ISSN 2189-5309

Research Reports of

National Institute of Technology, Tokyo College

No. 5 1 , Mar. 2020

東京工業高等専門学校

研　究　報　告　書

第 51 号

2020. 3

東京工業高等専門学校研究報告書 第51号

目　次

ある種の二次形式に関する類数公式予想―類数算出アルゴリズムの考察―
南出　大樹，清水 景太　1

車軸と車輪の間の動摩擦係数(減速係数)の測定5
―光変調フォトICによる検出精度向上に向けたノイズ対策―　藤井 俊介　11

零相電圧の印加量と直流コンデンサバランスに着目した素子温度均一化法のシミュレーション評価
綾野　秀樹，木村　悠利　20

光導波路用のSiC薄膜における透明性の向上についての研究
新國 広幸＊，伊藤 浩＊，川又 由雄　28

反応性スパッタリング法を用いたSiN膜の作製とエッチング特性　伊藤　浩，川又　由雄　31

実験科目における事前学習用ビデオ教材の活用　一戸　隆久，新田　武父　35

リアルタイムビッグデータのための拡張モーバイルマルチホップネットワークの一検討
田中 晶，岩田 青龍，木下 和渡，工藤 颯希，坂本 惇一郎，
佐田 彩星，西村 憲人，益子 海音，山川 涼　42

重金属汚染土壌の原位置にて安定化のための浄化剤と固化材の性能評価に関する研究
庄司 良，宮村 光，田上 實，神代 浩一郎　51

コラボレーション・コモンズ社会実装教育ラボの運用と活用
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　56

Research Reports of National Institute of Technology, Tokyo College No.51

CONTENTS

Some Conjectures of the Class Number Formula for Certain Quadratic Forms
— Study on Computational Algorithms — Hiroki MINAMIDE, Keita SHIMIZU 1

Measurement of Deceleration Coefficient in a Simple Experimental System with One Wheel and One Axis part 5
－Noise suppression intended for the proper construction of measurement system － Shunsuke FUJII 11

Simulation of the Equalization Technique of Losses Generated at Power Devices Focusing on the Zero-sequence Voltage and the Balance of DC Capacitors Hideki AYANO, Yuri KIMURA 20

Research on Transparency Improvement of SiC Thin Film for Optical Waveguide
Hiroyuki NIKKUNI, Hiroshi ITO, Yoshio KAWAMATA 28

Etching Characteristics and Deposition of Silicon Nitride Thin Films Prepared by Reactive Sputtering Method
Hiroshi ITO, Yoshio KAWAMATA 31

Application of video-learning materials for preparing fundamental experiments
Takahisa ICHINOHE, Takenori NITTA 35

A study on augmented mobile multihop networks for real-time big data
TANAKA Akira, IWATA Seiryu, KINOSHITA Kazuto,
KUDO Satsuki, SAKAMOTO Junichiro, SADA Ayatoshi,
NISHIMURA Kento, MASUKO Kaito, YAMAKAWA Ryo 42

Study on materials for in situ purification and solidification of soils contaminated with heavy metals
Ryo SHOJI, Hikari MIYAMURA, Minoru TAGAMI,
Kouichiro KUMASHIRO 51

Practical use and Operation of Social Implementation Education Lab in the Collaboration-Commons
Takenori NITTA, Gen-ichirou NAKAMURA, Takumi MUKOUGAWA,
Yoshimi NAGAI, Tsukasa FURUYA, Machiko NAGAYOSHI 56

ある種の二次形式に関する類数公式予想
—類数算出アルゴリズムの考察—

南出大樹 *，清水景太 **

本稿では，二次形式 $aX^2+b\sqrt{n}XY+cY^2$ の類数を分類アルゴリズムの観点から考察する。特に，正定値の場合における簡約理論を構築し，その種数を表す公式を具体的に予想した。この理論は，Gauss の時代より重要な研究対象と見出された二次形式の理論 [DA] の一般化とも考える事ができるものである。
（キーワード：二次形式，簡約理論，類数公式）

Some Conjectures of the Class Number Formula for Certain Quadratic Forms
— Study on Computational Algorithms —

Hiroki MINAMIDE*, Keita SHIMIZU**

In this note, we will investigate the class number of quadratic forms $aX^2+b\sqrt{n}XY+cY^2$ from the algorithmic point of view. In particular, we shall construct the reduction theory for positive definite forms. This subject could be thought of as a generalization of the theory that has been important since the age of Gauss [DA].
(Keywords: Quadratic Forms, Reduction Theory, Class Number Formula)

1　概要 –古典理論–

この章では，[DA] や [Zag] で扱われている古典的な二次形式を定義し，類数を具体的に計算する。

1.1　古典的二次形式

この節では，[Zag] に習い，古典的二次形式の同値類を構成し，その間の同値関係を考察する。

定義 1.1. $a,b,c\in\mathbb{Z}$ に対して，整二次形式 $[a,b,c]$ を次で定義する。

$$\begin{aligned}[a,b,c]&:=\begin{bmatrix} X & Y\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} a & \frac{b}{2}\\ \frac{b}{2} & c\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} X\\ Y\end{bmatrix}\\&=aX^2+bXY+cY^2\end{aligned}$$

加えて，$\gcd(a,b,c)=1$ である二次形式を原始的であるという。以降，断らない限り，原始的形式を扱う。また，二次形式 $[a,b,c]$ の判別式を次で定義する。

$$\begin{aligned}D(a,b,c)&:=-4\det\begin{bmatrix} a & \frac{b}{2}\\ \frac{b}{2} & c\end{bmatrix}\\&=b^2-4ac\end{aligned}$$

剰余の性質から，判別式となれる整数には次の条件が課されることを注意しておく。

$$D(a,b,c)\equiv 0 \text{ or } 1 \pmod 4$$

また，逆に，上記条件を満たす整数 D に対して，これを判別式とする二次形式は必ず存在する。具体的には，次のように構成可能である。

$$[a,b,c]=\begin{cases} X^2-\dfrac{D}{4}Y^2 & D\equiv 0 \pmod 4\\ X^2+XY+\dfrac{1-D}{4}Y^2 & D\equiv 1 \pmod 4\end{cases}$$

このような二次形式に対し，一般線型群

$$\mathrm{GL}_2(\mathbb{Z}):=\left\{\begin{bmatrix} x & z\\ y & w\end{bmatrix}\middle|\begin{array}{l} x,y,z,w\in\mathbb{Z},\\ xw-yz=\pm 1\end{array}\right\}$$

の作用を

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix} x & z\\ y & w\end{bmatrix}\curvearrowright\begin{bmatrix} a & \frac{b}{2}\\ \frac{b}{2} & c\end{bmatrix}\\&\quad:=\mu\cdot\begin{bmatrix} x & z\\ y & w\end{bmatrix}^t\cdot\begin{bmatrix} a & \frac{b}{2}\\ \frac{b}{2} & c\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} x & z\\ y & w\end{bmatrix}\\&\quad=\mu\cdot\begin{bmatrix} ax^2+bxy+cy^2 & \frac{2axz+(xw+yz)b+2cyw}{2}\\ \frac{2axz+(xw+yz)b+2cyw}{2} & az^2+bzw\end{bmatrix}\\&\qquad\qquad\left(\mu:=\det\begin{bmatrix} x & z\\ y & w\end{bmatrix}\right)\end{aligned}$$

で定義し，この作用で移り合う二つの二次形式は

＊一般教育科（数学）　＊＊情報工学科

同値であるという。また，特に特殊線型群

$$\mathrm{SL}_2(\mathbb{Z}) := \left\{ \begin{bmatrix} x & z \\ y & w \end{bmatrix} \middle| \begin{array}{l} x, y, z, w \in \mathbb{Z}, \\ xw - yz = 1 \end{array} \right\}$$

の元で移り合う二次形式を狭義に同値であるという。これらの作用に関して，行列式が行列の積を保存することから，判別式は不変であることを注意しておく。また，次の節でも確認するように，次の主張が成り立つ。

命題 1.2. ([Zag]§8 Thm.1) 与えられた判別式をもつ二次形式の同値類は有限個しか存在しない。

この有限の値を類数という。判別式 D の二次形式の類数を $h(D)$，狭義の類数を $h^+(D)$ で表す。

1.2　簡約理論

この節では，簡約理論と呼ばれる分類アルゴリズムを考察し，具体的に類数を計算する。

1.2.1　$D < 0$ の場合

判別式が負である二次形式を定値二次形式といい，特に a が正である二次形式を正定値二次形式という。定値形式を扱う場合，判別式が負の変換では，正定値と $a < 0$ である負定値を入れ替えるだけであり，その数は同数であるので，狭義の同値のみ考慮すればいいことを付記しておく。

定義 1.3. 正定値二次形式 $[a, b, c]$ が，条件

$$-a < b \leq a < c \qquad \text{または} \qquad 0 \leq b \leq a = c$$

を満たすとき，簡約であるという。

定理 1.4. ([Zag]§13) 任意の正定値二次形式は簡約形式に同値である。逆に，簡約された正定値二次形式は互いに非同値である。

以上の定理から，代表元を見つけるアルゴリズムを組むことができる。

表 1 正定値整二次形式の代表元

D	$[a, b, c]$	D	$[a, b, c]$
-3	$[1, 1, 1]$	-23	$[1, 1, 6]$, $[2, \pm 1, 3]$
-4	$[1, 0, 1]$	-24	$[1, 0, 6]$, $[2, 0, 3]$
-7	$[1, 1, 2]$	-27	$[1, 1, 7]$,
-8	$[1, 0, 2]$	-28	$[1, 0, 7]$
-11	$[1, 1, 3]$	-31	$[1, 1, 8]$, $[2, \pm 1, 4]$
-12	$[1, 0, 3]$	-32	$[1, 0, 8]$, $[3, 2, 3]$
-15	$[1, 1, 4]$, $[2, 1, 2]$	-35	$[1, 1, 9]$, $[3, 1, 3]$
-16	$[1, 0, 4]$	-36	$[1, 0, 9]$, $[2, 2, 5]$
-19	$[1, 1, 5]$	-39	$[1, 1, 10]$, $[2, \pm 1, 5]$ [3,3,4]
-20	$[1, 0, 5]$, $[2, 2, 3]$	-40	$[1, 0, 10]$, $[2, 0, 5]$

1.2.2　$D > 0$，狭義の場合

本節では，まず，不定値二次形式に対する狭義の擬簡約形式を次のように定義する。

定義 1.5. 不定値二次形式 $[a, b, c]$ が狭義に擬簡約であるとは，各係数が

$$a > 0, \qquad c > 0, \qquad b > a + c$$

という条件を満たすことをいう。

また，不定値形式 $[a, b, c]$ に対して，整数 n を，

$$n - 1 < \frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} < n$$

を満たすように設定し，次の変換 T_n を考える。

$$\begin{aligned} T_n : \begin{bmatrix} n & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \curvearrowright [a, b, c] \\ = [an^2 - bn + d, 2an - b, a] \end{aligned}$$

このとき，次のような命題が成立する。

定理 1.6. ([Zag]§13 Thm.1) D を正の数でかつ平方数でないとする。このとき，次が成り立つ。

1. 判別式 D の簡約形式は有限個しか存在しない
2. 任意の形式は，変換 T_n を有限回作用させることで，簡約形式へ移される
3. 変換 T_n は簡約形式を簡約形式へ移す
4. 簡約形式間の同値は，変換 T_n を何度か作用させることにより得られる

例．$D = 24$

$$[1, -6, 3] \xrightarrow{0} [3, 6, 1] \underset{6}{\overset{2}{\rightleftarrows}} [1, 6, 3]$$

$$[-1, 6, -3] \xrightarrow{-5} [2, 4, -1] \xrightarrow{3} [5, 8, 2] \xrightarrow{2} [6, 12, 5] \xrightarrow{2} [5, 12, 6] \xrightarrow{2} [2, 8, 5] \xrightarrow{4} [5, 8, 2]$$

以上のアルゴリズムより，以下の表を得ることができる。

表 2 不定値整二次形式の狭義代表元

D	$[a, b, c]$	$h^+(D)$
5	$[1, 3, 1]$	1
8	$[2, 4, 1]$-$[1, 4, 2]$	1
12	$[3, 6, 2]$-$[2, 6, 3]$, $[1, 4, 1]$	2
13	$[3, 7, 3]$-$[1, 5, 3]$-$[3, 5, 1]$	1
17	$[2, 5, 1]$-$[4, 7, 2]$-$[4, 9, 4]$-$[2, 7, 4]$-$[1, 5, 2]$	1
21	$[5, 11, 5]$-$[3, 9, 5]$-$[5, 9, 3]$, $[1, 5, 1]$	2
24	$[3, 6, 1]$-$[1, 6, 3]$, $[6, 12, 5]$-$[5, 12, 6]$-$[2, 8, 5]$-$[5, 8, 2]$	2
28	$[7, 14, 6]$-$[6, 14, 7]$-$[3, 10, 6]$-$[3, 8, 3]$-$[6, 10, 3]$, $[2, 6, 1]$-$[1, 6, 2]$	2
29	$[7, 15, 7]$-$[5, 13, 7]$-$[1, 7, 5]$-$[5, 7, 1]$-$[7, 13, 5]$	1

1.2.3 $D>0$，広義の場合

不定値二次形式の広義同値を考える場合，先ほどとは異なる簡約の概念を構築する必要がある。

定義 1.7. 不定値二次形式 $[a,b,c]$ が広義に擬簡約であるとは，各係数が

$$-1<\frac{b-\sqrt{b^2-4ac}}{2a}<0,\quad 1<\frac{b+\sqrt{b^2-4ac}}{2a}$$

を満たすことをいう。

また，$[a,b,c]$ に対して，整数 m を

$$m<\frac{b+\sqrt{b^2-4ac}}{2a}<m+1$$

を満たすように取り，次の変換を考える。

$$\begin{bmatrix} m & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \curvearrowright [a,b,c]$$
$$=[bm-c-am^2, 2am-b, -a]$$

この変換に関して，広義の場合における定理 1.6 と同様の主張が成り立つ。([Zag]§13 Prob.1)

例. $\underline{D=24}$

$$[1,-6,3] \xrightarrow{-1} [2,4,-1] \underset{4}{\overset{2}{\rightleftarrows}} [1,4,-2] \uparrow{\scriptstyle -6}$$
$$[-1,6,-3] \xrightarrow{-6} [3,6,1] \xrightarrow{1} [2,0,-3]$$

表 3　不定値整二次形式の広義代表元

D	$[a,b,c]$	$h(D)$
5	$[1,1,-1]$	1
8	$[1,2,-1]$	1
12	$[1,2,-2]$-$[2,2,-1]$	1
13	$[1,3,-1]$	1
17	$[1,3,-2]$-$[2,3,-1]$	1
21	$[1,3,-3]$-$[3,3,-1]$	1
24	$[1,4,-2]$-$[2,4,-1]$	1
28	$[2,2,-3]$-$[3,2,-2]$-$[1,4,-3]$-$[3,4,-1]$	1
29	$[1,5,-1]$	1

1.3 類数問題と類数公式

この章では，本研究の動機となった古典理論の最高峰である，類数問題と類数公式を紹介する。

1.3.1 類数問題

Gauss は，[DA] において次の予想を提出した。(§V Art.303-304)

1. $\lim_{d\to-\infty} h(d)=\infty$（1934 年解決 [Hei]）
2. 類数 1 となる負の判別式は次で全てである（1952 年解決 [Hee]，[Bak]，[Sta]）
   $-3,-4,-7,-8,-11,-12,-16,$
   $-19,-27,-28,-43,-67,-163$
3. 類数が 1 となる正の判別式は無限。（未解決）

1.3.2 類数公式

ここでは詳しく述べないが，基本判別式 D，つまり「$D\equiv 1 \pmod 4$，かつ D は平方因子を持たない」，または，「$D\equiv 0 \pmod 4$ で $\frac{D}{4}$ は平方因子を含まず，$\frac{D}{4}\equiv 2,\ 3 \pmod 4$」に対する類数公式は，Dirichlet の L-函数を用いて次のように表される。([Zag]§9 Thm.3)

$$h(D)=\begin{cases} \dfrac{w\sqrt{-D}}{2\pi}L(1,\chi_D) & D<0 \\ \dfrac{\sqrt{D}}{\log\varepsilon_0}L(1,\chi_D) & D>0 \end{cases}$$

ここで，$D<0$ のときに現れる w は

$$w=\begin{cases} 2, & D<-4 \\ 4, & D=-4 \\ 6, & D=-3. \end{cases}$$

で定義され，$D>0$ のとき現れる ε_0 は方程式

$$t^2-Du^2=4,\qquad t>0,\qquad u>0$$

の最小の解として、次のように定義される。

$$\varepsilon_0:=\frac{1}{2}(t+u\sqrt{d})$$

実際には，より一般的な形で知られているが，紙面の関係上ここでの紹介は割愛する。

2　捻れ n の二次形式

$n\in\mathbb{N}$ を固定する。この時 $a,b,c\in\mathbb{Z}$ に対して，捻れ n の整二次形式を

$$[a,b,c]_n:=\begin{bmatrix} X & Y \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} a & \frac{b}{2}\sqrt{n} \\ \frac{b}{2}\sqrt{n} & c \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$$
$$=aX^2+b\sqrt{n}XY+cY^2$$

で定義し，その判別式を

$$D_n(a,b,c):=-4\det\begin{bmatrix} a & \frac{b}{2}\sqrt{n} \\ \frac{b}{2}\sqrt{n} & c \end{bmatrix}$$
$$=b^2n-4ac$$

とする。簡単な計算により，判別式となれる整数には，次の条件が課されることが解る。

$$D_n(a,b,c)\equiv 0 \text{ or } n \pmod 4$$

逆に，この条件を満たす整数 D に関しては，これを判別式として持つ捻れ n の二次形式が必ず存在する。

$$[a,b,c]_n=\begin{cases} X^2-\dfrac{D_n}{4}Y^2 & D_n\equiv 0 \pmod 4 \\ X^2+\sqrt{n}XY+\dfrac{n-D_n}{4}Y^2 & D_n\equiv n \pmod 4 \end{cases}$$

古典理論と同様に，一般線型群や特殊線型群の作用を考察したいのであるが，そのままではうまく機能しない。そこで，次のような集合を考える。

$$G_n := \left\{ \left[\begin{array}{cc} x\sqrt{r} & z\sqrt{s} \\ y\sqrt{s} & w\sqrt{r} \end{array} \right] \middle| \begin{array}{l} x,y,z,w,r,s \in \mathbb{Z},\ r,s>0 \\ rs=n,\ xwr-yzs=\pm 1 \end{array} \right\},$$

$S_n := G_n \cap \mathrm{SL}_2(\mathbb{R})$.

命題 2.1. ([YY]Lmm6.10) $G_n \subset \mathrm{GL}_2(\mathbb{R})$, $S_n \subset \mathrm{SL}_2(\mathbb{R})$ はそれぞれ部分群である。

G_n 及び S_n から

$$\mathrm{Sym}_2(\mathbb{Z},n) := \left\{ \left[\begin{array}{cc} a & \frac{b}{2}\sqrt{n} \\ \frac{b}{2}\sqrt{n} & c \end{array} \right] \middle| a,b,c \in \mathbb{Z} \right\}$$

への作用が次で定義できる。

$$\mu \cdot \left[\begin{array}{cc} x\sqrt{r} & y\sqrt{s} \\ z\sqrt{s} & w\sqrt{r} \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{cc} a & \frac{b}{2}\sqrt{n} \\ \frac{b}{2}\sqrt{n} & c \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{cc} x\sqrt{r} & z\sqrt{s} \\ y\sqrt{s} & w\sqrt{r} \end{array} \right]$$

係数の観点から記述すると次のようになる。

定義 2.2. 二つの形式 $[a_1,b_1,c_1]_n$ と $[a_2,b_2,c_2]_n$ が同値であるとは，次を満たす $r,s \in \mathbb{N}$ と $x,y,z,w \in \mathbb{Z}$ が存在することとする。

$$\left[\begin{array}{c} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{array} \right] = \mu \cdot \left[\begin{array}{ccc} rx^2 & nxy & sy^2 \\ 2xz & rxw+syz & 2yw \\ sz^2 & nzw & rw^2 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{array} \right]$$

$$(rs=n,\ \mu := rxw-syz = \pm 1)$$

命題 2.3. $[a_1,a_2,a_3]_n \sim [a_2,b_2,c_2]_n$ であるとき，

$$\begin{cases} \gcd(a_1,b_1,c_1) = \gcd(a_2,b_2,c_2) \\ D_n(a_1,b_1,c_1) = D_n(a_2,b_2,c_2) \end{cases}$$

が成り立つ。

証明. $g_1 := \gcd(a_1,b_1,c_1)$ とすると，

$$a_2 = \mu \cdot (a_1 rx^2 + b_1 nxy + c_1 sy^2)$$

であるから，g_1 は a_2 を割り切る。同様に，$g_1|b_2$，$g_1|c_2$ であるから，g_1 は $\gcd(a_2,b_2,c_2)$ を割り切る。以上の議論を逆変換を考えることで $\gcd(a_2,b_2,c_2)$ は g_1 を割り切り，主張が従う。

また，行列式が行列の積を保存することから，$D_n(a_1,b_1,c_1) = D_n(a_2,b_2,c_2)$ は明らか。　□

我々は，この同値関係により分類された類，そして，その類の数 $h_n(D)$ に対し，以下の事を知りたいと考えるのは自然である。

1. 捩れ二次形式の数論的意味
2. 捩れ二次形式に対する類数公式
3. 捩れ二次形式を分類するアルゴリズム
4. 類数 1 である (n,D) を判定する方法

本稿では，主に分類アルゴリズムを考察し，類数公式を予想する。

3　簡約理論

本章において，n は 2 または 3 であるとする。

3.1　$D<0$ の場合

定義 3.1. 捩れ n の正定値二次形式 $[a,b,c]_n$ が簡約であるとは

$$-a < b \le a < c, \quad \text{または} \quad 0 \le b \le a = c$$

という関係式を満たす二次形式である。

類数を考える上で基本的なことであるが，次の事実が成り立つ。

命題 3.2. 与えられた判別式に対する簡約形式は有限個である。

証明. 三角不等式に，各係数の大小を加味すると

$$\begin{aligned} |D| = |b^2 n - 4ac| &\ge 4|ac| - |b|^2 n \\ &\ge 4|a|^2 - |a|^2 n = (4-n)a^2 \end{aligned}$$

という不等式を得る。本章において，n は 2 または 3 であるから，連立不等式

$$|a| \le \sqrt{\frac{|D|}{4-n}}, \quad |b| \le |a|, \quad c = \frac{b^2 n - D}{4a}.$$

を満たす a,b,c は有限個であることが解る。　□

以下，捩れ二次形式においても，定理 1.4 と同様の主張が成立すること，つまり，

1. 任意の正定値形式は簡約形式に同値であり，
2. 簡約された正定値形式は互いに非同値である。

を示す。

定理 3.3. 任意の捩れ n の正定値形式は，ある簡約形式と同値である。

証明. もし $c<a$ であるとすると，次の変換により

$$\left[\begin{array}{cc} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{array} \right] \curvearrowright [a,b,c]_n = [c,-b,a]_n$$

$a' < c'$ を満たす形式 $[a',b',c']_n$ を得る。

次に，$b \leq -a$ であるか，$b > a$ であるとする。

$$b_0 \equiv b \pmod{2a}, \qquad -a < b_0 \leq a$$

を満たす整数 b_0 に対して，

$$\begin{bmatrix} 1 & y\sqrt{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \curvearrowright [a,b,c]_n = [a, b+2ay, any^2+bny+c]_n$$

最後に $a = c$ でかつ $b < 0$ であれば，次の変換

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \curvearrowright [a,b,c]_n = [c,-b,a]_n$$

により，望みの形式を得ることができる。 □

$f(X,Y) := [a,b,c]_n$ に $(X,Y) = (x\sqrt{r}, y\sqrt{s})$ を代入して現れる数を $f(X,Y)$ による表現可能数という。この表現可能数に関する基本的な補題を二つ述べておく。

補題 3.4. 同値な二次形式が表現可能な数の集合は，正負の違いを除いて一致する。

証明. $A \curvearrowright [a_1,b_1,c_1]_n = [a_2,b_2,c_2]_n$ であったとする。このとき，

$$\begin{bmatrix} x\sqrt{r} & y\sqrt{s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_2 & \frac{b_2}{2}\sqrt{n} \\ \frac{b_2}{2}\sqrt{n} & c_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x\sqrt{r} \\ y\sqrt{s} \end{bmatrix}$$
$$= \mu \cdot \begin{bmatrix} x\sqrt{r} & y\sqrt{s} \end{bmatrix} \cdot {}^tA \begin{bmatrix} a_1 & \frac{b_1}{2}\sqrt{n} \\ \frac{b_1}{2}\sqrt{n} & c_1 \end{bmatrix} A \cdot \begin{bmatrix} x\sqrt{r} \\ y\sqrt{s} \end{bmatrix}$$

であるから，$\begin{bmatrix} x\sqrt{r} & y\sqrt{s} \end{bmatrix} \cdot {}^tA$ が求める形であればよいが，これは命題 2.1 の計算から従う。 □

補題 3.5. r,s は $rs = n$ を満たす自然数とする。正定値簡約形式 $f(X,Y) = aX^2 + b\sqrt{n}XY + cY^2$ および $x,y \in \mathbb{Z}$，$(x,y) \neq (0,0)$ に対して，常に $f(x\sqrt{r}, y\sqrt{s}) \geq a$ が成り立つ。

証明. $x = 0$ であるとき，$f(0, y\sqrt{s}) = csy^2 \geq a$ であるから，以降 $x \neq 0$ であると仮定する。同様に，$y \neq 0$ であるとも仮定できる。

$n = 2$，または $n = 3$ であるから，

$$\begin{aligned} f(x\sqrt{r}, y\sqrt{s}) &= arx^2 + bnxy + csy^2 \\ &= ax^2 + bnxy + cny^2 \\ &\geq a\left(x^2 - n|xy| + ny^2\right) \\ &= a\left[\left(|x| - \frac{n}{2}|y|\right)^2 + \left(1 - \frac{n}{4}\right)ny^2\right] \\ &\geq a \end{aligned}$$

または，

$$\begin{aligned} f(x\sqrt{r}, y\sqrt{s}) &= arx^2 + bnxy + csy^2 \\ &= anx^2 + bnxy + cy^2 \\ &\geq a\left(y^2 - n|xy| + nx^2\right) \\ &= a\left[\left(|y| - \frac{n}{2}|x|\right)^2 + \left(1 - \frac{n}{4}\right)nx^2\right] \\ &\geq a \end{aligned}$$

となり，望む結果が得られた。 □

定理 3.6. 簡約正定値形式は互いに非同値である。

証明. 「同値な二つの正定値形式があれば，それらは等しい」ことを示す。つまり，$[a,b,c]_n \sim [a',b'c']_n$ の仮定の元，$a = a'$，$b = b'$，$c = c'$ を証明する。$[a,b,c]_n$ と $[a',b'c']_n$ が同値であれば，

$$a = a' = arx^2 + bnxy + csy^2$$

を満たす整数 x,y，および $rs = n$ を満たす自然数 r,s が存在する。このとき，

$$\begin{aligned} a &= arx^2 + bnxy + csy^2 \\ &= ar\left(x + \frac{bn}{2ar}y\right)^2 + \left(cs - \frac{b^2n^2}{4ar}\right)y^2 \\ &= ar\left(x + \frac{bn}{2ar}y\right)^2 + \left(\frac{4ac - b^2n}{4a}\right)sy^2 \end{aligned}$$

である。このとき，$ar > 0$ なので

$$a \geq \left(\frac{4ac - b^2n}{4a}\right)sy^2$$

が成り立つが，加えて $4ac - b^2n = -D > 0$，および $b < a < c$ なので，

$$y^2 \leq \frac{1}{s}\left(\frac{4a}{4ac - b^2n}\right)a \leq \frac{a}{s} \cdot \frac{4a}{4a^2 - na^2} = \frac{4}{s(4-n)}$$

という評価式が得られた。

以下，n によって場合分けし議論を進める。

1. $\underline{n = 2，\text{つまり } sy^2 \leq 2 \text{ のとき}}$

（a）$y = 0$ のときは，$arx^2 = a$ であるから，

$$x = \pm 1, \quad r = 1, \quad y = 0, \quad s = 2$$

（b）$y = \pm 1, s = 1$ のとき，$2ax^2 \pm 2bx + c = a$ である。このとき

$$\begin{aligned} a &= 2ax^2 \pm 2bx + c \\ &= 2ax^2\left(1 \pm \frac{b}{ax}\right) + c \geq c \end{aligned}$$

であるから，$a = c$ であり，故に

$$ax^2 \pm bx = x(ax \pm b) = 0$$

が従う。

i. $x = 0$ のとき $(a = c)$

$$x = 0, \quad r = 2, \quad y = \pm 1, \quad s = 1$$

ii. $ax \pm b = 0$ のとき $(a = b = c)$

$$x = \mp 1, \quad r = 2, \quad y = \pm 1, \quad s = 1$$

(c) $y = \pm 1, s = 2$ のとき，$ax^2 \pm 2bx + 2c = a$ であああるから，等式

$$a\left(x \pm \frac{b}{a}\right)^2 - \frac{b^2}{a} + 2c = a$$

を満たす必要がある。しかし，

$$a^2 = 2a^2 - a^2 \leq 2ac - b^2$$

であるから，等式を満たす条件は以下の通りである。$(a = b = c)$

$$x = \mp 1, \quad r = 1, \quad y = \pm 1, \quad s = 2$$

以上の話を，a, b, c の観点から整理する。

(1) $a < c$ のとき，ありえる可能性は，

$y = 0$, $x = \pm 1$, $r = 1$, $s = 2$, $w = \pm 1$

のとき，つまり，

$$\begin{bmatrix} \pm 1 & z\sqrt{2} \\ 0 & \pm 1 \end{bmatrix} \curvearrowright [a, b, c]_2 = [a, b \pm 2az, 2az^2 \pm 2bz + c]_2$$

が成立するときのみである。また，$[a, b, c]_2$ 簡約条件から $-a < b \leq a$ である。一方，$[a', b', c']_2$ の簡約の条件から

$$-a < b \pm 2az \leq a$$

でもあるので，$z = 0$ が従う。

(2) $b \leq a = c$ であるとする。仮に $a' < c'$ であれば，逆変換を考えることで先程の場合に帰着される。従って，$c' = a' = a = c$ であると仮定してよい。

$[a, b, c]_2 \sim [a', b', c']_2$ であるから

$$\begin{aligned} b^2 &= D_2(a, b, c) + 4ac \\ &= D_2(a', b', c') + 4a'c' \\ &= b'^2 \end{aligned}$$

である。ここで，簡約条件から b, b' 共に正であるから，$b = b'$ が従う。

2. $n = 3$，つまり $sy^2 \leq 4$ のとき

(a) $y = 0$ のとき，$arx^2 = a$ であるから，

$$x = \pm 1, \quad r = 1, \quad y = 0, \quad s = 3$$

(b) $s = 1, y = \pm 1$ のとき $3ax^2 \pm 3bx + c = a$ である。このとき，

$$\begin{aligned} a &= 3ax^2 \pm 3bx + c \\ &= 3ax^2\left(1 \pm \frac{b}{ax}\right) + c \geq c \end{aligned}$$

であるから，$a = c$ であり，故に

$$3x(ax \pm b) = 0$$

が従う。

i. $x = 0$ のとき $(a = c)$

$$x = 0, \quad r = 3, \quad y = \pm 1, \quad s = 1$$

ii. $ax \pm b = 0$ のとき $(a = b = c)$

$$x = \mp 1, \quad r = 3, \quad y = \pm 1, \quad s = 1$$

(c) $s = 1$, $y = \pm 2$, $3ax^2 \pm 6bx + 4c = a$

$$3a\left(x \pm \frac{b}{a}\right)^2 - \frac{3b^2}{a} + 4c = a$$

しかし，

$$a^2 = 4a^2 - 3a^2 \leq 4ac - 3b^2$$

であるから，等式を満たす条件は以下の通りである。$(a = b = c)$

$$x = \mp 1, \quad r = 3, \quad y = \pm 2, \quad s = 1$$

(d) $s = 3, y = \pm 1$ のとき，$ax^2 \pm 3bx + 3c = a$ を満たす可能性のある x を絞る。$x = 0$ のとき，この等式は $3c = a$ となり簡約条件に反する。次に，$x = \pm 3$ のときには，$(\text{L.H.S}) = 9a \pm 9b + 3c \geq 3c$ であるから，こちらも不適である。以上に加えて，

$$a\left(x \pm \frac{3b}{2a}\right)^2 - \frac{9b^2}{4a} + 3c = a$$

と変形すると，$[a, b, c]_n$ の簡約条件

$$-a < b \leq a \Longleftrightarrow -\frac{3}{2} < \frac{3b}{2a} \leq \frac{3}{2}$$

から $|x| \geq 3$ では成立しないことも解る。以上を踏まえて，直接計算することで，

$x = \mp 1$ or ∓ 2, $r = 3$, $y = \pm 1$, $s = 1$

という条件を得る。$(a = b = c)$

以上の話を，a, b, c の観点から整理すると，$n = 2$ のときと同様の議論が成立することが解る。 □

以上の議論をまとめると，捻れ n の二次形式を分類するアルゴリズムを構築することができる。ここでは，Python を用いたコード，および小さい判別式に対する具体的な代表元を載せておく。

アルゴリズム 1　正定値二次形式の分類

```
import math
import sympy
def negative_coprime_n(D,n):
  list = []
  m = int(math.sqrt(-D/(4-n))
  for i in range(m+1):
    if (n*i**2-D)%4==0:
      ac = int((n*i**2-D)/4)
      a = sympy.divisors(ac)
      for j in range(len(a)):
        c = int(ac/a[j])
        if math.gcd(math.gcd(a[j],i),c) == 1:
          if c > a[j]:
            if (a[j] >= i) and (i > -a[j]):
              list.append([a[j],i,c])
            if (a[j] >= -i) and (-i > -a[j]) and
                (i != 0):
              list.append([a[j],i,c])
            elif c == a[j]:
              if a[j] >= i:
                list.append([a[j],i,c])
  if len(list)!=0:
    return len(list)
```

表 4　捻れ 2 の正定値虹形式の代表元

D	$[a,b,c]_2$	D	$[a,b,c]_2$
-2	$[1,1,1]_2$	-22	$[1,1,6]_2$, $[2,\pm1,3]_2$
-4	$[1,0,1]_2$	-24	$[1,0,6]_2$, $[2,0,3]_2$
-6	$[1,1,2]_2$	-26	$[1,1,7]_2$
-8	$[1,0,2]_2$,	-28	$[1,0,7]_2$, $[3,2,3]_2$
-10	$[1,1,3]_2$	-30	$[1,1,8]_2$, $[2,\pm1,4]_2$, $[3,3,4]_2$
-12	$[1,0,3]_2$	-32	$[1,0,8]_2$, $[2,2,5]_2$
-14	$[1,1,4]_2$, $[2,1,2]_2$	-34	$[1,1,9]_2$, $[3,1,3]_2$
-16	$[1,0,4]_2$, $[2,2,3]_2$	-36	$[1,0,9]_2$
-18	$[1,1,5]_2$	-38	$[1,1,10]_2$, $[2,\pm1,5]_2$
-20	$[1,0,5]_2$	-40	$[1,0,10]_2$, $[2,0,5]_2$

表 5　捻れ 3 の正定値虹形式の代表元

D	$[a,b,c]_3$	D	$[a,b,c]_3$
-1	$[1,1,1]_3$	-21	$[1,1,6]_3$, $[2,\pm1,3]_3$, $[3,3,4]_3$
-4	$[1,0,1]_3$	-24	$[1,0,6]_3$, $[2,0,3]_3$, $[3,2,3]_3$
-5	$[1,1,2]_3$	-25	$[1,1,7]_3$
-8	$[1,0,2]_3$	-28	$[1,0,7]_3$, $[2,2,5]_3$
-9	$[1,1,3]_3$	-29	$[1,1,8]_3$, $[2,\pm1,4]_3$
-12	$[1,0,3]_3$, $[2,2,3]_3$	-32	$[1,0,8]_3$, $[4,4,5]_3$
-13	$[1,1,4]_3$, $[2,1,2]_3$	-33	$[1,1,9]_3$, $[3,1,3]_3$, $[3,3,5]_3$
-16	$[1,0,4]_3$	-36	$[1,0,9]_3$, $[3,\pm2,4]_3$,
-17	$[1,1,5]_3$	-37	$[1,1,10]_3$, $[2,\pm1,5]_3$, $[4,3,4]_3$
-20	$[1,0,5]_3$	-40	$[1,0,10]_3$, $[2,0,5]_3$

このアルゴリズムを $-1000000 < D$ まで実行した結果，類数が 1 となる判別式はごく小さいものに限られた。これより，次の主張が予想される。

予想 3.7. 捻れ 2 の正定値二次形式に関して，類数が 1 となる判別式は，次で全てである。

$$-2,-4,-6,-8,-10,-12,-18,$$
$$-20,-26,-36,-44,-50,-74,-116$$

予想 3.8. 捻れ 3 の正定値二次形式に関して，類数が 1 となる判別式は，次で全てである。

$$-1,-4,-5,-8,-9,-16,$$
$$-17,-20,-25,-41,-49,-89$$

また，得られた類数と古典的二次形式の類数を比べてみると，興味深い法則性を見つけたので，ここで述べておく。

予想 3.9. 捩れ 2 の二次形式に対する類数 h_2 と古典的二次形式の類数 h には次の関係がある。

$$h_2(D) = \alpha h(2D)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & D = -2,-4 \\ 1, & D \equiv 0,8,10 \pmod{16} \\ 2, & D \equiv 2 \pmod{16} \\ 0.5, & D \equiv 4,6,12,14 \pmod{16} \end{cases}$$

予想 3.10. 捩れ 3 の二次形式に対する類数 h_3 と古典的二次形式の類数 h には次の関係がある。

$$h_3(D) = \beta h(3D)$$

$$\beta = \begin{cases} 1, & D = -1,-4 \\ 1, & D \equiv 0,15,24,27 \pmod{36} \\ 1.5, & D \equiv 3,12 \pmod{36} \\ 0.5, & D \equiv 4,7,8,11,16,19,20, \\ & \qquad 23,28,31,32,35 \pmod{36} \end{cases}$$

3.2　$D > 0$ のとき

本研究報告では，不定値二次形式に対する有効なアルゴリズムに言及することができない。しかし，ある程度の場合について具体的な計算を遂行できたので，報告しておく。本節では，簡単のために，広義の同値のみ扱う。引き続き，n は 2，または 3 とする。

命題 3.11. 任意の捻れ n の不定値二次形式は，次の条件を持つ形式 $[a,b,c]_n$ と広義に同値である。

$$-a < b \le a < -c, \quad \text{または} \quad 0 \le b \le a = -c$$

証明．まずは，変換

$$\begin{bmatrix} 1 & z\sqrt{n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \curvearrowright [a,b,c]_n = [a, az+b, *]_n$$

を用いて，$-|a| < b \leq |a|$ を満たすように b を選び直す。ここで $|a| \leq |c|$ であれば，次のステップへ進む。一方，$|a| > |c|$ であれば，変換

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \curvearrowright [a,b,c]_n = [-c, b, -a]_n$$

を施した後に最初のステップへ戻る。このサイクルで $|a|$ が真に小さくなるので，これを繰り返すことで必ず

$$-|a| < b \leq |a| \leq |c|$$

という状況に至る。加えて，このときには，a と c は異符号である。実際，$ac \geq 0$ であるとすると，

$$0 \leq D = b^2 n - 4ac \leq a^2 n - 4a^2 < 0$$

となり矛盾する。ここで，$a < c$ であれば，

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \curvearrowright [a,b,c]_n = [-a, b, -c]_n$$

を作用させることで，

$$-a \leq b \leq a \leq -c$$

という状況へ至る。最後に，$a = -c$ かつ $b < 0$ である場合には，

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \curvearrowright [a,b,c]_n = [-c, -b, -a]_n$$

を施すことで，期待する結果を得る。　□

3.2.1　$n = 2$ の場合

上で述べた擬簡約理論を元に，代表元と成り得る形式を以下にまとめる。

表 6　捻れ 2 の不定値二次形式の代表元候補

D	$[a,b,c]_2$	D	$[a,b,c]_2$
2		22	$[1,1,-5]_2$
4	$[1,0,-1]_2$	24	$[1,0,-6]_2$, $[2,0,-3]_2$
6	$[1,1,-1]_2$	26	$[1,1,-6]_2$, $[2,1,-3]_2$, $[2,-1,-3]_2$
8	$[1,0,-2]_2$	28	$[1,0,-7]_2$
10	$[1,1,-2]_2$	30	$[1,1,-7]_2$
12	$[1,0,-3]_2$	32	$[1,0,-8]_2$, $[2,2,-3]_2$
14	$[1,1,-3]_2$	34	$[1,1,-8]_2$, $[2,1,-4]_2$, $[2,-1,-4]_2$
16	$[1,0,-4]_2$	36	$[1,0,-9]_2$
18	$[1,1,-4]_2$, $[2,1,-2]_2$	38	$[1,1,-9]_2$, $[3,1,-3]_2$
20	$[1,0,-5]_2$	40	$[1,0,-10]_2$, $[2,0,-5]_2$

しかし，これらは互いに同値であるかどうか，容易には判らないので，これより個別に考察を行う。

$\underline{D = 18}$

命題 3.12. $[1,1,-4]_2 \nsim [2,1,-2]_2$ である。

証明．両辺の約数を考えれば，

$$2rx^2 + 2xy - 2sy^2 = \pm 1$$

を満たす整数 r, s, x, y は存在しない。　□

$\underline{D = 24}$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{2} & 3 \\ 1 & 2\sqrt{2} \end{bmatrix} \curvearrowright [2,0,-3]_2 = [1,0,-6]_2$$

$\underline{D = 26}$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{2} & 3 \\ 1 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \curvearrowright [1,1,-6]_2 = [2,1,-3]_2$$

$$\begin{bmatrix} 4\sqrt{2} & 5 \\ 3 & 2\sqrt{2} \end{bmatrix} \curvearrowright [1,1,-6]_2 = [2,-1,-3]_2$$

$\underline{D = 32}$

命題 3.13. $[1,0,-8]_2 \nsim [2,2,-3]_2$ である。

証明．二次形式 $2X^2 + 2\sqrt{2}XY - 3Y^2$ は $(X,Y) = (0,1)$ のとき，-3 を表現する。命題を示すには，$X^2 - 8Y^2 = \pm 3$ が $(x\sqrt{r}, y\sqrt{s})$，$rs = 2$ という形の解を持たないことを示せばよい。$r = 2$ の場合，左辺が偶数，右辺が奇数となり，解は存在しない。$s = 2$ の場合には $x^2 - 16y^2 = \pm 3$ を考えるのだが，$x^2 \equiv \pm 3 \pmod 8$ となる x が存在しないため，こちらにも解は存在しない。　□

$\underline{D = 34}$

命題 3.14. $[1,1,-8]_2 \nsim [2,\pm 1,-4]_2$ である

証明．命題 3.12 と同様の議論で解る。　□

$$\begin{bmatrix} \sqrt{2} & 1 \\ 1 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \curvearrowright [2,1,-4]_2 = [2,-1,-4]_2$$

$\underline{D = 38}$

$$\begin{bmatrix} 2\sqrt{2} & 3 \\ 1 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \curvearrowright [1,1,-9]_2 = [3,1,-3]_2$$

$\underline{D = 40}$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{2} & 5 \\ 1 & 2\sqrt{2} \end{bmatrix} \curvearrowright [2,0,-5]_2 = [1,0,-10]_2$$

以上をまとめると，$D \leq 40$ に対するリストは次の表で完成する。

表 7　捻れ 2 の不定値二次形式の代表元

D	$[a,b,c]_2$	D	$[a,b,c]_2$
2		22	$[1,1,-5]_2$
4	$[1,0,-1]_2$	24	$[1,0,-6]_2$
6	$[1,1,-1]_2$	26	$[1,1,-6]_2$
8	$[1,0,-2]_2$	28	$[1,0,-7]_2$
10	$[1,1,-2]_2$	30	$[1,1,-7]_2$
12	$[1,0,-3]_2$	32	$[1,0,-8]_2$, $[2,2,-3]_2$
14	$[1,1,-3]_2$	34	$[1,1,-8]_2$, $[2,1,-4]_2$
16	$[1,0,-4]_2$	36	$[1,0,-9]_2$
18	$[1,1,-4]_2$, $[2,1,-2]_2$	38	$[1,1,-9]_2$
20	$[1,0,-5]_2$	40	$[1,0,-10]_2$

3.2.2 $n = 3$ の場合

$n = 2$ の場合と同様に，まずは，擬簡約理論を元に，代表元候補をまとめる。

表 8　捻れ 3 の不定値二次形式の代表元候補

D	$[a,b,c]_3$	D	$[a,b,c]_3$
3		23	$[1,1,-5]_3$
4	$[1,0,-1]_3$	24	$[1,0,-6]_3$, $[2,0,-3]$
7	$[1,1,-1]_3$	27	$[1,1,-6]_3$, $[2,1,-3]_3$, $[2,-1,-3]_3$
8	$[1,0,-2]_3$	28	$[1,0,-7]_3$
11	$[1,1,-2]_3$	31	$[1,1,-7]_3$
12	$[1,0,-3]_3$	32	$[1,0,-8]_3$
15	$[1,1,-3]_3$	35	$[1,1,-8]_3$, $[2,1,-4]_3$, $[2,-1,-4]_3$
16	$[1,0,-4]_3$	36	$[1,0,-9]_3$, $[2,2,-3]_3$
19	$[1,1,-4]_3$, $[2,1,-2]_3$	39	$[1,1,-9]_3$, $[3,1,-3]_3$
20	$[1,0,-5]_3$	40	$[1,0,-10]_3$, $[2,0,-5]_3$

しかし，これらは互いに同値であるかどうか，容易には判らないので，これより個別に考察を行う。

$\underline{D = 19}$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3} & 2 \\ 1 & \sqrt{3} \end{bmatrix} \curvearrowright [1,1,-4]_3 = [2,1,-2]_3$$

$\underline{D = 24}$

$$\begin{bmatrix} 2 & 3\sqrt{3} \\ \sqrt{3} & 4 \end{bmatrix} \curvearrowright [2,0,-3]_3 = [1,0,-6]_3$$

$\underline{D = 27}$

一般的に，$D = nd^2$ となる自然数 d が存在する場合，任意の形式は $[0,d,c']_n$, $0 \le c' \le nd$ へと同値であり，これらはすべて非同値である。実際，

命題 3.15. 三つの形式

$$\begin{bmatrix} 2\sqrt{3} & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \curvearrowright [1,1,-6]_3 = [0,3,1]_3$$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3} & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \curvearrowright [2,1,-3]_3 = [0,3,2]_3$$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3} & 2 \\ -2 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \curvearrowright [2,-1,-3]_3 = [0,3,5]_3$$

はそれぞれ，同値にはならない。

証明. 仮に，二つの形式 $[0,d,c_1]_n$，$[0,d,c_2]_n$ が同値であるとすると，

$$dnxy + c_1 sy^2 = 0$$

となる x, y, s が存在する。以下，二つの場合を分けて考える。

1. $\underline{y = 0 \text{ のとき}}$
   $xrw - syz = \pm 1$ から $xrw = \pm 1$ を得る。つまり，$r = 1$，$(x,w) = (\pm 1, \pm 1), (\pm 1, \mp 1)$ が従う。このとき，許される作用は

$$\begin{bmatrix} \pm 1 & z\sqrt{n} \\ 0 & \pm 1 \end{bmatrix} \curvearrowright [0,d,c_1]_n = [0,d,9z + c_1]_n$$

$$\begin{bmatrix} \pm 1 & z\sqrt{n} \\ 0 & \mp 1 \end{bmatrix} \curvearrowright [0,3,c_1]_n = [0,3,9z - c_1]_n$$

   となるが，$c_2 = 9z \pm c_1$ を満たすような，異なる c_1, c_2 は存在しないため不適。
2. $\underline{dnx + c_1 sy = 0 \text{ のとき}}$
   両辺を s で割ることで，$drx + c_1 y = 0$ を得る。XY の係数に着目すると，

$$\begin{aligned} \mu \cdot d &= d(rxw + syz) + 2c_1 yw \\ &= d(rxw + syz) + 2(-drx)w \\ &= -d(rxw - syz) \\ &= -\mu \cdot d \end{aligned}$$

   となるため，同値とはなり得ない。 □

$\underline{D = 35}$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3} & 4 \\ 1 & \sqrt{3} \end{bmatrix} \curvearrowright [1,1,-8]_3 = [2,1,-4]_3$$

$$\begin{bmatrix} 2\sqrt{3} & -7 \\ -1 & \sqrt{2} \end{bmatrix} \curvearrowright [1,1,-8]_3 = [2,-1,-4]_3$$

$\underline{D = 36}$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2\sqrt{3} \\ \sqrt{3} & 5 \end{bmatrix} \curvearrowright [2,2,-3]_3 = [1,0,-9]_3$$

$\underline{D = 39}$

命題 3.16. $[1,1,-9]_3 \nsim [3,1,-3]_3$ である。

証明. 先の命題 3.12 と同様の議論により，

$$3rx^2 + 3xy - 3sy^2 = \pm 1$$

を満たす整数解が存在しないことから従う。 □

$\underline{D = 40}$

$$\begin{bmatrix} \sqrt{3} & 5 \\ 1 & 2\sqrt{3} \end{bmatrix} \curvearrowright [2,0,-5]_3 = [1,0,-10]_3$$

以上をまとめると，$D \le 40$ に対するリストは次の表で完成する。

表 9　捻れ 3 の不定値二次形式の代表元

D	$[a,b,c]_3$	D	$[a,b,c]_3$
3		23	$[1,1,-5]_3$
4	$[1,0,-1]_3$	24	$[1,0,-6]_3$
7	$[1,1,-1]_3$	27	$[1,1,-6]_3$, $[2,1,-3]_3$ $[2,-1,-3]_3$
8	$[1,0,-2]_3$	28	$[1,0,-7]_3$
11	$[1,1,-2]_3$	31	$[1,1,-7]_3$
12	$[1,0,-3]_3$	32	$[1,0,-8]_3$
15	$[1,1,-3]_3$	35	$[1,1,-8]_3$
16	$[1,0,-4]_3$	36	$[1,0,-9]_3$
19	$[1,1,-4]_3$	39	$[1,1,-9]_3$, $[3,1,-3]_3$
20	$[1,0,-5]_3$	40	$[1,0,-10]_3$

4　今後の展望

4.1　$n \geq 5$ に関して

この場合，命題 3.2. の主張がそのままの形では成り立たない。しかし，$n = 5$ の場合の実験においても，非同値な形式から成る集合に対して，各係数の最大値を $|D|$ に比べて小さく取れるように見受けられる。今後，簡約形式の定義から見直して，$n \geq 5$ の場合でも成立するアルゴリズムを見つけたい。

4.2　$D > 0$ に関して

3.2 節の冒頭でも触れたように，$n > 1$ の場合には，不定値二次形式を非同値なものへ完全に分類するアルゴリズムが得られていない。$n = 1$ と同様のアルゴリズムを構成しようとすると，$\sqrt{n}$ の無理性が邪魔をしているように感じる。今後は，分岐条件などを加味して，アルゴリズムの手数を増やすことで，解決の糸口としてみたい。

4.3　各種予想に関して

現段階では，これらの予想解決に向けての有効な手立ては（少なくとも筆者の中では）見つかっていない。$n = 1$ のときを模倣して，楕円や双曲線の面積に帰着させる証明を試みたが，n との約分をうまく制御できなかった。今後は，類対論を用いた代数的手法と保型形式を用いた解析的手法を考えている。

参考文献

1)[DA]. C. F. Gauss, *Disquisitiones Arithmeticae*, 1801

2)[Bak]. A. Baker, Linear forms in the logarithms of algebraic numbers, Mathematika 13 (1966), 204-216.

3)[Hee]. K. Heegner, Diophantische Analysis und Modulfunktionen, Mathematische Zeitschrift 56 (3): 227-253

4)[Hei]. H. Heilbronn, On the class-number in imaginary quadratic fields, Quart. J. Math. Oxford Ser. 5 (1934), 150-160.

5)[Sta]. H. M. Stark, A complete determination of the complex quadratic fields of class-number one, Michigan Math. J. 14 (1967), 1-27.

6)[YY]. S. Yanagida, K. Yoshioka, Semi-homogeneous sheaves, Fourier-Mukai transforms and moduli of stable sheaves on abelian surfaces

7)[Zag]. D. B. Zagier, Zetafunktionen und quadratische Körper – Eine Einführung in die höhere Zahlentheorie–, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1981.

（２０２０年１月１４日　受理）

車軸と車輪の間の動摩擦係数(減速係数)の測定 5

―光変調フォト IC による検出精度向上に向けたノイズ対策―

藤井 俊介*

光変調フォト IC と赤色レーザー光を用いて，自作エンコーダをつけた車輪の角速度(接線速度)の計測 [1)2)] を行ってきた。本稿では特に，パルス中の余計な信号 [1)] を取り除くことに焦点を当てて開発する。具体的には，光源に回折格子の導入，光源の拡散を制限するスリット幅の狭小化(1[㎜]→0.2[㎜])，スリット数を増やしたエンコーダの再試作(60 穴→90 穴)を行った。その結果，この IC の仕様通りの 2 出力パルスと正転・反転判別のための位相情報も，オシロスコープによる計測で正しく得られた。

また，車輪と軸の動摩擦係数(減速係数)について，初(接線)速度と動摩擦係数が関連しているように解釈できるデータを得た。

（キーワード：動摩擦(減速)係数，エンコーダ，光変調フォト IC,回折格子）

Measurement of Deceleration Coefficient in a Simple Experimental System with One Wheel and One Axis part 5

－Noise suppression intended for the proper construction of measurement system －

Shunsuke FUJII*

Intended for generating the proper pulse for rotating wheel motion, some experimental settings[1)] are modified. One trial is making single slit narrower for laser light making widespread spot on the encoder. And other trial is introducing diffraction grating. Use of both techniques works well. For further development, new encoding plate with narrower slit (from 60 slits (old)　to 90 slits (new)) is made.

The experiment shows that deceleration (kinetic friction) coefficients depends on its initial (radial) velocity, whose kinetic friction read from velocity-time graph looks different from one expected from the usual Coulomb-Amonton's law for longer time measurement.

(Keywords: kinetic friction, encoder, photo IC, diffraction grating)

1.　導入

物理の教育現場で，物体の運動状態を記録し，「そのデータ処理を通して物理的考え方や基礎概念を身につける」という，実験・理論-融合的な物理教育の方法論は,古くから台車の運動を打点式/放電式タイマーで記録するという方法によって，全国的に実現･教育実践されてきた。その状況は，この現代になっても変わらない。一方で，この方法には，記録用紙とタイマーとの摩擦によって，データにノイズが入りやすく，初学者の概念形成には有効ではあるが，物理現象一つ一つの特徴をつぶさに観察し，そのあらわれた結果の中で何が問題なのかを，より深く探るには不十分な点があった。特に，筆者は，力学台車の摩擦係数に興味を持って，その現象を調べるための具体的提案として，光を用いた非接触型の装置開発 [2)] を提案してきた。それらの研究過程の中で，ベアリングなしの車輪と軸の褶動という実験設定 [2)] では，特に車輪の角速度を早くした場合に摩耗の過程や，ガタつきなど余計なエネルギー損失・音波の発生などを伴うことが実験過程で見えてきた。摩耗はミクロなプロセスであるので，加速度・角速度など

＊一般教育科(物理科)

巨視的な測定量と摩耗・動摩擦係数の関係はまだ明らかにできていない。ただ，摩耗していると思われるときは，減速に伴う加速度から見積もられる動摩擦(減速)係数は，大きくなるように見え，従来教科書で一定(速度に依存しない)として扱われてきた動摩擦係数(クーロン-アモントンの法則[3])が，速度に依存し成立していないように見える。この動摩擦係数の速度依存性には，物性理論の総合報告でも，それを支持する実験結果はあるが，まだ決着を見ていない[3]ようである。本実験と関連すると思われる理論モデルについては附録 5.2 につけた。

6° ごとに穴をあけたエンコーダ盤を，車輪に見立てた金属円筒(黄銅製)をアルミ軸に取り付け，浮かせた状態で角速度の時間変化を測る，従来の方法[2]による測定では，基本的にセンサ 1 素子で行ってきた。しかし，1 素子では，正転・逆転(時計まわり・反時計回りの)方向が判定できず，実際の台車の，(単振動させるなどの)一般の運動の計測には，向かなかった。そこで，浜松フォトニクスが出している 4 素子タイプの光変調フォト IC 付きセンサ S4506 を用いた実験[1]を行い，2 種類の位相のずれた出力パルスを取り出すことによって，回転方向も検出できるような測定システムの構築を目指してきた。しかし，得られたデータ[1]は,とても解析に耐えうるようなデータではなく，前回の報告[1]ではその原因を究明しきれなかった。

ただ，一つの手がかりは，図 2 の様に，2 つのパルス(白い点線で囲んだ部分)が 1 つのデータに対応しているように見えること，その不要なデータの混入の原因を探ることが,今回の課題である。

この論文の構成は以下の通りである。次の 2 節では，2018 年度の研究報告[1]に挙げた問題点の探索を兼ねて行った予備実験について述べる。次の 3 節では，予備実験で得られたエンコーダ自体の改良の必要性と，レーザー集光用の凸レンズの代替として,回折格子を組み込んだ検証実験を行う。4 節で得られた結果をまとめ，結論と今後の展望を述べる。

2.　予備実験

この節では，2018 年度に作成した測定システム[1]の概要を説明し，その問題点を明らかにし，改善すべき点について報告する。

2.1.　問題点の確認

図 1 は，測定装置をレーザー照射側から見た図である。このレーザーは絞りレンズ付きのレーザーであるが，図 1 のエンコーダ上のレーザー照射部分（赤色）の光の広がり方からも分かるようにレーザーの絞りが甘い。エンコーダ盤はステンレス製で，1 スリット約 1mm 幅であり，スリット穴を通過した光が，エンコーダのすぐ後ろに備え付けてある光変調フォト IC に届き,到達した光信号に応じた ON-OFF パルスが 2 系統分出力される。出力パルスは互いに位相が少しずれた状態で出力されるが，2018 年度の報告[1]では，図 2(白い点線)のように，幅の異なる 2 つのパルスが組になって出力される。

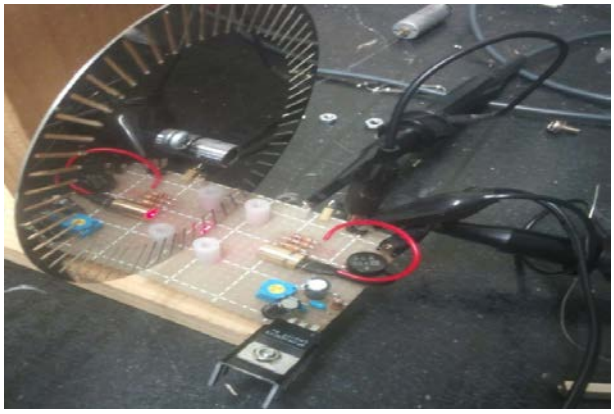


図 1　2018 年度に制作した測定装置

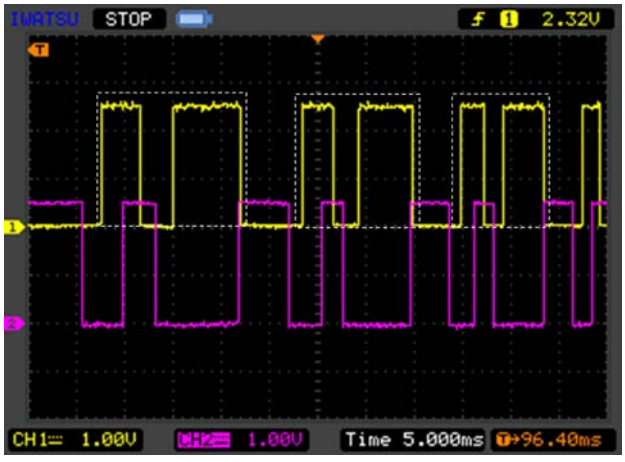


図 2　2018 年度報告したパルス

図 2 の白い点線部を 1 単位としてパルス幅が変動しているので，例えば，CH1(黄色・上側)の 2 パルスのうち，どちらか 1 つのパルスは不要なパルス[*1]が含まれていると考えられる。

[*1] 余計なパルスが生じる原因として，エンコーダ盤が金属製(ステンレス製)であり，光変調フォト IC も光をよく

ところで，この広がってしまったレーザーは，光変調フォト IC の推奨エンコーダ幅が図 4 の様に 0.70[㎜]であるので，推奨仕様外の実験設定になっていることに気づかされる。余計なパルスは仕様より大きな幅の光が再隣接の 2 素子だけでなく，2.7 素子分にレーザ光があたっているため，目的の信号が得られなかったのではないか。その結果，2018 年度の測定[1)]では余分なパルス信号が混ざり，物理的解釈に支障が生じたと考えられる。取り出した 2 出力のパルスの信頼性が良くなく，正転・

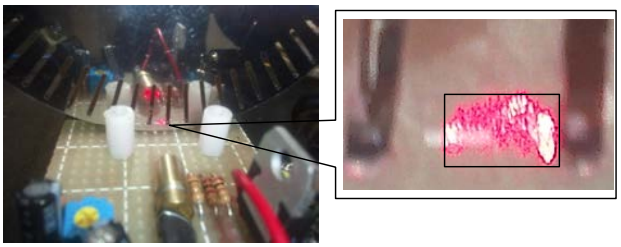


図 3　広がってしまったレーザー

逆転(時計まわり・反時計回り)の回転方向判定も含めた本来期待される情報を，エンコーダ[*2]の計測から取り出すことができなかった。

今回は，基礎に立ち返り，光変調フォト IC の推奨仕様に合わせたエンコーダ，レーザー光の絞りなどの検討を目的とした予備実験を以下に行う。

2.2.　レーザー光の調整と絞り窓・回折格子

エンコーダ盤を作り直すのはとても大変なので，エンコーダ盤を，光変調フォト IC の仕様である 0.70[㎜]に合わせることはせず，レーザー光源に対して，以下のようないくつかの工夫を行うことによって，正常なパルスが得られない問題[1)]の解決を目指す。

今回は光を絞るための専用のレンズの設計・製作は行わず，光の干渉を用いて光の集光を試みる。

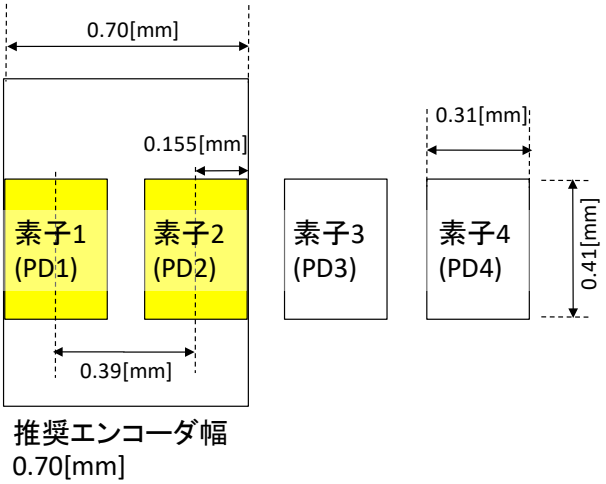


図 4　光変調フォト IC に対応するエンコーダの推奨仕様

ここでは，多波源の光源を作り出し，それらの光の干渉を行うことができる回折格子(1000[本/cm])を，図 5b. の光源とセンサの間の光路に図 5a. の様に設置する。0 次の明線では，光が強めあい，強めあい条件を満たさない場所では，特に回折格子では光の強度が極端に弱くなる特性があるので，回折格子は本実験の光の集光という目的に合って

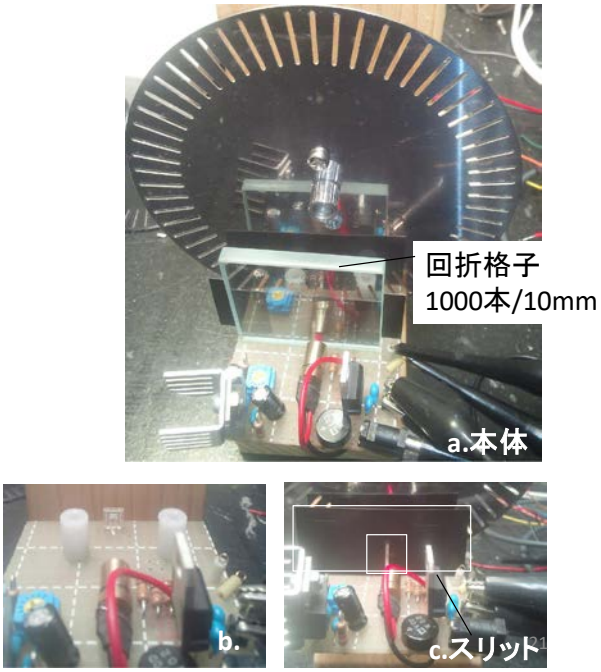


図 5　回折格子と 1[㎜]より小さな幅を持つスリットを用いた光源の絞り

反射する素材であることから，光変調フォト IC で反射したレーザー光が，エンコーダ盤で再反射して素子に入るマルチパス反射の可能性もある。そのために，反射を防ぐために，エンコーダ盤のカバーをポリスチレンの黒いプラ板で作成し，エンコーダ盤の裏につけるなどの試みも行った。しかし，この装着により，明確に，余計なパルスが減るようにも見えなかったので，マルチパス反射による誤検出は，可能性としては否定するほどではないが，データにノイズが混じる主な原因とは考えにくい。

[*2] そもそも，なぜ，市販のロータリーエンコーダを使わないのか，不思議に思うかもしれない。しかし，市販のものは，トルクを加える必要があり，そのようなものをつないで計測すると，元の測定すべき状態を変えてしまい，動摩擦係数の測定を目的とする本測定には，プローブとしての役割を果たさない。そのため，車輪に直接エンコーダ盤を取り付け，光パルスに反感して測定するという方法をとっている。

いる。しかし，実際は，回折格子を通すだけでは，目的のパルスが得られないため，図 5(a. または c.)のように 0 次の明線以外を遮断するための単スリットを，回折格子の後につけた。

2.3.　予備実験の結果

時計回りと反時計回りに回した場合の CH1 と CH2 を合わせたデータを図 6，図 7 に示す。いずれのデータも，2018 年度の測定で見られた解釈不可能な速度についての 2 価データ[1)]は現れず，得られたデータは物理的な解釈が可能なデータとなった。さらに，光変調フォト IC からの 2 出力パルスの位相差を取り出すように Excel で処理すると，時計回り・反時計回りの判定も可能となる。

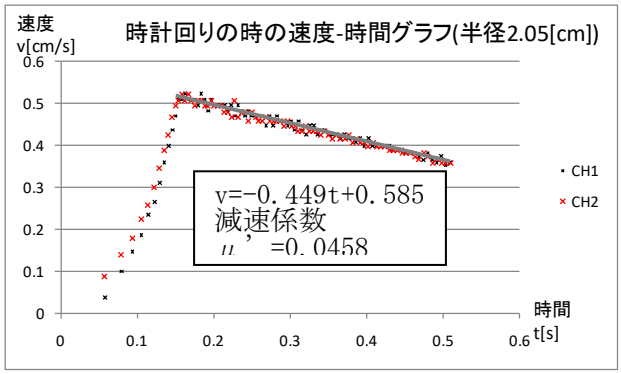


図 6 時計まわりで回した時の速度−時間グラフ

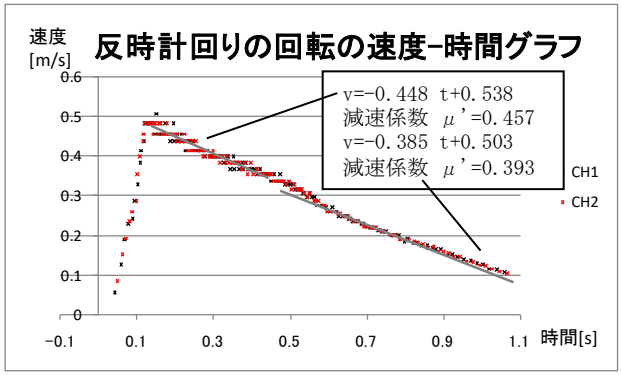


図 7　反時計回りで回した時の速度−時間グラフ

図 7 において車輪の接線速度が 0.35[m/s]を超えるところは，一周 60 穴のロータリーエンコーダのデータ精度が落ちている。これは，回転速度が速くなったときに生じる車輪の横揺れなど，新たに生じるエネルギー散逸過程に起因する。車輪と直結して機械的な方法で測定している現状では，この誤差増大を抑制するのは難しい。

図 6 では，時計回りの動摩擦(減速)係数 μ' は，接線加速度を重力加速度 g（$g=9.80$ [m/s^2]）で規格化したもの，$\mu'=\dfrac{|a|}{g}$ として定義される。図 6 では，$\mu'=0.0458$ を得る。図 7 では，反時計回りの動摩擦(減速)係数は，前半で $\mu'=0.0457$，後半で，$\mu'=0.0393$ を得る[*3]。

3.　ロータリーエンコーダの試作と測定

2 節では，光変調フォト IC の仕様に合わせた光源の調整が，正常なデータを得る要であることがわかったので，この点を実現するために，光源の調整に加えて，エンコーダの作成なども視野に入れたエンコーダ盤の試作も行う。

ロータリーエンコーダだけで，光変調フォト IC の仕様に合わせようとすると，推奨穴間隔が 0.31[mm]なので，これに合わせた穴の位置の寸法は，計算上，半径 2.6[cm]のエンコーダ盤上に約 1[°]間隔で配置する[*4]とよいことが分かる。ロータリーエンコーダの試作は 3[mm]厚のバルサ材(木材)を用い，加工データの製図は designer というソフト，加工はレーザー加工機で行う。内側の穴をレーザー加工機で切るのには出力の微調整が必要であり，その結果，加工可能だったのは現状で 90 穴/1 周[*5]であった。

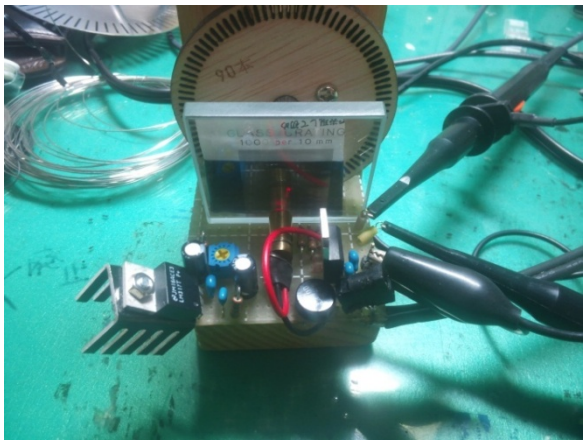


図 8　90 穴ロータリーエンコーダを用いた計測

[*3] 時間領域によって傾きが変化している(クーロン・アモントンの法則からのずれが見られる)。付録 5.1 では，時間分割方法を変えながら，区間ごとの傾きを求めた。

[*4] 実際は，半径 2.3[cm]の位置に 1[°]ごとに配置すると，穴の中央と穴の中央の間の距離は 0.039[cm]=0.39[mm]となり推奨穴間隔となる。

[*5] スリット位置半径 23[mm]とすると，1.6[mm]が穴と穴の

3.1. 90 穴のロータリーエンコーダによる実測

図 8 のように，測定装置には，新たに製作した 90[穴/周]の木材製のロータリーエンコーダを，予備実験のステンレス製のロータリーエンコーダに代わってとりつけた。従来[1)2)]行ってきた様に，黄銅製の車輪にロータリエンコーダをつけ，アルミ軸と黄銅車輪の間の褶動による速度-時間変化を取得するため，レーザー光を照射し，光の明暗をを光変調フォト IC でパルス信号化，オシロスコープで立ち上がり時刻を計測する。エンコーダ穴の位置は，黄銅製の車輪の半径の少し外側に設定した。黄銅製の車輪に取り付けてあるバルサ材製のエンコーダは，黄銅の車輪に対して密度が小さく，ステンレス製のロータリーエンコーダよりも慣性モーメントが小さいため，結果として回転が持続する時間が 2018 年度の実験[1)]より，短くなる。言い換えると，バルサ材製のエンコーダ装着後の測定時間は，本来の黄銅車輪の回転持続時間に近く，従来の測定(図 6，図 7)より短い。遮光用単スリット幅を 1[mm]に設定し，さらに，回折格子を前段

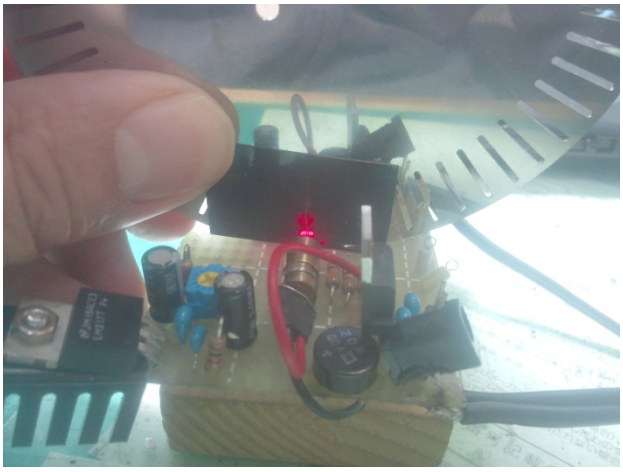


図 9　旧ロータリーエンコーダ[1)2)]にビニールテープを貼って作った即席スリットを通した計測(反時計回り)

に挟んだ状態での測定を予備実験に続いて行った。そうして得られたパルスが，時計回り回転によって生じるパルス(図 10)[*6]である。

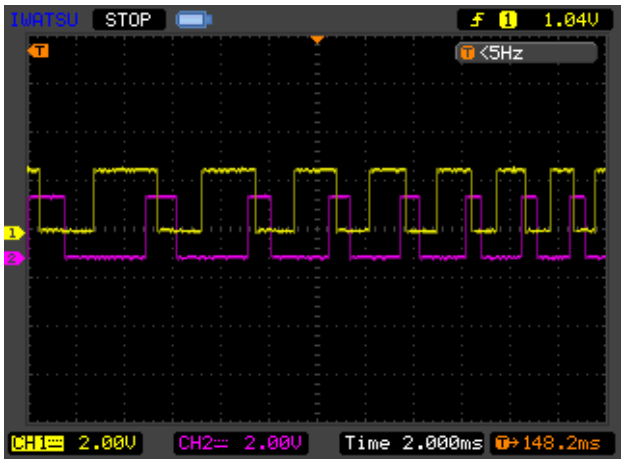


図 10　時計回りに回した時の出力パルス

一方，スリットの幅を狭くするための別なアイデアとして，図 9 のように，旧エンコーダ盤(ステンレス製)に黒の絶縁テープを貼り付け，カッターで切り目を入れただけの単スリット(幅は 0.2[mm]程度)を実験に用いた。この単スリット(0.2[mm])にレーザー光を通すことにより，レーザー光の幅を適切に狭めることができ，光変調フォト IC の仕様を，回折格子なしでもほぼ満たすことができる。実際，スリットの位置を左右にずらして微調整するだけで，図 11 のように，目的の信号を得ることができる。

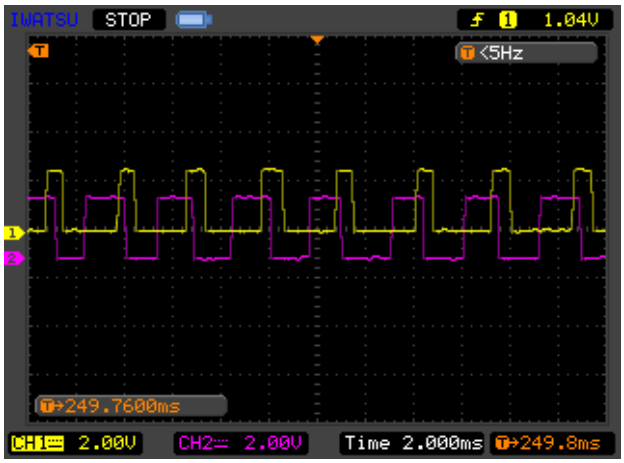


図 11　反時計回りに回した時の出力パルス

回転方向を変えた時の出力パルスの違いは，図 10 と図 11 のパルスの違いとして，今や明確に読

中心間距離になり推奨の 0.39[mm]を超える。広がって入射するレーザー光を仕様内に狭める調整が必要である。

[*6]図 10 のパルスは図 11 と比べて，精細に表示されている。これはオシロスコープのデータ記録前の時間分解能を 10[ms/div]程度に設定したためである。図 11 は 50[ms/div]-100[ms/Div]の時の波形であり，図 10 に比べて時間分解能が荒く，波形も粗く出力される。したがって，図 10，図 11 の違いはオシロスコープの表示仕様による違いであり，2 者に大きな実験設定の違いがある訳ではない。

み取ることができる。時計回りに回した場合，図 10 のように，CH1(黄)の位相に対して，CH2(紫)の位相が 1/4 周期分遅れて[*7]いる。また，反時計回りに回した場合，図 11 のように，CH1(黄)に対して，CH2(紫)が 1/4 周期進んでいる。この 2 つの信号の相対的な位相の違いを，検出してやれば回転方向の検出もソフトウェア的に可能である。

以下図 12，図 13 は，相対的な位相情報を入れない[*8]で CH1 と CH2 それぞれの立ち上がりパルスを独立に拾い出し，共通の速度-時間グラフに表示させたものである。

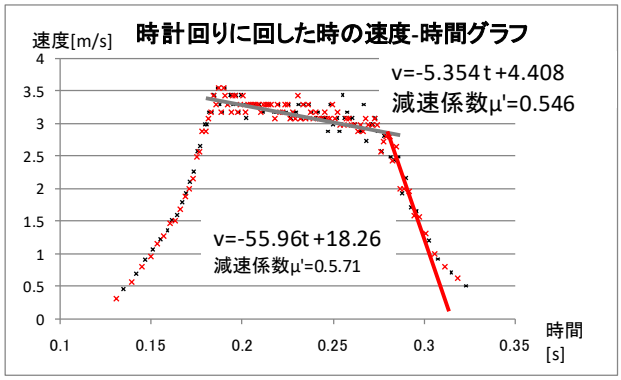


図 12　時計回りに回した時の速度-時間グラフ

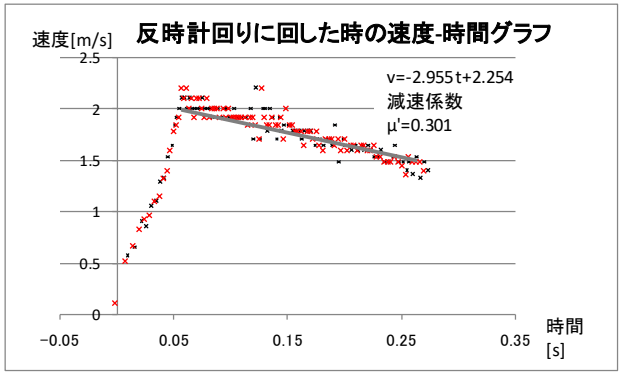


図 13 反時計回りに回した時の速度-時間グラフ

すでに 3.1 節の始めに説明したように，図 6，図 7 における計測時間よりも 0.2-0.9[s]ほど短くなり減速係数は大きめに出ている。

4. 議論と結論，将来展望

4.1 動摩擦(減速)係数の振る舞いについて

黄銅の車輪とアルミニウムの軸の摺動を起源とする摩擦による減速過程を，(黄銅)車輪を浮かせた状態で(アルミ製の)軸からの摩擦のみが効く状況で減速実験を行った。実際は，車輪に固定されたエンコーダを光が通過・遮断されることにより，パルス信号が 2 系統出力され，オシロスコープで計測・記録，特にパルスの立ち上がり時刻をデータ処理して時刻の間隔の変化を測定する。エンコーダの制約から，6° または 4° を最小分解角度とする(角)速度を得る。黄銅の車輪の半径が 2.0[cm]とした(接線)速度-時間グラフを Excel で処理し，傾きより動摩擦(減速)係数を読み取った。

図 6，図 7 を比較すると，動摩擦（減速）係数は，時計回りの方が大きく，反時計回りはやや小さい。また，反時計回りでは，減速係数が減少している。初速度に違いはなく，車輪と軸の間の摩耗具合が回転方向によって異なるのではないか。

図 12，図 13 についても比較する。減速係数が途中で大きく変わっているのは，時計回り方向であり，途中から傾きが大きくなっている。一方，反時計回りでは減速中に，傾きの大きな変化は見られない。この違いは，回転の接線速度の最大値が，時計回り回転の方が 1.7 倍くらい速い点が関係している(摩擦係数の速度依存性)。実際，回転の接線速度(角速度)が大きくなると，車輪の横揺れ，音の発生など，回転によるエネルギー損失が多様になる。

摩耗の仕方と初期接線速度のエネルギー損失の関係については，今だ，明らかでないため，この裏付けについてはさらなる検証実験が必要である。

4.2 装置開発のうえでの議論

光変調フォト IC で正しいデータが取れないという問題点[1)]について，IC の仕様に立ち戻り実験設定の問題点を絞り込んでいくことができた。

予備実験では，センサ(光変調フォト IC)とステンレス製のエンコーダ間で複数回反射による誤検出(multi-path reflection noise)を想定したが，実際実験してみると，それは主な原因ではないことが分った。ステンレス製エンコーダの反射を防ぐため同じ形の黒色のプラスチックカバーを製作依頼して実験したが，問題がほとんど改善されなかったからである。

次の可能性は，図 3 の拡大図のように，レーザー光が広がりすぎて(1[mm]以上の幅)，光変調フォト IC の推奨仕様(素子間距離=0.70[mm])を満たしていないため，不要なパルス信号が生ずる可能性

[*7] オシロスコープは左が過去，右向きが未来なので，図 10 の場合，紫(CH2)は未来側にずれる。パルスのタイミングとしては CH1 より CH2 が「遅れる」ことを意味する。

[*8] CH1 と CH2 の相対的な位相情報を Excel 上で識別させて処理を試みた結果は附録 5.1 に載せたので別途参照されたい。

である。2 節ではこの観点での予備実験を行い，続く 3 節で，さらなる検証実験を，エンコーダの作り直しも視野に入れて行った。最も単純な解決法はエンコーダのスリット幅を狭くすることであるが，そのためには 1° ごとの穴あけが必要である。レーザー加工機で試作が成功しなかった。実際は，60[穴/周](旧エンコーダ)から 90[穴/周](木製[バルサ材]製)の改善に留まった。そのため，光源を絞る工夫も追加で行った。光源の微調整には，予備実験で，回折格子(1000[本/mm])と遮光用としてポリスチレン製の単スリット(幅 1.0[mm]程度)を用いた。その結果，出力パルスに仕様通りの位相差をもった 2 つの出力パルスを得た。続く，3 節の本実験では，時計回り方向には 2 節と同じ回折格子と単スリット(1.0[mm])を，反時計回り方向に対しては，金属板(旧ロータリーエンコーダ盤)に黒の絶縁テープをはり，カッターで切れ目を入れて単スリットを作り，レーザー光の幅をスリットと同じ程度の 0.2[mm]幅程度まで絞った。これにより回折格子なしでも，仕様通りのパルス信号が 2 系統得られる。

4.3 結論

浜松フォトニクスの光変調フォト IC (S4506)の仕様に合わせた実験装置の設定は，遮光スリットの幅を 0.2[mm]程度にするとよいことが分かった。

動摩擦係数の接線速度(角速度)依存性は，速度時間グラフの**傾きの時間変化**として現れる。車輪と軸の摩耗状態との関連も引き続き調べていく。

4.4 将来展望

現状では，スリット幅の左右位置の微調整を，手で行っているため，車輪の回転軸の角度を任意に変えて，この実験を行うことが難しい。今後は，位置の微調整・固定ができるウォーム歯車とピニオン歯車・ラック歯車などを組み合わせた機構を導入して装置開発を行う。また，レーザーと車輪の垂直性も微調整・固定する機構も取り入れる。

さらに，教材用として，パルスの位相差をワンチップマイコンで回転方向検出し，LED で表示させることも試みる。

また，今回の試作を通して，レーザー加工機を自分で使えるようになったので，遮光単スリット幅を 0.1[mm]くらいのものを作成すること，再隣接スリットの端端間距離が 0.08[mm]の仕様を満たすエンコーダ盤の作成にも引き続き挑戦する。

また，レーザーホログラムモジュールを活用するためには，位置決め・補正のための制振が必要であり，サーボ機構など自動制御を学んでいきたい。CD の信号検出方法にならって，制振機構の導入・エンコーダの超精密計測を実現し，摩擦の物理計測を精密化する。

謝辞

黒ポリスチレン製のエンコーダカバーをレーザー加工機で複数枚作ってくださったものづくり実習工場の中村さんに感謝します。

はざまる工房の使用に当たる導入説明をしていただいた永吉さん，レーザー加工機に使用にあたって，使用方法の説明を行ってくださった長井さん，レーザー加工機の微調整の仕方などの相談に乗ってくださった向川さんに感謝します。

5.附録

5.1 解析ソフト(Excel 表計算)のバグ取りと一新された解析フロー

5 年ほど前から，5000 余りのオシロスコープ測定データを解析するため，Excel 上で解析ソフトを作ってきた。解析フローの見直しを兼ねて，ゼロからソフトを作り直した。その際に，本解析フローは以下の 6 つに整理できることが分かった。

(i)チャタリングによる誤動作防止のための入力信号処理部分。立ち上がりとみなす閾値 ε は，自分で自由に設定できる。

(ii)データ数から 1 データ時間当たりの経過時間を換算する部分。入力データの個数の自動カウントと，詳細の時刻の割り当ても入力データ数に基づいて自動計算，物理解析可能な時刻データ列を生成。データの立ち上がりを拾い出す処理を簡素化･時刻データ処理のバグを取り除くことに成功。

(iii)[大きく改善]立ち上がりデータのみを拾い出し，時刻の値の小さな順にデータの並べ替える部分。

(iv)CH1 からの信号と CH2 からの信号を合わせて，一つのグラフに混ぜてから v-t グラフとして表示する部分

(v)CH1 と CH2 の立ち上がり/下がりの両方を検出し，重みづけて足すことで位相情報に直す部分。

(vi)CH1 と CH2 の位相情報から，回転方向を検出し，時計回り・反時計まわりを判別し v-t グラフ化する部分。

特に，(iii)の処理手続きでは，従来 Microsoft Excel の Vlookup 機能を用いていたが，次のデータを探すために，取得データの「出現予想」を行うなど，入力データに基づいてはいるが場当たり的な方法をとっていた。今回は，Excel の small 機能を用いて，確実に時刻の小さい順番にデータを確実に拾い出すことが可能になった。具体的には，命令 1 のように，小さな立ち上がり時刻を拾い出す仕組みを考案した。また，今回から「ポインタ的な」アドレス指定方法を用いて処理を作り直したため，解析ソフトの柔軟性が高くなった。

```
SMALL(INDIRECT($I$2):INDIRECT($I$3),E12),"")
```

命令 1　small を用いたデータ検索

命令 1 の E12 には，1 から 1 ステップずつ順に増加する数値(時刻データの順位)が入っていく。それを，あらかじめ計算させておいた入力データの開始位置と最終位置を I2 変数と I3 変数に格納しておき，それらに Indirect 関数を用いて，元データの存在範囲を指定しておく。こうすることで，データ長が任意に変化してもデータ長に応じて，時刻が小さい順に並べ替えを行うことができる。

なお，こうして完成した解析ソフトで図 7 の場合のデータを解析したのが次の図 14 である。

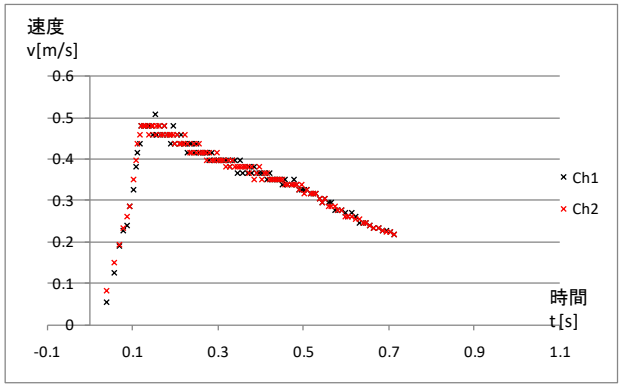


図 14　一新されたデータ解析ソフトによる図 7 のデータの再評価

図 14 は，速度時間データとしては，図 7 にくらべても初期の回し始めのばらつきが少なく解析ソフトとして改善したことが分かる。しかし，回転方向の判定を入れた速度時間グラフは下図 15 のとおりであり，謎の速度 0 のデータがところどころに見られる。データの処理手続きは，瞬間の位相だけを読み取る設定にした。位相判定の方法は図 10 に対応する位相(CH1 の立ち上がりかつ CH2 が L レベル)が時計回り判定とし，速さデータにマイナス符号をつけて表示，一方，図 11 に対応する位相(CH1 が立ち上がりかつ CH2 が H レベル)という判定基準で上のグラフを加工すると，図 14 のグラフは以下のようになり，これだけの判定法では，まだ方向を十分に識別したとは言えない問題点が残っている。

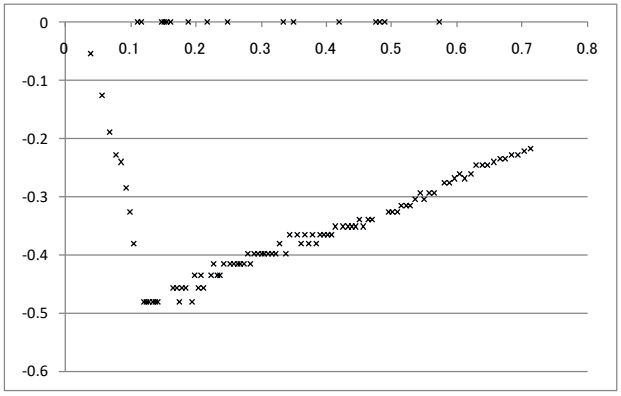


図 15　方向判定をつけたデータ

最後に，図 14 で得られた速度-時間グラフは，波打っており，区間ごとに傾きの平均値を求めると次のようであった。

開始区間	終点区間					傾き	減速係数
30	60	K30	K60	L30	L60	−0.41881	−0.04274
60	90	K60	K90	L60	L90	−0.52942	−0.05402
90	120	K90	K120	L90	L120	−0.38975	−0.03977
120	150	K120	K150	L120	L150	−0.32547	−0.03321
150	180	K150	K180	L150	L180	−0.42184	−0.04304
180	210	K180	K210	L180	L210	−0.58056	−0.05924
210	224	K210	K224	L210	L224	−0.41638	−0.04249

図 16　30 点ごとに傾きを最小二乗法で求める

このように傾きの大きくなる区間が繰り返し現れる。その大きさは区間の取り方によっても変わる。

開始区間	終点区間					傾き	減速係数
30	50	K30	K50	L30	L50	−0.24597	−0.0251
50	70	K50	K70	L50	L70	−0.43433	−0.04432
70	90	K70	K90	L70	L90	−0.53846	−0.05494
90	110	K90	K110	L90	L110	−0.37024	−0.03778
110	130	K110	K130	L110	L130	−0.33186	−0.03386
130	150	K130	K150	L130	L150	−0.371	−0.03786
150	170	K150	K170	L150	L170	−0.38384	−0.03917
170	190	K170	K190	L170	L190	−0.57645	−0.05882
190	210	K190	K210	L190	L210	−0.53853	−0.05495
210	224	K210	K224	L210	L224	−0.41638	−0.04249

図 17　20 点ごとに傾きを最小二乗法で求める

例えば，減速係数が図 16 では，30 個目～60 個目，150 個目～180 個目の時刻データで最大になっているのに対し，図 17 では，40 個目～60 個目，と 140 個目～160 個目・160 個目～180 個目で，減速係数が大きくなっている。

5.2 スティック-スリップ運動について

得られた実験結果は，まるで，車輪がどこかで引っ掛かり・固着・滑りを繰り返しながら減速していくようにも見える。類似の運動として，スティック・スリップ 運動[4]が挙げられる。この運動のモデルとして，トムソンモデル[4]を用いて，動摩擦係数が速度に依存することをシュミレーションしてみる。表面のざらついた様子は，x 軸上に有効ポテンシャル$U = U_0 \cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right)$の存在を想起させる。また，運動する物体の重心 $x_G(t)$ を振動の中心とする復元力を受けながら，凹凸のある表面上を物体は運動する。速度に比例する抵抗力も考えよう。

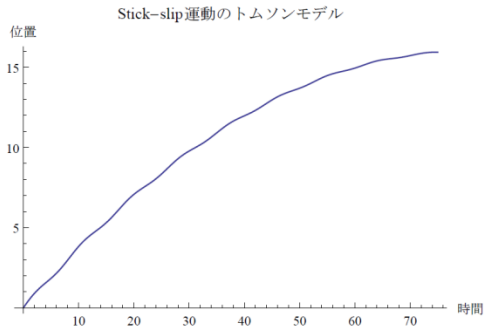


図 18　トムソンモデルで数値計算した位置-時間グラフ

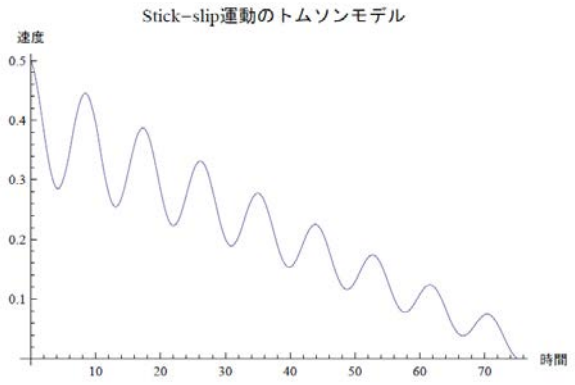


図 19　トムソンモデルで数値計算した速度-時間グラフ

この時の運動方程式は，

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma\frac{dx}{dt} = -\frac{\partial U_{eff}(x,t)}{\partial x}$$

ただし，$U_{eff} = U_0 \cos\left(\frac{2\pi}{L}x\right) + \frac{1}{2}k(x - x_G(t))^2$，振動の中心

$$x_G(t) = V_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

$x_G(t)$ は，手で等加速度直線運動を設定した。

初期値は，初期位置 0，初速度 0.5，他のパラメータ $m = 0.8$, $\gamma = 0.03$, $U_0 = 0.001$, $L = 10$, $k = 0.4$, $V_0 = 0.4$, $a = -0.005$ のもとで，Mathematica9.0 で，数値的に解いた。その数値解 $x(t)$ とその時間微分 $\frac{dx(t)}{dt}$ の数値プロットがそれぞれ図 18，図 19 である。実験結果の図 7，図 14，図 16，図 17 において，ところどころで，**傾きが大きく**なっていることと，図 18, 19 で全体として減速に重なって生じる細かな速度の変動で傾きの増加が説明できるかもしれない。今後はこのモデルと実験との関連も考えていく。

参考文献

1) 藤井 俊介：車軸と車輪の間の動摩擦係数(減速係数)の測定4 ーレーザー光を用いた光変調フォトIC を用いてー，東京工業高等専門学校研究報告 50，pp23-27, 2019 年 3 月
2) 藤井 俊介：車軸と車輪の間の動摩擦係数(減速係数)の測定 3 ―反射型光センサ(フォトリフレクタ)による実装を目的とした装置開発，東京工業高等専門学校研究報告書第 49 号 pp. 1-5, 28 年 3 月；藤井 俊介：車軸と車輪の間の動摩擦(減速)係数の測定 2 ―実装へ向けての拡張と装置開発，東京工業高等専門学校 研究報告書第 48 号, pp8-12, 2017 年 3 月；藤井 俊介：車軸と車輪の間の動摩擦係数の測定 ー力学台車と自作レールの性能評価のために，東京工業高等専門学校研究報告書第 47 号，pp. 1-5, 2016 年 3 月
3) 松川宏：摩擦の物理，表面科学 Vol. 24, No. 6, pp. 328―333, 2003
4) 松川宏：非線形科学シリーズ 4 滑りと摩擦の科学，培風館 pp166-171, 2009

（２０２０年１月３１日　受理）

零相電圧の印加量と直流コンデンサバランスに着目した素子温度均一化法のシミュレーション評価

綾野 秀樹*，木村 悠利*

省エネルギー化を促進するために，高効率駆動が可能である永久磁石モータの利用用途が増加している。しかし，永久磁石モータにおいて零速度で高トルクが要求される条件では，直流の大電流を流す必要がある。この場合，電力変換装置であるインバータでは，特定の素子に損失が集中し，発熱が偏る課題がある。これを解決するために，著者らは，3 レベルインバータを対象に素子温度均一化法を提案している。本論文では，提案法について零相電圧の印加量と直流コンデンサバランスの観点からシミュレーションにより発熱集中の緩和の効果を評価する。特に，直流コンデンサからの電荷供給量がバランスするように零相電圧の切替え時間割合を制御した場合，特定素子の最大温度を従来法よりも約 20%低減できることを示す。
（キーワード：零相電圧、インバータ、永久磁石モータ、発熱集中、直流コンデンサバランス）

Simulation of the Equalization Technique of Losses Generated at Power Devices Focusing on the Zero-sequence Voltage and the Balance of DC Capacitors

Hideki AYANO*, Yuri KIMURA*

In PM motors, a large DC current flows at a zero-speed and high-torque condition. In this case, the specific switching devices in inverter systems generate an electrical loss and the heat generation is locally concentrated. This paper shows the simulation results of the proposed technique focusing on the amount of zero-sequence voltage applied and the DC capacitor balance. In particular, the maximum temperature in the specific switching devices can be reduced by about 20% compared to the conventional method in all motor magnetic pole position.
(Keywords: zero-sequence voltage, inverter, PM motor, thermal concentration, DC capacitor balance)

1. 諸言

近年，地球温暖化の防止などの環境問題に対する気運が高まっており，家電製品や産業機器のさらなる省エネルギー化が期待されている。永久磁石モータは，ネオジム磁石など磁束密度の大きい永久磁石を使用することで小型化や高効率化を実現しており，その利用範囲は拡大している [1]。現在では，永久磁石モータは，冷蔵庫，エアコン室外機などの家電製品や，電気自動車，エレベータなどの産業用機器など，幅広い分野で使用されている [2) 3)]。近年では，東京メトロを始めとする鉄道用途などの大容量機器にも適用されている [4)5)]。

永久磁石モータの駆動には電力変換装置であるインバータが使用される。電気自動車や風力発電機の低速駆動時には，インバータに搭載しているスイッチング素子において接合温度が増加する課題がある [6) 7)]。特に，電気自動車や鉄道の坂道発進時，エレベータの始動・停止時，サーボプレス機のプレス時などの零速度で高トルクが要求される条件では，永久磁石モータには直流の大電流が流れる。この結果，インバータでは特定の素子にのみ電流が流れるため，その素子に損失が集中し，発熱が偏る。特に昨今のパワー密度の大きい素子やパワーモジュールでは，僅かな時間で温度が上昇する傾向にある [8) ~11)]。また，半導体素子は，温度上昇の大きさとその回数に依存してワイヤの接合部やシリコンチップ下の半田接合部に劣化が生じる。このため，これらにより寿命を評価するすパワーサイクル寿命と呼ばれる考え方がある [12) 13)]。チップの接合部の温度上昇量は比例級数的に寿命に影響するため，温度上昇を抑えることが求められる。しかし，この場合は放熱装置が大型化するトレードオフの課題がある。

＊電気工学科

接合部の劣化を軽減させる手法としては，ワイヤボンディングではなくリボンボンディングを使用する例がある[14) 15)]。また，低速駆動時等におけるパワーデバイスの発熱を制御により低減する手法としては，低速駆動時に，DC リンク電圧を制御する方法[16)]，スイッチング周波数を制御する方法[17) 18)]がある。制御による低減手法は動作が複雑になる場合があるが，付加装置を必要としないためコストの増加は生じず有用である。筆者らは先に，3 レベルインバータを対象として，零相電圧を積極的に利用して制御により電流経路を変化させる素子損失の均一化を提案した[19) ~21)]。3 レベルインバータは，素子数が多く制御が複雑になるが，出力電圧の段数が多くなるため，スイッチング損失，出力電圧・出力電流のひずみや電磁ノイズを低減できる特徴がある。このため，新幹線に搭載されるインバータなどで適用されている。近年では専用のモジュール素子が実用化され，利用範囲は広がっている[22)]。また，零相電圧は各相に同相成分として与える電圧であり，線間電圧の基本波成分は変わらないため，モータ制御に対して影響を与えない。このため，零相電圧を積極的に利用する例は限られるが，提案法は零相電圧を利用して高機能化を図る一例となると考える。

本論文では，提案した素子温度均一化法について，特定素子の発熱集中の緩和に対する評価を零相電圧の印加量と直流コンデンサバランスの観点でシミュレーションを用いて実施する。特に，電圧指令に与える零相電圧の振れ幅をパラメータとする場合の正負の零相電圧の最適な時間割合を評価する。また，その時間割合で駆動した場合の最大温度素子の温度上昇幅について詳細に評価する。さらに，直流部分に設置した 2 個のコンデンサから供給される電荷量がバランスするように，零相電圧の切替え時間割合を常に 50%とした場合について評価する。

2.　発熱均一化の原理

図 1 に，システム構成を示す。本論文では，3 レベルインバータを使用し，永久磁石モータを駆動する形態を対象とする。3 レベルインバータは，各相において 4 個のスイッチ素子と 2 個のクランプダイオードで構成される。図 1 において，永久磁石モータが回転している場合には，インバータの各スイッチング素子に流れる電流は転流により切り替わる。このため，各スイッチング素子で発生する損失は，概ね均一化する。一方，永久磁石モータが零速度で高トルク駆動をする場合は，インバータは直流電圧を出力し続けることになる。このため，従来の駆動法においては，特定の素子にのみ電流が流れ，損失が集中する課題が生じる。提案法では，制御回路において，モータ駆動用の電圧指令値（v_u^*，v_v^*，v_w^*）に対して，零相電圧 V_0 を与える。V_0 は各相に同相成分として与える電圧であり，線間電圧の基本波成分は変わらないため，モータ制御に対して影響を与えない。提案法ではこの V_0 について，永久磁石モータの磁極位置を考慮して時間割合を変えて正負に切り替える点が特徴である。

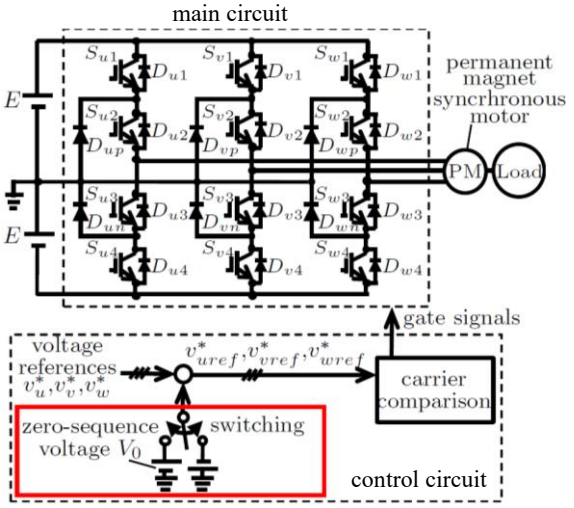


図 1　システム構成

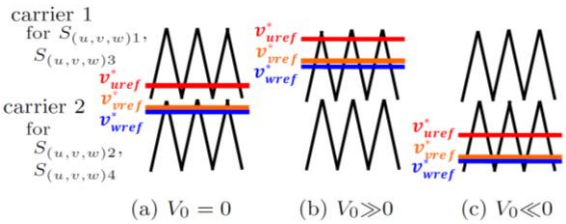


図 2　零相電圧を重畳させた場合の電圧指令値特性

図 2 に，永久磁石モータが零速度の条件において，提案法により V_0 を重畳させた場合の電圧指令値の特性を示す。ここで，電圧指令値は，U 相指令が最大となる磁極位置（$\theta = 0°$）を仮定する。図 2 において，零速度の場合の指令値は直流になる。U 相に着目した場合，キャリア 1 は S_{u1}，S_{u3} の駆動指令の生成に寄与し，S_{u1} は，指令値がキャリア 1 よりも大きい期間ではオン，小さい期間ではオフとなる。また，S_{u3} の駆動は S_{u1} の駆動と相補の

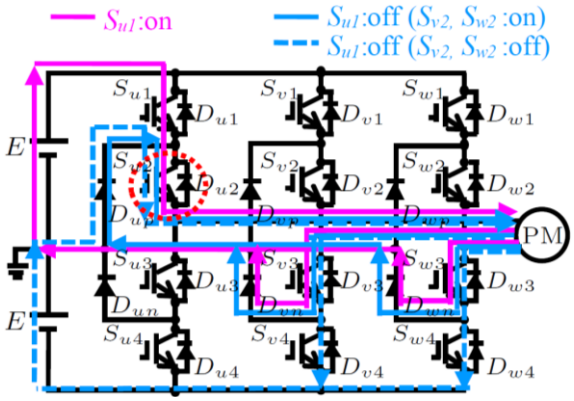


図 3　従来法の場合の電流経路（$\theta = 0°$）

関係になる。さらに，指令値とキャリア 1 が比較される条件では，S_{u2}は常に導通し，S_{u4}は導通しない。同様に，キャリア 2 は S_{u2}，S_{u4} の駆動指令の生成に寄与し，S_{u2}は，指令値がキャリア 2 よりも大きい期間ではオン，小さい期間ではオフとなる。また，S_{u4}の駆動は S_{u2}の駆動と相補の関係になる。さらに，指令値とキャリア 2 が比較される条件では，S_{u3}は常に導通し，S_{u1}は導通しない。V 相，W 相についても同様の動作となる。

図 2(a)より，V_0が零の場合(従来の場合)には，U 相電圧指令値 v_{uref}^* はキャリア 1 と比較され，V 相電圧指令値 v_{vref}^* と W 相電圧指令値 v_{wref}^* はキャリア 2 と比較される。図 3 に，V_0が零の場合(従来法)の電流経路を示す。零速度の場合は，永久磁石モータの誘起電圧が発生しないため，指令値の絶対値は小さくなる特徴がある。このため，U 相素子に着目すると，S_{u1}は僅かな期間のみオンとなり，ほとんどの期間ではクランプダイオード D_{up}が導通状態となる。また，S_{u2}は常に導通する。さらに，U 相からモータに流れる電流は，V 相と W 相で分流してインバータに戻る。この場合，S_{u2}の導通損失が極めて大きくなり，素子温度も高くなる。

図 2(b)は，提案法により，十分に大きい正の V_0を加算する場合の例である。この場合は，各相の電圧指令値はキャリア 1 のみと比較される。図 4(a)に，図 2(b)の条件の電流経路を示す。図 2(a)の場合と比較すると，U 相素子においては S_{u1}の導通時間が増加し，S_{u3} の 導通時間は減少する。また，S_{u2}，S_{u4}の導通時間は変化しない。主回路全体では，この場合も S_{u2}の素子温度が最も高くなる。

図 2(c)は，提案法により，十分に大きい負の V_0を加算する場合の例である。この場合は，各相の

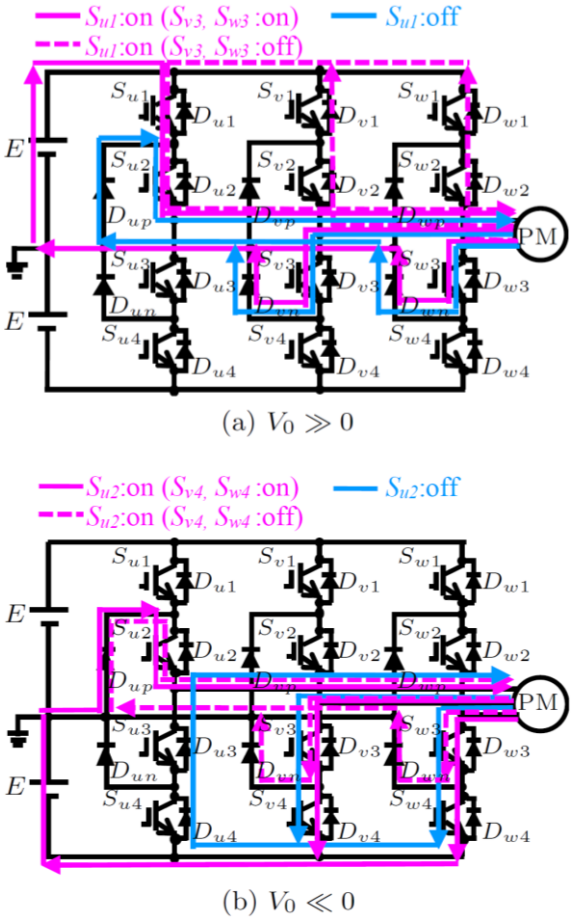


図 4　提案法の場合の電流経路（$\theta = 0°$）.

電圧指令値はキャリア 2 のみと比較される。図 4(b)に，図 2(c)の条件の場合の電流経路を示す。U 相素子においては，D_{up} と S_{u2}が導通する電流経路と，D_{u3}, D_{u4}が導通する電流経路がある。つまり，この条件では，S_{u2}に電流が流れない状態を作り出せるため，従来法で最も導通損失が大きくなる S_{u2}の損失を低減できる。提案法では，V_0を特定の時間割合で正負を切り替えることにより，電流経路を変化させる。これにより，各素子で発生する発熱を均一化できる。

3.　温度評価モデル

図 1 において，各 IGBT のスイッチング損失 P_{SW} は，コレクタ-エミッタ間電圧 V_{CE}，通電電流 I，ターンオン時間 t_{on}，ターンオフ時間 t_{off}，スイッチング周波数 f を用いて次式で表される。

$$P_{SW} = \frac{1}{6} \cdot V_{CE} \cdot I \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot f \quad \cdots\cdots (1)$$

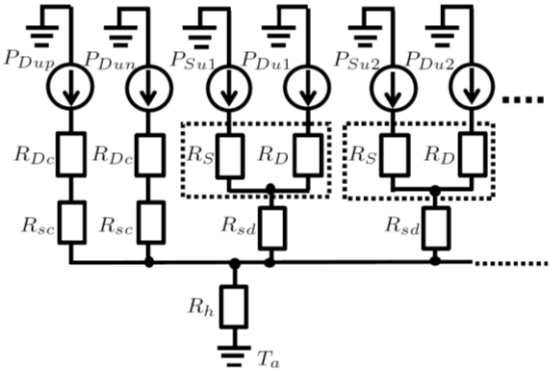


図 5　主回路部分の熱回路モデル

表 1　各要素の熱抵抗値

power devices		
IGBT	R_S	2.78 °C/W
diode	R_D	4.23 °C/W
clamp diode	R_{Dc}	2.0 °C/W
thermal conducting sheets		
IGBT (with diode) device	R_{sd}	1.11 °C/W
clamp diode	R_{sc}	0.556 °C/W
heatsink		
	R_h	0.53 °C/W

また，キャリア周期 T に対して導通時間が T_{on} の場合の導通損失 P_C は，コレクタ-エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$ を用いて次式で表される。

$$P_C = V_{CE} \cdot I \cdot \frac{T_{on}}{T} \quad \cdots\cdots (2)$$

各 IGBT で発生する損失は，スイッチング損失と導通損失の和で表される。還流時のダイオードの導通損失 P_D は，順方向電圧 V_f を用いて次式で表される。

$$P_D = V_f \cdot I \cdot \frac{T_{on}}{T} \quad \cdots\cdots (3)$$

なお，導通時間 T_{on} は，図 2 において，零相電圧 V_0 を電圧指令値に加算した値に対してキャリア 1，2 との相対関係から導出できる。

各素子の発熱計算は電気回路で表現する熱回路を用いて計算することができる。熱回路では，発熱源および熱抵抗が，それぞれ，電流源および電気抵抗として表される。また，熱抵抗の両端における温度差は電気抵抗における電位差として表される。図 5 に，図 1 の主回路部分の熱回路モデルを示す。P_x（x には，図 1 の素子名が入る。）は，それぞれ，前節で導出した IGBT およびダイオードの素子損失にあたる熱流源を表す。R_{Dc}，R_S，R_D，R_{sc}，R_{sd}，R_h は，それぞれ，クランプダイオード，IGBT，還流ダイオード，IGBT 素子用の放熱シート，クランプダイオード用の放熱シート，ヒートシンクの熱抵抗を表す。表 1 に，各要素の熱抵抗を示す。R_{sd} は，IGBT と還流ダイオードが内蔵された IGBT 素子の放熱シートの熱抵抗に対応している。また，R_{sc} と R_{sd} は，IGBT 素子およびダイオード素子が放熱シートと接触する部分の面積に基づき，放熱シートの熱伝導率から導出している。さらに，本論文では，ヒートシンク表面の熱伝導率は十分に大きく，一様に熱が広がると仮定する。このため，図 5 のように，すべての素子は放熱シートの熱抵抗を介して R_h に接続されるモデルとしている。

4.　シミュレーション結果

4.1.　θ =0°の場合の温度特性

前章の演算法を使用し，3 レベルインバータの素子温度を演算する。シミュレーションの条件として，DC リンクの電圧は 100 V(図 1 において E =50 V)とし，キャリア周波数は 5 kHz とする。さらに，永久磁石モータは，TS4127(多摩川精機) を仮定し，定格トルクを与えた零速度の条件での駆動を評価する。インバータの動作としては，t_{on}，t_{off} を，それぞれ，16.6 ns(3000 V/μs 相当)，33.3 ns(1500 V/μs 相当)とする。$V_{CE(sat)}$，V_f は，データシートから電流値に対応する値を読み取り，計算に使用している。外気温 T_a の条件は 21.3 度とする。零相電圧 V_0 は，まず，時間比率をパラメータとして+30V と-30V を電圧指令値に与える。さらに，V_0 をパラメータとした評価，および，電源の電源供給量をバランスさせた条件での評価を実施する。

磁極位置 θ に対する出力電流の絶対値は，60° 毎に最大電流の流れる相が変化し，30° 毎に電流条件の特性は相似形となる。零相電圧 V_0 は各相に等しく与える電圧であるため，対称性を考慮することで 0° から 30° の範囲に対して提案法を評価することにより，0° から 360° の全区間に対してその効果を適用できる。このため，本論文では，θ が 0° の場合と 30° の場合に着目して素子の温度特性を評価する。

磁極位置 θ が 0° の場合の電流条件は，定格運転を仮定する場合，U 相電流を 6A，V，W 相を－3A と

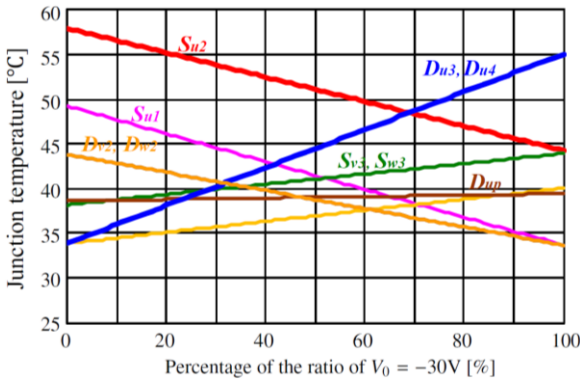


図 6　提案法を用いた場合の素子温度の特性（θ = 0◦）

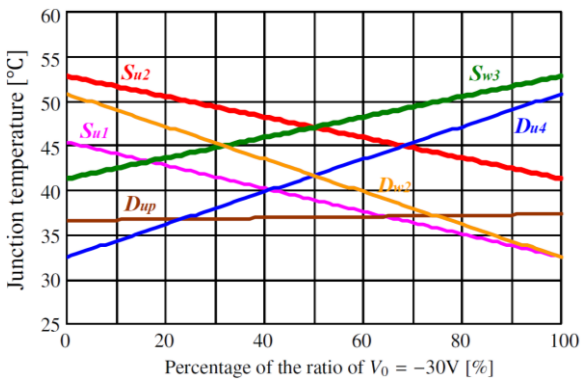


図 7　提案法を用いた場合の素子温度の特性（θ = 30◦）.

なる。従来法では，図 3 において電流導通量が多くなる S_{u2}，D_{up}，S_{v3}，S_{w3} の接合部温度が大きくなる。特に，S_{u2} では 56.8℃となり，外気温(21.3℃)から上昇する温度は 35.5℃となる。

図 6 に，θ が 0° の場合について，提案法を使用し，負の零相電圧の加算時間割合をパラメータとした場合の素子温度の評価結果を示す。時間割合が 0%の場合は V_0 として常に 30V が電圧指令値に加算され，100%の場合は V_0 として常に-30V が加算されることを意味する。なお，図 6 では，温度が低い素子は記載を省略している。θ が 0° の場合，S_{u2}，D_{u3}，および，D_{u4} の温度が最大素子温度に対して支配的になる。また，負電圧を加算する時間割合が 69%(−30V を 69%，+30V を 31%)の場合に最大素子温度が最小(48.5℃)なり，上昇温度は 27.2℃に低減できる。この場合，従来法と比較して素子上昇温度を 8℃(約 23.4%)低減できる。

4.2.　θ =30°の場合の温度特性

磁極位置 θ が 30° の電流条件は，定格運転を仮定する場合，U 相電流が$3\sqrt{3}$A，V 相電流が 0A，W 相電流が$-3\sqrt{3}$A となる。この条件で従来法の場合は，S_{u2}，S_{w3} の接合部温度が 51.9℃となり，外気温(21.3℃)から 30.6℃上昇する。図 7 に，θ が 30° の場合について，提案法を使用し，負の零相電圧の加算時間割合をパラメータとした場合の素子温度評価結果を示す。磁極位置が 0° から 30° の区間において位相角を増加した場合，電流経路の変化により，S_{w3} の温度が特に上昇し，S_{u2} が減少する。このため，θ が大きい領域では，最大素子温度が最小になるポイントは S_{u2} と S_{w3} の交点で決定する。図 7 より，θ が 30° の場合は，負電圧を加算する時間割合が 50%の場合に最大素子温度が最小(47.1℃)なり，上昇温度は 25.8℃に低減できる。この場合，従来法と比較して素子上昇温度を 4.8℃(約 15.7%)低減できる。また，図 6，図 7 の結果により，θ が変化することによって最適な重畳時間割合が変化することが判る。

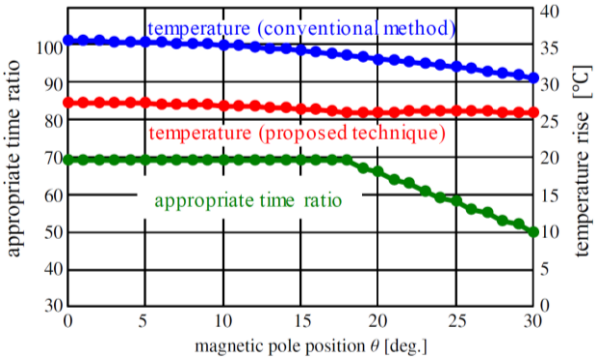


図 8　磁極位置をパラメータとした場合の最適な重畳割合と最大上昇温度の特性

4.3.　V_0=±30V の条件における素子の最大上昇温度特性

図 8 に，V_0 が±30V の条件において磁極位置 θ をパラメータとした場合の最適な重畳割合と素子の最大上昇温度の特性を示す。θ が 0° から 18° の区間では，最適な時間割合は 69%で一定であり，温度低減効果もほぼ一定となる。この区間では，図 6 より，S_{u2} と D_{u3}・D_{u4} が最大温度になる素子である。θ が 18° から 30° の区間では，最適な時間割合が 69%から 50%に推移し，θ が 18° から 30° の場合の最大素子温度はほぼ一定となる。この区間では，図 7 より S_{u2} と S_{w3} が最大温度になる素子となる。このように，最大上昇温度が最小になる時間割合は θ に依存して変化することが判る。提

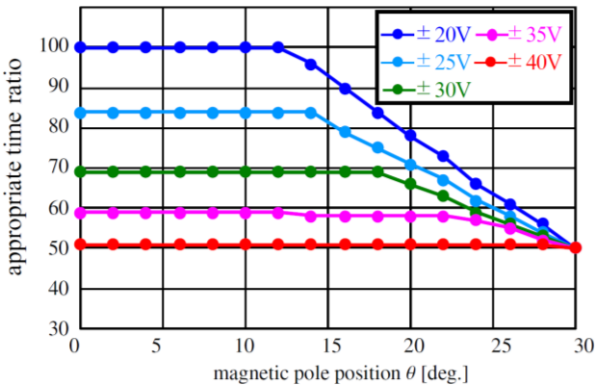


図 9　磁極位置と零相電圧をパラメータとした場合の最適な時間割合の特性

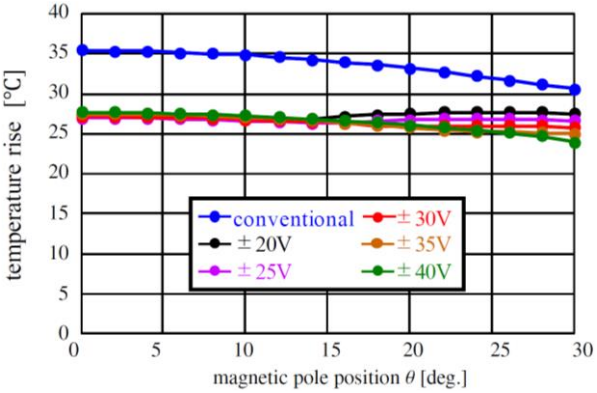


図 10 磁極位置と零相電圧をパラメータとした場合の素子の温度上昇特性

案する素子損失均一化法では θ を検出し，図 8 を参照して零相電圧の最適な時間割合を設定することにより，全ての磁極位置において温度低減効果が見込まれる。

4.4.　V_0 をパラメータとした場合の最適な時間割合と素子の最大上昇温度特性

図 9 に，θ と V_0 をパラメータとした場合の最適な時間割合の特性を示す。θ が小さい領域では，V_0 の振れ幅が小さいほど＋側と－側の時間配分割合が大きくなり，V_0 の振れ幅が大きくなるほど時間割合は 50%に近づくことが判る。また，いずれの V_0 においても，最適な時間割合は，θ が小さい領域では一定値となり，15° 付近以降から θ が大きくなるほど 50%に近づく。θ が 30° の場合は V_0 に依存せず 50%となる。θ が 15° 付近以降で変化が生じる理由は，4.3 節で述べた通り，最大温度に依存する素子が切替わることによる。V_0 が±20V の場合は θ が小さい領域で最適な時間割合が 100%である。これは，図 6 の S_{u2} と D_{u3}・D_{u4} が交差点を持たず，全ての領域で S_{u2} が最大温度となることを意味している。また，V_0 が±40V の場合は θ が全ての領域においてほぼ 50%になる。これは，直流部分の 2 電源からそれぞれ供給される電荷の量がほぼ等しいことを意味している。つまり，コンデンサで直流部分を構成する場合は，V_0 の振れ幅を大きくする程，長時間の零速度条件でも電圧のアンバランスを生じなくなる。

図 10 に，θ と V_0 をパラメータとした場合の素子の温度上昇特性を示す。図 10 では，温度上昇が最小になるように図 9 の結果に基づいて時間割合を制御している。提案法は，どの条件でも従来法よりも温度上昇が抑えられており，効果があることが判る。温度上昇幅について，θ が 0° から約 15° までの範囲は V_0 の大きさに依存せずほぼ同じであるが，それ以降の範囲では V_0 の振れ幅が大きいほど小さくなる。提案法で θ が 15° 付近で変化が生じる理由は，図 9 と同様に最大温度の素子が切替わることによる。ただし，θ が 30° の条件においても，V_0 が±20V の場合と±40V の場合の温度上昇幅の差は温度上昇値の 10%程度(3.5℃程度)であることが判る。

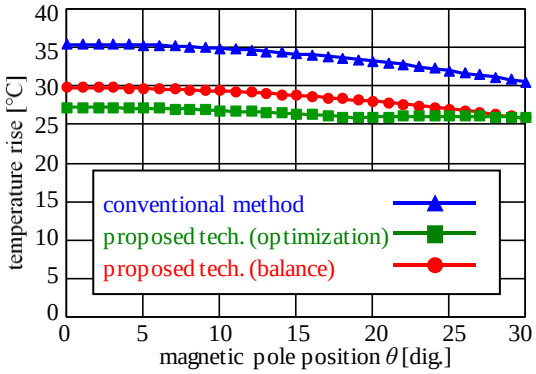


図 11　2 コンデンサからの電荷供給量をバランスさせた条件での素子の最大上昇温度特性
(V_0＝±30V)

4.5.　直流電源(コンデンサ)の電荷供給量をバランスさせる条件の素子の最大温度上昇特性

本節では，直流電源をコンデンサで構成する場合を想定した評価を実施する。図 11 に，(i)従来法，(ii)提案法で V_0 を±30V として最適な時間割合で切替える方法，(iii)提案法で V_0 を±30V として 2 コンデンサからの電荷供給量がバランスする

ように V_0 の切替え時間割合を常に 50%とする方法の素子の最大上昇温度の特性を示す。切替え時間割合を常に 50%とする方法では，いずれの磁極位置 θ でも従来法よりも最大温度を約 20%低減できる。また，最適な時間割合で切替える方法と比較しても，温度上昇は最大でも 10%程度であることを確認できる。このため，温度条件に余裕がある場合は，V_0 の切替え時間割合を常に 50%とする方法を採用することにより，長時間の零速度条件でも直流部分の 2 コンデンサの電圧アンバランスを生じなくなる。

5. まとめ

本論文では，永久磁石モータの零速度・高トルク駆動時のインバータにおいて課題となる特定素子の発熱集中の緩和法について検討した。特に，筆者らが提案している素子温度均一化法について零相電圧の印加量と直流コンデンサバランスの観点で詳細なシミュレーション評価を実施した。この結果，以下の結論を得た。

- 提案する素子損失均一化法ではモータの磁極位置を検出し，それに合わせて零相電圧の最適な時間割合を設定することにより，全ての磁極位置において温度低減効果が見込まれる。
- 電圧指令に与える零相電圧の振れ幅を大きくするほど，正負の零相電圧を分配する最適な時間割合は 50%に近づく。これは，直流部分をコンデンサで構成する場合に長時間の零速度条件でも直流部分の 2 コンデンサのアンバランスを生じにくくなることを意味する。
- 零相電圧の振れ幅をパラメータとして温度上昇が最小になるように零相電圧の時間割合を制御した。この結果，モータの磁極位置が 0° から約 15° までの範囲では零相電圧の振れ幅に依存せず温度上昇幅はほぼ同じとなる。しかし，15° ～30° では零相電圧の振れ幅が大きいほど温度上昇幅は小さくなる。ただし，モータの磁極位置が 30° の条件においても，零相電圧が±20V の場合と±40V の場合の温度上昇幅の差は温度上昇値の 10%程度である。
- 直流部分をコンデンサで構成する場合を想定して零相電圧の振れ幅を±30V として，2 コンデンサからの電荷供給量がバランスするように零相電圧の切替え時間割合を常に 50%とした場合，全ての磁極位置において従来法よりも最大温度を約 20%低減できることを確認した。また，最適な時間割合で切替える方法と比較しても，温度上昇は最大でも 10%程度であることを確認した。

謝辞

本研究の一部は，2017 年度日本学術振興会 科学研究費補助金基盤研究(C)「零相電圧の積極活用手法による電動機駆動用電力変換器の素子発熱低減技術に関する研究」，および，東京工業高等専門学校の平成 28 年度重点配分経費の援助により行われた。

参考文献

1) 石井孝幸，加藤崇，北島康彦，百目鬼英雄，戸張和明，桜井貴夫：産業・自動車・家電分野における PM モータ・ドライブの適用動向，平成 21 年電気学会産業応用部門大会，1-S9-2，2009 年 8 月
2) S. J. Galioto, P. B. Reddy, A. M. El-refaie, and J. P. Alexander : Effect of Magnet Types on Performance of Machines Designed for Traction Applications, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 51, no. 3, pp. 2148-2160, 2015.
3) J. H. Sim,D. G. Ahn, D. K. Kim, D. K. Son, S. Kim, J. P. Hong and T. H. Lee : Multiphysics Design of Triple 3-Phase PMSM for Ultra-High Speed Elevator Applications, Proc. 2018 - 23rd Int. Conf. Electr. Mach. ICEMS 2018, pp. 284-290, 2018.
4) 田坂洋祐:鉄道車両用 PMSM 主回路システム，東芝レビュー,Vol.68,No.4,pp. 23-26, 2013 年 4 月
5) K. Shikata, H. Kawai, H. Nomura, H. Aoki, S. Fukasawa, and Y. Tasaka : PMSM propulsion system for Tokyo Metro, in Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, ESARS, 2012.
6) H. Zheng, X. Wang, X. Wang, L. Ran, and B. Zhang : Using SiC MOSFETs to improve reliability of EV inverters, WiPDA 2015 - 3rd IEEE Work. Wide Bandgap Power Devices Appl., no. 2, pp. 359-364, 2015.
7) R. Pittini, S. D. Arco, M. Hernes, and A.

Petterteig：Thermal Stress Analysis of IGBT Modules in VSCs for PMSG in Large Offshore Wind Energy Conversion Systems, Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 2011.

8) 大部利春, 田多信光, 萩原敬三：放熱性能を向上させ低損失と高信頼性を実現した HEV インバータ用 IGBT モジュール,東芝レビュー, Vol.69, No.4, pp. 37-40, 2014 年 4 月

9) L. Wei, J. M. Guire, J. Hu and A. Bredley：Novel Discontinuous PWM Control Method to Improve IGBT Reliability at Low Speed, Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE), pp.3819-3825, 2014.

10) 日向敏文, 加藤康司, 伊東淳一：低速運転時のインバータ素子温度の上昇回避法, 平成 21 年電気学会産業応用部門大会, 1-55, 2009 年

11) V. Blasko, R. Lukaszewski and R. Sladky: On Line Thermal Model and Thermal Management Strategy of a Three Phase Voltage Source Inverter, IEEE IAS 34th Annual Meeting, pp.1423-1431, 1999.

12) M. Sathik, T. K. Jet, C. J. Gajanayake, R. Simanjorang and A. K. Gupta：Comparison of Power Cycling and Thermal Cycling Effects on the Thermal Impedance Degradation in IGBT Modules, 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp.1170-1175, 2015.

13) 両角朗, 山田克己, 宮坂忠志：パワー半導体モジュールにおける信頼性設計技術, 富士電機技報, Vol. 74, No. 2, pp.145-148, 2006 年

14) 廣田幸嗣, 篠原俊郎, 三原輝義：パワーモジュールの実装設計 故障のメカニズムを知り信頼性確保, 日経エレクトロニクス, pp.124-133, 2007 年 6 月

15) M. Sathik, T. K. Jet, C. J. Gajanayake, R. Simanjorang and A. K. Gupta：Comparison of Power Cycling and Thermal Cycling Effects on the Thermal Impedance Degradation in IGBT Modules'', 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp.1170-1175, 2015.

16) J. Lemmens, J. Driesen,and P. Vanassche：Dynamic DC-link Voltage Adaptation for Thermal Management of Traction Drives, 2013 IEEE Energy Convers. Congr. Expo., pp. 180-187, 2013.

17) L.Wei, J. McGuire,and R. A. Lukaszewski：Analysis of PWM frequency control to improve the lifetime of PWM inverter, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, no. 2, pp. 922-929, 2011.

18) L. Wei, J. McGuire, and J. Hu：Study of PWM frequency and its impact to adjustable speed drive reliability, 2017 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2017, vol. 2017-Janua, no. 1, pp. 3844-3850, 2017.

19) 綾野秀樹, 浅井亨太, 松井義弘：永久磁石モータの零速度運転時における素子発熱集中緩和法, 電気学会論文誌 D, Vol.136, No. 9, pp. 646-654, 2016 年 9 月

20) 綾野秀樹, 嶋本椋太, 松井義弘：永久磁石モータの零速度駆動時の素子発熱集中緩和法に対するシミュレーション検証, 東京工業高等専門学校研究報告書第 49 号, pp.24-29, 2017 年 3 月

21) 綾野秀樹, 嶋本椋太, 野田拓真, 松井義弘：永久磁石モータの零速度運転時における素子発熱均一法に対する実験検証, 平 30 電気学会半導体電力変換, モータドライブ合同研究会資料, SPC-18-132,MD-18-092 , 2018 年 9 月

22) K. Komatsu M. Yatsu, S. Miyashita, S. Okita, H. Nakazawa, S. Igarashi, Y. Takahashi, Y. Okuma, Y. Seki and T. Fujihira：New IGBT modules for advanced neutral-point-clamped 3-level power converters, 2010 Int. Power Electron. Conf. - ECCE Asia -, IPEC 2010, pp. 523-527, 2010.

（２０１９年１２月２４日　受理）

光導波路用の SiC 薄膜における透明性の向上についての研究

新國広幸*，伊藤浩*，川又由雄*

本研究では，スパッタリング法を用いて成膜された光導波路用の SiC 薄膜の透明性の改善を図った。スパッタリング法を用いて作製された SiC 薄膜はアモルファス構造，かつバンドギャップが小さいため，透明性が低い。問題を改善するために，SiC 薄膜にアニール処理及び加熱成膜を施した。その結果，透過率，光学バンドギャップは，アニール温度および加熱温度の増加に伴い，向上した。屈折率はそれらの 2 種類の温度の上昇に伴い，減少した。最後に，1000℃のアニール処理により，透明性は 83%，光学バンドギャップは 1.95 eV，屈折率は 2.54 の結果が得られた。

（キーワード：SiC 薄膜、光導波路、透明性）

Research on Transparency Improvement of SiC Thin Film for Optical Waveguide

Hiroyuki NIKKUNI*, Hiroshi ITO*, Yoshio KAWAMATA*

The transparency of the SiC thin film deposited by the sputtering method for optical waveguide was improved. These SiC thin films indicated the poor transparency, because these films have amorphous structure and have low bandgap width. The annealing treatment and the heating film deposition were carried out in order to increase the transparency of the SiC thin films. These experimental results showed the transmissivity and the optical bandgap of the SiC film increased with a rise in the annealing temperature and the heating temperature. The refractive index of the SiC film decreased as those two kinds of temperature increased.

(Keywords: SiC thin film, optical waveguide, transparency)

1. 研究背景と目的

化学プラントや原子力発電所のような可燃性ガスの充満している環境や，強い放射線の中で使用されるセンサは，一度のミスで大惨事に繋がる可能性があるため，安全性が高いセンサが必要とされている。光信号を利用した光導波型センサは，検出部に光を用いるため，無誘導性、防爆性に優れており，悪環境下においても安全性が高いセンシングが期待できる [1]。本研究では悪環境下で使用されるセンサや，光スイッチなどに使用可能な光導波路の研究を行う。具体的には，この光導波路が安全に作製でき，悪環境下でも使用できるように，成膜技術にスパッタリング法を用いて，材料に SiC を用いる。本研究室で作製した SiC 薄膜は，アモルファス構造かつ光学バンドギャップが低いため，透明性が低くなってしまい，光導波路として利用するには適していなかった。

本研究では，スパッタリング法によって成膜した SiC 薄膜に対して，アニール処理及び，加熱成膜を行うことで透明性と光学バンドギャップを改善し，SiC 薄膜が光導波路として適応可能かどうか検討を行う。

2. 実験内容

基板には溶融石英ガラスを用いて，成膜前にアセトンおよびセミコクリーン 56 を用いて超音波洗浄を行った。SiC 膜の成膜には，RF スパッタリング装置(ULVAC 社製の SH-350)を用いた。ターゲットには SiC(2N)を用い，スパッタガスには Ar を用いた．RF 電力 800 W で，成膜時間を 31 min とし，膜厚が約 0.2 μm の SiC 膜を成膜した。

アニール処理実験では，赤外線コールドイメージ炉(ULVAC 社製の TPC-1000)を用いた。成膜後の基板に対して，アニール温度 T_a[℃]を 300 ℃，500 ℃，700 ℃，1000 ℃とし，真空中で 30 min のアニール処理を行った。

加熱成膜実験では，SiC 薄膜の成膜時に基板を加熱し，加熱温度 T_h[℃]を 128 ℃, 178 ℃, 215 ℃

＊電気工学科

とした。

各々の実験で製作した SiC 薄膜の評価には，XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy)装置(アルバック社製の PH X-tool)を用いて，組成分析を行った。分光光度計(HITACHI 社製の U-3210)を用いて，透過率，光学バンドギャップ，屈折率の評価を行った。また，アニール処理実験では CCD レーザ変位センサ(キーエンス社製の LK-085)を用いて SiC 薄膜の内部応力の測定を行った。

3. 実験結果

3.1. 組成分析

図 1 に SiC 薄膜のアニール温度毎の組成比を示す。図 1 より，どの T_a に対しても Si と C が 1:1 になっていることがわかる。しかし，10 %程度の酸素が薄膜に存在していることがわかった。この酸素の混入経路は，ターゲット表面の酸化，チャンバー内への異物の混入である。プレスパッタ時間を調整することで，酸素の割合が減ることを確認した。また，酸素の割合がほぼ一定であることから，アニール処理によって薄膜が酸化しないことがわかる。加熱成膜に対しても同様の傾向が確認できた。

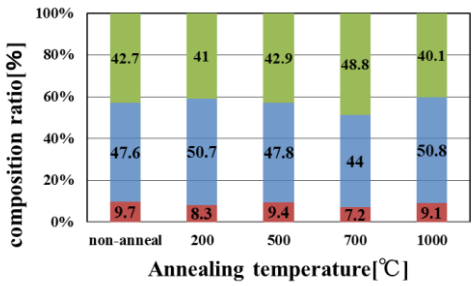


図 1　SiC 薄膜のアニール温度毎の組成比

3.2. 透過率

図 2 に透過率スペクトルのアニール温度依存性を示す。分光光度計で透過率スペクトルを測定したため，光の干渉の影響が考えられる。透過率スペクトルの山と谷の中間である 800 nm 付近の透過率の比較を行った。図 3 に波長 800 nm における透過率のアニール温度依存性及び，加熱温度依存性を示す。図より，透過率が T_a 及び T_h に比例することがわかる。具体的には，アニール無しの薄膜の透過率が 59 %に対して，1000 ℃でアニールした薄膜は約 83 %に向上した。また，215℃での加熱成膜により，透過率が加熱成膜なしの薄膜の透過率が 40 %に対して，57 %に向上した。前節で示した酸素の割合より，SiC 薄膜の酸化による影響ではなく，アニール及び加熱成膜により透明性が向上している。

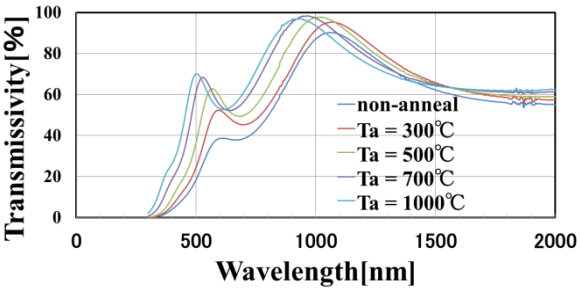


図 2　透過率スペクトルのアニール温度依存性

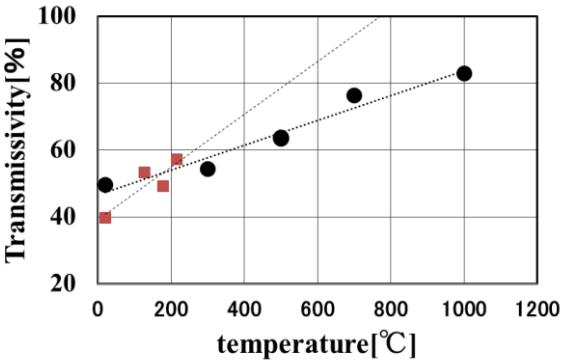


図 3　波長 800 nm における透過率のアニール温度依存性及び加熱温度依存性(●：アニール，■：加熱成膜)

3.3. 光学バンドギャップ

前節で求められた透過率スペクトルより求められる吸収係数から光学バンドギャップを求め、バンドギャップの目安として導出を行った。

図 4 の左軸に光学バンドギャップのアニール温度依存性を示す．図より，T_a に対して光学バンドギャップが比例している。加熱成膜についても同様の結果が得られた。アニール及び加熱成膜により光学バンドギャップが大きく改善されたのは，SiC 薄膜に熱エネルギーを与えることで，薄膜内部の原子が活性化されて，格子欠陥がなくなったためだと考えられる。

3.4. 屈折率

図 4 の右軸に屈折率のアニール温度依存性を示

す。図より，T_aの上昇と共に，屈折率が減少している。屈折率の減少の原因として，薄膜内部の圧縮応力が関係していると考える。図 5 に内部応力のアニール温度依存性を示す。図 5 より，T_aの上昇と共に内部応力が減少している。アニール処理により内部応力が緩和されて，格子間距離が広くなり，密度が減少し，分極が起こりにくくなり，屈折率が下がったと推察する。

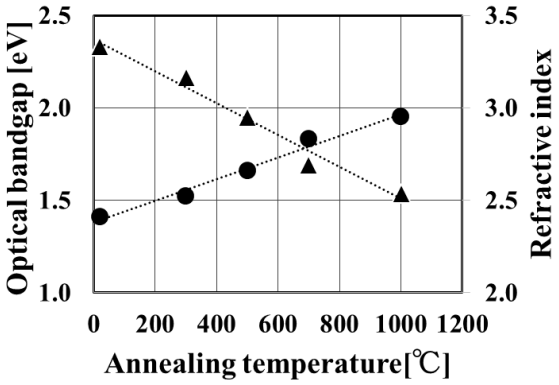


図 4　光学バンドギャップと屈折率のアニール温度依存性及び加熱温度依存性(●: 光学バンドギャップ，▲：屈折率)

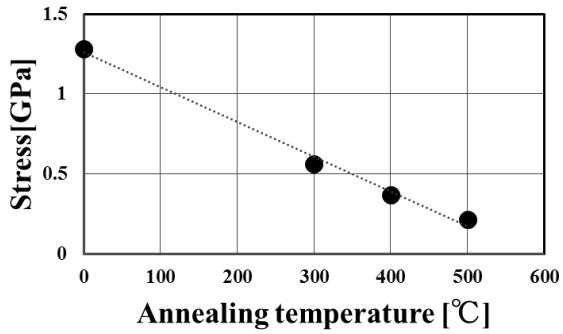


図 5　内部応力のアニール温度依存性

4.　結論

スパッタリング法によって作製した SiC 薄膜に対してアニール処理及び，加熱成膜を行い，特性評価を実施し，アニール処理，加熱成膜ともに薄膜の透明性の改善に効果的だということがわかった。具体的には，1000 ℃でのアニールにより透過率が 83 %，215 ℃での加熱成膜により， 57 %に改善された。一般的な材料である石英ガラス 1.46 に対して 2.54 と高いためデバイスの小型化が期待できる。

参考文献

1） H. Nikkuni, Y. Watanabe, M. Ohkawa, and T. Sato : Sensivity dependence with respect to diaphragm thickness in guided-wave optical preesure sensor based on elasto-optic effect, Opt. Eng.,vol.47,no.4,pp.044402,2008 年 4 月

（２０２０年１月１４日　受理）

反応性スパッタリング法を用いた SiN 膜の作製とエッチング特性

伊藤　浩 *，川又　由雄 *

本研究は，SiN 保護膜を反応性スパッタリング法で作製し，KOH エッチング保護膜の最適なプロセス条件を検討した。SiN 成膜条件として，窒素分圧比 50%，基板バイアス RF 20W にて良好な保護膜となることが分かった。スパッタ SiN 膜の BHF エッチング及び，KOH エッチングのエッチングレートを得ることができた。ダイヤフラム作製方法を検討した結果，SiN/SiO_2の 2 層構造にすることで SiN 膜の応力が緩和し，ほぼピンホールの無いエッチング結果を得ること及び，BHF の同時エッチングによりパターニングが可能であることを確かめた。以上のことから，本実験で得られた SiN 保護膜プロセスは，様々な MEMS センサデバイスへ応用されていくものと期待できる。

（キーワード：窒化シリコン，KOH エッチング，反応性スパッタリング，保護膜）

Etching Characteristics and Deposition of Silicon Nitride Thin Films Prepared by Reactive Sputtering Method

Hiroshi　ITO*, Yoshio KAWAMATA*

In this paper, optimal conditions of SiN film prepared by reactive sputtering method used for protection film of KOH etching were discussed. It was shown that SiN film prepared at deposition conditions, such as the fraction of nitrogen gas pressure, 50% and the substrate bias, RF 20W denoted good protection characteristics. BHF and KOH etching rate of sputtered SiN film were obtained. It was confirmed that SiN film stress is relaxing and there is no pinhole after the KOH etching by the structure of SiN/SiO_2 two-layer. From these results, it was expected that the fabrication process of SiN protection film would be applicable for several MEMS sensor devices.

(Keywords: silicon nitride, KOH etching, reactive sputtering, protection film)

1. はじめに

窒化シリコン SiN は，緻密で耐環境性に強い膜質なことから，集積回路技術や太陽電池などの保護膜として古くから利用されている[1]。最近では，MEMS 技術の発展により SiN はエッチング用保護膜としての必要性が増してきている[2]。MEMS センサでは，センサ部の基板を数 10μm に薄くしたダイヤフラム構造を用いる。このプロセスでは数 100μm の厚い Si 基板を水酸化カリウム KOH 水溶液に長時間浸漬しエッチングを行うため，保護膜として SiN 膜を利用する必要がある。また，一般的に SiN 膜の成膜は CVD 法が用いられているが，安全性，コスト面で課題となっている。本研究室では今までに SiN 膜を反応性スパッタリング法で成膜し，太陽電池保護膜の研究を実施してきたことから，基本的な成膜条件は調べてきている[3]。しかし，スパッタ SiN 膜をエッチング保護膜として利用したことは無く，また他の研究報告例もない。

そこで，本研究では SiN 膜を反応性スパッタリング法で作製し，MEMS プロセスに向けたエッチング保護膜の最適なプロセス条件を検討する。本実験ではスパッタ条件に基板バイアスを加え，膜構造，エッチング耐性を検討していく。

2. 実験方法

SiN 薄膜の成膜には，反応性スパッタリング装置（芝浦メカトロニクス 4ES）を使用した。成膜に使用するガスはアルゴン Ar と窒素 N_2を用い，窒素圧力比 F_Nを 30～50%と変えた。成膜時の圧力は 0.5Pa, スパッタ電力は DC 400W 一定とした。基板バイアスとして成膜中に RF 20W を印加した。実験に使用した基板は，Si ウエハ（100）と熱酸化膜付（膜厚 100nm）を用いた。基板の洗浄は，アセトン 10min，アルカリ洗浄液（セミコクリーン 23）を 10min の超音波洗浄を行い，純水洗浄後，

＊電気工学科

90℃のベーク炉で 5min 乾燥させた。

ダイヤフラム作製の実験では，SiN のパターニングをフォトリソグラフィにて行った。フォトレジストとして, OFPR-800（東京応化製）を用いた。フォトレジストの塗布条件は 3000rpm，20sec で，膜厚 1.5μm 程度とした。また，プリベークは電気炉 90℃, 30min で, 露光時間 10sec, 現像時間 1min とした。最後にポストベークを 130℃，5min 行った。

SiN 膜のエッチング実験では，バッファードフッ酸 BHF 及び水酸化カリウム KOH の 2 つのエッチング特性を評価した。BHF エッチングには BHF63　100％の溶液を用い，室温にて行った。KOH エッチングでは，KOH 濃度 34%で，溶液温度を 70℃とした。Si ウエハ(100)面に対する KOH のエッチング速度は 670nm/min 程度となることが分かっている。よって，Si ウエハを 300μm 以上エッチングすることを想定し，エッチング時間を 8 時間とした。

SiN の膜厚及び屈折率の評価には，エリプソメータ（ルドルフ AutoEL），表面モルフォロジーの評価には走査プローブ顕微鏡（日立ハイテクサイエンス AFM5000E）を用いた。

3. 実験結果と検討

3.1. 成膜速度と屈折率

図 1 にエリプソメータによって測定した成膜速度と屈折率の窒素分圧比 F_N依存性を示す。F_Nが増加するに伴い，成膜速度は減少している。これは窒素ガスの増加に伴いターゲットをスパッタするアルゴンガスが減少したためである。また，RF 20W の基板バイアスを印加した場合，約 5%減少している。これは成膜過程において，膜が逆スパッタにより削られているためと考えられる。

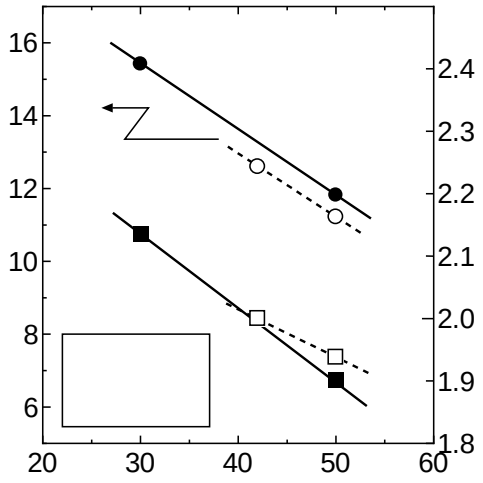
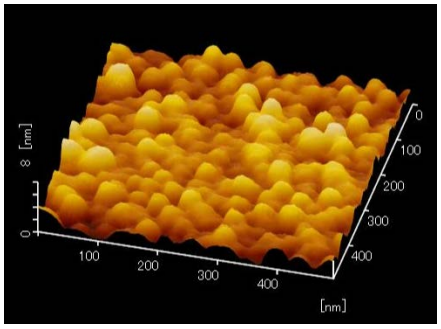


図 1　SiN 膜の成膜速度と屈折率の結果

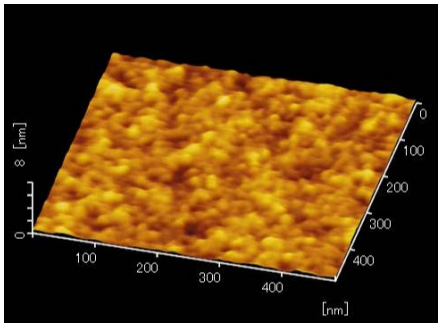
屈折率の結果から，無バイアスの場合に F_Nが 30％で 2.13 と高く，50％で 1.90 となった。バルクの SiN の屈折率が 2.02 であることから，30％では窒化不足と考えられ，50％では膜質が粗になっていることが考えらえる。基板バイアスを印加した場合，1.94 に増加し膜が緻密化する傾向を示したことから，基板バイアス効果が有効に作用しているものと考える。さらに基板バイアスを増やし，膜を緻密化することも考えられるが，逆スパッタによるプラズマダメージの影響が予想されるため，本実験では基板バイアスは RF 20W 一定とした。

3.2. 表面モルフォロジー

図 2 に SiN 薄膜の表面モルフォロジーの評価結果を示す。この結果から，基板バイアスを加えると, 膜表面の凹凸が減り, 平坦な膜となっている。平均の粒径と粒の高さは，無バイアスで 47nm, 2.2nm に対して, バイアス有りの場合 27nm, 0.5nm である。粒径は 1/2 になっているが, 高さは 1/4 に減少し，基板バイアスの効果は高さ方向により効果的に働いていることが分る。



(a)基板バイアス



(b)基板バイアス RF20W

図 2　SiN 膜の表面モルフォロジー評価結果

3.3. BHF エッチング特性

図 3 に BHF エッチングの結果を示す。この結果から，BHF のエッチング速度は 18.7nm/min と見積ことができた。これは CVD 法の SiN 膜（19.8nm/min[1]）と比べ，スパッタ膜は低い値であり耐薬性が比較的高いことが分かる。この理由として，スパッタ法で成膜される膜はプラズマによって叩き出された粒子のエネルギーは高いため，一般的に硬度が高くなることが言われており，本実験ではさらに基板バイアスを印加していることから，SiN 膜はより緻密化し耐薬性が向上したものと考えられる。

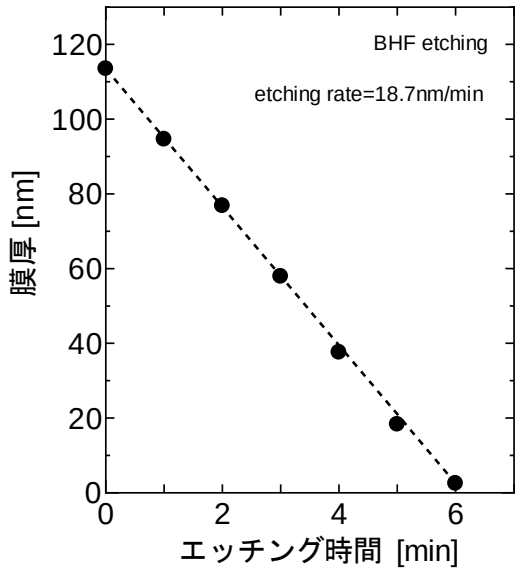


図 3 BHF エッチングの結果

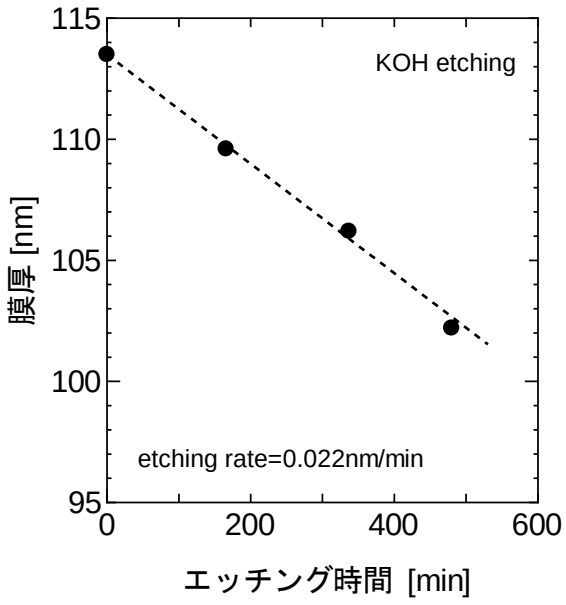
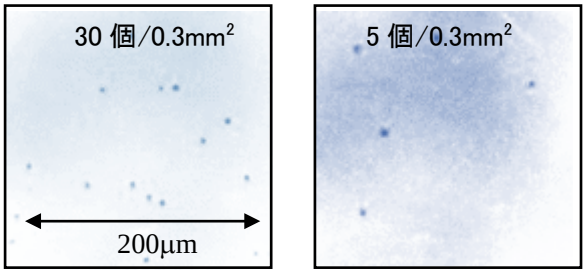


図 4 KOH エッチングの結果

3.4. KOH エッチング特性

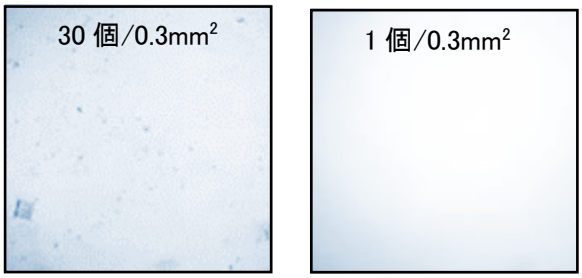
図 4 に KOH エッチングの結果を示す。この結果から，KOH のエッチング速度は 0.022nm/min となった。KOH の保護膜として利用される SiO_2膜の場合，エッチング速度が 2.1nm/min 程度と比べると，本実験で作製した SiN 膜は約 1/100 のエッチング速度であることが分かった。例えば，Si ウエハを 400μm エッチングする場合（エッチング時間は 10 時間程度），SiN 膜のエッチング量は 13.2nm となり，膜厚 100nm の SiN 膜で十分保護膜として機能することができる。SiO_2膜の場合，エッチング量は 1.3μm となり，余裕をみて 2μm 程度の厚い SiO_2膜が必要となるが，長時間成膜により生産性が悪くなる。さらに，膜応力の影響が大きくなり，膜の剥離が生じ保護膜利用に困難となる。

図 5 に KOH エッチング後の SiN 膜の表面観察結果を示す。この結果からピンホール数を調べると，基板バイアスの無い場合 30 個/0.3mm^2，バイアスが有る場合では 5 個/0.3mm^{2}と 1/6 に減少している。このことから，基板バイアスによって SiN 膜が緻密化され，ピンホールが減ったものと考え



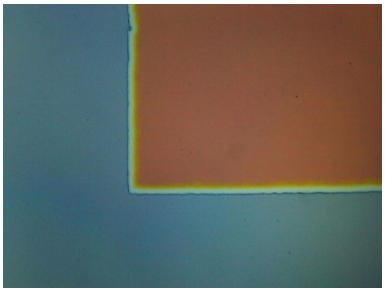
(a) non bias　(b) substrate bias

図 5 KOH エッチング後の SiN 膜表面観察結果
（Si ウエハ上 SiN 膜）

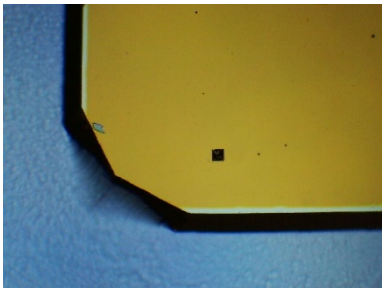


(a) non bias　(b) substrate bias

図 6 KOH エッチング後の SiN 膜表面観察結果
（酸化膜付き Si ウエハ上 SiN 膜）



(a) SiN 膜のパターニング結果



(b) KOH エッチング：5h30m 後

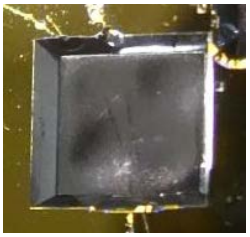
図 7 基板バイアス SiN 膜の保護膜試験結果

られる。図 6 の結果は，厚さ 100nm の酸化膜付き Si ウエハ上に成膜した SiN 膜の結果を示す。図 5 と同様にピンホール数を調べると，基板バイアス無しの場合 30 個であるのに対し，バイアス有りの場合 1 個となり，ほぼピンホールの無い良好な保護膜を得ることができた。以上の結果から，窒素分圧比 50%，基板バイアス RF 20W 及び，SiN/SiO_2の 2 層構造とする SiN 保護膜作製条件を見出すことができた。

次に，SiN 膜のパターニング方法を検討するために，BHF エッチングによる SiN/SiO_2保護膜の同時パターニングとその試料の KOH エッチング実験を行った。その結果を図 7 に示す。フォトレジストを保護膜としてSiN/SiO_2膜の同時エッチングによりパターニングが可能であることを確かめた。また，5 時間 30 分の KOH エッチング後においても良好なエッチング構造を得ることが確かめられた。

3.5. ダイヤフラム構造の試作

本実験で見出した SiN 膜の作製条件及びパターニング手法を用いて，ダイヤフラム構造の作製を試みた。厚さ 300μm の Si ウエハの両面に SiO_2（100nm）/SiN（100nm）の 2 層膜を形成し，片面のみダイヤフラムパターンを作製した。KOH エッチングを約 10 時間行い，ダイヤフラム構造を作製した結果を図 8 に示す。Si のエッチング量を調



(a) エッチング面側

(b) 表面側

図 8 SiN 保護膜を用いて試作したダイヤフラムの顕微鏡写真

べた結果から，ダイヤフラム厚は 4μm と薄い膜であることがわった。破断なく薄いダイヤフラムを形成できたことから SiN 保護膜の有効性を示すことができた。また，表面側ではダイヤフラム部に撓みを生じたが，SiN 膜の剥離後において，平坦な状態に戻ることを確認している。

4. まとめ

本研究では，ダイヤフラム構造の作製に必要となる SiN 保護膜を，安価で簡便な手法である反応性スパッタリング法で作製し，KOH エッチングの保護膜として最適なプロセス条件を検討した。その結果，以下のことが明らかとなった。

（１）窒素分圧比 50%，基板バイアス RF 20W により膜表面が平坦になり，膜が緻密化する。

（２）SiN 膜の BHF エッチングレート及び，KOH エッチングレートを明らかとした。

（３）SiN/SiO_2の 2 層構造にすることで KOH エッチング後のピンホールがほぼ無くなる。

（４）SiN 保護膜作製条件を提案し，ダイヤフラム試作結果において，保護膜の有効性を確かめた。

以上のことから，提案した SiN 膜保護膜プロセスが，様々な MEMS センサデバイスへ応用されていくものと期待できる。

参考文献

1) S.M.ジー，“半導体デバイス”産業図書 (1992)
2) 藤田博之，“センサ・マイクロマシン工学”オーム社 (2011)
3) 伊藤　浩，川又由雄，大山昌憲，“反応性スパッタリング法による太陽電池パッシベーション膜の作製と評価”，東京工業高等専門学校研究報告書，Vol. 45(1), pp. 71-76 (2013)

（２０２０年１月１４日　受理）

実験科目における事前学習用ビデオ教材の活用

一戸隆久*，新田武父**

学生が主体的に学ぶ姿勢を養い，多様な学生一人一人に対応するために，実験科目における 1 テーマについて，実験概要と注意事項をまとめた事前学習用ビデオ教材を作成し，学生に対する授業後のアンケート調査から実験科目における事前学習の効果を調べた。授業後のアンケートを分析したところ，ビデオ教材導入により事前に実験概要を把握したおかげで現象を深く考え，興味を持つ学生が増加したと思われる。またビデオ教材への改善提案を分析したところ，画質・撮影技術に対する提言が圧倒的多数を占めた。各種メディアによって目の肥えた現代学生らしい視点で建設的な改善提案が目立った。ビデオ教材の作り方も学生のやる気を引き出す重要な要素となると言える。

（キーワード：主体的な学び，事前学習，ビデオ教材）

Application of video-learning materials for preparing fundamental experiments

Takahisa ICHINOHE*,　Takenori NITTA**

We made the video-learning materials for the prior learning that compiled an experimental summary and instructions for one of the experiment themes for the purpose of cultivating independent intellectual mind. We studied effects of the prior learning in the experiment theme by analyzing the student questionnaires after the class. According to the analyses of the questionnaires, it is considered that students who thought about a phenomenon deeply and who were interested in this theme increased because they caught the instructions in advance by watching video-learning materials. Many students gave us a proposal for the photographing techniques and image quality through the questionnaires. They gave us various constructive improvement suggestions in the viewpoint like contemporary student seeing various media systems. How to make video-learning materials can become a key of the important element to cause students' motivations.

(Keywords: independent intellectual mind, the prior learning, video-learning materials)

1. はじめに

これからの日本では，人口減少やグローバル化とともに IoT や AI などの技術の高度化・深化に伴う「Society5.0 時代」の到来という社会変革への未来予測に基づき，ますます工学教育への期待が高まっている[1)]。2040 年を見据えて高等教育のあるべき姿として，学修者本位の教育を展開するための柔軟な組織改革と学修者の学びの「幅」及び「深さ」についての提言が中央教育審議会から答申されている[1,2)]。すなわち、社会が直面する課題の解決のために知識を組み合わせた「新しい知」の創出によって新たなビジネスを生み出し，社会を支える人材の育成が求められている[1,3)]。新たな価値を生み出していくためには問題解決能力とともに考える力を養う必要があり，学修者が主体的に学ぶ姿勢が一層求められる。

一方，教育現場においては学修者自身が積極的に学ぶ姿勢とはどういうことなのかが漠然としていて，学習意欲はあっても学習リテラシー(学習習慣やノートテイキングなど)や学習モチベーションが大学入学段階で欠如している場合が増えてきているという指摘がある[4)]。本校においても受動的にメニューをこなしているだけの学生も現実には見受けられる。高専ではさすがに授業中に立ち歩くという現象は耳にしないが，静かであっても「上の空のまま」で話を聞いておらず，時間だけが過ぎていたり，内向的な性格ゆえに質問できずに戸惑っている学生もいたりと，学生の気質が多様化してきたと感じることも多い。

本校 1 年生の専門科目「ものづくり基礎工学」では，興味・関心を広げることを目的として入学生全員が 5 学科の基礎的な実験を体験するため，

＊電子工学科　＊＊教育研究支援センター

中学卒業者にもわかりやすく取り組みやすいテーマを 5 テーマずつ提供している[5]。電気電子分野においては電気回路と電磁気現象がもっとも根本的な基礎項目として挙げられるが，電磁気は理解しづらく学科に配属された学生の多くも苦手意識を感じる学習領域である。小・中学校時代から単元としては電磁現象の学習はあるものの，電気系を好まない学生にも理解できるようにするためにはテーマの工夫が必要である。電子工学分野においては，これまでにもテーマの工夫として実験内容や手法の改善に取り組んできた。その都度，学生による授業評価アンケートを実施してきたが，学生の興味関心の高さは微増程度にとどまり，難しいと感じる印象もわずかに増加するほどであった[6]。

先行事例として基礎科目において独自のビデオ教材を作成し反転型授業を取り入れている試み[7]がある。実験科目においても学生が主体的に自分なりに学習を深められるようにするため，また当該の実験テーマでどんな作業をしてどんな結果が得られるのかを予習しておくためにも，座学と同様に事前学習が必要であるとの認識に立ち，実験概要ビデオ教材を独自に作成した。学生に対する授業後のアンケート調査から基礎実験における事前学習の効果を調べたところ浮かび上がってきた東京高専の学生気質とビデオ学習の効用について報告する。

2. 取り組み

1 年生の科目「ものづくり基礎工学」において，電子工学分野の 5 テーマのうち電磁現象について実験し考察するテーマ「D3 電磁力」を選び，ビデオ教材を作成した。主な内容は午前と午後の 2 つの実験(クリップモータ製作と LED の点滅実験)に対し，実験手順と実験上の注意点についてポイントを絞って強調した実験概要ビデオ教材である。授業中に学生に見せる powerpoint のスライドを活用しているため実験テキストを簡略化した構成である。授業中は学生に話すためテキストの図には書き込まれていない注意事項をコメントとして映し出すテロップ添付型のビデオとし，前年度に実施した授業中の取組み風景(手元の様子)の映像とつなぎ合わせて 3 分程度のビデオ教材を作成した。事前学習にはまだそれほど慣れていない学生も多いと考え，ビデオ視聴時間は 5 分以内を目標としてビデオ作成に取り組んだ。元々powerpoint のスライドを利用した構成であるため大部分が静止画であり 1 シーンの時間は 7 秒程度となっている。この時間の中で伝えたいポイントや注意事項をテロップとして出現させたり，フェードアウトさせたりして動きの感じられるビデオ教材に仕上げた。これは大部分が静止画をつなぎ合わせた構成であるため，インパクトを与えることによって視聴中に飽きさせないよう意図したことによる。

作成したビデオは Youtube に非公開掲載し，当該クラスには実験当日の 3 日前～1 日前に KinQ を利用して視聴サイトの URL を通知し，事前視聴するよう周知した。1 年生 5 クラスとも授業後にこのテーマに関する事後アンケート調査を行った。アンケート項目は表 1 に示す通り 6 項目であり，うち 4 項目においてビデオ視聴に関する意識調査，ビデオ内容評価，及び改善提案とした。テーマの事後印象(複数回答)及び改善提案(自由記述)以外の質問項目における選択肢は 4 つとした。アンケート評価に関しては「肯定」,「否定」,「どちらでもない」を含む 5 段階評価としての選択肢が必要との意見もあり，中心傾向を含めてアンケート結果であるという意見があることは承知しているが，本調査では中心傾向を排除するために敢えて 4 つ

表 1 授業後の学生アンケート設問

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

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

Q3. あなたは他の実験の概要説明ビデオが公開されたら事前学習すると思いますか？
1 事前学習しない　2 興味のあるテーマのみする　3 時間があればする
4 積極的にする

Q4-1. あなたはこの実験の概要説明ビデオを見られましたか？
1 見なかった　2 公開情報を知らなかった　3 アクセスできなかった　4 見た

Q4-2. あなたが見た実験の概要説明ビデオはわかりやすかったですか？
1 わかりにくい　2 どちらでもない　3 何となくわかった　4 わかりやすい

Q5. D3 電磁力のテーマで、あなたが感じたことに近いのは次のどれですか？
(複数回答可)
1 興味がない　2 コイルを巻くのが厄介　3 簡単なようで難しい
4 興味が湧いた　5 製作が楽しい　6 現象を深く考えた
7 映像を予習で見ていたので良かった

Q6. D3 の概要説明ビデオについてあなたが改善するとしたらどのように改善しますか？ (見た人のみ自由記述)

の選択肢とした。

また，電子工学科へ進級配属した 2 年生には新年度初めに振り返りアンケートを実施し，ビデオ導入前のクラスと導入後のクラスで意識の比較を行った。

3. 取り組み結果

平成 30 年度に実施した 1 年生の授業後アンケートを集計したところ，図 1～図 5 に示す結果を得た。表 1 のアンケート項目中，次の 4 つの観点で以下に述べる。

(1) 取り組み姿勢(Q1 と Q3)，(2) 概要ビデオ教材の評価(Q4)，(3) 事前学習を導入した実験テーマの事後印象評価，(4) 学生からのビデオ改善提案

3.1 取組み姿勢評価

実験科目に対する取り組み姿勢(Q1)についての回答結果を図 1 に示す。「とても」意欲的と回答したのは 56%，「やや」と合わせて 95%が意欲的であると肯定的に回答している。この質問は本テーマに関する質問というよりも科目「ものづくり基礎工学」全体への取り組み方と解釈して回答している学生も多いと思われ，実験実習が好きで入学してきた学生達の特徴と捉えることができる。図 2 は本テーマ以外にもビデオ教材があったら事前学習するかとの質問(Q3)，つまり事前学習への関心に対する回答結果である。「積極的にする」との回答は 3 割，「時間があればする」との回答が約 5 割であった。「興味のあるテーマのみ」との回答は 1 割強であった。アクティビティの高い学生は優先度において悩んだ結果，「時間があれば」を選択した学生が最も多数を占めたのではないかと考えられる。8 割強の学生が興味に関わらず，他の実験概要ビデオが公開されたら事前学習する(あるいは，したい)と回答していることから，事前学習をした方が良いと捉えている学生が多いことを示した結果であると言える。Q1 と合わせて，実験への取り組み姿勢の高さが伺える高専生らしい結果と感じられ，座学で見受けられる学習意欲の低下とは異質と捉えた方が良い。

3.2 概要ビデオ教材の評価

実験概要ビデオ教材の視聴割合とビデオ内容の評価結果を図 3 に示す。KinQ で通知してはいるもの

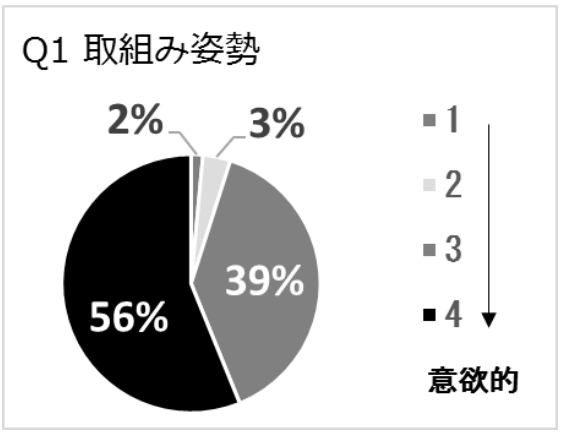


図 1 取り組み姿勢

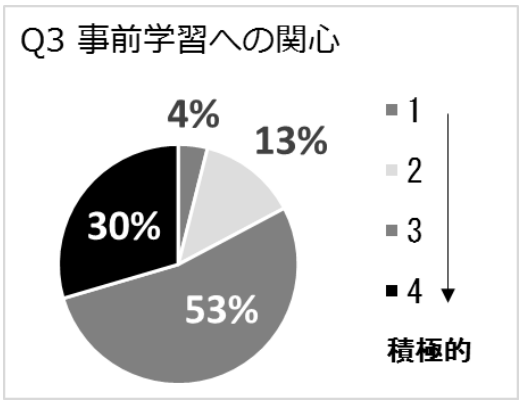
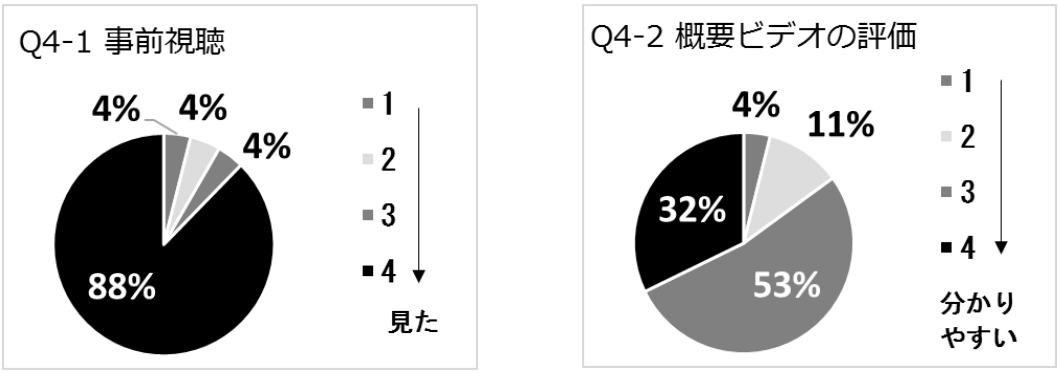


図 2 事前学習への関心

のメールを見ない学生も増えてきているため，実際にどれくらいの学生が事前学習としてビデオを視聴するだろうかという率直な不安があった。選択肢「見た」と「見なかった」以外には，見なかった理由に相当する選択肢「情報を知らなかった」や「アクセスできなかった」を設けることで，故意に見なかったという回答と区別することを意図した。図 3 (a)から約 9 割の学生が視聴し，何らかの理由で見なかったのは 1 割程度であったことが分かった。アクセスできなかった学生も含め 92%が視聴するための行為に及んでいるため，連絡・通知には非常に従順な学生ばかりであることが浮き彫りになった。図 3 (b)から概要ビデオの評価としては，「わかりやすい」が約 3 割，「何となくわかった」が約 5 割であった。「どちらでもない」が 11%，「分かりにくい」が 4%であるので，学生には肯定的にジャッジされたと捉えることができる。一方，過去の分析結果において，学生間の相互評価を行うとかなり高いスコアで評価し合



(a)　　(b)

図 3　ビデオ教材の評価　(a) 事前視聴割合と (b) ビデオ内容の評価

う傾向が示されていた [8]。最近の学生の傾向として，自分が悪く評価されないためにも相手を悪く評価しないという防衛本能があるのではないかとも感じられる事例である。

3.3　実験テーマの事後印象

実験概要ビデオによる事前学習，及び授業中の実験への取り組みを通じて本実験テーマで感じた印象を質問したところ図 4 に示す回答結果を得た。複数回答であるため感じた印象を率直に列挙したものと捉えることができる。電気電子系に関心がない学生にとっては「興味ない」の回答も一定数あっても良いと考えられるが，わずか 2%であった。「コイルを巻くのが厄介」と「簡単そうで難しい」はそれぞれ 13%, 19%であった。これに対して，「興味がわいた」，「製作が楽しい」はそれぞれ 16%，22%であった。前者 2 肢と後者 2 肢を単に否定的回答と肯定的回答として捉えるならば，肯定的な印象と否定的な印象のどちらも同程度の割合になったと見ることができる。一方，「現象を深く考えた」と「予習で見ていたので良かった」がそれぞれ 17%，11%であった。事前学習して良かったと感じた学生が意外に少数であったのに対し，現象を深く考えた学生が 2 割弱程度を占めたことに特徴があると考えている。

「LED の点滅実験」では自分たちでパイプ外部にエナメル線を 400 回巻き，パイプ内の磁石を左右に振ることで互いに逆向きに接続した LED が交互に点滅する現象を体験し，ファラデーの法則から振り方の違いで LED の発光強度が変わることを理解するという実験である。コイルを巻くのが厄介と感じる学生がいるのは当然としても回答は 1 割強の割合しかなかったことが予想外であった。小学校でも体験したことがある学生もいる様子で，一見，簡単そうに感じられるが，コイルの巻き数が比較的少ないため，ネオジウム磁石を利用して

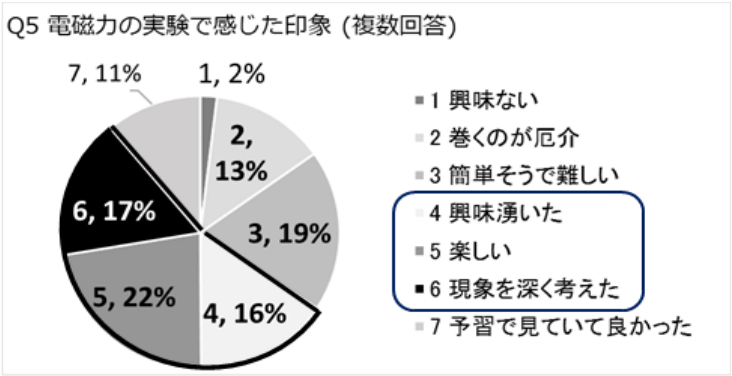


図 4　本実験テーマで感じた印象　（複数回答）

も発電は容易ではないことに気付いたと解釈することができる。「簡単そうで難しい」という回答と「楽しい」がほぼ同程度(約 2 割)であったこと，及び「興味がわいた」と「現象を深く考えた」が同程度(2 割弱)であったことが特徴として捉えられる。つまり，学生たちはおそらく事前学習の効果に気付いていないだけで，実際には実験内容を事前に見て把握しているために余裕が生まれた結果として本テーマの内容に引き付けられ，純粋に楽しむとともに現象を考える時間も生まれたと解釈することができる。

「クリップモータの製作」においても，コイルは 5-6 巻き程度であり，フェライト磁石の上で 1V 程度の電圧を与えるだけでコイルが回転し始めるが，高速回転させるには軸のバランスやエナメル線の削り方などノウハウが必要となる。これも簡単そうで難しい原因の一つとなっていると思われる。事前にビデオを視聴して，難しく感じられないだけに印象に残りやすい可能性があり，このような事象も事前学習の効用と言えるのではないだろうか。

3.4　学生によるビデオ教材の改善提案

上述した学生自身の取組み姿勢，概要ビデオの内容評価，実験テーマの事後印象とともに，実験概要ビデオを自分なりに改善するとしたらどのように改善するか，つまりビデオの改善提案を学生自身に問うた質問が Q6 であり，自由記述とした。高専生のユニークな発想がさまざまに挙げられたが，分類すると，次の 7 点に集約された。

(1) このままで十分　(2) 画質・撮影技術　(3) 文字挿入　(4) 音声挿入　(5) 文言・表示の修正　(6) 不要な映像･アニメ効果の削除　(7) 注意点･アドバイス，BGM，新たな視点の追加

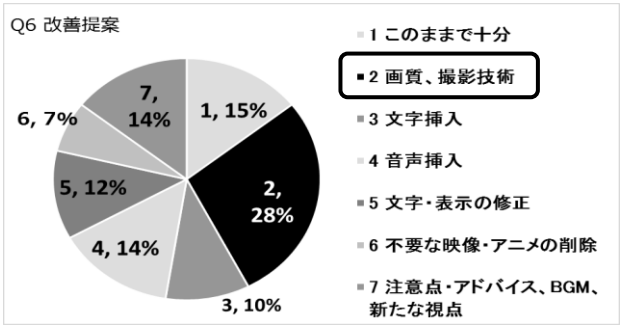


図 5　ビデオ教材の改善提案
(自由記述を分類)

これらの分類回答を割合で表した結果が図 5 である。回答割合では，ほとんどの分類が 10%台であるのに対し，唯一，「画質・撮影技術」関連の提案は約 3 割を占め，圧倒的大多数であった。ビデオ教材中では，前年度に撮影した授業風景の映像が画質低下で粗くなっていた。教材としては学生個人の顔が判別しづらく個人特定につながらないため指導者側としては画質低下は好都合であったが，一視聴者として見ると，手元の作業内容が分かりづらく何のためにある映像なのか意義が見出しにくい状況であった。この点が学生の改善ポイントの第一位になった理由と捉えられる。実際に記述された提案意見(抜粋)は次のようなものであった。

・細部の作業が見えない
・人物の陰になりやすいので撮影角度を変える
・もっと近づいて撮影
・画質が粗くて古っぽいから新しくする
・専用の機材で撮影する
・手元に光を当てて撮る
・解像度を上げる
・コントラストを明るくする
・手元をズームにする
・左右に振っているときは寄りすぎて動画で酔うなど非常に多彩に，厳しい指摘であり，かつ建設的な提案が目立った。現代の学生はソーシャルメディア等で多様な映像に接していることから目が肥えており，中には機種名を挙げて「○○で撮る」という具体的な指摘も含め，不必要にテロップを動かすアニメーションの削除や 1 シーンの秒数をもっと長くといった改善要求も見られた。アニメーション削除についてはビデオ視聴中に退屈しないように意図的に付けた“動き”が，好みにもよるが，目障りに感じられたものと考えられる。このようなビデオ教材の作り方によっても学生のやる気を引き出す重要な要素となると言える。

3.5　進級後 2 年生の比較

電子工学科に進級配属した学生に対して振り返りアンケートを行った。ビデオ教材による事前学習導入前後におけるクラス間比較の結果を図 6 と図 7 に示す。図 6 は事前学習導入前後における実験テーマの印象(複数回答)を比較している。事前学習についての印象は，導入前には「事前に見たい」，導入後には「事前に見ていて良かった」という選択肢であるためどちらか一方のデータとなっ

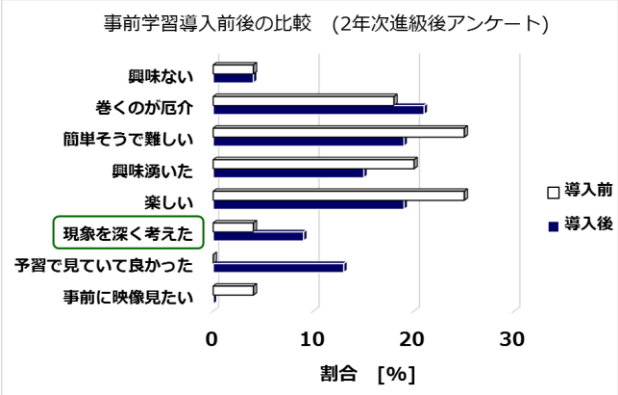


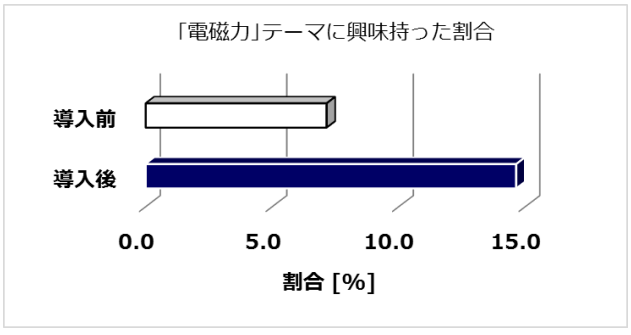
図 6　事前学習ビデオ導入前後における
本実験テーマの印象比較

ている。導入前のクラスにおける「事前に映像を見たい」は想像での回答でしかないが，導入後のクラスにおける「事前に見ていて良かった」は実感を伴った回答である。この点において割合が大きく異なっているものと思われる。先に 3-3 で述べた肯定的印象を比較すると，事前学習後に必ずしも好転(増加)しているわけではなかったが,「現象を深く考えた」の割合のみが 4%から 9%へほぼ倍増していることが分かった。この変化はもともと事前学習導入前の回答数が少なすぎたせいである可能性もあるが，他の選択肢の増減割合に比べて非常に高い増加割合であることから，事前学習の効果を表していると考えられる。3-3 で述べたように，事前学習によって実験概要を把握できたために余裕が生まれ，純粋に実験結果について考える時間が生まれたことによるものと解釈することが妥当であることを示している。類似の事例として実験内容に関する講義をビデオ制作して学生に実験前に事前学習させた試みが報告されている [9]。この報告によると，レポート評価で比較するとビデオ事前学習の導入後にA評価の割合が大きく増えており，実験結果の正しい理解が進み，実験結果に対する興味が深まったとしてビデオ学習による反転授業の効果を捉えている。

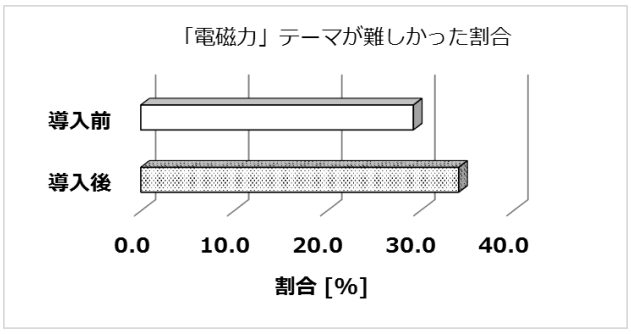
電子工学分野の 5 テーマの実験を比較して,「興味を持った」テーマ及び「難しかった」テーマを択一式で回答してもらった。その中から本実験テーマに対し「興味を持った」割合を図 7 (a)に示す。事前学習導入前のクラスに比べて導入後は 7%から 14%へと倍増している。同様に，本実験テーマが「難しい」と回答した割合を図 7 (b)に示す。この回答も 29%から 33%へと微増していることが分かった。増加割合を比較すると,「興味を持った」の回答の伸び率が高いことは事前学習の効果であると考えられる。ただし,「難しい」と感じられた回答が減少したわけではないことから，現象を考えようと試みて本実験における現象が「難しい」ものと再認識した可能性もある。このような教育手法の改善が単純に 2 値的価値観で述べることはできないことを示唆している。

4.　まとめ

学生が主体的に学ぶ姿勢を養い，多様な学生一人一人に対応するために，ものづくり基礎工学における 1 テーマ「電磁力」について，実験概要と注意事項をまとめた事前学習用ビデオ教材を作成し，事前学習を促す取組みを行った。授業後のアンケート調査を分析したところ，ビデオ教材導入により事前に実験概要を把握したおかげで現象を深く考え,興味を持つ学生が増加したと思われる。



(a)



(b)

図 7　事前学習ビデオ導入後における本実験テーマに対する感想比較
(a)「興味を持った」, (b)「難しい」

またビデオ教材への改善提案を分析したところ，画質・撮影技術に対する提言が圧倒的多数を占めた。各種メディアによって目の肥えた現代学生らしい視点で建設的な改善提案が目立った。ビデオ教材の作り方も学生のやる気を引き出す重要な要素となると言える。

謝辞

本研究の遂行にあたり電子工学科のご担当教員のご支援を頂きましたこと，感謝申し上げます。なお本研究は科学研究費補助金基盤研究(C)一般（課題番号 17K00995） の支援を受けたものである。

参考文献

1) 黄地吉隆：特別講演「高等教育を取り巻く最近の状況について－工学教育への期待―」, 工学教育 vol. 67, no.6, pp.28-35, 2019 年 11 月
2) 文部科学省 中央教育審議会答申 :「2040 年に向けた高等教育のグランドデザイン (答申)」, https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/__icsFiles/afieldfile/2018/12/20/1411360_1_1_1.pdf, 参照日 2020 年 1 月 12 日
3) 川上悟史：特別講演「産業界における理工系人材の活躍に向けて」, 工学教育 vol.67, no.6, pp.36-42, 2019 年 11 月
4) 鈴木健一，三浦直樹，田村英樹，河野公一：大学新入生の学修改善のための一施策，工学教育 vol.66, no.2, 2018 年 3 月
5) 大塚友彦，小坂敏文，大貫繁雄，清水昭博，西村亮，城石英伸，黒崎茂，福田勝己，森下達也，堤博貴，土井淳，伊藤浩，山内峯生，木村知彦，加藤格，一戸隆久，正木進，鈴木孝，松林勝志，吉本定伸，松本章代，中野雅之, 羽鳥広範, 鈴木塔二, 藤野宏, 海津朋之, 中村源一郎，米谷雄介，松岡敏，村田賢俊，雑賀章浩，新田武父：「ものづくり基礎工学」における体験重視型専門導入教育－東京高専 1 年生への試みー，東京工業高等専門学校研究報告書第 38(2)号, pp. 71-76， 2007 年 3 月
6) 一戸隆久，大塚友彦，加藤格，新田武父：専門基礎実験における学生の主体的な学びの実践例, 東京工業高等専門学校研究報告書第 47 号， pp. 40-43，2015 年 3 月
7) 河津祐之介, 堤 厚博 : 反転授業効果の定量的評価の試み, 工学教育, vol. 66，no. 3，pp. 88-91，2018 年 5 月
8) 一戸隆久，清水昭博，新國広幸，西村亮，城石英伸，大塚友彦，小坂敏文：専門導入基礎教育における主体的な学びの涵養, 工学教育, vol. 64，no. 4，pp. 53-56， 2016 年 7 月
9) 大坪康郎：実験教育への反転授業導入－機械材料系授業への導入における工夫と効果－, 工学教育，vol. 67，no. 3，pp. 52-55，2019 年 5 月

（２０２０年１月１４日　受理）

リアルタイムビッグデータのための拡張モーバイル マルチホップネットワークの一検討

田中 晶*，岩田 青龍*，木下 和渡*，工藤 颯希*，坂本 惇一郎*，
佐田 彩星*，西村 憲人*，益子 海音*，山川 涼*

近年マイコンやモバイルプロセッサ等の普及が進み，誰でも容易に入手可能となるとともに，このようなプロセッシングデバイスから個人／産業用問わず様々なデータ発信が行われている。デバイス周辺の環境データ，物の動き，車等の移動体から発せられる情報や人の発する情報を収集し分析に供するビッグデータも今後のさらに発展すると考えられる。情報通信研究室（田中研）では，これまでに設計してきたマルチホップメッシュネットワークをもとに，周辺データをリアルタイムに検出し，防災，さらに普段の生活・生産活動等の様々な用途に利用可能なビッグデータシステムの設計を目指している。本稿では，特に最近の進展を中心に一連のシステムを構成する，群ドローンマルチホップ制御，最適ルーティング，ネットワーク共有メモリ，モーバイルマルチメディア分散データベース，ネットワークエミュレータについて論じ，更に，将来これらのシステム設計を目指す人たちに向けたプログラミング教育ツールの設計について述べる。
（キーワード：モバイルマルチホップ通信，ビッグデータ，共有メモリ，群ドローン制御，FPGA，プログラミング教育）

A study on augmented mobile multihop networks for real-time big data

TANAKA Akira *, IWATA Seiryu*, KINOSHITA Kazuto*,
KUDO Satsuki*, SAKAMOTO Junichiro*, SADA Ayatoshi*,
NISHIMURA Kento*, MASUKO Kaito*, YAMAKAWA Ryo*

Mobile microcomputers are easily obtainable recently. These devices can continually send various personal and industrial messages including environmental sensing data, logistic information, vehicle and person's location, scientific observations everywhere, that are now open to the public as big data. We information communication laboratory (Tanaka lab.) have focused on real-time sensing data for disaster prevention, industrial and daily activities, researching a meshed real-time big data network system so as to gather and analyze such big data. In this article, we describe recent progresses of our developed heterogeneous mobile multihop mesh networks. Multihop linked group drones augmented by image-recognition and mutual position detection. Mesh networks that have abilities to repair their routing automatically, and can integrate all terminal memories into one shared memory on FPGA. Multihop terminals predict network congestion and make rerouting optimally. Mesh network emulator helps us to verify how routing systems functions. Distributed multimedia databases are implemented in Android terminals. In addition, we have designed internet and programming education system.
(Keywords: mobile multihop communications, big data, shared memory, group drone control, FPGA, programming education)

*情報工学科

1. はじめに

1.1. 小型端末の普及とマルチホップネットワーク

マイコン或いは PIC マイコンなどの小型プロセッサは従前から比較的安価に入手できていたが，一般に多く使用される状況ではなかった。しかしこの 2-3 年急速な広がりで製品設計だけでなく様々な形態での利用が浸透してき始めている。スマートフォンのような完成品による情報発信や情報収集に加えて，今後は比較的手軽にカスタマイズできるマイコン類を用いた情報発信も拡大すると想定される。既存のネットワークを用いて高速に画像や映像を送る大容量化だけでなく，インフラネットワークが直接届かない地域や領域での活動，例えば，森林地帯の調査，回線が十分には張られていない地下や建物内，イベント会場，被災地域や被災家屋内等にローカルに或いは一時的にネットワークを構成できるマルチホップネットワークも，携帯できる端末の普及により発展が続いてきた。様々な条件下でも生成できるマルチホップネットワークを用いると，インフラネットワークだけでは収集できないローカルな情報を広い地域でデータ化できる可能性があり，特に，スマートフォン等の携帯端末を接続するとローカルではあるものの人の発する情報とあわせて地区の状況も把握可能な，ある種のビッグデータとなる。

1.2. マルチホップネットワークの拡張

情報通信研究室（田中研）では，スマートフォン，マイコン，再構成可能デバイス（Field Programmable Gate Array (FPGA)）を用いて設計した端末を，周囲の状況に適した通信方式により接続するヘテロジニアスなマルチホップネットワークを設計してきた [1, 2]。図 1 にそのイメージを示す。無線が届きにくい，遠距離，画像中心の送信といった伝送条件に適応しやすいだけでなく，移動に対するルーティングによる適応についても有効な方式を実装している。端末移動はマルチホップネットワークで一般的に解決しにくい課題であり，ルーティングだけで対応すると非常に複雑化してディレイや不達の原因になる。我々のマルチホップネットワークは，群ドローンを用いた通信領域延伸，移動予測や伝送データ圧縮機能も持つており，移動ルーティングの補完にも役立っている。さらに，分散データベースをネットワーク内に配置し，マルチメディア化して直接通信をしなくても所望のデータが得られるようにしてデータアクセシビリティの向上も図ってきた。高速用にラベルスイッチングを用いており，自律ルーティングの改良に加えて端末のメモリを共有化しラベル配信に相当する機能を簡易に実行する。さらに，輻輳推定によるルーティングや解析用の疑似通信環境も可視化しながら設計している。なおこれらの背景も活かして田中研は 2012 年度より毎年夏に八王子市小学校科学研究センターの小学生を対象としたインターネット講座を担当してきており，関連する小学生向けプログラミング授業への提案

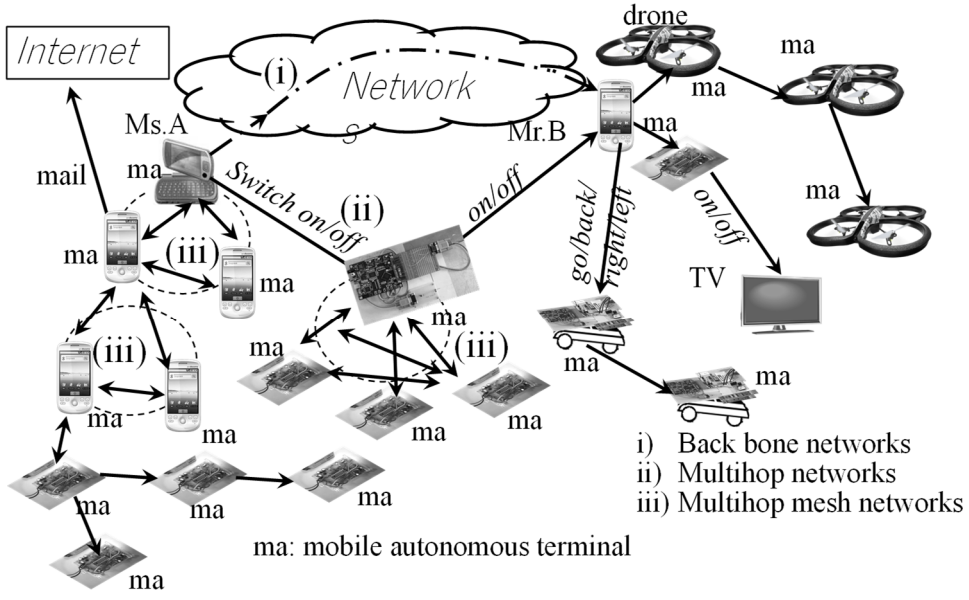


Fig. 1 Locally exploitable heterogeneous multihop networks

*情報工学科

も行った。

本稿では，上述のような空間的／機能的／操作面での拡張に着目し当研究室のマルチホップネットワークの最近の開発概要を述べる。

2. 知的センシング制御群ドローンによる応用

2.1. 群ドローン制御の改良

これまでの設計により，群ドローン制御にマルチホップ通信を適用して，直接制御できない遠方の先頭ドローンを制御できるようになっており，また，先頭ドローンの撮影動画がマルチホップを介してオペレータに送信される [1, 2,)]。このマルチホップ通信で送受される信号ではドローン制御信号は一部に過ぎず，通常の通信も行えるため，地上のマイコン制御端末等で構成されるマルチホップネットワークを接続しその通信領域の拡張が行える。複数ドローンを介してきた従来のコマンド再生方式と探索方式に加え，新たに画像処理を用いた前方追尾方式と内蔵位置センサを用いた協調動作方式を設計している。制御用 Raspberry Pi を軽量化すると搭載して飛行できる [3)]が，Raspberry Pi は WiFi でドローンと接続していて本体と離しても追尾動作確認は可能であり，複雑な動作検証のため今回は離れた状態で実験を行った。

2.2. 新たな群ドローン制御

(1)画像認識による追尾

新しい先頭追従型ドローン制御方法として，OpenCV [4)]を用いたリアルタイム画像認識によって次々と繰り出される複数台のドローンが数珠つなぎのように先頭ドローンを自動追尾し，電波が直接届かない遠方や入り組んだ場所にも到達できるシステムを設計した [5)]。リアルタイム画像認識は，ドローン間での通信のネットワークの性能に依存しない点や，常に前のドローンを認識しながら次の動作を決めるためルートが外れにくい点から，従来のコマンド再生方式や後続が探索する方式より優れていると考えられる。

ドローンは， AR Drone2.0 [6)] を使用する。実装するにあたり，Open CV のモジュールの一つである AR 用ライブラリ ArUco を用いた。図 2 の ArUco マーカを使用し，白黒の二色のみで容易に扱えるため，ドローン本体を検出するよりも高い精度で検出でき，手軽で正確な認識が可能である。このマーカを各ドローンの後部に取り付け，後ろのドローンのカメラでマーカを検出して先行しているドローンを認識する（図 2)。カメラがマーカを検出すると，カメラからの距離やマーカの向き，マーカの中心を原点とした座標，それぞれに割り振られた番号が分かる。また，姿勢推定をするためにカメラキャリブレーションを行い，カメラの内部パラメータや歪み係数を求めた。ドローン間の距離や傾きの数値をリアルタイムで取得できるため，一定の距離を保ったまま追尾できる。もしマーカが 1 個も検出されなかった場合は，検出できなくなった場所でホバリングし，マーカの探索を続けさせ，マーカが見つかったら追尾を再開させる。最終的にはドローン 5 機の連接制御を予定している。

追尾のプログラムを実行する時に，ドローンによって個体差があり飛び方に違いがあったが，何度も実験を繰り返すことにより解決した。マーカを検出して距離を求め，離陸，前進，ホバリング，着陸の動作できている。このシステムが完成すると，災害時に人の入れない場所の調査をするなど，様々な分野での活用が期待できる。

(2) 内蔵センサの応用

先行研究 [1, 2)]ではマルチホップ通信を用いたドローンの制御を行うことでより広範囲のドローンに対して制御命令を送ることができていた。しかしそれぞれのドローンに対して個別に位置を調整することはできなかった。そこでそれぞれのドローンの位置を計算し組み合わせて相対的な位置を算出できるようにする。これにより末端のドローンの位置を指定したときに中継のドローンも自動で移動させより柔軟に協調した動きができる [7)]。

プログラムでの制御のしやすさや，実際に制御時の安定感から従来や上記 (1) 項同様に AR.Drone2.0 を使用して図 3 のような構成としている。ドローンには加速度センサや GPS などのセンサが内蔵されており，Linux のサーバーがセンサデータの収集や制御用の API を提供している。通信は Bluetooth と Wi-Fi の二つがサポートされている。Wi-Fi を利用した制御では，プログラムから UDP で接続することで API にアクセスできる。SDK は node.js と python で書かれているものがメジャーである。バッテリーは一台当たり 15 分程度持続使用できる。 Raspberry Pi [8)]をアクセスポイントとして設定し，後続の Raspberry Pi を接続することでマルチホップ通信している。先行研究で

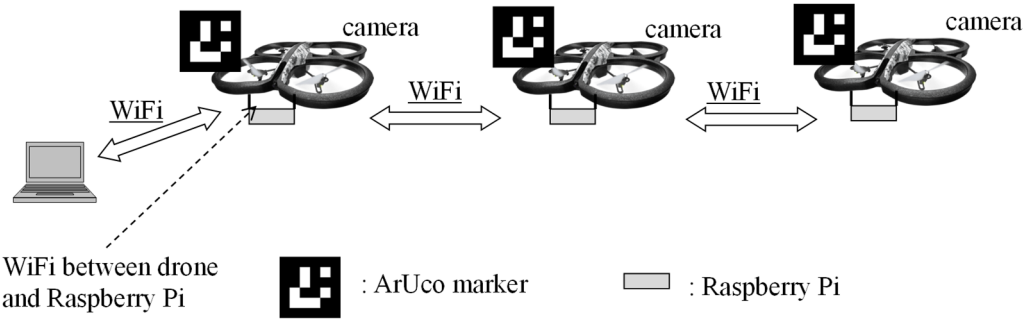
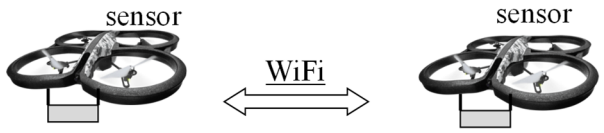


Fig. 2 Group drone control with image recognition seeking



displacement information sharing for collaborative works

Fig. 3 Collaborative group drone control

はWi-Fiモジュールの数の都合上からRaspberry Piとドローンは Bluetooth を介して通信していたが，API の仕様が Wi-Fi と異なり，得られるデータの種類や頻度が少なくなるのでドローンを子機にするか Raspberry Pi に外付けの Wi-Fi モジュールを追加する。末端の Raspberry Pi に対して Wi-Fi を通してアクセスすることでドローンに対しての制御できる。センサで位置検出ができており，複数ドローンの協調動作に応用する。

3. モバイルメッシュネットワークに向けたラベル配信機能

モーバイルマルチホップネットワークでの遅延をできるだけ小さくするためラベルスイッチング及び Virtual private network (VPN)を導入している。ラベルスイッチングで必要なラベル配信はモバイル化した場合複雑化する。そこで初期配信の後に端末移動した際には移動個所付近で自律的にルートを補修する方法を改良するとともに，共有メモリによる方法を新たに設計した [9]。FPGA を利用したメッシュネットワークが構築されており [1, 2]ハードウェア制御のためルーティングやラベル配信機能はネットワーク規模が拡大しても高速性は維持できる。

移動個所付近での自律ルート補修は開発済み [3] であり，端末が移動しても近辺の端末を使ってルートが修復されるのでラベル再配信は不要である。ラベルスイッチングでは，マルチホップ通信を行う上でデータのパケットに転送先や転送経路，ホップ数などの情報を付与するためのラベルを端末内でルーティングテーブルなどを元に書き換える操作を行っている。先行研究では，メインで使われるルーティングテーブルの他に予備ルーティングテーブルを予め端末に書き込んでおき，通信に障害が発生した場合に不達を自動検出し先頭ホップの端末からの信号で予備テーブルに切り替える方式であった。今回，図 4 内写真の端末を使用して予備のルーティングテーブルを持たない柔軟なルーティングプロトコルの実装を行う。まず以下の 3 案を考案して比較検討した。

(a) 障害を検知するとルートの変更箇所のみを他の端末に送信する差分配信方式。
(b) ルーティングテーブルから隣接しているはずのノードで通信が不可能な箇所の情報を同様に送信する方式。
(c) 障害を検知した端末が，ルーティングテーブル上で隣接している端末に通信を振り替える方式（図 4 参照）。

案(a)とは案(b)は通信量が多くなる，端末ごとに異なったルーティングテーブルを持つ可能性がある，などから，案(c)が最も実現可能性が高いと思われ，実装し動作確認した。

過年度来，マルチホップで接続されたFPGA端末のプロセッシング機能を結合して大規模なプロセッシングシステムを構成する方式を設計しているが，メモリ部分も共有されるため，メモリアドレスに書き込む方式でラベル配信を不要とする方法の実装も進めている（図4）。通信のデータセクタにビット情報を載せて通信ができることが確認できている。

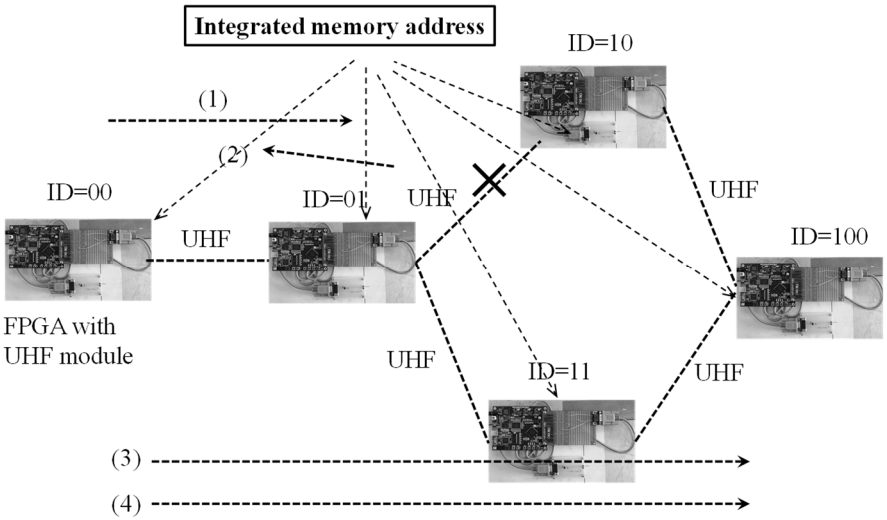


Fig. 4 Autonomous rerouting and memory integration

4. モーバイルメッシュネットワークに向けたラベル配信機能

4.1. マルチホップ分散データベース

マルチホップメッシュネットワーク内でピアツーピア通信を行うには，ルーティングが複雑化するケースも生じる。効果的なデータ配置ができればメッシュを構成する端末の何台かにデータベースを実装し，データベースアクセスによって情報伝達する方法が適している。また，マルチメディアデータを送受するには，処理能力の小さなモーバイル端末を多数経由するよりも帯域を確保しやすい。これまでに，ヘテロジニアスマルチホップネットワークへの分散データベース実装，マルチメディア化，簡易な競合回避やセキュリティ機能実装等を行い[1,2,3]，その後改良を進めている。

4.2. マルチメディアと分散処理の改良

(1) ライブラリ化

WiFi経由だった画像通信はBluetooth通信でも可能にする。データベースについては過年度通りアプリケーションに組み込まれているデータベース管理システムSQLite[10]を用いる。応用例としては，災害時対策では，避難所において避難者に被害状況に応じて支援物資をいきわたせる必要がある。そのために各地の被害状況をまとめ必要物資などを管理し，円滑に支援を進められるようなシステムが必要とされている。その際，被害状況，避難所の様子などの画像の情報もデータベースに組み込むことでより適切なデータ提供が可能になる。 SQLiteのカラム追加，更新，消去をAndroid Studioのレイアウトに紐付け実装しているが，画像については，全ての画像をビットマップに変換しカラムに直接挿入する方法を用いた。しかしながら，サイズの大きな画像や動画もデータベース化すると小型の携帯端末では性能が不足するため，プロセスが増えるもののマルチメディアデータはライブラリ化しておきデータ属性とライブラリ内のリンク情報をデータベース化する[11]。この処理は主としてUIで行う。

図5の画面が1つのテーブルとなっており地域，物資，個数の入力項目を入力し登録ボタンを押すことで上記の3つの項目の入ったカラムが作成される。また物資名や個数を修正，変更したい場合には，変更したい地域を入力後物資，個数を変更し更新ボタンを押すことでフィールド部分の変更が適用される。カラムを消去したい場合には，消去したいカラムの地域を入力し，削除ボタンを押すことで消去され，すべて削除で作成した全てのカラムが削除される。

(2) 分散化の改良

これまでAndroid端末同士の接続はWiFi direct と Bluetoothを用いていたがBluetooth Low Energy (BLE)[12]を採用して接続端末数の制限をなくし省電力で広範囲なマルチホップネットワークを目指した。特に災害時の避難所などでは充電ができないことが想定される。Bluetooth通信での消費電力約1Wに比べ，BLEでは0.01~0.5Wであり電力が限られた環境下で最適である。そこでBLEによる分散データベースシステムを設計している[13]。SQLite を用いるが，端末間の通信は Generic

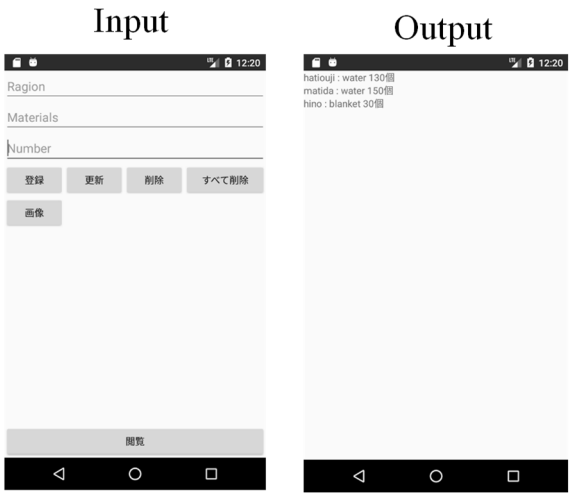


Fig. 5 UI for image database on multihop network

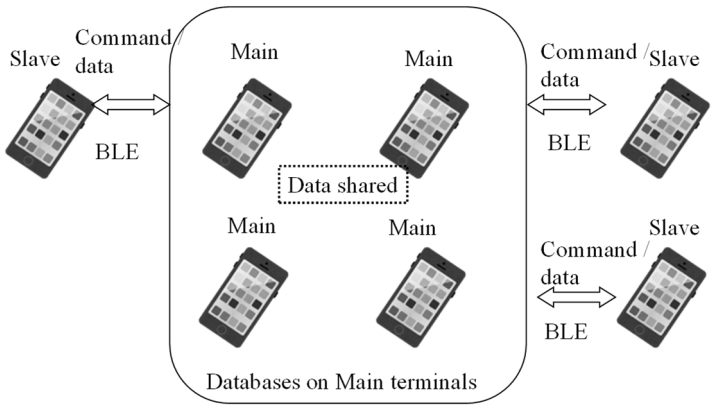


Fig. 6 Databases on Android terminals connected by BLE

Attribute Profile (GATT) [14]のデータ転送の定義が必要になる。データベース本体はすべての端末にあるわけではなく限られた複数の端末（親機）に搭載し，負荷分散する。データベースを持たない端末（子機）は親機端末にデータベース操作コマンドに相当するコードを生成して親機へリクエストとレコードを送信する（図 6 参照)。従来の研究 [3] では 2 台の分散データベース親機同士の同期を保つ実装がなされていたが，BLE 導入により端末台数が増えるため，より多くの親機同士での同期を実装が必要となる。避難所では物資や安否確認など様々な情報が求められ，転送容量が小さな BLE でも容易にテーブルやカラムの追加，削除などができるような工夫を行う。

5. 自律ルーティングと疑似通信環境

5.1. ブロードキャスト環境をベースとした最適通信に向けて

近年の多機能マイコンの普及により，誰でも比較的簡単にマイコンによるシステム設計もできるようになりつつある。これまではマイコン端末によりブロードキャストの最適自律ルーティングを設計してきたが [1, 2] メッシュ状の移動体ネットワークで 1 対 1 のマルチホップ通信を開発する。その際に複雑度が増すルーティングには，端末負荷を取得して輻輳を推測し自律的に最適な迂回をする方式を実装した。多機能マイコンでは容易に複雑な通信方式を実装できて適用する通信環境や使用状況も多岐になる。そこで，マルチホップメッシュネットワークの疑似通信環境を設計する。いずれも可視化されており常に通信状態把握も可能である。

5.2. 輻輳推測の型自律ルーティング

マルチホップ通信のシステムにおいて，ある端末を宛先にしたルートの中の最速で送れるルートを予測し，送信できるシステムを構築した [15]。実装機は Arduino [16]を基にした研究室自作端末 [2]（図 7 内写真）で，UHF（特定小電力無線）モジュールを用いている。Windows PC または Android スマートフォンに接続しメッセージを入力してメッシュネットワーク端末をリンクして目的端末に送信する。各端末の通信負荷（処理している通信の数）を常に端末が共有できるように設計してあり，特定の端末に負荷が集中するとその端末を迂回する形状にルート再構築される。負荷から輻輳を推測するにあたり，基本的な待ち行列計算の式 1 を用いている。

$$a = \lambda / \mu, \quad W = a / (1\text{-}a) \cdot h \qquad (1)$$

a：呼量　μ：終了率 $(1/h)$　W：平均待ち時間

h：平均保留時間　λ：平均到着率

メッセージ送信元には取得した通信負荷による待ち時間が送られ，そのデータを使いルーティングテーブル上の最速経路を求めることが可能になった。さらに，PC に接続した Arduino 端末の通信状況をリアルタイムで確認できるアプリを開発した（図 7)。メッセージ送信元が持つ通信状況をシリアル通信で PC に表示させ，それを元にグラフィック化してある。この最短経路が自律的に構成されるだけでなく，オペレータが負荷状況やルー

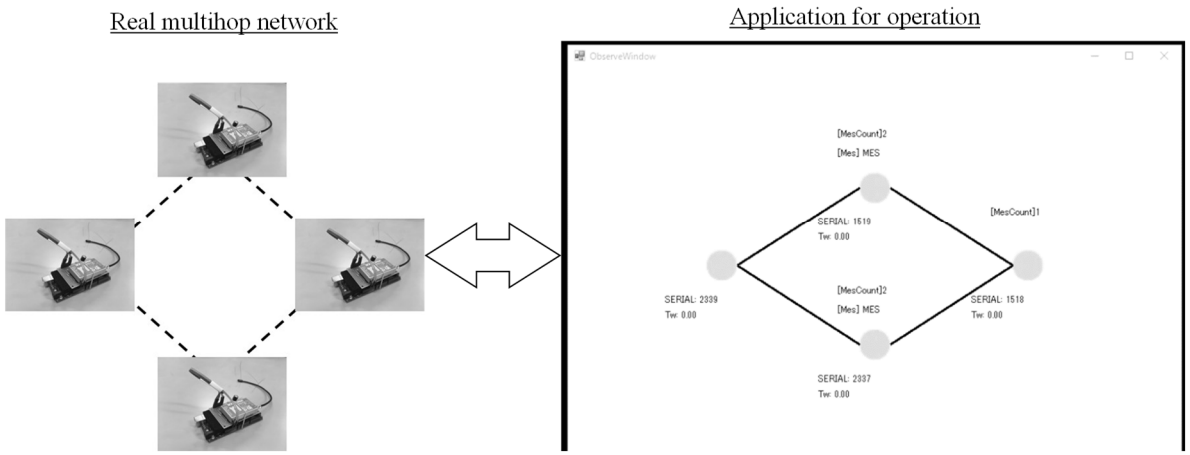


Fig. 7 Autonomous traffic diversion for maltihop mesh network

ト状況を PC 上で確認できる。

5.3. 多端末化や長距離化に向けた疑似通信環境

本マルチホップメッシュネットワークの適用例と考えられる災害時の情報収集では，電気インフラが停止し困難が生じる場合があり，バッテリー電源供給で動作し簡易にネットワークを構築できる本研究室の過年度来の研究の Android を用いたマルチホップ通信システムが適している。UHF（特定小電力無線）モジュールを android や PC に接続し自由に持ち運び可能なメッシュネットワークであり，フィールドテストも行われているが，端末台数も容易に増やせるブロードキャスト [2]であり，試作毎に屋外で遠距離実験を行うよりも，通信環境のエミュレータを開発して用いるとより効率良い設計と実用化する際に必要な評価ができる。そこで PC と図 7 内写真の実機を使用して通信疑似環境を開発した [17]。

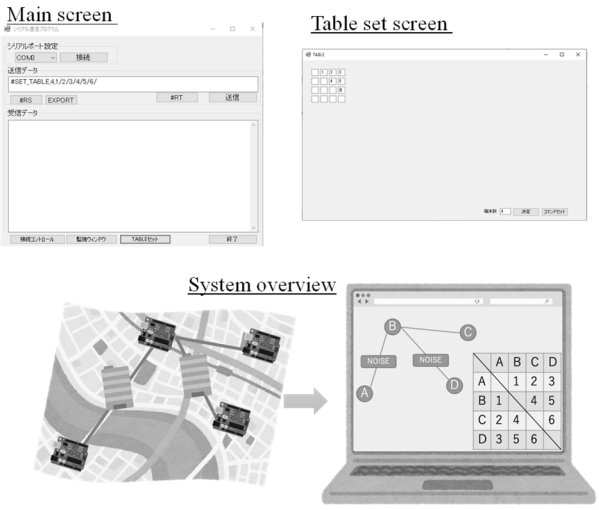


Fig. 8 Multihop mesh network emulator

ネットワーク構成は予めセットしておき，環境に応じた遅延時間を入力できる。図 8（主画面）に PC でのコマンド入力画面を示す。アプリ画面の下部の TABLE セットボタンを押すことにより図 8（テーブルセット画面）に示した端末状況入力画面に移行する。TABLE セット画面ではまず端末数を入力し，テーブルセット画面左上にある端末状況入力フォームを出して各端末感の遅延時間を入力し TABLE セットボタンを押す。それにより主画面の送信データの欄にコマンドが指定のフォーマットで入力される。遅延だけでなく様々対象端末全部に容易に設定する方法の実装にむけさらに改善する。図 8 下部に本システムの実際の使用状況を示す。

6. 小学生に向けたプログラミング教材の設計

情報通信研究室（田中研）担当の 4 年生向けゼミでは 10 年ほど前からい幾つかの教材を用いて ARM プロセッサ [18] (現在の Raspberry Pi 搭載プロセッサを用いた Web サーバ設計や複雑なプログラミングも可能なビジュアルプログラミング実験も取り入れてきた。その後 Raspberry Pi 等の普及，2020 年度には主としてビジュアルプログラミングが使われる小学校のプログラミングの授業が必修化されるなど実用にむけた拡がりを見せている。一方，現状では教育現場でのプログラミングに対する先を見据えたより深い理解がますます求められる。そこで，小学生を対象にした Python [19] によ

Fig. 9 Programming educational material for elementary students

るプログラミング教材を開発した[20]。画像認識や Raspberry Pi による基本動作処理等を含んだ内容のテスト教材を設計して小学校教員を対象に講習会を行い，それに基づいたより利便性が高く，わかりやすい小学生向け教材の完成をさせる。

教材作成にあたって重視したことは，小学生がプログラミングに興味を持ってもらえるユーザでもありプログラマーでもある状況で容易にプログラミングできることや，身近な存在として理解してもらうことである。そのため用いる言語はコードがシンプルで書きやすくて読みやすく，かつライブラリが充実していて難しい処理でも簡単に行うことがでてプログラミング初心者に馴染みやすいという特徴がある Python による教材の開発を行う。既に小学生向けのプログラミング教材は存在しているがその殆どがビジュアルプログラミング言語であり，スタート時点で実用プログラミングの方法と大きく異なる部分があり，実用的なシステムからはかなりの距離がある。今回開発する教材ではプログラミングの本質を理解できるように基礎の部分から応用の部分まで取り扱う。基礎の部分では図 9 のように文字の出力から簡単な四則演算, 応用の部分では LED の点滅や簡単なアセンブラ（マシン語），画像処理を行う教材を作成している。html で作成したページに穴埋めで答えを入力し, 入力された値が正しかったら flask によって建てた内部サーバを経由させ、python 側に値を受け渡し実行し，結果を表示する。

7. むすび

情報通信研究室（田中研）で設計を重ねてきたヘテロジニアスマルチホップネットワークは，携帯端末の浸透，多機能マイコンの普及，無線方式の多様化等の近年の傾向も取り入れ，多数端末対応化や共有型のデータ転送方式の拡充，オペレーション可視化，ネットワーク向けから作業向けのドローンへの応用など，より適用範囲を広げて開発している。このネットワークを用いた誰でも扱える身近な通信環境の実現に向け，プログラミング普及を意図したツール設計も並行して行ってきた。FPGA，Raspberry Pi，Arudino，Android 端末など多様な端末で構成され 3 次元化対応もなされている。今後はさらに規模拡大の実現やセンサーネットワークや計算機環境への応用をはじめとした各種実用機能をになうシステム設計や実証を進める。

謝辞

本研究の一部は，東京工業高等専門学校の令和元年度重点配分経費により行われた。

参考文献

1) A. Tanaka, “Locally exploitable heterogeneous multihop communications applied to cooperative robots,” Proc. 5th Int'l Conf. on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN 2013), 7A-5, pp. 421-326, Da Nang, Vietnam, Jul. 2013.
2) 田中晶，澁田叡知，中新井田覚志，河野雅，川向凜，杉本新，橘直輝，東宇辰朗，真下稔央，橋爪嘉輔, “リアルタイムビッグデータのためのモーバイル VPN マルチホップネットワークの一検討,” 東京工業高等専門学校研究報告書, No.50, pp.51-57, Mar. 2019.
3) 田中晶，澁田叡知，中新井田覚志，新井将司，三枝日奈子，坂本亮，佐々木貴啓，佐藤恵介，松村岳信，溝畑祐太, “モーバイル広域マルチホップネットワークの一検討,” 東京高専研究報告書, No.49, pp.41-46, Mar. 2018.
4) Open CV, https://opencv.org/, (2019.11.28 access)
5) 工藤颯希, “リアルタイム画像認識によるマルチホップ群ドローン制御の研究,” 2019 年度東京高専卒論, Feb. 2020.

6) Parrot, AR. Drone2.0 Power Edition, https://www.parrot.com/jp/doron/parrot-ardrone-20-power-edition, (2019.11.28 last access)
7) 坂本惇一郎, “マルチホップ通信を用いた群ドローンの位置制御の研究,” 2019 年度東京高専卒論, Feb. 2020.
8) https://www.raspberrypi.org/ (2020.1.13 last access)
9) 岩田青龍, “モバイルメッシュネットワークに向けたラベル配信プロトコルの研究,” 2019 年度東京高専卒論, Feb. 2020.
10) https://www.sqlite.org/ (2020.1.13 last access)
11) 佐田彩星, “Android 端末におけるマルチメディア分散データベースの研究 ,” 2019 年度東京高専卒論, Feb. 2020.
12) https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth-technology/radio-versions/ (2020.1.13 last access)
13) 益子海音, “BLE マルチホップ通信による分散データベースの研究,” 2019 年度東京高専卒論, Feb. 2020.
14) https://www.bluetooth.com/ja-jp/specifications/gatt/ (2020.1.13 last access)
15) 山川涼, “メッシュネットワークにおける実測値に基づく経路最適化の研究,” 2019 年度東京高専卒論, Feb. 2020.
16) https://www.arduino.cc/ (2020.1.13 last access)
17) 西村憲人, “無線メッシュネットワークにおける 3D 環境エミュレーションの研究,” 2019 年度東京高専卒論, Feb. 2020.
18) https://www.arm.com/ https://www.arm.com/ (2020.1.13 last access)
19) https://www.python.jp/ (2020.1.13 last access)
20) 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,” 2019 年度東京高専卒論, Feb. 2020.

（２０１９年１月１４日　受理）

重金属汚染土壌の原位置にて安定化のための浄化剤と固化材の性能評価に関する研究

庄司良 *，宮村光 *，田上實 **，神代浩一郎 **

原位置での汚染土壌処理技術としての可能性を実証実験により示していくことを最終的な目的とし，浄化剤と固化剤添加により汚染土壌を不溶化した場合の重金属の浄化性能を評価することと，浄化剤の汚染土壌添加による重金属の浄化性能の確認と最適混合比を検証した。処理前は基準値を超える重金属が検出された。処理後は 13 種類の試料の内，4 種類が浄化処理後においても基準値を超えていたことから，浄化剤の混合量の最適化の検討が必要であることが分かった。また，重金属の濃度が浄化剤添加量に応じて減少していることを確認した。今後は，浄化剤と土壌の最適混合比を模索していきたい。
（キーワード：土壌汚染，浄化剤，固化剤，土壌浄化処理）

Study on materials for in situ purification and solidification of soils contaminated with heavy metals

Ryo SHOJI*，Hikari MIYAMURA*，
Minoru TAGAMI**，Kouichiro KUMASHIRO**

Soil stabilization technology which in-situ purifies and solidifies soils contaminated with harmful substances has been desired. The objective materials of this study is to demonstrate the possibility for in-situ stabilization of contaminated soils by using soil purification and solidification. The purification performance for lead, arsenic and hexavalent chromium eluted from contaminated soils was evaluated with and without the addition of purified and solidified materials. The purification agent alone was not effective for arsenic and hexavalent chromium pollution, but was effective for lead pollution. With only the solidifying material, lead was insolubilized. For arsenic and hexavalent chromium, the amount of elution decreased when was added. Lead, arsenic, and hexavalent chromium were insolubilized when a cleaning agent and a solidifying material were used in combination.
(Keywords: lead, arsenic, hexavalent chromium, in situ treatment, contaminated soil)

1.　背景

従来の汚染土壌の処理には掘削除去やオンサイト措置，原位置安定化技術の適用などが挙げられる [1)]。掘削除去の場合，汚染土壌を廃棄物最終処分場に搬出するのが一般的であるが，これは単なる汚染の移動にすぎず，本質的な解決にならないばかりか，処分場の不足といった問題も指摘されてきた。対して，原位置措置は掘削除去より経済性が高く，環境負荷が低いという利点がある。しかし汚染土壌対策の技術として認知されるためには，不溶化の機構と，その安定性に対して一層の理解が必要である [2)]。

本研究では，原位置での汚染土壌処理技術としての可能性を実証実験により示していくことを最終的な目的とし，浄化剤と固化剤添加により鉛及びヒ素，六価クロムによる汚染土壌を不溶化した場合の浄化性能を評価した。

2.　研究方法

2.1　模擬鉛汚染土の調製

真砂土 50 g に 1000 mg/L 鉛標準溶液（和光純薬）40 mL を添加して混合し，蒸発乾固させた。これを模擬鉛汚染土とした。模擬鉛汚染土の濃度は 7.99 × 10^2 mg/kg で，pH は 4.04（23.8 ℃）

＊物質工学科　＊＊日立建設株式会社

だった。

2.2　模擬ヒ素汚染土の調製

模擬ヒ素汚染土は次の 2 つを調製した。

真砂土 30 g に 1000 mg/L ヒ素標準溶液 24 mL を添加して混合し，蒸発乾固させた。これを模擬ヒ素汚染土①とした。模擬ヒ素汚染土①の濃度は 7.98 × 10^2 mg/kg で，pH は 6.39 (22.2 ℃) だった.

真砂土 60 g に 1000 mg/L ヒ素標準溶液 50 mL を添加して混合し，蒸発乾固させた。これを模擬ヒ素汚染土②とした。模擬ヒ素汚染土②の濃度は 8.00 × 10^2 mg/kg で，pH は 5.74 (23.5 ℃) だった。

2.3　模擬六価クロム汚染土の調製

重クロム酸カリウム 0.0258 g を蒸留水に溶かし，50 mL メスフラスコに入れ，蒸留水を加えてメスアップした。これを重クロム酸カリウム水溶液とした。重クロム酸カリウム水溶液の濃度は 516 mg/L だった。

真砂土 50 g に重クロム酸カリウム水溶液 25 mL を添加して混合し，蒸発乾固させた。これを模擬六価クロム汚染土とした。模擬六価クロム汚染土の濃度は 2.58 × 10^2 mg/kg だった。

2.4　浄化剤・固化材の混合

浄化剤には浸透性水と，活性炭やゼオライト粉末，シリサイド粉末などが含まれており，汚染土壌中の汚染物質である重金属を吸着し,浄化する。

固化材はポルトランドセメントを主成分とし，石灰などを含む。固化材を重金属類の汚染土壌に添加すると，土壌の pH 増加により難溶性の水酸化物が沈殿し，ポゾラン反応とセメンテーション効果により移動性が低下する [3]。また，セメントはケイ酸カルシウム水和物を形成し，重金属を吸収してカプセル化・吸収することで汚染の濃度を低減させることができる [4]。

50 mL 遠沈管に模擬鉛汚染土または模擬ヒ素汚染土，模擬六価クロム汚染土 2.5 g を入れ，重金属用浄化剤を最終濃度で 0，1，2，10 %になるように添加，混合した。更に固化材を 50，100，150 kg/m^3となるように試料を調製した。固化材を加えなかったサンプルを固化材 0 kg/m^3とした。固化材を加えたサンプルはガラス棒を用いて 1 分間手動でかく拌し，1 週間室温静置した。

2.4　土壌溶出試験

溶出試験は土壌環境基準で規定されている環告 46 号に準拠して行った。各試料に蒸留水 25 mL を加えた。振とう機で 200 rpm で 6 時間水平振とうした。20 分間常温静置した。遠心分離機で 3000 rpm で 20 分間遠心分離した。上澄み液 10 mL を 0.45 μm メンブランフィルターでろ過を行い，ろ液をサンプル瓶に採取した。0.1 mol/L 硝酸 2.5 mL を加え，混合した。ICP-AES(PS7800, HITACHI) にて鉛またはヒ素,クロムの定量を 3 回ずつ行い，その平均値を実験値とした。

3.　結果

3.1　固化材添加による効果

図 1 に固化材添加量に対する鉛・ヒ素・クロムの溶出濃度を示す。固化材を添加すると鉛が溶出しなくなり，土壌溶出基準値を下回った。これより，固化材の鉛不溶化効果が極めて大きいことがわかった。また，固化材添加によって鉛の土壌溶出基準値 0.01 mg/L を下回ったため，固化材のみで十分に鉛は浄化された。

固化材添加によってヒ素溶出濃度が抑制された。これより，固化材の不溶化作用が極めて大きいことがわかった。しかし，いずれの結果もヒ素の土壌溶出基準値 0.01 mg/L を上回ったため，固化材のみでは十分なヒ素浄化ができなかった。

固化材を 50 kg/m^3，重量比で 4 %ほど添加するとクロム溶出濃度が増加した。六価クロムは塩基性が高いほど水溶液中でアニオンとして存在することから，固化材添加による pH 上昇によって六価クロムが溶出しやすくなり，その結果，クロムの溶出濃度が増加したと考えられる。対して，固化材を 100 kg/m^3 (7 %)，150 kg/m^3 (15 %) 添加した場合は溶出濃度が減少した。これは，固化材添加量が増えたことで固化材の不溶化効果が増大し，クロムが溶出しにくくなったためと考えられる。また，いずれの結果も六価クロムの土壌溶出基準値 0.05 mg/L を上回ったため，固化材のみでは十分な六価クロム浄化ができなかった。

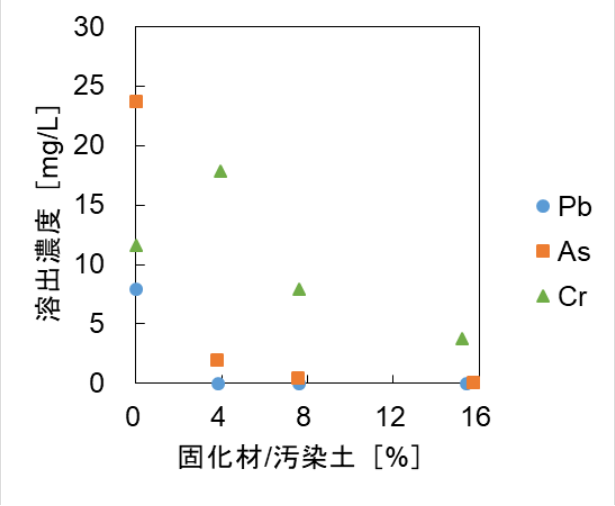


図 1 固化材添加量に対する
鉛・ヒ素・クロムの溶出濃度変化

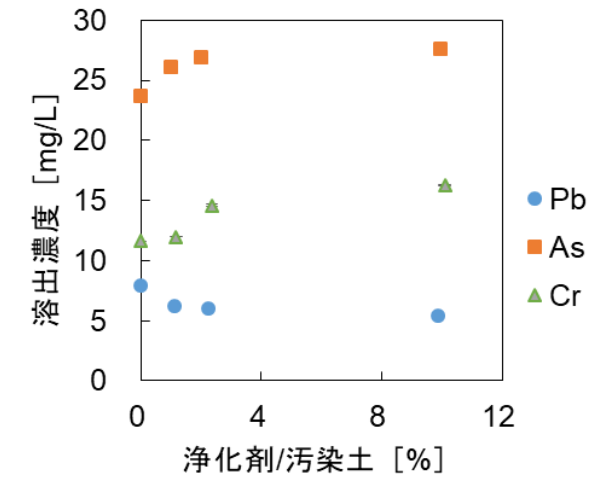


図 2 浄化剤添加量に対する
鉛・ヒ素・クロムの溶出濃度の変化

3.2 浄化剤添加による効果

図 2 に浄化剤添加量に対する鉛・ヒ素・クロムの溶出濃度変化を示す。鉛では，固化材無添加において浄化剤添加量に応じて溶出濃度が減少した。これより，浄化剤の鉛の吸着作用が確かめられた。しかし，いずれの結果も鉛の土壌溶出基準値 0.01 mg/L を上回ったため，浄化剤のみでは十分な鉛浄化ができなかった。

ヒ素及びクロムでは浄化剤の添加量に応じて溶出濃度が増加した。浄化剤添加によってヒ素及びクロムの溶出量が増加する原因を以下に考察する。浄化剤は，それに含まれるゼオライト粉末のアニオンサイトにカチオンである重金属が取り込まれることで価数 0 の安定かつ無害な物質へと浄化する。通常，ゼオライト粉末のアニオンサイトは K^+，Na^+などのカチオンが覆っているため電気的中性である。そこにアニオンであるヒ酸イオンや六価クロムが接近すると K^+, Na^+などのカチオンがこれらのアニオンに引き寄せられる。土粒子に吸着していたヒ素や六価クロムが K^+, Na^+などのカチオンに引き寄せられて土粒子から離れ，結果としてヒ素及びクロムの溶出量が増加したものと考えられる。よって，ヒ素及び六価クロムによる汚染土壌に浄化剤のみを施用すると逆に溶出が促進されることがわかった。

3.3 浄化剤・固化材併用による効果

固化材添加による鉛の浄化作用が極めて大きいため，浄化剤・固化材同時混合の必要性は認められない。

ヒ素溶出濃度を土壌溶出基準値 0.01 mg/L で規格化し，常用対数に変換した値を縦軸に，固化材の添加量を横軸にとり，浄化剤・固化材の添加量に対するヒ素溶出濃度変化を図 3 に示す。固化材を併用することで，浄化剤の添加量に応じたヒ素の溶出濃度の低減が確認できた。よって，浄化剤・固化材の併用によって浄化剤のヒ素浄化作用が機能するという相乗効果があることがわかった。理由は以下の 2 つが考えられる。1 つ目は，固化材を添加したことで土壌の pH が塩基性になり，ゼオライトのイオン交換反応が抑制されたため，他に浄化剤に含まれる活性炭などによってヒ素が浄化されたことである。2 つ目は，土粒子と結合したカルシウムイオンがヒ酸イオンと反応し，難溶性の塩を形成したことであり，その結果は常松らの研究[5]と一致する。また，固化材 150 kg/m^3 と浄化剤 1，2，10 %を混合した場合のみ，ヒ素の溶出濃度は基準値を下回った。よって，固化材と浄化剤を併用することでヒ素は十分に浄化された。

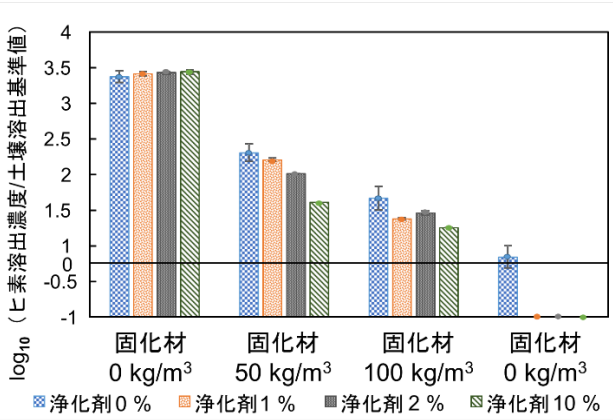


図 3 浄化剤・固化材添加による
ヒ素溶出濃度の変化と相違

浄化剤・固化材の添加量に対するクロム溶出濃度変化を図 4 に示す。固化材 50 kg/m³を添加した場合では，浄化剤添加量に応じてクロム溶出濃度が減少した。固化材を 100 kg/m³，150 kg/m³添加した場合では，浄化剤の併用によるクロム溶出濃度変化は見られなかった。よって，固化材 50 kg/m³を施用すると浄化剤の期待するクロム浄化効果が機能する相乗効果があった。固化材を添加したことで土壌の pH が塩基性になり，ゼオライトのイオン交換反応が抑制されたため，他に浄化剤に含まれる活性炭などによって六価クロムが浄化されたと考えられる。対して，固化材を 100 kg/m³，150 kg/m³施用した場合では，浄化剤のクロム浄化効果は現れなかった。これは，固化材の不溶化作用が大きいために浄化剤の効果を識別できなかったと考えられる。また，いずれの結果も六価クロムの土壌溶出基準値 0.05 mg/L を上回った。以上より，六価クロムの溶出濃度が基準値を下回るには，固化材を 150 kg/m³より多く添加する必要があると考えられる。

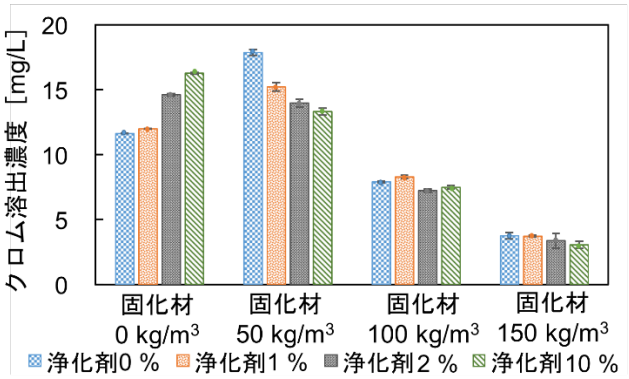


図 4 浄化剤・固化材添加による
クロム溶出濃度の変化と相違

3.4 吸着等温線

図 5 に固化材 0 kg/m³での浄化剤添加量に対する鉛溶出濃度，固化材 50 kg/m³での浄化剤添加量に対するヒ素溶出濃度，固化材 50 kg/m³での浄化剤添加量に対するクロム溶出濃度を吸着等温式に適用して得られた吸着等温線を示す。

吸着等温式は溶液中の溶質が固体に吸着される際の濃度と吸着量の相関関係を表した式である。ラングミュア型吸着等温式は単分子層吸着モデルの理論式である。ここで，浄化剤添加量を C [%]，鉛の吸着量を θ [−]，実験により決まる定数を a [−]，b [mg/kg] とする。ラングミュア型吸着等温式は，

$$\theta = \frac{abC}{1+aC} \quad (1)$$

と表せる。図 5 の鉛・ヒ素・クロムにおける a，b と相関係数 R^2 を表 1 にまとめた。

図 5 より，最大吸着量は鉛がおよそ 13 mg/kg，ヒ素がおよそ 7.5 mg/kg，六価クロムがおよそ 2.0 mg/kg と考えられる。

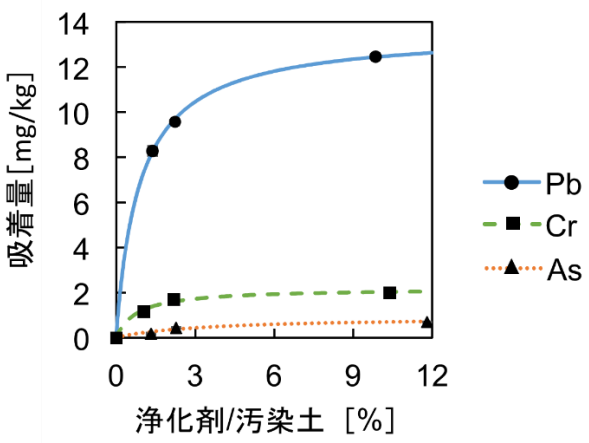


図 5 固化材 0 kg/m³での浄化剤添加量に対する鉛溶出濃度，固化材 50 kg/m³での浄化剤添加量に対するヒ素溶出濃度，固化材 50 kg/m³での浄化剤添加量に対するクロム溶出濃度を回帰して得られた吸着等温線

表 1 図 5 でラングミュア型吸着等温式に用いられた定数 a，b の値と相関係数 R^2

	Pb	As	Cr
a [-]	1.12	0.291	1.25

b	[mg/kg]	13.6	0.923	2.19
	R^2	0.999	0.961	0.992

4. 結論

鉛汚染土壌の場合，固化材無添加では，浄化剤添加量に応じて鉛を吸着する作用がある。ただし，固化材の不溶化作用が極めて大きいため，浄化剤の有無によらず固化材添加によって鉛は溶出しなくなった。

ヒ素汚染土壌の場合，固化材無添加では，期待する浄化剤の効果とは逆に，浄化剤添加量に応じてヒ素溶出量が増加した。対して，固化材を併用すると,浄化剤の本来の効果が発揮された。また，鉛汚染土と同様に，固化材の不溶化作用が大きいため，固化材添加によってヒ素溶出量が大幅に減少した。しかしながら，ヒ素汚染を十分に浄化するためには，浄化剤・固化材の同時混合が必要である。

六価クロム汚染土壌の場合,固化材無添加では，期待する浄化剤の効果とは逆に，浄化剤添加量に応じてヒ素溶出量が増加した。固化材 50 mg/m^3 を添加する場合では，六価クロムは塩基性が高いほど水溶液中でアニオンとして存在することから，固化材添加による pH 上昇によって六価クロムが溶出しやすくなり，その結果，クロムの溶出濃度が増加した。対して,固化材を100 kg/m^3,150 kg/m^3 と添加量を増やすと，固化材の不溶化効果の増大によってクロムが溶出しにくくなった。固化材 50 mg/m^3 と浄化剤を併用すると浄化剤の本来の効果が発揮された。これは固化材添加による pH 増加のため，ゼオライトのイオン交換反応が抑制されたからと考えられる。しかし，固化材 100 kg/m^3, 150 kg/m^3 と浄化剤を併用した場合は,浄化剤の六価クロム浄化効果は見られなかった。また，浄化剤・固化材を添加したいずれの結果でも，十分な六価クロムの浄化には至らなかった。十分な六価クロム浄化のためには，固化材を 150 kg/m^3 より多く添加する必要がある。

参考文献

1) 橋本洋平ら：土壌汚染の原位置浄化対策の現状と今後，日本肥料科学雑誌，86(3)，p.246-251(2015)
2) 和田信一郎：重金属類の不溶化および水処理剤としての酸化マグネシウム，日本肥料科学会講演要旨集第，60，p.197(2014)
3) Beverley Hale, L. Evans, R. Lambert : Effects of cement or lime on Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Sb and Zn mobility in field-contaminated and aged soils, Journal of Hazardous Materials, 199-200 (15), p. 119-127 (2012)
4) Wentao Li, Pengpeng Ni, Yaolin Yi : Comparison of reactive magnesia, quick lime, and ordinary Portland cement for stabilization/solidification of heavy metal-contaminated soils, Science of The Total Environment, 671 (25), p. 741-753 (2019)
5) 常松哲ら：石膏粉添加による土壌中の自然由来ヒ素の不溶化とその機構，農業農村工学会論文集，80 (2)，p. 141-150 (2012)

（２０１９年１２月１１日　受理）

コラボレーション・コモンズ社会実装教育ラボの運用と活用

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*

今年度，地域に開かれた産学官連携の施設としてコラボレーション・コモンズが設置された。その施設内の 2 ブースを利用した多目的工作スペースを「はざまる工房」として運用と活用を行った。工房の設備整備やルールの制定などの立ち上げを行い，本校の教職員や学生が安全に利用できるように整備を行った。利用するための講習を受講した多くの教職員や学生がはざまる工房を活用し，ものづくりに対して興味や関心が強いことが改めて認識できた。まだ改善点などあり，今後の高専教育特に社会実装教育に対応していくのか，はざまる工房を発展させていくのか検討中であり，さらに考えていかなければいけない。
（キーワード：社会実装教育，コラボレーション・コモンズ，はざまる工房）

Practical use and Operation of Social Implementation Education Lab in the Collaboration-Commons

Takenori NITTA*, Gen-ichirou NAKAMURA*, Takumi MUKOUGAWA*, Yoshimi NAGAI*,
Tsukasa FURUYA*, Machiko NAGAYOSHI*,

In 2019, Collaboration Commons was established as an industry-academia-government collaboration facility open to the neighbour community. The multipurpose work shop using two booths in the facility was operated and named as "Hazamaru Kobo". Various kinds of equipments and tools of were implemented, the workshop and the rules were established. The faculties, technical staffs and students some made improvements so that they could use them safely. The workshop have been utilized by many technical staffs and students who have beforehand taken the course to use the workshop safety, it can therefore be said once again that strong interests in manufacturing are digged up from the KOSEN students. Although some points to be improved are still remained, can we are studying how to respond to the future KOSEN education especially to the “Social Implementation Education”. And also how to develop the workshop that can widely be unilized among the neighbour social.
(Keywords: Social Implementation Education, Collaboration-Commons, "Hazamaru Kobo")

1. 概要

本稿では，技術職員が管理運営する新規実習施設を，技術職員発のボトムアップ型で立ち上げた事例を，立ち上げ段階から実際に半年ほど運用した時点での総括・次期への反省とともに記録するものである。

当該実習施設『はざまる工房』は，技術職員並びに教員や学生が日頃より感じていた「低学年でも自由に使用できるものづくり施設が不足している」という問題を解決するものである。当校は工業高等専門学校であるので，学生は学年に関わらずものづくりに興味をもつ。また，当校の特徴であるくくり入試（1 年次では専門に分かれず，全学科の基礎的な実習を行う必修科目「ものづくり基礎工学」を受講）のため，学科を超えた分野のものづくりに興味をもつ土壌がある。このような背景があるが，当校に存在するものづくり施設は各学科が管理する 4 年次以上を主な利用者とする比較的高度な実習を可能とする施設であり，その利用も何らかのプロジェクトや研究といった形で教員の管理の元で使用できるという煩雑なものであった。そのため，学年・学科横断的に気軽に利用できる多目的工作スペースも必要との考えに至ったものである。

この多目的スペースは最終的に，東京高専のイメージキャラクターとして学生にも認知されている東京高専広報イメージキャラクター『はざまる』（図 1 参照）の名を借りて，【はざまる工房】と名

＊教育研究技術支援センター　＊Technology Solutions Center

付けた。

図 1 東京高専広報イメージキャラクター
『はざまる』

2. コラボレーション・コモンズ

はざまる工房の紹介の前に，はざまる工房があるコラボレーション･コモンズについて説明する。

2.1. コラボレーション・コモンズの概念

コラボレーション･コモンズ（以後, CC 棟）は，地域に開かれた産学官連携の施設として，2018 年度中に竣工するよう計画された。1 階には多人数，多目的に使えるラーニングエリアを配し，2 階にはレンタルラボ 4 ブースを配し企業と本校のコラボレーションを促進する，3 階には社会実装教育のためのラボ設備を 5 ブース配し，実践的技術者養成の充実を図る計画とした。各階の機能を最大限生かせるよう，全学的にヒアリングを行い，間取り設備について十分な検討を行い，予算に合わせ落とし込み現在に至っている。具体的には，当初，2,3 階の設計には高電圧大容量電源，大重量を想定したが，本校各所に配されている既存の高度設備を活かし，CC 棟は人の交わりを重視するという役割分担から，上記ラボ設備 1 ブースあたり 4~50 A 程度の大きめの容量を有する 100 V 電源を配した一般的なラボ構造をとした。

このような CC 棟が完成した後, 2018 年 12 月，3 階の社会実装教育のためのラボブースを 2 ブース利用した多目的工作スペースをつくる計画が持ち上がった。契機は，2019 年度から 4 年次の社会実装教育の開始をにらんだ次期であったためである。この授業は学内の人財, 設備を存分に利用し，学生の社会実装能力を高める内容となっている。CC 棟は企業をはじめとする学外の知見と学内の技術が交わる場であり，社会実装教育にはうってつけの環境である。そこで，この環境に，低学年の学生を中心に，高学年の学生，専攻科生までが集い，様々な分野のものづくりに利用できる多目的工作スペースがあると，社会実装教育の質がより向上すると考えた。また，本校では元来，早期専門教育による高度技術者の育成を目的としており，低学年から専門的な知識技術に触れることが重要視され，高度な加工・実験設備を設置している。しかし，低学年にも実験実習を多く配してはいるが，実際に高度設備を利用した積極的で自発的な本格的ものづくり，研究を行えるようになるのは高学年になってからである。そこで, CC 棟の多目的工作スペース（以後，工房）は，低学年においても，自発的に多くのものづくりに触れることが出来るように，ロボコンなどの課外活動や卒業研究，実験実習とは関係なく，学生自身の好奇心や興味関心に基づいたものづくりができるような施設を目指すこととした。

2.2. 立ち上げ

2.1.の概念を基に，当初，立ち上げメンバーとして教育研究技術支援センターより有志の中村技術職員，新田技術職員，向川技術職員の 3 名が立ち上げに向かった準備を開始した。

CC 棟建設予算，建物振興予算の決定前には，全国のファブリケーション施設に関するリサーチや，電気通信大学ピクトラボ [1]への見学など，既存の施設について調査研究を行っていた。これらファブスペースの運用には，予算，安全が大きな課題であることが分かると同時に，本校の特徴として高校 1 年~大学 4 年まで幅広い年齢層に対応する必要も明らかとなった。電気通信大の大学院生を中心に設計されたピクトラボは 24 時間利用可能であるが，利用申請や予算確保は利用者が企業等と交渉し準備，学部生は院生の指導のもと利用できるなど制限があった。これらの調査研究内容を参考にし，多目的工作スペースの設備や運用ルールを決めていった。なお，運用の仕組み策定の経緯は，次項に記載する。

まず, 建物振興予算において, CC 棟全体を対象としての設備整備が行われた。広範に利用できるよう什器類の選定購入や無線 LAN 環境の整備が行われ，2 階レンタルラボにおいては，入居者が施錠装置から内部プライバシー保護設備等を用意し，利用することを前提として，必要最低限の電源, 有線 LAN を設置している。社会実装関係が入る 3 階についても，ミーテイングや軽い作業を想定した電源，有線 LAN，机，椅子，ホワイトボード等の設置にとどめた。なお，互いのブース利用

者同士が積極的に交流することを目的として，各ブース仕切りはあえて 150 cm 程度の低い固定式パーティションや，可動ホワイトボードをパーティション代わりとする方法を採った。

その後，2018 年度内に完了するよう，工房の設備整備を行った。はざまる工房の理念には事務部からの理解も得られ，総務課の協力を得て，予算を,『はざまる工房』の整備に優先的に当てることが許された。

2.3. 社会実装教育ラボの設備整備

工房の入る CC 棟 3 階北側の社会実装教育のためのラボスペースは，天井にはラックとダクトレールを配して汎用性を高めているが，床はタイルカーペットであり，前述のように床面荷重，電源容量も通常のオフィス仕様であった（図 2 参照）。

図 2 設備整備前の工房内の様子

また，当初，細かな運用ルールは未定であったこと，低学年の利用しやすさを考慮し，重大事故につながるような重量のある回転工具系機器の導入は避けつつ，操作方法が簡便な機器，必要最低限の機器工具を取り揃えるようにした。給排水設備も，広さと予算の制約，当初の CC 棟の目的を鑑みて，オフィス給湯設備レベルとしたため，より高度な給排水を必須とする化学実験用設備は全て用意せず，ドライラボとした。

全国のファブスペースの機器類を調べた結果から，多くの施設に用意されている機器を参考に，工房に設置する設備は次に挙げるものとした。

- レーザー加工機（非金属加工用）
- 3D プリンタ（熱融解）
- ボール盤
- 糸のこ盤
- 電源装置
- オシロスコープ
- マルチメーター
- 基板加工機
- モデリングマシン（NC フライス）
  ※ 既存設備
- カッティングマシン
- ハンドドリル，ニブラ，トリマー，電動ヤスリ
- ハンマー，ノコギリ，カンナ等の手工具
- はんだごて，ニッパ等の電子工作用工具
- グルーガン

工房内に設備を設置した様子を図 3(a),(b)に示す。

(a) 機械加工エリア

(b) 電子工作エリア

図 3 設備設置後の工房内の様子

また,以下の設備を将来の拡充設置対象とした。

- コンピュータミシン
- 卓上旋盤
- リフロー装置
- UV プリンタ
- 金属板裁断機
- 金属板曲げ機
- 双頭グラインダ
- ジグソー，回転ノコギリ
- テーブルソー
- のこ盤

設置設備が決まり，利用者の安全や設備の保護を考慮，それまでの調査も踏まえ，工房の機器工具の使用にはライセンス制を採用し，指定時間内は，ライセンス保有者が，ルールの範囲で自由に使用できる施設となるよう，運用ルールを策定することとなった。

また，工房の名前も，工房の立ち上げメンバーらにより【はざまる工房】と命名された。

3.　『はざまる工房』運用ルールの策定

3.1.　運用ルールの概要

はざまる工房の運用ルールは，CC 棟全体の運用規則や，学内の他規則類との整合性を取る必要もあり，事務部とも繰り返し相談しながら，ブラッシュアップしていった。中村・新田・向川の 3 名が叩き台を作成した後，責任ある立場として降矢技術専門職員・永吉技術専門職員・長井技術専門職員も合流して，運用ルールをブラッシュアップする作業を行った。なお，今後この 6 名のチームで，はざまる工房の運営に至るまでを担っていく。

2019 年 1 月頃から運用ルールの叩き台を作成し，2 月下旬には原型ができ，完成は 6 月となった。長期間かかった理由は，はざまる工房の運用ルールを，CC 棟全体の運用規則の下位に配したためである。運用ルールは，学生の利便性を優先するため，高い頻度での改定が想定され，「遵守事項」として，はざまる工房を主管する総合教育支援センターのセンター長裁定とした。一方で，はざまる工房が配置された CC 棟には，社会実装教育の観点から学外の方の常駐も考えられ，その運用規則は，当然，丁寧な議論が必要である。したがって，CC 棟運用規則が完成した後に，整合性を取ってはざまる工房遵守事項を定めたため，時間を用した。

さて，はざまる工房遵守事項に定めた内容は，以下の点である。

- はざまる工房の位置づけ
  - ・主に学生の利用を想定した，安全確保
    - ├利用する設備
    - └利用する時間・環境（一人作業・保護具）
  - ・設備の維持・破損防止

3.2.　はざまる工房の位置づけ

はざまる工房の設立の趣旨を明確に記載する必要がある。

したがって，「学生が広く学年・学科横断的にものづくりができるワーキングスペースであること」，「設置設備は一般的なものであり，より高度な設備を必要とする場合には，各学科設置の実習施設の利用を推奨する」旨を明記した。

また，より広く利用してほしいため，東京高専の学生，教職員のほか，社会実装教育等で CC 棟を利用する学外者も利用可能とした。

3.3.　主に学生の利用を想定した安全確保

安全確保は，設備の面，利用環境や時間の面から行われるため，これらについても定めた。ここには，管理者に関する定めも含み，はざまる工房の施錠管理者・安全管理者それぞれを明記した。

3.3.1.　利用する設備

はざまる工房に設置した設備は，前項のとおりであるが，安全面からこれらを分類すると，おおよそ，一生回復不能な傷や欠損を身体に及ぼす恐れのあるものと，そうでないものに分類される。また，社会一般的な設備であり，義務教育課程で使用方法を学ぶ（技術家庭でののこぎりやハンマー，理科での電源装置など）ものと，そうでない物にも分類可能であった。これらの面から設置設備を下記のように A~J のカテゴリに分類し，利用ははざまる工房内に限定し，危険性が高いと考えられる E~J のカテゴリのものは，利用に際し立ち会う技術職員または教員（以下，安全管理者）の帯同を利用条件とした。

A : ハンマー，ノコギリ，カンナ等の手工具，電源装置，ニッパ等の電子工作用工具
B : ディジタルオシロスコープ, ディジタルマルチメータ
C : カッティングマシン
D : 3D プリンタ（熱融解）
E : はんだごて
F : グルーガン
G : 電動工具（電動ドリル，ニブラ，トリマー，電動ヤスリ，糸のこ盤，ボール盤）
H : 基板加工機
I : レーザー加工機（非金属加工用）
J : モデリングマシン（NC フライス）

3.3.2.　利用時間と環境

はざまる工房の利用環境や時間も考慮し，利用できる時間と万が一の事故発生時に対応できるよう，2 名以上での利用を義務付けた。

時間に関しては，利用可能な時間＝開室時間とさだめ，平日や休日など，様々な条件で利用できる時間帯を区切ることとした。本校構内の体育施設など，他の施設との整合性も鑑み，表 1 に示すような区分けのとした。

平日は 8:40~19:00，休業日（休日等授業のない

日）8:40~16:30 を開室時間とした。この内，平日 8:40~17:00（以後，第 1 部）の時間帯で，事故が発生した際，教職員に連絡をつけることが可能であるため，はざまる工房は開錠され，不在となる教職員が多くなる平日 17:00~19:00（以後，第 2 部）は施錠することで，物理的な入室制限により安全を確保した。第 2 部に利用したい際は，学生が教員に安全管理者として立ち会ってほしい旨を申し出て,はざまる工房の開錠を教員に行ってもらう。休日も第 2 部と同様である。

環境面では遵守事項への記載は少なく，運用上で対応することとした。まず，前述の通り，危険度の高いカテゴリ E~J の設備は，いずれの時間であっても安全管理者が必要である旨遵守事項に記載があるが，この担保のため，カテゴリ E~J の設備の電源関係のいずれかに施錠し，その鍵は安全管理者が解錠できる運用を想定した。また，作業着等の保護具もカテゴリ E~J では皮膚や粘膜を覆うように，カテゴリの特性に合わせて指定をおこない，違反者には安全管理者が指導する運用を想定した。

表 1 開室時間と使用可能設備

	平常授業日 第 1 部 8:40~17:00	平常授業日 第 2 部 17:00~19:00	休業日 8:40~16:30
開室	技術職員	教　員	教　員
カテゴリ A~D	いつでも 利用可	安全管理者 （教員）立 会いの下， 利用可	安全管理者 （教員）立 会いの下， 利用可
カテゴリ E~J	安全管理者 （技術職員 又は教員） 立会いの 下，利用可	安全管理者 （教員）立 会いの下， 利用可	安全管理者 （教員）立 会いの下， 利用可

なお，学生による安全管理者（教員）の確保に関しては，はざまる工房が用意したフォーマット「はざまる工房　開室および設備の利用開放申請書」を学生が用意し教員を通してはざまる工房の運営主体である技術職員に提出し承認を受ける（＝鍵の受け渡し）する形とした。はざまる工房をできる限り使用してほしい一方，計画性のない利用により教員に過度の負担がかからないための，苦肉の策である。

3.3.3.　設備維持と破損防止

設備の維持管理を行う者（以下，設備管理者）は，技術職員と定めた。

機器のカテゴリの分類には，通常利用で破損しやすいかそうでないか, の視点も考慮されており，危険度の高いカテゴリ E~J の機器は，通常の利用の範囲で破損しやすい面もある。これらは安全管理者が立ち会うことで，学生が破損の恐れがある使用法を行っていた場合注意することで破損防止を実現している。

また，万が一破損した場合，その原因を追求するため，部屋の利用に際してログノートの記載も義務付けた。これにより，同原因による破損を繰り返さないよう，運用等の変更の対処を行う事ができるようになる。

以上のような内容をもりこんだ『コラボレーション･コモンズ はざまる工房利用にかかる遵守事項』に従い，次項以降のように実際の運用を行っていった。

4.　はざまる工房利用者講習

4.1.　はざまる工房の利用講習の導入

はざまる工房の位置づけとして，3.2. でも述べたように，「学生が広く学年・学科横断的にものづくりができるワーキングスペースであること」と,「だれでもいつでも利用できる」というコンセプトのもと，設置された。しかし，だれでもいつでもといっても,「利用者の安全確保」が第一前提であり，この安全確保なしでは，運用も管理も，しいては利用などは以ての外である。そこで,「利用者の安全確保」を第一に考え,「はざまる工房利用者講習」を行い，この講習を受講した者のみの利用を可能とした。また，設備についても，使ってみたいけど初めて使用する機器で使い方があったり，使い方を間違ったら怪我や事故につながる機器であったり，万が一，故障や事故が起きたらなどの不安があるなどといったことが考えられたため，カテゴリに分けた機器の講習「機器類利用講習」の 2 種類の講習の導入を考えた。

4.2.　講習の周知

「はざまる工房利用者講習」と「機器類利用講習」の講習を周知するポスターを，本校センターボードと，担任や専攻科主任に，クラスルームへの掲示や，学生へのアナウンスを依頼し，学生への周知を行った。

また, はざまる工房ホームページの開設や, URL や QR コードの開示を行い，スマートフォンなどからのアクセスを可能とし，ホームページ上で，各講習などの情報が分かるようにした。

4.3.　はざまる工房の利用可能までの流れ

4.1.で述べたようにはざまる工房を, だれでもいつでも安全に利用してもらうため，各講習を導入し，利用希望者に対して実施した。

対象者は本校教職員，学生，また CC 棟に入居している企業からのはざまる工房の利用希望をしている者のことである。

しかし，今年度はざまる工房の運用が初年度ということもあり，情報管理などのセキュリティなどの観点から，CC 棟に入居している企業関係者の利用に関しては，まだまだ議論していく必要があり，今年度の利用を見送っている。

利用希望者は以下に示す流れで，各講習を受講することにより，はざまる工房の利用と工房内の工具・機器の利用が可能となる.

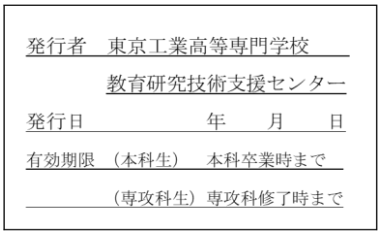
① 「はざまる工房利用者講習」を受講する。
② 「はざまる工房利用免許証（以下，利用免許証)」が発行される（図 4)。
③ 同時に「カテゴリ A」の機器類が利用可能となる。
④ 利用してみたい工具・機器類における各講習（カテゴリ A 以外のカテゴリ B~F のそれぞれの講習）を受講。
⑤ 利用免許証に受講したカテゴリ欄にシールと押印がされる。(図 4(a)参照)
⑥ 受講したカテゴリの工具・機器類が利用可能となる。

利用免許証は，配布時に「学生番号」,「氏名」,「発行日」を記入してもらい，はざまる工房の入室や，工具・機器類の利用時に本人確認の際，掲示させている。利用免許証の有効期限は本科生（1 年~5 年）は本科卒業時まで，専攻科生は専攻科修了時まで有効となっており，各自保管することとしている。

はざまる工房利用免許証
学籍番号
氏名
使用可能な工具・機器

A	B	C	D	E	F	G	H
I	J	K	L	M	N	O	P

(a) 表面


発行者　東京工業高等専門学校
教育研究技術支援センター
発行日　　年　月　日
有効期限　（本科生）　本科卒業時まで
（専攻科生）専攻科修了時まで

(b) 裏面

図 4 はざまる工房利用免許証

4.4.　はざまる工房利用者講習

まず，利用希望者対象に「はざまる工房利用者講習」を行った。

(1) 教職員対象

ある時間帯を設定し，その時間帯に集まり講習を行うことや，また複数の時間帯を設定し行うことは，教職員の業務への影響を考えると，かなり難しいことから，殆どの教職員が一堂に集まる会議”教育研究会”の時間を一部いただき，その時間にはざまる工房利用者講習を行った。また，その会議に欠席していた教職員は，別途講習を行い，受講してもらった。講習内容は, CC 棟の利用説明と併せて教育研究技術支援センター長より説明され，この説明をもってはざまる工房利用者講習を受講したとした。また，受講した教員は，安全管理者となる旨を説明し，学生からの依頼があることも併せて説明した。

(2) 学生対象

学生対象の「はざまる工房利用者講習」は，教職員対象の講習内容と, 多少異なり, 講習内容は,

- はざまる工房とはどのような場所か
- はざまる工房内にある工具・機器について
- 安全について
- 注意事項について
- 応急処置について
- はざまる工房の利用可能時間について
- 利用者講習後の流れについて

となっており，受講学生には，これらの内容を記載したテキストを配布し，講習を行った。

講習時間としては 45 分程度であり，安全第一で利用するためにはということを大きな柱とし，受講学生に講習を行った。本校在学中の学生対象であったため，開催回数は 1 日 45 分の講習を 2 回行い，それを複数日行った。また，4 年生は，カリキュラムの関係から，社会実装教育の講義の時間を使い，全 4 年生対象に講習を行った。

講習受講者は図 5 に示すように総勢 401 名（1 年；128 名，2 年 30 名 3 年；18 名，4 年 187 名，5 年 31 名，専攻科 7 名）と本校学生の約 4 割の学生が受講した。4 年生は授業内で行ったのでほとんどの学生が参加となったが，他の学年については，ポスターの掲示や，担任の先生からアナウンス，また 1 年生には技術職員が 5 学科共通授業内の担当学科において，試作品を見せたり，はざまる工房の利用についてなどの広報を行い，受講を促した結果，1 年生がかなり興味を持ち参加した結果となった。他の学年においては掲示やアナウンスのみであったため，1 年生の受講人数に比べ少ない人数となった。このことから，ポスター掲示など，間接的な広報ではイメージがわかなかったのか，効果が薄かったのに対して，技術職員が学生に直接口頭にて広報することで，はざまる工房の具体的なイメージを伝えることにより，学生の興味を引いたのではないかと考えられる。来年度も，ポスターの掲示，メールでの周知はもちろんのこと，新入学生に対し，直接的な広報を行っていく必要があると考えている。また，来年度以降において 4 年生は，今年度から始まった社会実装教育に備え全員を受講させたいと，担当教員から申し出があり，全員受講を必須とした。

また講習中の質疑応答では，ものづくりに興味がある学生などからの質問もあり，「はざまる工房」の利用に関心があると手ごたえのある感触をつかんだ。しかし，利用したいが利用者講習に日程上，参加できずに工房を利用できない学生がいる現状である。講習の日程を増やせば良いのでないかとも，議論したが，学生の時間割との兼ね合いや，我々の業務や，後で述べる機器類利用講習の日程調整との兼ね合いもあり，今後もこの問題についてどのように受講者を増やすのか，また興味を持ってもらうのか議論してく必要がある。

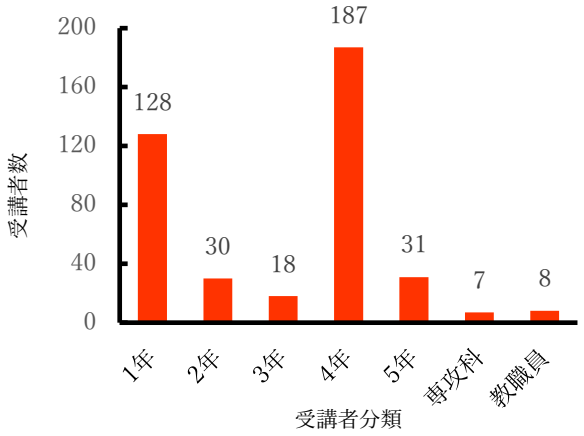


図 5 学年別受講者数

4.5. 機器類利用講習

はざまる工房利用者講習の受講者を対象に，はざまる工房内にある工具・機器類の使用には 4.3. で述べたように，使用したい工具・機器類の「機器類利用講習」をカテゴリ別に受講する必要がある（ただし，はざまる工房利用者講習受講者はカテゴリ A については利用可能となっている）。

また，カテゴリの工具・機器において，学科の実験で実習している学生や，本校実習工場ものづくり教育センターにある機器の講習を受講している学生については，学年，学科を考慮して，機器類利用講習の免除とし，はざまる工房内の対象工具・機器類を利用可能とした。この講習免除学生の一覧は表 2 に示す。この対象学生は，個別に技術職員に利用免許証の対象カテゴリ個所にシールと押印をしてもらいに行くように指示し，対応している。

表 2 機器類利用講習の免除対象学生

カテゴリ	対象学生の学年・学科
B	本科；電気工学科，電子工学科，情報工学科に所属する 4 年，5 年 専攻科；電気工学科，電子工学科，情報工学科を卒業した学生
D	モノづくり教育センターで 3D プリンタの講習を受講した学生
E・F	本科；電子工学科に所属する 4 年，5 年 専攻科；電子工学科を卒業した学生

4.5.1.　機器類利用講習受講までの流れ

機器類利用講習カテゴリ別に 1 回の講習に受講可能人数が決まっており，はざまる工房利用者講習と同様に，講習スケジュールを組み，校内に掲示した。受講希望希望者が受講が可能となるまでの流れは，次の通りである。

① はざまる工房の HP もしくは QR コードにアクセスするか，はざまる工房前に設置してある各機器類利用講習の「機器類利用講習申込書（以下，申込書)」を入手する。

② 必要事項を記入の上，教育研究技術支援センター内のポストに投函する。ただし，申込書の紛失や誤投函防止のため，教育研究技術支援センター内のポスト投函可能時間を決めている。

③ 講習受講応募期間が終了したら，各カテゴリの講習において先着順で受講者を決め，受講可能となった学生に連絡をする。ただし，誤記入や希望受講時間が複数のカテゴリで重複している申し込みは除外対象とした。

受講可能となり連絡を受けた学生は，講習日に受講に必要な持ち物を持参し参加となる。

教職員においては，学生とは別に，先着順とは関係なく，使用したい機器類の講習に応募し受講できることとした。

現在，各カテゴリにおける機器類利用者講習に対しての申し込み人数を表 3 に示す。

表 3 各カテゴリ別申込延べ人数

カテゴリ		人数
B	デジタルマルチメーター・オシロスコープ	38
C	カッティングマシン（後期～）	15
D	3Dプリンタ	103
E,F	はんだごて・グルーガン	45
G	電動工具	73
H	基板加工機（後期～）	5
I	レーザー加工機	111

前期は，はざまる工房をオープンしてから夏休み直前まで毎日機器類利用講習を行った。非常にタイトな日程で行う必要があったため，講習は学生がよく使うであろう 5 種類（B,D，EF,G,I）の機器類に絞り講習を行った。

後期は前期に行った講習に，C:カッティングマシン，H:基板加工機の講習を新たに追加して行った。また前期と違い，受講を済ませた学生が工房や機器類を使用するために施設を開放する時間も設けたため，機器類利用講習は週に 2~3 回のみ行った。

各講習によって定員，講習回数が違うため，単純な比較はできないが，D: 3 D プリンタ，I:レーザー加工機の受講希望者が多いことがわかった。これら 2 つの機器類は，学生の注目度が高いことから，優先的に講習を計画したいと考えている。

さらに，今後は長期休みの機器類利用講習も行う予定である。平日の講習スケジュール等の検討はもちろんの事，長期休みに行う機器類利用講習の申込人数を把握し，長期休みの期間における機器類利用者講習の需要有無についても検討する予定である。

4.5.2.　機器類利用講習の様子

(1) 技術職員機器類講習

はざまる工房内にある機器類などの保守などは，本校技術職員が行うこととなっており，技術職員の専門性に関わらず，機器類の使用方法などについて知っておく必要がある。そこで，教職員や学生への講習を行う前に，全技術職員向けに今現在設置されている機器類の講習を行った。その様子を図 6 に示す。説明は機器類利用講習を担当している技術職員が行い，受講している技術職員の中には初めて触れる機器や装置，以前使用したことがある機器もあるがメンテナンスなどは不安があるなどといった技術職員もいて，説明者や技術職員同士で質問や意見交換など活発に行われた。

図 6 技術職員向け機器類講習の様子

レーザー加工機の講習においては，メーカーの担当者を講師として呼び，講師とも活発な質問や意見交換をし，メーカー認定のマイスター資格を認定してもらった（人数の関係で 5 名認定)。

(2) 教職員・学生に対する機器類利用者講習の様子

教職員と受講可能となった学生は，対象カテゴ

リの講習において，技術職員と同様に初めて触れる機器や装置，以前使用したことがあるが，使用方法など不安な点がある受講者が大半であり，講習担当の技術職員の説明を熱心に聞いており，実際に講習内で実技として，図 7 に示しているように機器に触れながら講習を行い，そこで質問や意見など活発に行われた。

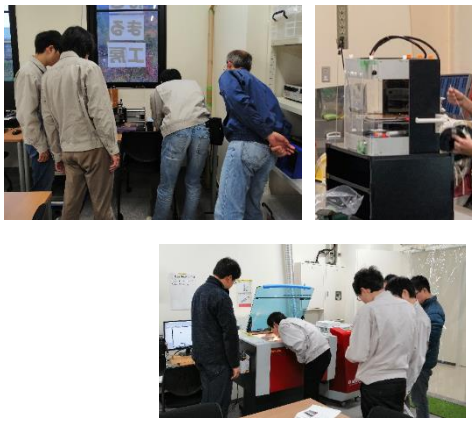


図 7 各機器類利用講習の様子

5. はざまる工房の利用状況

5.1. 教職員の利用状況について

後期の授業が始まって 1 週目は全く利用者がいなかったが，2 週目からは毎日利用があり，少しずつではあるが，工房の利用が増えつつある状態である。利用者は 4 年生が多く，今年度から始まった社会実装教育での試作などに工房を活用している。(図 8 参照)

はざまる工房が，社会実装教育の授業とどのように関わっていくか，何ができるのか，今後検討していきたいと思う。

また, 工房利用学生より, 下記の声も出ている。

- ものづくり教育センターと違い気軽に使用できるので，非常に利用しやすい。
- 予約せずに，やりたい日にすぐできるのでありがたい。

はざまる工房の利用開放を行ってから日が浅い状況ではあるが，工房設置のコンセプトに同調する学生の声を拾うことができたのは，順調な滑り出しと考えられる。

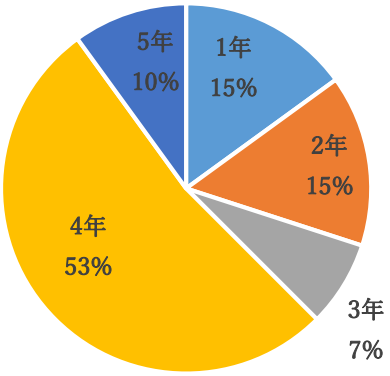


図 8 学年別利用状況

5.2. 公開講座として地域開放

本校学園祭期間中に，公開講座として次の 2 テーマを開講し，地域社会に対して限定開放を行った。

(1) 3D プリンタでミニジャックオーランタンを作ろう
(2) レーザー加工機でオリジナルキーホルダーを作ろう

これら，2 テーマは技術職員が主となり，学園祭期間中に実施した。テーマ内容としては，はざまる工房の中でも人気のある 3D プリンタとレーザー加工機を用いて公開講座を行った。

3D プリンタは, ハロウィンの季節にあわせジャックオーランタンを，レーザー加工機は，参加した子供たちが，自ら描いた絵をキーホルダーとして作製した。主な参加者は未就学児から中学生が多く，どちらもテーマも製作過程が目で直接見ることができるため，参加者たちは興味津々で加工過程を見ており，出来上がった作品を喜んで持ち帰って行く様子が伺えた。

開講期間中の参加者は，初日の天候不順での参加者の少なさがあるが，表 4 に示したように多くのお客様に参加していただき，盛大に行われたことは学外へのアピールとして，一つの成功例であったと考えられる。今後もこのように公開講座としての利用もしき，学内，学外に向けてもっとアピールをしていき活用していければと考えている。

表 4 各テーマ別参加延べ人数

テーマ No.	1 日目	2 日目	Total
(1)	49	48	97
(2)	181	297	478

6.　まとめ

本論では，今年度から運用開始した「はざまる工房」の立ち上げから実際の利用・運用について述べた。遵守事項を決め，その内容と照らし合わせながら，利用者講習やカテゴリ別の機器類利用講習の導入を行い，多くの教職員や学生に受講してもらえ，ものづくりに対しての興味が高いことが改めて認識できた。また，公開講座などで施設開放をすることにより，学校外へのアピールとして一つの成功例となった。

しかしながら，機器類利用講習の可能人数や回数，はざまる工房の利用方法など様々な要望や問題点もあり，今後どのように対応していくのか，はざまる工房を発展させていくのか検討中であり，さらに考えていかなければいけない。

参考文献

1) 田野俊一，橋山智訓：電気通信大学ピクトラボ:イノベーティブ人材育成のための高度 ICT 試作実験公開工房，工学教育（J. of JSEE），62（4），pp. 8-14，2014 年

（２０２０年１月１４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51号
令和元年度
令和2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　東京都八王子市椚田町1220-2
TEL (042) 668-5111