

ISSN 2189-5309

*Research Reports of
National Institute of Technology, Tokyo College
No.55, Mar. 2024*

東京工業高等専門学校
研 究 報 告 書



第 55 号

2024. 3

目 次

Vector's orbital angular momentum and spin wave function	Shinji MAEDAN	1
高専生の英語熟達度とライティング・パフォーマンスとの関係	長橋 雅俊	6
哲学対話の授業における思考の深まりと教師の役割について — 市民性教育としての哲学対話における問いに着目して —	村瀬 智之	14
二項係数の逆数からなる行列式について	安富 義泰, 丸山 文綱	24
東京高専における『文章表現論』の取り組み — 高専生の日本語探求 —	青野 順也, 上山 健太	26
超音波振動援用きさげ工具の開発 — 振動ホーンの開発と初等実験 —	堤 博貴	32
外部演算回路を用いた高機能電力変換器による自動演算システムの構築	綾野 秀樹, 近江 慎人, 塚越 達矢	40
応力集中型ダイヤフラム構造を用いた光 MEMS 圧力センサの感度と共振周波数の評価	新國 広幸, 伊藤 浩	48
ものづくり基礎工学における「英語による機器取扱い指導」実践例 — 一戸 隆久, 廣池 桜子, 苺米 志帆乃, 熊澤 匠真, 加藤 格 —		53
レイアウト付き文書に対応したクラウド型点字翻訳システムの実用化	山下 晃弘, 松林 勝志, 藤巻 晴葵, 板橋 竜太	59
高度モバイルマルチホップネットワークの拡張と応用の研究	田中 晶, 磯間 捺希, 金澤 晴輝, 後藤 圭介, 新木 康介, 鈴木 佑斗, 田井 葵, 細川 翼, 御子柴 まりの	68
海洋深層水と粒状活性炭を用いた微細藻類の培養によるバイオマス生産の可能性の検証	庄司 良, 久保 朱音	78
オープンデータに対する, 機械学習プラットフォーム DataRobot による社会実装教育	松原 弘明, 高田 宗一郎	84

CONTENTS

Vector's orbital angular momentum and spin wave function	Shinji MAEDAN	1
The Relationship between English Language Proficiency and Writing Performance of Technical College Students	Masatoshi NAGAHASHI	6
Improvement of thinking through community of philosophical inquiry and the role of teachers — Focusing on the questioning in philosophical dialogue as citizenship education —	Tomoyuki MURASE	14
On Determinants whose entries are Reciprocals of Binomial Coefficients	Yoshiyasu YASUTOMI, Fumitsuna MARUYAMA	24
Practice of "Japanese Expressions" at the National Institute of Technology, Tokyo College; Research on Japanese for technical college students	Junya AONO, Kenta UEYAMA	26
Development of an Ultrasonic Vibration-Assisted Scraping Tool — Development of the Vibration Horn and Preliminary Experiments —	Hiroataka TSUTSUMI	32
Construction of an Automatic Calculation System in High-Performance Power Converters with an External Computational Circuit	Hideki AYANO, Makoto OHMI, Tatsuya TSUKAKOSHI	40
Evaluation of Sensitivity and Resonance Frequency of an Optical MEMS Pressure Sensor with a Stress Concentrated Diaphragm Structure	Hiroyuki NIKKUNI, Hiroshi ITO	48
Practical efforts instructing beginner students in how to use equipment in fundamental engineering in English	Takahisa ICHINOHE, Sakurako HIROIKE, Shihono KARIKOME, Takuma KUMAZAWA, Itaru KATO	53
Practical Application of Cloud-Based Braille Translation System for Documents with Layout	Akihiro YAMASHITA, Katsushi MATSUBAYASHI, Haruki FUJIMAKI, Ryuta ITABASHI	59
Expansion and Integration of Advanced Mobile Multihop Networks	Akira TANAKA, Natsuki ISOMA, Haruki KANAZAWA, Keisuke GOTO, Kousuke SHINKI, Yuto SUZUKI, Aoi TAI, Tsubasa HOSOKAWA, Marino MIKOSHIBA	68
Verification of the possibility of biomass production by the culture of microalgae using deep sea water and granular activated carbon	Ryo SHOJI, Akane KUBO	78
Social Implementation Education using the Machine Learning Platform DataRobot for Open Data	Hiroharu MATSUBARA, Soichiro TAKATA	84

Vector's orbital angular momentum and spin wave function

Shinji MAEDAN*

Abstract

In the standard quark-model assignments, there is an ambiguity in the vector meson with $J^P = 1^-$, namely, such a vector meson will be represented by an admixture of ${}^{2S+1}L_J = {}^3S_1$ and 3D_1 , where $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$. We clarify how 3S_1 is admixed with 3D_1 in the vector ρ meson by use of an interpolating field $\bar{\psi} \gamma^\mu \psi$, which has a relativistically covariant form.

(Keywords: Quark model, Vector ρ meson, Relativistically covariant form, 3S_1 state, 3D_1 state)

1 Introduction

In the static picture of the quark model, the vector ρ meson is usually considered as the 3S_1 state. In the standard quark-model assignments, however, there is an ambiguity in the vector meson with $J^P = 1^-$, it is represented by an admixture of ${}^{2S+1}L_J = {}^3S_1$ and 3D_1 , where $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$ [1]. If the relative momentum of quark and antiquark in the vector meson is not zero, 3D_1 state will contribute.

The vector meson state with $J^P = 1^-$ will have the same structure as that of the interpolating field whose quantum number is 1^- , that is $\bar{\psi} \gamma^\mu \psi$. In this paper, by use of this interpolating field $\bar{\psi} \gamma^\mu \psi$ which has a relativistically covariant form, we will clarify how 3S_1 is admixed with 3D_1 in the vector ρ meson, studying only the kinematical structure of that meson (not dynamics of it). Using the free Dirac equation, we here consider the kinematical structure (or spin covariant part), $\bar{u}(\mathbf{k}, s_1) \gamma^\mu v(-\mathbf{k}, s_2)$ where the total momentum of the vector ρ meson \mathbf{P} is taken to be zero.

In the Dirac representation of the γ -matrices,

$$\begin{aligned} u(\mathbf{k}, s) &= \frac{1}{\sqrt{E+M}} \begin{pmatrix} (E+M) \chi^{(s)} \\ \mathbf{k} \cdot \boldsymbol{\sigma} \chi^{(s)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{E+M} \chi^{(s)} \\ \sqrt{E-M} \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \chi^{(s)} \end{pmatrix}, \\ v(\mathbf{k}, s) &= \frac{1}{\sqrt{E+M}} \begin{pmatrix} \mathbf{k} \cdot \boldsymbol{\sigma} \chi^{(s)'} \\ (E+M) \chi^{(s)'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{E-M} \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \chi^{(s)'} \\ \sqrt{E+M} \chi^{(s)'} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

where $\mathbf{n} = \mathbf{k}/|\mathbf{k}|$, $\chi^{(s)'} = -i\sigma^2 \chi^{(s)*}$, and $k^2 = M^2$ (quark mass). The two component spinor $\chi^{(s)}$ is an eigenstate of σ^3 ,

$$\chi^{(s=+1)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \chi^{(s=-1)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

*Department of Liberal Arts (Physics)

The component $\sqrt{E+M} \chi^{(s)}$ ($\sqrt{E+M} \chi^{(s')}$) is called the large component of $u(\mathbf{k}, s)$ (of $v(\mathbf{k}, s)$), and $\sqrt{E-M} \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \chi^{(s)}$ ($\sqrt{E-M} \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} \chi^{(s')}$) is called the small component of $u(\mathbf{k}, s)$ (of $v(\mathbf{k}, s)$) in a nonrelativistic approximation. In the static case ($\mathbf{k} = 0$), the small component of $u(\mathbf{k} = 0, s)$ becomes zero and only the large component contributes. The 3S_1 state ($L = 0, S = 1$) will come from the nonrelativistic part (the large component) and the 3D_1 state ($L = 2, S = 1$) will come from the relativistic part (the small component).

2 Static case ($\mathbf{k} = 0$)

We assume that vector ρ meson's spin wave function is given by $\bar{u}(\mathbf{k}, s_1) \gamma^\mu v(-\mathbf{k}, s_2)$, where spinors are free ones, $\bar{u}(\mathbf{k}, s_1) \{k_\mu \gamma^\mu - M\} = 0$, $\{(-k)_\mu \gamma^\mu + M\} v(-\mathbf{k}, s_2) = 0$, with quark mass $M^2 = k^2$. It should be noticed that all the four components $\mu = 0, 1, 2, 3$ of the vector are not independent. Indeed, with the total momentum of the vector meson $P_\mu = k_\mu + l_\mu$, one can show

$$\begin{aligned} & P_\mu [\bar{u}(\mathbf{k}, s_1) \gamma^\mu v(\mathbf{l}, s_2)] \\ &= \bar{u}(\mathbf{k}, s_1) [\{k_\mu \gamma^\mu - M\} + \{l_\mu \gamma^\mu + M\}] v(\mathbf{l}, s_2) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

and in the meson's rest fram $P^\mu = (P^0, 0, 0, 0)$ this relation leads to

$$\bar{u}(\mathbf{k}, s_1) \gamma^0 v(-\mathbf{k}, s_2) = 0 \quad (\text{meson's rest frame}). \quad (4)$$

Thus there remain three independent components $\bar{u}(\mathbf{k}, s_1) \gamma^i v(-\mathbf{k}, s_2)$ ($i = 1, 2, 3$) in the rest frame.

We then present the massive vector meson by more convenient three physical degrees of freedom, i.e., $\epsilon_\mu(\lambda) \{\bar{u}(\mathbf{k}, s_1) \gamma^\mu v(-\mathbf{k}, s_2)\}$, ($\lambda = +1, 0, -1$), where $\epsilon^\mu(\lambda) = (0, \hat{\mathbf{e}}(\lambda))$ is circular polarization vector [2],

$$\hat{\mathbf{e}}(\pm 1) = (\mp \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{i}{\sqrt{2}}, 0), \quad \hat{\mathbf{e}}(0) = (0, 0, 1). \quad (5)$$

In the static case ($\mathbf{k} = 0$) the above three physical degrees of freedom become,

$$\begin{aligned} & \bar{u}(\mathbf{k} = 0, s_1) \epsilon_\mu(\lambda) \gamma^\mu v(-\mathbf{k} = 0, s_2) \\ &= -(\sqrt{E+M} \chi^{(s_1)\dagger} \quad 0) \begin{pmatrix} 0 & \hat{\mathbf{e}}(\lambda) \cdot \boldsymbol{\sigma} \\ \hat{\mathbf{e}}(\lambda) \cdot \boldsymbol{\sigma} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \sqrt{E+M} \chi^{(s_2)'} \end{pmatrix} \\ &= \sqrt{2}(M+M) \chi^{(s_1)\dagger} (\hat{\mathbf{e}}(\lambda) \cdot \boldsymbol{\sigma}) (\frac{i}{\sqrt{2}} \sigma^2) \chi^{(s_2)*}, \end{aligned} \quad (6)$$

and the kinematical structure results from the product of the large component of

$\bar{u}(\mathbf{k} = 0, s_1)$ and that of $v(-\mathbf{k} = 0, s_2)$. The expression Eq.(6) gives

$$\chi^{(s_1)\dagger}(\hat{\mathbf{e}}(\lambda) \cdot \boldsymbol{\sigma}) \left(\frac{i}{\sqrt{2}} \sigma^2\right) \chi^{(s_2)*} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_{s_1 s_2} & \lambda = +1 \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}_{s_1 s_2} & \lambda = -1 \\ \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix}_{s_1 s_2} & \lambda = 0 \end{cases} \quad (7)$$

and this is just $S = 1$ (spin triplet) ($\lambda = +1, 0, -1$), or ${}^{2S+1}L_J = {}^3S_1$.

3 Non-static case ($\mathbf{k} \neq 0$)

The three physical degrees of freedom in the non-static case ($\mathbf{k} \neq 0$) become

$$\begin{aligned} & \bar{u}(\mathbf{k}, s_1) \epsilon_\mu(\lambda) \gamma^\mu v(-\mathbf{k}, s_2) \\ &= \sqrt{2}(E + M) \chi^{(s_1)\dagger}(\hat{\mathbf{e}}(\lambda) \cdot \boldsymbol{\sigma}) \left(\frac{i}{\sqrt{2}} \sigma^2\right) \chi^{(s_2)*} \\ & \quad - \left\{ \sqrt{E - M} (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}) \chi^{(s_1)} \right\}^\dagger (\hat{\mathbf{e}}(\lambda) \cdot \boldsymbol{\sigma}) \left\{ \sqrt{E - M} (-\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}) \chi^{(s_2)'} \right\} \\ &= \sqrt{2}(E + M) \chi^{(s_1)\dagger}(\hat{\mathbf{e}}(\lambda) \cdot \boldsymbol{\sigma}) \left(\frac{i}{\sqrt{2}} \sigma^2\right) \chi^{(s_2)} \\ & \quad - \sqrt{2}(E - M) \chi^{(s_1)\dagger}(\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}) (\hat{\mathbf{e}}(\lambda) \cdot \boldsymbol{\sigma}) (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}) \left(\frac{i}{\sqrt{2}} \sigma^2\right) \chi^{(s_2)}. \end{aligned} \quad (8)$$

In the above kinematical structure of the non-static case, the first term of the right handed side comes from the product of the large component of $\bar{u}(\mathbf{k}, s_1)$ and the large component of $v(-\mathbf{k}, s_2)$, whereas the second term comes from the the product of the small component of $\bar{u}(\mathbf{k}, s_1)$ and the small component of $v(-\mathbf{k}, s_2)$.

The second term contains the factor

$$(\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}) (\hat{\mathbf{e}}(\lambda) \cdot \boldsymbol{\sigma}) (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}) = -\hat{\mathbf{e}}(\lambda) \cdot \boldsymbol{\sigma} + 2(\hat{\mathbf{e}}(\lambda) \cdot \mathbf{n})(\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}). \quad (9)$$

Using the following relations

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} &= \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta e^{-i\phi} \\ \sin \theta e^{i\phi} & -\cos \theta \end{pmatrix} \\ &= \sqrt{\frac{4\pi}{3}} \begin{pmatrix} Y_{1,0}(\theta, \phi) & \sqrt{2} Y_{1,-1}(\theta, \phi) \\ -\sqrt{2} Y_{1,1}(\theta, \phi) & -Y_{1,0}(\theta, \phi) \end{pmatrix} \\ &= \sqrt{\frac{4\pi}{3}} \left\{ -Y_{1,-1}(\theta, \phi) (\hat{\mathbf{e}}(+1) \cdot \boldsymbol{\sigma}) - Y_{1,1}(\theta, \phi) (\hat{\mathbf{e}}(-1) \cdot \boldsymbol{\sigma}) \right. \\ & \quad \left. + Y_{1,0}(\theta, \phi) (\hat{\mathbf{e}}(0) \cdot \boldsymbol{\sigma}) \right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

and

$$\hat{\mathbf{e}}(\lambda) \cdot \mathbf{n} = \sqrt{\frac{4\pi}{3}} Y_{1,\lambda}(\theta, \phi), \quad (11)$$

one can obtain, for $\lambda = +1$,

$$\begin{aligned} & (\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma})(\hat{\mathbf{e}}(+1) \cdot \boldsymbol{\sigma})(\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma}) \\ = & -\hat{\mathbf{e}}(+1) \cdot \boldsymbol{\sigma} + \frac{8\pi}{3} Y_{1,1}(\theta, \phi) \\ & \times \left\{ -Y_{1,-1}(\theta, \phi)(\hat{\mathbf{e}}(+1) \cdot \boldsymbol{\sigma}) - Y_{1,1}(\theta, \phi)(\hat{\mathbf{e}}(-1) \cdot \boldsymbol{\sigma}) + Y_{1,0}(\theta, \phi)(\hat{\mathbf{e}}(0) \cdot \boldsymbol{\sigma}) \right\} \\ = & -\frac{2\sqrt{\pi}}{3} Y_{0,0}(\theta, \phi)(\hat{\mathbf{e}}(+1) \cdot \boldsymbol{\sigma}) \\ & + \frac{4}{3} \sqrt{\frac{\pi}{5}} \left[-\sqrt{6} Y_{2,2}(\theta, \phi)(\hat{\mathbf{e}}(-1) \cdot \boldsymbol{\sigma}) + \sqrt{3} Y_{2,1}(\theta, \phi)(\hat{\mathbf{e}}(0) \cdot \boldsymbol{\sigma}) \right. \\ & \left. - Y_{2,0}(\theta, \phi)(\hat{\mathbf{e}}(+1) \cdot \boldsymbol{\sigma}) \right]. \quad (12) \end{aligned}$$

By use of this equation, we thus obtain for $\lambda = +1$

$$\begin{aligned} & \bar{u}(\mathbf{k}, s_1) \epsilon_\mu(+1) \gamma^\mu v(-\mathbf{k}, s_2) \\ = & \frac{4\sqrt{2\pi}}{3} (2E + M) \chi^{(s_1)\dagger} [Y_{0,0}(\theta, \phi)(\hat{\mathbf{e}}(+1) \cdot \boldsymbol{\sigma})] \left(\frac{i}{\sqrt{2}} \sigma^2\right) \chi^{(s_2)} \\ & + \frac{8\sqrt{\pi}}{3} (E - M) \chi^{(s_1)\dagger} \left[\sqrt{\frac{6}{10}} Y_{2,2}(\theta, \phi)(\hat{\mathbf{e}}(-1) \cdot \boldsymbol{\sigma}) \right. \\ & \left. - \sqrt{\frac{3}{10}} Y_{2,1}(\theta, \phi)(\hat{\mathbf{e}}(0) \cdot \boldsymbol{\sigma}) + \sqrt{\frac{1}{10}} Y_{2,0}(\theta, \phi)(\hat{\mathbf{e}}(+1) \cdot \boldsymbol{\sigma}) \right] \left(\frac{i}{\sqrt{2}} \sigma^2\right) \chi^{(s_2)} \\ = & \frac{4\sqrt{2\pi}}{3} (2E + M) |0\ 1\ 1\ 1\rangle + \frac{8\sqrt{\pi}}{3} (E - M) |2\ 1\ 1\ 1\rangle, \quad (13) \end{aligned}$$

where $|0\ 1\ 1\ 1\rangle$ or $|2\ 1\ 1\ 1\rangle$ means $|L\ S\ J\ m_J\rangle$, ($m_J = -J, \dots, J$) with $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$. Here, we have used the Clebsch-Gordan coefficients. The first term of the right handed side is $L = 0, S = 1, J = 1$ and ${}^{2S+1}L_J = {}^3S_1$, whereas the second term is $L = 2, S = 1, J = 1$ and 3D_1 .

In the same manner one can show for $\lambda = +1, 0, -1$

$$\begin{aligned} & \bar{u}(\mathbf{k}, s_1) \epsilon_\mu(\lambda) \gamma^\mu v(-\mathbf{k}, s_2) \\ = & \frac{4\sqrt{2\pi}}{3} (2E + M) |0\ 1\ 1\ \lambda\rangle + \frac{8\sqrt{\pi}}{3} (E - M) |2\ 1\ 1\ \lambda\rangle, \quad (14) \end{aligned}$$

where $|0\ 1\ 1\ \lambda\rangle$ and $|2\ 1\ 1\ \lambda\rangle$ correspond to 3S_1 and 3D_1 , respectively.

4 Conclusion

We obtained the kinematical structure (or spin covariant part) of the vector ρ meson. The result can be represented by

$$\begin{aligned}
 & \bar{u}(\mathbf{k}, s_1) \epsilon_\mu(\lambda) \gamma^\mu v(-\mathbf{k}, s_2) \\
 &= \frac{4\sqrt{2\pi}}{3}(2E + M) | 0 \ 1 \ 1 \ \lambda \rangle + \frac{8\sqrt{\pi}}{3}(E - M) | 2 \ 1 \ 1 \ \lambda \rangle \\
 &= \frac{4}{3}\sqrt{6\pi(2E^2 + M^2)} \left\{ \cos \Phi(|\mathbf{k}|) | 0 \ 1 \ 1 \ \lambda \rangle + \sin \Phi(|\mathbf{k}|) | 2 \ 1 \ 1 \ \lambda \rangle \right\},
 \end{aligned} \tag{15}$$

where $| 0 \ 1 \ 1 \ \lambda \rangle$ and $| 2 \ 1 \ 1 \ \lambda \rangle$ correspond to 3S_1 and 3D_1 , respectively, and we have defined as

$$\begin{aligned}
 \cos \Phi(|\mathbf{k}|) &\equiv \frac{2E + M}{\sqrt{3(2E^2 + M^2)}}, \\
 \sin \Phi(|\mathbf{k}|) &\equiv \frac{\sqrt{2}(E - M)}{\sqrt{3(2E^2 + M^2)}}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

In the nonrelativistic limit $|\mathbf{k}|/M \rightarrow 0$, i.e. , the quark is almost at rest, one has $\cos \Phi \rightarrow 1$, $\sin \Phi \rightarrow 0$ and only 3S_1 contributes. This is consistent with the static picture of the quark model. On the other hand, in the relativistic limit $|\mathbf{k}|/M \rightarrow \infty$, one has $\cos \Phi \rightarrow \sqrt{2}/\sqrt{3}$, whereas $\sin \Phi \rightarrow 1/\sqrt{3}$ and 3D_1 does contribute. By use of a relativistically covariant form $\bar{\psi} \gamma^\mu \psi$, we clarified how 3S_1 is admixed with 3D_1 in the vector ρ meson.

References

- [1] S. Gasiorowicz and J.L.Rosner , Am. J. Phys. 49, No.10 (1981) 954.
- [2] C.R.Ji et.al. Phys. Rev. D45 (1992) 4214.

(Received January 12, 2024)

高専生の英語熟達度とライティング・パフォーマンスとの関係

長橋雅俊*

学術や実務的な英語発表の場面で活躍できるグローバル人材の育成に対応するため、本学の専攻科では新カリキュラムを刷新した。英語科でもまた、新科目 *Technical Writing* を立ち上げ、2022 年度より授業を展開している。この報告書では延べ 14 名の協力者から TOEIC®テストでの各技能セクションの到達度を調査した。また、彼らには 2 回のライティング活動を実施し、作文パフォーマンスと他の技能熟達度との関係を分析した。一連の分析を通じ、対象学生の英語発信力はどの技能領域が密接に支えているのか考察する。

(キーワード: ライティング, 英語技能領域, カリキュラム連携)

The Relationship between English Language Proficiency and Writing Performance of Technical College Students

Masatoshi NAGAHASHI*

For the development of global engineers who will play active roles in both academic and practical English presentation situations, the Advanced Courses at Tokyo Kosen has innovated its new curriculum. Also, the author has offered a new course “*Technical Writing*” since the 2022 academic year. This study surveyed a total of 14 participants on their achievement in the four-skill sections of the TOEIC® test. In addition, two phases of writing activities were conducted to analyze the relationship between writing performance and other skill proficiency levels. Through the analysis, we will discuss what skill areas closely support English communication ability.

(Keywords: writing, English skill areas, curriculum linkage)

1. ライティング指導の背景

文章を書く能力とは自然に身につくものではなく、上達には意識的な努力や経験を必要とする (Grabe & Kaplan, 1996)¹⁾。彼らはまた、ライティング技能について学校等の支援環境で文化的に教え伝えなくてはならないとも述べている。しかし、教育現場では困難も多く、他の技能より指導面での課題を抱えている。「令和 5 年度 全国学力・学習状況調査」(国立教育政策研究所, 2023)²⁾によると、中学校英語の「書くこと」への設問正答率が 24.1%と報告されている。この調査の「聞くこと」・「読むこと」への設問には、それぞれ 58.9%・51.7%と半数以上の正答に到達できていることから、中学の段階から既に自らの意見を書いて表現することに不慣れな生徒の多いことが分かる。

1.1. ライティングの実像と困難さ

自らの意見をまとめ、まとまった量の英文を書く、いわば自由英作文による言語活動は、学習指導要領の刷新による科目編成が変わるたびに、中

等教育でも増えてきてはいたが、他の技能演習に比べて現場教師の間での指導法が確立していないのが実情である。こうした学習や指導の難しさの要因としては、多岐にわたる認知的処理を行いながら文章を作り上げていく複雑さが挙げられる (e.g., Hyland, 2003; Weigle, 2002)^{3), 4)}。例えば、決められたトピックに沿って意見を述べる作文課題を与えられたとして、書き手は語彙や文法といった「言語的側面」だけでなく、文と文との結びつきを「論理構造」から精査し、時には書き手の独創力で「内容」を展開する技量さえ求められるのである。

1.2. ライティング評価

先述のとおり、作文とは言語表現、構成、内容、他にも様々に注意を向ける作業のため、教師が妥当なフィードバックを学習者に与え、公正に評価する難しさもある。信頼性のある評価には複数の観点による分析的評価法 (analytical scoring method) を用いたり、また複数教師を導入した採点で評価者間信頼性 (inter-rater reliability) を調べる方策も

*一般教育科

ある (Weigle, 2002)。しかし、何よりも教育現場でライティング評価を困難にしている要因とは、評価対象の多さに対する作業コストを指摘する研究も少なくない。膨大な評価対象を扱う解決例として、90年代にはアジア圏だけで年間 50 万人を超える受験者を抱えたとされる TOEFL Test of Written English (TWE) で自動採点システム (e-rater) の開発も報告されている (e.g., Burstein ほか, 1998; Attali & Burstein, 2006)^{5), 6)}。最近の生成型 AI プログラムの開発に先んじて、既に現行の TOEFL iBT でも専門採点官 (human raters) と併用されているが、これは評価システム自体が実際に言語を理解して判断を下しているわけではないことも背景にある (Enright & Quinlan, 2010; Weigle, 2010)^{7), 8)}。

2. 本校における英語指導の背景

前節で述べたように、発信力を育成する作文指導には学習者の知的作業の中で、様々に配慮すべき要因が介在する。とはいえ、海外での学術発表や企業プレゼンテーションを想定した次世代のグローバル・エンジニアを育成するには、学生の英語ライティング力を発展させていく教育への対応が急務な課題となってきた。こうした社会の変化を背景に本校での語学プログラムを見直す時期にきているともいえるだろう。

2.1. 本科 5 年課程

本科 5 年課程で開講されている英語科目は、必修科目のみに絞ると延べ 18 科目 (各 1 単位) である。科目名から推察する限り、書きことばを主体とした読解 (Reading I~VI, Science English I・II) 及び文法 (Grammar & Writing I~V) といった技能や学習領域に 13 単位と高い比重が置かれていると考えられる。概して、教材は高等学校の 1~2 学年で読まれる平易な教科書レベルから始まり、専門性の高い学術書や英語論文を読みこなす準備段階にまでじっくりと読解力を引き上げる教育体制であると窺える。一方で、音声指導に関しては Listening 及び Oral communication I・II を足し合わせて 3 単位と、教室内での演習時間だけを考慮すれば前者に対して大体 4 分の 1 ほどである。

しかし、発信技能の育成力から同科目群を再考した場合、Grammar & Writing で扱える学習項目にも限界がある。当該科目のシラバスを参照すれば明らかなおおりに、授業計画の大半は、いわゆる英

文法参考書を傍らに各時限ごとの文法特徴を含んだ構文生成に充てる必要がある。四半世紀以上も前のいわゆる和文英訳に終始していた英作文とは異なり、国内の高等学校や大学で行われているライティング指導の主流は、プロセス・アプローチ (process approach) である。この取組を実現させるには、学習者たちに英語の論理構造に則ったパラグラフ構成を浸透させ、個々の学生が自らの英語で意見をまとめるまで、継続的な指導と添削の時間をかけなくてはならない。しかし、本校におけるクラスあたり 40 人前後といった規模を考慮すれば、限定的な実施回数に留めて計画せざるを得ないのが実情だろう。

2.2. 専攻科課程における研究課題

2022 年度より刷新された本校専攻科の教育課程では、問題解決型 (project based learning) を推し進めた主体的な学習活動や特別研究が重視されたプログラムとなっている。このカリキュラム改変に伴い、英語科でも English Skills for the Workplace 及び Technical Writing といった専門性と発信型の言語活動に特化した新科目を中心に立ち上げることとなった。とはいえ、当該年度より入学した専攻科生は本校の内部進学者が大部分を占め、本科生での 5 年間の学びは従来型の文法・読解が主だったと推測される。加えて、本科教育課程の 4~5 学年においては、英語の学習機会は必修科目 TOEIC English I・II の週 1 コマに限られる。こうした事情から、専攻課程でディプロマシー・ポリシーの到達目標を満たすには、学生個々が目的意識をもって自立的な学習を継続していく必要があるだろう。そこで本研究では、工業高等専門学校の本科 5 年課程を経た専攻科生にとって、学術的な議論での英語発信力をどこまで実現し、どこに改善すべき課題があるのか検討したいと思う。現状の到達度を把握するにあたり、次節では調査及び分析方法について詳述する。

3. 方法

3.1. 調査協力者

2021 年度の当時で本科 5 学年に在籍し、翌 2022 年度に本校専攻科に進学した専攻科生 24 名のうち、調査協力の承諾が得られた 14 名を本研究の対象とした。

3.2. 外部評価テスト

上記の調査協力者より任意で提出された TOEIC Listening & Reading (L&R) のスコアシートから、聴解力と読解力に基づく受容言語能力の平均を算定した。また、樫村ほか (2022) ⁹⁾ で回収された調査資料を基に、TOEIC Speaking & Writing (S&W) のスコアを発信言語能力とみなし、後述のデータ分析に用いた。なお、前者 TOEIC L&R については、調査協力者が 2021 年度の IP または公開テストを受験した当時のものであり、後者 TOEIC S&W に関しては、2021 年 11 月から 12 月の間でオンライン試験 (internet-based test) を介して受験した結果に基づく。

3.3. ライティング・タスク

専攻科 1 学年の授業 Technical Writing における指導の一環を兼ねて、即興作文 (timed essays) 及び課題作文 (prepared essays) の課題を提示し、対象者のライティング・パフォーマンスの現状を調べた。作文トピックは、TOEIC S&W ライティング・セクションから Question 8 (意見を記述する問題) のサンプル課題 (Educational Testing Service, 2015; 2021) ^{10), 11)} を引用した (付録 A を参照)。実施時期にあたっては、指導前の作文力を診る目的で、授業開講から 2 回目の時限に即興作文を行った。また上記 TOEIC S&W のタスク条件と同様、制限時間 30 分を設け、辞書等の外部リソースの参照を禁止した。一方で、後者の課題作文については、講義演習を通じて論理構成やアカデミック・エッセイに必須の表現等、作文知識を共有してから約 6 週にわたる推敲を経たものを提出させた。

3.4. 評価及びデータ分析

ライティング・パフォーマンスを評価するには、採点方法で一長一短があることから、複数の指標を用いることが望ましい。本研究では Microsoft Word 2013 の文章校正ツールと、オンライン自動作文評価システム Criterion とを用い、そのフィードバックで得られた作文特徴を数値化した。評価観点と指標及び使用ツールは、表 1 に示したとおりである。この表の真ん中の列に (1) ~ (6) で記したとおり、外部評価テストによる 4 技能ごとのスコアと総合得点、そしてライティング・タスクから引き出された 6 指標から、集められた変量は 11 種類に区分された。これら変量同士を相関行

列にまとめ、それぞれの言語パフォーマンスについて関連性の高さを調べる。

表 1 作文の評価方法

観点	指標	評価ツール
全体的評価	(1) 6 段階採点 (Holistic scoring)	Criterion
流暢さ	(2) 延べ語数 (Words) (3) センテンス数 (Sentences)	Word 2013
複雑さ	(4) センテンスの長さ (Words per sentence) (5) 重文・複文・埋め込み構造の数 (Complexity)	Word 2013 及び手作業
正確さ	(6) 作文エラーの検出頻度 (Errors)	Criterion

4. 結果と考察

4.1 全体的評価

後述の相関分析に先んじて、Technical Writing の授業内で回収された作文を調べたところ、指導前と後で Criterion の全体的評価スコアに大幅な上昇がみられた。下表 2 の平均値 (Mean) 及び標準偏差 (SD) に示した平均差から明らかなおおりに、0.1% 水準で統計的な有意差を示した ($t(13) = 19.89, p < .0001$)。個々のスコアを確認しても、指導前では 6 点満点のうち 3 点以上の獲得者が不在だったのに対し、指導後の課題作文では大多数が 4 点を獲得するまでに至った。即興と持ち帰り課題によるタスク条件の違いも要因にこそ挙げられるが、本科までに学んだ英語表現のみではアカデミック・ライティングに対応できなかったことが窺える。

表 2 指導前後の全体的評価の分布

	Mean	SD
即興作文 (指導前)	1.21	0.43
	Min	Max
	1 (n = 11)	2 (n = 3)
課題作文 (指導後)	3.86	0.36
	Min	Max
	3 (n = 2)	4 (n = 12)

注. Min = 最低得点, Max = 最高得点, n は左記の得点者の人数を表す。

とはいえ、全体的評価でライティング・パフォ

パフォーマンスを比較するだけでは、複雑な作文特徴を把握するには程遠い。また、対象の規模が小さいことに加え、値の偏った順序尺度では変量が十分に正規分布しない懸念がある。そこで、後述の相関分析では全体的評価を除外した残りの変量に絞って考察する。

4.2 受容言語能力と発信言語能力との関係

表 3 は外部評価試験のスコアと、2 つの作文課題より得られた作文パフォーマンスの計測を基に、平均値 (*Mean*) 及び標準偏差 (*SD*) にまとめた記述統計量である。左上に示した TOEIC L&R の平均スコアを参照する限り、リスニング技能は概ね 300 点台に到達していることが分かった。これはヨーロッパ共通参照枠 (The Common European Framework of Reference: CEFR) に照らし合わせると B1 レベルに相当し、日常的な話題の会話なら問題なく理解でき、平易な表現で意思疎通も図れる自立段階といわれている。聴き取りに関しては、対象の多くが自立して学習を継続することで英語圏の生活に支障のない対応ができると推測される。ただし TOEIC 総合スコアの標準偏差が示すとおり、上位と下位に 300 点近くの開きがある実態にも目を向けるであろう。また、彼らの読解力について検討した場合、CEFR の A2 レベルから脱却できていない学習者が半数以上を占めていた。高度な語句に遭遇する専門書講読を想定した場合、彼らの多くは辞書を傍らに時間をかけて読み解く作業に迫られるだろう。

対象の専攻科生の言語理解に関して、ある程度の習熟度が確認されたが、Speaking と Writing の平均スコアは低かった。一般受験者の平均スコア

が Speaking で 127.8 点、Writing で 144.4 点と報告されている昨今 (iiBC, 2023)¹²⁾、本科の授業をこなすだけでは自立した英語発信を実践するには難しく、とりわけ会話力を身に付けるためには更なる訓練が必要だろう。前向きに取り上げれば、TOEIC の作文タスクは即時的な応答を必要としないためか、平均スコアでは 200 点満点の半分程度まで到達していた。総じて、本科 5 年課程における会話よりも文法・読解に比重を置いていた学習内容が、こうしたパフォーマンス差に起因したと考えられる。

同じく表 3 の中央列と右列には、それぞれ即興作文と課題作文によって計測された各指標の値を示した。TOEIC S&W 公式問題集 (ETS, 2015) によれば、Question 8 の期待されるパフォーマンスとして 300 words 程度で書き表すことが明記されている。このタスク要件に従えば、対象の英語表現の流暢さは平均の延べ語数から到達度 40%程度だったと推計される。トピックに関連した意見を展開できる論理力も重要だが、それらを英語で表現するための語彙と文法の知識を活性させる一層の訓練が必要だろう。

課題作文に関しては、指導を経てエッセイ・ライティングに必要な知識を蓄積したこともあるが、外部リソースで自らの未習得の表現を補えたことがパフォーマンスに大きく関係している。延べ語数の平均値が示すとおり、持ち帰り可能な同タスクからは概ね 300 words 以上に到達したエッセイが提出され、対象の学生は一定時間をかけてタスク要件を満たすために作文方略を学習したとみられる。

表 3 記述統計量 (TOEIC スコアと作文パフォーマンス指標)

外部評価テスト			作文指標	即興作文		課題作文	
Score	Mean	SD		Mean	SD	Mean	SD
TOEIC	565.36	96.92	Words	121.71	34.18	298.79	31.98
TC.L	333.21	35.39	Sentences	10.43	3.39	18.29	2.52
TC.R	239.29	65.51	WPS	11.93	1.91	16.29	2.02
TC.S	67.14	24.94	Comp	4.14	1.17	11.14	4.13
TC.W	105.71	15.05	Errors	5.00	4.84	6.33	7.52

注. TOEIC L&R は 990 点満点で Listening 及び Reading Section とともに 495 点満点、S&W は Speaking 及び Writing Section とともに 200 点満点、TC. = TOEIC L&R と S&W の技能別スコアを表す、WPS = words per sentence、Comp = センテンス構造の複雑さ指標 (complexity)。

また、平均センテンス数に着目した場合、課題作文のほとんどが5段落構成で提出されていた点と絡めて、各段落は概ね3~4センテンスで組み立てられていたことが分かった。以上で示した指導前後の作文パフォーマンスの推移から、今回の学習者は2カ月弱といった短期間ながら、明示的に目標設定された作文指導をすることで、概ね300 words程度の英文を推敲できることは明らかとなった。

4.3 技能領域と作文特徴との関係

4.3.1 即興作文

では、対象の背景にある英語熟達度と、今回の作文パフォーマンスには、どのような関係があるのだろうか。表4はTOEICによる総合スコア及び技能別のスコア、そして即興作文から引き出された各指標の計測値をまとめた相関行列である。本研究の主たる目的であるTOEIC Writing Sectionとの相関係数を便宜上、他の行列と異なる赤色で表示する。

相関係数の高さを比較した場合、TOEIC L&Rの総合スコアが最も高い値を示し($r = .581$)、次いでReading Sectionとの相関が高く($r = .574$)、Speaking Sectionとの相関はなかった($r = .129$)。つまり、4技能の熟達度を個別で捉えるよりも、それぞれの総和で捉えた方が学習者の分布を反映できてい

たと考えられる。一方、対象のパフォーマンスが軒並み低かったSpeaking Sectionでは、学習者個々に熟達度の違いを峻別できないほど難しかったことが窺える。

また、即興作文による客観的指標(Fluency, Complexity, Accuracy)の値とTOEIC Writing Sectionのスコアで相関を調べた場合、延べ語数に着目することで、対象者間での作文力や語彙力の違いを説明しやすいと思われる。TOEIC L&Rや作文の延べ語数に及ばないが、センテンス数や構文の複雑さもまた、対象の作文パフォーマンスの多様さを中程度ながら反映していた(Sentences: $r = .431$; Complexity: $r = .476$)。

4.3.2 課題作文

課題作文より引き出された計測値(Fluency, Complexity, Accuracy)とTOEIC L&R及びS&Wスコアとの相関は、表5に示したとおりである。技能別のTOEICスコアと課題作文との相関に明確な傾向は認められず、やはり推敲時間や外部リソースへのアクセスを制限しないタスク条件では、英語熟達度と異なる要因が介在することは避けられない。

ただし、赤色で示したセンテンス数を横軸に概観した場合、最低でも.34(Sentence \times TC.W)と中程度からやや低い正の相関を一貫して示した。

表4 相関行列 (外部評価テストの各技能スコア \times 即興作文パフォーマンスの指標値)

	TOEIC	TC.L	TC.R	TC.S	TC.W	Words	Sents	WPS	Comp	Errors
TOEIC	---									
TC.L	.644	---								
TC.R	.967	.535	---							
TC.S	.672	.408	.646	---						
TC.W	.581	.447	.574	.129	---					
Words	.766	.392	.782	.427	.540	---				
Sents	.653	.170	.685	.243	.431	.922	---			
WPS	-.001	.514	-.016	.179	.192	-.101	-.453	---		
Comp	.683	.612	.665	.491	.476	.664	.469	.298	---	
Errors	.063	-.148	.174	-.210	.243	.309	.525	-.436	.014	---

この結果から TOEIC で高スコアの熟達した学習者ほど、センテンスを多く書く傾向にはあったと推察される。意外な結果として、黄色の横軸で示した相関からは、複雑さの指標 (WPS, Complexity) と技能別スコアとの間に低いながらも負の相関が数件みられた (例. WPS×TC.W: $r=-.261$; Comp×TC.S: $r=-.287$)。考えられる原因として、TOEIC で低スコアだった学生に関して、即興タスクでは書き表すことのなかった極度に長いセンテンスが課題作文で表出し、Complexity の計測値に影響を与えていたと思われる。こうした現象の一因として、構文力に自信のない学習者が翻訳支援サイトに過剰依存していた可能性が挙げられる。このようなツールに不慣れな学習者は、母語特有の切れ目のない日本語文章を投入しがちである。いわゆる無終止文 (run-on sentences) や、文法的エラーに該当しないまでも極端に長いセンテンスは、読み手の理解にも支障となり得るため、ある一定の習熟度に達した段階で、書き手としての責任にも配慮した教えもまた必要となる (付録 B を参照)。

5. まとめ

本研究では、東京高専の本科 5 年課程を経た専攻科生を対象に、アカデミック・ライティングを通じて英語発信力の現状を調べた。調査にあたっては、TOEIC の 4 技能テストと Technical Writing の授業で書かれたエッセイを通じて彼らの言語運用力を検討し、各技能到達度と作文特徴との関係を調べた。今回の調査から得られた知見を振り返り、本校の英語授業における指導項目で見直すべき課題について考察する。

対象の専攻科生に限って論じれば、受容言語能力が CEFR の B1 から A2 レベルの閾値まで到達しており、自立的に英語を学んで運用できる学習者と評価できる。言い換えれば、社会性や学術面で内容のある英文や海外映像の理解に取り組むことで、ある程度の有意義なインプット学習が期待できる段階にある。また、即興作文から課題作文へのパフォーマンス向上が確認されたことから、時間をかけてアカデミック・ライティングの手法を体系的に学ぶ機会を提供すれば、現状より適切な構成で順序立てて英語で表現できるだろう。

表 5 相関行列 (外部評価テストの各技能スコア×課題作文パフォーマンスの指標値)

	TOEIC	TC.L	TC.R	TC.S	TC.W	Words	Sents	WPS	Comp	Errors
TOEIC	---									
TC.L	.644	---								
TC.R	.967	.535	---							
TC.S	.672	.408	.646	---						
TC.W	.581	.447	.574	.129	---					
Words	.319	.166	.405	.284	.014	---				
Sents	.525	.389	.506	.417	.338	.511	---			
WPS	-.109	-.111	-.001	.017	-.261	.372	-.561	---		
Comp	-.181	-.026	-.023	-.287	-.188	.615	.000	.683	---	
Errors	.127	.162	.098	.242	.070	-.038	-.019	.002	-.267	---

注. 上から 1~5 段目までの TOEIC 総合スコアと各技能別スコアとの相関係数は表 4 と重複した値で、小節 4.3.2 における考察の趣旨から逸れるため、淡色で表示する。

今回の専攻科生レベルに相当する語学力や素養を身に付けた学生には、CEFR B2 以降のレベルアップを図り、例えば語学参考書や専門書、他にも関心のある TED Talk や海外ニュース等の内容ある素材に触れる機会を与え、発展的な学習態度への促進を支援するのが建設的だろう。とはいえ、現行の教育課程上で本科 4 学年以降は選択科目を合わせても週 1~2 コマ、5 学年に至っては選択科目を履修しない限りは英語授業のないまま最終学年を過ごす学生も少なくない。上級学年に進むほど専門科目群の課題に勤しみ、語学に充てる時間の限られる学生も少なくないが、個々の進路先やニーズに適った教材や学習相談を提供できる指導体制を整備していく必要もあるだろう。

ただし、学習スタイルの面では学生と教師との間で再考すべきかもしれない。まず、学生の英語発信力を強化するには、インプット学習のみでは限界があると考えられる。発信技能の強化不足には、本科の現行教育課程で音声指導主体の科目数が少ないことにも起因するが、クラスの人数に対してきめ細かな指導や評価が困難な点も克服すべき課題である。しかし一方で、新規科目の導入による学習効果のトレードオフを引き起こすリスクにも注意しなくてはならない。英語授業に充てられる時間が有限であることを踏まえ、Reading や Grammar & Writing といった科目名は掲げられているものの、現行科目でも 4 技能を相互に関連づけた演習へ発展できるよう指導計画を練る必要はある。

取組みの一例として、筆者が 2022~2023 年度に担当する本科 1 学年開講の Reading I・II では、テキストの読み合わせや解説だけに終始せず、定期的な再話と筆記再生による言語活動を取り入れている。読みこなしした英語原文を見ずに自らの記憶から発話生成するには相応の認知負荷をかけるため、言語材料の記憶にとどまらず、テキスト構造や内容の深い理解に繋がる期待から導入に至った。学習の質的な向上には、シャドーイング等の音読指導で工夫したり、正確に単語を綴れるよう書字指導にも注力する必要があるが、本稿を執筆している導入 2 年目の現在、グループ活動から筆記再生まで学生の作業能率にも成長がみられた。語学全般からみれば一側面にすぎないが「音声と文字情報の一体化」そして「理解から表現へ」といった学習法が浸透し、上級学年に進んでいく学生たちの一助になればと願うばかりである。

6. 本研究の限界と今後の課題

相関分析にあたり、対象人数 ($N=14$) が限られていた点を考慮するとともに、考察した係数は高くても .60 に満たない中程度で留まっていた。今回の作文力と技能領域との関係性を解釈するには慎重に扱うとともに、より多くの協力者からのデータに基づいた追検証することが望ましい。

また、ライティング・パフォーマンスの評価にあたり、本稿では紙面の制限により自動作文評価システム及び Microsoft Word 2013 で計測された客観的指標に絞って考察した。作文内容や論理展開、構成の一貫性といった質的分析に関しては、以降の報告機会にて詳述したい。

謝辞

本調査の協力にあたり、専攻科 1 年生 (2022 年度当時) の皆さんに感謝の意を表します。

また、英語科の櫻村真由先生には、作文テストのタスク・デザインから資料の提供まで、お世話になりました。本紙面にて御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) W.Grabe & R.Kaplan: Theory and Practice of Writing. London: Longman, 1996.
- 2) 国立教育政策研究所 教育課程研究センター：令和 5 年度全国学力・学習状況調査の結果 (概要), 2023 年 7 月 https://www.nier.go.jp/23chousakekkahoukoku/report/data/23summary_zentai.pdf (参照日：2023. 10. 30)
- 3) K.Hyland: Second language writing. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- 4) S.C.Weigle: Assessing writing. Cambridge University Press, 2002.
- 5) J.Burstein, K.Kukich, S.Wolff, C.Lu, M.Chodorow, L.Braden-Harder, & M.D.Harris: Automated Scoring Using A Hybrid Feature Identification Technique, 1998.
- 6) Y.Attali, & J.Burstein: Automated Essay Scoring With e-rater® V.2. Journal of Technology, Learning, and Assessment, 4. 2006.
- 7) M.Enright & T.Quinlan: Using e-rater® to score essays written by English language learners: A complement to human judgment. Language Testing 27, 317-334, 2010.
- 8) S.C.Weigle: Validation of automated scoring of TOEFL® iBT tasks against non-test indicators of

- writing ability. Language Testing, 27, 335-353, 2010.
- 9) 樫村真由・長橋雅俊・三木耕介・三橋峰夫：高専生のエッセイライティングと TOEIC® Writing のスコアに関する考察, 全国高等専門学校英語教育学会 第 45 回研究大会資料, 2022 年 9 月
- 10) Educational Testing Service (ETS) : TOEIC® Speaking & Writing 公式 テストの解説と練習問題, 2015 年 12 月
- 11) ETS : TOEIC® Speaking & Writing Tests サンプル問題と解答例, 2021 年 8 月
- 12) 国際ビジネスコミュニケーション協会 (iIBC) : TOEIC® Program DATA & ANALYSIS 2023-2022 年度 受験者数と平均スコア, 2023 年 8 月 https://www.iibc-global.org/hubfs/library/default/toEIC/official_data/pdf/ (参照日 : 2023. 10. 30)
- (2024 年 1 月 12 日 受理)

付録 A ライティング・タスク

共通の指示文 (指導前・指導後)

Directions: Read the question below. You have 30 minutes to plan, write, and revise your essay.

Typically, an effective response will contain a minimum of 300 words.

即興作文タスク (指導後)

Do you agree or disagree with the following statement? Advertising on the Internet is the best way for a company to attract new customers. Give reasons and examples to support your opinion.

課題作文タスク (指導後)

At some workplaces, employees use computers and other company equipment for their personal needs. Should employers allow employees to use company machines and equipment in this way? Why or why not? Give reasons or examples to support your opinion.

付録 B 課題作文タスクにおける推敲例 (一部省略)

In the workplace, there is the issue of whether employees may be allowed to bring in personal equipment such as private computers. I don't think it should be allowed.

This will help prevent information leakage in terms of Internet usage. If you search using the Internet for private purposes, you may browse sites that are suspected of being infected with a virus. ^(a) According to some reports, we hear of cases that have led to the leakage of customers' personal information and data related to the company's technology, resulting in significant losses. For example, there is a virus that steals an email address and sends suspicious emails disguised as humans.

Prohibiting the use of personal devices and accounts leads to improved reliability. ^(b) By using a common account and a mobile phone, it is possible to minimize the exchange of information within the company so that it will not be leaked to the outside. If personal devices are used to share data within the company, ... [snip] ... This would make it easier to be trusted when doing business with other companies.

Sharing devices that ... [snip] ... The use of shared devices also improves security measures and credibility. In conclusion, I do not believe that private items should be allowed into the workplace.

注. 原文は 5 パラグラフで構成し, 延べ語数 324 words で書かれた課題作文である。□で示した囲み部分のセンテンスは, それぞれ (a) 29 words と (b) 31 words と極端に長く, 読み易さ (readability) の観点からは再考したい部分である。

哲学対話の授業における思考の深まりと教師の役割について — 市民性教育としての哲学対話における問いに着目して —

村瀬智之*

本稿では、哲学対話と呼ばれる参加者主体の議論を行う授業の実際の様子を文字起こしした資料をもとに、どのような思考の深まりが生じ、教師がどのような役割を求められ、それはどのような意義を持っているのかについて論じる。具体的には、市民性教育と哲学対話の関係に焦点を当てることで、思考の深まりにとって「問い」のもつ重要性を明らかにした上で、実際の授業の様子を問いとの関係において分析、整理していく。これらを通して、哲学対話においてどのように問いが生起し扱われるのか、教師が問いにどのようにかかわるのか、そして、その意義は何かについて明らかにする。

(キーワード: 哲学対話, 問い, 市民性教育)

Improvement of thinking through community of philosophical inquiry and the role of teachers

— Focusing on the questioning in philosophical dialogue as citizenship education —

Tomoyuki MURASE*

Based on transcripts of classroom philosophical dialogues, the article argues about the improvement of students' thinking and the role of teachers in a community of philosophical inquiry. This article shows with particular reference to recent discussions about the relationship between citizenship education and philosophical dialogue. It also focuses on the "questioning" that occurs in philosophical dialogue. The actual effects and significance of questioning are clarified on the basis of transcripts in terms of the students' thinking and the teachers' role.

(Keywords: philosophical dialogue, community of philosophical inquiry, questioning, citizenship education)

1. はじめに

本稿では、近年注目されている哲学対話の授業の意義について論じる。特に、民主主義や市民性の教育として哲学対話を行うことの意義と、教師の役割に注目し、実際の哲学対話の様子を基に分析をしていきたい。

2. 哲学対話と市民性教育

2.1. 哲学対話の授業とはどのようなものか?

「哲学対話」の授業とは、標準的には「子どもの哲学 *Philosophy for Children*」という教育プログラムを基にして、様々な国や学校の状況に応じてアレンジされた授業実践を指している。「子どもの哲学」は、リップマンやシャープらによって、1970年代から実践が開始された (Lipman 2003¹⁾)。日本の学校では、特にアメリカ・ハワイ州での「子どもの哲学」をベースとする実践が多い (ハワイ

州での授業実践については、Jackson 2013²⁾)。また、ハワイ州での実践が日本における授業実践の基になっている点については、梶谷 2018³⁾)等に詳しい。また以下では、ハワイ州でのジャクソンを中心とする授業実践は、「p4cHI」と略記する)。「子どもの哲学」の授業の核になるのは、子ども、すなわち、その授業の参加者が自ら問いを立てて、それについて自分たちで議論する活動である (たとえば、Gregory 2013^{4,5)})。この活動を狭義の意味での「哲学対話」と呼ぶことができる。すなわち、哲学対話の授業とは、狭義の意味での哲学対話を中心とする授業のことを指す (この意味で狭義と広義を分けるのであれば、広義の意味での哲学対話の授業とは、特定の教材等を利用し、いくつかのアクティビティ等も行い、狭義の意味での哲学対話も取り入れた授業のことを指すことになる)。

哲学対話では、授業参加者が円形に座り自分たちで決めた問いについて議論する。日本において

*一般教育科

は、p4cHI の影響を受け「コミュニティボール」と呼ばれる道具を使うことが多く、また、素材を決めず、参加者が考えたい問いを自由に出し、そこから議論する問いを選ぶ形の授業「プレーンバナナ」が哲学対話の基本になる。

哲学対話の中では、参加者が自由闊達に議論を進めることが重視される。言い換えるならば、予め教師側が授業計画として特定の議論の流れや特定の結論を誘導するようなことは差し控えられるべきだと考えられている。それは、リップマンが言う「議論が導くところについていく」という理念である (Lipman 2003:84) ¹⁾。

この特徴が、哲学対話の授業を他の授業と際立って異なるものにする。というのも、通常の授業では、教育目標として特定の命題的な知識の習得が挙げられることが多く、技能習得を目標にする授業であっても、その技能は狭く限定されている (たとえば、特定の薬品を使った実験であれば、それにまつわる命題的な知識やその薬品の取り扱いや実験レポートの書き方といった限定された技能が教育目標とされる)。それに対して、哲学対話の授業では、広い意味での思考力が教育目標とされ、それを習得する過程は多様に開かれている (それゆえに、しばしば哲学対話は通常の教科指導との相性が悪いというジレンマをもつ。このジレンマを解消する一つの方法を村瀬 (2021) ⁶⁾ で論じた)。

哲学対話の授業では参加者が自分たちで議論を進め、共同で問いを探究することによって、授業は進んでいくことになる。

2.2. 哲学対話と市民性教育

本稿では、哲学対話の授業における市民性の育成に焦点の一つを当てているが、市民性の育成と哲学対話にはどのような関係があるのだろうか。

リップマンらがすでに民主主義と子どもの哲学の関係を論じているように、哲学対話の授業は民主主義社会における市民性と深い関係をもっている (Lipman 2003) ¹⁾。

また、哲学教育一般が市民性との関係で打ち出されることもある。たとえば、1995 年、ユネスコのパリ宣言には次のようにある。「われわれは、哲学教育 (philosophy teaching) が、公平さ、市民の責任、個人や集団の間の理解や寛容を促進することを強調しよう」。「われわれは、教育や文化的生活において哲学的討論を発展させることが、いかなる民主主義においても基礎となる判断の能力を

鍛えることによって、市民の訓練に大きな寄与をなすことを確認しよう」(Droit 1995:15) ⁷⁾。

さらに国内でも哲学対話と市民性の深い関わり、より具体的には市民性の育成に哲学対話が有効であるという議論がなされている。たとえば、社会参加という観点から河野は次のように論じている。

社会への参加意識を高めるために教育はまず何をすべきか...【中略】...人びとに向けて、社会に向けて自分の声で語ることそして、人びとと社会の側がその表現を受け止めることです。逆説的に見えるかもしれませんが、社会参加という公共性を育てるのに第一に必要なことは、自己を表現することを学ぶことであると同時に、人の声を聞く態度を学ぶことなのです。他の言い方をすれば、自分の必要性を公共的な場所で表明し、それを誰にとつても課題へと開いていく過程を学ぶことであり、同時に他者のそれを心から受け入れることなのです。(河野 2014:55-6) ⁸⁾

自分自身を表現し、他者の意見 (声) を聞く態度は、まさに哲学対話を構成するものである。もしこれが正しいのであれば、哲学対話の授業は市民性の育成と直接的に関わっていることになる。

2.3. 市民性を育てる哲学対話における教師の役割とは何か？

市民性の育成に対して哲学対話の授業に見込みがあるかとする、それはどのような仕方で実現されるのだろうか。言い換えれば、どのような学習のプロセスが生じると、哲学対話は市民性の育成に資することになるのだろうか。

哲学対話は、参加者が発言をし、ともに考える経験をする。もちろん、それ自体が市民性の涵養に直接資すると考えることもできる。自らの意見を人の前で述べ、ともに考えることは、民主主義社会の市民にとって基本的な技能であるようにも思われるからだ。しかし、それは、単純な意味で「私的な利益」を他者に要求し交渉するというものではない。それであれば、より論争的な課題を扱い、相手を説得することを目的とする授業の方が有効であろう。その意味において、哲学対話において生起する市民性の涵養は別の側面をもつ。

では、それは何か。国内の子どもの哲学の第一

人者である高橋は次のように述べる。

彼らの対話がそれを示しているように、自分が何者かを示すような言葉や「考え」を人前で語る、ということは、「私的」な自己を晒すということではなく、それとはまったく逆に、「公的な存在」としてその場に現れるということなのだわたしは考える。この5年生の女の子が、言葉は不十分ながら態度でつらぬき、行ったことは、自分が直面している問題を、自分個人の悩みや困難としてではなく、他の全ての人が考えるべき、「公的」な問題ではないかと他の人に問うた、ということだったのだ。(高橋ら 2018 : 340, ただし強調は引用者) 9)

高橋は、悩みや困難を公的な問題へと変換して人々に問う子どものあり方を描き出した上で、これを民主主義の教育と関連させて論じている。

現在の教育現場では子どもや学生が、他者との対話、議論を学び、市民社会の主体としての意識を持つために「民主主義教育」や「シティズンシップ教育」が重要だということが言われており、そこでは、合意形成のトレーニングをするといった課題が教科学習にも取り入れられている。しかし、真の意味での「民主主義教育」や「シティズンシップ教育」がありえるとすれば、すでに「公的」なものとして、区切られ、与えられたテーマについて議論をすることではなく、自分の経験を公的な問題として再定義、再創造できる主体を育成することが必要なのではないだろうか。(高橋ら 2018 : 342, ただし強調は引用者) 9)

自らの経験や発言を問題として問うことは、哲学対話において必要不可欠であるだけでなく、それを公的な場に置くということでもある。元々は通じ合えないものを言葉を介して人々の前に提示する。それが「公的な存在」、言ってみれば「市民」になることであり、この意味での「公的な問題を問うこと」によって、市民としてふるまうことができるのである。

哲学対話の授業には、通常の意味での市民性教育が達成される面と同時に、高橋が言うような「問題の再定義」や「問題を公的なものにする」とい

った「問い」や「問題」と関わる面があり、それが哲学対話の授業の市民性教育における顕著な特徴なのである。

これは、哲学対話での思考の深まりの特徴でもある。哲学対話における思考とは、問題や問いに関わるものである。授業での思考の深まりの一つのイメージは、知識の獲得やその知識を活用、新たな知識の導出等である。しかし、哲学対話における思考とは、そのプロセスにおいても、また、その成果物としても問いや問題が深く関わっている。換言するなら、問いや問題、あるいは、問題の再定式化といった仕方でも思考が提示されることにこそ、哲学対話の哲学である所以があるということである (Murase 2023) 10)。つまり、問いに関する学習プロセスが生じることで哲学対話の授業は市民性教育に資するのである。

もしこれらのことが正しいのだとすると、哲学対話における教師の役割も「問い」や「問題」に関わる部分において焦点化されるべきであろう。

以下では、実際の授業の記録を基に、哲学対話の授業における思考の深まりと教師の役割について具体的に考察をしていきたい。

3. 授業の実際

3.1. 授業単元の概要

本稿で分析する哲学対話は、対話自体の前に二つの授業を行っている。一つは、プラトンの『クリトン』を読解する授業、もう一つは、「問題の根っこ」というアクティビティを行う授業である。

	内容	時間(目安)
1回目	試験返却	30-40分
	『クリトン』読解	30-40分
2回目	概要説明	10分
	グループでの「問題の根っこ」	25分
	問い選定	15分
	哲学対話	25分

図1 単元構成

単元の構成は、図1のように、プラトンの『クリトン』を読解し、そこで提起されている「ソクラテスは牢屋から逃げるべきか」という問いについて「問題の根っこ」というアクティビティをグループで行うことで、問いのもつ根本的な対立点

を析出する。いくつか出てきた「根っこの問い」から一つを選び、対話を行った。

『クリトン』を使って、「問題の根っこ」を行うという流れの授業にはいくつかの先行例があり、それらを参照している(村瀬 2013¹¹⁾、および、日本学術会議哲学委員会 2015 : 37-40)¹²⁾。「問題の根っこ」では、元の問いに関する二つの立場を支持する理由を連鎖的に考えることによって、それぞれの立場がどのような論理に支えられているかを解明するとともに、根本的な対立点を問いの形で析出する。当然のことながら、この「根っこの問い」の候補は複数出てくる。

今回の実践が先行実践と違う点は、グループで「問題の根っこ」のアクティビティを行う点である。概ね 4 名一組となり、グループで相談しながら、それぞれの意見を支持する理由を探していく。「問題の根っこ」を行う中で、理由を複数書いていく段階で止まってしまう学生が毎年複数見られた。コツをつかめるとすぐに書き進められるため、グループで行うことで、お互いに助け合ったり問いかけあったりすることでスムーズに思考を進めることができるよう企図した。

3.2. 哲学対話の中で起こっていること

本節では、「付録」にある哲学対話の様子を分析する。

3.2.1. 全体の流れ

今回「付録」にあるのは、おおよそ 20 分間の哲学対話の様子である。最初、教師は哲学対話のルールの説明をしている。その後、問いに対する参加者の答えの傾向を尋ねている。議論の始めで「思想」の意味を巡る問いが提起される。その上で、思想を持つことと他者とのズレや思想内容の変化について意見が出る。同時並行して、思想の種類が問題にされる。それらを踏まえて、教師が問いを「大切な思想をもつべきか」という形で再設定する。それに対して、「譲れない部分を持ったほうが良い」という主張がなされ、他の学生からの質問を受けて、「他人を疑いたくない」という信念が大事にしたい思想として例示される。それらを受けて、「思想を持たないという思想」という観念が提起され、「考えを持たないこと」と「思想を持つこと」の違いが曖昧ながら主張される。最後に教師がこれまでの議論を三つの種類の思想の分類として整理し、それに対する参加者からの反応が少

しあった後に、ソクラテスとの関係を述べる「クロージング」へと入る。

3.2.2. 学生による問いかけ

この哲学対話の中では、参加者自身が問いかけを行う場面が複数みられる。

他者の発言の意味を確認するための問いかけは、三回見られる(52-54, 132, 219)。他者が発した言葉の意味についての質問は、他者の主張に対する興味を表現している。また、例を挙げることを促す質問もある(189-191)。例を挙げることで他者の発言の意図を具体化し、意味を理解しようとする点で、この種の問いかけも、他者の主張に対する興味の表現である。

質問には、お互いに傾聴し合う雰囲気醸成してくれるという共同での探求をつくりあげる上での効力があるが、それ以上に発言者の言葉を大切なものとして扱っている、すなわち、その発言は聞かれるべきものであるという価値づけの作用がある。つまり参加者同士の問いかけは、その単純な見かけに反して、ケア的な思考を表現している。そのようなケアを代表するものだからこそ、質問は共同体での探求の基盤となるのである。

対話の中盤には、一人の学生の発言に対する質問から、その学生が思想の構造に対する一つの描像を描くやり取りがなされている。このやり取りでは、101 から 105 までの問いかけに答える形で思考が展開していく。ここでは問いかけがきっかけとなって、小さな議論が始まっている。そもそも哲学対話では、問いが定まることで議論がスタートするのだが、この問いかけは、ある意味では、そのミニチュア版として機能している。

哲学対話には、推論や議論の流れがあると同時に、それと並行して、問いや問題の流れがある。この問いかけは、哲学対話の中にある「問いの流れ」の一部を成す問いである(この点については、Murase 2023 : 93 を参照)¹⁰⁾。もちろん、101 から 105 の問いかけのように具体的な質問の形をとらない問いの流れも存在する。3.2.3 節でも扱われる教師による問いの再設定は、明示的には設定されていない問いの流れを焦点化し、問い自体を明示化する効果をもっている。別の言い方をすれば、そこにはまだ明言されていない問いが伏在しているのである。参加者は、主張や推論の流れの中で思考を深めていくが、それとともに、対話における問いの流れの中で思考が深まっていくのである。

参加者同士の問いかけあいは、個人的な経験や考えを公的なものにする、という 2.3 節での特徴と直接に合致するものではない一方で、相手の考えに興味を示し寄り添うことは、経験や考えを公的なものにしていくことを支え助けるものになっている。個人的なことを公的なものにしていくという市民性の核となる能力や経験は、他者によって支えられ、共同体の中に存する。参加者同士の問いかけあいは、それらの能力を涵養する経験を参加者にもたらしめている。

この構造は、哲学対話の全体に見られるものでもある。他者の一つの問いを共同で探求するという営み自体が、言ってみれば「誰かの問いに付き合っただけで考える」ことであり、個人的な問題を公的な問いとして扱う事例になっているのである。

3.2.3. 哲学対話の中で教師が行っていること

教師は哲学対話の中で何を行っているのか。一般に、哲学対話における授業の中で教師は「司会進行」を行う。ルールを設定し、議論の整理をする。この役割は、通常の授業の教師の役割とは大きく違う。通常の授業で教師は知識をもち、それを与える側として振る舞う。教師の質問は「発問」であり、教師自身も答えをしらない通常の質問とは大きく異なっている。授業内での教師の発問に対して学生・生徒が答えたとき、教師は「正解／不正解」を判定し、お礼を言うことは決してない。生徒・学生側からの質問も授業では本質的には歓迎されていない。なぜなら、質問がなくなるまで、その授業単元は終わらないからだ（質問と授業との関係については梶谷 2018 に詳しい）³⁾。

それに対して、哲学対話でなされる教師の質問は、自らも答えがわからないような（通常の意味での）本当の質問でありうる（し、その方が望ましい）。それは、哲学対話で問われる問いが経験的知識には本質的に依存しない種類のものである。哲学対話で教師は、他の参加者と問いの前で平等な立場でありえる。だからこそ、本当の質問ができるのである。（哲学的問いの前では平等が確保されるといっても、もちろん、実際の場面には、問いや知識、社会的地位、議論に関する経験の量の違い等で教師と参加者の立場は異なっている。授業という設定において教師は常に一定の権力を保証されている（参加者の行動を変化・コントロールできる）。それゆえに、場の平等性を重視するのであれば、教師は何かをする必要がある。

たとえば、教師は自らの権力・権威性を割り引くよう行為するとか、議論に参加せずに司会進行に徹する必要が出てくるかもしれない。）

今回の哲学対話で教師は、発言の促し問いを重視している。154 以降で教師は、全体の問いをそれまでのものと変換する形で設定し直す。3.2.2 節でも指摘したように、これは、すでに生じていた問いの流れの明示化と再設定である（もちろん、他のやり方での問いの再設定や別の問いの流れを感知しそれを明示化することも可能である。つまり、問いの流れが一つの対話の中に複数伏在していることは問いの流れの存在と両立可能である）。

問いの再設定が問いの流れを上手く表現していることは問いの再設定のあとにスムーズに参加者が議論をしている様子からもうかがえる。というのも、教師側がある種の問いの流れを察知し、それを明示化したとしても、参加者は別の流れを察知し、その理解のもとで思考していると、その問いかけに乗ってこないということが起こりうるからだ。なぜなら、別の流れとして理解していた参加者にとっては教師の再設定された問いは唐突なものにうつり、これまでの自らの思考と接続ができないためだ。その場合、問いの再設定以前の発言を受けて発言するといったことが起こる（教師の側がある種の思い込みを基に議論の流れを解釈する具体的な様子は、Murris 2000:43 等を参照）¹³⁾。

3.2.4. 哲学対話の繊細さ、あるいは、哲学対話における拍手問題

付録の哲学対話の中では、発言のあとに拍手が起こる場面が二つある（45, 79）。誰かが発言した後に拍手をするという習慣は、哲学対話のルールや推奨事項ではなく、学生たちがそれまでの（おそらくは中学校までの）授業の中で身につけてきた習慣である。発言の後の拍手については、哲学対話の授業でしばしば起こっている。

実践者によっては、その際に明確に拍手を禁止する指導を行う（哲学対話実践者である安本志帆氏の研究会での発言による（2023 年 12 月 16 日））。今回の哲学対話では明確に禁止を明言してはいないが、自然となくなっている。拍手には発言に対する肯定というポジティブな要素がある一方で、拍手の強弱で肯定の度合いを表せる点や、拍手が起こった時点が発言の終了時点であると明示されてしまう点（発言の始まりと終わりを発言者が決

めるという権利が疎かにされる点), 拍手がしやすい発言が自然と促されてしまう点 (言い淀みや質問といった「拍手がしづらい」発言が抑制されてしまう点), 拍手によって議論の流れが止まってしまふ等, 哲学対話にとってのネガティブな要素が多数ある。そのため, 拍手は哲学対話の授業において推奨される行為ではないだろう。一方で, 対話や議論の習慣を援用することで発言がしやすくなり議論に参加しやすくなる場合もある。一方的な禁止の通告が自由闊達な議論を阻害する場合もある。そのため, 教師の対処がどのようなものであるべきかに一律の答えがあるわけではなく, 文脈によって判断されるべき事柄であろう。

この種の, ある意味では細かい論点は, 対話や議論を通して共同で探求すること, すなわち, ともに考えることの繊細さと難しさを示すものである。その意味では, 教師に求められるものは画一的な技術や技能ではなく, 即興的な巧みさを伴う技術や技能であり, 参加者の思考を促すための意欲や態度を含んだ知的あり方であるといえる。

4. 終わりに

本稿では, 実際の哲学対話の様子を問いを中心に分析した。そこでは, 参加者による問いかけを通じた探求の共同体の形成, および, ケア的な思考の深化を強調した。これは市民性教育の問題の「公的化」を支える前提条件をなす経験である。同時に教師が行う問いの流れの察知と再設定を描出し, その意義についても論じた。

今回取り上げた哲学対話の授業は, 「とても上手くいった」授業ではない。当該のクラスは, どちらかというとも哲学対話で闊達に議論し発言が次々と出てくるようなクラスではない。今回, 実際の対話の様子を記録・分析するにあたっては「上手くいっている哲学対話」ではなく, あえて「標準的な哲学対話」(もしかすると「上手くいっていない哲学対話」)を取り上げた。それは, そういう状況でも, 上で記したような問いかけを通じた思考の深まりがあることを示したいと考えたからだ。理想的な授業ではない, いつもの授業の中に含まれる意義にこそ授業の意義はある。

謝辞

本研究は, JSPS 科研費 23H00563, 22K00024 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Lipman, M. (2003). *Thinking in education*. Cambridge University Press.
- 2) Jackson, T. (2013) Philosophical rules of engagement. In *Philosophy in Schools*, (Routledge), 113–123.
- 3) 梶谷真司 (2018) 『考えるとはどういうことか: 0 歳から 100 歳までの哲学入門』幻冬舎。
- 4) Gregory, M. (2013). Precollege philosophy education: What can it be? The IAPC Model. In *Philosophy in schools*, (Routledge), 69–85.
- 5) Goering, S., Shudak, N. J., & Wartenberg, T. E. (Eds.). (2013). *Philosophy in schools: An introduction for philosophers and teachers*. Routledge.
- 6) 村瀬智之 (2021) 「「哲学に関わる対話的手法」を用いた公民科授業づくりの試み —「媒介教材を用いた授業」を事例として—」『思考と対話』, 3 号, 12-23 頁。
- 7) Droit, R. P. (1995). *Philosophy and democracy in the world: a UNESCO survey*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000104173>[最終閲覧 2024/1/12]
- 8) 河野哲也 (2014) 『「こども哲学」で対話力と思考力を育てる』河出書房。
- 9) 高橋綾, 本間直樹 (2018) 『こどものてつがく ケアと幸せのための対話』, 大阪大学出版会。
- 10) Murase, T. (2023). What makes us P4C teachers?. *Tetsugaku: International Journal of the Philosophical Association of Japan*, 7, 78-95.
- 11) 村瀬智之 (2013) 「「哲学的探求とは何か」にかんする一考察—哲学教育の観点から—」『子どものための哲学教育研究 (山田圭一編)』, 千葉大学大学院人文社会科学研究所研究プロジェクト報告書第 255 集, 85-98 頁。
- 12) 日本学術会議哲学委員会 (2015) 「提言 未来を見すえた高校公民科倫理教育の再生—<考える「倫理」>の実現に向けて—」
- 13) Murriss, K. (2000). The role of the facilitator in philosophical inquiry. *Thinking: The journal of philosophy for children*, 15(2), 40-46.

(2024年1月12日 受理)

付録

(凡例は末尾に記載)

- 1 (1:58)
- 2 T はい、えっと一・・・[喧騒]・・・おーい、
- 3 いいかー？[喧騒が静まる]
- 4 いつもと同じルールです、手を挙げた人
- 5 がしゃべります。えーまあ結論を出すわ
- 6 けではないし、答えがあるわけでもない
- 7 ので、多少わからなくなったり、してもか
- 8 まいませぬ。もちろんしゃべらなくても
- 9 いいです。手を挙げてしゃべったら、次の
- 10 人を指名してあげてください。複数手が
- 11 あがった場合は、あまりしゃべっていない
- 12 人を、指名してあげてください。[...略
- 13 ...]何を言っていたいただいてもかまいません、
- 14 多少間違っているかなとか、 [...略
- 15 ...]ほかの人がしゃべったり、かんがえたり
- 16 がしづらくなるような発言はやめてく
- 17 ださい。[...略...]では今日のテーマは「自
- 18 分の思想をどこまで大事にするべきです
- 19 か」。これは二択とかの問いではないので、
- 20 みなさんはどれぐらい、自分の思想、考え
- 21 みたいなのを、大事にすべきと思うん
- 22 でしょうか。何かご意見ある方。
- 23 (3:40)
- 24 これさ、最初にちょっとファーストイン
- 25 プレッションを聞いてみたいんですけど、
- 26 どちらかというところで本当に人の言葉のニ
- 27 ュアンスだと思うんですけど、けっこう
- 28 大事ですとか、いやあんまり大事じゃな
- 29 いんじゃないかと思う人がいると思うん
- 30 ですけど、自分の思想とか考えてけっ
- 31 こう大事にしたいなと思う方、手を挙げ
- 32 て。
- 33 [半分くらいの学生が手を挙げる]
- 34 T いや、そんな大事じゃないんじゃないかな
- 35 と思う人手を挙げてください。
- 36 [こちら半分くらいの学生が手を挙げる]
- 37 T あー、半々くらいですかね。それぞれ理由
- 38 を教えてください。
- 39 [しばし誰も答えず、沈黙]
- 40 (4:45)
- 41 ① 自分はいやあんまり大事じゃないと思っ
- 42 てる側で、大事にしちゃうと、それを守って
- 43 いかなきゃいけないのがめんどくさ
- 44 いと思ったので、そこまで主張せずに行き
- 45 たいなと思う。[拍手が起こる]
- 46 [周りの学生とひそひそ話す]
- 47 [またしばし沈黙]
- 48 T 何かありますか？もし思いついたらどん
- 49 どん喋ってください。
- 50 (5:43)
- 51 ② もう一回(学生①の考えを)教えてくれ
- 52 ますか？一回だとなかなか理解が難しか
- 53 ったので。
- 54 ① 自分は自分の意見を大事にしない側の意
- 55 見なんですけど、一度自分の意見を持つと
- 56 それを大事にしていかなきゃいけないと
- 57 思ったので、そこまで大事にすべきじゃな
- 58 いなと思った。
- 59 (6:23)
- 60 ③ 一口に自分の意見と言っても、いろんな
- 61 種類があると思って、大事にしたいなっ
- 62 て思うやつと、これは別にどっちでもい
- 63 いかなくとも思うやつと2種類あると僕の中
- 64 では思って、そんなにどうでもいい奴は
- 65 人の意見に任せておけばいいかなって思
- 66 うんですけど、逆にこっちは譲れないな
- 67 と思うものは最後まで突き詰めていき
- 68 たいなと思います。
- 69 (7:10)
- 70 ④ 僕は自分の思想を大事にしていくという
- 71 意見なんですけど、さっき学生①が自分
- 72 の思想を持って生きるとはめんどくさ
- 73 いと言ったと思うんですけど、他人の
- 74 意見を大事にするのもそれはそれでめん
- 75 んどくさいと思うですよ。自分の意見
- 76 を持つことも他人の意見を大事にするのも
- 77 めんどくささは変わらないと思います。
- 78 [拍手が起こる]
- 79 (7:53)
- 80 T 今聞いててなるほどな、と思ったのは、
- 81 つまり、何らかの意見とか思想を持って
- 82 生きるのって、自分のものであれ、他人の
- 83 ものであれ面倒くさいんじゃないの？っ
- 84 てことですよ。なるほどなと思ったん
- 85 ですけど、これはどうですか？皆さんど
- 86 う思われますか？面倒くさいですか？な
- 87 んか、自分の考えとか思想みたいなもの
- 88 を持つっていうのは、面倒くさい、だか

- 89 ら、生きづらくなるとか、そういう感じが
90 しますか？
91 (8:46)
- 92 ⑤ 面倒くさいっていうよりはちょっとわか
93 らない。自分の意見を持つこと自体は何
94 でもないけど、そこで、自分の意見を持っ
95 て他人と話し合いになると、自分の意見
96 がめんどくさいっていう風になる。だか
97 ら、理解して、なんか、他人と話したくない。
98 面倒くさいのは他人と話したくない
99 かなっていう、そんな感じなんですよね。
- 100 ⑥ 思想ってどこまで思想なのかわからなくて、
101 例えば、シチューが好きで、シチュー
102 よりもカレーが好きの人っていうのが思
103 想なのか、生きるにはお金が必要かみた
104 いな、
105 ⑤ どっちも思想じゃないですか？
106 ⑥ どっちも思想なんですか。そしたらさ、思
107 想って、年を取ってくごとに変わってい
108 きませんか？
109 ⑤ 変わっても別にいいと思う。思想が他人
110 に影響されて、自分の考え方が変わった
111 っていうのなら別に大事にすべきって程
112 でもない、臨機応変に考え方を考えるっ
113 ていう柔軟な考え方もあるんじゃないで
114 すか。
115 (10:15)
- 116 ⑤ 真っ向から反対する意見ってあるじゃな
117 いですか。イエスかノーかみたいな。自分
118 がイエス側で、大切にするというか、あ
119 の一、絶対譲れないのは学生③の言った通
120 りなんですけど、絶対譲れないときは大
121 事にするじゃないですか。で、さっき言
122 ったみたいな、他人に影響されてすぐに変
123 化しちゃうっていうのは、それはまた別
124 の意見というか、別の話なんじゃないか
125 な。なんか類似した意見を出すなら自分
126 の考え方がちょっとずれるっていうのは
127 あるんですけど。
128 (10:59)
- 129 ⑥ んー、じゃあ、思想って大きいから、大事
130 な部分は小っちゃくて [聴き取り不可]
131 ⑤ すみません、もう一回いいですか？
132 ⑥ [手で大きな丸を描きながら]思想って大
133 きな部類のものがあって、こんなかにあ
134 る、自分では変えられないものをどこま
135 で大切にするか、どこまでこれを尊重す
136 るかっていうのを話すってことですか、
137 先生？
138 [笑いが起きる]
139 T あ、手を挙げてる人がいるよ。
140 (11:28)
- 141 ⑦ 今個人的には、思想が大きくあって、その
142 思想の中には大切にしたいちっちゃい部
143 分と、どうでもいい大きい部分があるよ
144 ねっていう話をさせていただいたと思うん
145 ですけど、その、深いところ、小っちゃい自
146 分が大切だと思うところを[聴き取り不
147 可]。ちょっとよくわからなかったん
148 ですけど。
149 ⑥ そしたら今回の問いって、答えとして、思
150 想ってものがあるって、大切なものは大切、
151 大切じゃないものは大切じゃないってと
152 ころで終わっちゃいませんか？
153 T そうそう、なので多分一つの問題は、そう
154 いう大切な部分としての思想ってものを
155 我々は持つべきかという問いに変換され
156 そうですね。さっき言ったみたいに、本当
157 に譲れないものとかを持つちゃうと、他
158 人と対立したり、話したりしなくちゃい
159 けないから若干面倒くさい感じがするじ
160 ゃないですか。別に自分が持っている思
161 想っていうのはある意味全部どっちでも
162 いいようなもの、のようにして生きてい
163 くのがいいのか、いやいややっぱりでも
164 ここは譲れないぞ、みたいな部分を持
165 って生きていくのがいいのかっていう問い
166 に変換されそうですね。今までの皆さんの
167 議論から、私もなるほどねと思いが
168 ながら聞いていたんですけど、という風にな
169 りそうですね。そうすると、ちょっと問い
170 を新しくしてみたんですけど、その点は
171 どう思いますか？そういう譲れない部分
172 みたいなものを、我々は持ったほうがい
173 いんでしょうか？
174 ? 持ったほうがいいっていうか、,,
175 T それともそういうのはあまり持たないほ
176 うがいいんでしょうか？
177 (13:11)
- 178 ⑧ 譲れない部分？は僕は持ったほうがいい
179 と思う派なんですけど、その理由が、ふわ
180 っとするみたいな、絶対に譲れない部分

181 があったほうが人生楽しくないですか？
 182 [何人かの学生が「確かに、確かに」と言う]
 183 ⑧ なんとなくわかる人にはわかると思うん
 184 ですけどそっちのほうが楽しいじゃない
 185 ですか。そうだから、譲れない部分
 186 みたいなのがあったほうがいいんじゃない
 187 かなと思ったりします、個人的には。
 188 ⑨ 学生⑧が言う楽しさってどういうところ
 189 で、例えば、その、例とか挙げてもらえま
 190 すか？
 191 [少し笑いが起きる]
 192 ⑧ それは、結構なんか、思想っていうかそ
 193 の、絶対に、そのなに、ちっちゃな大事な
 194 ところ、思想じゃなくて信念があるじゃな
 195 いですか。僕はなんかあんまり他人を疑
 196 いたくないなど、思ったりするんですよ。
 197 人間関係とかもろもろなんか崩れちゃい
 198 そうだから。他人を疑わないようにして、
 199 仮に裏切られたとしても、裏切られた数
 200 だけ、人を信じてきたっていうポジブ
 201 な考え方ができるし、人生やっぱ山と谷
 202 があったほうが楽しくない？ずっとその
 203 下ってくよりもちょっとやっぱ上って
 204 く楽しさも、自分は必要かなと思ったり
 205 します。
 206 (14:51)
 207 ⑩ 自分の理想を持ってなかったら持ってな
 208 かったで、どこに行きつくかわかんない
 209 んで、それはそれで先が、いい意味で先が
 210 見えなくて楽しくなるか[聴き取り不可]
 211 ⑪ 今学生⑩が言ったようなものもあるん
 212 ですけど、自分の思想を持たないというのも
 213 思想なんじゃないですか？固定概念を、
 214 自分の根底を一つに固定しない、という
 215 信念、思想なんじゃないかって思いまし
 216 た。
 217 [周りが少しざわざわする]
 218 ？ 思想を持ってないってこと？
 219 ⑪ 思想を持ってない？一つのことに執着し
 220 ないで、いろんなものに対して、平等に接
 221 触する、みたいな。
 222 ⑫ 俺の印象的には、学生⑪が言っているの
 223 は、「俺はほかの人の意見に任せます」っ
 224 ていう人がそれにあたると思って、学
 225 生？が言っているのは「まあどっちでも
 226 いいよ」っていう無気力な人っていうの

227 が、自分の思想をもたないっていう風に
 228 当たると思っているんですけど。で俺は
 229 今、思想を持ったほうがいいかなという
 230 風に思っているんですけど、まあその理
 231 由としては、なんか別に、持たないなら持
 232 たないで構わないけど、そうすると、ほか
 233 の人の思想から何か自分が得ることがで
 234 きなくなったときに何もできなくなっ
 235 ちゃうんじゃないかなって思って、そうい
 236 うのが怖いので自分は思想を持ったほう
 237 がいいと思います。
 238 (17:00)
 239 T あと五分くらいですか。もう時間はない
 240 ので、まだあまりしゃべってない人か、今
 241 の流れじゃなくてもいいですよ。
 242 [少しざわざわする]
 243 T どうですか？皆さん。なんとなく向こう
 244 でばっかしゃべってますけどこっち側の
 245 皆さんはしゃべらないですか？
 246 [再度ざわざわする]
 247 T 無理やりしゃべらそうとしてるんじゃな
 248 くて、何か思いついたことがあればぜひ。
 249 そうそう、特定の人ばかり喋っていると
 250 一般に、閉じてきちゃうんですね。いろん
 251 な思い付きがあったほうがおもしろいと
 252 思う。どうですか？別に、しゃべった人
 253 でももっとしゃべりたい人は手を挙げて。
 254 T 皆さんしゃべらないなら、私がしゃべっ
 255 てもいいですか？なんか、今のけっこう
 256 おもしろいと思って、[聴き取り不可]。っ
 257 ていうのは、信念でも思想でも、まあ同じ
 258 ようなものだと思うんですけど、「これ
 259 だ！」みたいなそういう未来像があるっ
 260 て人と、いやそういうのはないほうがい
 261 いんだっていう信念だけは持っている人
 262 と、何も考えてないやつ。なんか三種類あ
 263 るのかなって気もして、(長考) いや、し
 264 ました。で、意外とこの三種類の方は、な
 265 なんか、どの生き方が一番いいか意外と微
 266 妙だなという感じが、なんか私の中では、
 267 しました。...しましたね。いや、というの
 268 は、あんまりそういう固定したものを持
 269 ちたくないなと私自身は思うんですよ。
 270 思うんだけど、思うのはどうしてかって
 271 いうと、固定したものを持ちがちだから。
 272 で、持ちがちでなんかそれは、時になんか

- 273 偏見とか、なんかこうよからぬ信念みた
274 いなものも、うん、なんていうか、つても
275 のがあるような感じがするからですね。
276 だから、あんまりそういうのを持ちたく
277 ないなどは思っているんですけど、でも
278 なんかそういう風に思っている、あーど
279 うだろうな、でもなんかそれってそんな
280 にいい生き方じゃないのかなっていうか、
281 本当はもっと別のやり方があるんじゃない
282 かなって感じもちょっとしますって
283 うのが気になったかなって感じです。い
284 かがでしよう。特に皆さんしゃべること
285 がないなら,..。
- 286 (20:13)
- 287 ⑬ さっき言った三つの思想、まあ僕は全
288 部持っておいたほうがいい気がするん
289 ですけど、なんか、当たり前みたいな感じ
290 じゃないですけど、まあその3つのなかで、
291 その、それは自分の信じるモットーとい
292 うか、「こういう時は思想を持たない思想」
293 みたいな、そういうボーダーラインを決
294 めて、[聴き取り不可]、まあそっこのほう
295 が人生なんか楽なのかなって。だから、ボ
296 ーダーラインをきめて、[聴き取り不可]き
297 ます。
- 298 (21:12)
- 299 ⑭ 相手によって変えちゃえばいいんじゃ
300 ないかなって思います。そのさっき言っ
301 たように、絶対ここ譲らないぞって思っ
302 てる人に対して、ぶつかりに行っちゃっ
303 たら、決裂しちゃう、そこはちょっと[聴
304 き取り不可]ていく。で、逆にその相手と
305 「別にここは譲ってもいいかな」って思
306 っているところに、その自分の信念を持
307 ってる部分でぶつかりに行けば、なんか
308 うまく釣り合いがとれるんじゃないかと
- 309 思うので、その、人によって変えていくの
310 はありなんじゃないかなと。
- 311 (21:55)
- 312 T 他いかがでしょう。今までの流れじゃな
313 くても。あの、これ、あ、もう時間なので
314 すみません。普段別にまとめとくしない
315 んですけど、この話はもともとソクラテ
316 スの話だったんですよ。で、だから今少
317 しお話をして、信念とか、譲れない信念
318 みたいなやつ、が、結局ソクラテスはその
319 ためにある意味では死刑になったとなっ
320 てるわけですよ。だからそういうよう
321 な信念を我々が持つべきなのかというこ
322 とが今はなされてきたことなのかなと。
323 で、あともう一個あるのが、今日その話が
324 そんなになかったのは、譲れない信念
325 ってどんなものか、中身の話があんまり
326 なかったですね。中身、どんなものがあ
327 たら譲れない信念として、持つに値する
328 のか。なんか月曜日はカレーだとちょっと
329 弱いから、なんかそれはそんなに大事に
330 しなくていいんじゃないかなとか思う
331 じゃないですか。
- 332 ? 水曜日がカレー
- 333 T あ、水曜日がカレーか(笑)。いや何曜日
334 でもいいんですけど、いやわかんない、そ
335 れが大事だという感じがしなくもない
336 ですけど、でもまあさっきの人を疑わな
337 いとか、そういうほうが多分まともとい
338 うか、信念なのかなっていう、信念の中
339 身っていうのをもうちょっと話すと問題
340 になるのかなって感じはちょっとしまし
341 たね。

凡例：

T は、教師の発言。

丸数字は、学生の発言。

() 内は、ビデオの時間を表す。

[] 内は、筆者による補足。

二項係数の逆数からなる行列式について

安富義泰*, 丸山文綱**

本稿では、成分が二項係数の逆数である n 次正方行列の行列式について得られる公式を紹介する。
(キーワード: 行列式, 二項係数)

On Determinants whose entries are Reciprocals of Binomial Coefficients

Yoshiyasu YASUTOMI*, Fumitsuna MARUYAMA**

We notice the formula of determinants whose entries are reciprocals of binomial coefficients.

(Keywords: Determinant, Binomial Coefficients)

1. はじめに

以下 $C(p, q)$ (p, q は自然数) で次の二項係数、あるいは組み合わせの数

$$\binom{p+q-2}{p-1} = \binom{p+q-2}{q-1} = \frac{(p+q-2)!}{(p-1)!(q-1)!}$$

を表すことにする。

各 (i, j) 成分が $C(i, j)$ で表される n 次正方行列 C_n の行列式が次数によらず 1 であることは知られている。これは目的の行列が LU 分解により、対角成分がすべて 1 である下三角行列と上三角行列の積として表されることにより示される。これらの三角行列の非負の成分はやはり成分が二項係数である。次は $n = 3$ の例である。

$$C_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

一方で各 (i, j) 成分が $C(i, j)^2$ や $C(i, j)^3$ の場合には、行列式に共通した、素因数分解などに関するよい性質が見あたらない (いうまでもなく $C(i, j)^0 = 1$ の場合には行列式は 0^{n-1} である)。本稿では成分が逆数 $C(i, j)^{-1} = 1/C(i, j)$ である n 次正方行列 A_n の行列式について得られる公式について紹介する。

2. 公式

n を自然数とし、 A_n で各 (i, j) 成分が $1/C(i, j)$ である n 次正方行列を表すこととする。

定理 行列 A_n の行列式について

$$|A_n| = \frac{s(n)2^{n-1}}{\prod_{k=1}^n C(k, k)^2}$$

が成り立つ。ただしここで

$$s(n) = \sin \frac{n\pi}{2} + \cos \frac{n\pi}{2} \\ = \begin{cases} 1 & (n \equiv 0, 1 \pmod{4}) \\ -1 & (n \equiv 2, 3 \pmod{4}) \end{cases}$$

とする。

証明は長いため本稿では省略する。

例: $n = 3$ の場合

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1/2 & 1/3 \\ 1 & 1/3 & 1/6 \end{vmatrix} = \frac{s(3)2^2}{(c(1,1) \times c(2,2) \times c(3,3))^2} \\ = -\frac{2^2}{1^2 \times 2^2 \times 6^2} = -\frac{1}{36}$$

この場合の整合性は直接計算でわかる。

3. 補足

この公式で興味深いことは符号の付き方で、周期 4 で変化するという点であろう。(証明では自然に出てくるものの) この符号が本質的にどこから来るのかについては未確定事項である。たとえばベータ関数

$$B(p, q) = \int_0^1 t^{p-1}(1-t)^{q-1} dt$$

を使うと、 p, q が自然数の場合

$$B(p, q) = \frac{1}{p+q-1} \times \frac{1}{C(p, q)}$$

を満たすので、 A_n の (i, j) 成分は $(i+j-1)B(i, j)$ と書くこともできる。そこで (i, j) 成分が $B(i, j)$ である行列 B_n を考えてその行列式 $|B_n|$ を求めると、 $|A_n|$ のようなすっきりとした公式は得られないが、符号の付き方は同じである。

各 (i, j) 成分が $C(i, j)$ で表される n 次正方行列 C_n

* 一般教育科 (数学科) ** 東京工業高等専門学校非常勤講師

は斜め方向に考えるとパスカルの 3 角形になっていて、上と左の成分の和として成分を計算することができる。別の見方をすると、これらの 2 数の算術平均の 2 倍と考えることもできる。同様に A_n は上と左の成分の調和平均の半分として計算することもできる。

また、 $C(m, m)$ (m : 自然数) に対し、すでに C_n の LU 分解で現れており、簡単に証明できるものの、あまり知られていないように見受けられる

$$C(m, m) = \sum_{k=0}^m \binom{m}{k}^2$$

という平方和との関係式がある。こういった式との関連についても今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 砂田利一: 行列と行列式 (現代数学への入門)、岩波書店、2003 年

(2024 年 1 月 12 日 受理)

東京高専における『文章表現論』の取り組み —高専生の日本語探求—

青野順也*, 上山健太**

本稿は、東京高専において本科5年生および専攻科生を対象として開講された選択科目『文章表現論』の授業実践例を報告するものである。当科目では受講生によるプレゼンテーションと質疑応答とによって授業が進められていくが、令和4年度(2022)の取り組みとして、東京高専に在籍するフィンランド人留学生への日本語教育を題材とした「日本語学習者と学習支援」をはじめとする高専生による日本語・日本文化の研究事例を紹介する。これらの研究事例をとおして、工学を専門分野として学習活動を展開する高専生に対する教養教育・課題調査授業の成果と課題とについて述べる。

(キーワード: 東京高専, 文章表現論, 日本語探求, 日本語教育, 日本文化)

Practice of “Japanese Expressions” at the National Institute of Technology, Tokyo College; Research on Japanese for technical college students

Junya AONO*, Kenta UEYAMA**

Liberal arts education is essential for future engineers, and for technical college students to live in a globalized and diversified society. However, there are few reports on the practice and improvement of liberal arts subjects for technical college students. In this paper, we report on a practical example of the elective subject "Japanese Expressions" for fifth grade students and advanced course students in the National Institute of Technology, Tokyo College. In the class, students researched and presented their research about Japanese language and culture. Through this research by technical college students, we found the achievements and future challenges for liberal arts education in the technical college.

(Keywords: Tokyo KOSEN, Japanese Expressions, Japanese Research, Japanese Education, Japanese Culture)

1. はじめに —本稿の目的—

近年における学問の在り方を特徴付ける概念語として、「学際的」や「分野横断」を目にすることが多くなってきているが、工学を専攻する高専生の、文系科目に対する取り組みがどのようなものであるか、その実態についてはよく知られていないのではないだろうか。

また、昨今はグローバル化が叫ばれるようになって久しいが、グローバル化が進展するほど、母語や自国文化について他言語・他文化の者に説明する機会は多くなるのだから、グローバル化が叫ばれる現代にこそ、文系科目、とりわけ母語である日本語や関係する自国文化に関する知識・教養は、高専生にとっては逸することのできないものとなっていると考えられる。

本稿は以上の問題意識に基づき、東京高専(以下、本校と呼ぶ)における文系選択科目のうち、令和4

年度後期に開講された選択科目『文章表現論』(以下、当科目と呼ぶ)の取り組みを通し、工学を主たる学習対象とする本校学生による日本語・日本文化研究の成果と今後の展望とについて報告するものである。

まず第2節は当科目の授業設計・展開について述べる。続く第3および4節では、令和4年度に本科目を受講した学生による日本語研究の事例のうち、言語教育分野を中心に報告をおこなう。最後の第5節では全体のまとめをおこなう。

2. 選択科目『文章表現論』について

当科目は、本科5年生および専攻科生を対象として後期に開講される選択科目の一つである。科目名は「文章表現論」と題しているが、授業の前半は受講生に対する日本語全般への興味喚起として、漢字伝来や万葉仮名表記の文献を取りあげ、

*一般教育科 **長岡技術科学大学

日本語史を主題とした講義形式で進められる。

例年、十世紀における平仮名の発生まで講じたあたりで受講生による課題発表型授業に切り替わり、受講生によるプレゼンテーションと質疑応答を中心に進められていく。受講生は発表後、自身のプレゼンテーション内容をレポートにまとめて提出し(口頭発表の文章化)、プレゼンテーションの得点とレポートの得点とをそれぞれ50%換算して成績評価がなされる。

工学を専攻する受講生に日本語・日本文化を主題としたプレゼンテーションを課するのは難題のように感じられるかもしれないが、例年、意欲的な研究発表事例が見られ、なかでも令和4年度はグローバル化の渦中において将来を模索・展望していく学生にとって有意義といえる発表事例が散見された。

まず次節では言語教育分野の事例として、本校に在籍するフィンランド人留学生への日本語教育の実践例を発表した「日本語学習者と学習支援」を取りあげる。続く第4節では、言霊文化などについて発表した「日本の禁忌」と、他言語の比較をとおして母語である日本語を考察した「日本語とは何か」の概略を紹介していく。

3. 日本語研究事例「日本語学習者と学習支援」

当科目での研究課題として、日本語学習者への日本語教育の方法探究、および自ら携わった日本語教育への応用について検討、調査を行った。本節ではまず、このテーマに関する研究内容とその結果について、研究課題発表で用いた資料を交えて述べる。そのあと本科目授業時間内で行った、研究課題発表について述べる。

3.1 研究背景・目的

本校は、令和4年度、フィンランドのメトロポリア応用科学大学から3人の留学生を受け入れている。彼らは半年間の留学期間の中で、リサーチプロジェクトを遂行しつつ、日本国内での生活や日本文化体験をしながら過ごしていた。留学生たちの日本生活が始まったころ、留学生の方から日本語能力の向上を目的とした日本語講習を開いてほしいという要望があった。筆者はこの日本語講習の講師として参加することができた。しかし、実際に講習を始めてみると、留学生に効果的に日本語を教授する難しさを感じた。

そこで当科目の日本語研究課題として、この日

本語講習をより有意義にするための方法の調査および改善を設定した。日本語教育についての文献を調査することで、日本語講習改善のための具体的な方法をまとめた。さらに、留学生へのアンケートを実施し、講習内容の見直しを行った。

3.2 文献調査

文献調査では^{1),4),5)}、日本語学習者の日本語学習・運用について調査した。また、日本語学習者に対して日本人の行える支援方法を調査した。

日本語学習者は、日本語の複雑さから学習に困難を抱えることが多いことがわかった。そのうえで、日本語学習者が理解しやすい「やさしい日本語」を使うことで、日本語学習者に日本人の意思が伝えられることを理解した。

日本語を教える際は、日本語に対する学習目的、学習の現状を把握し、目標を立て、学習の軌道修正をすることが重要であると分かった。言語学習においては、学習者の学習目的に沿って学習を進めると、学習効率が上がることも示されていた。

3.3 アンケート調査

文献調査¹⁾により、効果的な日本語講習のためには、学習者の学習目的、状況に合わせて日本語講習の方向性を軌道修正することが必要であることが分かった(図1には、日本語の効果的な教育プロセスについての説明スライドを示す)。そこで学習者の日本語学習目的、学習状況の把握を行うために、日本語講習の留学生3人に対してアンケート調査を行った。一部を抜粋して説明する。

3.4.1 日本人のすべき支援 23/46

学習者が本当に求めている支援は?[2]

- (1) 学習ニーズ確認
- (2) 支援者・学習場所探し
- (3) 目標/学習計画たて
- (4) 第三者の学習相談先
- (5) 学習・評価・軌道修正
- (6) 日本語以外の問題対応



図1 日本語教育の効果的な教育プロセス (赤字は、アンケートのねらいにあたる)

まず、留学生の日本語の学習目的を把握する質問を行った。主な言語学習の目的を列挙し、選択

肢形式で選んでもらった。

その結果、日本語の発音向上, 読み書き, 敬語や方言といった項目を差し置いて、「文法知識の向上」, 「語彙の増加」, また「日本語を流ちょうにしゃべれるようになること」が主な学習目的として挙げられた。このことから、留学生たちは、日本語学習を通して、日本語によるコミュニケーションの幅を広げたいと考えているということが読み取れた。

次に、留学生3人に学習状況の自己評価を尋ねる質問をした。「読む」「聞く」「話す」「書く」の4技能別に、日本語能力の自己評価項目を3つ尋ね、「できる」「できるかわからない」「できない」の三段階で答えてもらった。例として、図2に「読む」の技能に関する質問項目と、アンケートの結果を示したスライドを示す。「できる」を1点、「わからない」を0.5点、「できない」を0点として換算している。

図3に、図2と同様に4技能について集計した自己評価項目の合計評価値を示す。

技能のため自信があるが、日本語を書く機会は少ないため、苦手になる。

そのほか、アンケート中では、留学生の日本語講習に対する要望を得ることができた。その中では、日本語のリスニング練習が学習に効果的であった、宿題を課してほしい、文法を強化してほしい、日本語を用いたゲームが楽しいといった意見が得られた。語彙や文法を中心としつつ、留学生が能動的に取り組めるコンテンツを設けることが重要であるとわかった。

3.4 講習改善

アンケートの結果、留学生の日本語学習の目的が明確となった。語彙や文法といった実用的な日本語のルールを学習することを目的に、日本文化、遊びも織り交ぜるように講習を改善した。

例えば、日本語文章の文意把握を目的として、会話文の読み聞かせ練習を行った。留学生が文章を見ない状態で講師が会話文を音読し、留学生同士で会話文の内容やキーワードなどを議論してもらった。留学生が苦手としていた「聴く」能力の補強を通して、日本語の円滑な運用を促した。

そのほか、日本のアニメーションを用いた、独特な日本語の言い回し、オノマトペ、難度の高い文法解説を行った。また、日本語によるライティング練習の講習、文法問題や新聞の読解の宿題を導入した。

図4に、4技能別能力の自己評価について、講習改善前と講習終了時に行ったものの比較を示す。

4.2.4 アンケート結果 35/46

日本語能力-読む *0.5はどちらともいえない

Level	質問	Yes[人]	No[人]
1	平仮名・片仮名が読める	3	0
2	掲示板が読める	1.5	1.5
3	新聞記事が読める	1	2

図2 留学生の日本語を読む能力の自己評価

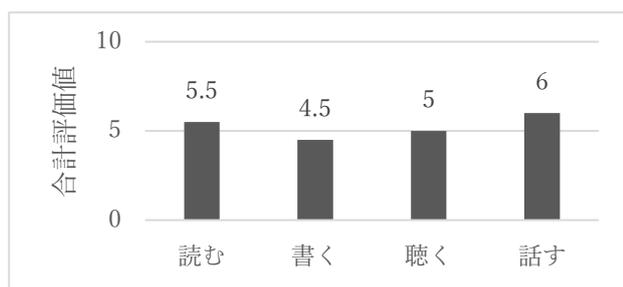


図3 4技能別日本語能力の自己評価合計値

「話す」の技能が6点と高く、「書く」の技能が4.5点と低かった。こうした傾向が現れる要因は、それぞれの技能を使う機会の頻度にあると考えられる。「話す」、「読む」は、日本にて一人で買い物をしたり、外出したりするときに多く使う

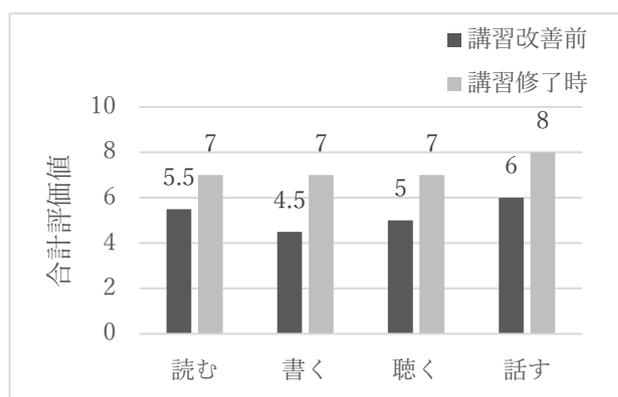


図4 講習改善前後の4技能別日本語能力の自己評価合計値

いずれの技能も1.5~2.5点、合計値の改善が見られた。留学生からは、講習が日本語能力向上に役立った、印象に残った、楽しかったなどの声も

聞かれた。また講習だけではなく、高専内外での日本での様々な体験によって、各技能の向上に成功したといえる。

日本語講習の改善によって、より留学生のニーズやレベルに沿った講習を提供し、彼らの日本語力向上に講習を役立てることができた。

3.5 研究課題発表

以上が、当科目の授業課題を通して調査・研究した事項である。ここからは、授業内で行われた課題発表について言及する。課題発表は課題研究の途中で行われたため、本稿 3.3 節までにあたる、授業改善前のアンケート結果について発表した。

課題発表では、日本語教育に関する文献調査、日本語講習を受講した留学生へのアンケートという二つの主題で発表を行った。

文献調査では、日本語学習者の日本語学習・運用についての調査結果を、例示やイメージ図を交えて説明した。例えば、やさしい日本語についての解説では、日本人の使う日本語と、日本語学習者にとってわかりやすい日本語とが明確に違うことを強調した。

授業改善前のアンケート結果は、図や表で結果を示したうえで、アンケート結果の考察と改善方針を口頭にて説明した。日本語講習の講師としての主観や経験、留学生からの声も交え、アンケートの実効性をアピールした。

3.6 課題発表の聴き手の反応

課題発表では、質疑応答の時間が設けられており、主に日本語講習に関する質問が多く寄せられた。

まず、日本語講習の受講者である留学生の、日本語の学習状況について質問がされた。留学生は来日前に、非ネイティブの先生から二年間日本語学んでいたことを説明した。また、日本語を書くときは、紙ではなくタイピングで書くことが多いことについても触れた。

具体的な日本語講習の改善方法について質問を受けた。発表当時は具体的な改善方法の実践には至っていなかったものの、能動的に日本語を学べるアクティビティーや、アニメーションを用いた日本語指導についての方針を説明した。

次に、聴き手の発表に対する反応を紹介する。

- やさしい日本語では、簡単な語彙を用いることだけでなく、平易な文章構造を用いることが重要である点が参考になった
- 日本の幼児表現であるオノマトペが、日本語学習者にとって難しいことが意外だった
- 発表者の日本語講師としての実体験に基づいた考察、発表が興味深い
- 各学習者が、それぞれの日本語学習目的を達成できる水準まで能力を向上させる、実用的な手法の探究をしてほしい

3.7 課題研究のまとめと受講者としての感想

当科目での課題研究を通して、日本語講習の改善のための具体的な方法の調査と実践を行うことができた。文献調査において一般的な日本語教育現場でのノウハウを調査し、調査内容を基に日本語講習受講者へアンケート調査をすることによって、留学生のニーズに沿った教育手法を提案することができた。その結果、留学生の日本語学習効果が高まり、日本語能力の向上に、講習を役立てることができたと考えられた。

課題研究発表では、それら調査の結果を例示、図表化し、さらに発表者自身の体験に基づいて説明した。このことによって、聴き手は、調査内容について理解し、日本語講習の改善について能動的に考えてくれた。

当科目で課題研究に取り組んだことで、普段深く考えない日本語について調査することができた。日本語についての文献は、普段の専門科目に関連した文献と異なり、グラフや図ではなく、例示や表を用いた情報集約がされていたことに気が付いた。課題発表でも表、例示を用いたスライド資料に、経験に基づいた説明を行っており、普段のグラフや図を用い、事実に基づいた工学的な説明とは異なった。その中でも、発表する内容の取捨選択や調査の順序、発表の流れを工夫することで、発表の聴き手に伝わる発表をすることができた。また、課題研究が「日本語について」と広く設定されたことで、自由度の高い調査項目の設定と絞り込みをすることができた。このことによって、自分で調査の流れ、進め方を計画することができた。

当科目において、普段とは違うカテゴリでの調査を行うことで、新たな調査方法、表現を学ぶことができた。今後も日本語をはじめとして広い

分野について興味を持って調査し, 知見を拡げ続けたい。

4. 日本語研究事例「日本における禁忌」および「日本語とは何か」

第3節では, フィンランド人留学生への日本語教育の実践例を課題とした日本語研究事例を報告した。令和4年度の当科目は本科5年生3名に加え, 2名の専攻科2年生も受講している。本節では, その他の受講生にはどのような取り組みが見られたのかを報告する。

まず, 本科5年生の事例を挙げる。当科目では受講生の発表に至るまでは教員による講義形式で授業が進められており, その後に展開される受講生によるプレゼンテーションにあたっては, 教員による日本語史概説の内容を承けたものでも良いし, また, 各自の興味関心に基づいたものでもよいとしているが, 日本語・日本文化ということで取りあげた「言霊」文化の概説を承け, 日本文化における禁忌(タブー)を取りあげた発表も見られた。この発表では, 日本における儒教・仏教の伝来と日本神話に与えた影響から始まり, ハレ・ケおよびケガレ概念, そして実名で呼ぶことの忌避, 斎宮忌詞など, 日本における禁忌を広範囲に亘って議論したものであった。

また, 専攻科2年生には「日本語とは何か」という問題設定による発表もあった。この発表における調査項目は下記のとおりであった。

「日本語とは何か」

1. 人類の移動と言語の発生
2. 祖語
3. 語族
4. 日本語の起源
5. 日本語の特徴
6. 英語、スペイン語、中国語、韓国語との比較
7. 日本語のアイデンティティ

とりわけ6においては「子音・母音数、音節の長さ、声調、主語・目的語・動詞の語順」といった観点から日本語と各言語との比較をおこない、オノマトペの豊かさや敬語表現といった特筆事項が見られるものの、日本語はそれほど難解な言語ではなく、確たる独自性としては「文字の多様さ」が挙げられるということであった。

英語をはじめとする他言語学習が進む現代にあつては母語を相対化する機会が頻繁にもたらされると思われるが, この発表は, こうした経験を十全に活かすことのできたものであった。発表に携わった受講生は, 「日本語は美しい」といった類の感覚・主観的な閉じた観点からの調査ではなく, 他言語との比較という基準によって「文字の多様さ」に日本語の特殊性を見いだすという客観的・分析的な結論に辿り着くことができたのである。

5. おわりに

以上, 高専生の日本語研究事例をみてきたが, 当科目における高専生の取り組みは, 実用的な日本語教育分野から始まり, 日本語を支える日本文化領域を探るもの, そして日本語の系統や多言語との比較といったように, 広範囲に及ぶものであった。当科目は高学年の5年生と専攻科生を対象として開講されているが, 小林, 鈴木, 青野(2021)²⁾および鈴木, 小林, 青野(2022)³⁾においても指摘されているように, 文系科目に対する学生の意欲的な取り組みは, 低学年にあつてもしばしば見られるものである。今後は教養教育・課題調査授業の発展にあたっては学生の興味関心を更に導出していくかが課題となってくる。

この課題解決にあたっては, 日頃より耳目に触れる社会現象に注視する姿勢や減退が叫ばれる読書習慣の回復, 異文化の人々とコミュニケーションをとろうとする意欲など, 必要とされる事項は挙げ切れないほど存在しており, 一朝一夕に成し遂げられるものではなく, 常日頃の授業プログラムに加え, クラス運営におけるホームルーム時間を有効に活用していくことなど日々の地道な活動こそが捷徑であると考えられる。当科目の日本語教育や日本文化の研究事例からは, 特に科目間の連携を密にしていくことによって得られるものが大きいことが伺えた。このことを今後の課題としていっそうの授業改善に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 大島有史・花立幸雄, 田島弘司: 中国帰国者のための日本語 Q&A, 文化庁, 1997
- 2) 小林礼実, 鈴木慎也, 青野順也: 東京高専における遠隔授業の取り組み—文系科目(英語, 社会, 国語)を例として—, 東京工業高等専門

学校研究報告書第 52 号, pp. 1-10, 2021

- 3) 鈴木慎也, 小林礼実, 青野順也: 東京高専における遠隔授業の取り組み—文系科目(英語, 社会, 国語)を例として—(2), 東京工業高等専門学校研究報告書第 53 号, pp. 76-85, 2022
- 4) 野田尚史, 迫田久美子, 渋谷勝己, 小林典子: 日本語学習者の文法習得, 大修館書店, 2001
- 5) 吉開 章: 入門・やさしい日本語 外国人と日本語で話そう, アスク出版, 2020

(2024年1月12日 受理)

超音波振動援用きさげ工具の開発 — 振動ホーンの開発と初等実験 —

堤 博貴*

きさげ加工は、手仕上げによる表面加工法であり、平面度と潤滑性能に優れた定盤面や工作機械摺動面を仕上げることができる。ワーク面に光明丹と呼ばれる赤い顔料を塗布して、他の模範面とすり合わせながら「当たり」をとり、光明丹の濃淡で高い部分をみわけて、その部分を加工することで平坦な面を仕上げることができる。きさげ加工は長年の習熟が必要な熟練技能であり、近年、後継者不足が深刻な分野の一つとなっている。筆者はきさげ加工と超音波振動を有機的に結合し、初級者でも容易に利用できるように汎用性を高めた超音波振動援用きさげ工具の設計開発を試みた。これによりきさげ加工時の切削力を軽減し、他方、加工精度を向上させることで、初級者でも熟練技能者のような高精度な加工を実現する。

(キーワード：超音波振動、きさげ作業、表面仕上、熟練技能)

Development of an Ultrasonic Vibration-Assisted Scraping Tool — Development of the Vibration Horn and Preliminary Experiments —

Hiroataka TSUTSUMI*

Scraping is a manual surface finishing method that offers superior flatness and lubrication. "Kohmei-tan", a red pigment, highlights "high spots" on surfaces, guiding craftsmen to achieve a flat finish. However, expertise in scraping is dwindling, leading to a shortage of skilled successors. To address this, recent innovations have merged scraping with ultrasonic vibrations. This ultrasonic-assisted scraping tool lowers the cutting force and boosts accuracy, allowing even beginners to achieve results comparable to seasoned craftsmen.

(Keywords: Ultrasonics, Scraping, Fine finishing, Skilled worker)

1. 諸論

1.1. 研究背景

きさげ加工は、手仕上げによる表面加工法であり、平面度と潤滑性能に優れた定盤面や工作機械摺動面を仕上げることができる。ワーク面に光明丹と呼ばれる赤い顔料を塗布して、他の模範面とすり合わせながら「当たり」をとり、光明丹の濃淡で高い部分をみわけて、その部分を加工することで平坦な面を仕上げることができる。

きさげ加工は長年の習熟が必要な熟練技能であり、近年、後継者不足が深刻な分野の一つとなっている。この問題に対して、これまでいくつかのアプローチがなされてきた。山根らによってきさげ加工への産業用ロボットの応用に関する研究がある^{2,3,4)}。筆者の研究室でも同様な取り組みをおこなってきた⁵⁾。

きさげ加工は熟練技能であり、今なお人間の手で行われている(図1)。腰に大きな負担がかかることから職業病の原因となっている。

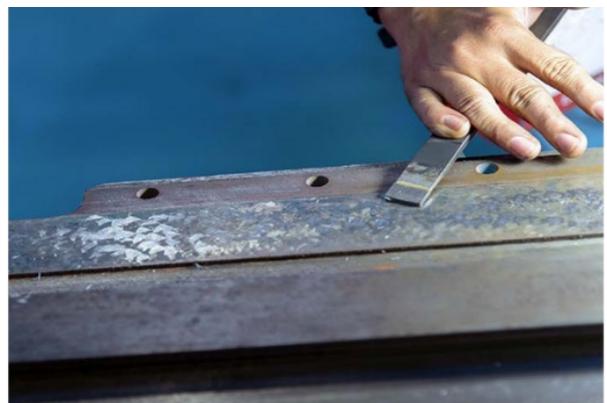


図1 State of scraping¹⁾

* 機械工学科

1.2. 超音波切削加工とは

一方、近年、工作機械加工において超音波を利用することで金属材料から一般的に加工が難しいとされるセラミック材や超硬材等のハイテク材の高精度、高効率な加工を実現する試みがある。磯部らは旋盤を用いて超音波振動援用切削理論に関する研究をおこなった^{6,7,8)}。実用化事例としては、超音波加工と HSC ミーリング加工を融合した超音波加工複合機 ULTRASONIC シリーズがある。(株式会社 DMGMORI 精機による dmgmori.co.jp)

1.3. 研究目的

前述したことを踏まえ、筆者はきさげ加工と超音波振動を有機的に結合し、初級者でも容易に利用できるように汎用性を高めた超音波振動援用きさげ工具の設計開発を試みた。これによりきさげ加工時の切削力を軽減し、他方、加工精度を向上させる。従来の研究では、フラットな板を 28kHz の振動にさせることで、なめらかな表面の創生が可能となった⁹⁾。

本報告では、実用化に向けた取り組みとして、ランジュバン型振動子用い、CAE により高速振動時の刃先の変位が最大となる形状に設計した。また、2 種類のきさげ刃先を試作し、実験から工具の性能を高めた。切削理論を合わせて振動切削のメカニズムと効用について考察した。

2. 超音波振動援用きさげ工具の開発

2.1. 原理と効果

図 2 に通常のきさげ加工と超音波振動援用きさげ工具の加工メカニズムの比較をしたものを示す。一般のきさげ加工では、大きな加工力で食い込み→逃げを繰り返すため加工力の変動が非常に大きく、結果、表面が荒くなってしまう。一方、超音波振動援用きさげ工具では、ホーンにより工具を強制的に切削方向に振動させることで、ワークと接触・非接触を繰り返し、断続的な加工となり、刃先鋭利化、平均加工抵抗低減効果が期待できる。また、小さな力で加工が進行するため、加工力の変動が小さく、表面をなめらかに仕上げる効果があると考えられる。

2.2. 臨界切削速度の検証

振動の速度は、振幅を α m、角速度を ω rad/s とすれば、 $\alpha\omega\cos\omega t$ で表される。振動速度は

$-\alpha\omega\leq\alpha\omega\cos\omega t\leq\alpha\omega$ の範囲となる。 $\omega=2\pi f$ となることから切削速度を v 、振動数を f とすると以下の式が得られる。

$$v = 2\pi\alpha f \quad (1)$$

この値は臨界切削速度と呼ばれ¹⁰⁾、切削速度を上回れば振動切削が可能となる。ここで、仮に振動周波数を $f=28$ kHz、振幅を $2\ \mu\text{m}$ とすれば、 $v=0.176$ m/s となり、一般的なきさげ加工の 0.05 m/s と比べて十分に高速であることがわかる。

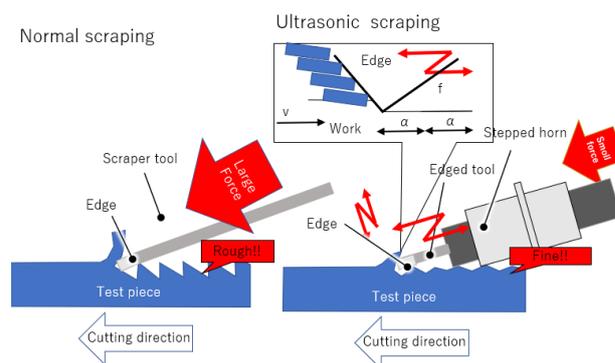


図 2 Overview of ultrasonic cutting

2.3. 超音波振動援用きさげ工具の設計

電圧を加えると伸び縮みするランジュバン型振動子(本田電子 HEC-2528P2BF)を組み込み、振動子が共振する周波数に合わせて電圧を加えると振動を発生する。共振周波数は周波数に対するインピーダンスを測定し、インピーダンスの極小値を測定することにより求められる。振動子にねじ止めした超硬の刃先を振動させる。金属ホーンは端面の面積比に応じて変位を拡大し刃先の変位が最大となるような構造をとっている。

本体および振動部はアルミ (A5052) を用い、工具は炭素鋼、刃先には一般的なきさげ加工に用いられる超硬チップを用いた。

2.4. 工具刃先の設計

動主分力方向 1 軸振動、主分力+背分力の 2 軸楕円振動の 2 種類の刃先を開発した。工具の設計図を図 3、図 4 に、実機の写真を図 5 に示す。超音波振動を発生させる振動子を保持するためのホルダーを作成し、振動の節の部分を持てるよう作成した。図 3 の工具は、きさげ工具とねじを

堤：超音波振動援用きさげ工具の開発

溶接し、ねじと振動子をダブルナット方式により締結した、以下 Type A（非対称設計）と呼ぶ。図 4 の工具は、刃物を円筒状のアルミと焼き嵌めし、それを振動子とねじ止めした。円筒状のアルミは刃先が振動の腹になるよう設計をおこなった。以下 Type B（対称設計）と呼ぶ。

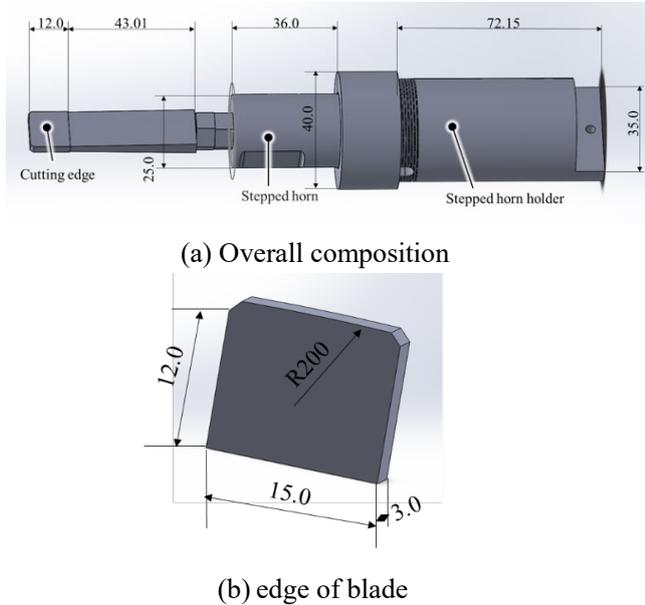


図 3 Type A (Design of asymmetric tools)

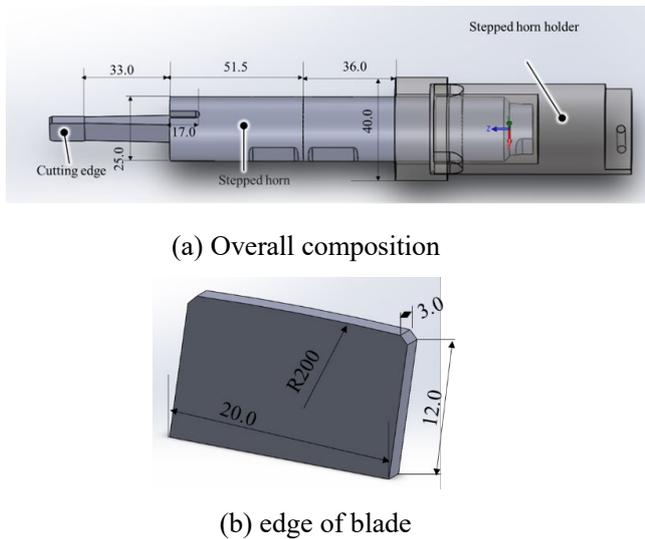


図 4 Type B (Symmetric tool design)



図 5 Tools created

2.5. 振動解析の結果と考察

振動の様子を図 6 に示す。設計対象を ANSYS で解析した結果を図 7 示す。解析の結果 26.337 kHz にアドミタンスが最大となる共振点が存在し、共振点での振幅は約 3 μm であることが分かった。

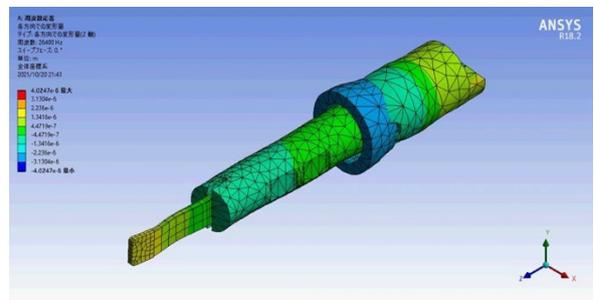
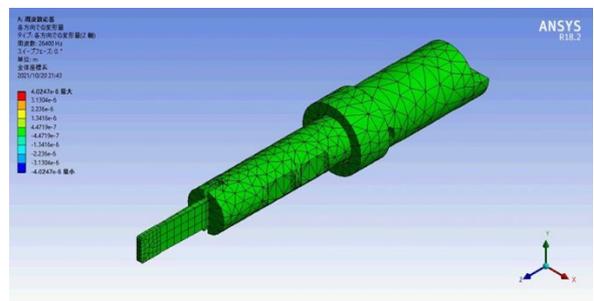
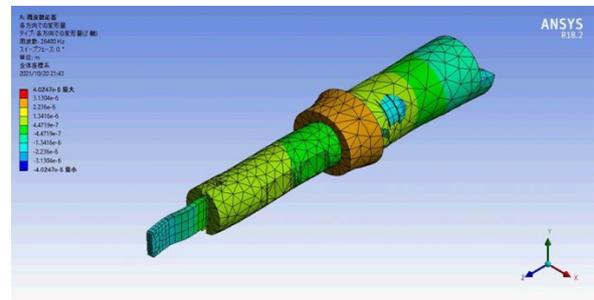


図 6 Tool vibration simulations results

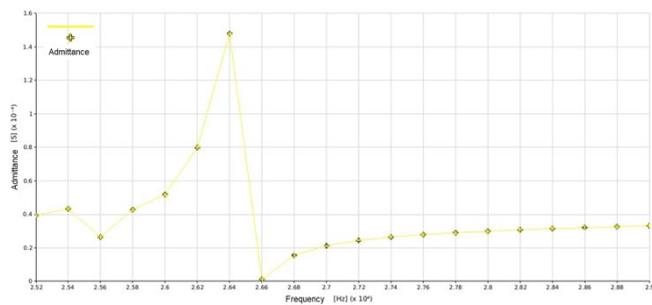


図 7 Frequency response simulation

2.6. 動作の検証

周波数特性分析器で周波数応答を解析した結果を図 8, 10 に、工具の振動方向を図 9, 11 に示す。振幅の計測はレーザードップラー振動計（小野測器 LV-1720A）を用いて計測を行った。解析の結果、Type A は共振点が 3 点（24.765 kHz, 26.337 kHz, 27.419 kHz）あり、26.337 kHz が最大の共振点であることが分かった。その周波数での全振幅は切削方向に 1.92 μm 、背分方向に 1.28 μm の 2 方向あることが分かった。

一方、Type B の共振点は 1 点(24.84 kHz)であることが分かった。その周波数での全振幅は切削方向のみで 1.96 μm であることが分かった。

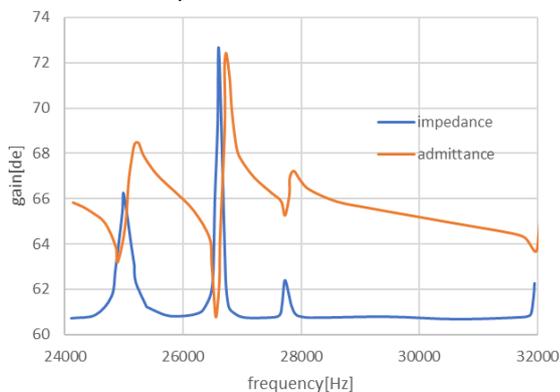


図 8 Frequency response of type A

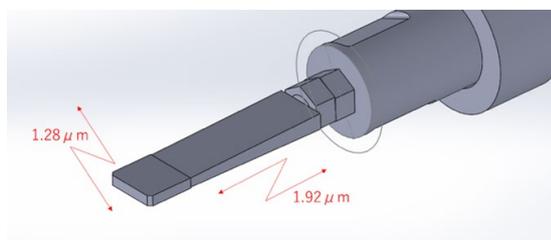


図 9 Full amplitude of type A

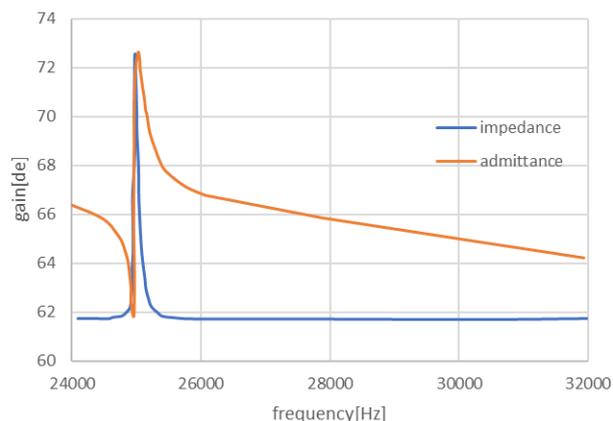


図 10 Frequency response of type B

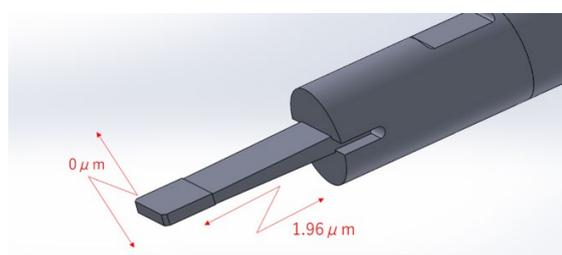


図 11 Full amplitude of type B

3. 実験方法

3.1. 振動発生装置とシステム構成

自動きさげ加工実験では、ランジュバン型振動子(本田電子 HEC-2528P2BF)と波形生成装置(DOUBLE Research & Development PZD-1)と NC 汎用立てフライス(WASHINO)を用いて自動送り実験を行った。実験装置の概要を図 13 に示す。試験片としては、アルミニウム合金 A5052 プレートを用いて切削実験を行った。工具は超硬製スクレーパーを用いた。切削速度は 200 mm/min とした。高速度カメラ(Keyence)を用いて切子排出の観察を行った。



図 12 Amp and function generator

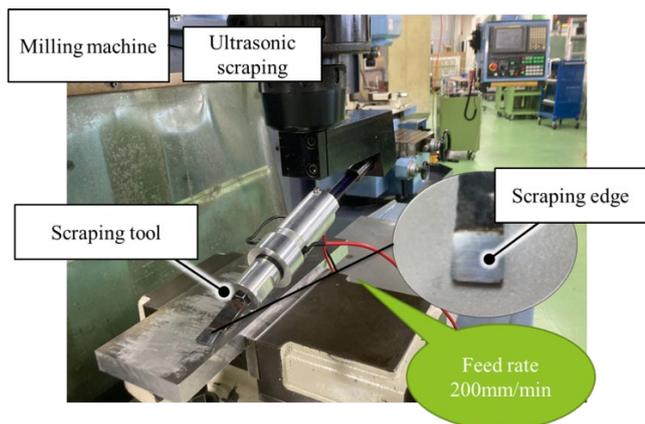


図 13 Schematic illustration of scraping experiments

実験後の評価は、表面粗さ測定器（ミットヨ SV-3000 CNC）を用いて加工面の算術平均粗さ Ra と顕微鏡観察にて行った。測定長さは 4.8000mm，測定ピッチは 0.0005mm とした。

筆者が独自に製作したファンクションジェネレータ(図 12)を用いて振動子が共振する周波数の電圧を加えることで、振動を発生させる。動作検証の結果から非対称設計工具は 26.330 kHz，対称設計工具は 24.840 kHz，振幅は 150 V で実験を行う。

3.2. 実験条件

NC フライス盤のチャックの回転を固定し，治具を利用してきさげ工具を取り付け，テーブルを上下に動かし，切り込みを与えて水平方向に自動送りを与える。最初は超音波を付与せずに切削し，途中でファンクションジェネレータにより振動を付与させることで同条件での比較実験を行った。テーブルの送りは 200 mm/min に設定した。10mm 幅で加工できるようにスクレーパーをワークに押し付けた。

4. 実験結果

4.1. 加工表面の写真

Type A，Type B のそれぞれできさげを行った表面の写真を図 14，図 15 にそれぞれ示す。慣用きさげ加工（超音波振動なし）に比べて超音波振動きさげでは切削痕の幅が広がっていることから切削量が増加していることがわかる。特に楕円振動（二軸楕円振動）に関しては切削痕が一軸振動と比べて一直線状になっていることから切り込み量が安定していることが分かる。これは，高速振動により切刃の食い込みが容易になり，切削時の加

工力の変動が少なく，また切り屑排出性が向上したことに起因すると考えられる。

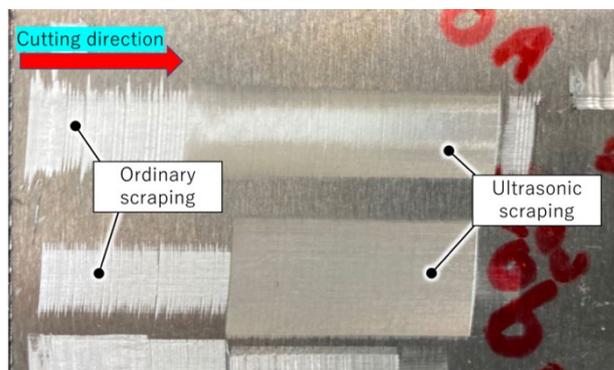


図 14 Ultrasonic scraping (Type A, Two-way)

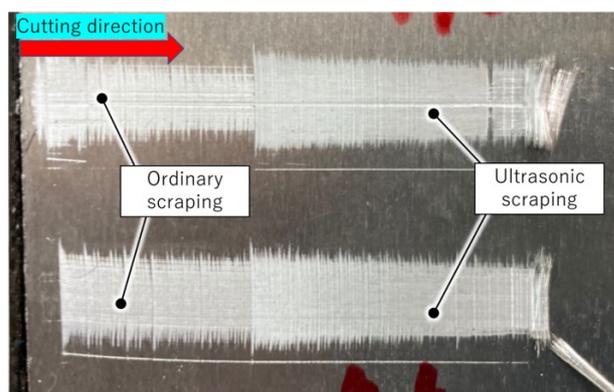


図 15 Ultrasonic scraping (Type B, One-way)

4.2. 顕微鏡写真と表面粗さ

図 16～図 18，は表面の顕微鏡観察結果であり，図 16 は Type B で無振動，図 17 は Type B で振動，Type A で振動させて，それぞれきさげ加工したものである。図 16 から無振動では 2～3 μm 程度のピッチで切削方向と垂直に切削痕が発生した。表面粗さ Ra は，それぞれ，1.2766 μm ，0.8073 μm ，0.4224 μm であった。

4.3. 高速度カメラによる観察

図 19～図 21 に，高速度カメラによる撮影の結果を示す。図 19 より慣用きさげでは切り子が断続的に排出した。切り子が線状に分かれているため慣用きさげでは，きさげ工具の沈み込みと跳ね上がりが見られていることが確認できる。一方，図

20 では超音波振動きさげ（一方向振動）では切り子が連続的に排出されていることが確認できた。また、図 21 から、二軸楕円振動では切り子が連続的に排出されると同時に粉碎され切り子が飛ぶ様子が確認できた。

4.4. 表面粗さの測定

振動なしと一方向振動、二方向振動で加工した表面の算術平均粗さの平均値を表 1 に示す。一軸振動では、表面粗さが悪化しているがこれは荷重が足りなかったために無振動時に切削に至らなかったためであると考えられる。

刃の角度を大きくした場合刃を寝かした場合に比べ、表面粗さが悪化した。一軸振動、二軸振動両方において通常のきさげと比べ切り込み量が増し、比切削速度が向上したにも関わらず同等程度の表面粗さで加工することができた。

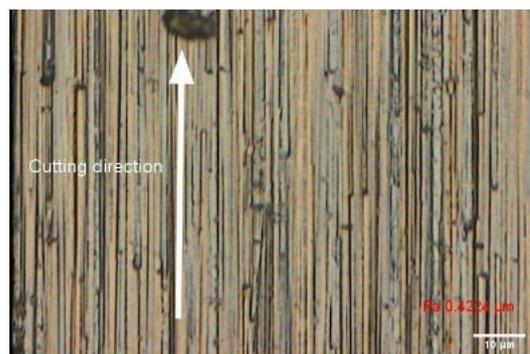


図 18 Micrograph scraping(Type A, Two-way)

表 1 Arithmetic Average Roughness Height

	One-way vibration		Two-way vibration	
	Nonvibration	Vibration	Nonvibration	Vibration
Ra[μm]	0.468	0.535	0.462	0.464

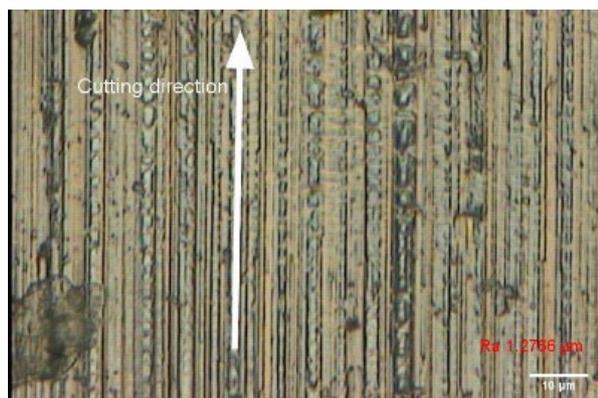


図 16 Micrograph ordinary scraping

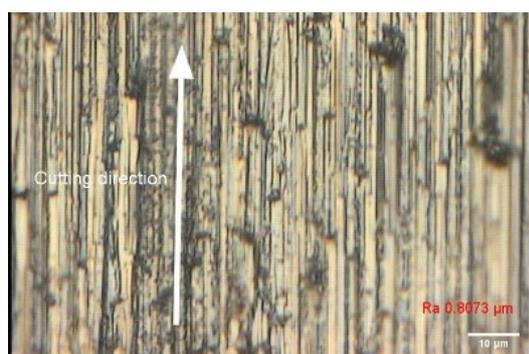


図 17 Micrograph scraping(Type B, One-way)

5. 考察

背分方向の振動が切削量と表面粗さを向上させたと考えられる。

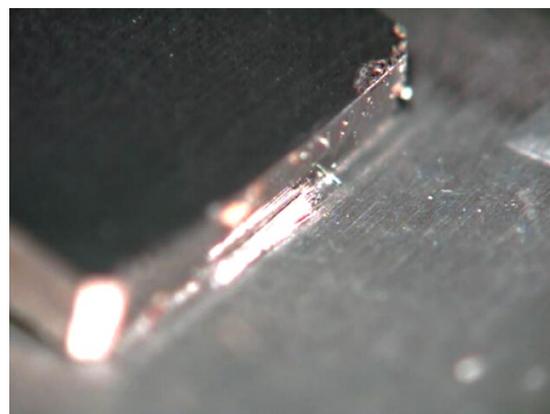


図 19 Chips of ordinary scraping

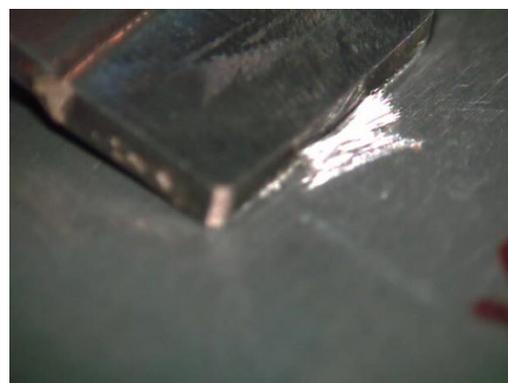


図 20 Chips of one-way vibration

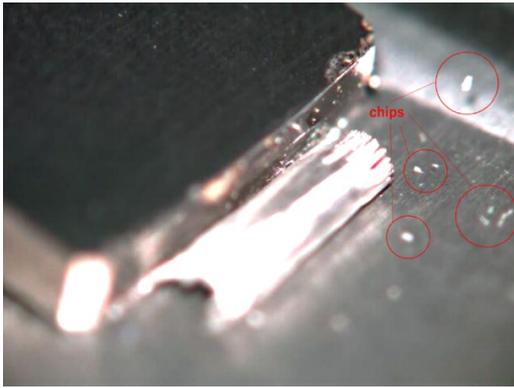


図 21 Chips of two-way scraping

また、高速度カメラによる観察から二方向振動では、一方向振動に比べて切削力の向上が見られ、切子の粉碎が確認できた。慣用きさげにおいて、刃先に切りくずがたまり刃に上向きの力がかかることにより、刃先が跳ね上がり、切りくずが排出され刃がもとに戻る動作を繰り返すことにより周期的なピッチのむしれが発生し、表面粗さが悪化したと考えられる。一方、超音波振動援用を与えた場合、刃先がワークと接触・非接触を繰り返し切り子排出が円滑になるためにむしれの発生が減少したと考えられる。さらに、刃物と切削方向の角度差が大きい場合、刃先がワークにめり込むため表面粗さが悪化するため刃物の角度が浅いほうがよいことが分かった。また、平均切削抵抗低減効果については、切り子を粉碎し排出を円滑にする二方向振動が特に有効であると考えられる。

6. 結論

超音波振動援用きさげ加工を設計・制作した。軽荷重でアルミ材をワークとして表面加工し、以下の結論を得た。

- 1) TypeBにて 24.84 kHzにおいて、切削方向に約 1.96 μm で振動する工具を設計製作できた。
- 2) 刃先取り付け部を上部下部で非対称形状にしたところ、切削方向・背分方向の2方向へ振動(楕円振動)し、一方向振動よりも良好な加工表面を得た。高速度カメラの映像から切り子の粉碎も確認できた。
- 3) 仕上げた表面を観察したところ、慣用加工と比べて超音波振動援用きさげは、むしれが少なく、表面粗さも良好であった。

以上のことから、本きさげ工具は軽荷重の加工においては表面性状を良くすることがわかった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導ご鞭撻を賜りました。

実験の実施にあたり、長岡技術科学大学の磯部浩已教授からは実験機器の提供、ご指導をご教示いただき感謝の念に堪えません。ありがとうございました。

長岡技術科学大学の高島考太様からは Type B (対称設計)きさげ工具について設計、解析に協力いただきました。厚く御礼を申し上げ、感謝する次第です。

参考文献

- 1) ものづくりエンジニアのためのはじめての工作機械, <https://monoto.co.jp/>, 閲覧 2022 年 2 月 2 日
- 2) 山根 八洲男ほか：定盤のきさげ加工への多関節型ロボットの応用, 昭和 63 年度精密工学会秋季大会学術講演会, p.55-60, JSPE-55-10-1787
- 3) Tung-Hsien Hsieh & Wen-Yuh Jywe & Ying-Chien Tsai & Meng-Tse Lee : Design , manufacture , and development of a novel automatic scraping machine , Int J Adv Manuf Technol (2017)
- 4) 杉野 直規, 山根 八洲男, 佐久間 到, 鳴瀧 則彦：きさげ作業のデジタル化とその知能化(第 1 報), 精密工学会誌(2003) 69 巻 7 号 p. 949-954
- 5) 堤 博貴, 羽田 千晶, 小池 大地：当たり面認識システムを有する自動きさげ盤の開発 (第 4 報), 精密工学会誌(2017) 83 巻 5 号 p. 468-473
- 6) 磯部 浩已：超音波切削における現象可視化と切削加工の応用展開, 日本工業出版機械と工具：生産加工技術を支える 11(1), 22-26, 2021-01
- 7) 磯部 浩已ほか：超音波振動切削による微細テクスチャの高速創成:第一報, 精密工学会学術講演会講演論文集 2021S(0), 252-252, 2021
- 8) 原 圭祐：超音波切削による機能性テクスチャ面の高速創成加工 (第 1 報), 精密工学会学

術講演会講演論文集 2020A(0), 137-138,
2020

- 9) 堤 博貴, 菊間 悠介, 磯部 浩己, 福田 勝己: 超音波きさげ工具の開発, 精密工学会学術講演会講演論文集 2011A(0), 261-262, 2011
- 10) 鬼鞍 宏猷, 神 雅彦: やさしい超音波振動応用加工技術, 養賢堂 (2015), P72

(2023年8月20日 受理)

外部演算回路を用いた高機能電力変換器による 自動演算システムの構築

綾野秀樹*, 近江慎人**, 塚越達矢*

本研究では、比較的安価なシングルボードコンピュータを接続した自律型電力変換装置の実現可能性を評価するものである。この装置は、オシロスコープと同等の精度で出力電流や負荷電圧を測定し、継続的にデータを蓄積する。さらに、このデータを処理して制御定数を自動調整する。一般的な電力変換装置は、設計者があらかじめ設定した制御定数で動作することが多く、駆動環境の変化や経年劣化、部品のばらつきに対する調整は限定的にしか実施できない。これに対し、本方式では、測定・蓄積したデータから特徴量を抽出し、最適な制御定数を自動的に計算・調整する。本稿では、上記を実現するために新たに外部演算回路と制御回路基板を製作したことを示す。さらに、一例として、デッドタイムひずみ補償の補正に適用した場合の評価結果を示す。

(キーワード：電力変換装置, 自動調整, シングルボードコンピュータ, デッドタイムひずみ補償)

Construction of an Automatic Calculation System in High-Performance Power Converters with an External Computational Circuit

Hideki AYANO*, Makoto OHMI**, Tatsuya TSUKAKOSHI*

This study evaluates the feasibility of an autonomous power converter system with a relatively inexpensive single-board computer. This system measures output current and voltage with the same level of detailed accuracy as an oscilloscope and continuously accumulates data. This data is processed to automatically adjust control values. Conventional power converters often operate using control constants preset by designers, with limited adjustments for driving environments, aging changes, and component variability. The proposed approach extracts features from the measured and stored data to automatically calculate and adjust the optimal control values. This paper shows the construction of new external computational circuits and a control circuit board. Furthermore, it presents evaluation results when the system is applied to dead-time compensation as an example.

(Keywords: power converter, automatic adjustment, single-board computer, dead-time compensation)

1. 緒言

電力変換器は電力用半導体を使用したスイッチング素子をオン/オフさせることで高効率に駆動周波数や電圧を自在に調整できる。このため、産業機器や家電製品においては、電力変換器が広く適用されており、SDGs 7「エネルギーをみんなに。そしてクリーンに」で推進されるエネルギー効率を高めて環境に優しい世界をつくることに貢献している。電力変換器の制御量は、一般的には設計の段階で調整した値が予め設定されている。その調整は、技術者がオシロスコープ等の測定器を使用して行い、様々な条件を考慮した場合の最適値を設定することが多い。一方で、スイッチング素子等の部品は、経年劣化により特性が変化する場

合がある。また、昨今の半導体不足の影響から、スイッチング素子の部品交換時にそれまでとは異なる素子を用いる場合があり、特性が異なる場合がある。この場合に、例えば、デッドタイムによるひずみ補償の制御値等に影響を与える場合がある。この問題を解決するために様々な手法が提案されている^{1,2,3,4,5)}。

本稿では、電力変換器に新たに外部演算回路を設けて高機能化を実現するシステムを提案し、デッドタイムひずみ補償量を対象に自動調整する方式について検討する^{6,7)}。この方式のコンセプトは、技術者がオシロスコープ等の測定器を使用して制御量を導出する過程を外部演算回路が画面を持たないオシロスコープを使用して特定部位の電圧や

* 電気工学科 ** 電気電子工学専攻

電流を測定し、状態量の変化を評価したり、機械学習により特徴量を学習させることで制御量を自動演算させることである。まず、この方式の特徴である外部演算回路の概要について述べた上で、試作したシステムについて説明する。さらに、デッドタイムひずみ補償に対する適正な補償量を導出するために、外部演算回路において相電流の 5 次高調波成分の演算を繰り返し、自動的に調整する手法について述べる。また、実機評価により検証した結果、適正に補正することができ、相電流のひずみを低減できることを示す。

2. システム構成

Figs. 1, 2 に提案する電力変換装置のシステム構成、提案システムの外観写真をそれぞれ示す。提案システムは、Fig. 2(a)に示す主回路、制御回路、外部演算回路と Fig. 2(b)に示す RL 負荷により構成される。外部演算回路は、制御回路とは別に出力電圧や電流の特性を演算できる点が特徴であり、従来のシステムと異なる点である。この外部演算回路は A/D 変換装置で計測した電流波形、あるいは、電圧波形に対して Raspberry Pi を使用し、メモリに蓄積した電流情報(あるいは電圧情報)を用いて高速フーリエ変換(FFT 解析)や機械学習などの演算処理を実施する。さらに、この結果から電力変換器で使用する制御値の最適値を演算する。例えば、高調波成分の大きさや THD の大きさを評価値として設定し、それが最小となるような制御値を演算する。演算した結果はシリアル通信で制御回路のマイコンに伝送し、制御量を更新して適用する。これを繰り返すことで常に最適な制御量を保つことができる。また、本稿では、提案システムを利用する一例としてデッドタイムひずみを取り扱うが、モータにおける機械損等による非線形な誤差の影響を削除するために RL 負荷で評価を実施する。

本研究では、インバータの DC リンク電圧 V_{dc} は 120 V とし、RL 負荷として $R = 4.7 \Omega$, $L = 11 \text{ mH}$ の抵抗とインダクタンスを接続する。今回の評価では、出力相電圧指令値は電流ひずみの影響が大きく現れる低変調率の場合を想定して 15 V(変調率 0.12) とし、出力周波数は 50 Hz の一定条件とする。キャリア周波数、デッドタイムは、それぞれ、10 kHz, 5 μs とする。また、デッドタイムそのものが影響する電流ひずみを評価するために電流に対するフィードバック制御はせず、オープンルー

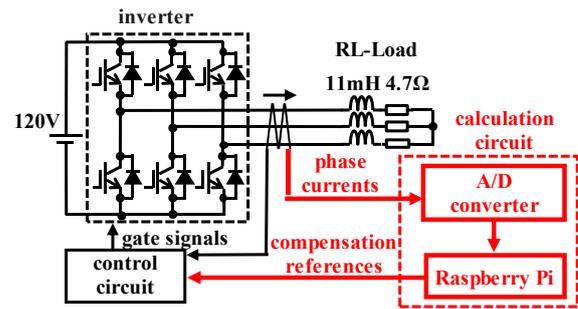
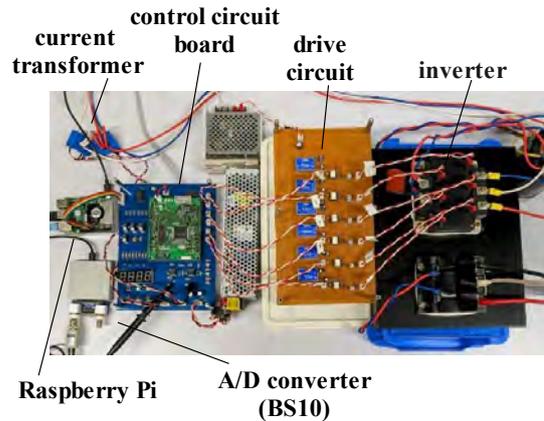
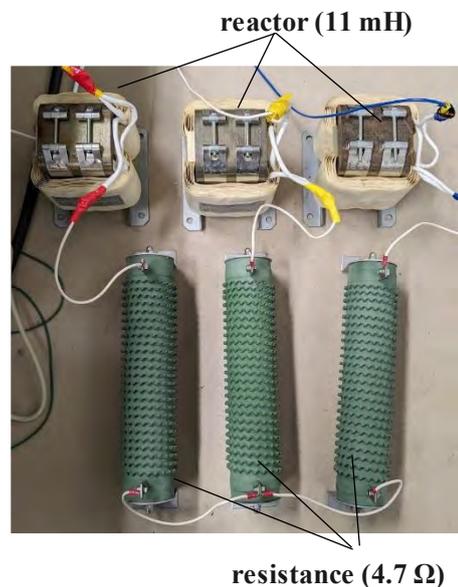


Fig. 1 System configuration.



(a) Main circuit, control circuit and external computational circuit



(b) loads

Fig. 2 Photographs of the system.



Fig. 3 Photograph of current transducer LA55-P.

Table 1 Specifications of LA55-P.

Primary nominal RMS current	50 A
Primary current, measuring range	0 ~ ±70 A
Secondary nominal RMS current	50 mA
Turns ratio	1 : 1000
Supply voltage	±12~±15 V

で駆動させる。

3. 外部演算回路と制御回路の構成

本研究では、波形計測部と演算処理部からなる外部演算回路部、および、それと通信可能であり電力変換器を制御するための演算を行う制御回路について新たに試作した。本章では、外部演算回路と制御回路部について詳しく説明する。

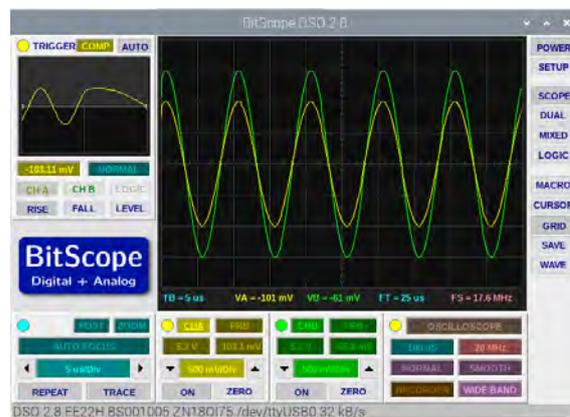
3.1. 波形計測部

Fig. 3, Table 1 に波形計測用に使用した電流センサ(LA55-P/SP1;LEM 社製)の外観写真と仕様をそれぞれ示す。この電流センサはホール素子を使用しており、直流から交流までを測定可能である。また、窓部分に電線を貫通させた場合の巻数比は 1 : 1000 となるため、計測側には 1/1000 倍の電流が流れる。評価では窓部分に電線を 4 周巻いているため、巻数比は 1 : 250 となり、計測側には 1/250 倍の電流が流れることになる。(この場合は計測可能な電流定格値は 1/4 倍になる点に注意する必要がある。) 計測側においては 100Ω の抵抗を介してグラウンドに接続している。このため、1 次側電線に 1 A の電流が流れた場合には、抵抗端で 0.4 V の電圧が発生することになる。

電圧取得用の A/D 変換装置として、本評価では USB オシロスコープ BS10 (BitScope Designs 社製) を使用する。Fig. 4, Table 2 に、BS10 の概要と仕



(a) Photograph



(b) GUI screen

Fig. 4 USB oscilloscope BS10

Table 2 Specifications of USB oscilloscope BS10.

(1)	100 MHz Analog Bandwidth.
(2)	40 MSps Logic Capture (25 ns).
(3)	2 Analog Oscilloscope Channels.
(4)	8 high speed Logic Analyzer channels.
(5)	Serial Protocol and Logic decoders.
(6)	Windows, Linux, Mac & Raspberry Pi.
(7)	Waveform, logic and clock generators.
(8)	RF & Baseband Spectrum Analyzers.

様をそれぞれ示す。Fig. 4(a)は、BS10 の外観写真である。BS10 は 2 チャンネルのアナログ計測ができ、1 チャンネルあたりのサンプリング周波数は最大 20 MHz で連続 12000 サンプルの測定が可能である。Fig. 4(b)は、BS10 をパソコン上でオシロスコープとして使用する場合の付属の GUI 画面である。一般的なオシロスコープと同様に、電



Fig. 5 Photograph of Raspberry Pi 4B.

Table 3 Specifications of Raspberry Pi 4B.

CPU	Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC
CPU clock	1.8GHz
memory	8GB LPDDR4-3200 SDRAM (depending on model)
USB connector	2 USB 3.0 ports; 2 USB 2.0 ports.
LAN	2.4 GHz and 5.0 GHz IEEE 802.11ac wireless
Other connector	2 × micro-HDMI® ports (up to 4kp60 supported)
	Micro-SD card slot for loading operating system and data storage
	4-pole stereo audio and composite video port
	2-lane MIPI DSI display port
	2-lane MIPI CSI camera port
	Raspberry Pi standard 40 pin GPIO header
Bluetooth	Bluetooth 5.0, BLE
rated voltage	5V DC
operating temperature	0 – 50 degrees C ambient

圧範囲や時間範囲を任意に変更して表示することができる。また、BS10 は Windows, Linux, Mac & Raspberry Pi 上で動作をさせることができる。BS10 は、本来は簡易タイプのオシロスコープとして使用するものであるが、本研究では GUI 画面は使用せず、電圧測定用の A/D 変換装置として使用する。特に、従来の電力変換装置用の汎用マイコンよりもサンプリング周波数を高くできる点が特徴である。

3.2. 演算処理部

Fig. 5, Table 3 に演算処理で使用する Raspberry Pi 4B(8GB)の外形写真と仕様をそれぞれ示す。

Raspberry Pi はシングルボードコンピュータであり、C 言語や Python 言語により演算プログラムを作成できる。また、インターネットへの接続も可能である。本研究では、3.1 節の波形計測部に得られた電流(あるいは、電圧)情報を従来の汎用マイコンよりもはるかに記憶容量の大きいメモリに格納し、そのデータを基に FFT 解析処理や機械学習などの演算処理を高速に実施する。さらに、最適な制御量に調整するための指令を演算し、制御回路に送信する。

3.3. 制御回路

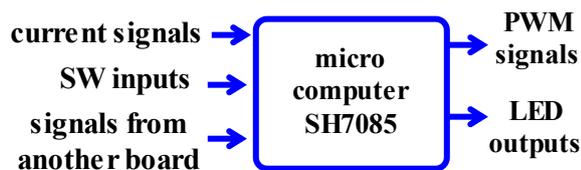
Fig. 6 に、製作した制御回路基板の概略と写真を示す。製作した制御回路基板(200mm×150mm)は、プリント基板設計ソフト KiCad を用いて回路図設計および基板設計を実施し、素子やコネクタ等を半田付けして製作している。製作した制御回路は、インバータの出力電流を OP アンプでゲイン調整した信号、外部演算回路からの指令信号、および、基板上のボタンスイッチ(7 個)とトグルスイッチ(4 個)の信号を制御マイコンに入力する。

製作した制御回路基板は、制御マイコン SH7085 を搭載したアルファ・プロジェクト製 CPU ボード AP-SH2F-10A を搭載しており、クロック周波数は 40MHz として駆動する。制御マイコンの A/D 変換器は 5V の入力電圧を 10 ビットの精度でデジタル値に変換する。本評価では、±12.5A を評価できる仕様で基板を設計している。また、外部演算回路内の Raspberry Pi の駆動電圧(3.3V)と制御マイコンの駆動電圧(5V)は異なるが、電圧変換回路を介して信号入力をしている。制御マイコンは入力情報からインバータを駆動する PWM 信号を演算して出力する。さらに、LED(3 個)と 4 桁の 7 セグメント LED の出力を制御する。

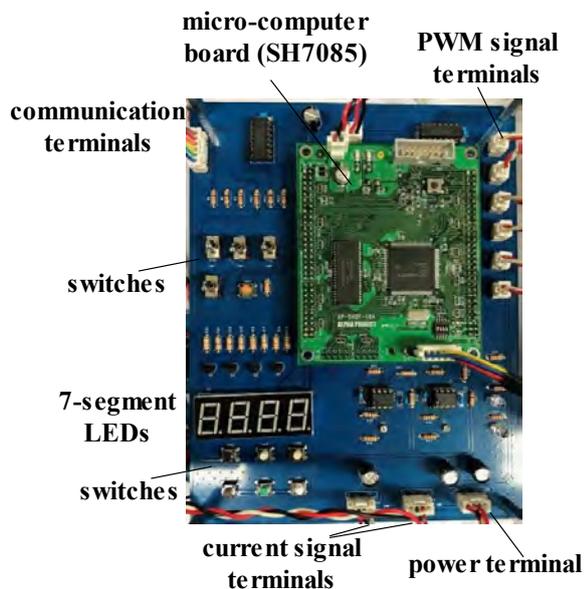
4. 波形取り込みと演算処理の例 -デッドタイム補償の自動調整-

4.1. デッドタイムひずみ補償

Fig. 1 のインバータにおいて、理想的な条件下の上下アームのスイッチング素子に与える PWM 指令は相補出力の反転指令が与えられる。しかし、スイッチング素子のオン/オフが切替る場合には、遅れ時間や立上り/立下り時間が発生するため、一方のアームの素子がオフする前に他方アームの素



(a) schematic diagram



(b) Photograph

Fig. 6 Control circuit board.

子がオンする可能性がある。この場合には電源が短絡状態になり、スイッチング素子に過大な電流が流れて破壊する恐れがある。これを防止するために、スイッチング時に上下アームのスイッチング素子がともにオフになる時間を設けており、この時間をデッドタイムと呼ぶ。

Fig. 7 にデッドタイムを設けた場合の出力指令値と PWM 波形を示す。実線の理想条件のキャリア波に対してデッドタイム相当分のオフセット成分を与えたキャリア波を作成し、指令値と比較することで上下アームの指令波形にデッドタイムを設けることができる。

Fig. 8 に、出力電流 i の極性とデッドタイム区間の出力電圧の特性を示す。Fig. 8(a) は i が負荷向きに正方向の場合の特性であり、上下アームのスイッチング素子がオフしているため下側アームの還流ダイオードが導通して電流が流れることになる。このため、デッドタイム期間は 0V の電圧が出力され、出力電圧は理想的なキャリアで比較した場

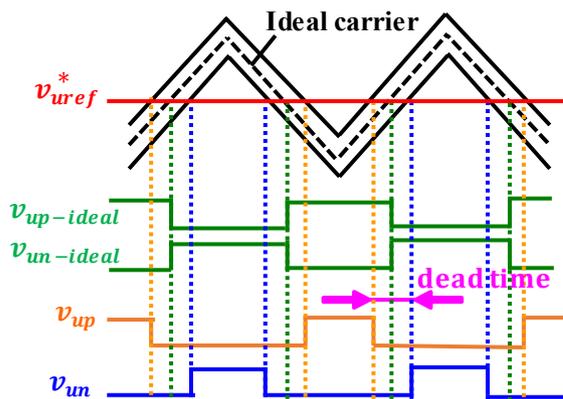


Fig. 7 PWM references with dead time.

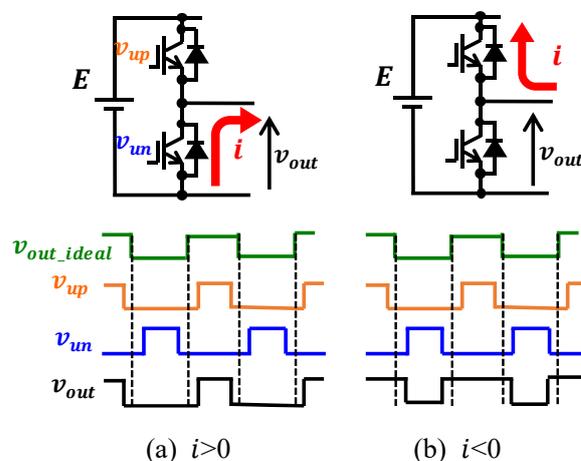


Fig. 8 Relationship between output current and voltage at dead time periods.

合よりもデッドタイム分だけ狭いパルスになる。Fig. 8(b) は i が負荷向きに負方向の場合の特性であり、上側アームの還流ダイオードが導通する。このため、デッドタイム期間は $E[V]$ の電圧が出力され、出力電圧は理想的なキャリアで比較した場合よりもデッドタイム分だけ広いパルスになる。このように、出力電圧のパルス幅は理想的な場合よりも増減するため、出力電流にはひずみが発生する。このひずみはデッドタイムひずみと呼ばれ、トルク脈動等の要因になる。

デッドタイムひずみを補償するために、相電流の極性を検出し、デッドタイム補償をした相電圧指令値 $\widehat{v_{ref}}$ を次式のように調整する。

- $i > 0$ の場合

$$\widehat{v_{ref}} = v_{ref} + v_{cmp} \quad (1)$$

- $i < 0$ の場合

$$\widehat{v_{ref}} = v_{ref} - v_{cmp} \quad (2)$$

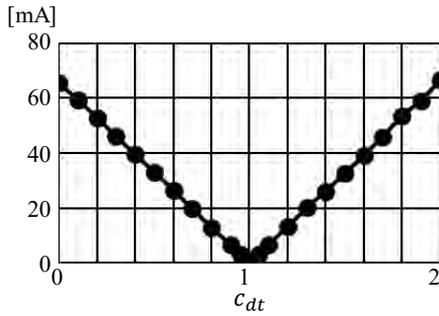


Fig. 9 Simulation results of 5th harmonic current characteristic when the compensation value is changed.

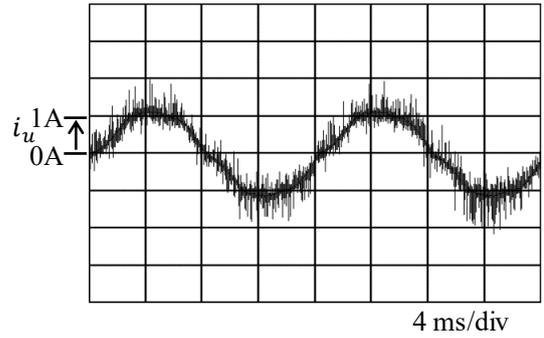
ここで、 v_{ref} は元々の相電圧指令であり、 v_{cmp} は補償電圧である。スイッチング素子の遅れ時間や立上り/立下り時間を考慮しない場合は、DC リンク電圧を E 、スイッチング周期を T 、デッドタイム時間を t_d とする場合、

$$v_{cmp} = E \cdot t_d / T \quad (3)$$

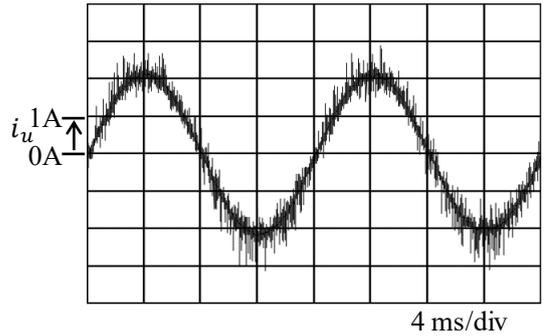
となり、一般的には設計の段階で(3)式の値付近で微調整をした値を予め制御値として使用する。ただし、素子の経年劣化や素子の置き換え時には、実際の補償量の適正值は(3)式の理想的な制御値に対して誤差を持つ恐れがある。

4.2. デッドタイムひずみ補償量をパラメータとした場合の 5 次高調波特性のシミュレーション結果

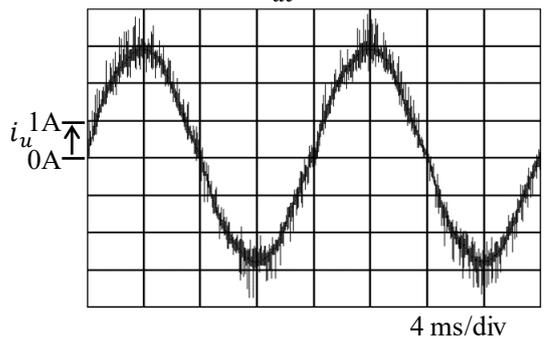
Fig. 9 に、デッドタイム補償量 (c_{dt}) を変化させた場合における相電流に含まれる 5 次高調波の実効値特性のシミュレーション結果を示す。本稿では、デッドタイム補償量の適正值を 1 に正規化して表す。つまり、 c_{dt} が 0 の場合は補償なしを意味しており、 c_{dt} が 2 の場合は適正值の 2 倍の補償量を与えた過補償の場合を意味する。Fig. 9 より、 c_{dt} を 0 から 2 まで変化させた場合の 5 次高調波成分は、適正補償量($c_{dt}=1$)の場合に最小となり、補償不足、過補償の割合が大きくなるほど増加する。これは、7 次高調波成分や電流 THD でも同様な傾向が見られる。このため、外部演算回路で相電流を FFT 解析処理し、5 次高調波成分を基に制御回路基板に調整信号を与える操作を繰り返す処理を実施する。さらに、山登り法を用いて 5 次高調波成分が最小になるポイントを探索することで適正



(a) $c_{dt} = 0$



(b) $c_{dt} = 1$



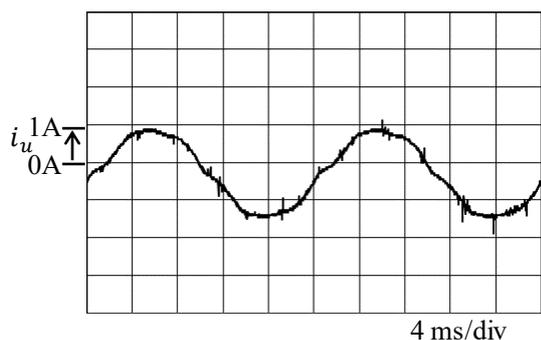
(c) $c_{dt} = 2$

Fig. 10 Phase currents measured with an oscilloscope.

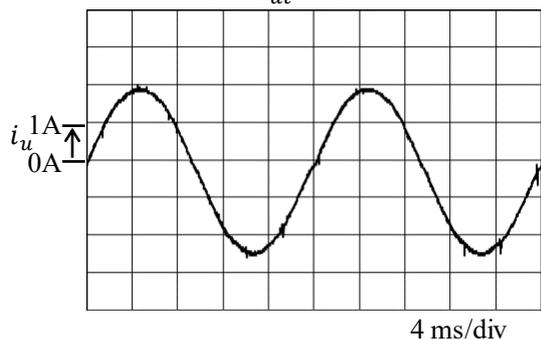
補償量を導出できる。

4.3. 電流波形取り込みと FFT 解析処理

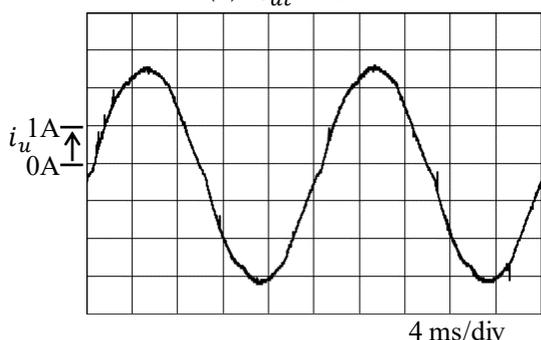
Fig. 10 に、提案手法によりデッドタイム補償の制御値(補償電圧)を自動調整した結果を示す。なお、Fig. 10 は、一般的なオシロスコープ(4MS/s)で測定した相電流の実測結果である。Fig. 10(a)は補償なし($c_{dt} = 0$)の場合の特性であり、Fig. 10(b)は提案法により適正補償量($c_{dt} = 1$)に調整した場合の特性である。また、Fig. 10(c)は、参考データとしての過補償($c_{dt} = 2$)の場合の特性である。 $c_{dt} = 0, 2$ の場合は電流波形にひずみが発生しているの



(a) $c_{dt} = 0$



(b) $c_{dt} = 1$

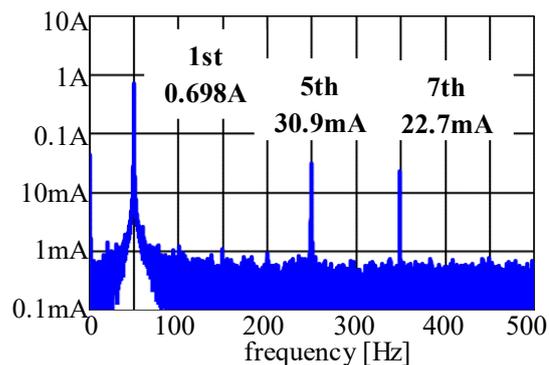


(c) $c_{dt} = 2$

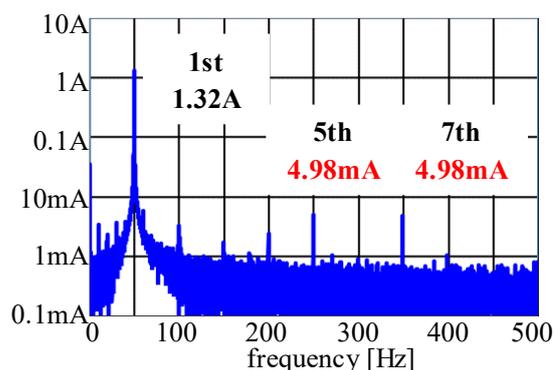
Fig. 11 Phase currents measured with BS10.

に対し, $c_{dt} = 1$ の場合は正弦波状の波形に補正できていることが確認できる。これは, Fig. 9 のシミュレーション結果とも合致している。

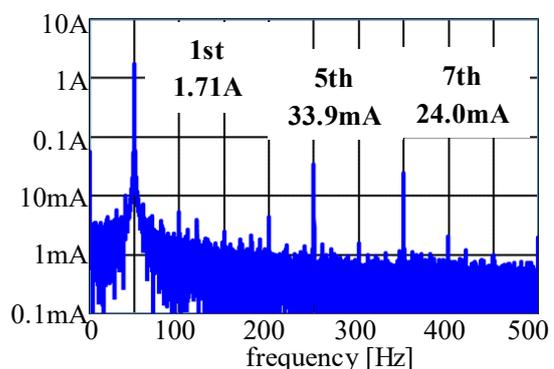
Fig. 11 に, 本評価で使用した BS10(100kS/s) で測定し, 制御値調整に用いた相電流の実測結果を示す。Fig. 11 (a)(b)(c) は, それぞれ, $c_{dt} = 0, 1, 2$ の場合の特性である。Fig. 10 の結果よりもサンプリング数が少ないため, 電流リップルが間引かれた波形になる。しかし, 本検討で評価するデッドタイムひずみは 5 次高調波(300Hz)が評価できればよいため精度は十分である。Fig. 11 の結果は, Fig. 10 の結果と同様に, $c_{dt} = 0, 2$ の場合は電流波形にひずみが発生しているのに対し, $c_{dt} = 1$ の場合



(a) $c_{dt} = 0$



(b) $c_{dt} = 1$



(c) $c_{dt} = 2$

Fig. 12 FFT analyses of phase current.

は正弦波状の波形に補正できていることが確認できる。

Fig. 12 に, Fig. 11 に波形に対して外部演算回路で FFT 解析を実施した結果を示す。 $c_{dt} = 0, 2$ の場合に対して, $c_{dt} = 1$ の場合は高調波成分が低減していることが判る。特に, $c_{dt} = 0$ の場合と比較すると, 5 次高調波成分, 7 次高調波成分を, それぞれ 1/6, 1/5 に低減できることが判る。以上より, 電力変換器に外部演算回路を設けてデッドタイムひずみの補償量を自動調整する提案法の有効性を

確認することができる。

5. 結言

本稿では、電力変換器に新たに外部演算回路を設けて高機能化を実現するシステムを提案し、デッドタイムひずみ補償量を対象に自動調整する方式について検討した。以下に結論を示す。

- ・ 電力変換器の主回路、制御回路とは別に A/D 変換器とシングルボードコンピュータからなる外部演算回路を設ける構成を提案した。この回路は従来の制御回路に搭載する汎用マイコンよりも処理速度が高速でメモリも大きいいため、FFT 解析や機械学習などの演算処理が実現できる。
- ・ シングルボードコンピュータの A/D 変換器には USB オシロスコープ BS10 を使用し、シングルボードコンピュータには Raspberry Pi 4B を用いたシステムを製作した。また、外部演算回路との通信機能を設けた制御回路基板を製作した。
- ・ デッドタイム補償量が適正值の場合にインバータの相電流の 5 次高調波が最小になることをシミュレーションにより確認した。
- ・ 外部演算回路により相電流を FFT 解析し、5 次高調波成分を基に制御回路基板に調整信号を与える操作を自動的に繰り返す機能を開発した。また、山登り法により 5 次高調波成分が最小になるポイントを探索することで適正補償量を導出できることを確認した。
- ・ 外部演算回路デッドタイムひずみ補償量を自動調整することで、相電流のひずみを低減できることを確認した。特に、適正補償の条件では、補償なしの場合と比較して、5 次高調波成分、7 次高調波成分を、それぞれ 1/6, 1/5 に低減できることを確認した。

なお、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(C)23K03829 の援助により行われた。

参考文献

- 1) 李東昇, 舟橋佳邦, 高木純一:「モータ駆動用インバータのデッドタイム補償値のオートチューニング方法」, 2023 年電気学会産業応用部門大会, 3-65 (2023)
- 2) Y. C. Pai, J. P. Chang, M. Y. Cheng and T. J. Liang, “Dead-time effects compensation for

PMSM drives - an adaptive linear neuron approach”, IEEE International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017) (2017)

- 3) D. M. Park and K. H. Kim, “Parameter-independent online compensation scheme for dead time and inverter nonlinearity in IPMSM drive through waveform analysis”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 2, pp. 701-707 (2014)
- 4) 萬年智介, 藤田英明:「電圧形 PWM 変換器のデッドタイムに起因する電圧誤差補償法の系統連系時の動作特性」, 電気学会論文誌 D, 136 巻, 1 号, pp.46-53 (2016)
- 5) 宮崎将司, 林洋一, 福本哲哉:「相電流瞬時値を考慮した PWM インバータの電圧制御誤差推定」, 2011 年電気学会産業応用部門大会, 1-26 (2011)
- 6) 近江慎人, 綾野秀樹, 大前佑斗, 松井義弘:「外部演算回路を用いたデッドタイムひずみ低減法の検討」, 2023 年電気学会産業応用部門大会, Y-1 (2023)
- 7) 近江慎人, 綾野秀樹, 大前佑斗, 松井義弘:「外部演算回路を用いた電力変換器のデッドタイムひずみ補償量の自動調整法」, 電気学会研究会, 半導体電力変換/家電・民生/自動車 合同研究会, SPC-23-251, HCA-23-041, VT-23-034 (2023)

(2024年1月10日 受理)

応力集中型ダイヤフラム構造を用いた光 MEMS 圧力センサの感度と共振周波数の評価

新國広幸*, 伊藤浩*

ダイヤフラム構造の一部に応力集中部を設けた応力集中型光 MEMS 圧力センサは、高感度と広帯域の両立化を期待できる。本研究では、ガラス基板を用いた本センサについて、理論解析により感度と共振周波数(周波数帯域を決める要素)のダイヤフラム厚依存性を導出し、平板型のセンサと比較・考察することで、高感度と広帯域の両立化を明らかにした。ダイヤフラム厚が 0.15 mm の時、応力集中型の平板型に対する感度比、共振周波数比は各々 1.44 倍、0.986 倍となり、感度の向上効果に対して共振周波数の低下の割合は、ほぼ 1 に等しい値となっていることが確認できた。したがって、応力集中の構造を用いることによって感度の向上を図りつつ、共振周波数の低下を抑えることが可能であることを示すことができた。

(キーワード: 光 MEMS 圧力センサ, 感度, 共振周波数, 応力集中型ダイヤフラム)

Evaluation of Sensitivity and Resonance Frequency of an Optical MEMS Pressure Sensor with a Stress Concentrated Diaphragm Structure

Hiroyuki NIKKUNI*, Hiroshi ITO*

An optical MEMS pressure sensor with a stress-concentrated diaphragm was proposed to achieve high sensitivity and broadband. The dependences of sensitivity and resonance frequency on the diaphragm thickness in the sensor using a glass substrate were considered theoretically. Compared with the flat diaphragm, when the diaphragm thickness is 0.15 mm, the sensitivity is approximately 1.44 times greater and the resonance frequency is approximately 0.99 times smaller, confirming both high sensitivity and wide bandwidth.

(Keywords: Optical MEMS Pressure Sensor, Sensitivity, Resonance Frequency, Stress Concentrated Diaphragm Structure)

1. 研究背景と目的

圧力センサの一般的な用途として、自動車のエンジン圧や掃除機の吸引圧などの計測が挙げられ、身近ないたる所で圧力センサは役立っている。さらに、MEMS 圧力センサは発電所や産業プラント等の高温、強振動、強磁場な悪環境下でも利用が期待されている。また、医療分野では血圧等の生体内圧の計測にも用いられている。

圧力センサは電子式と光学式に大きく分けられる。電子式は高精度、長寿命といった利点を有しているが、強磁場環境では電磁ノイズの影響を受けやすく、使用にはそれぞれの環境によって対策をとる必要がある。さらに電氣的現象を用いるためショートの大危険性も伴う。一方、光学式は光を利用しており、電磁ノイズの影響やショートの可能性が無い。本研究では、高い安全性や信頼性を

重視し、特殊な環境にも対応できる光学式圧力センサを選定した。光学式には様々な種類の圧力センサが存在する。主なものとして光ファイバ型¹⁾と光 MEMS 型²⁾が挙げられる。光ファイバ型は作製が比較的容易で柔軟性にも優れている。しかし、光ファイバとレンズ等の各種光学部品間で光軸調整が必要でセンササイズも比較的大きい。一方、光 MEMS 型は圧力感知部と光導波路・ビームスプリッタ等の光学部品を同一基板上に集積化するため、光軸調整が不要となり、小型化も図ることができる。したがって、我々の研究グループでは光 MEMS 圧力センサについて研究を行うことにした。本圧力センサは、圧力感知部としてダイヤフラムを持つ。光 MEMS 圧力センサの重要な特性として、感度と周波数特性がある。図 1 に周波数特性を示す。周波数帯域は測定可能な動的圧力の周

* 電気工学科

波数範囲を表し、ダイヤフラムの共振周波数によりその上限が制限される。そのため、応用を考えて共振周波数の設定をしなければならない。感度と共振周波数はダイヤフラムサイズに依存し、2017 年に新國らによりその依存性と設計ガイドラインの報告がなされた³⁾。この報告により、所望の感度と共振周波数を持つセンサを設計可能となったが、感度と共振周波数にはどちらか一方を大きくすると片方が低減する関係があることが分かった。例えばダイヤフラム厚を薄くすると感度は高くなるが、共振周波数は低下し周波数帯域が狭くなる。それを改善すべく応力集中型のダイヤフラム構造を提案し、感度の向上を図りつつ共振周波数の低下を抑えることが可能か理論解析を行った。

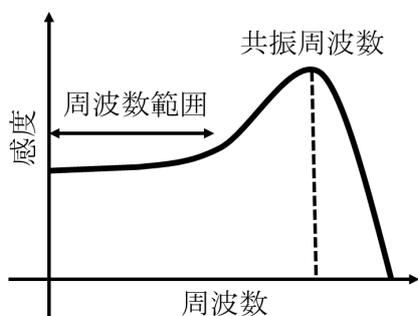


図 1 センサの周波数特性

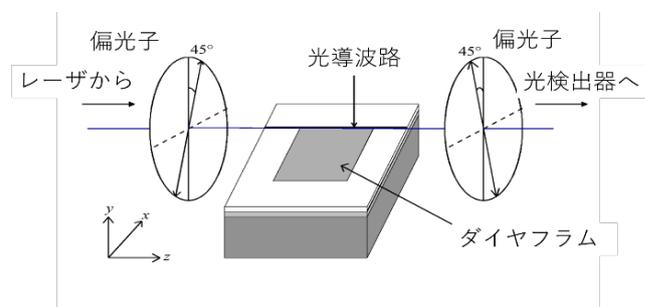
ところで、光 MEMS 圧力センサは、光波の変調によりセンシングを行っており、主に光強度変調型、位相変調型が利用される。光強度変調型は出力光の光強度の直接の変化がセンシングに利用されるため、構成が単純になるが、感度が比較的低い。一方、位相変調型は光の波長や周期の受ける微小変化から測定するため、光強度変調型よりも一般的に高感度である。ただし、圧力によって生じた位相変化を干渉計により光強度に変換する必要がある。本研究では、二種類の方式のうち、感度が高い位相変調型を選定した。

位相変調型にもいくつか種類があるが、偏光干渉型を採用した。偏光干渉型はビームスプリッタで光を分岐させないため、単純な構造となる。

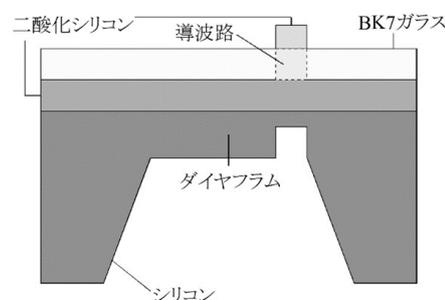
2. センサ構成と動作原理

図 2 に応力集中型光 MEMS 圧力センサの概形及び断面図を示す。本センサは、ダイヤフラムと光導波路により構成される。ダイヤフラムは応力を導波路下部に集中させるため、平板ではなく導波路下部のみ薄くなっている。これにより感度が向上するが、一部分のみしかダイヤフラムが薄くなっていないことから共振周波数の低下は抑えられると考えられる。

光導波路には、TM-like モード光と TE-like モード光を同じ強さで励起するために、センサ表面に対して 45 度の直線偏光が入射される。ダイヤフラムへの圧力の印加により、導波路に応力、ひずみが発生し、導波路の屈折率が変化する。すると、導波路出力光に位相変化が生じるが、TM-like モード光と TE-like モード光間には位相差が生じる。導波路出力光はその位相差に応じて直線、楕円、円偏光のいずれかの偏光状態をもつ。入射光の偏光方法に対して 90 度偏光方向が傾いた偏光子により、各々の偏光状態を光強度に変換し圧力を検出する。本研究では、センサ感度を単位圧力あたりの誘起位相差と定義し、「位相感度」と呼ぶ。



(a)



(b)

図 2 応力集中型光 MEMS 圧力センサの (a)概形と (b)断面図

3. 光 MEMS 圧力センサの感度解析及び共振周波数解析

3.1. 解析方法

通常の平板型と応力集中型の2つのダイヤフラム構造について, 感度と共振周波数のダイヤフラム厚依存性を解析・比較し, 高感度と広帯域の両立化について考察した。ダイヤフラム材料は, 材料力学定数, 光学定数がよく知られているガラスとした。

本研究で使用するダイヤフラムのモデルを図3に示す。図のように, x 方向が導波路方向に対して垂直方向, y 方向が厚さ方向, z 方向が導波路に対して平行方向をとるように座標系をとる。また, 圧力は $-y$ 方向に等分布で加わるものとし, 導波路に垂直な成分の辺長を a , 導波路に平行な成分の辺長を b , 厚さを h と設定する。

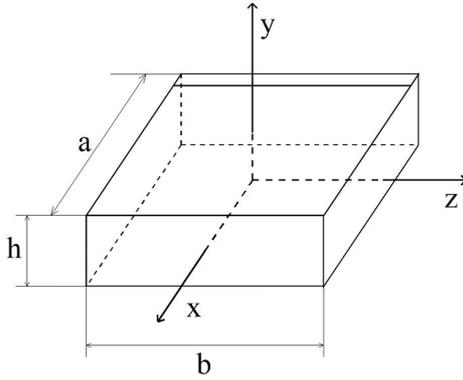


図3 解析モデル

感度は有限要素法による応力解析を行い, 求めた応力を用いて以下の式(1)から式(7)を用いて導出した。共振周波数は有限要素法により導出した。応力解析では, 有限要素法にて導波路上の応力値 T を6成分求めた。この応力値を用いて, ひずみ S を式(1)で求める。

$$S_i = s_{ij}T_j \quad (i, j = 1 \sim 6) \quad (1)$$

求めたひずみ S から屈折率変化 $\Delta n_1, \Delta n_2, \Delta n_3$ を式(2)で求め, 比誘電率 $\Delta \epsilon_1, \Delta \epsilon_2, \Delta \epsilon_3$ を式(3)で求める。式中における p_{ij} は光弾性係数, n は光導波路の屈折率, ϵ_r は比誘電率を示している。

$$\Delta n_i = -\frac{1}{2}n^3p_{ij}S_j \quad (i, j = 1 \sim 6) \quad (2)$$

$$\Delta \epsilon_i = -\epsilon_r^3p_{ij}S_j \quad (i, j = 1 \sim 6) \quad (3)$$

位相変化量 $\Delta \phi_{TM}, \Delta \phi_{TE}$ を式(4), (5)で求める。なお, $\Delta \phi_{TM}$ は TM-like モード光の位相変化量, $\Delta \phi_{TE}$ は TE-like モード光の位相変化量, k_0 は波数, $\Delta n_{1max}, \Delta n_{2max}$ は屈折率変化量の最大値, b はダイヤフラム上の光導波路長をそれぞれ示している。 Γ_z はニュートン法により求めることができる。

$$\Delta \phi_{TM} = k_0 \Delta n_{1max} b \Gamma_z \quad (4)$$

$$\Delta \phi_{TE} = k_0 \Delta n_{2max} b \Gamma_z \quad (5)$$

$$\Gamma_z = \frac{1}{b} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \frac{\Delta \epsilon_1(z)}{\Delta \epsilon_1(max)} dz \quad (6)$$

以下の式より, 位相感度 S_P を導出する。 P は圧力である。

$$S_P = \frac{\Delta \phi_{TM} - \Delta \phi_{TE}}{P} \quad (7)$$

3.2. 感度のダイヤフラム厚依存性

センサ感度のダイヤフラム厚依存性を平板型と応力集中型の両方で求める。本研究ではダイヤフラムの構造解析に, 有限要素法を用いた解析ソフト ANSYS ED10.0 教育・評価用ツールを使用する。ダイヤフラム面積を $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ とし, ダイヤフラム厚を $0.15 \text{ mm}, 0.20 \text{ mm}, 0.25 \text{ mm}, 0.30 \text{ mm}$ とする。なお, 導波路位置はダイヤフラム端とし, 有限要素法解析の際の要素数は 400 , 節点数は 3003 とした。

応力集中型ダイヤフラムにおいて応力集中部であるくぼみのパラメータはくぼみ幅 w_c を $100 \mu\text{m}$, 厚さ h_c を $40 \mu\text{m}$ と設定した。

解析結果を表1, 図4に示す。平板型の位相感度は, それぞれのダイヤフラム厚 $0.15 \text{ mm}, 0.20 \text{ mm}, 0.25 \text{ mm}, 0.30 \text{ mm}$ で $321 \text{ mrad/kPa}, 181 \text{ mrad/kPa}, 116 \text{ mrad/kPa}, 80.9 \text{ mrad/kPa}$ となった。応力集中型の位相感度は, それぞれのダイヤフラム厚 $0.15 \text{ mm}, 0.20 \text{ mm}, 0.25 \text{ mm}, 0.30 \text{ mm}$ で $462 \text{ mrad/kPa}, 275 \text{ mrad/kPa}, 181 \text{ mrad/kPa}, 129 \text{ mrad/kPa}$ となった。

図4より最小2乗法で傾きを計算したところ, 平板型の傾きが約-2.0 であることに対して, 応力集中型の傾きが約-1.8 と, 応力集中型の方が緩やかに変化していることが確認できた。この理由は, 平板型と応力集中型における厚さを変化させる部分のダイヤフラム幅が, 応力集中型の方が小さくなっているためである。

表 1 位相感度のダイヤフラム厚依存性

ダイヤフラム厚(mm)	位相感度 (mrad/kPa)	
	平板型	応力集中型
0.15	321	462
0.20	181	275
0.25	116	181
0.30	80.9	129

表 2 共振周波数のダイヤフラム厚依存性

ダイヤフラム厚 (mm)	共振周波数 (kHz)	
	平板型	応力集中型
0.15	13.8	13.6
0.20	18.3	17.2
0.25	22.9	21.4
0.30	27.4	25.5

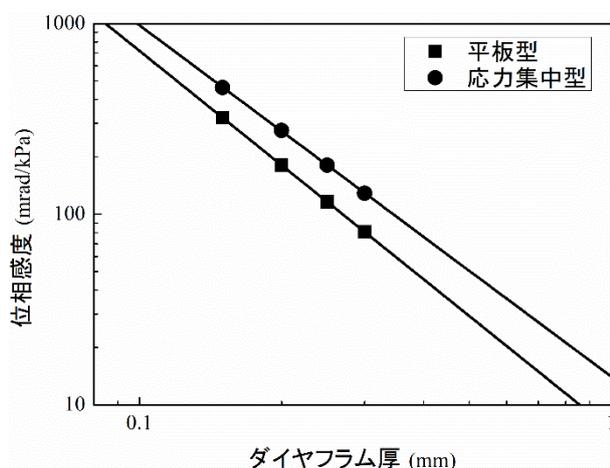


図 4 位相感度のダイヤフラム厚依存性

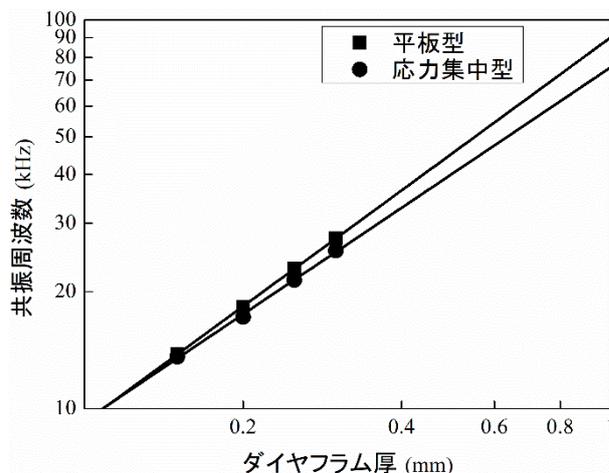


図 5 共振周波数のダイヤフラム厚依存性

3.3. 共振周波数のダイヤフラム厚依存性

本節では、平板型と応力集中型の共振周波数のダイヤフラム厚依存性を解析した。ダイヤフラムサイズや導波路位置、有限要素法の要素数、節点数、応力集中部のくぼみ幅、厚さは 3.2 節と同様とした。

共振周波数のダイヤフラム厚依存性を表 2、図 5 に示す。平板型の共振周波数は、ダイヤフラム厚 0.15 mm、0.20 mm、0.25 mm、0.30 mm それぞれで、13.8 kHz、18.3 kHz、22.9 kHz、27.4 kHz となった。応力集中型の値は、ダイヤフラム厚 0.15mm、0.20 mm、0.25 mm、0.30 mm 各々で、13.6 kHz、17.2 kHz、21.4 kHz、25.5 kHz となった。

最小二乗法により、近似曲線を求めたところ、傾きが平板型の 0.99 より応力集中型の 0.91 の方が緩やかになっていることが分かる。原因としては 3.2 節と同様で厚さを変化させる部分のダイヤフラム幅が、応力集中型の方が小さくなっていたからである。

3.4. 考察

本節では、感度と共振周波数の解析結果を比較して、応力集中型の高感度化と広帯域化の両立を考察した。

表 3 に、各厚さの応力集中型の感度、共振周波数を平板型のそれで割った感度比、共振周波数比を表す。表より、感度比が 1.44 から 1.59 の値となっていて、応力集中型にすることによって感度が向上していることが確認できた。また、薄くすると感度比が 1 に近づいていくことも確認できた。共振周波数比は約 0.986 から 0.931 倍となっていて、低下していることが確認できた。ダイヤフラム厚が 0.15 mm の時には、感度は 1.44 倍、共振周波数は 0.986 倍となり、感度の向上効果に対して共振周波数の低下の割合は、ほぼ 1 に等しい値となっていることが確認できる。したがって、応力集中の構造を用いることによって感度の向上を図りつつ、共振周波数の低下を抑えることが可能であると言える。

表 3 平板型に対する応力集中型の特性比

ダイヤフラム厚 (mm)	感度比	共振周波数比
0.15	1.44	0.986
0.20	1.52	0.940
0.25	1.56	0.934
0.30	1.59	0.931

4. 結論

本研究では, 応力集中型ダイヤフラムを提案し, 光 MEMS 圧力センサの高感度と広帯域の両立化を目指し, 理論解析を行った。また, 感度と共振周波数のダイヤフラム厚依存性について考察し, 平板型との比較も併せて行った。

位相感度のダイヤフラム厚依存性の傾きを求めた結果, 平板型は約-2.0 であり, 応力集中型は約-1.8 で平板型より緩やかに変化していた。また, 感度の値をダイヤフラムごとに絶対値で比較した結果, ダイヤフラム厚が 0.15 mm の時, 平板型は 321 mrad/kPa だったが, 応力集中型は 462 mrad/kPa と約 1.44 倍となった。結果として, 応力集中型を利用することで感度の向上に成功した。

共振周波数に関しても, 位相感度と同様にダイヤフラム厚依存性を求め, グラフ化をした後, 平板と応力集中型で比較を行った。結果は, 応力集中型の傾きが約 0.91 となり平板型の約 0.99 よりも緩やかになった。絶対値の比較においては, ダイヤフラム厚が 0.15 mm の時, 平板型の共振周波数が 13.8 kHz であることに對して応力集中型の共振周波数 13.6 kHz とその共振周波数比は 0.986 であり, ほぼ低下していないことが分かった。

以上のことから応力集中構造を用いた光 MEMS 圧力センサにより高感度と広周波数帯域の両立化を実現できることを理論的に証明できた。本成果は光 MEMS 圧力センサの応用範囲を広げるものであり, 価値のあるものと言える。

今後は, 実際に応力集中型ダイヤフラム構造を用いた光 MEMS 圧力センサを作製し, 実験的に依存性を考察していく。

参考文献

- 1) T. Katsumata, Y. Haga, and M. Esashi : “Micromachined 125 μm diameter ultra miniature fiber-optic pressure sensor for catheter”, Trans. IEEJ, 120-E, 58-63 (2000).
- 2) M. Ohkawa, M. Izutsu, and T. Sueta, “Integrated optic pressure sensor on silicon substrate,” Appl. Opt. 28, 5153-5157 (1989).
- 3) Hiroyuki Nikkuni, Masashi Ohkawa, Takashi Sato : “Design guidelines for a guided-wave optical pressure sensor based on dependences of sensitivity and resonance frequency on diaphragm dimensions”, Opt. Eng. 56(5), pp.057108-1 - 057108-9(2017).

(2024年1月12日 受理)

ものづくり基礎工学における「英語による機器取扱い指導」実践例

一戸隆久*, 廣池桜子**, 苅米志帆乃*, 熊澤匠真***, 加藤 格*

グローバルエンジニア育成事業の一環として 2 年間「ものづくり基礎工学」の電子工学分野において英語教員と連携して英語を用いた授業を実践した。写真やイラストなどを多用した電子機器取扱説明ファイルを英文翻訳して授業で活用し、授業冒頭 30 分間に発振器やオシロスコープの機器取扱を英語で指導した。学生の自己評価として実施した振り返りアンケート結果によると、学生の英語授業に対する意欲はやや高いものの内容理解にはやや自信がない様子が見受けられた。複数回答可として授業の印象を質問したところ、英語を用いた授業を不要と感じる学生は約 1 割程度であったが、英語を用いた授業を新鮮に感じた学生は 4 割程度であった。

(キーワード：英語を用いた授業，英語教員との連携，グローバルエンジニア育成事業)

Practical efforts instructing beginner students in how to use equipment in fundamental engineering in English

Takahisa ICHINOHE*, Sakurako HIROIKE**, Shihono KARIKOME*,
Takuma KUMAZAWA***, Itaru KATO*

In this report, we describe examples of the practical efforts of making the equipment instructions in English for beginner students in the electronic engineering course of “Fundamental Engineering” in collaboration with an English teacher. The instruction manuals with many visual aids were translated into English. We think that employing these efforts can reduce the resistant feelings of the students who are not good at English. We utilized the translated manuals for instruction so that the student can use electronic equipment such as an oscillator, while checking the student's understanding. This instruction was conducted in English for 30 minutes at the beginning of the class. The students' responses to our questionnaire revealed that 10% of them felt that English is “unnecessary”, while around 40% of them found the class taught in English “inspiring”.

(Keywords: a class using English, cooperation with English teacher, global engineers personnel training education)

1. はじめに

「英語が苦手」という高専生が多いことは以前からよく耳にしてきた。本稿を執筆するにあたって改めて調査したところ、TOEIC スコアのデータ比較では、高専 3 年生の平均点が高校 3 年生平均より 90 点低いとの報告がある¹⁾。このような「英語が苦手な高専生」神話を覆すべく、国際化・異文化理解・英語コミュニケーション力の向上を目指した教育事業が過去から繰り返し行われてきた。本校で長らく行われてきたホームステイ事業「日豪交流」や学内に英語しか通じない空間を設置し、様々な学生交流の取組みとともに英語でのプレゼ

ンテーションを実践した教育事業「Sphere 東京」²⁾などもその一例であり、異文化理解を育み英語によるコミュニケーション力向上に資する取組みを造詣の深い教員が核となって昔から一般教育科や専門学科の垣根を超えた全学的な事業として行ってきた。

近年では 2019 年度から国立高専機構が掲げるグローバルエンジニア育成事業³⁾における基礎力養成プログラムとして採択された本校の教育事業を遂行するにあたり、低学年時から英語に触れる機会を増やすために実験・実習などのエンジニアリング教育の中で一部英語を用いた授業を展開す

* 電子工学科 ** 一般教育科(英語) *** 教育研究技術支援センター第 2G

る計画が策定され、1 年次「ものづくり基礎工学」においては 5 学科ともネイティブの非常勤講師と専属英語教員の協力のもと 2021 年度より一部英語による授業を実践してきた。ここでは特に、「ものづくり基礎工学」の電子工学分野における授業実践例を紹介する。「ものづくり基礎工学」では 5 クラスの学生が 1 分野 5 テーマの実験をローテーション方式で 1 年間に亘って履修する。本稿で述べる取り組みでは、5 テーマのうち 1 テーマについて、30 分程度の時間を英語で授業した。電子工学分野においては、一般教育科(英語)の廣池教員に協力いただき、冒頭 30 分程度の時間を英語で、学生とコール&レスポンスをしながら、発振器やオシロスコープといった電子機器取扱を実習指導した。本稿ではこの授業実践の様子を報告するとともに、授業後に実施した学生の振り返りアンケート結果を元に 2 年間で実践してきた専門基礎教育での英語による授業の導入に関して授業評価・分析を試みた結果を報告する。

2. 授業実践の経緯

この「グローバルエンジニア育成事業」が始まった当初は 5 テーマ中の 1 テーマ「電波と通信のしくみ」の授業冒頭に、紙芝居風の読み聞かせを英語で実施し、直後に英語で出題したクイズに学生が答えるという取り組みを行った。ここで使用した専用テキストは 5 分野の英語による実習指導書をまとめて冊子化し、学生に配布した。電子工学分野のテキスト内容は「実習指導書」というより「読みもの」になっており、電波通信の父として有名なマルコーニの偉業について記述した書籍⁴⁾の一部分を翻訳した英文のみを掲載した。

授業内では英文テキストと同じマルコーニの生い立ちと偉業に関するストーリーを廣池教員が紙芝居風にパワーポイントにまとめてスクリーンに写して見せながら英語で語り聞かせ、最後に英語で出題したクイズに学生が答えるという授業インストラクションとした。紙芝居風にイラストを多用した背景には、英語による授業への嫌悪感・抵抗感を減らす狙いがある。英文翻訳した文章のみのテキストに比べ、場面を分かりやすいイラストで表現しているため多少リスニングが苦手でも、絵を見ることで話の内容理解の一助となっていたと思われる。内容理解を確認するクイズ自体も簡易な内容で作られていたが、ストーリー内容が把握できていない学生にとってはクイズに答えるの

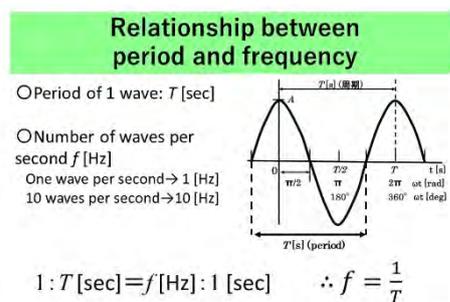
にも難儀した学生もいた。ただ残念なことに、この当初の取り組みについては学生のアンケートを収集していなかったため学生の様子を客観的に評価することは困難であるが、一部の英語嫌いな学生たち以外は純粋に紙芝居とその直後のクイズを楽しんでいたように感じられた。

この事業の期間中に学生が英語に触れる機会を増やすとともに英語によるコミュニケーション力の実効性をあげる方針が示されたため、「ものづくり基礎工学」の代表連絡会においても学年が 1 年生であることを考慮し「イヤにならない」程度に英語に触れる機会を増やすことが検討された。

3. 英語による授業実践と振り返りアンケート

3.1. 英語で指示する電子機器取扱指導

上記方針を受けて、電子工学分野では 2 年目から廣池教員の全面的な協力を仰ぎ、従来から授業前半に行ってきた電子機器取扱インストラクションを記載したパワーポイントの内容を英文翻訳することに着手した。これはもともと写真やイラストなどを多用した指導内容だったため、そのまま活用しスライド内の指示内容を英文翻訳して頂いた。スライドの一例を図 1 に示す。廣池教員にとっては全く馴染みのない交流波形の周期・周波数、発振器やオシロスコープのセッティング、波形観



Example of waveform observation

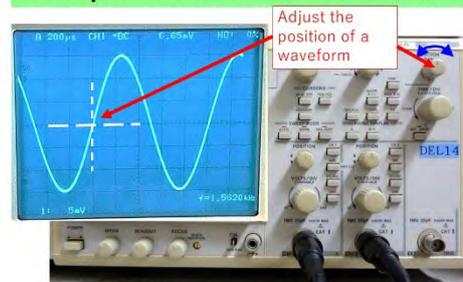


図 1 授業で示したスライドの一例



図2 英語での実習風景

測など機器の使い方を英語で指示してもらうために準備の労を依頼した。スライドの中身は最低限のことしか記載していないため、廣池教員には行間を英語で説明してもらいながら、時には日本語交じりで学生に指示を与えてもらった。授業中、電子工学科教員は廣池教員の英語による指示を繰り返し学生に伝えながら、指示を受けて学生が何をすべきかをアドバイスし、あるいは機材実習で困っている学生のサポートをした。図2に授業風景の一コマを示す。写真やイラストを多用したスライドを活用した授業インストラクションは、初年度に紙芝居風の英語による読み聞かせを実践した経験を生かし、できるだけ学生の嫌悪感・抵抗感を低減する狙いを受け継いだものとなっている。学生は2名1組のグループ活動であったが、グループ間でも互いに「何をどうすればよいか」助言し合っていた。教員自身も指示したことが実際にできているか学生に問いかけ、コール&レスポンスで反応を探りつつ進めたので、特に実習進度が遅れた学生もなく進められた。学生の中には英語による指示を聞いてというよりは、写し出されたスライドの文言を見て機材のセッティング等をしている様子が見受けられた。文字情報から英語で記載された実習内容を理解するという点ではマニュアルを読みこなすのと同様と言える。

3.2. 学生の振り返りアンケートから

前記2.で述べた通り、英語に触れる機会を増やしコミュニケーションの実効性をあげる観点から2年間にわたり、英語で解説・指示をする電子機器取扱指導を実践した。受講した5クラスすべての学生に対し、当日中に振り返りアンケートを実施し理解度について自己評価してもらった。2年

Q1. あなたはものづくり基礎工学の授業に意欲的に取り組んでいますか?
1 全く意欲的でない 2 やや意欲がない 3 やや意欲がある 4 とても意欲がある

Q2. あなたは電子計測機器の基本的な使い方を理解できていますか?
1 全くできていない 2 あまりできていない 3 多少理解できている 4 十分理解できている

Q3. あなたは今回の英語を使った授業にどのように取り組みましたか?
1 全く意欲的でない 2 やや意欲がない 3 やや意欲がある 4 とても意欲がある

Q4. あなたは今回の英語を使った授業がわかりやすかったですか?
1 わかりにくい 2 なんとなくわかった 3 わかりやすい 4 とてもわかりやすい

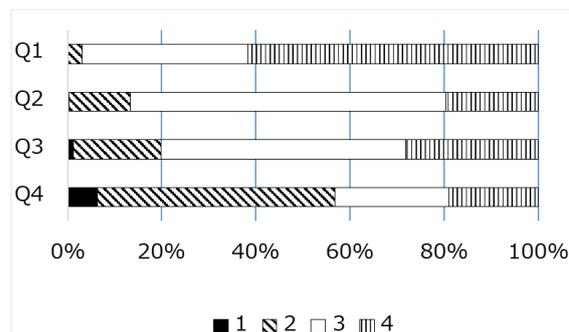
Q5. 今回のテーマで、あなたが感じたことに近いのは次のどれですか? (複数回答可)
1 興味が無い 2 機器の取扱いが厄介 3 簡単なようで難しい 4 興味が湧いた
5 つまらない 6 機器の取扱いが分かった 7 英語は不要 8 英語の授業が新鮮

自由記述欄

図3 振り返りアンケートの項目

間で得られたアンケートは回答者数413名であった。振り返りアンケートを図3に示す。質問項目はQ1：授業への意欲，Q2：機器取扱の理解度，Q3：英語による授業への意欲，Q4：英語による授業の理解度，Q5：このテーマで感じた印象，および自由記述欄で構成されており，Q1～Q4の各質問には自分の気持ちに最も当てはまるものを4段階択一式で選択，Q5は複数選択制とした。Q1～Q4の集計結果を図4に示す。全回答者数に対する項目選択者数の割合を積み上げ式に表した。

電子工学分野については、以前から学生のアンケート結果を元にもものづくり基礎工学で展開しているテーマの教育実践例について事例紹介してきた^{5,6,7,8}。アンケート項目Q1はその流れを汲み、まず学生自身の取り組み姿勢を問いかけている。1年次唯一の専門科目「ものづくり基礎工学」については約6割の学生が「とても意欲的」に取り



Q1 授業への意欲 (1:ない → 4:ある)
Q2 電子機器取扱いの理解 (1:全くない → 4:十分ある)
Q3 英語による授業への取組意欲 (1:ない → 4:ある)
Q4 英語による授業の分かりやすさ(1:分かりにくい →4:とても分かりやすい)

図4 振り返りアンケートの集計結果

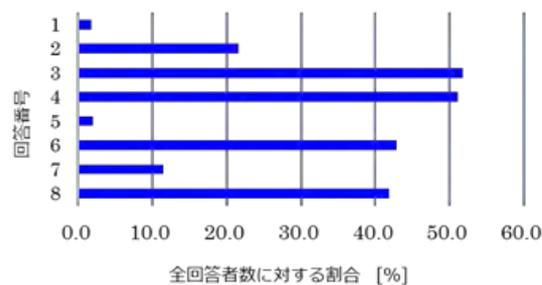
組んでおり、9 割以上の学生が意欲的に取り組んでいることを示している。この傾向は年度変化がほぼ見られず⁸⁾、工業高専の入学者であるため 1 年生唯一の専門科目に対する興味・関心が高いことの表れと受け止められる。次の Q2~Q4 では英語による授業への理解度と関連付けて問いかけている。

Q2「機器取扱の理解度」については、「十分理解できた」が 2 割に留まる一方、6 割以上の学生が「多少理解できた」と謙虚に自己評価している。機器取扱に不慣れまたは苦手意識を感じる学生が自信なく評価しているか、あるいは英語による指導だったため理解不足と感じて選択した可能性がある。

Q3「英語による授業への意欲」についての自己評価では、「やや意欲あり」が最多で半数を占めた。あまり意欲的ではないと自己評価した学生は 2 割程度であった。一方、「とても意欲あり」と自己評価した学生は 3 割であり、意外に多いと感じられた。しかし Q4「英語による授業の理解度」については、「なんとなく分かった」が最多で 5 割を占め、「分かりにくい」と合わせて約 6 割は消極的な自己評価であった。「とても分かりやすい」は 2 割に留まった。これは先述した Q2 の自己評価とリンクし、英語での指示内容が「なんとなく分かった」ゆえに機器取扱が「多少理解できた」と評価したのではないかと受け止められる。

Q5「このテーマの印象」については複数選択制の質問であるため、全回答者数に対する項目選択者数の割合で表し、図 5 に示す。「3. 簡単なようで難しい」と「4. 興味が湧いた」をそれぞれ約半数の学生が選択、続いて「6. 機器取扱がわかった」と「8. 英語の授業が新鮮」をそれぞれ約 4 割の学生が選択した。「7. 英語は不要」を選択した学生は意外に少数で約 1 割であった。3. を選択した学生が多かったのは本旨によるものというより、このテーマ特有の理由があると推測される。このテーマの授業後半では AM ラジオを組み立て、放送を受信してオシロスコープで電波(搬送波)の波形を観測する。図 1 の上のスライドのように波形の周期を測定し、周波数を計算で求める。本実験を行う実験室が広いため、場所によって電波の入りやすさが異なり、同調に用いるアンテナの向きや空気バリコンを絶妙に調整しなければならない場合がある。他の班が難なく受信できているのに対し、調整に手間取った班はこの調整の大変さを痛

Q5 このテーマで感じた印象 (複数回答)



回答番号は以下の通り		
1 興味ない	2 機器扱いが厄介	3 簡単なようで難しい
4 興味が湧いた	5 つまらない	6 機器取扱が分かった
7 英語は不要	8 英語の授業が新鮮	

図 5 振り返りアンケートの集計結果

感じたに違いない。学生によってはうんざりした表情を浮かべながら実験を続けている場合がある。これは 2 割の学生が選択した「2. 機器取扱が厄介」にも同様のことが言えるかもしれない。

ここで注目すべきは 8. を選択した割合が全回答者の 4 割だった点であり、意外にも学生には好印象に映ったと評価できる。先述した「Q3 英語による授業への意欲」が概ね意欲的であったことも踏まえ、英語で授業すること自体に経験がない学生には「嫌気」よりも「新鮮さ」が勝っており、純朴な高専生らしい感じ方かもしれない。また 6. を選択した割合が全回答者の 4 割という点についても、Q2 と比較すると意外にも高評価に受け止められていると感じられる。さらに注目すべきは 7. の選択割合が 1 割程度に留まった点である。英語に対する必要性を感じる学生が実は多いということの裏返しであり、苦手意識があるかもしれないけれど英語を使ったコミュニケーションに対する潜在的なポテンシャルは、実は高いのではないかと捉えられる。この意識レベルは、単なる英語の平均スコアでは計り知ることのできない点であるが、この意識の喚起に学生個人の「継続・持続」性が働けば英語力の向上=平均スコアのアップにつながるものと期待される。

さらに Q5 は複数回答制の質問であることに着目して、英語に対する積極的的回答としての 8. と消極的的回答としての 7. を軸にして本来エンジニアリング教育の素養である項目「4 興味が湧いた」や「6 機器取扱が分かった」との関係について集計した特徴抽出結果を図 6 に示す。図 6 では 4 と

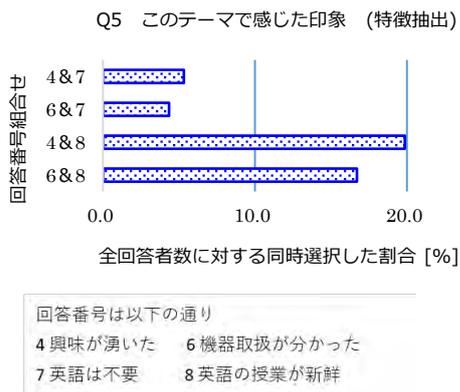


図6 振返りアンケートからの特徴抽出

8, 6と8, 4と7, 6と7についてそれぞれ同時に選択した学生の割合を示している。積極的な回答として、4と8を同時に選択した割合は2割、6と8を同時に選択した学生の割合は2割弱であった。一方、英語授業に消極的な回答の組合せとして4と7及び6と7を同時選択した学生の割合はそれぞれ5%及び4%程度であった。そもそも「7英語は不要」を選択した回答が全体の1割に過ぎないため、項目を同時選択した割合はさらに半数程度となっている。ただこの特徴は英語による授業に対して否定的であるが、興味・関心が高い、または理解度が高いことを表しており、つまりエンジニアリング教育自体には積極的に取り組んでいるが英語には嫌悪感が高い層と見受けられる。

自由記述欄にはテーマ内容自体に関する感想のほか、英語による授業に対する賛否の記載があった。Q5で英語による授業が新鮮に映った学生が少なくないことを反映し、肯定的に捉えてもっと英語力を向上させたいという明確な意思表示を表した文面も少なくなかった。一方、英語の重要性は認識するが、専門科目を学ぶ機会としての「ものづくり基礎工学」ではなく、別形態の講座で実施すれば良いとの意見もあった。学生の意見・感想のニュアンスを伝えるため、自由記述の一部を以下に紹介する。

- ・英語力が低いことを実感した
- ・英語だと機器の取扱い方が伝わりにくい
- ・英語は必要だと思うが、自由参加講座でやってほしい
- ・そもそも難しい授業なので、英語で受ける授業は難しかった
- ・図が示されていたため分かりやすかった

- ・英語を理解できなかったが、機器の使い方を最低限は理解できた
- ・英語への意欲が上がった
- ・聞き取れて自分の成長を実感した
- ・英語の先生の発音が聴き取りやすかった
- ・英語での授業で語学以外を習うことは初めての体験だったため新鮮で楽しかった
- ・工学の分野に取り組むうえでも英語が重要だと再認識できた
- ・英語による授業は海外における活動の重要な練習になると感じた

4. おわりに

グローバルエンジニア育成事業の一環で専門導入基礎教育である「ものづくり基礎工学」における電子工学分野の取組みとして、発振器やオシロスコープの機器取扱指導を授業の冒頭30分程度、英語科教員と連携して英語で実践した授業事例を紹介した。英語が苦手な高専生を意識し少しでも抵抗感を下げるため、イラストや写真を多用したパワーポイントファイルを英文翻訳して授業中のスライドとして用いた。学生の自己評価として実施した振返りアンケート結果によると、取組意欲はやや高いものの内容理解にはやや欠ける側面が見受けられた。しかし授業の印象としては本来の授業目的である「興味が湧いた」、「機器取扱が分かった」を挙げる学生が多く、「英語による授業が新鮮」に映り英語力を向上させたいと意欲を示す意見があった。一方、英語で授業を行うなら科目以外の自由参加講座で実践すればよいとの建設的な意見もあった。

英語科目以外で英語による授業を受けたのは初めてのようで新鮮だったとする学生が多かった点は、専門導入科目の中で英語科教員と連携し、英語に触れる機会を設けた意義が概ね受け入れられたものと思われる。一方、英語に対する嫌悪感の払拭は非常に難しい課題である。

参考文献

- 1) 横田実世, 菊地秋夫, 熊谷雅美, 佐藤健, 庭瀬一仁, 井関祐也, 今野大輔, 古川琢磨, 福松嵩博, 水野俊太郎, 山本歩: 専門エンジニア教員とのコラボレーションによる高専英語導入法, 工学教育 vol.70-2, pp.119-123, 2022年
- 2) 阿久沢昇, 小嶋徹也, 堀智子, 土屋賢一, 庄司良, 村井三千男, 玉田耕治, 一戸隆久: 国際通

用力的ある若き実践的エンジニア育成,
Journal of Japan Association for College
of Technology, vol.15, no.2, pp.5-8, 2010
年

- 3) 高屋朋彰, 千川尚人, 井手尾光臣, 石原学: グローバルエンジニア育成事業の展開と検証ー学生の国際交流活動を促すクラウド型ポートフォリオシステムの開発ー, 公益社団法人日本工学教育協会 2021 年度工学教育研究講演会論文集, 1C07, pp.56-57, 2021 年
- 4) 池谷理: 『エレクトロニクスの生い立ち』, オーム社, pp.15-17, 1990 年
- 5) 一戸隆久, 加藤格, 新田武父, 大塚友彦, 正木進: 東京高専における新入生向け体験重視型専門基礎教育ーその 3 電子工学分野ー, 平成 19 年度工学・工業教育研究講演会講演論文集, pp.570-571, 2007 年
- 6) 一戸隆久, 大塚友彦, 加藤格, 新田武父: 東京高専電子工学分野における新入生向け専門導入教育の授業改善, 平成 24 年度全国高専教育フォーラム教育研究活動発表概要集, P0-A05, pp.297-298, 2012 年
- 7) 一戸隆久, 大塚友彦, 加藤格, 新田武父: 専門基礎実験における学生の主体的な学びの実践例, 東京工業高等専門学校研究報告書 第 47 号, pp.40-43, 2016 年
- 8) 一戸隆久, 新田武父: 実験科目における事前学習用ビデオ教材の活用, 東京工業高等専門学校研究報告書 第 51 号, pp.35-41, 2020 年

(2024 年 1 月 12 日 受理)

レイアウト付き文書に対応した クラウド型点字翻訳システムの実用化

山下晃弘*, 松林勝志*, 藤巻晴葵**, 板橋竜太***

点字文書は、指先の触覚で情報を伝達するため、視覚的な表現方法を含むことができない。例えば、点字のサイズは一定で色は無く、レイアウトも基本的には左詰である。一方で、印刷された文書は、文字サイズや色などによる視覚的な強調や補足表現に加えて、段組みや箇条書きなど、視覚に障害のない晴眼者に対して可読性を高める工夫がなされている。そのため、これらの文書を点字文書に変換する場合、単に OCR (光学文字認識) 等で抽出された文字列を点字に変換するだけでは適切とは言えない。視覚障害者が読みやすい点字文書を作成するためには、文書を構成する要素ごとに切り分けたうえで、その内容やレイアウト等を考慮して再構築する必要があり、専門知識やスキルを持った人手による翻訳が不可欠である。本研究では、これらの点字への翻訳作業 (点訳) を効率化するために、深層学習モデルの一つである LayoutLMv3 をバックボーンとして用いて、レイアウト付き日本語文書の構成要素分析モデルと、順序予測モデルを開発した。一方で、複雑な文書を視覚障害者が理解しやすい点字文書に変換するためには多くのノウハウを必要とするにも関わらず、その知見はこれまで十分に蓄積されてこなかった。そこで、深層学習モデルを用いた点訳支援機能を持つクラウド型点字翻訳システムを開発し、点訳者の作業結果を蓄積することで、そこに潜在するノウハウの見える化と体系化を実現するための基盤を整備した。

(キーワード: 点字翻訳システム, 視覚障害者支援, 文書画像解析, 深層学習)

Practical Application of Cloud-Based Braille Translation System for Documents with Layout

Akihiro YAMASHITA*, Katsushi MATSUBAYASHI *

Haruki FUJIMAKI**, Ryuta ITABASHI***

Braille documents do not incorporate visual representations as information is transmitted through the sense of touch in the fingertips. For instance, there is no variation in the size, color, or font of Braille letters, and the layout remains fixed and left-justified. On the other hand, printed documents are designed to optimize readability for the sighted individuals, utilizing elements such as columns, bullets, visual emphasis, and supplementary expressions using typeface size and color. Therefore, the mere application of Optical Character Recognition (OCR) to convert extracted character strings into Braille is inappropriate. To enhance readability for the visually impaired, it is essential to separate the document into its constituent elements, determine the relationship and importance of each element in context of its content, layout, emphasis, etc., and then reconstruct the document. In that sense, Braille translation of documents with complex layouts requires manual human intervention, demanding significant labor, time, and expertise. In this study, we developed a model for analyzing the components of the layout of Japanese documents and a model for predicting the order of the components using LayoutLMv3, a deep learning model, as a backbone to improve the efficiency of braille translation. On the other hand, while converting complex documents into Braille documents while maintaining high readability for visually impaired people requires substantial expertise, the accumulation of such knowledge has been insufficient thus far. In this study, we developed a cloud-based Braille translation system that incorporates a deep learning model as a Braille translation support function, aiming to improve the work efficiency of Braille translators.

(Keywords: Braille translation system, support for the visually impaired, document image analysis, deep learning)

* 情報工学科 ** 筑波大学, TAKAO AI (株) *** サウサンプトン大学, TAKAO AI (株)

1. はじめに

点字文書は、点字のサイズは一定で色が無いなど視覚的な情報を一切含まない。一方で、印刷された文書は、文字サイズや色などによる強調表現、補足表現が可能であり、さらに段組みや箇条書きなど、晴眼者（視覚に障害の無い者）に対して可読性を高める工夫がなされている。そのため、これらの文書を点字文書に変換（点訳と呼ぶ）する際は、単に OCR（光学文字認識）で抽出した文字列を点字に変換するだけでは適切とは言えず、文書の内容やレイアウト、強調部分などを考慮したうえでその要素間の関係性や重要性を判断し、再構築する必要がある。場合によっては、読者の可読性を優先した順序変更や、点字特有の表現方法への変換が必要である。

渡辺らの研究¹⁾によれば、視覚障害者のための点訳・音訳サービスの需要は確実に存在するものの、点訳作業は長い時間を要することが課題であると指摘している。また、小説やエッセイなどの文学や雑誌は音訳利用者が比較的多い一方で、専門書、説明書、レシピ、会議資料といった何度も読み返す文書については、点訳が好まれる傾向があることも報告されている^{1) 2)}。

単純な日本語テキストや、見出しなどのごく基本的なレイアウトを含む文書の点字表記については、日本点字表記法³⁾や点訳のてびき⁴⁾が基準となっており、方言や表記の揺れの問題は残っているものの、自動翻訳技術やソフトウェアが広く利用されている。しかし、雑誌や専門書などの図表や複雑なレイアウトを持つ文書をどのように点訳すべきかの判断は、多くの場合点訳者に依存し、高いスキルと経験が必要である。

一方で、テキスト DAISY やマルチメディア DAISY といった、本文のテキストに見出し等のレイアウト情報を付加してアクセシビリティを向上させた電子書籍が普及しつつある。宮城ら⁵⁾は、テキスト DAISY 図書を対象に既存の自動点訳機能を適用しその有用性を調査した結果、翻訳の精度等に多くの問題が出現したと報告しており、アクセシビリティに配慮した電子書籍であっても、単純にテキスト部の機械点訳だけでは不十分であることが推察される。

そこで、本研究は次の三点を目的とする。①クラウド型点字翻訳サービスを開発し、単純な文書

に対する自動点訳機能及び、複雑な文書は点訳専門家による校正を直接依頼できる仕組みを提供する。②点訳者による点訳結果を蓄積することで、可読性の高い点訳法の体系化や、点訳事例共有化のための基盤を整備する。③点訳者の作業効率向上のために、深層学習モデルを用いて、レイアウト付き日本語文書の構成要素分析とその整列順序予測を行うモデルを開発する。

最終的には、あらゆる文書が人手による修正なく機械点訳できる状況が理想であるが、図やイラストを多用した複雑な文書や、前提知識を必要とする文書に対して完全な自動点訳を実現することは難しい。そこで本研究では、深層学習モデルを用いた点訳の半自動化を行い、効率化を目指す。

なお、著者らは視覚障害者アクセシビリティ向上を目指し、2021年2月に TAKAO AI 株式会社*を設立し、点字翻訳サービスを提供してきた。本稿は構築したシステムに加え、TAKAO AI の活動に基づいて得られた利用者からのフィードバックを分析し、システムの評価と今後の課題を考察する。

2. クラウド型点訳システム

2.1. 点訳の概要

点字文書は様々なルールや慣例に従う必要があり、表現の自由度が少ない。その制約下で、いかに正確かつ簡潔に元の文書の内容を表現するかが点訳の課題である。レイアウト付き文書を点訳する場合、文書の構成要素を抽出し、その読み順を考えて整列したうえで、各構成要素を単純なテキストで表現するという作業が基本となる。各要素がすべて文字列に変換された後は、点字表記のルールに従って、見出しや箇条書きなどを適切に変換すればよい。文書内の図は基本的に内容を説明するテキストで代替する。簡易的な表は表形式のまま点字で表現する場合もあるが、複雑な表は、行と列に関する説明を付加したり、全体をテキストで置き換えたりなどの工夫が必要になる。

2.2. クラウド型点訳システムの試作と事前調査

本研究ではまず、点訳システムの試作版を開発し、2021年10月から Web 上で公開[†]した。このシステムは、文書画像をアップロードすると、OCR に

* <https://takao.ai>

† <https://demo.takao.ai>

よって文字を抽出し, 抽出された文字列を左から右, 上から下に単純に並び替え, 独自に開発した点訳エンジン⁶⁾で点字表記に変換する。2022年11月までに約4,000件の点訳が行われ, そのうち260件についてユーザ評価を得た。評価項目としては, 5段階評価による全体の満足度及び点訳精度の満足度と, 自由記述形式での意見や感想とした。全体の満足度の結果を図1に, 点訳精度の満足度の結果を図2に示す。また, 文書の種類ごとに評価の分布を集計した結果を表1に示す。なお, 文字情報を一切含まないイラストや写真のみがアップロードされたケースは除外した。

集計結果から, 事務書類やパンフレットの満足度が比較的高い一方で, 複雑にレイアウトされた新聞などの満足度が低いことが分かった。特に新聞は複雑なレイアウトに加え, 縦書きと横書きが混在している文書であるため, 構成要素を正しい順序で点訳されず, 理解できない点訳結果になっていたと考えられる。また, 書籍や雑誌, 商品パッケージも満足度が低い。これらもレイアウトの複雑さが原因の一つであると考えられる。

2.3. 提案するシステムの概要

前述の通り, 複雑にレイアウトされた文書などを正しく点訳するためには, まず構成要素ごとに正確に分割し, 正しい順序に整列させる必要がある。構成要素が図や表などの複雑な要素である場合はそれらをテキストで説明する必要があるが, 本研究では図表の説明文の作成については極めて多様であるため, 人手による作業を前提とし, 構成要素の分割と順序の整列に関して深層学習モデルによる自動化を目指した。本システムにおける

点訳手順の全体像を以下に示す。また, システムが行う処理の全体像を図3に示す。

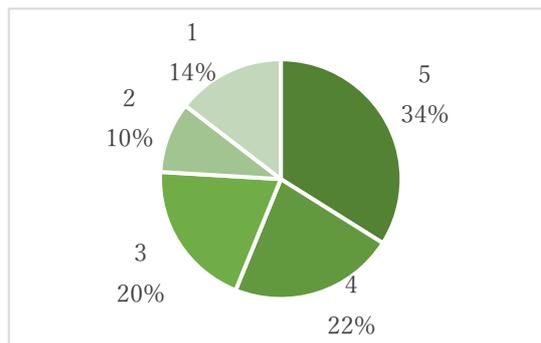


図1 満足度 5段階評価の結果

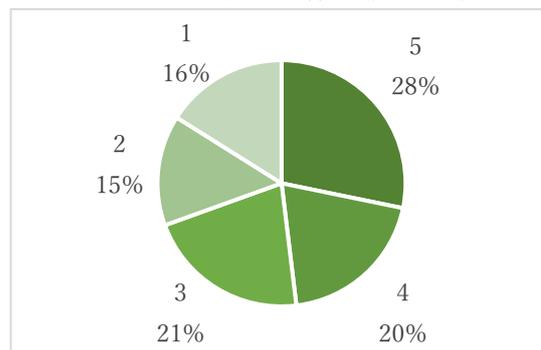


図2 点訳精度の満足度 5段階評価の結果

- ① OCR (光学文字認識) で文書内の文字を抽出
- ② 見出し, 箇条書き, 図表などの文書の構成要素単位でバウンディングボックスを推定
- ③ 深層学習を用いて構成要素の整列順序を推測
- ④ OCR の結果及び構成要素の範囲や整列順番の結果に基づいてテキストデータを出力。必要に応じて点訳者が確認し加筆修正
- ⑤ 点訳エンジンを使用して読む順番にそって各構成要素の内容を点字に変換

表1 画像の種類ごとの満足度の集計

点訳されたカメラで撮影された画像の種類	投稿数[件]	満足度別の投稿数[件]					満足度の平均値
		1	2	3	4	5	
新聞	15	2	6	4	3	0	2.53
書籍・雑誌	15	0	2	5	4	4	3.67
事務書類・パンフレット	39	1	1	3	14	20	4.31
チラシ・掲示物・ポスター・メニュー	42	1	3	10	8	20	4.02
手書きメモ・手紙	5	0	0	1	3	1	4.00
商品パッケージ	13	0	2	4	3	4	3.69
メータなど電子表示	6	0	1	0	0	5	4.50
点字書類・点字板	8	8	0	0	0	0	1.00
その他	16	3	2	5	4	2	3.00
計	159	15	17	32	39	56	3.65

ステップ①は、Google Cloud Vision API を使用する。この API は一文字ずつのバウンディングボックスと、一定の文字列のかたまりとしてのバウンディングボックスの両方を提供する。この結果に基づき、ステップ②では、文書の構成要素をひとまとまりとしたバウンディングボックスを推定する。詳細は 4 章で述べる。ステップ③は得られた文書の構成要素に対して整列順序を推定する。詳細は 5 章で述べる。また、ステップ②と③では、深層学習モデルのバックボーンに LayoutLMv3⁷⁾ を用いた。ただし、本稿執筆時点で LayoutLMv3 は日本語文書に対応していないため、独自に学習用データセットを準備して日本語対応版の事前学習済みモデルを構築し実装を行った。詳細は 3 章で述べる。ステップ⑤では、独自に開発した点訳エンジン⁶⁾を使用する。

このシステム利用時は、元となる文書を PDF 形式でクラウドにアップロードし、ステップ①から⑤を経て、最終的に点字書類のデジタルフォーマットとして一般的な BASE 形式で出力する。また、ステップ④では、点訳者が手作業で修正を行い、必要に応じて文書自体の修正や補足を加える。手作業による修正結果を蓄積して教師データとすることで、深層学習モデルを用いた構成要素検出や順序推定の精度を高められると考えている。

3. LayoutLMv3 による日本語文書エンコーダ

3.1. 基本方針

図 3 のステップ②では、文字サイズや配置、色

使いなどの複数の観点に基づいて文書を構成要素単位で区切り、各構成要素のカテゴリを推定する。近年、深層学習に基づく文書レイアウト解析の精度が急速に高まっており、本研究においても深層学習を用いたモデルを使用した。具体的には、テキスト情報と、画像的特徴を同時に扱うために、テキストと画像のマルチモーダル入力可能な LayoutLMv3⁷⁾を用いた。

3.2. LayoutLMv3 の概要

LayoutLMv3 は、Microsoft 社の Yupan Huang 氏らによって考案された言語モデルである。LayoutLMv3 はレイアウト付き文書に特化したモデルであり、BERT⁸⁾と同様に複数の Transformer⁹⁾モデルによって構成される自己教師付き事前学習モデルである。同じモデル内で文書画像とレイアウト情報を含めた文字列の両方を入力として使用するため、マルチモーダル型言語モデルと言える。

このモデルは Masked Language Modeling (MLM) と Masked Image Modeling (MIM), Word-Patch Alignment (WPA) と呼ばれる 3 つの自己教師付き事前学習で文書のマルチモーダル表現を学習する。MLM は正解テキストの一部をマスクして予測するタスクであり、BERT でも使用されている。MIM は入力画像パッチの一部をマスクして予測する。WPA は入力文字列に対応する画像パッチがマスクされているか否かを予測し、その関係性を学習する。

3.3. 事前学習済みモデルの作成

現在、日本語に対応した LayoutLMv3 の事前学習

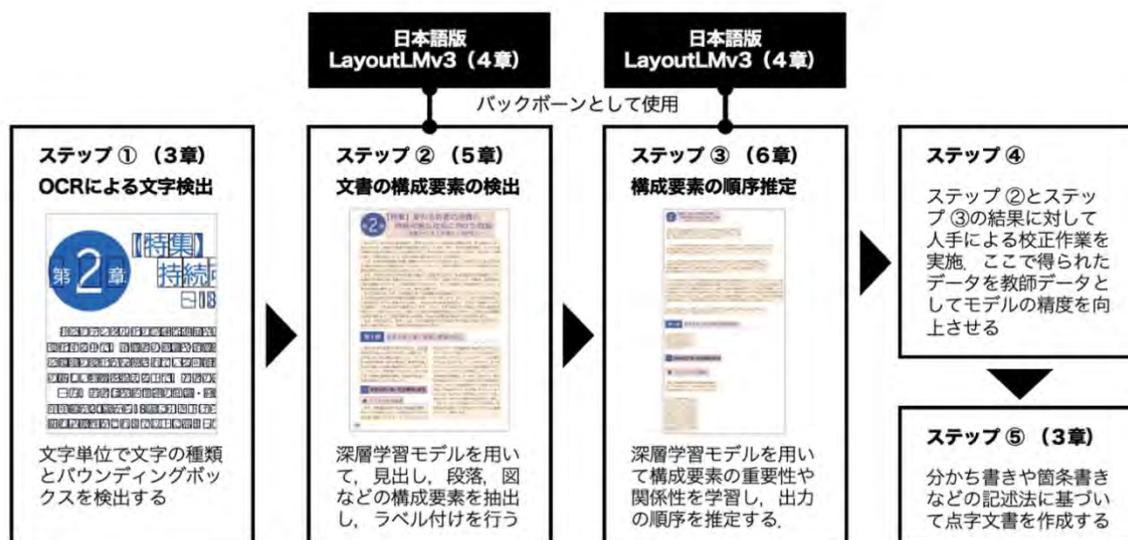


図 3 システムが行う処理の全体像

済みモデルは公開されていないため、独自に学習を行った。ただし、公開済みの英語版や中国版と同程度の精度を達成するためには、膨大なデータセットと計算資源が必要であり著者らの環境では困難である。本研究では日本語文書の対象を特定の領域に絞ることで一定の精度を達成することを期待し、事前学習を行った。

事前学習時のデータセットは日本政府や自治体が公開している白書など約 50 万枚の文書画像を使用した。また LayoutLMv3 は、文書画像とそこに含まれるテキスト情報が必要であるため、事前学習を行う前に Python の外部ライブラリである Tesseract¹⁰⁾ を用いて文字情報抽出を行った。

事前学習では、MLM と MIM の二つの事前学習タスクによって学習を行った。バッチサイズは 8、ステップ数は 50 万ステップ、最適化に Adam を使用し、学習率は 0.0001、ウォームアップ比率は 1% とし、NVIDIA RTX3090 を使用して 18 日間学習を行ったものを使用した。

4. 文書の構成要素の検出

4.1. 基本方針

本研究では文書の構成要素として、見出し (Headline)、本文 (Paragraph)、画像 (Image)、表 (Table)、補足 (Caption)、キー (Key)、バリュー (Value)、箇条書き (List)、その他 (Other) という 9 つのカテゴリを設定した。図 3 のステップ②では、各構成要素を文書内から検出するために物体検出の深層学習モデルを使用した。具体的には、Zhaowei Cai 氏らによって考案された Cascade R-CNN¹¹⁾ を用いた。このモデルは、様々なエンコーダモデルと組み合わせ使用しやすく、安定して高い検出精度を達成している。また、物体検出器では一般的に、Intersection Over Union (IoU) の閾値を小さくするとノイズを含む検出を許容し、逆に閾値を高くすると検出性能が落ちてしまう問題がある。Cascade R-CNN は、検出器を多段層にし、徐々に IoU の閾値を高くすることでその問題を改善している。このような優位性を評価し、本研究では Cascade R-CNN を採用した。

Cascade R-CNN を使用する上で、画像表現を抽出するエンコーダ部分には CNN ベースのモデルを使用することが一般的であるが、公開されている事前学習モデルは風景から人などの物体を検出す

る目的で作成されたものが多く、文書の構成要素検出を目的として使用するのには適切でない可能性がある。そこで、構成要素の検出モデルのエンコーダ部分には一般的に利用されている CNN ベースのモデルとは別に事前学習済みの LayoutLMv3 を用いてファインチューニングした場合についても評価実験を行い比較した。

4.2. 学習に使用するデータセット

学習用の教師データは、アノテーション情報として構成要素のバウンディングボックス及びそのカテゴリのラベルが必要である。本研究では、白書などの政府が発行している日本語公文書の画像約 200 枚に対して手作業でアノテーション作業を実施した。この作業には Label Studio¹²⁾ を利用し、前述の 9 カテゴリのラベルを付与した。なお、その他 (Other) のカテゴリは文書のページ番号などの文書の内容に直接関係なく、読まれなくても問題のないものとした。また、キー (Key) とバリュー (Value) は項目名とその内容など、二つの構成要素が従属関係にある場合に使用した。図 4 は、作成したデータの例である。またデータセットのフォーマットは COCO フォーマット¹³⁾ を採用した。

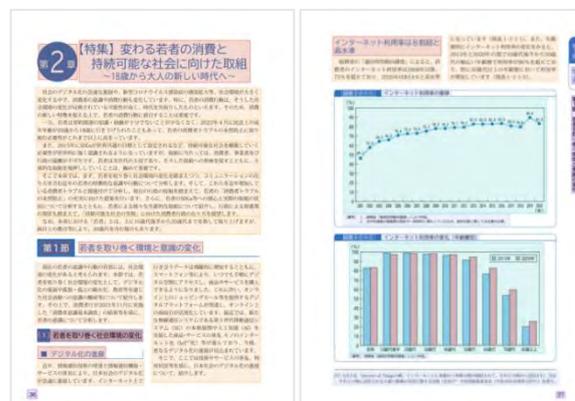


図 4 文書の構成要素のバウンディングボックスをカテゴリ別で色分けし描画した図

4.3. 構成要素検出の精度比較実験

Cascade R-CNN を用いた文書の構成要素検出精度の検証を実施した。エンコーダモデルには以下の 3 種類を適用し、同じデータセットで学習を行い、精度を比較した。

- ImageNet¹⁴⁾ で学習済みの CNN ベースのモデル
- Microsoft 社が提供している事前学習済みの

表 2 白書 26 ページ分による各モデルのクラスごとの mAP スコア

エンコーダモデル	Headline	Paragraph	Image	Table	Caption	Key	Value	List	Other
CNN ベース	52.319	67.932	65.797	33.663	24.946	N/A	N/A	N/A	35.296
英語版 LayoutLMv3	47.764	75.143	53.703	54.307	31.595	N/A	N/A	N/A	38.695
日本語版 LayoutLMv3	38.378	58.960	46.130	30.297	12.737	N/A	N/A	N/A	29.539

英語版 LayoutLMv3 モデル

- 本研究で独自に作成した事前学習済みの日本語版 LayoutLMv3 モデル

学習時はバッチサイズ 4, ステップ数 20,000, 最適化には Adam を使用し, 学習率は 0.000025 に設定して学習を行った。また, 英語版, 日本語版 LayoutLMv3 は入力に文書画像だけを使用した。

精度評価には, 物体認識モデルのライブラリである Detectron2¹⁵⁾に含まれている COCO Evaluator という評価クラスを使用した。評価方法は COCO の Mean Average Precision (mAP) とし, この時の IoU は 0.50 から 0.95 の範囲とした。評価用データは, 政府が発行する日本語白書の文書画像から無作為に抽出した 26 ページ分とした。

4.4. 実験結果

3 つのモデルの学習による精度評価を行った結果を表 2 に示す。各数値は COCO の評価方法に従い算出された値である。構成要素のカテゴリは 4.1 節で示した 9 カテゴリであるが, 無作為に抽出した評価用のデータセットにはキー(Key), バリュー(Value), 箇条書き(List)の項目がわずらかしか含まれておらず, 精度の評価値としては信頼性が低かったため今回の評価は N/A とした。この結果から見出し (Headline), 画像 (Image) 以外の項目で Microsoft 社が作成した英語版 LayoutLMv3 の精度が他のモデルよりも高いことがわかった。

4.5. 考察

3 つのモデルの精度評価結果から全体として Microsoft 社が作成した英語版 LayoutLMv3 が CNN ベースのモデルよりも高い精度を達成した。この理由は, 事前学習で使用しているデータセットの違いであると考えられる。CNN ベースのエンコーダモデルは ImageNet のデータセットを用いて事前に学習されたモデルを利用している。ImageNet は主に風景や物体などの写真画像であり, 文書画像に特化していない。対して, 英語版 LayoutLMv3

は文書画像で事前学習を行っているため, 文書画像を扱うタスクに対して適している。加えて, LayoutLMv3 は事前学習時に文書画像だけでなく, 文書画像内の文字列を入力として同じモデルで使用しており, より効率よく文書画像表現の精度が向上していると考えられる。

本研究で作成した日本語版 LayoutLMv3 は, 現時点では Microsoft 社によって作成された英語版 LayoutLMv3 と CNN ベースのモデルに精度面で及ばなかった。最も大きな要因は事前学習のデータセットの規模や計算資源の不足であるが, それでも一定の精度に達していることから, 日本語文書を用いた事前学習は正しく行われていることがわかる。日本語文書に対しての推定精度を高めるためには, 事前学習においても日本語文書を用いることが必要であり, 今後は学習ステップ数やデータセットの規模を増やし, 精度改善を目指す。

5. 構成要素の順序推定

5.1. 基本方針

図 3 のステップ③にあたる構成要素の順序推定では, ステップ②で分割された構成要素を入力とし, 深層学習を用いて各構成要素の整列順を推定する。先行研究としては, Microsoft 社による LayoutReader¹⁶⁾が挙げられる。しかしこのモデルは本稿執筆時点で日本語に対応しておらず, データセットも公開されていない。また, LayoutReader はデコーダ部に RNN を使用しているが, 独自に学習させる場合は, Transformer をベースとしたモデルの方が効率よく学習できると判断し, 本研究では独自にモデルを構築した。このモデルは 4 章と同様に LayoutLMv3 をバックボーンに使用し, 文書のレイアウト情報を含んだ文字列と文書画像から正しい構成要素の順序を推定させる。

5.2. モデル設計

本研究で開発した構成要素の順序推定モデルを図 5 に示す。入力に位置埋め込みを実施した後,

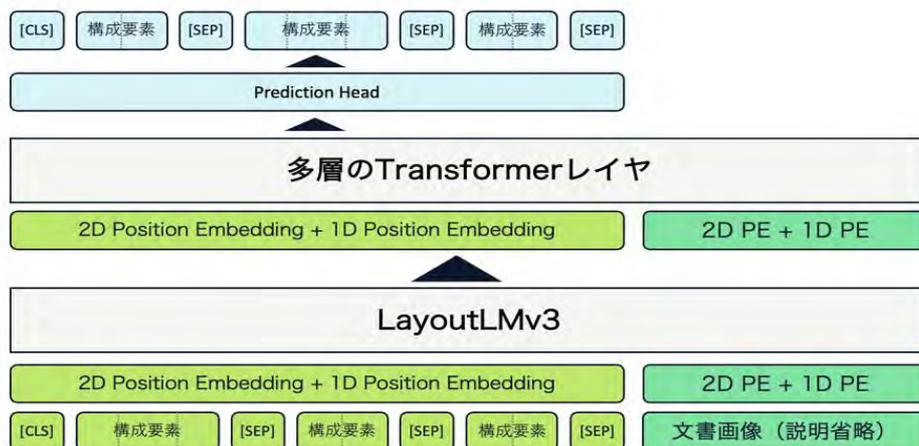


図 5 構成要素の順序推定モデル

LayoutLMv3 でエンコードを実施する。この出力に対して再度同様の位置埋め込み処理を行い、多層の Transformer レイヤを通過させる。最後に Prediction Head によって構成要素の順序を推定する。また、明示的に構成要素を区切るために構成要素ごとに [SEP] トークンを挿入した。

5.3. データセットとモデルの学習

4.2 節で述べた独自データセット 200 枚に対して、手作業で読み順の正解ラベルを付与し、学習を行った。バッチサイズ 8, ステップ数 10,000, 学習率 0.0001, ウォームアップ比率 5% とした。なお、本モデルは日本語文書のテキスト情報も使用するため、英語版 LayoutLMv3 は使用できない。そこで、事前学習の精度は不十分ではあるものの、本研究で作成した日本語版 LayoutLMv3 を使用した。その後の Transformer レイヤは 4 層とした。

過学習を防ぐために、構成要素の順序は入力時にランダムにシャッフルして学習を行った。なお、構成要素の文字列がモデルの文字列入力制限を超えてしまう場合を考慮し、構成要素ごとに最大文字数を 50 文字までに制限した。

5.4. モデルの評価

5.3 節で述べた学習済みモデルを使用して、構成要素の順序推定を行った。評価には機械翻訳等における定量的評価手法である BLEU スコア¹⁷⁾を用いた。結論としては、学習データに対する BLEU スコアは 68.840, テストデータに対する BLEU スコアは 1.225 となり、推定結果に差が生じていることから過学習を引き起こしていると考えられる。主な原因は順序推定のための学習データ数不足で

あり、また事前学習時の精度不足も影響していると考えられる。今後は点字翻訳システムを実運用しながらモデルの精度を高める予定であるが、日本語文書で使用可能な事前学習モデルが公開された場合はそれらを使用し、独自のデータセットによるファインチューニングを実施することも視野に入れてシステムを構築している。

6. クラウド型点訳システムの開発と運用

6.1. システム概要

本研究では、2 章で述べた深層学習を用いたクラウド型文書点訳システムを実現するために、クラウド型文書点訳システムの開発を行った。このシステムの点訳手順を以下に示す。

- ① OCR (光学文字認識) で文書内の文字を抽出
- ② 点訳者は文書内の見出しや箇条書きの部分にバウンディングボックスを作成し、文書の構成要素の種類を選択する
- ③ 各構成要素を適切な読む順番に並び替える
- ④ プログラムベースで読む順番にそって各構成要素の内容を点字の文書に変換

最終的には、ステップ②と③で深層学習による推論結果を初期候補として示すことを想定している。ただし、現時点では推定精度が不十分であるためまずは人手での入力を前提とした。これらの作業は基本的にマウス操作のみ完結するよう設計しており、深層学習による推論が無くても、従来の点訳作業と比べれば効率的である。図 6 は翻訳作業を行う画面である。左側に表示された入力画

像に対して構成要素ごとにマウスで範囲選択し、カテゴリを設定する。そして図 6 の右には構成要素をリスト表示しており、要素をマウスでドラッグすることにより、読む順序を設定する。図表は、その説明文を入力することで、点字に変換する。

このシステムを運用することで、点訳者が作成したデータが蓄積される。得られたデータは深層学習による文書の構成要素の検出モデルと読む順序の推定モデルの学習で使用し、モデルの推論精度向上を目指す。一定の推論精度に達成した後、機械学習による推論機能を有効化する予定である。



図 6 文書の構成要素のバウンディングボックスと順序を設定している様子

6.2. システムの検証

文京区役所、筑波大学附属視覚特別支援学校と協力し、本システムを用いて文京区役所が発行している 19 種類の書類を視覚障害者向けテキストに変換した。特別支援学校に在籍する視覚障害者の教師 7 名に閲覧して頂き約 80 件のフィードバックを得た。項目は、読みやすさ、役に立ったかの二項目について、それぞれ 5 段階で評価して頂いた。結果を図 7, 8 に示す。

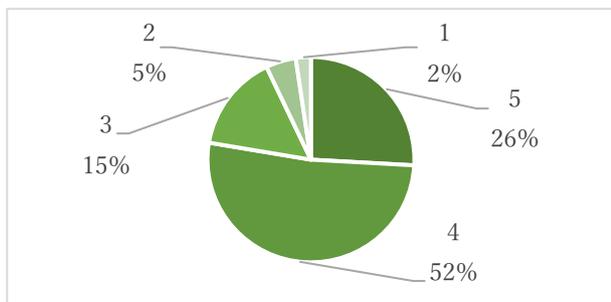


図 7 「読みやすさ」 5 段階評価の結果

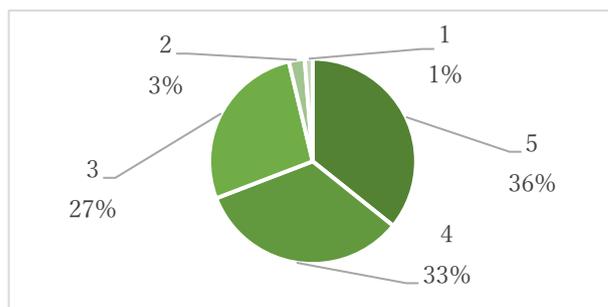


図 8 「役に立った」 5 段階評価の結果

「読みやすさ」の評価では、78%の文書が 4 以上の評価を得ており、点訳の知識がなくとも視覚障害者に一定程度の情報提供を行えていることが分かる。一方で、一部の評価が 3 以下である原因として、点訳者のスキルによる品質のばらつきや、元の文書自体の情報量が多く、翻訳時にうまく内容を表現できなかったことが挙げられる。これらの部分は今後検討すべき点である。加えて、「役に立った」の評価については、文書の種類が大きく影響しており、防災情報などの文書は評価が高く、音楽イベントなどは比較的低い結果となった。

7. おわりに

本研究では、深層学習を用いたクラウド型文書点訳システムの実現に向けて以下を開発した。

第一に、見出しや箇条書きなどの文書の構成要素を検出するために、深層学習モデルの一つである Cascade R-CNN を用いたモデルを開発した。文書画像表現を行うエンコーダ部分には ImageNet で事前学習済みの CNN ベースのモデル、Microsoft 社が作成した事前学習済みの英語版 LayoutLMv3、本研究で独自に事前学習を行った日本語版 LayoutLMv3、の 3 種類を使用し、モデルの精度比較を実施した。その結果、Microsoft 社が作成した英語版 LayoutLMv3 の事前学習モデルの精度が高いことがわかったが、独自に事前学習を実施した日本語版の LayoutLMv3 も一定程度の精度が達成できており、今後データセットの規模を拡大することで精度改善が期待できる。

第二に、本研究で開発した日本語版 LayoutLMv3 を用いて、多層の Transformer レイヤを用いた文書の構成要素の読み順推定モデルを開発した。現時点ではデータセット不足による過学習が問題であるが、学習自体は進んでおり、こちらもデータセットの充実により精度改善が期待できる。

第三に、クラウド型の文書点訳システムを開発

し実際に実証実験を行った。このシステムは、OCRを用いて入力された画像から文字列を検出し、文書の構成要素の抽出とその並び順序を設定し、点字を出力するシステムである。OCR部分や点字への変換部分は自動化され、従来の点訳作業と比較して効率化することができた。また、前述の深層学習モデルを用いた構成要素検出や順序推定機能を準備しているものの、現時点では精度が十分ではないため手作業を前提としている。今後システムを運用してデータを蓄積し、精度改善が達成できた段階で有効化する予定である。

本システムを用いて点訳の一部を自動化できたことで、点訳の効率化を図ることが出来た。実証実験においても、比較的点訳の労力を抑えて効果的な変換が実現できていることが分かった。このシステムを継続的に使用いただくことで自動化できる範囲を広げていきたいと考えている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K12906 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 渡辺哲也, 他, 視覚障害者のための点訳・音訳サービス利用状況調査, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 20, No. 1, pp. 13-20, 2018.
- 2) 点字利用と読書に関するアンケート調査報告書 -点字利用者の読書意識, 点字利用の実態を把握するために-, 日本点字図書館, 2014.
- 3) 日本点字表記法 2018 年版, 日本点字委員会, 2019.
- 4) 点訳のてびき第 4 版, 全国視覚障害者情報提供施設協会
- 5) 宮城愛美, 他, テキスト DAISY の閲覧における実時間自動点字変換機能の有用性に関する調査, 筑波技術大学テクノレポート, Vol. 28 (2), pp. 6-10, 2021.
- 6) R. Itabashi, et al., Research on a deep learning approach for translating Japanese document to braille text, In proc. of ISET2021, Taiwan, 2021.
- 7) Y. Huang, et al., LayoutLMv3: Pre-training for Document AI with Unified Text and Image Masking, Proc. of the 30th ACM International Conference on Multimedia, 2022.
- 8) J. Devlin, et al., BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding, NAACL-2019, pp. 4171-4186, 2019.
- 9) A. Vaswani, et al., Attention is all you need, Advances in neural information processing systems, pp. 5998-6008, 2017.
- 10) tesseract-ocr, <https://github.com/tesseract-ocr/tesseract>
- 11) Z. Cai, et al., Cascade r-cnn: Delving into high quality object detection, CVPR, 2018.
- 12) M. Tkachenko, et al., Label Studio: Data labeling software, <https://github.com/heartexlabs/label-studio>
- 13) Tsung-Yi Lin, et al., Microsoft COCO: Common Objects in Context, ECCV 2014, pp. 740-755, 2014.
- 14) O. Russakovsky, et al., ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge, Int'l. Journal of Computer Vision, 2015
- 15) Y. Wu, et al., Detectron2, <https://github.com/facebookresearch/detectron2>
- 16) Z. Wang, et al., LayoutReader: Pre-training of Text and Layout for Reading Order Detection. In Proc. of the 2021 Conference on Empirical Methods in NLP, pp. 4735-4744, 2021.
- 17) K. Papineni, et al., BLEU: a method for automatic evaluation of machine translation. In Proc. of the 40th Annual Meeting on ACL, USA, pp. 311-318, <https://doi.org/10.3115/1073083.1073135>, 2002

(2023年12月28日 受理)

高度モバイルマルチホップネットワークの拡張と応用の研究

田中 晶*, 磯間 捺希*, 金澤 晴輝*, 後藤 圭介*, 新木 康介*,

鈴木 佑斗*, 田井 葵*, 細川 翼*, 御子柴 まりの*

田中研究室では、スマートフォン、マイコン、Field Programmable Gate-Array (FPGA)などを端末として、多種類のマルチホップネットワークを設計してきた。これらマルチホップネットワークは、a)周辺・無線環境や使用状況・端末機能・ネットワーク障害・帯域や消費エネルギーに適應する最適自律ルーティング、b)マルチメディア・メッセージパッシング・高精細映像通信、c)バリアフリー対応、d)群移動体（ドローン及びロボット）制御、e)移動予測、f)クラスタリング、g)可変トポロジー、h)分散データベース制御、i)3D マップ生成、j)モバイル SINET やインターネット等の基盤ネットワークとの連携、k)GPS 高精度測位、l)サーバ制御、m)MR エミュレータ・仮想ルータ制御、n)AI サポートによる制御、o)分散共有メモリと分散プロセッシング、p)ネットワークセキュリティ、他の様々な機能備えている。基幹ネットワークが使用できない困難な状況でも領域内をくまなくカバーした通信が行えるため災害対策に応用したり、多様なインタフェースを活用してスマートシティなどへも応用が可能となる。また、これらの一部はサーバに実装したネットワーク・プログラミング教材のオンライン実習素材として利用できるように設計されている。これらのマルチホップネットワークを高度化と並行して相互結合し、またモバイル SINET・高精細映像システムとの接続により、広域への拡張と機能の共有を進めている。

(キーワード：モバイルマルチホップ通信，分散共有メモリ，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)

Expansion and Integration of Advanced Mobile Multihop Networks

Akira TANAKA*, Natsuki ISOMA*, Haruki KANAZWA*,

Keisuke GOTO*, Kousuke SHINKI*, Yuto SUZUKI*,

Aoi TAI*, Tsubasa HOSOKAWA*, Marino MIKOSHIBA*

The Information and Communication Lab (Tanaka Lab) has developed a variety of multihop networks with smartphone, microcomputer and Field Programmable Gate-Array (FPGA) terminals. Our multihop networks have many effective functions such as a) optimal autonomous routing based on the surrounding radio environment, network usage and failure, bandwidth, energy consumption and terminal specification b) multimedia, message-passing and high-resolution communication c) barrier-free communication d) group drone and robot control e) mobility prediction f) clustering g) adjustable topology h) distributed database i) 3D map generation j) interconnection with Mobile SINET and internet k) high accuracy positioning l) server control m) MR emulator and virtual router control n) AI support o) distributed shared memory and distributed processing p) network security, and so on. Our networks can be available everywhere even in difficult conditions where major networks are not working; therefore, disaster prevention is one of the potent applications. Variable interfaces provides rational data application for “smart cities.” We transfer a portion of our networks to online network and programming education system developed on servers. We now advance these networks and interconnect the networks with each other directory, through Mobile SINET and through high resolution system so as to expand the area of coverage and to share network functions among all the users.

(Keywords: mobile multihop communications, distributed shared memory, distributed database, group mobile objects)

*情報工学科

control, emulator, network and programming education)

1. はじめに

産業，日常問わずあらゆるところで非常に多くのコンピュータ/プロセッサが存在してこれらがネットワークで情報送受している今日，多数のコンピュータ/プロセッサを直接接続するマルチホップネットワーク機能を適用すると，いつでも，くまなくどこからでも/どこへでも情報を伝達し受信できる環境が構築できる。田中研では，これまでに多くの種類のマルチホップネットワークを設計し，実証実験を重ねてきた^{1,2,3,4)}。各マルチホップネットワークは，様々な機能を有し，使用目的や環境・仕様にあわせて常に最適状態を保ちながら，様々なシーンで活用できる。Fig.1 に示すように，このマルチホップネットワークを互いに結合してそれらの持つ機能の協調処理を実現し，さらにモバイル SINET⁵⁾やインターネット，高精細映像システム⁶⁾を介して接続範囲を拡張し，あらゆる場所をカバーするとともに，高度なサーバ・情報処理装置・オンライン教材とも連携できるように設計を進めている。

本稿では，これまでに開発したシステムから主に次の機能を持つマルチホップネットワークについて論じる。

- ・移動しながら上空や人の入り込めない被災地などにも広がって通信範囲を延伸し，高精度な位置⁷⁾とリンクしたセンサ情報を収集する群移動

- 体（ドローン及びロボット）制御，
 - ・リアルタイム高精細ストリーミング映像のセキュアなマルチホップ伝送，
 - ・サーバに実装したエミュレータと仮想ルータを用いたUHF マルチホップネットワークのアダプティブ制御，
 - ・人や交通流の予測と MR コンサルト機能を持つ分散データベースとそのスマートシティへの応用，
 - ・FPGA で設計されたネットワーク全体が分散共有メモリを構成する分散プロセッシング。
- さらに，これらマルチホップネットワークの一部を教材に転用し，モバイル SINET を通してサーバ上のネットワーク・プログラミング課題を解くと実際のネットワークや回路が連携して結果を確認できる，オンライン教材の開発について述べる。

2. マルチホップネットワークの群移動体制御と高精度測位

災害発生時や基幹ネットワークが整備されていない山間部などで，広大な地域を単独の人間やロボットで探索したりセンサで環境値をモニタしようとしても，危険であったり無線通信が届かず非常に困難である。マルチホップネットワークを用いると場所を問わず通信は到達可能となるため，地上においてより広域にマルチホップ通信が行え

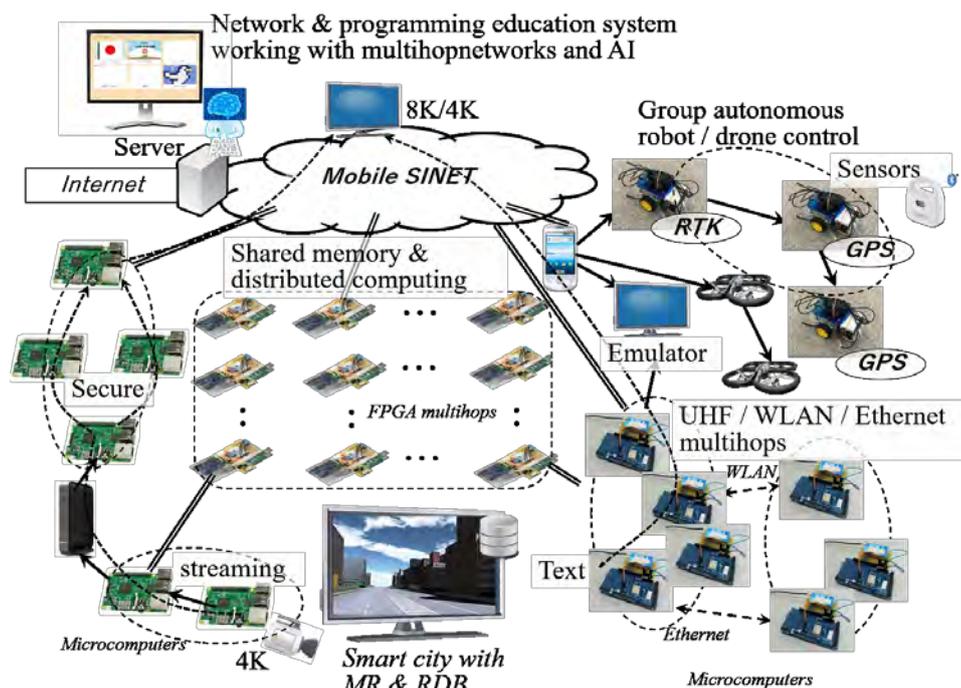


Fig. 1 Expanded and integrated multihop networks

るようロボット⁸⁾が等間隔に広がる隊列を組んだ状態で広域を網羅する研究を行ってきた^{2,4)}。3台のロボットが正三角形の頂点の位置に広がり自律的に効率よく走査範囲を広げて移動する。ロボットの位置を正確に取得するためGPSモジュール⁹⁾を用いているが、より精度を高めることと屋内など直接GPSが使えない場所でも測位できるようにRTK-GNSS導入した¹⁰⁾。これにより災害現場等でより正確に群ロボットの走査位置を制御できる。GPSは数十cmから数mの誤差を含むが、RTKは誤差を数cmまで抑えられるFIX解を算出するためである。

RTK-GNSSは移動局と基準局の2つの受信機が衛星と通信し、それに加え受信機間で補正情報を送信してより正確な測位を行う (Fig.2 右参照)。室内等の場合、求められる測位解はFIX解ではなくFLOAT解となる。あらゆる場所に入り込んで高精度測位を可能とするために、基準局も可搬型としてその都度適切な位置に設置し一定期間後には高精度な位置情報を通知できるようにした。GPSモジュールを搭載した3台同時自律走行も実装済みであり、さらにRTKモジュール¹¹⁾を使用して1台のロボットの自律制御が可能となっている。本来の、3台で広い面積を正確にくまなくカバーし、センサデータを集めるよう設計中である。即ち、Fig.2左のように隊列を組むことで通信範囲を広域化できる。環境センサ¹²⁾を搭載して地域一帯の状況を把握する。

また、過年度に設計してきた群ドローン制御のエミュレーションアプリケーションを元にして、ロボットから得られる測位データやそこから計算

される速度等を表示する詳細情報表示アプリケーションの開発も行っている。ドローンエミュレータは3D表示のため、ロボットでもその高低差を反映して3Dの相対位置を可視化する機能も実装する。

3. セキュアマルチホップネットワークを用いる高精細映像通信

田中研の過年度の研究でRaspberry Pi¹³⁾を用いるマルチホップネットワーク上で複数経路にデータを分割して送信し、たとえ通信が傍受されてもデータの流出が防げる仕組みを実現した^{2,4)}。パスワード入力等の操作を全く必要とせず、ユーザは何もすることなくネットワーク自体によってセキュリティが確保される。動画のフレーム毎に、マルチホップネットワーク経路をランダムに選択し中継器となっている複数のRaspberry Piをホップバイホップで送信し、受信したRaspberry Piで結合している。また、モバイルSINETを経由して通信も可能で、日本全国の学術機関で利用できる設計となっている。そこで、これまで行ってきた、分割通信とモバイルSINETを用いた広域通信の機能を用いて、高精細映像のライブストリーミングも可能にしてより快適にマルチメディア通信ができる仕組みを設計した¹⁴⁾。さらに、過年度の研究で行ってきたMRエミュレータや群移動体他のマルチホップネットワークと接続し、他ネットワークのデータもセキュアに送信可能とする。

使用しているマイコンの仕様上の上限の精細度4K動画の送受信可能であり、データ形式も任意である。4K動画を自動的に切り出して静止画化もで

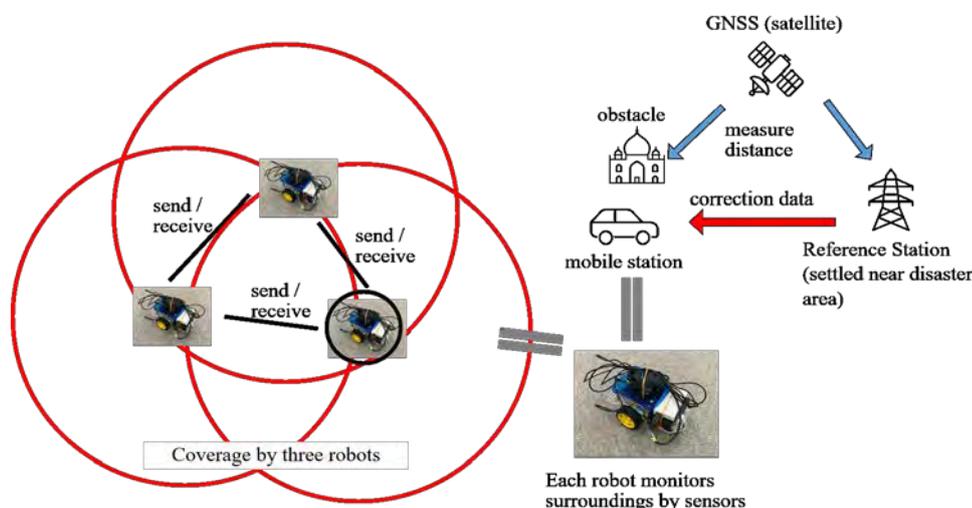


Fig. 2 RTK-GNSS and coverage by autonomous group robot

きるため、共同研究先の高精細映像 (8K) リアルタイム通信システム⁹⁾に、モバイル SINET を経由して本マルチホップネットワーク 4K の映像を映し出すことに成功した。例えば被災地で通信障害が起きているとき、いつでもどこでも稼働するこのマルチホップ通信を用いながらカメラの映像を高精細で送信し、どのようなところからでも現在の現場状況を広く伝えることができる (Fig.3)。ストリーミング映像のためリアルタイムで、Linux の Raspberry Pi や Android のタブレット/PC も全く同じアプリをインストールするだけで中継器として用いることができるので、不意の災害などにとっても有効と考えられる。

4. エミュレータ制御による異種混合マルチホップ無線通信方式

災害発生時で基幹ネットワークが不通になる場合や通常時でも輻輳が発生したり基地局に障害が発生すると、多くの被災地域・輻輳範囲で被災状況や安否確認、至急の連絡などの真に重要な情報を共有できなくなる可能性が考えられ、基地局に依存しないマルチホップ無線通信は有用である。またマルチホップ通信システムは身近にネットワークを構成できるため、特にエミュレータとの親和性を活かして、これまでに設計してきたネットワーク・プログラミングについて学べる教材としても使用できるシステムとして、UHF/LAN 混合マルチホップネットワークを開発した¹⁵⁾。先行研究²⁴⁾によって開発されてきた Arduino¹⁶⁾をノードとした、エミュレータでモニタと制御ができるヘテロジニアス (異種混合) マルチホップ無線通信システムを用い、WLAN とモバイル SINET と接続可能にし、遠隔でのエミュレータによる制御・監視や Network Function Virtualization (NFV) (特に

仮想ルータ) の導入、共同研究先の高精細映像伝送システム⁹⁾の実装、田中研内の他のマルチホップネットワークとの接続を行い、Fig.4 のような通信システムを構築した。エミュレータから SINET を経由し、Arduino ネットワークや仮想ルータ、高精細映像伝送システムとの通信を監視、制御できるようになった¹⁵⁾。

図にはネットワークの状態を表したエミュレータの画面も示してある。水色の丸がネットワークノードを表し、それらを結ぶ黒い線はノード同士の接続を表す。パケットがノードを通過すると、エミュレータに表示されているノードの上に受信したことを表す通知が表示される。当初このエミュレータはノードと有線でつなぐ必要があったが、利便性を高めるため、エミュレータを SINET に接続したサーバで稼働させ、遠隔でエミュレーションを可能にしている。

NFV は「ネットワーク機器の機能の仮想化」を意味しており、本研究では NFV の一つとして仮想ルータをサーバ上で動作させ、マルチホップ無線通信システムと接続できるようにした。クラスタ間や異種ネットワーク間の接続構成変更、動的な接続やルータの追加が実ルータを持ち込まず簡単にオンラインで行える、さらにはこれにより、オンライン教材としてルータによる実ネットワーク制御が学習できる。また、Arduino ノード群にはクラスタの概念を導入しノードをグループでくくすることで、ルーティングの効率化を図っている。

高精細映像伝送システムに対し、モバイル SINET を経由し本システムを接続、本システムから映像伝送システムに対してロップを表示させることに成功した。安価な Arduino 端末を被災地等に配布すれば自律的にマルチホップネットワークを組めるので、被災者がそのシステムを経由し安

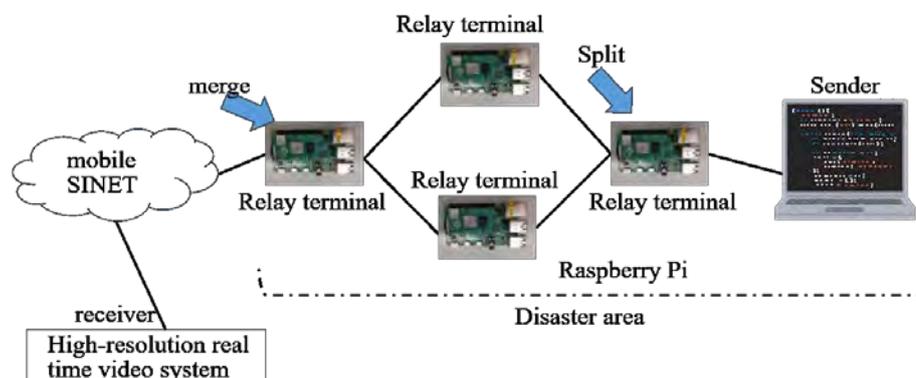


Fig. 3 Secure real time multihop network streams high resolution video

田中，磯間，金澤，後藤，新木，鈴木，田井，細川，御子柴：
高度モバイルマルチホップネットワークの拡張と応用の研究

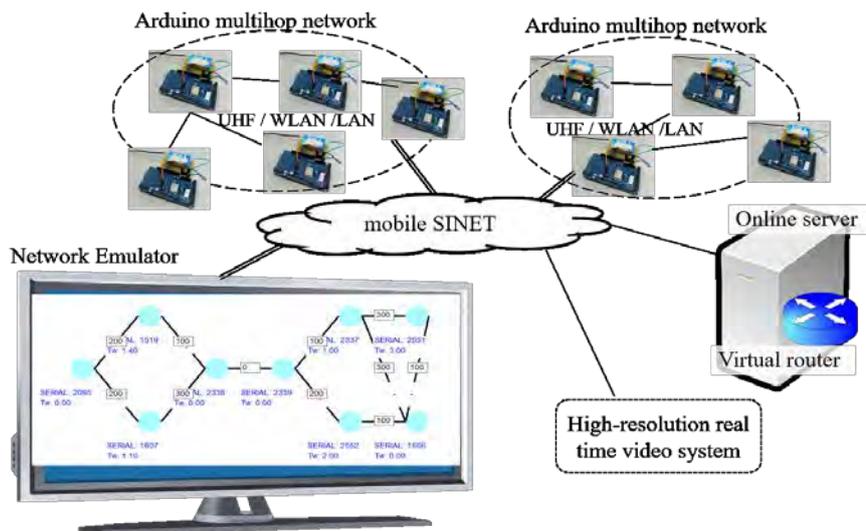


Fig. 4 Emulator and virtual router implemented heterogeneous mobile multihop networks

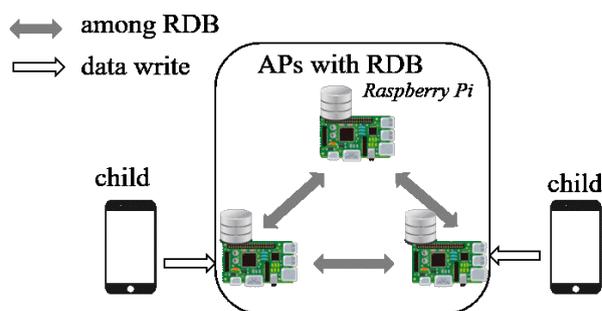


Fig. 5 Hardware implemented distributed RDB²⁾

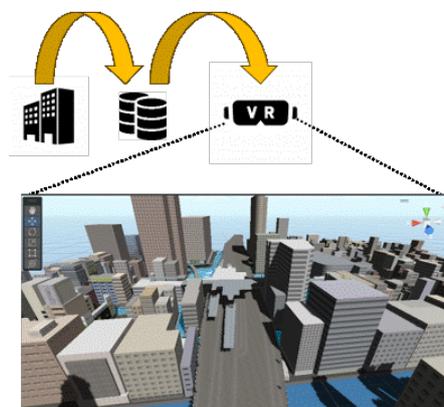


Fig. 6 Smart City in MR system based on distributed RDB

否確認などのテロップを簡単に送信できるようになる。高精細映像伝送システムと接続できるため、防災関連組織などでは映像を見ながら各地の被災情報をテロップで参照し、救助活動などに役立てられる。

5. ネットワーク分散データベースとスマートシティへの応用

過年度の分散データベースの研究²⁴⁾をもとに、ネットワーク上の不特定の複数データベースを自在に結合して、一般ユーザーからの要求に最適な提案が出来るモバイル分散データベースシステムを設計している¹⁷⁾。例えば、旅先の交通量などを知りたいとき、簡単なシナリオを入力するだけで、リアルタイム更新されるマップを閲覧できる機能、得られた情報をもとに周囲の状況をMRで可視化し、実感をもって確認できる機能なども追加し、

実用的なシステムを設計するとともに、田中研の各種のマルチホップネットワークと接続して相互の機能のデータベース連携を行う。

近年 Society5.0 などの取り組みにより、スマートシティといった、ICT等の技術を活用し最適化が図られる持続可能な街づくりの推進がなされている^{18,19)}。そこで、ネットワーク上の不特定の複数データベースを自在に結合して、一般ユーザーからの要求に最適な提案が出来るモバイル分散データベースシステムを設計した。また、応用研究の一つでもあるため、一般利用者に向けた可視化や即時に状況を把握できる実用性を特に重視し、MRと仮想化技術を取り入れ、全オンサイトシステムとしている。これまで設計されてきた各種のマルチホップネットワークが、様々なデータを取得できるため、これらと接続して情報の相互利用可能なリレーショナルデータベース(RDB)化を

行った。

過年度のシステムは複数の Raspberry Pi 上にデータベースを分散配置してシナリオによって関連づける方式で設計してきたが (Fig.5), 各種端末へのデータベース設計はこれまで多く行っているため、データベース連携のシミュレーションも含めてサイト上で全て実行できる方式とした (Fig.6)。データベース言語は SQLite, MR アプリケーションは Unity²⁰⁾ で設計した。MR 機器を用いてアミューズメント施設の入場者数や天候の状況などにアクセスし、ユーザーの要求に適切な提案が体感をもって返ってくるシステムとなっている。8K ディスプレイ, HMD やコントローラも用いて街区の状況を間近に体感しつつ、複数のデータベースを連携させて車の込み具合や人の流れを推測し、外出や道順のコンサルトをしてくれる。データベース連携はスマートシティで最も重要視されている技術であり、新たな街づくりへの提言となるシステムとなる。

6. マルチホップ無線通信による FPGA 共有メモリ分散プロセッシング環境

災害時や通信機器の障害が起きた際、輻輳発生の際にも継続して正常な通信を維持することは常に重要な課題となっているが、通信の維持とともに情報処理機能も保つ必要がある。一般的に生活の場に見られる IoT 端末では性能や容量に制約があり複雑な処理は難しい。そのため本研究室では多数台の FPGA²¹⁾ をマルチホップ接続する分散演算システムの構築を進めてきた^{2,4)}。これまでのと

ころ、処理の高度化のための PC から入力や命令の操作、出力等が容易ではなく、操作性も課題であった。そこで、PC と FPGA, FPGA と Raspberry Pi マルチホップクラスタを Hard Processor System (HPS²¹⁾, 高機能なプロセッサ)を用いて FPGA と連動させ、処理速度と操作性の向上を行った。また、通常はシーケンシャルなメモリを 2 次元構造して、平面的に広くネットワークを構成する FPGA 端末群全体が一つのメモリとして動作するようにし、さらに、これまで四則演算の範囲だったインストラクションを、基本的な命令セットにまで拡張して、算術・論理演算、データ転送、命令制御を含めて実行できる分散プロセッシング環境を構築した²²⁾。

Fig.7 は分散共有メモリと分散プロセッシングシステムの動作を示している。初めに各 FPGA 端末に端末 ID を設定する。指定した端末から演算を開始すると演算に必要なデータを取得するまで各 FPGA と通信が行われる。そして全てのデータが集まると演算が行われる。最後に出力端末に演算結果が出力される。使用している FPGA には HPS が搭載されており、処理の高速化や Linux システムの起動ができる。Raspberry Pi と FPGA を通信する際に HPS を用いて Linux を動かし、FPGA のマルチホップネットワークと Raspberry Pi 間の通信が可能となった。命令セットが動作する分散プロセッシング環境で、演算の命令内容、出力等が他端末から操作できるため、複雑な処理も容易に行える。Linux が動作しているため、PC や Raspberry Pi を用いた FPGA マルチホップネット

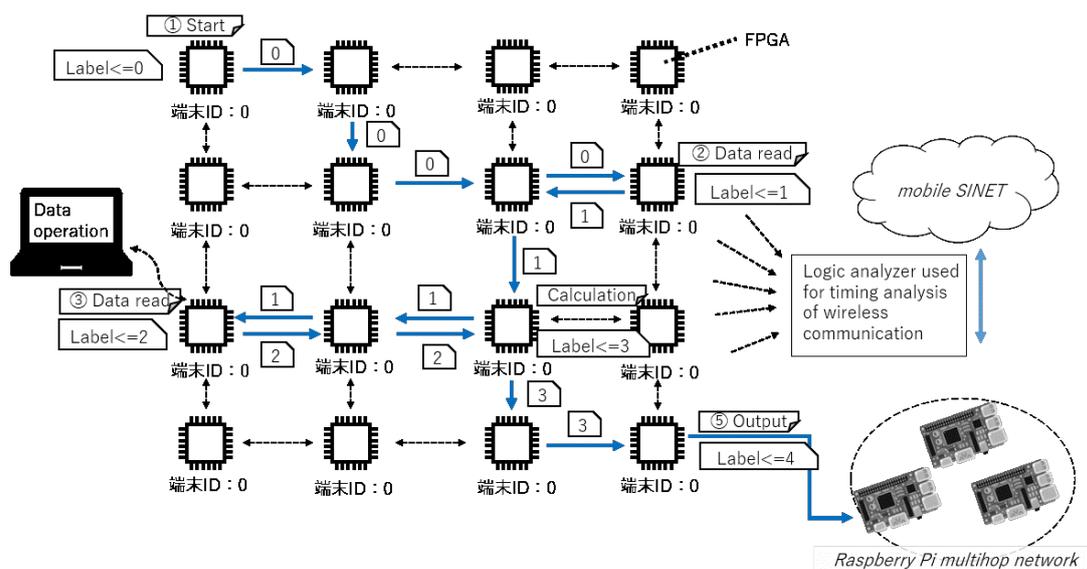


Fig. 7 Distributed shared memory and distributed processing system on FPGA multihop network



Fig. 8 Experiment of shared memory and distributed processing on FPGA multihops

ワークの端末 ID の書き換えや FPGA 内の演算データの入力・更新，演算結果の出力が出来る。また Raspberry Pi はモバイル SINET と接続できるため，全国の教育機関からも遠隔で FPGA マルチホップネットワーク制御が可能となる。Fig.8 は実際の FPGA 分散プロセッシング環境の全体図で，UHF²³⁾通信を行う 16 台でマルチホップネットワークを形成し，障害時の迂回ルーティングやデータ保証も実現している。

7. ネットワーク・プログラミング教材への適用

高専，特に情報工学系学科では，プログラミング学習のカリキュラムが組まれているが，プログラミングの面白さを感じる前に苦手意識を持ってしまい，学習意欲が減少してしまう場合もある。そのため，小学生向けにサーバ上で設計し実際に講座で使用を重ねてきたプログラミング教材^{24,25)}をもベースの一つとして，過年度来，学習者のペースでプログラミングを楽しみながら学べる教育システムを研究・設計してきた^{24,26)}。しかしながら，情報系のシステムの学習はインターネット等通信技術との関連が強く，それぞれでの学習よりもネットワークとプログラミングを共に学べる教材が望まれる。一方，2-6 章に述べたように，これまで田中研では多数のマルチホップネットワークを設計してきており，これらマルチホップネットワークは身近にネットワークを扱うための非常に適した素材となる。

そこで過年度の研究もベースにしつつ，ネットワーク学習も組込んだ高専生向けのネットワーク・プログラミング教材を，モバイル SINET とインターネットに接続されたサーバ上に実装し，学習者の習得レベルに合せどこからでも学習をできる教育システムを設計している。サーバの Web ア

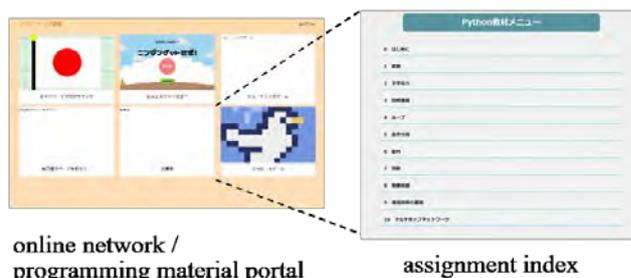


Fig. 9 Network and programming education material: Portal

プリケーション教材にアクセスして回答すると，回答に従って実際のマルチホップネットワークや回路さらに FPGA が連携動作するので，正誤を実システムの動作として確認できる。Fig.9 は教材ポータルで，マルチホップネットワークは，本稿 2-6 章の実用ネットワークを接続するだけではなく，過年度の教材設計に基づいた小型ネットワークも用いる。

なお，プログラミング設計に AI が導入されつつあることから，AI サポートによる設計を取り入れている。

7.1. Raspberry Pi 小型マルチホップネットワークとの連携

文法がわかりやすく初学者にも取り組みやすい Python を用い，穴埋め形式の課題とし，田中研ではこれまでにモータ駆動やタッチパネル操作が実習できる教材や，PC 上でダイクストラ法を学ぶ教材なども設計してきた。通信分野の学習を深めるため Raspberry Pi のマルチホップネットワークのルーティングの実習教材を仕上げる²⁷⁾。他ネットワークとの関連を含め，Fig.10 に示した。モバイル SINET を通してサーバ上の教材で回答した結果が実際のネットワークで確認できる。

文字出力，四則演算，ループ，条件分岐，関数，

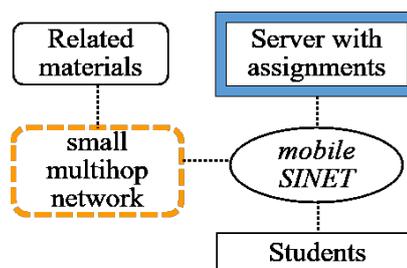


Fig. 10 Network education material with real Raspberry Pi multihop network

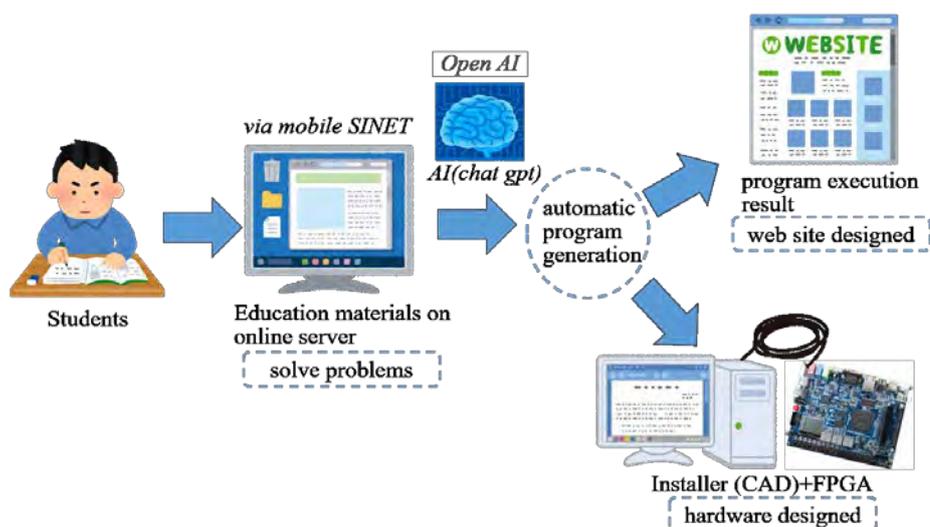


Fig. 11 Online education material with AI for networks, programming and hardware

ダイクストラ法，マルチホップネットワークなどの情報通信分野に関する課題が作られているので，これをもとに，最短接続経路を設定するアルゴリズムを学習する教材を設計している。i)小型ネットワークを構成する端末 (Raspberry Pi) 間の電波強度 (RSSI) が定期的にサーバに送られ，ii)RSSIを端末間のコストとしてダイクストラ (最短路探索法の一つ) で最短路を計算し，iii)小型ネットワークのルーティングテーブルを生成して各端末に送信，iv)ルーティングテーブルに基づき小型ネットワークで端末間が接続される。ii)に関する課題を正しく解けば正しく経路が設定され，学習者は自分の回答に基づいて実際にネットワークが構成され通信が行われる状況を確認できる。

7.2. ハードウェア設計と AI を用いたオンライン教材フレームワーク

田中研の過年度の研究においては PC からハードウェア (回路) を操作する教材であったが，回路動作を学ぶ教材に加えハードウェア設計を伴う FPGA のマルチホップネットワークについての課題を追加した。サーバから直接作成する教材の構成を Fig.11 に示す。FPGA ネットワークは共有メモリ上に他のネットワークからのデータが置けるため，本教材も様々なネットワークからの情報を扱えるようになる。今年度作成した教材はサーバ上に実装していて，作成したプログラムが FPGA ・回路や周辺端末やサーバと接続し動作させるところまで実習で確認できる仕組みになっている。また，学習者は AI²⁸⁾によるサポートを利用しながらプログラミングの問題を解いたり，プログラム作成できるようにしている²⁹⁾。学習者がキーワ

ードを打つとその内容に沿ったプログラムが自動生成されるだけでなく，プログラム本体に，AI が生成したソースをどのように組み込むか，が容易に理解できる。モバイル SINET 経由でサーバ教材から PC を操作できるようにしたため，PC 上の CAD を使ってハードウェア記述言語 (Verilog) で書かれたプログラムを FPGA にダウンロードして回路を生成できる。FPGA 設計だけでなく，学習者は好みの画像を使いながら Web の自己紹介ページを作るなど広くプログラミング設計を学べる。教材のサーバ実装に際し，学習者がわかりやすい表示となるようガイドをつける工夫も行った。

8. まとめ

産業活動，日常生活，災害時，ネットワーク集中時，ネットワークインフラが手薄な山間や島嶼など，場所・状況に関わらず常にネットワークでカバーできる，田中研究室のモバイルマルチホップネットワーク技術とその応用について論じた。多様な機能，群移動体を含む多様な端末，伝送媒体が利用でき，通信，データの共有，及び，大規模に拡張可能な分散プロセッシング環境も有している。最適ルーティングやバックアップ，セキュアネットワーク，エミュレーション，リアルタイム映像，高精度測位，サーバ制御，仮想ルータ，AI，MR，環境センシング，などのロバストネスと自律的に高い性能をもたらす要素も組み込まれ，モバイル SINET など基幹ネットワークと相補いネットワークの発展に寄与するシステムとなっている。マルチホップネットワークの一部をネットワーク・プログラミング教材に転用し，モバイル SINET

を通しオンラインで全国どこからでも, 実ネットワーク制御, プログラミング, ハードウェア設計技術の基礎を学習できるシステムとして実用設計を進めている。

謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費 22K02905 及び2023年度国立情報学研究所公募型共同研究 (23S0208) 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, 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, "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," 東京高専研究報告書, No.54, pp.28-36, Mar. 2023.
- 3) 田中晶, 丸山充, 漆谷重雄, "マルチホップ通信を用いた持続可能なリアルタイム情報ネットワーク," 情処学 29 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ(DPSWS2021), IPSJ-D PSWS2021, pp.187-194, Oct. 2021.
- 4) 田中晶, 丸山充, 漆谷重雄, 辻井利昭, "環境空間を共有する持続可能なモバイルマルチホップネットワーク," 信学技報, Vol.122, No.406, NS2022-183, pp.95-10, Mar. 2023.
- 5) NII, SINET update, https://www.nii.ac.jp/openforum/upload/c1_setsumeikai2019_sinet_1_20191216.pdf (2024.01.12 access)
- 6) 丸山充, 瀬林克啓, 君山博之, 青木弘太, 小島一成, 漆谷重雄, 栗本崇, 河合栄治, 大槻英樹, 小林和真, "エッジとクラウドの連携による 8K 超高精細映像処理システムの実現," 信学技報, Vol.121, No.421, CQ2021-121, pp.118-123, Mar. 2022.
- 7) I. G. Petrovski and T. Tsujii, "Digital Satellite Navigation and Geophysics: A Practical Guide with GNSS Signal Simulator and Receiver Laboratory," Cambridge University Press, Mar. 2012.
- 8) Dexter industries, "GoPiGo Tutorials & Documentation," <https://www.dexterindustries.com/gopigo-tutorials-documentation> (2024.01.12 access)
- 9) 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) (2024.01.12 access)
- 10) 磯間捺希, "GNSS による群ロボットの自律制御," 2023 年度東京高専卒論, Feb 2024.
- 11) ビズステーション(株), "DG-PRO1RWS," https://www.bizstation.jp/ja/drogger/dg-pro1rws_index.html (2024.01.12 access)
- 12) オムロン(株), "2JCIE-BL," <https://components.omron.com/jp-ja/products/sensors/2JCIE-BL> (2023.01.11 access)
- 13) Raspberry Pi Foundation, "Raspberry-Pi," <https://www.raspberrypi.com/products/raspberrypi-4-model-b/> (2024.01.12 access)
- 14) 金澤晴輝, "マルチホップネットワークを用いたセキュアな高精細映像通信," 2023 年度東京高専卒論, Feb 2024.
- 15) 後藤圭介, "エミュレータ制御ヘテロジニアスマルチホップ無線通信の研究," 2023 年度東京高専卒論, Feb 2024.
- 16) Arduino, "Arduino," <https://www.arduino.cc/> (2024.01.12 access)
- 17) 鈴木佑斗, "モバイル分散ネットワークによる広域データベースの実現と実装研究," 2023 年度東京高専卒論, Feb 2024.
- 18) 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 (2024.01.12 access)
- 19) 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 (2024.01.12 access)
- 20) Unity, "Unity," <https://unity.com/ja> (2022.09.20 access)
- 21) Terasic, "DE Boards," <https://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&CategoryNo=163> (2024.01.12 access)
- 22) 細川翼, "マルチホップ通信による FPGA 分散プロセッシング環境の研究," 2023 年度東京高専卒論, Feb 2024.
- 23) 株式会社サーキットデザイン, "MU-3-429," <https://www.circuitdesign.com/mu-3-429>

ww.circuitdesign.jp/wp/wp-content/uploads/support/download/docs/og_mu-3-429.pdf
(2024.01.12 access)

- 24) 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.
- 25) 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.
- 26) 田中晶, 丸山充, 漆谷重雄, 辻井利昭, “多様なネットワークを組み合わせる学習する創造的 ICT 教育プラットフォームシステムの開発,” 2022 年信学総大, 情報・システム講演論文集 1, D-15-2, p.85, Mar. 2022.
- 27) 新木康介, “Raspberry Pi マルチホップネットワークとリンクした ICT 教材の研究,” 2023 年度東京高専卒論, Feb 2024.
- 28) Open AI, <https://openai.com/> (2024.01.12 access)
- 29) 田井葵, “共有メモリでつながる AI を用いたオンラインフレームワークの研究,” 2023 年度東京高専卒論, Feb 2024.

(2024年1月12日 受理)

海洋深層水と粒状活性炭を用いた微細藻類の培養による バイオマス生産の可能性の検証

庄司良*, 久保朱音*

再生可能エネルギーの中でも、微細藻類を利用したバイオマスエネルギーが注目を集めている。本研究では、バイオマスエネルギー生産の効率のための、先行研究で用いられている海洋深層水や粒状活性炭を用いた海洋性微細藻類である *Dunaliella* sp. や *Phaeodactylum tricornutum* の培養実験により、海洋深層水の割合や粒状活性炭添加量の検証を行った。海洋深層水の割合は 25~50% が最適であることが分かり、粒状活性炭添加量は海洋深層水割合が 25% 時 *Dunaliella* sp. で 1.0 g/L、海洋深層水割合が 50% 時 *Phaeodactylum tricornutum* で 0.0~7.0 g/L であることが分かった。共培養では、海洋深層水を f/2 培地に混合させた培地を用いて、2 種類の微細藻類を同じ比率添加して培養を開始したものについて、比増殖速度が大きくなった。

(キーワード: *Dunaliella* sp., *Phaeodactylum tricornutum*, 再生可能エネルギー, 増殖速度, 共培養)

Verification of the possibility of biomass production by the culture of microalgae using deep sea water and granular activated carbon

Ryo SHOJI*, Akane KUBO*

Biomass energy using microalgae has been attracting much attention. In this study, highly efficient culture experiments of marine microalgae such as *Dunaliella* sp. and *Phaeodactylum tricornutum* are conducted using deep sea water and granular activated carbon to verify the optimal mixing ratio of the culture medium and deep sea water and the amount of granular activated carbon added for growth. The optimal mixing ratio of deep sea water was found to be 25~50% in the artificial sea water, and the optimal amount of granular activated carbon (GAC) added was 1.0 g/L for *Dunaliella* sp. When the ratio of deep sea water was 50%, the GAC addition should be between 0.0~7.0 g/L for *Phaeodactylum tricornutum*. In the co-culture experiment, the specific growth rate was higher when two types of microalgae were added in the same ratio to the medium in which deep sea water was mixed with f/2 medium.

(Keywords: *Dunaliella* sp., *Phaeodactylum tricornutum*, renewable energy, proliferation rate, co-culture)

1. 緒言

地球温暖化問題を契機とし、世界ではパリ協定や SDGs などの政策が掲げられている。再生可能エネルギー、その中でも微細藻類を利用したバイオマスエネルギーが注目を集めている。また、微細藻類の中でも海洋性微細藻類を用いることで、淡水資源を利用することなく培養でき、不毛の大地である砂漠に微細藻類の平面培養施設を設置し、大規模に培養することができれば、更に農地を使用せず、食糧と競合することなく培養できる。これを我々は「砂漠の田んぼ(油田)」と称し、再生可能エネルギーとしての普及によりカーボンニュートラル社会の実現に貢献できると考えている。しかし、微細藻類の培養と回収にかかるコストな

どの課題がある。培養と回収の効率化は、微細藻類による再生可能エネルギー生産を普及していくうえで極めて重要であると考えられる。特に COP28 等を通じて世界全体でのカーボンニュートラル実現に向けた気運が高まっている¹⁾。それを解決すべく、再生可能エネルギーが注目されている。

再生可能エネルギーは具体的に、太陽光発電、風力発電、バイオマスエネルギー、水力発電、地熱発電、太陽熱発電、潮流発電等がある²⁾。その中でも、バイオマスエネルギーが期待されており、特に微細藻類を用いたバイオマス生産が注目を集めている。微細藻類は耕地を必要とせず、工業的な生産が可能であり、穀物などの陸上や高等植物

*物質工学科

と比較して、単位面積当たりの生産性が非常に高く、安定した生産が期待できる。砂漠の田んぼでは耕地を必要としないため、食糧利用との競合もないという利点がある。また、海水で培養できる海洋性微細藻類も多種存在し、淡水資源を利用しない利点もある。将来的にバイオマスやバイオ燃料の原料として高い可能性があるが、微細藻類を利用して脂質を大量培養して生産するには高いコストがかかる³⁾。そこで一般の植物同様に光合成によって炭酸ガスを固定し、油脂ならびに炭水化物を効率よく生産可能な藻類から、バイオ燃料を経済的に得る手法の確立が期待されている⁴⁾。

一方、先行研究では多くの藻類の培養に海洋深層水の特長である富栄養性、清浄性、低温性が有用であると考えられている。ここで海洋深層水とは、海洋における有光層 200 m 以深の水のことで、表層と比較して低温かつ清浄であり、植物の成長に必要な無機栄養塩類を多量に含んでいることから、その有効利用が期待されているものである⁵⁾。その存在量は膨大であり、自然の物質循環によって再生されるため、再生可能な新資源として認識され始めている⁶⁾。海洋深層水の利用には深海からのポンプアップによる多量のエネルギー消費が大きな欠点として挙げられる。しかし、地球の熱塩循環の関係で特定の海域には比較的表層に湧昇している。こうした地点では、汲み上げた大きなエネルギーを要さず塩分の低い海洋深層水の可能性もみえてくる。

海洋深層水を利用した先行研究では、油分を豊富に含むクロレラ・ソロキニアナ CY1 の独立栄養成長と脂質蓄積を促進させるための工業的手法を研究しており、培養液に 20% の海洋深層水を添加することで細胞増殖と脂質蓄積を効果的に促進したという結果を得ている⁷⁾。しかし、クロレラ・ソロキニアナ CY1 は淡水性であり、海洋性微細藻類など多くの種では、海洋深層水を利用した培養についての研究は進んでいないのが現状で、多くの課題が残っている⁸⁾。

加えて活性炭などを用いた大量培養技術の開発に焦点が当てられており、活性炭を用いた *Phaeodactylum tricornutum* の回収の効率化について研究されている⁹⁾。活性炭は表面が非極性の性質をもち、有機物を選択的に吸着しやすいため、脱臭や水質浄化などに用いられることで有名である。活性炭の中でも、活性炭繊維を用いて微細藻類の培養への高成長率を調べている先行研究があ

る。例えば庄司らは、活性炭繊維を添加することで生育速度が向上したことを報告している⁹⁾。しかし、活性炭の中でも粒状活性炭についての微細藻類への影響や、微細藻類の多くの種で活性炭を利用した研究は進んでいない。*Dunaliella* sp. では粒状活性炭の最適な添加量についても研究は進んでいない。そこで、本研究では培地と海洋深層水の混合に最適な割合の検証と、大量培養を目的として粒状活性炭の最適な添加量の検証を行った。また、単一の微細藻類の場合、環境変動によってバイオマス状況の生産が安定しないという問題がある。そこで、性状の異なる二つの微細藻類を共培養させることで安定化が期待される。過去にバイオマス生産安定を目的として、微細藻類の共培養を行っている研究事例はなく、共培養における海洋深層水の割合の最適化やそれぞれの微細藻類の添加割合の最適化を行うための検証を行った。

2. 研究方法

2.1. 微細藻類の継代培養

本研究で取り扱う微細藻類は、微生物系統保存施設 (NIES) から購入した *Dunaliella* sp. (NIES-3629) と *Phaeodactylum tricornutum* (NIES-4392) である。どちらも海洋性微細藻類であり、培養には f/2 培地を使用した。培養環境は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、照度が約 2000 lux、10 時間明/14 時間暗とした。照明には白色蛍光灯を使用した。*Dunaliella* sp. と *Phaeodactylum tricornutum* は、どちらの微細藻類も海洋性微細藻類であることであり、それぞれのメリットとしては、*Dunaliella* sp. は高い耐塩性を有し、ストレス環境下でも生息が可能であること、*Phaeodactylum tricornutum* は細胞中に多いもので 35wt% の脂質を含み、増殖速度は早いことが挙げられる¹⁰⁾。

2.2. 単培養実験の検量線

Dunaliella sp. および *Phaeodactylum tricornutum* のそれぞれ単独の培養液を f/2 培地で 1/2, 1/5, 1/10, 1/100 に希釈し、改良型ノイバウエル血球計算盤 (エルマ, 03-202-1) を用いて細胞数計算と分光光度計 (SHIMADZU, UV-1280) を用いて吸光度測定を行い、検量線を作成した。吸光度の波長としてドナリエラは 680 nm、フェオダクチラムは 440 nm を用いており、検量線より R^2 値の値が 0.9990, 0.9935 と得られ、1 に近

いことから正確であると考えられる。また, 検量線より吸光度から細胞数を求める式として式 (1) に *Dunaliella* sp., 式 (2) に *Phaeodactylum tricorutum* の細胞数を求める式を示す。式の Y_D [Abs] および Y_P [Abs] に測定された吸光度を代入することで, 細胞数 X_D [cells/mL] および X_P [cells/mL] を求めることができる。*Dunaliella* sp. および *Phaeodactylum tricorutum* の細胞数は, 培養液の波長 680 nm および 440 nm の吸光度の測定値を式 (1) および式 (2) に代入して算出した。吸光度は, 光路 1 cm のキュベットを用いて, 分光光度計により測定を行った。

$$Y_D = 0.0239X_D + 0.0060 \quad (1)$$

$$Y_P = 0.0126X_P + 0.0123 \quad (2)$$

2.3. 海洋深層水を利用した微細藻類の培養

Dunaliella sp. と *Phaeodactylum tricorutum* のそれぞれについて f/2 培地と混合する海洋深層水の割合が, 0, 25, 50, 75, 80, 90, 100% の培地を各 100 mL 用意し, 100 mL 三角フラスコ 3 つに 30 mL ずつ分けて入れた。その後, f/2 培地で 3 日間培養を行った種水を初期濃度 1.0×10^4 cells/mL となるように添加し, インキュベーター内で培養実験を行った。インキュベーター内の温度は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ で, 照度は約 2000 lux, 10 時間明/14 時間暗で行った。

2.4. 粒状活性炭を用いた微細藻類の培養

粒状活性炭を 0, 1.0, 4.0, 7.0, 10 g/L 添加した 30 mL 三角フラスコを各添加量に 9 つ用意した。ここで三角フラスコを 9 つ用意する理由として, 24 時間ごとの測定時に平均をとるため 3 つずつ使用し, 使用したものは継続して培養・測定はできないためである。粒状活性炭添加量は 20 mL 換算で添加した。そこへ, 海洋深層水の割合の条件を固定した培地を 1000 mL 用意し, 20 mL ずつ分けて添加し, その他の操作は 2.3. と同じ条件で行った。海洋深層水割合の条件として, *Dunaliella* sp. は 25%, *Phaeodactylum tricorutum* は 50% で実験を行った。

2.5. 共培養実験の検量線

共培養時の検量線は 2.2. と同様の操作で, 各微細藻類 685nm, 660nm の波長で各検量線を算出し, 検量線から式 (3) ~ (6) を得る。このとき, 685nm と 660nm の波長を使用した理由として, *Phaeodactylum tricorutum* と *Dunaliella* sp. のそれぞれ単独の細胞数を算出する際, 両微細藻類のスペクトルを比較したときに, 最もピークの差があった波長が 685nm と 660nm の時であったためである。式 (3) ~ (6) の R^2 値はすべて 0.99 以上であることから, 検量線に利用できる。 Y_{D685} , Y_{D660} , Y_{P685} , Y_{P660} は各波長 685nm と 660nm における各微細藻類の吸光度 [Abs] を表し, X_{D685} , X_{D660} , X_{P685} , X_{P660} は各波長における各微細藻類の細胞数 [cells/mL] を示す。*Dunaliella* sp. の細胞数を求める各波長での式 (3), (4) は, ほとんど同じとみなし, 式 (7) として使用する。このとき, $Y_{D'}$ [Abs] はドナリエラの 660~685nm での吸光度, $X_{D'}$ [cells/mL] はドナリエラの 660~685nm での細胞数を表す。式 (7) と波長ごとに式 (5), (6) を足し, 式 (8) のように連立方程式を立て, この式を用いて *Dunaliella* sp. と *Phaeodactylum tricorutum* それぞれの細胞数 X_i [cells/mL] を算出する。

$$Y_{D685} = 0.0185X_{D685} - 0.0046 \quad (3)$$

$$Y_{D660} = 0.0181X_{D660} - 0.0045 \quad (4)$$

$$Y_{P685} = 0.0142X_{P685} - 0.0162 \quad (5)$$

$$Y_{P660} = 0.0106X_{P660} - 0.0121 \quad (6)$$

$$Y_{D'} = 0.0183X_{D'} - 0.0046 \quad (7)$$

$$\begin{cases} Y_{DF685} = 0.0185X_{D685} + 0.0142X_{P685} - 0.0208 \\ Y_{DF660} = 0.0181X_{D660} + 0.0106X_{P660} - 0.0167 \end{cases} \quad (8)$$

2.6. 2種類の微細藻類の共培養

共培養の条件として, *Dunaliella* sp. と *Phaeodactylum tricorutum* の比が, 1:1, 2:1, 1:2 を用意し, 培地は f/2 培地にて実験を行った。ただし, 1:1 の条件については培地に対して海洋深層水の割合を 25%, 50% にした場合も用意した。各条件で培地を 100 mL 用意し, 30 mL 三角フラスコ 3 つに 30 mL ずつ分けて入れた。その他の操作は 2.3. と同じ条件で行った。

3. 結果と考察

3.1. f/2 培地と海洋深層水の混合割合

図 1 に *Dunaliella* sp. および *Phaeodactylum tricorutum* について海洋深層水割合を変化させた時の増殖速度の変化を示す。増殖速度 μX_t [cells/(mL · h)] は式 (9) にて算出した。

$$(X_n - X_0)/(t - t_0) = \mu X_t \quad (9)$$

ここで、 μ は比増殖速度、 X_n は 72 時間目の細胞数 [cells/mL]、 X_0 は培養開始時の細胞数 [cells/mL]、 $t - t_0$ は培養時間 [h] であり、72 時間目と 0 時間目の差とした。*Dunaliella* sp. と *Phaeodactylum tricorutum* のどちらも海洋深層水の割合が 25~50% の時に最も増殖速度が大きく、25~50% が増殖に最適な海洋深層水の割合であることが分かった。さらに海洋深層水の割合が大きくなると増殖速度は低下した。銅の毒性について Wang らは *Phaeodactylum tricorutum* では濃度が高くなるにつれて毒性を示すと報告している¹¹⁾。また、*Dunaliella* sp. の一種である *Dunaliella marina* で銅が細胞体積制御を阻害すると報告されている¹²⁾。このことから銅が海洋深層水に培地よりも大きく存在しているため、このような傾向が表れたのではないかと考える。

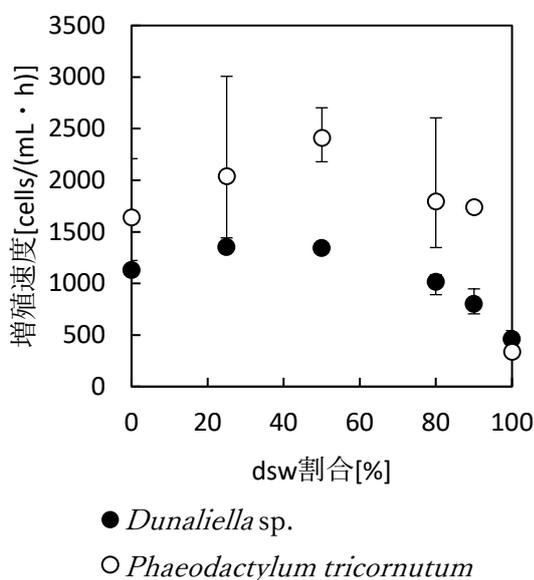


図 1 *Dunaliella* sp. および *Phaeodactylum tricorutum* について海洋深層水割合を変化させた時の増殖速度の変化, dsw: Deep Sea Water (海洋深層水)

3.2. 粒状活性炭の添加量

図 2 に海洋深層水割合の条件について固定した時の粒状活性炭の添加量ごとの増殖速度を示す。*Dunaliella* sp. は海洋深層水割合が 25%, *Phaeodactylum tricorutum* は 50% とした。*Dunaliella* sp. では粒状活性炭添加量が 1.0 g/L の時に最も増殖しており、*Phaeodactylum tricorutum* では 0.0~7.0 g/L となった。*Dunaliella* sp. の傾向としては、粒状活性炭を添加しない時よりも添加する方がより増殖するが、添加量が一定の値以上に大きくなると増殖が小さくなるのが分かる。また、*Phaeodactylum tricorutum* の傾向は、*Dunaliella* sp. とは違う傾向を示し、無添加から 7.0 g/L までの広い範囲でより増殖させ、10 g/L 添加となると増殖は小さくなった。傾向の違いについては、図 3 に示すように *Phaeodactylum tricorutum* と *Dunaliella* sp. の細胞の形状が異なり、*Phaeodactylum tricorutum* については細長い形で、*Dunaliella* sp. は卵型であり、活性炭への吸着にコンフォメーショナルな影響がもたらされたと考えられる。

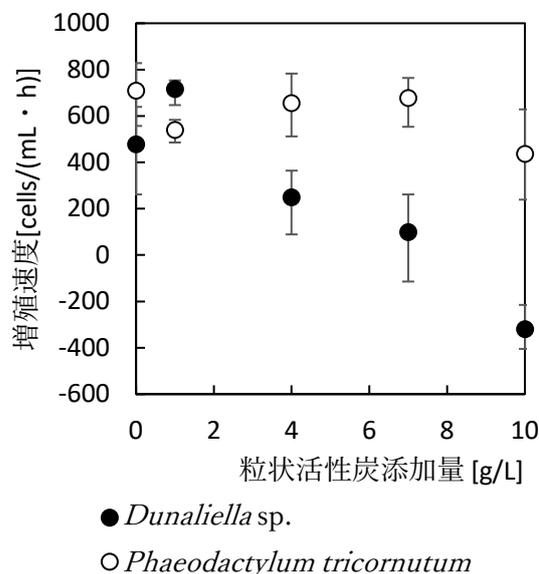


図 2 *Dunaliella* sp. および *Phaeodactylum tricorutum* について粒状活性炭添加量を変化させた時の増殖速度

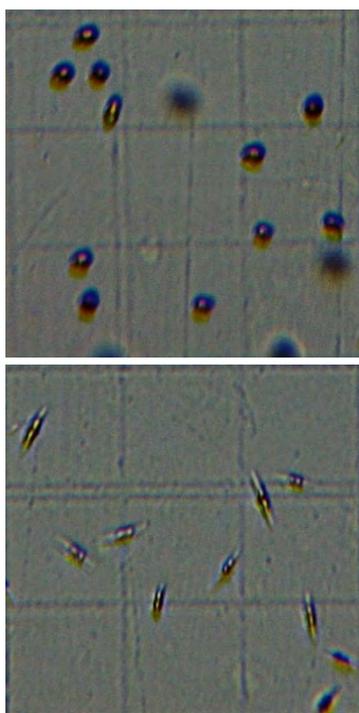


図3 *Dunaliella* sp. (上)と *Phaeodactylum tricornutum* (下) の細胞形状

3.3. 共培養

表1に *Dunaliella* sp. と *Phaeodactylum tricornutum* の細胞数の比と使用培地の設定条件をまとめ、図4に各条件下での *Dunaliella* sp. と *Phaeodactylum tricornutum* の各比増殖速度をプロットで示し、各条件における2種類の微細藻類の比増殖速度の総和を棒グラフにて示す。使用培地が同一で、共培養開始時の添加比率を変化させた条件①②③を比較すると、条件①では、ドナリエラがむしろ死滅していくこととなり、比増殖速度の総和についても負の値を示した。このことは、共培養においては通常培養に用いる培地では二種類の微細藻類の培養のバランスは保てないということが分かる。条件②③は、比増殖速度が *Dunaliella* sp. よりも *Phaeodactylum tricornutum* のほうが大きく示されている。条件②は、比としては *Dunaliella* sp. を多く添加しているにも関わらず、*Phaeodactylum tricornutum* の比増殖速度のほうが大きく示されている。このことより、f/2培地では *Phaeodactylum tricornutum* の培養が優先して行われることが示唆される。f/2培地にて共培養を行う場合には、最も比増殖速度の総和が大きくなっている条件②が有効と思われる。全条件で比較すると、条件⑤が最も大きくなっており、

Dunaliella sp. の比増殖速度は正の値で全条件内でも最も大きな値となっているが、*Phaeodactylum tricornutum* の比増殖速度は負の値となっている。つまり共培養は成立しない。f/2培地に対して海洋深層水の割合が50%の時の培地を使用すると、*Dunaliella* sp. が優先的に増殖し、*Phaeodactylum tricornutum* の増殖に影響を与えた可能性が考えられる。また、条件④は海洋深層水の割合が25%で、比増殖速度の総和も各微細藻類の比増殖速度も正の値となっている。また、*Dunaliella* sp. と *Phaeodactylum tricornutum* の比増殖速度の値は各条件の中でも最も近い値をとっており、バランスの取れた共培養といえる。この条件④と⑤の結果より、共培養に使用する培地としてはf/2培地に対する海洋深層水の割合が25~50%の間にあると考えられる。

表1 共培養の設定条件

初期播種細胞数比 (<i>Dunaliella</i> sp. : <i>Phaeodactylum tricornutum</i>)	使用培地	
	①	1 : 1
②	2 : 1	f/2
③	1 : 2	f/2
④	1 : 1	dsw 25%
⑤	1 : 1	dsw 50%

dsw: Deep Sea Water (海洋深層水)

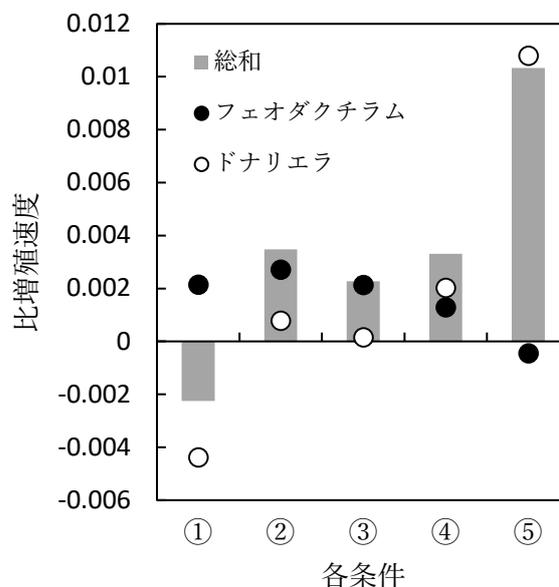


図4 各条件における *Dunaliella* sp. と *Phaeodactylum tricornutum* のそれぞれの比増殖速度と比増殖速度の総和

4. 結言

本研究では、微細藻類におけるバイオマス生産の可能性を検証するため、*Dunaliella* sp. と *Phaeodactylum tricornutum* の二つの微細藻類や、海洋深層水、粒状活性炭を用いて培養実験を行った。また、二種類の微細藻類の共培養についても検討した。

培養実験の結果、*Dunaliella* sp. および *Phaeodactylum tricornutum* に最適な f/2 培地に対する海洋深層水の混合割合は、25~50%であることが分かった。この 25~50%になった理由としては、人工海水や f/2 培地、海洋深層水の組成が関係していると考えられる。次に、増殖に最適な粒状活性炭添加量については、*Dunaliella* sp. が 1.0 g/L、*Phaeodactylum tricornutum* が 0.0~7.0 g/L となり、どちらの微細藻類も 1.0 g/L 添加が共通して最適ということが分かった。

最後に共培養の実験では、海洋深層水の割合が 25~50%の間の培地を用いることが有効であるということがわかった。これにより、塩分濃度などの環境の変化があっても安定的にトータルとしてバイオマス生産を継続することが可能であることが明らかとなった。今後、粒状活性炭を用いた場合の共培養の検討も行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 産業技術環境局・資源エネルギー庁，カーボンニュートラル実現に向けた国際戦略，資料 3，pp. 5，(2022)
[004_06.pdf \(meti.go.jp\)](#) (参照日：2024/01/09)
- 2) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構，NEDO 再生可能エネルギー技術白書第 2 版，第 1 章 再生可能エネルギーの役割，pp. 11，(2013)
- 3) 藤田，藻類バイオ燃料への期待と課題，日本機械学会 2012 年度年次大会講演論文集，F001003，(2012)
- 4) 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構編，NEDO 再生可能エネルギー技術白書第 2 版，第 4 章 バイオマスエネルギー，pp. 11，(2013)
- 5) 深見ら，海洋深層水の水質変動と微細藻類に対する増殖ポテンシャルの関係，Deep Ocean Water Research，Vol. 1，pp. 27-31，

- (2000)
- 6) 筒井ら，海洋深層水の利用研究と今後の展望，日本海水学会誌，Vol. 54，pp. 289-293，(2000)
- 7) C.Y.Chen et al，Enhancing microalgal oil/lipid production from *Chlorella sorokiniana* CY1 using deep-sea water supplemented cultivation medium，Biochemical Engineering Journal，Vol. 77，pp. 74-81，(2013)
- 8) 丸山，微細藻類の大量培養からみた深層水の特長，日本海水学会誌，Vol. 54，pp. 294-299，(2000)
- 9) Ryo SHOJI et al，High Growth Rate of *Phaeodactylum tricornutum* Using Activated Carbon Fiber，Journal of Chemical Engineering of Japan，Vol. 37，pp. 1238-1242，(2004)
- 10) 須藤ら，*Phaeodactylum tricornutum* の増殖速度，化学工学論文集，Vol. 17，pp. 484-490，(1991)
- 11) W. Liping et al，Toxic effects of fluoranthene and copper on marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*，Journal of Environmental Sciences，Vol. 20，pp. 1363-1372，(2008)
- 12) H. U. Riisgård，Effect of copper on volume regulation in the marine flagellate *Dunaliella marina*，Marine Biology，Vol. 50，pp. 189-193，(1979)

(2024年1月11日 受理)

オープンデータに対する、機械学習プラットフォーム DataRobot による社会実装教育

松原弘明*1*2, 高田宗一朗*2

大量かつ多様なデータが溢れるビッグデータ時代において、データを処理し分析するためのデータサイエンスの重要性が注目されている。本稿は、東京工業高等専門学校機械工学科 4 年「社会実装プロジェクトI」の授業におけるデータサイエンス教育の事例を紹介し、データサイエンス教育導入に寄与することを目指す。2023 年度の「社会実装プロジェクトI」では、1) 総務省統計局が公開している、「情報II」補助教材を用いた Python による AI・機械学習の実装、2) 機械学習プラットフォーム DataRobot を用いた、「東京都多摩地域の身近な地域課題発見」の 2つの演習を通じて、AI とデータサイエンスを学習した。

(キーワード: データサイエンス教育, 社会実装教育, 自動機械学習)

Social Implementation Education using the Machine Learning Platform DataRobot for Open Data

Hiroharu MATSUBARA*1*2, Soichiro TAKATA*2

In the era of Big Data, the importance of data science for processing and analyzing data is attracting attention. This paper aims to contribute to the introduction of data science education by introducing an example of data science education at National Institute of Technology, Tokyo College in 2023. Students learned AI and data science through two exercises: 1) implementation of AI and machine learning in Python using "Information II" supplementary materials, and 2) "Discovery of familiar regional issues in the Tama region of Tokyo" using the machine learning platform DataRobot and Open Data. (Keywords: Data Science Education, Social Implementation Education, Auto Machine Learning)

1. はじめに

大量かつ多様なデータが溢れるビッグデータ時代において、データを処理し分析するためのデータサイエンスの重要性が注目されている。情報人材の確保が求められる情勢下において、大学・高専等の高等教育において、データサイエンス教育の導入が広がりを見せている。本稿は東京工業高等専門学校（以下、東京高専と記載）におけるデータサイエンス教育の取り組みを紹介し、データサイエンス教育導入に寄与することを目指す。

1.1. データサイエンス教育の重要性の高まり

2015 年に行われた「ビッグデータの利活用に係る専門人材育成に向けた産学官懇談会」において、データサイエンティスト育成の必要性と我が国の課題が議論された。懇談会での産業界とアカデミアからの要請をまとめると、我が国におけるデータサイエンティスト育成のあるべき姿は図 1 のようになる。まず、すべての新入大学生の人数を想

定したリテラシーレベル（50 万人）から、見習いレベル（5 万人）、独り立ちレベル（5,000 人）、棟梁レベル（500 人）、業界代表レベル（50 人）、世界トップレベル（5 人）までの 6つのレベルで考える。このうち、「リテラシーのレベルでは、ピラミッドの底辺を広げる必要があり、読み・書き・そろばんのレベルでデータに基づく思考ができるようにすることが極めて重要」と提言している。

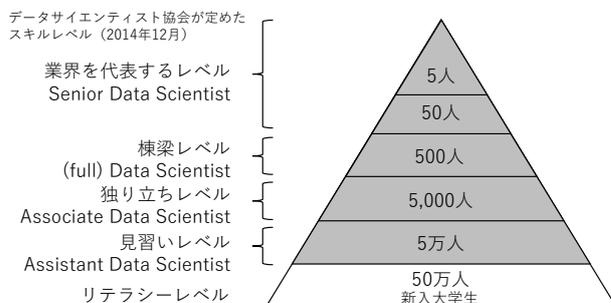


図 1 データサイエンティストの育成レベルと毎年の育成目標人数（文献¹⁾をもとに筆者作成）

*1 社会実装教育研究センター *2 機械工学科

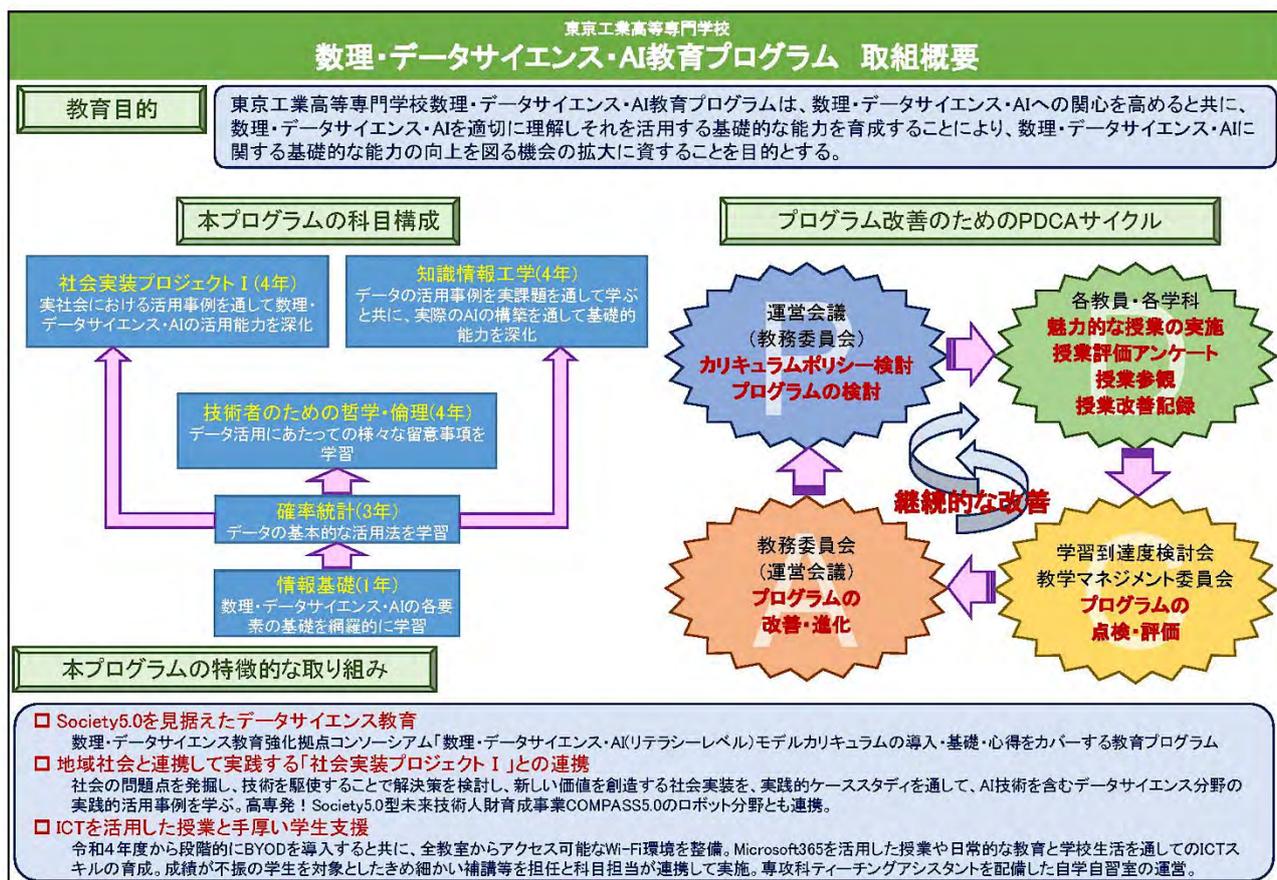


図2 「東京工業高等専門学校 数理・データサイエンス・AI教育プログラム」の概要³⁾

このような、数理・データサイエンスを「リテラシー」「(デジタル時代の)読み・書き・そろばん」と捉える潮流の中、大学・高等専門学校の正規課程の教育プログラムのうち、一定の要件を満たした優れた教育プログラムを文部科学大臣が認定・選定することによって、多くの大学・高専が数理・データサイエンス・AI教育に取り組むことを後押しする「数理・データサイエンス・AI教育プログラム認定制度」が2021年度より認定を開始した²⁾。高等専門学校では、国立51高専で42件のリテラシーレベル以上の認定がなされている。筆者らが所属する東京高専においても、図2のように「東京工業高等専門学校 数理・データサイエンス・AI教育プログラム」が2022年度に認定されている。学生は図2左に記載された5つの科目の単位を履修し申請することにより、数理・データサイエンス・AI教育プログラム(リテラシーレベル)の修了認定を受けることができる。

1.2. 東京高専の社会実装教育^{4,5)}

次に、東京高専の社会実装教育について述べる。

社会実装教育とは、公的機関や企業と連携し、

- ① 社会ニーズを分析した上で、
- ② ハードウェア・ソフトウェアとこれらを用いたサービスとを一体として考案、
- ③ 実際にその開発に取り組む、
- ④ 試作の中でユーザからのフィードバックを得る

という4つのステップを経て社会実装に取り組む体験型教育プログラムである。学生は、実社会の課題に対峙し、プロトタイプを試作、それを実際の公的機関や企業の方々へ試用してもらって評価をいただき、改良に反映させるという一連のアジャイル開発を経験する。これにより、学生はユーザ目線で研究・開発することの大切さを学ぶことができる。東京高専では2019年度から「社会実装プロジェクトI, II, III」が4年及び5年の全学科に必修科目として導入(計5単位)されている。このうち、「社会実装プロジェクトI」(4年前期・全学科履修)は、社会実装活動のケーススタディ

を主とする科目である。学生は, 上記の社会実装活動のプロセス全体を俯瞰的に把握し, 技術と社会の関係性を理解することが可能となる。あわせて, 学生は身近な課題を題材に, 課題発見から課題解決へのアイデア創出までを体験学習する。また, 「社会実装プロジェクトI」は前節の「東京工業高等専門学校 数理・データサイエンス・AI 教育プログラム」の履修科目の一つとなっており, 「実世界における活用事例を通して数理・データサイエンス・AI の活用能力を深化」するような授業が行われている。本稿では, 2023 年度の機械工学科 4 年の「社会実装プロジェクトI」におけるデータサイエンス教育導入の事例を紹介する。

2. Python による AI・機械学習の実装

2023 年度機械工学科の「社会実装プロジェクトI」では, 15 回の講義のうち 5 回分をデータサイエンス教育に割いた。本節ではそのうち前半 2 回分の「Python による AI・機械学習の実装」の取り組み内容を紹介する。

2.1. 課題概要

Python による AI・機械学習の実装における課題の概要を示す。講義後半の社会実装に向け, AI・機械学習のアルゴリズムを理解することを目的に Python による実装を行った。教材には, 総務省統計局が公開している「高等学校における「情報II」のためのデータサイエンス・データ解析入門」⁶⁾の内容を用いた。これは, 統計学習の指導のための小中高校の教員向け補助教材の一つで, 「単回帰分析」から「ニューラルネットワーク」までの機械学習事例と, 実行のための Python の notebook ファイル (ipynb ファイル) が公開されている。

2.2. 実施内容

前半 2 回の講義のなかで, まず座学で機械学習技術の概要, 機械学習を用いたデータサイエンスのプロセス, 「説明変数」と「目的変数」の設定, 「予測」「分類」タスクの違いなどを説明した。その後, Python による AI・機械学習の実装を行った。Python の実行環境には, 環境構築の簡単な Google

Colaboratory⁷⁾を用いた。AI・機械学習の実装では, 「単回帰分析」「サポートベクターマシン (SVM)」「決定木」の 3 つの「教師あり機械学習」のアルゴリズムを学んだ。「単回帰分析」ではケーキ屋の売り上げ予測タスク, 「SVM」ではスマートフォンの故障要因予測タスク, 「決定木」ではケーキ屋のポイントカードの有無や POS データを用いた常連顧客の予測タスクを Python で体験させた^{*1)}。

2.3. レポート課題

前半 2 回の講義終了後, オープンデータに対するデータ解析に向け, 「データサイエンス (機械学習) に適合する独自タスクを 1 つ考えて, それぞれの説明変数・目的変数・モデルの例を示す」という課題を課した。この課題は, 自分たちの身近な社会課題に対し, 機械学習をどのように利用すれば良いかを思考することで, データサイエンスや機械学習への理解を促した。

3. オープンデータと AI を用いた東京都多摩地域の身近な社会課題発見

続いて, 後半 3 回の「オープンデータと AI を用いた東京都多摩地域の身近な地域課題発見」の演習を紹介する。この演習では, オープンデータと AI を用いた身近な社会課題発見を行うことにより, 「社会実装」の中の「社会」の部分サイエンスすることを目的とした。社会実装教育ではプロトタイプの前には, 社会ニーズの分析を行うことが求められており, ここを意識しないと「実装」で終わる。本年度においては, 仮説の設定からオープンデータの収集・整形, 機械学習プラットフォーム DataRobot を用いたデータ解析, 外部企業を招いての最終発表を実施した。

3.1. 課題概要

オープンデータと AI を用いた課題の概要を述べる。今回, 東京高専の学生が多く住む「東京都多摩地域の課題」を「データから発見し提案すること」を目的に演習に取り組んだ。学生には, 「若者としての生活者視点×データサイエンス」による東京都「多摩地域」の社会課題の発見が期待され

^{*1)} なお補足として, 今回使用した「情報II」の補助教材は高校生向けの内容であり, アルゴリズムの数理的な詳細は省略されていることが多い。そのため, 専門科目でよ

り高度な数学に触れている高専生向けに数理的な解説を行う場合は, 滋賀大学データサイエンス学部 2 年生および 4 年生の講義内容をまとめた文献⁸⁾などを参照のこと。

ていると伝え、以下のプロセスで課題に取り組んでもらった。

- ① 身近な課題を見つけ、データから課題を提案する
- ② 基本のデータセットは提示するので、選んで物語を組み立てる
- ③ データと課題が解決された後のビジョンを、自治体をお客さまとする企業の方の前でプレゼンする

オープンデータに対する AI を用いた解析では、2023 年に東京高専社会実装教育研究センターに導入された機械学習プラットフォーム DataRobot を用いた。機械学習プラットフォーム DataRobot は、データを入れるだけで「分類」「回帰」「予測」などの機械学習タスクを行うことができるツールである⁹⁾。DataRobot は、機械学習技術の専門でない人材でも機械学習アルゴリズムの実装を行える自動機械学習のひとつであり、東京高専の教育・研究においても、DataRobot の使用が始まっている¹⁰⁾。この演習では、オープンデータの収集とデータの整形方法を伝えた上で、学生に実際に DataRobot による解析を実施させ、課題発見をデータから行うプロセスを一通り体験してもらった。

課題発見の演習はグループワークで実施した。学生は A から G の 7 グループに分かれ、各グループ 5～6 名で課題に取り組んだ。グループ分けにおいては、教員から各グループで学生のバランスを考慮してグループ間での力量差を減らすよう指示し、学生側でグループ編成を行った。

3.2. 学生に提示したオープンデータ

東京都多摩地域の身近な地域課題発見に向け、演習で学生に提示した各オープンデータの概要を記載する。なお、一部のオープンデータの利用には会員登録が必要な場合がある。

- ① 東京都オープンデータカタログサイト¹¹⁾：東京都内のオープンデータを集約したサイト。東京高専が所在する八王子市のデータは比較的多く公開（2024 年 1 月 5 日時点で 1006 件が検索にヒット）されているものの、自治体によってはデータの公開量に差があり、対象とする地域と課題の設定を考慮する必要がある。
- ② 地域経済分析システム RESAS（リーサス）¹²⁾：

地方創生の様々な取り組みを情報面から支援するために、経済産業省と内閣官房デジタル田園都市国家構想実現会議事務局が提供している。産業構造や人口動態、人流などのデータの可視化が行える。

- ③ V-RESAS¹³⁾：内閣官房デジタル田園都市国家構想実現会議事務局と内閣府地方創生推進室が提供する地域経済分析システム。各地域の「人流」「飲食」「消費」等のデータがタイムリーに公開され、新型コロナウイルス感染症が地域経済に与える影響を把握できる。一部データは CSV ファイルでダウンロード可能。
- ④ 東京都の統計¹⁴⁾：東京都総務局統計部が実施している、東京都の家計、労働力、小売等のデータを公開している。
- ⑤ 国土数理情報ダウンロードサイト¹⁵⁾：国土交通省が提供し、地形、土地利用、公共施設などの国土に関する基礎的な情報を GIS（地理情報システム）データとして整備され、無償で利用できる。
- ⑥ 気象庁 | 過去の気象データ¹⁶⁾：気象庁が公開する 1976 年以降の日本の各地域の気象データ。気温、天気、風速などの各種気象データをダウンロードできる。
- ⑦ (公財) 東京市町村自治調査会 | 統計資料¹⁷⁾：東京市町村自治調査会の調査研究を公開している。特に、各年度の「多摩地域データブック～多摩地域主要統計表～」が参考になる。
- ⑧ e-Stat 政府統計の総合窓口¹⁸⁾：日本の各府省等が公表する統計データを一つにまとめたサイト。統計データの検索や、地図上の表示など、統計を利用する上で多くの便利な機能がある。

3.3. 最終発表

オープンデータに対する解析について、最終発表を行った。最終発表のポイントとして、学生には「企画のコンセプトをわかりやすく伝える」「短時間で伝えるプレゼンを意識」「数値処理のアイデアより提供価値をベースに伝える」「社会に与えるインパクトは何か」の 4 点を事前に提示した。

表 1 は最終発表でのテーマ一覧である。「住みやすさ」や「利便性」などの「まちづくり」に関するテーマが 4 件、震災危険地域の予測の「防災」に関するテーマが 1 件、放置自転車と盗難に関する「犯罪抑止」のテーマが 1 件、若者の投票率向上に関する「選挙」のテーマが 1 件だった。

表 1 多摩地域の身近な課題解決の最終発表テーマ一覧

グループ	発表テーマ名
A	多摩地区の人口を増やそう
B	震災危険地域予測
C	生活保護と住みやすさ
D	多摩地域における南北移動の利便性について
E	多摩地域の住みにくさの解決
F	放置自転車と盗難
G	投票率

続いて，各グループの取り組み内容を述べる。

A グループは「多摩地区の人口を増やそう」と題し，多摩地区の人口を増やすための施策を提言した。アルゴリズムにはリッジ回帰が採用された。若者や子育て世代が住みやすさの判断材料にしそうな，学校数，公園数，駅数，各種事業所数，犯罪率などを説明変数とし，各自治体の人口を目的変数とした。DataRobot による解析の結果，人口（人数）には「医療関係事業所」の数が最も寄与度が高いことがわかった（図3）。また，A チームは自治体ごとに施設数に差があることの影響を減らす工夫として，各データを自治体の面積で割り，単位面積あたりのデータに直して解析していた。

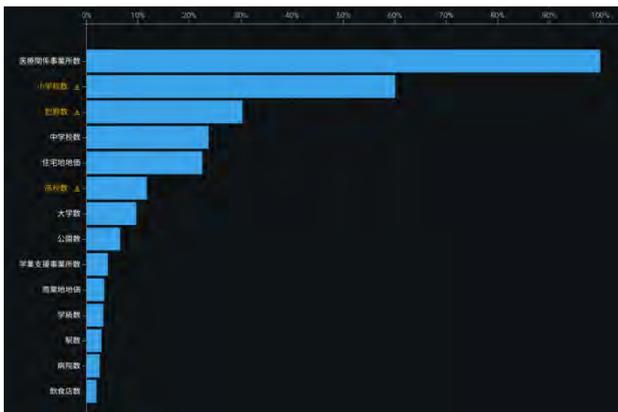


図 3 人口に対する各説明変数の寄与度 (A グループの発表資料より)

B グループは多摩地域の地震データから，震災危険地域の予測を行った。市町村ごとの「最大震度」「人口」「住宅数」を説明変数に，オープンデ

ータで入手した地震の被災者数のデータから「死者が 10 人以上」を目的変数と設定して解析を行った。図 4 は人口に対する死者数の予測をおこなった結果である。B グループは今回の演習の中で唯一，新たにテストデータを用意し，テストデータに対する「予測」を実施していた。

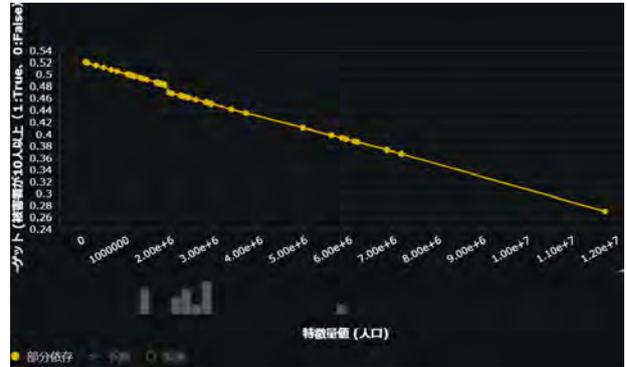


図 4 目的変数に対する特徴量「人口」の予測 (B グループの発表資料より)

C グループは生活保護に着目した。各自治体の地価，離婚比（離婚件数），流出人口，保育所の定員，年齢のオープンデータを説明変数に用い，生活保護率を目的変数とした。DataRobot による解析の結果，14 歳以下の人口比率と生活保護率に負の相関がみられた（図5）。14 歳以下の子供の人口割合が多いと，生活保護を受けている割合が少ない理由として，「金銭的に余裕のある家族が子供を作りやすい」「生活保護は子供がいると世間的に取りづらい」の2つを考察し，子供のいる家庭にも生活保護を受けやすくするための施策として，生活保護という単語に触れる機会を増やして生活保護についての理解を広めることを提案した。

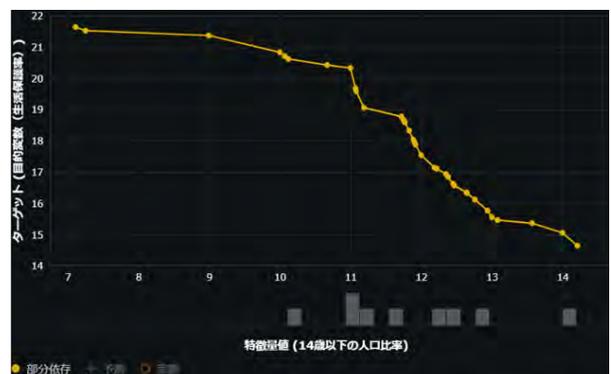


図 5 14 歳以下の人口比率と生活保護率の関係 (C グループの発表資料より)

D グループは多摩地域の南北移動が不便という自分たちの身近な実感をデータから検証した。課題設定として、多摩地域の鉄道駅をランダムに選び、その駅から東西方向・南北方向の駅を選んで、乗換案内を用いて駅間の所要時間を調べた。多摩地域の 100 駅間の移動時間から、それが東西の移動か南北の移動かを予測するタスクを実施した。図 6 が DataRobot による解析結果である。図 6 を見ると、所要時間が長いほど南北移動である確率が上がっており、確かに南北移動に時間がかかることをデータから説明することができた。

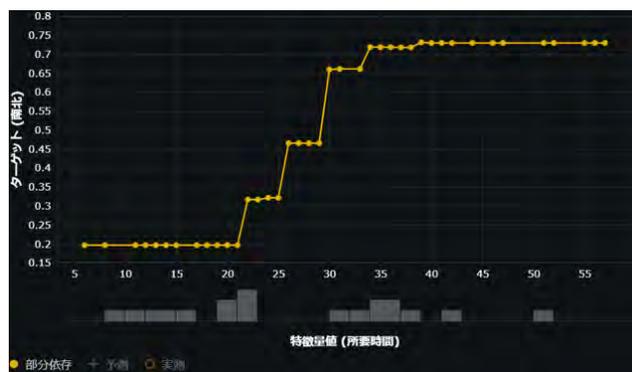


図 6 多摩地域の 2 駅をランダムに選び、その所要時間から移動の方向が南北か東西かを判別するタスク。横軸の移動時間が長いほど、南北の移動である確率が高い (D グループの発表資料より)

E グループは多摩地域住民の「住みにくい」というロコミに着目し、住みやすい街を考察した。ロコミや生活者の視点をもとに、i)施設が密集しているのが駅周辺だけである、ii)坂が多い地形で移動手段に限られる、iii)学校の数に限りがある、の 3 つの仮説を立て、各自治体の人口の増減量を目的変数として多摩地域の現状をみた。DataRobot



図 7 単位面積あたりのコンビニの密度と人口増減量 (E グループの発表資料より)

による解析の結果、人口増加と相関のある変数は、「コンビニ>スーパー>小学校>中学校」の順で相関が高く、特に商業施設の影響が顕著だった(図 7)。一方で、相関関係の把握はできたものの、人口増加と、学校や商業施設数の因果関係の順序については、今回の解析からは分らなかった。

F グループは犯罪率について、盗難の多い地域の特徴を調べた。説明変数に放置自転車数、人口密度、平均年収、生活保護割合、居酒屋の数、パチンコ屋の数などを用い、人口当たりの自転車盗難数を目的変数として解析した。図 8 に放置自転車数と盗難の関係を示す。仮説に反し、放置自転車数が多いほど、自転車盗難数は少なかった。

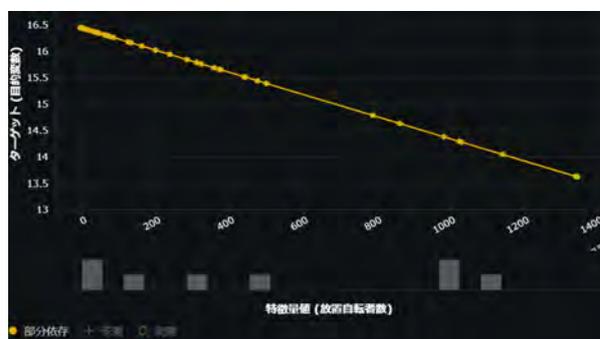


図 8 放置自転車数と盗難の関係 (F グループの発表資料より)

G グループは、若者の選挙の投票率向上を目的に、投票率は住民の幸福度に左右されると仮説を立てた。そこで、投票率が上がる要因として、収入による因子(平均地価、面積あたりの犯罪件数、教育費、平均年収、人口あたりの犬の登録数)、家族構成、期日前投票所数など説明変数として、投票率を目的変数に解析を実施した。図 9 に投票率

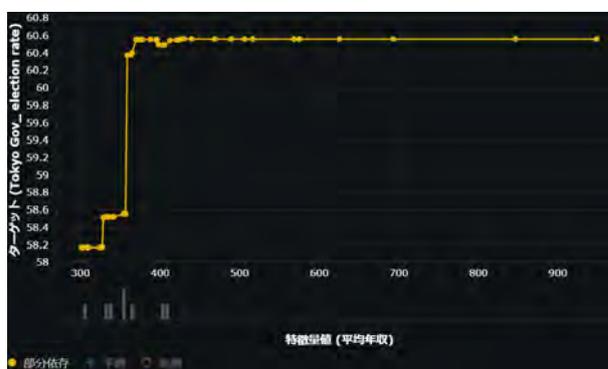


図 9 東京都の投票率と平均年収の関係 (G グループの発表資料より)

と平均年収の関係を示す。平均年収が高いほど投票率も高かったため, 生活に余裕があるほど政治に関心を持っていると考えられる。ただし, 各説明変数の投票率への寄与度に大きな差は見られなかった。

3.4. 外部からの評価

最終発表は2023年7月13日, 東京高専と関わりのある民間企業数社の社員とオンラインで繋いで実施した。各グループは, 発表5分, 企業の方からの質疑応答3分で発表した。企業の方からのコメントでは, 「仮説を立ててデータを集め, 検証するプロセス」を学生のうちに行なっていることがよく評価されていた。最終発表と質疑応答を通して, 「社会実装」の「社会」の部分についてサイエンスするという目的を達成したうえで, 社会からのフィードバックを得るといふ社会実装教育のプロセスを一通り体験学習することができた。

4. 2つの演習での取り組みを振り返って

ここまで, 2023年度の機械工学科4年の「社会実装プロジェクトI」の授業内の取り組みを紹介してきた。以下に, 本年度の取り組みの振り返りと来年度以降への展望について述べる。

1)「Pythonを用いたAI・機械学習の実装」では, Pythonの実行環境の構築に苦勞している学生が多く見受けられた。また, 2.3節で紹介した学生への課題レポートでは, 大多数の学生は授業内容をよく理解し, 「単回帰分析」「SVM」「ナイーブベイズ法」などの機械学習を用いて社会課題解決を提案していた。一方で, 一部のレポートでは説明変数と目的変数の意味を理解していない様子が見られ, 「AIプログラムを用いて予測する」のような抽象的なタスクの提案にとどまっていた。機械工学科のカリキュラムではデータサイエンスに触れることが初めての学生が大半だったため, 各学生の理解度のフォローアップが必要だと考えられる。

2)「多摩地域の身近な課題発見のタスク」では, 学校行事のため1回分の講義をオンデマンド配信で代替し, 学生同士のグループワークの時間が短かった。それでも, 学生は最終発表に向けよく準備し, データの収集から課題発見を行っていた。実際の演習の中では, ある程度自分たちがやりたい課題の仮説を絞った上で, 機械学習を行いながら適宜説明変数のデータを増やしていくというア

プローチを行ったグループでは, 円滑にデータ解析が進んでいた印象だった。一方で, 仮説がフワフワした状態で「とにかくデータを集めて, データ同士の関係が見えてから課題を絞る」というアプローチを実施したグループは, 課題の発見に苦勞していた。また, 解決したい課題の設定に苦勞し, データ解析の試行回数が少なかったグループは, 説明変数が少なくデータからの説得力が弱い印象だった。しかしながら, 外部の企業の方からのコメントにおいて, 苦勞を重ねながらも「仮説を立てて検証するプロセス」を学生のうちに行なっていることがよく評価されており, データサイエンス教育の取り組みとして一定の成果が得られたと言える。今後の取り組みとして, 来年度以降は都知事杯オープンデータ・ハッカソン¹⁹⁾への参加などを視野に入れ, オープンデータとAIを用いたデータサイエンス教育を進めていきたい。

5. まとめ

本稿では東京高専におけるデータサイエンス教育の事例として, 機械工学科4年の「社会実装プロジェクトI」の事例を紹介した。

最後に, 今後のデータサイエンス教育の展望を述べる。政府は2022年の第2次補正予算においてデジタル・グリーン等の成長分野をけん引する理系の高度専門人材の育成に向け, 「成長分野をけん引する大学・高専の機能強化に向けた基金」を創設した。これは全国の意欲ある大学や高等専門学校に対し, ①学部再編等による特定成長分野への転換等(私立・公立大学が対象), ②高度情報専門人材の確保に向けた機能強化(国公立大学・高専が対象)の2つの支援に向け, 10~20億円規模の補助を行う制度である。2023年に発表された初回公募において, 仙台高専, 石川高専, 鳥羽商船高専, 阿南高専, 佐世保高専の国立5高専が「高度情報専門人材の確保に向けた機能強化」の支援校に選定されている²⁰⁾。筆者の周りでも, 「文系の大学が突然情報の学部を作った」などの声を聞くことがあり, 今後, データサイエンス教育は好むと好まざるにかかわらず, 様々な分野に拡大していくことが予想される。本稿は, このようなデータサイエンス教育拡大の潮流の中で, 専門が情報工学ではない, 高専の機械工学科学生に対するデータサイエンス教育の取り組み事例を紹介した。本稿が, あらゆる分野へのデータサイエンス教育導入にわずかでも寄与できれば望外の喜びである。

参考文献

- 1) 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構：ビッグデータの利活用に係る専門人材育成に向けた産学官懇談会報告書(案), 2015年7月(参照日: 2024.1.4)
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/006/shiryo/icsFiles/afiedfile/2016/01/08/1364297_04.pdf
- 2) 文部科学省高等教育局専門教育課：「数理・データサイエンス・AI教育プログラム認定制度」の概要／申請に当たってのポイント, 2023年9月(参照日: 2024.1.4)
https://www.mext.go.jp/content/20230920-mxt_senmon01-000012801_1.pdf
- 3) 東京工業高等専門学校 数理・データサイエンス・AI教育プログラム(参照日: 2024.1.4)
https://www.tokyo-ct.ac.jp/school_summary/sdai/
- 4) 多羅尾進, 浅野敬一, 佐藤知正: 社会実装ロボット教育の取り組みプロセスの分析, 工学教育, 63-1, p.62-67, 2015年9月
DOI: 10.4307/jsec.63.1_62
- 5) 大塚友彦, 多羅尾進, 永井翠, 佐藤知正: 必修科目とした社会実装型 PBL の初年度の実践とその教育的効果, 工学教育, 69-4, p.52-58, 2021年4月
DOI: 10.4307/jsec.69.4_52
- 6) 総務省統計局: 「高等学校における「情報II」のためのデータサイエンス・データ解析入門」, 総合学習のための補助教材 | 統計学習の指導のために(先生向け), (参照日: 2024.1.4)
<https://www.stat.go.jp/teacher/comp-learn-04.html>
- 7) Google Colaboratory
<https://colab.research.google.com/>
- 8) 松井秀俊: データサイエンス大系 多変量解析, 学術図書出版社, 2023年3月
- 9) シバタアキラ, 中山晴之, 小島繁樹, 川越雄介, 香西哲弥: DataRobot ではじめるビジネス AI 入門 [DataRobot Japan 公式ガイドブック], 翔泳社, 2020年7月
- 10) 鈴木創, 松原弘明, 高田宗一郎: 機械学習プラットフォーム DataRobot の性能評価, 第21回 評価・診断に関するシンポジウム予稿集, pp.63-68, 2023年11月
- 11) 東京都オープンデータカタログサイト
<https://portal.data.metro.tokyo.lg.jp/>
- 12) 地域経済分析システム RESAS
<https://resas.go.jp/>
- 13) V-RESAS <https://v-resas.go.jp/>
- 14) 東京都総務局統計部: 東京都の統計
<https://www.toukei.metro.tokyo.lg.jp/>
- 15) 国土交通省: 国土数理情報ダウンロードサイト <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- 16) 気象庁: 過去の気象データ・ダウンロード
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>
- 17) (公財) 東京市町村自治調査会: 統計資料
https://www.tama-100.or.jp/category_list.php?frmCd=2-6-0-0-0
- 18) e-Stat 政府統計の総合窓口
<https://www.e-stat.go.jp/>
- 19) 都知事杯オープンデータ・ハッカソン
<https://odhackathon.metro.tokyo.lg.jp/>
- 20) 文部科学省: 「大学・高専機能強化支援事業」の初回公募選定結果について(報道発表資料), 2023年7月(参照日: 2024.1.4)
https://www.mext.go.jp/content/20230721-mxt_senmon01-72.pdf

(2024年1月10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55号

令和5年度

令和6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