vol.64, no.12, pp.724-729, 2019, DOI:10.18914/tribologist.64.12_724.
- 2) Steinbuch, M., Oomen, T., Vermeulen, H.: Motion Control, Mechatronics Design, and Moore's Law, IEEJ Journal of Industry Applications, vol.11, no.2, pp.245-255, 2022, DOI:10.1541/ieejjia.21006010.
- 3) van Herpen, R.M.A., Oomen, T.A.E., Kikken, E.J.G.J., van de Wal, M.M.J., Aangenent, W.H.T.M., Steinbuch, M.: Exploiting Additional Actuators and Sensors for Nano-positioning Robust Motion Control, Mechatronics, vol.24, no.6, pp.619-631, 2014, DOI:10.1016/j.mechatronics.2014.03.008.
- 4) Altintas, Y., Verl, A., Brecher, C., Uriarte, L., Pritschow, G.: Machine Tool Feed Drives, CIRP Annals, vol.60, no.2, pp.779-796, 2011, DOI:10.1016/j.cirp.2011.05.010.
- 5) Varanasi, K.K., Nayfeh, S.A.: The Dynamics of Lead-Screw Drives: Low-Order Modeling and Experiments, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol.126, no.2, pp.388-396, 2004, DOI:10.1115/1.1771690.
- 6) THK 株式会社: ボールねじ, URL: https://www.thk.com/jp/ja/products/ball_screw/, 参照日: 2025.12.11.

- 7) ミスミ：ボールねじの特徴（ボールねじを極める-2），URL: https://jp.misumi-ec.com/tech-info/categories/machine_design/md05/c1382.html，参照日：2025.12.11.
- 8) 黒田精工株式会社：なぜボールねじの長さの制限があるのですか，URL: <https://kurodaprecision.com/jp/products/technical-information/bs/bs016.html>，参照日：2025.12.11.
- 9) 大塚二郎，坂戸啓一郎：図解 精密位置決め機構設計，工業調査会，1996.
- 10) Liu, C., Zhao, C., Liu, Z., Wang, S.: Dynamic Analysis of Ball Screw Feed System with the Effects of Excitation Amplitude and Design Parameters, *Applied Sciences*, vol.11, no.15, 6868, 2021, DOI:10.3390/app11157070.
- 11) Zhang, H., Liu, H., Du, C., Lv, D., Zhang, J., Zhao, W.: Dynamics Analysis of a Slender Ball-screw Feed System Considering the Changes of the Worktable Position, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol.233, no.8, pp.2685-2695, 2019, DOI:10.1177/0954406218799781.
- 12) Wang, C., Zhao, Y., Liu, H., Guo, Y., Niu, W.: Evolution of Lower-order Vibration Mode of the Slender Ball Screw Feed System, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol.236, no.12, pp.1601-1613, 2022, DOI:10.1177/09544054221080599.
- 13) Erkorkmaz, K., Kamalzadeh, A.: High Bandwidth Control of Ball Screw Drives, *CIRP Annals*, vol.55, no.1, pp.393-398, 2006, DOI:10.1016/S0007-8506(07)60443-0.
- 14) Li, Z., Tan, Z., Chen, Y., Lu, Z., Fan, Y.: Thermal Error Prediction of Ball Screw Feed System Based on Inverse Heat Transfer Analysis, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.122, no.5-6, pp.2607-2624, 2022, DOI:10.1007/s00170-022-10076-8.
- 15) Yu, H., Luan, X., Zheng, G., Hao, G., Liu, Y., Xing, H., Liu, Y., Fu, X., Liu, Z.: Analysis and Experiment of Thermal Field Distribution and Thermal Deformation of Nut Rotary Ball Screw Transmission Mechanism, *Applied Sciences*, vol.14, no.13, 5790, 2024, DOI:10.3390/app14135790.
- 16) THK 株式会社：精密ボールねじ・スプライン，BNS / NS 形 技術資料，URL: https://www.thk.com/jp/ja/products/ball_screw/ball_screw_spline/，参照日：2025.12.11.
- 17) ケーエスエス株式会社：新製品情報（中空モータ直結ボールねじスプライン等），URL: https://www.kss-superdrive.co.jp/jp/product/new_product.html，参照日：2025.12.11.
- 18) ハイウィン株式会社：TM-HMS シリーズ製品情報，URL: <https://www.hiwin.co.jp/product/tm-hms/>，参照日：2025.12.11.
- 19) Wang, Z., Hu, J., Zhang, Y., Tian, W.: Dynamic Modeling and Analysis of the Nut-direct Drive System, *Advances in Mechanical Engineering*, vol.10, no.11, pp.1-13, 2018, DOI:10.1177/1687814018810656.
- 20) 日本精工株式会社：ダイレクトドライブモータの技術動向，URL: <https://www.nsk.com/jp-ja/tools-resources/pm-tech-report/direct-drive-motors/>，参照日：2025.12.11.
- 21) CKD 日機電装株式会社：ダイレクトドライブモータの基礎知識，URL: <https://www.nikkidensho.co.jp/technology/d-d-knowledge/about/>，参照日：2025.12.11.
- 22) マイクロ・テックラボラトリー株式会社：DD（ダイレクトドライブ）モータとは，URL: <https://www.mtl.co.jp/page-ddmotor/>，参照日：2025.12.11.
- 23) 三浦雄太，堤正臣：送り系の運動精度向上を目指したボールねじと直動転がり案内の摩擦変動の解析，*日本機械学会論文集*, vol.84, no.865, 18-00123, 2018, DOI:10.1299/transjsme.18-00123.
- 24) 古市雄太，深田茂生：ボールねじの微視的変位挙動に関する研究 第 10 報 オフセットロード予圧型のモデル化と反転時追従誤差の低減実験，*精密工学会春季大会学術講演会講演論文集*, pp.159-160, 2022, DOI:10.11522/pscjspe.2022A.0_159.
- 25) Zhao, J., Lian, B., Lin, M., Song, X., Jiang, H., Zhang, D., Qi, B.: A Novel Modeling Method of Friction Torque for Ball Screw Based on Lubrication Performance Analysis, *Proceedings of*

the Institution of Mechanical Engineers, Part C:
Journal of Mechanical Engineering Science,
vol.237, no.11, pp.2621-2634, 2023,
DOI:10.1177/09544062221136443.

- 26) 松原厚：精密位置決め・送り系設計のための制御工学，森北出版，2008.
- 27) Li, F., Jiang, Y., Li, T., Du, Y. : An improved dynamic model of preloaded ball screw drives considering torque transmission and its application to frequency analysis, Advances in Mechanical Engineering, vol.9, no.7, pp.1-11, 2017, DOI:10.1177/1687814017710580

(2025年12月14日 受理)

東京高専内での学術連携の事例紹介

武田美咲*

本稿では、著者が東京高専内で進めている学術連携の事例を取り上げ、その背景、内容および得られた成果について紹介する。著者はヒトの運動制御メカニズムの解明とその応用研究を進める中で、数学、ロボティクス、生体医工学を専門とする 3 名の教員と連携している。これらの連携は、理論モデルの構築や生体信号の計測および解析といった研究の様々な場面を支え合う役割を果たしており、研究活動を続けていく上で大きな励みとなっている。また、学生が複数の研究室にまたがって共同研究や学会発表に取り組むことで、教育面でも相乗効果が生まれている。これらの事例から、学内における専門性や背景の異なる研究者同士の協働は、研究の推進のみならず、教育の活性化にも有効な取り組みであることが示唆された。

(キーワード: 学術連携, 工学教育, 学際研究)

Case Study of Academic Collaboration at Tokyo KOSEN

Misaki TAKEDA*

This paper presents case studies of academic collaboration within Tokyo KOSEN, focusing on the author's ongoing research partnerships with three faculty members specializing in mathematics, robotics, and biomedical engineering. The author's research aims to elucidate the mechanisms of human motor control and to develop technologies for motor performance evaluation. These collaborations have supported various aspects of the research process—including theoretical model development, biosignal measurement, and data analysis—and have become a significant source of motivation for sustaining long-term research activities. Furthermore, students engaged in cross-laboratory research and conference presentations have benefited from the educational synergy created through these collaborations. The findings suggest that collaboration among researchers with diverse expertise and backgrounds within the institution contributes not only to the advancement of research but also to the enrichment of educational practices.

(Keywords: academic collaboration, engineering education, interdisciplinary research)

1. はじめに

高専教員は各分野に強い専門性を有しているが、教育・研究活動に加えて多様な校務を担っているため、工夫をしなければ単独で研究を推進し成果を出していくことは困難である。とりわけ、着任間もない教員や研究時間に制約のある教員にとっては、研究の継続と専攻科生を含む学生指導の双方に十分に打ち合わせるために、効果的な体制整備が重要となる。

著者自身も着任して 6 年目を迎え、専攻科生を指導する立場として研究業績の蓄積が求められる中、これまで二度の産休・育休を挟み、現在も育児と業務の両立により研究時間が限られているという状況にある。このような制約のもとで、限られた時間を最大限に活かし研究の質と継続性を確保するためには、教員一人で取り組む従来型の研究スタイルでは限界がある。

以上の問題意識のもと、著者は学内外の研究者と積極的に学術連携を構築してきた。特に学内では、3 名の教員の協力を得て共同研究体制を形成している。学内連携は、教員同士が日常的につながりを持つことで孤立を防ぎ、互いの専門性を活かしながら研究を深めていくうえで、とても心強いものだ実感している。専門性や背景の異なる研究者同士が協働することで、新しい視点が得られたり、研究の進め方に広がり生まれやすくなる。こうした連携は、研究を無理なく続けていくための支えとなる。

本稿では、著者が東京高専内で実施している学術連携の 3 つの事例を取り上げ、その意義と成果について述べる。まず著者の研究の概要を紹介し、次に学内で形成している連携の全体像を述べたうえで、各連携事例の具体的な内容を整理する。最後に、学内学術連携の意義について総括する。

* 電気工学科

2. 著者の研究概要

著者は、ヒトの随意運動における運動制御メカニズムの解明と、その知見を応用した運動パフォーマンス評価・支援技術の開発を主な研究テーマとしている。その中でも特に、到達運動における速度と精度のトレード・オフ機構の解明を中心的な研究課題として取り組んできた。

この速度と精度のトレード・オフの背景には、運動指令の大きさに比例して増大する信号依存ノイズや腕の動力学特性が関与しているとされる。著者は、信号依存ノイズや腕の動力学特性が最終的な運動パフォーマンスにどのように影響するかを数理的・計算論的に説明したいと考えている。

現在は、最適フィードバック制御理論に基づく運動予測モデルを構築していくことを目指しており、理論的側面については後述する一般教育科・数学の井口雄紀先生の助言を得ながら進めている。

理論研究と並行して、シミュレーションや行動実験を通じた実証的な検討も行っている。行動実験では、光学式モーションキャプチャシステムを用いて身体動作の三次元計測を実施し、運動軌道、速度、誤差、ばらつきなどのデータを取得している。これらの計測結果を用いて、理論モデルの妥当性を確認するだけでなく、ヒトの運動特性の抽出も行っている。

本科 5 年生の「卒業研究」では、著者の研究テーマを発展させた多様なテーマに学生が取り組んでいる。具体的には、書字の美しさの定量評価、フィッツの法則を用いた若年者と高齢者の運動比較、モーションキャプチャを用いた投球動作における速度重視条件と精度重視条件の比較、運動前準備の有効性の検証、生体信号を用いた不安感推定方法の基礎的検討などである。

専攻科生の「特別研究」では、タイピング動作の速度と精度のトレード・オフに着目した、小型ハンドトラッキングセンサで計測した手指動作情報を用いたタイピング評価アプリケーションの開発を進めている。

本科 4, 5 年生の「社会実装プロジェクト」では、マーカーレスモーションキャプチャ技術を活用したブルンストロームステージ自動判定アプリケーションの開発や、低コストのハンドヘルドダイナモメータを用いた徒手筋力テスト自動判定アプリケーションの開発にも取り組んでいる。

以上の研究活動は、ヒトの運動制御に関する基礎的な理解を深めるだけでなく、運動パフォーマンス

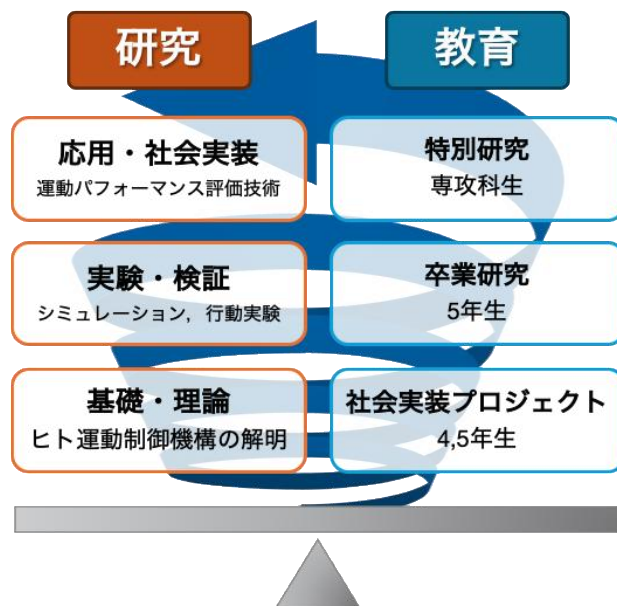


図 1 著者の教育・研究活動の概要（俯瞰図）

ンス評価の基盤技術の構築や、スポーツ計測、リハビリテーション・教育支援システムの開発など、実践的な領域への応用にもつながる可能性をもつ。理論研究と実験研究を進めながら、その先の社会実装も視野に入れることで、高専における教育活動との連携も図ることができる（図 1）。

3. 学内における学術連携の概要

著者は教育・研究活動を進める中で、現在学内の 3 名の教員と学術連携を行っている。図 2 にその概略図を示す。本節では、それぞれの連携がどのような特徴をもち、著者の研究にどのように関わっているのかを概説する。

これらの連携は、はじめから意識して構築したわけではないが、結果的に、数学、ロボティクス、生体医工学といった異なる専門分野の力が自然に集まるかたちとなった。こうした専門性の組み合わせによって、研究に多様な視点を取り入れることができるようになり、テーマの広がりや新しい気づきにもつながっている。

3.1. 一般教育科 井口雄紀先生（数学・幾何学）

研究を進めるうえで不可欠となる数学的な側面について日頃から多くのご助言をいただいている。計算論的神経科学では、ヒトの運動制御を確率論的最適制御として説明する考え方が用いられるが、その数学的な仕組みは難しい内容も多く、著者一人では理解が追いつかないこともある。そうした

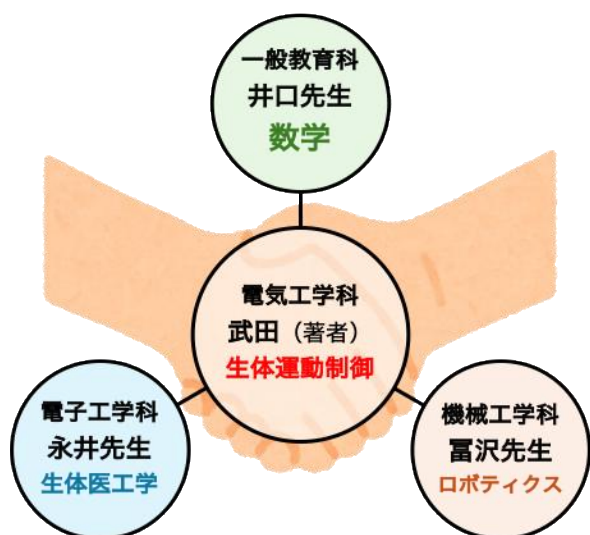


図2 学内の学術連携の概略

とき、井口先生が数式の意味やモデルの考え方を丁寧に教えてくださり、研究を進める大きな助けになってくださっている。井口先生との連携によって、これまで難しいと感じていた理論面の理解が少しずつ深まり、研究の方向性もより明確になってきている。

3.2. 機械工学科 富沢哲雄先生 (知能情報ロボティクス)

科研費基盤研究(C)「自律移動ロボットの搭乗者に生じる不安感の要因究明とその軽減法に関する研究」のテーマを中心に連携している。富沢先生の研究室では、自律移動パーソナルモビリティ搭乗者が感じる不安感を、深層学習モデルを用いて周辺環境情報と車両物理情報から推定する研究が行われている。著者の研究室では、最終的には富沢研究室の不安感推定モデルに組み込む技術として、生体信号からヒトの心理状態を定量化する技術を検討している。両研究室の学生が共同で議論し学会発表を行うなど、研究の進展だけでなく教育的な相乗効果が生まれている。

3.3. 電子工学科 永井翠先生 (生体医工学)

科研費基盤研究(C)「タッチタイピング習得に向けた生体情報の活用によるタイピング評価システムの開発」のテーマにおいて、分担研究者として連携いただいている。手指専用の表面筋電計の検討や生体信号の計測・解析手法に関してご助言とご協力をいただいている。こうした連携により、著者単独では到達し得なかった学際的な研究テーマが新たに生まれ、本研究の発展につながっている。

る。また、本テーマでは専攻科学生が学会発表を行うなど、教育的な成果にも結びついている。

次章では、各先生との連携事例について、連携の背景、目的、成果などの具体的な内容について述べる。

4. 一般教育科 井口雄紀先生との研究連携

4.1. 連携の背景

井口先生とのつながりは、もともとサッカー一部の顧問という共通点から始まったと記憶している。その後、学内で開催された教職員の研究座談会で著者の研究内容について話す機会があり、著者の方から研究の理論面での協力を依頼したことがきっかけである。

著者が取り組む運動制御研究では、到達運動の軌道特性や手先終端分散を理論的に検討するため、信号依存ノイズを含む単関節および多関節腕の動力学モデルを数理的に扱う必要がある。特に確率ノイズの扱い、パラメータ依存性の評価、状態空間モデルの理解、決定論的モデルから確率論的モデルへの変換、連続時間モデルの離散時間化など、高度な数学的知識が不可欠となる。

こうした背景から、井口先生に理論構築面で助言をいただく連携が本格的に始まった。

4.2. 共同研究の内容

井口先生には、研究室の学生とともに参加する勉強会を開催していただき、計算論的神経科学の基礎となる数理モデルをご指導いただいた。特に、信号依存ノイズを含む単関節腕モデルにおける手先終端分散の定式化について議論を重ね、運動方程式に含まれる主要パラメータ(慣性モーメント、粘性係数)の役割を体系的に整理することができた。

4.3. 得られた成果と今後の展開

井口先生との共同研究を通じて、信号依存ノイズを含む単関節腕動力学モデルにおける手先終端分散を定式化した。その結果、慣性モーメントは手先終端分散に寄与しないこと、粘性係数の増加は手先終端分散を減少させる方向にはたらくことが理論的に明らかとなった。

今後はこれらの知見を論文としてまとめることを目指す。また、現在は最適フィードバック制御理論に基づく運動予測モデルを構築していくことを目指しており、引き続き井口先生と共同で研究を続けさせていただきたいと考えている。

5. 機械工学科 富沢哲雄先生との研究連携

5.1. 連携の背景

富沢先生はロボティクスおよび知能機械システムを専門としており、ヒトの生活環境において物理的なサービスを提供することのできるスマートなロボットシステムの開発を精力的に進めている。富沢先生と著者は同じ年度に東京高専に着任しており、着任時期の差は半年ほどである。そのため、当初から親しくさせていただいているが、研究者・教育者として富沢先生は大先輩であり、著者にとってロールモデルのような存在である。

互いに学際的な研究に取り組んでいることもあり、「いつか両研究室の強みを生かした共同研究をしたい」という話を着任当初から交わっていた。そうした中、2023 年度に富沢先生が代表となる科研費「自律移動型パーソナルモビリティ搭乗者の不安感推定」が採択され、著者は分担研究者として参画させていただけることとなった。これをきっかけに、本格的な共同研究体制が整い、現在も継続して連携を続けている。

5.2. 共同研究の内容

本研究の目的は、搭乗者が安心して利用できるパーソナルモビリティを実現するために、「ヒトがどのような環境・走行条件で不安を感じるのか」、「その不安をどのように定量的に推定できるか」を明らかにすることである。同じ研究目的に対して、富沢研究室と武田研究室（著者の研究室）で異なる研究のアプローチをとることにした。

5.2.1. 富沢研究室:深層学習モデルを用いた走行環境・車両情報による不安推定

富沢研究室では、深層学習モデルを用いた不安感推定の手法の検討を進めている。具体的には、測域センサ (LiDAR) によって取得した周辺環境情報と、車両の速度や加速度などの物理情報を組み合わせ、時系列データを扱う深層学習モデルである LSTM を用いて不安感推定モデルを構築した¹⁾。その結果、環境情報と車両情報のみから最大 75% の精度で不安感を推定できる可能性が示されている²⁾。これらの結果から、外部センシング情報のみを用いて搭乗者の心理状態を推定する手法の有効性が示唆された。

5.2.2. 武田研究室:生体信号による不安感推定の基礎的検討

武田研究室では、生体信号を利用した不安感推定の可能性を探っている。心電図を計測し、心電図から算出される自律神経指標である LF/HF 比を心理的負荷の指標として用いた。実験の結果、狭路走行や蛇行走行といった不安を喚起しやすい条件において LF/HF 比が顕著に上昇した。このことから、LF/HF 比は心理的負荷の指標として有望である可能性が示唆された。

5.3. 得られた成果と教育的効果

本共同研究は、学術的成果にとどまらず、教育面においても多くの効果を生み出している。両研究室の教員および学生が互いの週報ミーティングに参加し、研究内容を共有して議論することで、日常的に学び合う環境が形成された。また、富沢研究室の学生は、計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2023) および日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2024) において成果を発表した^{1,2)}。著者研究室の学生も、計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2025) にて研究成果を発表する予定である。

異なる専門性をもつ学生同士が日常的にディスカッションを重ねることで、研究に取り組む力だけでなく、学際的な視点や協働しようとする姿勢も自然と育まれている。こうした取り組みを通して、両研究室の学習コミュニティがより活気づき、研究の質と学生の成長が互いに良い形で影響し合う流れが生まれている。

5.4. 今後の展開

今後も良好な連携関係を維持しながら、外部資金の獲得に向けて研究体制を強化していく予定である。また、研究室間の交流をさらに活発化させ、ディスカッションの機会を増やすことで学際的な研究をより一層深めたいと考えている。加えて、生体信号データと機械学習モデルを統合した予測手法の高度化にも取り組み、より精度の高い不安感推定モデルの構築を目指す。

6. 電子工学科 永井翠先生との研究連携

6.1. 連携の背景

永井先生は、生体医工学および医用福祉工学を専門としており、脳波や表面筋電図などの生体信

号計測に豊富な実績を持つ。永井先生とは、生体を対象とした工学研究という点で共通点があり、当初からいつか共同研究をしたいと感じていた。

そうした中、2021年度に申請していた科研費が双方とも採択され、永井先生から分担研究者としてお声がけいただいたことをきっかけに連携が開始した。その後著者の科研費でも分担研究者として参画いただく形となった。

特に、著者が進めているタッチタイピング動作の定量評価の研究では、高精度な生体信号計測が不可欠であり、永井先生の専門性が重要な役割を果たしている。

6.2. 共同研究の内容

本研究の目的は、小型ハンドトラッキングセンサで計測した手指動作データ、表面筋電図、視線情報といった多様な生体情報を統合し、正確かつ高速なタイピングスキルを客観的に評価できるシステムを構築することである。

6.3. 得られた成果と今後の展開

本共同研究を通じて、学生による初期的な成果も得られている。著者の研究室の専攻科生が映像情報メディア学会の研究会 (BCT2023) において研究成果を発表し、手指動作と筋活動を組み合わせたタイピング評価の有用性を示した³⁾。

6.3.1. 手指専用筋電計の共同開発

タイピング動作では、手首や手指の微細な筋活動を捉える必要があるが、従来の筋電計では十分な分解能が得られない場合があった。そこで、永井先生と共同で手指専用筋電計の開発を進めたいと考えている。このデバイスは、手指や手首の細かな筋活動を高精度に記録できるよう設計され、筋活動解析やタイピングスキル評価に活用する予定である。

6.3.2. 3D モーションデータとの統合解析の発展

富沢先生および永井先生との連携には、社会実装教育研究センターが保有する最新型の光学式モーションキャプチャシステム (図 3) を共通の研究基盤として活用しているという特徴がある。モーションキャプチャを用いた動作解析は、両研究室において重要な研究手法であり、本設備を中心に自然な形で研究室間の協働が生まれている。

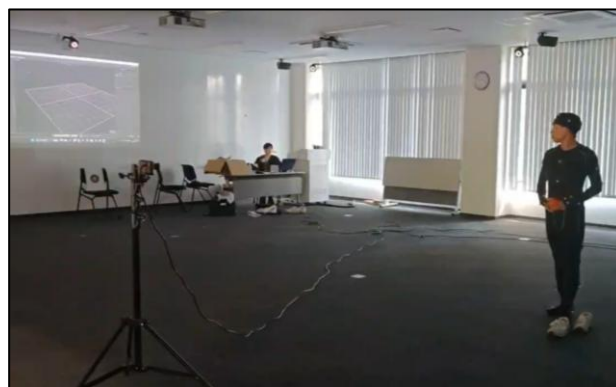


図 3 社会実装教育研究センターのモーションキャプチャシステム

毎年度の研究開始時には、合同でモーションキャプチャシステムのデモンストレーションおよび操作説明会を実施し、学生が計測技術を習得する機会としている。この合同実施体制は、研究室間の交流促進、計測手法の標準化、設備利用効率の向上に寄与し、学内連携の基盤として重要な役割を果たしている。

7. 学内学術連携の意義

本稿で紹介した3つの学内学術連携の事例は、それぞれの専門性を生かしながら互いを補完し合う形で成立している。数学、ロボティクス、生体医工学という異なる分野が交わることで、著者単独では到達し得なかった多角的な視点が生まれ、研究の広がりや深まりが大きく促進された。学内に身近な専門家がいることは、新しい発想や知識を得る機会を増やすだけでなく、研究の継続性を確保する上でも重要である。

また、学内学術連携は教育面にも大きな価値をもたらしている。複数の研究室が協力して取り組むプロジェクトは、学生にとって学際的な研究に触れる貴重な機会となり、他分野の知識に触れながら研究を進める経験は、今後の学習やキャリア形成にも良い影響を与える。さらに、研究室間でのミーティング参加や共同計測、デバイス開発など、実践的な活動を通して、学生の主体性や協働する姿勢が育まれている。

以上のことから、学内での学術連携は、研究の活性化と教育的成長の双方を促進する有効な仕組みであり、高専という多様な専門性をもつ教育研究機関において、特に重要な役割を果たすと考えられる。

8. おわりに

本稿では、著者が東京高専内で進めてきた学内学術連携の事例を紹介し、その意義について述べた。今回取り上げた3つの学内学術連携は、いずれも自然な関わりの中から生まれたものであるが、結果として著者の研究の柱となり、教育面においても大きな成果を生むものとなった。限られた時間の中で研究を継続し、発展させるためには、学内外を問わず他者との協働が重要であることを改めて実感している。

今後も、これまで築いてきた学内学術連携を大切にしながら、新たな研究テーマの開拓や外部資金獲得を視野に入れ、研究・教育活動のさらなる充実を図りたい。また、学生たちが学際的な視点を持ち、自ら学び研究する姿勢を育めるよう、学内学術連携を基盤とした学びの環境づくりにも引き続き取り組んでいく所存である。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科学研究費「タッチタイピング習得に向けた生体情報の活用によるタイピング評価システムの開発」(基盤研究(C), 課題番号: JP21K02847) および JSPS 科学研究費「自律移動ロボットの搭乗者に生じる不安感の要因究明とその軽減法に関する研究」(基盤研究(C), 課題番号: JP23K03766) の助成を受けて行われたものである。

本研究を進めるにあたり、一般教育科 井口雄紀先生には運動制御モデルの理論的検討に関して有益な助言をいただき、機械工学科 富沢哲雄先生および電子工学科 永井翠先生には共同研究を通して多大なご支援を賜った。また、研究活動に尽力した東京高専の学生諸氏にも感謝申し上げます。ここに記して深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤貫雄大, 富沢哲雄, 武田美咲, 多羅尾進: 自走型パーソナルモビリティの搭乗者が受ける不安感と心拍との関連調査, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会第 24 号, 2E4-08, 2023 年 12 月
- 2) 藤貫雄大, 富沢哲雄, 武田美咲, 多羅尾進: 動的な周辺環境情報を用いた電動車椅子搭乗者の不安感推定, 日本ロボット学会学術講演会予稿集第 42 号, 3J2-03, 2024 年 9 月
- 3) 姫田柊優, 武田美咲: 手指動作データを用い

たタイピングパフォーマンスの評価手法の提案, 映像情報メディア学会技術報告, vol. 47, no. 21, pp. 37-40, 2023 年 7 月

(2025 年 1 月 2 日 受理)

アーク溶接のデジタルツインに向けた 3 次元点群データを用いた 計算領域の構築

根本雄介*, 長沢東悟*, 谷上真緒*

本研究は、アーク溶接のデジタルツイン構築に向けて、LiDAR (Light Detection And Ranging) により取得したステンレス鋼の 3 次元点群データを用い、3 次元電磁熱流体解析に適用可能な計算領域構築手法を検討した。対象として、板厚 1.0 mm および 5.0 mm、表面加工の有無、ならびに継手形状を含む 9 条件で点群計測を実施し、点群品質と寸法再現性を評価した。この結果、金属光沢が大きい条件では近赤外光反射の影響により点群欠損や面の不均一化が生じ、形状再現性が低下する傾向が確認された。また、寸法評価では長さ方向の相対誤差が 9~23% 程度、幅方向が 1~6% 程度となり、評価方向により計測ばらつきが異なることを示した。1.0 mm および 2.0 mm 間隔の点群を用いて三角形要素に基づく面構築と直交座標系上での境界面生成を行った。1.0 mm 間隔では固体領域が比較的均一に再現された。一方、2.0 mm 間隔では三角形構築時の空洞により不均一化が生じた。さらに、構築された固体寸法が実寸に対して約 1/6 となる事象が認められ、3 次元点群スキャナ付属ソフトウェアのギャップ修復処理が幾何構築へ十分反映されていない可能性が示された。以上より、3 次元点群データに基づく計算領域構築の有効性と課題を整理し、今後は倍率補正とギャップ修復相当処理の導入、ならびに境界条件設定を通じて、実形状および溶接トーチ移動を考慮した 3 次元電磁熱流体解析へ展開する。

(キーワード: デジタルツイン, 3 次元電磁熱流体シミュレーション, 3 次元点群データ, アーク放電)

Computational Domain for Digital Twin of Arc Welding Using 3D Point Cloud Data

Yusuke NEMOTO*, Togo NAGASAWA*, Mao TANIGAMI*

This study investigates a computational-domain construction methodology for a digital twin of arc welding by using three-dimensional (3-D) point-cloud data of stainless steel acquired with LiDAR. Point-cloud measurements were conducted under nine conditions that included plate thicknesses of 1.0 and 5.0 mm, the presence/absence of surface finishing, and joint configurations, and the point-cloud quality and dimensional reproducibility were evaluated. The results indicate that, under highly specular (metallic-gloss) surface conditions, near-infrared reflection effects increase point loss and surface nonuniformity, thereby degrading geometric fidelity. The relative error in the measured length was on the order of 9%–23%, whereas that in the width was 1%–6%, demonstrating direction-dependent variability in dimensional evaluation. To reduce memory consumption in the 3D electromagnetic–thermal–fluid analyses simulation code, point-cloud preprocessing was performed via representative-point selection and removal of RGB attributes. Using preprocessed point clouds with sampling intervals of 1.0 mm and 2.0 mm, surface reconstruction based on triangular elements and boundary generation in a Cartesian coordinate system were implemented to construct the computational domain. A comparatively uniform solid region was obtained at a 1.0 mm interval, while a 2.0 mm interval led to nonuniformity due to voids generated during triangulation. Moreover, the reconstructed solid dimensions were approximately one-sixth of the nominal dimensions, suggesting that the gap-repair operation performed in the scanner software was not fully reflected in the geometric construction workflow. Future work will incorporate scale correction and gap-repair equivalent processing and will further impose boundary conditions for the governing equations to enable 3D electromagnetic–thermal–fluid analyses that account for real geometry and torch motion.

(Keywords: digital twin, 3D electromagnetic thermal fluid simulation, 3D point cloud data, arc discharge)

* 電気工学科

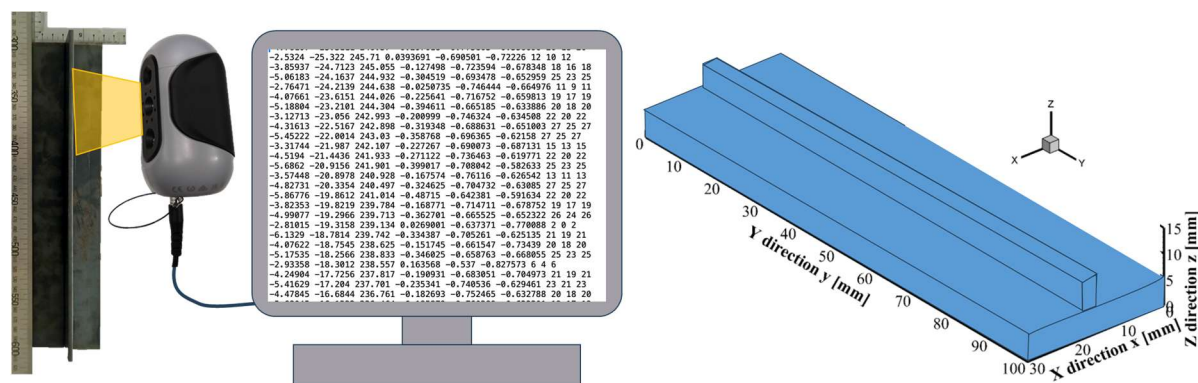


図 1 3次元点群データを用いた計算領域構築システムの概略

1. はじめに

アーク溶接は、消耗電極または非消耗電極を用いたアーク放電により母材を局部的に加熱・溶融し、凝固過程を経て接合する溶接法である。特に TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接は、非消耗のタングステン電極と不活性ガス (一般に Ar など) を使用する代表的な非消耗電極アーク溶接法である。TIG 溶接の特長は、高品質な溶接が可能であること、スパッタおよびスラグの発生が原理的に少ないこと、溶加材の使用が任意であり薄板や精密溶接に適すること、アーク長・溶接電流・溶加材投入などの制御性が高く自動化に適すること、ならびに多様な材料へ適用可能であることである。このため、TIG 溶接は、原子力発電所のステンレス鋼配管、火力発電プラントのボイラチューブ、蒸気タービンブレード等の製造・補修工程で用いられている。

一方で、TIG 溶接の短所として、溶接速度が比較的遅く生産効率が低いこと、アーク長が短く操作に熟練を要すること、ならびに高電流域や厚板への適用が相対的に難しいことが挙げられる。これに対して、熟練技能者は、母材形状に応じて適切なアーク長、トーチ角度、溶接速度、溶接電流等を総合的に制御することで、高品質な溶接を実現している。しかし、日本における金属材料製造、金属加工、金属溶接・溶断の職業の求人倍率は 7.77 倍程度¹⁾とされ、欧米においても熟練溶接工が 60 万人程度不足しているとの報告がある。このため、経験則のデジタルデータ化と保存を通じて再現可能性を確保し、さらに溶接ロボットへ移植して自動化へ展開することが重要となる。

この技術実現に対して、アーク溶接のデジタルツインを構築することが有効な手法の一つとして位置付けられる。このため、著者らは、TIG 溶接を対象として実験計測および数値解析の両面から検討を進めている。実験計測としては、人工知能を活用した湾曲状ステンレス鋼の溶接制御実験を報告している²⁻³⁾。これにより、ステンレス鋼の形状変化に伴うアーク長変動に対して、溶接状態を制御可能であることを示した。また数値解析としては、電場・磁場・温度場・速度場等の複合的な物理現象を同時に扱うことが可能な 3次元電磁熱流体解析手法を確立している⁴⁻⁵⁾。

しかし、従来の数値解析は、溶接トーチの移動やステンレス鋼構造 (実形状) を未考慮とする報告が多く、実溶接プロセスの再現性に課題が残る。このため、熟練技能者の減少という社会的課題に対して、数値解析に基づく抜本的な解決策 (技能の形式知化、再現、移植) を提案することが難しい。このため、本研究では、3次元点群スキャナーにより対象構造物を 3次元点群データとして取得し、点群データで表現された実形状内部 (あるいは近傍) を移動するトーチ周辺の電磁熱流体解析を目指す。以上の背景から、本論文では、アーク溶接のデジタルツイン構築に向けて、3次元点群データを用いた計算領域の構築手法を提案し、この有効性を検討する。

2. 実験方法・計算方法

2.1. 計算領域の構築のフロー

図 1 に、3次元点群データを用いた計算領域構築システムの概略を示す。まず、LiDAR に代表される

根本, 長沢, 谷上: アーク溶接のデジタルツインに向けた3次元点群データを用いた計算領域の構築



図2 3次元点群スキャナー

表1 3次元点群スキャナーの性能

Item	Specification
Product name	3DMakerpro “Mole”
Accuracy	0.05 mm
Minimum object size	15 mm × 15 mm × 15 mm
Light source	NIR (near-infrared)
Resolution	0.1 mm
Frame rate	10 fps
Scanning distance	150–400 mm
Single-capture area	200 mm × 100 mm
Body dimensions	141 mm × 80 mm × 80 mm
Mass	390 g
Output formats	OBJ / STL / PLY
USB interface	USB 2.0
Supported OS	Windows 10/11, macOS 11/12 (including M1/M2 chips)
Recommended PC specification	Intel Core i7 (8th gen.), 16 GB RAM, NVIDIA 1060 GPU with 4 GB VRAM
Minimum PC specification	Intel Core i5 (8th gen.), 16 GB RAM, MX250 GPU with 2 GB VRAM

光学式距離計測技術を利用する3次元点群スキャナーにより, ステンレス母材の形状を計測する。LiDARはレーザー光を照射し, 反射光の情報に基づいて対象物までの距離や形状を推定する計測技術である。



(a) 5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm の表面加工有



(b) 1.0 mm × 30.0 mm × 300 mm の表面加工無



(c) 5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm の表面加工無

図3 角継手のステンレス鋼

取得した計測データはテキストデータとして出力・保存する。本研究で扱うテキストデータには, 点群の X, Y, Z 座標, X, Y, Z 方向に対する法線ベクトル成分, ならびに RGB 情報が含まれる。以降, このテキストデータを入力として, 3次元電磁熱流体解析に用いる計算領域(境界形状および境界条件設定に必要な幾何情報)の構築を行う。

2.2. 計測装置

図2に3次元点群スキャナー, 表1に3次元点群スキャナーの性能を示す。本スキャナーは, 3次元点群スキャナー 3DMakerpro「Mole」であり, 単一スキャンの精度は 0.05 mm, 空間分解能は 0.1 mm である。一般的に, TIG 溶接で接合対象となる板厚は 1~5 mm 程度であるため, 板厚のオーダーに対して計測精度の妥当性を検討する。測定可能な最小対象物寸法は 15 mm × 15 mm × 15 mm であり, 推奨される測定距離は 150~400 mm である。本研究で対象とするステンレス鋼試験片の寸法は約 10⁰~10² mm オーダであるため, 寸法オーダーに対して計測精度の妥当性を検討する。光源には近赤外光 (NIR) が用いられており, 1 フレームあたり 200 mm × 100 mm の視野 (Field of View) を 10 fps で取得する。ステンレス鋼は表面加工の有無により金属光沢 (反射特性) が変化するため, 表面加工の有無が計測精度に与える影響を検討する。スキャナー本体の外形寸法は 141 mm × 80 mm × 80 mm, 質量は 390 g である。し

表 2 ステンレス鋼の条件

Material	Surface treatment	Dimensions	Joint configuration
SUS304	w/	5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm (3 plates)	T-joint
SUS304	w/	5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm (2 plates)	Lap joint
SUS304	w/	5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm (2 plates)	Corner joint
SUS304	w/o	1.0 mm × 30.0 mm × 300 mm (3 plates)	T-joint
SUS304	w/o	1.0 mm × 30.0 mm × 300 mm (2 plates)	Lap joint
SUS304	w/o	1.0 mm × 30.0 mm × 300 mm (2 plates)	Corner joint
SUS304	w/o	5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm (3 plates)	T-joint
SUS304	w/o	5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm (2 plates)	Lap joint
SUS304	w/o	5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm (2 plates)	Corner joint

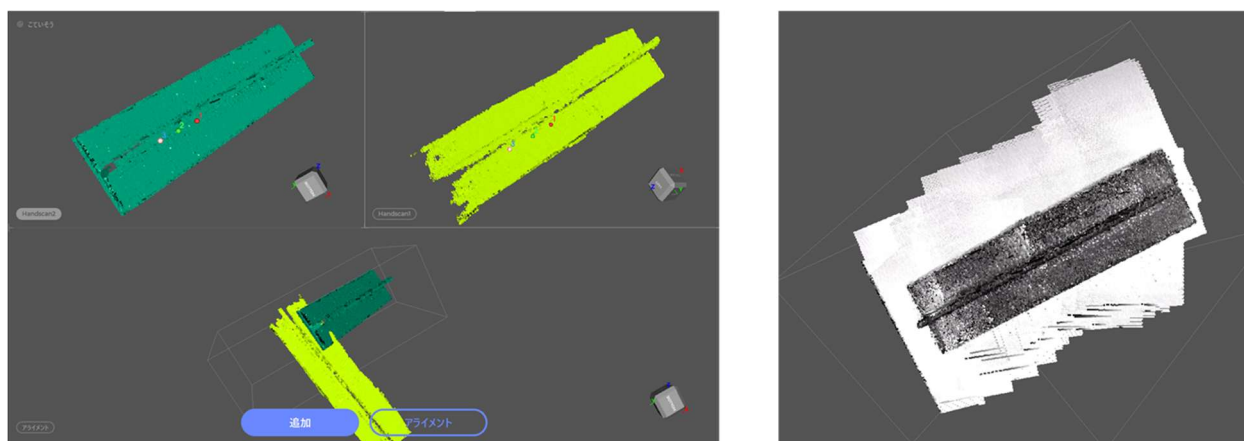


図 4 アライメント操作

たがって、実溶接現場においても可搬性の観点から計測が可能である。出力データ形式として OBJ, STL, PLY が利用可能であり、さらに点群のテキストデータとして ASC 形式の出力が可能である。本研究では、点群データ取得時の PC との接続に USB 2.0 インタフェースを用い、対応 OS は Windows 10/11 および macOS 11/12 (M1/M2 チップを含む) である。動作環境として、最低要件は Intel Core i5 (第 8 世代), 16 GB RAM, 2 GB VRAM を有する MX250 クラスの GPU, 推奨要件は Intel Core i7 (第 8 世代), 16 GB RAM, 4 GB VRAM を有する NVIDIA 1060 GPU である。

2.3. 計測手法

図 3 に角継手のステンレス鋼, 表 2 にステンレス鋼の条件を示す。ここで, 図 3(a) は 5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm の表面加工有のステンレス鋼, 図 3(b) は 1.0 mm × 30.0 mm × 300 mm の表面加工無のステ

ンレス鋼, 図 3(c) は 5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm の表面加工無のステンレス鋼である。TIG 溶接の板厚のオーダは 1.0~5.0 mm である。熟練技能者は, 板厚 1.0 mm の TIG 溶接における溶接電流を 30~50 A 程度, 板厚 5.0 mm の TIG 溶接における溶接電流を 100 A 程度に設定して溶接を行っている。本研究では, 実溶接および他者文献で報告されている条件に対応する板厚 1.0 mm と 5.0 mm のステンレス鋼を用いる。

また, 表面加工有のステンレス鋼表面は黒色であり, 表面加工無のステンレス鋼表面は金属光沢を有する。このため, 近赤外光の反射特性に差が生じ, 点群取得の欠損やノイズ発生確率が変化する可能性がある。したがって, 表面加工の有無が計測精度に与える影響を検討する。TIG 溶接の代表的な継手形式として, T 継手 (T-joint), 重ね継手 (Lap joint), 角継手 (Corner joint) 等がある。本研究では, 最大 3 枚のステンレス鋼を組み合わせ, 合計 9 条件の計測

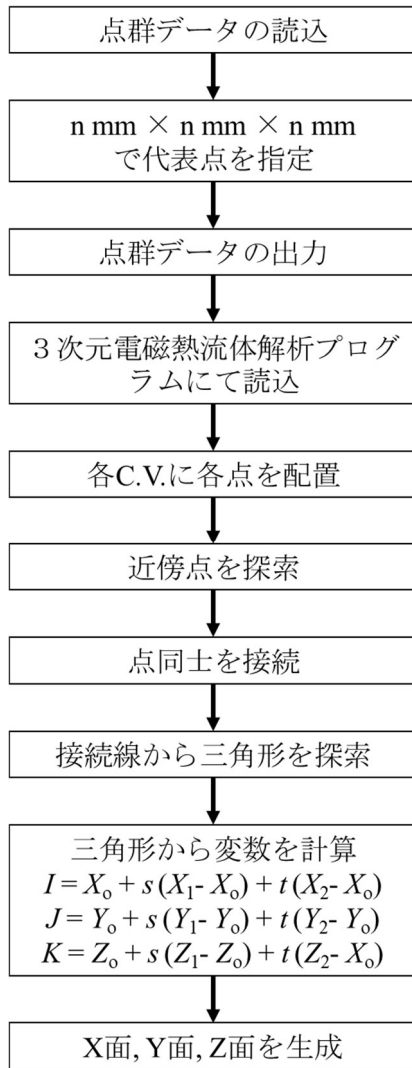


図5 計算領域の構築フローチャート

を実施する。ステンレス鋼の条件(板厚, 表面状態, 継手形状)に依存して, 1度のスキャンでは計測不可能な領域(遮蔽部, 反射に伴う欠損部)が生じる。このため, 各条件において, 複数視点から2~10度のスキャンを行う。3次元点群スキャナ付属ソフトウェアにより, 計測した点群を同一座標系に統一するアライメント(位置・姿勢合わせ)を行う。図4に, アライメント操作を示す。ここで, 左上の緑色の点群は1回目の計測, 黄色の点群は2回目の計測である。また, 左下はアライメント前, 右はアライメント後の点群である。複数視点から取得した3次元点群の座標系統合には, 対応点(同一物理点)の手動指定によるアライメントを用いた。重複領域から同一物理点に対応する特徴点を各点群上で3~5点指定し, 対応点集合に基づいて剛体変換(回転および並進)を推定する。推定した剛体変換は一方

の点群へ適用し, 点群間の位置・姿勢を共通座標系上で整合させる。剛体変換推定は, 対応点誤差を最小化する最小二乗の枠組みで実行される。

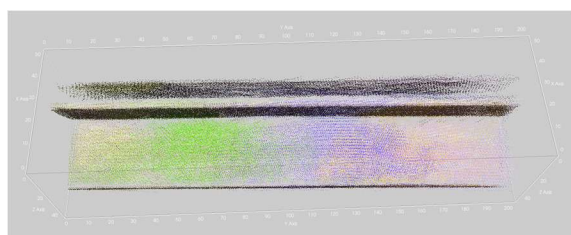
2.4. 解析手法

図5に, 計算領域の構築フローチャートを示す。3次元点群データのテキストデータは200万行であり, 座標・法線・RGB等を含めると1800万要素に相当する。3次元電磁熱流体解析プログラムにおけるメモリ消費を抑制するため, 3次元点群データの前処理を行う。まず, 0.2~4.0mm程度の間隔を指定し, 代表点を抽出する(間引き・ダウンサンプリング)。これは, 3次元電磁熱流体解析で用いる計算格子の代表スケールが概ね 10^{-1} ~ 10^0 mmオーダーであるためである。次に, 点群テキストデータに含まれるRGBは本解析の幾何構築には不要であるため削除する。前処理後の3次元点群テキストデータを3次元電磁熱流体解析プログラムで読み込み, 計算領域構築に用いる。

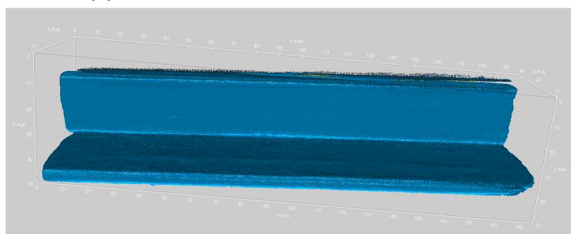
本研究の3次元電磁熱流体解析では, 有限体積法により空間離散化を行う。有限体積法は計算領域を有限個の制御体積(Control Volume: C.V.)に分割し, 各C.V.に対して支配方程式を積分形で立式する手法である。本研究で扱う支配方程式は, 質量保存式, 運動量保存式, エネルギー保存則, 電流連続の式, 一般化されたオームの式, ならびにマクスウェル・アンペールの式である。有限体積法では, 各C.V.境界面におけるフラックスを主要量として評価でき, 境界条件設定と整合した保存性が高い。

本研究では, 3次元点群データを計算格子の各C.V.に空間的に対応付けて配置する。次に近傍点探索を行い, 点同士を接続する。接続点数は最大6点程度となるように調整する。接続点数が過大になると, 異なるステンレス鋼面上の点を単一面として処理する割合が増し, 結果として角部形状が丸められて鈍角化する傾向が生じる。TIG溶接で想定する継手はT継手(T-joint)および角継手(Corner joint)であり, 異なるステンレス鋼面の交差角は幾何学的に90度である。したがって, 異なる面が90度として再現されるよう, 近傍点接続数および接続条件を調整する。

次に, 接続線分群から三角形要素を探索し, 三角形に基づいて面を定義する。本研究では, 抽出した三角形の3頂点 (X_0, Y_0, Z_0) , (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) をとする。 (X_0, Y_0, Z_0) から他の2頂点へ向かう2本の方向ベクトルをそれぞれ定義し, 媒介変数 s と t

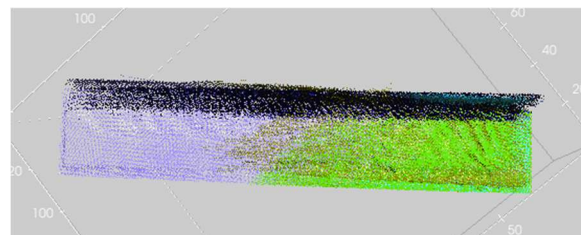


(a) 上面のステンレス鋼 (点群)

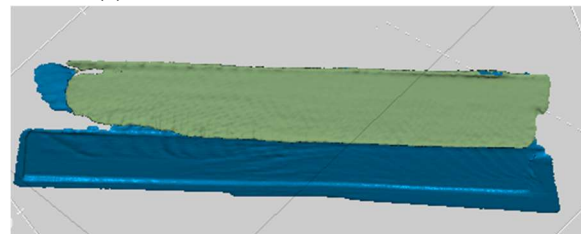


(b) 側面のステンレス鋼 (面処理後)

図 6 5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm の表面加工有の 3次元データ



(a) 上面のステンレス鋼 (点群)



(b) 側面のステンレス鋼 (面処理後)

図 7 1.0 mm × 30.0 mm × 300 mm の表面加工無の 3次元データ

を導入して三角形面上の任意点を表現する。具体的には、三角形面上の点 $\mathbf{r}(s,t)$ を以下の式で表す。

$$\mathbf{r}(s,t) = \mathbf{r}_0 + s(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0) + t(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_0)$$

ここで、 \mathbf{r}_0 , \mathbf{r}_1 , \mathbf{r}_2 は各頂点位置ベクトルである。三角形領域に限定するため、媒介変数の範囲を $s \geq 0$, $t \geq 0$, $s + t \leq 1$ とする。この範囲により、媒介変数表示は平面全体ではなく三角形面のみに対応する。この媒介変数式に基づき、3次元格子のインデックス (I, J, K) に対応する座標面との交差判定を行う。三角形領域と座標面の交わりは、「なし」「1点」「線分」のいずれかとなり、線分となる場合の交点は最大2点となる。算出した交点对から線分群を構成し、各座標面上における境界線分として配置する。最後に、構築した境界面に対して、質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、電流連続の式、一般化されたオームの式、ならびにマクスウェル・アンペールの式の境界条件を設定する。以上により、ステンレス鋼構造 (実形状) の幾何情報を反映した計算領域を形成し、構造のデジタルツインの解析基盤を構築する。

3. 3次元点群データを用いた計算領域の構築

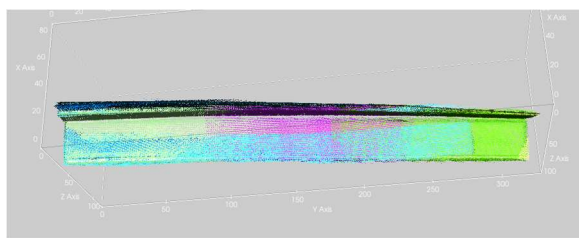
LiDAR を用いてステンレス鋼の3次元点群データを計測し、この計測結果に基づいて計算領域の構築を行った。

3.1. LiDAR によるステンレス鋼の計測

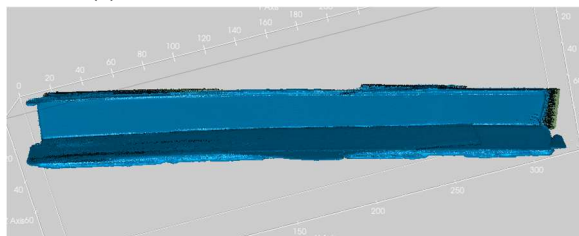
図 6 に、5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm の表面加工有のステンレス鋼における3次元データを示す。こ

で、図 6(a) は上面から取得したステンレス鋼の3次元点群データであり、図 6(b) は3次元点群スキャナ付属ソフトウェアを用いて浮遊点 (外れ点) 除去およびギャップ修復処理を施した後の、側面から見たステンレス鋼の3次元データである。XY 面におけるステンレス鋼の3次元点群データは長方形形状であった。これは、地面に対して水平に配置したステンレス鋼について、面全体の計測が行えたためである。これに対して、地面に対して垂直に配置したステンレス鋼の3次元点群データは、X 方向に対して複数の面形状として観測された。これは、アライメントにおいて設定した対応点に位置ずれが含まれたためである。また、3次元点群スキャナは法線ベクトルに基づいて面の向きを推定するため、ステンレス鋼表面に対する法線ベクトルの精度が低い場合、面の湾曲や位置ずれとして可視化される。ここで、本3次元点群データに対して、ソフトウェアによる浮遊点除去およびギャップ修復処理を行った。この結果、5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm の表面加工有ステンレス鋼では、均一な面が形成された。5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm の表面加工有ステンレス鋼について、3次元データから算出した長さは 236 mm であった。このため、3次元点群スキャナにおける長さの相対誤差は 21% であった。さらに、同データから算出した幅は 31.1 mm であった。このため、3次元点群スキャナにおける幅の相対誤差は 4% であった。

図 7 に、1.0 mm × 30.0 mm × 300 mm の表面加工無のステンレス鋼における3次元データを示す。



(a) 上面のステンレス鋼 (点群)



(b) 側面のステンレス鋼 (面処理後)

図8 5.0 mm × 30.0 mm × 300 mm の表面加工無の3次元データ

ここで, 図7(a) は上面から取得したステンレス鋼の3次元点群データであり, 図7(b) は3次元点群スキャナ付属ソフトウェアを用いて浮遊点除去およびギャップ修復を施した後の, 側面から見たステンレス鋼の3次元データである。XY面におけるステンレス鋼の3次元点群データは同様に長方形形状であったが, ステンレス鋼の境界近傍に床面の点群が含まれていた。これは, 板厚が1.0 mmと薄く, ステンレス鋼表面と床面の距離が小さいため, 点群の分離が困難となったためである。また, 板厚1.0 mmのステンレス鋼について, 地面に対して垂直な面の点群形状は, 板厚5.0 mmの場合と比較して, 面としての成立が少なかった。これらの3次元点群データに対して, ソフトウェアによる浮遊点除去およびギャップ修復を行った。しかし, 1.0 mm × 30.0 mm × 300 mmの表面加工無ステンレス鋼では不均一な面が形成された。これは, 表面加工無の金属光沢により近赤外光の反射条件が変化し, 点群の欠損やばらつきが増加したためである。1.0 mm × 30.0 mm × 300 mmの表面加工無ステンレス鋼について, 3次元データから算出した長さは274 mmであった。このため, 3次元点群スキャナにおける長さの相対誤差は9%であった。また, 同データから算出した幅は31.7 mmであった。このため, 3次元点群スキャナにおける幅の相対誤差は6%であった。

図8に, 5.0 mm × 30.0 mm × 300 mmの表面加工無のステンレス鋼における3次元データを示す。

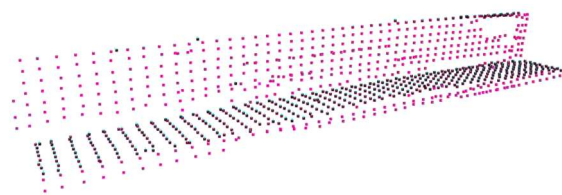


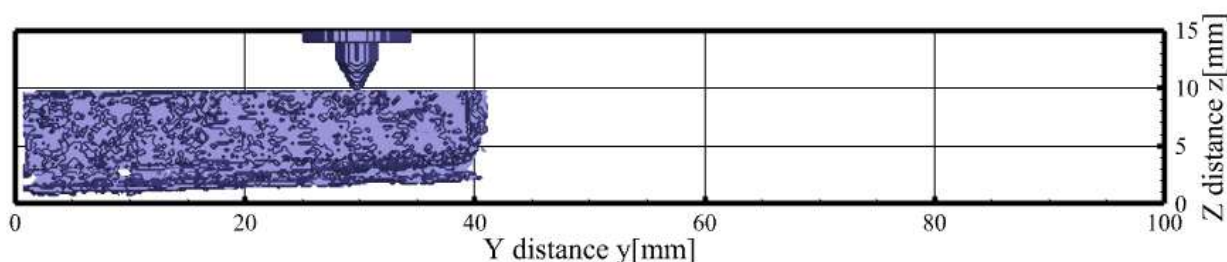
図9 2.0 mm 間隔の3次元点群データの前処理結果

ここで, 図8(a) は上面から取得したステンレス鋼の3次元点群データであり, 図8(b) は3次元点群スキャナ付属ソフトウェアを用いて浮遊点除去およびギャップ修復処理を施した後の, 側面から見たステンレス鋼の3次元データである。XY面におけるステンレス鋼の3次元点群データは同様に長方形形状であった。また, 板厚5.0 mmのステンレス鋼において地面に対して垂直な面の点群形状は湾曲していた。これは, 計測対象のステンレス鋼自体が湾曲していたためである。これらの3次元点群データに対して, ソフトウェアによる浮遊点除去およびギャップ修復を行った。5.0 mm × 30.0 mm × 300 mmの表面加工無ステンレス鋼では均一な面が形成された。これは, 5.0 mm板の表面状態が1.0 mm板と比較して点群取得の精度が高いことを示している。これらの結果から, 均一な3次元データ取得の観点において, 金属光沢が小さい条件が適していることが示唆された。5.0 mm × 30.0 mm × 300 mmの表面加工無ステンレス鋼について, 3次元データから算出した長さは339 mmであった。このため, 3次元点群スキャナにおける長さの相対誤差は13%であった。また, 同データから算出した幅は30.4 mmであった。このため, 3次元点群スキャナにおける幅の相対誤差は1%であった。

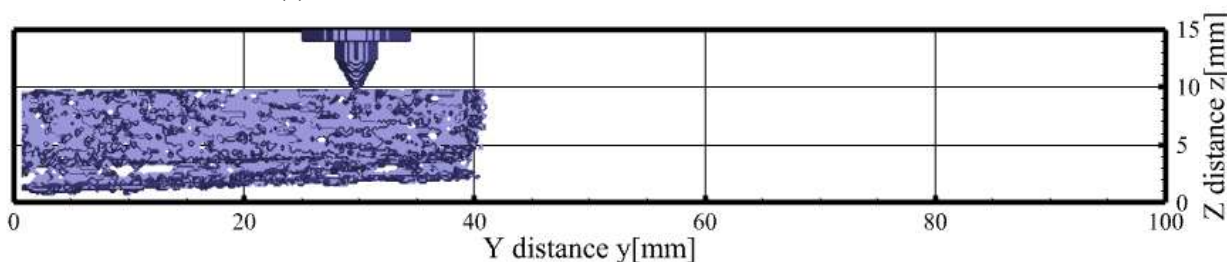
本計測の9条件における長さの相対誤差のオーダーは9~23%であった。この結果から, 300 mmオーダーの長さ評価では計測ばらつきが相対的に大きいことが示唆された。これに対して, 本計測の9条件における幅の相対誤差のオーダーは1~6%であった。この結果から, 3次元点群スキャナの視野内での移動距離(あるいは合成に伴う累積誤差)が小さい寸法評価では, 計測ばらつきが相対的に小さくなることが示唆された。

3.2. 3次元点群データの前処理

3次元電磁熱流体解析プログラムにおけるメモリ



(a) 1.0 mm 間隔の 3次元点群データを用いた計算領域



(b) 2.0 mm 間隔の 3次元点群データを用いた計算領域

図 10 3次元点群データを用いて構築した計算領域

容量の消費を抑制するため、3次元点群データの前処理を行った。本研究では、0.2 mm, 1.0 mm, 2.0 mm 間隔で代表点を指定した。図 9 に、2.0 mm 間隔の 3次元点群データの前処理結果を示す。前処理後の 3次元点群データは、T 継手形状を保持した。

また、前処理後の 3次元点群テキストデータは 1 万行であり、6 万要素であった。このため、前処理前データに対して 1/300 の要素数で読み込みが可能となった。

3.3. 3次元直交座標系における計算領域の構築

0.2 mm 間隔の 3次元点群データは要素数が多く、3次元電磁熱流体解析プログラムで読み込むことができなかった。このため、1.0 mm および 2.0 mm 間隔の 3次元点群データを用いて計算領域の構築を行った。図 10 に、3次元点群データを用いて構築した計算領域を示す。ここで、図 10(a) は 1.0 mm 間隔の 3次元点群データを用いた計算領域であり、図 10(b) は 2.0 mm 間隔の 3次元点群データを用いた計算領域である。また、青色の領域は固体表面（固体領域境界）を表す。両条件における溶接トーチは、 $y=30$ mm の位置に配置して構築した。

1.0 mm 間隔の 3次元点群データを用いたステンレス鋼領域は、均一な領域として再現された。これに対して、2.0 mm 間隔の 3次元点群データを用いたステンレス鋼領域は、不均一な領域として再現された。これは、代表点間隔が大きく、三角形要素を構

築する際に空洞が生じたためである。これらの結果から、メモリ容量の消費を抑制しつつ、3次元点群データを用いた計算領域構築が可能であることを確認した。

さらに、3次元点群データを用いて構築したステンレス鋼の長さは 40 mm 程度、幅は 5 mm 程度であった。これらの結果から、3次元点群データを用いて構築したステンレス鋼の寸法は、実寸と比べて 1/6 程度となった。これは、計算領域構築フローにおいて、3次元点群スキャナー付属ソフトウェアで実施したギャップ修復処理操作を、解析側の幾何処理に反映できていないためである。今後のアーク溶接数値解析においては、実寸に対する点群寸法の倍率を算出した上で、ギャップ修復処理操作を幾何処理手順に追加する。さらに、設定した固体領域に対して、質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、電流連続の式、一般化されたオームの式、ならびにマクスウェル・アンペールの式の境界条件を設定する。

4. まとめ

本研究では、アーク溶接のデジタルツイン構築に向けて、LiDAR により取得したステンレス鋼の 3次元点群データを用い、3次元電磁熱流体解析に適用可能な計算領域の構築を行った。主な結果は以下の通りである。

根本, 長沢, 谷上: アーク溶接のデジタルツインに向けた3次元点群データを用いた計算領域の構築

- (1) 3次元点群計測において, 板厚および表面状態が点群品質に影響した。特に, 表面加工有のステンレス鋼では浮遊点除去およびギャップ修復処理後に均一な面の形成が容易である。一方, 表面加工無で金属光沢が大きい条件では点群欠損や面の不均一化が生じ, 形状再現性が低下する傾向が確認された。また, 3枚のステンレス鋼を組み合わせた9条件の計測において長さ方向の相対誤差は9~23%程度, 幅方向の相対誤差は1~6%程度であり, 寸法評価の方向によってばらつきが大きさが異なることが示唆された。
- (2) 3次元電磁熱流体解析におけるメモリ消費を低減するため, 点群データの前処理(代表点抽出およびRGB情報の削除)を行い, 点群要素数を削減した。代表点間隔の設定により形状保持とデータ削減の両立が可能であり, 前処理後の点群データは継手形状(T継手形状)を保持した状態で解析プログラムに入力可能となった。
- (3) 前処理した点群データ(1.0 mm および 2.0 mm 間隔)を用いて, 三角形要素に基づく面構築および直交座標系上での境界面生成を実施し, 計算領域を構築した。1.0 mm 間隔では固体領域が比較的均一に再現された。一方, 2.0 mm 間隔では代表点間隔の増大に起因して三角形構築時に空洞が生じ, 不均一な領域となる傾向が確認された。さらに, 構築された固体寸法が実寸に対して約1/6となる事象が認められ, 3次元点群スキャナー付属ソフトウェアで実施したギャップ修復処理が計算領域構築フローに十分反映されていない可能性が示された。

以上より, 3次元点群データを用いた計算領域の構築が可能であることを示した。今後は, 点群寸法と実寸の倍率を定量化して幾何処理へ反映し, ギャップ修復相当の処理を計算領域構築手順に組み込むとともに, 構築した固体境界に対する支配方程式の境界条件設定を行い, 実形状およびトーチ移動を考慮した3次元電磁熱流体解析へ展開する。

謝辞

本研究は, 本研究は JSPS 科研費 JP24K17269 の助成を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) 厚生労働省: 「バランスシート」, <https://jsite.mhlw.go.jp/tokyohellowork/content/contents/001708976.pdf> (最終閲覧 2024/6/20)
- 2) S. Ichinose, Y. Kusakari, H. Morishita, M. Takagi, Y. Suzuki, Z. Ren, Y. Nemoto, G. Reggie, T. Iwao: "Contribution to Bead Width Using Welding Torch Feedback Control with Real-time AI Discrimination", 75th Annual Gaseous Electronics Conference, HT4. 053 (2022)
- 3) S. Ichinose, H. Sukegawa, H. Morishita, M. Takagi, Y. Suzuki, Z. Ren, Y. Nemoto, T. Iwao: "Control of Bead Width for Prevention of Weld Defect Using Feedback Control with AI in TIG Arc Welding", 電気学会研究会資料 EPP-22-074 SA-22-041 SP-22-009, pp.47-51 (2022)
- 4) Y. Nemoto, S. Iwata, Y. Maeda, T. Iwao: "Analysis of electron and heavy particle velocity distribution under consideration of nonthermal equilibrium arc", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.102, Issue11, pp.9-15 (2019), <https://doi.org/10.1002/ecj.12214>
- 5) 根本 雄介, 鈴木 祐揮, 任 振威, 真栄田 義史, 岩尾 徹: 「リストライク現象の解明に向けた横風吹き付け時のアークの電子と重粒子温度分布の解析」, 電学論 B, Vol. 142, No. 4 (2022), <https://doi.org/10.1541/ieejpes.142.228>

(2025年12月4日 受理)

鉄道模型製作を通じた創造性と技術スキル向上の教育的研究

西村亮*, 堤博貴**

本研究は、鉄道模型製作を通じて学生の技術スキルと創造性を向上させ、地域社会との連携を深めることを目的とした研究である。近年、STEAM 教育が注目される中、創造性を育むカリキュラムの不足が課題とされている。本研究では、3 次元 CAD や 3D プリンティング技術を活用した鉄道模型製作を教育モデルとして活用し、学生が試行錯誤を重ねながら技術を習得する学びの場を提供する。また、地域住民との交流を通じた社会貢献を図り、継続的な PBL 教育プログラムの構築を目指すものである。

(キーワード: 鉄道模型, PBL 教育, 3D プリンタ, 3 次元 CAD, モデリング)

Educational Research on Enhancing Creativity and Technical Skills through Railway Model Production

Makoto NISHIMURA *, Hiroataka TSUTSUMI **

This study aims to enhance students' technical skills and creativity through railway model production while strengthening connections with the local community. In recent years, STEAM education has garnered attention, highlighting the challenge of insufficient curricula for fostering creativity. This research utilizes railway model production incorporating 3D CAD and 3D printing technologies as an educational model, providing students with a learning environment where they acquire skills through iterative trial and error. Furthermore, the study seeks to promote social contributions by engaging with local residents and aims to establish a sustainable PBL (Project-Based Learning) education program.

(Keywords: Railway Models, PBL Education, 3D Printer, 3D CAD, Modeling)

1. はじめに

1.1. 研究背景

近年、社会全体の急速な技術革新に伴い、教育現場においても、理数系の基礎知識を統合的に活用する STEAM 教育が求められている¹⁾。STEAM 教育は、科学 (Science)、技術 (Technology)、工学 (Engineering)、芸術 (Art)、数学 (Mathematics) を融合し、創造性や課題解決能力を育成することを目的としている²⁾。日本でも STEAM 教育の導入事例は増えているが、カリキュラム整備や学生の主体性を引き出す工夫が課題である^{3),4)}。

特に、創造性を育む教育プログラムが不足していることが課題とされており⁵⁾、従来の座学型学習では、学生が自発的にアイデアを形にする能力を十分に養うことが難しいとの指摘がある⁶⁾。これに対応するためには、実践的なプロジェクトを通じて、学生が試行錯誤を重ねながら技術を習得する学習環境が必要である⁷⁾。

鉄道模型製作は、3 次元 CAD や 3D プリンティ

ング技術を活用した設計・製作を通じて、STEAM 教育の理念を実現する可能性を秘めた活動である。さらに、地域との連携を通じて学生が社会と接点を持つことにより、教育効果がさらに高まると期待される。

1.2. 先行事例

3 次元 CAD や 3D プリンティングを活用した教育実践はこれまでも多くの研究で取り上げられている。たとえば、田中ら⁸⁾ は、設計・製作学習が学生の技術スキルと創造性の向上に寄与することを示している。また、佐藤ら⁹⁾ は、フォーミュラカー製作を通じた PBL (プロジェクト型学習) を報告し、CAD 設計と製作プロセスが学生の課題解決能力とチームワークの向上に効果的であると述べている。

一方、大谷¹⁰⁾ は、地域課題をテーマにした STEAM 教育モデルの構築を提案し、学生の主体性を引き出すための学びの場が地域社会との連携

* 情報工学科 ** 機械工学科

を通じて形成されることを示した。また、村上¹¹⁾は、3次元 CAD 教育を通じて、学生の視点変換能力や設計力が向上することを実証している。

これらの先行事例から、3次元 CAD や 3D プリンティングを活用した教育が技術スキルの向上に寄与するだけでなく、地域社会との協力を通じて学生の社会的スキルを高める可能性が確認される。

1.3. 研究目的

本研究では、鉄道模型製作を通じて以下を目的とする。

- ① 技術スキルと創造性の深化：3次元 CAD や 3D プリンティング技術を用いた設計・製作を通じて、学生が創造的かつ技術的な課題解決能力を向上させる。
- ② 地域連携の強化：模型製作を通じて地域文化や歴史を学び、地元住民との交流を深めることで、地域社会とのつながりを強化する。
- ③ 継続的な教育モデルの提案：課題解決型学習 (PBL) を継続的に実践することで、学生が主体的に取り組む教育プログラムを構築する。

本研究は、鉄道模型製作を中心とした教育モデルが、STEAM 教育 (図 1) の概念を実現し、学生の成長と地域社会への貢献を両立する新たな学びの形を提供できることを示す。

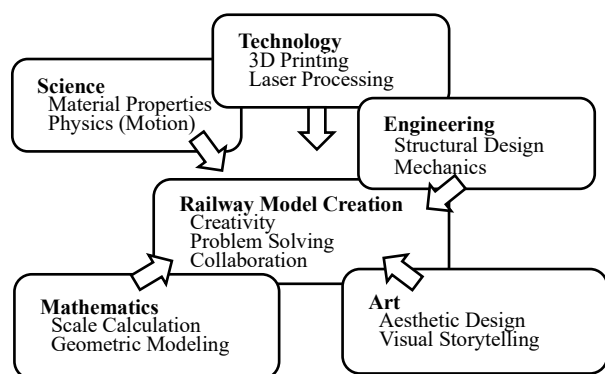


図 1 STEAM 教育における鉄道模型製作の位置付け (イメージ図)

2. 鉄道模型製作の概要

2.1. 鉄道同好会の活動内容

東京高専の鉄道同好会は、2023 年度に発足し、現在 20 名の部員で構成されている。表 1 に 2024 年度の活動内容の一覧を示す。同好会では、5 インチゲージの乗車型鉄道模型の運行、N ゲージ鉄道模型やプラレールの運転会を主な活動としてい

る。これらの活動は、文化祭や学校のオープンキャンパス、地域イベントなどで実施され、学生の技術力向上や創造性育成を目的とするとともに、地域住民や子どもたちとの交流を深める機会を提供している。

図 2 は、2023 年の文化祭における同好会の活動風景を示している。多くの来場者が展示を楽しみ、特に子どもたちの興味を引いた。2023 年 5 月に立川立飛で開催されたイベントでは、5 インチ鉄道模型を用いた運行体験が行われた (図 3)。この運行では、子どもたちが模型に乗車して楽しむ姿が印象的であり、技術的な仕組みの紹介も行われた。

表 1 鉄道同好会の活動内容一覧

日付	イベント名	内容
2024/3	オープンキャンパス	N ゲージ運行
2024/5	高校生乗車型ミニ鉄道フェスティバル in 立川立飛	5 インチ乗車型鉄道模型の運行
2024/5	八王子大学生文化祭	5 インチ乗車型鉄道模型の運行
2024/6	八王子市子ども科学館	5 インチ乗車型鉄道模型の運行、ものづくりワークショップ、地域住民との交流
2024/8	オープンキャンパス	N ゲージ運行、プラレール展示・運転
2024/9	プラレール運転会	プラレール展示・運転
2024/11	文化祭	N ゲージ運行、プラレール展示・運転、ものづくりワークショップ
2025/1	八王子ビートレインズ トレインズデー	N ゲージ運行、ものづくりワークショップ



図 2 文化祭における鉄道同好会の活動風景 (2024 年 11 月)



図3 立川立飛での5インチ鉄道模型運行風景 (2024年5月)

2.2. 製作の動機とプロジェクトの流れ

鉄道模型製作を通じて学生が設計から製作までのプロセスを体験し、地域イベントで披露することで地域連携を強化することが目的である。活動は以下のように進行している。

- ① 企画段階: 各イベントに向けた展示内容や運行プランを部員で議論し、模型の設計や製作計画を立案する。
- ② 設計・製作段階: 3次元CADを使用して鉄道模型の詳細設計を行い、学校所有の3Dプリンタを活用して部品を製作する。部員は製作作業を分担しながら、試行錯誤を重ねて模型を完成させる。
- ③ 展示・運行段階: 完成した模型を文化祭やオープンキャンパス、地域イベントで披露し、訪問者との交流を通じて成果を発表する。

2.3. 鉄道模型コンテストへの挑戦と成果

鉄道同好会は、2023年および2024年の鉄道模型コンテスト¹²⁾に参加し、それぞれ以下の成果を上げている。

- ① 2023年: ベストクオリティ賞を受賞。独創的な設計と丁寧な仕上がりが評価された。図4は、2023年の鉄道模型コンテストで作成されたプレゼンテーションを示している。この作品は地域の歴史的背景を忠実に再現したもので、訪問者から高い評価を受けた。
- ② 2024年: 奨励賞を受賞。地域文化との融合をテーマにした展示が好評を得た。

2.4. 模型運転会の実施

文化祭で行われたNゲージ運転会では、来場者が自由に操作を体験できる展示を行った。また、八王子市子ども科学館では、5インチ乗車型鉄道模型運転会を実施し、地域住民との交流を深めた(図5)。このイベントでは、子どもたちが自分で操作する楽しさを体験し、学生たちが運営や技術の説明を行った。



図4 2023年度に鉄道模型コンテストで製作したポスター (2024年8月)



図5 八王子市子ども科学館での5インチ乗車型鉄道模型運転会の様子 (2024年6月)

3. 3Dプリンティング技術の活用

3.1. 使用した機材と技術概要

本研究では、鉄道模型の製作において、社会実装センターに設置された最新の3Dプリンタを活用した。使用した機材には、ELEGOO Jupiter SE レ

ジン 3D プリンタが含まれている。このプリンタは、12.8 インチの 6K モノクロ LCD を搭載した MSLA (Masked Stereolithography Apparatus) 方式を採用しており、大型サイズかつ高精細な印刷が可能である。これにより、模型の小型パーツやディテールの再現において重要な役割を果たした。

また、設計には 3 次元 CAD ソフトウェアである SolidWorks 2024 (以下、「SolidWorks」という。) を使用した。このソフトウェアは、複雑な形状のモデリングや設計効率の向上に寄与し、特に連結器やシャシーのように機能性が求められる部品の設計において効果を発揮した。図 6 は、SolidWorks で設計された鉄道車両模型の CAD モデルを示しており、部品の細かい構造が詳細に設計されている様子がわかる。これらの機材と技術を活用することで、設計から製作までの一連のプロセスを高精度で進めることができた。図 7 では、このプリンタを使用して製作された部品の精細な仕上がりが確認できる。

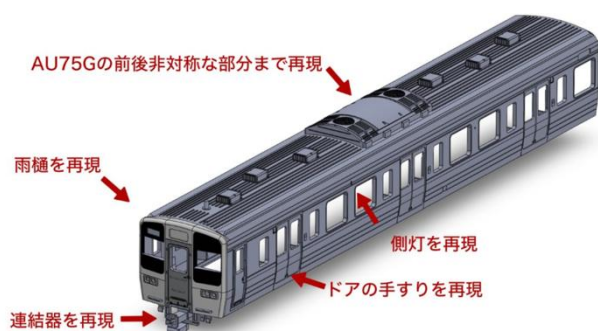


図 6 設計された CAD モデル (例：車両模型)



図 7 3D プリンタで製作された部品の仕上がりが

3.2. 3次元 CAD を用いた設計プロセス

鉄道模型の設計は、以下のプロセスで進行した。

- ① 初期設計：模型全体のスケールやレイアウトを決定し、必要な部品をリストアップした。
- ② モデリング：各部品の 3D モデルを作成し、構造強度や形状の一貫性を考慮して設計を進めた。特に、3D プリンタの性能を活かし、レジンプリンタ用に最適化されたディテールを重視した。
- ③ シミュレーション：設計段階で強度や動作を確認するためのシミュレーションを実施した。その結果を基に設計を修正し、最適化を図った。
- ④ データ出力：完成したモデルを STL 形式で書き出し、プリンタに送信した。出力時には、サポート材の配置やプリント方向を細かく調整した。

3.3. 学校設備を活用した製作環境

社会実装センターには、高性能な 3D プリンタだけでなく、製作をサポートするための各種設備が整備されている。作業環境とプロセスの特徴は以下の通りである。

- ① 大型レジンプリンタの利用：高精度部品の製作が可能となり、従来の FDM 方式では再現が難しかった細部を正確に作ることができた。
- ② 効率的な作業体制：部員ごとに担当パーツを割り振り、製作を分担した。また、作業進捗を定期的に共有し、全体の効率化を図った。
- ③ 後加工作業の整備：出力後の部品に対してサポート材の除去やレジン硬化処理を行い、模型としての精度と耐久性を高めた。

これらの取り組みにより、鉄道模型の細部まで再現可能な高品質な部品製作を実現した。また、製作プロセスを通じて、学生が最新の 3D プリンティング技術に触れる機会が得られ、技術力の向上につながった。

4. 具体的な製作事例

4.1. 御陵線武蔵横山駅の復元プロジェクト

京王御陵線は、かつて地域の主要な交通手段であった路線であり、廃線となった現在でも多くの地元住民に親しまれている。本プロジェクトでは、この御陵線の武蔵横山駅を復元することを目的に模型製作を行った。

製作は以下の手順で進めた。図 8 は、完成した

武蔵横山駅模型を展示した様子を示している。駅舎の装飾やプラットフォームのディテールにこだわった点が特徴であり、模型全体にリアリティを持たせている。

- ① 歴史資料の収集: 地元の図書館や歴史資料館で御陵線に関する資料を調査し、武蔵横山駅の構造や駅舎の外観を把握した。写真や図面をもとに詳細な設計を行った。
- ② CAD による設計: SolidWorks を用いて駅舎やプラットフォームを設計した。設計段階では、駅舎の外観を正確に再現するため、建物のディテールや装飾を考慮した。
- ③ 3D プリンティングによる製作: レジン方式の3D プリンタを使用して、細部にこだわった駅舎模型を出力した。プリント後は塗装作業を行い、実物に近い質感を再現した。

完成した模型は文化祭や鉄道模型コンテストで展示され、多くの来場者から好評を得た。特に地元住民からは「かつての駅を思い出す」といった感想が寄せられ、プロジェクトの意義が評価された。



図8 武蔵横山駅復元模型のコンテストにおける展示 (2023年8月)

4.2. 信越本線横川駅の模型製作と地元住民との交流

群馬県に位置する信越本線横川駅は、鉄道輸送の要所として歴史的価値が高い駅である。本プロジェクトでは、横川駅をテーマにした模型製作を通じて、地元住民との交流を図った。

製作は以下の手順で進めた。図9は、完成した横川駅模型を展示した様子を示している。来場者が模型を囲みながら地域の歴史について議論して

いる場面が特徴である。

- ① 現地取材と交流活動: 部員が現地を訪問し、駅舎やプラットフォームの構造を観察するとともに、地元住民や鉄道愛好家から駅の歴史や当時のエピソードを収集した。この過程で住民との交流が深まり、プロジェクトへの協力体制が整った。
- ② 模型の設計と製作: SolidWorks を用いて横川駅の模型を設計した。駅舎の外観やホームの配置、線路周辺の風景を忠実に再現するため、取材で得た写真やメモを設計に反映させた。
- ③ 展示と地域交流イベント: 完成した模型は文化祭で展示され、住民との共同製作の成果を発表した。来場者が模型を囲みながら地域の歴史について語り合う場となり、地域文化の継承に寄与した。



図9 横川駅模型とコンテストの展示で来場者と交流する様子 (2024年8月)

4.3. HOゲージ車両模型の製作

鉄道模型製作の一環として、HOゲージスケールの車両模型も製作した。本プロジェクトでは、実在する車両をモデルにし、設計・製作のプロセスを通じて技術力を向上させることを目指した。

- ① 車両の選定と設計: 実在する車両を参考に選定し、SolidWorks で詳細な車両設計を行った。車両の外観だけでなく、走行性能や動力機構の再現も目指した。
- ② 製作と組み立て: 車体や車輪、連結器などの部品を3Dプリンタで出力し、組み立てを行った。
- ③ 文化祭等における展示: 完成した模型は鉄道模型コンテストに出品し、文化祭においても展示した。詳細に再現した模型を自ら製作できることを示すことができた。

図10は、完成したHOゲージ車両模型を示して

いる。車両の外観や連結器の再現性が高く、細部まで丁寧に作り込まれている点が特徴である。



図 10 HO ゲージ車両模型の完成品

5. 学生への教育効果

5.1. 技術スキルの向上

鉄道模型製作のプロジェクトを通じて、学生は最新の設計技術や製作技術を実践的に習得した。

- ① CAD 技術の習得と応用：SolidWorks を使用した 3D 設計において、学生が初めて CAD に触れる場面も多かった。基本的な操作から始まり、複雑な部品のモデリングやシミュレーションを行う中で、設計の効率化や精度向上に関するスキルが大幅に向上した。また、学生同士で設計データを共有し、協力して作業を進めることで、設計プロセス全体を理解する力が養われた。
- ② 3D プリンティング技術の実践経験：レジン方式の 3D プリンタを活用した高精細な出力を通じて、学生は 3D プリンタの特性を理解し、適切なプリント条件（材料設定、サポート材の配置など）を調整する力を身につけた。また、製作後の後加工を通じて、模型を実用的に仕上げる技術も習得した。これにより、デジタル設計からフィジカルな形状への変換を一貫して体験することができた。

5.2. 創造性と課題解決能力の向上

鉄道模型製作は、学生が創造性を発揮し、具体的な形にする場として機能した。

- ① 模型製作を通じた創造性の発揮：各プロジェクトにおいて、学生がアイデアを出し合い、それを具現化するプロセスを経験した。特に、御陵線武蔵横山駅の復元プロジェクトでは、歴史資料を基に独自のデザインを加える試みが行われた。横川駅模型の製作では、地元住民の意見を取り入れながら、細部にまでこだわった設計が行われた（図 11）。
- ② 課題解決能力の向上：模型製作の過程では、設計の不具合や製作エラーなどの問題が発生し

た。これに対し、学生たちは設計変更や製作手順の見直しを行い、協力して課題を解決する力を養った。これらの取り組みを通じて、実践的な問題解決能力が明確に向上した。



図 11 学生による製作の様子（2023 年 7 月）

5.3. 学生へのインタビュー結果と教育効果の分析

約 10 名の学生に今回の取組を通じて、①どのような成果があったか？②どのような成長があったか？③その他自由意見、のインタビューを行った。

プロジェクト終了後に実施した学生向けのインタビューでは、①技術スキルが向上した、②創造性を発揮できた、③チームでの作業が学びに役立った、との回答が得られた。これらの結果から、鉄道模型製作が学生の技術力や創造性の向上に寄与したことがうかがえる。また、チームでの作業を通じて、協調性やコミュニケーション能力も向上したと考えられる。

学生の自由記述には以下のような感想が寄せられた。

「初めての CAD 設計は難しかったが、完成品を見て達成感があった」

「プリント後の組み立てで失敗もあったが、試行錯誤を重ねて改善できた」

「地元の方々と話しながら模型を作ることで、新しい発見が多かった」

これらの感想は、学生がプロジェクトを通じて達成感を得るとともに、地域住民との交流を通じた学びも重要であることを示している。

6. 地域活動と社会的貢献

6.1. 地域イベントへの参加

鉄道同好会では、5 インチ鉄道模型の運行や N ゲージ、プラレールの展示を通じて、地域住民との交流を深めるイベントに積極的に参加している。これらの活動は、模型製作の成果を発表する場であると同時に、地域社会への貢献の機会として位置づけられている。

- ① 5 インチ鉄道模型の活用: 5 インチ鉄道模型は、乗車可能なスケール感や運行体験の楽しさから、地域イベントの目玉として高い評価を受けている。特に、2023 年 5 月に開催された「高校生乗車型ミニ鉄道フェスティバル in 立川立飛」では、多くの来場者が乗車体験を楽しんだ。このイベントでは、模型の運行を通じて鉄道の仕組みや安全性に関する説明を行い、幅広い世代に好評を得た (図 3)。
- ② 鉄道模型を通じた地域交流の実例: 八王子市子ども科学館 (図 5) での展示会やオープンキャンパスでは 5 インチ鉄道模型の試乗会のほか、N ゲージやプラレールを活用した運転会を実施した。これらのイベントでは、来場者が自由にジオラマ製作できる体験型のコーナーを設け、模型の魅力を直接体感できる機会を提供した。また、地域住民と学生が対話を深め、鉄道模型を介した新たなつながりが生まれた。

6.2. コミュニティとの協力体制とその意義

地域活動を成功させるためには、地域住民や施設との協力体制が欠かせない。同好会の活動は、地域コミュニティと共に成長することを目指し、以下のような取り組みを行っている。

- ① 地元施設との連携: 八王子市子ども科学館との連携や地元施設で開催されたイベントへの参加を通じて、イベントの実施環境を整えている。これにより、模型運行や展示が安全かつ円滑に行われ、来場者の満足度向上にもつながっている。
- ② 地域住民との共同作業: 横川駅の模型製作では、地元住民から歴史資料や写真を提供してもらい、製作過程にも協力を仰いだ。このような取り組みは、地域文化の再発見や継承に寄与するとともに、学生が地域社会への理解を深める貴重な経験となっている (図 12)。
- ③ 意義と成果: これらの活動を通じて、学生は単

なる技術習得にとどまらず、社会貢献の意義を学ぶことができた。また、地域社会にとっても、模型製作の成果を共有することで文化的価値の創出につながり、双方にとって有益な協力関係が築かれた。



図 12 横川駅模型製作の際に現地取材で撮影した写真 (2024 年 5 月)

7. おわりに

7.1. 研究成果のまとめ

本研究では、鉄道模型製作を通じて、学生の技術スキルや創造性を向上させるとともに、地域社会との連携を強化する取り組みを実施した。本研究の主要な成果を以下にまとめる。

- ① 技術スキルの向上: 3 次元 CAD やレジン方式の 3D プリンタを活用した設計・製作プロセスを通じて、学生は高度な技術を習得した。特に、精密な部品製作や設計シミュレーションの活用により、課題解決能力が向上した。
- ② 創造性と課題解決能力の育成: 模型製作における試行錯誤や設計改良のプロセスを通じて、学生の創造力が発揮され、実践的な問題解決能力が向上した。
- ③ 地域連携の実現: 武蔵横山駅の復元模型や横川駅の模型製作プロジェクトでは、地域住民との交流が活発に行われた。この取り組みを通じて、地域文化の継承と教育的価値の創出に寄与した。
- ④ STEAM 教育の実現: 本プロジェクトは、科学、技術、工学、芸術、数学を統合した STEAM 教育の理念に基づき、創造性や技術的実践力を育む学びの場として機能した。この成果は、STEAM 教育の具体的な実践例として位置づけることができる。
- ⑤ 社会的貢献: 5 インチおよび N ゲージ鉄道模

型, プラレールを用いた地域イベントへの参加を通じて, 多くの来場者に鉄道模型の魅力を伝えるとともに, 地域社会への貢献を果たした。以上のように, 本研究は教育的価値と社会的意義を兼ね備え, 多方面で成果を上げることができた。

7.2. 今後の展望

本研究の成果を基盤として, 以下のような発展的な取り組みを計画している。

- ① 鉄道模型プロジェクトの拡大計画: 今後は, より大型で複雑な鉄道模型の製作に挑戦し, 新たな技術やデザインの導入を検討する。また, 運行システムの自動化や IoT 技術を活用した制御機能の導入を進め, 技術的な挑戦を広げる計画である。これにより, 学生がさらに高度な技術に触れる機会を広げる。
- ② 地域連携の強化と教育効果の向上: 地域イベントでの展示や運行に加え, 地元学校や文化施設とのコラボレーションを強化する。具体的には, 地域住民との共同製作やワークショップの開催を通じて, 地域コミュニティとの協力体制を一層強化し, 地域社会とのつながりを深める。
- ③ 教育プログラムのモデル化と展開: 鉄道模型製作を中心とした PBL 型教育プログラムを体系化する。このプログラムは, STEAM 教育の理念を反映し, 科学・技術・芸術を融合した次世代型学習モデルとして他校への展開を目指す。地域課題をテーマに設定することで, 地域文化や産業との連携を促進し, 学生の社会的意識と実践力を高める教育プログラムとして発展させる。
- ④ STEAM 教育のさらなる深化: 鉄道模型製作を通じた STEAM 教育を拡大し, 創造性や実践力を育むだけでなく, 技術的革新を通じた持続可能な地域社会の発展に寄与する新たな教育モデルを目指す。

今後も, 鉄道模型製作を通じて学生の成長を促し, 地域社会に貢献する取り組みを継続することで, 教育的価値と社会的意義を追求していく考えである。

参考文献

- 1) 文部科学省: STEAM 教育の推進に向けて, 文部科学省レポート, 2020 年。
- 2) 文部科学省: STEAM 教育への取り組み, 文部

科学省レポート, pp.1-18, 2020 年。

- 3) 柳原みず季, 大谷忠: PBL 教育における実践研究の分析結果に基づいた問題解決学習の特徴, 日本科学教育学会年会論文集, 44 巻, pp.65-72, 2020 年。
- 4) 田中洋介, 伊藤直哉: 地域課題解決型 PBL 教育における設計・製作活動の事例報告, 地域社会学会年報, 35 巻, pp.89-98, 2021 年。
- 5) STEAM JAPAN: ジオラマで STEAM 教育, STEAM JAPAN レポート, pp.10-15, 2019 年。
- 6) 及川和広, 村上存: 3 次元 CAD による構想設計の教育とその効果, 日本機械学会論文集, 73 巻, 729 号, pp.1410-1417, 2012 年。
- 7) 山田一成: 3 次元 CAD による製図・設計教育が視点変換行為の形成に及ぼす効果, 技術教育学会誌, 49 巻, 1 号, pp.36-45, 2017 年。
- 8) 田中真二, 竹尾和子, 高橋秀智: 3 次元 CAD を用いた設計・再設計過程を含む設計・製作学習の提案と学習効果の検討, 日本技術教育学会誌, 60 巻, 1 号, pp.25-33, 2018 年。
- 9) 佐藤洋一 他: CAD を利用したフォーミュラカーの設計教育, 明星大学研究紀要, 43 巻, 1 号, pp.112-120, 2012 年。
- 10) 大谷忠: 日本型 STEM・STEAM 教育モデル形成のあり方に関する一考察, 日本科学教育学会年会論文集, 47 巻, pp.45-52, 2022 年。
- 11) 村上存, 濱口哲也, 及川和広: 東京大学機械系三学科における 3 次元 CAD による設計教育, 日本設計工学会誌, 42 巻, 11 号, pp.1021-1030, 2010 年。
- 12) 一般社団法人鉄道模型コンテスト: 鉄道模型コンテスト公式サイト, 閲覧日: 2025 年 1 月 16 日。

(2025 年 1 月 2 日 受理)

高専生に向けたコンピュータと分散ネットワーク教材の作製と実装 —コンピュータ, ネットワーク教育の発展に向けて—

田中 晶*, 細川 翼**, 小川 仁希*, 梶 亮平*, 渡辺 克樹*

平成 24 年 (2012 年) から田中研究室で毎年担当させていただいている八王子市小学校科学教育センターの「インターネットとプログラミング」講座, さらに, 出張授業, 公開授業などで, 小中学生向けにコンピュータやインターネットの仕組みを中心に, サーバ上のオンライン教材やスタンドアロン教材を設計し使用して実績を重ねてきた。授業で教材が備える要件の一つは, 受講生に興味を持ってもらえる設計であり, 受講生の当日の状況やアンケート等からも要求に十分応えられている。一方で, 田中研究室では高専生向けのコンピュータやネットワーク学習教材の設計も進め, 特に, CPU 内部を操作しその処理の様子を確認できるコンピュータシミュレータや, マルチホップネットワークの仕組みを使いデータ処理も観察できるハードウェア連携のオンライン教材について, 昨年度と今年度に本科と専攻科の正課授業で使用し良好な結果を得た。低年齢層向け教材設計からのフィードバックも上級生向けに大いに効果があり, 逆に上級生向け教材を簡易化して低学年に適用すると, 将来の道筋を見出す役割にもつながる。本稿では, 教材全体の概要, 講座などでの状況, 新たに加えた教材について, その経過と結果に触れ, 改良の方向性などを論じる。

(キーワード: 情報工学教材, コンピュータシステム, マルチホップネットワーク, CPU, Linux サーバ, オンライン教材, 地域教育)

Design and Implementation of Computer and Distributed Network Educational Materials for Students of National Institutes of Technology

— For the Evolution of Computer and Network Education —

Akira TANAKA*, Tsubasa HOSOKAWA**, Hitoki OGAWA*,
Ryohei KAJI*, Katsuki WATANABE*

Tanaka Lab has provided every year “Internet and programming courses” as lectures for the Hachioji elementary-school science education center since 2012. And we have conducted extension and demonstration lectures and so on of computing and networking for elementary and junior high school students by using our developed online and standalone hardware educational materials. An important requirement of the materials for such lectures is how to design them in a way that would attract learners’ attention. Learners’ behavior during the lectures and questionnaires have been shown that our materials sufficiently fulfill learners’ expectations. In addition to the many materials already in use, we have implemented the CPU simulator and the multihop network educational materials for the students in our colleges of technology since last year. The computer simulator enables the students to observe the internal behaviors of a CPU. The network material enables the students to observe the processes in a real network composed of FPGA terminals. Both materials are operated via a Linux server and are used in the regular and advanced departments of our college of technology. Consequently the students showed improved understanding. Feedback from the younger students can effect improvements of the system for the students in upper years. Meanwhile, applying the simplified materials for the advanced levels to younger students leads the younger students to find their future. In this paper, an overview of the educational materials, classroom situations, newly added materials, the implementation processes and the outcomes are discussed.

(Keywords: education materials, computer system, CPU simulator, multihop network, Linux server, FPGA)

*情報工学科 **機械情報システム工学専攻

1. はじめに

八王子市小学校科学教育センター¹⁾の科学教育の一環として、ここ十数年本校において夏休み期間に1日(当初何年かは2日)の日程で、市内全域の小学校から選抜された理科やものづくりに興味を持つ90~130名程度の小学生を対象に、幾つかの講座が実施されてきた。田中研究室は平成24年度(2012年)より「インターネットとプログラミング」をテーマに講座を担当してきた²⁻⁷⁾。この成果によって理科教育の充実のための「教育・研究に関する連携協定」が八王子市教育委員会と締結(平成26年1月)され、出前授業^{3,8)}など相互の協力が発展してきている。

「インターネットとプログラミング」の講座では、田中研究室配属の卒研生・特別研究、さらに、令和元年度からは4年後期と令和2年度からは5年前期の社会実装プロジェクトII, IIIで田中研究室配属となった学生も教材設計に参加し、また、講座でTAを務めてきている。田中研究室はマルチホップネットワークとネットワーク分散処理を中心に研究を行っており^{9,10)}、コンピュータシステムやアーキテクチャ関連の授業を担当してきた。卒業研究の場合では、過去に一部の卒研生が高専生向けの教材設計を行ったものの¹¹⁻¹⁷⁾、小中学生向けの教材は卒業のテーマにはしていない。しかしながら卒研生全員が卒業研究の傍らに講座向けの教材の設計やTA、高専生向けも含めた教材の改

良などに貢献してきた¹⁸⁾。一方、社会実装プロジェクトにおいても、当初は小学生向けを中心としたテーマから始め、その後高専生向けの設計にシフトした¹⁹⁻²⁴⁾。さらに教材システムにこれらも組み込み、殆どをオンライン教材として設計し、一部はハードウェア連携して実物のハードウェアの処理や動きも観察しながら学習できる教材となっている²⁵⁾。十余年にわたり、小中学生向け公開授業^{2-7,26)}も重ねる一方で、高専生向けの教材の開発を続け、試用を繰り返した上で、昨年度初めて、本校の正課授業に教材を適用し、大いに好評を得るとともに十分な学習効果をあげた²⁷⁾。

2. 教材の構成

Linux サーバ上にメインの教材プログラムを実装しており、図1の全体概要のポータル画面を通してインターネットとモバイル SINET²⁸⁾を介して、9種類の教材が利用できる。また、FPGA など実ハードウェアで設計されたネットワーク教材もサーバ上の教材と連動し、受講生は実ネットワークを使って学習できる。さらには、電子回路入門、AIを用いたホームページ作り、タッチパネルの制御、マイコンなど他のハードウェアを連携させる教材、量子コンピュータ、マルチホップネットワーク、数式の評価、最短路問題など、特定領域に関する教材も備えており(図1の「教材メニュー」からアクセス)、図2に示すようにこれらを適切に

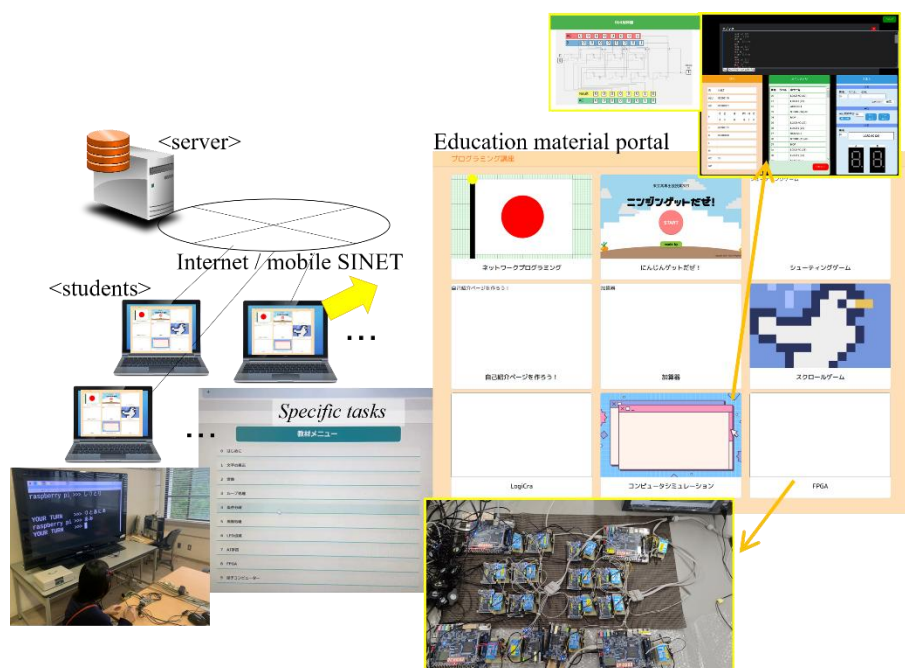


図 1 Computer and network education materials of Tanaka Lab.

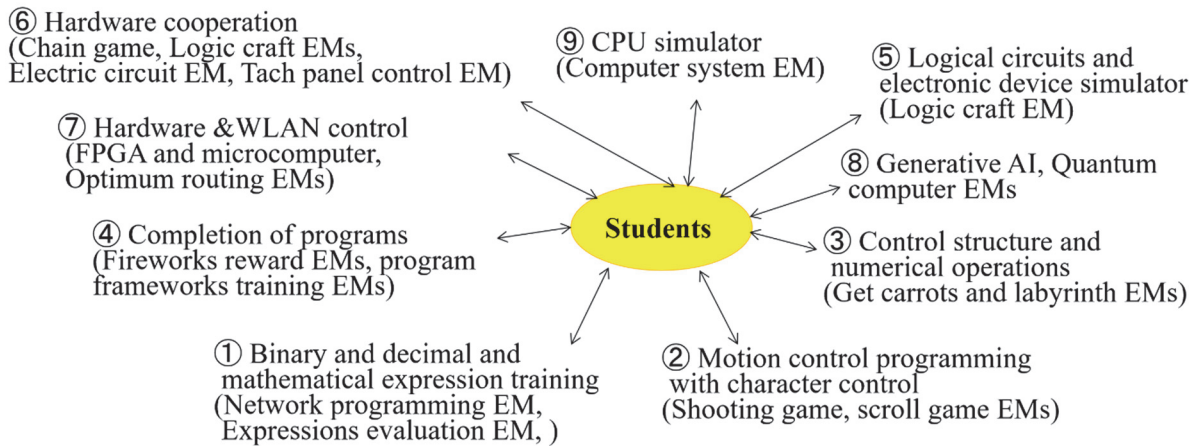


図 2 Composite learning with variety of educational materials (EMs)

適用して組み立てた中で受講生は学習を進める。本稿では、授業に適用した教材の内、CPU シミュレータ、FPGA マルチホップネットワーク、について述べる。いずれもポータルから直接使用する。

図 1 で示している Linux サーバは同一アプリケーションを実装した予備用のサーバも備え、トラブル時などでも課題の実施が出来るようになっている。受講生はインターネット及び学術用ネットワークであるモバイル SINET を通してサーバにアクセスし、課題を実施する。モバイル SINET は閉域網と SIM 認証でセキュリティが確保されているだけでなく、屋外、移動しながら、自宅、での学習も自在に行えるため、適用範囲の広い情報工学系の教材には適している。

3. CPU シミュレータの研究

3.1. アプリケーションプログラムの概要と UI の設計

開発したシミュレータのアプリケーションプログラムの画面を図 3 に示す。アプリケーション本体は大きく 3 つの画面で構成されており (図 3 (a)), さらに、本システムの構成や操作方法、CPU のインストラクション一覧とその解説、回路シミュレータ部の取り扱いなどの詳しい解説の画面 (図 3 (b)) やエディタ (図 3 (c)) も実装している。HTML や JavaScript, CSS を用いて開発していて、フレームは非常に単純に組んでいるが (図 4), 受講生のリクエストを受けてすぐにより見やすい画面に変更もできる。

メインとなるアセンブリ言語の入力・実行画面 (図 3(a)①～⑤) では、現行の主流プロセッサ x86

系²⁹⁾の初期版或いはそれと同等の Z80 プロセッサ³⁰⁾に基づいた命令の処理過程を視覚的に確認できる。本アプリケーションにより、x86 系と Z80 の動作を反映して開発した、レジスタ値やメモリ内容、フラグの変化をリアルタイムで確認できるほか、ステップ実行機能を用い CPU の内部処理を 1 命令単位で追うことができる。また、出力装置として 7Seg (7 セグメント LED) (図 3 (a)⑤) を実装しており、アセンブリ言語による数値出力を視覚的に確認できるため、実際の組み込み機器の I/O の仕組みを体験的に理解できるようになっている。

既にアセンブリ言語を扱ってきた受講者だけでなく、全く初めてアセンブリ言語を扱う場合でも取り組めるように簡易化してはいるが Z80 の仕様を再現している分、操作手順がやや複雑になる傾向があり、本シミュレータの使い方を理解するまでに一定の学習時間を要する。授業内ではアプリの説明に割ける時間が限られているため、受講生が各自で操作方法を確認できるよう、図 3 (b)でその一部を示しているシミュレータ操作ガイドを併せて開発した。この操作ガイドには、アセンブリ言語の入力から実行、結果出力までの流れを段階的に解説した章を設けており、画面のスクリーンショットを用いながら初学者でも操作の流れが把握できるように工夫している。また、シミュレータで使用可能なアセンブリ命令の一覧や、7Seg の仕様と動作例、さらに誤操作が起こりやすい点や対処方法についても記載し、授業外でも自主的に学習できる構成とした。

このアプリ操作ガイドの導入により、授業内での説明時間を短縮できただけでなく、受講生が自



図 3(a) CPU, Main memory and I/O

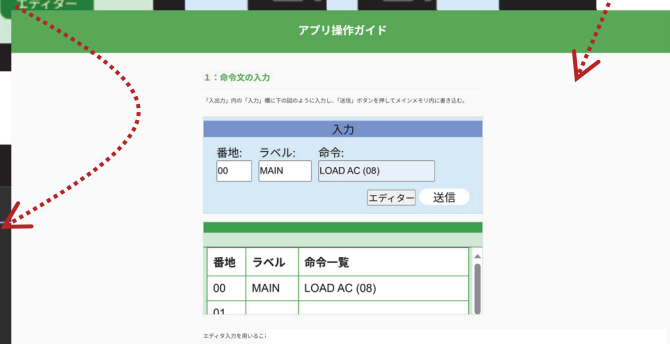


図 3(b) Help screen (pop-up)

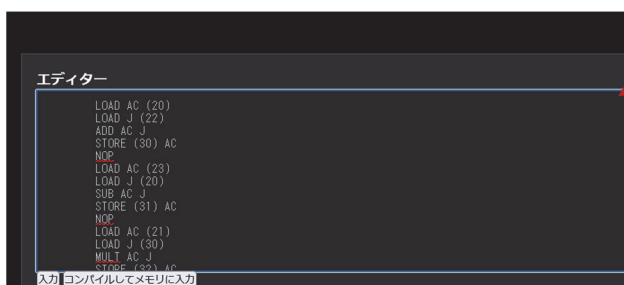


図 3(c) Editor

図 3 Developed computer simulator

主的に試行錯誤しながらアセンブリ言語の動作を理解する姿が多く見られるようになった。結果として、Z80 の基本動作や CPU の内部処理に関する理解が向上し、授業全体の学習効率の向上に大きく貢献した。

3.2. CPU と周辺装置の処理の実装

(1) CPU とその周辺

演算装置 Arithmetic logic unit (ALU), レジスタ, メモリ の関係を, それらの動作 (処理) を可視化して理解できる構造にする目標であり, あまり複雑にならず全体の流れが追えるような処理が実行できる命令セットを組んだ。Z80 はそれ特有の機能もあることと, 現行の x86 系自体を簡易化したほうが理解しやすいケースもあり, 命令は Z80 と現行 x86 系の両方に基づいて設計している。実装した命令を表 1 に示す。X,Y はレジスタ, (xx) は番地を入力する。本アプリケーションは 30 個以上の命令が実装されており, それらを入力エリアから送信, メインメモリに書き込

んだのち実行することで, Z80 と同様の動作を行う。また, エディタを使用することで複数行を一度に書き込むことができる。

(2) 命令実行の流れ

このプログラムはすべて JavaScript で実装を行っている。メモリから読み込む動作を表現しているため, HTML 内で id を付与し, その id の値を読み取り・書き込みする形で表現した。命令実行は以下の流れで行われる。

- (ア) 実行する命令をメインメモリから CPU 内のインストラクションレジスタ IR に書きこむ。
- (イ) IR の内容をスペースごとに区切る。
- (ウ) どんな命令かを区切った 1 つ目を条件分岐で特定。
- (エ) 2 つ目(あれば 3 つ目も)をもとに命令の詳細を決定。
- (オ) 命令を実行。

アセンブリプログラム全体を「全て実行」と「一つ実行」の 2 パターンを用意した (図 3(a)③)。全て実行は実行開始番地から終了までメインメ

```

129 <div class="card card-blue">
130 <div class="card-header">
131 入力
132 </div>
133 </div>
134 <div class="form">
135 <div class="form-container">
136 <div>
137 <label for="hanchi1">番地</label><br>
138 </div>
139 <input class="input input-number" type="text" id="hanchi1" value="00"><br>
140 </div>
141 <div>
142 <label for="hanchi1">ラベル</label><br>
143 </div>
144 <input class="input input-label" type="text" id="label"><br>
145 </div>
146 <div>
147 <label for="input_form">命令</label><br>
148 </div>
149 <input class="input" type="text" id="input_form"><br>
150 </div>
151 <div style="text-align:right">

```

図 4 Simple frame structure

表 1 Instruction set

LOAD X (xx)	NOP	CP 8bit二進数
STORE (xx) X	DAA	JP LABEL
HALT	SRL X	JP Z LABEL
ADD X Y	SRA X	RET
SUB X Y	RR X	PUSH X
MULT X Y	RRC X	POP X
IMULT X Y	SLL X	SET X bit番号
DIV X Y	SLA X	RET X bit番号
IDIV X Y	RL X	BIT X bit番号
AND X Y	RLC X	OUT M (xx)

```

} else if (str=='OUT') {
  let ostr1 = IR.substr(str.length+1,IR.indexOf(' ',str.length+1)-str.length-1);
  let onumber;
  console.log((IR.substr(str.length+1+ostr1.length+1)).length);
  if((IR.substr(str.length+1+ostr1.length+1)).length == 8){
    onumber = parseInt(IR.substr(str.length+1+ostr1.length+1),2);
  }else{
    let ostr2 = IR.substr(IR.indexOf('(')+1,IR.indexOf(')') - IR.indexOf('(')-1);
    onumber = parseInt(document.getElementById(ostr2).innerHTML,2);
  }
  let m = document.getElementById(ostr1).innerHTML;
  console.log(onumber);
  let mask = 0x80;
  let pointer = '0';
  if (m=="00000000") {
    console.log("Out to A");
    pointer = '1'
  }else if (m=="11111111") {
    console.log("Out to B");
    pointer = '2';
  }else {
    alert("不正な命令です。");
  }
  if(pointer != '0'){
    for(let i = 'h'.charCodeAt(0); i >= 'a'.charCodeAt(0); i--){
      console.log("mask: ", mask, "onumber: ", onumber);
      let id = 'seg' + pointer + '.' + String.fromCharCode(i);
      let element = document.getElementById(id);
      if (mask & onumber) {
        if (!element.classList.contains('active')) {
          element.classList.add('active'); // 'active' クラスがない場合のみ追加
        }
        element.classList.remove('inactive'); // 'inactive' クラスを削除
      } else {
        if (!element.classList.contains('inactive')) {
          element.classList.add('inactive'); // 'inactive' クラスがない場合のみ追加
        }
        element.classList.remove('active'); // 'active' クラスを削除
      }
      mask=mask>>1;
    }
  }
} else {

```

図 5 Implementation of “out” instruction

メモリ内のすべての命令を一度に実行する。一つ実行は実行開始番地から逐一実行し、命令一つ一つの動きを確認することができる。また、一つ実行時に不具合が生じた場合に命令を修正できるように、実行中断ボタンも実装している。フラグはサインフラグ (S)、ゼロフラグ (Z)、ハーフキャリーフラグ (H)、パリティオーバーフローフラグ (PV)、ネガティブフラグ (N)、キャリーフラグ (C) がフラグレジスタ内で格納されており、フラグの値を演算で用いる際は、対応するアルファベットを機械語のオペランドに設定するか、フラグレジスタ全体を AND 命令で特定のビットの値を見ることで使用することができる。

(3) 特に検討・工夫したコーディング

本機能で特に工夫した点は図 5 のコードで示す OUT 命令である。この機能は画面上に存在する 2 つの 7Seg (図 3(a)の⑤) のうち、選択した方に任意の 8bit 2 進数を表示するものである。

8bit 2 進数は、2 進数が書き込まれたメインメモリの番地を参照するか、値を決め打ちするかの 2 通りで決めることができる。メモリ内に保存された命令 [OUT (xx)] (または[OUT 00001111]) が IR に書き込まれ、その文字列をスペースで区切る。その後番地または 2 進数を読み込み、M レジスタで指定された 7Seg へ出力するという流れである。この 7Seg は HTML 内でそれぞれの LED を作成している。そこで for ループと if 文を使用することで、表示する 8bit 2 進数を 1bit ずつ読み込み、1 であればその bit に対応した LED の状態を変更し見た目を変えるよう工夫した。

(4) 8bit 加減算器・乗算器・除算器の実装

四則演算は普段の生活で頻繁に使われる。しかし、コンピュータでの四則演算がどのように行われているかイメージがしにくい。そこで、コンピュータ内で四則演算の処理の様子を、CPU の処理に合わせて変化する内部の回路図と処理

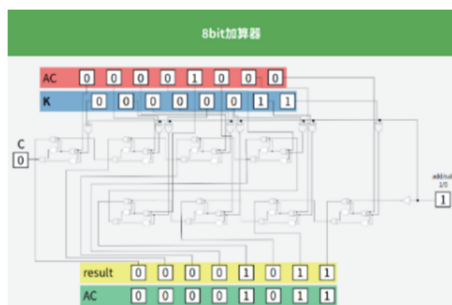


図 6(1) Adder-subtractor

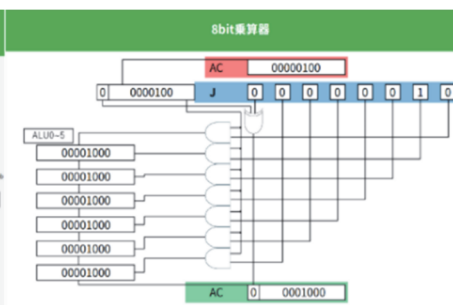


図 6(2) Multiplier

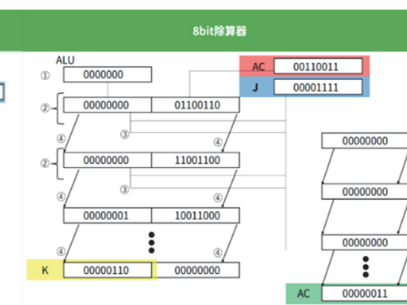


図 6(3) Divider

図 6 Arithmetic unit

手順を可視化して示すことで説明し、値の変化を追いながら視覚的・動的にコンピュータでの計算方法の理解を深められるようにした。これらは ADD, SUB, IMULT, DIV を実行したときにポップアップ表示され、どのレジスタが計算で使用されているか、どんな値が計算されているか、どのように計算が行われているかを 1 つの画面で確認することができる。図 6 に加減算器、乗算器、除算器を示す。これらの画面はアキュムレータ AC と汎用レジスタ J を使った演算を示している。

(ア) 加減算器

右側に加算・減算のどちらを行うかが示されている。AC と J を 1bit ずつ加算し、繰り上がりを次の bit に加算する。これを繰り返すことで AC と J の加減算を行う。

AC と J の一番右側の bit(0 と 1)を加算し、繰り上がりがあれば次の bit(0 と 1)の加算に追加する。この計算で繰り上がりが出たら次の bit の加算に追加...という流れである。

(イ) 加乗算器

AC に J を 1bit ずつ乗算し、bit 数に応じてシフトを行い加算する。

図 6 をもとに説明すると、0000100 と 0 を乗算したものと 0000100 と 1 を乗算し 1bit シフトしたものを加算。そこに 0000100 と 0 を乗算し、2bit シフトしたものを乗算...という風な流れである。この乗算器は符号付きのため最終的に 2 値の符号を乗算したものを結果の商として扱う。

(ウ) 除算器

AC を 1bit シフトし J を減算、減算後の符号によって商を決め正だったら 1、負だったら 0 を出力。こちらも 1bit シフトする。その後符号が負だった場合のみ J を加算し符号を正に直す。結

果は商が AC、剰余が汎用レジスタ K に入っている。

3.3. シミュレータの操作手順の概要

開発した CPU シミュレータの操作手順について述べる。図 3(a)で示しているように、シミュレータは大きく「入出力部 (I/O)」「メインメモリ部」「CPU 部」の 3 つの機能に分けられる。それぞれが連携することで、プログラムの入力から実行、様々なレジスタを使った処理内容の観察までを行えるようになっている。

まず、入出力部では、実行したいプログラムの命令文や、実行時に使用する値を入力する。入力の際には、これらを格納するメモリの番地を指定する (図 3(a)の①)。入力された命令や値は、指定した番地にメインメモリ部へ書き込まれる (図 3(a)の②)。

すべての入力完了したら、入出力部からプログラムを実行する (図 3(a)の③)。実行中の処理は、CPU 部のレジスタやメインメモリ部の状態の変化として確認できるため、CPU がどのように命令を処理しているかを、実行の流れに沿って視覚的に追うことができる (図 3(a)の④)。

3.4. シミュレータのエディタ

「入出力部 (I/O)」を通して「メインメモリ部」にアセンブリ言語で転送・書き込むのは、実際の CPU (実際は機械語ではあるが) と同等の処理であり、CPU の学習に適している。しかしながら、受講生がキーボード操作をミスしたり、考えたプログラムが間違っていると、その行を指定して訂正するため、規模が大きいプログラムでは煩雑になり、全体の流れの理解に時間をかけられなくな

る場合が生じる。そこでマウス操作でウィンドウ内全体を対象に編集できるエディタを設計した(図 3(c))。メモリでは表示されない行番号が表示されている他, タブが使用できる, また, 識別しにくい空白箇所は空白を示す記号を示していくつ空白があるかなどもわかる。ここに書き込んだアセンブリ言語のプログラムをワンリックでメモリに展開できる。

また, 簡単なコンパイル機能も持ち, 高級言語で記述した四則演算がアセンブリ言語に変換されてメモリに書き込まれ, C や Python などの高(中)級言語が実際にはコンピュータでどのように扱われているかも, 同時に観察できる。

4. 正課授業への適用

本シミュレータを用いて行った授業では, 対象者が簡易的な適用とした場合の小中学生, 本校の情報工学科の2・3・4年生, さらに専攻科1年生と幅広く, プログラミング経験にも大きな差があった。そのため, 授業で設定する課題は本来であれば対象ごとに最適化する必要がある。しかし, 本アプリケーションの特徴を十分に体験してもらうためには, できるだけ多くのアセンブリ言語の実行過程を観察してもらうことが重要であった。

そこで, 入門編から上級者レベルまで一連で課題を設計し, 学習者のレベルごとに用いる課題を変える, 或いは, 課題の質を調整する・ヒントの量を調整する, などにより, 上位レベルの教育機関に進んでも, 上級生になっても, 全く同一の流れで学習が進められるように工夫した。具体的には, 課題として出すプログラムの複数箇所を空白にして出題し, それまでの学習レベルや知識に対応して, 適切な空白を設定し, さらに, 空白の部分には追加するべきプログラムの内容の説明を示した。対象者のレベルごとに空白の量や説明の詳細度を変え, それぞれのプログラミング経験の実力に合った課題の実現を図った。これにより, 初心者には手順を補助する形で理解を促し, 経験者には自力で試行できる余地を残すことができた。

この方法により, 対象者の習熟度に応じた適切な負荷で課題に取り組みせることが可能となり, すべての授業において多くのアセンブリ言語の実行過程を観察させるという目的を達成することができた。なお, 昨年度には, 八王子市立恩方第一小学校6年生のクラスの出張授業において, 簡易

版を適用し, 2進数の扱い, コンピュータの中身の紹介, の教材としてほぼ全員(ほぼ100%)から理解が進んだ・興味持てたなど, 大いに好評を得ている。

今年度, 本校の情報工学科2年生の論理回路I, 情報工学科3年生の論理回路II, 専攻科の機械情報システム工学専攻1年生の計算機アーキテクチャの授業で実際に適用した際は, クラス内全体同時に本シミュレータを使用し学習を進め, 出題した課題の実習と結果の提出をしてもらった。アンケート結果もほぼ全員(ほぼ100%)から, 大いに役だった, 理解できた, 興味を持って学習できた, など前向きな結果を得て, コンピュータ内部の動作の学習に大いに有効であったと言える。

5. FPGA のマルチホップ通信による ICT 教材の研究

5.1. 背景と概要

近年, 通信技術の発展により IoT 機器や災害時の通信手段としてマルチホップ通信^{9,10,31})の重要性が一層高まっている。マルチホップ通信は中継ノードを介してデータを段階的に伝送することで, 直接通信が困難な環境でも確実な情報伝達を可能にする技術である。しかし, その内部構造やルーティングの仕組みを実際に体験しながら学ぶ機会が高専教育の現場では限られており, 理論だけでなく実機を通じた学習環境の整備が求められている。そこで, 高専生を対象とした教育用教材として, 複数の FPGA 端末を用いたマルチホップ通信ネットワークをサーバから動作させる仕組みを開発する。図 7(a)(b)に示すように, 各 FPGA 端末が一つの通信ノードとして配置され, 隣接ノード間でデータを中継することで最終的に目的ノードまで情報を転送する構成となっている。本教材では, FPGA 間の通信を通して信号の受け渡しが行われ, 信号の伝搬経路を可視化することができる。これにより, 学生は中継回数や経路構成による通信特性の変化を直感的に理解できる。

5.2. 設計の方針

サーバ上の Web インターフェースから FPGA 群を制御できる構成とし, 学生がルーティング方式を選択してその影響を実際の通信結果として可視化できるよう設計した。教材と FPGA を使用したシステム全体の構成を図 7(a)に示す。学生がサー

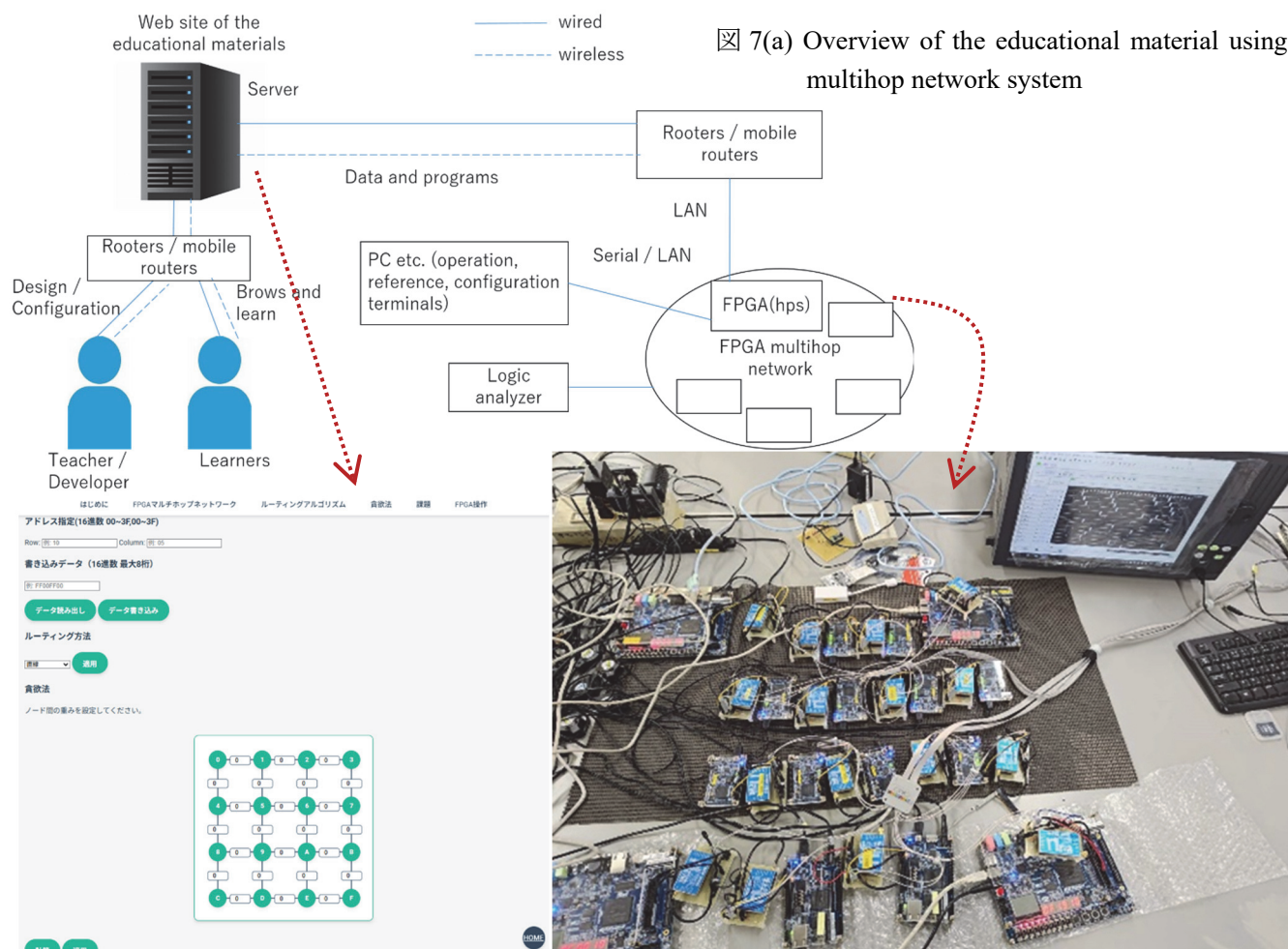


図 7(c) Optimum routing assignment screen

図 7(b) Multihop network with logic analyzer

図 7 Multihop network used for the educational material

バにある教材にアクセスし、そこから FPGA 群にデータを送り、設定や通信経路を FPGA に適用させている。サーバは FPGA にパラメータを送信し、その応答データを取得して Web 上に反映する。教材には、行と列を順に合わせて通信する直線ルーティング、経路を交差させて通信特性の違いを体験できるジグザグルーティング、端末間に重みを設定し、貪欲法によって最短経路を選択する最適ルーティングの三種類を実装した。実際の教材画面を図 7(c)に示す。画面上では、FPGA 端末をノードとして配置し、ボタン操作でルーティング方式や通信経路を選択できる。これらを用いて提示された課題に対して実験を行い、学習していく。そのため、実験結果を基にした考察を容易に行える設計となっている。これにより、学生は異なるアルゴリズムによる通信経路や伝送遅延の差を比較しながら、通信理論とネットワーク設計の双方を実践的に理解できるようになった。

5.3. サーバを用いた機能の高度化

開発にあたっては、FPGA 端末とサーバ間のデータ連携を強化するため、FPGA 内部のメモリに対してサーバ側からデータを読み書きできる仕組みを新たに実装した。これにより、Web 上で設定したルーティング情報や重みパラメータを即座に FPGA へ反映させることができる。さらにサーバを介して、通信結果や演算データを取得することが可能となった FPGA メモリの直接アクセス機能により、学生が Web ブラウザ上で設定した条件をそのまま実機に反映できるようになり、リアルタイム性の高い教育環境を実現した点は本研究の大きな成果である。

また、通信結果をサーバ側に保存する仕組みを実装した。これにより、通信実験の結果や各 FPGA ノードの状態をサーバに蓄積し、ネットワークを介して他の PC から同時に閲覧・共有できるよ

うになった。複数の学習者が同一の実験環境を遠隔から共有しながら結果を比較・分析することが可能となり, 協調的な学習環境を実現した。

さらに, 従来のルーティング方式に加えて, 隣接テーブルを用いた経路探索アルゴリズムを新たに実装した。このアルゴリズムでは, 各ノードが接続されている隣接ノードの情報をテーブル形式で管理し, その情報を基に通信経路を決定する。これにより, 実際のネットワーク機器で用いられているルーティング方式に近い仕組みを教材上で再現することができ, より実践的なネットワーク理解を促進することが可能となった。

5.4. サーバ教材との相互の動作

システム全体はサーバ側で貪欲法などのルーティングアルゴリズムを処理し, その計算結果をネットワーク経由で FPGA 群に送信する構成にした。この設計により, アルゴリズムの変更や改良をサーバ側で行うだけで FPGA 側のプログラムを再構築する必要がなく, 教材の拡張や更新を容易に行うことができる。複数の FPGA 端末が分散的に動作しながらも全体として統一的なシステムとして学習者に提示されるように設計したことで, 分散処理・通信遅延・経路選択といった実際のネットワーク動作を直感的に理解できるようになった。

5.5. GPS 情報の取得

本研究では Web ブラウザから GPS 情報を取得し, その位置情報を FPGA に保存できる機能を新たに実装した。これにより, 各 FPGA ノードに実際の地理的座標を対応付けることが可能となり, ノード配置と通信経路を地理情報と関連付けて可視化できるようになった。これにより, 通信距離やノード配置と通信性能の関係を直感的に理解できる教材としての発展が期待される。

5.6. 授業での実施と今後の発展

本校専攻科の機械情報システム工学専攻 1 年生の計算機アーキテクチャの授業で実際に適用し, 理解度・興味とも非常に良好なアンケート結果を得て, また, 分散処理システム, ネットワークシステムの実習教材として学生の理解度向上に大きく役立った。

今後は, 取得した位置情報を利用して通信経路を地図上に可視化する機能や, 複数拠点に設置

された FPGA 端末の状態を統合的に管理するシステムの構築を進める予定である。これにより, 遠隔地に設置された FPGA を一元的に管理し, 各端末で発生した通信結果や内部状態をリアルタイムで確認できるようになり, より発展的な ICT 教材としての活用が期待される。

6. まとめ

平成 24 年より担当させていただいている八王子市小学校科学教育センター講座, 中学生向け公開講座, 本校の本科及び専攻科における正課授業, いずれも非常に良好な感想を得られており, 正課授業では学習成果向上に十分な有効性が確認された。サーバに実装した教材, スタンドアロンの教材含め, ICT のベースになる要素技術, 実用につながる技術, 今日見につながる技術など, 様々な要素が学べる内容を提供しており, 小学生向けの紹介から専攻科向けの専門授業まで十分に適用でき学習への有効性が実証された²⁷⁾。

コンピュータ社会・ネットワーク社会と言われる今日, オンラインでコンピュータの中身と実物のネットワーク分散処理の動作を自分で観察・動かして確かめられる教材であり, 興味, 学習効果のみならず受講者の将来にわたって, 技術の変化, 社会の変化に追従できる素地を身につける有力な手段となる。機能の高度化を進めるとともに成績評価にも直接使用できる仕組みに改良し, 授業への適用やフィードバックを反映する予定である。

謝辞

協力していただきました八王子市小学校科学教育センター及び恩方第一小学校の 6 年生の皆さんや先生方他関係者の皆様, 本校技術室, 情報工学科 2 年生, 3 年生, 4 年生, 機械情報システム専攻 1 年生, 及び関連各位に深謝致します。本研究の一部は JSPS 科研費 22K02905 及び 2025 年度国立情報学研究所公募型共同研究 (252S1-23660) の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 八王子市, “八王子市小学校科学教育センター,” <https://www.city.hachioji.tokyo.jp/kurashi/kyoiku/003/004/010/p004741.html>, <https://hachioji-school.ed.jp/edcen/page/frm6306b30a034cc?tm=20251030145611> (last access 2025.12.4)

- 2) 田中晶, 土屋賢一, 林丈晴, 中野雅之, 小池和摩, 酒井元太, 菅原健太, 仲林龍馬, 牧野康平, “八王子市小学校科学教育センター「インターネット講座」の実施,” 東京高専研究報告書, no. 46, pt. 2, pp. 66-74, 2015.
- 3) 田中晶, “小学生に向けたインターネット・プログラミング導入講座,” 信学技報 (ET), vol. 118, no. 294, pp. 13-18, Dec. 2018.
- 4) 門脇雄治, 小林正崇, 野崎博樹, 安藤岬, 木村鉄哉, 林美友梨, 田中晶, 三谷知世, “小学生に向けたインターネット講座の考案と実施,” 第 4 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, pp. 26-27, Dec. 2012.
- 5) 伊藤総一郎, 岡野慎史, 青柳智子, 田中晶, 大塚友彦, 林丈晴, “小学生に向けた体験学習によるインターネット講座,” 第 5 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, pp. 44-45, Dec. 2013.
- 6) 岩田青龍, 木下和渡, 工藤颯希, 坂本惇一郎, 佐田彩星, 西村憲人, 益子海音, 山川涼, 田中晶, “小学生に向けたインターネット・プログラミング講座の実施,” 第 11 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, D125, Dec. 2019.
- 7) “令和 7 年度八王子市小学校科学教育センター東京高専理科講座,” https://www.tokyo-ct.ac.jp/news/20250922_2/ (last access 2025.12. 4)
- 8) “八王子市立恩方第一小学校で出前授業を行いました,” https://www.tokyo-ct.ac.jp/news/20250110_1/ (last access 2025.12. 4)
- 9) 田中晶, 磯間捺希, 金澤晴輝, 後藤圭介, 新木康介, 鈴木佑斗, 田井葵, 細川翼, 御子柴まりの, “高度マルチホップネットワークの拡張と統合の研究,” 東京高専研究報告書, no. 55, pp. 68-77, Mar. 2024.
- 10) 田中晶, 丸山充, 漆谷重雄, 辻井利昭, “マルチホップネットワークで構成するリアルタイム分散共有メモリの研究,” 信学技報, vol. 124, no. 419, NS2024-245, pp. 292-297, Mar. 2025.
- 11) 木下和渡, “学習体験に基づく Python による小学生向けプログラミング教材の研究,” 令和元年度東京高専卒論, Mar. 2020.
- 12) 池田凜音, “高専新入生向けのプログラミング教材の研究,” 令和 2 年度東京高専卒論, Mar. 2021.
- 13) 小泉夏椰, “高専新入生向けプログラミング教材の研究,” 令和 2 年度東京高専卒論, Mar. 2021.
- 14) 河村碧生, “高専生向けプログラミング教材の研究,” 令和 3 年度東京高専卒論, Mar. 2022.
- 15) 森下大輝, “高専新入生向けプログラミング教材の研究,” 令和 4 年度東京高専卒論, Mar. 2023.
- 16) 新木康介, “Raspberry Pi マルチホップネットワークとリンクした ICT 教材の研究,” 令和 5 年度東京高専卒論, Mar. 2024.
- 17) 田井葵, “共有メモリでつながる AI を用いたオンライン教材フレームワークの研究,” 令和 5 年度東京高専卒論, Mar. 2024.
- 18) 中村悠哉, 坂本楓, 澤田昂佑, 清水皓介, 田井葵, 御子柴まりの, 田中晶, “小学生プログラミング・ネットワーク教材向け汎用教材サーバの構築,” 2022 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, B6, 54, Mar. 2023.
- 19) 池田凜音, 石田一翔, 大越朱花, 久保夏葵, 谷崎栄俊, 田中晶, “プログラミングを学ぶ学生自身が主体となる「小学生向けプログラミング講座」,” 第 12 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, T212, Dec. 2020.
- 20) 河村碧生, 土屋一, 寺川優汰, 本間玄太, 三國蒼介, 田中晶, “小学生に向けたプログラミング教材の設計,” 第 13 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, T217, Dec. 2021.
- 21) 杉本葉玖, 立山明日菜, 寺尾啓翔, 長濱真人, 森下大輝, 新井瑛貴, 仮谷星汰, 須藤大翔, 中村悠哉, 田中晶, “学生自身が主体となる「小学生向けプログラミング実習講座」,” 第 14 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, TA6-16, Dec. 2022.
- 22) 坂本楓, 澤田昂佑, 清水皓介, 田井葵, 御子柴まりの, 後藤圭介, 田中晶, “小中学生向けプログラミング講座とその教材開発,” 第 15 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, TA2-02, Dec. 2023.
- 23) 田辺友斗, 早瀬壮真, 水落祐太, 水上滉介, 田中晶, “高専生向け論理回路教材の開発と実践,” 第 16 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, PI06, Dec. 2024.
- 24) 水落祐太, 田辺友斗, 早瀬壮真, 水上滉介, 田中晶, “高専生向け論理回路教材の開発と実践,” 2024 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, D15, 98, Mar. 2025.
- 25) 田中晶, 丸山充, 漆谷重雄, 辻井利昭, “コンピュータ基礎から実ネットワークへの創造的 ICT 教育システムの研究,” 2025 年信学総大, D-15-23, Mar. 2025.

- 26) “令和7年度公開講座(8月),” https://www.tokyo-ct.ac.jp/news/20251003_2/ (last access 2025.12.4)
- 27) A. Tanaka, S. Urushidani, T. Kurimoto, M. Maruyama, and T. Tsujii, “ICT Creative Instructional System Working with Real Hardware Networks on Mobile SINET Access Network,” IEEE 14th Int. Conf. on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (IEEE TALE 2025). 掲載予定
- 28) “2022年度モバイルSINET実証実験,” <https://www.sinet.ad.jp/wadci/koubo2022-1> (last access 2025.4)
- 29) Intel corp., “IA-32 インテル®アーキテクチャソフトウェア・デベロッパーズ・マニュアル,” https://www.intel.co.jp/content/dam/www/public/ijk/jp/ja/documents/developer/IA32_Arh_Dev_Man_Vol1_Online_i.pdf (last access 2025.12.4)
- 30) Zilog inc., “Z80[®] CPU Central Processing Unit,” Sep.1988.
- 31) 細川翼, 田中晶, “FPGA のマルチホップ通信による ICT 教材の研究,” 2024年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, D15, 96, Mar. 2025.

(2025年12月4日 受理)

p-ニトロフェノールおよびその誘導体の淡水生態に及ぼす影響 —誘導体との同時曝露による複合毒性評価—

庄司良*, 工藤洲瑛*

ニトロ芳香族化合物である *p*-ニトロフェノール (*p*-NP) とその誘導体である *p*-アミノフェノール (*p*-AP) が *Daphnia magna* と *Chlorella vulgaris* に及ぼす影響を調査した。*Daphnia magna* 急性遊泳阻害試験および *Chlorella vulgaris* 生長阻害試験を実施し EC₅₀ を算出した。*p*-NP の pH 変化に伴う毒性の変化が確認された。一方, *p*-AP は *Daphnia magna* に対して EC₅₀ は算出できたが, *Chlorella vulgaris* では明確に EC₅₀ を算出できなかった。また, 本研究では *p*-NP の pH 変化に伴う解離状態の変化および *p*-AP の時間経過による化学形態の変化を検証した。その結果, *p*-NP は pH が増加することで解離型が増加し, 吸収波長が変動した。また, *p*-AP では新規のピークの出現が見られ, 時間依存による化学変化が確認された。これらの結果から, *p*-NP および誘導体の環境中の挙動を理解することが重要と示唆された。

(キーワード: *p*-ニトロフェノール, *p*-アミノフェノール, 毒性の変化)

Evaluation of the Effects of *p*-Nitrophenol and its Derivatives on Aquatic Organisms

—Effects of Combined Toxicity of Simultaneous Exposure to Derivatives—

Ryo SHOJI*, Shuei KUDO*

The effects of *p*-nitrophenol (*p*-NP) and its derivative *p*-aminophenol (*p*-AP) on *Daphnia magna* and *Chlorella vulgaris* were investigated. The pH-dependent changes in the absorption characteristics of *p*-NP and *p*-AP were also examined using spectroscopic analysis. *p*-NP exhibited shifts in absorption peaks due to an increased fraction of dissociated species at higher pH, whereas *p*-AP developed a new absorption peak over time, suggesting transformation in its chemical form. These findings contribute to a better understanding of the environmental behavior of *p*-NP derivative compounds in aquatic systems.

(Keywords: *p*-Nitrophenol, *p*-Aminophenol, changes in ecotoxicity)

1. はじめに

1.1. ニトロ芳香族化合物による水質汚染の現状

近年, 工業排水による水質汚染が問題となっている¹⁾。特に, ニトロ芳香族化合物は強い発がん性を有し, 米国環境保護庁 (EPA) により高優先度の有害汚染物質として指定されている²⁾。その中でも *p*-ニトロフェノール (*p*-NP) は合成染料, 除草剤, 腐食防止剤などに使用されている。また, *p*-NP の還元により生成される *p*-アミノフェノール (*p*-AP) は, アセトアミノフェンなどの医薬品原料に用いられている。そして, *p*-AP からさらに還元されて生成される *p*-ヒドロキノン (*p*-HQ) は有機合成の重合防止剤, 染料中間物として利用さ

れている。このように, *p*-NP およびその誘導体は, 様々な用途で広く使われている。一方で, 高い安定性と水溶性を持つ難分解性化合物であり, その検出および除去は極めて重要である¹⁾。また, COVID-19 によるパンデミックの影響で, 解熱鎮痛剤であるアセトアミノフェン (APAP) の生産と消費を著しく拡大させた³⁾。そのため, 過剰になった APAP の直接廃棄, ヒトや動物の排泄物, 病院や製薬工場からの排水を通じて水環境へ蓄積が促進され, 排水や地下水, 地表水, 飲料水で ng/L から mg/L の範囲で検出されている³⁾。また, 一般的に APAP 分解菌による分解経路がアミダーゼ群による APAP の加水分解から始まり, *p*-AP が形成

*物質工学科

されると知られている³⁾。そして、図 1 に示すように、*p*-NP およびその誘導体はフェノール骨格を持ち、*para* 位の官能基が異なるといった構造を持つ。この構造の差異が水中での化学形態や解離状態に影響を及ぼし、毒性発現の違いに関与する可能性がある。

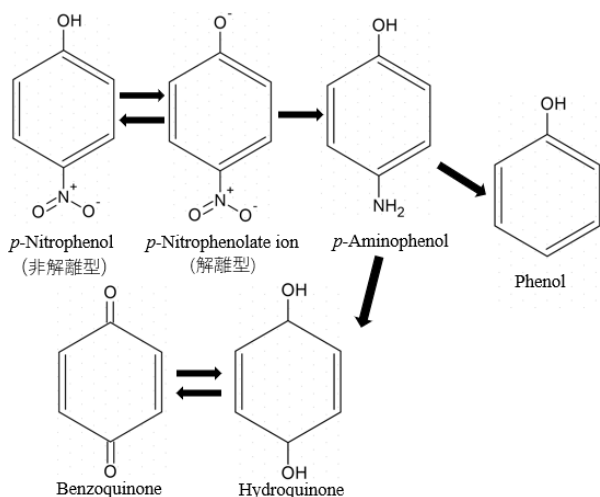


図 1 *p*-NP とその誘導体の構造¹⁾

1.2. 研究目的

本研究では、*p*-NP の pH 差による毒性の変化を明らかにすることを目的とし、pH を変化させた条件下で、甲殻類遊泳阻害試験および藻類生長阻害試験を実施した。また、*p*-AP による甲殻類遊泳阻害試験および藻類生長阻害試験を実施した。試験では淡水性甲殻類の *Daphnia magna*、淡水性微細藻類の *Chlorella vulgaris* を使用した。また、*p*-NP の誘導体である *p*-AP が水に溶解することで化学形態が変化するため、その確認のために時間経過ごとに紫外可視分光光度計で吸収波長の変化を観察した。

2. 研究方法

2.1. *Daphnia magna* 培養

本研究で取り扱う *Daphnia magna* は OECD テストガイドライン No.211 で用いられている M4 培地にて、22±3°C、12 時間明/12 時間暗の条件下で培養した⁴⁾。また、遊泳阻害試験に使用した培地は *Chlorella vulgaris* 用の AAP 培地 (表 1) で、使用した *Daphnia magna* は生後 24 時間以内の幼生である。

表 1 毒性試験で使用した AAP 培地組成(mg/L)

NaHCO ₃	15.0	Na ₂ EDTA · 2H ₂ O	0.300
NaNO ₃	25.5	H ₃ BO ₃	0.186
MgCl ₂ · 6H ₂ O	12.16	MnCl ₂ · 4H ₂ O	0.415
CaCl ₂ · 2H ₂ O	4.41	ZnCl ₂	0.00327
MgSO ₄ · 7H ₂ O	14.6	CoCl ₂ · 6H ₂ O	0.00143
K ₂ HPO ₄	1.044	Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	0.00726
FeCl ₃ · 6H ₂ O	0.160	CuCl ₂ · 2H ₂ O	0.000012

2.2. *Chlorella vulgaris* 培養

本研究で取り扱う *Chlorella vulgaris* (NIES-227) は AAP 培地にて、22±2°C、照度 4000~5000 lux、16 時間明/8 時間暗、曝気量 200 mL/min の条件下で継代培養をした。この継代培養したものを生長阻害試験で使用した。

2.3. 試験溶液の調製

本研究では *p*-NP (FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation, Osaka, Japan)、*p*-AP (FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation, Osaka, Japan) を毒性物質として使用した。遊泳阻害試験および生長阻害試験で使用する際は AAP 培地に溶解し、0.1 mol/L 水酸化ナトリウム水溶液 (FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation, Osaka, Japan)、0.1 mol/L 塩酸 (FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation, Osaka, Japan) で pH を調整した。

2.4. *Daphnia magna* 遊泳阻害試験 (48 時間)

Daphnia magna 遊泳阻害試験の *p*-NP は 0~80 mg/L の濃度範囲で曝露し、23±2°C、照度 2000~3000 lux、16 時間明/8 時間暗の光条件下で 48 時間実施した。また、各濃度について 5 頭ごとの 3 連で実施し、試験開始から 24 時間ごとに生存個体を確認した。遊泳阻害率 I_S を生存個体から (1) 式で求めた。

$$I_s = \frac{S_t}{S_c} \quad (1)$$

S_c は初期個体数, S_t が遊泳阻害された個体数である。得られた遊泳阻害率をロジスティック式に当てはめて用量作用曲線を回帰し, 得られた用量作用曲線から EC_{50} とよばれる半数影響濃度を算出した。*Daphnia magna* 遊泳阻害試験は試験溶液を pH6.5 で調整したものと, pH8.0 で調整したもので2回実施した。また, *p*-AP による遊泳阻害試験は 0~12.5 mg/L の濃度範囲で pH6.5 に調整して実施し, その他の条件は *p*-NP での遊泳阻害試験と同様の条件で実施した。

2.5. *Chlorella vulgaris* 生長阻害試験(48, 72 時間)

Chlorella vulgaris 生長阻害試験の *p*-NP は 0~45 mg/L の濃度範囲で曝露し, $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 照度 3000~4000 lux, 16 時間明/8 時間暗の光条件下で 48 時間実施した。各濃度について3連で実施し, 試験開始から 24 時間ごとに 72 時間後まで細胞密度を測定した。得られた結果から比生長速度 μ を(2)式で算出し, (3)式で得られる生長阻害率をロジスティック式に当てはめて用量作用曲線を回帰した。

$$\mu = \frac{\ln N_n - \ln N_0}{t_n - t_0} \quad (2)$$

$$I_m = \frac{\mu_c - \mu_t}{\mu_c} \quad (3)$$

N_0 は t_0 時点の初期細胞密度, N_n は t_n 時点の細胞密度を示している。ここで得られた用量作用曲線から EC_{50} を算出した。また, *p*-AP による生長阻害試験は 0~10 mg/L の濃度範囲で実施し, その他の条件は *p*-NP での生長阻害試験と同様の条件で実施した。

2.6. pH および時間経過ごとの吸収波長

AAP 培地に溶かした *p*-NP を AAP 培地で希釈し, 0.1 mol/L 水酸化ナトリウム水溶液と 0.1 mol/L 塩酸を使って pH6.5~8.0 に調整し, 10 mg/L の *p*-NP 溶液を調製した。調整した pH ごとにそれぞれ紫外可視分光光度計で吸収波長を測定した。また,

p-NP の pK_a が 7.08 であること, そして (4) 式に示すヘンダーソン-ハッセルバルヒの式を使い, *p*-NP が解離している割合を計算した⁴⁾。また, *p*-AP を AAP 培地に溶解させてから一定の時間で吸収波長を測定した。

$$\text{pH} = \text{pKa} + \log \frac{[\text{A}^-]}{[\text{HA}]} \quad (4)$$

3. 結果

3.1. *p*-NP の *Daphnia magna* および *Chlorella vulgaris* に及ぼす影響

p-NP による pH6.5 および pH8.0 における *Daphnia magna* および *Chlorella vulgaris* に対する用量作用曲線を図2に示す。図2より, pH6.5 条件の *Daphnia magna* に対する EC_{50} は 4.85 mg/L, pH8.0 条件では 5.37 mg/L となり, *Daphnia magna* に対して毒性が小さくなったことが示唆された。環境省では *Daphnia magna* に対する EC_{50} は 4.7 mg/L と報告されており, pH6.5 条件がほとんど同じ結果となった⁵⁾。しかし, pH が pH6.5 条件の *Chlorella vulgaris* に対する EC_{50} は 22.7 mg/L, pH8.0 条件では 19.1 mg/L となり, *Chlorella vulgaris* に対して毒性が大きくなったことが示唆された。

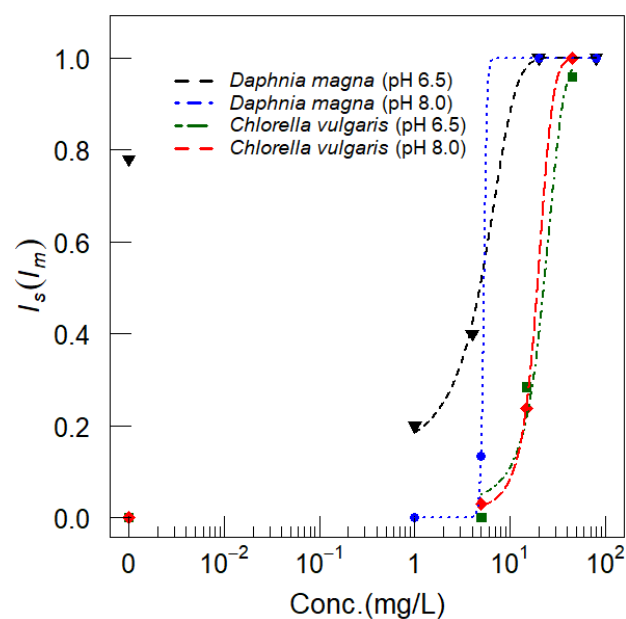


図2 *p*-NP の pH 差による *Daphnia magna* および *Chlorella vulgaris* に対する用量作用曲線

3.2. *p*-NP の pH の変化による解離型と非解離型の割合

pH による解離型の割合の変化を (4) 式によって求めた。pH が 6.5, 7.0, 7.5, 8.0 のとき、解離型の割合がそれぞれ 21, 45, 72, 89% となった。次に、pH が 6.5, 7.0, 7.5, 8.0 のときの吸収波長を図 3 に示す。計算で得られたように *p*-NP の解離型の 400.5 nm の波長と非解離型の 319 nm の波長が大きく変化していることが分かった。

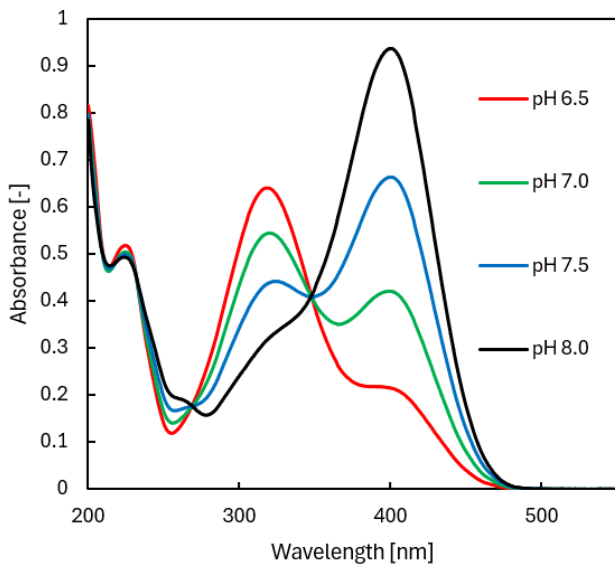


図 3 pH 別の吸収波長

3.3. *p*-AP の *Daphnia magna* および *Chlorella vulgaris* に及ぼす影響

p-AP の *Daphnia magna* および *Chlorella vulgaris* に対する用量作用曲線を図 4 に示す。図 4 より、*Daphnia magna* の EC₅₀ は 3.12 mg/L となったが、*Chlorella vulgaris* の EC₅₀ は算出できなかった。既往の研究では *Daphnia magna* の EC₅₀ は 0.24 mg/L、*Chlorella vulgaris* の EC₅₀ は掲載されていないが、*Pseudokirchneriella subcapitata* は 1 mg/L 超と報告されており、*Daphnia magna* の結果は一桁大きくなった⁶⁾。

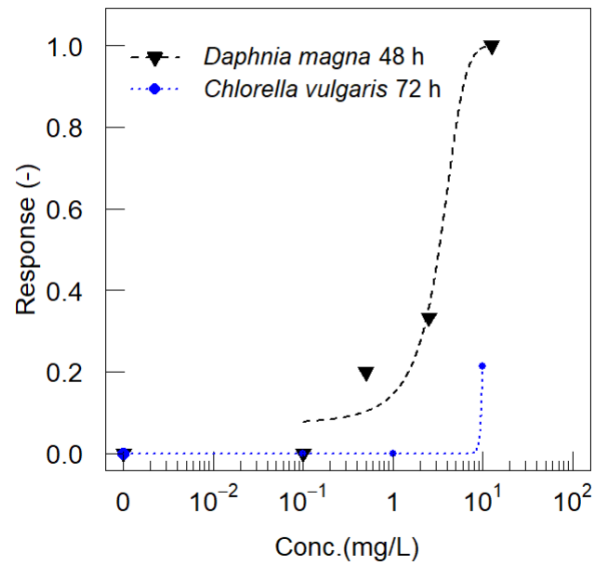


図 4 *p*-AP による *Daphnia magna* および *Chlorella vulgaris* に対する用量作用曲線

3.4. *p*-AP の時間経過による化学動態変化

p-AP の時間経過による吸収波長の変化を図 5 に示す。調製してから 24 時間までは 231 nm のピークが大きくなっているが、48 時間以降は減少した。また、360 nm 付近に新しいピークが出現した。

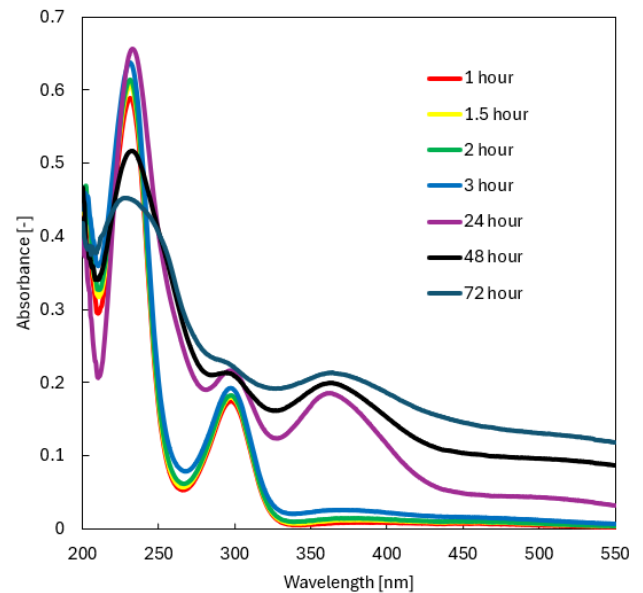


図 5 時間経過による *p*-AP の吸収波長の変化

4. 考察

まず、*p*-NP の *Daphnia magna* に対する EC₅₀ は pH6.5 条件で 4.85 mg/L、pH8.0 条件で 5.37 mg/L となった。しかし、*Chlorella vulgaris* では pH6.5 条件

で EC₅₀ が 22.7 mg/L, pH8.0 条件で 19.1 mg/L となり, pH が上昇することで毒性が強まり, *Daphnia magna* とは逆の結果となった。この結果は *p*-NP の解離型と非解離型の割合が関与していると考えられる。*p*-NP の pH6.5 条件の解離型の割合が 21%, pH8.0 条件では 89% と約 70% の差がある。この計算結果は図 3 に示す吸収波長の変化と一致しており, pH 上昇に伴った解離型の増加を確認できた。

一般的に解離型が非解離型に比べて疎水性が高く, 細胞膜を透過しやすいことが知られている。したがって, 解離型の少ない, つまり非解離型が多い pH6.5 条件では *Daphnia magna* の体内に取り込まれやすくなり, 毒性が強まったと考えられる。逆に, *Chlorella vulgaris* は毒性が強まったが, 藻類と甲殻類では細胞構造が異なる。そして, 藻類は光合成をおこなうため, 細胞表面に電荷を帯びた分子が結合することで電子伝達系に影響を与えている可能性も考えられる。

p-AP の *Daphnia magna* に対する EC₅₀ は 3.12 mg/L と算出できたが, 環境省では 0.24 mg/L と報告されており, 本研究では一桁大きくなった。本研究では OECD テストガイドライン No.211 で用いられている M4 培地ではなく, AAP 培地を用いて遊泳阻害試験を実施した。AAP 培地は M4 培地に比べ, 弱塩基性側に pH 緩衝作用を持つ NaHCO₃ が 3 倍ほど含まれている。この pH 緩衝作用により, *p*-AP の化学形態や分解挙動に対して変化を与え, 毒性発現に影響を及ぼした可能性がある。また, *Chlorella vulgaris* に対しては算出できなかった。これは, 時間経過による化学変化の影響で, 有効な濃度を維持することができなかった可能性が原因として挙げられる。図 5 より, 調製直後から 24 時間までは 231 nm のピークが増加し, 24~48 時間では 231 nm のピークが減少した。さらに, 360 nm 付近に新しいピークが出現した。この結果から, 溶液中で化学反応が起こり, 別の物質へ変化していることが示唆される。変化後の物質は *p*-AP よりも毒性が弱い可能性がある。そのため, *Daphnia magna* の毒性が弱くなり, *Chlorella vulgaris* では用量反応が得られず, EC₅₀ も得ることができなかったと考えられる。また, *p*-AP が別の物質に変化していることが確認できたため, 複合毒性についても考慮していく必要がある。

以上より, LC-MS などの機器分析を駆使し, 反

応副生成物を網羅的に同定し, その濃度を定量していくことをしない限り, 個別物質の濃度と毒性の対応をとることについては一定の限界があると考えられる。現実的には主生成物も複数の副生成物も含まれる試料について, 環境リスクを評価する場合においては, 本研究で実施した生態毒性試験を複数組み合わせることで, 多角的なリスク評価を実施することが有効な環境管理手法であると考えられる。

5. 結論

本研究では, *p*-NP および *p*-AP の淡水生態に対する毒性と水中での化学形態の変化について評価を行った。*p*-NP は pH によって解離型と非解離型の割合が大きく変化し, *Daphnia magna* と *Chlorella vulgaris* の両方で毒性に差が生じることが明らかになった。特に, pH6.5 条件では非解離型が多く, *Daphnia magna* に対する毒性が強くなった。一方で pH8.0 条件では解離型が増加し, *Chlorella vulgaris* に対して毒性が強くなる傾向が見られた。また, 吸収波長の測定結果は, 解離型の割合の変化の傾向と一致しており, pH に伴う変化が毒性にも影響していることが示唆された。

一方で, *p*-AP は *Daphnia magna* に対して EC₅₀ を算出できたが, *Chlorella vulgaris* では明確な EC₅₀ を算出できなかった。さらに時間経過に伴い, 吸収波長が大きく変化し, 新たなピークが出現したことから, *p*-AP は水中で酸化などの化学変化を起こしやすい不安定な物質であることが確認された。これにより, 初期濃度が維持されず, 用量反応が得られなかった可能性が高い。

以上の結果から, *p*-NP および *p*-AP の環境影響評価には, 単一の条件下で得られた毒性値のみでは不十分であり, pH や曝露時間, 光照射時間など, 環境中の変動要因を考慮した総合的な評価が必要であることが示された。本研究で得られた知見は今後の環境リスク評価の改善につながると考えられる。

参考文献

- 1) Francis Merlin Melatagua Tachieno, Ignas Kenfack Tonle, *p*-Nitrophenol determination and remediation: an overview, *Reviews in Analytical Chemistry*,

37, 2, 104-105, (2010).

- 2) Naveen Kumar Reddy Bogireddy, Yetzin Rodriguez Mejia, Tejraj M. Aminabhavi, Victor Barba, Raul Herrera Becerra, A. David Ariza Flores, Vivechana Agarwal, The identification of byproducts from the catalytic reduction reaction of 4-nitrophenol to 4-Aminophenol: A systematic spectroscopic study, Journal of Environmental Management, 316, 1-2, (2022).
- 3) Chao-Fan Yin, Piaopiao Pan, Tao Li, Xin Song, Ying Xu, Ning-Yi Zhou, The universal accumulation of *p*-aminophenol during the microbialdegradation of analgesic and antipyretic acetaminophen in WWTPs: a novel metagenomic perspective, Microbiome, 13, pp.2, (2025).
- 4) OECD, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, No. 211 Daphnia magna Reproduction Test, pp.16-17, 2012
- 5) 環境省, 化学物質の環境リスク評価 第12巻, pp.186, 199, 環境省, 2014年
- 6) 環境省, 化学物質の環境リスク評価 第3巻 (p-アミノフェノール), 環境省, 2004年

(2025年11月27日 受理)

Comparison of News Article Classification Models Using Automated Machine Learning

—A Case Study of the Changes of Defense Capability Debate in Asahi Shimbun Editorials—

Hiroharu MATSUBARA^{*,**}, Masato NAKAHARA^{***}, Hodaka SAITO^{****}

This study examines how automated machine learning (AutoML) can enhance text data visualization in social science research. Japan’s sharp policy shift toward increased defense spending after the outbreak of the Ukraine war provides a socially significant context. Using 116 Asahi Shimbun editorials related to defense capability published between 2012 and 2022, we developed 17 visualization models using AutoML. Among them, models employing clear color coding most effectively captured changes in news framing over time. The findings show that AutoML-supported visualization enables efficient text analysis and yields methodological insights into feature words of media discourse on policy transformation. (Keywords: Text mining, Quantitative text analysis, Word Cloud, DataRobot, The exclusively defense-oriented policy)

1. INTRODUCTION

Recent advances in information and communication technology have driven the explosive growth of big data and promoted the spread of data science across many domains. Global data generated and consumed was 64.2 zettabytes in 2020 and is projected to reach 149 zettabytes (trillion gigabytes) in 2024, more than twice the 2020 level (Fig.1)¹⁾. These developments have created fertile ground for quantitative text analysis and text mining in the social sciences; such methods are now widely used to support empirical studies of political discourse and collective attitudes²⁻⁴⁾. Recent studies increasingly use supervised machine learning to classify, code, or predict news content. Yet most still rely on a single algorithm, rarely comparing alternatives or testing robustness to model choice, even though small performance gaps can reshape substantive interpretations⁴⁾. To address this limitation, this study uses automated machine learning (AutoML) to compare multiple models and guide algorithm selection for news media analysis. As a case study, it examines the intensified debate over strengthening Japan’s defense capability after Russia’s invasion of Ukraine on February 24, 2022, as a rapidly shifting arena of political news discourse.

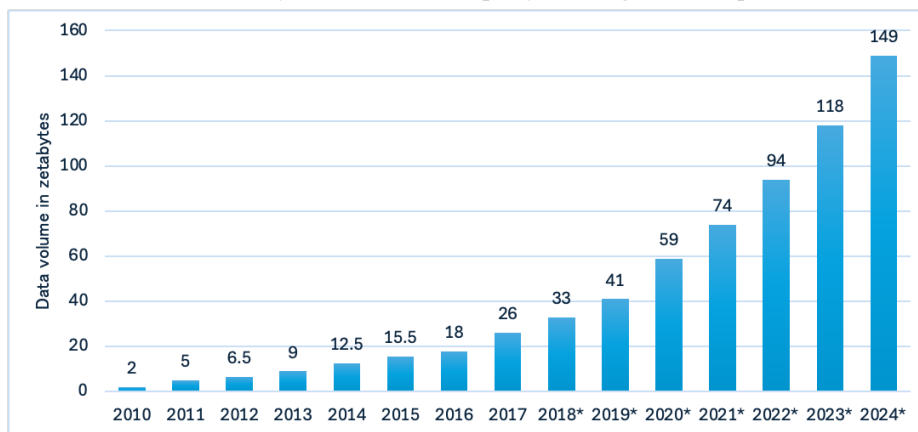


Fig. 1 Volume of data/information created, captured, copied, and consumed worldwide from 2010 to 2024¹⁾.

* Social Implementation Education Research Center, * * Department of Mechanical Engineering,
 * * * Graduate School of International Cooperation Studies, Kobe University,
 * * * * Department of Tourism, Osaka University of Tourism

2. LITERATURE REVIEW

The debate over strengthening Japan's defense capabilities intensified after Russia's full-scale invasion of Ukraine on February 24, 2022, which many in Japan viewed as a turning point for European and global security. In this context, the Kishida administration's proposal to raise defense spending to 2% of GDP became a central policy issue and a truly epoch-making shift away from the long-standing informal 1% ceiling, introduced in 1976 and maintained—aside from brief departures under the Nakasone administration—as both a fiscal guideline and a powerful political and normative boundary symbolizing postwar self-restraint and pacifism⁵⁾. This ceiling was embedded in a broader “culture of anti-militarism⁶⁾” and “utopian pacifism⁷⁾,” reinforced by a series of informal taboos identified by scholars such as Kenneth Pyle, including strict limits on overseas deployments, collective self-defense, power-projection capabilities, nuclear weapons, arms exports, defense technology transfers, military spending above 1% of GDP, and the military use of outer space, all of which encouraged Japan to maintain only minimal and exclusively defensive capabilities⁸⁾.

Within this normative framework, the concept of an “exclusively defense-oriented policy,” articulated in the 1970 *Defense of Japan* (Annual White Paper) and grounded in Article Nine's prohibition on using force to settle international disputes, defined the acceptable scope of “defense capability” by limiting military power to the minimum necessary for self-defense⁹⁾. Capabilities that appeared offensive or power-projecting were therefore viewed with suspicion, and proposals to enhance defense capability often faced strong normative resistance and fears of “remilitarization,” making even modest changes in force structure, equipment, or budgets politically costly and socially contested. The December 2022 decision to significantly increase defense expenditures thus signaled the erosion of what had long functioned as a political taboo. The rapid December 2022 decision to significantly increase defense expenditures therefore signaled the erosion of what had long been treated as a political taboo. The war in Ukraine prompted many citizens and policymakers in Japan to reconsider assumptions about the durability of peace and the role of military power in deterring aggression¹⁰⁾. Rising concern over China, North Korea, and Indo-Pacific tensions has strengthened calls, especially within the Liberal Democratic Party (LDP), to expand Japan's defense posture and move toward a 2%-of-GDP spending target, making the abandonment of the long-standing 1% cap politically highly significant.

Against this evolving background, this study analyzes newspaper editorials published under LDP administrations since 2012, with particular emphasis on the period following the outbreak of the Ukraine war. Its aim is to clarify how the notion of “defense capability” has been framed, contested, and partially redefined in Japanese media discourse, and to examine how the legitimacy of increased defense spending has been debated in these editorials.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. Text data from news articles

Referring to previous studies that use binary classification tasks for quantitative text analysis, this study constructs a labeled article dataset for supervised machine learning⁴⁾. For the analysis, we use 116 Asahi Shimbun newspaper editorials published under LDP administrations since 2012. These editorials, dated from December 2012 to December 2022, are identified by searching for “defense capability (防衛力)” in Asahi Shimbun Cross-Search¹¹⁾. Asahi Shimbun Cross-Search from the Asahi Shimbun Company is the largest newspaper article database in Japan, permitting searches of 16 million articles and advertisements from more than 140 years of the newspaper. In this

study, we analyzed editorial articles that express the newspaper company's own views. To perform a supervised machine learning binary classification task, a dataset is constructed by labeling editorials published before the Ukraine war as “0” and those after its outbreak as “1.” The resulting dataset includes 82 pre-war editorials and 34 post-war editorials and uses the headline (article title) and text (article body) as input features for the models.

3.2. Modelling Setup and Visualization in DataRobot

This study adopts text mining as a method for visualizing news articles, combining quantitative text analysis with Word Cloud representations. Quantitative text analysis counts how often each word appears in the dataset, enabling the identification of salient terms and overall tendencies in an objective and systematic way^{2, 3)}. Building on this idea, the analysis uses supervised machine learning with the AutoML platform DataRobot to classify two news article datasets—before and after the outbreak of the Ukraine War—according to differences in feature words. Feature word extraction is conducted by a data scientist, who operates DataRobot and selects suitable models from the resulting Word Clouds, and two researchers with PhD in political science then qualitatively interpret the selected Word Clouds, discussing how the feature words relate to changes in political discourse. By extracting and comparing feature words through this procedure, the study clarifies how the vocabulary of the articles shifts across the two periods while minimizing the influence of the researcher’s prior assumptions and subjectivity^{2, 3)}.

Figure 2 shows an example of data processing and machine learning workflow in DataRobot¹²⁾. In DataRobot, the Comprehensive modelling mode was chosen, which runs all model blueprints from the repository. The logarithmic loss (LogLoss) accuracy metric and fivefold cross-validation (CV) are chosen for optimizing the ML algorithm training. Within this framework, influential feature words are visualized using a Word Cloud based on TF-IDF weighting¹³⁾, where up to 200 terms are displayed and the size of each word reflects the number of samples in which it appears, while the color scale indicates its contribution to the prediction¹²⁾. Red signifying a stronger positive influence on the target class and blue indicating a stronger negative influence.

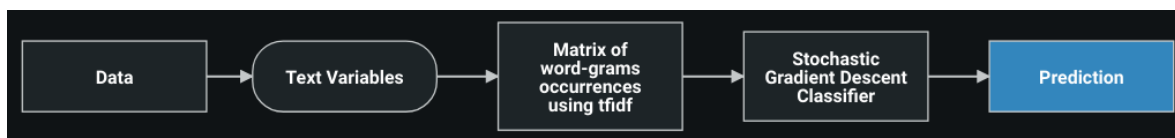


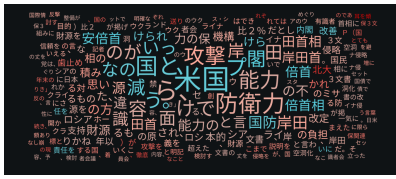
Fig. 2 Example of DataRobot's data processing and machine learning workflow.

4. RESULTS

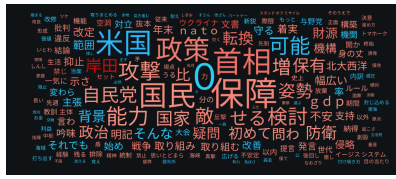
4.1. Summary of the classification models

We conducted supervised machine learning to extract binary classification by using DataRobot. Figure 3 shows the 17 Word Clouds of visualization models generated by DataRobot. The visualization relies on four natural language processing algorithms, namely the Word N-gram and Char N-gram models¹⁴⁾ (Models (a), (d), (o), and (q)). It also uses six deep learning algorithms, including Slim, Deep, and Wide Residual Neural Networks (ResNet)¹⁵⁻¹⁷⁾, corresponding to Models (b), (c), (e), (h), (i), and (j). In addition, six Elastic-Net Classifiers¹⁸⁾ are employed—Models (f), (g), (k), (l), (n), and (p)—where the L1 and L2 terms indicate the regularization norms (Lasso and Ridge). Finally, one Stochastic Gradient Descent Classifier¹⁹⁾ is used, corresponding to Model (m). Models (a), (d), and (f) are trained using only the text (article body), whereas Models (o), (p), and (q) use only the headline (article title),

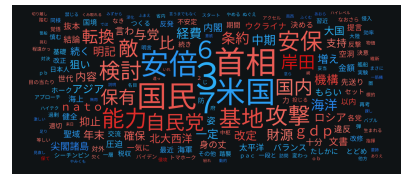
and all remaining models take both fields as input. In Fig. 3, Models (c), (e), (h), (i), and (j) display clear red and blue shading, making them especially suitable for gaining substantive insight.



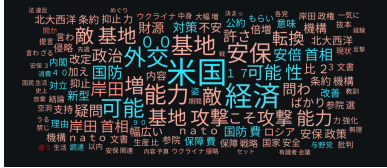
(a) Auto-Tuned Char N-Gram Text Modeler using token occurrences and tfidf -text



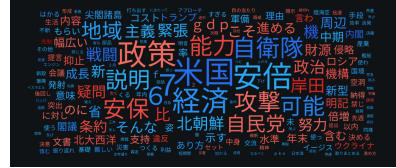
(b) Keras Slim ResNet Classifier using Adaptive Training Schedule (1 Layer 64 Units)



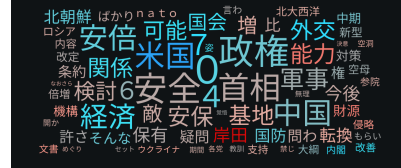
(c) Keras Deep ResNet Classifier using Training Schedule (2 Layers 512, 512 Units)



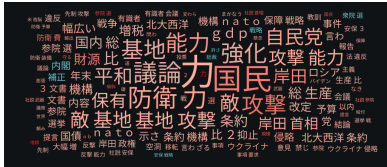
(d) Auto-Tuned Word N-Gram Text Modeler using token occurrences and tfidf - text



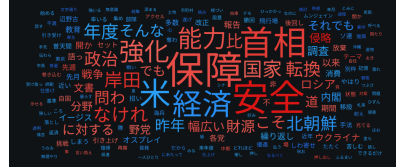
(e) Keras Wide ResNet Classifier using Training Schedule (1 Layer 1536 Units)



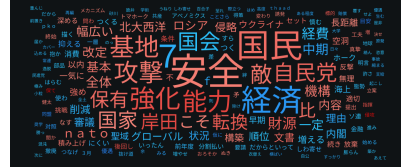
(f) Elastic-Net Classifier (mixing alpha=0.5 Binomial Deviance)



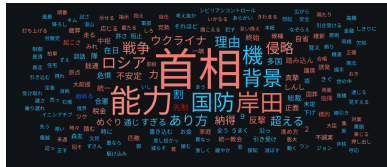
(g) Elastic-Net Classifier with Naive Bayes Feature Weighting (L2)



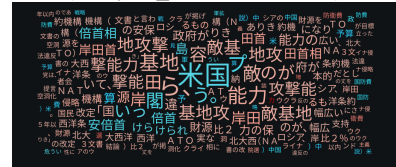
(h) Keras Deep ResNet Classifier using Training Schedule (3 Layers 512, 64, 64 Units)



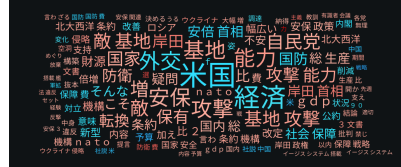
(i) Keras Deep Self-Normalizing ResNet Classifier using Training Schedule (3 Layers 256, 128, 64 Units)



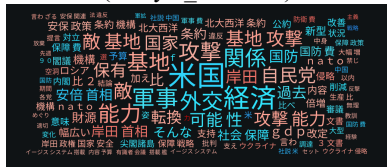
(j) Keras Slim ResNet Classifier using Training Schedule (1 Layer 64 Units)



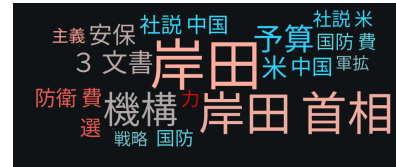
(k) Elastic-Net Classifier (L2 Binomial Deviance)



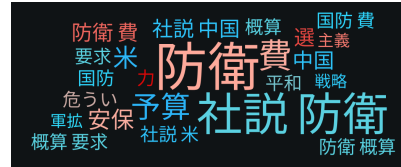
(l) Elastic-Net Classifier (L2 Binomial Deviance)



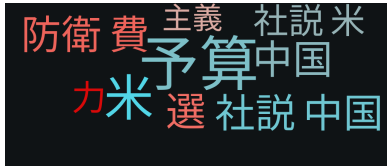
(m) Stochastic Gradient Descent Classifier



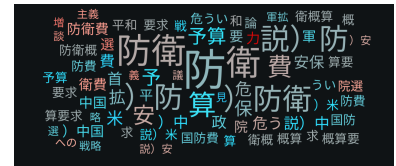
(n) Elastic-Net Classifier (mixing alpha=0.5 Binomial Deviance)



(o) Auto-Tuned Word N-Gram Text Modeler using token occurrences and tfidf -headline



(p) Elastic-Net Classifier (L1 Binomial Deviance)



(q) Auto-Tuned Char N-Gram Text Modeler using token occurrences and tfidf -headline

Fig.3 Visualization of feature words in cluster prediction by Word Clouds. The size and color of each term reflect its influence direction and magnitude. Red indicates after Ukraine war, and blue indicates before Ukraine war.

4.2. Evaluation of machine learning models

Furthermore, the processing time generated algorithms were evaluated in terms of logarithmic loss (LogLoss). Here, LogLoss is defined by Eq. (1).

$$LogLoss = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i \log p_i + (1 - y_i) \log(1 - p_i)) \tag{1}$$

Here, n is the number of data points, y_i is the class label (that is, 0 or 1), and p_i is the probability that i_{th} data point belongs to dataset 0 or 1. LogLoss indicates the prediction performance and increases the case of the prediction value that leaves the correct label. By contrast, it decreases the prediction value that approaches the correct label. Table 1 compares the 17 classification models generated in this study: for each model, LogLoss is reported both on the training dataset and under cross-validation (CV), and the rows are sorted in ascending order of training LogLoss. Range indicates the width of the Word Cloud feature. The wider the range, the darker and clearer the letters in the Word Cloud will appear. In terms of accuracy, LogLoss by training dataset was 0.091 to 0.502, LogLoss (CV) was 0.303 to 0.597.

Table 1 Comparison of 17 machine learning models generated by DataRobot.

Model	Words	LogLoss	LogLoss(CV)	Range
(a) Auto-Tuned Char N-Gram Text Modeler using token occurrences and tfidf -text	198	0.091	0.377	[-0.13, 0.79]
(b) Keras Slim ResNet Classifier using Adaptive Training Schedule (1 Layer 64 Units)	186	0.144	0.493	[-0.48, 0.72]
(c) Keras Deep ResNet Classifier using Training Schedule (2 Layers 512, 512 Units)	184	0.144	0.304	[-0.87, 0.95]
(d) Auto-Tuned Word N-Gram Text Modeler using token occurrences and tfidf - text	110	0.158	0.430	[-0.23, 0.58]
(e) Keras Wide ResNet Classifier using Training Schedule (1 Layer 1536 Units)	186	0.170	0.354	[-0.96, 0.85]
(f) Elastic-Net Classifier (mixing alpha=0.5_Binomial Deviance)	71	0.175	0.443	[-0.59, 0.45]
(g) (Elastic-Net Classifier with Naive Bayes Feature Weighting (L2))	126	0.245	0.450	[-0.11, 0.95]
(h) Keras Deep ResNet Classifier using Training Schedule (3 Layers 512, 64, 64 Units)	183	0.259	0.350	[-1.00, 0.94]
(i) Keras Deep Self-Normalizing ResNet Classifier using Training Schedule (3 Layers 256, 128, 64 Units)	186	0.266	0.303	[-0.82, 0.96]
(j) Keras Slim ResNet Classifier using Training Schedule (1 Layer 64 Units)	186	0.272	0.578	[-0.96, 0.66]
(k) Elastic-Net Classifier (L2_Binomial Deviance)	177	0.273	0.421	[-0.37, 0.53]
(l) Elastic-Net Classifier (L2_Binomial Deviance)	123	0.296	0.425	[-0.58, 1.00]
(m) Stochastic Gradient Descent Classifier	117	0.316	0.441	[-0.70, 0.54]
(n) Elastic-Net Classifier (mixing alpha=0.5_Binomial Deviance)	18	0.465	0.553	[-0.33, 0.61]
(o) Auto-Tuned Word N-Gram Text Modeler using token occurrences and tfidf -headline	23	0.469	0.597	[-0.48, 1.00]
(p) Elastic-Net Classifier (L1_Binomial Deviance)	9	0.502	0.424	[-0.15, 0.56]
(q) Auto-Tuned Char N-Gram Text Modeler using token occurrences and tfidf -headline	72	0.525	0.612	[-0.35, 0.47]

The maximum number of words used for visualization was 198, and the minimum was 9. This is likely because the maximum value of DataRobot's Word Cloud function was set to 200 words. Models (f), (n), (o), (p), and (q) were excluded because the number of feature words was small, ranging from 9 to 70, making it difficult to gain insights from them. Among the remaining models, we then focused on the five models with cross-validated LogLoss values below 0.4, namely Models (a), (c), (e), (g), and (h). Table 2 compares the top 15 most frequent words produced by these five models, and Model (e) *Keras Wide ResNet Classifier using Training Schedule (1 Layer_1536 Units)* was selected for qualitative interpretation because it provides the most balanced visualization of the words that classify pre- and post-Ukraine war articles in the supervised learning task.

Table 2 Comparison of the top 15 most frequent words for the five models with LogLoss (CV) of 0.4 or less.

Rank	(a)			(c)			(e)			(h)			(i)		
	Word	Response	abs_freq	Word	Response	abs_freq	Word	Response	abs_freq	Word	Response	abs_freq	Word	Response	abs_freq
1	米国	-0.11	43	3	-0.52	53	米国	-0.87	43	保障	0.67	52	安全	0.43	49
2	ら、	0.12	37	首相	0.59	45	政策	0.52	41	安全	0.94	49	国民	0.51	43
3	防衛力	0.16	35	米国	-0.61	43	安倍	-0.54	41	首相	0.75	45	7	-0.51	40
4	国と	-0.11	34	国民	0.63	43	7	-0.78	40	米	-0.62	42	経済	-0.65	39
5	ブ	-0.13	32	安倍	-0.65	41	経済	-0.68	39	経済	-0.69	39	強化	0.66	32
6	能力	0.12	31	7	-0.55	40	6	-0.73	33	強化	0.58	32	能力	0.71	31
7	攻撃	0.21	31	6	-0.59	33	自衛隊	-0.86	32	能力	0.65	31	攻撃	0.46	31
8	けで	0.11	29	攻撃	0.55	31	攻撃	0.52	31	国家	0.58	24	基地	0.48	31
9	う。	-0.11	29	基地	0.68	31	能力	0.70	31	岸田	0.81	22	敵	0.48	27
10	閣	-0.13	28	能力	0.83	31	安保	0.68	31	なけれ	0.80	22	自民党	0.55	26
11	容	0.12	27	安保	0.59	31	説明	-0.51	30	転換	0.65	21	国会	-0.43	26
12	減	-0.12	27	検討	0.55	29	可能	-0.76	30	年度	-0.59	21	国家	0.39	24
13	のが	0.13	26	敵	0.58	27	地域	-0.62	27	北朝鮮	-0.67	20	保有	0.52	23
14	田	0.15	26	自民党	0.74	26	自民党	0.55	26	政治	0.64	20	岸田	0.68	22
15	いつ	-0.11	25	国内	0.48	25	岸田	0.85	22	比	0.68	20	転換	0.60	21

4.3. Qualitative interpretation based on Word Cloud visualization

Next, the results of the qualitative interpretation are presented. The aim of this analysis is to clarify, for the post-Ukraine war period, how “defense capability” is framed and partially redefined in Japanese media discourse, and how the legitimacy of increased defense spending is discussed in newspaper editorials. In Fig. 4, words such as “attack (攻撃)” and “financial resources (財源)” appear in dark red, indicating a strong positive contribution to the post-Ukraine war class. This suggests that, after Russia’s invasion of Ukraine, “defense capability” was increasingly linked to the idea of “attack,” and that the focus of debate shifted from treating defense policy as a taboo toward more concrete discussions of “financial resources” and how to fund expanded defense spending.

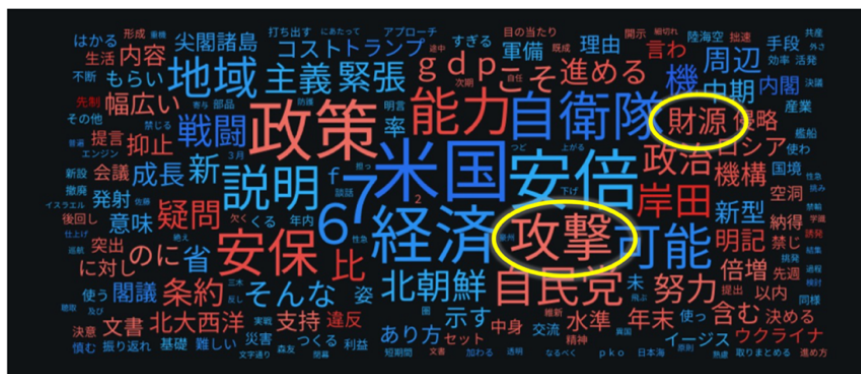


Fig. 4 Word Cloud (reprinted) visualizing characteristic words before and after the Ukraine war using Model (e).

4.3.1 Increasing number of articles containing the word “attack”

Figure 5 shows a sharp rise in Asahi editorials using “attack” after the outbreak of the Ukraine war, especially in late 2022. Table 3 illustrates this shift in tone through two examples. In the pre-war editorial on March 31, 2017 (above of Table 3), “enemy base attack capability” is portrayed in a strongly critical tone. The editorial explicitly states, “I cannot fully agree,” expressing skepticism toward the proposal. Underlined sections further highlight concerns that such a capability could undermine Article Nine’s spirit, erode the exclusively defense-oriented policy, and “potentially escalate the war” if Japan were to attack enemy bases. In contrast, the post-war editorial on November 24, 2022 (below one) discusses the same concept more moderately, framing it as part of strengthening “defense capability” and enhancing “deterrence,” yet noting that such deterrence is uncertain and may not necessarily prevent future attacks, thereby maintaining a cautious view of potential escalation and regional instability.

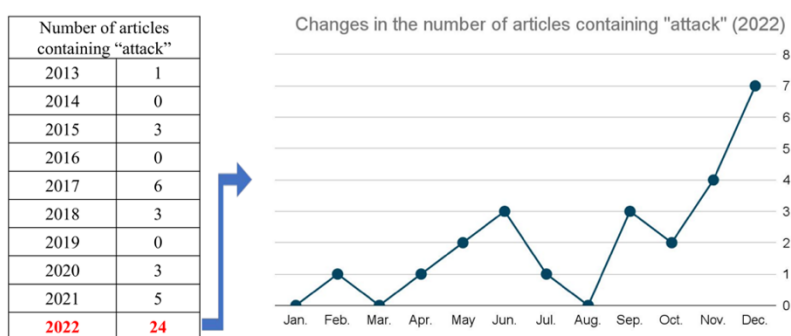


Fig.5 Increasing number of articles containing the word “attack”.

Table 3 Shift from critical to moderate tone on “attacks” around the Ukraine war.

<p>March 31, 2017, Editorial: <i>Enemy base attack capability: The exclusively defense-oriented policy becomes hollow</i> We call on the government to begin considering acquiring the capability to strike enemy missile bases. A LDP study team compiled this proposal and submitted it to Prime Minister Abe. While the prime minister responded, “I would like to take it seriously,” <u>I cannot fully agree</u>. While it is necessary to address North Korea’s nuclear and missile development, <u>acquiring the capability to strike enemy bases will not solve the problem</u>. On the other hand, <u>there is a risk that it will hollow out the principle of exclusively defense-oriented policy based on Article Nine’s prohibition</u>. (...) <u>If Japan were to attack enemy bases, the Self-Defense Forces could potentially escalate the war</u>. · Furthermore, attacking enemy bases requires offensive weapons such as long-range cruise missiles. The proposal cites examples such as determining the location of enemy bases, disabling the radar sites protecting them, and precision-guided missiles, <u>but these would represent a significant departure from the traditional equipment system based on exclusively defense-oriented policy</u>. (...) <u>The move to consider enemy base attack capabilities, given the many issues involved, is risky</u>.</p>
<p>November 24, 2022, Editorial: <i>Hone your comprehensive capabilities to put the people first and protect your country</i> The Kishida administration is expected to reach a conclusion on revising three security-related documents within a month. This could mark a major shift from the postwar, restrictive defense policy. (...) Possessing long-range missiles would allow Japan to launch them into enemy territory in the event of a threatened attack or as a counterattack in the event of an attack. The acquisition of enemy base attack capabilities, which has only been under consideration for the past few years, is a key component of the defense strengthening plan. <u>While this is said to provide a “deterrent” that would dissuade other countries from attacking, it is not guaranteed</u>. (...) Under Article Nine of the Constitution, Japan has upheld an exclusively defense-oriented policy. This is a declaration that Japan will not pose a threat to other countries, and it has likely provided neighboring countries with what is known in international politics as “reassurance.” Deviating from a principle maintained for nearly 80 years and acquiring equipment capable of preemptive attack would put Japan in a security dilemma and could accelerate regional instability.</p>

Note: Both articles are abbreviated excerpts from editorials in dataset ¹¹⁾; underlining and translation by the authors.

4.3.2 From strong opposition into “financial resources” debates on defense spending

Figure 6 shows that, after the outbreak of the Ukraine war, debates on defense spending increasingly converged on “financial resources,” especially from August 2022 onward. In the May 30, 2018, editorial in Table 4, proposals to move toward the NATO 2% benchmark were denounced as “completely unacceptable,” with strong opposition to “doubling the budget” and virtually no concrete discussion of how to fund it. By contrast, the April 23, 2022, editorial still warns that counterattack and enemy base attack capabilities could erode the exclusively defense-oriented policy and spur a regional arms race, but it also questions whether doubling defense spending within five years is fiscally realistic and stresses the need to secure “truly necessary” budgets while considering cost-effectiveness. Overall, the axis of controversy has shifted from outright rejection of expansion to budget-centered debates over the sustainability and financing of increased defense spending.

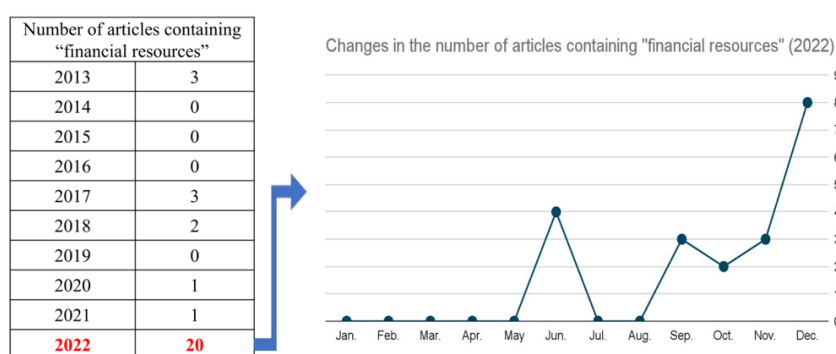


Fig.6 Revitalizing the discussion on “financial resources”.

Table 4 From firm opposition to fiscal discourses on defense expenditures.

<p>May 30, 2018, Editorial: <i>National Defense Program Guidelines Proposal: The Dangerous Path of “Doubling the Budget”</i></p> <p>This proposal, which treats defense spending as a sacred cow despite unprecedented fiscal difficulties and <u>pursues an arms race that deviates from the principle of exclusively defense-oriented policy, is completely unacceptable.</u> (...) The report characterized Japan's current security environment as "the most critical situation since the war" and called for exceeding the 1% of GDP (gross domestic product) target, which has limited defense spending growth. It cited the example of the North Atlantic Treaty Organization (NATO), which aims for a 2% target, as a "reference point." Are we really trying to double defense spending, which has ballooned to over 5 trillion JPY, to 10 trillion JPY? <u>It is the height of irresponsibility to make such ambitious claims without any discussion of funding.</u> (...) It is certainly true that the Self-Defense Forces need to counter the Chinese navy's aggressive maritime expansion. <u>However, simply responding to force with force risks only increasing tensions in the region.</u> It is also unacceptable to over-hype the threat of North Korea's nuclear and missile development, and to use it as a catalyst for building up defense capabilities. While diplomatic efforts by related countries continue toward peace and stability on the Korean Peninsula, <u>the LDP's insistence on military buildup is running counter to the trend of the times.</u></p>
<p>April 23, 2022, Editorial: <i>The Counterattack Capability Proposal: Its Dangerous Nature Remains</i></p> <p>It deviates from the principle of exclusively defense-oriented policy based on the Constitution and risks <u>instability in the region through an arms race.</u> (...)It contains content that could lead to a shift in the restrained security policy that Japan has adhered to since the end of World War II, <u>and this cannot be overlooked.</u> A thorough discussion from a broad perspective is necessary. (...) Regarding defense spending, the government aims to achieve the necessary budget level within five years, keeping in mind the NATO member states' goal of 2% or more of GDP. Currently, it is around 1%, and with fiscal pressures, is <u>doubling it in five years a realistic goal?</u> <u>While we understand the need for steady defense development in light of an increasingly severe security environment, the fundamental principle is to accumulate the truly necessary budget while carefully examining cost-effectiveness.</u></p>

Note: Both articles are abbreviated excerpts from editorials in dataset ¹¹⁾; underlining and translation by the authors.

5. DISCUSSION AND CONCLUSION

This study applied text mining to visualize patterns in news articles on Japan’s defense policy. Using the AutoML platform DataRobot, it generates models that predict changes in news coverage from 116 editorials and shows that models with diverse feature sets and clear visual outputs are particularly effective (Fig. 3 and Table 1,2). The analysis indicates that, since the outbreak of the Ukraine war, “defense capability” has appeared more frequently alongside terms such as “attack (Fig.5)” and “financial resources (Fig.6),” while attention in the discourse has increasingly shifted toward “financial resources” and the costs of defense expansion (Table 4).

The findings of this pilot study indicate that comparing multiple models with AutoML can guide algorithm selection in news media analysis, even with small datasets. Training and evaluating 116 editorials show different algorithms surface distinct feature-word sets, offering complementary views of shifts in Japan’s defense-capability debate after Russia’s invasion of Ukraine. However, adopting a LogLoss (CV) cutoff of 0.4 and limiting the dataset to one decade of “defense capability” editorials impose methodological constraints, so results are exploratory. Future work should validate on larger, more varied dataset, broaden search terms, extend time spans, and include additional newspapers to better capture how Japanese media discourse evolves amid changing regional and global conditions.

As of December 2025, Japan’s security environment is shifting rapidly. The tensions in Japan–China relations have deepened following Prime Minister Takaichi’s November 7 statement in the Diet that a Taiwan contingency could constitute a “survival-threatening crisis” permitting the exercise of collective self-defense²⁰). In this context, machine-learning-based analysis of news articles, such as in this study, offers a useful benchmark for stepping back from daily events and gaining a more reflective view of Japan’s evolving security debates.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was conducted using DataRobot, a machine learning platform provided by the Social Implementation Education Research Center, the National Institute of Technology (KOSEN), Tokyo College.

This paper is part of the collaborative research projects: “*AI-Based Media Analysis: Focusing on the Ukraine War and the Changing Process of Japan's Defense Policy*” (Nov. 2023 – Mar. 2024) and “*AI-Based Media Analysis: Focusing on Social Media Discourse on Defense Awareness*” (Apr. 2024 – Mar. 2026) conducted by Graduate School of International Cooperation Studies, Kobe University and the National Institute of Technology, Tokyo College. This paper is based on a poster presentation titled “*What is Defense Capability? : The Evolution of Defense Debates in Asahi Shimbun Editorials*” (by Masato Nakahara, Hiroharu Matsubara and Hodaka Saito) presented at JAMS76, held at Osaka University on Mar. 17, 2024. We would like to thank everyone commented on this study.

REFERENCES

- 1) B. Berisha, E. Mëziu, I. Shabani : Big data analytics in Cloud computing: an overview, *Journal of Cloud Computing*, Vol.11, Issue 1, Aug. 2022. DOI: [10.1186/s13677-022-00301-w](https://doi.org/10.1186/s13677-022-00301-w)
- 2) K. Higuchi : *Quantitative text analysis for social researchers : a contribution to content analysis*, 2nd Edition, Nakanishiya Shuppan, Mar. 2020. (in Japanese)
- 3) A. Watakabe : Transition of Peace Consciousness in Peace Declarations, *Japanese Sociological Review*, Vol.72, Issue 2, pp.118-134, Jul. 2021. (in Japanese) DOI: [10.4057/jsr.72.118](https://doi.org/10.4057/jsr.72.118)

- 4) J. Jansen : Nationality swapping in the Olympic Games 1978–2017: A supervised machine learning approach to analysing discourses of citizenship and nationhood, *International Review for the Sociology of Sport*, Vol.54, No.8, pp.971-988, 2018. DOI: [10.1177/1012690218773969](https://doi.org/10.1177/1012690218773969)
- 5) Y. Komaki : Debates over Increasing Japan's Defense Budget. *Issue Brief*, no. 1204, National Diet Library, Research and Legislative Reference Bureau, Sep. 6, 2022. (in Japanese)
https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_12317517_po_1204.pdf?contentNo=1
- 6) T. U. Berger : From Sword to Chrysanthemum: Japan's Culture of Anti-militarism, *International Security*, Vol.17, No.4, pp.119–150, Spring, 1993. DOI: [10.2307/2539024](https://doi.org/10.2307/2539024)
- 7) M. Inoki : From Utopian Pacifism to Utopian Militarism, *Chūō Kōron*, Vol.95, Issue 12, pp.62-75, Sep. 1980. (in Japanese) DOI: [10.11501/3365942](https://doi.org/10.11501/3365942)
- 8) K. B. Pyle : *Japan in the American Century*, The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts. Oct. 2018.
- 9) Y. Tatsumi, A. L. Oros (Eds.) : *Japan's New Defense Establishment: Institutions, Capabilities, and Implications*, The Henry L. Stimson Center, Washington, DC. Mar. 2007.
- 10) M. Kamiya : The courage to acknowledge the necessity of military force, *THE SANKEI SHIMBUN*, Jul. 31, 2023, Morning Newspaper. (in Japanese, accessed Sep. 21, 2025)
<https://www.sankei.com/article/20230731-EGO2EP7TBBLCTPPMIK53IXJ44Q/>
- 11) Asahi Shimbun Cross-Search Website : <https://xsearch.asahi.com>
- 12) DataRobot Website : <https://www.datarobot.com/>
- 13) K. S. Jones : A Statistical Interpretation of Term Specificity and Its Application in Retrieval, *Journal of Documentation*, Vo.28, No.1, pp.11-21, Jan. 1972. DOI: [10.1108/eb026526](https://doi.org/10.1108/eb026526)
- 14) Modeling algorithms, DataRobot Website :
<https://docs.datarobot.com/en/docs/reference/pred-ai-ref/model-list.html>
- 15) K. He, X. Zhang, S. Ren and J. Sun : Deep Residual Learning for Image Recognition, *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp.770-778, Jun. 2016. DOI: [10.1109/CVPR.2016.90](https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90)
- 16) X. Liu, Z. Liu, C. Li, Y. Dong, M. Wei : SlimResNet: A Lightweight Convolutional Neural Network for Fabric Defect Detection. In: L. Pan, J. Liang, B. Qu, (eds) *Bio-inspired Computing: Theories and Applications. BIC-TA 2019. Communications in Computer and Information Science*, Vol. 1160, Springer, Singapore, pp.597-606, Apr. 2020. DOI: [10.1007/978-981-15-3415-7_50](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3415-7_50)
- 17) S. Zagoruyko, N. Komodakis : Wide Residual Networks, version 4, Jan. 2017. DOI: [arXiv:1605.07146](https://arxiv.org/abs/1605.07146)
- 18) H. Zou, T. Hastie : Regularization and Variable Selection Via the Elastic Net, *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, Vol. 67, Issue 2, pp.301–320, Mar. 2005.
DOI: [10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x)
- 19) T. Zhang : Solving Large Scale Linear Prediction Problems Using Stochastic Gradient Descent Algorithms, *Proceedings of ICML 2004*, Banff, Alberta, Canada, Jul. 2004. DOI: [10.1145/1015330.1015332](https://doi.org/10.1145/1015330.1015332)
- 20) K. Ewe : What to know about China and Japan's escalating spat over Taiwan, BBC, Nov. 18, 2025, (accessed Dec. 2, 2025) <https://bbc.com/news/articles/crklvx2n7rzo>

(Received December 4, 2025)

©東京工業高等専門学校

東京工業高等専門学校研究報告書

第57号

令和7年度

令和8年3月31日発行

編集者 東京工業高等専門学校 情報・図書・広報室

発行者 東京工業高等専門学校

〒193-0997 東京都八王子市櫛田町1220-2

TEL (042) 668-5111