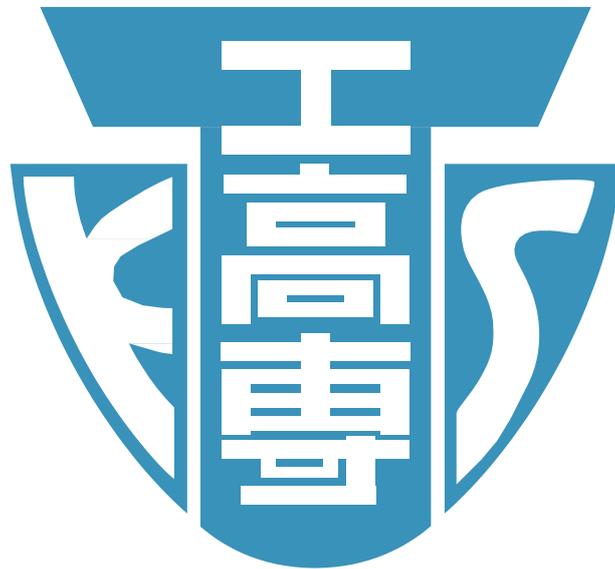


*Research Reports of
National Institute of Technology, Tokyo College
No.56, Mar. 2025*

東京工業高等専門学校
研究報告書



第 56 号

2025. 3

目 次

【査読なし論文】

物理的実在を学生にどう教えるか？	前段 眞治	1
東京高専における古典教育の一例	青野 順也	6
高専生のための英語を用いた「SF 未来リテラシー教育」の実践 — SF プロトタイピング 入門 —	横溝 仁, 向山 大地, 廣池 桜子	14
英文における要約の技法と方略の研究	長橋 雅俊	20
南フロリダ大学と高専生の対面交流についての実践報告	廣池 桜子, 八田 直紀, 横溝 仁	28
DD モータを用いた電動アシストカートの開発 — 電動アシストユニットのプロトタイプ的设计開発 —	堤 博貴, 島 健太郎	35
スパッタ SiC 光導波路の作製と評価	新國 広幸, 本白水 亮, 伊藤 浩	42
高専生に向けたコンピュータ基礎教材の作製と実装 — コンピュータ, ネットワーク教育の発展に向けて —	田中 晶, 田辺 友斗, 早瀬 壮真, 水落 祐太, 水上 滉介	47
複数の海洋生微生物に対する光感受性薬剤の毒性の変化	庄司 良, 山越 湧馬	57
小中学生を対象とした公開講座「光電融合を用いたエネルギー変換」の実施と評価	熊澤 匠真, 松岡 敏, 新田 武父, 庄司 良	63
低学年向けワークショップを通じた「はざまる工房」の活用	吉元 照貴, 熊澤 匠真, 中村 源一郎, 向川 拓臣 原口 大輔, 富沢 哲雄, 多羅尾 進	72

CONTENTS

【Non-refereed Papers】	
How can we teach students physical reality ?	Shinji MAEDAN 1
An Example of Classical Language Classes at the National Institute of Technology, Tokyo College	Junya AONO 6
“SF Futures Literacy Education” for Kosen Students — An Introduction to SF Prototyping —	Hitoshi YOKOMIZO, Daichi MUKOYAMA, Sakurako HIROIKE 14
A Study of Techniques and Strategies for Summary Writing in English	Masatoshi NAGAHASHI 20
Report on In-Person Exchange between Students of the University of South Florida and NITTC Students	Sakurako HIROIKE, Naoki HATTA, Hitoshi YOKOMIZO 28
Development of electrically power-assisted carts using DD motors — Design and development of electric power assist unit prototypes —	Hiroataka TSUTSUMI, Kentaro SHIMA 35
Fabrication and Evaluation of Sputtered SiC Optical Waveguides	Hiroyuki NIKKUNI, Ryo MOTOSHIROMIZU, Hiroshi ITO 42
Design and Implementation of Fundamental Computer Teaching Materials for Students of the National Institute of Technology — For the Evolution of Computer and Network Education —	Akira TANAKA, Yuto TANABE, Souma HAYABUCHI, Yuta MIZUOCHI, Kousuke MIZUKAMI 47
Changes in toxicity of photosensitive drugs to two kinds of marine microorganisms	Ryo SHOJI, Yuma YAMAKOSHI 57
Lecture for Elementary and Junior High School Students Implementation and evaluation of “Energy Conversion Using Photonics-Electronics Convergence”	Takuma KUMAZAWA, Satoshi MATSUOKA, Takenori NITTA, Ryo SHOJI 63
Practical Use of the “Hazamaru Kobo” through Workshop for the First Grade Students	Shoki YOSHIMOTO, Takuma KUMAZAWA, Gen-ichiro NAKAMURA, Takumi MUKOUGAWA, Daisuke HARAGUCHI, Tetsuo TOMIZAWA , Susumu TARAO 72

物理的実在を学生にどう教えるか？

前段眞治*

マクロの世界を扱う古典物理学では、運動している物体の物理量の値（位置の値や速度の値等）は、観測者が物理量を測定するしないに関わらずその物体がもっていると常にみなされる。一方、ミクロの世界を扱う量子力学では、一般的には物理量を測定する前に確定した物理量の値をもつと考えるのは間違いであることが確認されている。筆者は専攻科で「量子からみた世界」という科目を担当しているが、上に述べた量子力学と古典物理学との違いを学生にどのようにして教えるのが効果的であるか考察する。（キーワード：物理的実在, 量子力学, 古典物理学, 物理量, 測定）

How can we teach students physical reality?

Shinji MAEDAN*

It is always assumed in classical mechanics that the system has the precise values of its observables before these observables are measured. In quantum mechanics, however, it is impossible to specify simultaneously the precise values of two observables of a system that do not commute. We introduce this subject in our class in the Advanced Course.

(Keywords: Physical reality, Quantum mechanics, Classical mechanics, Observable, Measurement)

1. はじめに

近年、量子情報科学が注目されている。それは量子力学の原理に基づいた情報科学のことを指し、量子コンピューターや量子暗号通信などの実用化が目指されている。筆者は本校の専攻科で「量子からみた世界」という科目を担当しており、量子情報科学の基盤となっている量子力学の初歩を中心に教えている。量子力学はミクロの世界を記述する理論であるが、学生が本科の物理関連科目で学んできた古典物理学（ニュートン力学や電磁気学など）とは形式や考え方が随分違う。本科の授業では粒子だと教えられてきた電子が状況によっては波の振る舞いをしたり、波だと教えられてきた光が状況によっては粒子の振る舞いをする。量子力学で学ぶ内容には、日常生活の中で身

につけてきた常識や直感とは異なることが上述以外にもいくつもでてくる。そのため、筆者は専攻科の授業で学生に教える際、苦勞することも多い。

本稿では、量子力学において物理量とその物理量の値（測定値）がどのように関連づけられているのか、授業の中で十分伝えられなかったことも含めて活字の形でまとめてみたい。古典物理学の柱の1つであるニュートン力学では、運動している物体の物理量の値（位置の値や速度の値等）は、観測者が物理量を測定するしないに関わらずその物体がもっているとみなされる（例えば自由落下している物体の位置の値や速度の値）。一方、ミクロの世界を扱う量子力学では、一般的には物理量を測定する前に確定した物理量の値をもつと考えるのは間違いであることが確認されている。

*一般教育科

2. 電子の二重スリット実験

本科の物理授業で習ったヤングの実験を思い出そう。単色光を単スリットに送った後、さらに複スリット（上のスリットを S_1 、下のスリットを S_2 と呼ぼう）に送ると、後方に置いたスクリーン上に干渉縞が現れた。これは、光が波であることを如実に示している。ヤングの実験での光を電子に置き換えたような電子の二重スリット実験が 1965 年に行われ、電子の干渉縞ができることが確認された。もちろん、電子の二重スリット実験にふさわしい装置に設定されている。この実験では多数の電子が一齐に複スリットへ送られたのだが、1989 年には電子を時間をかけて 1 個ずつ複スリットに送る実験が実施された [1]。ヤングの実験でのスクリーンに相当する、電子の二次元検出器で電子が観測される時は、必ず点状の粒子として観測される点に注意してほしい。二次元検出器上で観測される電子は点として 1 個ずつ蓄積されるので、観測された電子の数が多くないとわかりづらいのだが、多数の点が蓄積されると干渉縞がはっきり見えてくる。これは電子が干渉を起こしていることの確かな証拠である。しかも、電子は時間をかけて 1 個ずつ複スリットに送られているので、複数の電子の間で干渉を起こすことは考えられない。いわば 1 個の電子が自分自身と干渉を起こして、その結果干渉縞ができたといえることができる。このことを一体、どのように理解したらよいのであろうか？

量子力学と呼ばれる、ミクロの世界を記述する理論が 100 年近く前に完成した [2]。本科で学生が習ってきたマクロの世界を記述する古典物理学とこの量子力学とでは、考え方や記述の仕方が大きく異なる。量子力学で電子の二重スリット実験をどう理解できるか、以下、説明したい。

1924 年にドブロイは、すべての粒子は波の振る舞いをするという‘物質波’の仮説を唱えた。この考えに従って、電子の波としての振る舞いを表すために、電子の波動関数 $\psi(x)$ を導入しよう。

ここで、 x は位置を表す。 $\psi(x)$ は波を表すので、それぞれの点 x で $\psi(x)$ は値を持つことになる。ヤングの実験において波である光を変位 $u(x)$ によって表したことを思い出すと、電子の二重スリット実験をどのようにして波動関数 $\psi(x)$ で記述すればよいのか参考になる。ただし波動関数 $\psi(x)$ は一般に複素数の値をとる。‘物質波’の考えに従うと、複スリットに向けて送られた 1 個の電子は同時にスリット S_1 と S_2 の両方とも通過し、その先にある二次元検出器で観測される。しかし、電子が観測される時は必ず点状の粒子として見いだされ、1 個の電子の破片が観測されることは決してない。この事実と、空間的に広がった分布をもつ波動関数 $\psi(x)$ との間にどのように整合性を持たせることができるのであろうか。

量子力学の正統的な解釈は、観測の結果電子がある点 x に見いだされる確率が波動関数 $\psi(x)$ の絶対値の 2 乗、

$$|\psi(x)|^2 \quad (1)$$

に比例する、というものである。この確率解釈によれば、波動関数 $\psi(x)$ は電子の実体を直接表すものではなく、電子を観測した結果どこの点に見いだされるかの確率を与えるものであり、そのため確率振幅という名で呼ばれる。さてスリット S_1 を通って二次元検出器に到達した波動関数を $\psi_1(x)$ 、スリット S_2 を通って検出器に到達した波動関数を $\psi_2(x)$ とそれぞれ書くと電子の波動関数 $\psi(x)$ は $\psi(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x)$ と書ける。従って二次元検出器上のある点 x で電子が観測の結果見いだされる確率は

$$\begin{aligned} |\psi(x)|^2 &= |\psi_1(x) + \psi_2(x)|^2 \\ &= |\psi_1(x)|^2 + |\psi_2(x)|^2 \\ &\quad + \psi_1(x)\psi_2^*(x) + \psi_1^*(x)\psi_2(x) \end{aligned} \quad (2)$$

であり、 $\psi_1(x)\psi_2^*(x) + \psi_1^*(x)\psi_2(x)$ の項を干渉項と呼ぶ。確率の干渉が起こることによって、二次元検出器上で観察される電子の干渉縞を説明することが可能となる。

さて、ここでもし我々が電子を素朴に古典的な粒子であると考えた場合、電子は当然、スリッ

ト S_1 を通ったか、スリット S_2 を通ったかのどちらかになる。スリット S_1 を通ったとすると $\psi_2(x) = 0$ なので干渉項はゼロになり、電子の二重スリット実験で電子の干渉縞が確認されたことと矛盾する。スリット S_2 を通ったとした場合も同様である。従って電子を素朴に古典的な粒子であるとみなすことはできない。電子の物理量の位置を測定する前に、電子が確定した位置の値を持っていると考えることは間違いである。そのことを認めると、複スリット付近で電子は確定した位置の値を持っていないので、電子はスリット S_1 とスリット S_2 を同時に通ったとみなすことが可能になる。

波動関数 $\psi(x)$ の絶対値の 2 乗に比例する量によって確率が与えられる点についてももう少し議論しよう。電子が観測される直前、二次元検出器上の各点で電子の波動関数は値 (0 を含めて) を持つので、観測の結果、電子がいろいろな点で見いだされる可能性がある。ここで、実際に観測が行われて、ある点 x_0 に見いだされた場合を考えよう。観測前に広がっていた波動関数 $\psi(x)$ が、観測された瞬間、点 x_0 でのみ値をもつような関数に変化したことになる：

$$\psi(x) = \begin{cases} 0 & \text{でない値} & (x = x_0) \\ 0 & & (x \neq x_0) \end{cases} \quad (3)$$

観測したことによるこのような $\psi(x)$ の突然の変化を「波束の収縮」と呼ぶ。専門用語を用いて述べると、波動関数 $\psi(x)$ は物理量である位置 x を測定した瞬間、位置 x の固有値 x_0 (これが測定値に当たる) に属する固有関数に変化する ($x \delta(x - x_0) = x_0 \delta(x - x_0)$)。このように電子の物理量の位置と、その物理量の値 (測定値) とは同一ではないのである。一般に量子力学では、物理量とその物理量の値 (測定値) は同一ではなく、両者の間の関係は量子力学のルールによって定められる。

3. 物理量およびその物理量の値

古典物理学では、物理量とその物理量の値 (測定値) は密接に関係していた。質点の位置や運動

量のような物理量は時刻の関数とみなされ、ある時刻における位置や運動量はそれぞれの測定値と同一視された。また、質点は同時に確定した位置の値と運動量の値をもち、それらの値の組によってその時刻における状態が指定された。

一方、量子力学では 2 章で説明したように、物理量とその物理量の値 (測定値) は同一ではない。両者の間の関係は、量子力学では次のようになっている。

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

上に述べた、測定による状態の突然の変化を「波束の収縮」と呼ぶ。我々は電子の二重スリット実験を考察した際、電子の物理量の位置を測定する前に電子が確定した位置の値を持っていると考えるのは間違いであることをみた。この章では、物理量とその物理量の値 (測定値) についてより一般的に述べる。どのような場合であれば、物理量を測定する前であっても、確定した物理量の値 (測定値) を持っているとみなすことが許され、あるいは許されないのか考えることにする。

(A) 観測可能な物理量 ξ と η が可換な場合
物理量 ξ と η が $\xi\eta = \eta\xi$ を満たす場合である (物理量は量子力学では演算子で表されるので、 $\xi\eta = \eta\xi$ が成り立つとは限らないことに注意する)。この場合、 ξ と η が観測可能な物理量であることにより、 ξ と η の同時固有ベクトルを構成することができる。そして ξ の値と η の値を同時に、しかもそれぞれ 100 % の確率で予言することが次のような場合には可能である。即ち、状態ベクトルが ξ と η の同時固有ベクトルの内のただ 1 つで与えられている場合である (もし、状態ベクトルが ξ と η の同時固有ベクトルの重ね合わせで与えられているときは、 ξ の値と η の値のそれぞれが特定の値をとる確率を計算することが

できる)。この場合、物理量を測定する前であっても同時に ξ と η はそれぞれ確定した物理量の値を持つと考えることができる。

(B) 観測可能な物理量 ξ と η が可換でない場合 $\xi\eta$ と $\eta\xi$ が同じではない場合である。演算子であるのでこのような場合が生じ得る。古典物理学では 2 つの物理量は常に可換であったことを思い出すと、可換でないケースがあることは量子力学の際だった特徴の 1 つであるといえる。可換ではない場合、 ξ の値と η の値を同時に、しかもそれぞれ 100 % の確率で予言することは不可能である。なぜなら可換ではない場合、 ξ と η の同時固有ベクトルは構成できないからである。 η の 1 つの固有ベクトルを ξ の固有ベクトルで展開しよう。その展開式の各項のベクトルは、 ξ と η が可換でない場合には、 η の固有ベクトルにはなっていない。従って、 η の 1 つの固有ベクトルは、異なった固有値に属する ξ の固有ベクトルの重ね合わせで表されることになる。これは、 ξ の値が確定していないことを意味する。 ξ と η が可換ではない場合、同時に確定した物理量 ξ の値と物理量 η の値は持たない。同時に確定した値を持つと考えること自体が間違いなのである。

話が抽象的になったので、上の (B) の場合を具体的な例で以下、説明する。電子のスピン (角運動量) \mathbf{J} を例にとる。 \mathbf{J} は、直感的には電子が自転することによって生じる角運動量と思ってもらえば良い。物理量であるスピン \mathbf{J} は 2 行 2 列の行列を用いて次のように表される、

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= (J_x, J_y, J_z) \\ &= \left(\frac{\hbar}{2}\sigma_x, \frac{\hbar}{2}\sigma_y, \frac{\hbar}{2}\sigma_z \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\hbar \equiv h/2\pi$ (h はプランク定数) であり、また、

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, & \sigma_y &= \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \\ \sigma_z &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

の 3 つの行列はパウリ行列と呼ばれる。スピン \mathbf{J} の各成分同士は可換ではなく、たとえば $J_z J_x \neq J_x J_z$ である。前述の (B) で、 ξ として J_z を、 η として J_x ととり、具体的に計算しよう。 J_z と J_x の同時固有ベクトルは構成できない。スピン z 成分 J_z の固有値は $\pm\hbar/2$ の 2 つあり、それぞれの固有値に属する固有ベクトルを $|z_{\pm}\rangle$ と書くと、

$$\begin{aligned} J_z |z+\rangle &= \frac{\hbar}{2} |z+\rangle, \\ J_z |z-\rangle &= -\frac{\hbar}{2} |z-\rangle. \end{aligned} \quad (6)$$

固有ベクトルをそれぞれ求めると、

$$\begin{aligned} |z+\rangle &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ |z-\rangle &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

同様に、スピン x 成分 J_x の固有値は $\pm\hbar/2$ の 2 つあり、それぞれの固有値に属する固有ベクトルを $|x_{\pm}\rangle$ と書くと、

$$\begin{aligned} J_x |x+\rangle &= \frac{\hbar}{2} |x+\rangle, \\ J_x |x-\rangle &= -\frac{\hbar}{2} |x-\rangle. \end{aligned} \quad (8)$$

固有ベクトルを求めると、

$$\begin{aligned} |x+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \\ |x-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

さて、電子のスピン x 成分 J_x を測定した結果、得られた測定値が $\hbar/2$ だったとしよう。するとこの測定をした瞬間、電子のスピン状態ベクトルは $|x+\rangle$ に波束の収縮を起こす。この固有ベクトル $|x+\rangle$ を、スピン z 成分 J_z の固有ベクトル $|z+\rangle$ と $|z-\rangle$ で展開すると、次のようになる:

$$|x+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |z+\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |z-\rangle. \quad (10)$$

ここで、 $|z+\rangle$ や $|z-\rangle$ は、それぞれスピン z 成分 J_z の異なる固有値に属する固有ベクトルであるので、上式左辺はスピン z 成分の値が不確定で

あるような状態ということになる。つまり、電子は同時に確定したスピン x 成分の値とスピン z 成分の値は持たないのである。

最後に、2章で考察した電子の二重スリット実験の補足をしておこう。19世紀末頃までに完成した古典物理学では、電子のような質点は同時に確定した位置の値と運動量の値をもつと考える。しかし量子力学では、位置の演算子と運動量の演算子は可換ではないことが知られており、上記の(B)の場合に当たる。従って、電子（のような質点）は同時に確定した位置の値と運動量の値をもつと考えることはできない。電子が測定前であっても確定した位置の値をもつとみなすことが許されるのは、その時の運動量の値の不確かさが ∞ （無限大）の場合に限られるのである。

4. まとめ

マクロの世界を記述する古典物理学とミクロの世界を記述する量子力学とでは、形式も考え方も大きく異なる。量子力学では物理量とその物理量の値（測定値）は同一ではなくそれらの関係がどのようなになっているのかこれまでみてきた。量子力学によれば電子（のような質点）は同時に確定した位置の値と運動量の値をもってはおらず、それは我々の抱いている素朴な粒子描像にそぐわない。しかし、2章で議論した二重スリット実験で、我々は二次元検出器に到達する前までの電子を直接見ることはできない。電子の位置の値を知るためには、二次元検出器のような測定機器を用いて観測することが必要であり、そして観測を実行すると「波束の収縮」が起こる。

このように、ミクロの世界では観測を行うことによって系の状態が擾乱されることは避けられない。古典物理学とは異なり、ミクロの世界を扱う量子力学では、観察者の行う測定行為とは独立に物理対象があると考えすることはできない。

参考文献

- [1] <https://www.hitachi.co.jp/rd/research/materials/quantum/doubleslit/index.html> (参照日：2024.12.11)
- [2] 高林武彦「量子論の発展史」中央公論社 1977年

(2024年12月12日 受理)

東京高専における古典教育の一例

青野順也*

本稿は、東京高専における国語科科目のうち、本科 1 年生を対象として開講されている「国語総合Ⅱ」を例として、古典教育の実践例について報告するものである。本稿ではまず、第 2 章で「古典を学ぶ意義」などを扱った「国語総合Ⅱ」の導入について紹介した後、続く第 3 章では令和 6 年度の後期に行った同授業における日本神話『古事記』のストーリー紹介を取りあげ、授業時に用いたパワーポイント資料を示しながら実践例を報告していく。最後の第 4 章では古典にまつわる教養教育についての展望を述べ、全体のまとめとする。

(キーワード：東京高専，古典教育，日本神話『古事記』，教養教育)

An Example of Classical Language Classes at the National Institute of Technology, Tokyo College

Junya AONO*

In this paper, I will report on the Classical Japanese classes for first-year students at the National Institute of Technology, Tokyo College. In the beginning of this paper, I will discuss the significance of studying Classic Language. Next, I will introduce the story of KOJIKI (Japanese mythology) that was covered in 2024. In particular, practical examples will be introduced by using Power Point materials. Finally, the future of Liberal Arts and classical education at technical colleges will be discussed.

(Keywords: National Institute of Technology, Tokyo College, Classical Japanese Classes, KOJIKI (Japanese mythology), Liberal Arts)

1. はじめに

本稿は東京高専（以下、「本校」と呼ぶ。）における国語科科目のうち、令和 6 年度（2024 年）における古典分野の授業実践例について報告するものである。

本校における国語科のカリキュラムは、本科 1 年生前期には「国語総合Ⅰ」として現代文分野が、後期には「国語総合Ⅱ」として古典分野の学習機会が設けられている。本科 2 年生も同様に、前期には「国語総合Ⅲ」として現代文が、後期には「国語総合Ⅳ」として古典の授業が設けられている。ただし古典分野の学習は本科 2 年生の後期までに終えることになっており、その後、選択科目以外で古典を学ぶ機会は設けられていない。工学を志す学生に対する国語教育は、論文・レポート作成や実社会での文書作成といったように、日本語文章表現力の涵養という実学としての側面に重きが置かれている。

以上のように、古典分野の学習機会は本科 2 年生の後期までの短いものとならざるを得ないのであるが、筆者は古典（古文・漢文）教育はどうあるべきなのかという問題意識のもと、本校着任 2 年目にあたる平成 28 年度（2016 年）以来、試行錯誤を繰り返してきている。この間には、新型コロナウイルス蔓延による緊急事態宣言発出とオンライン授業の実施というイレギュラーの事態にも見舞われたが^{1,2)}、授業環境の変化による影響を受けながら今日までに辿り着くことのできた古典授業の方法論および実践例を紹介していくこととしたい。

本稿の議論は以下のように進めることとする。まず第 2 章では本校の本科 1 年生対象「国語総合Ⅱ」の授業内容・進め方について紹介する。続く第 3 章では令和 6 年度（2024）後期の「国語総合Ⅱ」における日本神話『古事記』のストーリー紹介について、授業時の PPT 資料を提示しながら

*一般教育科

事例紹介を行う。第4章では全体のまとめを行う。

2. 「国語総合Ⅱ」について

本科1・2年生には、後期開講の「国語総合Ⅱ」および「国語総合Ⅳ」において古典分野の学習機会が設けられている。例えば本科1年生の場合、前期のはじめは高等学校と同じように「歴史的仮名遣いの読み方」や「五十音図」といった古典学習の初歩から始まるが、本稿で紹介する令和6年度(2024年)の授業は、これ以降の授業展開において高等学校とは大きく異なるものとした。

まず、高等学校の生徒が学習する用言の活用、助詞・助動詞の意味用法については扱う機会がほとんどない。本校の国語教育はいわゆる「古典文法・学校文法」を活用した、一般的な大学受験とは隔絶した環境にあるので、学校文法の知識は直接的に役立つことはほとんどないと思われる。そうした教育環境下における国語科の授業は教養教育の一環として進めていくべきだと考える。

そこで後期第1回目のガイダンスでは、次に挙げる図1のスライドを使用して古典学習の導入・動機付けを行った。

古典を学ぶ意義

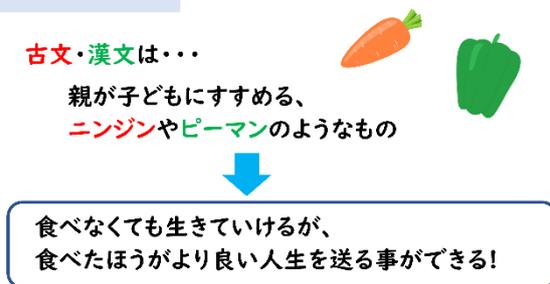


図1 古典を学ぶ意義

「成果主義」という言葉があるように現代社会は過程よりも結果を求められることが多いのだが、古典から得られる知識・知恵に即効性は求めるべくもなく、古典の学習経験が花開いて人生や実生活の支えとなってくるのは社会人となって応分の労苦を経験してからのことになることは、大方の首肯するところであろう。

また過去に一度、「古典の勉強は何の役に立つのですか」という質問が寄せられたこともあった。この質問は純粋な問いかけである一方、質問者の心中には「古典は役に立たない」という「答え」が用意されているとも思われる。もっともこうした問いかけは科目を越えて多くの教員のもとに寄

せられるものであり、ときには快調に応答し、ときには回答に困難を感じることもあると思われるが、本授業では、次のようなスライドを用意して受講する学生に考えてもらう機会を設けた。次に図2・3として挙げる。

図2では、「寒くてもあかぎれを起こさない薬を使用して川で洗濯をして生計を立てている宋人」の存在を提示する。そして続く図3では「偶然通りがかった旅人が宋人からあかぎれ予防薬を百金で買い取った」ことを提示する。

そして図4においては、「あかぎれ予防薬を所持する旅人は自らを呉王に売り込み、冬季の戦さにて大活躍して敵軍を破り、大身に取り立ててられた」という逸話を紹介する。



図2 冬でもあかぎれを起こさない薬



図3 あかぎれ予防薬を手に入れる旅人

同じ「あかぎれの薬」でも・・・

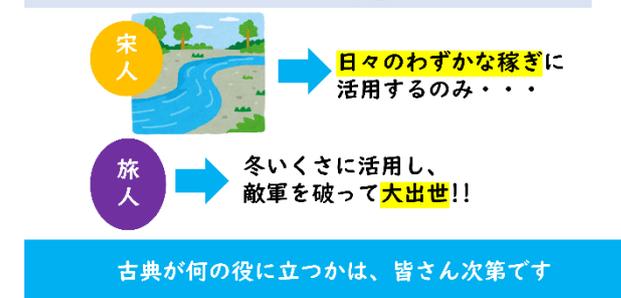


図4 あかぎれ予防薬の活用方法

最後の図4では、「あかぎれ予防薬の使用」に

ついて、片や洗濯のみに使用して生計を立てていた者、片や敵国の大軍を破るという手柄をあげて大身に取り立てられた者といった対比を提示する。このように、諸種の「学問が何の役に立つか」は「すべて自分次第ではないだろうか」という問題提起を行って学習意欲の喚起に努めた。

次に図5～7として挙げるのは、『日本書紀』(養老4年、西暦720年)に見える「十七条憲法」第10条の現代語訳である。

第十条に言うことには、

「心にうらみを抱かず、顔に憤りを表さず、

人が自分と違うからといって怒ってはならない

人間は、みんな考えが違う。怒ってはならない

図5 「十七条憲法」の第十条(1)

人には皆 心があり、心にはそれぞれの考えがある。

自分が正しくて相手が間違っている事があれば、

相手が正しくて自分が間違っている事もある。

人は、誰もが正しい事をし、また、間違いを犯してしまう事もある。みんな凡人なのだ

人間は、みんな不完全なのですよ

図6 「十七条憲法」の第十条(2)

賢人と愚人とは、輪っかの両端のようなもので、つながっている。

相手が怒ったら、自分が間違いを犯している事も考えてみる必要がある。

自分が正しいと思っても、周囲の皆とよく話し合い、より良い合意形成に至れるように努力しなさい

自分の過失も考慮し、よく話し合いなさい

図7 「十七条憲法」の第十条(3)

「十七条憲法」の第十条には、「人が自分と(考えが)違っていても、怒ってはならない」ということ、また、「自分が正しく、相手が間違っている場合もあるが、その反対に、自分が間違っていて相手が正しい場合もある」とある。この文言の紹

介は、人格形成の重大時期を迎えている学生にとって有意であると思われる。また関連して、学生自身が支えてしている名言名句を披露してもらうこともあった。

以上、本章では「国語総合Ⅱ」における導入内容を紹介した。古典は「古くさいもの、難解なもの」という見方からの転換を図ること、また、学生自身の日々の生活に引き寄せて読み直してもらい、古典を学ぶ意義を察してもらえればという筆者の希望をこめた次第である。

続いて次章では、第2回目以降の内容として古典文学作品のストーリー紹介の試みについて紹介していく。

3. 古典作品ストーリー紹介

3.1. 「国語総合Ⅱ」の授業展開

前章では「国語総合Ⅱ」の導入部について紹介した。本章では、授業の中心をなす「古典作品のストーリー紹介」の実践例について報告していく。

本校では検定教科書を採用しているため『徒然草』や『伊勢物語』といった教材の読解・鑑賞も行うことになるが、大学受験という目標がないことから古典の授業は形骸化してしまうのではという懸念があり、また、一つの授業の形骸化は多くの科目の学習にも影響を及ぼすと思われる。したがって古典分野の授業には(他科目にも同じことが言えるが)学生の興味喚起を意識した授業設計とその実践とが求められる。

そこで筆者は、令和2年度(2020年)に行われたオンライン授業実践時の、パワーポイント教材作成経験を活かし、古典作品のストーリー紹介を導入することにした。古典作品の選定にあたっては、「書名こそ誰もが知っているものの、内容については必ずしも熟知されていない作品」のうち、たとえば「因幡の白兔」など、過去の読書経験などを通して断片的にストーリーを知っているなど、再発見の楽しみもあることから日本の神話・歴史書の『古事記』を選定した。授業前半に『古事記』のストーリー紹介を行い、後半に教科書教材の読解を行っていくという方式で授業を展開した。当該時間に扱う内容・説明の方途にもよるが、90分間のうち60分ほどの時間を『古事記』のストーリー紹介に用い、教科書教材の時間は20～30分ほどとなった時間もあったが、学生からは常に反応が見られ、教員としても充実した時間であった。以下、その実践例を紹介していく。

3.2. 『古事記』ストーリー紹介の実践例

『古事記』は元明天皇の命により太安万侶が和銅5(712)年に完成させた我が国の神話・歴史書である。中巻以降になると歴史叙述となっていく、それはそれで興味を惹かれるが、本授業では神話または神話要素が強く、ストーリーとしても感興に富む箇所が興味喚起にあたって望ましいと考え、『古事記』上巻の冒頭「天地のはじまり」から中巻の「神武東征」までの箇所から教材を作成し、ストーリー紹介を行った(図8)。

『古事記』の構成

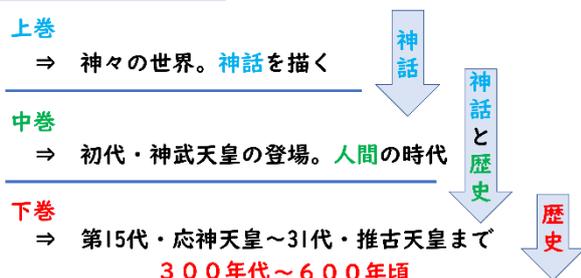


図8 『古事記』上・中・下巻の構成

また、たとえば「大国主神の国作り」や「日本建国」といった直接的な内容だけでなく、次の図9のように、抽象的で現代人の心にも響くと考えたテーマを授業冒頭に提示して進めていくこともあった。

『古事記』序盤のテーマ

1. 日本列島の誕生
2. 人はなぜ死ぬのか?
3. 死を克服する方法は?

時代を超えた問いが示されています

図9 『古事記』序盤のテーマ

そのほか、グローバル化の進む今、異文化理解要素も含めていくことが良いと考えられるので、日本の神々は自然崇拝に由来すること、そして『古事記』において完全無欠の存在として語られていないことにも触れている。この説明によってはじめは不完全な神々が試練を乗り越えて成長していくことにも納得でき、ストーリー展開に我が身のことを考え合わせながら没入していくことができ

るものと思われる。

3.3. 日本列島の「国生み」

それでは『古事記』上巻冒頭の伊邪那岐命・伊邪那美命(いざなぎのみこと・いざなみのみこと)二神による、「国生み」紹介に移っていく。

高天原から降った伊邪那岐命・伊邪那美命は日本列島を創造していくが、これにはクイズ形式を導入している。

はじめに淡路島だけを示したスライドを提示し(図10)、「次に生まれた島はどこか?」と発問し、学生には既存の日本列島の島々に関する知識を動員して答えさせていく。

日本の島々が生まれた順番



図10 日本列島は淡路島から始まる

淡路島の次に誕生した島は四国であるが、これは淡路島の近く」という示唆を与えて答えさせる。「淡路→四国→隠岐」と続き、四番目に誕生する島は九州であるが、「西日本の大きな島はどこか?」という示唆を与えて答えさせる(図11)。

日本の島々が生まれた順番



図11 「淡路→四国→隠岐→九州」と誕生

この後、五番目に生まれる「壱岐」、六番目に生まれる「対馬」は、九州北側にある島影を示して島の名を答えさせていく(図12)。最後の「本州」誕生まで順を追って島影を示して島の名を答えさせていき、日本列島の「国生み」神話の紹介を終える(図13)。

大八洲(おおやしま)と呼ばれる



図12 「壱岐→対馬」と誕生

大八洲(おおやしま)と呼ばれる



図13 大八洲(おおやしま)

以上、「国生み」神話は、日本神話に語られる内容が現在の日本人の生活中に継続して存在するものであるということを感じ取ってもらうことができ、『古事記』ストーリー紹介の導入によく適合したものであると考える。この「国生み」神話を扱った授業においてはこちらから学生を指名して答えさせることはなく、自然と島々の名称や関連事項についての発言もあった。「隠岐」や「壱岐」の正解は困難かと思われたが杞憂に終わり、学生の学習意欲の高さが感じられた。

3.4. 神話の現代的解釈

「国生み」神話に続いて「黄泉の国」での伊邪那岐命・伊邪那美命の対話と、続く三貴子の誕生や出雲国における須佐之男命(すさのおのみこと)の

活躍について、順次紹介していく。

次に図14・15として八岐大蛇退治のまとめスライドを挙げる。八岐大蛇退治は登場人物の名から八岐大蛇が河川の氾濫を象徴し、荒れ狂う河川から農作物や人々の生活を守った「農耕神話」と解釈されることがある。

そもそも八岐大蛇退治とは・・・

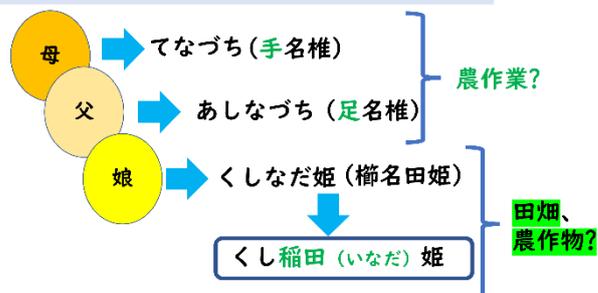


図14 神名から伺える農耕神話

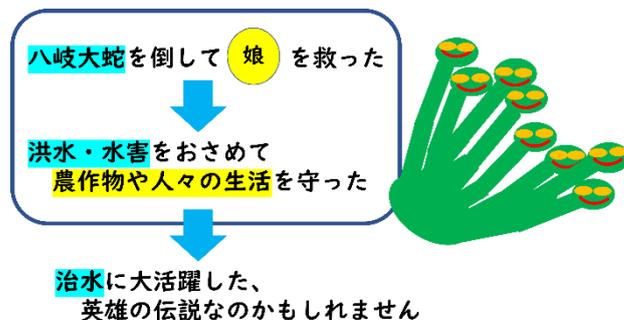


図15 八岐大蛇退治の意味は？

神話は現代人の解釈を加えることなくそのまま受け止めるのが好ましいとも考えられるが、工学を志す学生に対しては「割り切れなさ」だけではもどかしさを感じてしまうことが多くなっていくかと思われるので、「八岐大蛇の正体＝河川の氾濫」、「八岐大蛇退治＝治水作業」という、得心に到りやすい説も紹介しておくこととした。

3.5. 大国主神の「国作り」

大国主神の「国作り」神話は特段の力を入れて取り組んだところである。同神話は、春秋に富む一方で将来には多くの試練が待ち構えている若い学生諸君にとって学ぶところが多い。

大国主神は須佐之男命の子孫にあたり、兄たちの迫害や、須佐之男命からの試練も乗り越えて成長し、やがて地上世界の「国作り」に着手する。

次に挙げる図 16・17 は、大国主神の良きパートナーとなる少彦名命(すくなひこなのみこと)が登場した場面である。

「国作り」の協力者

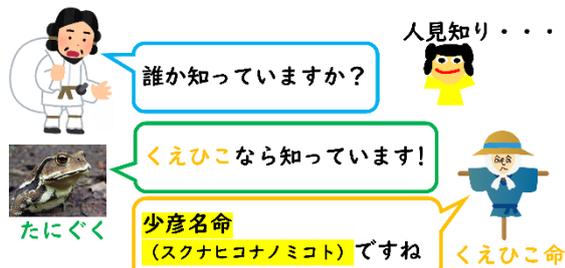


図 16 少彦名命との出会い



図 17 協力して「国作り」に取り組む

「たにぐく」や久延毘古命(くえびこのみこと)も登場し、少彦名命という手のひらほどの小さな神の登場によって教室の雰囲気緩和が和む。しかし、少彦名命は海の彼方にある故郷・常世国(とこよのくに)に帰ってしまい、残された大国主神は途方に暮れる(図 18)。

少彦名命が去り、協力者がいなくなった・・・

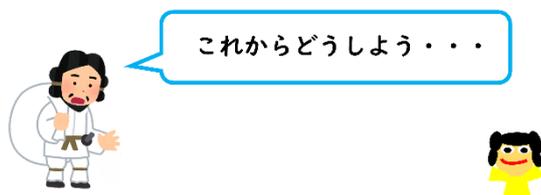


図 18 途方に暮れる大国主神

このとき、大国主神のもとに現れた偉大な神が協力することになり、「国作り」は完成に向かっていくことになる。次にそのシーンを図 19・20 として挙げる。

最大の協力者とは？



図 19 最大の協力者が現れる

自分との出会い



図 20 自分との出会い(1)

ここでは大国主神の前に現れた「国作り」最大の協力者となる神の正体について発問するが、難問なので、ある程度の示唆を与えていく。

一つには「ここまで登場した神である」ということである。この示唆を発したところ、「大国主神の祖先にあたる須佐之男命ではないか」という声があがった。またその他では「大国主神の母」という発言もあった。ここまで答えが出そろったところで、「皆さんなら、最後の最後に一番頼りになる存在は誰か」と、最後の示唆を与える。そうしたところ、学生からは「自分」という答えが返ってくる。

教室にはあつけにとられる者もいたのだが、大国主神は自分の魂(幸魂・奇魂(さきみたま・くしみたま))と出会ったのであり、ここに「国作り」の完成が約束される(図 21)。

自分との出会い



図 2 1 自分との出会い(2)

「最も頼りになる存在は自分である」という読み方をした場合、これは大変勇気づけられるエピソードとなるため、ぜひとも紹介したいと思っていたが、学生からの反応も良好であった。

最後にまとめとして、次の図 2 2 のスライドを示した。



図 2 2 「国作り」エピソードのまとめ

大国主神の「国作り」は『古事記』のなかではたいへん短いエピソードであるため、適宜、『日本書紀』から内容の補充を行いながら進めたが、図 2 2 に示したように「①身近な神々との協力→②外からの知識をも学び→③最後に自分を信じた」という目標達成までの筋道は、人生の様々な局面で活かしていくことのできるものである。

3.6. 神武東征

大国主神のエピソードを紹介した後は、「国譲り」, 「日向三代」と続いていき、最後に日本建国につながる「神武東征」を紹介し、『古事記』ストーリー紹介の結びとした。

九州の日向国を出発したのち、近畿地方に到るまではその行程だけを紹介し(例えば図 2 3), 河内国に上陸してからは細かく旅路や出来事を紹介

していった。

ゴールは近い・・・



図 2 3 建国の地に到着

また、金鵄の飛来などにもアニメーションを取り入れて躍動的な様子を提示できるよう心がけた(図 2 4)。



図 2 4 金鵄飛来

神武東征についてはエピソードから発問材料をうまく抽出できず、ストーリー紹介に留まった点が反省されるが、場面や人物を描く技術の向上が図られたことは大きな収穫であった(図 2 3・2 4, および次の図 2 5・2 6)。



図 2 5 長い旅の終わり



旅の終わりは、日本のスタート地点でした!!

図 2 6 日本の始まり

参考文献

- 1) 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一文系科目(英語, 社会, 国語)を例として一, 東京工業高等専門学校研究報告書第 52 号, pp. 1-10, 2021
- 2) 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一文系科目(英語, 社会, 国語)を例として一(2), 東京工業高等専門学校研究報告書第 53 号, pp. 76-85, 2022

(2024年12月12日 受理)

4. おわりに

—今後の授業設計, 教材作成について

ここまで『古事記』ストーリー紹介の実践例を紹介してきたが, 課題も残された。

まず, 3.6 節で述べたように発問の難しいエピソードもあったということである。また, 当授業においては学生が漫然とスライドを眺める状況を回避するために, ストーリーに沿った空所補充プリントを配布しているが, このプリントには興味喚起事項が少なかった。今後は読書案内や関心を抱いた事項について調べ物ができるような誘導があれば良いと思われる。

以上, 本稿では古典教育の一例として本校本科 1 年生の「国語総合Ⅱ」の授業実践例を報告した。なお, このことは私事となるが, この夏に旅先にて偶然出会ったドイツ人と会話していた折に話題が両国の国民性や教育の話題へと発展していき, さらに「日本における天皇の役割とは何か」, 「日本は歴史上, いつ統一国家になったのか」といった質問を受けた。昨今は翻訳技術の向上によって言語間の壁を越えることが容易になった一方で, 上記のような質問に答えることは依然として困難であると思われる。

グローバル化の進捗は, 他文化の人々に自国の歴史・文化・言語を説明する機会が増大することを意味するのだから, その備えとして, 教養教育の一旦を担う古典教育の充実を図り, 国語教員としての責めを果たしていきたい。

高専生のための英語を用いた「SF 未来リテラシー教育」の実践 — SF プロトタイピング入門—

横溝仁*, 向山大地*, 廣池桜子*

本報告では、東京工業高等専門学校本科 5 年生対象の選択科目 **Comprehensive English II** において実施された「SF 未来リテラシー教育」の実践について紹介する。この授業では、受講者の「未来リテラシー」の涵養を図りつつ、「サイエンス・フィクション」の視点を取り入れることで、学生の想像力／創造力及びストーリーテリング力の向上を目指した。具体的には、SF プロトタイピングの手法を活用し、未来の課題を想像／創造し、それを物語として描く活動に取り組んでもらった。創作活動には課題もあったが、多くの学生が授業に積極的に取り組み、独創的な作品を完成させた。授業アンケートでは好意的な意見が寄せられ、特に英語が苦手な学生にとっても学びやすい環境を提供できたことが分かった。

(キーワード: SF プロトタイピング, 未来リテラシー, 英語教育)

“SF Futures Literacy Education” for Kosen Students

—An Introduction to SF Prototyping—

Hitoshi YOKOMIZO*, Daichi MUKOYAMA*, Sakurako HIROIKE*

This report introduces our efforts to conduct “SF Futures Literacy Education” in an elective English course for fifth-year students at Tokyo Kosen. The course aimed to foster students’ “futures literacy” while incorporating “science fiction” perspectives to enhance their imagination, creativity, and storytelling skills. Specifically, students engaged in activities utilizing SF prototyping techniques to imagine and create solutions to future challenges. While some challenges arose during the creative process, many students actively participated and produced innovative works. Feedback from class surveys highlighted the positive reception, indicating that the course provided a supportive learning environment, even for students less confident in English.

(Keywords: SF prototyping, Futures Literacy, English Education)

1. はじめに

本報告は、東京工業高等専門学校（以下、「本校」と略す。）の本科 5 年生を対象に開講されている選択科目 **Comprehensive English II** で実施された「SF 未来リテラシー教育」に関する実践報告である*1。

「未来リテラシー」とは、UNESCO が 2012 年から重要性を強調している能力で、先行き不透明な時代の変化に対応していくために必要な力、あるいは **Futures Literacy Net** を参照すると、「多様で複数の未来を想像し、現在を新たに見つめるレンズとして未来を使う能力」とあり、技術者養成をその主たる目的とする高専教育において注目すべき

能力と言える¹⁾。

本稿はこの「未来リテラシー」に「サイエンス・フィクション(SF)」を加え、「SF 未来リテラシー教育」の実践と銘打ったが、これは「多様で複数の未来を想像」するのに SF が大いに役立つということと、SF は小説、漫画、映画、アニメなど、様々なメディアで展開しており、高専生に受け入れられやすいと考えたからである。この受け入れやすい下地をもとに英語学習とつなげることで、英語が苦手な高専生であっても「英語」の部分をあまり意識せずに楽しんで学ぶことができ、一方、英語が得意であっても自由な発想が苦手な学生にと

*1 本報告は第 47 回全国高等専門学校英語教育学会研究大会（2024 年 8 月 21 日）で行った口頭発表に加筆修正を加

えたものである。

* 一般教育科

っては、SF プロトタイピングを通じて自らの想像力の幅を広げ、さらにはストーリーテリングの能力を伸ばすことにもつながると考えた。

2. 講義概要と構成

Comprehensive English II は本科 5 年生の選択科目で、東京高専（本科）における最後の英語科目（選択科目）である。講義内容については、担当教員が自由に選択することができ、個々の教員の研究テーマや専門性を生かすことのできる授業となっている。以前この講義を担当した際は筆者の専門分野であるアメリカ文化、文学作品を扱ったが、今回は共同著者の協力のもと、「SF」そして「未来リテラシー」をキーワードに新しい取り組みに挑戦した。

本講義の評価割合は表 1 に示した通りである。毎回の授業の流れは、はじめに「WEB 課題に関する Q&A 及び意見交換」を行い、続いて「その週のトピックに関する講義&ディスカッション」、最後に「リアクション・ペーパーの提出」という流れにした*2。

表 1 評価割合

Web 課題 (10回)	20%	Podcast プログラムの聴取、 Forms クイズに回答
リアクション・ペーパー (10回)	20%	授業内で指定用紙に 執筆&提出
英語プレゼンテーション (2回)	20%	中間課題に関するプレゼン、 期末課題に関するプレゼン
中間課題	20%	SF movie review の提出 (日本語+英語)
期末課題	20%	SF prototyping の提出 (日本語+英語)

学期の前半、中間試験までは「未来リテラシー」の涵養を目的として、主に以下のような技術者倫理に係る様々なトピックを扱った。

- ・NHK ドキュメンタリー『映像の世紀バタフライエフェクターマンハッタン計画 オッペンハイ

*2 受講者は本科 5 年生 6 名。

*3 オンライントークイベント「SF プロトタイピングで描

マーの栄光と罪』

- ・Netflix『監視資本主義: デジタル社会がもたらす光と影』
- ・映画『マトリックス』
- ・“Atomic Power: Difficulty in Estimating Cancer Risks” from *Discovery, Innovation, and Risk: Case Studies in Science and Technology*.²⁾
- ・“From Climate Change and Geoengineering to Questioning ‘Nature’ and Thinking in and about the Anthropocene” from *Introduction to Philosophy of Technology*.³⁾

学期の後半は、前半で扱った話題やそこで得られた知見に基づき、受講者に SF プロトタイピングに挑戦してもらった。

3. SF プロトタイピングの実践について

近年になり教育やビジネスの分野で SF が注目されている。その顕著な例が企業やものづくりの業界で導入が進む SF プロトタイピングの取り組みである。日本の代表的な実践者の言葉を借りると、SF プロトタイピングとは「サイエンス・フィクション的な発想を元に、まだ実現していないビジョンの試作品=プロトタイプを作ること、他者と未来像を議論・共有するためのメソッド」(宮本 3)⁴⁾である。別の言い方をすれば、「SF を用いて未来を想像し、その未来からバックキャストで「今、これから何をすべきか」を考察する技法」と言える*3。まだ実現していない技術やその技術が社会に与える影響を具体的に想像し、描き出すことで、エンジニアや政策立案者たちは新たなアイデアを視覚化し、そのアイデアが（現状を踏まえたとえで）社会でどのように受け入れられるか、またどのような課題が発生しうるかを事前に検討することが可能になるのだ。

3.1. 何故 SF プロトタイピングなのか？

今回、筆者が SF プロトタイピングに注目した理由は、SF プロトタイピングの取り組みが本校での「モノづくり」あるいは「社会実装」に直結し

き出す、下水道と都市の未来」(<https://www.youtube.com/watch?v=gIPGbodydQ&t=7s>)より。

ているという理由だけではなく, SF プロトタイプ
 ングへの取り組みを通じて, 学生たちの「物語を
 想像/創造する力」さらには「ストーリーテリ
 グ力」を養うことができると考えたからである。

学生は普段, 感想文やレポートを書く機会があ
 っても, いわゆる「創作」の機会はあまりなかつた
 ように思う。そこでぜひとも「創作」に挑戦して
 もらい, できればその「楽しさ」を実感してもら
 いたいという思いがあった。くわえて, 創作, スト
 ーリーテリングへの取り組みは, 学生のプレゼン
 テーション能力の向上にもつながると考えた。

学生のプレゼンテーション能力は(日本語、英
 語いずれにおいても)以前に比べると大分向上し
 ているように見える。卒業研究発表などに参加し
 てみると, 最近の学生は堂々と臆することなく発
 表を行い, 形式や体裁も整っている。しかし, そ
 の一方で, ある種の「物足りなさ」を感じるこ
 ともある。発表は聞き取りやすいし, 形式や体裁
 も整っているのだが, どうも内容が頭に入ってこ
 ない, といったことがある。このような状況を改善
 するのに SF プロトタイプングは有効だと考えて
 いる。生物学者から映画製作者に転身したユニ
 ークな経歴をもつ Randy Olson は, 著書 *Huston, We
 Have a Narrative*⁵⁾の中で, 理系学生, 科学者, エ
 ンジニアは, 自分たちの仕事を魅力的な方法で伝
 えることが苦手で, 時として, 意図せず一般の人々
 との間に断絶を生み出すことがあり, そのような
 状況を避けるためにも, 自分の研究を他者に効果
 的に伝える手段として「ストーリーテリング」を
 取り入れるように呼びかけている。

3.2. SF プロトタイプングの取り組み事例紹介

本講義の受講者のなかには SF に精通している
 学生もいたが, 実際に創作の経験のある学生はい
 なかった。そこで様々な資料を使って SF を題材
 にする意図や SF プロトタイプングの手法を詳し
 く説明した。主な資料は以下のものである。

① 映像資料

- YouTube “How science fiction can help predict the future - Roey Tzezana” (<https://www.youtube.com/watch?v=paXKoZ1pr5w>)

/ watch?v=paXKoZ1pr5w)

- YouTube 「SF プロトタイプングで描き出す, 下水道と都市の未来 (<https://www.youtube.com/watch?v=gIPGbodxydQ&t=7s>)

② その他

- 雑誌『Wired』(特集: ナラティブと実装) Vol. 34 (コンデナスト・ジャパン, プレジデント社, 2019年)
- NHK スペシャル「Next World」制作班編著 『Next World—未来を生きるためのハンドブック』(NHK 出版, 2015年)

SF プロトタイプングの手法を詳しく説明する
 際, 「SF プロトタイプングで描き出す, 下水道と
 都市の未来」における岡田弘太郎氏の解説を参照
 させてもらった。SF プロトタイプングの意義, 目
 的は「SF 小説のように自由に想像を膨らました未
 来の世界からイノベーションを生み出す」ことで,
 図1にあるように, 最終的には, SF プロトタイ
 ピングによって得られたデザインを現実社会に即し
 た形で実装することがゴールとなる。ただ, 今回
 の授業では, 「STEP1: 仮説」, つまり「問いやテ
 ーマを起点に未来の世界を想像する」, そして
 「STEP2: 科幻(中国語でSFの意味)」, 「サイ
 エンス・フィクションとしてのストーリーを描く」
 ことに取り組んでももらった。

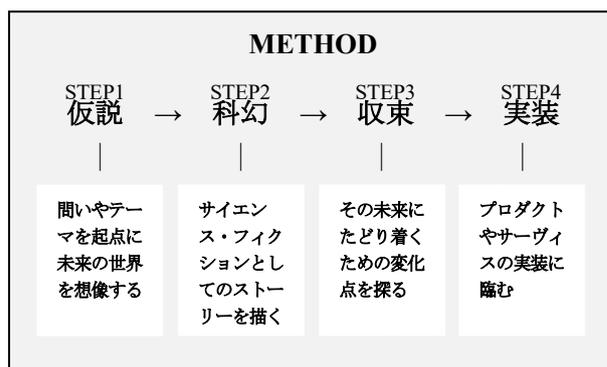


図1 SF プロトタイプングのプロセス*4

「STEP1: 仮説」の段階として, まず「1. 未
 来の世界を自由に想像する」, 続いて「2. その世
 界に存在する課題を想像する」, そして「3. その

都市の未来」より引用。

*4 この図は「SF プロトタイプングで描き出す, 下水道と

課題の解決方法を想像する」。実際に物語を作成するうえで、この「仮説」の段階が非常に重要なので、学期後半の授業では数回にわたりブレインストーミングを行い、そのうちの一回は SF プロトタイピング・ワークショップを実施した*5。事前にある程度は予想していたが、創作にかなり苦戦しそうな学生がいたため、図 2 のようなライティング・フォーマットと筆者が作成した SF プロトタイピングのサンプルを提示したうえで、学生には創作に取り組んでもらった。

▶SF Prototyping Writing Format

>Title: Provide a concise and intriguing title.

(1) Setting/Background: (30-50 words)

Introduce the main character(s) and the setting, including the social background or problems.

(2) Technology Introduction: (60-80 words)

Describe the new technology or gadget that is central to the story.

(3) Impact of the New Technology: (150-200 words)

Explain how the new technology or gadget affects the character(s) or society. Present a dystopian or utopian outcome resulting from this technology or gadget.

(4) Resolution: (30-50 words)

Provide a potential resolution or an unexpected twist to the outcome described above.

図 2 ライティング・フォーマット

ワークショップでは、図 2 のフォーマットを下敷きに、「キャラクターや背景の設定づくり」、「登場するテクノロジー（ガジェット）に関するブレインストーミング」、そして「ストーリービルディング」をワークショップ形式で実施した。

以上の準備を経て、講義の残り 3 週で学生には執筆に取り組んでもらった。作品提出前の最後の授業では、先ほどのフォーマットに従って、各受講者に自分の作品について英語で概要を発表してもらった。最終的に作品を提出する際は、フォーマットに縛られすぎず、展開のある「物語」として

作品を完成させるように学生に伝えた。

提出された作品の評価については、大きく分けて、「内容」と「英語力」の 2 点で評価を行った。内容については、作品の「物語性（展開）」や「独創性」を評価し、「英語力」に関しては、同時に提出してもらった日本語原稿と照らし合わせて、英文の正確さを評価した。なお、学生には機械翻訳の使用は最低限に留めるように事前に伝えてあった。授業で毎回リアクション・ペーパーを提出してもらっていたので、教員は学生の英語力（英語作文力）を把握できており、そのことを踏まえて学生には「リアクション・ペーパーの英語と提出された作品の英語との間に大きな乖離がある場合は減点対象となります」と伝えておいた。そのため、機械翻訳に係る問題は生じなかった。

4. まとめ

本稿では本科 5 年生対象の選択科目 Comprehensive English II における「SF 未来リテラシー教育」の実践を紹介してきた。本講義では、技術者倫理や未来社会に関する多様なトピックを取り上げ、学生の未来リテラシーの涵養を図る一方、後半の SF プロトタイピング活動では、未来を構想する力を養いながら、実社会での課題解決に向けた思考法を、物語創作の方法を通して身につけてもらった。

一部の学生は創作活動で非常に苦勞し、キャラクター設定に行き詰まり、十分に深掘りできないケースや物語の大筋はできていても細かい設定を詰めることができないケースが見受けられた。こういった問題に対しては、受講者数に応じて、可能なら 3～4 名ほどのグループを作り、協働で課題に取り組んでもらうことでスムーズに創作を進められたかもしれない*6。

一方、本講義には SF や創作には関心があるものの、英語がものすごく苦手だという学生も参加していた。当初は授業について来られるか心配していたが、その心配は無用だった。というのも、英語が苦手でも、SF や創作に関心のある学生は、かえって熱心に授業に取り組み、結果として大変興味深い、独創的な作品を書き上げてくれたからで

*5 ワorkshopは廣池が担当。

*6 グループ（協働作業）での SF プロトタイピングの取

り組みについては、藤「近未来フィクションの協働制作—はじめのプロジェクト学習」⁶⁾が参考になる。

ある。この学生は授業アンケートで「(SF の創作に) 時間はかかったけれど、自分で考えて書いた英文がちゃんと相手に伝わると嬉しい、という実感を得ることができました。5年間の中で一番印象に残った授業だと思います。」と意見を寄せており、SF という高専生に受け入れられやすいトピックを授業に取り入れたことで、英語が苦手な学生にも学びやすい環境を提供できたようだ*7。今回の SF 未来リテラシー教育の実践を通じて、SF と英語教育の融合が高専の技術教育において一定の有効性を持つことが示されたと考えている。

謝辞

Comprehensive English IIの授業に参加し、アンケート調査に協力してくれた受講者の皆さんに心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) <https://futuresliteracy.net/>
- 2) Coecklbergh, Mark. *Introduction to Philosophy of Technology*. Oxford UP, 2020.
- 3) Copp, Newton H and Andrew W. Zanella. *Discovery, Innovation and Risk: Case Studies in Science and Technology*. The MIT P, 1993.
- 4) 宮本道人 (監修, 編著), 難波優輝, 大澤博隆 (編著): SF プロトタイプینگ—SF からイノベーションを生み出す新戦略, 早川書房, 2021 年.
- 5) Olson, Randy. *Huston, We Have a Narrative*. The U of Chicago P, 2015.
- 6) 蕨知英: 近未来フィクションの協働制作—はじめのプロジェクト学習, 英語教育, Vol.73, No.3, 大修館書店, 2024 年.

(2024年12月12日 受理)

付録 1

「受講者の声」(授業アンケートより)

- WEB 課題 (Podcast の聴取) を通してリアルな英語を聞くという機会が得られた。
- 普段しないような観点から、技術の利便性や危険性について考えることができた。

- 人数が少なかったから集中して取り組めた。
- 自分の意見を沢山考えられて楽しかった。普段の授業では知識を頭に入れるのみで自分の意見や発想を出す機会は少なかったが、自分の言葉で思ったことを伝えることができ、一番授業の内容が頭に残っている。
- 英語で話す時間をもう少し増やしてほしい。

付録 2

「低学年の英語の必修授業での SF 活用—本科 1 年生 Grammar & Writing I(担当: 向山)での事例」

概要

Grammar & Writing Iの授業で英作文課題として次のような形で取り入れた。

「授業で学んだ〈助動詞 / 言い換え表現〉をできる限り多く使い以下のテーマに沿って英作文して下さい: まだ実用化されていない未知のテクノロジーを開発してください。SF 的な荒唐無稽なものでもよいですし、現実的なものでもよいです。「○○という問題を解決するためにXXという技術を開発した。しかしそれが暴走して—/悪者の手に落ち—、意図せざる結果を生み出してしまった」というのが骨子になります。暴走したら/悪用されたらどんなことがおきるか、人類に何をもたらすかなど、自由に書いてください。爆発オチ・夢オチは禁止します」という指示を与え、自由にまとめた物語を書かせた。

「狙い」など

• フィクションというフレームワークを通して、ありがちなお仕着せのテーマ英作文ではなく、自分で考えた面白い世界に言葉でカタチを与えたい、そしてそれを誰かに読んで欲しいという気持ちを刺激することが狙いとなっている。これには、生成 AI 使用の防止の意味もある。単に使用禁止とするのではなく、学生本人に「書きたい」という意志を生むのが狙いである。

• 「新しい技術を想像/創造する」だけではなく「もし暴走したら/悪用されたら」と物語を反転させる理由は、一つには技術には良い側面だけがあるわけではないという技術者倫理に目を向けさせるこ

*7 その他の意見については付録 1 を参照されたい。

とと、もう一つにはクリエイティブ・ライティング的な要素として「予想外」を取り込むことで物語を自分の想像の一步先へと導き、言語使用への欲望をさらに刺激することにある。

・助動詞は、可能性や蓋然性などの濃淡、あるいは、これから起こることに対して話者の心的態度を表現するのに重要な要素である。広い意味で未来をテーマにした作文を書くことを通して、単に訳語を暗記するのではなく、自ら物語を作る過程で各助動詞のニュアンスを主体的に意識させる機会としている。

英文における要約の技法と方略の研究

長橋雅俊*

日本英語検定協会 (2023)¹⁾は、現行学習指導要領 (外国語) の指導目標に準拠するために、実用英語技能検定の問題の改訂を発表した。この改訂の目的は、生徒の思考・判断・表現する力の育成を促進するため、1 級から 2 級の試験に要約問題が新たに導入された。しかし、要約を書く際に学習者はどのような言語能力を求められるのか明らかされていない。本研究では、東京工業高等専門学校の専攻科 1 学年に在籍する 21 名の学生を対象に、要約テストを実施した。また、要約を書く際に学生たちが認識した言語活動やタスク方略についてアンケートを用いて訊き出した。これらの調査を通じ、要約を書く際に求められる技能領域の仕組みについて解明を目指す。

(キーワード: 英文要約, タスク方略, 英語熟達度テスト)

A Study of Techniques and Strategies for Summary Writing in English

Masatoshi NAGAHASHI*

The Eiken Foundation of Japan (2023) announced a partial revision of the Eiken Test to comply with teaching objectives in the current Curriculum Guidelines. Accordingly, summary tasks have been newly introduced in the tests for Grade 1 through to Grade 2. However, it is uncertain what skills are required while writing a summary. Our study administrated a summary test for 21 students enrolled in the Advanced Course of a technical college. Moreover, a questionnaire was conducted to extract their language activities and task strategies they recognized while writing a summary. Through these surveys, we aimed to clarify the skill areas for summary writing.

(Keywords: summary writing in English, task strategies, English proficiency tests)

1. 研究の背景

平成 30 年に告示され、現行で施行されている『高等学校学習指導要領』(文部科学省, 2018)²⁾によると、外国語 (英語コミュニケーションほか) の言語活動に関する事項の中で「必要な情報を読み取り、概要や要点を把握する活動」や「読み取った内容を話したり書いたりして伝え合う活動」の指導が求められている。外国語教育を通じて、概要や要点の理解が推し進められるようになったのは、筆者の調べる限り平成元年に告示 (平成 6 年施行) された『高等学校学習指導要領』(文部省, 1989)³⁾からと認識しているが、ここ 30 年余り、日本の中等教育では概要・要点から生徒に理解させることを課題としてきた。しかしながら、指導目標としての概要・要点の把握を確かめるには、それ自体の定義が難しく、言語テスト論の専門家でも議論の標的となる話題であった。

実際のところ、読んだ文章を確認したい場合、

細部を隅々まで尋ねるより、全体像として話して聞かせる再話 (retelling) や、回想したままに話したり書いたりする再生法 (recall) が、アウトプット指導にも役立てられている (村野井, 2006)⁴⁾。しかし、口頭による応答の評価が難しいことや、取り留めのない語りや筆記が、本質的な理解の証拠として評価することが難しい点も否めない。

情報を整理して再構築できるように指導することは、生徒の表現力を高めることにも繋がり (高梨・卯城, 2000)⁵⁾、近年の新学習指導要領で学びの改善すべき課題として掲げられている、「思考・判断・表現」の評価を実現する足掛かりとなるだろう。いわゆる「まとめる力」に取り組む要約は、今や注目すべき教育活動の 1 つとなっている。

1.1. 英語資格試験への波及

国内で多くの学生・生徒や社会人が受験する語学検定試験に、実用英語検定 (以下、英検) が挙

* 一般教育科

げられるが、かつて文部省令の認定を受けた当時から現在に至るまで、多くの高等学校や大学などの入学試験や単位認定で利用され、教育機関での影響力は大きい。そうした資格検定の役割を担う形で、日本英語検定協会(2015)⁶⁾は学習指導要領(外国語)の改訂に合わせて出題形式や英語能力の評価観を見直してきたと公表している。

昨今の TOEIC[®]や TOEFL[®]テストと比較すれば時間・分量ともに短いながらも、2004年以降にはすでに1級と準1級で200語ないしは100語程度の作文問題を導入していたが、2016年から翌年2017年には2級から準2級、3級までライティングテストの対象を拡げ、英検の受験人口で7割超と高い比率を占める中学・高校生への影響は大きかった。2024年度のリニューアルは、これら2010年代の改訂に続くライティング技能に注力した出題の変更といえるだろう。

とはいえ、日本英語検定協会では試験内容の改訂を公表するたびに、公式ホームページ上で学習支援教材や過去問・サンプル問題を公開し、ライティングテストの採点方法や注意点にも作文例を交えて詳細な説明に努めてきた。

今回の2024年度から導入される要約問題に至っては、YouTubeチャンネルを開設して、安河内

哲也先生による講義形式の動画によって、新形式問題への対策や勉強法を発信している(日本英語検定協会, 2023)⁷⁾。

1.2. 英検2級における要約問題

安河内先生は自身の予備校講師の経歴や、受験対策の学習参考書など多数の著書で知られている。入学試験に臨む多くの中学・高校生が信頼を寄せる英語指導の専門家であるが、同協会が配信する動画からは、昨今の十代の受験者にとってライティング技法や知識がどこまで浸透しているのか窺い知ることができる。安河内先生による2級の要約問題の解説は、以下の3つポイントにまとめられている。

- 1 文章全体で伝えているメッセージを捉える
- 2 パラグラフ毎の重要なポイントを盛り込む
- 3 具体的表現を抽象的表現にまとめる

時間内の解答作成が要求される試験では、どうしても「書くこと」に意識が先行しがちだが、ポイント1から、パラグラフの内容や要素を満遍なく理解するよう訴えていることが分かる。また、ポイント2でも、英文の各段落で書かれているトピ

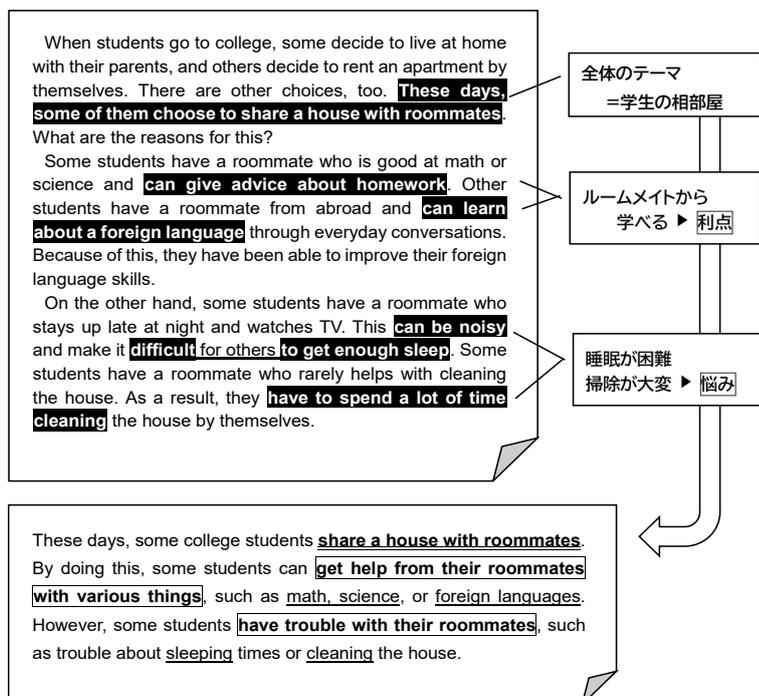


図1 英検2級における要約問題の解答プロセスのイメージ：原文(左上)から統合概念(右上)を抽出して要約文(下)をまとめるためには、原文の中に書かれていない表現を考え出す必要がある。(図中にある日本語の説明と、下線・囲みは、動画からの解説を参考に筆者が補足)

ックを吟味し、全体的な主張へ統合できる思考力の大切さを説いている。最後のポイント3で、安河内先生は「パラフレーズの力」と明言していたが、こうした別の言い回しに置き換える概念が、すでに高校レベルの英作文指導で扱われているのかと、時代的な進展を垣間見る場面である。

上記の解説動画を視聴し、出題された原文から要約文への説明や工程をまとめ、模式図にしたものが前頁の図1である。安河内先生もまた、要点を統合できる表現を出すには、出題文にない語句やセンテンスを考え付く必要があると説いていたとおり、ある種の創造的な言語活動は求められる。出題文の中盤の内容を吟味すれば、たとえば「理数科目が得意なルームメイト」や「海外から来た学生」と読み解き、「利点・助かること」(advantages, helpfulness) といった概念にたどり着くだろう。また終盤のルームメイトによる「騒音」や「部屋の掃除」について読み解き、「問題・トラブル」(problems, troubles) といった英語で瞬時に言い換えるには、相応の発想力が求められる。

2. 本調査の目的

前節で述べたとおり、ライティング課題の1つとして要約には、語彙・文法知識といった言語能力や、読解と作文を統合して遂行するための下位技能が存在する。しかし、外国語として英語を学んでいる日本人 EFL 学習者の多くは、これまでの授業活動や試験で英文を要約した経験は少なく、どうすれば文章の骨子をとらえ、書き手の意図などを的確にまとめられるのか、その指導法もまた明らかではない。そこで、今回の調査では参加者に要約タスクに取り組んでもらい、その作文結果の分析とともに、タスク後のアンケートに寄せられた回答について調べた。

2.1. 調査背景および実施タスク

参加者らは専攻科1学年の英語科科目 Technical Writing を受講し、工学系論文を発表する際に添付する英語の要旨 (abstracts) の推敲を中心に学んでいた。今回の調査より1~2週前に補助タスクとして平易な英文からパラグラフ構造を理解し、原文から3割程度の分量でまとめる要約活動に取り組んだ。参加者として初めて取り組むことから、持ち帰って後日提出する形式の準備タスク (a) を与えた。翌1~2週間後に全員の提出を確認した

のち、Technical Writing の授業時間の一部で20分程度の要約タスク (b) を実施した。上記の段階を経た理由として、未知の英語タスクに対する不安を取り除き、事前練習をはたらきかけることで、参加者が自らのタスク方略を考えてくる機会を与える意図があった。すでに図1で示したとおり、準備タスク (a) は日本英語検定協会 (2023)⁸⁾ が英検の問題リニューアル前年に公表していた出題例 (2級) から、要約タスク (b) は2024年度6月に実施された「第1回 実用英語技能検定」2級⁹⁾ の問題冊子より抜粋した (付録1を参照)。

2.2. 事後アンケート

要約タスク (b) を実施したのち、事後アンケートを用いて参加者の回答を求めた。付録2で示したとおり、まず自由記述の質問 (0番) から開始して、続けて4段階のリッカート尺度で8項目の質問 (1~8番) を PowerPoint スライドを用いて提示した。こうした順序で提示した理由は、先行する質問が後続の回答に影響を与えないためである。なお、後続の質問項目は、作文の量・内容・構造・表現の観点で検討して、質問文を構成した。

3. 結果と考察

3.1. 要約文について

先に検討した解答例の構造を基に、要約の主要素を「導入」(introduction)、そして「論点1」・「論点2」(topics) と定義し、論点から展開する要素を「支持」と「詳細」(supports & details) に分類した。表1は参加者の書いた要約文を精査し、それぞれの要素の表出がみられた人数を示している。

表1 要約タスク (b) の参加者の達成度

	可	部分的に可	不可
Introduction	6	15	0
Topic 1	14	2	5
Support 1	4	12	5
Detail 1	15	3	3
Topic 2	10	4	7
Support 2	6	11	4
Detail 2	11	3	7

注. N=21

表出の達成度に関しては、英語表現として内容が十分に伝わるものを「可」とし、内容の一部が脱落したり、語彙や文法の誤りはあるが意味の伝

わるものを「部分的に可」、そして要素が含まれていなかったり、意味の伝わらない言語的エラーのある表出は「不可」で判定した。

導入の達成数が 6 名と低く判定した理由として“online classes”のみ言及し、従来の授業との対比を反映してない表出を部分的と判定したためである。次の段落以降を読み解けば、たしかに online classes の長短所について展開しているため、強ち間違った要約ともとれない表出だったと基準のきびしさを振り返る。また「通学」(going to the campus) という表現が冗長だったことや、「従来の授業」として traditional や conventional 等に変換する難しさがあり、これらの問題となる対比構造が避けられたと解釈すべきだろう。

一方で、「論点 1」をまとめ上げる表現には大部分の書き手が到達していた。これは原文にも“benefits”が使われていたことが関係しているようで、最も多い 6 名が転用していた。他の語彙には“advantage(s)”と“helpful”が 3 名ずつ確認され、あえて原文の表現から言い換えを試みたと思われる。「論点 2」に関しても“problem(s)”の使用が 8 名と最も多く、次いで“bad (points)” (3 名)、“trouble” (2 名)、“difficult/difficulty” (2 名) の使用が観測されたが、これらの一部には文法・構文誤りによって「部分的に可」と判定したものも含まれた。つまり複数の内容を統合する際、書き手の多くは原文にはないセンテンスを生成する過程で苦心があったと思われる。

複数の内容を要約文に収める難しさとしては、「支持 1」では「時間の節約」と「理解度 (の改善)」を内容も同様に、いずれか一方を脱落させた表出が多くみられた。「支持 2」も達成度は前者とほぼ同程度であったが、「コンピュータ (の不調)」や「さびしさ」といった内容を省くケースは少なかった。ただし、終盤で残りの時間と語数が限られる状況の中、その多くが不完全な表出に終わったと推察される。

なお「詳細」を要約に残すか否かについて、当初の見解ではさほど重要ではないとみなし、語数が足りなければ随意的に書き加える余地として捉えていた。結果として、回収した要約作文からは半数以上で言及され、筆者の予想に反して参加者は気に留めていたようである。従来まで日本人の英語学習や読解法には、小さな単位から大きな単位へ理解を進める局所的戦略 (local strategy) が根強く、細部から大枠の順に理解する読み手が多いといわれてきた。こうした読解プロセスで段落末尾の情報が強く認知されていた可能性も考えられる。

3.2. 事後アンケート：質問 (1) ～ (8)

要約タスク (b) の直後に実施した事後アンケートに関しては、質問 (1) から (8) の回答状況から報告する。図 2 で示したとおり、参加者は問いに対する自らの考えや意見に近いものを 4 段階尺度の中から選択した。

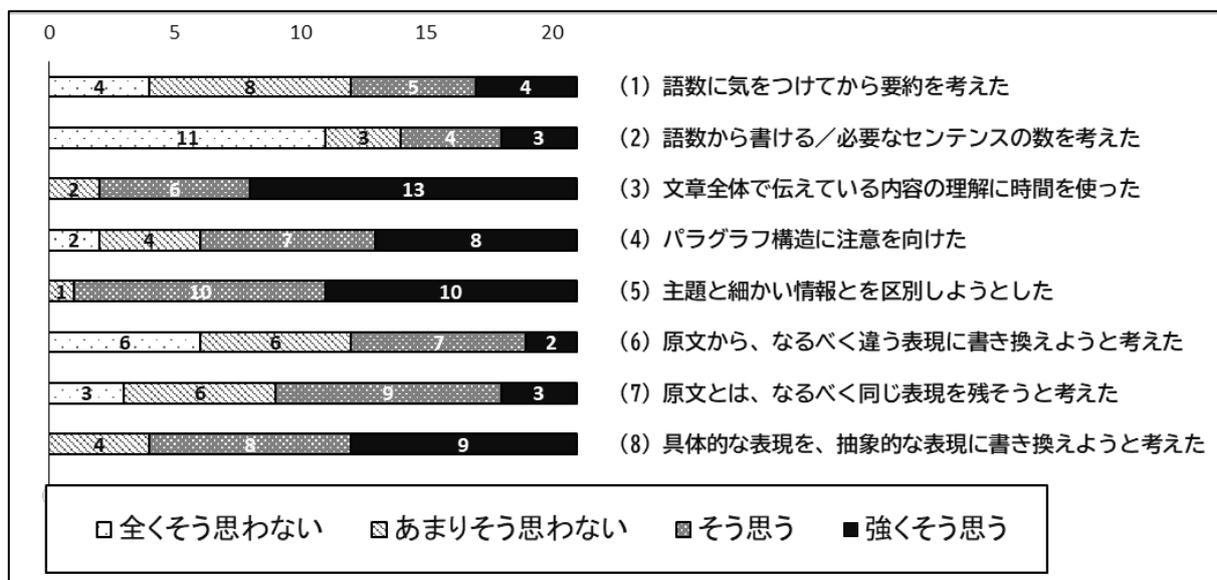


図 2 事後アンケート質問 (1) ～ (8) の回答状況

段階ごとに帯グラフを濃淡で塗り分けたとおり、同意する者が多い項目ほど、右方向からの濃色が大部分を占め、同意する者の少ない項目は左方向からの淡色で示した部分が大きくなる。回答状況を概観すると、濃色で示した肯定寄りの回答（そう思う・強くそう思う）が多いほど、参加者はそうした方略で要約タスク (b) に取り組む傾向が強かったと考えられる。延べ 21 名の参加者だったことを踏まえ、過半数の 12 名以上がどちらの方向性で答えたかに注目し、要約の過程でどういった言語特徴に注意を払ったのか考察していきたい。

まず、質問 (1) の語数や (2) のセンテンス数に関する問いからは、タスクで要求される言語産出量を見積もってから作文を計画したか否かを確かめた。本調査で使用した要約問題のいずれにも、指示文の中で「語数の目安は 45～55 語です」と明示していたが、質問 1 からの肯定的な回答はむしろ少なかった（質問 1=9 名）。理由として、まずは推敲してみなければ語数を予測することができないことが考えられる。自由記述の中には、先述の「日本語にまとめてから英語にする」といった回答や、「簡単に表現できないかを考える」ことや「別のもの[表現]を置き換える」必要が念頭にあったと窺える。また、要約文の解答用紙を参照したところ、枠外に数字の走り書きが確認されたことから、作文の途中で語数を調整したと考えられる。これらの状況から考えると、質問 (2) のようにセンテンス数までを見積もって計画することは難しいだろう。参加者自身が書いている英語表現によほど注意を向けなくてはならないことを考えれば当然だが、肯定的な回答は 3 分の 1 と少なかった（質問 2=7 名）。

質問 (3) の回答状況については、安河内先生の実践ポイントに大多数が賛同する結果となった。今回の参加者も要約には原文の内容をよく理解することが大切と捉え、たとえ時間制限下のタスクでも、ほぼ全員が読解に時間を費やす必要性を認めていた。内容の重要度を吟味するには、英文パラグラフの知識が助けとなるケースが多く、質問 (4) と (5) でそうした構造に意識していたかを確かめた。大多数はパラグラフ構造から効率よく情報の重要度を仕分けていた様子だが、質問 (4) で 6 名、質問 (5) で 2 名と少数の否定派もみられた。英文を読んでみるまでは、その通りに順序立てて書いてあるか疑念の残る少数派もいたようである。

質問 (6) と (7) は対照的な問いではあるが、参加者たちが要約文を書くにあたり、原文の表現を保持するか改変するか判断の一貫性を調べるために用いた。全体の傾向として、質問 (6) では否定派が 12 名とわずかに多く、質問 (7) では一部の回答が中間寄りの尺度に動きながらも肯定派は依然として 12 名だった。この結果を考察するにあたり、英文の要約には表現力の幅広さを評価する一面もあって考えていたが、参加者の半数以上が原文の表現を残そうと意識していたことは意外だった。一方で、質問 (8) に対しては 4 名を除く大多数が表現の書き換えに賛同し、内容を統合する手段の 1 つとして、意味範囲の広い語彙を選択する技法を認めていることが分かった。

3.3. 事後アンケート：自由記述より

前述の段階尺度による質問に先んじて、事後アンケートでは自由記述式で英文要約に関する意見

表 2 自由記述による方略分析 (要約プロセスにおける行為の抽出)

対象(目的語とみなした語)	行為・認知的活動	回答人数
いらぬ情報, 説明, 不要な修飾語, 具体例	捨てる・省く・減らす	6
一番言いたい部分, 簡単なもの(に), 調整(で)	言い換える	5
英文, 内容, 重要な部分,	読む・理解する	4
重要なところ, 要点, ある程度(に), 日本語(に)	統合する・まとめる	4
簡単な語彙, 語数の少ない表現, 類義語	選択する	3
英語(に)	翻訳する・変換する	2
文章構文	簡単にする	1
要点	絞る	1
具体[的な表現/例]	抽象化する	1
必要な語数	予測する	1

注. 対象 (目的語) を対格とみなした語句の格助詞「を」は省略し、与格とデ格のみ表記、[]の中は記述の原文に筆者が推測して加筆。

も求めた。この回答を通じて参加者たちから当該のタスクに必要と考えた知識や技能領域について率直な意見の抽出を試みた。回収した記述回答については、節構造の認められる言語的な命題情報をアイデア・ユニット (idea unit) とみなし、各ユニットから動詞または派生して述部となりうる語 (例:「排除 (する)」,「簡素化 (する)」) に着目し、延べ 39 種類の動詞及び動作関連の語彙リストにまとめた。前頁の表 2 は自由記述として書かれた回答に基づき、参加者が要約に取り組む上で必要と考えたタスク方略および技能的側面をまとめたものである。先述の語彙リストから重複または類似した語義を合わせ、要約に関わる行為および認知的な活動としてまとめたところ、表 2 の中央列に示した 10 種類へと収束した。

回答の重複した人数に基づいて考察すると、やはり要約には「省く」・「減らす」といった記述が多く、いかに語数を減らし、英文を短くするかを念頭に置き、取り組んでいたことが窺える。こうした削る作業に次いで多かった行為には「言い換える」と答えた参加者が多かった。これらの回答は、すでに言及した質問 (6) 及び (7) と相反するように思えたが、左列の「対象」に注目すると英文の様々な部分に分かれてパラフレーズの必要性を回答していることが分かる。以上のことを勘案すると、今回の書き手の多くは重要な部分で原文の表現を尊重する傾向が強く、それ以外の周辺的な内容を省略したり、他の部分と一緒にまとめて表現した方がよいと判断したと思われる。とはいえ、前節の作文結果を再考すると、簡単な語彙や構文を選んだり、少ない語数の表現を選ぶことは意識してはいたが、実行までには至らない冗長な表現も散見されていた。時間の限られるタスク条件下で的確に代替表現を思い付くことは難しく、語彙知識の単なる暗記だけではなく、複数の事象から共通点や包括的な概念を言語化できるアウトプット活動が上達の糸口となるかもしれない。

その他の発見として、回答人数は 2 名とけっして多くはないが、翻訳ストラテジーを選択した書き手が複数観測されていたことは特筆すべき点かもしれない。回答者の 1 名からは、たしかに解答用紙の枠外に日本語で下書きの作文をした痕跡が確認されたが、先行研究では極めて初期の日本人 EFL 学習者に特有の作文プロセスと指摘され、推奨されない方略として長らく論じられてきた。その理由として、母語の介入によって英語の論述法

が損なわれることや、時間制限下では特に 2 言語で文章を再生成する非効率な点が挙げられる。しかしながら参加者には未経験で不慣れだった英文の要約に取り組む中で、原文にはない統合的な概念を模索し、懸命な言語化を試みた証拠ともいえるだろう。以上の調査を通じて、初級から中級レベルの日本人 EFL 学習者が英語で要約する場合、どのようなプロセスをたどっていくのか観測し、貴重かつ興味深い創造的活動に立ち会うことができたと振り返る。

4. まとめ

東京工業高等専門学校の専攻科生に限らず、本科で学ぶ学生にとっても、文章の要約はエンジニアとしての実務及び研究活動で大切となる言語活動であろう。先行研究の本質を把握したり、成果や残された課題を整理していく上で技能的な支えとなる。本稿の執筆において、英検の問題形式のリニューアルの時期と重なり、筆者自身にも既存の文章をまとめ、再生成することの難しさを深く考える機会となった。とかく文章を要約するという行為とは、言論を「短く」して「簡単に」することに終始しがちだが、それは筆者自身もたびたび陥る偏った認識であった。ことばの冗長性を顧みて、文章を量的に節約することも技法の 1 つにはあるが、数ある情報や事象の深い理解から着手し、核心を見出すことから要約は洗練されていくことがわかった。そして、その核心を最適手順と言葉選びで伝えられる表現力こそが、今回の取り組みで追い求めていたことではないかと再考する。2024 年度に担当した専攻科科目 Technical Writing での指導に限らず、授業で教えること全般、さらには何気ない学生とのやりとりに携わる場面でさえ、理解すること、伝えることの難しさを痛感する日々ではあるが、本研究の一端でも自らの教師力の糧となればと考える。

謝辞

本調査の協力にあたり、専攻科 1 年生 (2024 年度当時) の皆さんには、本紙面にて御礼を申し上げます。

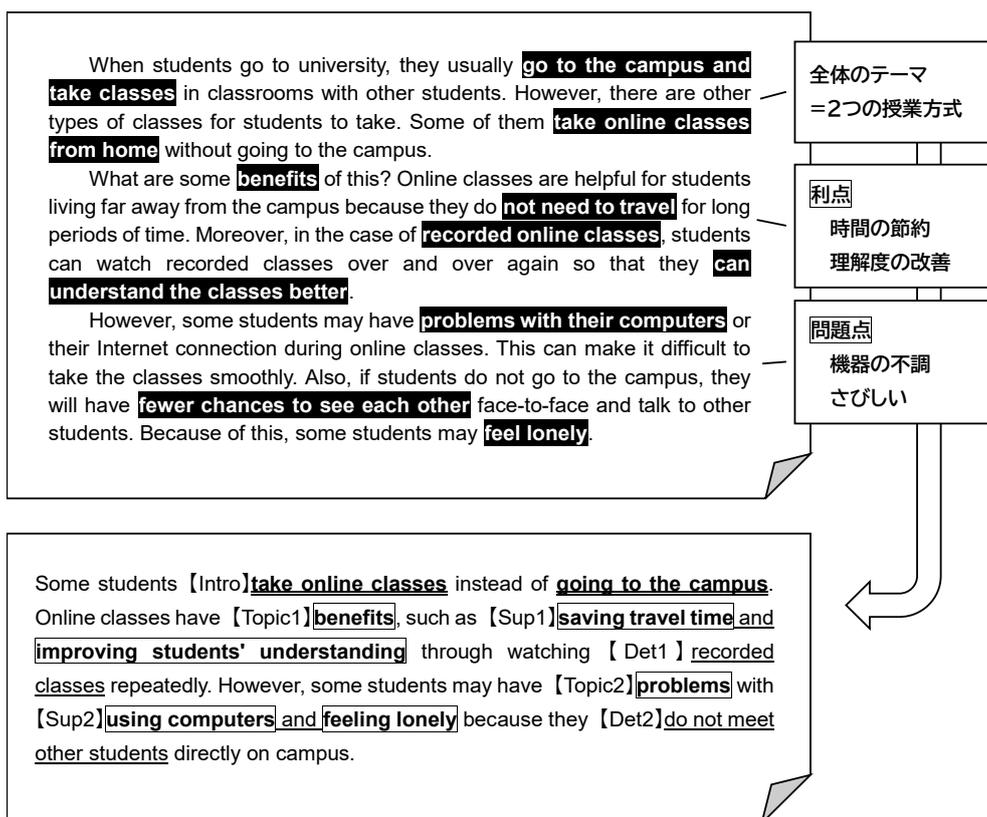
参考文献

- 1) 日本英語検定協会：2024 年度 実用英語技能検定 (英検) 問題形式リニューアル, 2023.
<https://www.eiken.or.jp/eiken/2024renewal/>

- 2) 文部科学省：高等学校学習指導要領（令和4年施行），2018. <https://erid.nier.go.jp/files/COFS/h30h/chap2-8.htm>
 - 3) 文部省：高等学校学習指導要領（平成6年施行），1989. <https://erid.nier.go.jp/files/COFS/h01h/index.htm>
 - 4) 村野井仁：第二言語習得研究から見た効果的な英語学習法・指導法，大修館書店，2006.
 - 5) 高梨庸雄・卯城祐司 編：英語リーディング事典，研究者，2000.
 - 6) 日本英語検定協会：実用英語技能検定「2級」ライティングの導入、4 技能化のお知らせ，2015. https://www.eiken.or.jp/eiken/info/2015/pdf/20150715_pressrelease_writing2.pdf
 - 7) 日本英語検定協会チャンネル：【英検 2024 リニューアル解説動画】英検 2 級の変更点と勉強法（安河内哲也先生），2023. <https://www.youtube.com/watch?v=SBStcLmr2cs&t=385s>
 - 8) 日本英語検定協会：2024 年度（予定）より実用英語技能検定（英検）の問題形式一部リニューアルのお知らせ，2023. https://www.eiken.or.jp/eiken/info/2023/pdf/20230706_info_eiken.pdf
 - 9) 日本英語検定協会：実用英語検定 2024 年度第 1 回検定一次試験（2 級），2024. <https://www.eiken.or.jp/eiken/exam/kakomon/2024-1-1ji-2kyu.pdf>
- （2024年12月12日 受理）

付録1 要約タスク (b) 指示文と解答プロセスのイメージ

- 以下の英文を読んで，その内容を英語で要約し，解答欄に記入しなさい。
- 語数の目安は 45 語～55 語です。



原文となる問題文（上）の白抜き文字（黒塗り）で表記した部分は，各段落で抽出すべき要点を表す。右に示した概念にまとめ，解答例としては要約（下）のような英文を再生成すると想定した。例示した要約文で【Intro】は原文の第1段落「導入」（introduction）の要点，【Topic】は「論点」（topic）の要点を表し，【Sup】及び【Det】はそれぞれ「支持」（support）・「詳細」（detail）の要点を表す。

付録 2 事後アンケート

質問(自由記述式)

- (0) 今回の要約タスクを上手にこなすには, どんな方法(ストラテジー)や技能(スキル)が求められると思いますか?

質問(段階尺度式)

	まったく そう思わない				強く そう思う			
(1) 語数に気をつけてから, 要約を考えた。	1	-	2	-	3	-	4	
(2) 語数から書ける/必要なセンテンスの数を考えた。	1	-	2	-	3	-	4	
(3) 文章全体で伝えている内容の理解に時間を使った。	1	-	2	-	3	-	4	
(4) パラグラフ構造に注意を向けた。	1	-	2	-	3	-	4	
(5) 主題(メインアイデア)と, 細かい情報とを区別しようとした。	1	-	2	-	3	-	4	
(6) 原文から, なるべく違う表現に書き換えようと考えた。	1	-	2	-	3	-	4	
(7) 原文とは, なるべく同じ表現を残そうと考えた。	1	-	2	-	3	-	4	
(8) 具体的な表現を, 抽象的な表現に書き換えようと考えた。	1	-	2	-	3	-	4	

南フロリダ大学と高専生の対面交流についての実践報告

廣池桜子*, 八田直紀*, 横溝仁*

令和 6 年度, 東京高専では「グローバルエンジニア育成事業」の一環として, 米国フロリダ州の南フロリダ大学 (USF) との国際交流を実施した。本稿では, 交流準備, 活動内容 (ゲームや文化紹介, ドッジボール大会など), 及び事後アンケート結果を通じて得られた知見について報告する。事後アンケートから, 参加者は交流を通じて, 英語学習への意欲や海外への興味が向上したことが確認された。

(キーワード: 英語教育, 国際交流)

Report on In-Person Exchange between Students of the University of South Florida and NITTC Students

Sakurako HIROIKE*, Naoki HATTA*, Hitoshi YOKOMIZO*

We carried out an international exchange program with the University of South Florida (USF) as part of the “Global Engineer Development Program.” The program included activities such as games, cultural introductions, and a dodgeball tournament, fostering cultural exchange and collaboration. Post-exchange surveys revealed that participants enhanced their motivation to learn English and developed a greater interest in global experiences.

(Keywords: English Education, International Exchange)

1. 導入

1.1. 概要

グローバルに活躍できる技術者を育成するため, 国立高等専門学校機構は令和元年度より, 基礎力養成プログラム及び高度育成プログラムから成る「グローバルエンジニア育成事業 (以下, 「GE 育成事業」と略す。))」を開始した。GE 育成事業の一環として, 東京高専では, 令和 5 年度より, 米国フロリダ州の南フロリダ大学 (University of South Florida, 以下, 「USF」と略す。)と対面での国際交流を行っている。本稿では, 令和 6 年度の交流についての実践報告を行う。

1.2. 交流開始の背景

USF 日本語プログラムでは, 令和 5 年度より, コロナ禍により中止していた日本への研修旅行を再開することになった。それに伴い, 同校の日本語プログラムの主任教員より, 本校の訪問と, 本校学生との対面交流の実施についての打診があった。交流初年度である令和 5 年度の交流の実現に先立ち, 令和 4 年度中にオンラインミーティングを実施し, 交流プログラムの具体的な計画を立て

た。内容としては, 高尾山でのハイキングをしながら, 東京高専の学生と USF の学生による日米の混成チームでクイズに挑戦し, 課題をクリアする, スカベンジャーハントを予定していた。しかし, 当日は雨天のため急遽校内レクリエーションに変更した。交流後, USF 側より, 翌年の交流は登山ではなく, 校内レクリエーションを通じた交流を行いたいとの要望を受け, 令和 6 年度の交流も校内レクリエーションを行うことになった。令和 6 年度は, USF 一行の東京での滞在期間のうち, 東京高専の授業日を避け, 6 月 1 日 (土) に行うことになった。

1.3. 目的

国立高等専門学校機構は, 高専生のコミュニケーション力の涵養, グローバル環境下で専門知識・スキルを活用し, 協働して課題解決に取り組むことができる人財としてのグローバルエンジニアを養成し, 産業界の人材ニーズに的確に応え, 社会に広く寄与することを GE 育成事業の目的としている。この事業の一環として交流を実施するにあたり, 参加した学生が以下を達成することを目的

*一般教育科

に交流を計画した。

- ・ USF の学生と英語、日本語を使って交流する
- ・ 英語学習への動機づけを高める
- ・ 海外に行くこと、海外への興味を高める契機とする
- ・ 英語でコミュニケーションを取ることを楽しさを実感する

1.4. 参加学生について

東京高専の学生全員が参加している「Go Global!Tokyo Kosen」というチームで、東京高専からの参加者を募集し、参加希望者は、所定の応募フォームを提出することとした。また、応募フォームへのリンクを載せた QR コード付きのポスターを作成し、本科 1 年生から 4 年生までの教室に掲示した。21 名からの申し込みがあり、当日は本科 1 年生から専攻科 2 年生の学生 15 名が参加した。参加者のうち、2 年生以上の本科生の所属学科は、機械工学、電子工学、情報工学、物質工学であった。専攻科生は、電気電子工学、機械情報システム工学、物質工学を専攻する学生が参加した。

USF からは、日本旅行研修に参加する 20 名の学生が参加した。学生の中には、USF の初級日本語の授業を履修し、挨拶などの簡単な日本語が話せる参加者が複数名いた。

2. 交流の概要

2.1. 交流の準備

交流ゲーム・アクティビティの時間に、日米の伝統的なゲーム・アクティビティについてお互いに紹介し合うことを踏まえ、交流に先立ち、参加予定の学生には、交流相手の学生に紹介する簡単なゲームを考えておくように伝えた。また、教員同伴のもと、参加学生が、交流日の昼休憩の間に提供のお菓子の買い出しを行った。USF の参加者が喜んでくれるような、日本らしいお菓子を買うように伝えた。学生たちは、大福などの和菓子の詰め合わせ、おせんべい、知育菓子などを中心にお菓子を選んでいった。

2.2. 交流の内容

交流は以下のスケジュールで行った。

10:15 東京高専 第一体育館集合：オープニング

10:30-12:00 交流ゲーム・レクリエーション

12:00-23:15 昼休憩

13:15-14:45 交流ゲーム・レクリエーション

15:00-16:30 ドッジボール大会：終了後、解散

次に、交流ゲーム・レクリエーションで行った内容を詳述する。以下、「あっち向いてホイ」から「なんでもバスケット」までは英語教員が英語で指示を行い、参加学生の代表者がデモンストレーションを行った。「プロジェクトアドベンチャー系ゲーム」については体育教員主導により実施され、英語と日本語を用いて、簡単な身体活動を含むアクティビティを行った。「日米のゲーム紹介」以降は代表学生が指揮をとった。

2.2.1. あっち向いてホイ

アイスブレイクも兼ねて、この活動で交流を開始した。まず、日本の「じゃんけん」のルール、「あっち向いてホイ」の掛け声と意味、ルールを紹介した。一回の試合につき、3 回勝負とし、勝ち抜いた参加者がフィールドに残り、次の相手を探して、最後の 1 人が勝ち抜くまで活動を続けた。単純な活動であるが、大いに盛り上がり、決勝戦では、日米の学生みんなで声を合わせて掛け声を出して応援する姿が見られた。

2.2.2. 共通点探し

次に、日米の学生でペアを作り、共通点を見つけるアクティビティを行った。学生にはワークシートと鉛筆を渡し、お互いに好きなものを尋ね合い、共通点を見つけたらワークシートに記入するように指示した。共通点の一つ見つけたら、新たな相手を探し、できるだけ多くの相手と話して共通点を見つけるように伝えた。英語教員がインストラクションを与えた後、日米の学生を 1 人ずつ前を出してデモンストレーションを行った。同世代の学生同士、好きな「ゲーム」や「アニメ」等の話題で共通点を見つけ、盛り上がる様子が見られた。

2.2.3. 他己紹介

次に行った「他己紹介」は、日米の学生 1 人ずつのペア 2 組、合計 4 名で実施する活動である。まず、全員を日米学生それぞれ 1 人ずつの 2 人 1 組にわけ、ペアで行動するように指示する。別の

ペアを見つけ、ペア同士が互いに向かいあったら、最初に質問するペアの学生が、相手のペアの学生のうち1人に好きな色や好きな食べ物などについて、質問をする。質問を受けたペアのうち、答えるのは質問を受けた本人ではなく、その一緒にペアを組んでいる学生である。交流日に初めて顔を合わせた学生同士であるため、お互いのことはほとんど何も知らないはずであるが、ペアを組むまでに交わしたわずかなやり取りや服装、雰囲気などから、質問を受けた学生の趣味嗜好を想像して、本人に代わって質問に答えるという形式である。その後、質問を受けた本人による「答え合わせ」が行われる。これを繰り返して、4人全員の「他己紹介」が終わったら、新しいペアを見つけて、また4人で同様の活動を行うこととした。このアクティビティは昨年度、デモンストレーションを挟まずに教員の指示だけで行ったところ、質問を受けた学生本人が回答することが複数回あった。昨年度の経験を踏まえ、今回はデモンストレーションを行って、学生がルールを理解したことを確認してからアクティビティに移った。このアクティビティの目的は質問に対する正しい答えを出すことではないが、ペアの学生について質問された内容を正しく推測できた時も、推測と答えが正反対だった場合も、大きく盛り上がっていた。

2.2.4. お互いの言語の紹介

次に行ったこのアクティビティでは、日米の学生でペアを作り、東京高専の学生は日本語、USFの学生は英語のフレーズや挨拶をお互いに教え合い、活動の最後に、学んだ言葉を発表してもらった。この活動では、お互いの発音を真似したり、スペルを教え合いながら、和気あいあいと学ぶ様子が見られた。日米の学生どちらにも人気があったのは若者言葉やスラングであった。学校の教材で扱わないような、生きた語彙や表現をネイティブスピーカーから学ぶ機会は、学生の言語学習において有益なものであったと考える。

2.2.5. なんでもバスケット

学生同士が打ち解けてきたところで、この活動を行った。体育館に大きな輪を描く形で人数分より一つ少ない数の椅子を用意し、輪の中心に立った代表の学生が指定した条件（例：メガネをかけ

ている人、黒い服を着ている人）に当てはまる人が立ち上がって、別の席を移動するゲームである。

今回の交流は、この活動を行うために体育館を使用したと言っても過言ではない。参加学生が笑顔で楽しむ様子が見られた一方、反省点としては、USFの学生が輪の中心に立った場合、ゲームに熱中するあまり早口になってしまい、東京高専の学生が聞き取れない場面が何度か見られた。今後の交流では、事前の注意を徹底する他、ゲームを行う前に使われうる表現をいくつか予習する必要があると感じる。

2.2.6. プロジェクトアドベンチャー系ゲーム

この後に予定されているアクティビティが運動量の高いものであったため、準備運動も兼ねて、プロジェクトアドベンチャー（以下、「PA」と略す。）系のゲームをいくつか実施した。PAとは、冒険教育（危険やストレスを感じる難易度の高い活動に協同的に挑戦する教育）¹⁾を手軽に教育現場に取り入れるために考案されたものであり、新入生オリエンテーションなどにも活用されるものである²⁾。

今回は、諸澄³⁾を参考に、対人コミュニケーションを積極的に促すことを意図し、フラフープを用いたりレー競争や、チームで力を合わせて取り組むゲームなどをいくつか実施した。スポーツや体を動かすことに苦手意識をもつ学生もいたかもしれないが、全体を通して学生には笑顔がみられ、競争という要素もあることから、より盛り上がりを見せた場面もあった。他のアクティビティと比較し、言語のみを用いたコミュニケーションの機会は少なかったと思われるが、たとえ言語が苦手な学生がいたとしても、参加者全員で楽しい時間を共有できうるという点が、今回のような多文化交流にスポーツやPAの手法を活用する意義であろう。

2.2.7. 日米のゲーム紹介

昼食休憩後、東京高専の学生が、日本の遊びを説明し、実際にUSFの学生と行うことになった。昼休みの間に「氷おに」と「色おに」を紹介することで意見が固まり、東京高専の代表学生数名が指揮をとり、デモンストレーションを行ってルールを説明した。どちらのゲームにも参加学生は熱

心に取り組み、笑いの絶えない時間となった。特に「色おに」使われる“red”や“blue”などの色を表す語彙は東京高専の学生もよく知っており、USF の学生が「おに」になった場合も、発話を理解して、指定された色を体育館内で見つける様子が見られた。「なんでもバスケット」で学生がネイティブスピーカーの発話の理解に苦労していたことを先に反省点としてあげたが、言語での交流を主な目的としないゲーム活動においては、単純な語彙の使用で成立するゲームの方が、英語の苦手な学生にとっては取り組みやすいのかもしれない。

続いて、USF の学生の代表者が“Red lights, green lights”のルール説明とデモンストレーションを行った。ルール説明に使われた英語を東京高専の学生が理解していたかは定かではないが、日本でいう「だるまさんが転んだ」に類似したゲームであったため、東京高専の学生は問題なくルールを理解していたようで、積極的に取り組む様子が見られた。日本と米国のいずれのゲームにおいても、活発な言語での交流は少なかったが、日米の学生は熱心に取り組み、笑顔で楽しんでいる様子だった。

2.2.8. ドッジボール大会

最終アクティビティとして、ドッジボール大会を行った。このアクティビティを行うころには疲労を訴える学生がみられたため、ドッジボール大会は自由参加とした。ドッジボールに参加しない学生はコートの外側に座って、言語交流を楽しんでいた。

参加学生した学生は真剣に取り組み、チーム編成やルールを工夫しながら複数試合行っていた。チームスポーツを通じて全員が楽しみながら真剣に取り組み、友情を深めることができたようである。このドッジボール大会の後、流れ解散とした。

3. 事後アンケート

交流後、日米それぞれの学生に対してイベントについてのアンケートを行った。東京高専の学生の回答率は 73.3% (15 名中 11 名)、USF の学生の回答率は 50.0% (20 名中 10 名) であった。以下に、それぞれの学生グループに対するアンケートの内容と回答を詳述する。

3.1. 東京高専の学生を対象とするアンケート内容

1.3 に先述した本交流の目的の達成度を図るため、東京高専の学生を対象に、以下の内容について尋ねるアンケートを実施した。

1. 最も USF の学生と交流できたアクティビティ
2. 最も楽しかったアクティビティ
3. イベントを通じて、USF の学生と交流することができたかどうか
4. イベントに参加したことで、英語学習を学ぶことへの意欲が高まったかどうか
5. イベントに参加したことで、海外への興味が高まったかどうか
6. イベントに参加したことで、海外に行くことについて意欲が高まったかどうか
7. イベントを通じて、英語でコミュニケーションを取ることに楽しさを感じることができたかどうか
8. イベントの良かった点
9. 改善してほしい点・今後への要望

3.2. USF の学生を対象とするアンケート内容

USF の学生を対象としたアンケートでは、次年度以降の交流の改善を目指し、以下の内容について尋ねた。

1. イベントへの満足度
2. 高専生と最も交流できた活動
3. 最も楽しめた活動
4. イベントの良かった点
5. 改善してほしい点・今後への要望

3.3. 東京高専の学生に対するアンケートの分析結果

以下では、アンケートのそれぞれの質問についての回答と考察を記す。

「最も USF の学生と交流できたアクティビティ」を選ぶ質問に対し、「共通点探し」が回答者の 45% (11 名中 5 名) の票を集め、最も高い結果となった。次いで、「お互いの言語の紹介」が 18% (2 名)、「米国のゲーム紹介」が 18% (2 名)、「自己紹介」が 9% (1 名)、「日本のゲーム紹介」が 9%

(1名)という回答が得られた。

「共通点探し」はUSFの学生との「共通点」を探すという目標を達成するために、たくさんの質問を聴き、質問に答え、見つかった共通点について話すなど、自然と学生同士の交流が促進されたのだと感じた。

また、「最も楽しかったアクティビティ」を選ぶ質問では、「なんでもバスケット」が45% (11名中5名)の回答を集め、「ドッジボール大会」が18% (2名)、「お互いの言語の紹介」が18% (2名)、「米国のゲーム紹介」が9% (1名)、「他己紹介」が9% (1名)という結果となった。「なんでもバスケット」は前述の通り、東京高専の学生がUSFの学生の発話を聞き取れずに動けない場面が見られたが、活動そのものを楽しみ感じた学生が多かったことは、嬉しい驚きであった。次年度は、楽しさと言語の学習の要素を両立させるため、表現の事前学習などの割合を増やして実施したいと考える。

次に「今回のイベントを通じて、USFの学生と交流することができたか」という質問に対し、91% (11名中10名)が「非常に当てはまる」と回答し9% (1名)が「やや当てはまる」と回答した。この回答から、参加者の学生は全員がUSFの学生と交流することができたことが分かり、「USFの学生と英語、日本語を使って交流する」という本交流の目的の一つは達成されたと言えるだろう。そして「今回のイベントに参加したことで、英語学習への意欲が高まったかどうか」を尋ねる質問には、全員が「非常に当てはまる」と回答した。この回答から、「英語学習への動機づけを高める」という本交流のもう一つの目標も十分に達成されたと言える。

そして、「今回のイベントに参加したことで、海外への興味が高まったか」という質問では、91% (11名中10名)が「非常に当てはまる」と回答し、9% (1名)が「やや当てはまる」と答えた。また、「海外に行くことについて意欲が高まったか」という質問に対しても同様の結果が得られた。多くの学生がイベントを通じて海外に対する興味や意欲を深めたことがわかり、このイベントが「海外に行くこと、海外への興味を高める契機とする」

という本交流の目的の一つも達成されたと言える。

また、「英語でコミュニケーションを取ることの楽しさを感じることはできたか」という質問には、91% (11名中10名)が「非常に当てはまる」と回答し、9% (1名)が「やや当てはまる」と回答した。このことから、「英語でコミュニケーションを取ることの楽しさを実感する」という本交流の目的の一つも、達成されたと言える。

次の質問以降は、次年度以降のイベントを改善するための質問である。

「今回のイベントで、良かったと思う点」についての質問には、多くのポジティブな回答が得られた。その中で、特に注目すべき回答を以下に引用し、それぞれについて考察を加える。

「色々なアクティビティがあり、その中で楽しく交流できたので良かったと思います。また、昼食を一緒に買いに行くことで、さらに交流できました。」このコメントから、昼食の場が学生同士の自然な会話を生むのに役立ったと考えられる。教員がその場にいなかったことも、学生の緊張を解くことの手助けをしたのかもしれない。

また、以下のような意見も寄せられた。「海外の遊びを英語で説明してもらい、みんなで体を動かすというのが盛り上がり楽しかった。改善してほしい点と合わせると、それぞれの国の言葉遊びなどの紹介は、英語を話せ、海外の遊びも知ることができるのでいいと思った。」このコメントから、それぞれの国の言葉遊びを取り入れることが、英語の実践力向上だけでなく、異文化理解をさらに深める可能性があるという改善案も示されており、次年度の導入を検討したい。

また、以下のような意見もあった。

「他己紹介や言語紹介以外に運動系があったこと(が良かった)。言語紹介ほど会話は無いけど運動系のほうがみんな笑顔で楽しくて使う英語も日常会話の英語により近い感じがしました。」

この意見は、海外経験のある学生から得られたものである。体育教員とコラボレーションして、体を動かすアクティビティを取り入れたのは今年度が初めての取り組みであったが、海外で英語を勉強した経験のある学生がそのアクティビティの中でのやりとりを、自然であると感じたのは有益

なフィードバックである。次年度も、言語交流の要素を増やしつつ、導入したいと考える。

続いて、改善点に関する質問についての回答をまとめる。まず、用意したお菓子について、以下のような意見が寄せられた。

「グルテンアレルギーの方がいて、用意してたお菓子を食われていなかったの、もし可能であれば来年からは、グルテンフリーのお菓子を少しでも用意しておくといいのかなと思います。」

昼食時は教員は交流の場に居なかったために、教員はこのことについて認識していなかった。参加者がイベントを楽しめる環境を提供するために、今後は食べ物に関する色々なニーズに対応できる選択肢を用意したい。

次に、今後追加すべきアクティビティについて、以下のような意見があった。

「お互いの学校を簡単に紹介するコーナーを作っても良いかなと思いました。USF の学生さんたちが高専ってどんなところか聞いてきてくれたのと、私もアメリカの大学がどんな感じなのか気になったからです。」

このコメントから、学生には、お互いの学校の仕組みを知りたいというニーズがあることが分かる。次年度以降の交流に取り入れたいと考える。また、広報活動についても課題があることが以下のコメントから明らかになった。

「もっとイベントの知名度が上がってほしいと思いました。私は友達からの誘いでしたが、もっと多くの高専生の目に留まるようにしたいです。」

このコメントは、専攻科生からでた意見であった。ホームルーム教室のある本科 1 年生から 4 年生に対しては、教室内のポスターで周知していたものの、高学年に対する周知が十分でないことが明らかになった。今後は、必修の授業で周知してもらっただけでなく、複数回メールをすることで高学年への周知を図りたいと思う。

3.4. USF の学生を対象とするアンケート内容

以下では、アンケートのそれぞれの質問についての回答と考察を記す。

「イベント全体に満足したか」という質問に対し、回答者の 80% が「非常に満足」と回答し、10% が「満足」、10% が「やや満足」と回答した。この

結果から、参加者の大多数が本プログラムを高く評価していることがわかる。

最も交流できたアクティビティについて尋ねた質問では、「他己紹介」が 30%、「共通点探し」、「ドッジボール」が 20% であった。また、「言語紹介」、「日本のゲーム紹介」、「なんでもバスケット」が 10% の支持を得た。

この項目で最も多くの東京高専の学生の票を集めたのは「共通点探し」であったが、最も多くの USF の学生の票を得たのは「他己紹介」だった。東京高専の学生と USF の学生どちらにとっても交流の機会を提供できるよう、次年度以降は両方のアクティビティを取り入れたいと考える。

次に、最も楽しかったアクティビティについての質問では、「ドッジボール」が 40% の学生から選ばれた。また、「日本のゲーム紹介」が 30%、「他己紹介」と「言語紹介」、「なんでもバスケット」がそれぞれ 10% となった。

「ドッジボール」が大きな支持を得た背景には、学生同士で相談しながらルールを工夫して実施できたことがあると考えられる。

具体的には、日本のルールとアメリカのルールを交互に取り入れて実施していたが、これにより、学生たちは文化の違いを体験しながら楽しむことができた点があると考えられる。

次に、良かった点についての自由記述欄では以下のような意見が寄せられた。

「ゲームをすることで、他の人とより自然に交流しやすくなり、会話もしやすくなる点が良かったです。」

「日本の伝統的なゲームや文化を学ぶのがとても楽しく、米国の類似点を見つけてその違いを比較するのが興味深かったです。」

「自己紹介や共通点を探す活動のように、多くの学生と交流できるアクティビティが特に良かったです。また、昼休みや文化交流の時間も気に入りました。」

このように、ゲームや言語活動を通じた交流は、東京高専の学生、USF の学生どちらにも人気であった。また、昼食時間も日本人同様、アメリカ人学生にとっても好評であったのは、嬉しい驚きであった。

昼休みに東京高専の学生が知育菓子の作り方を説明し、一緒に作っている様子も見られたことか

ら、言語を使ったゲームや体を動かすアクティビティに加え、今後はお菓子作りなどを交流に取り組むことも検討したいと考える。

一方で、いくつかの改善点も挙げられた。

「ゲームの内容を事前に説明しておけば、後のアクティビティの時間を節約できたかもしれません。」

「USFの学生が模擬授業に参加したり、東京高専の学生が進行中のプロジェクトを紹介するような場があれば、良いかも知れません。」

「体育館で多くの運動をする際に水分補給用の水を用意しておくとも良いかも知れません。」

ゲームの説明については、学生の指摘から読み取れるように、少し時間がかかっているように見受けられた。事前にワークショップを行うことや、アメリカ人学生にゲームのリンクを送ること、先述の通り「なんでもバスケット」で使われうる表現を日本人学生に事前に教えること、などの改善点が考えられる。しかしながら、学生同士が試行錯誤しながらもお互いにルールを伝え合い、最終的にゲームのプレーに至る経験は、言語交流の醍醐味であり、学生にとって貴重な成功体験につながると考える。そのため、バランスを考えつつ、事前に一部ルールを伝えることを検討したい。

また、学術的な要素を取り入れることへの期待については、専攻科の授業で行っている、オンライン交流への参加を促すことで応えたい。

4. まとめ

本交流は計画段階から、日米学生が対話を通じて楽しみながら互いの文化や言語に触れられるよう、言語ゲームやレクリエーション色の強いアクティビティを取り入れた。

事後アンケートの結果、参加した東京高専の学生は、英語学習の意欲や海外への興味が向上したと回答した。また、アクティビティに対する満足度は概ね高かったものの、言語を使うアクティビティを増やすことなど、今後の改善点に関する意見も収集できた。

また、令和6年度は英語科教員に加え体育科教員がプログラムの一部を担当したことで、プログラムがより充実したものとなった。この成果を踏まえ、次年度以降は他分野の教員とも連携し、さらなるコラボレーションの可能性を探りたい。たと

えば、物理や化学の教員とともに実験を行ったり、国語の教員を含めて、俳句大会などを行っても面白いかもしれない。このように、異なる教科の教員が持つ専門性を活かすことで、より多彩な内容の交流プログラムの実現が可能になる。本交流を通じて、楽しむことは、英語学習のモチベーションをポジティブに引き上げてくれると感じる。英語に苦手意識がある学生こそ、この交流に参加して、英語でコミュニケーションができることの嬉しさを実感してほしい。次年度以降は広報を徹底し、より多くの学生にこのイベントを知ってもらい、参加してほしいと思う。

参考文献

- 1) 松尾美香，望月雅光，松下佳代：新入生オリエンテーションに組み入れた冒険教育の教育効果—プロジェクトアドベンチャーの実践を通して—，大学教育学会誌 44 巻 2 号，pp.73-83，2022 年 12 月
- 2) 松尾美香：コロナ禍における大学生のための人間関係の構築の支援，リメディアル教育研究 19 巻 1 号，pp.83-96，2024 年 10 月
- 3) 諸澄敏之：みんなの PA 系ゲーム 243，杏林書院，2005 年 11 月

(2024 年 12 月 12 日 受理)

DD モータを用いた電動アシストカートの開発 — 電動アシストユニットのプロトタイプ的设计開発 —

堤博貴*, 島健太郎**

保育園におけるカートの使用は、子どもたちを乗せての移動に不可欠である。しかし、登坂や不整地での操作が難しく、保育士にとって大きな体力的負担となっている。この問題に対処するため、電動アシスト技術の導入が有効であると考えられる。本研究では、DD モータを搭載した電動アシストカートの開発を進めており、これにより保育士の負担の軽減と子どもたちの安全な移動が目指されている。2022 年度には市販の電動アシストユニットの導入を試みたが、操作性に課題があった。そのため、DD モータを使用した新しい電動アシストユニットの開発に取り組み、その実用性を検証した。

(キーワード: DD モータ, 電動アシスト, カート, 課題解決, 保育士)

Development of electrically power-assisted carts using DD motors — Design and development of electric power assist unit prototypes —

Hiroataka TSUTSUMI*, Kentaro SHIMA**

The study addresses challenges faced by childcare workers, predominantly women, in handling heavy loads, emphasizing the need for a safer and more efficient work environment. While electric assist systems are widely used for goods transportation, their application in childcare remains limited. The introduction of Direct Drive (DD) motors, known for their compact size and silent operation, presents an innovative solution. The research aims to develop an electric assist cart, integrating DD motors to enhance compactness and operational efficiency. The study's purpose is to alleviate the physical burden on childcare workers, particularly during uphill movement, addressing concerns raised in previous research. This includes creating a foundational unit with DD motors, ultimately improving the overall working conditions for childcare professionals.

(Keywords: DD motor, Electric assist, Carts, Childcare workers)

1. 序論

1.1. 研究背景

近年、女性の社会進出が進む中、特に保育士という職業においては女性が大多数を占めている。これに伴い、女性の身体的負担を考慮した作業環境の改善が求められている¹⁾。保育士では例えばカートを使用して 100kg の重量物を扱う際、制動操作に影響が出やすくなるため、重量や速度が増すほど危険性が高まる。特に登坂時には、平地に比べてカートの移動により多くの力が必要となり、体力の消耗が激しく、移動範囲に制約が生じる要因となり得ることがある。このような状況は、保育士の日常業務における安全性と効率性を低下させる要因となっており、改善が急務である。

1.2. 電動アシストシステムの技術動向

物流センターや病院などで物品運搬の効率化を図るために電動アシスト台車が導入され、多くの現場で用いられてきたが、近年では株式会社サンワ²⁾などのメーカーが電動アシスト台車や、後付けキットをリリースしているほか、株式会社シロ産業³⁾や太陽建機レンタル株式会社⁴⁾などでは電動アシスト台車のレンタルサービスを行っている事例が見られる。これらの電動アシスト台車は、重量物の運搬を容易にし、作業者の負担を軽減することが主な目的とされている。これまでに車椅子や工業用台車などで電動アシスト化が行われた事例は多々あるが^{5, 6, 7)}、保育園向けの用途で利用された事例はごくわずかである。これは、保育園における物品運搬の効率化と作業者の負担軽減に向けた新たな可能性を示唆している。

* 機械工学科 ** 株式会社 マツダ E&T

1.3. DD モーターについて

DD モーターは、直接駆動 (Direct Drive) 方式の電動機であり、ギアボックスや伝達機構を必要としないため、減速機構を省略できることによる静音化の実現が可能である⁸⁾。また、部品点数の削減によるメンテナンス性の向上が期待できる。その特長は、コンパクトさと低回転時の大きなトルクである。DD モーターは、その特性から電気自動車 (EV) や産業用ロボット、精密機械の製作など、様々な分野で採用されている。電動機に DD モーターを新たに採用した事例として 1999 年にシャープ株式会社が電動機に DD モーターを採用した全自動洗濯機 ES-SE91⁹⁾の開発を成功させた例が挙げられる。さらに電動アシストには DD モーターを採用した事例がなく、採用することで設計工数や部品点数の削減、ダウンサイジング、メンテナンス性の向上が期待できる。DD モーターのこれらの特性は、保育園におけるカートの使用においても大きなメリットをもたらす可能性があり、その採用は革新的な解決策となり得ると考えた。

1.4. 研究目的

このような背景を踏まえ、保育園におけるカートの使用は、保育士の体力的負担を減らし、子どもたちを乗せての安全な移動と効率的化を目的に電動アシストカートの開発が必要と考えられた。2022 年度¹⁰⁾、我々の研究グループは市販の工業台車用電動アシストユニットを既製品の大型カートに組み込むことで、電動アシストカートを製作した。電動アシストカートは実際に現場で使用する保育士による使用評価を受け、乗り心地や速度に関しては肯定的な意見が多かったが、アシスト使用時の速度が遅いと指摘や、アシスト非使用時の操作性に課題がある旨の意見も寄せられた。

2023 年度において更に、保育士の作業負担を軽減するための電動アシストカートを開発することである。この電動アシストカートは、電動アシストユニットに DD モーターを組み込んで、アシスト装置のコンパクト化とともに操作性の向上と速度の問題を解決することを目指した。そのための実現手段としては、DD モーターを搭載した電動アシストの基礎的なユニットを製作し、実用の可能性を探ることである。

2. 電動アシストカートの概要

2.1. 電動アシストカートの外観

図 1 に電動アシストカートの外観を示す。電動アシストユニットは本カートの下部に 1 機、電源装置やマイコンなどはハンドル周りに配置した。DD モーターやドライバからの配線は結束バンドでフレームに結び付ける形で纏められている。電動アシストカートに対して穴あけや切断などの復元不可能な加工は行わない。部品点数においても減速機構を用いた場合に比べて少数化を図っており、実用性とメンテナンス性を考慮した設計となっている。動輪を電動アシストカートの中央に配置している。また、2023 年度製作するカートは公道上での使用を想定していない為、道路交通法による制約を考慮せず設計した。

2.2. DD モーターと駆動システム

アシスト装置には、マイクロテック・ラボラトリー製のマイクロ DD モーター MDH100 シリーズを使用している。この DD モーターの定格トルクは 3Nm であり、荷重 100kgf を負荷している状態で 2



(a) 全体像



(b) ホイール部



(c) ハンドル部

図 1 電動アシストカートの外観

度の傾斜を登る際に必要な出力を賄えるため、採用した。この DD モータは小型さと低回転高トルクの出特性が特徴であり、電動アシストカートのサイズや重量に制約がある中で最適な選択であった。携帯バッテリーから DD モータ制御用の電源を供給しており、可搬性と使いやすさを両立した設計となっている。

2.3. 制御システム

制御システムを図 2 に示す。この電動アシストユニットには、マイコンに Arduino Mega 2560 を採用し、持ち運びできる携帯型バッテリーを電源装置として組み込んでいる。大まかな動作内容として、スイッチが押されたときのみ DD モータが回転し最高速度は時速 4km/h で巡行し、それ以外の場合はアシストが作動しないといったものである。具体的には、レバーを押すと DD モータがオンになり回転する。このシステムは、使用者の操作性を重視して設計されており、イージーな操作で効果的なアシストを提供することを目指している。

この制御システムは大きく分けて、リミットスイッチ、DD モータ、バッテリー、マイコン、ドラ

イバの 5 点で構成されている。バッテリーでは、DD モータ、ドライバ、マイコンの 3 系統の電源を賄っている。動作概要として、リミットスイッチが押されていない状況ではモータロックが作動せず、自由に動かすことが可能である。一方で、リミットスイッチが押されている場合はマイコンからパルスが発せられ、最大 141rpm まで加速する仕組みとしており、制御システムは安全かつシンプルな動作を実現している。

3. 電動アシストユニットの設計

3.1. 設計要件と設計コンセプト

2023 年度製作した電動アシストユニットの外観を図 3 に示す。設計要件を表 1 に示す。本システムの設計要件では、保育士の負担を軽減し、子どもたちの安全な移動を実現することに重点を置いた。また、設計コンセプトとしてユーザーフレンドリーな操作性、耐久性、そしてコスト効率の良さを重視した。DD モータはその大きなトルクによりギアレスで運用できるため、通常必要とされるギアボックスが不要となり、装置の小型化に寄与する。DD モータから車軸に直接取り付けられた車輪は片持ち式である。

表 1 DD モータの仕様

モータ型式	MDH-10018-21B
モータ種別	三相 AC サーボモータ、PM ロータ方式
ロータ磁極数	20 P
供給電圧	DC24~70V (モータドライバ入力)
瞬時最大電流	19 Arms
連続定格電流 (※1)	2.9 Arms
等価誘起電圧定数	109 V(kr/min)
瞬時最大出力	104 W
瞬時最大パワーレート	9.1 kW/sec
線間電機子抵抗 (25℃)	3.3 Ω
線間電機子インダクタンス	8.2×10 ⁻³ H
電機子絶縁抵抗	100MΩ 以上、DC500V
電機子絶縁耐圧	AC500V、1 分間



図 3 電動アシストユニットの外観

3.2. 坂道登坂限界角の理論と計算

坂道で静止する車輪に対し、坂道方向に回そうとする重力トルク $T_g = F_g r$ とモータの静止トルクのつりあいから登坂限界角を算出する。本解析では、車輪にかかる等価質量を $m=100\text{kg}$ 、半径を $r=0.0750\text{m}$ 、モータトルクを $T_m=3.00\text{Nm}$ とする。摩擦は十分大きくタイヤは斜面で滑らないとする。坂の接線方向に働く重力成分は以下で与えられる。

$$F_g = mg \sin \theta \quad (1)$$

DD モータが発生する接線方向の反力は次式で表される。

$$F_m = \frac{T_m}{r} = \frac{3.00}{0.0750} = 40.0\text{N} \quad (2)$$

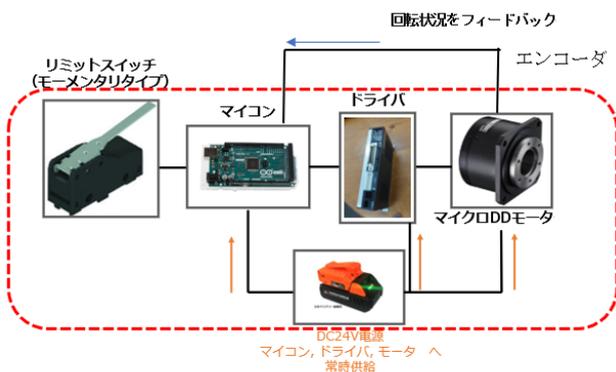


図 2 制御システム

$F_g = F_m$ であるから、力のつりあいより θ は以下で求められる。

$$\sin \theta = \frac{3.00}{100 \times 9.80 \times 0.075} = \frac{3.00}{73.50} \approx 0.0408 \quad (3)$$

$$\theta = \sin^{-1}(0.0408) \approx 2.34^\circ$$

以上より、傾斜角が約 2.34° 以下であれば、モータの静止トルク (3.00 Nm) は重力による回転を打ち消し、車輪は静止を維持できる。これを超えると車輪は坂を下り始める可能性があり、 2.34° が登坂限界角となる。

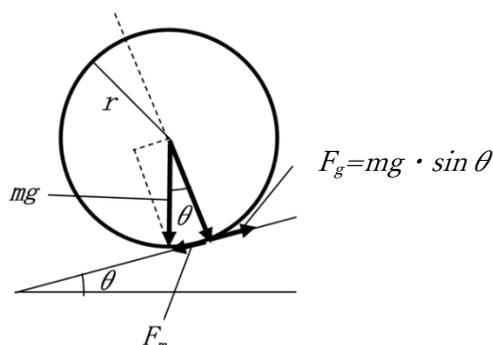


図 4 荷重とトルクの関係モデル

3.3. 継手の強度解析

図 5 には本研究で製作された電動アシストカートのユニットの分解図が示されており、この図において、継手は赤色で強調されている。この継手

表 2 設計要件

- 大型の DD モータを 1 つ用いる
- 手元のスイッチと DD モータの回転の 2 条件で回転が始まる
- 最高速度は時速 4km 以下
- 既製カートに後付し、カート自体に穴あけなどの加工をしない
- 公道以外で使用する
- 電源は充電式で脱着可能できる
- 搭乗スペースには出っ張りなどがない
- 動輪は常に接地できるようにする

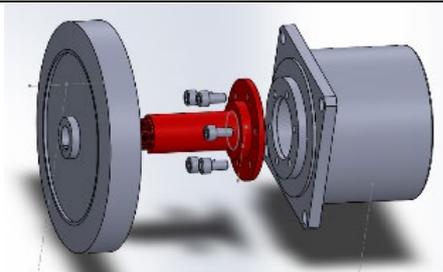
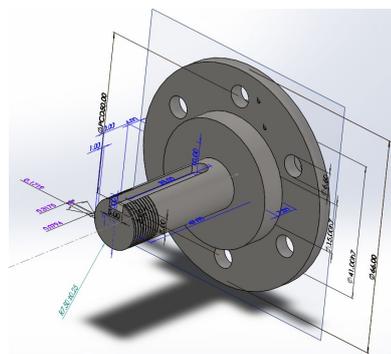


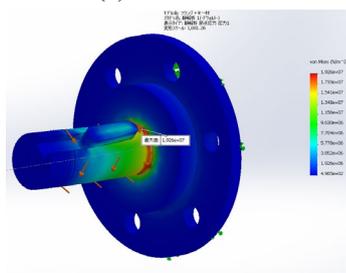
図 5 電動アシストカートのユニットの分解図

は、DD モータからの動力を効果的に車輪へと伝達するために極めて重要な役割を果たしている。具体的には、この継手は 6 本のボルトを用いて DD モータ側の位置に対応する穴に確実に固定される。このような構造は、動力伝達機構全体の構造的な安全性を確保するために不可欠である。

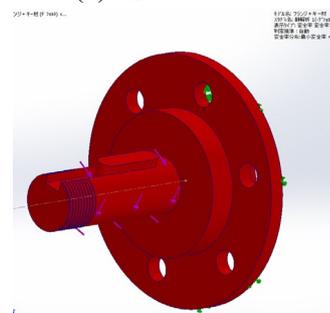
図 6 には、強度解析結果を視覚的に示した。解析条件については、表 2 に記載されており、DD モータの出力の 2 倍のトルクが作用する状況が仮定されて応力解析が行われた。この応力解析により、目標とされた安全率 2 を上回る結果が得られたことから、継手の安全性が確認された。応力解析と安全率の検証という 2 つのアプローチを通じて、作用する応力が降伏応力に対して大幅に小さいこと、そして目標安全率が達成されていることが明らかになった。



(a) 設計モデル



(b) 応力解析結果



(c) 安全解析結果

図 6 フランジ部の解析結果

4. 性能評価試験

4.1. アシスト不使用時における直進時の操作性の定量的評価

この実験は、2022 年度に製作した電動アシストカートの課題点であるアシスト不使用時の操作性について、2023 年度試作した電動アシストカートで改善が達成されているかを検証することを目的としている。



図 7 実地試験の測定区間



(a) 側面



(b) 上面

図 8 実験用カートの外観



図 9 力測定装置の外観

4.1.1. 実験条件と実験方法

測定は屋外かつアスファルトの路面上で行う。

(公道を除く)直進している状況下で測定を行うため、10mの測定区間を設定する。詳細を図7に示す通りである。秒速約1mのペースで電動アシストカートを動かす。この実験を行うにあたって使用する装置を図8, 9に示す。

4.1.2. 実験装置

試験走行中ではフォースゲージ (NEXTECH 製 DFS500) で1点のみを押ししながらアシストを使用しないで測定区間内を走行する。

4.1.3. 測定結果

表3では2022年度と2023年度製作した電動アシストカートの動作荷重の平均値を示す。2022年度に比べて、平均値にしておよそ3Nの動作荷重の軽減を達成した。2023年度製作した電動アシストカートに測定において、1回目と3回目の数値が2回目に比べて低いことが伺える。これは測定で電動アシストカートを押している最中に力が逃げてしまっていたことが原因と考えられる。さらに直進している中でやや左側に流れていくような挙動が確認され、直進安定性に問題があることが判明した。これはタイヤが真っ直ぐな状態ではなく、進行方向からやや右側を向いてしまっており、図10に示すフレームの接続部分の剛性が不足していたことが原因である。

表 3 荷重測定結果

回数	1	2	3	平均荷重 [N]
2022 年度	15.9	15.1	15.1	15.4
2023 年度	11.6	13.4	11.9	12.3



図 10 フレームの接続部分の様子

4.2. アシスト非使用時・旋回性能の定性評価

この実験では電動アシストユニットを装備する前と比べて、操作性が損なわれていないことを確認することを目的としている。検証するに2種類

の実験を行い、それぞれ動輪を外している状態と装着している状態で比較を行った。以下に詳細を示す。

4.2.1. 蛇行走行の様子

図 11 に示す通り測定区間を 10m 設定し、パイロンを 3 本、2.5m 間隔で設置する。そしてその間を蛇行するように走行した。装着前に比べて、僅かであるが外側に引っ張られるような挙動が穏やかになっていた。切り返した際に動輪が地面のギャップと引っかかっているような感覚はなく、非常にスムーズに操作できた。



図 11 蛇行走行の様子

4.2.2. 旋回走行実験

図 12 では、旋回走行実験において、2.5m地点に設置されたパイロンを中心として、時計回りおよび反時計回りにそれぞれ 5 周ずつ旋回する実験を実施した。この実験は、電動アシストカートの旋回性能と操縦性を評価するために行われた。

旋回走行中、電動アシストカートの挙動には特筆すべき乱れや不具合は見られず、全体としては非常にスムーズな旋回が可能であったことが確認された。この結果は、電動アシストカートの設計における旋回性能の優れた点を示しており、電動アシストカートの操縦性に対する信頼性を高めるものである。また、動輪を装着する前後での電動アシストカートの挙動に大きな差異は認められなかった。このことから、動輪の装着が電動アシストカートの基本的な性能に悪影響を与えることなく、期待される機能を適切に果たしていることが

示された。

この実験を通じて、電動アシストカートが様々な旋回条件下でも安定した性能を維持することが確認され、電動アシストカートの設計および構造が適切であることが示唆された。全体として、この旋回走行実験は、電動アシストカートの性能評価において重要な役割を果たし、電動アシストカートの操縦性と安全性の向上に貢献する貴重なデータを提供した。



図 12 旋回試験の様子

4.3. アシスト使用時・移動速度の測定

荷重を負荷しない状態でアシストを使用して走行し、区間タイムを計測する。そしてタイムを基に移動速度を算出する。測定区間は 10m に設定し、走行条件はスタート地点から 3m 手前より助走をつけてアシスト走行を行っている状態で測定区間に突入する。実験は 3 回実行し、移動速度の平均を算出する。測定区間は平地かつ屋内を選定した。表 4 に結果を示す。「動作状況」の項目について、途中でアシストが停止した場合は×、アシストが最後まで途切れなかった場合は○とした。平均移動速度 3.84km/h を記録し、移動速度における改善を確認した。10m 区間の測定において 1 回目のアシスト動作が不安定であった。

表 4 アシスト使用時の移動速度の測定結果

移動距離	平均移動速度(km/h)	1 回目			2 回目			3 回目		
		タイム[s]	動作状況	タイム[s]	動作状況	タイム[s]	動作状況	タイム[s]	動作状況	
10	3.88	8.27	○	9.33	×	10.44	×			
		4.10	○	3.77	○	3.66	○			
10 (2 回目)	3.84	9.66	○	9.20	○	9.27	○			
		動作状況	○	○	○					

5. 結論

5.1. 総括

DD モータを搭載した電動アシストの基礎的なユニットを製作し、実用の可能性を探り、以下の結論を得た。

- 1) 電動アシストカートの底部に DD モータを搭載した電動アシストユニットを設計・製作した。
- 2) 平地での直進、旋回時において、優れた操作性を発揮し、2022 年度製作した電動アシストカートよりも大幅な改善が見られた。
- 3) 動作荷重の軽減、移動速度の向上を達成した。

以上より、電動アシストカート用アシストユニットのシステム設計・製作に成功し、平地での直進および旋回時の操作性が大幅に向上し、動作荷重の軽減と移動速度の向上を達成した。

5.2. 今後の展望

登板での使用時において、停止状態から発進できない現象を確認した。これは電源装置の出力不足が原因であり、さらに出力の高い電源装置への交換が必要であることを示唆している。またモータからのトルクや走行時の微弱な衝撃にも耐えられるよう、結合部の剛性アップを目指す必要がある。今回は制御システムをカートのポケット収納部にまとめて配置したが、元から備わっているポケットの収納を犠牲にしてしまっているため、制御機器の配置を検討する必要がある。また、アシストの動作状況が不安定であったことに関して、電源装置をテストで通電確認を行った結果、導電テープで延長した箇所の通電不良が確認された。制御機器に確実な電源供給を達成するためにも接続方法を別途検討する必要がある。

謝辞

謝辞を本研究の遂行にあたり、多くの方々のご指導ご鞭撻を賜りました。

マイクロテック・ラボラトリー株式会社の合田様には製作を進めるにあたり、多くのデータやエンジニアとしてのご助言をいただき、試作機のトラブル解消において多大な協力を頂きました。感謝申し上げます。

また、本校電気技術職員の吉元氏には電源供給システムの製作にあたり、多くのアドバイスをいただきました。感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 保育士の人数推移を解説 : マイナビ, <https://hoiku.mynavi.jp/topic/2023/01/000833/> (参照日 2024.2.12)
- 2) 株式会社サンワ, <https://www.sunwa-jp.co.jp/info/電動アシスト台車のご案内/>
- 3) 株式会社シロ産業, 軽量折畳式電動アシスト台車 <https://www.webshiro.com/syouthinsetumei8/M1080LTAS-300KG.html>, (参照日 2024.2.12).
- 4) 太陽建機レンタル電動アシスト台車, <https://www.taiyokenki.co.jp/pickup/ELASSDO.html>, (参照日 2023.12.1).
- 5) 池防泰裕, 柿木健史, 松実孝友, 青木尚彦, パワーエレクトロニクス研究会論文誌, 25, 1, (1999), pp. 35-44.
- 6) 関弘和, 高橋一樹, 多田隈進, 回生制動に基づく電動アシスト車椅子の走行制御法, 電気学会論文誌D, Vol.128, No.2, (2008), pp. 137-144.
- 7) 丸山次人, 針生重好, 高齢者用電動アシストカートの開発, EOS, Vol.29, No.1, (2016), pp. 9-16.
- 8) 小林誠一, ダイレクトドライブモータ, 精密工学会誌, Vol. 69, No. 11, (2003), pp. 1534-1537.
- 9) DD (ダイレクトドライブ) インバータ全自動洗濯機, <https://corporate.jp.sharp/rd/journal-73/pdf/73-12.pdf>
- 10) 小島立登, 遊佐梨花 : 保育園向け電動アシストカートの開発, 東京高専卒業研究論文 (2022).

(2024年12月12日 受理)

スパッタ SiC 光導波路の作製と評価

新國広幸*, 本白水亮**, 伊藤浩*

光導波路の材料として機械的強度に優れ、高屈折率で、低コストなスパッタ SiC を利用する。スパッタリング法により作製した SiC 薄膜にアニール処理を施すことで透明化を図り、また、SiO₂/Si 基板上に SiC 薄膜を作製することで光導波路を作製・評価した。まずは、最適なアニール温度を明らかにするために、SiC 薄膜における各種特性（透過率、吸収係数、光学バンドギャップ、屈折率、硬さ、ヤング率）のアニール温度依存性を評価した。実験の結果、700 °C のアニール温度が最適であることがわかった。本条件で装荷型チャンネル SiC 光導波路を設計・作製し、850 nm の半導体レーザーで光導波実験に成功した。

(キーワード: 光導波路, SiC, スパッタリング法, アニール処理, 透明化)

Fabrication and Evaluation of Sputtered SiC Optical Waveguides

Hiroyuki NIKKUNI*, Ryo MOTOSHIROMIZU**, Hiroshi ITO*

We improved the transparency of sputtered SiC thin films through annealing treatment, and optical waveguides were fabricated and evaluated by depositing SiC thin films on SiO₂/Si substrates. In order to determine the optimal annealing temperature, the temperature dependence of various characteristics of SiC thin films (transmittance, absorption coefficient, optical bandgap, refractive index, hardness, and Young's modulus) was evaluated. Experimental results revealed that an annealing temperature of 700 °C was optimal. Using a 850 nm semiconductor laser, we demonstrated waveguide propagation in a strip-loaded channel SiC optical waveguide.

(Keywords: optical waveguide, SiC, sputtering method, annealing treatment, transparency)

1. 研究背景と目的

光信号は、広い伝送帯域、無誘導性（電磁誘導の影響を受けない）、防爆性（電氣的火花が生じず可燃性ガス環境下でも爆発しない）、低消費電力等の多くの優れた特長を有している。光信号を伝搬させる光導波路は、高速大容量な光通信を実現させるための光スイッチや光フィルタ等の基盤要素として重要である。現在では光通信に限らず、センシング¹⁾、データセンターでも利用されている。将来的には、電子回路と光導波路を融合した光電融合デバイスの実現が期待されていて、これにより超高速で低消費電力なコンピューティングが可能となると考えられている。

我々の研究グループでは、光信号の無誘導性、防爆性の特長に注目し、化学プラントや発電所等の厳環境下で利用可能な光導波路を利用した圧力センサ（光導波型圧力センサ）の開発に取り組んでいる。光導波路の材料としては、一般的にガラスやポリマーが使用されているが、高温高压な環境下における機械的強度や耐熱性には限界がある。そこで、SiC（炭化ケイ素）の高い機械的強度、優

れた耐熱性に着目して²⁾、光導波路の材料に採用することで、高温高压環境下で使用可能な信頼性の高い圧力センサの実現を目指す。2006 年に G.Pandraud らが PECVD 法によって SiC 光導波路を作製した³⁾。しかし、PECVD 法では可燃性ガスを使うため、除外ガス等の安全対策が必要で、コストが高いという問題があった。我々は、シランガス等の危険ガスを使用しなくてもよいスパッタリング法を利用した SiC 光導波路の作製を目指している。しかし、スパッタ SiC 膜は膜中に空隙を含み、膜中での光の吸収損失が大きい。

本研究では、アニール処理（加熱処理）により SiC 薄膜の空隙をなくすことで膜の緻密性を上げ、光吸収損失の低減、すなわち、透明性向上に取り組む。SiC 膜の各種特性（光学バンドギャップ、屈折率、硬さ、ヤング率）のアニール温度依存性を実験的に考察し、最適な光導波路の作製条件を明らかにする。その条件をもとに低損失な SiC チャンネル型光導波路を設計・作製し、光導波実験を行う。

* 電気工学科 ** 電気電子工学専攻

2. SiC 光導波路の概要

図 1 に SiC 光導波型圧力センサの概形を示す。光信号を伝搬させる光導波路と圧力による変形を光導波路に伝えるダイヤモンドから構成されている。本研究では、装荷型のチャンネル光導波路を採用している。このタイプの光導波路は導波層の一部分の上部に装荷層を積層することで、装荷層下部の等価屈折率がそれ以外の導波層部分よりも高くなり、光が横方向で全反射して閉じ込められる。

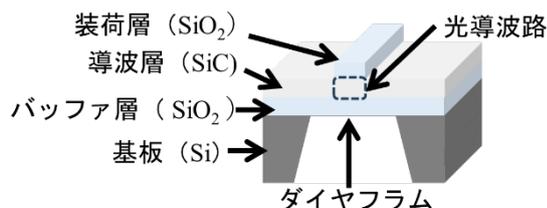


図 1 SiC 光導波型圧力センサ

3. SiC 薄膜各種特性のアニール温度依存性

SiC 薄膜を作製し、アニール温度ごとの光学的特性(光学バンドギャップ, 屈折率)および機械的特性(硬さ, ヤング率)の評価を行い、最適な条件を明らかにする。基板について、光学バンドギャップ用には合成石英ガラス基板を、屈折率、機械的特性には単結晶 Si 基板を利用する。

3.1. 作製方法

まず、基板をアセトン、エタノールの順に超音波洗浄する。その後、RF スパッタリング法を用いて SiC 薄膜を成膜する。成膜には、マグネトロンスパッタリング装置 (ULVAC 社製の SH-350) を利用した。表 1 に成膜条件を示す。ターゲットには、4 インチで純度 99.99% の SiC を用いる。チャンバー内に基板を設置後、ロータリーポンプとターボ分子ポンプで、圧力 1.3×10^{-3} Pa まで真空引きを行う。その後、チャンバー圧力が 0.6 Pa になるようにチャンバーに Ar ガスを導入する。逆スパッタを 100 W で 5 分、プリスパッタを 800 W で 5 分行ったあとに、本スパッタを 800 W で 47 分実施した。

成膜後に、真空中でのアニール処理を施し、膜質を改善し、透明性の向上を図る。アニールには、赤外線を薄膜に照射することで高速に昇温ができる RTA(Rapid Thermal Anneal, ULVAC の SINKU-RIKO) を用いた。条件を表 2 に示す。アニール条件は、昇温時間 3 分、アニール時間 4 分、到達真

空度約 4.4×10^{-3} Pa とした。アニール温度 300 °C, 500 °C, 700 °C, 1000 °C, 1100 °C, アニールなし (20 °C) の 6 枚の試料を作製した。

表 1 SiC 薄膜のスパッタリング条件

基板	合成石英ガラス, 単結晶 Si
成膜方法	RF スパッタリング法
ターゲット	4 インチ, SiC (99.99%)
到達真空度	1.3×10^{-3} Pa
成膜時ガス圧	0.6 Pa
逆スパッタ	100 W, 5 分
プリスパッタ	800 W, 5 分
本スパッタ	800 W, 47 分

表 2 SiC 薄膜の真空アニール条件

アニール方法	RTA(急速アニール処理)
到達真空度	4.4×10^{-3} Pa
昇温時間	3 分
アニール時間	4 分
アニール温度	アニールなし(20 °C), 300 °C, 500 °C, 700 °C, 1000 °C, 1100 °C

3.2. 評価方法

光学バンドギャップの導出には、分光光度計(日本分光社製の Ubest V550)を用いた。波長範囲は 350 - 900 nm とした。まずは、分光光度計を用いて、SiC 薄膜の透過率 T のスペクトルを測定した。次に吸収係数 α を、以下の式(1)により求めた⁴⁾。

$$\alpha = \frac{(-\ln(T) + \ln(1-R))}{d} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 R は薄膜の反射率、 d は膜厚である。SiC 薄膜各試料の α を波長 λ ごとに計算し、光吸収特性を作成した。光吸収特性の横軸は光エネルギー hc/λ (h はプランク定数, c は真空中の光速), 縦軸は光エネルギーと吸収係数の積の平方根 $\sqrt{\alpha hc/\lambda}$ である。作製した SiC 膜はアモルファスであり、アモルファス半導体では、 $\sqrt{\alpha hc/\lambda} = A(hc/\lambda - E_g)$ が成立する。ここで A は定数, E_g は光学バンドギャップである。吸収特性において、光の干渉の影響を無視できる直線部分に接線を引き、横軸と接線の交点を求めることで光学バンドギャップの導出を行った。

屈折率の測定には、エリプソメータ(ガートナー社製の LSE-USB)を用いた。光源は波長 632.8 nm の He-Ne レーザである。各試料 5 点測定を行い、その平均値をとった。

硬さ、ヤング率の測定には、ナノインデント(エリオニクス製の ENT-1100a)を使用した。三角錐圧子を SiC 薄膜に押しつけ、荷重-変位特性を測定し、その結果から硬さとヤング率を求めた。なお、膜厚に対して変位量が 10 分の 1 程度になるように最大荷重は 1 mN とした。各試料につき 4 点評価し、その平均値をとった。

3.3. 実験結果と考察

評価した SiC 膜における各種特性のアニール温度依存性を図 2 から図 5 に示す。図 2 から、光学バンドギャップは、700 °C 程度まではアニール温度が上昇するにつれて大きくなり、それ以上では低下する傾向が見て取れる。700 °C の光学バンドギャップは 2.2 eV とアニールなし(20 °C)の光学バンドギャップ 1.8 eV に対して 0.4 eV 向上して、透明性の改善が実現できている。

屈折率は、アニール温度の上昇に伴って約 700 °C まで低下していき、700 °C で 2.2 になった。この値はガラスやポリマーの 1.5 程度の屈折率と比べて十分高い値であり、光閉じ込め効果の強い導波路を作製できる。そのため、曲率半径の小さい曲げ導波路を作ることができ、センサの小型化が期待できる。

硬さは、光学バンドギャップと同様に約 700 °C まではアニール温度の上昇に伴い大きくなり、それ以上では低下する傾向が見て取れる。700 °C の硬さは 25 GPa で、3C-SiC 結晶の硬さ 32 ± 2 GPa⁵⁾ と比べると若干低い。SiO₂ の硬さ 8.5 GPa⁶⁾ の 2.9 倍で高い値と言える。

ヤング率は 300 °C から 700 °C の間でおおよそ一定で、700 °C を超えると低下する傾向が見られた。700 °C のヤング率は 180 GPa で、3C-SiC 結晶の 440 ± 16 GPa⁵⁾ と比べると半分以下であるが、SiO₂ のヤング率 70 GPa⁶⁾ の 2.6 倍と高い値になっている。

光学バンドギャップ、硬さ、ヤング率が 700 °C を超えた温度で低下した理由として、アニールによる膜の緻密化と膜応力の 2 つの効果が影響していると考えた。膜の緻密化は、アニール温度の上昇に伴う原子、分子の再配置の促進による空

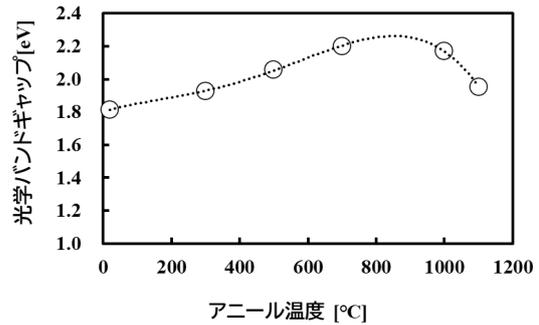


図 2 バンドギャップのアニール温度依存性

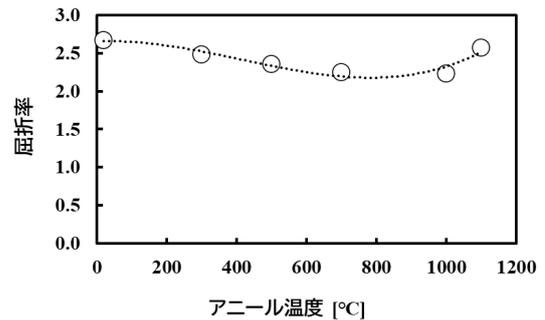


図 3 屈折率のアニール温度依存性

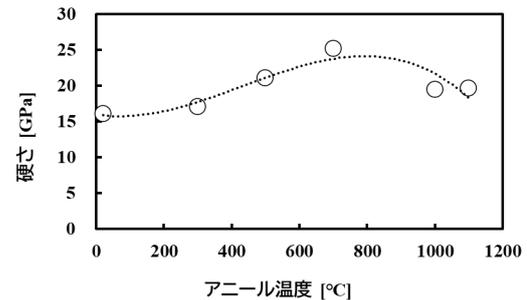


図 4 硬さのアニール温度依存性

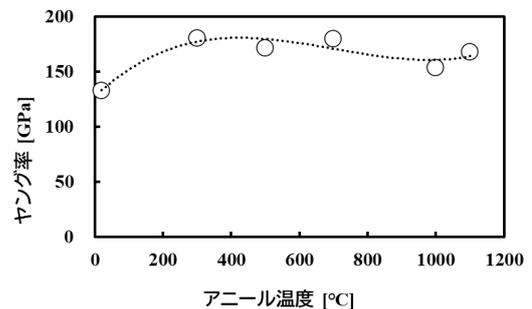


図 5 ヤング率のアニール温度依存性

隙の低減により起こり、その結果、光学バンドギャップ、硬さ、ヤング率が大きくなる。一方で、膜応力は SiC スパッタリング時に圧縮応力として生じていて、アニール温度上昇により低減し、空隙が広がっていき、光学バンドギャップ、硬さ、ヤング率を低減させる効果があると推察する。さ

らに温度を上げると応力ゼロを通過して引っ張り応力に切り替わり、空隙をさらに広げると考える。アニールなし(20℃)から700℃までは膜の緻密化による効果が膜応力による影響を上回っていたが、700℃を超えると膜応力の効果が膜の緻密化の影響より大きくなり、光学バンドギャップ、硬さ、ヤング率が低下したと考えた。

また、屈折率が700℃程度までで低下し700℃を超えて向上したのは、700℃までは膜応力低減効果が緻密化の効果より大きくて空隙が広がったため、それ以上の温度では緻密化の効果が膜応力の効果より大きかったためだと推察した。

アニール温度700℃では、光学バンドギャップと硬さ、ヤング率が最も高く、屈折率は2.2と導波路としては十分高い値である。そのため、700℃のアニール温度を最適な条件だと考え、スパッタSiC光導波路のアニール温度を700℃とすることにした。

4. SiC チャネル光導波路の作製

4.1. 設計, 作製方法, 評価方法

図6に作製したチャネル光導波路の概形を示す。基板はSi, バッファ層と装荷層はSiO₂とした。寸法については、シングルモード光導波路となるように設計した。バッファ層の厚さは、Si基板への放射損失が十分無視できる1.5μmとした。導波層の厚さと装荷層の厚さ、幅はそれぞれ1μm, 0.1μm, 8μmとした。導出に当たっては、マクスウェル方程式を基に導かれる固有値方程式を二分法で解き、分散曲線を作成し、シングルモードとなるように設計した。

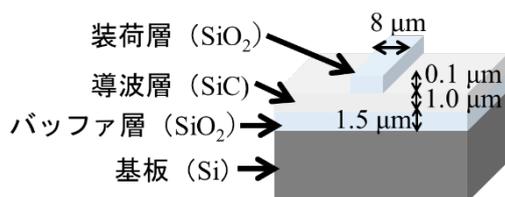


図6 作製したチャネル光導波路の概形

基板にはSiO₂付きSiを使い、アセトンとエタノールによる超音波洗浄を行った。基板の上にスパッタリング法でSiC膜を成膜し、その後、700℃でアニール処理を施した。この後レジストを塗布し、フォトリソグラフィ法により光導波路となる箇所のレジストを除去する。その上からSiO₂膜を

スパッタリングし、最後にリフトオフ(剥離液に浸して超音波洗浄によりレジストを除去)して装荷型チャネル光導波路が完成する。光導波路の断線による失敗を考慮して、一つの基板に複数本の光導波路を作製した。

光導波実験のシステムを図7に示す。光源には波長850nm, 出力光強度8.3mWの赤外線半導体レーザを用いた。レーザ光をレンズで集光し光導波路に入射し、導波路から出た光をレンズで拡大しスクリーンに投影、CCDカメラで導波光(近視野像)を撮影した。

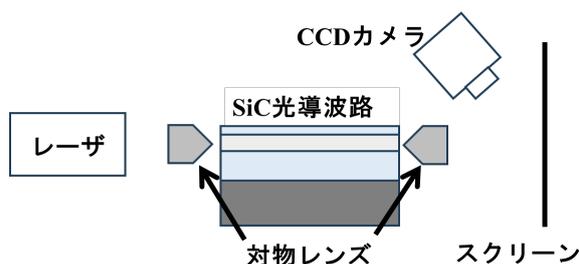


図7 光導波実験システム

4.2. 実験結果と考察

図8にチャネル光導波路における近視野像を示す。単峰性の光分布であるため、シングルモードの光導波路の作製に成功したと言える。一方、光パワーメータで導波光の光強度を測定したところ1μW程度であり、レーザ光8.3mWの1/8300と損失が非常に大きかった。光の損失として、導波路入射部での結合損失、膜による吸収損失、導波路構造や膜中の屈折率分布による散乱損失が挙げられる。今回作製した光導波路においては、吸収損失は光の透過率がほぼ100%のため無視でき、結合損失と散乱損失の影響によるものと言える。



図8 チャネル光導波路の近視野像

5. 結論

本研究では, スパッタ SiC 薄膜の透明化のために, 光学バンドギャップ, 屈折率, 機械的特性のアニール温度依存性を実験的に考察し, 700°Cのアニール温度が最適であることを明らかにした。この条件を基に装荷型チャネル光導波路を作製し, 導波光の観察を行い, シングルモード光になっていることを確認した。しかし, 導波路の光損失が大きく出力光強度が小さかった。主な要因として結合損失と散乱損失が考えられるが, より詳細に分析するために, カットバック法による伝搬損失の測定, 導波路構造の凹凸の評価が必要であり, 今後実施する予定である。

参考文献

- 1) H. Nikkuni, M. Ohkawa, and T. 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年5月
DOI : 10.1117/1.OE.56.5.057108
- 2) 松波弘之, 大谷昇, 木本恒暢, 中村孝 : 半導体 SiC 技術と応用 第2版, 日刊工業新聞社, 2011年9月
- 3) G.Pandraud, H.T.Pham, P.J.Franch, and P.M.Sarro : Polarization-insensitive PECVD SiC waveguides for sensor platform, *Opt.Mat.*, 28, pp.380-384, 2006年3月
DOI : 10.1016/j.optmat.2005.01.025
- 4) 金原繁, 吉田貞史ら : 薄膜の評価技術ハンドブック, テクノシステム, pp.305-306, 2013年1月
- 5) V. Kulikovskiy, V. Vorlicek, P. Bohac, M. Stranyanek, R. Ctvrtlik, A. Kurdyumov, and L. Jastrabik : Hardness and Elastic Modulus of Amorphous and Nanocrystalline SiC and Si Films, *Surf. Coat. Technol.*, Vol.202, pp.1738-1745, 2008年2月
DOI : 10.1016/j.surfcoat.2007.07.029
- 6) 中上明光, 川上信之 : ナノインデンテーション法による薄膜の機械的特性評価, 神戸製鉄技報, Vol. 52, No. 2, pp.74-77, 2002年9月
- 7) 新國広幸, 沼田千鶴, 山路涼斗, 伊藤浩, 川又由雄 : 反応性スパッタリング法を用いた光導波路用 SiCO 薄膜の透明性向上, 電学論 E, Vol.140, No.12, pp.369-373, 2020年7月
DOI: 10.1541/ieejsmas.140.369

(2024年12月12日 受理)

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

田中晶*, 田辺友斗*, 早渕壮真*, 水落祐太*, 水上滉介*

平成 24 年 (2012 年) より, 八王子市小学校科学教育センターの「インターネットとプログラミング」講座を担当させていただいており, 田中研究室で設計した教材をサーバに実装し, 毎年 4 クラス各 30~40 人の受講者に対し, 夏休みの講座を提供してきた。この講座では, 主にインターネット応用, ネットワークプログラミングなど実用プログラミング, LAN/WLAN/PLC 通信実験を, 毎年改良を重ねながら実施している。さらに本校公開講座では, Arithmetic Logic Unit: ALU (演算器) 設計実験を, 小中学校教員研修では, サーバを用いたプログラミングとハードウェア制御, FPGA での加算器設計, 移動体プログラミングを実施している。これらの蓄積, 及び, 通信及び教材をテーマとした卒研・特研を含む研究室の実験・試作での設計をベースに高専生向けの教材の開発に取り組んできた。高級言語のプログラミング基礎教材を充実させ, PC 単体やサーバを用いた PC・マイコン制御やネットワーク実習教材などの実装・試行を行い, 昨年度後半から今年度の田中研究室の社会実装において, 比較的汎用性の高い高専生向けの論理回路教材を設計した。本年度前期の情報工学科 2 年生及び 3 年生の正課授業で使用して適用効果を得, さらに発展設計を進めている。

(キーワード: インターネット, プログラミング, 論理回路, Linux サーバ, 教材, 地域教育)

Design and Implementation of Fundamental Computer Teaching Materials for Students of the National Institute of Technology

— For the Evolution of Computer and Network Education —

Akira TANAKA*, Yuto TANABE*, Souma HAYABUCHI*,
Yuta MIZUOCHI*, Kousuke MIZUKAMI*

Since 2012, Tanaka Lab has provided “Internet and programming courses” as an extension lecture of the Hachioji elementary-school science education center every year. Using education materials developed and implemented on Linux servers in the lab, four classes of 30-35 elementary school students in each class, attended the one or two day lectures at our school. Students can have practical experience through internet applications, making web pages including synchronous 3D imaging, network programming, and communication experiments with LAN/WLAN/PLC. The lab has continuously developed a variety of educational materials and provided extension lectures: e.g., an Arithmetic Logic Unit (ALU) and instruction course on computer hardware and applications for elementary and junior high school teachers, C programming experiments for junior high school students, programming / AI materials for visiting lectures, some research prototypes as graduation research and scholarly works. Based on these achievements, with mobile SINET and internet, computer language and network training schemes, user interface and interconnection among servers and computers are improved. From the second semester of 2023 to 2024, the Social Implementation team (Tanaka Lab) has developed logic circuit materials on the server. These materials are used in the regular curriculum of second and third grade classes in the National Institute Technology, Tokyo College (NITTC) and had sufficiently positive educational effectiveness. Further developments are continuing.

(Keywords: internet, programming, logic circuit, Linux server, education materials, region-education)

* 情報工学科

1. はじめに

八王子市小学校科学教育センター¹⁾の科学教育の一環として、ここ数十年本校において夏休み期間に幾つかのテーマを実施してきている。市内全域の小中学校から選抜された理科やものづくりに興味を持つ 90~130 名程度の小学生が 4 クラスに分かれて受講する。田中研究室では「インターネットとプログラミング」をテーマに平成 24 年度以来毎年、本校受け持ち講座を担当してきた²⁻⁷⁾。この成果によって平成 26 年 1 月 14 日には八王子市教育委員会と理科教育の充実のための「教育・研究に関する連携協定」が締結されて、出前授業^{3,8)}など相互の協力が発展してきている。

この講座で受講者は、本研究室が設計した教材²⁻⁶⁾を使って、インターネットを介してサーバ上に各自の Web ページを作成し、完成したページをクラス内で互いに参照したり、グループごとに 3D 画像を組み入れて動きをクラス全員で同期して操作・参照したり、サーバを通してクイズを出題、C や JavaScript の簡単なプログラムを作成・動作させたり、ネットワークゲームを完成させてクラス内でゲームを楽しむ、などによりインターネットとプログラミングを学び、さらには、LAN/WLAN/PLC を使った実験で、ネットワークの仕組みの一旦を学んでいる。中学生向けの公開講座⁴⁾ではコンピュータの中央処理装置 (CPU) の演算機能部分の簡単な実験や C プログラミング、小中学教員を対象とした研修⁶⁻⁹⁾ではコンピュータ

ハードウェアや応用について、出前授業ではネットワークプログラミング・AI 教材を開発し講座を実施してきた。また、卒業研究・特別研究、研究試作においても幾種もの教材設計を行っている。さらに、採択されたモバイル SINET¹⁰⁾実証実験のネットワークを用い、高専間への教材提供にむけた設計にも取り組んでいる。

昨年度後期から今年度にかけては、これらの教材システムや講座の成果にも基づきながら、の社会実装プロジェクトにおいて、本研究室配属の J03 班で論理回路教材を設計した¹¹⁾。継続して、時間要素を取り入れた順序回路、ハードウェア連携、サーバ機能向上に取り組んでいる。入門者から高専である程度の習熟を重ねた学年まで通用するように、学習過程を複数の段階にわけて設計し、また、本校情報工学科のコンピュータ関連のカリキュラム (座学・実験) に適合するように、授業の過程との関連付けも行った。関連する技術項目がワンストップで実行・確認できる構造を意図し、一つの画面の課題を解くと幾つもの論理回路及び応用機能の要点が習得できる方向を目指した。本研究室設計の教材の概観を述べるとともに、主に本年度の教材を使用した授業・講座、今後の展開を述べる。

2. 教材と講座や授業などとの関連

これまで本研究室で開発してきた教材^{2-6, 9-24)}は、マイコンを使った個別使用の AI しりとりゲ

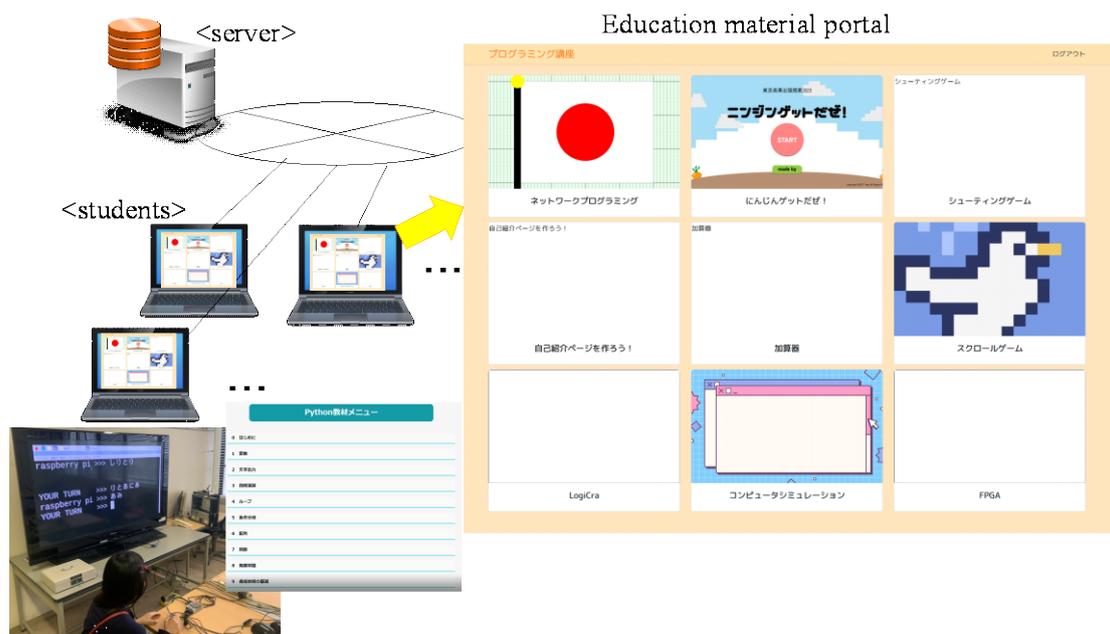


図 1 Computer and network education materials of Tanaka Lab.

ーム教材や机上や屋外実験用のアプリケーション、そして多くは図1に示すようにLinuxサーバに実装している。サーバにはポータル画面が用意されていて、開発した教材をポータルに組み込んで提供するしくみである。八王子市小学校科学教育センター講座で用いている教材は何度か更改を経て昨年度と今年度に使用した版を置いているなど、改良も同じサーバ上で行っている。小中学校でもビジュアルプログラミング中心でのプログラミング教育は行われているが^{25,26)}、ものづくりで使用する本物のプログラミングに触れながら、受講者自身による設計を通して学ぶ教材の設計である。代入、画面と座標の関係、動き、3D、生成AI、ゲーム、マイコン操作などをサーバアクセスでのコーディングを通して学び、その成果を体感できる。単体で行う場合が多かったマイコンの扱いは、オンライン化に移行を進めてきている。課題に回答する過程が、実生活内でも十分に使えて楽しめるWebページ、ゲーム、動きのある画像や3Dオブジェクトの完成につながり、学習効果を高めている。一部には穴埋め回答式も用意し、自習教材としても使えるように設計してきた。講座で実際に学習効果を確認められてきたこのようなアプローチも、高専生向け教材の設計にあたり取り入れている。

本研究室では情報通信、中でもマルチホップネットワークなど通信の研究を重ねてきており^{27,28)}、設計教材の中には、ネットワーク講座向けに開発し使用したものだけでなく、本研究室の卒業研究・特別研究、これらを含む研究室の試作で設計してきた通信研究の素材も多い。これらの設計の一部の転用も行いながら高専生向けの教材の試作・評価を行っていて、その一部も取り込みながら本研究室の社会実装プロジェクトでコンピュータシステム教材を設計してきている^{11, 14, 17, 19, 22)}。

本研究室が設計した教材により実施した本年度の授業、講座は次のようになっている。

- ・筆頭著者が担当している本校情報工学科2年生の論理回路I, 3年生の論理回路IIの正課授業。
- ・例年と同様に、八王子市小学校科学教育センターの講座⁷⁾。
- ・中学生を対象とした本校公開講座²⁹⁾。
- ・小学校への出前授業。

3. 教材の設計指針

3.1. 教材システムの装置構成概観

- これまで本研究室で開発してきた教材は、
- ・実機を主としたもの:マイコンを使ったAIしりとりゲーム教材, 机上や屋外実験用のアプリケーション。
 - ・Linuxサーバに実装しネットワーク経由で使用するもの: 数値ベース, 体験ベース, ゲームベース, 理論やシミュレーションベース。
 - ・Linuxサーバと実機を連動させる教材: マイコンやFPGAと連動した回路実験。

の形態で実装されて、多くはLinuxサーバ経由で使用する^{2-7, 11-14, 17, 19, 21-24)}。

単に対象科目の習得に留まらず、PC, サーバ, マイコン, FPGA, 外部回路, 測定器など取り扱い, オンライン制御, 受講者同志の同期操作, 数値処理の扱いや実験空間の理解など、幅広く知識を吸収できる。

3.2. 教材システムのアプローチ

サーバに実装して開発した教材は、オンライン、教室・実験室・電算機実習室、自宅での自習、セミナー形式、いずれにも適応し、個人、グループ、クラスなど受講者の構成それぞれにあわせて利用できる。3章に示した修得要素を、Web画面上マウス操作での数値の生成や画像の生成、オブジェクトの動きや変化、などにより、各自の入力、処理の経過、結果、解との照合、ヒント/ガイド/正否の表示、で確認できる。小学生から高専生まで幅広い受講者に対応するように、オンラインゲーム、入力ガイドによる選択、比較的容易な高級言語プログラムによる入力、Webページが完成される過程、など多様なUIで提供している。①二進数の変化の観察、グラウンドに徒歩で絵を描く、②自分で操作したり自分で完成させるキャラクターの動きで結果を確認・正解であれば迷路を抜ける、③簡単な制御構造を理解できればパラメータの変更のみで高級言語プログラムが完成、④花火やロケットのような誰でも知っている素材を使ったゲームを課題回答で段階的に完成されて理解度をゲームで確認、⑤ボタン操作、色の変化/疑似外部装置の変化/配線・表・式の自動生成など理論の習得とあわせてシミュレーションを通して理解度を確認、⑥ハードウェア連携、⑦ハードウェア(FPGA, マイコン)制御、⑧生成AIやガイドラインによる課題解決/サーバ制御、の機能を持ち、初

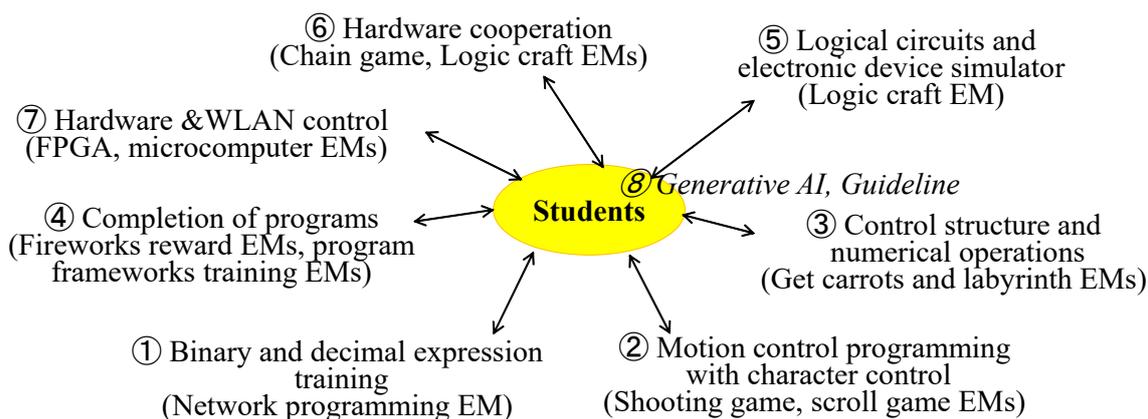


図 2 Composite learning with variety of educational materials (EMs)

心者から経験者まで学習・実習に取り組める (図 2)。

4. 高専生向けコンピュータシステム教材

4.1. 論理回路教材とコンピュータシステム

コンピュータシステム教育は、システムで使われる数値の扱い、データ構成、CPU やメモリなど中心部分を構成する論理回路、CPU 内部構成とその動作、CPU と周辺装置とのインタラクション、コンピュータシステムと外部機器とのインタラクション、ネットワークとコンピュータシステム、応用システム、関連する電子回路、などが要素となる。その中で、昨年度後半から今年度にかけて進めてきた論理回路教材では、回路を構成する基本素子、基本素子を組み合わせる回路、時間要素をもつ回路、について、それらの動作、入出力、動作の表記 (論理関数や真理値表、プログラミング)、処理の結果、応用、を一連の教材として設計している¹¹⁾。

4.2. Step 学習

Step 学習は大きく三段階で構成されていて、Web アプリケーションで学習する。実際のハードウェア (マイコン) を使って回路設計の結果を確認するフェーズも用意している。受講者は直感的に操作できる UI、或いは Python を用いて基本的な素子の動作の確認から全加算器回路を含む組合せ回路が設計でき、さらに時間要素を組み込んだ順序回路も学習できる。Web サイト上で回路を作成し、課題に従って各自の端末画面上で操作・論理回路シミュレーションにより動作確認する。自分の回答した結果がその場で実回路と同様に動作

し、視覚的に理論と実用につながる基本事項が理解できるだけでなく、WebSocket により web アプリケーションから Raspberry Pi を介してブレッドボードで回路動作を再現する機能も持つ。

視覚的学習のため、親しみやすさやわかりやすさを優先し配線や値の変化の様子が Web アプリケーションによる補助で容易に行える UI を設計した。開発には、HTML、CSS、JavaScript、Python を用い、本研究室の各種教材が実装されているウェブサーバに追加した。教材ポータルから論理回路教材をクリックし、その後各ステップに遷移する。

4.3. 論理回路の基本素子学習

Step1 の基本素子学習は、論理回路と真理値表を中心に、基礎的な学習コンテンツを提供するため大きなサイズで把握し易い視覚的要素を多く取り入れた。具体的には、図 3 に示されているように、3 種類の比較的シンプルな回路 (AND 回路、OR 回路、XOR 回路、NAND 回路、NOR 回路、XNOR 回路、NOT 回路を用いた回路) を作成し、学習者が基本的な論理ゲートの動作を理解できるよう設計した。

図 3 の真理値表の出題画面では、学習者が自分のペースで論理を考えられるようクイズ形式を使った工夫をしている。動的なフィードバック機能により、回答に応じたリアルタイムのヒントや補足が表示され、インタラクティブな学習体験を提供している。

プログラム設計においては、主に次のような工夫を取り入れている。

- ・リアルタイムフィードバック機能
クイズを取り入れた画面では、受講者が回答を選択した時点で正誤判定と補足説明を即座に表

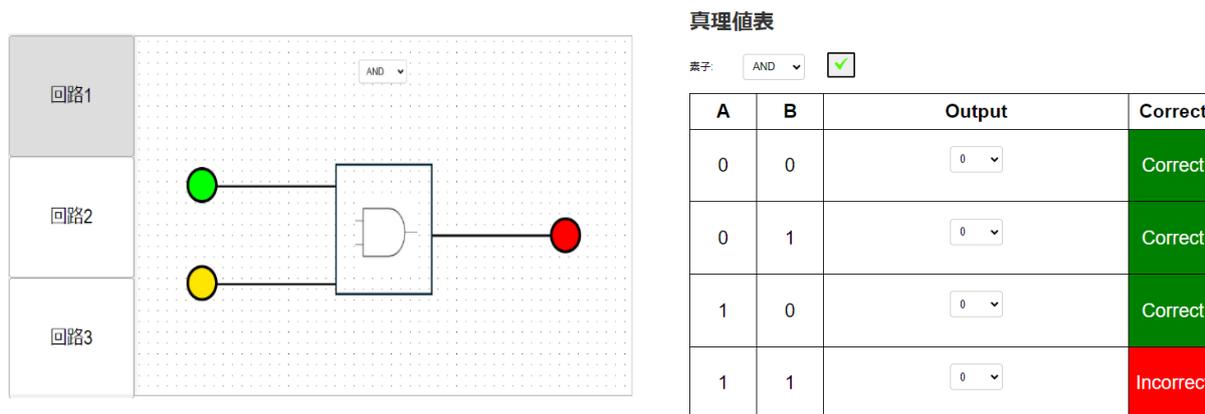


図 3 Logic circuit training in Step 1: logical element

示るようにしている。これは JavaScript の `addEventListener` でクリックイベントを監視し、入力が変わるたびに判定関数が呼ばれることで実現している。

• 視覚的要素の動的な更新

各論理素子の回路図は、操作に応じてハイライトの色を変えることで動作がわかりやすくなるよう工夫している。基本動作は色の変化で結果が視認できる。即ち、AND 回路ではどちらも 1 を入力すると、かつ、その場合のみ、出力が赤色に点灯する他、どの素子も同様である。数字よりは学習者が結果を直感的に理解できる工夫をしているが、数値は真理値表画面で併せて確認でき、複合的な理解が可能になっている (図 3)。

4.4. プログラミング言語による基本論理の理解

Step2 では論理素子のコーディング基礎を学ぶ (図 4)。Ace エディタ, Pyodide, jQuery, WebSocket などのライブラリ, ツールを使用し, Ace エディタでユーザが Python コードを入力・編集できる環境を設計し, エディタ内でベーシックなオートコンプリート機能, スニペット, ライブオートコンプリート機能が機能する。また, Pyodide を利用してブラウザ上でユーザが入力した Python コードを実行する仕組みを実装している。実行結果やエラーメッセージは出力エリアに表示され, 受講者は即座に正否に関するフィードバックが得られる。

4.5. 組合せ論理回路・順序回路の学習

Step3 で実装している回路エディタ・シミュレータは, 学習者が論理回路を設計し, サーバ上で動作させてその状況や結果を各自の PC で確認できるインタラクティブな UI を提供している。特に論理素子の追加・接続などの基本操作を簡単に行えるようワンストップ設計を実現した。一面に格子状に素子フレームを配置してあり, それぞれでプルダウンにより適切な素子を選択, 出力素子 (或いはスイッチ) の出側から入力素子 (或いは疑似外部装置) の入側まで, 配線を通ししたいポイント付近をクリックしていくと, 他の素子を迂回して自動的に配線される。論理式を入力し出力を指定もできる。設計した回路に基づき自動的に真理値表や論理式が生成される。疑似外部装置は現在は LED 群を用意している。受講者が画面上で設計した回路を動作させると視覚的に結果が認識でき, 受講者自身が実際に論理回路を作成し, 動

論理回路シミュレーション2

論理素子の関数をコーディングしよう!

```

1
2 def and_gate(input1, input2):
3     return input1 & input2
4
5 def or_gate(input1, input2):
6     return input1 | input2
7
8 def xor_gate(input1, input2):
9     return input1 ^ input2
10
11 def nand_gate(input1, input2):
12     return int(not (input1 & input2))
13
14 def nor_gate(input1, input2):
15     return int(not (input1 | input2))
16
17 def not_gate(input1):
18     return int(not input1)
19
20 def xnor_gate(input1, input2):
21     return int(not (input1 ^ input2))
22
23 def half_adder(input1, input2):
24     sum = xor_gate(input1, input2)
25     carry = and_gate(input1, input2)
26     return (sum, carry)
27
28 def full_adder(input1, input2, carry_in):
29     sum1, carry1 = half_adder(input1, input2)

```

図 4 Logic circuit training in Step 2: logical operations by Python

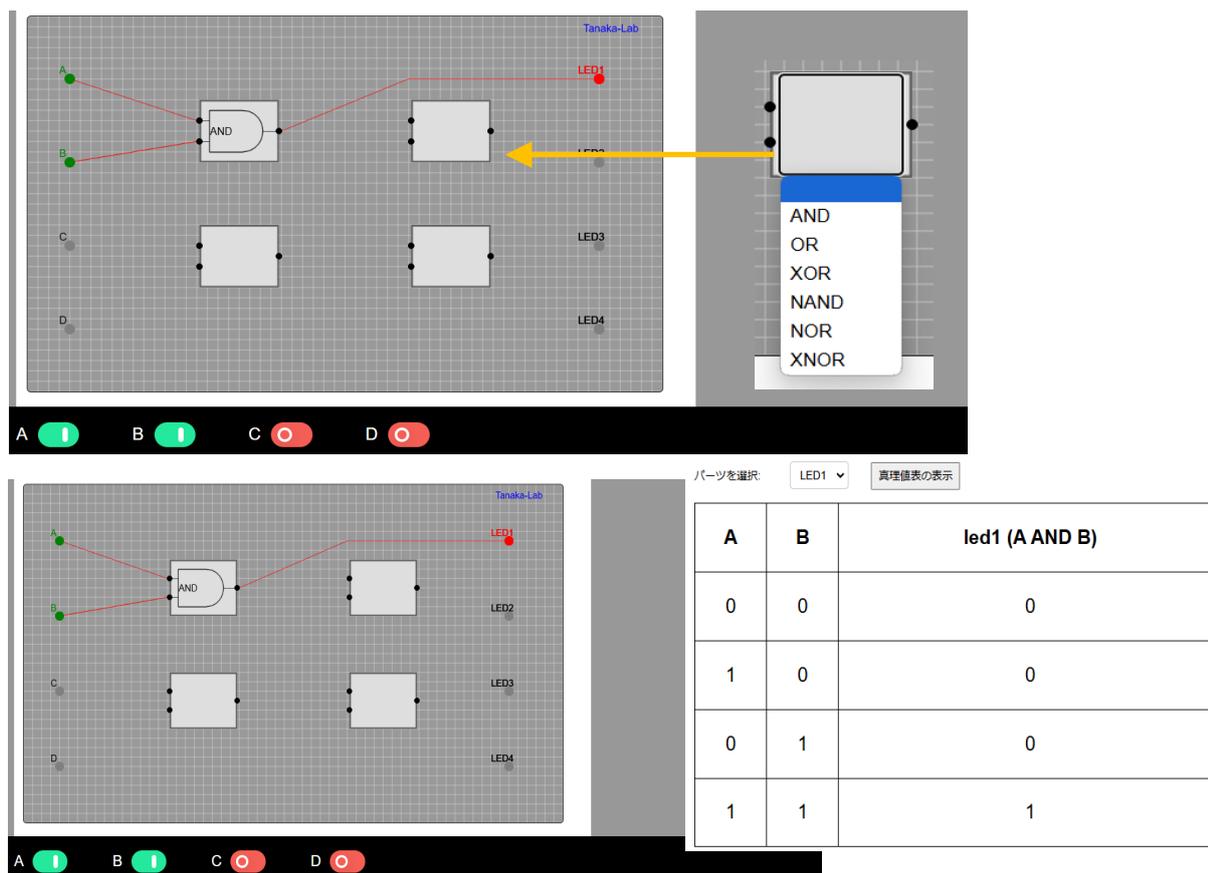


図 5 Logic circuit training in Step 3: combinational and sequential circuit

作方法を検証する。さらに真理値表で回路の動作との対応も確認できる。このように受講者は自分がどの程度或いは課程のどの部分が理解できているか、すぐに確認できる機能を実装している。構造上の主な特徴を述べる。

(1) この Step3 のプログラムは次のような構成になっている。

・回路エディタ機能

図 5 に示すように、論理ゲート (AND, OR, NOT, XOR, NAND, NOR, XNOR) のアイコンがプルダウン式で選択可能。一面に配置され、接続可能なインターフェースを設計した。学習者が直感的に回路を設計しやすくしている。

・自動生成される真理値表

図 5 に示すように、エディタで配置した回路に基づき、真理値表が自動的に生成される。学習者が各論理ゲートの動作結果をすぐに確認分析できて、複合的に回路理解ができる。

各 LED の動作を示す真理値表に加え画面に配置された各素子の真理値表も生成され、回路の配線の追いながら順序だてて組合せ回路の構造を理解できる。

- ・視覚的、直感的、リアルタイムに把握容易な UI
上述の回路エディタの素子プルダウンに加え、図 5 のように入力ボタンの配置を画面下部に設定し、素子同士を正しく接続したときに接続状態が一見してわかるため、受講者はストレスなく操作できる。

(2) 回路設計を行うごとに真理値表が併せて生成されるため、受講者は結果を確認しながら順序だてて操作の正しさを確認、また、振り返りができる。間違いの気づき、或いは指導者による助言も、受講者が操作すると同時に得られる。

・動的なイベントリスナー

論理ゲートの配置や接続操作に対してイベントリスナーを動的に付与する仕組みを実装した。素子や配線が配置されると、それぞれに対応したイベントが付与され、配置変更や接続が自動で反映されるようになっている。

・真理値表の自動更新

JavaScript で各ゲートの状態を管理し、設計した回路に基づき全パターンの入力と出力を計算し、真理値表を更新している。更新を行うと各 LED の真理値表はもちろん、各素子の真理値表も

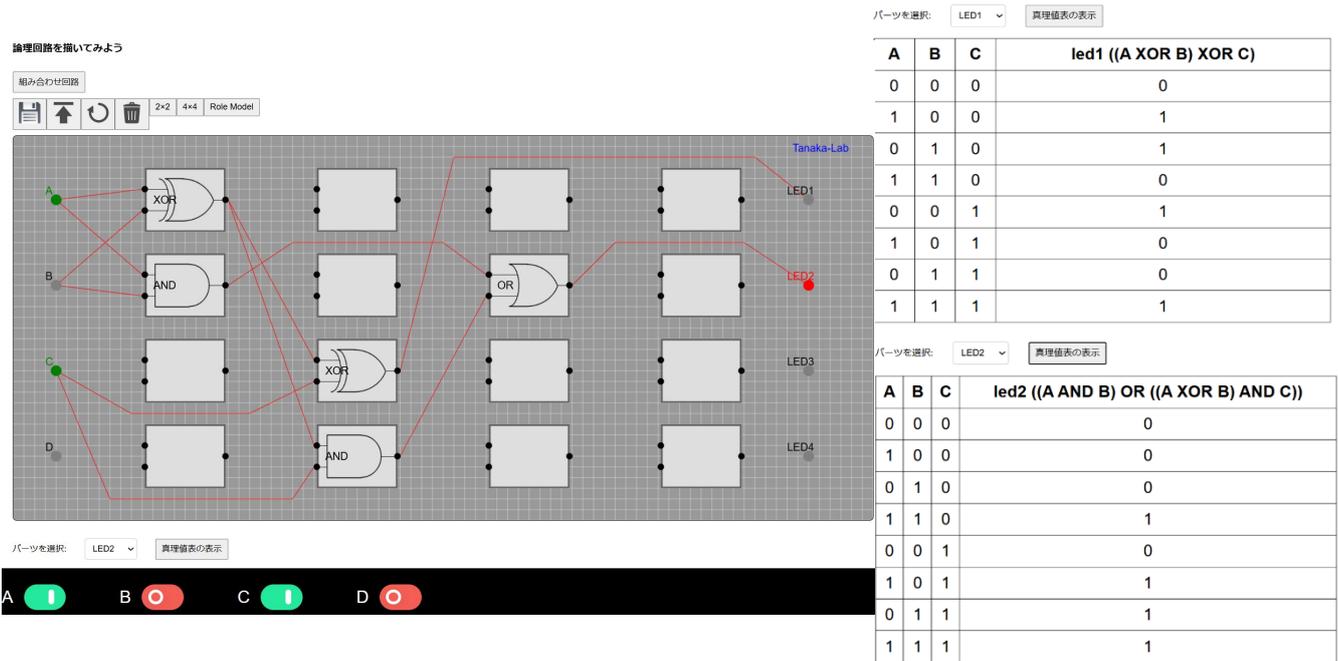


図 6 Logic circuit training in Step 3: full adder

変更され, 受講者は順序を追って組み合わせ回路について理解できる。

(3) 順序回路の実装

時間変化も反映する順序回路も提供している。過去の状態を保持するための状態変数を追加し, 時刻や順序ルールに従って状態が更新されるように設計している。組み合わせ回路と同様の画面で受講者は戸惑うことなく出力変化, 回路内の変化が生じる状況など, 順序回路の特性と動作を理解できる。

(4) 学習で設計される回路の例

Step3 において作成された全加算器の回路図を図 6 に示す。表は全加算器が作成されて自動生成された真理値表である。論理回路で使用されている入力変数を特定し, すべての入力の組み合わせを得て, その組み合わせに基づいて論理式を評価して真理値表を生成している。出力の際, 選択した素子における論理式も合わせて表示される。これにより, 受講者は具体的な論理式とその評価方法を確認しながら学習を進められる。

4.6. ハードウェア連携による学習

Raspberry Pi と連動する Web アプリケーションの Step3 では, 受講者は自分が作成した論理回路の動作を実際のハードウェア上で確認できる。Web アプリケーション画面で作成された論理回路の構

成情報を WebSocket 通信を用いて Raspberry Pi に送信し, Raspberry Pi 上で同様の回路の動作を再現する。この通信方法の概観を図 7 に示した。受講者の PC からサーバにアクセスし, Web アプリケーションで作成した回路の動作を WebSocket を用いて Raspberry Pi に送信する。これにより, 受講者はソフトウェア上で作成した論理回路が手元に置いた現実のハードウェアが実際にどのように動作するか視覚的に確認できる。図 8 は実際に Raspberry Pi を配線した状況で, Web アプリケーションの Step3 から LED と 7segLED を点灯させる様子である。現時点では, 4.7. (4) に記すようにローカルに立ち上げて連携している。

4.7. サーバへの実装

本研究室が構築し運用しているサーバは, 仮想専用サーバ (VPS) で OS は CentOS Stream 9, Web アプリケーション用のフレームワークとして Laravel を使用しており, 過去に設計した教材が実装され講座などで使用してきている。本年度の論理回路教材も同様に設計した Web アプリケーションをサーバ実装し, ユーザ情報の管理などの整備を行った。

(1) 作成した Web アプリケーションのアップロード

Web アプリケーションを GitHub のリモートリポジトリへアップロードし, サーバ上に pull し

た。そのため GitHub の再認証, サーバ側の .git ディレクトリに対する権限が増設のためディレクトリ所有者を変更, 等を行っている。

(2) ユーザ情報の管理

受講者はユーザ認証を経て Web アプリケーションへアクセスするが, ユーザ情報の管理は Laravel に搭載されている対話シェルの tinker を用いてきている。正課授業などでは同時アクセス数が増えるなど, 確実性の担保が必要となる。ユーザ認証機能にユーザ追加やパスワード管理の更新も行った。並行しユーザ情報の管理についてまとめ資料を作成し, 授業利用しやすくした。

(3) Web アプリケーションの動作確認

新たな教材とこれまで実装されている教材が並行して動作可能になるよう, 過年度の教材 Web アプリケーションとの干渉が生じないよう工夫した上で, 特に本年度使用の小学生向け教材については操作説明資料を用意した。

(4) ハードウェア連携とサーバ制御

サーバ上の教材 Web アプリと Raspberry Pi 間の通信プロトコルは, これまで実装されている教材の例と同様 WebSocket によるリアルタイム通信を用いる予定のところ, サーバ側からの暗号化された WebSocket Secure による通信の要求に対し, Raspberry Pi 側が WebSocket Secure で送信されたメッセージを受取る扱い容易な方法がなく, Raspberry Pi との連携はローカルで実施している。リアルタイム性を妥協しつつ, 別の通信プロトコルの使用を検討している。

5. 正課授業での使用, 講座の状況

4 章で述べた論理回路教材は, 筆頭著者が担当している情報工学科 2 年生の論理回路 I, 及び同学科 3 年生の論理回路 II, の正課授業で使用した。従来は座学と演習で行ってきた一部の内容を教材での学習に充てられるように教材を設計しており, また, 各授業日のスケジュールと課題のある範囲を, 「教材での確認」, によって完成にいたるよう継続的に指導を進めるなど, 年度当初から準備を行った。本研究室配属の社会実装班の 4 名は TA として参加し, 教材使用方法やサーバアクセスなどの指導をした。多重アクセスが原因と思われるフリーズが一部で生じたものの想定範囲で支障はなく, 4 章記述の Step 1 ~ Step 3 まで, 順を追って全員が完了, ハードウェア連携の観察

も含めることができた。アンケート結果では 90% が教材として適切である, 95% が興味を持った, 他, 自習でも使えるようにしてほしい, もっと授業内で使ってほしい, 手軽に回路動作が確認できて理解しやすい, などほとんどが前向きな意見であった。授業評価においても十分な効果がみられている。

例年と同様, 8 月の八王子市小学校科学教育センター講座では, サーバに置いた本研究室設計の HTML/CSS/JavaScript を使った Web ページ作り, C 言語入門, ネットワーク実験の教材を用いて実施し, 多くの小学生にネットワークとコンピュータの関わりを学んでもらい, 当日の受講者の取り組み状況だけでなく, アンケート結果も, 楽しかった, わかりやすかった, とともにほぼ 100% の好評を得た。中学生向け公開講座でも, コンピュータハード実験や C プログラミング導入の体験をしてもらい, 好評であった。

6. まとめ

平成 24 年より例年担当させていただいている八王子市小学校科学教育センター講座, 中学生向け公開講座, 本校正課授業, いずれも良い感想を得られており, 講座向けの教材とその実施方法はこれまで通り良好で, 正課授業では大いに効果が得られた。Web での情報生成と発信, ネットワークプログラミング・同期処理・排他制御, ルータ, WLAN/LAN の仕組み, トラフィック観測, 生成 AI, 通信とコンピュータシステムの基礎技術や回路設計, マイコン, など, 様々な要素が学べる教材となっている。

これらを含め, 本研究室では, 教材設計, サーバ実装やネットワークを用いた実施と試行を重ねながら, 高専生向け教材の開発を進め, 本年度は高専 2, 3 年生向けの論理回路教材を設計した。2 年生, 3 年生の正課授業で実際に使用し, 大いに学習効果が得られている。信号の流れとその変化が前提となる回路の学習において, 受講者が自分の設計をリアルタイムに確認し, 振り返りを繰り返す, また, 自らの操作に基づいて回路の変化を視認できる, いつでもどこでも学べるサーバ教材は大いに有用であり, そこに取り入れた段階学習, 複合的な理解, 理論と実験の同時習得, の要素は有意な効果をもたらしている。論理回路教材においては, 時間変化要素により柔軟性をもたせ, 多様な順序回路の生成ができるように, また, サー

バ～ハードウェア連携の完成, 同時アクセスの強化, などの発展設計に取り組んでいる。興味を持って自らの手で本物のシステムの実習ができる小中学校を対象とした講座など地域科学教育への貢献も行う。

謝辞

協力していただいた八王子市小学校科学教育センターの受講者や公開講座受講者, 先生方, 本校術室, 情報工学科 2 年生 3 年生及び関連各位に深謝致します。本研究の一部は JSPS 科研費 22K02905 及び 2024 年度国立情報学研究所公募型共同研究 (24S0105) の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 八王子市, <https://www.city.hachioji.tokyo.jp/kurashi/kyoiku/003/004/010/p004741.html> (last access 2024.11.28)
- 2) 田中, 土屋, 林, 中野, 小池, 酒井, 菅原, 仲林, 牧野, “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, 2015.
- 3) 田中晶, “小学生に向けたインターネット・プログラミング導入講座,” 信学技報 (ET), 118(294), 13-18, Dec. 2018.
- 4) 門脇, 小林, 安藤, 野崎, 木村, 林, 田中, 三谷, “小学生に向けたインターネット講座の考案と実施,” 第 4 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, pp.26-27, Dec. 2012.
- 5) 伊藤, 岡野, 青柳, 田中, 大塚, 林, “小学生に向けた体験学習によるインターネット講座,” 第 5 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, pp.44-45, Dec. 2013.
- 6) 岩田, 木下, 工藤, 坂本, 佐田, 西村, 益子, 山川, 田中, “小学生に向けたインターネット・プログラミング講座の実施,” 第 11 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, D125, Dec. 2019.
- 7) R6 年度八王子市小学校科学教育センター東京高専理科講座, https://www.tokyo-ct.ac.jp/news/20240920_02/ (last access 2024.11.28)
- 8) 出前授業, https://www.tokyo-ct.ac.jp/news/20230331_01/ (last access 2024.11.28)
- 9) 木下和渡, “学習体験に基づく Python による小学生向けプログラミング教材の研究,” R 元年度東京高専卒論, Mar. 2020.
- 10) 2022 年度 モバイル SINET 実証実験, <https://www.sinet.ad.jp/wadci/koubo2022-1> (last access 2024.11.28)
- 11) 田辺, 早瀬, 水落, 水上, 田中, “高専生向け論理回路教材の開発と実践,” 第 16 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, PI06, Dec. 2024.
- 12) 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て学習する創造的 ICT 教育プラットフォームシステムの開発,” 2022 年信学総大, D-15-2, 情シ論集 1, 85, Mar. 2022.
- 13) 田中晶, 丸山充, 漆谷重雄, 辻井利昭, “実ネットワークで学ぶオンライン創造的 ICT 教育システムの開発,” 2024 年信学総大, D-15-02, Mar. 2024.
- 14) 池田, 石田, 大越, 久保, 谷崎, 田中, “プログラミングを学ぶ学生自身が主体となる「小学生向けプログラミング講座」,” 第 12 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, T212, Dec. 2020.
- 15) 池田凜音, “高専新入生向けのプログラミング教材の研究,” R2 年度東京高専卒論, Mar. 2021.
- 16) 小泉夏椰, “高専新入生向けプログラミング教材の研究,” R2 年度東京高専卒論, Mar. 2021.
- 17) 河村, 土屋, 寺川, 本間, 三國, 田中晶, “小学生に向けたプログラミング教材の設計,” 第 13 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, T217, Dec. 2021.
- 18) 河村碧生, “高専生向けプログラミング教材の研究,” R3 年度東京高専卒論, Mar. 2022.
- 19) 杉本, 立山, 寺尾, 長濱, 森下, 新井, 仮谷, 須藤, 中村, 田中晶, “学生自身が主体となる「小学生向けプログラミング実習講座」,” 第 14 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, TA6-16, Dec. 2022.
- 20) 森下大輝, “高専新入生向けプログラミング教材の研究,” R4 年度東京高専卒論, Mar. 2023.
- 21) 中村悠哉, 坂本楓, 澤田昂佑, 清水皓介, 田井葵, 御子柴まりの, 田中晶, “小学生プロ

- グラミング・ネットワーク教材向け汎用教材サーバーの構築,” 2022 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, B6, 54, Mar. 2023.
- 22) 坂本, 澤田, 清水, 田井, 御子柴, 後藤, 田中,” 小中学生向けプログラミング講座とその教材開発,” 第 15 回大学コンソーシアム八王子学生発表会, TA2-02, Dec. 2023.
- 23) 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,” R5 年度東京高専卒論, Mar. 2024.
- 24) 田井葵, “共有メモリでつながる AI を用いたオンライン教材フレームワークの研究,” R5 年度東京高専卒論, Mar. 2024.
- 25) 文科省, “小学校プログラミング教育の手引 (第一版), ” https://www.mext.go.jp/content/20200214-mxt_jogai02-000004962_004.pdf (last access 2024.11.28)
- 26) 文科省, 新学習指導要領のポイント (情報活用能力の育成・ICT活用), http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/_icsFiles/afieldfile/2019/05/21/1416331_001.pdf (last access 2024.11.28)
- 27) 田中晶, “マルチホップ移動体無線通信の一検討,” 東京高専研究報告書, No. 43(2), pp.127-134, Mar. 2012.
- 28) 田中, 磯間, 金澤, 後藤, 新木, 鈴木, 田井, 細川, 御子柴, “高度マルチホップネットワークの拡張と統合の研究,” 東京高専研究報告書, No. 55, pp.68-77, Mar. 2024.
- 29) R6 年度公開講座(8月), https://www.tokyo-ct.ac.jp/news/20241004_01/ (last access 2024.11.28)

(2024年12月12日 受理)

複数の海洋生微生物に対する光感受性薬剤の毒性の変化

庄司良*, 山越湧馬*

光感受性薬物であるケトプロフェン (KTP) とその光分解産物が海洋性微細藻類 *Dunaliella salina* と甲殻類 *Artemia salina* に与える生態毒性を調査した。*Dunaliella salina* 生長阻害試験, *Artemia salina* 急性遊泳阻害試験, および共培養阻害試験を実施し, KTP およびその光分解産物の生物への影響を評価した。その結果 KTP とその光分解産物は *Dunaliella salina* と *Artemia salina* の両方に毒性を示した。さらに *Dunaliella salina* 存在による KTP の光分解速度の上昇が確認され, 毒性効果が増強された。これらの結果は水環境における薬物汚染が, 個々の種への影響を超えて, 生態系に影響を与える可能性を示唆している。

(キーワード: ケトプロフェン, 共培養, 微細藻類)

Changes in toxicity of photosensitive drugs to two kinds of marine microorganisms

Ryo SHOJI*, Yuma YAMAKOSHI*

This study investigated the ecotoxicity of the photosensitive drug ketoprofen (KTP) and its photodegradation products on the marine microalgae *Dunaliella salina* and the crustacean *Artemia salina*. We evaluated the effects of KTP and its photodegradation products on the two organisms. The results showed that KTP and its photodegradation products were toxic to both *Dunaliella salina* and *Artemia salina*. Furthermore, the presence of *Dunaliella salina* did not increase the photodegradation rate of KTP. The drug contamination in aquatic environments may have a certain impact on ecosystems beyond the effects on individual species.

(Keyword : ketoprofen, co-culture, microalgae)

1. はじめに

1.1. ケトプロフェン (KTP) の環境光分解性

近年, 医薬品およびパーソナルケア製品 (PPCPs) の使用量の増加に伴い, 水環境中における医薬品汚染が深刻な問題となっている¹⁾。特に, 非ステロイド性抗炎症薬である KTP はその高い光分解性と, その光分解産物による毒性増強が報告されており, 水生生物に一次生産者の藻類に対して強い影響を与える可能性がある。(図 1)

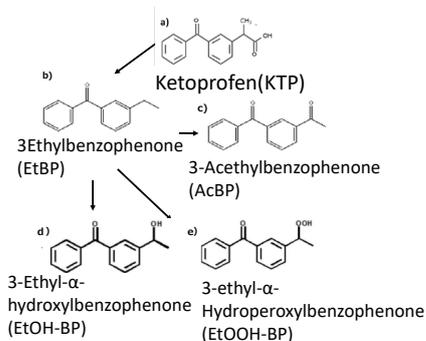


図 1 KTP とその光分解産物の構造

1.2. 医薬品の生態毒性試験の現状と課題

従来, 化学物質の毒性評価は, 単一生物種を用いた急性毒性試験が主流であった。しかしこの試験方法では水環境における複雑な生態系や光照射条件下での毒性変化を十分に考慮できていない。特に, 光分解性の高い物質である KTP の場合, 試験中の光照射条件によって毒性が大きく変動するため, 得られた結果は実際の環境における影響を正確には反映していない可能性がある²⁾。しかし遮光条件下では藻類阻害試験を実施することができないため, 明暗の制御が問題になる。試験の実施に際しては, 照明強度と時間を正確に記録することで, 反応速度の制御を行う必要がある。

多方, 甲殻類遊泳阻害試験は, 通常 16 時間明, 8 時間暗という証明条件で実施されることが多いが, 甲殻類の培養に際しては, 24 時間暗所でも特に問題なく可能であるため, 明暗の制御はそれほど問題にはならない。あらかじめ一定時間被験物質を溶解させた水溶液に光照射した後, 連続暗条件下で毒性試験を実施するなどすれば, 完全に反

* 物質工学科

応条件を制御できる環境下で実験が可能となるという利点はある。

1.3. モデルエコシステム

以上のような毒性試験は多くの場合単一の生物によるものとなっている。しかし、実際の環境中では複数の生物が食物連鎖を通して互いに関係をしている。その場合、食物連鎖では下位の生産者が毒性影響によって減少するとそれを捕食する上位の消費者に影響が出ることになる。また、被食者が蓄積した毒性物質によって、それを捕食する捕食者に毒性影響が出ることもある。そのため、捕食-被食関係を構築する複数生物によって共培養阻害試験を行うことで、さらに現実の環境に即した化学物質の生態系影響を評価することが可能になることが期待される。

1.4. 研究目的

本研究では、海洋生微生物に対する光感受性薬剤を用いた生態毒性の程度を調査することを目的として、捕食-被食関係にある微細藻類と甲殻類を用いた藻類生長阻害試験と甲殻類遊泳阻害試験および共培養阻害試験を行った。試験には、海水性微細藻類である *Dunaliella salina* と同じく塩水性甲殻類である *Artemia salina* を使用した。

この試験の結果を受け、単培養と共培養による毒性試験結果の際を考察することを目的として、被食者である *Dunaliella salina* を一定の曝露時間で捕食者である *Artemia salina* に給餌して、捕食者に対する毒性影響を確認する実験も実施した。また、光分解性のある医薬品を被験物質として選択したので、その分解反応を速度論的に解析することを目的として、LC-MS による機器分析を行なった。

2. 研究方法

2.1. *Dunaliella salina* 培養

本研究で取り扱う *Dunaliella salina* (NIES-2257) の飼育は、OECD 化学ガイドライン No.201 に準拠して実施した。培養液には、f/2 培地 (表 1) を採用し、希釈溶液として人工海水 (ダイゴ人工海水, 塩谷エムエス株式会社) を用いている。天然海水の代わりにダイゴ人工海水 SP を用いても、毒性試験については同様の結果が得られることを予備実験によって確かめてある。培養は水温 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$,

照明 24 時間明とした。

表 1 f/2 培地組成 (mg/L)

NaNO ₃	75.0	FeCl ₃	0.316
		・ 6H ₂ O	
NaH ₂ PO ₄	6.0	CoSO ₄	0.0012
・ 2H ₂ O		・ 7H ₂ O	
Vitamin B ₁₂	5×10^{-5}	ZnSO ₄	0.0021
		・ 7H ₂ O	
Biotin	5×10^{-5}	MnCl ₂	0.018
		・ 4H ₂ O	
Thiamine	0.01	CuSO ₄	0.0007
HCL		・ 5H ₂ O	
Na ₂ SiO ₃	10.0	Na ₂ MoO ₄	0.0007
・ 9H ₂ O		・ 2H ₂ O	
Na ₂ EDTA	0.44		
・ 2H ₂ O			

2.2. *Artemia salina* 孵化

ブラインシュリンプという商品名で熱帯魚等の餌として販売されている *Artemia salina* 耐久卵を f/2 培地にて、水温 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、照明 24 時間明条件下でエアレーションしながら孵化を行った。試験に用いた *Artemia salina* は、孵化後 48 時間以内のノープリウス幼生である。

2.3. 試験溶液の調製

本研究では光感受性薬剤として KTP (FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation, Osaka, Japan) を用いた。KTP はエタノール (特級, FUJIFILM Wako Pure Chemical Corporation, Osaka, Japan) に溶解後、f/2 培地で希釈し、最終濃度 0.01~100 mg/L となるよう調製した。なおエタノールの最終濃度は 100 mg/L とした。

2.4. *Dunaliella salina* 生長阻害試験 (72 時間)

Dunaliella salina 生長阻害試験は、OECD 化学ガイドライン No.201 に準拠して実施した。試験開始から 3 日前から前培養を行った。濃度区範囲は 0.01~100 mg/L および 0 mg/L (対照区) とし、前培養後の *Dunaliella salina* (10^5 cells/mL) に曝露した。また常に振とうさせ、照明は 24 時間明とした。試験開始から 24 時間おきに 72 時間後まで細胞数を記録し、生長阻害率を得た。*Dunaliella salina* の細胞数は血球計算盤を用いた計度に基づき、

Dunaliella salina の吸収波長である 680 nm を測定することで細胞数を算出した。以下に生長阻害率の算出方法を示す。

$$\mu = \frac{\ln N_n - \ln N_0}{T_n - T_0} \quad (1)$$

$$I_\mu = \frac{\mu_c - \mu_T}{\mu_c} \quad (2)$$

μ [h^{-1}]: *Dunaliella salina* の比増殖速度, N_n [cells/mL]: 試験終了時における細胞密度, N_0 [cells/mL]: 試験開始時における細胞密度, T_n [h]: 試験終了時間, T_0 [h]: 試験開始時間, I_μ [-]: *Dunaliella salina* の生長阻害率, μ_c [h^{-1}]: 対照区における比増殖速度, μ_T [h^{-1}]: KTP 溶液の各濃度区に対する比増殖速度を示す。

2.5. *Artemia salina* 急性遊泳阻害試験 (72 時間)

Artemia salina 急性遊泳阻害試験は, OECD 化学品ガイドライン No.202 に準拠して実施した。濃度区範囲は 0.01~100 mg/L および 0 mg/L 対照区とし, 生後 24 時間以内の *Artemia salina* (5 匹/30 mL) に曝露した。また常に振とうさせ, 照明は 24 時間明とした。試験開始から 24 時間おきに 72 時間後まで *Artemia salina* の個体数を記録し, 遊泳阻害率を得た。以下に遊泳阻害率の算出方法を示す。

$$I_S = \frac{N_I}{N_T} \quad (3)$$

N_I [匹]: 遊泳阻害数, N_T [匹]: 全体数, I_S [-]: *Artemia salina* の遊泳阻害率を示す。

2.6. 共培養阻害試験 (72 時間)

共培養阻害試験では 2.4., 2.5. と同様な試験条件で *Dunaliella salina* (10^5 cells/mL) と *Artemia salina* (5 匹/mL) 共存下で試験を実施した。試験開始から 24 時間おきに 72 時間後まで *Dunaliella salina* の細胞数および *Artemia salina* の個体数を記録し, 生長阻害率および遊泳阻害率を得た。また *Artemia salina* による捕食減少, KTP を含む *Dunaliella salina* を捕食することによる毒性増加を考慮した。その環境においての比増殖速度 μ と生長阻害率 I の算出方法を以下の (4)式と(5)式にそれぞれ示す。

$$\mu = \frac{(\ln(N_n + N_A * (1 - I_S)) - \ln N_0)}{T_n - T_0} \quad (4)$$

$$I_\mu = \frac{\mu_c - \mu_T}{\mu_c} \quad (5)$$

N_A [cells/mL]: *Artemia salina* に捕食される *Dunaliella salina* の細胞密度を示す。

遊泳阻害率の算出方法を以下に示す。

$$I_S = \frac{N_I - N_D}{N_T} \quad (6)$$

N_D : KTP を含んだ *Dunaliella salina* を捕食することで死亡する *Artemia salina* の個体数を示す。要するに捕食による被食者個体数の減少を表した物質収支式である。

2.7. KTP 溶液培養下 *Dunaliella salina* 給餌による *Artemia salina* 急性遊泳阻害試験(192 時間)

捕食による *Artemia salina* 急性遊泳阻害試験は 2.5. と同様な条件で KTP 溶液にて培養した *Dunaliella salina* を給餌することで試験を実施した。濃度区範囲は 0.01~100 mg/L および 0 mg/L (対照区) とし, 試験開始 24 時間前から培養した *Dunaliella salina* を試験開始から 24 時間おきに 10^5 cells/mL 加えた。試験開始から 24 時間おきに 192 時間後まで *Artemia salina* の個体数を記録し, 遊泳阻害率を得た。(3)式より遊泳阻害率を算出した。また試験後の *Artemia salina* の腹部を顕微鏡にて観察することで捕食を確認した。

2.8. LC-MS による KTP の分解産物の定量

実験には, 試験開始 3 日前から前培養を行い, 24 時間連続照明下で振とう培養した *Dunaliella salina* を用いた。試験溶液として, 10 ppm の KTP 溶液および 10^5 cells/mL の *Dunaliella salina* を添加した 10 ppm の KTP 溶液を調製し, 実験に用いた。KTP およびその光分解産物の時間変化を調べるため, 試験開始から 24 時間おきに 72 時間後まで LC-MS (6495C, Agilent) を用いて, 代謝物も含めて定量分析を行った。

3. 結果

3.1. 単培養および共培養下生長阻害率の比較

単培養および共培養下での *Dunaliella salina* の

生長阻害率と試験溶液に使用した KTP 溶液の濃度関係を単培養および共培養での *Dunaliella salina* に対する KTP と光分解産物の用量作用曲線 (図 2) に示す。図 2 より単培養では EC₅₀ は 1.1 ppm, 共培養では 1.0 ppm となり同条件下ではほぼ同程度の毒性を受けたことが示唆された。EC₅₀ は試験物質が 50%の生物学的効果を示す濃度であり、本実験において藻類の増殖や甲殻類の遊泳を 50%阻害する濃度に対応する。

(4) 式を用いて *Artemia salina* に捕食されることによる *Dunaliella salina* の減少を考慮した結果、*Dunaliella salina* の増殖阻害は KTP およびその光分解産物の毒性が主要な原因であると考えられる。このことから、本実験条件下では *Dunaliella salina* 個体群に対する *Artemia salina* による被食圧は、KTP の毒性影響に比べて小さいと考えられる。

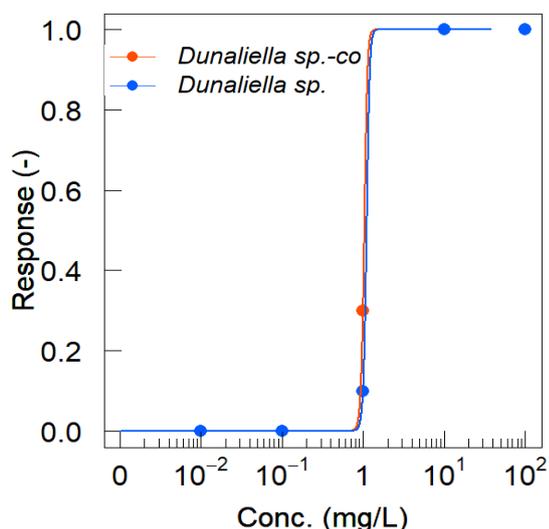


図 2 単培養および共培養での *Dunaliella salina* に対する KTP と光分解産物の用量作用曲線 (co : 共培養下で実施)

3.2. 単培養および共培養下遊泳阻害率の比較

単培養阻害試験および共培養下での *Artemia salina* の遊泳阻害率と試験溶液に使用した KTP 溶液の濃度関係を単培養および共培養での *Artemia salina* に対する KTP と光分解産物の用量作用曲線 (図 3) に示す。図 3 より単培養では EC₅₀ は 5.5 ppm, 共培養では 0.9 ppm となり単培養より共培養のほうがより毒性が大きくなったことが示唆された。また共培養における 72 時間後の遊泳阻害率は (6) 式を用いて評価した。この結果から、*Dunaliella salina* の捕食による影響は小さく、KTP およびその光分解産物の毒性が *Artemia salina* の

遊泳阻害の主要な原因と考えられる。

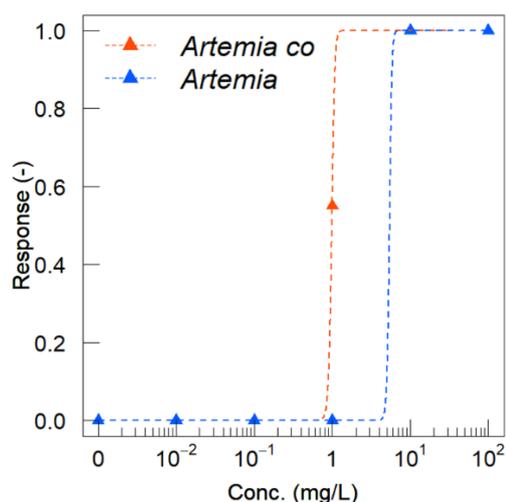


図 3 単培養および共培養での *Artemia salina* に対する KTP と光分解産物の用量作用曲線 (co : 共培養下で実施)

3.3. 単培養および共培養の比較

図 2 および図 3 の結果から、単培養において *Dunaliella salina* が *Artemia salina* よりも KTP に対して高い感受性を示した。しかし共培養では両者の感受性がほぼ同等となった。この結果は、単細胞藻類である *Dunaliella salina* が多細胞性である *Artemia salina* よりも一般的に KTP などの化学物質に対して感受性が高いという知見と一致する³⁾、共培養において *Artemia salina* の感受性が低下した原因として、KTP に曝露された *Dunaliella salina* を捕食および *Dunaliella salina* の存在による KTP の光分解速度の変化が複合的に作用した結果のいずれかであると考えられた。

3.4. KTP 溶液培養下 *Dunaliella salina* 給餌による *Artemia salina* の遊泳阻害率

KTP 溶液培養下での *Dunaliella salina* を給餌とした *Artemia salina* の遊泳阻害試験を実施した。その結果、KTP 溶液培養下 *Dunaliella salina* 給餌による遊泳阻害の用量作用曲線 (図 4) より通常の急性遊泳阻害試験の曝露期間である 0~72 h では KTP による有意な遊泳阻害は認められなかった。しかし試験時間を延長し、144 h 以降では遊泳阻害が確認され、曝露時間 144, 168, 192 h での EC₅₀ はそれぞれ 48.3, 8.97, 6.31 mg/L となった。EC₅₀ は時間経過とともに低下し、KTP の亜急性毒性が時間依存的に増強することを示唆する。

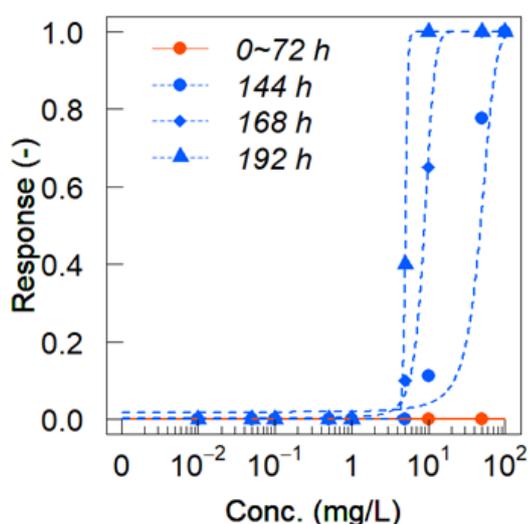


図4 KTP 溶液培養下 *Dunaliella salina* 給餌による遊泳阻害の用量作用曲線

4. 考察

図4で示した144時間以降の半数致死濃度 EC_{50} をKTP濃度とみなして、あえて一次反応の反応速度式を表す(7)式で整理すると、反応速度定数 k は 0.042 h^{-1} となる。この時の相関係数 R^2 は 0.960 であり、数学的にはロバストな回帰計算といえる。

$$EC_{50} = EC_{50,0} * \exp(-kt) \quad (7)$$

ここで、 $EC_{50,0}$ は曝露時間 0 h の時の半数致死濃度 (mg/L)、 k は反応速度定数 (h^{-1})、 t は時間 (h) を表す。 $EC_{50,0}$ は曝露直後の半数致死いわば即死を仮定した濃度ということになるが、あくまでも数学的に導出された便宜的な数値であり、その絶対値に大きな意味は持たない。そもそも次元が同じであるからといって、通常の化学物質の濃度と同じ取り扱いを EC_{50} にして良いかどうか、慎重に考察する必要がある。とはいえ、毒性発現という生化学反応を反応工学的に解析することで、複雑な毒性発現メカニズムを数学的に明確な表現を試みる研究は例えばBLM(Biotic Ligand Model)など数多くあり、重金属の毒性の予測などに高い精度を示している例もある⁴⁾。

一方、KTPの光分解について、*Dunaliella salina* の有無の両条件で、同じ一次反応とみなして分解

反応の速度論的な解析を行なったところ、*Dunaliella salina* の有無に関わらず、その反応速度定数は 0.026 h^{-1} となった。つまり、毒性の増加とKTP分解は同程度のオーダーでの時定数で変化する現象であったことが明らかとなった。このような毒性の時間依存性に関する研究は数多くあるが、単純な一次反応モデルで毒性の経時変化を表現している例が多い⁵⁾。複雑な体内コンパートメントモデルなどの運命予測モデルを適用しなくても、実用上は十分な精度で毒性の時間変化を予測することは可能である。

また、本研究では緑藻類と甲殻類を単独または共存させて培養し、毒性試験をおこなった。これは模擬的に小さい食物連鎖を再現し、それによる毒性影響の伝搬を見るという意図も狙ったものであった。その場合の捕食者であった *Artemia salina* の毒性影響については、被食者である *Dunaliella salina* を共存させた場合でも、補食による毒性の増強は認められなかった。一般に、本研究における共培養のような模擬的な小さな生態系を再現して毒性試験を実施する生態毒性試験として、マイクロゾウム試験がある⁶⁾。本研究は2種類の生物の共培養阻害試験にとどまったが、さらに多くの生物を毒性試験に用いることで、現実的な生態系を模倣することも可能になる。曝露する化学物質によっては、単一の生物を用いた場合の毒性値に比べて圧倒的に大きな毒性を上位の捕食者に発現することもある。

KTPの*Dunaliella salina*への取り込みは、精度の高い定量が求められるため現時点では実現できていない。一般に生物への化学物質の取り込みは、ミカエリスメンテン式で整理されることが多い⁷⁾。低濃度領域では取り込み量は濃度に比例するが、一定以上の高濃度では取り込み量は飽和に到達する。本研究でのKTP曝露濃度(10 ppm前後)では、一定程度の取り込みがなされているものと判断している。取り込まれたKTPまたは細胞表面に付着しているKTPが上位捕食者へ144時間以上の曝露時間を経て毒性発現に至ったが、その間も生物学的な代謝は受けていると考えられる。Ismailらも微細緑藻類である*Chlorella sp.*によるケトプロフェンの代謝に関する研究を実施し、暗所でも41%の減少が認められたと報告している⁸⁾。

今後、取り込まれたKTPまたは細胞表面に付着しているだけのKTPも含めて、それらの組成やその後の移動について、詳細な機器分析によって明

らかにすることで、生物間の相互作用や物質循環が複雑に絡み合う生態毒性を明らかにすることが可能になる。

5. 結論

本研究では KTP およびその光分解産物が微細藻類 *Dunaliella salina* および *Artemia salina* に対して毒性を示すことを明らかにした。特に共培養において KTP の光分解が促進され、その毒性効果が増強されることが示唆された。これらの結果は水環境における薬剤汚染が単一の生物種だけでなく、生態系全体の機能に影響を与える可能性を示唆するものである。従来 of 生態毒性評価は単一の生物種を用いて単培養で行われることが多かったが、本研究の結果はより現実的な生態系を模倣した共培養系での評価の重要性を示唆している。共培養で生物間での相互作用や物質循環が複雑に絡み合い、単培養では予測できない毒性効果が表れる可能性がある。

謝辞

本研究の一部は、東京高専社会実装研究センターの分析装置 (Agilent LC-MS) を用いることで得られた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Huan Wang, Mingkang Jin, Wenfeng Mao, Cijia Chen, Linya Fu, Zhe Li, Shaoting Du, Huijun Liu, Photosynthetic toxicity of non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) on green algae *Scenedesmus obliquus*, *Science and Total Environment*, Vol. 707, 136176, 2020 年
- 2) Lixiao Wang, Yajie Zheng, Yiran Zhou, Junhe Lu, Jean-Marc Chovelon, Yuefei Ji, Aquatic photolysis of ketoprofen generates products with photosensitizing activity and toxicity, *Water Research*, Vol. 210, 117982, 2022 年
- 3) Mennillo Elvira, Arukwe Augustine, Monni, Gianfranca, Meucci Valentina, Intorre Luigi, Pretti, Carlo, Ecotoxicological properties of ketoprofen and the S(+)-enantiomer (dexketoprofen): Bioassays in freshwater model species and biomarkers in fish PLHC-1 cell line, *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 37, 201-212, 2018 年
- 4) 庄司良, 生物結合モデルに基づく土壌環境中の重金属の陸生植物に対する有害性予測, *日本環境毒性学会誌*, vol. 26, S1-S12, 2023 年
- 5) Ayumi Hatano, Ryo Shoji, A new model for predicting time course toxicity of heavy metals based on Biotic Ligand Model (BLM), *Comparative Biochemistry and Physiology C-Toxicology & Pharmacology*, vol. 151, 25-32, 2010 年
- 6) 村上 和仁, 鮫島 正一, 稲森 隆平, 類家 翔, 稲森 悠平, 徐 開欽, 西村 修, マイクロコズムを活用した環境リスク評価技法の開発と戦略的展開, *日本水処理生物学会誌*, vol. 58, 93-105, 2022 年
- 7) Hiroki Nakanishi, Ryo Shoji, Misao Itouga, Hitoshi Sakakibara, Application and Comparison of two biotic ligand models predicting copper toxicity and accumulation in heavy metal tolerant moss, *Journal of Water and Environment Technology*, vol. 8, 339-345, 2010 年
- 8) Maha M Ismail, Tamer M Essam, Yasser M Ragab, Fathia E Mourad, Biodegradation of ketoprofen using a microalgal-bacterial consortium, *Biotechnology Letters*, vol. 38, 1493-1502, 2016 年

(2024年12月10日受理)

小中学生を対象とした公開講座 「光電融合を用いたエネルギー変換」の実施と評価

熊澤匠真*, 松岡敏*, 新田武父**, 庄司良***

近年, 地球温暖化や地球資源の枯渇問題に対して, 自然エネルギーの活用が注目されている。私たちは, 発光デバイスとして一般的に用いられている発光ダイオード(LED: Light Emitting Diode)を発電デバイスとして利用し, 光電融合技術への応用を考えた。また, 光電融合を用いたエネルギー変換回路の製作をし, その回路を用いて小学生や中学生に対して「電気エネルギー変換」の公開講座を行った。参加者からは講座内容への評価も高く, また電気エネルギー変換への興味も高かった。

(キーワード: ものづくり, 公開講座, 自然エネルギー, LED, 電気エネルギー変換, 光電融合技術)

Lecture for Elementary and Junior High School Students Implementation and evaluation of “Energy Conversion Using Photonics-Electronics Convergence”

Takuma KUMAZAWA*, Satoshi MATSUOKA*, Takenori NITTA**, Ryo SHOJI***

In recent years, the use of renewable energy has been attracting attention in order to solve the problems of global warming and the depletion of fossil fuels. We are using light-emitting diodes (LEDs), which are commonly used as light-emitting devices, and are now also being explored as power generation devices, particularly in the context of photonics-electronics convergence technology.

We developed an energy conversion circuit using photonics-electronics convergence, and used the circuit to hold an open lecture on "Electrical Energy Conversion" for elementary and junior high school students. Participants gave the course high marks and showed great interest in electrical energy conversion.

(Keywords: Manufacturing, Open Lecture, Renewable Energy, LED, Electrical energy conversion, Photonics-Electronics Convergence Technology)

1. はじめに

近年では温室効果ガスの増加に伴い, 地球温暖化や地球資源の枯渇が深刻な問題とされている。そこで自然エネルギーの活用が注目されている。自然エネルギーを用いた発電を用いることのメリットは以下の点が挙げられる。

- 枯渇の心配がない
- 地球温暖化対策になる
- 日本の地形と相性が良い
- 緊急時の電源となる

2022 年時点で, 自然エネルギーを用いた発電は全体の発電量の 24.6%を占めている。この中でも太陽光発電は比較的身近な発電方法である。太陽光発電の割合は年々増加しており, 2022 年度には全体の発電量の 10.6%に達している。しかしなが

ら FIT(Feed In Tariff), FIP(Feed In Premium)制度が導入され, コスト回収の目途が立ったものの, 依然として初期費用が高いことが問題点となっている。

FIT, FIP 制度¹⁾とは, 太陽光発電により発電した電力を電力会社が買い取ってくれるシステムである。本制度での買取期間は 10 年から 20 年となっている。これは太陽電池の寿命を考えた際の発電可能年数に基づいているものである。FIT 制度では期間内は 1kW 当たりの固定価格で電力を買いとられるのに対し, FIP 制度では市場価格に連動する。しかし FIP 制度は一般家庭の太陽光発電にはあまり適用されないため, FIT 制度が主に利用される。この制度を活用しても, 初期費用の回収には一般的に 10 年程度かかるといわれている。

* 教育研究技術支援センター ** 電子工学科 *** 物質工学科

以上を踏まえると、現在必要とされているのは安価で長寿命な発電素子である。ここで、身近な素子である発光ダイオード(LED: Light Emitting Diode)は安価で長寿命、低消費電力のデバイスとして広く知られている。そこで、このLEDが発電素子として活用できれば、応用の可能性が広がるが、現状ではLEDを用いた発電に関する研究は盛んにおこなわれているわけではない。

そこで、LEDを発電素子として応用する取り組みとして、光電融合²⁾を用いたエネルギー変換回路の製作を行い、その回路を用いてエネルギー変換講座を行ったので報告する。

1.1. LEDの発光原理

LEDはpn接合半導体に順方向電流を流すことにより、少数キャリアとして存在する電子と正孔が再結合し、そのエネルギーを光として放出する過程で発光する。

再結合には、発光を伴う発光再結合と、発光を伴わない非発光再結合がある。LEDは、前者の発光再結合により発光する。

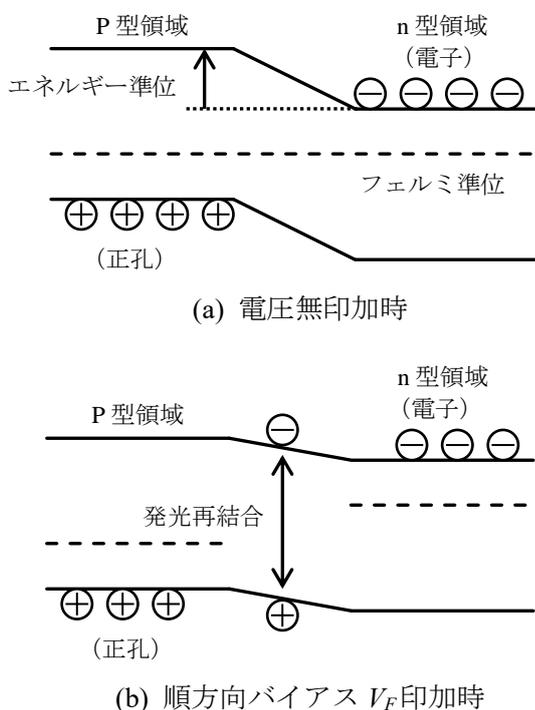


図1 LEDの発光機構

p型半導体では電子が、n型半導体では正孔が少数キャリアとなる。この時、キャリアの濃度の不均一性からキャリアの移動が発生する。しかし、図1(a)の電圧無印加時では、エネルギー障壁が存

在し、この移動は起こらない。

一方、図1(b)に示すように外部から順方向電圧 V_F を加えると、pn接合のエネルギー障壁が低くなり、n型半導体からp型半導体へ電子が、p型半導体からn型半導体へ正孔が流れ込む。このキャリアの移動による電流を拡散電流と呼ぶ³⁾。

キャリアの移動により、バンドギャップ(禁制帯)を超えてキャリアが発光再結合するとき、そのエネルギーに伴う光が発生する。再結合の前後のエネルギー差を ΔE とし、発生する光の式は(1)を満たす。

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

プランク定数 h 、光速 c 、光の波長 λ であり、 c/λ は光の周波数を示す⁴⁾。

この式より ΔE が大きくなると波長 λ の短い光が発生することがわかる。つまり、発光に必要なエネルギーと波長は反比例の関係となっている。

1.2. 太陽光発電

太陽光発電システムの入力エネルギーとなるのは日々不規則に変化する日射エネルギーである。一瞬の日射エネルギーの強さを日射強度といい、積算量を日射量という。太陽光発電⁵⁾は太陽光を利用して発電する方式であり、この日射強度や日射量の影響を受ける。

光エネルギーを電気エネルギーに変換するデバイスとして太陽電池が用いられている。

一般的に太陽光発電デバイスの材料として普及しているのは結晶シリコン系である。そのほかにも様々な種類の太陽電池があり、用途や設置環境により特徴を活かしたものが用いられている。

太陽光発電システムの発電原理は、図2に示すように、大きなpn接合半導体と見ることができ、ここに光が照射(光エネルギーが入力)されると、pn接合面の電子と正孔が、それぞれ電子がn型半導体側に、正孔がp型半導体側に弾き出される。その後、電極に負荷抵抗が接続されているため、電子がp型半導体へ移動し、電流が流れ起電力が発生する。このようにpn接合半導体などの整流作用を持つ半導体に、バンドギャップ以上のエネルギーを持つ光を照射したとき、起電力が発生する現象を光起電力効果という。

太陽光発電システムはこの光起電力効果を利用して発電を行っている。

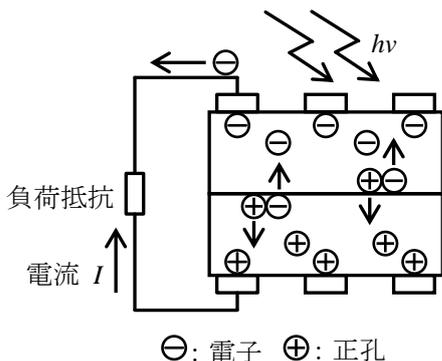


図2 太陽光発電の発電原理概略図

2. 光電融合技術

現在、デバイスの内部回路は電気信号で動作しているが、光電融合技術⁶⁾では、電気信号だけではなく光信号も加わり、電気と光の両方で信号伝達や情報処理を行う(図3参照)。この技術は、光が電気エネルギーに比べ消費電力が小さいという特徴を活かし、省電力化(発熱が少ないなど)が期待されている。

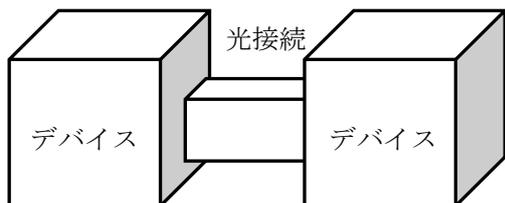


図3 光電融合のイメージ

3. 光電融合を通して体験するエネルギー変換講座

小学校学習指導要領(電気の利用)⁷⁾の中で、小学校6年生が理科で学ぶ「電気から電気以外のエネルギー(電気以外のエネルギーから電気への変換)」に関する項目をもとに、エネルギー変換に関する講座を企画した。現在、消費電力問題を抑える一つの技術として、省電力化を実現すると期待され、開発が進められている「電気と光を組み合わせる光電融合技術」を題材に取り入れることにより、紹介程度ではあるが新しい技術に触れることができる講座とした。光電融合をテーマにすることにより、小学生だけでなく、中学生を含む広い年代層にも興味を持ってもらえるのではないかと考え、講座を実施した。アンケート結果から得られた評価を基に、講座の内容を分析した。図4に講座の様子を示す。



図4 講座の様子

3.1. デモンストレーション回路の製作

講座内の説明時や工作後のデモンストレーション用に製作した回路を図5(a), (b)に示す。図5(a)の回路では、メロディーICからの電気信号がLED送受信部⁸⁾を通じて光信号に変換され、その後スピーカーから再生される。図5(b)では、Scratchを使用してプログラミングした音階信号が光変換部を通り、スピーカーから音出力される回路を示している。使用したことのあるScratchとの関連を持たせることで、ものづくりへの興味を引き出すことを狙った。

デモンストレーション用として、光変換部にLEDを使用し、電気信号がLEDの点滅により光に変換され、再び元の電気信号に戻る様子を視覚的に確認できるよう工夫をした。これにより、光電融合によるエネルギー変換が視覚的に体験できるようになっている。



(a) 説明用回路 (b) Scratchによる使用例
図5 LEDを用いたデモンストレーション回路

光電融合を視覚的に確認できるよう、光変換部に使用するLED送受信の組み合わせを最適化するための測定回路を図6に示す。得られた図7の開放電圧特性、図8の短絡電流特性を基に最適な組み合わせを検討した。

照射 LED としては、青色(467nm)、緑色(525nm)、黄色(590nm)、赤色(625nm)の 4 色を使い波長による受光 LED(青、緑、黄、赤)の出力変化を調べた。LED 間の距離を 8mm に設定し、電源電圧 5V に固定、発光 LED の照度は 4.3klx~4.5klx に調整して測定を行った。短絡電流の測定は、点 a, b 間にトランスインピーダンスアンプ回路(TIA)⁹⁾を接続して測定を行った。

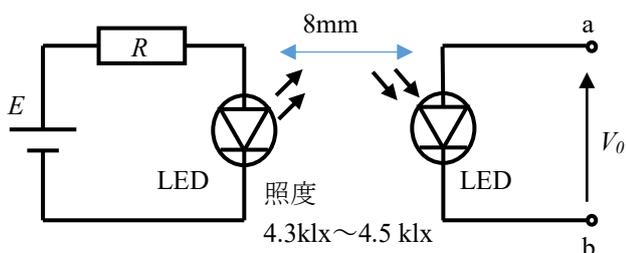


図 6 測定回路

LED の選定において注目したのは、開放電圧特性および短絡電流特性である。特に、照射波長 625nm 時に赤色 LED が自波長によく反応し最も電流が流れる特性を示した。このため短い照射距離であれば、LED 照度のみに反応し、十分な受光電力が得られると判断し、安価に入手可能な赤色 LED を送受光用として使用することとした。

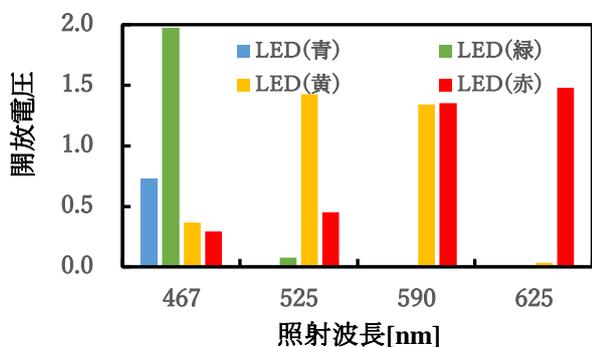


図 7 照射波長に対する LED 開放電圧特性

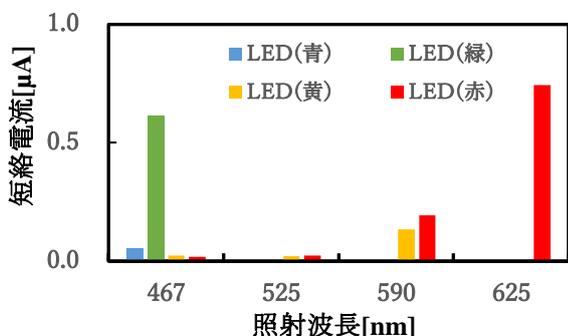


図 8 照射波長に対する LED の短絡電流特性

3.2. 講座の流れと製作回路

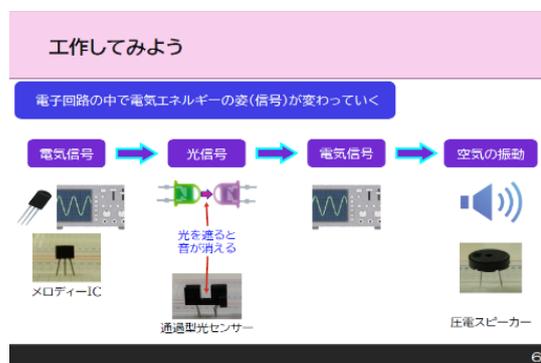
本講座は、保護者同伴であれば未就学児から中学 3 年生までの幅広い年代を対象に開講したが、メインターゲットは小学校高学年とし、準備を始めた。講座の開催時間は、小学校の授業時間と同じ 45 分とし、説明時間を 10 分から 15 分、ハンダ付け作業時間を未経験者の指導からトラブル対応を含めて 25 から 30 分以内で終了できるように設定した。

当初は、デモンストレーション回路と同様に LED を用いた回路構成を考えていたが、作業時間内での終了は難しいと考え、代用品として赤外発光ダイオードとフォトトランジスタが 1 つのパッケージとなっている透過型フォトセンサ (Panasonic CNZ1023) を用いて回路を簡素化した。これにより、部品数を減らし、ハンダ付け箇所を大幅に減らすことができ 25 分以内での作業を終えることが可能となるようにした。

図 9(a), (b) に使用したテキストの一部を抜粋し、図 10 には講座内で製作する回路を示す。講座では、次々とエネルギーが姿を変えながら電気が作られていくことを学び、光を題材とした回路製作によって、実際にエネルギーが変換する様子を体験してもらうことを目的としている。



(a) 電気以外のエネルギーから電気への変換説明



(b) 製作回路の説明 (光電融合の体験)

図 9 講座テキストの抜粋

熊澤, 松岡, 新田, 庄司:

小中学生を対象とした公開講座「光電融合を用いたエネルギー変換」の実施と評価

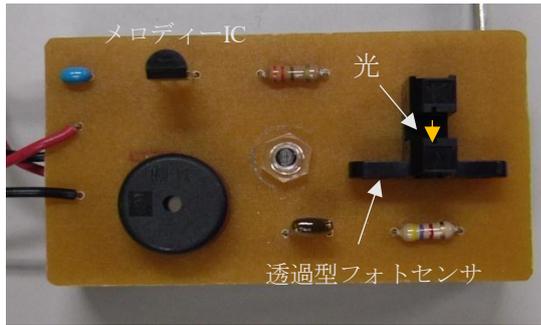
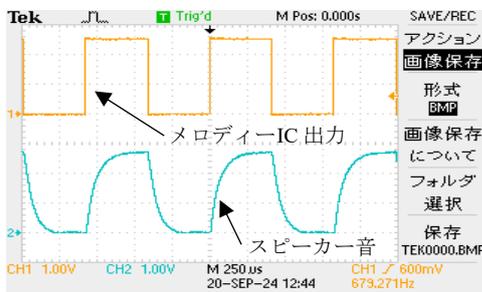
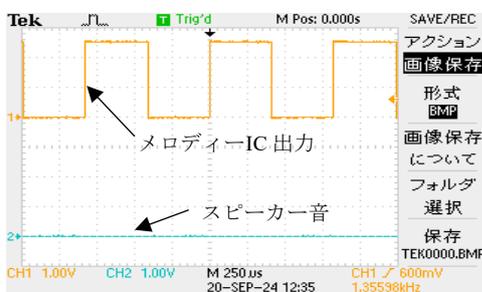


図 10 製作回路

図 11 による回路の動作波形からも確認できるように、透過型フォトセンサでは光が通過できる状態で、図 11(a)のようにメロディーIC の電気信号がスピーカー音として出力される。一方、光の通り道を厚紙などで遮断した状態では、図 11(b)の波形のようにスピーカーから音が出力されない。これにより、電気信号が光信号に変換していることが確認できる。光電融合という新しい技術に触れることで、電気エネルギーは電気以外のエネルギーにも変換し、また変換したエネルギーは再び電気エネルギーに戻すことができるということを、受講者が体感できたのではないかと考えている。



(a) 光通過時の信号波形



(b) 光遮断時の波形

図 11 製作回路の動作波形

3.3. アンケートによる評価

本講座のメインターゲットとして設定した小学校 5, 6 年生(以下、「小学校高学年」という。)に対して講座内容は適切であったか、また本講座に参加した他の学年にも有意義なものとなっていたか客観的に評価するため、講座受講者にアンケートを実施した。図 12 に受講者の学年分布を示す。

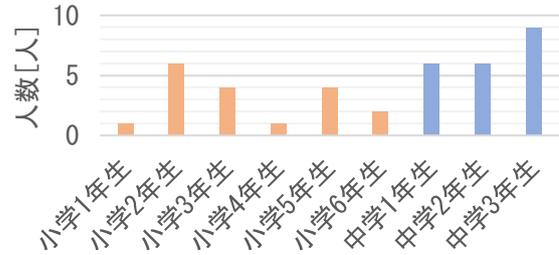


図 12 受講者学年分布

アンケートは受講者 39 名から回答が得られた。受講者を学年別の割合で見ると、小学校 1 年(3%), 小学校 2 年 (15%), 小学校 3 年 (10%), 小学校 4 年(3%), 小学校 5 年(10%), 小学校 6 年(5%), 中学校 1 年 (15%), 中学校 2 年 (15%), 中学校 3 年 (23%) となった。メインターゲットを小学校高学年としていたもの、東京工業高等専門学校(以下、「本校」という。)の学校説明会と併せて開催された影響もあり、中学生の参加者が計 21 名と半数以上を占めていた。

今回の講座は小学校高学年を主要な対象としていたが、本校の講座が開催される時期は受験生を対象とした学校説明会と同時に行われることが多く、今回もその形式で実施された。そのため、「光電融合」の解説を製作と組み合わせることで中学生においても興味を引く内容に工夫した。その工夫の効果についてもアンケート評価を通じて確認していく。

また、全体の 26 名(約 67%)が男性、13 名(約 33%)が女性で、男性が約 7 割を占めていた。メインターゲットの小学校高学年に限ると 6 名が受講し、男女比は全体と同様に男性が約 7 割であった。アンケートの自由記述欄から、一部の受講者が講座を受講する際に男女比を気にしていることがわかった。工学系の講座として一定の関心が得られている一方で、講座内容以外の点で受講しづらさを感じていることが示唆された。こうした点については、今後の講座運営で改善を図る必要が

あると考える。

講座アンケートの評価結果では、受講者全体のデータとメインターゲットである小学校高学年のデータを比較し、メインターゲット層における講座理解や評価を詳細に分析していく。

3.4. アンケートによる理解度調査

本講座では、小学校の指導要領に沿い、エネルギー変換について電気エネルギーを題材に解説している。講座内で行った説明や製作を通じ、受講者がどの程度理解し認識できたかを確認するため、製作中に出てきた現象や原理についても問いを設け、確認した。

具体的には、水力発電、太陽光発電、風力発電、地熱発電、潮力発電を取り上げ、それぞれの特徴を説明している。さらに、講座内容の理解度を確認するため、アンケートで各発電方法について知ることができたかを尋ねた。

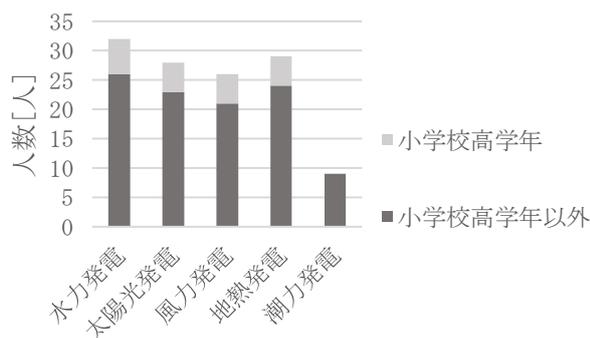


図 13 発電の習得人数

図 13 のグラフは、各発電方法について認知できた人数を小学校高学年とその他の学年で分けてまとめたものである。小学校高学年の回答の中で他の学年と異なる点は、潮力発電の認知度が低かったことである。講座内で口頭での説明は行ったものの、潮力発電は他の自然エネルギー発電方法に比べて一般的ではないため、理解が難しかったと考えられる。また、発電方法の種類に加え、発電プロセスにおいてさまざまなエネルギーが電気エネルギーへ変換される仕組みについても説明し、これが理解できたかアンケートで確認した。

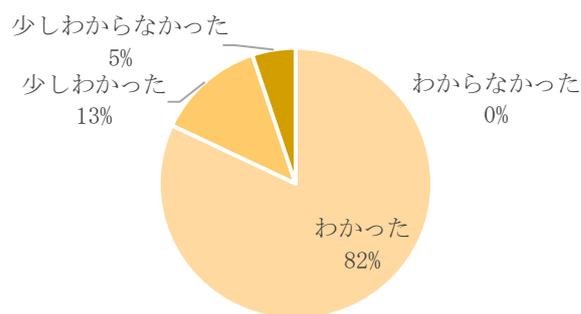


図 14 発電についての理解度

図 14 に示すように、4 段階評価の回答結果では 9 割以上の受講者から「理解できた」という回答が得られた。特に、小学校高学年と中学生の計 27 名全員が「わかった」との回答が得られた。

今回メインターゲットとしていた小学校高学年以上には「電気以外のエネルギーから電気エネルギーを作れること(発電)」を理解してもらうことができたと考えられる。

さらに、エネルギー変換の応用例として、発電だけではなく、電気エネルギーを光エネルギーに変換し、さらにその光エネルギーを電気エネルギーへ再変換するプロセスについても、回路製作や解説を通じて体験してもらった。この技術の応用例として、光電融合技術の一つである光ファイバーを用いた光通信についても説明した。また光電融合に関する理解度も確認した。

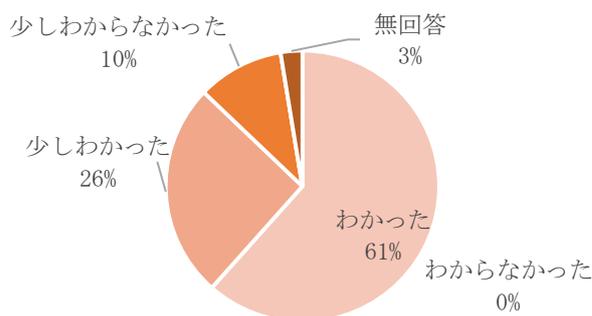


図 15 光電融合についての理解度

発電についての理解度に関するアンケート回答と比較すると、図 15 に示すように光電融合についての理解度のアンケートでは「わかった」と回答した割合が全体で約 6 割に留まり、「少しわか

熊澤，松岡，新田，庄司：

小中学生を対象とした公開講座「光電融合を用いたエネルギー変換」の実施と評価
 らなかった」という意見が増えた。小学校高学年や中学生の計 27 人の回答を見ると、22 人が「わかった」と回答したが、5 人は「少しわかった」と回答しており、発電についての理解度よりも若干低い 8 割程度という結果となった。このことから本講座の工夫点である「光電融合の解説」をすることで中学生以上の受講者にも新たな知識の提供ができたと考えられる。

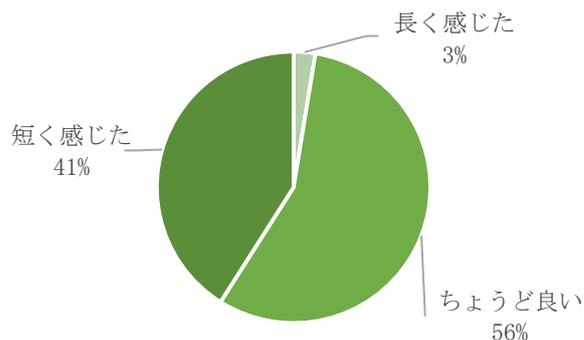


図 17 講座の時間

時間配分については、図 17 のように 3 段階評価「長く感じた」、「ちょうど良い」、「短く感じた」とした。半数以上の受講者が「ちょうど良い」と答えた。はんだ付けの個人作業が多かったためか、講座時間が長いと感じた受講者は少なかった。逆に、時間が短く感じた受講者は 4 割以上となった。

本講座では、説明、作業、回路動作確認のように講座内の時間を段階的に分けて実施した。メインターゲットが小学校高学年であることを考慮し、講座開始時の説明は比較的短めに行った。その分、作業中には受講者 2 人に対して 1 人の説明員を配置し、受講者からの質問にその場で対応できるようにした。複数の説明方法を取り入れた中で、説明がわかりやすかったかどうかを調査した。

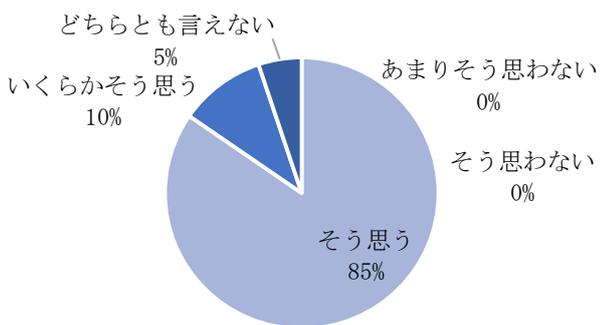


図 16 講座内容への興味

図 16 のように全体として、「そう思う」や「いづらかさ思う」といった、少しでも興味を持ったと答えた受講者は全体の 9 割以上に達した。また、「そう思わない」や「あまりそう思わない」と言った興味を持たなかった受講者は一人もいなかった。さらに「どちらとも言えない」と回答した受講者の多くは、小学校 3 年生以下であった。メインターゲットよりも低い学年の受講者は、難易度が高いためか、興味を持てなかったことが考えられる。

本講座の時間は、前節でも触れたように小学生の 1 コマの授業時間である 45 分を基準に説明、作業、回路動作確認の順で時間を区切って実施した。この時間配分に対して評価を得た。

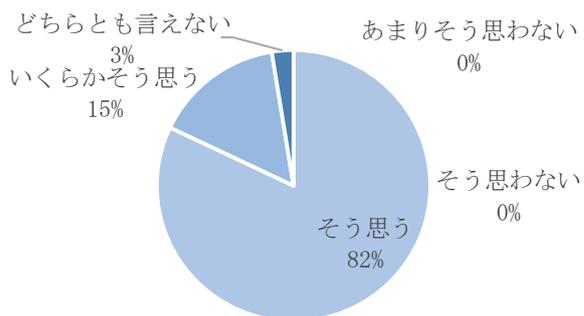


図 18 説明のわかりやすさ

結果として、図 18 に示すように、8 割の受講者が「わかりやすかったですか？」という質問に対して「そう思う」と回答した。「そう思わない」と回答した受講者はいなかった。また、「どちらとも

言えない」と答えた受講者は、メインターゲットよりも低い学年の受講者であった。講座の難易度についても調査を行った。

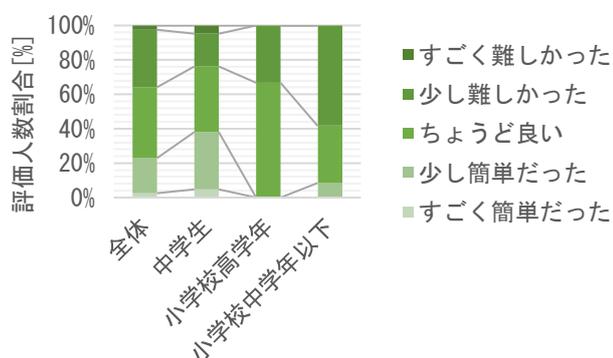


図 19 講座の難易度

図 19 は、受講者全員、受講者の中で中学生以上、小学校高学年、小学校高学年未満のグループに分け、各グループでの回答割合を示している。メインターゲットの小学校高学年の受講者の半数以上が「ちょうど良い」と答え、他の回答者も「少し難しかった」といった意見であった。この結果から、小学校高学年をターゲットとした講座として、難易度は適切であったと考えられる。

また、中学生の受講者の 38% が「ちょうど良い」と評価し、33% が「少し簡単だった」、19% が「少し難しかった」と評価した。これにより、「光電融合」など普段耳にしない技術の説明をしたことで、中学生にも適切な難易度で講座が提供できたことがわかる。

次回開催される講座に参加する意欲について調査を行った。

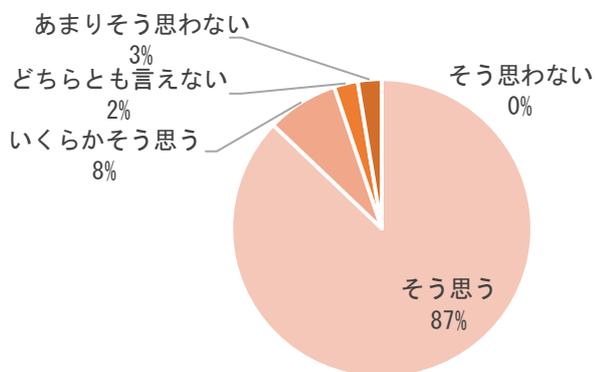


図 20 次回の講座への意欲

図 20 のように、全体で 39 名の受講者のうち 9 割近くが次回の講座にも参加したいという前向きな回答を得られた。「あまりそう思えない」や「どちらとも言えない」と答えた受講者の中にはメインターゲットである小学校高学年の受講者はいなかった。

3.6. アンケート調査のまとめ

講座の事後アンケートを通じて、受講者の理解度や講座に対する評価を確認し、メインターゲットが適切であったかどうかを評価した。また、メインターゲットよりも高い年齢層である中学生にも工学への興味を持ってもらえるよう、「光電融合」の説明が実際に適切だったがどうかも調査した。理解度調査の結果、メインターゲットよりも上の受講者からは「わからなかった」や「少しわからなかった」といった意見はなく、内容はターゲット層に適していたと考えられる。

講座内容の改善調査では、受講者全体の回答として、「興味」や「説明のわかりやすさ」については肯定的な回答が多かった。難易度に関しては、小学校高学年と中学生の結果を見ると「ちょうど良い」という意見が最も多く、その次に「少し簡単だった」と「少し難しかった」という意見がほぼ半数ずつ分かれた。これらの結果から、講座内容や説明、難易度はメインターゲットである小学校高学年に適していたといえる。また、今回追加した「光電融合」の説明や製作を通して、中学生の工学への興味を高めることができた。本講座でははんだ付けがメインであったため、時間については多くの受講者が短いと感じたことがわかった。小学生の一コマの授業時間を目安に時間配分したが、作業に想定よりも時間を要したと考えられる。次回の課題として、時間配分の見直しを検討したい。

4. まとめ

従来、発光デバイスとして用いられている LED を発電デバイスとして活用して、また近年注目されている「光電融合技術」の概念を取り入れた「電気エネルギー変換回路」を製作し、その公開講座で利用した。

電気エネルギー変換の講座ではデモンストレーションとして Scratch を用いて行うことにより、参加者の電気エネルギー変換に対して興味を湧き立

熊澤，松岡，新田，庄司：

小中学生を対象とした公開講座「光電融合を用いたエネルギー変換」の実施と評価
てるきっかけになったのではないかと思われる。

LEDを発電デバイスとして用いるには、短絡電流が小さいなど問題点はあるが、光電融合技術への応用においては、LEDを利用する一つの方法として有望であると考ええる。

今後は、自然エネルギーを利用した光電融合技術への応用についてアイデアを出しながら取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁. 制度の概要|FIT・FIP 制度|なっとく！再生可能エネルギー. 資源エネルギー庁.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/surcharge.html (参照日：2024. 2. 2)
- 2) NTT. 世界的な電力不足を救う？注目を集める「光電融合技術」とは
https://group.ntt.jp/magazine/blog/photos_electronics_convergence/ (参照日：2023. 10. 11)
- 3) 竹下照雄：実験ではじめる光と光センサの世界. トランジスタ技術 2022 年 6 月号. p162-164. CQ 出版社
- 4) 竹下照雄：実験ではじめる光と光センサの世界. トランジスタ技術 2022 年 4 月号. p131-132. CQ 出版社
- 5) 一般社団法人 太陽光発電協会 (2022). 太陽光発電システムの太陽光発電設計と施工. 株式会社オーム社.
- 6) 総務省：令和 5 年版 情報通信白書, pp. 82, 2023 年
- 7) 文部科学省：小学校学習指導要領（平成 29 年告示）解説理科編, pp. 82-83, 2017 年 2 月
- 8) 安部尚吾, 春山真一郎, 中川正雄：LED を光受信機として使う新方式の検討, 電子情報通信学会技術研究報告 106 号, pp. 19-24, 2007 年 1 月
- 9) 向川拓臣, 遠藤蒼太, 大塚遼之介, 杉浦昂樹, 熊澤匠真, 吉元照貴, 中村源一郎, 永吉真知子, 松岡敏, 新田武父, 庄司良, 玉田耕治：『はざまる工房』を拠点とした新たな形の公開講座開講, 東京工業高等専門学校研究報告書 第 54 号, pp. 46-53, 2022 年 3 月

(2024 年 12 月 12 日 受理)

低学年向けワークショップを通じた「はざまる工房」の活用

吉元照貴*, 熊澤匠真*, 中村源一郎*, 向川拓臣*,

原口大輔**, 富沢哲雄**, 多羅尾進**

2019 年度より学内外で活用できる多目的工作施設『はざまる工房』の運営を行ってきた。約 5 年ほど運営する中で内部的に評価を行い様々な課題が表出した。本報告では、学生利用者のリピート率改善に着目し、改めて学生への工房周知と工房の創造的な使い方を示すために、主に本学 1 年生向けにワークショップを開催した内容とアンケート結果について報告する。

(キーワード: ものづくり, はざまる工房, COMPASS 5.0 ロボット分野)

Practical Use of the “Hazamaru Kobo” through Workshop for the First Grade Students

Shoki YOSHIMOTO*, Takuma KUMAZAWA*, Gen-ichiro NAKAMURA*,

Takumi MUKOUGAWA*, Daisuke HARAGUCHI**, Tetsuo TOMIZAWA**,

Susumu TARAO**

Since 2019, we have been managing the "Hazamaru Kobo" as a multipurpose manufacturing facility used both within and outside the college. Over five years of management, various issues have emerged through internal evaluations. This paper focuses on the reuse rate among students and describes efforts to improve awareness of the workshop and encourage creative uses among students. To achieve this, we organized workshops primarily for first-year students. This paper reports some of the contents of these workshops and their evaluation by questionnaire.

(Keywords: Manufacturing, Hazamaru Kobo, COMPASS 5.0)

1. はじめに

本校には、技術職員が運営管理する多目的工作施設である社会実装教育ラボ『はざまる工房』(以下、「工房」という。)がコラボレーション・コモンズ棟(以下、「CC 棟」という。)内に設置されている。工房には、利用に関するリテラシーが求められる機材が多数設置されており、主に学生向けに工房そのものの利用講習(以下、「利用者講習」という。)と機材ごとの講習(以下、「機器類講習」という。)を実施している。また、地域貢献として、近隣の小中学生などのモノづくりマインド向上のため技術職員が積極的に公開講座を開催している。

これまでの報告¹⁻⁴⁾では、工房の立ち上げ経緯、立ち上げ時の利用者講習者等の状況や学生、教職員の利用状況、また世界的に流行した COVID-19 の影響下での施設の活用、公開講座等への利用について言及してきた。一方で、学内利用に関しても

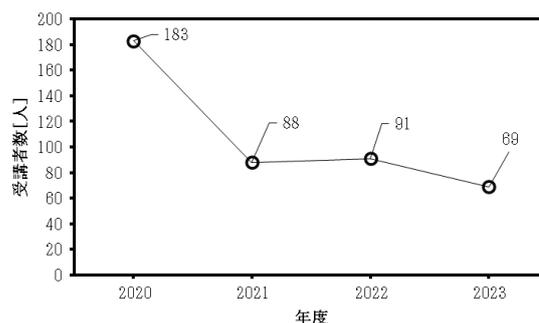


図 1 利用者講習受講者数推移

利用者に関するログを残しその設立趣旨に対する評価、教育的な効果について試行錯誤的に評価・改善を行っている。工房利用にあたって利用希望者が受講する利用者講習について、2020 年度から 2023 年度までの受講者数推移を図 1 に示す。

*教育研究技術支援センター **機械工学科

表 1 2023 年度はざまる工房利用学生の内訳

1-5年生の利用者数の内訳	
利用学生数 (名)	78
利用最大回数 (回)	45
1回のみ利用者数 (名)	34
1回のみ利用者率 (%)	44
1年生の利用者数の内訳	
利用学生数(名)	31
全利用者数中の割合 (%)	40
1回のみ利用者数(名)	14
5回以下利用者数(名)	22

設立年度の翌年度である 2020 年度までは、対面での利用者講習を行い 1 年生ほぼ全員が受講する結果となった。2021 年度以降は、COVID-19 の影響が残る中、施設内での感染症対策の充実、世間的な自粛緩和、さらに業務効率化の観点からも利用者講習をオンライン化し受講時間に制限を設けない安全でフレキシブルな形態で開催した。その結果、2021 年度以降、1 年生を中心に各学年一様に受講者がいる傾向となった。これらの結果より、おおむね設立趣旨である「低学年からものづくりマインドを育む」施設としての役割を担うことができていると考えている。

2023 年度の工房の利用記録を基に集計した学生の利用状況詳細を表 1 に示す。同じく 2023 年度の工房利用回数別の学生数を図 2 に示す。1 年生から 5 年生までの利用学生数は 78 名であった。最も利用回数が多い学生は年間 45 回利用しており、工房がテスト期間や長期休暇中にメンテナンス期間として通年 3 か月閉室していることを考慮すると、平均で月 5 回程度利用しており、学生の需要に対して不足ない開室日数であると考えられる。

しかし、利用者の中には 1 度工房に来て以来、足が遠のいている者もあり、全体で約 4 割程度いた。利用者講習受講者数の特に多い 1 年生に注目すると、1 度しか利用していない学生が半数程度の割合で存在しており、2 カ月に 1 度程度の頻度で利用している計算となる 5 回以下利用の学生は 7 割程度いた。

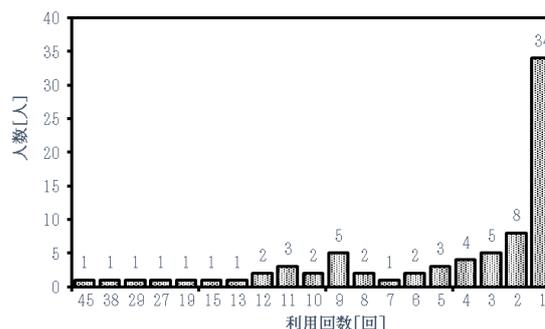


図 2 はざまる工房利用学生の利用回数別学生数 (2023 年度)

このように、はざまる工房を多数回利用する学生が少ないことがわかった。このリピート率の低さは単目的の達成で工房利用を終了する学生が多く、工房の様々な機器を利用した、創造的で広がりのあるものづくりマインドの醸成には至っていないことが原因と推察できる。

こうした観点から工房を利用する最低限のライセンスである利用者講習や機器類利用講習だけではなく、工房の機器を活かした楽しく創造的なものづくり体験を主眼とした催しを開催することでリピート率と工房の利用価値の向上、ひいては本来の目的である学生の資質向上が見込めると考えた。本報告では、この目標を達成するため主に低学年を対象としたワークショップを企画、開催したことについてその概要と参加学生からのアンケート結果を紹介する。

2. COMPASS5.0 ロボット分野と本取り組みへの活用

2020 年度より小学校でのプログラミング教育が必修となった⁵⁾。世間的に ICT リテラシーの重要性が高まっている中で、さらに論理的な思考という人間的なスキルとプログラミングの相性がよいこともあり、プログラミング教育は、非常に注目度の高い教育的なトピックとなっている。

しかし、論理的思考は抽象的なスキルであり小中学生が身につけるためには、わかりやすく、また楽しく学べる教材が必要である。このようなわかりやすく、楽しく学べる教材として「ロボットプログラミング」が注目されている。

比較的集中力が散漫になりやすい小中学生の年代の子供達でも、楽しみながら、機構を学び、動きを順序だてて考えながらプログラミングを学べ

吉元, 熊澤, 中村, 向川, 原口, 富沢, 多羅尾:
低学年向けワークショップを通じた「はざまる工房」の活用

るのが、ロボットプログラミングの優れた点である。また多様性や個別最適な学びの重要性も注目されている現代で、ロボットプログラミングは子供の身体的な能力に左右されにくい教材であることから成功体験が得やすく、個を大事にする教育との相性もよい。

こうした現代的な教育として、ロボットを作る以外にも、ロボットを上手に活用するためのリテラシー教育を高専全体で先導的に行えるよう教育パッケージを構築する事業が「COMPASS5.0 ロボット分野」⁶⁾である。本校はその拠点校を担っており、教材開発の例として、原口らにより高学年向けのロボット S1er 教材⁷⁾が開発されてきた。しかし、学生が高学年でこれらの教材を学ぶためには、低学年のうちからロボットやマイコン等の周辺技術に触れる経験、頭の中に描いた漠然とした設計イメージを具現化する経験が求められる。

そこで、今回、全学年向け多目的工作施設であるはざまる工房の本質的価値向上のために開催する、低学年向けのロボットプログラミングワークショップが、COMPASS5.0 の目的とマッチしているという点から本ワークショップを COMPASS5.0 の一環として開催する機会を得ることができた。

3. 低学年向けワークショップの開催

本科の低学年学生がいきなりロボットを作成することは難しい。その要因としてロボット製作の周辺技術となるマイコンに関する知識やレーザー加工機、切削加工、3D プリンタ等の工作機械の習熟度が低いことが挙げられる。さらにロボットに関する数学的、物理的な理論も当該科目を履修していない学生にとって高い壁を感じる一因となる。

今回開催したワークショップは、こうした学生に配慮し高度なスキルや知識を必要とせず、楽しくはざまる工房での創造的なものづくり活動が体験できるように教材の検討、準備を行った。

1年間を通じて、学生の反応を見ながら学習習熟度と興味に応じた以下のようなワークショップを開催した。

- ① ロボットとマイコンを利用したプログラミング教材
- ② CG モデリングソフトと 3D プリンタを用いた立体物造形教材

これらのワークショップの概要とその狙いを記載する。



図 3 No:71201 プログラミング工作シリーズ No.1 マイコンロボット工作セット (クローラータイプ)

Original micro:bit

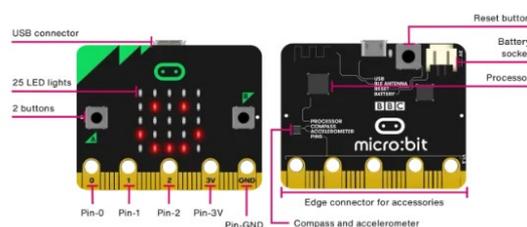


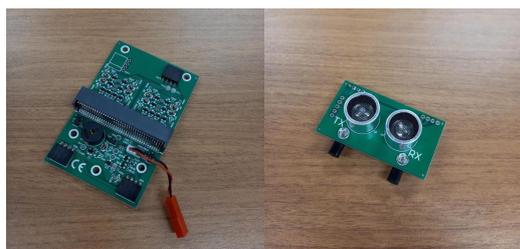
図 4 マイコンボード BBC micro:bit



図 5 Microsoft MakeCode ビジュアルエディタ画面

3.1. 新入生向けロボットプログラミングワークショップ

毎年4月の新入生向けオリエンテーションにて、はざまる工房を紹介する活動を行っている。工房開設以来、利用者講習は毎年人気でその時期は工房の繁忙期となっている。利用者講習を終えた学生は各々の目的で工房を活用するが、とくに入学したばかりの大半の学生はものづくりに興味はあれど、ものづくり初心者が多いため作りたいという気持ちはあるが、実際に何を作ればよいかわからないというような、心と体に大きなギャップを



(a) mi-01 (b) mi-02

図 6 駆動回路 mi-01 と超音波センサーmi-02

抱えている状態だと推察している。そのような学生にも気軽に参加してもらえるように、楽しくマイコンでのプログラミングを学べ、また画面内に留まらない現実世界のロボットを制御し、ものづくりの楽しさが体験できる教材を用意した。ここではロボットを一から作ることはせず、マイコンとロボットがセットで販売されている、タミヤ社の「プログラミング工作シリーズ No.1 マイコンロボット工作セット (クローラータイプ)」(図 3)⁸⁾を教材として用いた。またロボットの制御に用いるマイコンは、英国放送協会 BBC が開発した micro:bit(図 4)⁹⁾という教育用マイコンボードを利用してプログラムを作成しロボットに取り付けた二輪を制御する教材とした。

micro:bit は本格的なテキストプログラムを作成できると同時に、小中学生にもプログラミングがわかりやすいようテキストプログラムの構造を模したプログラムブロックを連結させてプログラムを作成することができるビジュアルプログラミングでプログラムが可能である。

今回は Microsoft 社が開発しているビジュアルプログラミング環境の Microsoft MakeCode (図 5)¹⁰⁾を利用してマイコンへのプログラムを学べるようにした。

また、ロボットだけに限らないマイコンに関する基本的な知識として「何らかの入力に応じて、マイコンがプログラムされた通りに判断し何らかの出力をする」という流れを、工作セットに付属

表 2 進行スケジュール

所要時間	内容
1 20分	ロボットプログラミングの概要と micro:bitの動かし方
2 20分	DCモーター駆動のプログラミング
3 30分	超音波センサーの使い方と測定距離に応じたDCモーターの制御
4 20分	自由探求

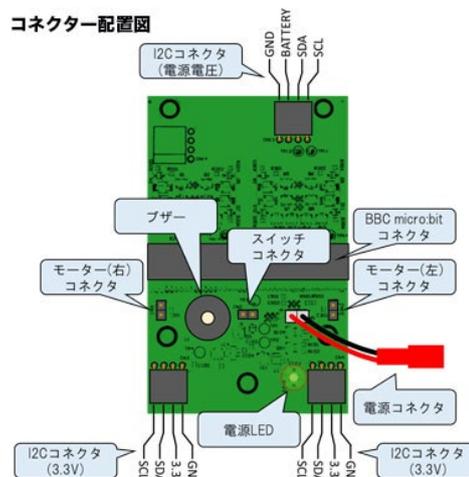


図 7 駆動回路 mi-01 のコネクタ配置図 (商品紹介ページより)

している「超音波センサー」と「DC モーター」を利用することで学べるような内容とした。

講座は表 2 のような進行スケジュールで実施した。1 回あたりの受講者定員は 4 名を想定し、講師として技術職員 1 名で実施できるように講座内容等を配慮した。

1 回で完結する講座であり、受講者の前提知識を設けない内容であること、また集中力が持続できるように 90 分の構成とした。講座の終盤では講座中に紹介されたプログラムを試したり、受講者自身がロボット制御に関する課題を設け挑戦したり、後述する電子工作や工房の機材に関する教材に挑戦したり自主的に探究できる時間を設けた。

3.1.1. マイコンロボット工作セットの詳細

工作セットには付属の DC モーターを駆動させるモータードライバやセンサーの入力回路を一体にしてロボット本体に搭載できる「駆動回路 mi-01」(図 6 (a))と「超音波センサーmi-02」(図 6 (b))という二つの基板が付属している。詳細な仕様は公開されていないが公式ウェブページに簡易的な仕様が公開されている(図 7)⁸⁾。

配置図より駆動回路 mi-01 への接続部品は、DC モーター2つ、外部電源、ブザー、電源用 LED、マイコンとの通信にシリアル通信規格 I2C を利用する超音波センサー、micro:bit が基本的な構成となることが示されている。さらに電源電圧が供給されて I2C 通信が可能入出力ポートと、3.3V 電源が供給されて I2C 通信可能な入出力ポート 2 つ



図8 ロボット本体に取り付けたレーザー加工機で彫刻を施したロボット用の装飾

を別途備えていることが読み取れる。別途仕様ページに記載されている消費電流は 500mA とされているのであまり電力供給的に余裕がない構成と考えられるが、駆動回路は拡張性のある作りとなっている。

3.1.2. 工房機材体験のための創造的な課題

本講座で学ぶプログラミングの内容は、受講者が小中学生のときに経験している可能性が高い。そのためより進んだ知識技能の習得と工房の創造的活用方法周知のために、電子工作工具でのほんだ付けとレーザー加工機(Speedy300, トロテック・レーザー・ジャパン株式会社)を用いたロボットへの装飾製作ができる体験項目を加えた。

具体的には、レーザー加工機のスキル習得のため、図8に示すロボット正面のネジ穴に合うようレーザー加工機でアクリル板を加工し、お面形状の装飾を作成した。

工房に設置してあるレーザー加工機を使用し、受講者が設計した「ロボットの顔」の作成を通してレーザー加工機の切断機能に加え、彫刻機能も体験できるようにした。レーザー加工機の使用例や使いやすさを受講者へ周知・実感してもらえると同時に、データ作成時に、ベクターデータ形式のソフトウェアでイラストを作成することで、よく利用されるビットマップ形式のペイントソフトウェアと異なるソフトウェアを利用しその違いについても体験することが可能となっている。

また、お面の目にあたるLED装飾は、前節で紹介した駆動回路 mi-01 の 3.3V 電圧供給ポートの拡張性を利用した、駆動回路への電源供給チェッ



図9 CGソフトBlenderでモデリングしたゲーム用のキャラクターの3Dモデル

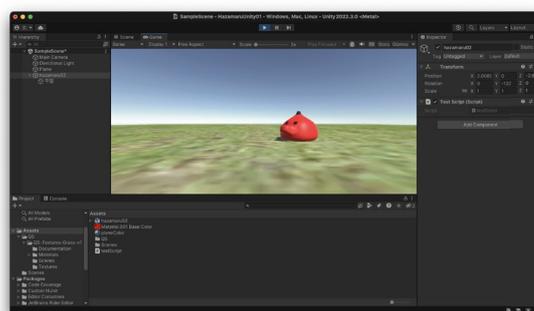


図10 作成した3Dモデルをゲーム制作統合開発環境Unityで動かしている画面



図11 3Dプリンタで造形した3Dモデルキャラクター(およそ縦50mm×横50mm×高さ30mm)

ク用LEDである。LED用の穴は前述の通り顔デザインの一部としてレーザー加工し、空中配線でLED, 抵抗, ワイヤーをはんだづけする応用教材として電子工作に興味がある受講者やそうでない受講者にもテクニックの一例として紹介用に用意した。

3.2. 3DCG ソフトを利用した 3D モデル制作と 3D プリンタ体験ワークショップ

本ワークショップは年度の後期にあたる 11 月から 12 月にかけて開催した。新学期が始まってから半年が経過し、新入生であれば実験や課外活動で、本格的なものづくりをある程度体験し、2 年生以上は各々の専門科目を通じてより高度な技術に興味をもつ時期だと推察する。そうした頃を見計らい少し毛色の異なるワークショップを実施した。

3D プリンタを使って造形物を作ることはそもそも、作りたいモデルがあることが前提となる。一般的にモデルを作成する方法として 3DCAD ソフトを利用して作成されることが多い。

ここでは、CG 作成ソフトである Blender¹¹⁾を利用して CG ゲームづくりのための CG キャラクターを作成し、そのキャラクターの 3D モデルを 3D プリンタで出力する体験内容とした(図 9, 10, 11)。

一見、ゲームという仮想空間のキャラクターと実態物を製作する工房に親和性は無いようにみえるが、3D プリンタのような機材利用を介して異なる嗜好の学生でも工房を利活用できることを知ってもらおうことを狙い、本ワークショップを開催した。

しかし、3D プリンタ体験型のワークショップでは、参加者が造形物の出来上がるまでの長い時間を待つことが難しい。そこで、CG ゲーム制作と同時並行で 3D プリンタ出力を行うことで、時間を有効活用できるように試みた。

表 3, 4 に本講座の進行スケジュールを示す。本講座は全 2 回構成となっており、1 回目が Blender

表 3 進行スケジュール(1 回目)

1 回目		
所要時間	内	容
1	20分	CGモデリングの概要
2	60分	Blenderによる3Dモデリング
3	10分	データのエクспорт

表 4 進行スケジュール(2 回目)

2 回目		
所要時間	内	容
1	10分	Unityと3Dプリンタの概要
2	70分	Unityによるゲーム制作と3Dプリンタによるモデル出力
3	10分	自由探求



図 12 FLASHFORGE 社 Adventurer5M Pro

を利用した 3D モデリング、2 回目が 3D モデルをゲーム開発統合環境の Unity¹²⁾にインポートして簡易的なゲームを作成し、同時に 3D モデルを 3D プリンタで出力する内容となっている。各回、受講者の集中力の持続も鑑みて 1 回あたり 90 分を想定した内容となっている。また、1 回あたり受講者定員を 4 名とし、講師は技術職員 1 名で実施できるように講座内容等を考慮した。

CG モデリングの講座では、Blender にあらかじめ用意されている基本図形(四角形等)の面を分割して、線、点への操作を繰り返すことでモデリングできることをチュートリアル的に説明し、図 9 のモデルを作成した。こうした作業は延々と繰り返すことになるので、モデリング作業においてソフトウェア上の機能メニューを度々開いて作業することのないようにショートカットキー等も教える内容とした。完成したモデルをゲームインポート用のデータ形式(.dxf; Drawing Exchange Format)と 3D プリンタ造形用のデータ形式(.stl; Standard Triangulated Language)の 2 種類のデータにエクスポートする操作手順を伝えて 1 回目の講座は終了とした。

2 回目の講座では、ゲーム開発を行うことができる Unity の基本的な使い方の説明と 3D モデルを 3D プリンタで出力するまでの簡単な流れを説明する内容とした。ここでは、受講者が 3D プリンタで印刷指示を行い、造形物を回収するところまでを体験することに重きをおいて講座内容をデザインした。

今回、3D プリンタで出力する 3D モデルは、縦横が 50mm、高さが 30mm 程度の造形物となるように 3D プリンタのスライサーソフトでデータを作

吉元,熊澤,中村,向川,原口,富沢,多羅尾:
低学年向けワークショップを通じた「はざまる工房」の活用

成した。しかし、一般的な家庭用の3Dプリンタでは、このサイズの造形物を印刷するのに1時間程度かかる(工房内にあるFlashForge社CreatorPro2では54分の印刷予想時間が提示された)。そこで、図12に示したFlashForge社製の最高速度600mm/sで高速造形が可能なAdventurer5M Pro¹³⁾を用いることで造形時間の短縮を図った。造形スタート時のノズル、プラットフォーム加熱等の予備動作、受講者のオペレーション時間、実際の造形時間、これらを合計して1つのモデルの造形完了まで約20分程度に短縮され、受講者4名全員の造形を講座内で行うことができた。また、造形が終わった受講者と造形を始める受講者で互いに教えあうよう指示して、その間、講師は他受講者へUnityの利用方法について説明を行った。これにより、人為的な造形の遅れを防ぎかつ、3Dプリンタでの造形待ち時間を有効活用できるような工夫を行った。

4. 受講者からのワークショップへのフィードバック

各回における受講者からのアンケート結果を図に示す。アンケート結果より全体を通じて、受講者の開催趣旨の理解、難易度、時期、所要時間は適切であったと考えている。開催の趣旨やワークショップの難易度、開催時期が適切であったかについて各ワークショップのアンケート結果等から考察を記す。

まず、新入生向けのロボットプログラミングのワークショップについてアンケート結果を図13に示す。この時開催したワークショップでは簡単な工作を行うワークショップも同時に開催しており合計26名の参加申し込みがあった。定員の都合もあり実際の参加人数は11名となり、受講後のアンケートへの有効回答数は11であった。

高専に入学したばかりの4月に開催したということで非常に多くの受講希望があり、工房の利用者講習後の創造的な利用方法を多くの学生に周知できたことが実感できた。

次に、12月に実施したCGモデリングと3Dプリンタ体験のワークショップのアンケート結果を図14に示す。受講希望者は12名で定員の都合上受講者は9名となった。同じく受講後のアンケートを実施し有効回答数は6であった。このワークショップは工房を利用した創造的な活動と少し毛

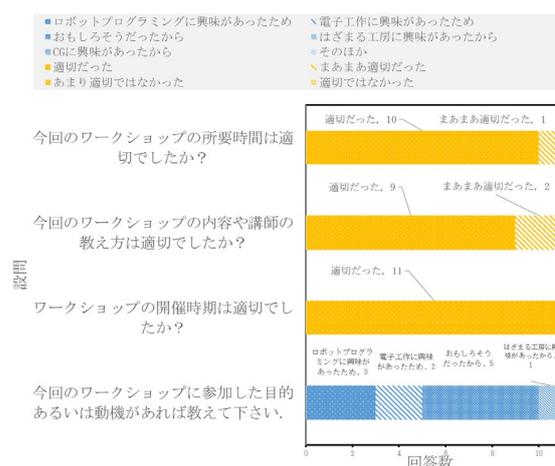


図13 4月度ワークショップ受講者アンケート

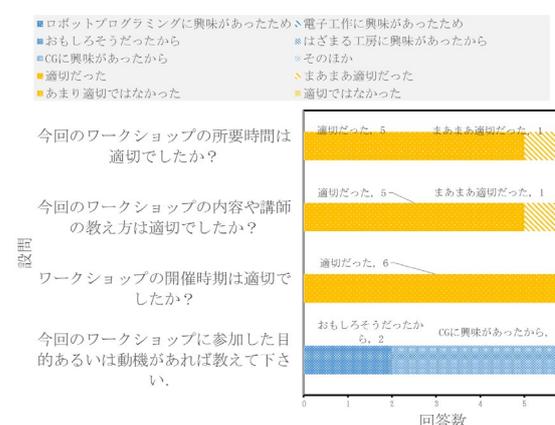


図14 12月度CGモデリング、CGゲーム作成3Dプリンタ体験受講者アンケート

色の異なる取り組みとなっている。日ごろの教育活動で、ゲームやアニメーションなどディスプレイ内の世界を構築することに興味を持つ学生が多いことを実感していたため、そうした層にも工房を工作等以外の集会の場として利用することができることを周知したいと考えていたためである。

アンケート中の、参加目的を問う設問の回答より、この試みは成功したと考えている。また開催時期が後期であり、1年生においては高専での生活にも慣れ2年次の学科選択も迫っている時期であった。ある程度技術的な認識やスキルも高くなってきたこのタイミングでの比較的負荷の高い内容のワークショップではあったが、開催時期に関するアンケート結果よりワークショップの難易度、開催時期も適切であったと考えている。

5. まとめ

学生の工房リピート率向上の取り組みとして低学年向けのワークショップを開催した。

リピート率が比較的 low、工房への魅力をより感じているであろう 1 年生をターゲットに、内容を平易なものとする事で、ワークショップ参加への敷居を下げ、工房の創造的な活用例を広く周知できるように配慮した。また、アンケート結果も概ねワークショップ開催の主旨に即した回答を得ることができた。さらに、今回のワークショップの一環として低学年向けのロボットプログラミングに関するワークショップを開催したことで高学年向けの COMPASS5.0 教材受講前にロボット周辺技術の経験を積むことができる内容とすることができた。

しかし、今回の報告では、ワークショップ参加の有無に関わらず、学生が工房をリピートしているかどうかについての評価は中長期的に効果測定が必要であると考えられるため、保留しており今後の課題としている。

また、冒頭で学外向けの公開講座を教職員が率先して開催することで地域貢献と小中学生のモノづくりマインド向上に尽力していることについて述べた。しかし、こうした方式は、企画立案、教材作成、周知集客、開催、評価と教職員への負担が多分にあるため開催頻度を上げることは現実的でない。ワークショップに参加した学生や工房を頻りに利用している学生が学外向けの公開講座等を企画、立案し、教職員と連携して学外へ向けて催しを行うなど、工房をアピールできる者が率先して、人海戦術的に活動していくことで課題解決の希望になるのではと思う。組織的にこうした機運をいかに促していくかについても今後の課題としたいと思う。

参考文献

- 1) 新田武父, 中村源一郎, 向川拓臣, 長井佳海, 降矢司, 永吉真知子: コラボレーション・commons 社会実装教育ラボの運用と活用, 東京工業高等専門学校研究報告書第 51 号, pp. 56-65, 2020 年 3 月
- 2) 松岡敏, 伊藤祐, 中村源一郎, 向川拓臣, 新田武父, 溝口将吾, 永吉真知子, 藤野宏, 羽鳥広範, 庄司良: はざまる工房を活用したもののづくりと公開講座, 東京工業高等専門学校研究報告書第 52 号, pp. 56-61, 2021 年 3 月
- 3) 中村源一郎, 熊澤匠真, 向川拓臣, 永吉真知子, 松岡敏, 羽鳥広範, 新田武父, 庄司良, 玉田耕治: コロナ禍における『はざまる工房』の公開講座への積極活用, 東京工業高等専門学校研究報告書第 53 号, pp. 125-134, 2022 年 3 月
- 4) 向川拓臣, 遠藤蒼太, 大塚遼之介, 杉浦昂樹, 熊澤匠真, 吉元照貴, 中村源一郎, 永吉真知子, 新田武父, 庄司良, 玉田耕治: 『はざまる工房』を拠点とした新たな形の公開講座開催, 東京工業高等専門学校研究報告書第 54 号, pp. 46-53, 2023 年 3 月
- 5) 文部科学省: 小学校学習指導要領 (平成 29 年告示), 入手先 (https://www.mext.go.jp/content/20230120-mxt_kyoiku02-100002604_01.pdf)
- 6) 多羅尾 進, 富沢 哲雄, 高田 宗一郎, 原口大輔, 伊藤 浩, 町田 茂: COMPASS5.0 ロボット分野における RX 教育の開発に向けた取り組み, 日本ロボット学会誌, 2024, 42 巻, 3 号, p. 197-200, 公開日 2024/04/20, Online ISSN 1884-7145, Print ISSN 0289-1824
- 7) 原口 大輔: ロボット SI 演習の教材開発と教育実践, 日本ロボット学会誌, 2024, 42 巻, 3 号, p. 211-214, 公開日 2024/04/20, Online ISSN 1884-7145, Print ISSN 0289-1824
- 8) 株式会社タミヤ: プログラミング工作シリーズ No.1 マイコンロボット工作セット (クローラータイプ), <https://www.tamiya.com/japan/products/71201/index.html>
- 9) Micro:bit Educational Foundation: micro:bit, <https://microbit.org/>
- 10) Microsoft: MakeCode, <https://www.microsoft.com/ja-jp/makecode>
- 11) Blender Foundation: Blender, <https://www.blender.org>
- 12) ユニティ・テクノロジー・ジャパン株式会社: Unity, <https://unity.com/ja>
- 13) FLASHFORGE: Adventurer5M Pro, <https://flashforge.jp/product/adventurer5m-pro/>

(2024年12月12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56号

令和6年度

令和7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