

*Research Reports of
National Institute of Technology, Tokyo College
No. 54, Mar. 2023*

東京工業高等専門学校
研 究 報 告 書



第 54 号

2023. 3

目 次

学生との対話から再構築する物理の授業とその改善 ー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ー	藤井 俊介	1
東京高専の入学生における体力に関する基礎的研究	溝渕 絵里, 八田 直紀, 黒田 一寿	11
A Study of a STBC-MIMO-OFDM Wireless System for Specified Radio Microphones Hiroyuki HAMAZUMI, Shuta IIJIMA		18
スパッタ Si 膜積層による光導波型 SPR センサの高感度化	新國 広幸, 伊藤 浩	25
リアルタイム情報共有モバイルマルチホップネットワーク 田中 晶, 中村 悠哉, 新井 瑛貴, 仮谷 星汰, 杉本 葉玖, 須藤 大翔, 立山 明日菜, 長濱 真人, 森下 大輝		28
ネオニコチノイド系農薬であるチアメトキサムの原体及びその分解生成物の オオミジンコ繁殖阻害性に関する研究	庄司 良, 岩崎 多聞	37
『はざまる工房』を拠点とした新たな形の公開講座開講 向川 拓臣, 遠藤 蒼太, 大塚 遼之介, 杉浦 昂樹, 熊澤 匠真, 吉元 照貴, 中村 源一郎, 永吉 真知子, 松岡 敏, 新田 武父, 庄司 良, 玉田 耕治		46

CONTENTS

Student oriented Physics class starting from question and answer dialogue, evaluated with DCAP-form improvements — Instructional design oriented to learning process of each student —	Shunsuke FUJII	1
Characteristics of Physical Fitness among Students Enrolled at the National Institute of Technology, Tokyo College	Eri MIZOBUCHI, Naoki HATTA, Kazutoshi KURODA	11
A Study of a STBC-MIMO-OFDM Wireless System for Specified Radio Microphones	Hiroyuki HAMAZUMI, Shuta IJIMA	18
Sensitivity Improvement for an Optical Wave-Guided SPR Sensor by Lamination of Sputtered Si Film	Hiroyuki NIKKUNI, Hiroshi ITO	25
Real-time Information Sharing Mobile Multihop Networks	Akira TANAKA, Yuya NAKAMURA, Teruki ARAI, Seita KARIYA, Haku SUGIMOTO, Taika SUDO, Asuna TATEYAMA, Masato NAGAHAMA, Daiki MORISHITA	28
Study on the Reproductive Inhibition of <i>Daphnia magna</i> Exposed to Thiamethoxam, a Neonicotinoid pesticide and the Degradation Products	Ryo SHOJI, Tamon IWASAKI	37
Organization of new-style open lectures held in the “Hazamaru Kobo”	Takumi MUKOUGAWA, Sota ENDO, Ryonosuke OTSUKA, Koki SUGIURA, Takuma KUMAZAWA, Shoki YOSHIMOTO, Gen-ichiro NAKAMURA, Machiko NAGAYOSHI, Satoshi MATSUOKA, Takenori NITTA, Ryo SHOJI, Koji TAMADA	46

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—

藤井俊介*

「物理をより楽しく、より分かりやすく」という思いは、物理教員の悲願である。この思いを実現するために、筆者が 14 年間の物理教育の中で行ってきた授業改善を、授業の実施・結果の確認・改善・授業計画の立案(DCAP サイクル)の観点でふりかえり、まとめる。

(キーワード: 物理教育, 定期試験の分析による系統的な授業改善)

Student oriented Physics class starting from question and answer dialogue, evaluated with DCAP-form improvements -Instructional design oriented to learning process of each student-

Shunsuke FUJII*

Every physics teacher wants students to learn physics as enjoyable as possible and tries to give them ability to make true physical insight into daily phenomena in physics. To realize this easier-to-learn and effective instructional design of physics class, I will review my experiences and methods of my 14 years' physics class in terms of DCAP-cycle improvements such as some trials of physics instruction (Do), the analysis of the results in mid-term and final examination(Check), improvements and feedback to students(Action) and next year instructional design (Plan).

(Keywords: Physics education, DCAP-cycle with examination analysis)

1. 導入

日常の教育業務の中で筆者は、「学生の物理的思考力を育てられているのだろうか」という疑問を抱いていた。

10 年以上前に行っていた授業(附録 1)を思い返すと、授業の解決すべき課題として、授業内容が筆者の教育理念に伴わず「学生に伝わる授業ができない」という**筆者の教え方の問題**と、「物理の基礎理解ができていない」という**学生の学びの問題**を、二重に抱えていた。14 年間(大学 1 年, 県立高校 5 年, 東京高専 8 年)の授業改善の中で、筆者の教え方の問題は解決しつつあり、近年は授業をより洗練することに力を注げるようになってきた。本稿では、学生が現在の授業(当該科目: 3 年物理 V, VI)において基礎概念が理解できない問題を**物理の学び方**^{*1}の観点で分析し、授業を改善していく過程を紹介した上で、これまでの筆者の物理教育を総括する。ただし、D 評価を取るような

理解度の低い学生の理解度を高める試みも別途実施しているが、それは本稿の範疇を超えた多角的な観点・方法となる。このことから、論旨を明確にするため、それについては今回は議論せず別の機会にまとめたい。

筆者の支えとして、授業実践の中で絶えず意識している言葉がある。すなわち、「**学力が下の学生と上の学生を同時に伸ばす**」というものである。この言葉は、筆者が県立高校の教諭時代に熟練した先輩教諭から受けた助言¹⁾であり、教科教育の究極目標であると筆者は考えている。この言葉を筆者の解釈で言い換えると、「理解度の低い学生には理解の基盤となる考え方を、理解度の高い学生には基礎概念の修得に必要な考え方および発想の転換を含めた思考訓練を、全ての学生に同程度伝える」ことである。

本稿は、本校の標準的な教育活動(授業・定期試験・授業アンケートのフィードバック(:=学生への還元)・計画)の中で取り組んできた記録である。そのため以後も、時系列的に同様の順序(Do Check Action Plan)サイクル)^{*2}で報告する。

^{*1}基礎概念が理解できない原因は初期では複合的で、筆者の教え方の問題と学生の学び方の問題が混在する。授業の改善・洗練後も残る教育困難な学生が[物理の学び方]の問題を抱える学生である。

*一般教育科

^{*2}近年は、「DCAP サイクルは、未知の領域・変化

当該科目における学生の理解度の確認には、公式行事である定期試験を活用する。試験の作題では、学生が学習を怠ると確実に試験の素点が下がり、努力していると試験の素点が相対的に上がるように、授業ノート・教科書・問題集から問題を練り上げる。試験により、あらゆる学習段階(本校でいう S, A, B, C, D レベル)の学生の努力を評価することを作題意図としている。試験の出題内容は、教科担当教員から学生へ公式的に送る最強のメッセージであり、学習内容と学習方法の振り返りと反省を学生に促すことができる。

授業では、学習強化の手法である**教育内容・学習段階の小分割化[スモール・ステップ³⁾化]**を特に多用する。この小分割化により、成功体験および確実に理解できる部分を増やし、学生の学びを促進できる。

本稿の構成は、2 節で授業実施の様子を、3, 4 節で定期試験による確認とそれを踏まえた次の授業展開の例を示し、5 節で改善計画を示すことで、全体として「実施・確認・改善・次年度の実施計画(DCAP サイクル)」の形で整理した。6 節, 7 節でまとめと将来展望とし、現在までの物理教育を総括する。

2. 学生の理解状況を踏まえた授業実践 (Do)

以下に記載する「**定性的**」^{※3}理解は、「測定値の変化を見つつ、計算を介さずとも予測できる大雑把ではあるが確かな傾向」を読み取れること、と狭義に定義する。

東京高専で 8 年間、年度ごとに 5 クラス分計 40 回の「物理 V」(波動分野)の授業を実施してきた。その結果、学生の理解が追いつかなくなる箇所などの要所が判明しつつあり、初めからそのポイントを踏まえた授業を行っている。授業での試行錯誤の中で、筆者が理想とする「原理的理解を質疑

する領域において、PDCA サイクルよりも強みを発揮する」(仮説)として実社会の業務改善²⁾で注目・試行され始めている。一方、PDCA は決めたことを統一的、安定的に実施できる長所がある。DCAP で学生の状況にあった授業改善を行い状況が安定したのち PDCA サイクルに移行するなど、両者を組合わせた長期的な授業改善も考えられる。

※3「定性的」≡「直感的」と思ってもよいが、精度の高さは、直感 < 定性 < 定量であるため、本稿では区別する。

応答による対話で促進する」授業ができるようになりつつあり、その授業を楽しむことができる学生も、様々な(S, A, B, C の)理解度の学生から出てき始めている。その様子は、附録 2 にまとめた。質疑応答の内容は、設定や定義の確認から、物理法則と直感のずれに関するもの、物理法則の深い理解に通じる本質的な質問までであった。理解度が中程度から高い学生は授業中に質問するなど積極的に参加しており、理解を深めたと期待できる。前述の「下と上の理解度をもつ学生両方を育てる」理念は、部分的に実現できているのではないのか。

2.1. 授業の進め方

波動分野は波源の理解から始まるため、筆者は波源の導入背景も含めた説明・授業構成を心がけている。具体的には附録 3 にまとめた。

波源の單元では前提も含めて授業内容を**小分割化**し、円運動の観察、表現の仕方、単振動、波源の特徴付けまで、ほぼゼロから導入する。実施方法は、演示実験の「定性的」理解、作図による情報集約、用語定義に基づいたグラフ理解により、定量的理解につなげることを目指して授業実践している。

これらの経験を生かした、学習段階として有効な小分割化の提案は、5 節の計画で再び扱う。

2.2. 方程式の日本語への翻訳

学生の理解が追い付かなくなる箇所を探していく中で、「**物理現象から数式に至るまでの間に言葉による表現をはさむ**」ことで、思考過程を補強できる可能性に気づいた(学習内容の小分割化の一つ)。すなわち、「**数式の意味を語学のように『翻訳』できるか?**」と学生に問いかけるのである。この言語化は、今まで、謎の記号のようにしかとらえられていなかった数式の意味を言葉に置き換え、数式を言語感覚でとらえ直すきっかけになるため、学生の苦手意識の低減にも有効である。

例をあげると、運動方程式「 $ma = \text{合力}$ 」について苦手意識を持つ学生は多い。そこで、学生には「数式を言葉に直す」という意味での「翻訳」を通して運動方程式の意味や位置づけを考えさせている。翻訳の模範解答例としては、「物体にはたらく**合力がゼロでない**」^{※4}とき、その合力を原因として、

※4力の和がゼロでないというのは、物体にはたらく力が相殺しきれずに、「残った力が物体にはたら

質量 $m[\text{kg}]$ の物体が合力と同じ向きに加速し続ける」である。この数式の翻訳により、学生が運動方程式の意味・目的・使用方法を言葉で把握でき始めている^{※5}。授業内容を理解しているつもり of 学生でも、図に基づいて立式することは案外難しい。数式から翻訳した言葉を頼りに物理的な状況を図的に想像しながら運動方程式を立てられるようになることが、今後の課題である。

数式の翻訳を通して、「数式は言語である」と認識させることにより、物理において積年の、類似概念の混同(例えば「力のつり合い」と「運動方程式」の混同など)も解消していくと期待される。

2.3. 実験レポートの文章改善から拓く現象把握

筆者の経験から、物理学習で日本語をおろそかにしている学生が多いと感じている。そこで、ここ数年、学生の実験レポートの赤入れ(チェック)をより徹底し、やり直し指導をしているため、以下に紹介する。

実験レポートを学生に正しく書かせることは案外難しい。自明な実験でも、レポートを書かせることで状況認識や言葉での表現の問題が現れる。例えば、実験レポートの「どうなるか?」という問いに対して、「〇〇だから」のように述語だけで解答し主語がないものが多く見られた。

主語を省くのは「日本の文化」とも言われるが、物理実験の報告(レポート)は、英文の報告書を書くつもりで主語と述語を明確に書く必要がある^{※6}。そうでなければ、物理現象を正確に描写できず、あいまいなまま終わってしまう。そのため、実験レポートを書く際には「主語と述語を対応させた完結した文章」で実験テキスト⁵⁾の各設問に答えるように注意・強調し、やり直し等もさせている。

光の反射の実験⁵⁾の例を挙げる。図1のように、鏡を(紙面に)垂直に立てて鏡に映った釘 A の像 A' を視差から特定^{※7}するという実験において、「釘の

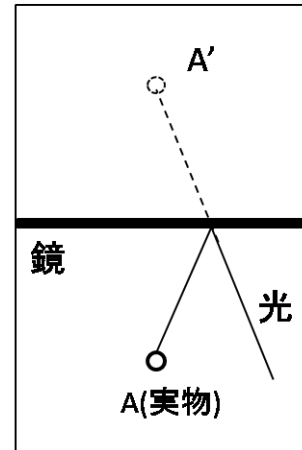


図 1 光の反射の実験

虚像 A' は釘と鏡の位置に対してどのような特徴付けができるか」が、明らかにするべきテーマである。しかし、基本的な特徴をとらえることができていない学生でも、述語「線対称の関係にある」を書くのみで、**実験結果を的確に表現するための主語を書いていない**場合が多い。「私」や「あなた」という1人称・2人称の主語ではなく、「**もの**」を主語とする文章を書くことが、実験結果を正確に認識し、表現する出発点となる。また、主語を「釘 A とその虚像 A' 」とすると、「線対称である」という述語も「何に対して」線対称かについての詳細情報を追加説明すべきことが分かる。

「線対称であること」が見抜けにくいなど、実験の特徴を理解していないレポートがあった場合には、「述語が不適切」という指摘をし、レポートのやり直しと実験設定の確認させている。具体的には以下のような指摘事項を印刷して学生 of レポートに付け加えている。「A と A' の関係は、一直線上だけではなく、A, A' 点それぞれから境界(=鏡)に引いた直線とのなす角、平面からの距離(直線)の関係にも触れてください。それをまとめて、鏡の位置で決まる境界線に対して何「対称」といいますか。主語と述語を明確にして表現してください。」などである。

物理の基礎概念がなかなか理解できない場合、このように実験結果一つを説明するにも、最適な主語と述語で表現できないことがあり、それらを正確に選ぶことができるように指導することが、実験における観察能力の向上や能動的な基礎概念の修得につながると筆者は考えている。

く」ということである。

※5 「数式を見ると思考が止まる」学生が、数式に慣れるきっかけになる。

※6 歴史的には、物理学(窮理学)は、江戸～明治時代あたりに西洋から輸入された⁴⁾ため、日本古来の文化ではない。

※7 本稿での表現を簡単にするため、視差から虚像の位置を特定する過程は、図1から取り除いてあ

る。

3. 定期試験から見る典型的な誤答傾向(Check)

定期試験を記述問題にすると、どういう背景からその誤答が生まれたのかが分析しやすく、学生の教科指導につなげることができる。

採点してみると、学生は、授業内容を大筋では理解・吸収している。理解度の低い学生を除いて^{※8}、多くの学生の誤答は、現在の物理(当該教科)の問題として筆者の教え方の精細化に帰着させられる。その内容の一部は、次の節で示すように基礎演習プリントの形で集約し、どこから説明を始めるか、どのように説明するかを考え^{※9}て、次年度の通常授業の改善につなげている。

4. 授業アンケートのフィードバックと次年度の授業への反映(Action)

授業アンケートで、「課題が多い」などの指摘があった。これは、「楽に^{※10}効率的に勉強したい」学生と「物理をしっかりと理解できる実力をつけてほしい」筆者との間でのギャップが背景にある。かねてから筆者は、学生の問題集への取り組み方について疑問を抱いていたため、以下のように学生に提案した。「問題集は、『やっつけ』^{※11}で演習するのではなく、自分の実力を上げるために、どう取り組むのが最も良いかを考えて学習すべきである。私(=筆者)が課題に設定した問題の分類を紹介すると、テーマごとに、①定義の確認のための基本問題、②思考の核になる問題、③類題、④応用問題から成る。段階的・構造的に学習を進めてほしい。まずは①基本問題(定義確認含む)と②核になる問題に集中して取り組んではどうか。①基本問題や②核になる問題を背景まで含めて理解するように取り組むには、かなり時間がかかるはずである。全ての学生が同じ学習段階とは想定し

てないので、他の人と同じ方法で取り組む必要はない。自分の理解状況に合わせて、物理の①基礎問題(定義確認含む)に加えて、②核になる問題を理解するために、教科書や授業ノートを見直し、分からなくなっている部分を学び直し、整理して集中的に理解するようにしてはどうか。問題を解く際にも、用語の定義が理解できていないと問題文を正確に読めない。用語が分かれば問題文から作図への情報集約を練習できる段階に達するし、それができるようになれば、解答する方針を考える練習に集中すればよい。類題・応用問題は思考に幅を持たせる意図なので、たとえ手がつけられなかったとしても、この方法で演習を進めれば定期試験を解くための基礎力はしっかりと備わるはずである。」これにより、問題演習の目的と、「効果的」^{※12}に取り組む方法をアンケートのフィードバックとして伝えることができた。

授業アンケートでは学生と教員の意識のずれ違いが明確になるため、テストの誤答分析と同様に、学生の思惑と教員の教育方針をすり合わせた上で分析を進めると、教員から学生への真剣で有効な提案・助言・指導につなげることができる。

定期試験の典型的な誤答から示唆される学生が理解できていない前提知識のうち、理解してほしい内容を演習問題に組み込む。筆者はこれを、内容理解の補強を目的とする基礎演習プリントとして、B4 用紙の表に問題、裏に簡潔な解答を記載した 1 枚完結型のプリント教材にまとめ、次年度の授業で新 3 年生に配付している。

5. 物理の教科指導の設計 (Plan)

ここでは、2 節から 4 節までの授業実践・分析・反映を踏まえた授業設計上の注意点を挙げる。

5.1 物理の教科の特性といくつかの教育手法

ここでは、教育内容・学習段階を小分割化[スモール・ステップ³⁾化]した各段階について説明する。まず、①物理の教科特性として定量的扱いが中心になるが、物理として「定性的」に理解できる部分から始めて直感的イメージを作っていく上で定量的な取り扱いに入っていくことで、定量的理解と直感的理解の両立を目指す。次に、②演示実

※8理解度の低い学生の誤答分析には、本稿の範疇を超えた観点と詳細な前提理解の分析が必要になる。論旨の明確化のため、本稿では議論しない。
※9例えば、「なぜ〇〇ではないのでしょうか?」といった発問から始めて、誤解を解いていくという流れで授業することが考えられる。

※10学生の中には体力的な問題、他教科とのバランスの問題を挙げてくる学生もいる。それも考えて返答したのが、この節のやりとりである。

※11「やっつけ」とは、問題集の答えを丸映ししてノートに並べているだけに見える課題ノートで、学生の思考力の強化につながると筆者が思えないものを指す。

※12効果的に学習する方法を考えることは重要であるが、学習に効率性を求めると効果的な学習と両立しないことがあるので注意したい。

験による導入，③物理用語から日常語の類似概念を排除する学習指導，④物理的作図による情報集約・思考の整理を説明する。これら全てを総合することで物理の問題の理解につながることを示し，1 節に挙げた[物理の学び方]の問題についての解決策を提案する。

5.1.1 物理の教科特性と筆者の教育方針

物理に苦手意識を持っている学生でも，(中学)理科は好きだったという学生が多い。その中には，実験が好きで定性的理解ができる学生だけでなく，実験は(見世物として)好きであるが，定性的理解は苦手とする学生も存在する。特に定性的理解が苦手という学生に対し，(中学)理科と物理の共通点を意識させることにより，「なんで(なぜ)?」という素朴な疑問を学生に抱かせ，物理に親しめるようにしたい。

一方，物理は(中学)理科と異なり定量的要素が強く，計算が多くなるのは事実である。しかし，情報を集約・整理し，グラフの作図を通して読み解くと，ある特定の状況では計算せずとも予測が立つ「定性的」理解^{※13}も可能である。これは，実験結果を直感的に解釈するのに役立つ。実験結果の「定性的」理解を直感と結び付けていくことで，定量的な思考への準備ができる。

物理現象の**基礎概念の形成**は観察から始まる。始めに「定義ありき」ではなく，その現象をとらえる上で，その物理量(例えば，加速度)の定義がなぜ妥当なのかを実験で観察・追体験しながら「定性的」理解を深め，最終的に定量的理解として与えられた定義で整理できることを納得することが望ましい。この実験・観察・整理・抽象化の過程を丁寧にたどれるように指導することは，究極的には「目の前の物理現象をどのように見抜いて普遍的な物理法則を見出すか」を根本的に考えられる学生を育てることにつながると考えている。

5.1.2 演示実験による導入から始まる物理教育

授業は「つかみ→導入→展開→まとめ」で完結する。特に，つかみは心理的障壁を下げる目的である場合と，物理的状況設定を理解する目的であ

る場合がある。物理概念は「定義」が独特であるため，それに慣れる必要がある。定義に慣れるためにも物理現象の実物を見ることは重要であることから，例や演示実験は，学生の状況によってつかみとして使うこともあれば，導入として扱うこともある。

日常見られる物理現象を振り返る「つかみ」により，学生の興味・関心を引き出す。つかみは，学生の苦手意識を小さくし，「考えたい」，「聞きたい」と思わせることを目的としているため，筆者が想定していないところがつかみになることもある。その意味では，見易い大きな字を書くこと，伝わる大きさの声で授業すること，伝わる図を短時間で書くことも重要であり，一つの工夫例として作図用小道具の例を附録4に挙げた。

導入では，物理現象の観察を通して物理的な基礎概念の形成につなげる。その手法が演示実験や学生実験である。実験を通して自然現象に直面し，そこから直接的に物理法則を見抜く目を養うことができる。ここでは，筆者の授業に取り入れている演示実験に絞って紹介する。

物理の理解を促す演示教材は，必ずしも複雑なものである必要はない。例えば，テニスボールとタコ糸1本があれば，円運動の導入に便利な演示教材(図2)を作ることができる。この演示実験は，実際の円運動の様子を見るだけでなく，円運動を生じさせるためにボールにはたらく力の向きを考えるのにも役立つ。円の中心でひもを強く握っていないと円運動は維持できない。すなわち，ボールにはたらく張力は，糸に沿って円の中心に向い

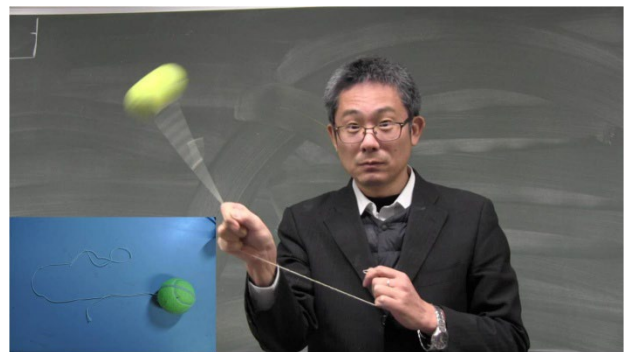


図2 円運動とは何かをつかむための演示教材

ている^{※14}ことをイメージさせることが演示実験

※13 本稿の「定性的」理解とは，「測定値の変化を見つづ，計算を介さずとも予測できる大雑把ではあるが確かな傾向」を読み取れること。再掲しておく。

※14 手は糸を通して外向きに引かれているように感じるが，それは糸がボールから受ける力でもある。この力の反作用が「ボールが糸から受ける力」

の目的である^{※15}。このように、演示実験は、普段何気なく目にしている物理現象について、どこをどのようにみれば物理的な理解につながるかという着眼点を考える機会になる。そのため、日常ではなかなか意識化されにくい多くの物理の基礎概念(速度変化、加速度、力、仕事、運動エネルギー、運動量、力積など)は、まず、実験的に可視化・実体験化し、次に、測定データが与えられている場合、そこからデータをグラフに表して可視化し、グラフの特徴的な量を分析することにより理解を深めるのがよい。ここで、指名した学生が演示実験を理解できない場合の展開は附録 5 にまとめた。

5.1.3 物理用語から日常語としての類似概念を排除する学習指導

物理用語には、日常語でもよく見かける言葉を、日常語にはない「特別な意味」で定義しているものがある。具体的には、「力」や「仕事」である。特に、日常語にある「～力」^{※16}などの言葉は、「力」という語を含んでいても物理的な意味での「力の大きさ」($[N]$ (ニュートン))の単位をもつ物理量とは直接関係がない。そのため、物理用語としての「力」の定義は、「物体の運動を特徴づける**加速(度)**を生じる原因である」ことを、特に強調して伝えておく必要がある。

同様に、物理用語の「仕事」は、「(物体に加える)力と(力に平行な方向に動いた物体の)位置変化の積」であるから、物体を動かさない(変位がゼロである)とき、仕事はゼロ^{※17}である。しかし、日常語としての仕事と、物理用語の「仕事」($[J]$ (ジュール))の単位をもつものを混同すると意味が分からなくなり、授業理解に困難が生じる^{※18}。

である。つまり、糸を通してボールを内向きに引っ張っていることに気づかせることが課題となる。^{※15}実際の授業では、糸の張力の向きは分かるが、ボールが張力と同じ向きに加速度を受けていることの直感的なイメージづくりが課題である。

^{※16}「破壊力・威力・効力・販売力・能力」など。専門用語でも「(衝)撃力(=力積)・電子親和力」など紛らわしいものがある。

^{※17}値が「ゼロ」を「存在しない」と混同する学生もいるが、 $0[J]$ という値が「存在」する。

^{※18}例えば、物理の授業を聞いていなかった学生が試験問題を見たときに、「何を言っているのかわからない」という反応を示したことがあった。この原因のうちの一つは、学生が物理用語を定義通り

物理用語を正しく理解させるために、授業では数式以前に、物理用語の定義の理解とその日常語との区別の重要性和それらができない場合の切実な問題^{※19}も挙げ、強調して伝えている。

5.1.4 物理的作図による情報の集約と思考の整理

学生が問題を解いた課題ノートをチェックしていると、問題を解く際に作図をしていない学生が大部分を占める。物理的作図とは、物理の問題文の内容を図に集約させ、内容を「見える化」していく作業である。この考え方は、物理教員なら自然にやっていること^{※20}ではある。この作図による「見える化」の目的は、次の 2 点に集約される。

1 点目は問題情報の整理である。問題文に含まれている物理量(ベクトル)の大きさや向きを図に記入することで「見える化」する。具体的には、実際の物体の配置に、力 $[N]$ 、速度 $[m/s]$ 、加速度 $[m/s^2]$ などのベクトルを、単位の異なるベクトル量ごとに矢印のデザインを変えて描き分ける(図 3)。これは、異なる単位をもつベクトル量(速度と加速度など)を合成するような誤りを防ぐための意識づけになる。

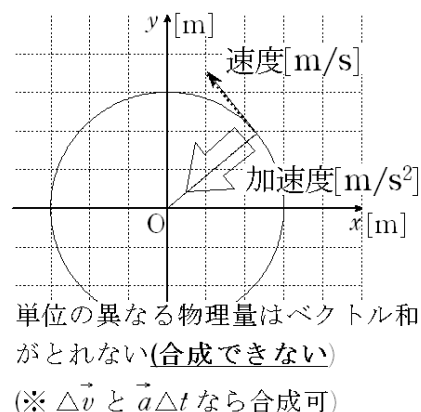


図 3 ベクトルと単位の図への記入

2 点目は、グラフを用いた状況把握である。ここでは数学と物理のグラフの違いを強調すること

理解していないことにあると言える。

^{※19}物理用語が理解できないと、物理のものの見方が身につかないので、出発点にさえ立てない。

^{※20}前職で予備校講師が学生向け特別授業で複雑な大学入試問題を解くのを見学させてもらったことがある。問題文に合わせて図を描くと状況整理が自然にできる授業構成になっており、この物理的作図の重要性を改めて認識した。

から始めると良い。まず、物理のグラフの座標軸は、数学と異なり右向きが正とは限らず、問題に応じて便利のように正の向きを決めることができる。したがって、座標軸の正の向きに対して、図に描いたベクトルの向きが同じ向きか逆向きかという相対的關係に基づき向きの符号表現を正確にできることは、出発点としてとても重要である。

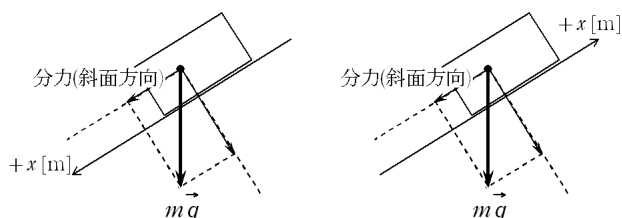


図 4 物理的作図と符号の問題

図 4 は、斜面に沿ってはたらく重力の分力の符号を決める問題の例である。このように、分力の斜面方向の成分の符号表現は座標軸の正の向きによって相対的に変わることがわかる^{※21}。(図 4 の左図では斜面方向の分力の成分が「正」、右図は「負」として表現できる。分力の向きは共に左下向き。)

次に、グラフに単位があることも数学との大きな違いである。数学の 1 次関数においては、座標軸に単位がないため傾きや切片はただ一つの意味しか持たないが、物理では座標軸に単位があるため 1 次関数といっても $x-t$ グラフか $v-t$ グラフのどちらなのかによって、傾きや切片の単位やそれぞれの物理的意味が全く異なる。グラフの座標軸の単位に基づいて傾きや切片の意味が変わることを意識することは、グラフから正しい物理的解釈を引き出すために重要である。

5.2. スモール・ステップの総合としての物理的作図とその先にあるもの

5.1.1. 節から述べてきた、物理の「定性的」理解により物理に対する心理的障壁を下げてから行う「演示実験・用語と単位・作図と情報集約・立式」の各過程は、立式に至る学習段階を小分割化[スモール・ステップ³⁾化]したものである。これらの中で弱い部分を取りあげて訓練・強化することで、学生が物理の方程式を正しく立式できるようになる^{※22}と筆者は考えている。

※21 多くの学生が、図 4 のように正の向きが相対的に変わることになじめないでいる。

※22 最終的に学生に行わせたい行動である「標的行動³⁾」

問題文から読み取ったベクトル情報などを図に集約できれば、符号を含めたベクトルの成分の表現や、ベクトル図から方程式への翻訳も自然にでき、学生の物理に対する苦手意識もかなり改善されるのではないかと。

5.2.1. 定量的分析能力向上の先に見据えるもの

$v-t$ (速度-時刻) グラフ(図 5)において、傾きや面積とそれぞれの単位の把握ができれば、物体の運動などの物理量の時間変化の傾向がグラフから読み取れ、計算せずとも物理量の変化の様子を俯瞰的に見通すことさえ可能になる。このようなグラフの図形的・幾何的解釈を中心とした解法は、「定性的部分」による見通しから厳密な定量的結果を得る方法でもあり、定量計算をベースとする代数的な問題解決方法と同じくらい重要である。

物理量をグラフの特徴量(傾きや面積)から解析していく方法は、微分・積分による解析と似ている。グラフの特徴量の正確な理解により、物理量の時間変化を扱う多くの専門分野の内容を読み解くのに必要な基礎力も備わっていくのではないかと。

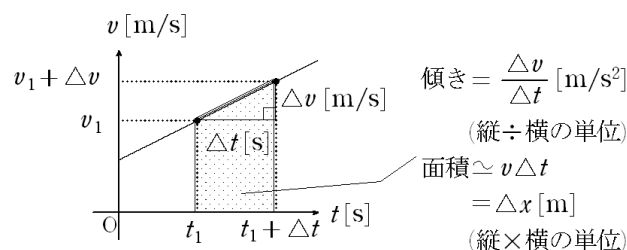


図 5 $v-t$ グラフと単位による情報整理

6. まとめ

ここまで、授業内容の紹介と学生の学びを促進する取り組みとして「数式の翻訳」、「実験レポートでの主語を明確にする指導」などを挙げてきた。そして、定期試験を分析して誤答傾向から学生の学びを確認し、学生アンケートから学生の自学・自習方法に対する提案もできた。5 節では、これまでの授業経験や定期試験の分析に基づき、基礎に不安がある学生に物理を理解させていくための着眼点として、小分割化した物理の学習内容(演示実験・物理用語の定義の理解・作図による情報集約と立式)を総合していくことを提案した。

学習段階のどこかで躓きがあると、「問題文に書

動³⁾」を小分割化して学習強化することにより、「標的行動」につなげられるという仮説³⁾がある。

かれた内容を作図して情報を集約し、立式につなげる」という当たり前のことを正しく実行できなくなる。その場合に、5.1 節のどの観点を訓練すればよいかという学び直し指導の目安として、本稿は役立てられる。補講や通常授業等でこれらを実施することで、学生の基礎理解力が向上し、効果的に物理の理解を高めることができると考えられる。

では、これらの教育活動を通して、筆者が新米の物理教師の頃と比べて学生はどう変わったであろうか。

授業ノートを取ろうとする、黒板を見ながら考えている、(自分の理解のために)初歩的な質問でも臆せず発言するなど、学生の「好ましい反応」が見られるようになった。授業に積極的に参加しようとする学生が、中間的な理解度の学生から見られるようになり、授業中に指名して発表させると「分かりません」と即答する学生でも、追加で与えたヒントから正しい結論に至る例も出始めている。問題集での演習においても、解答過程を意識して作図する学生が見られるようになった。

また、学生指導的な観点で見た最近の学生の様子は附録 6 につけた。

7. 将来展望

物理の学び方の問題を意識した教育方法は、塾等の外部機関⁶⁾や家庭内で従来から行われてきており、教育方法として何ら新しいものではない。石川正明氏は高校化学の参考書の下巻⁶⁾にパスカルの「人間は考える葦である」を引用し、「思考を停止しやみくもに暗記することは、自らの人間性※²³の破壊である」と節の冒頭で指摘しており、この言葉には筆者も深く共感した。本稿の内容は、筆者が日々の教育活動の中で感じた問題点と向き合い、その解決策を「再発見」しただけである。

本来の高専は、「長い一生を通じて**限りなく伸び続けていくことのできる潜在力ある人物**を育成する」⁷⁾教育研究機関であることが望まれる。その観点からこれまでの取り組みを見直せば、本稿は「学習の姿勢と物理の学び方から一つ一つ再生させる試み」とは言えるが、学生の「潜在力を高める」ことにつながっているかは不明である。

※²³石川氏のいう「人間性」は、「計算の背景にあるものを読み解く感性」、本校の校訓で言うと「潜在(能)力」のような意味で使われている。

むしろ、学生の理解を助けようとすればするほど、学生は依存的になり能動的に学ぼうとしなくなることも経験的に感じているため、忘れないようにしたい。そのためには、自ら考え、自分の弱い部分に気付き質問できる「自律性」を育てていくことが必要である。それにより、逆説的ではあるが、このような取り組みをせずとも、学生が当たり前のことは当たり前に(状況設定から作図・物理法則を見抜く・立式・問題解決)できるほどに成長した理想状態に近づけることも可能であろう。今後も、学生の潜在(能)力と自律性を高めることを意図した教育方法を考え続けていきたい。

謝辞

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った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物理科・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。また、本稿の構成について、本校物理科の大野秀樹先生より丁寧な助言をいただきました。大変感謝いたします。最後に、原稿の分かりにくいところを徹底的に指摘し、校正に協力してくれた妻陽子にも感謝します。

参考文献

- 1) 齊藤忠志先生(当時、岩手県立盛岡第一高校、国語科教諭)との個人的対話に基づく(2010年-2013年)
- 2) 小野和俊、「PDCAではなく、DCAPでやるべき『3つの仕事』」, DIAMOND オンライン(2020年8月)
<https://diamond.jp/articles/-/247269>
- 3) 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)
- 4) 窮理学から物理学へ——日本で最初の物理学書, 窮理, 防備録
<http://kyuurisha.com/yukichi-kohmin/>
- 5) 令和4年度 物理実験テキスト 3 学年, 東京高専物理科(2022年)
- 6) 石川正明: 新理系の化学(下), 駿台文庫

(2005 年), pp7~9(「化学反応の理論」の節の最初のページに本文で紹介した警句的な言葉がある)

- 7) 岡俊平:東京工業高等専門学校, 初代校長(岡俊平)による本校の教育方針, 令和 4 年度学生便覧
- 8) レファレンス協同データベース (2019), https://crd.ndl.go.jp/reference/detail?page=ref_view&id=1000257881
- 9) S.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
- 10) 本校の学生で、波の重ね合わせの原理をリアルタイムでシミュレーションできるソフトをスマートフォン上で作成した学生がいた。(2022 年)

【附録 1】：筆者の新任時代の授業の様子

筆者が物理を教え始めた当初、授業中に学生を観察するほどの心理的余裕はなく、ほとんど黒板しか見ていなかった。導入がなく定量的な部分の詳細(厳密さ?)にいきなり入っていき、時々直感的理解(分かりやすさ?)を促すつもりで行ったボディーランゲージが伝わらず笑いを誘う程度^{※24}で終わる、思いが空回りした教え方^{※25}だったため、難し過ぎるか簡単過ぎるかの両極端の印象で、学生は筆者の説明の全体像がつかめなかったようだ。学生アンケートでも「物理への情熱が伝わってくる」以外の項目の評価は低かった。寝てしまう学生が見られ、授業中に学生が静かなことを「よく理解している」と勘違いし、物理の定期試験で学生の理解不足に直面することも多かった。また、

※24 教員五者論⁸⁾(学者・医者・易者・役者・芸者たれ)で、筆者は「芸者」ではあったかもしれない。

※25 この教え方の意図としては厳密さと分かりやすさの両立を目指していた。

授業ノートを取ることの重要性や、課題(問題集)を通して深く考える訓練をする意義が学生に伝わっていなかった。試験で点数を取ることが目標の学生と、物理を根本から理解させたい筆者の間ですれ違いも多く、学生からの好ましくない反応に直面し、周りの先生方から当該学生への指導や筆者自身への助言をいただく日々であった。

【附録 2】授業での指導の様子と方針

演示実験や物理量の定義・物理法則がなぜ成り立つのかを中心に、原理的な理解を深められるように解説している。眠そうにしている学生には声掛けをし、眠りから起こすと同時に学生の理解状況を確認している。一方、新しい物理概念を真に理解するために必要な、問題設定の背景・考え方の基礎となる定義・その定義を用いた物理法則の意味など、「深く考える」ための一連の説明を、教科書の行間を埋める意図で追加し、論理の飛躍がなるべく少なくなるようにしている。

「なぜ？」という問いを持つことを大切にしておき、「質問は、その疑問が浮かんた(新鮮な)瞬間にするのが一番」と筆者は学生に指導している。学生による鮮度の高い質問を受けて、授業を止めて始まる質疑応答で授業が盛り上がることもあれば、学生が板書をノートに書きとる際に抱いた素朴な疑問には、個別に返すだけでなく全体補足説明として解説することもある。授業では、なぜ成り立つのか?を理解することを最重要事項としているため、熱心なクラスでは質問をひねり出している姿が見られる。学びに上限を設けず、どんな深さの質問にも答えられるように、深さを調整しながら解説している。その際には、自分で考えて納得するまでの過程を大切にしている。質問の中には、図の設定や用語の定義に関するものもあり、学生が基礎からしっかり理解しようと努力していることが感じられる。このように、筆者は学生からの質問に応じ対話的に授業を行っている。

【附録 3】「波源」の導入の授業の様子

物理を学ぶにあたって意識的に取り組んでおくとよいことの確認から始め、過年度の教科からの接続を意識した復習の後、前提となる等速円運動の演示実験の観察を通して、「定性的」性質の理解から特徴をつかませる。その上で必要な物理量の定義を導入し、「定性的」理解と直感的理解を結びつけ、「なぜ？」という疑問に答えるようにしながら

ら物理量の定量化へ進む。等速円運動の位置を把握するのに便利な角度を、弧度法^{※26}で導入する。1[rad]の定義を「半径 r [m]と円弧 Δl [m]が等しくなる」便利な角度^{※27}として導入・復習しながら、一般の角度から円運動の位相の概念を自然に導く。そして、円運動を真横から見ると単振動に見えるという関係として、演示実験に加えて、より細かな実験設定での演示ビデオや実験シミュレーション^{※28}などを通して実験的に単振動を導入し、単振動の位相変化と y - t グラフを導入・精密化して数式表現していく。

【附録 4】小道具の活用例

伝わる授業を考える上では小道具の活用も重要である。ひもで作った簡易コンパスで、比較的きれいな円弧をスピーディーに作図(図 6)することで、授業リズムをさほど落とすことなく誤解の少ない作図表現が可能になる。

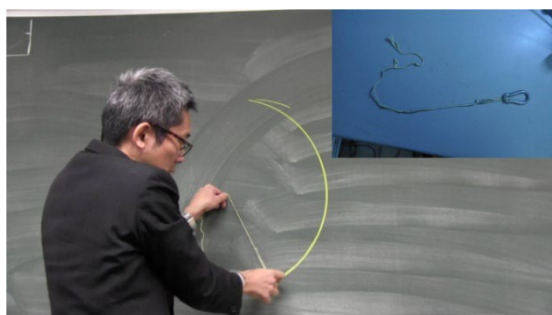


図 6 簡易コンパスによる作図

【附録 5】理解不足を補う演示教材

演示教材があると、理解不足の学生や授業を聞き逃していた学生に再度説明を試みる際にも便利である。演示実験に再度取り組む際には、学習段階の小分割化(「スモール・ステップ³⁾」化)をしながら観察させると良い。具体的には、設定や着眼すべきところをどこまで理解しているか、そこに至らない何らかの心理的・論理的混乱の所在を

対面的なやり取りで探り、補足説明していく。このように演示実験と対面での質疑応答を組み合わせることにより、演示実験の直感的理解と物理の定義や法則とのつながりを段階的に進め、学生の学びを促すことができる。このような、演示実験と対話による質疑応答過程を入れることで、学生が物理現象を作図により紙面上に再現する機会になる。自然に図を描き、図に注釈をして、物理現象の「定性的」理解を深める⁹⁾ことができる。

また、モノ作りに取り組む本校では、実際の物体がどういう運動をしているのか、学生自身が簡単な演示教材を製作し、観察し直して自らの理解につなげるような発展も期待できる¹⁰⁾。学生がモノ作りにより培った技術で測定器具を自作し、物理法則の検証につなげ、自らの学びを促進するのである。科学の検証可能性の部分とモノ作りを組み合わせた自律的な学習の形と言える。

物理と関わる形で何らかの興味が生まれれば、どのような学習段階にある学生であっても、理解の深化は可能であると筆者は考える。物理は、演示実験を通して、中学校でも親しんできた「理科」そのもの(=直感とも一貫する「定性的」理解が可能なもの)であるという意識を学生が持つことができれば、物理への苦手意識も軽減されるだろう。

【附録 6】学生指導的観点からみた学生の様子と筆者の対応

眠そうな学生や寝ている学生は残るものの、筆者からの声掛けや、授業中の指導に素直に応え、態度を改めようとする学生も出てきている。また、授業アンケート等には過激なコメントを寄せる学生であっても、授業が崩壊しそうな激しい反抗になる前に、他の先生方にも協力・援助をいただきながら、当該学生との対話を通して、問題解決の模索・提案ができるようになってきた。昔と異なり、孤独に独断で対応することは減った。

教員側の意識として、学生とのやりとりにおいて問題が大きくなってきたとき、「自分の手に負えない」可能性に気づくことは重要である。そのような時こそ、次の手を打つときで、プライドを捨て、素直に現状を周りに相談する必要があるだろう。

(昔は、学生が成長した未来を信じて、自分のやり方を通すことしかできなかった。)

(2023年1月13日 受理)

※26 学生には「弧の長さに対応する扇型のひらき角度を、半径を基準にした弧の長さとして、比の値に角度を対応させる角度」と説明している

※27 弧度法は、積分せずに、弧度 $\times$ 半径という掛け算により円弧という曲線の長さが厳密に求められる感動的な定義であることを、筆者は学生に強調している。

※28 シミュレーションは、mathematica という Wolfram の数式処理ソフトで行った。

東京高専の入学生における体力に関する基礎的研究

溝渕絵里*, 八田直紀*, 黒田一寿*

本研究では、5 年間の体力テストの結果をもとに、東京高専 1 年生と同学年の全国平均の比較や、東京高専 1 年生の結果を入学年度別に比較することにより、東京高専に入学してくる新入生の体力の特徴や傾向について明らかにすることを試みた。その結果、男子学生では全国平均値と比較して、5 年間全において低値を示した種目は、握力、上体おこし、20m シャトルラン、50m 走、ボール投げの 5 項目であった。女子学生においては握力、20m シャトルラン、50m 走、ボール投げの 4 項目であった。東京高専 1 年生において入学年度別に比較を行った結果、男女共に 2021 年度および 2022 年度入学生が、それまでの入学生と比べ、体力が低下していることが明らかになった。2021 年度および 2022 年度入学生には、自身の健康や体力の維持・向上についての意識を持たせられるような指導を行うことが重要であると考えられる。

(キーワード: 体力テスト, 入学生, 全国比較, 年度別比較)

Characteristics of Physical Fitness among Students Enrolled at the National Institute of Technology, Tokyo College

Eri MIZOBUCHI*, Naoki HATTA*, Kazutoshi KURODA*

In this study, we examined the results of physical fitness tests over a five-year period, comparing the national average values with the scores of students enrolled at the National Institute of Technology, Tokyo College (NITTC). In addition, we examined five-year-worth of test scores of the NITTC students, comparing scores they had on their first year at NITTC. The results showed that male students showed lower values than the national average for all five years in the evaluated five categories, including sit-up tests, hand-grip strength tests, 20-meter shuttle run tests, 50-meter dash tests, and ball-throw tests. Female students had lower scores in hand-grip strength tests, 20-meter shuttle run tests, 50-meter dash tests, and ball-throw tests. The results of the comparison by year of enrollment at NITTC showed that the physical fitness of both male and female students who enrolled in the 2021 and 2022 academic years declined compared to the previous academic years. It is suggested that it is especially important to provide guidance to students entering in 2021 and 2022 to make them aware of the importance of maintaining and improving their health and physical fitness.

(Keywords : Physical Fitness Test, new student, national comparison, comparison by year)

1. はじめに

文部科学省は、子供の体力の状況を把握するとともに、その改善を目的として、毎年全国で体力・運動能力調査を実施している。文部科学省が行っている「体力・運動能力調査」によると、子どもの体力は、昭和 60 年頃から長期的に低下傾向にある¹⁾。その原因として、外遊びの減少や、都市化・生活の利便化等の生活環境の変化、睡眠や食生活等の子どもの生活習慣の乱れといった様々な要因が指摘されている²⁾。こうした現代の社会状況や生活様式を鑑みれば、学校現場において、自

発的な運動習慣が子供たちに身につくよう指導することは、今後より重要になると考えられる。

こうした観点から、東京工業高等専門学校（以下：東京高専）では、毎年体力テストを授業内で実施し、日々の授業における指導に活用している。具体的には、体力レベルや運動を含む生活習慣などを学生自身に把握させることにより、学生の運動や健康への関心を高めることなどを意図している。

本研究では、体力テストの結果をもとに次の 2

* 一般教育科

点に焦点を当てて検討する。まず、東京高専 1 年生の体力テストの測定結果と同じ学年の全国平均値とを比較し、東京高専に入学してくる新入生の体力の特徴や傾向について検討する。1 年生の体力の特徴について明らかにすることは、自発的な運動習慣を身につけさせる授業内容を検討する上での手がかりになると考えられる。

次に 2020 年 1 月から新型コロナウイルス感染症が流行し始め、行動が制限されるようになったことから、新型コロナウイルス感染症の流行前後である 2018 年から 2022 年の 5 年間に着目し、東京高専 1 年生における体力の変化について検討する。

東京高専における新型コロナウイルス感染症が流行した前後の体力テストの比較は、既に黒田・八田・鈴木³⁾によって行われている。2011-2020 年度に在籍していた 1-4 年生のデータを分析した結果、登校機会抑制やクラブ活動の見合わせの影響により、シャトルランの低下率が大きくなっていることなどが明らかにされている。このように 1-4 年生を対象にした黒田ら³⁾に対し、本研究では 2018-2022 年度に在籍していた 1 年生のみに焦点を絞り、新型コロナウイルス流行の影響も考慮したうえで、東京高専に入学してくる新入生の体力の特徴や傾向について明らかにすることを試みる。

2. 対象者

2018 年度から 2022 年度の入学生 1048 名(男子 841 名、女子 207 名)であった。

3. 測定方法

新体力テスト実施要項⁴⁾に基づき説明したのち、測定を行った。測定は 4 月-5 月にかけて体育の授業時間において実施した。ただし、2020 年度については 9 月-10 月にかけての実施となった。

4. 測定項目

身長・体重・Body Mass Index (以下: BMI) に加えて、握力・上体起こし・長座体前屈など、新体力テスト実施要項⁴⁾に基づく各種目について測定した(表 1)。さらに運動習慣に関するアンケート(例: 一日の運動実施時間は?)について回答を得た。

表 1 測定項目

測定項目	体力要素
握力	筋力
上体おこし	筋持久力
長座体前屈	柔軟性
反復横とび	敏捷性
20m シャトルラン	心肺持久力
50m 走	瞬発力(走力)
立ち幅跳び	瞬発力(跳力)
ボール投げ	瞬発力(投力)

5. 分析方法

まず、身長・体重・BMI については、年度ごとに基礎統計量を算出した。さらに、BMI については、日本肥満学会の基準⁵⁾にならない 18.5 未満を「低体重」、18.5-25 未満を「標準範囲」、25 以上を「過体重」に分類した。次に、年度ごとの体力レベルの相違を検討するために、各種目の測定結果を従属変数、実施年度を独立変数とした一元配置分散分析を行った。その際、有意差が認められた場合には、Bonferroni 法による多重比較検定を行った。検定の有意水準は全て危険率 5%未満とした。なお、データの解析には統計処理ソフト (SPSS 28.0, IBM 社製) を使用し、体力テスト結果のコーディングおよび集計にあたっては、大修館体力科学研究会による「新体力テスト分析処理サービス」を利用した。

6. 結果及び考察

6.1 東京高専 1 年生の身体的特徴

対象者の身体的特徴について検討するために、年度ごとの身長・体重について示した(表 2, 3)。さらに同学年である高校 1 年年生の全国平均値についても示した(表 4, 5)。全国平均値と比較し大きな差はみられないことから、東京高専の 1 年生は、男女ともに体格的には平均的な学生であると考えられる。

また、BMI を「低体重(18.5 未満)」、「標準範囲(18.5-25 未満)」、「過体重(25 以上)」に分類し結果を図 1 と図 2 に示した。

表 2 東京高専男子入学生の身体特性

項目	年度	2018	2019	2020	2021	2022
対象者数 (人)		170	171	168	168	164
身長 (cm)	平均値	168.29	168.49	169.09	168.25	168.80
	標準偏差	5.09	6.02	5.97	5.70	5.88
体重 (kg)	平均値	55.94	57.51	56.25	56.00	56.50
	標準偏差	9.25	9.92	9.23	8.36	10.75
BMI	平均値	19.71	20.22	19.65	19.75	19.77
	標準偏差	2.84	3.02	2.88	2.82	3.17

表3 東京高専女子入学生の身体特性

項目	年度	2018	2019	2020	2021	2022
対象者数 (人)		36	38	41	39	53
身長 (cm)	平均値	156.89	158.29	158.11	158.23	157.62
	標準偏差	6.01	4.85	5.81	5.26	5.10
体重 (kg)	平均値	51.47	50.54	51.18	50.57	50.23
	標準偏差	7.58	6.60	7.34	10.58	6.95
BMI	平均値	20.87	20.16	20.44	20.16	20.22
	標準偏差	2.47	2.36	2.70	3.55	2.52

表4 全国高校一年生男子の身体特性

項目	年度	2018	2019	2020	2021	2022
対象者数 (人)		1391	1397	1411	1429	347
身長 (cm)	平均値	168.46	167.85	168.37	168.23	168.41
	標準偏差	5.66	5.85	5.75	5.81	5.66
体重 (kg)	平均値	58.15	57.37	57.40	57.80	57.90
	標準偏差	8.87	8.53	8.83	8.69	9.52

表5 全国高校一年生女子の身体特性

項目	年度	2018	2019	2020	2021	2022
対象者数 (人)		1384	1412	1413	1415	348
身長 (cm)	平均値	156.95	156.60	156.76	156.87	157.28
	標準偏差	5.30	5.37	5.36	5.28	5.35
体重 (kg)	平均値	51.16	50.82	50.82	51.07	51.13
	標準偏差	7.15	6.85	6.53	6.54	6.96

男子の結果によれば、2020年と2022年において「低体重」が全体の約40%を占めるなど、過体重よりも低体重の学生が多いことが明らかになった(図1)。同様に、女子の結果においても過体重よりも低体重の学生が多い傾向がみられ、2022年度入学生においては約30%の学生が「低体重」であることが明らかにされた(図2)。また、標準範囲に収まっている学生の割合は、男性よりも女性に多くみられる。しかしながら、女性においても標準範囲に収まる学生は2019年度までは70%を超えていたが、それ以降減少し、2022年度においては約56%まで減少している(図2)。

このような低体重学生の増加や標準体型学生の減少を引き起こしうる要因として、様々なことが考えられる。例えば、日常的な運動不足に起因する筋力低下もその一つであろう。2022年度の運動習慣に関するアンケートの結果を見ると、「低体重」に分類されている男子学生のうち体育授業以外の運動・スポーツ活動をしなない・行っても月1—3日と答えた学生は約64%おり、女子学生では約69%であった。東京高専において標準体型の学生を増やすには、体育授業を通じて運動習慣の形成を促すことがより重要になるかもしれない。

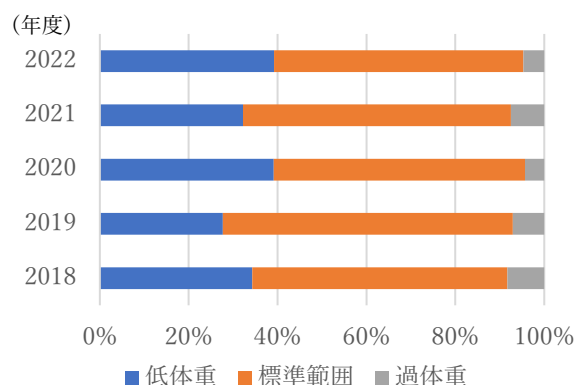


図1 男子入学生におけるBMIによる3分類の割合の推移

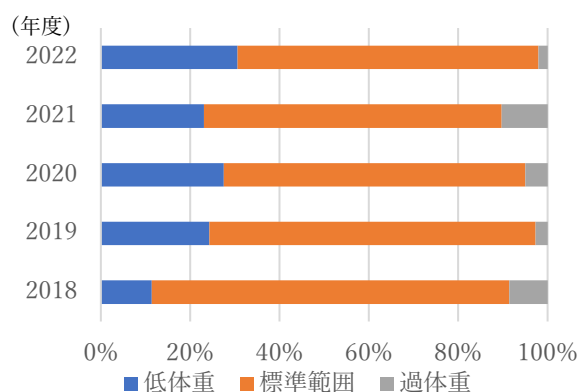


図2 女子入学生におけるBMIによる3分類の割合の推移

6.2 東京高専1年生の体力に関する特徴

次に、東京高専1年生の体力測定の結果を入学年度ごとに男女別に示した(表6, 7)。さらに、彼らと同学年に当たる全国の高校1年生の結果を同様に示した(表8, 9)。

体力テストの結果から、男子学生では全国平均値と比較して、5年間全てで低値を示したのは、握力、上体おこし、20mシャトルラン、50m走、ボール投げの5項目であった。女子学生では握力、20mシャトルラン、50m走、ボール投げの4項目であった。以下、男女共通して全国平均を下回った4種目(握力・20mシャトルラン・50m走・ボール投げ)の特性を考慮し、東京高専1年生の体力の特徴について言及したい。

握力は全身の筋力と高い相関関係があることが指摘されている。そのため、東京高専1年生は同学年の高校生と比較し、筋力不足である可能性が考えられた。また、20mシャトルランは心肺持久力を測定する指標である。運動頻度と相関関係があり⁶⁾、最も運動習慣に左右されやすい体力要素

表 6 東京高専一年生男子の体力測定結果の推移

項目		2022	2021	2020	2019	2018
握力 (kg)	平均値	32.87	34.71	35.40	35.29	35.14
	標準偏差	6.46	6.90	6.97	5.84	6.35
上体おこし (回)	平均値	26.91	28.15	28.76	28.04	28.19
	標準偏差	5.50	5.76	5.48	5.64	5.11
長座体前屈 (cm)	平均値	45.49	46.98	48.88	45.05	44.73
	標準偏差	10.70	11.98	10.92	11.56	9.53
反復横とび (回)	平均値	54.98	53.99	56.38	55.70	55.15
	標準偏差	6.02	6.45	7.42	6.07	5.28
20m シャトルラン (回)	平均値	73.95	77.03	76.07	83.72	81.26
	標準偏差	21.06	20.81	21.98	22.34	20.08
50m走 (秒)	平均値	7.60	7.45	7.71	7.70	7.63
	標準偏差	0.77	0.61	0.91	0.66	0.83
立ち幅跳び (cm)	平均値	214.79	212.93	221.70	220.02	223.27
	標準偏差	25.13	25.22	23.32	21.01	22.87
ボール投げ (m)	平均値	21.97	23.31	22.93	23.26	22.25
	標準偏差	6.35	6.39	6.52	5.89	5.47

表 8 高校一年生男子の体力測定結果の推移 (全国平均)

項目		2022	2021	2020	2019	2018
握力 (kg)	平均値	36.93	36.98	37.82	37.19	38.50
	標準偏差	7.34	7.03	7.04	6.92	7.10
上体おこし (回)	平均値	27.80	29.02	29.37	29.27	29.76
	標準偏差	5.91	5.80	5.99	6.13	5.85
長座体前屈 (cm)	平均値	46.24	47.31	47.41	46.15	47.37
	標準偏差	11.35	10.68	10.93	10.71	10.63
反復横とび (回)	平均値	54.34	55.86	56.07	55.38	55.69
	標準偏差	7.58	6.85	6.57	6.74	6.71
20m シャトルラン (回)	平均値	78.21	83.75	85.35	85.12	85.93
	標準偏差	26.65	26.93	26.28	26.08	26.68
50m走 (秒)	平均値	7.49	7.45	7.43	7.45	7.40
	標準偏差	0.56	0.54	0.56	0.55	0.54
立ち幅跳び (cm)	平均値	216.35	218.21	218.43	215.77	220.63
	標準偏差	24.43	23.03	22.99	22.56	21.96
ボール投げ (m)	平均値	23.34	23.87	24.22	24.14	24.81
	標準偏差	5.99	5.89	6.05	6.05	5.74

であることから、東京高専には運動習慣が少ない学生が数多く入学していることが推察された。50m 走は、下肢のすばやさや筋力が求められる測定種目である。体格については全国平均値と大きな差がなかったことから(表 2-5)、東京高専 1 年生は体重あたりの下肢筋力が低いことが考えられた。さらにボール投げのような投運動については、特別な投運動の経験がない限り、投動作は習熟しないことが報告されている⁷⁾。そのため、東京高専に入学してくる学生の多くは、あまり投動作を入学までに経験していないことが考えられた。このように、東京高専 1 年生は筋力、心肺持久力、走力、投力が全国平均値と比べ下回っている現状にあり、体育授業においては「走る」「跳ぶ」「投げる」といった各運動要素をバランスよく取り込む必要があると考えられる。

表 7 東京高専一年生女子の体力測定結果の推移

項目		2022	2021	2020	2019	2018
握力 (kg)	平均値	22.19	24.49	24.66	23.55	24.89
	標準偏差	4.67	4.45	3.93	4.49	5.09
上体おこし (回)	平均値	22.19	21.51	23.24	22.37	23.44
	標準偏差	5.06	5.39	4.98	5.73	5.75
長座体前屈 (cm)	平均値	46.96	52.64	49.71	47.61	48.14
	標準偏差	10.12	10.94	11.92	11.61	8.51
反復横とび (回)	平均値	47.08	46.69	48.59	48.50	47.89
	標準偏差	4.90	6.11	4.85	5.64	4.15
20m シャトルラン (回)	平均値	42.30	47.49	39.58	47.74	46.03
	標準偏差	14.50	15.21	13.52	14.61	12.20
50m走 (秒)	平均値	9.11	8.92	9.12	9.15	9.06
	標準偏差	0.83	0.78	0.89	0.92	0.66
立ち幅跳び (cm)	平均値	161.55	165.82	174.41	177.00	174.81
	標準偏差	26.50	21.91	19.26	26.30	16.59
ボール投げ (m)	平均値	12.15	12.69	13.29	12.71	12.44
	標準偏差	3.77	3.78	3.96	3.50	3.75

表 9 高校一年生女子の体力測定結果の推移 (全国平均)

項目		2022	2021	2020	2019	2018
握力 (kg)	平均値	25.69	25.52	25.59	25.44	26.07
	標準偏差	4.57	4.63	4.65	4.69	4.78
上体おこし (回)	平均値	22.33	23.36	23.23	23.00	23.35
	標準偏差	5.92	5.88	5.88	6.16	5.96
長座体前屈 (cm)	平均値	48.35	47.48	47.37	45.90	47.00
	標準偏差	9.91	10.18	9.76	9.94	10.27
反復横とび (回)	平均値	47.85	48.22	48.12	46.81	47.57
	標準偏差	5.95	5.89	5.95	6.15	6.12
20m シャトルラン (回)	平均値	48.67	50.14	49.52	49.64	50.80
	標準偏差	19.03	19.00	18.77	18.94	20.79
50m走 (秒)	平均値	8.89	8.85	8.85	8.92	8.88
	標準偏差	0.74	0.73	0.75	0.74	0.77
立ち幅跳び (cm)	平均値	172.33	172.35	171.54	167.44	172.30
	標準偏差	21.74	22.25	22.74	23.29	22.79
ボール投げ (m)	平均値	13.93	13.57	13.80	13.65	14.35
	標準偏差	4.30	4.10	4.15	4.31	4.47

6.3 新型コロナウイルス流行前後の東京高専 1 年生における体力レベルの変化

新型コロナウイルス流行前後の体力レベルの変化について検討するために、入学年度別に東京高専 1 年生の結果を比較検討した。その結果、ボール投げを除く 7 種目において統計的に有意な差がみられた。

男子学生の握力では、 $F(4,835)=4.27$ ($p<0.01$) の結果となり主効果が認められた(図 3)。多重比較の結果、2022 年度は 2020 年度・2019 年度・2018 年度に対し有意に低いことが認められた ($p<0.01$ もしくは $p<0.05$)。

上体おこしの結果についても、 $F(4,833)=4.50$ ($p<0.05$)となり主効果がみられ(図 4)、多重比較の結果、2022 年度は 2020 年度に対し有意に低い値を示した ($p<0.01$)。

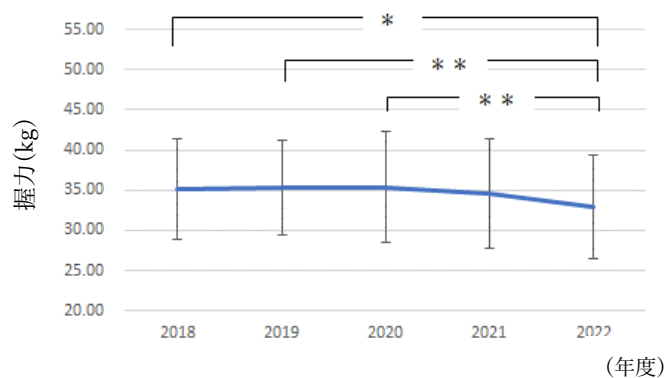


図3 握力の入学者年度別比較 (男子)

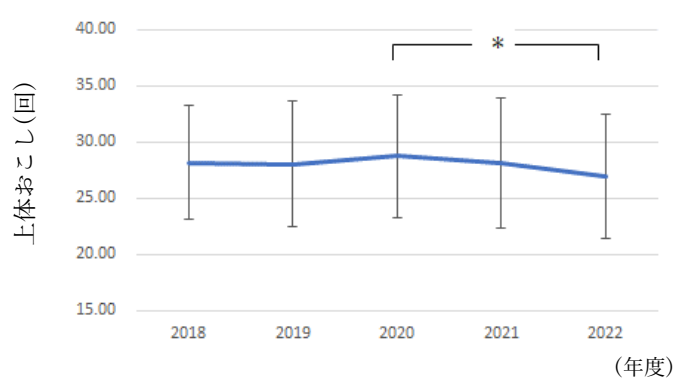


図4 上体おこしの入学者年度別比較 (男子)

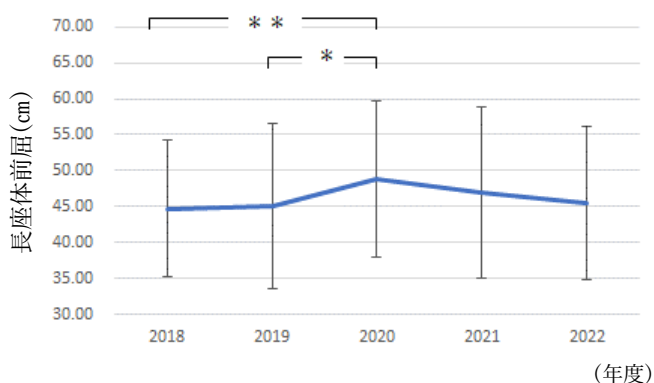


図5 長座体前屈の入学者年度別比較 (男子)

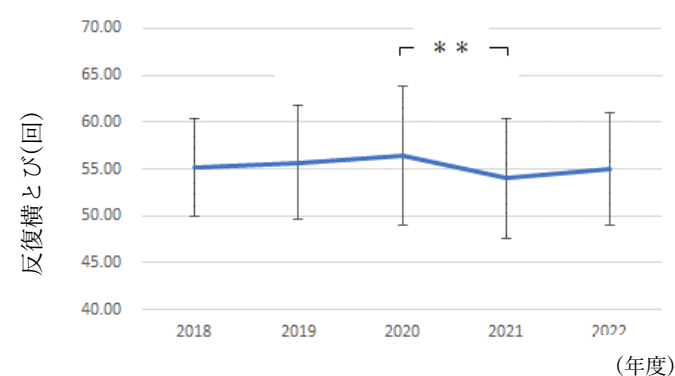


図6 反復横とびの入学者年度別比較 (男子)

(* $p<0.05$ ** $p<0.01$)

また、長座体前屈の結果は、 $F(4,835)=4.12$ ($p<0.01$) となった (図5)。多重比較を行ったところ、2020年度は2019年度および2018年度に対し有意に高い結果を示した ($p<0.05$ もしくは $p<0.01$)。

反復横跳びでは、 $F(4,833)=3.34$ ($p<0.01$) となり主効果が認められた (図6)。多重比較を行った結果、2021年度は2019年度に対し有意に低いことが認められた ($p<0.05$)。

20m シャトルランの結果は、 $F(4,813)=5.75$ ($p<0.01$) となった (図7)。多重比較の結果をみると、2022年度は2019年度および2018年度に対し有意に低いことが示された ($p<0.01$ または $p<0.05$)。さらに、2020年度は2019年度に対し有意に低い結果となった ($p<0.05$)。

50m 走の結果では、 $F(4,823)=2.97$ ($p<0.05$) となり主効果が認められた (図8)。多重比較を行った結果、2021年度は2020年度・2019年度に対し有意に低いことが認められた ($p<0.05$)。

立ち幅跳びでも、 $F(4,834)=6.04$ ($p<0.01$) となり主効果が認められる結果となった (図9)。多重比

較を行った結果、2022年度は2018年度に対し有意に低いことが認められた ($p<0.05$)。また、2021年度は2020年度および2018年度に対し有意に低いことが認められた ($p<0.01$)。

これらの結果を統合して検討すると、男子学生では2021年度および2022年度の入学生はそれまでの入学生と比べ、体力が低下傾向にあることが推測される。近年の全国体力テストの全国平均値は2019年度に比べ2021年度は男女ともに体力合計点が低下していることが明らかになっている⁸⁾が、東京高専の2021年度および2022年度の入学生でも同様な結果がみられた。

一方で、ボール投げについては、統計的に有意な差は認められなかった。その理由として、ボール投げは投運動の経験がない限り、投動作は習熟しないことや、男女ともに身体的特性は遠投距離に与える影響が少ないことが報告されている⁷⁾。このことから、投動作には過去の運動歴が重要であり、活動制限による変化はみられなかったことが考えられる。

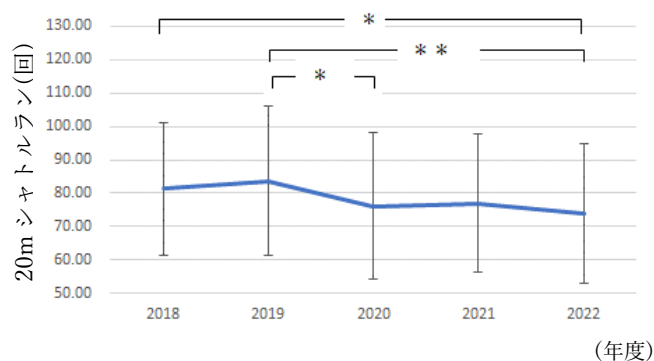


図 7 20mシャトルランの入学者年度別比較(男子)

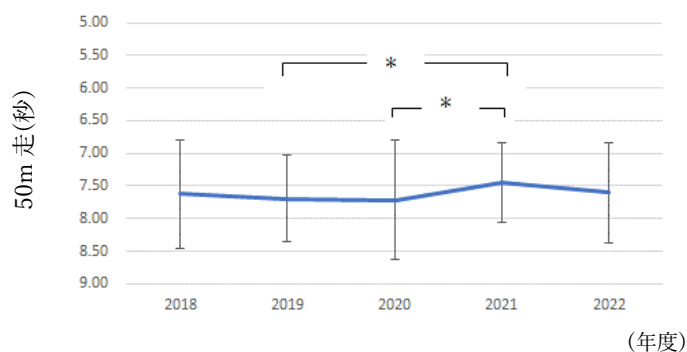


図 8 50m走の入学者年度別比較 (男子)

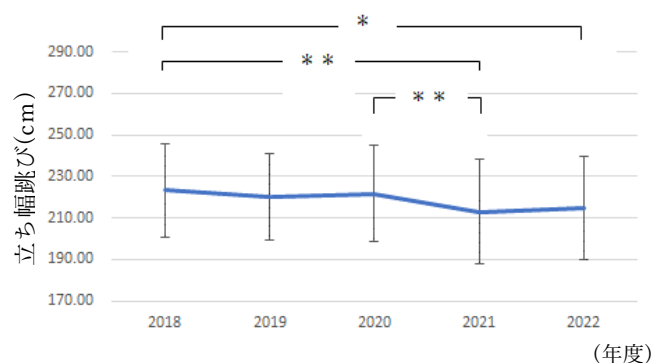


図 9 立ち幅跳びの入学者年度別比較 (男子)

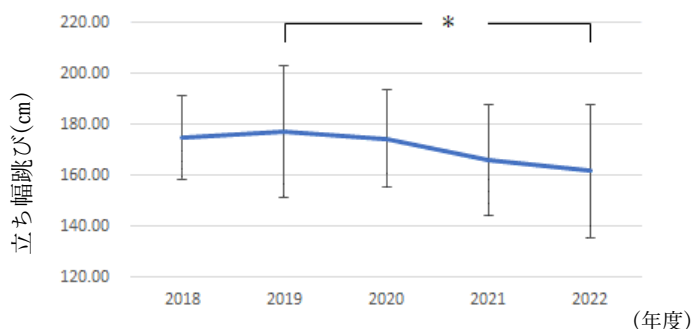


図 10 立ち幅跳びの入学者年度別比較 (女子)

(* $p<0.05$ ** $p<0.01$)

男子学生の結果と異なり、女子学生の結果において統計的に有意な差が見られたのは立ち幅跳びのみの1種目であった。女子学生の立ち幅跳びについて、年度別で比較を行った結果、 $F(4,202)=3.59$ ($p<0.01$)となり主効果が認められた(図10)。多重比較の結果、2022年度は2019年度に対し有意に低いことが認められた($p<0.05$)。しかし他の8種目では統計的に有意な差は認められなかった。その理由として、過去5年間の「スポーツは好きか」というアンケートに「大好き」「好き」と答えたのは平均で約38%であり、東京高専に入学してくる女子学生はスポーツ自体があまり好きではなく、普段から運動習慣がない学生が多いことが考えられる。一方で、男子学生の過去5年間の「スポーツは好きか」というアンケートに「大好き」「好き」と答えたのは平均で約50%であり、普段から運動に対し積極的であることが推測される。新型コロナウイルス感染症により活動制限がかかったことで、男子学生については体力の低下が推測されるが、女子学生はもともと運動習慣が乏しいため、活動制限による体力低下が生じなかったことが考えられる。

7. まとめ

本研究では、体育の授業で行う体力テストの結果をもとに、東京高専入学生の特徴や課題を見つけること、さらに5年間の入学生の比較を行い、入学生における体力の変化がみられたかを検討することを目的とした。

対象者の身体的特徴は全国平均値と比較をしても大きな差はみられなかったことから、男女ともに平均的な体格であることが分かる。一方、BMIによる分類で、男子学生および女子学生ともに低体重者が増加していることということが懸念される。

また、体力テストの結果から、男子学生では全国平均値と比較して、5年間全てで低値を示したのは、握力、上体おこし、20mシャトルラン、50m走、ボール投げの5項目であった。女子学生は握力、20mシャトルラン、50m走、ボール投げの4項目であった。低値を示すものは男女ともほぼ同様な傾向がみられた。

さらに、東京高専1年生の体力テストの結果を年度別に比較したところ、2021年度および2022年度に入学した男子学生は、例年よりも体力が低

下傾向にあることが示唆された。その理由として、中学校の3年間、新型コロナウイルス感染症によって活動を制限されてきたことが原因の一つとして推察される。そのような中学校時代を過ごしてきた学生には、心身における身体活動の効用を、体育授業を通じて伝えていくことがより一層重要になろう。学生自身が健康や体力の維持・向上についての意識を持つことができ、学生の自発的な健康行動を促進するような体育授業が求められる。

今回測定した体力テストで全国平均と比べ東京高専の学生が低値を示した心肺持久力や筋力は様々な疾病との関係が深く、将来のことを考えると軽視することができない。運動習慣の無さから生じる体力低下は、生活習慣病をはじめ様々な疾病率上昇の危険性があることを学生たちに十分に理解させる必要がある。さらに、体育の授業内だけでなく、普段から筋力トレーニングを自身で行えるような知識を身につけさせたり、学生が生涯にわたって継続していけるようなスポーツ種目を授業において紹介していくことも必要であろう。

参考文献

- 1) 文部科学省：子どもの体力向上のための取組ハンドブック
- 2) 文部科学省：スポーツ振興基本計画（平成18年9月21日改定）
- 3) 黒田一寿，八田直紀，鈴木智之：東京工業高等専門学校研究報告書，第52号，pp.25-32，2021年3月
- 4) 文部科学省：新体力テスト実施要項(12歳～19歳対象)
- 5) 日本肥満学会：肥満症診療ガイドライン2022
- 6) 鍋倉賢治：大学生の身体活動状況と全身持久力との関係，筑波大学体育科学系紀要19，pp159-166，1996.
- 7) 薄井好人，岡出美則，滝沢洋平，奥村拓朗：小学校6年生の体育授業における遠投距離改善に向けた技術的課題の検討，日本体育大学紀要，51号，pp1105-1113，2022
- 8) 文部科学省：令和3年度全国体力・運動能力、運動習慣等調査結果

（2023年1月15日 受理）

A Study of a STBC-MIMO-OFDM Wireless System for Specified Radio Microphones

Hiroyuki HAMAZUMI* and Shuta IJIMA*

Professional wireless microphones used for concerts, music programs, news programs, etc. are called specified radio microphones. They are very important equipment for audio work, and users require high reliability to transmit low-latency and high-quality audio without interruption. There are technical standards for specified radio microphones based on the Radio Law. One of the standards is based on OFDM, which has excellent multipath tolerance, but there is not enough research on reliable transmission. In order to provide a reliable transmission system, we proposed a transmission system for specified radio microphones that combines OFDM and STBC, and performed computer simulations. Based on the simulation results, we conducted a link budget and found that the transmission distance could be increased and the transmission reliability could be improved.

(Keywords: Wireless microphones, high reliability, low latency, OFDM, STBC, link budget)

1. Introduction

Professional wireless microphones are widely used in concerts, music programs, news programs, etc., and are very important equipment for voice work 1). In Japan, radio microphones that require a radio station license and use frequencies from 470 to 710 MHz, 710 to 714 MHz, and 1240 to 1260 MHz (excluding 1252 to 1253 MHz) are called specified radio microphones. Because high reliability is required for professional wireless microphones, technical standards for specified radio microphones have been established based on the Radio Law, and among them is a standard that uses OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), which is superior in multipath tolerance 2).

The purpose of this standard is to transmit high-quality voice with low latency, and the occupied frequency bandwidth is set to 600 kHz to enable linear PCM (Pulse Code Modulation) voice transmission 3).

On the other hand, users of specified radio microphones require not only high-quality and low-latency voice transmission, but also reliable transmission that is always stable. For systems with an occupied bandwidth of 600 kHz, only the 1.2 GHz band is considered to be available as a

transmission frequency. In the case of using the UHF band, which has good propagation conditions, the occupied frequency bandwidth is considered to be 288 kHz or less. However, there is a lack of research on the reliable transmission of OFDM specified radio microphones in 288 kHz systems.

In this paper, we propose a transmission scheme for specified radio microphones that combines OFDM and STBC (Space Time Block Coding) 4) with the aim of providing a reliable transmission scheme. To improve reliability, it is necessary to introduce error correction. However, since low latency is required for specified radio microphones, it is challenging to apply interleaving techniques that can effectively bring out the performance of error correction. Therefore, MIMO (Multi-Input Multi-Output) transmission, in which the signal transmitted by STBC-OFDM is received with spatial diversity, is also studied and its effectiveness is confirmed by computer simulation. In addition, the results of a line design based on the required C/N obtained by computer simulation are described.

*National Institute of Technology, Tokyo College
Department of Electrical Engineering

2. STBC-MIMO-OFDM wireless system

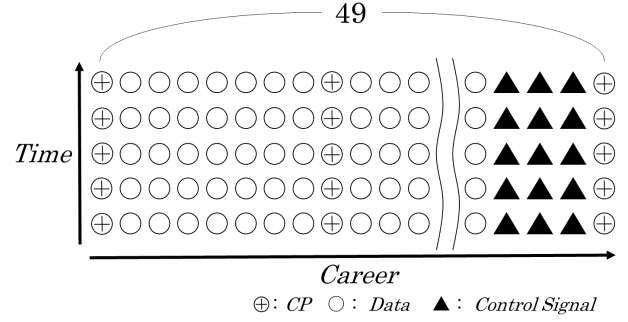
2.1 System considerations

To study the STBC-MIMO-OFDM system, the transmission frequency is set to the UHF band (470 MHz to 714 MHz) and the occupied frequency bandwidth is set to 288 kHz based on the standard 2). Since low-latency transmission is required, convolutional codes and Viterbi decoding were used for error correction. For this reason, the information bit rate was set to 192 kbps when the first-order modulation was QPSK, and the transmission bandwidth was designed to be 271.3864 kHz.

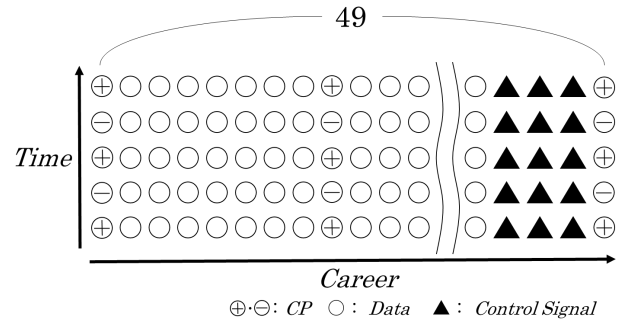
Table 1. Specifications of wireless system for specified radio microphone

Target	Specified Radio Microphone	
Transmission Frequency	470 to 714 MHz※	
Occupied Bandwidth	288 kHz※	
Transmission Power	25 + 25 mW※	
MIMO Structure	Tx: Aramoti STBC Rx: DiversityCombining 2×1, 2×2, 2×4	
Carrier Modulation	QPSK	16QAM
Information Bit Rate	192 kb/s	384 kb/s
Error Correction	Convolutional Code Code Rate = 1/2 Constraint length = 7	
FFT Clock Frequency	708.923 kHz	
FFT Points	128	
Useful symbol length	180.555556 □□s	
Guard Interval (GI) Length	22.569445 □s (GI Ratio : 1/8)	
OFDM Symbol Length	203.125 □□s	
OFDM Pilot Structure	Continual Pilot every 8 Sub-carriers	
STBC Pilot Structure	Hadamard matrix	
Number of Sub-carriers	Total	49
	Data	39
	Continual Pilot	7
	Control	3

※ The values were selected based on ARIB STD T-112 2).



(a) OFDM modulator 1



(b) OFDM modulator 2

Fig. 1 Diagram of Continual Pilot

The CP of OFDM modulator 1 transmits without sign reversal, while the CP of OFDM modulator 2 reverses the sign in the time direction and transmits separately from the two antennas. The transmission and reception system under consideration is shown in Fig. 2.

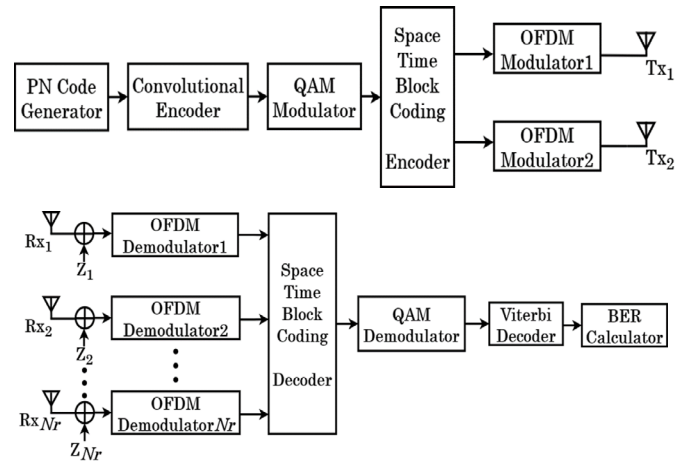


Fig. 2 Diagram of specified radio microphone system using STBC-OFDM

2.2 MISO transmission

We describe MISO (Multi-Input Single-Output) transmission. Transmitted symbols S_n and S_{n+1} are coded as a pair and transmitted over two instants in time, n and $n+1$, and a single antenna in space. Y_n and Y_{n+1} are the received signals.

$$\begin{cases} \text{Time}_n & Y_n = h_n S_n + h_{n+1} S_{n+1} \\ \text{Time}_{n+1} & Y_{n+1} = h_n (-S_{n+1}^*) + h_{n+1} S_n^* \end{cases} \quad (1)$$

In the STBC decoder, the received signal represented by equation (1) is processed as described in equations (2) and (3), and the transmitted signals S_n and S_{n+1} are extracted.

$$S_n = \frac{h_n^* Y_n + h_{n+1} Y_{n+1}}{(|h_n|^2 + |h_{n+1}|^2)} \quad (2)$$

$$S_{n+1} = \frac{h_{n+1}^* Y_n - h_n Y_{n+1}}{(|h_n|^2 + |h_{n+1}|^2)} \quad (3)$$

The propagation path responses h_n and h_{n+1} are calculated by the following channel estimation formula after interpolation by the carrier filter using information from the CP carrier.

$$h_n = \frac{1}{2}(Y_n + Y_{n+1}) \quad (4)$$

$$h_{n+1} = \frac{1}{2}(Y_n - Y_{n+1}) \quad (5)$$

2.3 MIMO transmission

We describe MIMO transmission. Diversity is constructed by estimating the propagation path response based on the CP added at the transmitter and using it to perform STBC decoding. The transmitted signals S_n and S_{n+1} at the consecutive symbol times n and $n+1$ are encoded and transmitted as follows.

$$\begin{bmatrix} x_1(n) & x_2(n) \\ x_1(n+1) & x_2(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S(n) & S(n+1) \\ -S(n+1)^* & S(n)^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

If $S(n) = S_1$ and $S(n+1) = S_2$, then the received signal at the k th antenna is as follows

$$[Y_k(n) \quad Y_k(n+1)] = [h_{1k} \quad h_{2k}] \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ -S_2^* & S_1^* \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

At this time,

$$\begin{aligned} Y_1(n) &= h_{1k} x_1(n) + h_{2k} x_2(n) \\ &= h_{1k} S_1 + h_{2k} S_2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Y_1(n+1) &= h_{1k} x_1(n+1) + h_{2k} x_2(n+1) \\ &= h_{1k} (-S_2^*) + h_{2k} S_1^* \end{aligned} \quad (9)$$

This signal is decoded at the receiving end. The received signal is decoded and combined by the following operations.

$$\begin{aligned} &Y_1(n) h_{1k}^* + Y_1(n+1) h_{2k}^* \\ &= S_1 h_{1k} h_{1k}^* + S_2 h_{2k} h_{1k}^* - S_2 h_{1k} h_{2k}^* + S_1 h_{2k} h_{2k}^* \\ &= S_1 (\|h_{1k}\|^2 + \|h_{2k}\|^2) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} &Y_1(n) h_{2k}^* - Y_1(n+1) h_{1k}^* \\ &= S_1 h_{1k} h_{2k}^* + S_2 h_{2k} h_{2k}^* + S_2 h_{1k} h_{1k}^* - S_1 h_{2k} h_{1k}^* \\ &= S_2 (\|h_{1k}\|^2 + \|h_{2k}\|^2) \end{aligned} \quad (11)$$

Adding the signals from all the antennas described in the above equation, we get

$$\begin{aligned} \therefore S_1 &= \frac{\sum_{k=1}^{N_r} \{Y_1(n) h_{1k}^* + Y_1(n+1) h_{2k}^*\}}{\sum_{k=1}^{N_r} (\|h_{1k}\|^2 + \|h_{2k}\|^2)} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \therefore S_2 &= \frac{\sum_{k=1}^{N_r} \{Y_1(n) h_{2k}^* - Y_1(n+1) h_{1k}^*\}}{\sum_{k=1}^{N_r} (\|h_{1k}\|^2 + \|h_{2k}\|^2)} \end{aligned} \quad (13)$$

With these operations, the received signal is combined and demodulated, and the transmitted signal can be extracted.

3. Computer simulation

3.1 Optimal value of the pilot signal level

When performing OFDM demodulation, synchronous detection is performed by dividing the main line signal by the received pilot signal. Therefore, if the S/N of the pilot signal is larger than that of the main line signal, the C/N improves. Therefore, we first checked the optimum value of PBR (Pilot Boost Ratio). We varied the PBR and recorded the C/N at PBR=10⁻⁵. The results, shown in Fig. 3, confirmed that the optimum value is 1.4, so the simulation is performed with PBR = 1.4.

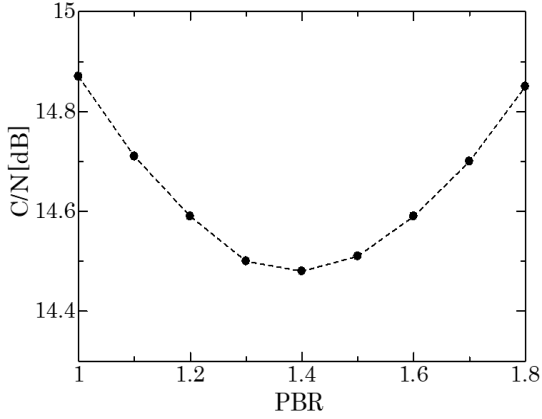


Fig. 3 Confirmation of the optimum value for pilot boost ratio

3.2 SISO system

To confirm the effectiveness of the proposed system, computer simulations of the SISO system were first performed. The fading was based on Jakes' model 5) with a Rayleigh distribution of amplitudes, and the multipath was assumed to be two paths. The average powers of each wave were assumed to be equal, and to vary Rayleigh independently. The maximum Doppler frequency was set to 10 Hz, assuming that a person wearing a radio microphone would be running.

In the STBC-OFDM system, the BER characteristics before and after error correction for the SISO antenna configuration are shown in Fig. 4. Fig. 5 shows the BER characteristics under the same conditions with 16QAM carrier modulation. Note that γ is the D/U of each path and τ is the delay time.

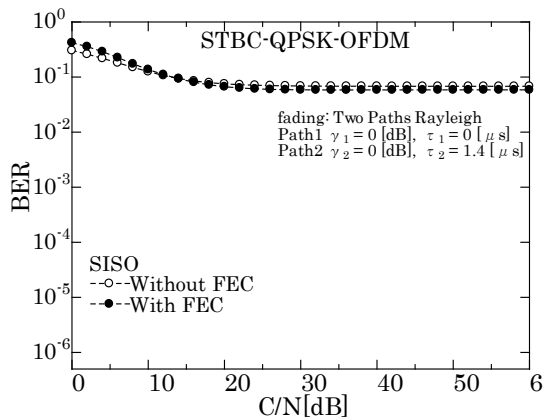


Fig. 4 SISO-QPSK

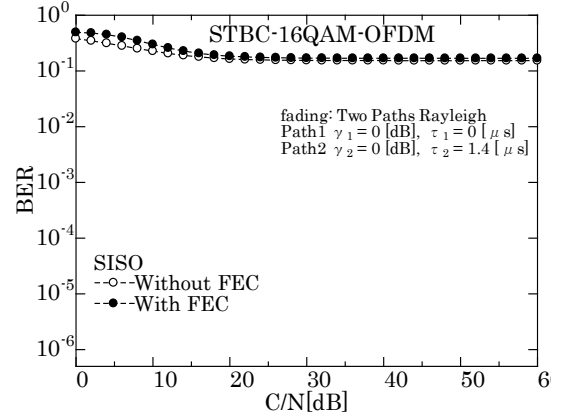


Fig. 5 SISO-16QAM

It can be seen from Fig. 4 and Fig. 5 that the BER characteristics of the SISO system in a two-path Rayleigh environment are not improved by error correction.

3.3 MISO system

Next, Fig. 6 shows the BER characteristics of the STBC-OFDM system before and after error correction when the antenna configuration is MISO (2×1). Fig. 7 shows the BER characteristics under the same conditions with 16QAM carrier modulation.

We can see from Fig. 6 and Fig. 7 that the BER characteristics of the MISO system are improved compared to the SISO system. The required C/N for QPSK, which ensures $\text{BER} = 10^{-6}$, is 38.9 dB without error correction and 29.3 dB with error correction, a difference of 9.6 dB. The required C/N for 16QAM with error correction is 52.1 dB without error correction and 35.3 dB with error correction, a difference of 16.8 dB.

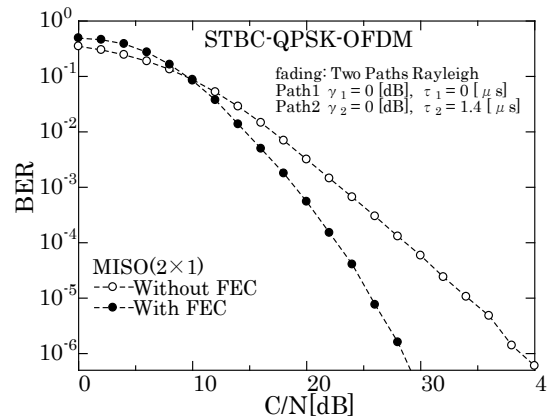


Fig. 6 MISO-QPSK

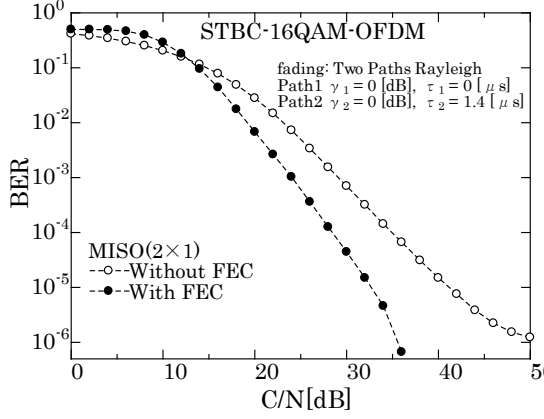


Fig. 7 MISO-16QAM

3.4 MIMO system

Fig. 8 shows the BER characteristics before and after error correction for a STBC-OFDM system with a MIMO (2×2) antenna configuration. Fig. 9 shows the BER characteristics under the same conditions with 16QAM carrier modulation.

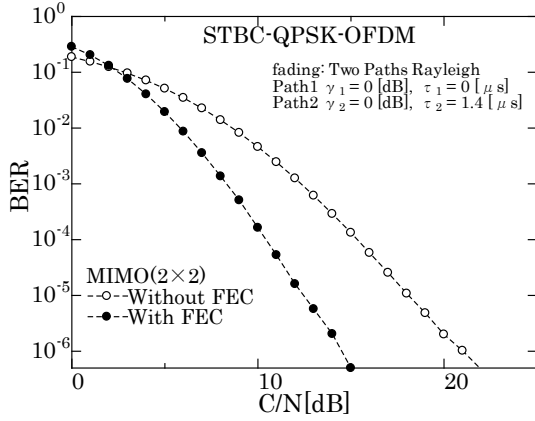


Fig. 8 MIMO(2×2)-QPSK

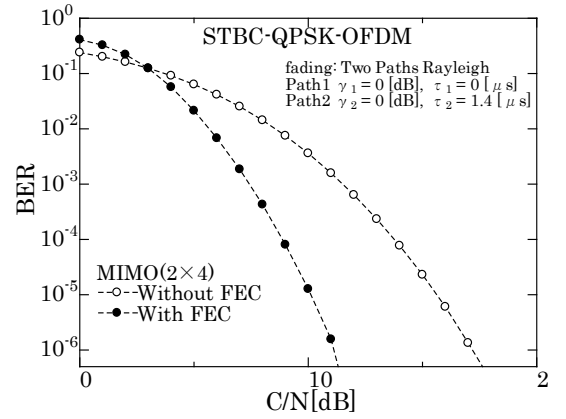


Fig. 10 MIMO(2×4)-QPSK

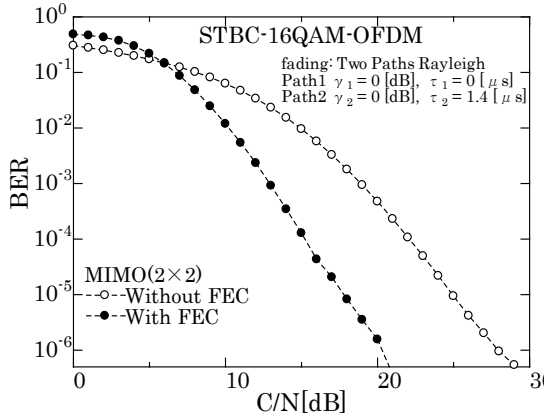


Fig. 9 MIMO(2×2)-16QAM

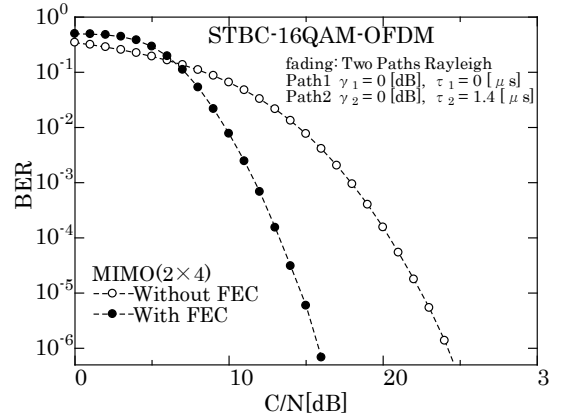


Fig. 11 MIMO(2×4)-16QAM

The required C/N for QPSK, which ensures $\text{BER} = 10^{-6}$, is 21.1 dB without error correction and 14.4 dB with error correction, resulting in a difference of 6.7 dB. The required C/N for 16QAM with $\text{BER} = 10^{-6}$ is 27.9 dB without error correction and 20.2 dB with error correction, a difference of 7.7 dB.

The BER characteristics of the 2×2 MIMO system are improved compared to the MISO system, as shown in Fig. 8. The same result is obtained when the carrier modulation is 16QAM.

In the STBC-OFDM system, the BER characteristics before and after error correction for the MIMO (2×4) antenna configuration are shown in Fig. 10. Fig. 11 shows the BER characteristics under the same conditions with 16QAM carrier modulation.

The required C/N for QPSK, which ensures $BER = 10^{-6}$, is 17.2 dB without error correction and 11.2 dB with error correction, resulting in a difference of 6.0 dB. The required C/N for 16QAM with $BER = 10^{-6}$ is 24.2 dB without error correction and 15.8 dB with error correction, a difference of 8.4 dB.

Fig. 10 shows that the BER characteristics of a 2×4 MIMO system are much better than those of a 2×2 MIMO system. Fig. 11 shows that the same result is obtained when the carrier modulation is 16QAM.

These results confirm the effectiveness of MIMO transmission with spatial diversity reception of signals transmitted using the STBC-OFDM method.

4. Link budget

We attempted to design links to evaluate the effect of STBC-MISO and STBC-MIMO in terms of transmission distance. First, we calculate the fading margin from the results obtained by computer simulation. The fading margin is calculated as follows, where Γ_{ray} denotes the required C/N in the Rayleigh channel and Γ_{AWGN} denotes the required C/N in the AWGN channel.

$$Fading\ Margin = \Gamma_{ray} - \Gamma_{AWGN} \quad (14)$$

In equation (14), the fading margin is defined as the value obtained by subtracting the value of Γ_{AWGN} from the value of Γ_{ray} , which ensures $BER = 10^{-6}$. Assuming that concealment by speech signal processing is applied to the portion of speech that is missing due to errors, the error rate at which errors are almost imperceptible aurally is generally said to be about $BER = 10^{-6}$. In this case, the value of Γ_{AWGN} is 13.6 dB in the case of QPSK and 20.4 dB in the case of 16QAM.

Calculating this gives a value of 12.5 dB for 2×1 MISO, 0.7 dB for 2×2 MIMO, and -2.5 dB for 2×4 MIMO in QPSK. For 16QAM, we can obtain a value of 14.8 dB for 2×1 MISO, -0.3 dB for 2×2 MIMO, and -4.7 dB for 2×4 MIMO. The results of the line design for QPSK and 16QAM are shown in Table 2.

The transmit frequency is 700 MHz and the transmit power is 50 mW. A propagation margin of 5 dB and an antenna gain loss due to the human body of 15.2 dB were used for the link budget, based on the literature 6) and assuming the use of a body-pack type wireless microphone with the transmitter attached to the human body.

Table 2. Link budget of STBC OFDM wireless system for specified radio microphone

MIMO Structure	2×1 MISO	2×2 MIMO	2×4 MIMO
Transmission Frequency	700 MHz		
Trans. Power	25 + 25 mW		
Trans. Antenna Gain	2. 14 dBi		
Propagation Margin	5 dB		
Antenna gain loss due to human body	15.2 dB		
Rec. Antenna Gain	2.14 dB		
Boltzmann Constant	−198.6 dBm/HzK		
Noise Temperature	25 dBK		
Occupied Bandwidth	288 kHz		
Noise Figure	6 dB		
Rec. Degradation	4 dB		
Thermal Noise	−113.0 dBm		
Modulation	STBC-QPSK-OFDM		
Transmission Distance	552 m	2149 m	3106 m
Free Space Propagation Loss	84.19 dB	96.0 dB	99.2 dB
Receiving Power	−82.91 dBm	−94.71 dBm	−97.91 dBm
Fading Margin	12.5 dB	0.7 dB	−2.5 dB
Required C/N at $BER=10^{-6}$	13.6 dB	13.6 dB	13.6 dB
Receiving C/N	26.1 dB	14.3 dB	11.1 dB
Modulation	STBC-16QAM-OFDM		
Transmission Distance	194 m	1102 m	1829 m
Free Space Propagation Loss	75.09 dB	90.2 dB	94.6 dB
Receiving Power	−73.81 dBm	−88.91 dBm	−93.31 dBm
Fading Margin	14.8 dB	−0.3 dB	−4.7 dB
Required C/N at $BER=10^{-6}$	20.4 dB	20.4 dB	20.4 dB
Receiving C/N	35.2 dB	20.1 dB	15.7 dB

In the case of QPSK carrier modulation, Table 2 shows that the transmission distance of MISO is more than 500 m. In 2×2 MIMO, the transmission distance is 2000 m, which is about 4 times that of MISO, and in 2×4 MIMO, the transmission distance is 3000 m, which is about 6 times that of MISO. In the case of 16QAM carrier modulation, MISO has a potential transmission distance of about 200 m. 2×2 MIMO has a potential transmission distance of 1100 m, over 5 times greater than MISO, and 2×4 MIMO has a potential transmission distance of more than 1800 m, or about 9 times greater than MISO.

5. Conclusion

In order to provide a transmission system with high transmission reliability, we have investigated a transmission system for specified radio microphones that combines OFDM and STBC (Space Time Block Coding). The effectiveness of MIMO (Multi-Input Multi-Output) transmission was confirmed by computer simulation. Based on the results of the required C/N, a link budget was carried out, and the following results were obtained.

- (1) In the SISO system, the effect of error correction was not observed at all, but in the MISO system, it was confirmed that error correction improved the BER characteristics.
- (2) It was found that the BER characteristics of a 2×2 MIMO system can be significantly improved compared to a MISO system, and the transmission distance can be increased to 4-6 times that of a MISO system.
- (3) It was found that the BER characteristics of a 2×4 MIMO system can be significantly improved compared to a MISO system, and the transmission distance can be increased to 5-9 times that of a MISO system.

These results indicate that the STBC-MIMO-OFDM transmission system can significantly increase the transmission distance and improve the transmission reliability of specified radio microphones.

References

- 1) “Wireless Microphones; Audio PMSE Equipment up to 3 GHz; Part 1: Audio PMSE Equipment up to 3 GHz; Harmonised Standard for access to radio spectrum”, ETSI EN 300 422-1 V2.2.1 (2021-08)
- 2) ARIB Standard, “Specified Radio Microphone for Land Mobile Radio Station” (in Japanese), ARIB STD-T11, Ver. 1.3, July 2014
- 3) M. Taguchi, T. Mizuguchi, Y. Abe and H. Hamazumi : “Development of Low-Latency Digital Transmission System for Specified Radio Microphone” (in Japanese), ITEJ Vol. 68, No.5, pp. J202~J209 (2014)
- 4) S.M. Aramoti, “A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communication”, IEEE J. Sel. Areas Commun., Vol.16, no.8, pp1451-1458, Oct. 1998
- 5) William C. Jakes: “Microwave Mobile Communications,” John Wiley & Sons, 1974
- 6) N.Kogo, H.Hamazumi; “Link Budget of Wireless Microphone for Frequency Migration” (in Japanese), ITE Technical Report Vol.36, No.53, 2012

(Received January 13, 2023)

スパッタ Si 膜積層による光導波型 SPR センサの高感度化

新國広幸*, 伊藤浩*

本研究では光導波型 SPR センサの高感度化について検討した。本センサは、光導波路基板と金属膜から構成される。高屈折率な Si 膜を金属膜上に積層することで、センサの感度向上が期待できる。積層方法による感度への影響を考察するために、EB 蒸着 Si 膜とスパッタ Si 膜の感度を実験的に比較した。5 nm ではスパッタ Si 膜の方が高感度だったが、3 nm では EB 蒸着 Si 膜の方が高感度だった。3 nm で感度が低下した理由は膜の密着性が悪く、反射回数が低下したからだと推察する。スパッタ Si 膜は EB 蒸着 Si 膜よりも高屈折率だったため、スパッタ Si 膜の方が EB 蒸着 Si 膜よりも感度が向上したと考える。

(キーワード: 光導波路, SPR センサ, Si 膜, スパッタリング法, 感度)

Sensitivity Improvement for an Optical Wave-Guided SPR Sensor by Lamination of Sputtered Si Film

Hiroyuki NIKKUNI*, Hiroshi ITO*

In this study, we investigated the improvement of the sensitivity of the optical guided-wave SPR sensor. This sensor is composed of an optical waveguide substrate and a metal film. By laminating a high-refractive-index Si film on a metal film, it is expected to improve the sensitivity of the sensor. In order to consider the influence of the lamination method on the sensitivity, we experimentally compared the sensitivity of the EB-deposited Si film and the sputtered Si film. It was considered that the sputtered Si film has higher sensitivity than the EB-evaporated Si film.

(Keywords: Optical Waveguide, SPR Sensor, Si Film, Sputtering, Sensitivity)

1. 研究背景と目的

糖尿病とは、インスリンの作用・分泌不足により高血糖値が慢性的に続く病気である。糖尿病を発症した場合、血糖値を良好にコントロールする必要がある。

本研究では負担が少ない唾液を用いて血糖値を測定するセンサの開発を目標とする。唾液に含まれる糖の量は血液の $1/50 \sim 1/100$ ¹⁾であり、高感度な濃度測定が求められる。本研究では高感度に測定するために SPR センサを活用する。表面プラズモン共鳴 (surface-plasmon-resonance : SPR)とは、金属に染み出した光が金属中の電子と共鳴する現象で、この現象を利用し測定試料の濃度を高感度に測定する。SPR センサにはプリズム型、光ファイバ型、光導波型がある。光導波型はプリズム型や光ファイバ型と比べて小型化が可能のため²⁾、本研究では光導波型を採用する。

Priya Bhatia らの研究から高屈折率 Si を金属膜上に積層することでセンサの感度が向上することがわかっている³⁾。これは、光と測定試料の相互作用が向上するからである。

先行研究では Si を蒸着法だけで成膜していたが、本研究では緻密な膜を成膜できるスパッタリング法でも Si を成膜し、二つの方法でセンサを作製し感度を評価する。また、感度の Si 膜厚依存性についても考察する。

2. センサ構成と原理

センサシステムは Xe ランプ、分光器、センサから成る。図 1 に光導波型 SPR センサシステムの構成を示す。センサは、導波路基板上に Ag 膜を成膜し、さらにその上に高屈折率な Si 膜を積層した構造になっている。高屈折率の Si 膜を Ag 膜に積層することで Ag 膜中の自由電子が持っている電場が積み重なり電場が増強する。Si は高屈折率な誘電体であり、Si を Ag 膜上に積層することで染み出す光の量が増加する。この光と測定試料との接触体積が増加することで、光と測定試料の相互作用が増強しセンサが高感度となる³⁾。

光が Ag 膜との境界面で全反射するとき、特定の波長で自由電子と共鳴して、反射率が減衰する。このときの波長を共鳴波長と呼ぶ。共鳴波長は測

* 電気工学科

定試料の屈折率に依存して変化し、試料の屈折率が高くなるにつれて共鳴波長は長波長側へ移動していく。屈折率は試料の濃度に依存しているため、共鳴波長から濃度を求められる。

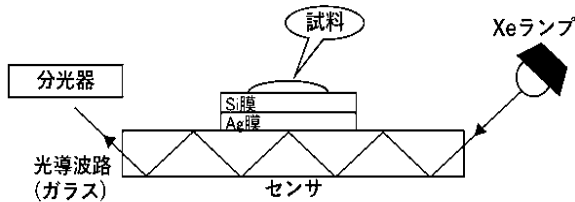


図1 センサシステムの構成

3. 実験

3.1. 作製方法

導波路基板は透明性の高い石英ガラスとし、基板の長さ、幅、厚さをそれぞれ 6.5 cm, 2.0 cm, 0.5mm とした。Ag 膜の長さ、厚さは、それぞれ 1 cm, 40 nm とした。これは、鈴木氏の研究により、1 cm の長さ、40 nm の厚さでセンサ感度が高くなったためである⁴⁾。Ag 上に積層する Si の厚さは 0 nm(成膜しない), 3 nm, 5 nm の3種類とした。Si はスパッタリング法と EB 蒸着法で 3 nm と 5 nm をそれぞれ成膜した。以下に作製手順の概要を示す。

- (a) 基板を超音波洗浄機によりアセトン、セミコクリーンで洗浄
- (b) Ag を成膜(DC スパッタリング(電力 100 W, 0.6 Pa))
- (c) Si を成膜(RF スパッタリング法(300 W, 0.6 Pa)か EB 蒸着法(45 mA, 3.8 kV))

3.2. 評価方法

光導波路分光装置と分光器を用いて作製した 5 種類のセンサの反射率スペクトルを 5 回ずつ測定し、Si の成膜方法及び膜厚と感度の関係について考察した。滴下する試料は血糖値を模倣するためにグルコース溶液にした。センサ感度を測定するために、溶液の濃度(屈折率)を変え、その設定値は 0%, 2%, 4%, 6%, 8%とした。屈折率はそれぞれ 1.3328, 1.3358, 1.3386, 1.3415, 1.3446 である。感度の成膜法・膜厚依存性を考察するにあたって、各薄膜の厚さ、表面粗さ、屈折率、組成を実験的に評価した。SPM を用いて、成膜したスパッタ Si3, 5 nm と EB 蒸着 Si3, 5 nm, スパッタ Ag40 nm お

よび屈折率・反射率調査用に成膜した Ag, スパッタ Si, EB 蒸着 Si をそれぞれ 100 nm の膜厚を測定した。エリプソメータ(波長 633 nm)を用いて、各膜の屈折率を測定した。分光光度計を用いて、各薄膜の消衰係数をエリプソメータとは異なる方法(透過率・反射率の測定)により評価し、信頼性を確認した。XPS 装置で各膜の組成分析を行った。

図 2 は EB 蒸着 Si3 nm の SPR 血糖値センサの反射率スペクトルを示しており、試料の濃度が上昇するにつれて共鳴波長が長波長側へ移動していることが分かる。同様な測定をほかのセンサでも行った。図 3 に各センサの屈折率と共鳴波長の関係を示す。このグラフの傾きがセンサ感度で、屈折率が 1 変化した際の共鳴波長のシフト量を示す。単位は nm/RIU で、RIU(Refractive index unit)は屈折率 1 のことを表す。図 4 に各センサ感度と膜厚の関係を示しており、大きな傾向として、Si 膜厚が厚くなるにつれて感度も向上していると分かる。

スパッタ Si5 nm の感度は EB 蒸着 Si5 nm よりも高かった。エリプソメータによる屈折率測定結果より、EB 蒸着 Si 膜の屈折率の平均は 2.60 で、スパッタ Si 膜の屈折率の平均は 3.64 だった。スパッタ Si 膜の方が EB 蒸着 Si 膜よりも屈折率が高いことから、スパッタ Si 膜の方が緻密な膜だと推察することができ、スパッタ Si 膜の方が EB 蒸着 Si 膜よりも高感度だと考える。

スパッタ Si 膜の屈折率が高い理由として、緻密さのほかに酸化の影響も考えられる。組成分析の結果より、スパッタ Si 膜の O の量は 9.87 % で EB 蒸着 Si 膜の O の量は 22.6 % だった。EB 蒸着 Si 膜の O がスパッタ Si 膜の約 2 倍あり、EB 蒸着 Si 膜の SiO₂ の割合が増加した。EB 蒸着 Si 膜に O が多く含まれているのは、蒸発させる Si が基板であり、Si 基板の表面積が厚さに比べて大きかったため、酸化部分の割合が大きかったからだと考える。蒸発物質として粒状の Si を用いることで Si の酸化面積の割合を小さくできると考える。

3 nm 同士のセンサを比較した場合、EB 蒸着 Si3 nm の感度がスパッタ Si3 nm を上回った。スパッタ Si3 nm の感度が低下した理由として、スパッタ膜の密着性が悪く、測定のたびに膜が剥がれていたことが挙げられる。そのため、Si 膜長の縮小によりスパッタ Si3 nm は反射回数が減少したと考える。反射回数は $N = 1 / (D \tan \theta)$ で求めることができる。ここで、 N は反射回数、 D は光導波路の厚み、 θ は光が全反射する角度、 l は Si 膜の長さで

ある。反射回数は感度に影響を与える要素であり、反射回数が多いほど感度が向上する。EB 蒸着 Si3 nm の方がスパッタ Si3 nm よりも反射回数が多かったため、EB 蒸着 Si3 nm の方が高感度になったと考える。スパッタリングの密着性は、基板を加熱しながら成膜するか成膜後に熱処理を加えることで高められると考える。

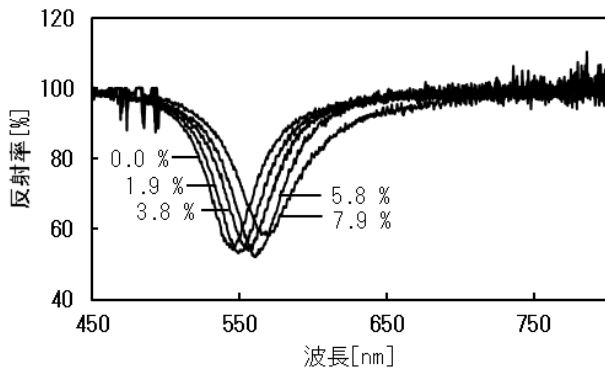


図2 EB 蒸着 Si3 nm の反射率スペクトル

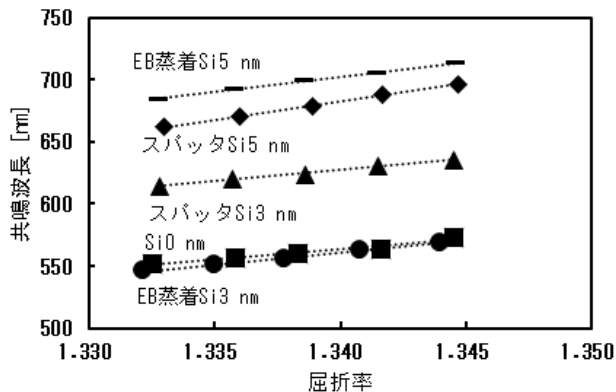


図3 各成膜法・膜厚の共鳴波長と屈折率の関係

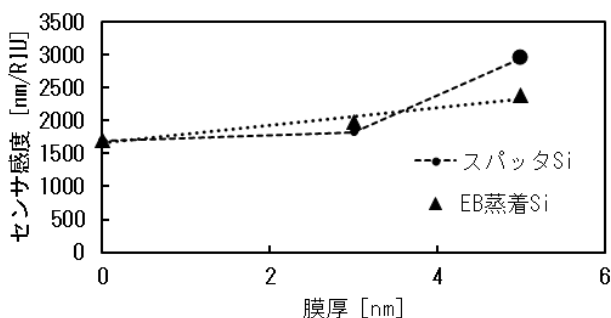


図4 センサ感度と膜厚の関係

4. 結論

本研究では SPR センサの Si の積層方法としてスパッタリング法と EB 蒸着法を比較した。

スパッタ Si5 nm は EB 蒸着 Si5 nm よりも高感度になった。スパッタ Si 膜の方が EB 蒸着 Si 膜よりも屈折率が高かったことでスパッタ Si 膜の方が高感度になったと推察する。しかし、EB 蒸着 Si 膜の方がスパッタ Si 膜よりも酸化していたため、屈折率は緻密性のほかに酸化も影響していると考えられる。

スパッタ Si3 nm は EB 蒸着 Si3 nm よりも感度が低かった。これは、スパッタリングによる密着性が低く、測定のために剥がれたことが原因だと考える。

今後の展望として、スパッタ Si 膜の密着性は加熱成膜か成膜後の熱処理により高める。EB 蒸着 Si 膜の酸化は粒状の Si を使うことで防ぎ、スパッタ Si 膜と組成比を合わせる。

参考文献

- 1) 山田晶樹, 木村一, 鹿野快男, 喜多純子, 江草玄士: 血糖値と唾液糖値の相関に関する検討, 糖尿病, vol. 40, pp. 335-340, 1997 年 2 月
- 2) 鈴木碧, 新國広幸, 伊藤浩: 表面プラズモン共鳴を利用した光導波型血糖値センサの理論解析, 第 35 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, S-064, 2018 年 11 月
- 3) Priya Bhatia and Banshi D. Gupta: Surface-plasmon-resonance-based fiber-optic refractive index sensor: sensitivity enhancement, Appl. Opt. 50, 2032-2036, 2011 年 5 月
- 4) 鈴木碧: 生体情報計測のための光導波型 SPR センサの基礎研究, 令和元年度東京高専専攻科特別研究論文, 2020 年 3 月

(2023 年 1 月 13 日 受理)

リアルタイム情報共有モバイルマルチホップネットワーク

田中晶*, 中村悠哉**, 新井瑛貴*, 仮谷星汰*, 杉本葉玖*,
須藤大翔*, 立山明日菜*, 長濱真人*, 森下大輝*

大規模震災, 洪水や大雨・雪など, 予測を超えた災害で通信手段が想定外に途絶するケースも続いている。一方で, IoT の流れが進み, 処理能力をもつ機器が生活の場にも多く見られるようになってきた。普段の生活の場で生成可能なマルチホップネットワークで情報共有が実現できれば, 基地局が利用できない災害時においても通信手段としてだけでなく情報共有や各種の処理システムとして効果をもたらす。情報通信研究室(田中研)で設計してきている多種のマルチホップネットワーク, 共有メモリシステム, 移動通信装置(群ドローン, 群ロボット)を用いたリアルタイムの広域情報共有ネットワーク・データベースシステムにおける, 幾つかの要素技術とシステム拡張可能性を論じる。

(キーワード: モバイルマルチホップ通信, 共有メモリ, 分散データベース, 群移動体制御, エミュレータ, ネットワーク・プログラミング教育)

Real-time Information Sharing Mobile Multihop Networks

Akira TANAKA*, Yuya NAKAMURA**, Teruki ARAI*,
Seita KARIYA*, Haku SUGIMOTO*, Taika SUDO*,
Asuna TATEYAMA*, Masato NAGAHAMA*, Daiki MORISHITA*

Massive earthquakes, floods / rainfalls / snowfalls cause unintended communications disruptions. On another front, people find devices with processing functions all around us in global trend of IoT. Multihop networks that can be flexibly generated in every life function as an information sharing platform as well as temporal communication systems. Various kinds of multihop networks, shared memory system and mobile devices (group drones and robots) developed in our information and communication laboratory (Tanaka Lab.) evolve into an integrated wide-area information sharing / database system. Some recent element technologies of our system are discussed.

(Keywords: mobile multihop communications, shared memory, distributed database, group mobile objects control, emulator, network and programming education)

1. はじめに

日常の身の回りにも IoT 機器が非常に多く見られる今日, これらを接続して自在にネットワーク化できれば, わざわざ専用の通信機器によらずとも随時情報共有ができ, センサ GPS やデータベースと連携し, スマートシティや Intelligent Transport Systems (ITS)のような通常の社会利用型のシステムに有効な技術となる。情報通信研究室(田中研)で設計しているマルチホップネットワーク(図1)^{1,2,3)}は, 日常的なマイコンや移動体機器を結び必要な処理を実現する基盤となる。様々な伝送媒体とトポロジーで小規模なネットワーク

(Fig.1)^{1,2,3)}は, 日常的なマイコンや移動体機器を結び必要な処理を実現する基盤となる。様々な伝送媒体とトポロジーで小規模なネットワークを生成する技術が確立されており, ネットワーク自体がセキュリティをもって 4K 動画を送る, 遠隔の無線環境をエミュレートして制御する, 簡単な演算の実行, 最適経路選択, 群動体制御, 位置情報とのリンク, 教材の提供, インターネットでの広域化, などの技術も機能している。

本稿では, 最近の成果を中心に, 最適伝送媒体マルチホップネットワーク・情報共有システムの構成要素と応用プロセスを述べる。2 節で高精度位

*情報工学科 **機械情報システム工学専攻

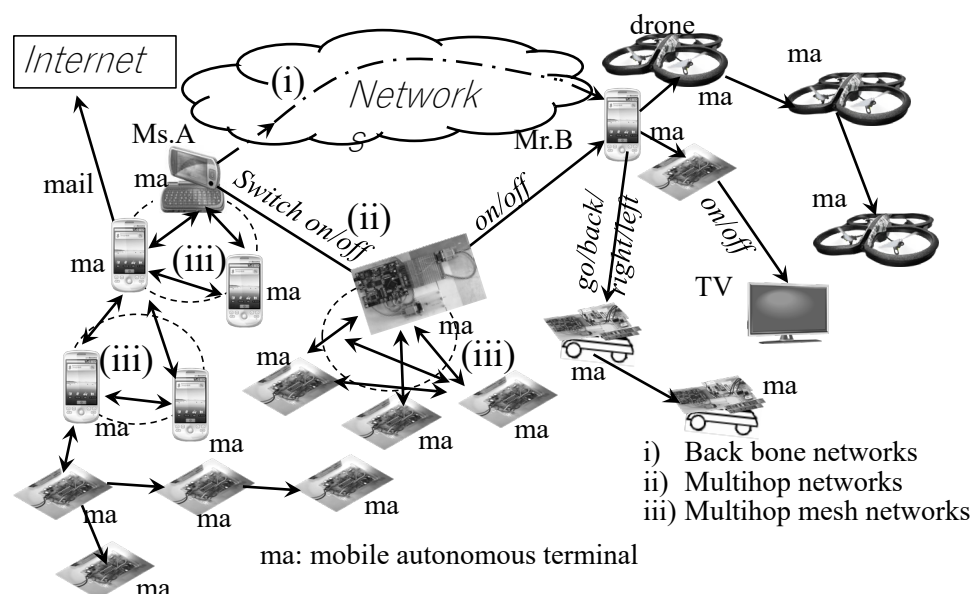


Fig. 1 Locally exploitable heterogeneous multihop networks

置情報とリンクしてネットワークとセンシング領域を効率的に拡張する群移動体制御, 3 節では情報共有と整合性をもつセンシング技術, 4 節では映像通信やモバイル SINET⁴⁾を介した広域化, 5 節では広域化で効果を発揮する実端末を用いるエミュレーション, 6 節ではスマートシティへの展開, 7 節でネットワーク・プログラミング教材について述べ, 8 節ではネットワークの自在なカスタマイズを目指す教材システムについて論じ, 9 節でまとめと今後の展望を述べる。

2. 移動体とネットワーク空間

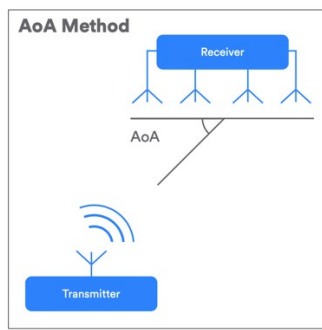
情報収集・共有のカバー域は, モビリティの進展とあいまって移動体により任意に拡張, 伸縮できるように設計を進めている。これまでのドローン主体に加え地上の移動体 (車, ロボット) も用いて, 実用移動体に置き換える道筋も明らかにできつつあり, 災害時では特に効果が高いと思われる。

2.1. 群ドローンとエミュレータ

災害時等では, 現場の状況をいち早く把握することは極めて重要だが, 現在利用されている通信手段では基地局の破壊等により通信が途絶し, 状況の把握が遅れてしまう可能性がある。通信手段が失われた場合や, 洞窟等の人が立ち入れず電波が届かない場所の調査を行う際等に威力を発揮する主マルチホップネットワークの通信範囲を拡大

できるマルチホップ群ドローン制御システムの実現を目指してきた。Bluetooth Low Energy (BLE) の方向検知機能を用いてドローンの自動追尾を行って, 建物内や暗闇等の環境下でも動作可能な制御システムを構成している。接続したドローンをマルチホップ通信によって制御する群ドローン制御において前方ドローンを自動追尾するシステムである。さらに, 規制に従った上で支障のない方法で, 通信資源が限られた災害現場等の環境を再現し, マルチホップ群ドローン制御システムのテスト飛行を行える移動体制御エミュレータも開発している。

ドローンに通信端末 (Raspberry Pi4 Model B⁵⁾) を搭載したユニットを複数接続して制御している。通信端末では, 前方および後方のユニットと Wi-Fi 接続してマルチホップネットワークを構成し, ドローンと Wi-Fi 接続した通信端末から制御コマンドを送信しドローンを制御している。なお, ドローンは Tello⁶⁾ を使用した。ユーザは先頭のユニットのドローンのみを操作する。最後方のユニットに接続した操作端末からユーザが制御コマンドを送信し, マルチホップネットワークを介して先頭のユニットまで送り届け, コマンドを実行する。後方のユニットを制御する自動追尾システムは, BLE の方向検知機能である Angle of Arrival (AoA)⁷⁾ を用いた (Fig.2(1))。BLE モジュールおよび BLE タグは XPLR-AOA-1 kit⁸⁾ を使用した。送信機が単一のアンテナで信号を送信し, 受信機が



(1) Angle of Arrival⁷⁾



(2) Emulator

Fig. 2 Group-drone

複数のアンテナにより構成されたアレイアンテナで信号を受信する。このとき、アレイアンテナにおけるそれぞれのアンテナが受信した信号の位相差を用いて相対的な到来角度を計算する。

前方（一つ前）のユニットを自動で追尾するように制御を行い、制御部は大きく自動離陸と自動追尾に分けられ、自動離陸では前方のユニットから送信された電波の Received Signal Strength Indicator (RSSI) が一定値以下になると自動で離陸し、その後、自動追尾に切り替わる。自動追尾では、前方のユニットから送信された電波の RSSI の値が一定の範囲内に収まるように速度を変化させ、電波の到来角度を用いて前方のユニットがドローンの正面に位置するように機体を回転させ制御している。

さらに、Unity⁹⁾を用いて設計した移動体制御エミュレータ (Fig. 2(2)) で、マルチホップ群ドローン制御システムを実際に動作させたときの各ユニットにおける位置や向き、ドローンの制御情報、自動追尾システムで利用している RSSI および AoA の値を可視化できる。

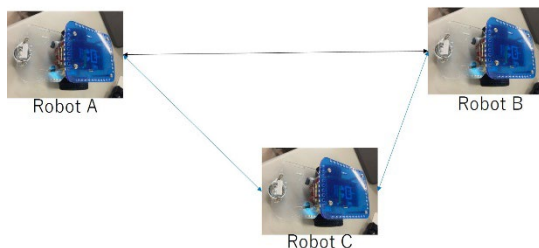


Fig. 3 Group-robot

2.2. 群ロボットと測位

被災地で情報収集・センシングするには精度の高い位置情報と常にリンクさせる必要がある。また、移動体同士の位置関係を保って広く収集する必要性も生じ、面的にカバー域を広げる群ロボットを開発した。3 台のロボット GoPiGo3¹⁰⁾ と GPS BU-353S4¹¹⁾ を用いる。

災害が起きた際、広大な災害現場を単独の人間やロボットが探索することは、現場の危険性やネットワークの通信範囲を考慮すると非常に困難である。この通信範囲の問題の解決策の一つとして、無線機に備え付けられたセンサ端末を中継器として利用して広範囲におよぶ通信を可能にすることができるマルチホップネットワークが挙げられる。先行研究では、より広域にマルチホップ通信が行えるように、ロボットが等間隔に広がる隊列を組んだ状態での制御を行う研究が行われており、現在、特に 3 台のロボットが正三角形の頂点の位置に広がることでより効率よく通信範囲を広げる設計を継続して行っている (Fig. 3)。マルチホップネットワークを形成し、GPS によってそれぞれのロボットの相対位置を把握した群ロボットによって面積的な観点から最も効率の良い形である正三角形の形を維持しながら災害現場を効率的に探索するシステムを開発している。GPS モジュールのみで屋内の位置情報の取得は精度に問題があるため、RSSI などを利用して屋内での相対位置の測位の精度を向上させ、協調作業が行える設計も進めている。

3. 環境センシング

どこにいても環境情報を広く収集し分析できれ

ば、防災のみならず、日常的にも産業上も利用価値が高い。例えば、災害が起きて通信環境がない現場は周辺がどのようなになっているかわからない。そこで、通信距離が遠すぎる、間に障害物があるなど、直接通信ができない端末間でも、中継器を用意して中継器を経由することで通信を可能にするマルチホップネットワークをセンサに応用している。

現在開発している広域環境情報センシングネットワークシステムは、マルチホップ通信と環境センサを使って通信環境がない現場でもどのような状況になっているかを特に意識せずに取得できるため、現場だけではなくその周囲やより離れた場所の状況も把握できて行動の判断に役立つ。取得したデータは移動体上のデータベースに保存し、そのデータベースを持つ端末を効率的に自律移動させ、災害等で通信がしにくい状態であっても容易に通信が維持できるように通信資源の節約が可能になっている。

具体的には、Bluetooth を使ってアンドロイドでのマルチホップ通信を行い、センサ (2JCIE-BL¹²⁾) モバイルセンサネットワークを構築している。位置情報、環境データを Android 上のアプリケーションの一つとしてデータベースに格納し統計処理ができる (Fig. 4)。データベース端末の自律移動制御機能によって任意の端末から最短距離でデータベースへアクセス可能にした。データベース移動とそうでないケースで通信資源消費量をアクセス側と測定側の二つの側面から評価するシステムを組んでいる。

マルチホップネットワークだけでなくインターネットを使って遠くからでもアクセスを可能にしており、センサ端末は 2.2 項の群ロボットに搭載

し、情報収集が必要な場所へ移動させる。取得したデータはリレーショナルデータベース化されて、2.2 項の測位を流用して近辺の端末と平均をとり、より正確な値の環境データを測定できる。実験では、センサを移動させて広い範囲のデータを取得し、気圧から風の大まかな動きを推定する予定である。開発環境を整え、テスト用の Android アプリを作成し動作させ、センサとの動作確認やデータ取得は完了している。

4. 広域化技術の応用

広域化にはモバイル SINET⁴⁾を用い、応用としては高精細映像のリアルタイム通信を予定している。実用に際し、マルチホップネットワークで求められるセキュリティも取り入れる必要があり、これらを一括し機能化に取り組んでいる。これまで、マルチホップネットワークでは Raspberry Pi を用い、VPN の実装やデータの経路分割送信で安全な通信網の構築が行われてきた。Raspberry Pi 間での通信で完結していたので、実際にユーザが現場で使うことを想定し、Android スマートフォンを使えるようにした。これまではメッシュ Wi-Fi を介した通信は可能であったが、さらにモバイル SINET を挟んでマルチホップ通信を行っている。システムの開発を行った環境は、Raspbian GNU/Linux11(bullseye), Python 3.7.3 等である。軽量かつ安価であり、運用が容易であることから採用した。Android 端末には Termux¹³⁾ というアプリをいれ、コンソールから Python プログラムを実行できるようにした。

現在、送受信を行うデータ形式を問わず送受信が可能となり、高画質の動画や画像に加え、テキストファイルやパワーポイントファイル等も送受

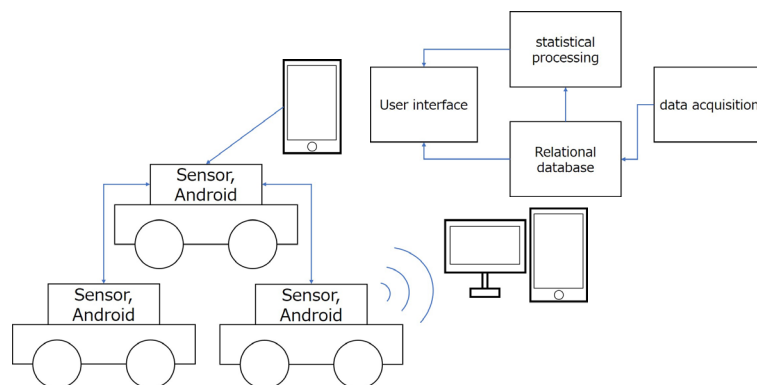
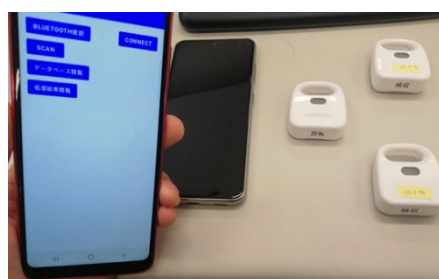


Fig. 4 Mobile sensor system

田中，中村，新井，仮谷，杉本，須藤，立山，長濱，森下：
リアルタイム情報共有モバイルマルチホップネットワーク

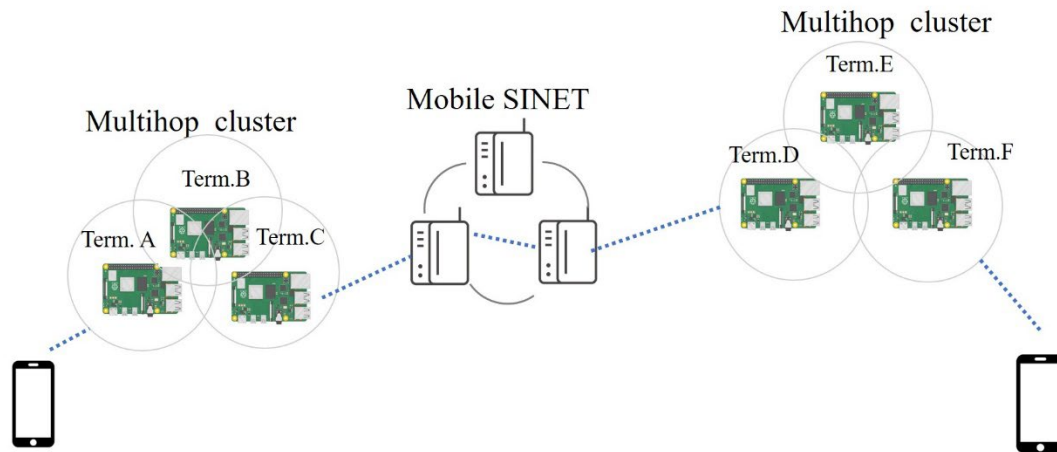


Fig. 5 Wide area communications

```
def relay(recvIP, sendIP, ext):
    port = 54321
    output_list = []
    with socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM) as s:
        s.bind((recvIP, port))
        s.listen(1)
        while True:
            conn, addr = s.accept()
            with conn:
                dt_now = datetime.datetime.now()
                frame = "receive," + ext
                with open(fname, mode="ab") as f:
                    while True:
                        data = conn.recv(1024)
                        if not data:
                            break
                        f.write(data)
                        conn.sendall(b'finished')
                    client(sendIP, "receive," + ext)
```

Fig. 6 Relay terminal function

信可能である。ネットワーク構成は、Android 端末からデータ送信を行い、画像フレームを細分し経路分割し Raspberry Pi のマルチホップ通信を経由し、別の Android 端末で受信できる。WLAN のメッシュを挟む、或いは、モバイル SINET を介する様子を Fig. 5 に示す。

ところで、端末の役割は、送信、中継、受信と別れているが、実際の災害現場ではどの端末も送信、受信、中継ができなければならないので、それぞれの通信プログラムを関数としてまとめ、プログラムを一つに統合した。通信プログラムの関数部分を Fig. 6 に示す。実現したシステムにより、実現場で Android スマートフォンを用いユーザが安全にマルチホップ通信を利用して高精細映像を通信し、必要に応じ WLAN を間に介して広域通信での情報共有も可能になる。

5. 広域化に伴うエミュレーション

災害時の情報伝達は非常に重要であるが、被災者と知人どうしの安否確認によるトラフィックの増加によって、通常の電話回線での通信は困難になる。マルチホップ通信をより広域化しメッシュ化することで被災地域などをくまなくカバーできるが、一方で端末の電波環境が把握できにくくなり、効率が低下する。そこで遠隔で端末の状態を確認できる MR エミュレータの開発が行われた。本研究では実用を想定した、より広範囲でのエミュレーションを実現する MR エミュレータの開発を進めた。複数の中継端末が互いに対等な関係で網の目状の伝達経路を形成してデータを転送する、メッシュネットワーク方式を採用した通信システムである。本研究では、Fig. 7（左上）のような Arduino¹⁴⁾に無線モデム MU-3¹⁵⁾を接続した無線機を複数台用いて、マルチホップ通信方式を使用して実験を行う。Fig. 7 が実際の通信の様子で、使用する無線機のうち、1 台を PC に接続し、その他の端末とマルチホップ通信で接続することで、メッセージを送信することができる。この通信状況をエミュレータで観測している。

現在、このマルチホップメッシュネットワークエミュレータを発展させ、すぐに現実利用できるレベルの MR エミュレータの設計を行っている。例としては、通信の広域化を図るため、無線 LAN 化や、LTE 等の携帯のインターネットと同じ方法でつながられるモバイル SINET⁴⁾での通信、より多数の端末に対応できるよう設計し、多数端末をクラスタと見立て、塊と塊の間の通信もエミュレーション、エミュレータの UI 改良である。

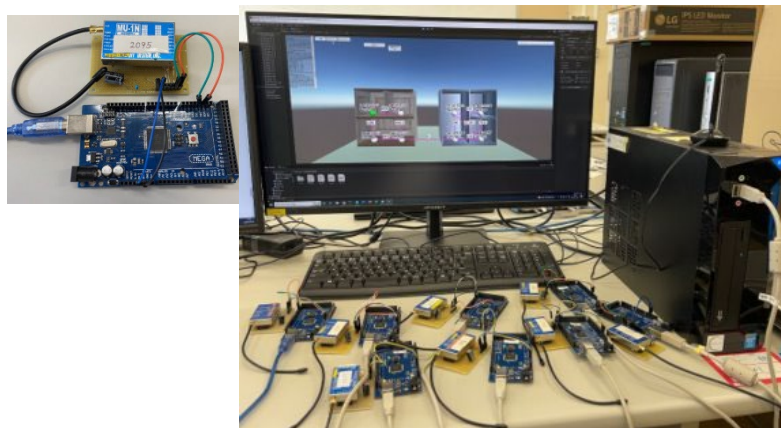


Fig. 7 Emulator with real multihop terminals

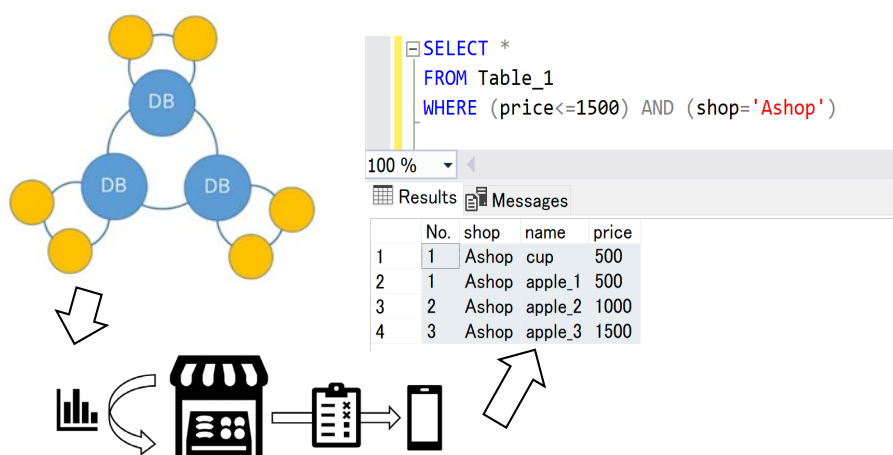


Fig. 8 Distributed database for smart-city

これまで、広域化のための無線 LAN 化、及びモバイル SINET⁴⁾でも同様に文字の送信ができることを確認できた。それらをエミュレータに適用する必要がある、これらを実装すると、より遠方へのメッセージ送信が可能となり、実際の災害時でも利用できる。

6. スマートシティ構想への発展

インターネットが使えない被災地域などでの情報共有や安否確認を目指して、BLE や Wi-Fi のモバイルマルチホップ通信を用いて基地局を介さない分散データベースネットワークの設計が行われてきたが、日常生活へも大いに適用可能性を持つ。近年 Society5.0 (内閣府などにより、スマートシティ)¹⁶⁾といった、ICT 等の技術を活用し最適化が図られる持続可能なまちづくりの推進がされている。そこで、過年度の研究室の分散データベースの研究成果などを踏まえながらスマートシティ

へ応用する分散データベースの実装を行う。

スマートシティに活用するには、様々な形式のデータを扱う必要がある。また、広い地域のデータを取り扱い、多数の様々な利用者がアクセスする¹⁷⁾。データベースを分散化してより大きなデータの通信をするため、負荷の軽減やアクセスの高速化、複数種類のデータベースを用意して効率的な利用を図るなどの工夫が必要となってくる。

現在、商品の仕入れ方やお客が買い物に行くとときに出かける先を考えられるようなシステムを開発している。Fig.8 に想定しているシステムのイメージを示す。ユーザはアプリを通して街中や店舗の近くの状況を確認することができ、店側では受け取った情報から混雑の予測、対策を考えたりすることができる。どんなところでも使えるパワフルなシステムにするためマルチホップネットワーク上で設計し、クロスプラットフォームを想定し、データベース言語は SQLite で開発してお

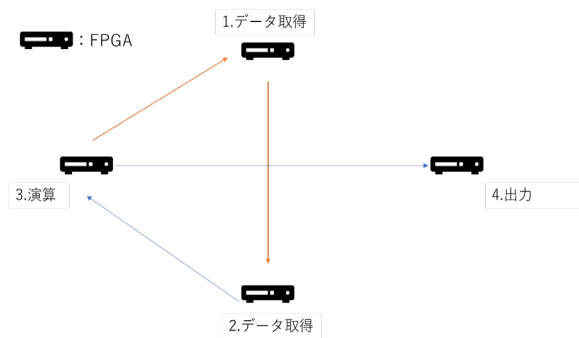


Fig. 9 Distributed computing

り，仮想空間での複数データベース連携を設計した。データベース内のデータを抽出した結果の例も Fig. 8 に示した。

7. 分散プロセッサの実装

防災用の情報伝達システムでは，高機能なプロセッサ機能が必要になる。しかし，一般に使用される IoT 端末にはメモリの制限があり，高度な処理を行うことができない。そこで，複数台の FPGA 端末を用いて，各端末のメモリを通信でアクセスできる分散演算システムの構築を行ってきた。過去卒研では 4 台の FPGA 端末で 2 つのデータを用いた四則演算を行う分散演算システムの構築を行っている。このシステムでは，各 FPGA 端末に端末 ID を設定し，メモリのアクセスを通信によって行う。そして，演算や出力を行う端末を ID で指定し，指定された ID の端末で演算を行い，指定した ID の端末へ出力データ（演算結果）を送信する。すべての端末のメモリにアクセスできるため，システム全体を一つの共有メモリとして使用することが可能である。システムの概要図を Fig. 9 に示す。

より高度な処理を行えるようにするため，使用する無線モジュールは MU-3¹⁵⁾とし，コードを用いたコマンドによって送受信や端末 ID の設定などの操作が簡単に行う。また，使用する FPGA 端末の台数を 4 台から 10 台に増やし，演算に使用するデータを 10 個に増やすことでシステムの広域化を図る。使用する FPGA は，DE10 standard と DE0Nano¹⁸⁾とする。DE10 standard は基本的なインターフェースやプロセッサを搭載していて高速であるため，高度な処理を容易に設計できることが

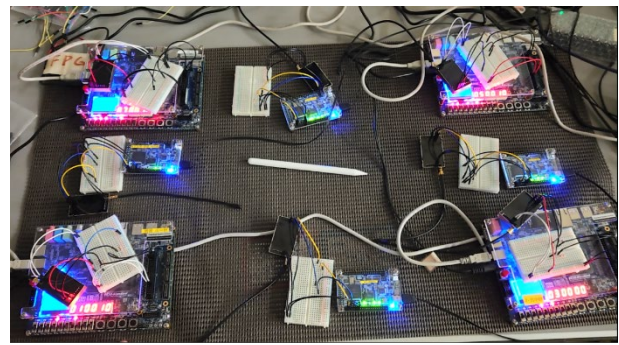


Fig. 10 Communication and comping on FPGAs

メリットである。DE0Nano は，インターフェースは少ないが小型である。そのため，DE0Nano は中継やデータ処理の機能に限定して使用する。また，単純な四則演算だけでなく，取得したデータの平均を計算する機能を追加することで，処理の高度化を図っている。現在は，8 台の FPGA 端末を用いて 3 つのデータを通信によって取得し，四則演算を行い出力するシステムが完成している。本研究で構築しているシステムの全体図を Fig. 10 に示す。

8. 教材によるネットワークの構築

研究室で設計しているマルチホップネットワークは，誰でも容易に使用できる構造であるものの，利用者の使用目的に最適なカスタマイズ等にはネットワーク構築技術やプログラミングのスキルが求められる。未経験の学生・ユーザに向け，インターネット講座^{19,20)}や過年度の卒研をもとに高専生向けのプログラミング教材を設計している。Python を使用した Web アプリで，本研究室の，災害時通信が充分に行えない際等のためのマルチホップネットワーク構築・改良やルーティング制御の方法を本教材に取り入れている。文字出力，四則演算，ループ，条件分岐，関数やダイキストラ法などの情報通信技術に関する問題が組み込まれ，if や else を学習させる問題であれば一行ごとに「もし x=0 であれば」などとコメントに沿って穴埋め回答し，実行後に結果（説明）が表示される。さらに，端末間の RSSI を測定し最適経路で接続するマルチホップネットワークと連動する。教材で問題を解いてプログラムが完成すると実際に Raspberry Pi 数台が連動してプログラム通りに通

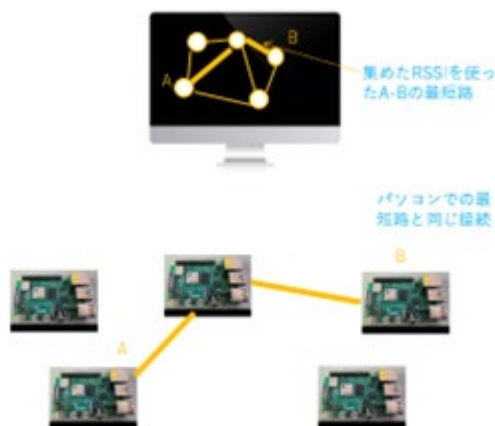


Fig. 11 Educational materials with real network

信する (Fig. 11)。同一ネットワーク上での 4 台の Raspberry Pi 同士での通信が行え、txt ファイルを 2 台の Raspberry Pi を経由して別の Raspberry Pi に送信は確認できている。問題を充実させることでプログラミング学習者にマルチホップネットワークについての理解を深めてもらい、プログラムの基礎知識習得に有効な本教材となる。

9. まとめ

様々な端末を用いてメッシュ、バス、スターなど任意のトポロジーでマルチホップネットワークを生成できることは実証済みであり、通信の場所や環境に応じて広く情報伝達できるため、共有メモリ^{1,3)}も導入して、伝達、状況の共有、センシング、情報処理などを一括して行えるセキュアな情報共有システムへと発展させてきた。緊急時、災害時、インフラネットワークが整わない領域での適用に限らず、世界各地で既に実用も進められているスマートシティの要素としても有効であり、群移動体制御、モバイル SINET や高精細映像技術も用いて広域化しながら、応用技術の開発を進める予定である。さらに、エミュレータと教材に同期して、初学者であってもリアルタイムの情報共有システムのカスタマイズ・構築ができる統合環境の設計を進めている。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 22K02905 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) A. Tanaka, "Locally exploitable heterogeneous multihop communications applied to cooperative robots," Proc. 5th Int'l Conf. on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN 2013), 7A-5, pp. 421-326, Da Nang, Vietnam, Jul. 2013.
- 2) 田中 晶, 中村悠哉, 内田恭矢, 河村碧生, 栗原秀弥, 坂本蒼樹, 寺川優汰, 本間玄太, 三國蒼介, "情報共有モバイルマルチホップネットワーク," 東京高専研究報告書, No.53, pp.108-116, Mar. 2022.
- 3) 田中晶, 丸山充, 漆谷重雄, 辻井利昭, "持続可能なリアルタイム情報共有モバイルネットワーク," 信学技報, Vol.121, No.433, NS2021-147, pp.146-151, Mar. 2022.
- 4) NII, SINET update, https://www.nii.ac.jp/openforum/upload/c1_setsumeikai2019_sinnet_1_20191216.pdf (2022.07.06 access)
- 5) Raspberry Pi Foundation, Raspberry-Pi, <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/> (2022.09.20 access)
- 6) Shenzhen Ryze Technology, Tello, <https://www.ryzerobotics.com/jp/tello> (2022.09.20 access)
- 7) Martin Wooley, Bluetooth Core Specification v5.1, Bluetooth SIG, 2019.1
- 8) XPLR-AOA-1 kit, u-blox, <https://www.u-blox.com/en/product/xplr-aoa-1-kit> (2022.09.20 access)
- 9) Unity, Unity, <https://unity.com/ja> (2022.09.20 access)
- 10) Modular Robotics, GoPiGo, <https://www.dexterindustries.com/gopigo-tutorials-documentation> (2023.01.11 access)
- 11) 株式会社アイ・ディー・エーBU353-S4, [https://www.ida-japan.co.jp/GPS/BU353-S4\(USB\).pdf](https://www.ida-japan.co.jp/GPS/BU353-S4(USB).pdf) (2023.01.11 access)
- 12) オムロン(株), 2JCIE-BL, <https://components.omron.com/jp-ja/products/sensors/2JCIE-BL> (2023.01.11 access)
- 13) Termux, Fredrik Fornwall, <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.termux&hl=ja&gl=US&pli=1> (2023.01.11 access)
- 14) Arduino, Arduino, <https://www.arduino.cc/>
- 15) 株式会社サーキットデザイン, MU-3-429, https://www.circuitdesign.jp/wp/wp-content/uploads/support/download/docs/og_mu-3-429.pdf (2023.01.11 access)

- 16) 内閣府，スマートシティに関連する施策・参考資料，https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/smartcity/02_ref2.appendix.pdf
(2022.12.01 access)
- 17) United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), People-Smart Sustainable Cities, https://unece.org/sites/default/files/2021-01/SSC%20nexus_web_opt_ENG_0.pdf
(2022.12.01 access)
- 18) Terasic, DE Boards, <https://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&CategoryNo=163> (2023.01.12 access)
- 19) 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(2), pp.66-74, Mar. 2015.
- 20) 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，Vol. 118, No.294, ET2018-55, Nov. 2018.

(2023年1月13日 受理)

ネオニコチノイド系農薬であるチアメトキサムの原体及び その分解生成物のオオミジンコ繁殖阻害性に関する研究

庄司良*, 岩崎多聞*

ネオニコチノイド系農薬とは, 1990 年代から有機リン系農薬に替わり, 幅広い場面で利用されている農薬である。産業的な利用が拡大する一方で, 環境へのリスクは正確に評価されるべきである。そこで, 本研究ではネオニコチノイド系農薬に分類されるチアメトキサムの原体及び, その分解生成物について, 甲殻類のオオミジンコ(*Daphnia magna*)を用いた生態毒性試験を実施した。試験の結果, チアメトキサムの濃度に依存して, オオミジンコは遊泳阻害及び繁殖促進効果を有する可能性が示唆された。また, 農薬の助剤として含まれている界面活性剤の毒性についても考慮されるべき結果を得た。

(キーワード: ネオニコチノイド系農薬, チアメトキサム, オオミジンコ, 界面活性剤)

Study on the Reproductive Inhibition of *Daphnia magna* Exposed to Thiamethoxam, a Neonicotinoid pesticide and the Degradation Products

Ryo SHOJI*, Tamon IWASAKI*

Neonicotinoid pesticides have replaced organophosphorus pesticides since the 1990s and are used in a wide range of fields. While their utilization is expanding industrially, their risk to the environment should be accurately evaluated. In this study, we conducted ecotoxicity tests of thiamethoxam, which is categorized as a neonicotinoid pesticide, and its degradation products using the *Daphnia magna* crustacean. The results suggest that thiamethoxam may inhibit swimming and promote reproduction in the *Daphnia magna*, depending on the concentration of thiamethoxam. The toxicity of surfactants (LAS) contained as pesticide aids should also be taken into consideration.

(Keywords: Neonicotinoid pesticides, Thiamethoxam, *Daphnia magna*, Surfactant)

1. はじめに

1.1. ネオニコチノイド系農薬の概要

ネオニコチノイド系農薬とは, ニコチンと化学構造が類似している殺虫剤であり, 有機リン系農薬, カーバメート系農薬に替わって, 1990 年代から広く使用されている農薬である¹⁾。この農薬は, 従来の農薬と比較して, 毒性選択的である。そのため, ヒトや環境に対する毒性が低いと推定され, 広く評価されている²⁾。このような利点から, 耕作農業や園芸, 一般家庭で使用されている他, ペットのダニや, ノミの駆除などの動物用としての利用価値もある³⁾。なお, 2014 年には農薬全体の世界市場シェア率が 25%に達している⁴⁾。

ネオニコチノイド系農薬の特徴として, 水溶性であり, 浸透性が高いことが挙げられる。例えば, 植物に散布されたとき, この農薬は葉や花, 根を経由して取り込まれ, 全体へと輸送される。これらをミツバチなどの吸汁性昆虫が摂取すると, 体

内に存在するニコチン性アセチルコリン受容体に対して, 不可逆的に結合する。ネオニコチノイドはアセチルコリンで分解することができないため, 神経伝達を阻害し麻痺させ, 最終的に昆虫を死に至らしめる²⁾。ニコチン性アセチルコリン受容体は昆虫体内に散見されるため, 農薬との強い相互作用を示すが, 哺乳類の末梢神経や中枢神経系にも存在する。従って, ネオニコチノイド系農薬は, 有機リン系農薬よりも 5~10 倍, 高い昆虫選択性を有すると推定される⁵⁾。

先に述べた特徴以外に, ネオニコチノイド系農薬は, その残留性が高い点も特筆するべきある。一度の散布で効果が長く持続するため, 農薬散布量の削減に繋がる一方で, 高い残留性を示すことから, 環境中に長期的に偏在し, 野生動物やヒトに対する健康被害も報告される⁴⁾。半減期については様々であるが, 例えば, チアメトキサムの半減期については pH 7 において, 1110 ~ 1250 日に

*物質工学科

達する⁶⁾。また、ネオニコチノイド系農薬は、簡単な洗浄では残留物を除去しきれないため、食品や花粉からも頻繁に検出されている⁷⁾。よって、ヒトを代表する非標的生物にも行き渡り、生物多様性を損なう可能性がある。

日本において、登録・使用されているネオニコチノイド系農薬は7種類(ジノテフラン(DIN, Dinotefuran), クロチアニジン(CLO, Clothianidin), イミダクロプリド(IMI, Imidacloprid), チアメトキサム(TMX, Thiamethoxam), アセタミプリド(ACE, Acetamiprid), チアクロプリド(THI, Thiacloprid), ニテンピラム(NIT, Nitenpyram))である。

1.2. ネオニコチノイド系農薬の加水分解性

農薬が実環境中で利用されるとき、周りの環境に依存して、農薬原体は様々な動態変化を起こすことが予想される。例えば、土壌や水のpH値に基づいた加水分解反応や、自然光の照射による光分解反応の進行である。加えて、環境中に普遍的に存在し、溶存有機物の主成分であるフミン酸との吸着現象も起こる⁷⁾。以上の点を踏まえれば、農薬原体のみに焦点を当てた研究だけでなく、それらの分解派生物や吸着物についても着目されるべきである。

ネオニコチノイド系農薬は、長期残留性が問題視されているが、いくつかのネオニコチノイド系農薬の加水分解性に関する研究成果も存在する。

例えば、Zhengらは、IMIは中性及び酸性条件下では安定して存在するが、pH 8以上では加水分解速度が非常に速いことを報告している⁸⁾。また、Todeyらは、TMXの加水分解が一次速度論に従っており、加水分解速度はpH 8以上で最も高いと述べている⁹⁾。つまり、本研究の対象であるTMXの安定性とはpH依存的である。

TMXは酸性及び、中性条件では長期的に安定して存在する¹⁰⁾。しかし、塩基性条件ではFig. 1に示すように、水酸基による求核置換反応が起こるため、加水分解反応が進行する¹⁰⁾。反応経路は4つである(Fig. 1)。初めに、①の反応はTMX(化合物1)のチアゾール環の2'位の炭素に対して、水酸基が求核置換攻撃を行うことで進行する。これにより、塩素の脱離を伴って水酸基が付加するため、化合物2を与える。続いて、②の反応は、TMXの1,3,5-オキサジアジナン環の2'位の炭素に δ^+ が発生していることで、反応が進行する。これは2'位の炭素の末端に、電子吸引基性を示すニトロ基が存在することによる。②の反応後、化合物3の中間体を経由し、化合物5を与える。また、③の反応では、TMXの1,3,5-オキサジアジナン環の4'位の炭素に水酸基が付加反応を起こし、化合物4を得る。最後に、④の反応は、1,3,5-オキサジアジナン環の1'位の炭素へ水酸基が求核置換攻撃を行い、環の開裂を引き起こす。④の反応は、化合物1と5に対して起こり、化合物6を与える。

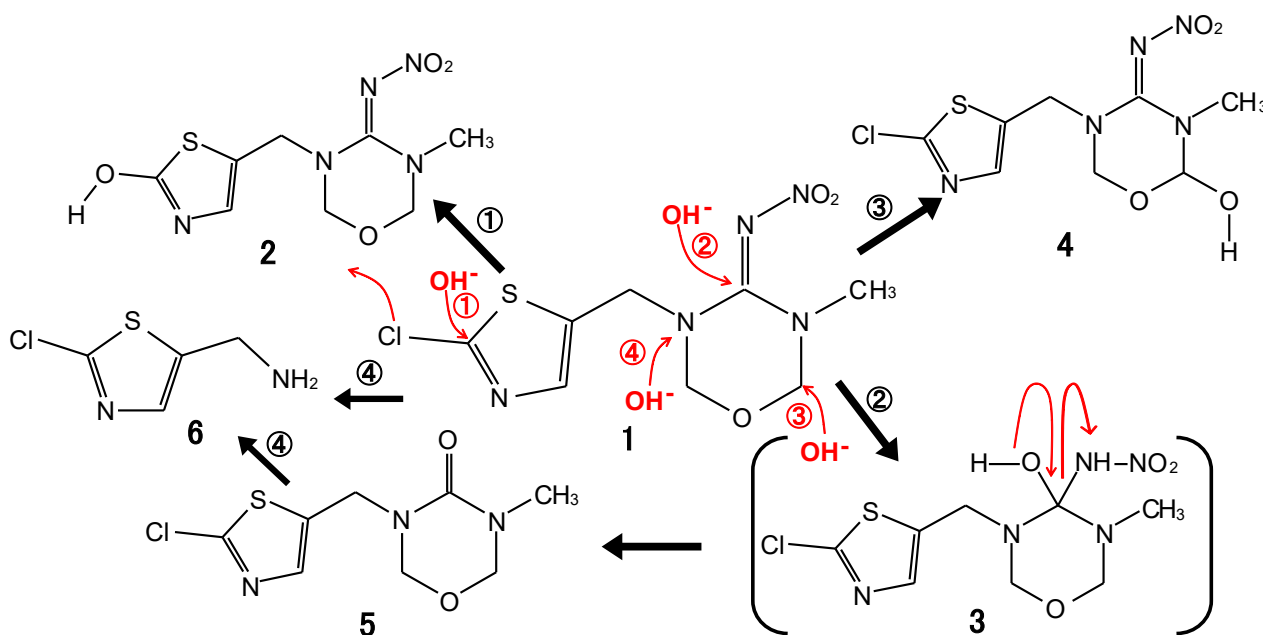


Fig. 1. Hydrolysis mechanism of thiamethoxam, a neonicotinoid pesticide, in basic conditions.¹⁰⁾

1.3. 本研究の目的

本研究では、ネオニコチノイド系に分類される農薬の1つであるTMXを対象としている。TMXの原体及び、その分解生成物がオオミジンコ (*Daphnia magna*) に与える生態毒性を調査することを目的とした。WET (Whole Effluent Toxicity) 手法を応用した日本の水環境管理に用いられるバイオアッセイに準じ、オオミジンコを用いた72時間急性遊泳阻害試験と21日間繁殖阻害試験を実施した。

2. 研究方法

2.1. 使用試薬

本研究ではTMX ((EZ)-3-(2-chloro-1,3-thiazol-5-ylmethyl)-5-methyl-1,3,5-oxadiazinan-4-ylidene (nitro) amine)標準物質 (富士フィルム和光純薬(株), TraceSure[®]), アクタラ顆粒水溶剤¹¹⁾ (シンジェンタジャパン(株), TMX: 10 wt%, 界面活性剤・無機塩類等: 89 wt%, 直鎖アルキルベンゼンスルホン酸ナトリウム (LAS, Linear Alkyl benzene Sulphonic acid): 1 wt%), アセトニトリル (富士フィルム和光純薬(株), 高速液体クロマトグラフ用 for HPLC), ほう酸 (富士フィルム和光純薬(株), 試薬特級), 1 mol/L 水酸化ナトリウム液 (富士フィルム和光純薬(株), 一般試験法用)を使用した。

2.2. オオミジンコの継代培養

本研究で取り扱う試験個体のオオミジンコは、メダカ学園 ((株)ビリーブインターナショナル) より購入したものである。オオミジンコの飼育は、OECD (Organization for Economic Co-operation and Development) 化学品テストガイドライン No.202 及び 211 に準拠して実施された^{12,13)}。飼育水にはElendt M4 培地 (以下 M4 培地) を使用した。飼育密度は25匹/L, 水温 20±2℃とした。また、オオミジンコの餌には、淡水微細藻類である *Chlorella vulgaris* を用い、餌密度が 1.0×10^9 cell/mL となるように給餌した。照明には白色蛍光灯を使用し、16時間明/8時間暗とした。なお、M4 培地は調製後に、エアーポンプ (α Beetle 90, (株) マルカン) を用いて、空気量 1.5~2.5 L/min で24時間曝気させた。

2.3. オオミジンコ急性遊泳阻害試験 (72 時間)

急性遊泳阻害試験は、OECD 化学品テストガイドライン No.202 に準拠して実施した¹²⁾。試験開始から24時間前に、生後2週間が経過し、かつ2腹目以降のオオミジンコの抱卵成体を、25匹/Lとなるように分取し、16時間明/8時間暗、20℃に保たれたインキュベーター内で保存した。

急性遊泳阻害試験は、TMX 標準物質及び、アクタラ顆粒水溶剤の2種類に対して実施された。対照区には、十分に曝気されたM4培地を使用した。それぞれの濃度区は、対照区+5段階 (TMX 標準物質: 12.5, 25.0, 50.0, 100, 184 mg/L, アクタラ顆粒水溶剤: 62.5, 125, 250, 500, 800 mg/L) とした。各濃度区における連数は4連である。生後24時間以内のオオミジンコの仔虫を、各濃度区に対して20匹ずつ曝露した。

試験液の水質 (水温, pH, DO (Dissolved Oxygen)) は、全ての濃度区の試験容器1つについて、試験開始時と終了時に測定した。試験開始から、24時間ごとに、オオミジンコの遊泳阻害数を記録した。なお、ビーカーを穏やかに動かした後、オオミジンコが15秒間泳げない場合、遊泳阻害されたとみなした¹²⁾。

2.4. オオミジンコ繁殖阻害試験 (21 日間)

繁殖阻害試験は、OECD 化学品テストガイドライン No.211 に準拠して実施した¹³⁾。試験開始から24時間前に、生後2週間が経過し、かつ2腹目以降のオオミジンコの抱卵成体を、25匹/Lとなるように分取し、16時間明/8時間暗、20℃に保たれたインキュベーター内で保存した。

繁殖阻害試験は、急性遊泳阻害試験と同様に、TMX 標準物質及び、アクタラ顆粒水溶剤の2種類に対して実施された。対照区には、十分に曝気されたM4培地を使用した。それぞれの濃度区は、対照区+5段階 (TMX 標準物質: 6.25, 12.5, 25.0, 50.0, 80.0 mg/L, アクタラ顆粒水溶剤: 62.5, 125, 250, 500, 800 mg/L) とした。各濃度区における連数は4連であった。生後24時間以内のオオミジンコの仔虫を、各濃度区に対して4匹ずつ曝露した。

試験液の水質 (水温, pH, DO) は、全ての濃度区の試験容器1つについて、試験開始時と終了時、換水操作前後の試験液に対して測定した。農薬原体からの分解生成物の影響を調査するために、換

水操作は週 1 回 (計 2 回) とした。OECD 化学品テストガイドラインでは、換水操作を 3 日に 1 度行うことを推奨している¹²⁾。換水操作を行わない場合、試験液の水質が悪化することにより、オオミジンコの慢性毒性に繋がる可能性がある。よって、TMX 標準物質を用いた繁殖阻害試験の実施と同時に、21 日間の試験期間中、1 度も換水操作を行わない対照区 (No water change control) を設けた。24 時間ごとにオオミジンコ 1 匹当たりの産仔数及び、遊泳阻害数について観察した。遊泳阻害の判定方法は、急性遊泳阻害試験と同様である。

2.5. HPLC による供試物質の定量

オオミジンコに対する 2 種類の毒性試験で使用される、M4 培地の pH は約 7.5~8.0 である。そのため、特に繁殖阻害試験においては、試験期間において TMX の加水分解反応が進行し、原体濃度の変動ならびに、原体からの分解物生成の可能性が示唆された。よって換水操作時に、試験液を冷暗所で保存し、HPLC (High Performance Liquid Chromatography) (LC-2000Plus series, 日本分光 (株)) による農薬の定量を試みた。測定条件を Table 1 へ示す。

Table 1, HPLC conditions for determination of the testing substances.

Column temperature	40°C
Flow rate	1.5 mL/min
Detection wavelength	250 nm
Injection volume	10 µL
Mobile phase composition	25 mM boric acid buffer-MeCN 70/30
Mobile phase pH	pH 9.21
Column No.	Unifinepak C18 04150-5M

3. 結果と考察

3.1. TMX がオオミジンコにもたらす急性毒性

3.1.1. TMX 標準物質

TMX 標準物質を用いた急性遊泳阻害試験における各水質パラメータは、水温 16.9~18.2°C, pH 7.4~7.8, DO 8.1~9.2 mg/L であった。溶存酸素濃度が低い場合、オオミジンコは低酸素ストレスによる、ヘモグロビン生成のため体色を赤色に変化させる¹⁴⁾。しかし本試験では、これらの所見は確

認されなかった。

TMX 標準物質の濃度変化に対する、オオミジンコの用量反応曲線を、統計処理ソフト R (ver. 4.1.2) を用いて作成した (Fig. 2)。なお、TMX 濃度については、試験液調製時に計算されたものとする (12.5, 25.0, 50.0, 100, 184 mg/L)。

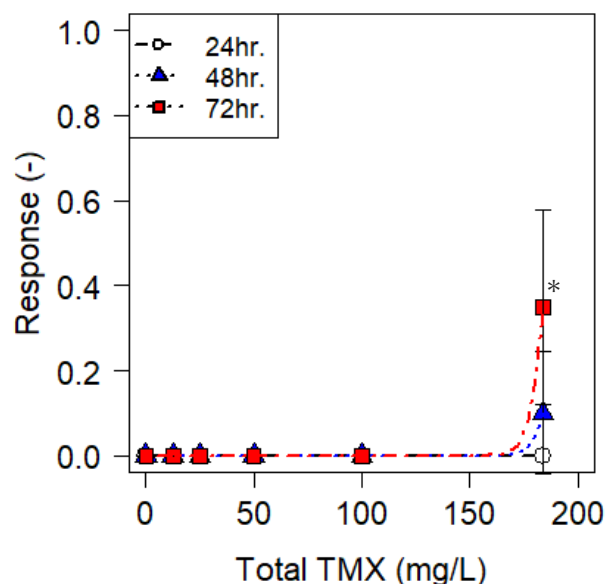


Fig. 2, Dose-response curves of *Daphnia magna* to different concentrations of TMX reference substance at each exposure duration. Logistic regression analysis was carried out using the statistical software R (ver. 4.1.2). (Error bars are 95% confidence intervals. * : $p < 0.05$, two-tailed t test)

TMX 濃度が 12.5 – 100 mg/L である濃度区においては、72 時間の試験期間中、オオミジンコへの遊泳阻害は確認されなかった。そのため、TMX 標準物質のオオミジンコに対する 72 h - NOEC (No Observed Effect Concentration) 値は、72 h - NOEC = 100 mg/L と判断される。先行研究において、オオミジンコに対する TMX の毒性値は 48 h - $EC_{50} > 100$ mg/L と報告されている¹⁵⁾。一方で、TMX 濃度が 184 mg/L に設定された試験液にオオミジンコを曝露した場合、試験開始から 48 時間後に 10%、72 時間後に 35%の遊泳阻害が確認された。特に、35%の遊泳阻害は対照区と比較して有意 ($p < 0.05$, 両側 t -検定) であった。一般に、ネオニコチノイド系農薬は、昆虫 (標的害虫種など) の神経組織に存在する、ニコチン性アセチルコリン受容体を標的として神経毒性作用を引き起こす²⁾。この毒性作用機構は、標的害虫種と非標的生物種の間で

保存されている¹⁴⁾。よって、オオミジンコに対する TMX の毒性作用機構は、これに由来すると考えられる。

3.1.2. アクタラ顆粒水溶剤

アクタラ顆粒水溶剤を用いた急性遊泳阻害試験における各水質パラメータは、水温 20.5~21.5℃, pH 7.0~7.6, DO 7.1~8.1 mg/L であった。

アクタラ顆粒水溶剤の濃度変化に対する、オオミジンコの用量反応曲線を、統計処理ソフト R (ver. 4.1.2) を用いて作成した (Fig. 3)。アクタラ顆粒水溶剤には、標的害虫への有効成分として、製剤中に 10 wt% の TMX が含まれる¹¹⁾。よって、TMX 濃度は、試験液調製時に計算されたアクタラ顆粒水溶剤濃度の 10% として求められる (TMX 濃度: 6.25, 12.5, 25.0, 50.0, 80.0 mg/L)。

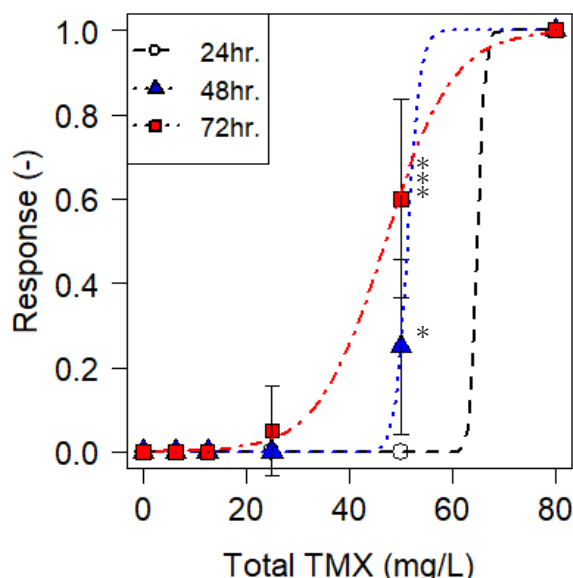


Fig. 3. Dose-response curves of *Daphnia magna* to different concentrations of Actara Granular Water Solvent at each exposure duration. Logistic regression analysis was carried out using the statistical software R (ver. 4.1.2). (Error bars are 95% confidence intervals. * : $p < 0.05$, *** : $p < 0.001$, two – tailed t test)

TMX 濃度が 6.25, 12.5 mg/L である濃度区においては、試験期間を通して、オオミジンコへの遊泳阻害は確認されなかった。よって、アクタラ顆粒水溶剤のオオミジンコに対する 72 h - NOEC 値は、TMX 濃度換算で 72 h - NOEC = 12.5 mg/L で

ある。一方で、最高濃度区の 80 mg/L では、試験開始から 24 時間経過時に遊泳阻害率が 100% に達した。また、50 mg/L の濃度区においても遊泳阻害が起こり、時間経過に伴って遊泳阻害率が有意 ($p < 0.05$, 両側 t -検定) に上昇した (48 時間経過: 25%, 72 時間経過: 60%)。Fig. 3 に示す用量反応曲線より、アクタラ顆粒水溶剤の半数阻害濃度 EC_{50} (half maximal (50%) effective concentration) は TMX 濃度換算で 24 h - EC_{50} = 66, 48 h - EC_{50} = 51, 72 h - EC_{50} = 48 mg/L であった。

遊泳阻害が確認された濃度区について、等量の TMX 標準物質を用いた場合、オオミジンコに対する急性毒性は無いことを既に述べた (Fig. 2)。ここで考慮されるべきは、アクタラ顆粒水溶剤中に 1 wt% 含まれる、直鎖アルキルベンゼンスルホン酸ナトリウム (LAS) の存在である。LAS は PRTR (Pollutant Release and Transfer Register) 制度の 1 種に指定されている物質 (第一種指定化学物質) である。ヒトや生態系への有害性があり、また、環境中に広く存在し、曝露の可能性があると認められている¹⁶⁾。毒性作用機構の始まりは、界面活性剤の疎水性部分が細胞外膜に挿入され、脂質膜タンパク質と相互作用することである。これにより、細胞膜の崩壊に伴って細胞内物質の放出、細胞溶解現象が起こる¹⁷⁾。先行研究より、オオミジンコに対する LAS の毒性値は 48 h - EC_{50} = 4.3 mg/L とされる¹⁸⁾。アクタラ顆粒水溶剤中の TMX 濃度を 0.1 倍したものが、LAS 濃度に相当するとすれば、本研究により得られた 48 h - $EC_{50,LAS}$ は 5.1 mg/L と考えられる。この値は、LAS 単体を用いた場合の毒性値と近い。つまり、アクタラ顆粒水溶剤がオオミジンコに与える毒性作用とは、農薬の助剤である LAS に大きく依存する可能性が示唆された。

3.2. TMX がオオミジンコにもたらす慢性毒性

3.2.1. TMX 標準物質

TMX 標準物質を用いた繁殖阻害試験における、試験液交換前の各水質パラメータは、水温 19.5~20.8℃, pH 7.5~8.8, DO 8.3~9.0 mg/L であった。また、試験液交換後の各水質パラメータは、水温 20.3~21.5℃, pH 7.6~8.4, DO 7.8~8.6 mg/L である。TMX 濃度は試験液の HPLC 測定により決定された。すべての試験液は、曝露時のサンプリングから 1 週間以内に分析された。0~7, 7~14, 14

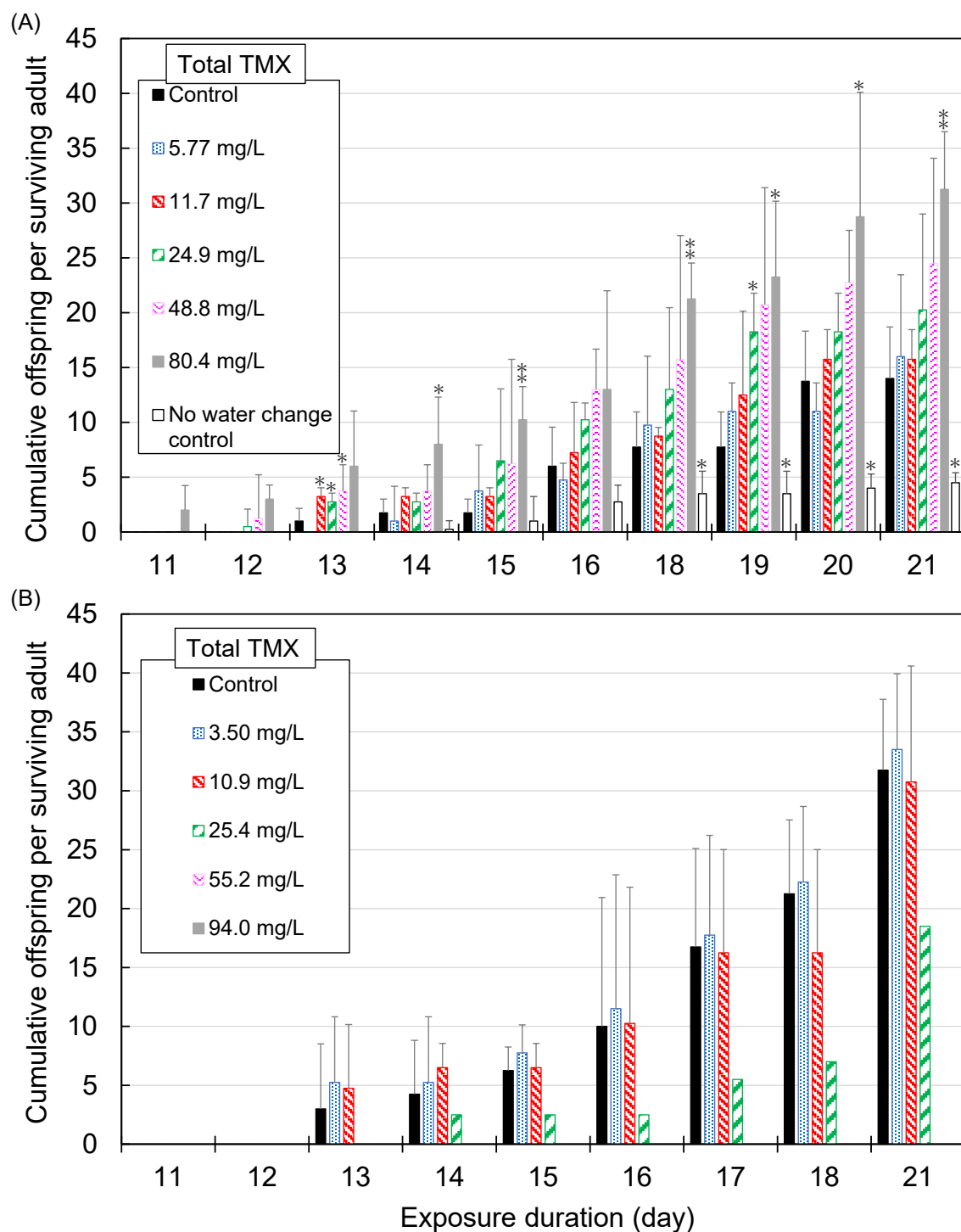


Fig. 4, Reproductive inhibition tests were carried out for 21 days. (A) : Cumulative offspring per surviving adult of *Daphnia magna* relative to changes in concentrations of TMX reference substance. (B) : Cumulative offspring per surviving adult of *Daphnia magna* relative to changes in concentrations of Actara Granular Water Solvent. (Error bars are 95% confidence intervals. * : $p < 0.05$, * * : $p < 0.01$, two – tailed t test)

～ 21 日における TMX 濃度の幾何平均を求め、これを 0～21 日間で曝露された TMX 濃度とする。

TMX 標準物質の濃度変化に対する、オオミジン

コの生存親 1 匹当たりの累積産仔数の推移を Fig. 4 (A) に示す。また、各曝露濃度区における親個体の生存率及び初産日を Table 2 へ示す。

TMX 標準物質の濃度によらず, 全ての濃度区において, オオミジンコの遊泳阻害及び死亡は確認されなかった (Table 2)。一方で, オオミジンコは 21 日間の繁殖阻害試験において, TMX 標準物質濃度の上昇に伴い, 対照区と比較して有意 ($p < 0.05$, 両側 t-検定) に繁殖を促進させた。この傾向は, 試験終了時まで保たれた。試験開始から 11 日目に, TMX 濃度が 80.4 mg/L である濃度区の個体が産仔した。翌日の 12 日目には, 最高濃度区から 2, 3 番目に相当する個体が産仔した。対照区よりも短い日数で繁殖行動が起こったため, 結果として 21 日間の累積産仔数も増加したと考える。先行研究によれば, TMX はオオミジンコに対する慢性毒性をもたないとされる¹⁴⁾。一方で, この農薬がオオミジンコの繁殖を促進するという事例も報告されていない。物質は異なるが, TiO₂NPs (TiO₂ Nanoparticles) をオオミジンコに曝露した場合について, Galhano らは TiO₂NPs の濃度上昇に伴い, 産仔数が増加するという結果を報告している¹⁹⁾。この現象について, Galhano らは不利な状況下で種を存続させるための適応戦略であると解釈している。本試験においても, 農薬の曝露により, 生存環境の悪化が起こっていた可能性は高い。よって, TMX 曝露による繁殖促進効果はオオミジンコの生存本能の現れであると考ええる。

3.2.2. アクタラ顆粒水溶剤

アクタラ顆粒水溶剤を用いた繁殖阻害試験における, 試験液交換前の各水質パラメータは, 水温 17.1~19.2℃, pH 7.5~8.3, DO 7.9~9.7 mg/L であった。また, 試験液交換後の各水質パラメータは, 水温 18.1~20.1℃, pH 7.4~7.9, DO 7.7~8.8 mg/L である。アクタラ顆粒水溶剤中の TMX 濃度は試験液の HPLC 測定により決定された。すべての試

された TMX 濃度とする。

アクタラ顆粒水溶剤中の TMX の濃度変化に対する, オオミジンコの生存親 1 匹当たりの累積産仔数の推移を Fig. 4 (B) に示す。また, 各曝露濃度区における親個体の生存率及び初産日を Table 2 へ示す。TMX 濃度に応じて, 親個体の生存率及び産仔数は影響を受けた。TMX 濃度が 25.4 mg/L の濃度区では親個体の生存率は 50%であり, さらに高濃度区である 55.2, 94.0 mg/L においては, 曝露開始から 72 時間以内に死亡が確認された。この結果は, 同程度の濃度区で実施された急性遊泳阻害試験の結果と一致している。また, TMX 標準物質を用いた繁殖阻害試験では, 濃度上昇に伴って繁殖を促進する結果を得ているものの, 本試験においてはそのような傾向はみられなかった。これは, アクタラ顆粒水溶剤中に助剤として含まれる LAS の毒性の方が, TMX よりも強く, 支配的であることに由来すると考える。

4. まとめ

本研究では, ネオニコチノイド系農薬に分類される TMX に焦点を当て, オオミジンコに対する急性毒性及び慢性毒性について調査を行った。

急性毒性試験の結果, オオミジンコに対して急性毒性を示す TMX 濃度は 184 mg/L であり, 曝露時間の経過に伴って, 遊泳阻害率は上昇した。また, アクタラ顆粒水溶剤を用いた試験においては, TMX 標準物質を用いた際に, 毒性を示さなかった濃度範囲においても急性毒性があった。これは, アクタラ顆粒水溶剤中に助剤として含まれ, 界面活性剤の役割を果たしている LAS の毒性によるものであると考えられる。

一方で, 繁殖阻害試験の結果より, TMX 標準物質は濃度上昇に伴ってオオミジンコの繁殖を促進

Table 2, Survival (%) and time to first brood (days) (Means $\pm$ SD) in the *Daphnia magna* reproduction inhibition test using TMX reference substance and Actara granules aqueous solution.

験液は, 曝露時のサンプリングから 1 週間以内に分析された。0~7, 7~14, 14~21 日における TMX 濃度の幾何平均を求め, これを 0~21 日間で曝露

させる結果を得た。既往の研究においても, TMX がオオミジンコに対する繁殖促進効果を有する結果は報告されていない。今後, オオミジンコの生

TMX reference substance							Actara Granular Water Solvent						
Total TMX (mg/L)	0	5.77	11.7	24.9	48.8	80.4	0	3.50	10.9	25.4	55.2	94.0	
Survival (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	50	0	0	
Time to 1st brood (days)	14.0 ± 1.4	15.0 ± 0.8	13.0 ± 0.0	12.8 ± 0.5	12.8 ± 0.5	11.3 ± 0.5	13.8 ± 0.9	13.5 ± 1.0	13.3 ± 0.5	16	-	-	

体内へのさらなる調査が求められるが、現時点では、外部環境の悪化による種としての生存本能の現れに起因すると考える。試験期間中、農薬原体の加水分解反応が進行していることを HPLC 測定により確認した。しかし、農薬原体の減退率は約 80%であったことから、この現象は TMX 原体が関与していると考ええる。反対に、アクタラ顆粒水溶剤を用いた繁殖阻害試験においては、産仔数を増加させることはなく、濃度変化に伴って産仔数が減少した。TMX の毒性よりも LAS の方がオオミジンコに対する感受性が高いことによるものである。その他にも、アクタラ顆粒水溶剤を用いた場合には、TMX と LAS の複合毒性についても議論の余地がある。

参考文献

- 1) 上浦沙友里, 伏脇 裕一: ネオニコチノイド系農薬の環境と食品汚染の現状と課題, 安全工学, vol. 57, no. 2, pp. 137-144, 2018 年 4 月
DOI : https://doi.org/10.18943/safety.57.2_137
- 2) D.Klingelhofer, M.Braun, D.Bruggmann, D.A.Groneberg : Neonicotinoids: A critical assessment of the global research landscape of the most extensively used insecticide, Environmental Research, vol. 213, 113727, Oct. 2022
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113727>
- 3) J.E.Casida : Neonicotinoids and Other Insect Nicotinic Receptor Competitive Modulators: Progress and Prospects , Annual Review of Entomology, vol. 63, pp. 125-144, Jan. 2018.
DOI : <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020117-043042>
- 4) D.A.Thompson , H.J.Lehmler , D.W.Kolpin , M.L.Hladik , J.D.Vargo , K.E.Schilling , G.H.LeFevre , T.L.Peebles , M.C.Poch , L.E.LaDuca, D.M.Cwiertny, R.W.Field: A critical review on the potential impacts of neonicotinoid insecticide use: current knowledge of environmental fate, toxicity, and implications for human health, Environmental Science: Processes & Impacts, vol. 22, pp. 1315-1346, Mar. 2020
DOI : <https://doi.org/10.1039/C9EM00586B>
- 5) M.Tomizawa, J.E.Casida : Neonicotinoid insecticide toxicology: mechanisms of selective action, Annual Review of Pharmacology and Toxicology, vol. 45, pp. 247-268, Sep. 2005
DOI : <https://doi.org/10.1146/annurev.pharmtox.45.120403.095930>
- 6) 食品安全委員会農薬専門調査会: チアメトキサム評価書 (案), pp. 33-34, 2015 年 5 月
- 7) D.Pan, X.Wu, P.Chen, Z.Zhao, F.Fan, Y.Wang, M.Zhu, J.Xue, Y.Wang : New insights into the interactions between humic acid and three neonicotinoid pesticides, with multiple spectroscopy technologies, two-dimensional correlation spectroscopy analysis and density functional theory , Science of The Total Environment, vol. 798, 149237, Dec. 2021
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149237>
- 8) W.Zheng, W.Liu : Kinetics and mechanism of the hydrolysis of imidacloprid, Pesticide Science, vol.55, no. 4, pp. 482-485, May. 1999
DOI : [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9063\(199904\)55:4<482::AID-PS932>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9063(199904)55:4<482::AID-PS932>3.0.CO;2-3)
- 9) S.A.Todey , A.M.Fallon , W.A.Arnold : Neonicotinoid insecticide hydrolysis and photolysis: Rates and residual toxicity , Environmental Toxicology and Chemistry, vol. 37, no. 11, pp. 2797-2809, Aug. 2018
DOI : <https://doi.org/10.1002/etc.4256>
- 10) R.Karmakar, S.B.Singh, G.Kulshrestha : Kinetics and mechanism of the hydrolysis of thiamethoxam, Journal of environmental science and health / B, vol. 44, no. 5, pp. 435-441, Jun. 2009
DOI : <https://doi.org/10.1080/03601230902934785>
- 11) シンジェンタジャパン (株): アクタラ顆粒水溶剤 SDS
https://cp-product.syngenta.co.jp/product/actara_wg
(参照日: 2022.12.18)
- 12) OECD : Test No. 202: *Daphnia* sp. Acute Immobilisation Test, pp. 1-12, Nov. 2004
DOI : <https://doi.org/10.1787/20745761>
- 13) OECD : Test No. 211: *Daphnia magna* Reproduction Test, pp. 1-25, Oct. 2012
DOI : <https://doi.org/10.1787/9789264185203-en>
- 14) M.Raby , X.Zhao , C.Hao , D.G.Poirier , P.K.Sibley : Relative chronic sensitivity of

neonicotinoid insecticides to *Ceriodaphnia dubia*
and *Daphnia magna*, *Ecotoxicology and*
Environmental Safety, vol. 163, pp. 238-244,
Nov.2018.

DOI :
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.086>

- 15) M.C.Finnegan, L.R.Baxter, J.D.Maul, M.L.Hanson, P.F.Hoekstra : Comprehensive characterization of the acute and chronic toxicity of the neonicotinoid insecticide thiamethoxam to a suite of aquatic primary producers, invertebrates, and fish, *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 36, no. 10, pp. 2838-2848, May. 2017.

DOI : <https://doi.org/10.1002/etc.3846>

- 16) 藤田正一: 毒性学 — 生体・環境・生態系 —, 朝倉書店, 第7刷, pp. 188-197, 2008年
- 17) Y.J.S.Lai, F.D.Francesco, A.Aguinaga, P.Parameswaran, B.E.Rittmann : Improving lipid recovery from *Scenedesmus* wet biomass by surfactant-assisted disruption, *Green Chemistry*, vol. 18, no. 5, pp. 1319-1326, Oct. 2016.

DOI :
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/GC/C5GC02159F>

- 18) OECD SIDS : SIDS Initial Assessment Report - Linear Alkylbenzene Sulfonate, pp. 35-45, Apr. 2005

DOI :
<https://hpvchemicals.oecd.org/ui/handler.axd?id=5b837fb0-350c-4742-914e-5f6513df120a>

- 19) V.Galhano, R.Zeumer, M.S.Monterio, B.Knopf, B.Meisterjahn, A.M.V.M.Souares, S.Loureiro, C.Schlechtriem I. Lopes : Effects of wastewater-spiked nanoparticles of silver and titanium dioxide on survival, growth, reproduction and biochemical markers of *Daphnia magna*, *Science of The Total Environment*, vol. 839 p. 156079, May. 2022

DOI :
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156079>

(2023年1月6日 受理)

『はざまる工房』を拠点とした新たな形の公開講座開講

向川拓臣*, 遠藤蒼太**, 大塚遼之介**, 杉浦昂樹**, 熊澤匠真*,
吉元照貴*, 中村源一郎*, 永吉真知子*, 松岡敏*,
新田武父**, 庄司良***, 玉田耕治****

2019 年度より多目的工作施設『はざまる工房』を設置し、学内学生向けの運用の他、公開講座や出前授業で学外に向けても活用してきた。今年度(2022 年度)新たな運営形態で 2 つの体験型公開講座を開講した。いずれも昨年度(2021 年度)実施した公開講座を発展させたものだが、一方は工房の運営者である技術職員と利用者である教員・学生の三者がそれぞれ主要な役割を果たしながら共同で講座開講し、もう一方では専門の異なる技術職員が協力し、分野横断的な講座を開講した。異なる立場の者が協力して公開講座を開講するという新たな試みにより、講座内容への評価が上がり、また新しい研究テーマが見出されるなどの思わぬ派生効果があった。

(キーワード: ものづくり, 公開講座, はざまる工房, 自然エネルギー, 樹脂加工, 電子回路)

Organization of new-style open lectures held in the “Hazamaru Kobo”

Takumi MUKOUGAWA *, Sota ENDO**, Ryonosuke OTSUKA**,
Koki SUGIURA**, Takuma KUMAZAWA*, Shoki YOSHIMOTO*,
Gen-ichiro NAKAMURA *, Machiko NAGAYOSHI*, Satoshi MATSUOKA*,
Takenori NITTA**, Ryo SHOJI***, Koji TAMADA****

Since 2019, a multipurpose workshop "Hazamaru Kobo" has been set up for students in our college. Many of elementary and junior high school students in the neighborhood are participating in the open lectures held in the "Hazamaru Kobo", including two hands-on type open lectures. Both of them were developed in last year as new attempts. The lecture was operated by three parties, technical staffs and teaching staffs and students, who all played a major role. Another lecture can be said as cross-disciplinary open lecture, because staff members with different areas of expertise were collaborated. By these new attempts, the lectures were more highly rated by participants, and the discovery of new research topics were also produced as unexpected derivatives.

(Keywords: “Manufacturing,” Open Lecture, “Hazamaru Kobo,” Renewable Energy, Resin Processing, Electronic Circuit)

1. はじめに

本校はコラボレーション・コモンズ棟(以下, CC 棟)内に技術職員が管理運営する多目的工作施設である社会実装教育ラボ『はざまる工房』(以下, 工房)を設置している。この工房は多様な加工・試作機器を有し、低学年の自発的なものづくりから高学年の社会実装教育や卒業研究まで、学年・学科横断的に利用できる施設である。

例年、本校では教員や技術職員が地域の小・中学生向けの出前授業・公開講座を数多く行っているが、昨年度報告¹⁾のように工房はこれら学外向け講座にも活用されている。また近年では、社会実装教育の一環で学生が出前授業や講座を企画・実施することがあり、企画や教材作製拠点として工房が利用される例も見られる。

今回、2022 年 8 月 21 日に事前申し込み定員制

* 教育研究技術支援センター ** 電子工学科 *** 物質工学科 **** 電気工学科

で開催されたイベント『東京高専公開講座』に工房を活用して2つの体験型講座を開講した事例を報告する。一方の講座は、事前に工房で作製した実験器具を用いて学習する講座形態としつつ、工房の運営側である技術職員と利用者の学生・教員の三者が講座準備、当日の運営の過程で、それぞれが主要な役割となる講座設計とした。一者が主体で他は支援という形態が多い中、新しい試みと思われる。もう一方の講座は、ものづくり体験を主目的としつつ分野横断型の講座とし、機械工学と電気・電子工学という異分野の技術職員が協力して講座を企画・運営した点で新しい試みであった。また、両講座において講座内容を評価するアンケートを実施した。このアンケートの解析結果や、公開講座を通じて得られた工房の活用と発展につながる気づきについても合わせて報告する。

2. 体験型公開講座（蓄発電学習）

昨年度と同様に太陽光等の再生可能エネルギー発電と、補完技術としての蓄電の大切さを学ぶ体験型講座を開講した。参加者の対象学年は小学校3年から中学校2年としたが、コアターゲットを小学校6年生に据えた点も昨年度と同様である。昨年度のアンケート結果や気づきから、講座内容に修正を加え、実験器具を追加製作し新たに『LEDブース』を設置した。これら新たな要素追加の効果を、アンケートによる評価から分析した。

また、教員が内容のアウトラインを考案し講座当日の説明を担当、技術職員が実験器具を用いた実験項目の提案・開発・製作を担当、と二者連携で行った昨年度に対して、学生を参加者への指導・実験器具の深化研究担当として加え、当初目指していた三者連携での開講とした(図1(a), (b))。



(a) 説明風景

(b) 学生による指導

図1 講座の様子

2.1. 実験器具の追加と『LEDブース』の設置

(1) 実験器具の追加

手探り状態で始めた昨年度の講座¹⁾では、太陽電池、コンデンサの充電電圧(蓄電)、模型用小型モータによる発電電圧等の発電条件変化に伴う出力変化を、デジタルテスタを用いて確認を行ったが、低学年参加者であるほど結果に対する反応が乏しいと感じていた。原因が低学年ほど数値で表示された出力変化が直感的に理解しにくい点にあると考え、今年度は、ビジュアル的な印象を改善して興味を引くように、図2に示すLED器具を作製し、デジタルテスタに代えて使用した。

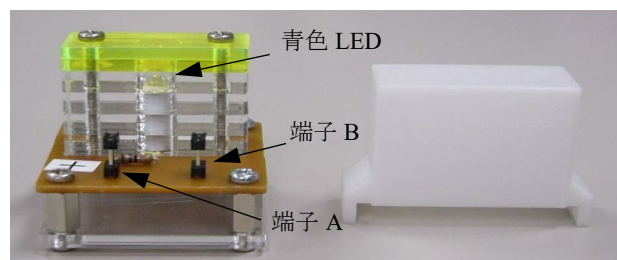
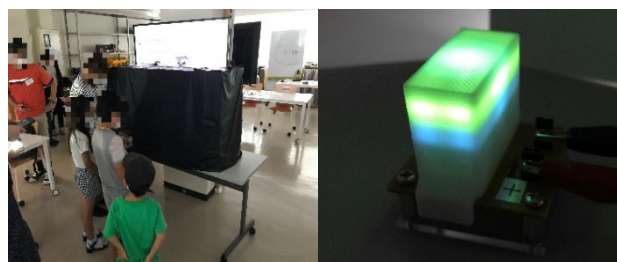


図2 LED 器具と拡散キャップ

このLED器具は、端子A-B間に太陽電池の出力や模型用小型モータの出力、電荷が蓄積されたコンデンサ等を接続することにより、出力電圧の変化をビジュアル的に確認できる。器具の中心に発光体として青色LEDを1つ設置しており、入力電圧(0.8~1.5V)が高くなるほどLEDの光量が増す。LEDが倒れないように横から無色の透明アクリル板で支え、上部を緑色の透明アクリル板で覆ったことで、LEDの横には青色の光が広がり、上部は緑色に光る。ここに拡散キャップを取り付け、点灯状態が見やすいよう補助している。さらに図3(a)の今年度新たに設置した暗幕の中にLED器具を置くことで、図3(b)のように点灯状態の確認しやすさの向上と、感興が増すことでより楽しみながら講座を進行できる効果を期待した。実際、昨年度よりも参加者の反応がよくなり、付き添いの保護者からも『この光源は何ですか?』といった反応を引き出す要素の一つとなった。



(a) 暗幕

(b) 点灯したLED器具

図3 暗幕内での出力電圧確認

(2) 太陽電池体験ブース『LED ブース』の設置

オプション体験ブースとして講座会場内に太陽電池の特徴を体験する『LED ブース』を設置した。太陽電池には半導体の pn 接合の性質が利用されているのはよく知られたことだが, 同様に発光ダイオードも半導体の pn 接合構造を持ち合わせるため, 一般には知られていないが実は発電することが可能である。経験的に知っていたこの特性を利用して発光ダイオード (以下, LED) を太陽電池に見立てて簡易な回路を設置し, 以下のような太陽電池の特性を体験するブースを設置した。

- ・照度の変化に対する出力電圧の変化
(受光角度, 距離変化)
- ・種類の違いによる出力電圧の違い
(太陽電池の種類)
- ・発光ダイオードの接続個数による電圧の変化
(太陽電池セルと電圧の変化)

このブースで使用した4種類のLED(左から青, 緑, 黄, 赤に発光)とLEDへの光の照射の様子を図4(a), (b)に示す。ブースでは, 光源としてハロゲンランプと蛍光灯との2種類を用いた。



(a)使用 LED (b)光源からの照射
図4 使用LEDと発電電圧測定

前述の通り LED が発電に利用できることは一般的ではなく基礎データが見つからなかったため, 事前にブースで使用した4種類のLEDの発電の電圧-電流特性を図5のように簡易的に測定した。

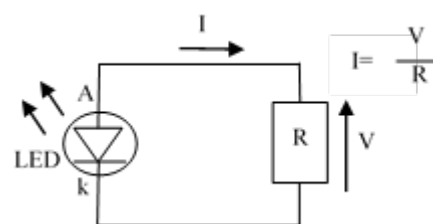


図5 電圧-電流特性測定の様子

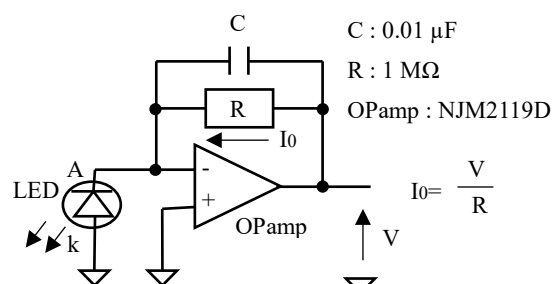
光源にはハロゲンランプ (CRS110V120W, 三菱電機オスラム株式会社) を使用し, 光源台座と

LEDの距離を35cmとした。LED位置における光源消灯時の周囲照度は約94lx, 点灯時の照射照度は約65klxであった。その他, デジタルマルチメータ (PC710, 三和電気計器株式会社), 照度計 (ILLUMINANCE METER LX2, 三和電気計器株式会社), オシロスコープ (TB1022, 株式会社テクトロニクス) を使用した。

特性測定時の電流-電圧変換には, 抵抗方式とトランスインピーダンスアンプ方式(以下 TIA 方式)²⁾の2種類の方法を用い, 抵抗方式は負荷変化時の特性, TIA 方式は短絡電流の測定に使用した。図6(a),(b)にそれぞれの測定回路図を示す。



(a)抵抗方式の測定回路図



(b)TIA 方式の測定回路図

図6 測定時に使用した回路図

また, 図7に短絡電流 I_0 , 開放電圧 V_0 , 抵抗負荷8点(10 Ω , 100 Ω , 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 510 k Ω , 1 M Ω , 2.2 M Ω)の計10点で測定したLEDの電圧-電流特性を示す。

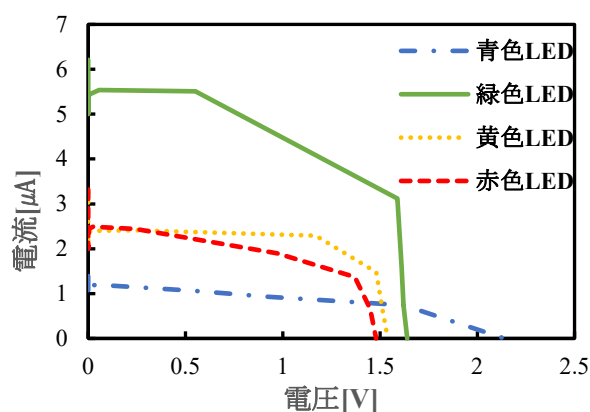


図7 発光ダイオードの電圧-電流特性

ここで、短絡電流 I_0 は電圧 0 V 時の電流値であり、開放電圧 V_0 は電流値 0 μA 時の電圧である。図 7 では短絡電流 I_0 や抵抗負荷 10 $\Omega \sim 1 \text{ k}\Omega$ の測定点は 0 V 近傍に集中し y 軸と一体化して見えるが、ここで注目したいのは電圧-電流特性曲線全体の形状である。4 種類すべての LED の電圧-電流特性曲線の形状が太陽電池の電圧-電流特性曲線と類似しており、高価な太陽電池の代替に LED を実験器具として使用できることが示唆された。

一方で LED は、照射光源、表面のエポキシ樹脂（クリア色等）の違い、高輝度などの種類等によって発電量に違いがあると思われる。例えば発光色に依る発電量の違いの様子がわかるデータとして、表 1 に短絡電流 I_0 と開放電圧 V_0 、また $I_0 \times V_0$ の値を示す。一般に、 $I_0 \times V_0$ の値の大小が太陽電池から取り出すことのできる電力の大小に関係する傾向があり、今回測定した 4 種類個の LED のの中では、緑色 LED が最も発電量があるということがわかった。

表 1 発光ダイオードの短絡電流 I_0 と開放電圧 V_0

	青色	緑色	黄色	赤色
$I_0 [\mu\text{A}]$	1.39	6.21	3.25	3.32
$V_0 [\text{V}]$	2.14	1.64	1.54	1.48
$I_0 \times V_0 [\mu\text{VA}]$	2.97	10.2	5.01	4.77

LED による発電を、“オプション”ではなくそれを主眼とする体験講座に使用するには、照射光源や LED の種類による電圧-電流特性といった基礎データが全く不足しており、実験内容としても今回行った「照射角度の違いによる発電量の変化」「LED の種類による発電量の違い」「セルの個数による発電量の違い」以外にも使用できるか検討の余地が多い。これらの検討は、講座を共同開講した学生が研究しているところであり、今後研究結果を講座内容にフィードバックしていきたい。

2.2. アンケートによる評価

昨年度からの講座内容の改善点の効果を確認し、さらなる改善点を洗い出すため、講座参加者に講座内容を評価するアンケートを依頼した。

昨年度と同様に小学校 3 年から中学校 2 年を対象に募集したが、若干の他学年の申込みも含め参加者総数は 33 名であった。参加者を学年別でみ

ると小学校 1 年 (3%)、小学校 3 年 (24%)、小学校 4 年 (21%)、小学校 5 年 (16%)、小学校 6 年 (6%)、中学校 1 年 (6%)、中学校 2 年 (18%)、中学校 3 年 (3%)、未就学 (3%) の割合であった。以下では昨年度のアンケート評価との比較を含めて、結果を分析する。

図 8 で昨年度と今年度における設問『太陽電池の仕組の理解度について』の回答状況を比較した。

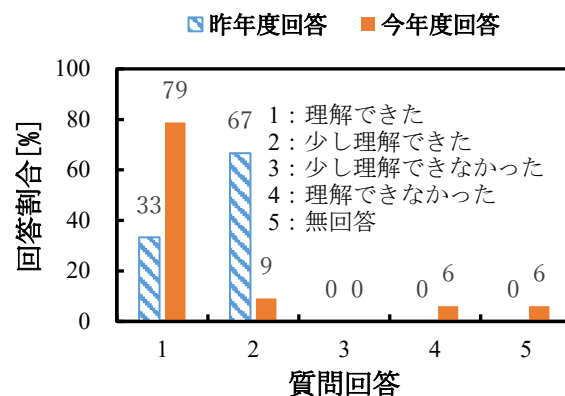


図 8 理解度についてのアンケート結果

「理解できた」と回答した参加者の割合が、昨年度 33%に対し今年度は 79%と増えており、昨年度のアンケート評価や反省点を前述 2.1.(1)のように改善した結果が、評価の好転として現れたと考えられる。一方で昨年度無かったネガティブな回答「理解できなかった」が見受けられたが、この回答をした参加者は未就学児と小学校 1 年生であり、小学校 3 年から中学校 2 年までを想定した講座内容が難しく感じられたものと考えられる。

次に、図 9 に設問『講座内容に興味を持てたか』についてのアンケート結果を、またそのアンケートにおいて学年毎に「そう思う」と回答のあった割合を図 10 に示す。

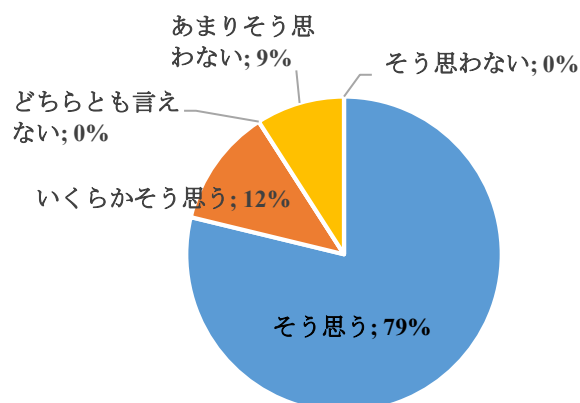


図 9 講座内容への興味を問うアンケート結果

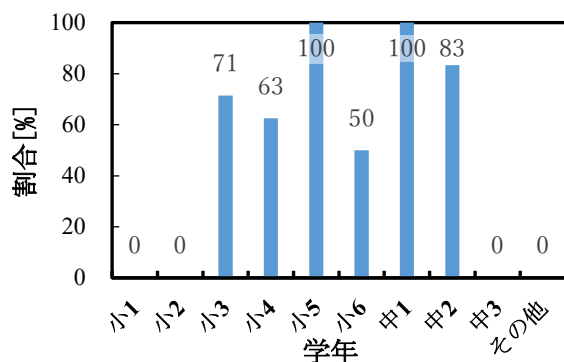


図 10 学年毎「そう思う」と回答のあった割合

図 9 に示すように「そう思う」の回答が約 8 割あり、多くの参加者に講座内容に対する興味を持ってもらえたことがわかった。一方で図 10 に示すように、本講座のコアターゲットとしていた小学校 6 年生の参加者 50% からしか「そう思う」との回答が得られなかった。小学校 6 年生で学習する再生可能エネルギーに関する講座であるにも関わらず、参加者の興味を引き出せていないことは反省すべきであり、説明内容や実験の進め方にさらなる工夫が必要であると考えます。その他の学年については、コアターゲットの学年から離れるほど興味が下がる傾向があるのは妥当な反応であり、おおむね良好な評価が得られたと考えています。

図 11 は昨年度と今年度における設問『講座時間の適切さ』への回答状況の比較である。昨年度の講座時間 45 分に対し今年度は 60 分と 15 分長くして開講したところ、昨年度に比べ回答が分散した。昨年度には無かった「長く感じた」の回答が増えているが割合としては 1 割であり、9 割が「普通」もしくは「短く感じた」と答えていたことから、60 分以内で終わるような講座内容とすることが適当だと、この 2 年間の比較から考えられる。

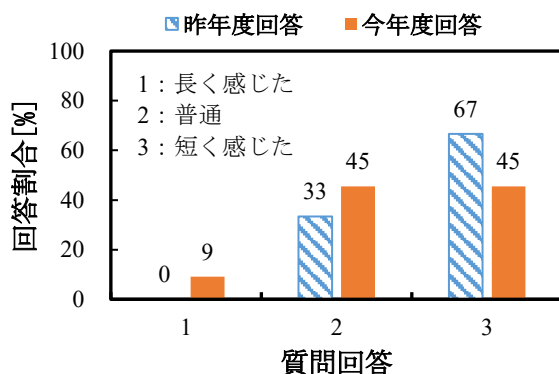


図 11 講座時間についてのアンケート結果

2.3. 蓄電学習まとめ

昨年度の気づきを活かし、直感的なわかり易さが向上するように改善して図 8 に示した理解度についてのアンケート結果より、望んだ効果が出ているように感じているが、まだ改善の余地があると考えている。これら改善点は、学生・技術職員・教員が、“講座を運営する”という同じ立場から忌憚なく意見を出しあい、次年度以降の公開講座に反映させたい。また公開講座の枠だけに収まらず、学生の卒業研究にも派生しており、立場の異なる三者の協力が教育研究にも良い影響を与えるという良事例が得られた。

また、本講座内容を出前授業に使用しないのか、との質問を見学者から受けた。同時参加者が多人数となる出前授業への転用も視野に入れ、講座内容により厚みを持たせ、講座進行に工夫を加える試行錯誤をしていく必要がある。

3. 体験型公開講座（オブジェ製作）

専門分野が異なる技術職員（機械工学・電気工学）が協力して、工房にある加工・試作機器を複数使用しながら、材料加工から組み立て完成に至る、分野の異なる工程を組み合わせたものづくりを体験する講座を開講した。

これまでも本校の技術職員が公開講座を開講することは多数あったが、専門分野毎に開講しており、用意される講座内容も単独の専門分野毎の狭い範囲となっていた。しかし、実際のものづくりは分野を横断して複合的な作業工程を経て行われるものである。今回、参加者にもものづくりの一連の工程を知ってもらいたいという思いで、新たに専門分野が異なる技術職員が協力する講座を開講したものである。なお、“分野を横断する”というコンセプトは、当校の学科選択制度や工房の設置理念とも一致することである。

3.1. 『光るはざまる君オブジェ』製作

講座内容は図 12 に示す『光るはざまる君オブジェ』を作り上げることを目的とした。第 1 工程では、手動射出成型機を使用して樹脂材料を加工して透明な『はざまる君オブジェ』を作製する。このオブジェ作製工程は昨年度の公開講座¹⁾で参加者が加工体験した工程の発展形であり、オブジェの片面は技術職員が事前に準備した金型に依る共通デザインだが、もう片面は参加者がその場で

描いたオリジナルデザインに加工できるというものである。第 2 工程では、『はざまる君オブジェ』を固定し、また光らせるための土台となる点灯回路を作製する。技術職員が予め準備した回路基板に、講座参加者が抵抗・LED 等をハンダ付けしてのオブジェ点灯回路を作製する。最後の第 3 工程で、『はざまる君オブジェ』と点灯回路、電池ボックスを固定し、『光るはざまる君オブジェ』を完成させる。

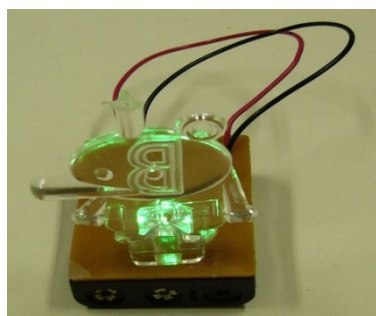


図 12 『光るはざまる君オブジェ』完成品

以下に各工程の詳細，特に事前準備の面を中心に記載する。

(1) はざまる君オブジェ作製（射出成型機）

オブジェは手動射出成型機（INARITM，株式会社オリジナルマインド）で無色透明のポリスチレン樹脂を射出して作製する形とした。射出成形で樹脂を加工成型するには型が必要になるが，その模式図を図 13 に示す。

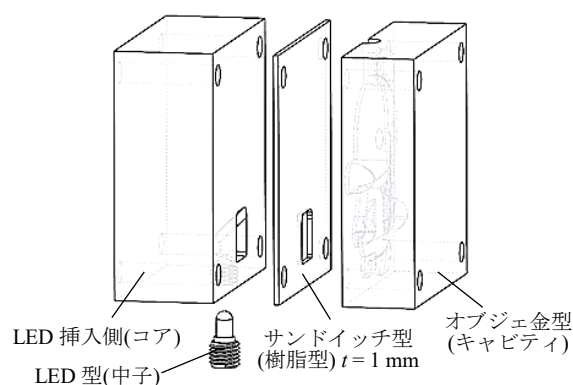


図 13 射出成型型の模式図

共通デザインの面は，本校ものづくりセンターの高度な切削機器で昨年度製作^りしたアルミニウム製のキャビティ（凹金型）を使用し，そのデザインは本校の広報イメージキャラクターである『はざまる』を立体化したデザインとした。

参加者オリジナルデザイン面にはアクリル樹脂型を使用した。通常射出成形で大量生産を行う場合は耐久性のある金型を用いるが，本講座のように 1 度のみ使用する型を多様なデザインに短時間で作成するには，耐久性が低くとも加工しやすい材料とすることが適当であるからである。予めレーザー加工機（Speedy 300，トロテック・レーザー・ジャパン株式会社）で図 13「サンドイッチ型」の形に切り出しておいたアクリル板に対して，モデリングマシン（MDX-40，ローランド ディー・ジー株式会社）にて切削加工を施した。図 14 に参加者が切削加工を行う様子を示す。切削加工の加工データは，講座時間中に参加者が描いた絵をドキュメントスキャナ（DR-C225W II，キャノン株式会社）でスキャンすることで，短時間での作成を可能とした。なお，材料樹脂の射出量の削減と，樹脂型を割って型ばらし出来るように，アクリル板厚さは昨年度の 2 mm から 1 mm に薄型化した。



図 14 切削加工の様子

オブジェを光らせるために，土台に設置した直径 3 mm の LED をオブジェに挿入する穴を設ける必要があり，昨年度使用した金型の改良を検討した。LED を挿入する穴を設けるためにオブジェの全体を厚肉化すると，使用する手動射出成型機の射出量では樹脂が不足するため，オブジェ本体は薄型のままで背面（コア）側に LED を挿入する出っ張りをつけることにした。そのためコア金型に出っ張り部の穴と，さらにイモネジで作成した LED 挿入穴を確保する中子をネジ止めできるねじ穴を追加した。この際，1 mm 厚の樹脂型をサンドイッチできる構造にも追加工した。

金型に LED 挿入部分が追加されたことにより，昨年度に比べ必要とする樹脂量が増し，その分だけ図 15 のように射出成型機のハンドル操作開始位置が垂直に近くなった。てこが働きにくくなったため，射出時に技術職員の補助が必要な小学校低中学年の参加者は多く，射出時の力感と達成感

向川, 遠藤, 大塚, 杉浦, 熊澤, 吉元, 中村, 永吉, 松岡, 新田, 庄司, 玉田:
『はざまる工房』を拠点とした新たな形の公開講座開講

が減る一方、操作の難しさを感じたようである。後述するが、このことが講座の難しさを問うたアンケート結果に反映されたと考えられる。

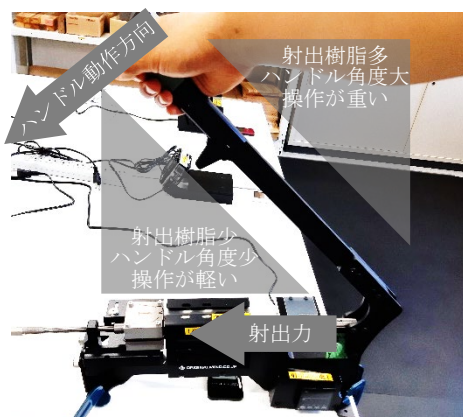
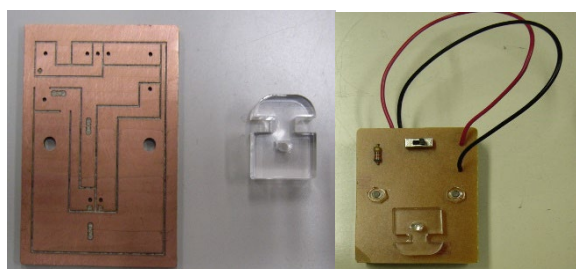


図 15 射出樹脂量とハンドル操作力の関係

(2) 点灯回路作製（ハンダ付け）～組み立て

(1)で作製したオブジェの土台となる点灯回路作製には、図 16(a)のようなハンダ付け用基板³⁾とオブジェ固定用樹脂パーツが必要であり、それぞれ基板加工機（KitMill CIP100, 株式会社オリジナルマインド）とレーザー加工機を使用して技術職員が事前に作成した。この工程では、最終的に 2 つのパーツと電池ボックスを図 16(b)のように組み立てることとした。



(a)事前作成パーツ (b)組み立て時

図 16 はざまる君オブジェの土台

ハンダ付け用基板の設計では、小学校低学年の参加者でもハンダ付けがしやすくなることを念頭においた。作業負担を減らすようにハンダ付けエリアを広くとり、またハンダブリッジ時の修正が行いやすいように溝の間隔を広くしたことで、小学校低学年でも大きなトラブルもなく器用にハンダ付けから組み立て作業まで行うことができた。

3.2. アンケートによる評価

小学校 1 年から中学校 3 年の幅広い学年を対象に開講した本講座の、アンケートによる講座内容

への評価を以下に分析する。講座時間は 1 枠 2 時間、午前と午後に各 1 枠開講した。参加人数は 2 枠で合計 9 人、学年内訳は小学校 1 年生：2 人、小学校 2 年生：1 人、小学校 5 年生：3 人、小学校 6 年生：2 人、中学校 3 年生：1 人であった。

図 17 に設問『むずかしさについて』のアンケート結果を示す。参加者の 56% が難しいと回答したが、一方で別の設問『面白さについて』では参加者全員が「面白い」と回答した。また設問『今後同様の講座があれば参加したいか』でも参加者全員が「参加したい」と回答した。この結果を踏まえて、講座内容において負荷要素（難しさ）と楽しさのバランスをうまくとることが、参加者の達成感に繋がる重要なポイントであると再認識した。

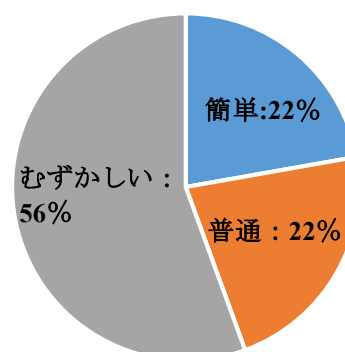
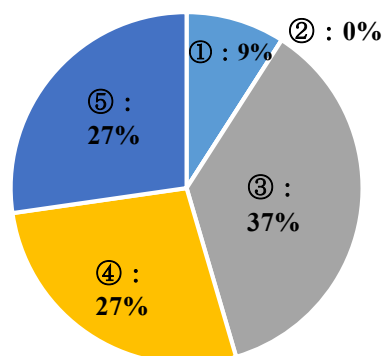


図 17 むずかしさについての評価結果

図 18 は、本講座を選んだ理由を尋ねたアンケートの結果である。



- ①射出成型機が何か知りたいから
- ②射出成型機を見る、操作したい。
- ③ハンダ付による電子回路の制作がしたい
- ④複合的な制作ができるから（樹脂加工・ハンダ付け）
- ⑤とにかく何でもいいのでオリジナルの作品が作りた

図 18 本講座を選んだ理由に関する回答

「製作をしたい」という趣旨の回答③～⑤が全回答の 91%を占めており、製作意欲が前面に出た結果となっていた。別途の設問『工房を利用したいか』でも 89%の参加者が「利用したい」と回答しており、ものづくりに興味・関心が高いことがうかがえた。また設問『オブジェのデザインについて』では全員が「良かったと」回答したが、「他の形も製作したい」という意見もあり、射出成型への興味を喚起することができたと考えられる。

次の図 19 は、オブジェ製作（射出成型）の時間配分についての評価である。

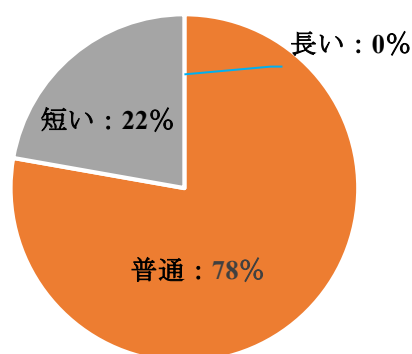


図 19 射出成型機の時間配分についての回答

約 8 割が「普通」、約 2 割が「短い」と回答したが、『全体の作業』『ハンダ付け作業』の時間配分の適切さを尋ねた設問では、参加者全体が「普通」と回答しており、全体で 2 時間の講座時間は妥当な時間配分であると考えられる。

アンケートには表れなかったが、今回 3 名で講座を運営したところ、参加者へのサポートがゆき届かないと感じることがあり、反省すると同時に適切な講座運営のための人数確保、または手薄なサポートでも作業ができるマニュアル整備が今後の検討課題である。

4. まとめ

新たな試みに取り組みながらも、昨年度と同様に、工房の工作機器や作業エリアを活用して 2 つの公開講座を開講した。

蓄発電講座では、新たな試みとして太陽電池の説明に発光ダイオードを持いた説明を模索したが、十分に取り入れられず今後、教員、技術職員、学生でアイデアを出し合いながら講座内容に組み込んでいこうと考えている。今回、参加者に年齢が近い学生が寄り添うことで、参加者の緊張もほ

ぐれ、アンケート結果における理解度の高さが得られてと考えられる。また、学生が自ら参加者に説明することで、学生にとってはこれまでに学んできた知識や技能が再構成され、定着が促されたのではないだろうか。社会実装教育のように学生が主体で進める出前授業や公開講座も学生の自主性や、知識技能の定着に効果的であるが、今回のように教員、技術職員と一緒に作業、教示することは、知識技能の再確認や広がりを得つつ、自らの能力を再認識、再構成できる機会であったといえよう。

製作講座の取り組みとして、専門性の違う技術職員が協力して行った今回の複合的講座では、技術職員が互いに、普段知りえない専門外の技術・技能に触れることができた。工房の講座を通して、互いの職域を理解し、不足する部分を知り、今後の日常業務における協力体制の構築の礎を得ることができたと考えている。

工房を中心に、様々なかたちの講座や利用方法を生み出すことができると示唆された。また、工房の機能は年々拡張されており、自発的のものづくりや社会実装教育といった学内利用の延長として、学生のスタートアップの一助にもなると期待される。今後もアイデアを出しながら柔軟に工房を運用していきたい。

参考文献

- 1)中村源一郎, 熊澤匠真, 向川拓臣, 永吉真知子, 松岡敏, 羽鳥広範, 新田武父, 庄司良, 玉田耕治 : コロナ禍における『はざる工房』の公開講座への積極活用, 東京工業高等専門学校研究報告書第 53 号, pp.125-134, 2022 年 3 月
- 2)竹下照雄 : 実験ではじめる光と光センサの世界, トランジスタ技術 2022 9, pp.162-169, 2022 年 8 月
- 3)松岡敏, 伊藤祐, 中村源一郎, 向川拓臣, 溝口奨吾, 永吉真知子, 藤野宏, 羽鳥広範, 新田武父, 庄司良, 玉田耕治 : ものづくり工房を活用した電子工作の事例紹介と公開講座・基板への実装, 技術・教育研究論文誌, Vol.28, No.1, pp.5-12, 2021 年 6 月
- 4)永井翠, 安富義泰, 大塚友彦, 多羅尾進, 佐藤知正, 新保幸一:社会変革を担う人材を育成する「社会実装教育」の実践, 工学教育, 68-3, pp.65-71, 2020

(2023 年 1 月 13 日 受理)

©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54号

令和4年度

令和5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