

ISSN 0385-6844

有明工業高等専門学校紀要

第 56 号

令和 3 年 2 月

Research Reports
of the
National Institute of Technology, Ariake College
No. 56
February 2021

Published by National Institute of Technology, Ariake College

Omuta, Japan

目 次

混合スピン系の平均場近似	村岡 良紀	1
低学年次における数学セミナーの試み	青影 一哉 田上 輝波 山崎 省吾	14
被削材の機械的特性と切削加工力の関係	石橋 大作 篠崎 烈 明石 剛二	19
機械実習における卓上ボール盤技術サポートシステムの導入	石橋 大作 堀田 孝之 池上 勝也	23
一穴あけ加工の技術向上に向けてー	篠崎 烈 明石 剛二	
タッチパネルディスプレイを活用した	吉富 貴司 中島 正寛 古賀 つかさ 青柳 洋平 池之上 正人	27
PLC 分野横断型教育教材の開発	原 慎真也 野口 卓朗 松野 哲也	
チャレンジの共有を図るライブ広報・寄付誘導手法の検討	柳原 聖 神戸 好美	33
有明高専創造工学科における2年生「課題研究Ⅰ」の取り組み	竹内 伯夫 (他 27 名)	37
日本人英語学習者に対する質問指導に関する考察	村端 啓介	41
ーポライトネスの観点からー		
有明高専における英語習熟度別授業(3年生)の分析と考察(1)	山崎 英司 Richard T. Grumbine 村端 啓介 村田 和穂	50
「自然」の声を聴け	村田 和穂	55
ー英米文学作品における“Nature”をめぐってー(2)		

混合スピン系の平均場近似

村岡良紀

<令和2年12月9日受理>

Mean field approximation of the mixed spin system

MURAOKA Yoshinori

In this paper, the mean field approximation is applied to two types of mixed spin models on the two-dimensional square lattice and the three-dimensional lattices. For mixed spin model of Ising and 3-state clockwise spin, a first order phase transition appears in both two and three dimensions. For mixed spin models of Ising and n -state clockwise spin($n \geq 4$), a second order phase transition appears in both two and three dimensions.

1. はじめに

近年の物質合成・物質設計の発展により、様々なスピン系が合成されており、複数の磁性イオンから構成されるスピン系には多種多様な磁気的性質を発現することも期待されている。マルチフェロイックと呼ばれる物質群の1つである磁気遷移金属酸化物 $\text{Lu}_2\text{MnCoO}_6$ においては、異方的なイジングスピンの振る舞いをする Co^{2+} イオンと等方的なハイゼンベルグスピンの振る舞いをする Mn^{4+} イオンから構成される混合スピン系である。磁性および強誘電性が共存するという特徴を持つマルチフェロイックは、物理的に非常に興味深い対象であるばかりでなく、その応用面からも広く研究されている [1-3]。これまでもイジング型またはハイゼンベルグ型スピン等のスピン対称性は同じであるが異なるスピン自由度（スピンの大きさ）を持つスピンから構成される混合スピン系の研究は、フェリ磁性・補償温度等の観点から多数なされてきている [4]。その一方で、2種類の異なる対称性を持つスピンから構成されるスピン系の研究は少ない。

本研究では、大きさは等しいが異なる対称性を持つスピンから構成されるスピン系に対して平均場近似を適用し、磁化・比熱などの物理量の温度依存性およびそれに伴う相転移を明らかにし、スピン対称性の混在がスピン系に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。本稿の構成は、2.において本研究で扱う2種類のモデルを紹介する。3.において、各モデルに対し平均場近似を適用し、解析の結果を示す。4.において、平均場近似により得られた非線形連立方程式を数値的に解くことにより、磁化・

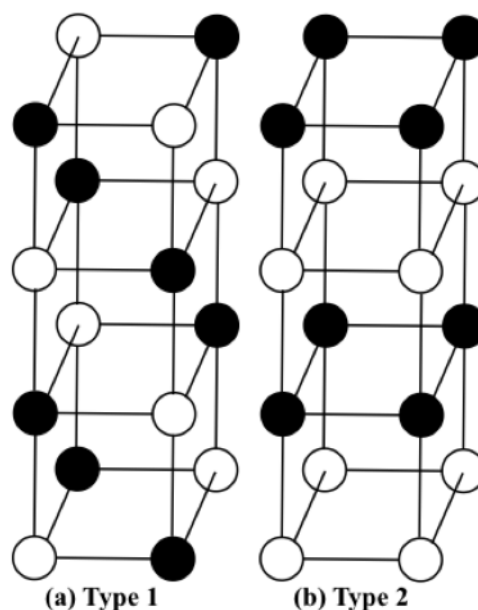


図1 本研究で扱う3次元立方格子上的2種類の副格子構造。以下では○および●をそれぞれ A 副格子（イジングスピン）および B 副格子（クロックスピン）と呼ぶことにする。

比熱などの物理量の温度依存性およびそれに伴う相転移を示し、考察を加える。最後に5.において、まとめおよび今後の展望について述べる。

2. 混合スピン系

本研究では、イジングスピンに対して対称性の異なる n 状態クロックスピン($n \geq 3$)を採用し、NaCl型配置および積層型配置を考える。図1および図2にそれぞれに3次元立方格子および2次元正方形

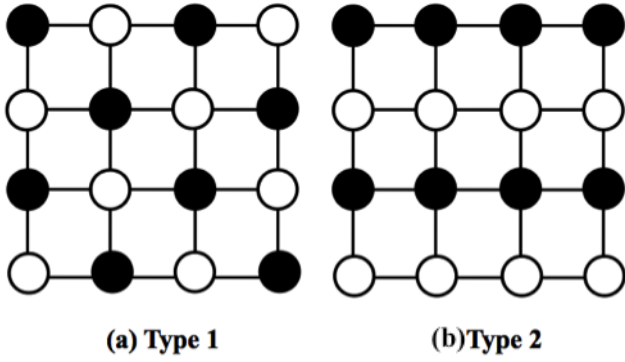


図2 本研究で扱う2次元正方格子上の2種類の副格子構造. 以下では○および●をそれぞれ A 副格子 (イジングスピン) および B 副格子 (クロックスピン) と呼ぶことにする.

子上での配置を示す. 以下, NaCl 型配置および積層型配置をそれぞれ Type1 格子および Type2 格子とよぶことにする. Type1 格子においては, 配位数 $z=4$ および $z=6$ がそれぞれ 2次元正方格子および 3次元立方格子上のモデルとなる. 一方, Type2 格子においては積層する層内の配位数 3, 4 および 6 に対してそれぞれ積層蜂の巣格子, 立方格子および積層三角格子が対応する. したがって, 積層する層内の配位数を z_0 と置き, $z_0=2$ の場合を 2次元正方格子と見做すことにより, z_0 を用いて積層型格子構造 (Type 2) を指定する. このとき, 層間の配位数は 2 であるので, Type2 格子における配位数は $z=z_0+2$ と書くことができる.

A 副格子にはイジングスピンを, B 副格子には n 状態クロックスピンを配置する. 最隣接スピン間相互作用のみを考慮するとき, Type 1 格子ではイジングスピン・クロックスピン間の相互作用のみ存在する. 一方, Type 2 格子ではイジングスピン・クロックスピン間の相互作用に加えて, イジングスピン間およびクロックスピン間の相互作用も存在する. A 副格子上的イジングスピン $\sigma_i = \pm 1$ によって表し, B 副格子上的 n 状態クロックスピンをイジングスピン $\sigma_i = +1$ の向きとのなす角

$$\theta_i = \frac{2\pi}{n} l \quad (l=0, 1, \dots, n-1), \quad (1)$$

によって表すことにし, $\theta_i = 0$ のときクロックスピンは $\sigma_i = +1$ と同じ向きを向いていると定義する. 以上のようにスピン変数を定義すると, 系のハミルトニアンは

$$\text{Type 1 : } H = -J \sum_{(i,j)} \sigma_i \cdot \cos \theta_j, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Type 2 : } H = & -J \sum_{(i,j)_A} \sigma_i \cdot \sigma_j - J \sum_{(i,j)_B} \cos(\theta_i - \theta_j) \\ & - J \sum_{(i,j)} \sigma_i \cdot \cos \theta_j, \end{aligned} \quad (3)$$

と書くことができる. ここで, (i, j) , $(i, j)_A$ および $(i, j)_B$ はそれぞれ, A 副格子・B 副格子間の最隣接スピンの和, A 副格子内の最隣接スピンの和および B 副格子内の最隣接スピンの和を表し, 相互作用は全て強磁性相互作用 ($J > 0$) とする.

3. 平均場近似

スピン変数を期待値および期待値からの揺らぎの和, すなわち

$$\begin{aligned} \sigma_i &= m + (\sigma_i - m), \\ \cos \theta_i &= M_z + (\cos \theta_i - M_z), \\ \sin \theta_i &= M_x + (\sin \theta_i - M_x), \end{aligned} \quad (4)$$

と表す. ここで, m , M_z および M_x は

$$\begin{aligned} m &= \langle \sigma_i \rangle, \\ M_z &= \langle \cos \theta_i \rangle, \\ M_x &= \langle \sin \theta_i \rangle, \end{aligned}$$

(5)

であり, イジングスピンおよび n 状態クロックスピンの期待値をあらわし, 系の対称性よりスピンの座標に依存しない.

平均場近似[5]は, スピン間相互作用に現れる積

$$\begin{aligned} \sigma_i \cdot \sigma_j &= \{m + (\sigma_i - m)\} \{m + (\sigma_j - m)\} \\ &= m^2 + m \cdot (\sigma_i - m) + m \cdot (\sigma_j - m) \\ &\quad + (\sigma_i - m)(\sigma_j - m) \end{aligned}$$

において微小量である揺らぎの 2 次の項を無視する. これにより,

$$\sigma_i \cdot \sigma_j \approx m(\sigma_i + \sigma_j) - m^2,$$

が得られる. 同様にして,

$$\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j \approx M_z (\cos \theta_i + \cos \theta_j) - M_z^2,$$

$$\sin \theta_i \cdot \sin \theta_j \approx M_x (\sin \theta_i + \sin \theta_j) - M_x^2,$$

$$\sigma_i \cdot \cos \theta_j \approx M_z \cdot \sigma_i + m \cdot \cos \theta_i - m \cdot M_z,$$

が得られる. 以上を系のハミルトニアンに代入することにより, 平均場近似を適用したハミルトニアン

Type 1

$$H_{MF} = -zJ \sum_{i \in A} M_z \cdot \sigma_i - zJ \sum_{i \in B} m \cdot \cos \theta_i + \frac{1}{2} zNJmM_z, \quad (6)$$

および

Type 2

$$H_{MF} = -z_0J \sum_{i \in A} m \cdot \sigma_i - z_0J \sum_{i \in B} (M_z \cdot \cos \theta_i + M_x \cdot \sin \theta_i) - 2J \sum_{i \in A} M_z \cdot \sigma_i - 2J \sum_{i \in B} m \cdot \cos \theta_i - \frac{1}{4} z_0NJ(m^2 + M_z^2 + M_x^2) - NJmM_z, \quad (7)$$

が得られる。ここで、 z および N はそれぞれ、配位数および系全体の格子点数を表している。ここで以下で用いる記号等をまとめておく。 $\beta = 1/k_B T$ および $\gamma = z\beta J$ とし、 T および k_B はそれぞれ、絶対温度およびボルツマン定数である。また、

$$\begin{cases} C(l) = \cos\left(\frac{2\pi}{n}l\right), \\ S(l) = \sin\left(\frac{2\pi}{n}l\right), \end{cases} \quad (l=0, 1, \dots, n-1) \quad (8)$$

と定義する。ここからは、Type 1 格子および Type 2 格子について個別に議論する。

3. 1 Type 1 格子

Type 1 格子における、内部エネルギー U 、分配関数 Z 、自由エネルギー F 、エントロピー S 、および比熱 C は以下のようなになる。

$$U = -\frac{1}{2} zNJmM_z, \quad (9)$$

$$Z = e^{\beta U} \{2 \cosh(\gamma M_z)\}^{N/2} \left[\sum_{l=0}^{n-1} \exp\{\gamma m C(l)\} \right]^{N/2} \quad (10)$$

$$-\beta F = \beta U + \frac{N}{2} \log \{2 \cosh(\gamma M_z)\} + \frac{N}{2} \log \left[\sum_{l=0}^{n-1} \exp\{\gamma m C(l)\} \right] \quad (11)$$

$$\frac{S}{k_B} = 2\beta U + \frac{N}{2} \log \{2 \cosh(\gamma M_z)\} + \frac{N}{2} \log \left[\sum_{l=0}^{n-1} \exp\{\gamma m C(l)\} \right] \quad (12)$$

$$\frac{C}{k_B} = -\frac{NzJ}{2k_B} \cdot \frac{\partial}{\partial T} (mM_z) = -\frac{N}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial (1/\gamma)} (mM_z). \quad (13)$$

磁化 m および M_z は、

$$m = \tanh(\gamma M_z), \quad (14)$$

$$M_z = \frac{\sum_{l=0}^{n-1} C(l) \cdot \exp\{\gamma m C(l)\}}{\sum_{l=0}^{n-1} \exp\{\gamma m C(l)\}}, \quad (15)$$

による、非線形連立方程式の解として与えられる。また、Type 1 格子における結果は、変数 $\gamma = z\beta J$ を用いることにより配位数 z に依存しない。したがって、平均場近似の枠内では Type 1 格子においては、正方格子および立方格子の区別は無く統一的に議論できる。

相転移点近傍における磁化 m および M_z の振る舞いについて議論する。 x を微小量すなわち $|x| < 1$ とするとき、

$$\tanh(x) \approx x - \frac{1}{3} x^3, \quad (16)$$

また、式(15)の右辺を

$$F(x) = \frac{\sum_{l=0}^{n-1} C(l) \cdot \exp\{C(l)x\}}{\sum_{l=0}^{n-1} \exp\{C(l)x\}}, \quad (17)$$

と定義することにより、式(15)の右辺を $F(\gamma m)$ とかき表す。このとき、

$$\begin{aligned} \sum_{l=0}^{n-1} C(l) &= 0, \\ \sum_{l=0}^{n-1} \{C(l)\}^2 &= \frac{n}{2}, \\ \sum_{l=0}^{n-1} \{C(l)\}^3 &= \begin{cases} 3/4 & (n=3) \\ 0 & (n \geq 4) \end{cases}, \\ \sum_{l=0}^{n-1} \{C(l)\}^4 &= \begin{cases} 2 & (n=4) \\ \frac{3}{8}n & (n \neq 4) \end{cases}, \end{aligned} \quad (18)$$

を用いて $F(x)$ を x^3 まで展開すると、

$$F(x) \approx \begin{cases} \frac{1}{2}x + \frac{1}{8}x^2 - \frac{1}{16}x^3 & (n=3) \\ \frac{1}{2}x - \frac{1}{24}x^3 & (n=4) \\ \frac{1}{2}x - \frac{1}{16}x^3 & (n \geq 5) \end{cases}, \quad (19)$$

を得る.

相転移点近傍においては、磁化 m および M_z が微小量であると仮定して良いので、式(16)および式(19)を用いて式(14)および式(15)の右辺を微小量について展開し、連立方程式を解くことにより、相転移点近傍における磁化 m および M_z の振る舞いが解析できる。クロックスピンの状態数 $n=3$, $n=4$ および $n \geq 5$ の順に議論する。

1) $n=3$

式(14)および式(15)より

$$\begin{cases} m = \gamma M_z - \frac{1}{3}(\gamma M_z)^3 \\ M_z = \frac{1}{2}\gamma m + \frac{1}{8}(\gamma m)^2 - \frac{1}{16}(\gamma m)^3 \end{cases}, \quad (20)$$

を得る。 M_z を消去し、 m^2 の項まで残した場合、式(20)第1式において1次の項 $m = \gamma M_z$ までしか考慮しないことになるため、 m^3 の項まで残すと、

$$m\{\gamma^4(2\gamma^2+3)m^2 - 6\gamma^3m + 24(2-\gamma^2)\} = 0, \quad (21)$$

を得る。 $m \neq 0$ である解は、

$$m = \frac{3\gamma^3 \pm \sqrt{9\gamma^6 - 24\gamma^4(2\gamma^2+3)(2-\gamma^2)}}{\gamma^4(2\gamma^2+3)}. \quad (22)$$

このとき、磁化 m の振る舞いとして2通り考えられる。

i) 複号の+を採用した場合

$$m_+ = \frac{3\gamma^3 + \sqrt{9\gamma^6 - 24\gamma^4(2\gamma^2+3)(2-\gamma^2)}}{\gamma^4(2\gamma^2+3)}. \quad (23)$$

$\gamma > 0$ より、右辺が実数である限り $m_+ > 0$ であることから、転移点 γ_c において磁化の飛びが現れることが期待される。すなわち、1次相転移が起こることが期待される。転移点 γ_c は式(23)の根号部分が実数であることより、

$$9\gamma^6 - 24\gamma^4(2\gamma^2+3)(2-\gamma^2) \geq 0$$

$\gamma > 0$ より、4次不等式

$$16\gamma^4 - 5\gamma^2 - 48 \geq 0$$

を得る。 $\gamma > 0$ である解は

$$\gamma \geq \sqrt{\frac{5 + \sqrt{3097}}{32}},$$

より

$$\frac{k_B T}{zJ} \leq 4\sqrt{\frac{2}{5 + \sqrt{3097}}}.$$

したがって、1次相転移温度

$$\frac{k_B T_c}{zJ} = 4\sqrt{\frac{2}{5 + \sqrt{3097}}} \approx 0.7263L, \quad (24)$$

を得る。

ii) 複号の-を採用した場合

$$m_- = \frac{3\gamma^3 - \sqrt{9\gamma^6 - 24\gamma^4(2\gamma^2+3)(2-\gamma^2)}}{\gamma^4(2\gamma^2+3)}. \quad (25)$$

このとき、系は転移温度以下において強磁性的秩序を示すため、 $m_- \geq 0$ となる条件

$$3\gamma^3 - \sqrt{9\gamma^6 - 24\gamma^4(2\gamma^2+3)(2-\gamma^2)} \geq 0,$$

より、 $0 < \gamma \leq \sqrt{2}$ 、すなわち

$$\frac{k_B T}{zJ} \geq \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad (26)$$

得る。これは低温領域において $m_- \geq 0$ が成り立たないことを示しており、ii)は物理的描像に当てはまらない。

i), ii) より、 $n=3$ の系においては、1次相転移が起こる。

2) $n=4$

式(14)および式(15)より

$$\begin{cases} m = \gamma M_z - \frac{1}{3}(\gamma M_z)^3 \\ M_z = \frac{1}{2}\gamma m - \frac{1}{24}(\gamma m)^3 \end{cases}, \quad (27)$$

を得る。 M_z を消去し、 m^3 の項まで残すと、

$$m\{\gamma^4(\gamma^2+1)m^2 - 12(\gamma^2-2)\} = 0, \quad (28)$$

を得る。 $m \geq 0$ である解は、

$$m = \sqrt{\frac{12(\gamma^2-2)}{\gamma^4(\gamma^2+1)}}. \quad (29)$$

2次相転移温度は、 $\gamma_c^2 = 2$, すなわち

$$\frac{k_B T_c}{zJ} = \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad (30)$$

を得る.

3) $n \geq 5$

式(14)および式(15)より

$$\begin{cases} m = \gamma M_z - \frac{1}{3}(\gamma M_z)^3 \\ M_z = \frac{1}{2}\gamma m - \frac{1}{16}(\gamma m)^3 \end{cases}, \quad (31)$$

を得る. 2)と同様の計算により $m \geq 0$ である解は,

$$m = 2\sqrt{\frac{6(\gamma^2 - 2)}{\gamma^4(3\gamma^2 + 2)}}. \quad (32)$$

2次相転移温度は, $\gamma_c^2 = 2$, すなわち

$$\frac{k_B T_c}{zJ} = \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad (33)$$

を得る.

2), 3) より $n \geq 4$ の場合, 2次相転移が起こり, 2次相転移温度は,

$$\frac{k_B T_c}{zJ} = \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad (34)$$

である.

3. 2 Type 2 格子

Type 2 格子における, 内部エネルギー U , 分配関数 Z , 自由エネルギー F , エントロピー S , および比熱 C は以下ようになる.

$$U = -\frac{1}{4} z_0 N J (m^2 + M_z^2 + M_x^2) - N J m M_z, \quad (35)$$

$$Z = e^{\beta U} \{2 \cosh(\beta h_A)\}^{N/2} \times \left[\sum_{l=0}^{n-1} \exp\{\beta h_{Bz} C(l) + \beta h_{Bx} S(l)\} \right]^{N/2}, \quad (36)$$

$$-\beta F = \beta U + \frac{N}{2} \log \{2 \cosh(\beta h_A)\} + \frac{N}{2} \log \left[\sum_{l=0}^{n-1} \exp\{\beta h_{Bz} C(l) + \beta h_{Bx} S(l)\} \right], \quad (37)$$

$$\frac{S}{k_B} = 2\beta U + \frac{N}{2} \log \{2 \cosh(\beta h_A)\} + \frac{N}{2} \log \left[\sum_{l=0}^{n-1} \exp\{\beta h_{Bz} C(l) + \beta h_{Bx} S(l)\} \right], \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \frac{C}{k_B} = & -\frac{1}{4} z_0 N J \frac{\partial}{\partial T} (m^2 + M_z^2 + M_x^2) \\ & - N J \frac{\partial}{\partial T} (m M_z). \end{aligned} \quad (39)$$

ここで,

$$\begin{aligned} h_A &= J(z_0 m + 2M_z), \\ h_{Bz} &= J(z_0 M_z + 2m), \\ h_{Bx} &= J z_0 M_x, \end{aligned} \quad (40)$$

である. 磁化 m , M_z および M_x は,

$$m = \tanh(\beta h_A), \quad (41)$$

$$M_z = \frac{\sum_{l=0}^{n-1} C(l) \cdot \exp\{\beta h_{Bz} C(l) + \beta h_{Bx} S(l)\}}{\sum_{l=0}^{n-1} \exp\{\beta h_{Bz} C(l) + \beta h_{Bx} S(l)\}}, \quad (42)$$

$$M_x = \frac{\sum_{l=0}^{n-1} S(l) \cdot \exp\{\beta h_{Bz} C(l) + \beta h_{Bx} S(l)\}}{\sum_{l=0}^{n-1} \exp\{\beta h_{Bz} C(l) + \beta h_{Bx} S(l)\}}, \quad (43)$$

による, 非線形連立方程式の解として与えられる.

相転移点近傍における磁化 m , M_z および M_x の振舞いについて議論する. 全ての相互作用が強磁性 ($J > 0$) の場合を考えているので, 秩序状態において磁化の期待値は, イジングスピン $\sigma_i = +1$ の向きの値をとると考えて良い. したがって, 全温度領域において $M_x = 0$ であることを仮定する. よって, 本来は式(41)~式(43)を用いて議論すべきところを, 式(41)および式(42)だけで議論できる.

一般に1変数関数 $G(x)$ のマクローリン展開が与えられているとき, a および b を定数とする2変数関数 $G(ax + by)$ のマクローリン展開は, $G(x)$ のマクローリン展開において変数 x を $ax + by$ で置き換えた式で書くことができる. したがって, 式(41)および式(42)の右辺の微少量への展開は, 式(16)および式(17)において変数 x を $h_A = J(z_0 m + 2M_z)$ および $h_{Bz} = J(z_0 M_z + 2m)$ で置き換えた式で書くことができる.

Type 1 格子の場合と同様に, 相転移点近傍においては, 磁化 m および M_z が微少量であると仮定し, 連立方程式を解くことにより, 相転移点近傍における磁化 m および M_z の振舞いが解析できる. クロックスピンオ状態数 $n = 3$, $n = 4$ および $n \geq 5$ の順に議論する.

1) $n = 3$

式(41)および式(42)より

$$\begin{cases} m = \alpha(z_0 m + 2M_z) - \frac{1}{3}\alpha^3(z_0 m + 2M_z)^3 \\ M_z = \frac{1}{2}\alpha(z_0 M_z + 2m) + \frac{1}{8}\alpha^2(z_0 M_z + 2m)^2, \\ \frac{1}{16}\alpha^3(z_0 M_z + 2m)^3 \end{cases} \quad (44)$$

を得る. ここで, $\alpha = \beta J$ である. 任意の z_0 に対する計算は非常に煩雑であり, 1 次相転移温度は 5 次方程式の解となり, 解析解を得られないので, 詳細は付録とし, $z_0 = 2$ の結果を以下に示す. $z_0 = 2$ とおくと,

$$\begin{cases} m = 2\alpha(m + M_z) - \frac{8}{3}\alpha^3(m + M_z)^3 \\ M_z = \alpha(M_z + m) + \frac{1}{2}\alpha^2(M_z + m)^2, \\ \frac{1}{2}\alpha^3(M_z + m)^3 \end{cases} \quad (45)$$

両辺それぞれの和をとり $X = m + M_z$ とおくと,

$$X \{19\alpha^3 X^2 - 3\alpha^2 X + 6(1 - 3\alpha)\} = 0,$$

$X = m + M_z > 0$ である解は,

$$X = \frac{3\alpha^2 \pm \sqrt{9\alpha^4 - 456\alpha^3(1 - 3\alpha)}}{38\alpha^3}, \quad (46)$$

このとき, 磁化 $X = m + M_z$ の振る舞いとして 2 通り考えられる.

i) 複号の+を採用した場合

$$X_+ = \frac{3\alpha^2 + \sqrt{9\alpha^4 - 456\alpha^3(1 - 3\alpha)}}{38\alpha^3}, \quad (47)$$

$\alpha > 0$ より, 右辺が実数である限り $X_+ > 0$ であることから, 転移点 α_c において磁化の飛びが現れることが期待される. すなわち, 1 次相転移が起こることが期待される. 転移点 α_c は

$$9\alpha^4 - 456\alpha^3(1 - 3\alpha) \geq 0,$$

より

$$\frac{k_B T}{J} \leq \frac{3 \cdot 153}{152}.$$

2 次元正方格子の配位数は $z = 4$ より 1 次相転移温度

$$\frac{k_B T_c}{zJ} = \frac{3}{4} \cdot \frac{153}{152}, \quad (48)$$

を得る. ここで, z は各格子点の配位数 $z = z_0 + 2$ である.

ii) 複号の-を採用した場合

$$X_- = \frac{3\alpha^2 - \sqrt{9\alpha^4 - 456\alpha^3(1 - 3\alpha)}}{38\alpha^3}, \quad (49)$$

このとき, Type 1 格子の場合と同様に

$$3\alpha^2 - \sqrt{9\alpha^4 - 456\alpha^3(1 - 3\alpha)} \geq 0,$$

より, $\alpha \leq 1/3$, すなわち

$$\frac{k_B T_c}{J} \geq 3, \quad (50)$$

得る. よって ii) は物理的描像に当てはまらない.

Type 1 格子と同様に, i), ii) より, $n = 3$ の系においては, 1 次相転移が起こると考えられる.

2) $n = 4$

式(41)および式(42)より

$$\begin{cases} m = \alpha(z_0 m + 2M_z) - \frac{1}{3}\alpha^3(z_0 m + 2M_z)^3 \\ M_z = \frac{1}{2}\alpha(z_0 M_z + 2m) - \frac{1}{24}\alpha^3(z_0 M_z + 2m)^3 \end{cases} \quad (51)$$

ここで,

$$\begin{cases} X = \frac{1}{z_0}(m + 2M_z) \\ Y = \frac{1}{2}(z_0 M_z + 2m) \end{cases}, \quad (52)$$

とおくと式(51)より,

$$\begin{cases} m = z_0 \alpha X - \frac{1}{3} z_0^3 \alpha^3 X^3 \\ M_z = \alpha Y - \frac{1}{3} \alpha^3 Y^3 \end{cases},$$

を得る. 式(52)へ代入すると,

$$\begin{cases} X = z_0 \alpha X - \frac{1}{3} z_0^3 \alpha^3 X^3 + \frac{2}{z_0} \left(\alpha Y - \frac{1}{3} \alpha^3 Y^3 \right) \\ Y = z_0 \alpha X - \frac{1}{3} z_0^3 \alpha^3 X^3 + \frac{z_0}{2} \left(\alpha Y - \frac{1}{3} \alpha^3 Y^3 \right) \end{cases},$$

が得られ, 両式より X を消去し

$$Y \left[2z_0^3 \alpha^3 (1 - 3\eta\alpha)^3 + 2z_0 \alpha^3 (1 - 3\eta\alpha) - z_0 \alpha^3 \right] Y^2 - 3 \{ 2z_0 \alpha (1 - 3\eta\alpha) + z_0 \alpha - 2 \} = 0.$$

ここで,

$$\eta = \frac{z_0^2 - 4}{6z_0},$$

とおいた. $Y \geq 0$ の解として

$$Y = \sqrt{\frac{3\{2z_0\alpha(1-3\eta\alpha)+z_0\alpha-2\}}{2z_0^3\alpha^3(1-3\eta\alpha)^3+2z_0\alpha^3(1-3\eta\alpha)-z_0\alpha^3}},$$

を得る. 2次相転移温度は,

$$2z_0\alpha(1-3\eta\alpha)+z_0\alpha-2=0$$

より

$$\frac{k_B T_c}{J} = \frac{1}{4} \left\{ 3z_0 + \sqrt{z_0^2 + 32} \right\} \quad (53)$$

を得る.

3) $n \geq 5$

式(41)および式(42)より

$$\begin{cases} m = \alpha(z_0 m + 2M_z) - \frac{1}{3} \alpha^3 (z_0 m + 2M_z)^3 \\ M_z = \frac{1}{2} \alpha(z_0 M_z + 2m) - \frac{1}{26} \alpha^3 (z_0 M_z + 2m)^3 \end{cases} \quad (54)$$

$n=4$ の場合と同様にして, 2次相転移温度

$$\frac{k_B T_c}{J} = \frac{1}{4} \left\{ 3z_0 + \sqrt{z_0^2 + 32} \right\} \quad (55)$$

を得る.

2), 3) より $n \geq 4$ の場合, 2次相転移が起こり, 配位数 z で規格化した2次相転移温度は,

$$\frac{k_B T_c}{zJ} = \frac{1}{4(z_0+2)} \left\{ 3z_0 + \sqrt{z_0^2 + 32} \right\} \quad (56)$$

となり, Type 2 格子では2次相転移温度は配位数 z に依存する.

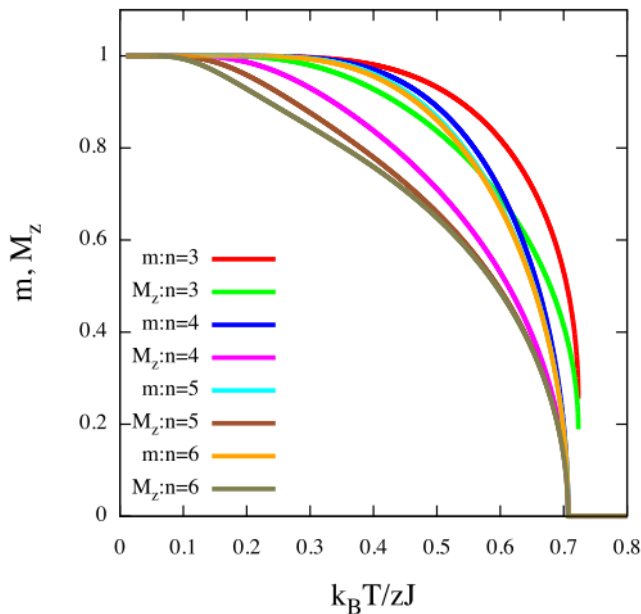


図3 状態数 $n=3, 4, 5$ および6 の磁化の温度依存性.

4. 数値解析

平均場近似で得られた非線形連立方程式を, ニュートン法を用いて数値的に解くことにより, 全温度領域における各種物理量の温度依存性を示す. なお, 数値計算の結果, 全温度領域において, $M_x = 0$ であったため, 以下では M_x の温度依存性は図示していない.

4. 1 Type 1 格子

図3にクロックスピン状態数 $n=3, 4, 5$ およ

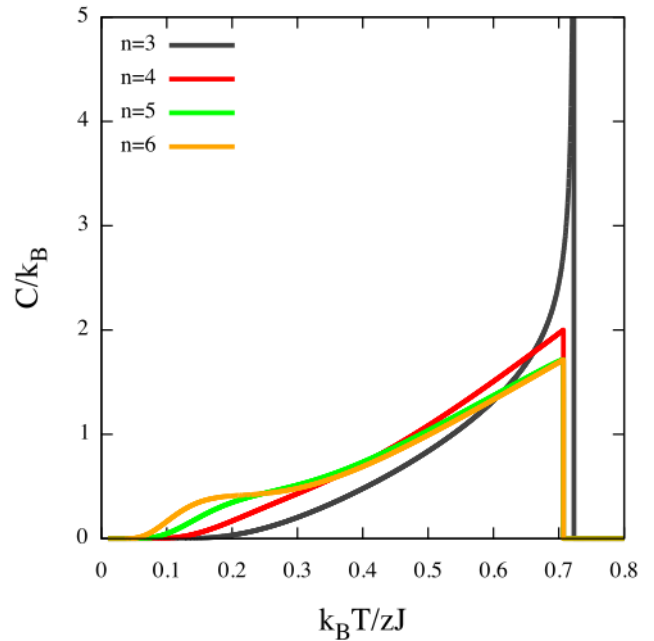


図4 状態数 $n=3, 4, 5$ および6 の比熱の温度依存性.

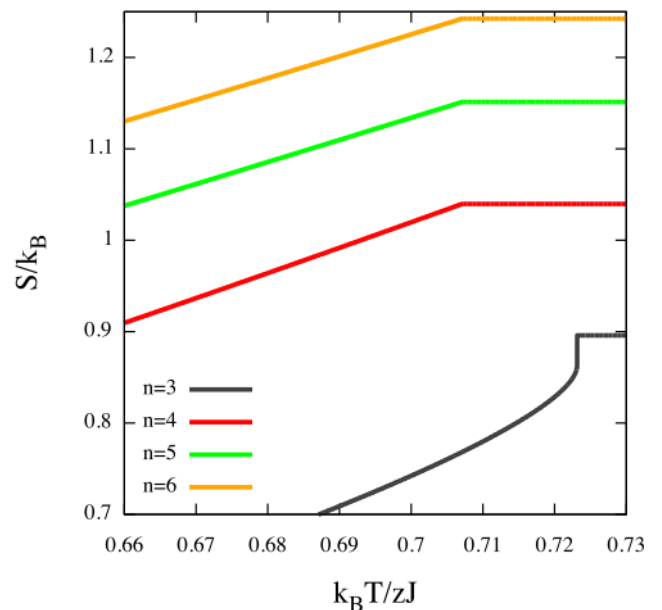


図5 状態数 $n=3, 4, 5$ および6 のエントロピーの温度依存性.

び6 状態の磁化の温度依存性を示す．状態数 $n=3$ の場合のみ磁化に飛びが見られ，1 次相転移であることを示している．

図4および図5にクロックスピン状態 $n=3, 4, 5$ および6 状態の比熱およびエントロピーの温度依存性を示す．磁化の振る舞いに対応して，図4に示されている比熱の温度依存性においては $n=3$ の場合のみ転移温度において1 次相転移を示す鋭いデルタ関数的ピークが現れている． $n=4, 5$ および

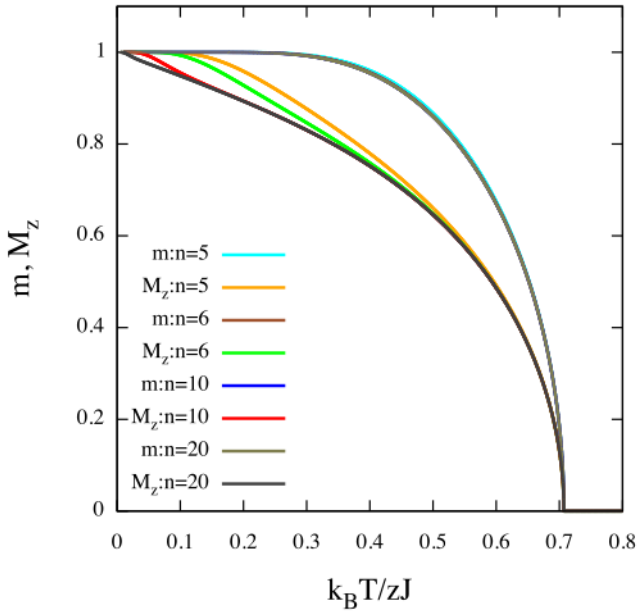


図6 状態数 $n=5, 6, 10$ および20の磁化の温度依存性．

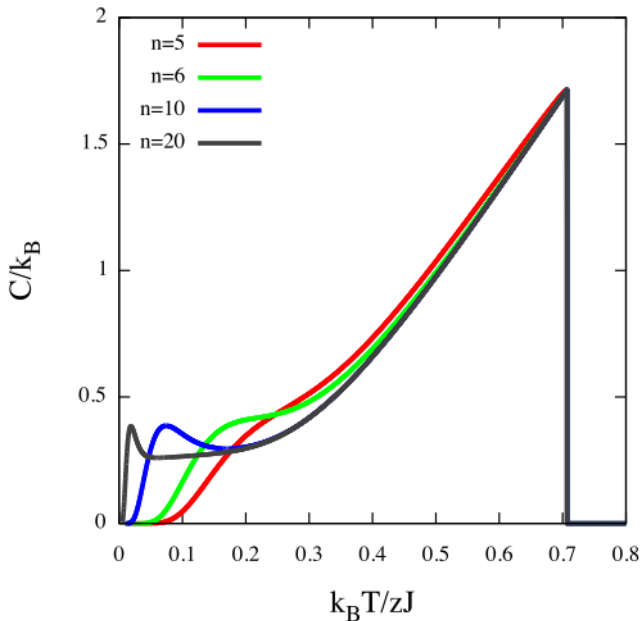


図7 状態数 $n=5, 6, 10$ および20の比熱の温度依存性．

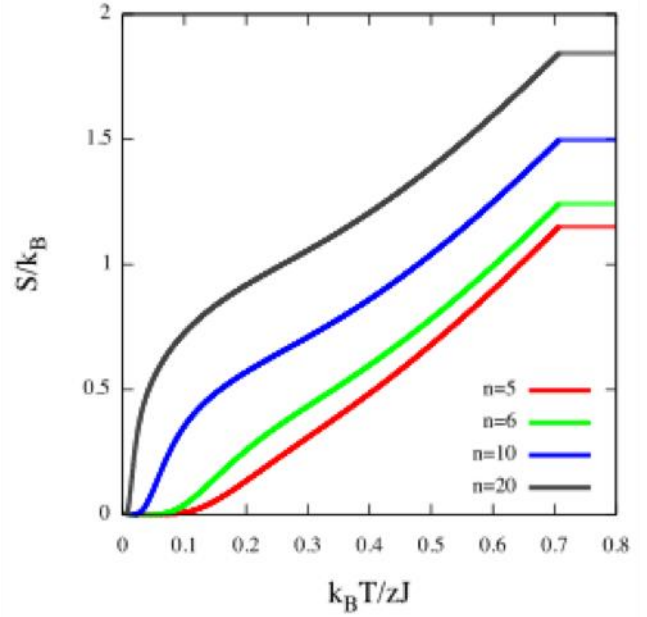


図8 状態数 $n=5, 6, 10$ および20のエントロピーの温度依存性．

6 の場合は，平均場近似において2 次相転移の典型的な比熱の振る舞いである，転移温度での有限値の飛びが現れている．図5に示されているエントロピーの温度依存性においては，図4の比熱の振る舞いに対応して， $n=3$ の場合には転移温度での有限値の飛びが現れ，不連続関数となっている． $n=4, 5$ および6 の場合は，転移温度において，左微分係数および右微分係数が異なる連続関数となっている．

図6にクロックスピン状態数 $n=5, 6, 10$ および20 状態の磁化の温度依存性を示す．イジングスピンの磁化の温度依存性はほとんど状態数に依存していない．一方，クロックスピンの磁化の温度依存性は，高温側においてはイジングスピンと同様にほとんど状態数に依存していないが，低温側においては状態数が大きいほどより低温側からイジングスピンの磁化曲線から離れ小さな値をとり始める．図7および図8にクロックスピン状態数 $n=5, 6, 10$ および20 状態の比熱およびエントロピーの温度依存性を示す．状態数の増加と共に，比熱の低温部分の膨らみがなだらかなピークとなり，さらに鋭いピークへと変換し，ピークの位置も状態数の増加と共に低温側にシフトしている．エントロピーの温度依存性も対応して，状態数の大きな系ほど低温部分で大きく増加している．以上の物理量の振る舞いは，状態数の増加と共に，励起状態が基底状態へと近付き，低温領域においてもクロックスピンの揺らぎが大きくなり易くなることから理解できる．その一方で，

状態数の増加は低温領域におけるイジングスピンの振る舞いにほとんど影響しないと考えられる。

4. 2 Type 2 格子

3. 2における解析的计算においては, 全ての相互作用が強磁性 ($J > 0$) の場合, 秩序状態において磁化の期待値は, イジングスピン $\sigma_i = +1$ の向きの値を

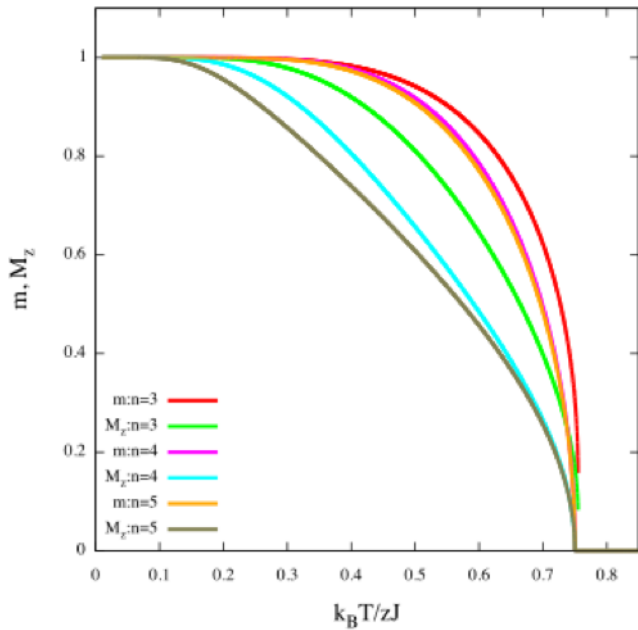


図9 $z_0 = 2$ の格子上的における, 状態数 $n = 3, 4$ および5 の磁化の温度依存性.

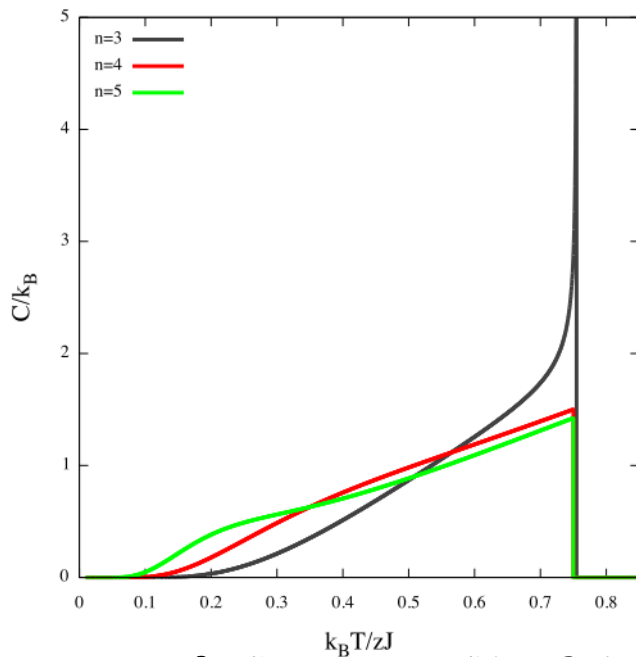


図10 $z_0 = 2$ の格子上的における, 状態数 $n = 3, 4$ および5 の比熱の温度依存性.

とると考えて良いため, 全温度領域において $M_x = 0$ であることを仮定して計算を進めた. しかしながら, 本章の数値計算においては, $M_x = 0$ であることを仮定せず, 式(41)～式(43)の非線形連立方程を, 直接数値計算し議論する.

図9に2次元正方格子 ($z_0 = 2$) 上における, クロックスピン状態数 $n = 3, 4$ および5 状態の磁化の温度依存性を示す. 前章の解析的結果で示したように

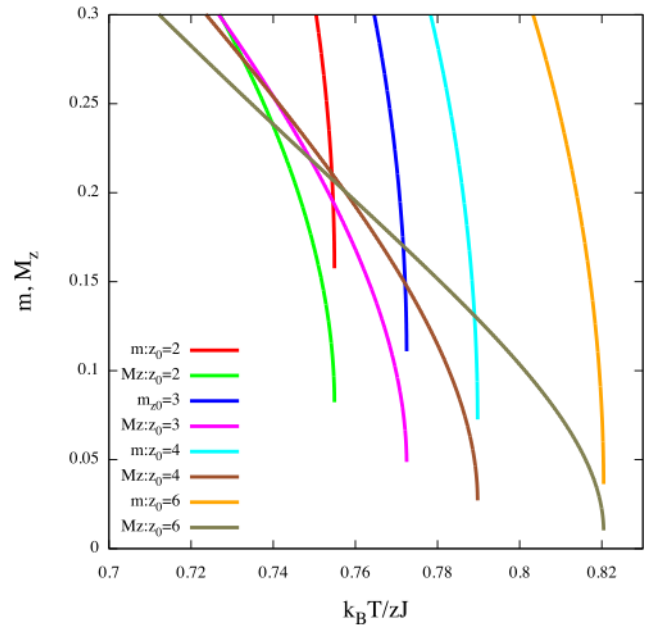


図11 状態数 $n = 3$ における, 副格子内配位数 $z_0 = 2, 3, 4$ および6 の格子上的における, 磁化の温度依存性.

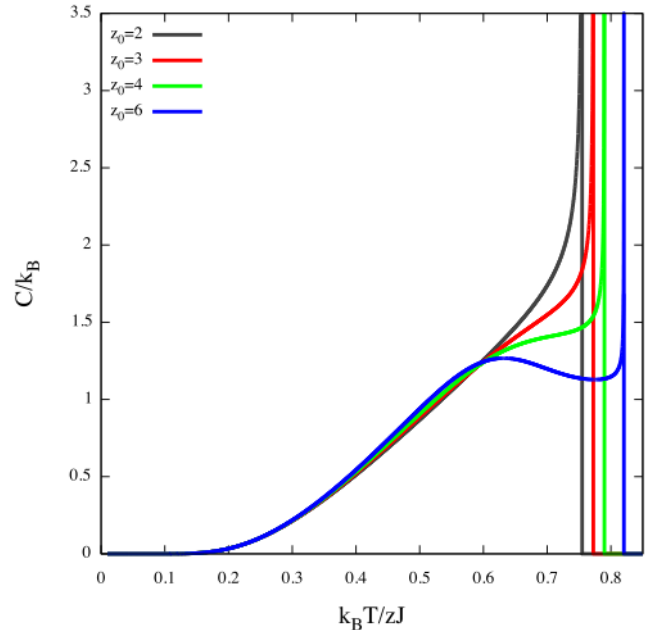


図12 状態数 $n = 3$ における, 副格子内配位数 $z_0 = 2, 3, 4$ および6 の格子上的における, 比熱の温度依存性.

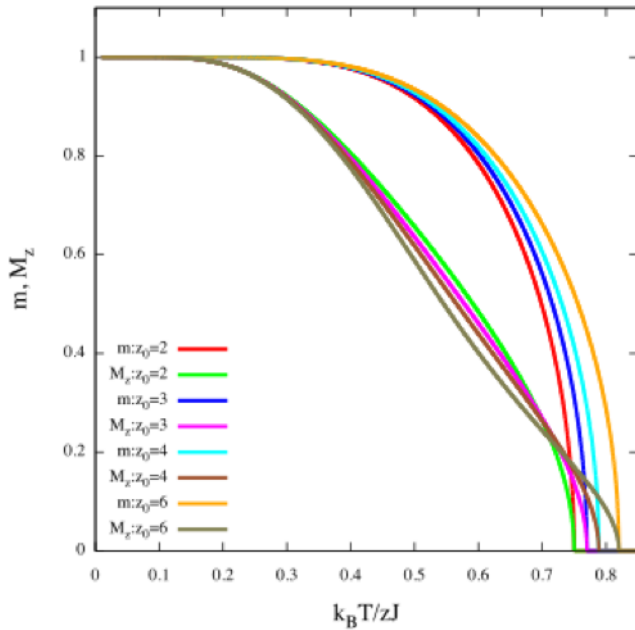


図 1.3 状態数 $n=4$ における，副格子内配位数 $z_0=2, 3, 4$ および 6 の格子上的における，磁化の温度依存性.

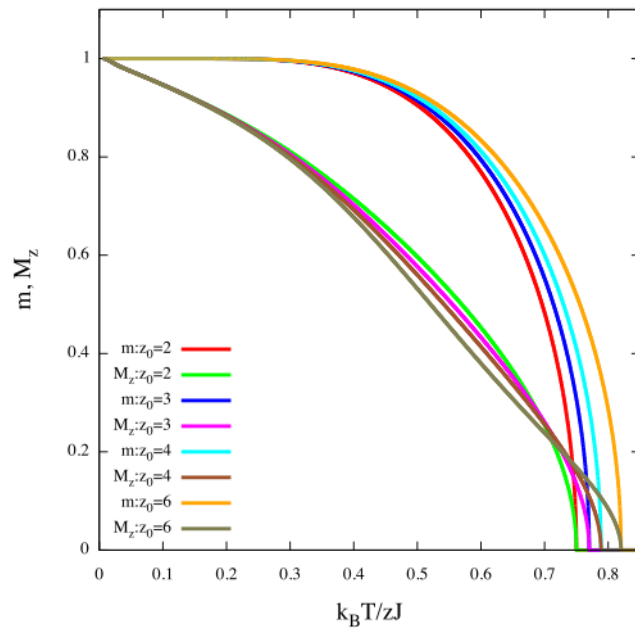


図 1.4 状態数 $n=20$ における，副格子内配位数 $z_0=2, 3, 4$ および 6 の格子上的における，磁化の温度依存性.

表 1 Type 2 格子における相転移温度 $k_B T_c / zJ$.

	$z_0 = 2$	$z_0 = 3$	$z_0 = 4$	$z_0 = 6$
$n = 3$	0.75490	0.77248	0.78976	0.82045
$n \geq 4$	0.75000	0.77016	0.78868	0.82020

状態数 $n=3$ 場合には 1 次相転移が起こり，状態数 $n \geq 4$ 場合には 2 次相転移が起こる．図 1.0 に 2 次元正方格子 ($z_0=2$) 上における，クロックスピン状態数 $n=3, 4$ および 5 状態の比熱の温度依存性を示す．磁化の振る舞いに対応して，図 1.0 に示されている比熱の温度依存性においては $n=3$ の場合のみ転移温度において 1 次相転移を示す鋭いデルタ関数的ピークが現れている． $n=4$ および 5 の場合は，平均場近似において 2 次相転移の典型的な比熱の振る舞いである，転移温度での有限値の飛びが現れている．また， $n=3$ の比熱には低温部分に膨らみが見られないが， $n=4$ および 5 の場合には低温部分に膨らみが見られる．

図 1.1 にクロックスピン状態数 $n=3$ における，副格子内配位数 $z_0=2, 3, 4$ および 6 の格子上的における，磁化の温度依存性を示す．全ての副格子内配位数に対して 1 次相転移を示し，転移温度は副格子内配位数と共に上昇している．一方，転移点における磁化の飛び幅は減少している．副格子内配位数の増加に伴う転移温度の上昇は，1 スピン当たりの相互作用するスピンの個数の増加が秩序化を助長すると解釈できる．一方，磁化の飛び幅は減少は相転移の次数が，2 次相転移へと移行しているとも考えることもできるが，秩序化の助長との関係は明らかではない．

図 1.2 にクロックスピン状態数 $n=3$ に対する，副格子内配位数 $z_0=2, 3, 4$ および 6 の格子上的における比熱の振る舞いに大きな差異は見られない．一方， $k_B T / zJ \geq 0.5$ の温度領域において，傾きが一旦緩やかになった後，1 次相転移の鋭いピークを持つ傾向にある．この傾向は z_0 の増大と共に顕著になる．特に，副格子内配位数 $z_0=6$ の格子においては，極大および極小を経て鋭いピークを示している．この傾向は図 1.1 の磁化の振る舞いと同様に，相転移の次数が 2 次相転移的に移行しているとも考えることもできる．

図 1.3 にクロックスピン状態数 $n=4$ に対する，副格子内配位数 $z_0=2, 3, 4$ および 6 の格子上的における，磁化の温度依存性を示す．相転移の次数は 2 次であるが，状態数 $n=3$ の場合と同様に転移温度は副格子内配位数と共に上昇している．また，イジングスピンの磁化 m およびクロックスピンの磁化 M_z の振る舞いは，副格子内配位数によって大きく変わることは無いことがわかる．

表 1 に Type 2 格子における相転移温度 $k_B T_c / zJ$ を

まとめておく．1次相転移温度および2次相転移温度は共に，副格子内配位数と共に上昇している．また，1次相転移温度は2次相転移温度よりもわずかに高い温度であることがわかる．

図14にクロックスピン状態数 $n=20$ に対する，副格子内配位数 $z_0=2, 3, 4$ および6の格子における，磁化の温度依存性を示す．クロックスピン状態数 $n=4$ の場合と同様の振る舞いを示すが，イジングスピンの磁化 m およびクロックスピンの磁化 M_z の振る舞いが異なり始める温度領域が低温側に

大きく移動していることがわかる．図15に3次元立方格子 $z_0=4$ 上の，クロックスピン状態数 $n=5, 6, 10$ および20状態の比熱の温度依存性を示す．Type1格子の場合と同様に，クロックスピン状態数の増加に伴い，低温領域における膨らみがピークとなり，さらに鋭くなっていくことがわかる．この傾向は，図13および図14の比較において見られた，クロックスピン状態数の増加に伴うイジングスピンの磁化 m およびクロックスピンの磁化 M_z の振る舞いが異なり始める温度領域の低温側へ

の大きな移動が，状態数の増加に伴う励起状態の基底状態への接近に起因し，より低温領域での比熱の大きな値として現れている．また，高温領域においては転移温度に近くほど，比熱の振る舞いに状態数の違いが見られなくなる．

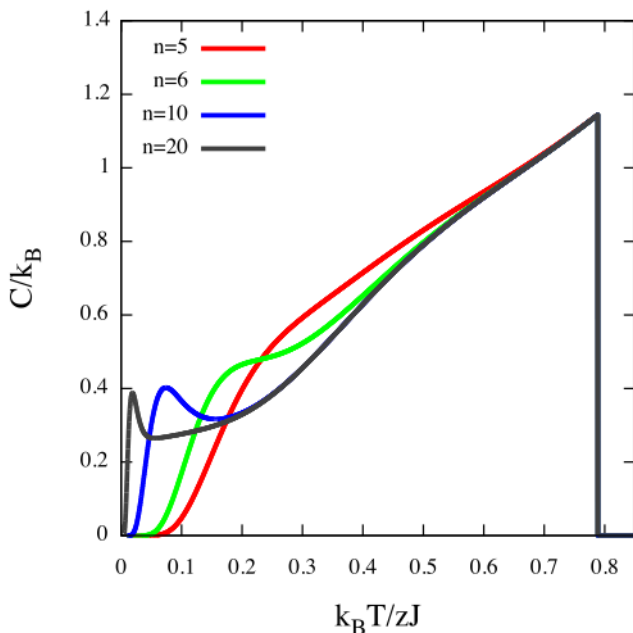


図15 $z_0=4$ の格子における，状態数 $n=5, 6, 10$ および20の比熱の温度依存性．

5. まとめおよび今後の展望

イジングスピンおよび対称性の異なる n 状態クロックスピン ($n \geq 3$) が，NaCl型配置 (Type 1) および積層型配置 (Type 2) をとる混合スピン系に対して，平均場近似を適用し，解析的に相転移温度を評価し，数値的に磁化・エントロピー・比熱の温度依存性を計算した．

NaCl型配置 (Type 1) においては配位数 $z=4$ および $z=6$ はそれぞれ2次元正方格子および3次元立方格子に対応している．しかしながら，平均場近似の特徴上，温度を $k_B T_c / zJ$ と配位数 z により規格化することにより，計算結果には2つの格子の違いは現れず，物理量の温度依存性は同一の曲線として記述される．一方，積層型配置 (Type 2) においては，積層する副格子内の配位数を z_0 と表したとき， $z_0=2, 3, 4$ および6はそれぞれ直線，蜂の巣格子，正方格子および三角格子に対応する．したがって，格子全体としては，それぞれ2次元正方格子，積層蜂の巣格子，3次元立方格子および積層三角格子に対応する．積層型配置 (Type 2) においては，層間の配位数は全て2であり，格子内の配位数 z_0 に依存しないため，層内および層間の配位数が非対称となっている．この結果として，平均場近似により得られた結果は，格子構造に依存することになる．

物理量の振る舞いおよび相転移への，クロックスピン状態数 n の効果は， $n=3$ において1次相転移， $n \geq 4$ において2次相転移を起こすことが特徴的な結果であり，各種物理量の温度依存性も状態数 n への依存性を示した．しかしながら，NaCl型配置 (Type 1) および積層型配置 (Type 2) において，定量的な違いは見られるが，定性的には大きな差異はない．唯一格子構造への依存が見られたのは，図12に示された，1次相転移温度近傍の比熱の振る舞いである．副格子内の配位数を z_0 増加に伴い，単調増加を示す曲線から，極大・極小を伴う曲線へと移行変わる．

比熱の低温領域における振る舞いの状態数 n への依存性は，状態数の増加に伴う励起状態の基底状態への接近に起因し，磁化の振る舞いより低温領域における比熱にはクロックスピンが大きく寄与しており，イジングスピンからの寄与はほとんど無いと考えられる．相転移点に近い高温領域においては物理量の振る舞いにほとんど差異が無い．比熱の低温領域における振る舞いに関しては，以前報告した比熱の低温展開の結果と整合している[6]．図8のエントロピーの温度依存性において，転移温度における値が異なっているが，状態数 n の違いがエントロ

ピーの値の違いに反映しているだけであり、定性的に差異は無い。

$n=3$ においてのみ1次相転移を示す点については、スピン対称性の混在の効果と考えられるが、状態数 $n=3$ に限定されている点については、平均場近似の範囲では1次相転移であることしか示すことができない。

本研究では平均場近似に基づく計算を行った。平均場近似は揺らぎの1次のまでを取り込み、高次の揺らぎを無視した近似方法であり、クロックスピン $n=3$ においてのみ1次相転移を示す点については、モンテカルロ・シミュレーション等の手法による研究を進め、検証する必要があると考えている。また、状態数 $n=3$ に限定される点についても議論する必要がある。

Type 1 格子においては、 $k_B T/zJ$ と温度を規格化することにより、物理量の温度依存性は配位数 z に依存しないことを上で述べた。本研究においては、Type 2 格子との比較の関係で正方格子($z=4$)および立方格子($z=6$)を念頭に置き議論してきた。しかしながら、本研究の結果は配位数 z のバイパートイト格子にも適用できる。ここで、バイパートイト格子とは、格子点を2つの副格子に分割したとき各副格子内の格子点間にボンドが無いようにできる格子である。したがって、 $z=3$ の2次元蜂の巣格子はバイパートイト格子であるので、 $n=3$ の場合1次相転移を示すことがわかる。

マルチフェロイック $\text{Lu}_2\text{MnCoO}_6$ の磁気的性質については、基底状態が **Co-Mn** 鎖 (c 軸) に沿ってスピンの向きが $\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow$ を繰り返す磁気構造 (逆位相構造) を持っており、同じ基底状態が現れる ANNNI (Axial next nearest neighbor Ising) モデル[7]と同様に相互作用の競合により逆位相構造が出現していると考えられる。したがって、**Co-Mn** 鎖 (c 軸) に沿った第2隣接スピン間に反強磁性相互作用を導入したモデルの研究が必要になると考えている。現時点では、強磁性相互作用の場合についての知見が得られている段階で、最隣接間相互作用として反強磁性相互作用を採用した場合については、今後の研究課題であり、反強磁性次隣接間相互作用を導入する必要がある ANNNI モデルを議論する前に取り組まなければならない課題である。また、実際の **Mn** スピンはハイゼンベルグスピンであり、古典スピンとしても球対称性を持つことから、モデルのさらなる拡張が必要と考えられる。

付録

Type 2 格子上的 $n=3$ の系についての解析計算の詳細を示す。式(44)において、式(52)のようにと、

$$\begin{cases} m = z_0 \alpha X - \frac{1}{3} z_0^3 \alpha^3 X^3 \\ M_z = \alpha Y + \frac{1}{2} \alpha^2 Y^2 - \frac{1}{2} \alpha^3 Y^3 \end{cases},$$

を得る。式(52)へ代入すると、

$$\begin{cases} X = z_0 \alpha X - \frac{1}{3} z_0^3 \alpha^3 X^3 + \frac{2}{z_0} \left(\alpha Y + \frac{1}{2} \alpha^2 Y^2 - \frac{1}{2} \alpha^3 Y^3 \right) \\ Y = z_0 \alpha X - \frac{1}{3} z_0^3 \alpha^3 X^3 + \frac{z_0}{2} \left(\alpha Y + \frac{1}{2} \alpha^2 Y^2 - \frac{1}{2} \alpha^3 Y^3 \right) \end{cases},$$

が得られる。両式より X を消去し、 Y^3 の項まで残すと、

$$z_0 \alpha \{ 4z_0^2 (2\eta\alpha - 1)^3 + 6(2\eta\alpha - 1) + 3 \} y^3 - 3z_0 \alpha (4\eta\alpha - 1) y^2 - (2 - 3z_0 \alpha + 4z_0 \eta \alpha^2) y = 0, \quad (57)$$

を得る。ここで、

$$y = \alpha Y, \\ \eta = \frac{z_0^2 - 4}{4z_0},$$

である。式(57)において、 $y \neq 0$ の解を与える2次方程式の解には複号が現れる。この複号において+を採用した場合、解は常に $y > 0$ であり、決して $y = 0$ となることはない。したがって、実数解を与える条件から決定される温度の上限が、1次相転移温度を与えられと考えられる。式(57)より条件式は α の5次不等式となり、解析的に解くことができないため、表1に数値的に得られた結果を示す。

複号において-を採用した場合、に $y > 0$ の値を取りながら、ある温度で $y = 0$ となる解の存在が考えられる。このとき、式(57)より条件式

$$\begin{aligned} & \{ 4z_0^2 (2\eta\alpha - 1)^3 + 6(2\eta\alpha - 1) + 3 \} \\ & \times (2 - 3z_0 \alpha + 4z_0 \eta \alpha^2) \geq 0, \end{aligned} \quad (58)$$

を得る。ここで、

$$f(\alpha) = 4z_0^2 (2\eta\alpha - 1)^3 + 6(2\eta\alpha - 1) + 3, \\ g(\alpha) = 4z_0 \eta \alpha^2 - 3z_0 \alpha + 2,$$

とおくと、 $f(\alpha)$ はその導関数が常に正であるので、単調増加の3次関数である。したがって、 $f(\alpha) = 0$ を満たす実数解 α_0 が唯一存在し、

$$\begin{cases} f(\alpha) < 0 & (\alpha < \alpha_0) \\ f(\alpha) \geq 0 & (\alpha \geq \alpha_0) \end{cases}, \quad (59)$$

である．一方， $g(\alpha)=0$ を満たす2つの実数解を

$$\alpha_+ = \frac{3z_0 + \sqrt{9z_0^2 - 32z_0\eta}}{8z_0\eta} = \frac{3z_0 + \sqrt{z_0^2 + 32}}{2(z_0^2 - 4)},$$

$$\alpha_- = \frac{3z_0 - \sqrt{z_0^2 + 32}}{2(z_0^2 - 4)},$$

とおくと，

$$\begin{cases} g(\alpha) < 0 & (\alpha_- < \alpha < \alpha_+) \\ g(\alpha) \geq 0 & (\alpha \leq \alpha_- \text{ or } \alpha \geq \alpha_+) \end{cases} \quad (60)$$

である．ここで，

$$z_0 = 3, 4 : \alpha_- < \alpha_0 < \alpha_+,$$

$$z_0 = 6 : \alpha_0 < \alpha_- < \alpha_+,$$

より，式(58)すなわち $f(\alpha) \cdot g(\alpha) \geq 0$ の解は

$$z_0 = 3, 4 : \alpha \leq \alpha_- \text{ or } \alpha_0 \leq \alpha \leq \alpha_+,$$

$$z_0 = 6 : \alpha \leq \alpha_0 \text{ or } \alpha_- \leq \alpha \leq \alpha_+,$$

となる．したがって，式(58)を満たす温度は

$$\frac{k_B T}{J} \geq \alpha_+ = \frac{3z_0 - \sqrt{z_0^2 + 32}}{4},$$

となり，低温領域で無秩序状態を与えるため，物理的描像に当てはまらない．したがって，Type 2 格子上の $n=3$ の系については，1次相転移が起こることが示される．

参考文献

- [1] S.Cheong and M.Mostovoy, Nature Materials **6**, 13 (2007).
- [2] J.F.Scott, Nature Materials **6**, 256 (2007).
- [3] Y.H.Chu, et.al., Nature Materials **7**, 478 (2008).
- [4] M.Godoy, et.al., Physical Review **B69**, 0544 (2004).
- [5] J.M.Yeomans, *Statistical Mechanics of Phase Transitions*.
Oxford University Press, (1992).
- [6] 村岡良紀, 有明工業高等専門学校紀要, 55, 16(2020).
- [7] W.Zelke., Physics Report **170**, 213 (1988).

低学年次における数学セミナーの試み

青影 一哉¹, 田上 輝波¹, 山崎 省吾²

＜令和 2 年 11 月 23 日受理＞

An implementation report for mathematics seminar

AOKAGE Kazuya · TANOUE Teruha · YAMASAKI Shogo

In this paper, we report on our mathematics seminar, which has been regularly performed.

Keywords: Fourier analysis; latex; mathematics education

1 はじめに

高専教育に携わる上で、教員は教育者としての側面と研究者としての側面を使い分け、良い教育法を探っているのではないだろうか。講義の中で、細工を散りばめるものの直接的な事を出来ず、不完全になってしまう。多種多様な学生がいる中で、どのレベルに合わせ、どのような講義を行うか悩ましい。特に素養のある学生を見つけたとき、どう刺激を与えて育てるのか平常通りの教育活動では難しいように感じている。2017 年度、試験的に 1 年生 1 名と数学のセミナーを開始した。形式は、講義の先行学習を簡単な英語の本を用い 2 時間程度黒板で解説させるものである。本紀要はこの活動の 2 期目にあたる記録である。主に題材とその実施記録であるが、内容の総まとめとして、5 章に熱伝導方程式の解法を latex を用い記述した。5,6 章は学生によるものである。

2 目的と方法

解らない事に出会ったとき、考え、調べ、自分で解決する能力を身に付けさせること、早い段階で物事を大域的に見る力を身に付けさせることが目的である。これらを身に付けさせることに最適なものは数学であろう。大学の数学科に進学すると 3、4 年にセミナーというもの

があり、学生は、各分野の専門教員に付き、1 週間に 1 度、1 人 2 時間程度学んだことを黒板で解説する。教員相手に講義を行うものが数学のセミナーである。準備にはそれなりの時間を要し、教員は事前に手を貸すこともない。この方法で実施し、学生の変化、様子を探る。

3 題材選び

題材は、本校 4・5 年または専攻科で学ぶフーリエ解析 (cf.[1]) を選んだ。化学コースを希望していたこともあり、早い段階で波動方程式に触れさせるよい機会になると考えた。まず彼らが 1 年生であることから、予備知識を補う上で、本校の有明高専の数学 第 2 巻、第 3 巻を学習させることとした。参考文献 (cf.[1]) は、工学系の学生がフーリエ級数を学習するのにより本であろう。ある程度厳密な数学の議論も行いつつ定着させるために問題演習も記載されている。もちろん補えないであろう関数解析の知識は、適宜助言が必要である。また、本来触れることのないであろう本当の数学を体験してもらうために寄り道 (cf.[2, 3]) を設定した。参考文献 (cf.[1]) は、1878 年に懸賞金を懸けられたスライドパズルの問題である。交代群の作用で普遍になることを用いて解かれるのだが、なかなか面白い。あみだくじを使って理解できる。項目 22,23 は項目 17 でも用いた代数構造に触れさせるために設けた。シャッフル問題に隠れる巡回群の構造に触れさせた。

¹ 有明高専創造工学科学生

² 有明高専創造工学科学生

4 実施記録

1 年生の後期 11 月から開始した。本を読む前に予備知識として、下記の 1~9 の項目を学習させた。ある程度初等関数の扱いに慣れさせることが目的である。フーリエ解析を展開するには、関数解析の知識を要する。実際、2 乗可積分なヒルベルト空間上の解析学がフーリエ解析にあたる。当たり前の様に周期関数を展開するが、空間に入れたある内積のもつ完備性で保証されている。越えなければならないハードルはかなり高い。そこで、ある程度パラレルに議論可能な有限次元のベクトル空間を学習させることで、巧くごまかしながら進めることにした。項目 10 を設け簡単ではあるが概略の講義を行うことにした。ユークリッド空間、他の空間も例に出しながら解説を行った。特に、内積の重要性を強調した。この項目を踏まえたうえで、関数の展開に繋げた。項目 12 から参考文献 [1] を元に読み進めた。項目 17, 22, 23 で、初等関数を扱わない数学を体験 (cf.[1]) させた。コロナ禍で学校に登校出来ない期間は遠隔 (Zoom) でのセミナーも行った (項目 22, 23)。また、下記の表は実施記録である。本論と違う活動内容に*を付けた。

	日付	内容
1	2018 11/15 (木)	逆関数
2	12/14 (金)	指数関数
3	2019 1/17 (木)	対数関数
4	1/31 (木)	関数の極限
5	2/26 (火)	数学的帰納法
6	3/11 (月)	微分 (定義式)
7	4/26 (金)	微分
8	6/14 (金)	不定積分
9	7/17 (木)	定積分
10	7/26 (月)	抽象ベクトル空間
11	8/19 (水)	テイラー展開と近似式
12	9/12 (木)	フーリエ展開
13	10/9 (水)	複素フーリエ級数
14	10/23 (月)	パーシバルの等式
15	11/6 (水)	デルタ関数と単位階段関数
16	11/18 (月)	フーリエ変換
17	12/3 (火)	*15 パズルとあみだくじ (cf.[2])
18	12/17 (火)	合成積のフーリエ変換
19	2020 1/15 (木)	フーリエ変換におけるパーシバルの等式
20	2/12 (水)	フーリエ逆変換
21	2/19 (水)	微分方程式と変数分離法
22	3/26 (木)	*合同式
23	4/2 (木)	*トランプシャッフル (cf.[3]), 囚人のジレンマ
24	8/19 (月)	関数の一次独立
25	8/18 (火)	熱伝導方程式
26	8/25 (火)	高速フーリエ変換

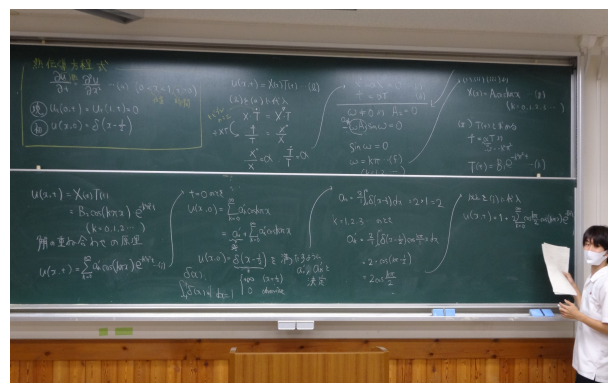


図 1. 項目 25 熱伝導方程式の解法



図 2. 項目 17 15 パズルとあみだくじ

5 熱伝導方程式とその解法

我々は、この活動を通して様々な数学に触れた。ここでは、一つの区切りとして以下の条件下で与えられた 1 次元熱伝導方程式を周辺の知識を補いながら解説する。また、6 章に付録を付けた。両端が一定の温度の長さ 1 の棒に対する熱伝導方程式は、境界条件： $u_x(0, t) = u_x(1, t) = 0$, 初期条件： $u(x, 0) = \delta(x - \frac{1}{2})$ とする 2 階の偏微分方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad 0 < x < 1, t > 0 \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $\delta(x - \frac{1}{2})$ はデルタ関数。初期条件は棒の半分の位置において、瞬間的に大きな熱を加えた状態である。以下解説を行う。まず、 $u(x, t)$ が x の関数 $X(x)$ と t の関数 $T(t)$ の積

$$u(x, t) = X(x)T(t) \quad (2)$$

で表されると仮定する。(2) を (1) に代入すると

$$XT_t = X_{xx}T$$

を得る。両辺を $XT (X \neq 0)$ で割ると、

$$\frac{T_t}{T} = \frac{X_{xx}}{X}$$

となる。ここで、左辺と右辺はそれぞれ t の関数、 x の関数となるので、この等式が成り立つためには

$$\frac{X_{xx}}{X} = \alpha, \quad \frac{T_t}{T} = \alpha \quad (\alpha : \text{定数})$$

を必要とする。このことから、次の2つの常微分方程式:

$$\begin{cases} X_{xx} - \alpha X = 0 \\ T_t = \alpha T \end{cases} \quad (3)$$

が導かれる。また、境界条件 $u_x(0, t) = u_x(1, t) = 0$ より

$$X_x(0) = X_x(1) = 0 \quad (5)$$

を得る。

(I) (3) から X を決定する。解が $e^{\lambda x}$ の形であると仮定し、 λ を決定する。ここから得られる方程式 $\lambda^2 - \alpha = 0$ を補助方程式という。

(i) $\alpha > 0$ のとき

$$\lambda^2 - \alpha = 0 \quad \text{より} \quad \lambda = \pm \sqrt{\alpha}$$

を得る。(3) の解空間は、 $e^{\sqrt{\alpha}x}$ 、 $e^{-\sqrt{\alpha}x}$ で張られるので、一般解は、

$$X(x) = C_1 e^{\sqrt{\alpha}x} + C_2 e^{-\sqrt{\alpha}x} \quad (6)$$

で与えられる。この両辺を微分すると

$$X_x(x) = \sqrt{\alpha} C_1 e^{\sqrt{\alpha}x} - \sqrt{\alpha} C_2 e^{-\sqrt{\alpha}x}$$

を得る。また、(5) より

$$X_x(0) = X_x(1) = 0$$

であるので

$$\begin{cases} X_x(0) = \sqrt{\alpha} C_1 - \sqrt{\alpha} C_2 = 0 \\ X_x(1) = \sqrt{\alpha} C_1 e^{\sqrt{\alpha}} - \sqrt{\alpha} C_2 e^{-\sqrt{\alpha}} = 0 \end{cases}$$

となる。これらを解くと、上の式から

$$\sqrt{\alpha} C_1 - \sqrt{\alpha} C_2 = 0 \quad \text{より} \quad \alpha(C_1 - C_2) = 0$$

を得る。 $\alpha > 0$ より $C_1 = C_2$ 。また、下の式から

$$\sqrt{\alpha} C_1 (e^{\sqrt{\alpha}} - e^{-\sqrt{\alpha}}) = 0, \quad \sqrt{\alpha} > 0, \quad e^{\sqrt{\alpha}} - e^{-\sqrt{\alpha}} \neq 0$$

より $C_1 = 0$ 。従って、 $C_1 = C_2 = 0$ 。以上より

$$X(x) = 0$$

すなわち

$$u(x, t) = 0$$

を得る。いま、これを解として適用すると温度分布が恒等的に 0 になってしまうため、この解を不適として扱う。

(ii) $\alpha = 0$ のとき

$$\lambda^2 = 0 \quad \text{より} \quad \lambda = 0$$

を得る。よって、(3) の一般解は

$$X(x) = (px + q)e^0 = px + q$$

で与えられる。また、(5) より

$$X_x(0) = X_x(1) = 0$$

であるので、 $p = 0$ 。したがって、 $X(x) = q$ (q は定数) は解である。

(iii) $\alpha < 0$ のとき

$\alpha = -\omega^2$ ($\omega > 0$) とおくと、(3) は

$$X_{xx} + \omega^2 X = 0$$

であり、補助方程式は、

$$\lambda^2 + \omega^2 = 0 \quad \text{より} \quad \lambda = \pm i\omega$$

となる。よって (c) の一般解は

$$X(x) = A_1 \cos \omega x + A_2 \sin \omega x \quad (7)$$

で与えられる。この両辺を x で微分すると

$$X_x(x) = -\omega A_1 \sin \omega x + \omega A_2 \cos \omega x$$

を得る。また、(5) より

$$\begin{cases} X_x(0) = \omega A_2 = 0 \\ X_x(1) = -\omega A_1 \sin \omega + \omega A_2 \cos \omega = 0 \end{cases}$$

を得る。これらを解くと、 $\omega \neq 0$ より、上の式から

$$A_2 = 0, \quad \omega A_1 \sin \omega = 0$$

を得る。ここで、 $A_1 = 0$ とすると温度分布が恒等的に 0 となるため、 $A_1 \neq 0$ 。よって

$$A_2 = 0, \quad \sin \omega = 0$$

であり、 ω は正の定数であるので

$$\omega = k\pi \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (8)$$

を得る。以上 (i), (ii), (iii) より

$$X(x) = A_1 \cos k\pi x \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (9)$$

となる。

(II) 次に $T(t)$ を求める。(4) を解くと、 $T(t)$ は 1 階の線型微分方程式なので

$$T_t(t) = -k^2 \pi^2 T$$

より、

$$T(t) = B_1 e^{-k^2 \pi^2 t} \quad (10)$$

で与えられる。いま、(I)(II) の $X(x)$, $T(t)$ の積が $u(x, t)$ であることから

$$\begin{aligned} u(x, t) &= X(x)T(t) \\ &= B_2 e^{-k^2 \pi^2 t} \cos k\pi x \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (11)$$

となり、これらは、境界条件 $u_x(0, t) = u_x(1, t) = 0$ を満たす。しかし、(11) は初期条件を満たしていない。そこで、解の線型性により解を重ね合せても解になることを利用し、初期条件を満たすように係数を決定したい。すなわち、

$$u(x, t) = \sum_{k=0}^{\infty} a'_k e^{-k^2 \pi^2 t} \cos k\pi x \quad (12)$$

となる係数を決定する。 $t = 0$ のとき (12) は

$$\begin{aligned} u(x, 0) &= \sum_{k=0}^{\infty} a'_k \cos k\pi x \\ &= a'_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a'_k \cos k\pi x \\ &= \delta \left(x - \frac{1}{2} \right) \end{aligned}$$

(ここで、 $a'_0 = \frac{a_0}{2}$) となる。したがって

$$\delta \left(x - \frac{1}{2} \right) = a'_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a'_k \cos k\pi x$$

となり、これはデルタ関数のフーリエコサイン級数展開に他ならない。よって、初期条件を満たすように a'_0 , a'_k

($k = 1, 2, \dots$) の値を決定することができる。まず、 a'_0 を求める。

$$a_0 = 2 \int_0^1 \delta \left(x - \frac{1}{2} \right) dx = 2, \quad a'_0 = 1$$

次に、 a'_k ($k = 1, 2, \dots$) を求める。

$$a'_k = 2 \int_0^1 \delta \left(x - \frac{1}{2} \right) \cos k\pi x dx = 2 \cos \frac{k\pi}{2}$$

となる。以上を (12) に代入して

$$u(x, t) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} e^{-k^2 \pi^2 t} \cos \left(\frac{k\pi}{2} \right) \cos(k\pi x)$$

を得る。 □

6 付録

ここでは、1 次元熱伝導方程式について、必要な周辺知識を補う。

6.1 関数の一次独立性について

いずれも 0 でない n 個の関数 $f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t)$ に対して、 $c_1 f_1(t) + c_2 f_2(t) + \dots + c_n f_n(t) = 0$ ならば、 $c_1 = c_2 = \dots = c_n = 0$ に限るとき、関数 $f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t)$ は $\mathbb{C}$ 上一次独立であるという。また、一次独立でないとき一次従属という。関数の組が一次独立であることを調べるには、行列式を用いるとよい。関数の組 $f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t)$ が $\mathbb{C}$ 上一次独立である必要十分条件は、

$$\begin{vmatrix} f_1(t) & \cdots & f_j(t) & \cdots & f_n(t) \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ f_1^{(k)}(t) & & f_j^{(k)}(t) & & f_n^{(k)}(t) \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ f_1^{(n-1)}(t) & \cdots & f_j^{(n-1)}(t) & \cdots & f_n^{(n-1)}(t) \end{vmatrix} \neq 0$$

である。

例 6.1. 2 つの関数の組 $e^{\sqrt{\alpha}t}$, $e^{-\sqrt{\alpha}t}$ ($\alpha > 0$) は

$$\begin{vmatrix} e^{\sqrt{\alpha}t} & e^{-\sqrt{\alpha}t} \\ \sqrt{\alpha}e^{\sqrt{\alpha}t} & -\sqrt{\alpha}e^{-\sqrt{\alpha}t} \end{vmatrix} \neq 0$$

より、一次独立である。

6.2 非同次 n 階線型微分方程式の解について

非同次 n 階線型微分方程式

$$\frac{d^n x}{dt^n} + P_1(t) \frac{d^{(n-1)} x}{dt^{(n-1)}} + \cdots + P_n(t)x = Q(t) \quad (13)$$

に対して、

$$\frac{d^n x}{dt^n} + P_1(t) \frac{d^{(n-1)}x}{dt^{(n-1)}} + \cdots + P_n(t)x = 0 \quad (14)$$

を (13) の同次形という。ここで、(14) の一般解は (14) を満たす一次独立な n 個の関数の組 $f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t)$ で線型に張られる。すなわち

$$x = c_1 f_1(t) + c_2 f_2(t) + \cdots + c_n f_n(t)$$

である。また、(13) の一般解は、(14) の一般解 + (13) の特殊解で与えられる。特に、2 階の定数係数線型同次微分方程式

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_2 x = 0$$

の一般解は、

(i) $a_1^2 - 4a_2 > 0$ のとき

$t^2 + a_1 t + a_2 = 0$ の異なる実数解を α, β とすると

$$x(t) = c_1 e^{\alpha t} + c_2 e^{\beta t}$$

(ii) $a_1^2 - 4a_2 = 0$ のとき

$t^2 + a_1 t + a_2 = 0$ の重解を α とすると

$$x(t) = (c_1 + c_2 t) e^{\alpha t}$$

(iii) $a_1^2 - 4a_2 < 0$ のとき

$t^2 + a_1 t + a_2 = 0$ の異なる虚数解を $\alpha \pm \beta i$ とすると

$$x(t) = e^{\alpha t} (c_1 \cos \beta t + c_2 \sin \beta t)$$

で与えられる。また、(13) の特殊解を求める方法として、逆微分作用素が有用である。

6.3 フーリエ級数展開について

$-L < x \leq L$ で定義された周期 $2L$ の区分的に滑らかな周期関数 $f(x)$ は不連続点を除けば、次のようにフーリエ級数で表すことができる。すなわち

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{k\pi}{L} x + b_k \sin \frac{k\pi}{L} x \right)$$

ここで、 a_k, b_k は

$$\begin{cases} a_k = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos \frac{k\pi}{L} x \, dx \quad (k = 0, 1, \dots) \\ b_k = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \sin \frac{k\pi}{L} x \, dx \quad (k = 1, 2, \dots) \end{cases}$$

で与えられる。

6.4 デルタ関数について

次で定義される特殊関数 $\delta(x)$ をデルタ関数という。
 $\forall \epsilon > 0$ に対して

$$\delta(x) = 0 \quad (x \neq 0), \quad \int_{-\epsilon}^{\epsilon} \delta(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1$$

直ちに定義より

$$\int_{a-\epsilon}^{a+\epsilon} f(x) \delta(x-a) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x-a) dx = f(a)$$

が成り立つ。

7 おわりに

フーリエ解析は大学 2, 3 年生程度で学ぶ内容である。高校 2 年生に、これを理解し教員相手に解説しなさいと要求した。もちろん早い段階で音を上げると思っていた。事前に手を貸すことをせずとも読み進める様子に驚いた。もちろん、フーリエ解析を理解するために、周辺の数学も学習したはずである。関数を扱わない数学にも抵抗なく挑めた。題材を誤らなければ 2 年生でも論文が読めるようだ。共著者の 2 人が将来何をを目指すのか分からないが、もしこういった活動を機に学者になりたいと思ったなら成功だ。語弊があるかもしれないが、化学者は数学を知らないし、数学者は化学を知らない。興味の対象が異なるのであろう。両名には、確かな数学の教養を持った化学者になってもらいたい。

この活動をもう少し続ける予定である。いろいろな波動方程式を解くために特殊関数、直交多項式を学習させたい。目眩く広がる超関数の世界に足を踏み入れよう。

参考文献

- [1] 馬場 敬之, フーリエ解析 1 キャンパス・ゼミ. マセマ出版社. (2015)
- [2] 片山 聡一郎, 田川 裕之, 高校生への数学講義の一例 - 15 パズルの非可解性について -. 和歌山大学教育学部紀要. 18, pp.89-95 (2008)
- [3] 宗政 昭弘, 並べ替え操作の計算法. 講義ノート. (1998)

被削材の機械的特性と切削加工力の関係

石橋大作, 篠崎 烈, 明石剛二

<令和2年12月4日受理>

Relationship between mechanical properties of workpiece and cutting force in a drilling process

ISHIBASHI Daisaku, SHINOZAKI Akira and AKASHI Koji

Drilling in cutting is a machining method widely usable in milling machines and lathes and drilling machines. It can be said that the twist drill is a familiar cutting tool for those who perform cutting. When performing the drilling, the cutting speed, feed rate, and the presence or absence of cutting fluid, etc. are set according to the type of tool or workpiece materials. Therefore, It is important to set machining conditions for each work materials. Although each tool manufacturer recommends the proper use of the drill depending on the material to be machined, there are some situations where it is difficult to align the drill with all materials at the machining site. Therefore, the drilling is often supported by changing the machining conditions of drilling process.

In this report, the effect of different materials characteristics to cutting force in drilling process, is reported.

1. はじめに

機械加工による穴あけは、ボール盤をはじめフライス盤や旋盤等、多種にわたって使用されている加工方法である。一般的に、穴あけ加工に用いる2枚刃のドリルは、切削加工を行う人にとっては、最も身近な切削工具であり、実際に穴あけ加工を行う際は、被削材やドリル材種の違いにより、切削速度や送り速度・切削液の有無などを各状況から設定している。そのため、被削材種は、加工条件を設定するためには、最も必要であると考えられる。各工具メーカーも被削材種によってドリルの使い分けを推奨しているが、加工現場において全ての材種に対してドリルを揃えることが難しいため、加工現場では加工条件を変えることによって、実際の穴あけ加工に対応していることが多い。

本取り組みでは、被削材種が異なる穴あけ加工において、材種の違いが切削力に与える影響について検討した結果を報告する。

2. 測定システムおよび切削条件の概要

2.1 切削力測定システム

本測定システムは、ドリル穴加工時のスラスト力およびトルクを測定するものである。図1に測定システムを示す。本システムは、直立ボール盤の加工テーブルにバイスを設置し、その下にひずみゲージを用いた自作の動力計を取付けている。また、トルクセンサーは、動力計と同様にひずみゲージを用いた自作のものであり、ドリルと主軸モータの間に取付けるように専

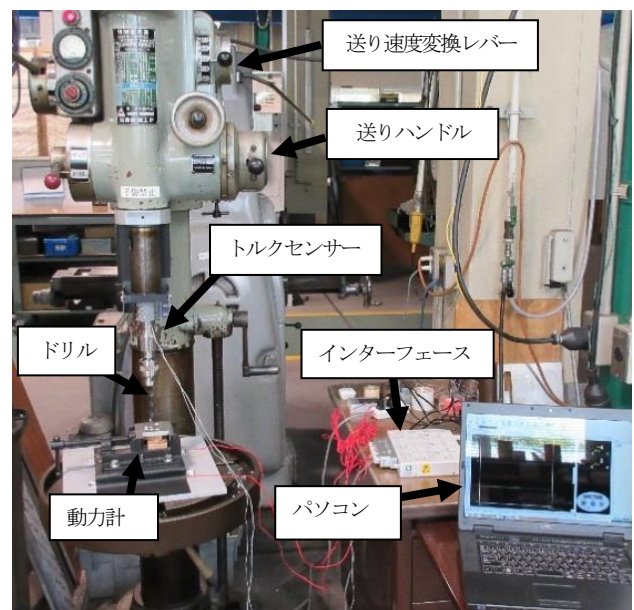


図1 切削力測定システム

用のアダプターを設計して製作した。また、工具が回転するため、スリップリングとブラシを用いて配線を行い、オリジナルのプレートを用いてブラシを固定した。¹⁾

切削力の測定値は、記録と同時にリアルタイムにパソコン上でその数値を確認することができ、同時に加工と測定を行うことができる。このようなシステムにより、作業者が穴あけ作業時の切削力を目視しながら曖昧な感覚だけではなく、定量的な感覚で加工できるようになっている。

2.2 切削条件

穴あけ加工実験は、主軸回転と切削送り速度を設定するために、直立ボール盤（型式：YUD-540, (株)吉田鉄工所製）を使用した。また、実験に使用したドリルは、三菱マテリアル製のドリル（型式：SDD1000）であり、その外観を図2に示す。ドリルの材種は高速度鋼を選定した。ドリル径は10mmである。主軸回転数を405rpm（切削速度13m/min）になるように設定した。送り速度は0.1mm/revとし、乾式により穴加工実験を行った。

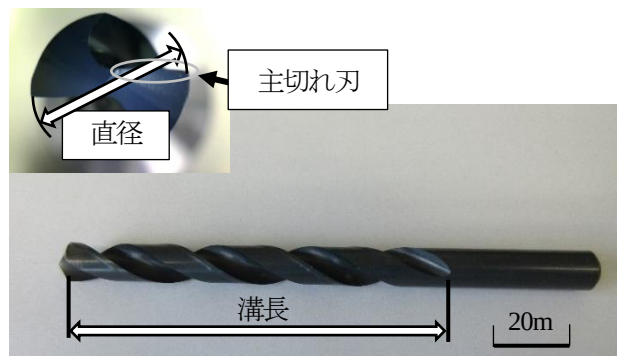


図2 実験で使用した2枚刃ツイストドリル

2.3 被削材の種類

本実験に用いた被削材は、鋳鉄（JIS FC200）、アルミニウム合金（JIS A5052）、一般構造用圧延鋼材（JIS SS400）である。実際の加工では、穴あけ加工が終了する直前にドリル先端が被削材から貫通し始めた時にトルクが大きくなることが確認されている²⁾。また、貫通時の観察を行うために、各材料の厚みを10mmとした。

3. 被削材の材料特性の測定

3.1 特性試験の種類

材料特性は、硬さ試験と衝撃試験で測定した。選定した理由は、加工工具の切削条件を選定する時に、被削材の硬度を指針とすることがあるためである。しかし、硬度だけでは、硬度が比較的高いが脆い特性である鋳物や硬度は比較的低いが延性があるアルミニウム合金のようなものがあるため、本実験では、衝撃試験も行うことにした。

3.2 ブリネル硬さ試験

本実験で行った硬さ試験は、ブリネル硬さ試験（記号HB）である。ブリネル硬さ試験は、円形の押し込み痕を測定する硬さ試験である。10mmの鋼球を一定の荷重で測定物表面に押し込み窪んだ押し込み痕の表面

積の関係から硬さを算出する。ブリネル硬さを算出する式を（1）に示す。

$$HB = 0.102 \frac{F}{s} = \frac{0.102 \times 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

HB：ブリネル硬さ

F：試験荷重 29.42×10^3 [N]

S：くぼみの表面積 [mm²]

D：圧子の直径 10 [mm]

d：くぼみの直径 [mm]（測定値）

各材種のブリネル硬さ試験の結果は図5に示される。FC200のブリネル硬さ試験結果は、今回の被削材の中で最も硬い170HBであった。その次に硬かった被削材はSS400であり、125HB、最も柔らかいA5052は、52HBであった。

3.3 シャルピー衝撃試験

図3に、シャルピー衝撃試験機の外観を示す。試験方法・試験片は、JIS（日本産業規格）のZ2242に基づいて行っており、シャルピー衝撃試験は材料の脆性を判断するために使用されることが多い試験方法である。シャルピー衝撃試験の測定方法は、図3に示すように、ハンマーを持ち上げ角度 $\alpha=140\text{deg}$ にセットする。また、最下点の所定の位置に図4に示す試験片をUノッチがハンマーの中央になるように治具を使用してセットし、ハンマーを振り下ろして破壊した後ハンマーの振れ上がり角度を確認する。その破壊前後のハンマーの角度を式(2)に代入して、衝撃破断を行うために、必要なエネルギー量を算出する。

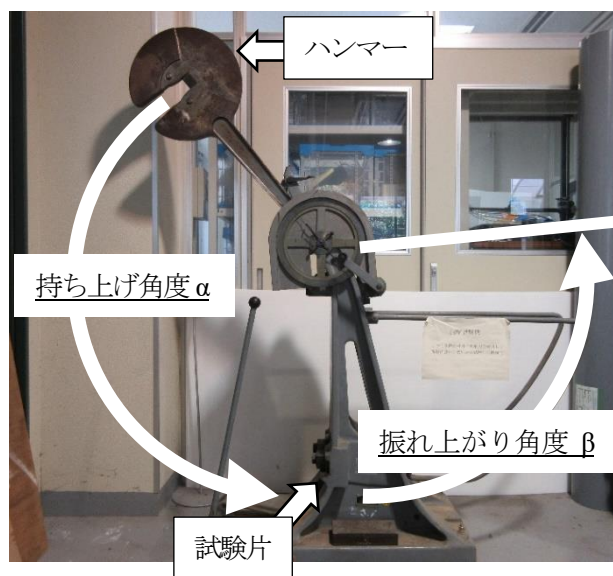


図3 シャルピー衝撃試験

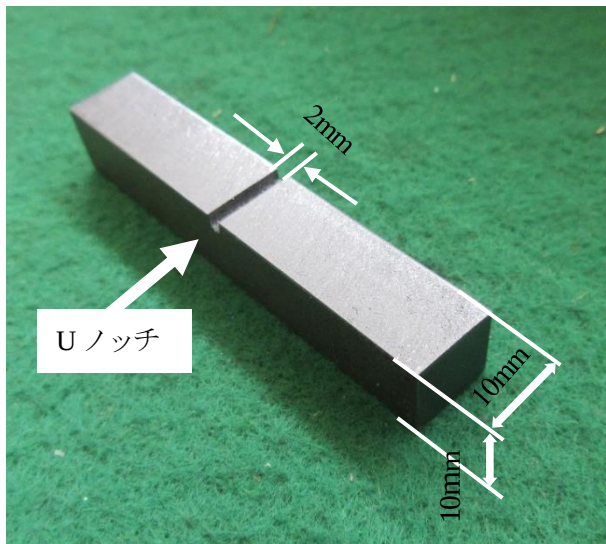


図 4 シャルピー衝撃試験片

$$E = WR (\cos\beta - \cos\alpha) \quad (2)$$

W : ハンマーの自重 (25.999×9.8 [N])

R : ハンマーの回転軸中心から重心までの距離
(0.6539 [m])

α : ハンマーの持ち上げ角度 [deg]

β : 試験片破断後のハンマーの振れ上がり角 [deg]

図 5 に、硬さ試験とシャルピー衝撃試験の結果を示す。FC200 の衝撃エネルギーは、 $E=4\text{J}$ であり、ほとんどエネルギーを消失することなく、破断していることがわかる。図 6 (a) に示す FC200 の破断部を観察すると、形状がほとんど変形することなく、試験片断面の四角の形状を保ち破壊していることがわかる。この結果から FC200 の素材が硬くて脆く、衝撃破断しやすいと考えられる。また、破断した断面をつなぎ合わせ、破断する時の試験片の変形角度が、 1.2deg であることがわかった。

A5052 のシャルピー衝撃試験では、衝撃エネルギーを $E=72\text{J}$ 程度奪われることが確認できた。図 6 (b) に示す A5052 の破断部を観察すると、押しつぶされたように破断面の先端が鋭角に変形していることが観察される。また、破断した断面をつなぎ合わせ、破断する時の試験片の変形角度は 75.2 度であった。

SS400 のシャルピー衝撃試験の結果は、衝撃エネルギーを $E=200\text{J}$ であり、最も大きなエネルギーを要して破断している。図 6 (c) の SS400 の破断は、大きくハンマーの進行方向に変形して引きちぎられたように伸びて破壊していることが観察できる。また、破断し

た断面をつなぎ合わせ、破断する時の試験片の変形角度は 53.8deg であった。

シャルピー衝撃試験の結果より、衝撃的な力の作用に関しては、SS400 が最もエネルギーを必要とすることを確認することができた。しかし、今回、試験を行った被削材の中では、A5052 が最も変形量が多いことが分かった。

4. 各材種に対する穴あけ加工時の切削力測定実験

図 7 に、各材種に対して穴あけ加工実験した際のスラスト力とトルクの測定結果を示す。

各被削材のスラスト力は、FC200 で 550N 、A5052 で 470N 、SS400 で 1040N であった。

トルクは、FC200、A5052、SS400 において順に、 $1.1\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $1.2\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $2.5\text{N}\cdot\text{m}$ であった。スラスト力とトルクと共に最も大きくなったのは SS400 であり、FC200 と A5052 はスラスト力・トルクに大きな違いがないことが確認できた。これは、FC200 のように、硬い特性を持つ材種であっても脆い特性があるため、切削を行いやすくなったと考えられる。また、A5052 のようにあまり硬くない材料であっても、延性がある特性を持つ材種は、切削を行いにくい状況であったと考えられる。そのため、特性の異なる 2 種類の材料でも、同じようなスラスト力とトルクになったと考えられる。

硬さ試験とシャルピー衝撃試験の実験結果から FC200 は硬くて脆い性質、A5052 は硬度試験の結果から今回使用しようした被削材の中では比較的柔らかい材料であり、シャルピー衝撃試験の結果から、粘りがある性質であることがわかった。SS400 は、今回使用

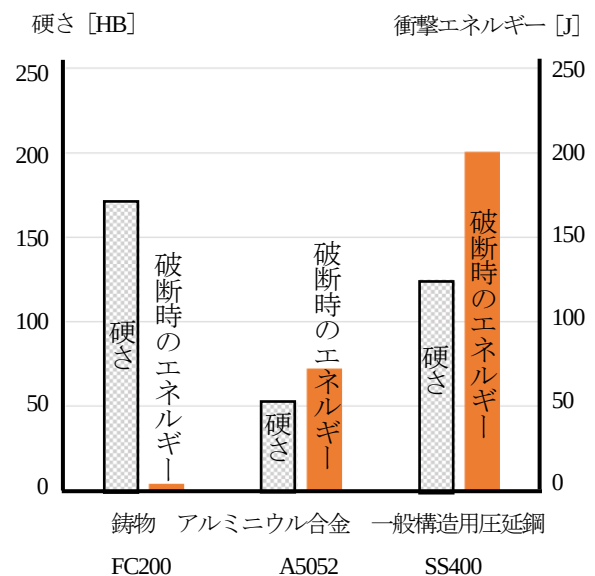
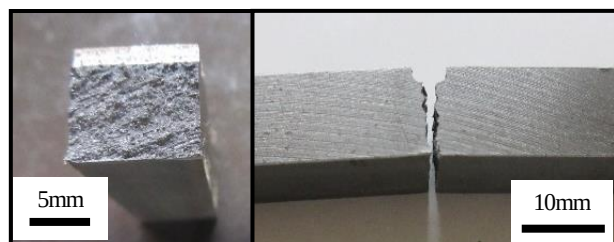


図 5 硬さ試験と衝撃試験の結果

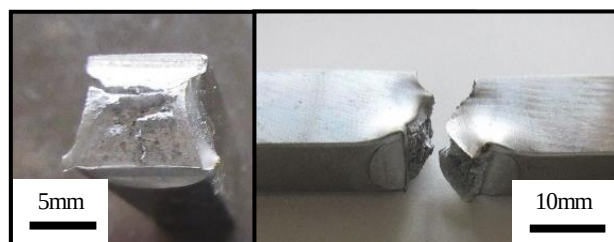
した材料の中でシャルピー衝撃試験が最もエネルギーを使用して破断した材料で粘り強い性質であることがわかる。



(a) FC200



(b) A5052



(c) SS400

図6 衝撃試験後の破断面

5. おわりに

本研究では、被削材種による材料特性の違いで、ドリル加工中の切削力に違いがあることがわかった。スラスト力やトルクに与える影響は、被削材料の硬さや衝撃エネルギーの違いがスラスト力とトルクに影響を与えることが確認できた。切削条件の選定には、硬さを参考にすることが一般的であるが、ドリル加工における切りくず排出等の切削現象を考えると、衝撃試験の結果から想定できる靱性も参考にする必要があると考えられる。また、被削材料の種類や性質を確認することでスラスト力やトルクの値を推測することが可能であると考えられる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費（課題番号 17H00324）の助成を受けて実施したものです。

参考文献

- 1) 石橋大作, 吉富貴司, 明石剛二: 機械加工技術の教育的効果を高めることを目的とした穴あけシステムの設計開発, 平成28年度日本設計工学会, (2016), pp.3-4.
- 2) 石橋大作, 明石剛二: 穴あけ加工技術を受け継ぐことを目的とした取り組み, 2016年度日本設計工学会秋季大会研究発表講演会講演論文集, (2016), pp.63-64.

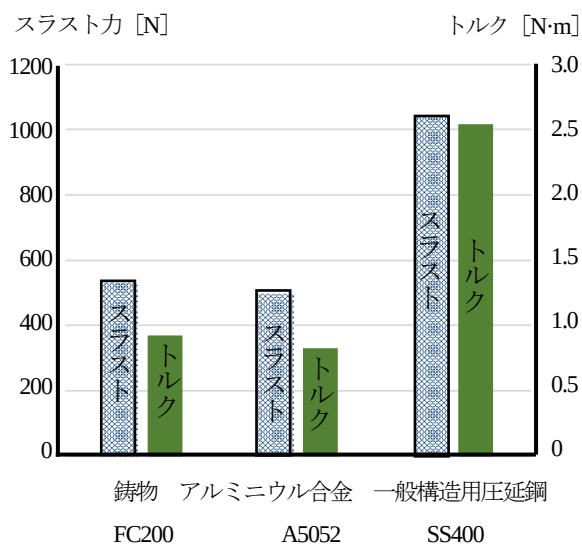


図7 穴あけ加工時のスラスト力とトルク

機械実習における卓上ボール盤技術サポートシステムの導入

— 穴あけ加工の技術向上に向けて —

石橋大作, 堀田孝之, 池上勝也, 篠崎 烈, 明石剛二

<令和2年12月4日受理>

Introduction of bench drilling machine technical support system of mechanical training

- For technological improvement of hole processing -

ISHIBASHI Daisaku, HORITA Takayuki, IKEGAMI Katsuya,

SHINOZAKI Akira and AKASHI Koji

A hole drilling process is the machining technique used for various machine tool like as a milling machine, lathe and drilling machine. Tools used to drill holes in these machining process are double or more edge drills, then drilling conditions are decided from the spindle speed, tool feed speed, drill materials and condition of cutting liquid supplying. So it is able to say that workpiece materials are important factor to establish drilling conditions. Each tool manufacturing companies are also recommending to use drills for workpiece materials matched drilling conditions set by users, however it is difficult to prepare all matched drills in a real factory. Therefore it often corresponds to drill holes by changing cutting conditions at manufacturing fields.

In this paper, the result of influence which kinds of workpiece materials give in the cutting force while drilling process is reported.

1. はじめに

機械加工技術を学生に伝えることや教えることは、非常に難しいことである。また、加工技術の中でも汎用の加工機においては、感覚的な部分が非常に多いにもかかわらず、その大切な感覚的部分を曖昧な表現(これくらいの力)で伝えている。そこで、「体感的機械加工技術の教育的効果を高める加工システムの開発」を行った。このシステムの概略を図1に示す。このシステムでは、切削加工中の切削力の測定がリアルタイムでその値を確認することが可能である。また、穴あけ加工中の測定データを記録するには、便利なシステムである。しかし、このシステムは、歪ゲージを用いて測定を行い、パソコンのモニターで表示を行うため、実際に切削力を確認しながらの穴あけ加工を行うには、システム自体が比較的大掛かりであり、学生の実習に使用するには不向きなものになっている。

そこで、学生の実験や実習で加工中の切削力を感覚的に必要な部分のみを表示できることを目的に、新システムの開発を行った。システムの製作にあたり、以下のことを目標とした。

- 1) 卓上ボール盤で使用可能であること
- 2) 初心者が利用可能であること

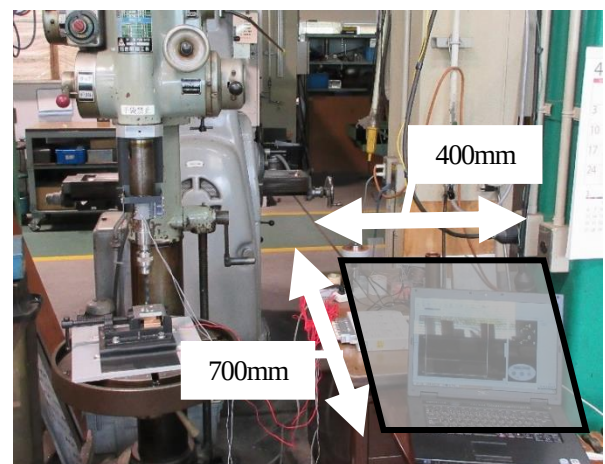


図1 切削抵抗を測定するシステム

- 3) コンパクト (小型) であること
- 4) 使用方法が簡素であること
- 5) 持ち運び可能であること

本取組みでは、メカニクスコースの授業科目である「ものづくり基礎ⅠおよびⅡ (機械実習)」での卓上ボール盤の穴あけ作業において送りハンドルの送る力 (感覚的な部分) を可視化 (穴あけ加工時のハンドルの伝わる力) できる装置を実習に取り入れた内容について報告する。

2. 体感的機械加工技術の教育的効果を高める

加工システム

体感的機械加工技術の教育的効果を高める加工システムでドリルのスラスト力やトルクを測定することができる。インターフェースには、歪測定器【PCD-400A, 共和電業（株）製】を使用している。この測定器のサンプリングタイムは、10KHz である。パソコンによる制御で、測定値はモニターに表示でき、同時に測定記録も可能である。

スラスト力・トルクの測定を歪ゲージで行うため、11本の電線をインターフェースに引き込んでいる。電源は測定機のみで2か所のコンセント（AC100V）が必要となる。また、測定機とパソコンの設置場所は、400mm×700mmの広さを必要とする。

3. 穴あけ加工時の切削力について

3.1 ドリルの切削力について

ドリルには、スラスト力（軸方向の力）とトルク（力のモーメント）の切削力がある。その力の方向を図2に示す。今回のサポートシステムは、スラスト力を表示させることにした。

その理由は、図3に示す穴あけ加工時のスラスト力の結果が示すように、切削送り速度が0.1~0.3mm/revに変化することにより、スラスト力も比例的に変化することが確認でき、その結果、切削送り速度をスラスト力からある程度、予測することが可能であるためである。

3.2 スラスト力の比較について

学生達と経験者の切削加工技術の違いおよび一定の送り速度の3パターンで穴あけ作業時のスラスト力を測定した。加工の条件は、「ものづくり基礎ⅠおよびⅡ（機械実習）」で実際に行っている内容に設定した。主軸回転数は、690rpmに設定した。被削材料も機械実習で使用している鋳鉄（FC200）で実験を行った。穴あけ加工時のスラスト力の測定結果を図3示す。学生達の穴あけ加工時のスラスト力は、200N以下であった。しかし、経験者の穴あけ加工時のスラスト力は300Nを超える状態であった。これは、穴あけ加工の指導を行っている技術職員の説明が送りハンドルを操作する送る力が学生にうまく伝わっていないことが確認できる。また、同時に学生は、慎重に穴あけ作業に取り組んでいるのではないかと推測することができる。

また、本実験で使用したドリルのメーカーが推奨する送り速度は、鋳鉄（FC200）の加工を行う時に0.2mm/revとしている。そこで、実際の機械実習の主軸回転数で送り速度を0.1~0.3mm/revに設定を行い切削

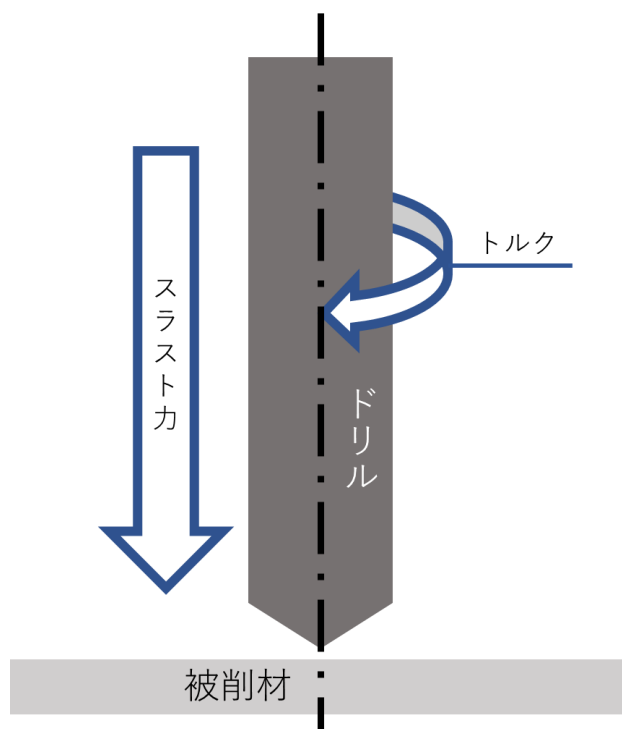


図2 ドリルのスラスト力とトルクの方

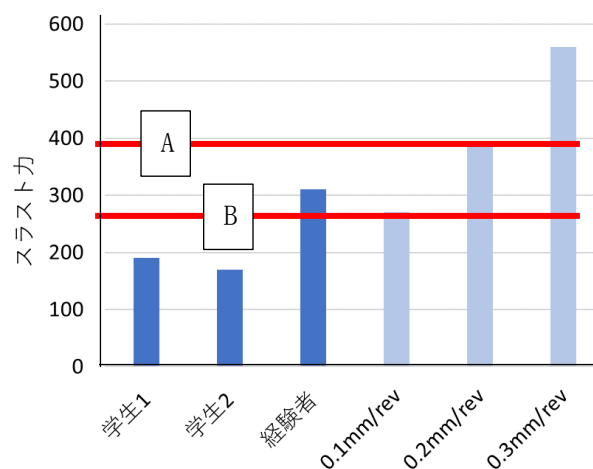


図3 穴あけ加工時のスラスト力

力の測定を行った。その結果の切削力の値は、270~570Nとなった。ドリルの推奨送り速度は0.2mm/revなので、400Nが実際に行っている穴あけ作業に適していると考えられる。機械実習の卓上ボール盤の剛性やクランプ方法などを考えると送り速度を少し落とした状態が良いと考えられるため、機械実習では、切削送り速度0.1（図3の下方のBライン：約270N）~0.2mm/rev（図3の上方のAライン：約400N）が最適な送り速度であると設定した。このようにして、スラスト力270~400Nの範囲で機械実習を行うことにした。

4. サポートシステムについて

4.1 システム構成部品の詳細について

本システムは穴をあける時のドリルにかかるスラスト力を表示することを目的としている。ワークを固定するバイスに専用のベース板を取り付けた。また、卓上ボール盤の作業台にもベース板を取り付けた。両ベース板の素材は、塩化ビニールを選定した。また、そのベース板の間にあたる位置にロードセルを4か所(50kg×4=200kg)に設置し、そこにかかる力を読み取るようにした。その読み取った力を Arduino に入力し、A/D 変換した値を LCD 表示器に表示する。図4に、その表示させるまでの詳細を示す。

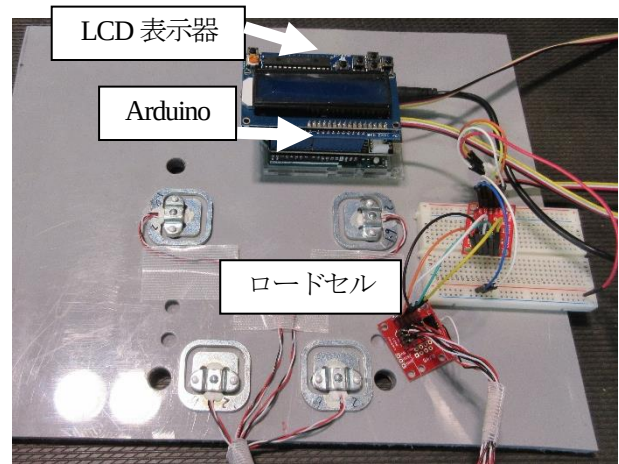


図4 サポートシステムの部品の紹介

4.2 本システムの制御について

本サポートシステムは、Arduino で制御を行うことにした。その制御スケッチ（ソースプログラム）の仕様を下記に示す。

- 1) ドリルにかかるスラスト力を入力とし、A/D 変換した値を LCD に表示する。
- 2) LCD 表示器は、スラスト力を N（ニュートン）で表示させるため、ロードセルから得た情報を N に校正できること。

4.3 本システムの仕様について

図5に、示す本システムの設置スペースは、LCD 表示器・Arduino やモジュール基盤など配線の部分を含めて 250mm×200mm となっている。また、コンセントの数は1か所となった。そのため、システムの移動は可能である。システム使用にあたっては、電源を接続するだけで測定・表示を開始することができる。初期設定（ゼロ合わせ）も LCD 表示モジュール基盤のリセットボタンを押すことで可能としている。

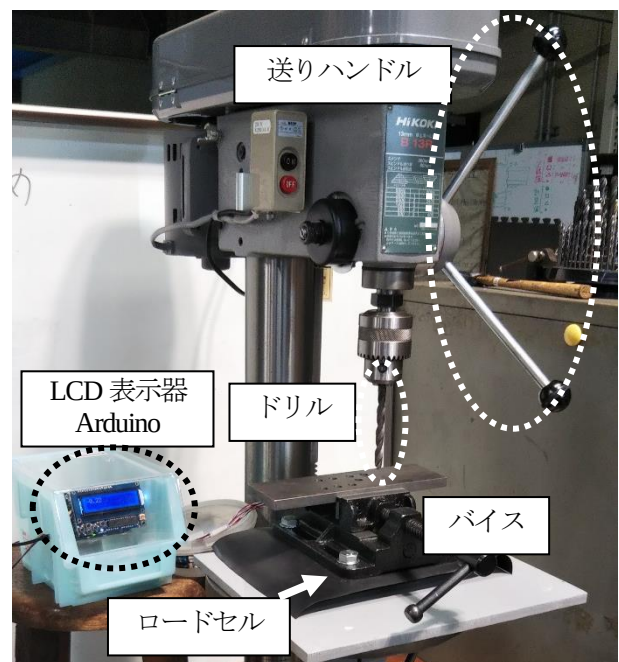


図5 本システムの外観

5. 穴あけサポートシステムの実践について

5.1 機械実習への導入

図6に、本システムを使用して穴あけ加工の実習を行っている様子を示す。本システムを使用していない穴あけ加工は、手に伝わる感覚と耳で聞く音、また、目で切削状態を観察（切りくずなど）することによって穴あけ加工を行っていた。

本取組みのシステムを用いて卓上ボール盤で穴あけ作業を実践することで、穴あけ加工中のスラスト力の情報が加わったことにより、より適した送り速度でハンドルを動かすことができる。また、工作物にどれくらいの力が加わっているかという情報も得ることが可能となった。

穴あけ加工の機械実習において「これくらい」とい



図6 本システムを使用している様子

う曖昧な表現ではなく、一例として、「数値的に 300～400N の間のスラスト力で穴あけ加工を行う」など、学生への説明や指示がより具体的なものとなった。また、穴あけ加工中の送りハンドルを送る力の適量の判定がわかりやすくなった。

参考文献

- 1) 石橋大作, 吉富貴司, 明石剛二: 機械加工技術の教育的効果を高めることを目的とした穴あけシステムの設計開発, 平成 28 年度日本設計工学会, (2016), pp.3-4.

5.2 本システムを使用した学生の感想

本システムを使用して穴あけ加工を行った後に、学生に対してアンケート調査を行った。対象者は、本システムを使用しないで機械実習を受けた者とした。アンケート調査の結果を下記に示す。

- ① ドリルにかかる力を感覚的に捉えることができた。その感覚を捉えることで技術を体得することができた。
- ② 適切な送り速度で穴あけ加工ができることで、切りくず処理がうまくできた。
- ③ 穴あけ加工を行う時の不安や恐怖感が少なくなった。
- ④ 穴あけ加工時のドリルにかかる力に対して理解することができた。
- ⑤ 指定された数値に合わせることで加工中の切削音の違いを確認することができた。

6. おわりに

本サポートシステムをメカニクスコースの「ものづくり基礎ⅠおよびⅡ（機械実習）」に導入することで得られた成果を下記に示す。

- (1) 学生が行う穴あけ加工時の切削力は、小さいことが確認できた。これは慎重に送りハンドルを操作し穴加工を行っていると考えられる。また、指導者が穴あけ作業の見本を見せても、実際には切削力までは伝えることができないことが確認できた。しかし、本システムを導入することで指導者の切削力を数値的に確認しながら穴あけ作業を行うことができ、同時に適切な切削送りの技術を学ぶことができる。
- (2) サポートシステムを使用した後の学生へのアンケート調査結果より、穴あけ加工時の恐怖感や不安を軽減できたとの回答があった。学生は恐怖感や不安があることがわかり、(1) の考察のように、そのため慎重に送りハンドルを操作していたことも関連していると考えられる。
- (3) 実践的技術者を育てるために、必要な技術を数値として確認できることから技術の継承が以前と比べると容易にできると考える。
- (4) 表示されている値を見ながら穴あけ加工を行うことで、穴の仕上げ精度を一定に保つことができると考えられる。

タッチパネルディスプレイを活用した PLC 分野横断型教育教材の開発

吉富貴司・中島正寛・古賀つかさ・青柳洋平
池之上正人・原槇真也・野口卓朗・松野哲也

<令和2年12月9日受理>

The Development of PLC Teaching Application Using Touch Panel Display in department crossing.

YOSHITOMI Takashi , NAKASHIMA Masahiro , KOGA Tsukasa , AOYAGI Yohei
IKENOUE Masato , HARAMAKI Shinya , NOGUCHI Takuro , MATSUNO Testuya

This report describes the newly developed teaching applications by introducing a Touch Panel Display in updating the PLC teaching applications that have been developed so far. In addition, the PLC update have changing from OMRON to Mitsubishi, the tools used have been enhanced, and we have succeeded in developing teaching applications that are expected to be expandable in the future.

1. はじめに

有明工業高等専門学校（以下、本校とする）エネルギーコースでは、これまでにシーケンス制御に関する教育を行ってきた。教育を始めた当初は、有接点シーケンス制御やラダープログラムと電気系技術者が扱うことを想定した教育プログラムが主であった。現在、使用されているPLC(Programmable Logic Controller)は高性能化しており、さまざまな機器との連携、ラダープログラム(以下、ラダー)の記述方法の変化と、機器の用途や使用方法が変化してきている。本稿では、取り巻かれている状況の変化に対応できる技術者を育成するための教材開発について報告する。

2. これまでの開発教材

2.1 PLCロジカル教材

図2.1に示す実験装置は、入力に押しボタンスイッチ・トグルスイッチ、出力に表示灯ランプと、シーケ

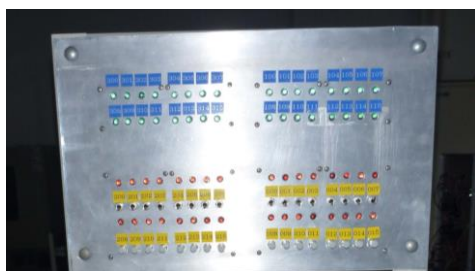


図 2.1 ロジカル教材

シーケンス制御の入力・出力をロジカルに操作することができる実験装置である。信号を入力し、出力の変化を確認することができるが、その信号の変化に対応した動きを確認することができない欠点があった。また、ラダーの入力もプログラミングコンソールを使用する必要があり、学習者は操作に苦慮していた。

2.2 模擬実験装置

図2.2に示す実験装置は、入力に押しボタンスイッチ・トグルスイッチ、出力にモータの回転・状態表示のLEDと実在する物を模して製作した実験装置である。これらの実験装置は、身近にある物を想定し製作した為、学生がラダーを作成する際、それぞれの経験をもとに「動くもの」を実現することができる。ラダーの入力もパソコン用のソフト(GUI)で行うため、全体の流れを見ながらのプログラミングが可能である。しかしながら、使用しているPLCが古いタイプに分類されるようになり、学生が就職し企業で活躍するための教材としては教育的効果を十分に得ることができなくなってきた。

2.3 オムロン実習キット

図2.3に示す装置は、平成20年のオムロン創立75周年を記念して全国高専に贈られたものである。有接点シーケンス、PLCを使った制御の基礎を学習することができる実習装置である。このキットも含め、PLCロジカル



図2.2 疑似実験装置
(疑似交差点、疑似踏切、疑似エレベータ)



図2.3 オムロン寄贈学習キット

教材、疑似実験装置にはPLCとしてオムロン社製のPLCを使用している。これら3つの教材は、使用しているPLCが旧タイプのもので、近年主流となっているFB(ファンクションブロック)やST(ストラクチャテキスト)が使えないといった問題を抱えていた。

3. タッチパネルディスプレイを用いたPLC教材

2で紹介したPLC教材で使用できなかった新しい技術を盛り込み、以下の3つの教材の開発を行った。

3.1 タッチパネルディスプレイを用いた

シーケンス基本学習プログラム

この学習プログラムは、シーケンス学習を初めて経験する学生向けに開発した学習プログラムで、電氣的配線をすることなく、PLCを用いたシーケンス制御を学習できることをコンセプトとしている。

図3.1.1に示すように、学習システムは制御装置のPLC、プログラムを行うノートPC、入力操作・出力確認をするタッチパネルディスプレイで構成され、それぞれの接続はLANケーブルのみで完結する。シー

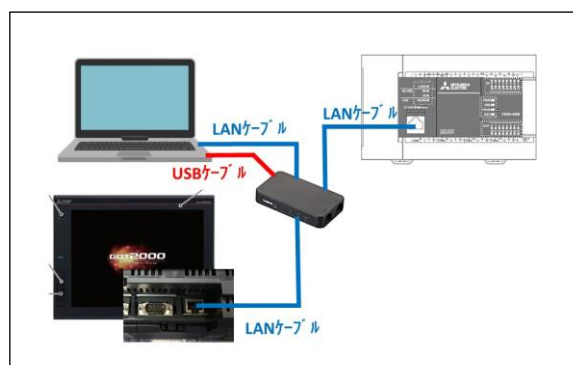


図3.1.1. 基本学習システムの構成(イメージ図)

ケンス制御を学習する上で、有接点シーケンスに必要な接続に関する知識、ラダーを作成する上でのプログラムに関する知識が重要である。一度に両者を学習することは敷居が高く、このプログラムは後者を学習することを目的としている。



図3.1.2. 基本学習プログラムのタッチパネル画面

図3.1.2にはこのプログラムのタッチパネルディスプレイの画面表示を示しており、操作スイッチと表示灯が配置されている。使用するタッチパネルディスプレイの仕様でマルチタッチ(一度に複数箇所をタッチ)対応でないため、操作スイッチはオルタネート型(操作することでON/OFFが切り替わる)とした。画面の右側タイマの時間表示とカウンタの現在値表示を配置することで、以下の基本的回路を学習することができる。

- A接点回路、B接点回路
- AND回路、OR回路
- タイマ回路(ディレイON/OFF)
- カウンタ回路
- フリッカ回路

3. 2 モータ回転制御実習装置

この実習装置は、3. 1のプログラムで学習した学生が、簡単な配線でモータの回転制御について学習するプログラムである。基本的な構成は図3. 1. 1に示す構成と同じであるが、それに加えPLCと実習装置の間を信号線で接続する必要がある。



図3. 2. 1モータ回転制御実習装置の外観

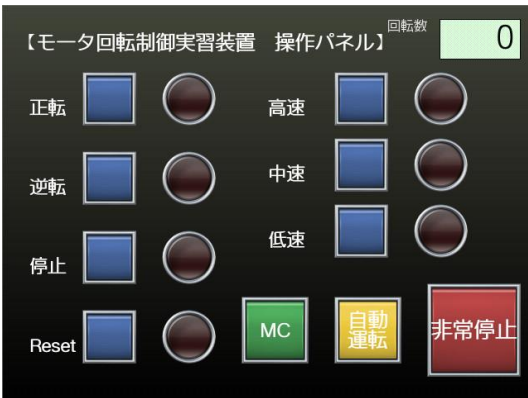


図3. 2. 2モータ回転制御実習装置のタッチパネル

図3. 2. 1に示す実習装置は、PLCを接続することなく単独で動作させることができ、インバータの基本操作を行いながら、誘導電動機の基本的特性を測定することができる。基本操作を学習した後、タッチパネルとPLCを接続し、タッチパネルにて回転制御を行う。

図3. 2. 3にはPLCと実習装置間の配線接続を示しており、簡単な配線を行うことで、予め準備したラダーでモータの回転制御を行うことができる。基本的な動作確認を行った後、課題となる自動運転プログラムの作成を行う。

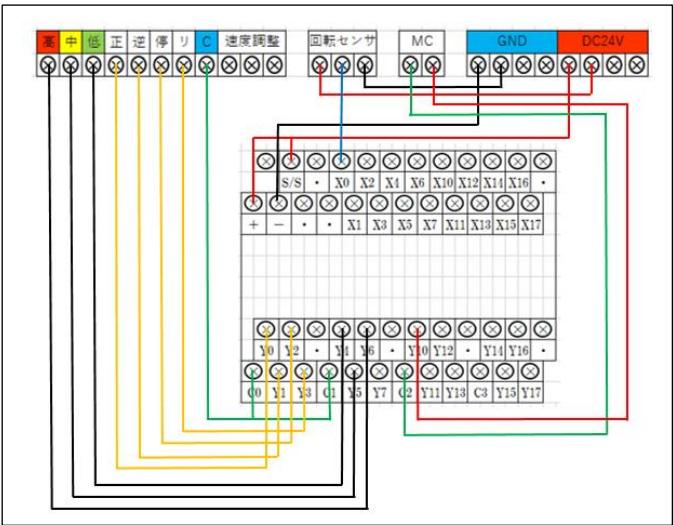


図3. 2. 3モータ回転制御実習装置の配線接続

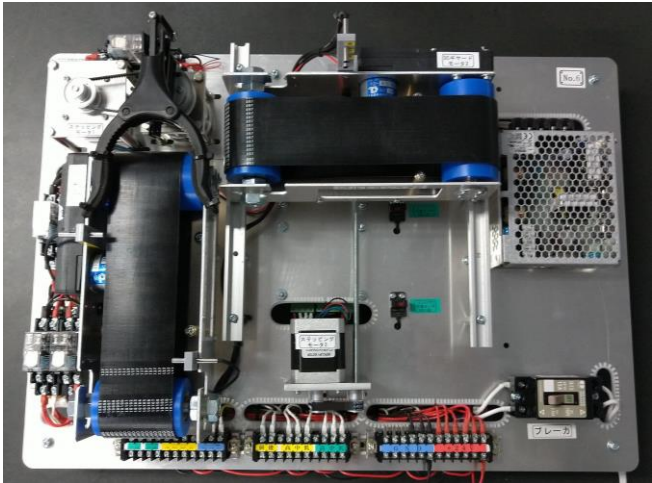


図3. 3. 1ベルトコンベア制御実習装置の外観



図3. 3. 2 ベルトコンベア実習装置のタッチパネル

3.3 ベルトコンベア実習装置

このベルトコンベア(以下、コンベア)実習装置は、今回開発した3.1と3.2のPLC教材で学習したことを前提に開発した実習装置である(図3.3.1参照)。2つの教材で、タッチパネルの基本的操作・ラダーの基本的プログラミングを習得した後での学習を想定している。

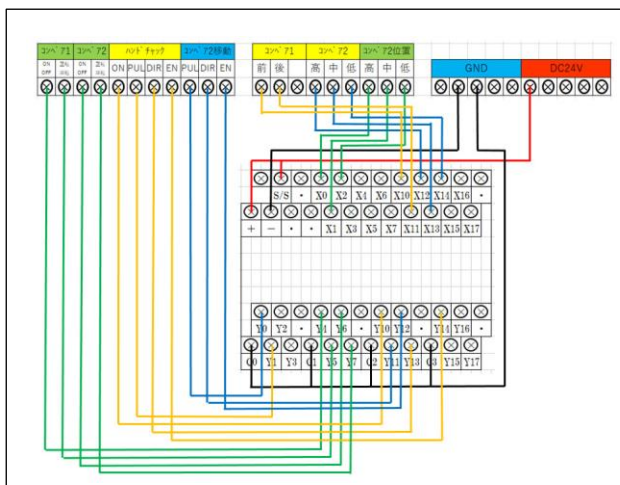


図3.3.3 ベルトコンベア 実習装置の配線接続

この実習装置も、モータ回転制御実習装置同様に図3.3.2に示すようなタッチパネルでの基本的動作の確認ができ、図3.3.3にはこの装置の配線図を示す。基本的動作を確認の後、総合運転プログラムの作成を行う。装置の構成要素として、以下のようなものがある。

(1) 対象物検知・位置検出

この実習装置には、2つのコンベアが実装されており、コンベア1で対象物が置かれたことを検出するセンサ、チャック機構に物体が到達したことを検出するセンサ(図3.3.4参照)が取り付けられている。また、コンベア2には、対象物の高さを検出するセンサが実装されており、検出した対象物の高さに応じてコンベア2を移動さ

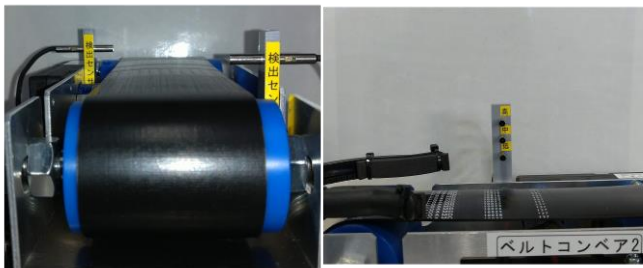


図3.3.4 物体検出センサ

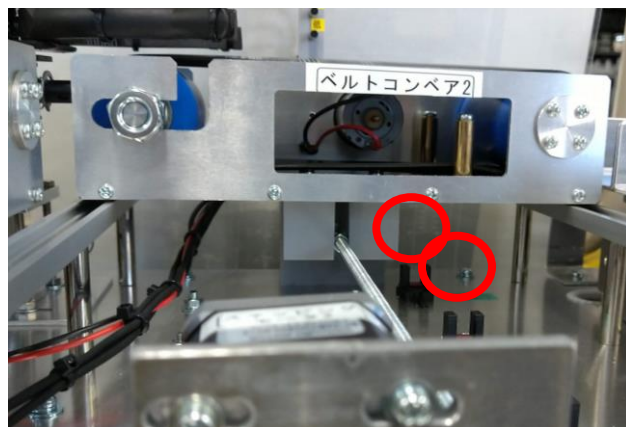


図3.3.5 コンベア位置検出センサ

せ、サイズ別に専用の回収BOXまで搬送する。

その際、コンベア2が所定の位置に到達したことを検出するために、コンベア2の下方(床側)に位置検出センサを取付けている。(図3.3.5)

(2) ベルトコンベア

本実験装置には図3.3.6に示すCADを基に製作したコンベア(図3.3.7参照)を2台搭載し、コンベア1に乗せた対象物をセンサで検出、チャック機構の前まで運搬する。対象物をコンベア2に渡した後は近接センサで高さを検出し、それぞれの回収箱まで運搬する。底板と側板でローラ軸を保持する構造になっており、側板のローラ軸の固定穴の片方は、軸をスライドして取付け・取り外しができるようL型の形状とした。また、メンテナンス性を考慮し小窓を設置した。試運転の際にベルトの片寄りが見られたため、底板にベルトガイド用の支柱を追加し改善を行った。

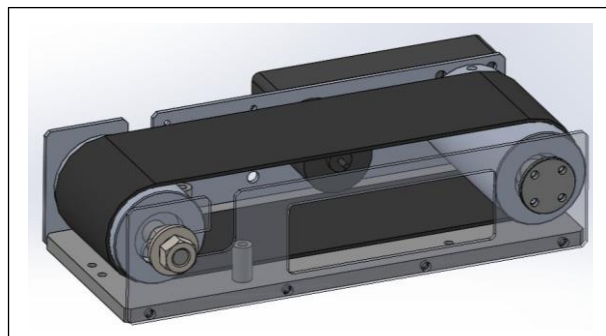


図3.3.6 ベルトコンベア図面

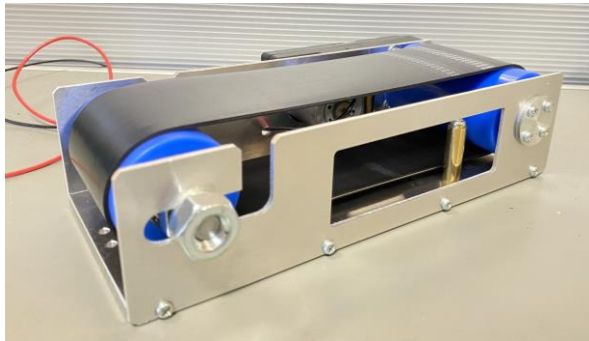


図3.3.7 製作したベルトコンベア

(3) チャック機構

本機構は、コンベア1で運ばれてきた物体を掴み、その後90度旋回しコンベア2に受け渡すものである。旋回機能はステッピングモータを用い（図3.3.8左側）、ベルトにて旋回軸（図3.3.7右側）を回転させる構造となっている。

旋回軸の上に取り付けるチャックハンドはソレノイドにより動作し、プログラムミスによる連続回転にも対応できるよう、スリップリングを用いた設計となっている。また、チャックハンド内部には、圧縮ばねを組込み、スムーズな開閉動作を実現した。



図3.3.8 チャック機構

(4) コンベアスライド機構

図3.3.9には、コンベア2をそれぞれの回収BOXまで移動させる機構を示す。ベルトコンベアの左右にガイドレールを配置し、コンベア中心にステッピングモータで駆動する全ねじボルトを用い、ベルトコンベア自体をスライドさせる。コンベアの位置検出には、スリット式の近接センサを用い、所定の位置に到達した後、コンベアを回転させ対象物を回収BOXに搬出する。

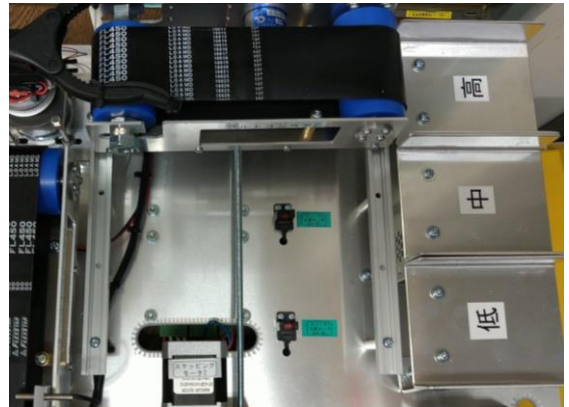


図3.3.9 コンベアスライド機構

(5) モータの駆動

コンベア1、2の駆動にはDCギヤードモータ、ベルトコンベア2のスライド、チャック機構の回転にはステッピングモータと、異なる制御方法を学習することができる。

DCギヤードモータも、正転/逆転の制御も可能で、視覚的にも制御の仕組みを確認することができる。

4. 専攻科授業への導入

今回製作したPLC学習教材は、本校専攻において学習教材として活用中で、学習過程が現在進行中である。現段階で有接点・無接点、OMRONのキットと三菱シーケンサと専用ラダー作成ソフトGX-Worksを用い、シーケンス制御の基本的な制御方法の学習が完了した。

有接点においては、基本的要素に加え、抽象的な問題文「以下に示す問題文のような動きをする回路の作

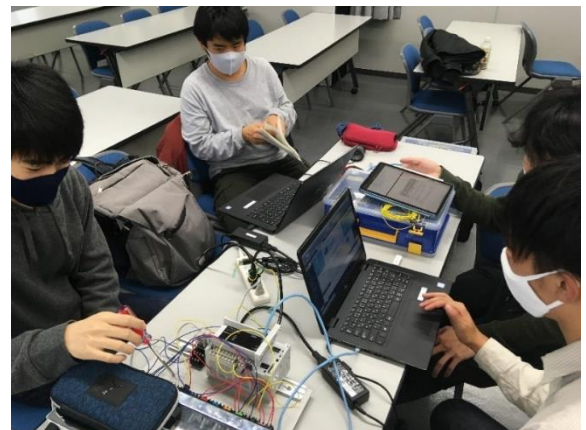


図4.1.1 実習風景

表4. 1. 1専攻科授業スケジュール

日程	内容
10/8	シーケンス紹介・ガイダンス・デモ
10/15	有接点・基礎・OMRONkit
10/22	〃
10/29	有接点・応用課題・OMRONkit
11/5	〃
11/12	無接点・基礎・三菱シーケンサ・OMRONkit
11/19	〃
以後	残り8回でタッチパネル, モータ, コンベア搭載のオリジナルキットを用いて課題を提示もしくは学生に考えさせ, 制御を行わせる予定

成しなさい」のような課題を提示した。課題に取り組む学生は意欲的に課題に取り組めたことで、教育水準が向上し本科のカリキュラムとの差異が生じたと考えられる。授業への導入は現在進行中であり、これ以降の課題についても、タッチパネルを活用した「シーケンス基本学習プログラム」、「モータ回転制御学習装置」、「ベルトコンベア実習装置」においても同様に、学生に考えさせるような問題・課題を提示し、それを達成させることを検討している。図4. 1. 1に実習風景の写真、表4. 1. 1には専攻科の授業スケジュールを示す。

4. 1 学生に与えた応用課題(有接点)

以下、学生に与えた応用課題を示す。なお、文中ではSWはスイッチ、Lはランプを示す。

(1) SW1を押すと0. 5秒間ランプL1が点灯その後消灯(ワンショット)

(2) 電動昇降スクリーン

実際のスクリーンの代わりに上昇をランプ1の点灯、下降をランプ2の点灯とする。

目的の高さ以外にスクリーンが上昇下降しないよう、限界に達するとリミットスイッチがONになる。上昇下降が競合しないようインターロック回路を設ける。

(3) 2つのスイッチSW1・SW2・SW3を1, 2, 3の順に押すとコンベアが回り続ける

4. 2 学生に与えた応用課題(無接点)

(1) SW1→SW2→SW3の順のSW入力でL1点灯

条件1 : SW1→SW3と間違えるとS1からやり直す

条件2 : SW1, 2, 3を押した回数が10回を超えるとL1は永久に点灯しない)

(2) SW1, 2, 3の中で最後に押されたSWに対応するランプL1, L2, L3を点灯

(3) L1(5秒) → L2(2秒) → L3(4秒)の点灯を繰り返す

5. まとめ

本報告は、開発を行っている「タッチパネルディスプレイを用いたPLC教材」について報告を行った。以前の教材は、電気系を履修する学生を対象としてのものであったが、タッチパネルディスプレイを用いることで、スイッチや表示灯といった電気部品をタッチパネル上に配置できるため、配線の数を減らすことが可能となり、他分野の学生が容易に学習できる教材となっている。

これまでに製作を行ってきた教材で基礎的内容を学習後、今回製作した教材で学習することで時代の流れに対応したシーケンス制御学習が可能になると考える。現在、本校専攻科の授業にて活用中であるが、進行中であるため様々な問題点・改善点が挙げられることが予想される。今後は、これらも問題を解決しながら、より教育効果が得られる教材に改善する必要がある。

最後に、一連の教材開発は本校「校長裁量経費」を財源としており、製作するにあたって関係各所からご協力を頂いております。関係して頂いた皆様には、心より御礼申し上げます。

チャレンジの共有を図るライブ広報・寄付誘導手法の検討

柳原 聖 神戸好美^{*1}

<令和2年12月9日受理>

Study on way of live streaming and funding promotion to share student's challenge

YANAGIHARA Kiyoshi and KANBE Yoshimi

abstract

Our proposals, which is entitled that "Study on way of live streaming and funding promotion to share student's challenge", was selected as one of the subjects for 2019 research funds of principal's discretion of NIT Ariake. This study is a technical report that is about a trial of on-line live streaming through participation of NIT Ariake automotive engineering club on 2019 Honda Eco mileage Challenge competition. This also describes difficulties to deliver our colleges student's struggles with warm sympathy in both outreaching side and engineering side.

Key words : live streaming, funding, student's challenge

1. はじめに

ロボコン、エコラン¹⁾、ソーラーボート等のものづくり系競技は、体育競技のクラブ活動のように場所や競技用具といった環境だけでなく、さらに物を作るための環境が必要になる。実際にものを作るためには、知識、技術、技能はもちろんであるが、man(人)に加え machine(製造機械)、material(材料)、month(時間)これはすなわち money(お金)が必要となる。このため活動を円滑に継続してゆくためには安定した財務基盤が確保されていることが何よりも必要であり、地元企業、OB、保護者等で構成されるわが校のステークホルダーに活動を正しく理解していただきながら財政的サポートを得ることが肝要となる。

このようなこともあり、ものづくりの競技は普通の人が簡単に始められるものでもないため、いわば参入障壁の高い競技分野とも言える。一方で、誰もが簡単に始めることができない競技分野であることから、わが校のような技術系教育機関こそがその教育活動の特長をアピールできる領域とも言える。

しかし、参入障壁が大きい競技であるがゆえのものとかしさも同時に存在する。それは陸上やメジャーな球技のように、日常の景色の中で身近に触れられる競技分野ではないため、TV等の報道においては視聴者の共感を得ることが難しいことである。このためTV報道をされる場合の番組内容としては、全体の番組時間考慮しながら、まずはその競技についての入門的な競技解説をし、比較的限られたチームを対象とした報道内容になる。すると、取材対象から外れてしまった学校の関係者が自校のチームの奮闘を知るためには、会場まで足を運ぶしかなく、学生らとの「チャレンジの共有」を図ることが困難になる。

^{*1} 自動車工学研究部学外コーチ

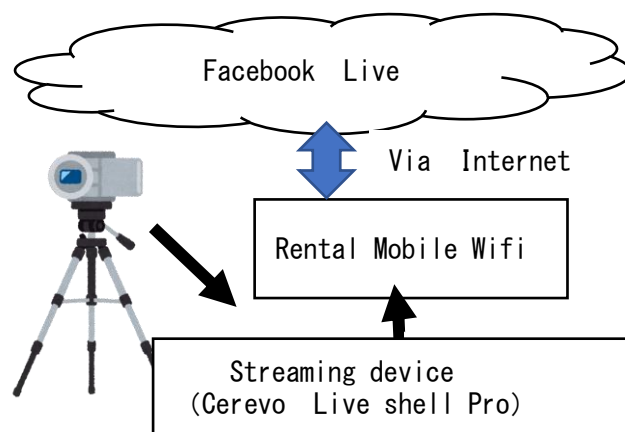


図1 オンラインストリーミング装置の概要

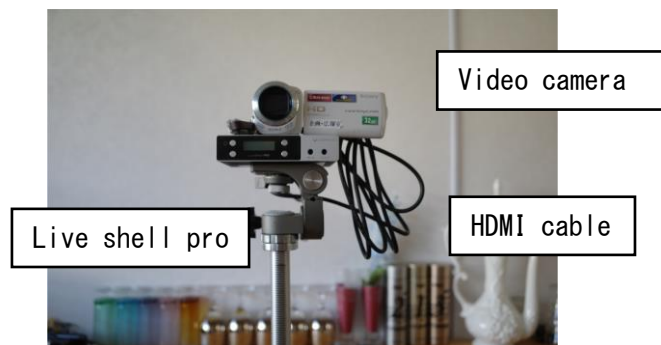


図2 ストリーミングデバイスのセットアップ

そこで、著者らは、2019年度の校長裁量研究経費における学校広報・寄付誘導という募集枠に「チャレンジの共有を図るライブ広報・寄付誘導手法の開発」という題目にて申請を行い、計画が採択された。この申請においては、今後の寄付誘導のパイロット事業手法の研究として、ものづくり系競技におけるインター

ネットライブ映像配信（以降、ストリーミングとする）、クラウドファンディング等の新たなネット広報手法を検討し、ノウハウ等を蓄積することを目的とした。本報はその報告である。

2. ライブストリーミング方法

インターネットを使ったライブストリーミングの概要を図1に示す。市販のビデオカメラからHDMIケーブルを介してオンラインストリーミングデバイス(Cerevo社製 live shell pro²⁾)に映像信号と音声信号を出力する。ストリーミングデバイスはレンタルモバイルWifiをアクセスポイントとして4G回線(通信速度最大1Gbps)にてインターネットに接続される。そして自動車工学研究部のFaceBookページにライブ映像と音声を伝送しライブ放送を実施する。

3. ストリーミング実験

3.1 対象イベント



図3 Honda エコマイレージチャレンジ全国大会⁴⁾⁵⁾

今回の実験におけるライブ配信対象としてはHondaエコマイレージチャレンジ全国大会を主たる配信対象と考えた。そこで、まずはストリーミングテストとして2019年8月6日に熊本県大津市で開催された九州大会においてライブ配信を試行した。それぞれの会場の立地を図4に示す。

3.2 ストリーミング結果とその問題点

サーキット会場において、Wifiの受信アンテナを確認しながら配信を開始したところ当初は良好な配信であったが、配信から数分のうちに音声配信は良好なもの、図5のように映像がモザイク様になるような状況や、人物等の動作が滑らかにならないような状況が生じてきた。これはサーキット付近の4G回線の混雑具合により生じたものと推測した。

あらかじめ調べていた資料ではHSR九州は回線がカバーされている地域であったが、いざ競技が始まってくるとサーキット内での回線利用者が増加してくるためか回線速度が低下しがちであった。

以上のようなテスト配信の結果から4G回線のモバイルWifiアクセスポイントの利用では良好な回線が確保できなければサーキット等の郊外からのライブ配信は難しいとがわかった。

この結果をもとに図4の九州大会と全国大会会場の地理を比較しながら全国大会におけるライブ配信について検討を加えたが、図のように全国大会会場のツインリンクもてぎはHSR九州以上に都市から離れており、2019年10月時点において良好な回線を確保できる見通しが薄いことから、この年度においての全国大



(a) 九州大会会場地理 (HSR九州)



(b) 全国大会会場地理 (ツインリンクもてぎ)
図4 大会会場の地理 (google mapより)



図5 モザイク部分ができてしまった配信画像⁶⁾

<https://fb.watch/2PsrHMHqMD/> より

会の配信は断念することとした。

現在、5G回線網が全国に敷設されているところではあるが、モータースポーツ会場は騒音を配慮して総じて山間部に立地しており、ステークホルダーとの「チャレンジの共有」をライブ配信で実現するには通信インフラの整備が不十分で、いましばらくの時間を要すると考えられる。

なお、現在、世界的に新型コロナウイルスの感染拡大防止として人が密に集うことを避ける努力がなされているが、このようなパンデミックや荒天、地震等においては、遠隔授業やパーソナルなライブストリーミングによる配信の需要は益々増加すると思われる。

4. 360° カメラの導入

今回の申請においてはライブストリーミング機器の導入とその操作技術習得を主な目的として全国大会からの動画配信を主としていたが、九州大会における配信テスト結果からライブストリーミングをサーキットから実施するには時期尚早と判断し、新たに 360° カメラ (GoPro 社製 Fusion) を導入し学生たちの全国大会における活動を記録することにした。(図 6)

この Fusion というカメラは魚眼レンズカメラを本体の表と裏に 2 台貼り合わせたような構造となっており 5k/30fps の高精細画像をカメラ周囲全球にわたり記録できるものである。このカメラを用い、大会決勝日のピットの様子をタイムラプス映像として記録した一例が図 7 である。記録した画像は帰校後に画像編集ののち部の FaceBook ページにアップロードし配信した。



(a) 表

(b) 裏

図 6 360° カメラ GoPro Fusion⁷⁾



図 7 360° カメラで記録したピットの様子⁸⁾

<https://fb.watch/2PYjJf2gCd/>

このカメラにはズームはないが高精細に全球にわたりカメラ周囲を記録できるので、後からパソコン上で画角を選択し、ズームイン/アウトの編集が可能である。よって臨場感を伝えやすい映像表現が可能となるだけでなく、当日のメンバー同士の動作解析等をする上でも有用と考えられる。一方で、画像の編集にはスティッチング処理という表裏画像の張り合わせ処理が必要となり、10GB 程度の大容量のメモリと高速 CPU が望まれる。今回は intel core i7-8700 3.2GHz CPU, 24GB メモリ, Radeon RX580 8G グラフィックアクセラレータを搭載した PC にてタイムラプス映像の

編集をしたが各種処理に小一時間程度の時間を要した。

5. クラウドファンディングについて

2012 年に技術系人材育成の活動としてご賛同いただいた企業様および同窓会の後押しもあり全国大会に初出場した。以来全国大会への挑戦を継続しているが、競技車両の輸送費用の捻出には例年苦慮している。そのような中で、鈴鹿高専から本校の校長に着任された江崎尚和校長からクラウドファンディングについて検討してみてもどうかとのご提案を頂戴した。

鈴鹿高専では図 8 に示す申請書を、教職員 1 名以上を代表責任者として学生が申請することで原則 50 万円までのファンドの利用が可能となっている。この規定は H30 年に校長裁定の下で制定されており、いくつもの実施例がある。

このようなクラウドファンディングのメリットは SNS の口コミにより情報が拡散されれば少額ではあっても幅広い層に寄付を誘導しやすいことである。その

(別紙様式)

平成 年 月 日

鈴鹿工業高等専門学校長 殿

申請者所属 (学科名・クラブ等団体名)
申請者氏名 印

クラウドファンディングの実施について (申請)

クラウドファンディングを実施したいので申請します。

事業名称	
事業内容	
事業実施開始予定日	平成 年 月 日
目標金額	円
■ 使用経費 (使用経費内訳)	円
・消耗品	円
・備品	円
・設備費	円
・研究設備利用料含む	円
・備品研究費	円
・諸謝金	円
・賃金 (人件費)	円
■ 手数料	円
■ 管理費	円
募集期間	平成 年 月 日 ~ 平成 年 月 日
事務担当者所属 担当者氏名 (内職)	

・ 支援金を適正に管理し、執行するとともに、支援金募集のために公表する事業内容に責任を負い、事業を誠実に遂行します。

・ 支援金から運営者の定める手数料 (支援金の総額に運営者の定める所定の割合を乗じた金額) 及び本校の管理費 (支援金の総額の 10%) を拠出します。

実施責任者 (役職・氏名・内職)
○○ ○○ 印 (内職:)

図 8 鈴鹿高専クラウドファンディング申請書⁹⁾

一方でデメリットとしてはほとんどのファンディングサイトで成功報酬が請求されるため、少額の目標達成金額であればむしろ通常の寄付金として協賛を得るほうが良いと考えられることである。

令和元年度の自動車工学研究部の Honda エコマイレージチャレンジ全国大会参加においては、学内規定がまだ制定されていないこともあり実施が間に合わなかったが、現在規定制定に向けて各所に働きかけを行っている。

6. おわりに

本報においては、2019 年度の校長裁量研究経費に

おける学校広報・寄付誘導課題「チャレンジの共有を図るライブ広報・寄付誘導手法の開発」について報告をした。この申請においては、今後の寄付誘導のパイロット事業手法の研究として、ものづくり系競技におけるインターネットライブストリーミング、クラウドファンディングによる寄付誘導方法検討し、ノウハウ等を蓄積することを実施した。

対象とした競技は自動車工学研究部で参加している Honda エコマイレージチャレンジを対象とし、まず競技会場からのライブストリーミング試験を実施した。

試験の結果、競技会場であるサーキットが比較的都市部から遠く、4G 回線がブロードとは言えないため、競技開始から回線が混雑して映像の配信にはまだ難があると明らかになった。自校の学生によりフォークラスした情報をステークホルダーに届けるためには、早期の 5G 回線網の整備が望まれる。

またクラウドファンディングによる寄付誘導については鈴鹿高専の規定をベースとして規定の早期制定が必要と考え、校内機運の醸成に努めはじめたところである。

謝辞

課題実施においてはストリーミングデバイスの利用等については本校マルチメディアセンタ情報基盤部より機器の貸与等を賜りました。

また、本文で述べた通り本研究は 2019 年度校長裁量研究経費「チャレンジの共有を図るライブ広報・寄付誘導手法の開発」にて実施されております。この課題実施にて得られた知見および技能は、図らずも翌年度の新型コロナウイルス禍による学校内外からの遠隔授業実施において、円滑な授業配信に役立てることができました。関係の皆様記して御礼申し上げます。

参考文献等

- 1) <https://www.honda.co.jp/emc/>
- 2) <https://liveshell.cerevo.com/ja/pro/feature/>
- 3) 柳原 聖, 吉田正道, 神戸好美, Honda エコマイレージチャレンジ九州大会 V2 までの軌跡, 日本高専学会誌 17(4), 36-40, 2012-10.
- 4) <https://www.facebook.com/NITAAUTOCLUB>
- 5) <http://mame.me.ariake-nct.ac.jp/anctauto/>
- 6) <https://fb.watch/2PsrHMhQMD/>
- 7) <https://www.tajima-motor.com/gopro/product/fusion/>
- 8) <https://fb.watch/2PYjjF2gCd/>
- 9) たとえば、鈴鹿高専事務資料

有明高専創造工学科における2年生「課題研究Ⅰ」の取り組み

竹内 伯夫・明石 剛二・中島 洋典・森山 英明・清水 暁生・高松 竜二^{*1}・富永 伸明・
大河平 紀司・原楨 真也・柳原 聖・松野 哲也・下田 誠也・近藤 恵美^{*1}・村岡 良紀・
村田 和穂・井上 仁志・山口 英一・酒井 健・Richard GRUMBINE・嘉藤 直子・田中 彰則・
山崎 英司・鮫島 朋子・田端 亮・野口 欣照・焼山 廣志・中島 亨輔^{*1}・広瀬 裕美子^{*1}

<令和2年12月17日受理>

Introduction of a new subject “Exercises on Engineering I” by second grade students and subject teachers in the creative engineering department of Ariake Kosen

TAKEUCHI Norio, AKASHI Koji, NAKASHIMA Yosuke, MORIYAMA Hideaki, SHIMIZU Akio,
TAKAMATSU Ryuji, TOMINAGA Nobuaki, OKOBIRA Tadashi, HARAMAKI Shinya,
YANAGIHARA Kiyoshi, MATSUNO Tetsuya, SHIMODA Seiya, KONDO Emi, MURAOKA Yoshinori,
MURATA Kazuho, INOUE Hitoshi, YAMAGUCHI Eiichi, SAKAI Takeshi, Richard GRUMBINE,
KATO Naoko, TANAKA Akinori, YAMASAKI Eiji, SAMESHIMA Tomoko, TABATA Ryo,
NOGUCHI Yoshiaki, YAKIYAMA Hiroshi, NAKASHIMA Kosuke, HIROSE Yumiko

Three years ago, a new subject “Exercises on Engineering I” was introduced in the creative engineering department of Ariake Kosen. A system concerning laboratory assignments and management method for each laboratory were established. The results of students’ class evaluation questionnaire were good in most cases and some students contributed thesis and announced at the academic meeting.

1. 背景

有明高専は昭和38年の創設時に機械工学科・電気工学・工業化学科が設置され、建築学科と電子情報工学科の増設、工業化学科から物質工学科への改組という沿革を経て、27年間5学科体制で運用されてきた。科学技術分野の融合化・複合化が著しく進んでいる現代において、多様な知識や技術を有し、グローバル化にも対応できる新しいタイプの技術者をよりの確に育成するために、本校は平成28年度より学科を創造工学科の1学科に再編した。本学科は環境・エネルギー工学系としてエネルギーコース（Eコース）、応用化学コース（Cコース）、環境生命コース（Lコース）、人間・福祉工学系としてメカニクスコース（Mコース）、情報システムコース（Iコース）、建築コース（Aコース）の2系6コースの専門コースで構成され、2年生後期から各コースに配属されることになった。

2. 課題研究Ⅰについて

「課題研究Ⅰ」は、学科再編の際に創造工学科の特徴的な科目の1つとして設置された新科目であり、創造工学科所属の7名と一般教育科（G科）所属の10名の計17名の教員で2年生の学生約200名を担当している。前期1単位の必修科目で、成績は合否判定で評価される。到達目標は、①研究課題に取り組むことができる、②研究課題に対する思考方法を身につけることができる、③取り組みの成果をまとめることができる、の3点である。研究テーマは科学研究に限っておらず、一連の研究・探求活動が伴えば特に分野の制限は設けていない。本科目が平成29年度に開講されてから3年間の研究テーマ一覧を表1～3に示した。一般教育科の文系科目教員も担当し、幅広い研究テーマが並んでいる。研究テーマごとの実施方法や内容が異なることを考慮し、本校では2年生全員が集合して行う研究成果発表会等は実施せず、研究活動の成果発表およ

*1 元有明高専

び評価については各研究テーマの担当教員の方法に従うことにした。

表1 課題研究Ⅰの研究テーマ（平成29年度）

コース	研究テーマ名
E	・電気工事士に挑戦してみよう！ ・マインドストームでロボットを作ってみよう！ ・オーディオの世界を体験しよう！
C・L	・最新の科学（化学と生物）技術を調べてみよう ・校内の植物調査
M	・ロボットマニピュレータの研究 ～3D CAD・3D プリンタによるロボット製作～ ・ロボットマニピュレータの研究 ～コンピュータによる運動制御～ ・研究とは何か？ ～メカニクス創造設計学入門～
I	・情報技術あるいは人工知能がもたらす未来を考える
A	・生活空間の体験 ～建築人間工学からの環境デザインのために～ ・段ボールで強くて軽い橋を作る
G	・太宰府歴史探求 ～太宰府天満宮祭神菅原道真公の謎に迫る～ ・地図資料を使って地域特性を調べてみよう ・アニメ「ドラえもん」の世界を読み解く ・プレゼンテーションの極意を探る ～TEDで学ぶメディアリテラシー～ ・科学館を盛り上げよう！～展示作品の提案・製作・解説～ ・まちの魅力を発信しよう！～宝物調査とWEBサイト作り～ ・アメリカの数学科教科書の内容の検討 ・身近な言語表現に隠された意図を読み解こう ～楽しい言語学への招待～

表2 課題研究Ⅰの研究テーマ（平成30年度）

コース	研究テーマ名
E	・電気工事士に挑戦してみよう！ ・マインドストームでロボットを作ってみよう！ ・オーディオの世界を体験しよう！
C・L	・最新の科学（化学と生物）技術を調べてみよう ・校内の植物調査
M	・ロボットマニピュレータの研究 ・モーターサイクルエンジンの研究
I	・ジェネラティブ・アートを楽しもう！

A	・段ボールで強くて軽い橋を作る ・自分のからだをものさしにして身の回りの環境を測ってみよう！
G	・Film in Action ・スポーツ心理学に関する研究 ・環境に優しい超伝導体づくりを目指して！ ・竹あかりに挑戦！ ・強力な電磁石を作ってみよう！ ・物理・科学に関する自由テーマ ・整数・素数に関連する性質を調べよう！ ・「ハリー・ポッター」シリーズを原書で読む

表3 課題研究Ⅰの研究テーマ（令和元年度）

コース	研究テーマ名
E	・電気工事士に挑戦してみよう！ ・マインドストームでロボットを作ってみよう！ ・オーディオの世界を体験しよう！
C・L	・最新の科学（化学と生物）技術を調べてみよう ・校内の植物調査
M	・身近なメカニズムの仕組みを調べ、CADで作ってみよう！ ・モーターサイクルエンジンの研究
I	・ジェネラティブ・アートを楽しもう！
A	・段ボールで強くて軽い橋を作る ・自分のからだをものさしにして身の回りの環境を測ってみよう！
G	・超伝導コースターのコース作り ・Arduinoを使用した講座の企画 ・洋画を通じて英語の口語表現を学ぼう ・トレーニング実技と理論 ・「ハリー・ポッター」シリーズを原書で読む ・Excelでゲームを作ってみよう ・整数・素数に関連する性質を調べよう！ ・デザインして作って解説して

3. 実施方法

（1）研究テーマの決定・周知方法

2年生は初回の授業で担当教員から各研究テーマの説明を受け（図1）、その後その場で希望テーマを検討してもらっている。学生は提示された研究テーマに対して、第1希望から順にすべてのテーマに対して希望順位をつけて（平成29年度は第5希望まで）提出する。説明会当日に欠席した学生には後日希望テーマを調査し、全員分の希望がそろってから各テーマの第1希望

の人数を確認し、定員以内の場合はその希望者全員をそのテーマに配属確定、定員を超える場合は抽選によりそのテーマの配属学生を決定した。



図 1 初回授業におけるテーマ説明の様子

定員に達しなかったテーマについては、第 2 希望以降について同様の作業を繰り返し、すべての学生を希望順に配属させていった。表 4 に平成 30 年度の、表 5 に令和元年度の各希望順におけるテーマ配属決定者数および累計者数の状況を示す。例えば令和元年度は 2 年生の学生数が 208 であったので担当教員 1 名あたりの受け持ち学生数は最大 13 名であった。教員 2 名で 1 つのテーマを開講する場合もあり、その場合のテーマの定員は 2 倍の 26 名となる。配属方法は上述の通り、学生の希望テーマを初めに第 1 希望について並べ、全 14 テーマ(区分)中 5 テーマが定員を越えていたため、該当テーマについては抽選を行って配属となる 13 名をそれぞれ決めた。他の 9 テーマについては定員以内であったため、抽選をすることなく配属が決まった。次に配属が決まらなかった学生について第 2 希望について並べ、以下同様に配属を決めていった。いずれの年度も第 3 希望までに 88% の学生の配属が決まっており、ほぼ学生の希望通りに配属ができていることが分かる。ただし、この方法で進める場合、定員に達したテーマが次々に出てくるため、配属となるテーマが例えば第 8 希望以降は平成 30 年度の場合は 3 つ、令和元年度の場合は 1 つに絞られてしまい、結果的に第 14 希望や第 11 希望になってしまう事例が見られた。また、その講座の配属者数は他のテーマに比べて人数が少なくなった。なるべく学生が希望するテーマに配属となるように決めている方法であるが、学生全員の希望に完全に沿えるような方法ではなく、また、配属者数の偏りも見られ、今後の課題として認識した。

表 4 各希望順の配属決定者数 (平成 30 年度)

希望順	配属決定者数 (累計)	全体の割合 (累計)
1	162 名 (162 名)	75% (75%)
2	22 名 (184 名)	10% (85%)
3	8 名 (192 名)	4% (88%)
4	5 名 (197 名)	2% (91%)
5	6 名 (203 名)	3% (94%)
6	4 名 (207 名)	2% (95%)
7	5 名 (212 名)	2% (98%)
8	1 名 (213 名)	0% (98%)
9	2 名 (215 名)	1% (99%)
10	1 名 (216 名)	0% (100%)
11	0 名 (216 名)	0% (100%)
12	0 名 (216 名)	0% (100%)
13	0 名 (216 名)	0% (100%)
14	1 名 (217 名)	0% (100%)

表 5 各希望順の配属決定者数 (令和元年度)

希望順	配属決定者数 (累計)	全体の割合 (累計)
1	127 名 (127 名)	61% (61%)
2	33 名 (160 名)	16% (77%)
3	22 名 (182 名)	11% (88%)
4	8 名 (190 名)	4% (91%)
5	6 名 (196 名)	3% (94%)
6	5 名 (201 名)	2% (97%)
7	4 名 (205 名)	2% (99%)
8	1 名 (206 名)	0% (99%)
9	0 名 (206 名)	0% (99%)
10	1 名 (207 名)	0% (100%)
11	1 名 (208 名)	0% (100%)

(2) 活動の記録方法

1 回目の合同説明会であるが、2 回目以降の授業は各研究テーマの講座において担当教員の指示に従いながら進めていった。合否判定の科目であり、定期試験等は実施しないため、「授業実施記録表」を教員側で用意し(図 2)、毎回の授業後に受講学生に学修内容や感想、5 段階評価の理解度などを記入してもらった。1 名の教員で最大 13 名の学生を担当するので、1 班 3~4 名の学生グループを作って実施している教員が多いようであった。

H31年度課題研究Ⅰ・記録表

研究テーマ:

(担当教員:)

2年 組 番 氏名:

回数	日付	実施内容	コメント・感想	(5が最高) 自己採点
1	4/10	オリエンテーション 研究テーマ紹介		
2	4/17			

図2 授業実施記録表の雛型

(3) 活動成果の発表方法

上述した通り、活動成果の発表方法等は各研究テーマによって異なっている。成果発表会を実施する場合は事前に学内の全教職員に案内を送って質疑の場を設けたり(図3)、FD活動の一環として授業の取り組みを見て頂いたりしていた。



図3 講座内発表会の様子

また、前期の授業終了後も継続して学生が研究活動続け、自分達で作製した実験装置を学外での出前授業に持参して直接外部の方に説明したり、学会で発表したり^{[4]・[5]}、授業後に約1年かけて査読付き論文を投稿したり^[6]、地域の祭典「三池光竹2018」に出展したりするグループもあった。

4. 授業改善アンケートの結果

すべての授業で実施している「授業改善アンケート」において受講学生が記入した課題研究Ⅰの代表的なコメントを以下に記載する。関心のあるテーマで研究することができた影響か、前向きな意見が多かった。

- ・先生方が積極的に協力してくれたのでスムーズに実験を進めることができた。
- ・なるべく学生たちだけの力で問題や作業に取り組め

た点が良かった。

- ・普段できないことができて良かった。

また、年度末に実施した担当教員による意見交換会では以下のような意見が挙がった。

- ・学生のやる気がバラバラで難しかった。機械的にテーマを割り振っても良いのではないかな。

以上の意見を踏まえ、今後引き続き様子を見ながら進める必要がある。

5. まとめ

有明高専における創造工学科の新科目「課題研究Ⅰ」が開講されて3年が経ち、研究室配属の方法や各研究室における実施方法が確立されてきた。探求心に火がつき、学会発表や論文投稿で成果を残している学生もいる。引き続きより良い授業の形を目指す。

謝辞

本取り組みは本学内の複数の担当教職員の支援を受けて実施した。特に技術部の森田恵一氏、大木泰仁氏、松原征男氏らには多大な支援をいただいた。また、地域の市民団体で活動されている島村隆大氏および新谷肇一氏にもご協力いただいた。ここに感謝申し上げる。

参考文献

- [1] 月野沙南、鎌田英字佳、清水暁生、他、「小学生向けスピーカー工作教室に用いる教材開発」、2017年度電子情報通信学会九州支部学生会講演会・講演論文集(2017)。
- [2] Subaru Yokoyama, Keiun Satoh. "Development of a pulsed laser oscillation system using an inexpensive Q switch" Science Castle in Singapore, P-18 (2017)。
- [3] 高口裕太、野口瑠星、吉開駿、「小さい力で重いものを持ち上げる!～摩擦を考慮した動滑車に関する定量的調査～」第14回日本物理学会Jr.セッション、23JPSB-50 (2018)。
- [4] 河野優翠、岡本彩花、田中佑季、「ダイラタンシーの定量的分析～回転粘度と瞬間抗力の測定～」第14回日本物理学会Jr.セッション、23JPSA-33 (2018)。
- [5] 林拳士朗、鎌田真綿、松藤颯大、坂倉可紳、「3次元超伝導コースターの作成とその特性」、第4回高専生サミット、P-12 (2019)。
- [6] 高口裕太、野口瑠星、吉開駿、他、「摩擦を考慮した滑車」、大学の物理教育、Vol.24、No.3、pp.95-99 (2018)。

日本人英語学習者に対する質問指導に関する考察 ーポライトネスの観点からー

村端 啓介

<令和2年12月9日受理>

Teaching Japanese English Learners Questioning Skills

ー From the View of Politeness ー

MURAHATA Keisuke

Learning to create and politely ask questions is an important skill and encourages learning and deeper thinking. However, students rarely ask questions in class. Effective pedagogical techniques are theoretically discussed on this paper to increase questioning while addressing issues concerning politeness.

I はじめに

日本の学校教育の現場において「学生中心の授業」と聞くと、例えば英語の授業なら教員が用意したアクティビティに参加し、グループワークを楽しむ学生を思い浮かべるかもしれない。では、自ら手を上げクラスメイトの前で堂々と質問をする学生は浮かぶだろうか。筆者の感覚では、学校種を問わず多数の学生は必要以上の質問をしない傾向にある。ここでいう必要以上に質問をしない状態とは、議論を深め、学習促進効果のある質問を意識的・無意識的に発信しないといった学習機会の損失を生み出す状態を指す。英語教員である筆者に彼らが聞いてくる質問は宿題やテスト範囲を聞くものが多く、英語の文法や表現について込み入った質問が飛んでくことは稀である。加えて、フリートーク等のアクティビティにおいて、コミュニケーションの一環として英語での質問を活用できる、またはしようとする学生も決して多くはない。しかし、学生からの質問が少ないことはその必要性が低いわけではなく、むしろ学生にとって質問力は育成するべき力であるとして、日本の教育において質問をすることの重要性が説かれてはいるが（楠見，子安，道田，2011；道田，2011），その教育的結果は現状を見たところ芳しくない状況である。学生からの質問の頻度が低いその理由は何か、またいかに学生の質問の量と質を向上させるべきか、その一端を今一度解明すべきである。

本研究は、基本的に小学校から大学までの全ての英語科目授業を対象とした学校教育における質問指

導を推進し、英語教員が最終的に「より高次の質問が第二言語（英語）のできる日本人英語使用者」を育成することを最終目標とする。本論の位置付けとしては、その質問行為に影響を与えるであろう日本人のポライトネス観をもとに、質問行為とそれに必要な能力向上を目的とした効果的な指導法に関する考察を行うことである。

II 質問とは

1. 質問の定義

ここではまず本論における「質問」を定義する。南（1985）によると質問は以下の三点の条件によって成立するという。まず一つ目は、「相手の存在」である。独り言や自身での思考過程で疑問を表現する場合を除くと、コミュニケーション活動における質問には相手が必要である。この相手となる人物は質問を投げかける対象として発信者が選定する。異なる捉え方をすれば、質問の回答者となると強制的に何かしらの言語アウトプットを要求されることになる。二つ目は、「問題の提示」である。質問を投げかける相手に対して、何かしらの方法での解決の必要性がある問題・課題を提示することも、質問であるための条件である。最後は、「情報提供の要求」である。質問とは、言語行為によって提示された何かしらの問題・課題に対して、相手がその表現にふさわしい応答を考えることができるように要求する言語表現でなければならない。

ただし、上記の条件によって成立する質問も、状

況や発信者の意図や会話背景において、その機能や応答が変わる場合が考えられる。例えば、確認要求質問（例：今聞こえますよね？）、判定要求質問（例：お気づきになりますか？）、選択要求質問（例：その動物は大きさでいうと、50センチだと思いますか、それとも1メートルでしょうか？）、説明要求質問（例：この商品についてどう思いますか？）等がある（国立国語研究所、1960）。加えて、修辞疑問文のような（例：誰に向かってそんな口聞いているの？）直接的な情報要求機能以外の質問も存在する。このように、話者の目的によって質問はその形式が変わる。

これら多様な種類の存在に加えて、それぞれの質問の質が異なる場合もある。単純に物事の真偽を問うものや要求された情報を返答するのみならず、より深い思考や高次の認知活動を促す質問は「質の高い質問」とされる（King, 1995）。質の高低はその内容の良し悪しを判断するものではなく、使い分けによってよりの確にコミュニケーションの目的を果たすことができる。ただし、質の高い質問に関してはその生産過程においてより高次の認知能力を要するので、意図的に用いる場合はそれ相応の訓練が必要であると推測される。

これらを踏まえた上で、本論での「質問」は、『異なる種類や質の表現を用いて、情報の提供要求や、より高次の認知活動を促す目的のために行われる言語行為』とする。そしてこの定義であるように状況によって機能や質が異なる「質問」を効果的に使いこなすためには、それに相対した質問能力が必要である。以下ではその質問を有効的に使用するために必須である能力についてまとめる。

2. 質問に関する能力について

本論では最終的に日本の英語教育にてより質の高い質問行為を外国語で行えるように指導することが目標である。そのために、状況に応じた適切な質問をするためにはどのような能力が重要視されるべきか、ここでは実際に質問として言語アウトプットをするまでに必要な能力を本論では二つに分けて考える。

まず一つ目に、質問生産能力である。この能力は、ある対象を多角的に観察・分析することで自分にとって必要な情報、またはコミュニケーションの流れを明確にできる能力である。この質問生産の過程においては、既有知識（Van der Meij, 1990）と言語能力（Van der Meij & Dillon, 1994）が最終的な生

産量と質に影響するとされている。そして、そもそも質問をする場合、その目的に限らず質問者は自らが要求する情報、または質問をする目的を設定する必要がある。言い換えると、意識的または無意識的のどちらにせよ、自分に足りない情報は何か、何がわからないのか気づき、そして疑問感を抱くことが質問行為を行うために必須である（Dillon, 1998; Dillon, 2004）。そのために、ある対象の物事に対して、疑い、驚き、無知、無理解、不確かさ、困惑を感じる心理的な状態であることも、質問の発生条件である（Dillon, 1998）。この質問を生産するきっかけに関しては、基本的には個人の経験や対象への興味の有無によって頻度や程度が異なる。

そして二つ目は質問伝達力である。この能力は、生産能力によって生産された質問内容を、より適切な状況において適切な方法で伝達できるように文法やその他のコミュニケーションスキルを適宜選択し使用できる能力である。前述した多角的視点も重要ではあるが、この適切な方法を選択できる能力に関しては、その状況判断に文化的背景とその差異が影響する場合が多く、質問をする相手に合わせた質問ができる能力はこのグローバル社会では必須項目とも言える。

上述の質問に関する能力に焦点を当てた効果的な指導が、学習者の疑問感の発生頻度を高くする可能性があるのではないだろうか。さらにその質に関しても、よく練られた質問をするためには高次の思考能力が必要だが、この能力が自然発達するとは考えにくい。よって、質問を考える訓練を経験することが学習者の質問力を向上させるためには必要であるとも考えられる。特に礼儀を意味するポライトネスの観点で言えば、質問をすること自体、そして誰にいつ質問するかを考慮した言語使用に関する指導はこれまで多く行われてこなかったと思われる。日本人としての質問の用途がその他の外国人のそれと乖離している可能性を考慮した指導が実現すれば、これからの英語学習者が経験する異文化衝突を軽減できるかもしれない。以下では、日本人のポライトネスストラテジーがどのように日本人の質問の用途に文化的な影響を及ぼすのか、その様相について考察する。

III 日本人のポライトネス観と質問

ここでは、より具体的にどのように質問指導を日本人英語学習者に対して行うべきかを検討するために、日本人のポライトネス観とその考えられる影響

を考察する。

まず、学校教育現場という枠を外して考えてみても、日本語母語話者はそもそも基本的に質問を発する頻度が低いのではないかとBrown & Levinson (1987)は、自分が属する文化的・社会的グループ内において、自らが他者にどのように扱われたいのか、コミュニケーションにおける何らかの願望を抱いているとしている。例えば、何かしらの社会的コミュニケーションを他者と取る場合、他者との不必要な言語交流を避けたいという欲求を優先する行為を選択する傾向があるものは「ネガティブフェイスホルダー」に分類されている。反対に、基本的な欲求として、他者からの承認や称賛を求める傾向にあるものは「ポジティブフェイスホルダー」に分類されている。Brown & Levinsonによると、日本語母語話者はネガティブフェイスホルダーであり、他者との精神的・社会的な距離を極力保ちたいという欲求を持つという。この日本語母語話者の性質を考えると、内容はどうであれ、発信側として質問をするという相手に強制的に返答を要求する行為は、ネガティブフェイスホルダーの心情を脅かす恐れがある。万が一質問をする必要があった場合でも、敬語表現など受け手が期待する文法的な構成や質問をするタイミングを見計らう必要があり、できるだけ質問をしない方が誤って他者を不快にする可能性が低いのである。気を使わないといけない精神的距離があればあるほど、あえてその行為を回避する可能性は高くなるとも考えられる。このことは質問の発信がしづらいということだけではなく、質問の受信をもあまり好まない人の存在がいる可能性も示唆している。なぜなら質問を受けることは不必要な要求を依頼されることになり得るので、他者へ割く時間が強制的に生まれるのである。結果的に、自己への他者の介入のきっかけとなりうる質問を受けることすらも、ネガティブポライトネスストラテジーを理由として敬遠する日本人も少なくはないと予想できる。反対に、Brown & Levinsonがポジティブフェイスホルダーに属するとした欧米人は、日本人よりも質問行為の頻度が高く、授業中に周りの目が気になるという他者への配慮が質問をしない理由である程度も低いとされている(祐宗, 無藤, Shwalb, Shwalb, 仲野好重, 1994)。つまり、欧米人と異なる質問行為への受容態度を日本人は持ち合わせている可能性があり、やはり質問行為の受け手がどうあるべきかをも視野に入れた指導が重要になると言える。

授業内における質問に関しては、授業スタイルに

よって異なるが、その行為自体が基本的には重要視されていない状況である可能性が現状では高い。例えば、質問をする個人に対して、他の学生がその行為者に対して「変わった人だ」や「目立つ行為をした」と認識し、質問行為に対してネガティブなイメージを有している言われている(祐宗, 河本, 浜崎, 川崎, 西川, & 高野, 1996)。学生にとって教員が授業中に直接的に返答を要求する時、つまり教室の権威が発言を義務化したとき以外の質問は、日本人のポライトネスストラテジーを考えると授業の進行の妨げと判断する人も少なからず存在するはずである。その質問がいかにかその他のクラスメイトに対して学習促進効果があるとしても、強引に自分のペースで発言をしたと捉えられうるのである。このようなクラス内の学習環境において質問することが阻害されているような状態である場合、学習者は質問することを重要視しなくなる傾向にある(無藤, 久保, & 大嶋, 1980)。この悪循環に陥ってしまった教育現場において、実際に授業内での学生からの質問が少ないことが指摘されている(柴田, 1991; 東谷, 2007)。質問をしないのか出来ないのかは別問題であり、そもそも質問が浮かぶ頻度が少ない可能性も考えられるが、目立つから、変わった人だと思われるからといった理由で質問したいのに出来ない状況は学習環境として適切ではない。学生にとって学ぶ機会の損失に繋がる問題がいまだに解決されているとは考えにくく、言語学習の場に限らず教育現場ではこれらの問題が軽視されている可能性は決して低くはないと思われる。

このような状況がこのまま続くと、学習環境として教室内での学習効率が悪くなりうることに加えて、日本語母語話者とは異なる感覚を行為に対して持つ外国人英語話者とはスムーズなコミュニケーションが取れない可能性も十分に考えられる。場合によっては質問をしない・できない状態が話を聞いていないというネガティブな態度として判断される可能性も考えられるので、結果的に質問をしないことが相手にとって失礼に当たることもある。この生まれ育った環境で培ったポライトネス観は、同じ社会的グループに属しない人に対して器用に使い分けること、言い換えるとネガティブとそれに相対するポジティブ、それぞれのフェイスホルダーとしての振る舞いを自由に切り替えることは容易ではないかもしれない。しかし、異なる価値観を持つ人の存在を知り、さらに理解しようとする態度はコミュニケーション能力向上に繋がるだろう。ポライトネスの観点から

質問の使用について現状を認識し、特に日本人として自身が属する社会外の者に対して今後どのように質問行為と向き合うかを今一度検討するべきではないか。以下では上記の日本人としての質問観の考察をもとに、質問指導の日本の英語教育導入に関する利点を検討する。

IV 日本の英語教育で質問指導を導入する利点

日本人の質問行為について、ポライトネス観がその様相に、少なからず頻度に関して影響を与えることがわかった。それも肯定的とはいえない影響である。日本人英語学習者を対象とした質問指導導入が、最終的に上記のような状況を改善させ、学習者のコミュニケーション能力と思考力を向上させる利点があると本論では主張する。この章ではその導入に関わる利点を、それぞれ1)学習内容として導入する利点と、2)学習補助機能として導入する利点の二点に分けて述べる。

1. 学習内容としての質問指導効果：コミュニケーションスキルとして

質問行為指導を導入すべきである理由として、まずは英語のコミュニケーションスキルとして質問を活用することで、容易に会話の主導権を握ることができるという利点が考えられる。これは英語を実践的に学習する授業を想定した利点である。授業内外に限らず、特に英語を実際に使用する実践の場においては、質問発信行為には会話のトピックを設定する機能がある。政治や文化、宗教など、自分に馴染みのないトピックをもとにした会話は英語学習者にとって難易度が高いが、トピックを変える、または最初から自分の設定する目的で質問を活用すると、自ら選んだトピックで会話をスタートさせることができる。具体的には、会話のはじめや直前のトピックに関する会話がひと段落した場面にて、「そういえば最近どんな音楽を聴きますか？」と質問すれば、アメリカの大統領に関する話題を避け、好きな歌手の話ができる。結果的に発言の機会増加が期待できる。質問の種類としては、返答が「はい」か「いいえ」の二択になるものではなく、開かれた質問(open-ended questions)を活用することでより会話の促進も期待できるので、率先して質問行為を行うことは学習機会を増やすことになる。さらに、スピーキングスキルとして、自身の会話内容の理解度を図るためにも質問行為は活用できる。わからない情報については質問をしてその情報の差を埋めることもでき

ることに加え、相手の話を理解した上で生産できる質問を投げ掛ければ、あなたの話を聞いていることをアピールする機会も作れる。コミュニケーションを実践的に学習する場合、質問行為は率先して学習すべき内容である。

2. 学習補助機能としての利点その1：学習環境構築効果

次に、学習内容ではなく学習補助として質問行為が行えるように指導すべき理由を述べる。これは、文法等の座学で英語または英語に関する科目を学習する場合を想定した利点である。まず、質問行為はより良い学習環境構築に効果的である。単純に、質問行為にはこちらが意図した何かしらの情報を相手から引き出すことができるという言語機能を有していることから、相手に質問すればするほどその相手を知ることができる。これは学習内容には直結しないが、クラス内でのクラスメイトや教員に関する情報を多く得られることで、知らない人に囲まれた状況よりも良い学習環境作りに効果的である。同じ学習環境を共有するものを知れば知るほどその相手との会話の理解力が上がり、さらには議論により生産性を持たせることができるのである(無藤, 久保, & 大嶋, 1980)。

同時に、学習内容の確認や応用に関する質問を通じた教員と学生のコミュニケーションを重視する授業では、教員にとっては学習者の学習進捗状況を知る手段となり、学習者にとってもただ講義を受ける授業スタイルよりも、質問内容を考えることで能動的に学習に参加する態度の育成にも繋がる。このことは学習内容の理解にも効果があるとも考えられている(無藤, 久保, & 大嶋, 1980)。さらに対話者に対する質問の難易度が上がることが両者にとって深い学びへと繋がり、結果的に学習者が学習内容に対してより多くの疑問を持つための刺激ともなり得るのである(辰野, 2009)。Bransford (1979) も、質問は有効な学習を促進するものであり、ただ事実内容を述べる能力よりも重要であると述べている。そして最終的には教員から学生のみならず、学生の問いかけを学生が回答する「児問児答」の教育へ転換を目標に、学問に対する追求心を育てる教育を展開するために重要なラーニングストラテジーとして、質問は効果的である。

3. 学習補助機能としての利点その2：質問生産過程における論理的思考能力強化

そして、質問指導を日本の英語教育で導入すべき最後の理由は、自ら質問の生産、伝達方法を意識的に考えて実行する過程を経ることで、論理的思考能力が鍛えられる点である。

例えば、質問生産過程において、質問の内容は正しいのか、既知な事実ではないか、自ら調査できる範囲の内容ではないのか、この質問の価値はどれほどのものなのか等に関して論理的に思考を巡らせることは、より有意義な質問を生産するためには必須である。学習者が積極的に質問行為を行うことで、学習内容と自身の理解度を知る機会が増加し、必要な情報とそれを得るための手段を自らが選択できるような訓練につながることも、質問指導の効果として期待できる。文化的に異なる価値観を抱くものが対話の相手である場合は、この質問生産の段階でその質問の内容が対話者の文化的にトピックとして適切かどうかを客観的に判断することになる。この質問の内容に関して適切かどうかの評価ができるようになれば、情報の取捨選択スキルが上がり、結果として学生自らがより高次な内容の質問を生産し使用することができるようになる。ただ自分の意思を伝えるのみならず、コミュニケーションの相手への情報開示要求を促すこの行為だからこそ、対話者とのやり取りにより注力する必要がある。よって、より論理的に考え、文化的な背景をも考慮した行為選択訓練が質問指導によって可能なのである。

次に、内容が定まった後にその質問を伝達する際には、質問をする相手やその状況を加味した伝達方法を選択する必要がある。日本人ならば年齢による文法の制限が存在し、相手と自分の社会的・精神的距離を考慮した伝達方法の選択が求められる。つまり、状況や相手に合わせた質問伝達方法を考える訓練を、質問指導を通して行うことができるのである。日本人以外が会話の対象である場合、多くは英語を使用する場合は多いことを前提にすると、まずは英語での疑問文習得が最低条件である。学習者がある程度の質問表現をアウトプットできるような段階に達した後、様々な条件等を考慮した上でその質問を伝達するのに適切な状況かどうかの判断を下すことになる。この時に、そのような外国人相手に質問をする状況を想定した活動、具体的にはポライトネスの概念を指導の内容として質問使用訓練を行うと、対話者の文化によって異なる質問をする適切なタイミングを選択できると推測される。この相手に合わせた言語表現の選択過程が、既知の事実から状況に適した判断を下すための論理的思考能力を高める可

能性がある。

以上のように、コミュニケーションスキルそのものとして、そして学習環境構築や思考能力強化に関して、質問行為指導導入はいくつかの利点が考えられる。ここからは実際にどのように質問指導を行うべきか考察する。

V 質問指導に関する教授法の在り方

この章では、具体的にどのように日本人英語学習者に対して英語教員が質問指導を行うべきか、その指導法について考察する。ここでは質問指導を三つに分けて、それぞれの指導の目的に沿った指導法を検討する。

1. 学習環境構築

まず、もっとも重要な項目は、質問行為を自ら遂行すること、そして受信する側に立つことに慣れるために質問に対する意識を変え、クラス内で質問をしやすい環境作りを行うことである。そもそも日本人のポライトネスストラテジーを考えると、適切な学習環境が整っていない場合、授業中に教員または他のクラスメイトの発言に割り込んだ質問が自然発生する可能性は低いと思われる。よって、まずは科目担当教員が率先して質問をするように学生に伝え、話を遮らないことよりも質問したいことがあれば聞くことを心がけるよう、学生に問いかけることが最初の一步になるだろう。これは他のクラスメイトの前で質問することを強制するのではなく、あくまでも割り込んだ質問をも許可・受容する空気づくりをすることが目的である。とはいえ、そのような即時的な質問行為を効果的に使用できるまで時間を要すると容易に想像がつくので、それと並行して、学生が学習内容に対して質問をする特別な時間を授業内で設けることも効果的である。手を上げてクラス全体の前で質問することに抵抗がある学生も少なからずいるであろうことも考えると、リフレクションタイムのように学生同士でも内容の理解度を確認し、都度必要であれば個別に教員へ質問ができるような機会は学生が学習内容に関する疑問点を探り出すために効果が期待できる。この方法だと、ラーニングストラテジーとしての質問活用機会が増えるので、学生にとっては質問ができる環境のもと学習を進めることができる。

この環境作りで重要なのは、指導する教員側が質問行為を学習の一環として認識し、学生からの多種多様な質問を学習内容に還元する役割として機能す

るよう対応することである。教員も学生同様に日本の文化圏内で育った人物である場合が多いので、学習者に対して質問を有効的に使用する手助けが十分に行えないことが懸念される。例えば、指導スタイルとして学習者の質問による授業の遮断を人一倍快く思わないとする教員は、質問の機会を別途設ける等の対策無しでは無質問状態で授業を進行することにもなるので注意が必要である。そして、質問が得られた場合も、何に対してどのような疑問を持つかは学生によって千差万別なので、質問の意図を適切に分析し、学生が必要とする情報が提供できるよう回答する必要がある。加えて、学習内容から外れた質問が出る可能性も考えられるので、その際には質問したことを褒めた上で、同時に本筋へのトピックのシフト作業を要する状況が考えられる。教員の役割がクラス内環境作りにおいて非常に重要である。

2. 質問生産・伝達訓練

次は、実際に質問を生産・伝達する指導について考察する。まずは質問の生産に関して、効果的だと思われる指導を考える。道田(2011)は、質問指導において指導内容を二つに分けて考えられるとしている。それぞれ、学習者に対して即興で質問行為を強要する方法と、もう一つは雛形を与える指導法があるという。以下がその例である。生田&丸野(2006)は三段階に分けた体験を通して、実際に小学生を対象とした質問作りを中心にした指導を行った。道田による分類の双方の属性を含む指導法である。その段階はそれぞれ、「疑問感への気づき体験」「質問を自己内で生成する体験」「質問を他者へ表出する体験」であり、社会科の授業として普段と同じような授業形態に沿うような指導での実験であった。質問生産体験の指導時に、King(1991, 1992)の質問語幹リストを使用したと報告されている。この実験の結果、児童の授業中の質問形成活動の分析によると、質問生成活動の有無と疑問感の生起の程度に肯定的な変化が見られたという。年齢的にまだ認知能力も言語能力も未熟な小学生を対象とした実験でも肯定的な効果が現れたことから、彼らより年齢の高い英語学習者に対する上記の体験を通した質問指導の効果は、より高い結果が期待できる。そして特に「疑問感への気づき体験」は、能動的に対象物を分析することによる多角的思考能力向上への効果が期待できるので、思考能力の強化という面でもこの指導法は有効であると考えられる。さらに、日本人学習者のポライトネスストラテジーを考えると、明

示的に質問生産を課すこの指導法は、日本人にとってクラス内で目立つことのない、全員が揃って取り掛かる作業として質問を作成することにもなる。よって、普段疑問が浮かんでも人前での発言を避けるためにあえて質問しない学習者にとっては質問を生産、そして共有しやすい環境である。ただ、英語でこの指導法を実行するためには高い言語能力が条件となってしまうので、母語のみ、または母語を交えた指導が必要な場面が予想される。

次に、日本人英語学習者にとって質問の伝達訓練を行う上で留意すべき点は、多数相手に口頭で質問をすることへの難易度が高いので、個人単位での活動という意識を希薄にし、集団で取り組むように指導することである。理由は、そもそも意見を発信することに慣れていないことも考えられるが、他者を邪魔してはいけないというポライトネス観による個人としての発言への配慮が発生する可能性が高いからである。その点を踏まえると、例えば、田中(1999)の質問書方式が日本人学習者にとって導入が容易であり、すぐに実行できる指導法である。質問書方式とは、講義の終了直前に学生が授業内容に対して質問を紙に記入し、それを提出する質問指導方式である。そしてこれを受け取った教員は次の授業でそれらの質問へ回答するという方法である。この方法はリアクションペーパー等の別称で既に実践している教育機関も少なくはないだろう。この指導の効果として、同研究にて実施されたアンケートの結果、実験対象の学生のうち約8割が物事を良く考えるようになったと回答している。そして同じく約8割が文章を読む際に疑問を持つようになったとも回答していることから、授業ごとに学習内容に関する質問を生産する機会を与える方法は効果が高い。この質問書方式の良い点は、質問伝達の過程が紙媒体を通すので、実際にクラス内で発言する方式に比べて教員への質問行為自体が間接的であり、クラスメイトの前で質問する必要がない。つまり、他の学習者の学習時間を妨げることなく質問ができるので、自分の質問が有意義なのか、聞く価値があるのか等他の学習者に配慮する必要性が低い。よって、この質問指導は、質問指導の導入として日本人英語学習者に適した指導である。さらに質問を記入する際に強制的に英語の使用を課すことで、言語アウトプットの機会増加にも繋がり、もちろん母語ではないことが理由で質問の質が低くなる可能性はあるが、英文の質問型の学習の場としても有効である。

このように、基本的には、質問の生産・伝達に関

しては学習者がグループまたはクラス単位で質問伝達まで段階的に行うアクティビティでの指導か、もしくは紙等に個人で記述する質問方式をもとにした指導が日本人英語学習者には有効だと考えられる。

3. より高次の質問生産・伝達のためのフィードバック指導

最後に、より高次の質問内容を生産する能力育成の際に特に重要であるフィードバックの活用についてここでは触れたい。ここで言うところの高次の質問とは、いわゆる批判的思考のもとに考え出された自己の意見や主張を交えて論理的に構築された、議論を深化させる機能を持つ質問である。答えが単一である単純な質問ではなく、即時で回答を得られる可能性が低い、さらなる思考に繋がるような内容を高次の質問とする。小野田&篠ヶ谷（2014）らは、より学習内容の理解を深化させるためには、ただ質問させるのみならずより高次の質問生産を促す指導が必要だと述べている。ではこの能力を向上させるフィードバックを用いた指導法はどうあるべきなのか。

結論からいうと、教員から指導目的に合わせたポジティブフィードバックを学習者の質問内容に対して行う機会を設けることが効果的であると考えられる。まず、石原&泰山（2020）の研究によると、教員のフィードバックは学習者の認知的欲求を増幅させる効果があるという。そして批判的思考能力の態度に対しても肯定的に作用することが報告されている（Pedrosa, Guerra, Feehily, Williams, Kyomuhendo, Seeam, & Zhang, 2018; 豊田・黒岩, 2003）。さらには、教員からのフィードバック有無が質問の質に影響することを指摘し、十分なフィードバックを行った実践報告では実際に批判的思考のもと生産された良い質問の発現が増加したとの研究もある（小山, 2017）。授業中であれば、教員は学生から質問があればその内容に対して返答をする。しかし、内容自体、またその疑問の内容の論理展開に対して評価を下すのは授業の流れが止まる等の可能性があるため、教員がフィードバックを与える機会は意識して作らなければあまり多くはないかもしれない。

学習者へのフィードバックに関しては、その指導目的によって効果的なフィードバック方法は異なる。まず、学習内容として質問行為を指導する場合は、総括的フィードバック（Summative Feedback）が有効活用できる。この実践的に英語でのコミュニケー

ションを学習するタイプの授業では、英語で質問できるようにすることが学習目標になるので、単元の終わりに定められた評価基準をもとに質問の複雑さや頻度を評価することで、学生は自身の質問力の程度を詳しく知ることができる。より細分化された項目に対するフィードバックを学生に与えることができる反面、評価基準の設定と評価行為自体が教員の負担になることはデメリットである。これに対して、学習補助機能として質問を指導する場合には、基本的に形成的フィードバック（Formative Feedback）を中心に指導に当たるべきであると考えられる。形成的フィードバックは、例えば授業内で発言された質問に対して、その内容の質を即時的に教員が評価をすることで実行できる。よく考えられた良い質問が授業中に学習者から発せられたとして、教員がその内容へ返事をする前にその質を褒めることで、質問内容の質の評価と、さらに良い質問としてのモデルを他の学生に提示することが可能である。この種類のフィードバックの利点は、学習補助としてメインの授業内容から脱線しすぎないよう簡潔にフィードバックを行うことができることと、そのために教員の負担が比較的少ないことである。ただし、フィードバックの量や質も総括的なフィードバックと比べて下がるのが欠点である。

そして、このフィードバック指導に関しても、やはり日本人のポライトネス観を考慮しない指導はその指導効果が減少する可能性があることをここで述べたい。具体的には、褒めを併用する等ポジティブフィードバックを駆使して指導に当たることが推奨される。その理由は、フィードバックを与える者と受け取る者の間に高い親密度があり、さらに地位差がなく平等な関係である場合にフィードバックは「成長促進効果」として作用するが、そうでなければ「安定阻害効果」が発動し受け手の自尊感情を脅かす可能性が考えられ（佐野, 吉永, 吉田&森本, 2012）、特に日本人学習者にこの作用が顕著にみられるかもしれない点である。実際に、学生に対して多角的な考え方や、論理的思考法についてアドバイスしたつもりが、反対に学生のモチベーションを下げてしまう状況に筆者は何度か遭遇している。フィードバックも本質的には指摘であり、批判にもなりうるのである。同じ他者への指摘でも、伝え方によってフィードバックではなくただの「ダメだし」になってしまう状況もあることを念頭に入れた指導が重要であり、建設的な指摘も学習者が否定的に捉えてしまうと指導の効果が逆効果になってしまうこと

を見過ごせない。このことはネガティブフェイスホルダーを持つとされる日本人英語学習者にとってフィードバック指導の壁を示唆している。とにかく他者からの不必要な介入を避けたい日本人にとって、そもそもフィードバックを受けること自体が避けたい行為である可能性が考えられる。なぜならフィードバックの対象が人格に対してではなく内容であっても、「批判＝攻撃」であると認識してしまう場合が考えられ、結果的に学習機会よりも自己安定を選ぶ学生がいることが予想される。そこで褒めを多用したポジティブフィードバックを実行することで、批判やダメ出しではなく、加点方式で良いところを伸ばす指導が、教員の声が届きやすいかもしれないという意味で日本人には効果が高いのではないか。さらにフィードバックよりも褒めを中心とした発言では、その受け手に期待される言語的要求は、その方法は異なるとしても、ただ褒めを受容することである。つまり、明示的に改善行為を強制することを回避することも可能である。加えて、Dörnyei (2012) もポジティブフィードバックは学習環境である教室の雰囲気をよくすると述べているので、結果的に教員との親密度の向上への貢献も期待できる。

この章では、質問指導において具体的にどのような点に焦点を当てた指導法が効果的なのか考察を行った。結果的に、日本で教育を受け育った日本人英語学習者にとって、文化的側面を考慮しない一般化された指導法では効果が薄いのではないかという推測に至った。英語での質問力を鍛えるべく、今後は指導の効果がどの程のものなのか、実際に指導した実践報告を行い、その効果について調査を行いたい。

VI おわりに

本論では、質問行為に影響しうる日本人英語学習者のポライトネスに注目し、今後日本人英語学習者が発信する質問の量と質を向上させる目的である指導法について考察した。ネガティブポライトネスが優勢である日本人にとって、質問行為にもその独自のコミュニケーションスタイルが反映される可能性が高く、他の国の文化の価値観とは差異が見受けられうる可能性が浮かんた。中でも批判的思考能力とポライトネスの関係は現在まで多く研究されてこなかったが、本論での考察によると、その指導の際に特別に考慮しないといけない日本人特有のコミュニケーションスタイルが存在しうることがわかった。

今後は、実際に日本人英語学習者が質問行為をどのように認識・活用しているのか、またポライトネ

スストラテジーが実際にどのように批判的思考能力やその伝達に影響をするのかを調査したい。加えて、日本人英語学習者に対する質問行為指導に関して、本論で触れた指導法の効果を調査し、最終的により多くの英語話者相手と対等に議論をする力の育成を図るべく、研究活動を続けていきたい。

参考文献

- (1) Bransford, J. D. (1979) *Human cognition: Learning understanding and remembering*. Wadsworth, Belmont, CA
- (2) Brown, P., & Levinson, S. C. (1987). *Politeness: Some Universals in Language Usage*. Cambridge: Cambridge University Press.
- (3) Dillon, J. T. (2004). *Questioning and teaching: A manual of practice*. Wipf and Stock Publishers.
- (4) Dillon, J. T. (1998). Theory and practice of student questioning. *Strategic Help Seeking Implication for Learning and Teaching*.
- (5) Dörnyei, Z. (2012). *Motivational Strategies in the Language Classroom*. (2nd Ed.) Cambridge: Cambridge University Press.
- (6) King, A. (1992). Comparison of Self-Questioning, Summarizing, and Notetaking-Review as Strategies for Learning from Lectures. *American Educational Research Journal*, 29(2), 303-323. Retrieved April 15, 2020, from www.jstor.org/stable/1163370
- (7) King, A. (1991). Effects of training in strategic questioning on children's problem-solving performance. *Journal of Educational Psychology*, 83(3), 307-317. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.83.3.307>
- (8) King, A. (1995). Inquiring minds really do want to know: Using questioning to teach critical thinking. *Teaching of Psychology*, 22, 13-17.
- (9) Pedrosa-de-Jesus, H., Guerra, C., Feehily, R., Williams, H., Kyomuhendo, F. C., Seeam, A. K., ... & Zhang, C. (2018). Teachers' written formative feedback on students' critical thinking: A case study. *J. Educ*, 9(1).
- (10) Van der Meij, H., & Dillon, J. T. (1994). Adaptive student questioning and students' verbal ability. *The Journal of experimental education*, 62(4), 277-290.
- (11) Van der Meij, H. (1990). Question asking: To know that you do not know is not enough. *Journal of Educational Psychology*, 82(3), 505.

- (12) 生田淳一, & 丸野俊一 (2006). 「質問作りを中心にした指導による児童の授業中の質問生成活動の変化」. 『日本教育工学会論文誌』, 29 (4), 577-586.
- (13) 石原浩一, & 泰山裕. (2020). 「フィードバックと振り返りが学習者の認知欲求に及ぼす影響の検討」. 『日本教育工学会論文誌』, 44 (1), 105-113.
- (14) 小野田亮介, & 篠ヶ谷圭太 (2014). 「リアクションペーパーの記述の質を高める働きかけ」. 『教育心理学研究』, 62 (2), 115-128.
- (15) 楠見孝, 子安増生, 道田泰司 (編) (2011). 『批判的思考力を育む - 学力と社会人基礎力の基盤形成』. 東京:有斐閣.
- (16) 国立国語研究所 (1960). 『話し言葉の文型 1—対話資料による研究—』 秀英出版.
- (17) 小山悟. (2017). 批判的思考を促す日本語の授業. 『九州大学留学生センター紀要第 25 号』, (25), 91-106.
- (18) 佐野睦夫, 吉永千紘, 吉田祥子, & 森本亜美. (2012). 「人間・ロボット対話におけるフェイス脅威度を考慮したインタラクション制御」. 『第74回全国大会講演論文集』, 2012 (1), 19-20.
- (19) 柴田義松 (1991). 「低学年カリキュラムの構成原理について-問うことを学ぶ授業づくり-」. 日本教育方法学会 (編) 『学校文化の創造と教育技術の課題』. 明治図書, 東京: p. 109-118.
- (20) 祐宗省三, 河本肇, 浜崎隆司, 川崎健二, 西川勝美, & 高野清純 (1996). 「授業中における学生の無質問行動に関する教育心理学的諸問題」. 『第38回日本教育心理学会総会発表論文』. 74-75.
- (21) 祐宗省三, 無藤隆, Shwalb D., Shwalb B., 仲野好重 (1994). 「授業中における大学生の無質問行動をめぐる教育心理学的諸問題」 『日本教育心理学会総会発表論文集』, 34-35.
- (22) 辰野千壽 (2009). 『科学的根拠で示す学習意欲を高める 12 の方法』. 東京:図書文化社 .
- (23) 田中 一 (1999). 『さよなら古い講義—質問書方式による会話型教育への招待』. 北海道大学図書館刊行
- (24) 豊田努, & 黒岩督. (2003). 「「考え方」を学ぶ小論文指導におけるフィードバックが批判的思考力に及ぼす効果」. 『日本教育心理学会総会発表論文集 第45回総会発表論文集』, 602.
- (25) 東谷護 (2007). 『大学での学び方 - 思考のレッスン』. 東京:勁草書房. 質問力とは?
- (26) 道田泰司 (2011). 「授業においてさまざまな質問経験をすることが質問態度と質問力に及ぼす効果」. 『教育心理学研究』, 59, 193-205.
- (27) 南不二男 (1985). 「質問文の構造」. 水谷静夫(編) 『朝倉日本語新講座 4 文法と意味II』 39-74. 朝倉書店.
- (28) 無藤隆, 久保ゆかり, & 大嶋百合子 (1980). 「学生はなぜ質問をしないのか?」. 『心理学評論』, 23 (1), 71-88.

有明高専における英語習熟度別授業(3年生)の分析と考察(1)

山崎 英司・Richard T. Grumbine・村端 啓介・村田 和穂

<令和2年12月9日受理>

Analysis of Leveled English Classes at National Institute of Technology, Ariake College

YAMASAKI Eiji, Richard T. GRUMBINE, MURAHATA Keisuke, MURATA Kazuho

For three years, a leveled education class has been given to 3rd year Chemistry students at NIT-A. This experimental class was started with the aim of improving student motivation for English and was later included in the Global Engineering Project. TOEIC Bridge results were used to analyze the leveled classes, with an eye to finding better ways to teach English at NIT-A. This research shows effectiveness of top and bottom level classes in NIT-A, problems that we should solve in order to improve middle level class, and difficulty to keep the effectiveness for a whole year.

I はじめに

過去3年にわたり、有明高専の物質工学・環境生命コースの3年生に対して英語習熟度別授業が実施されてきた。この授業は当初は学生の英語に対する動機づけを改善することを目的として始まり、のちにグローバルエンジニア事業に組み込まれることとなった。このグローバルエンジニア事業では主に低年次の学生に対して英語および理工系教科において、国際的に活躍ができる学生の育成を目的としており、有明高専ではその達成状況をTOEIC Bridge テストのスコアを基にして今後数年に渡って調査することとなっている。

当校では常勤のネイティブスピーカーが授業を担当しているが、これまで貴重なネイティブスピーカーとの対話のチャンスを有明高専の学生が十分に活用できていたとはいえない。その理由として40人を超えるクラスにおいて限られた時間内でコミュニケーション中心の英語授業をすることの難しさと、有明高専の学生が入学時に持ち合わせている英語に対する学習意欲の低さがある。工業高専を志望して入学してきた学生は当然ながら「英語」よりも「数学」「化学」「物理」といった理系教科に対するモチベーションが高く、英語を学習するために高専を受験する学生は少ないのが現状である。また大学受験を控えた普通高校生にとって英語は好き嫌いのいかに問わず学習必須の教科である一方で、高専生にとっては英語の授業で落第しない程度に勉強しておけば、自身の英語力が試されることが二度とない可能性さえある。このように高専においては学生が自主的に英語に対するモチベーションを向上させる機会がほとんどないのである。

ゆえに我々高専英語教員にとってまず取り組むべきは高専生の英語に対するモチベーションの教科となり、正確な英文法の理解や英語語彙力の増強の補助だけでは足りないことになる。そういった状況の中でこの習

熟度別クラスを導入すれば、どのような改善が見込めるだろうか。まず英語力と英語に対するモチベーションが高い学生たちには、少人数での充実した英語コミュニケーションを機会を提供することが可能となり、より自発的な英語学習習慣の獲得につなげることが望める。

次に英語力がほとほとどの学生には、通常の教科書精読授業と異なるドリル形式の反復練習問題をさせることで、英文法の定着と語彙力の増強を同時に行い、TOEIC Bridge テストという適度な競争環境の中で満足のいくスコアを取ることで、学修到達度を実感させてモチベーションを向上させることができる。

最後に英文法があまり理解できておらず語彙力も乏しい学生に対しては、初歩的な中学英語からもう一度、英文法の基礎をわかりやすくゆっくりとしたスピードで学習することで、英語に対する苦手意識を払拭し、モチベーション向上のきっかけを与えることが可能になる。

このような思惑を持って実施された英語習熟度別授業がTOEIC Bridge のスコアにどのように影響しているのかを検証するのがこの報告の目的である。

II 習熟度別グループの分け方

この習熟度別授業を始めた際に、まず3つのグループに分けて実施することとした。2グループの場合は上位グループが20名超となってしまい、「少人数での充実したコミュニケーション」から遠ざかってしまう可能性があったためである。また4グループ以上に分けた場合、指導者が足りないおそれがあった。そのために各15人程度の3グループに分けることにした。各グループの特徴は以下のとおりである。

（1）上位グループ

上位グループはネイティブスピーカー1名が担当する。授業はEnglish Labと呼ばれるネイティブスピーカーの研究室と隣接した部屋で行われ、各学生からの英語での発話がしやすいようなアットホームな工夫が施された空間で実施する。授業中は日本語の使用を控え、英語中心でのコミュニケーションを行う。教材もコミュニケーションを前提としたものとなり、リスニング・スピーキング能力の向上も狙うものとなる。

（2）中位グループ

中位グループは専攻科生2年生2名がTAとして指導する。場所は図書館棟1Fのセミナー室となり、隣接した多目的室で下位グループを指導している日本人英語教員が適宜サポートに入る。教材は総合英語問題集を使用して、学生の英語力の向上を図るとともにTAの専攻科生でも利用しやすいものとしている。

（3）下位グループ

下位グループは日本人英語教員が基礎から英語を指導する。場所は図書館棟1Fの多目的教室となり、隣接したセミナー室で指導しているTAのサポートに適宜入る。教材は高校初等クラスの英文法問題集と比較的読みやすいリーダー教材を使用する。

なお成績処理に関しては、TOEIC Bridge テストの結果を70%、ポートフォリオを30%として算出している。TOEIC Bridge テストの結果は実力テストであり試験勉強などによる対策を立てることが不可能なため、そのまま成績に組み込まずにクラス内での得点分布を基にした相対評価として処理をしている。またポートフォリオに関してもグループ間で平均点に差が出てしまい「学生自身の英語力ではなく、どこのグループに所属したかによって成績が変動する」といった不均衡が生

じないように留意している。

各グループの所属は一年間継続するものとして、途中でのグループ変更は認めていない。そのため前年度のグループ分けの際に、学生本人が異なるグループでの学習を希望したときにはその意志を尊重して無理のない範囲で別グループへの移動を認めることもあった。

III 各グループの平均点比較

習熟度別クラス在学中の各グループの所属学生数とそれぞれのグループのTOEIC Bridge 平均スコアを比較したものが表1である。一部例外はあるものの、おおむね上位グループがもっとも高い平均スコアを獲得しており、それに中位グループ、下位グループと並んでいる。2019年に3年全コースで実施されたTOEIC Bridge テストにおいては、3CLの下位グループの平均スコアが、他のコースの平均スコアに近いものとなっており、全体として英語習熟度別授業に一定の効果があることを裏付ける結果となっている。

一方で7月の前期末に受験したスコアよりも、半年後の1月の学年末に受験したスコアの方が低いグループが中位グループと下位グループにそれぞれ一か所ずつあり、英語習熟度別授業の中位・下位グループの教育が継続的にTOEIC Bridge スコアアップに貢献しているのか疑問がもたれる箇所もあった。

なお2020年度の7月よりTOEIC Bridge のIPテストはそれまでの190点満点から100点満点へとスコアのスケールが変更された。また2点刻みだったスコアも1点刻みで算出されるようになり、2019年度までのスコアとの比較がやや難しいものとなっている。こちらの表1では2020年度の各グループの平均点のみを単純に1.9倍に変換し、過去のデータと比較しやすい数値を算出して掲載している。その影響のためか、上位グループの平均点が昨年までとあまり変化がないのと比較して、中位・下位グループの平均点は2018・2019年

表1 各グループの所属人数および平均点

	2018年度			2019年度			2020年度	
	人数	7月	1月	人数	7月	1月	人数	7月
3CL 上位グループ	16	136	137.6	14	129.9	135	19	129.1
3CL 中位グループ	20	118.9	119.8	16	118.1	114.8	18	106.6
3CL 下位グループ	10	109.8	105	15	116.3	118.3	7	88.5
3年 他コース				175		118.9		

（注）・各グループ平均点は中途休退学生・原級留め置き学生・留学生を除外して算出。

・3年生全員に向けての1月のBridge一斉テストは2019年度より実施。

・2020年度より100点満点に算出方法が変わったため、従来のスコアと比較できるように2020年度のスコアのみスコアを1.9倍にして算出。

度よりもかなり低いものになっている。

この傾向の原因としていくつかの理由が推測される。一つは新しい TOEIC Bridge の 100 点満点のスコア算出方法では英語能力の低い学生に対して従来よりも低めのスコアが出やすくなっている可能性である。TOEIC Bridge は TOEIC 受験につなげるための「橋渡し」として国際ビジネスコミュニケーション協会により開発されており、そのスコア算出方法は協会により秘匿されている。そのため受験対象が主に中学生から高校生までの英語学習到達度が幅広い学生たちであることから、上位の学生たちに細かいスコアの差をつけるよりも、学習途上の学生たちに細かい評定差を提供するような採点スケールとしていることが推測される。

もう一つの理由として 2020 年度のコロナウィルスの感染拡大により、2020 年の前期の英語関連の授業の大半が遠隔授業になり、自学自習の習慣が定着していない学生の英語力低下を招いてしまった可能性が考えられる。こちらについては今後のデータ収集によって 2020 年度特有の問題であったのかどうかが明らかになるであろう。

IV 同一グループ内での平均点の変動

次に各グループにおける TOEIC Bridge の平均点の変動を表 2 を基にして確認する。習熟度別授業の主な目的は学習到達度にあわせて少人数にグループ分けされた学生たちにきめ細かい指導を行い、学習到達度を着実に上昇させていくことである。ゆえに有明高専

の英語習熟度別授業においては TOEIC Bridge のスコアが年間を通じて右肩あがりに上昇していくのが理想となる。そのため表 2 では各テスト間および 1 年間でどの程度スコアが上昇／下降したのかを「変動値」として掲載している。

まず 2 年生後半にグループ分けの根拠となるプレテストだが、プラスマイナス 5 点程度の差はあるものの全体的に例年同じぐらいのスコアとなっている。2019 年度のみ各グループ間のスコア差が縮まっているように見えるが、それがスコアの変動に影響を与えているようには見えない。これは 1・2 年での混合クラスで実施されている英語教育において、一定水準の学習内容を学生たちが学習していることを示している。

次に通年変動値を見ると、いずれのグループでも平均点は向上しており、学生たちの年間を通じての英語力の向上を確認できる。特に 2019 年度の下位グループは伸び幅が大変大きく、学習効果が非常に高い授業が展開されたようだ。上位グループにおいてもある程度の得点上昇が確認できる。しかし一方で中位グループでは平均点の伸び悩みが確認され、年間を通じてかろうじて上昇してはいるものの、他グループと比較するとかなり伸び幅は小さい。中位グループは専攻科 2 年生の TA による指導を中心としたグループであるが、教員ではなく専攻科生が指導していることもあり、質問しやすい学習環境となる一方で、教員に指導されなければ学習に集中できない学生が一定数存在しているのかもしれない。

表 2 各グループの「プレテスト→前期末試験→学年末試験」における平均点変動

二〇一八年度		プレテスト	(変動値)	前期末	(変動値)	学年末	通年変動値
	3CL 上位グループ	133.2	(+2.8)	136	(+1.6)	137.6	+4.4
	3CL 中位グループ	119.7	(+1.5)	121.2	(-0.1)	121.1	+1.5
	3CL 下位グループ	98.8	(+11.0)	109.8	(-4.8)	105	+6.2
二〇一九年度		プレテスト	(変動値)	前期末	(変動値)	学年末	通年変動値
	3CL 上位グループ	128.9	(+1.0)	129.9	(+5.1)	135	+6.1
	3CL 中位グループ	112.0	(+6.1)	118.1	(-3.3)	114.8	+2.8
	3CL 下位グループ	101.4	(+14.9)	116.3	(+2.0)	118.3	+16.9
二〇二〇年度		プレテスト	(変動値)	前期末			
	3CL 上位グループ	133	(-3.9)	129.1			
	3CL 中位グループ	115.3	(-8.7)	106.6			
	3CL 下位グループ	94.3	(-5.8)	88.5			

(注) 各グループ平均点は中途休退学生・原級留め置き学生・留学生を除外して算出。

2020年度より100点満点に算出方法が変わったため、従来のスコアと比較できるよう2020年度の前期末のみ、100点満点のスコアを1.9倍にして算出。

最後に前期の変動値（プレテスト→前期末）と後期の変動値（前期末→学年末）を比較してみると、いずれのグループにおいても前期の変動値の方が高く、後期の変動値は「若干のプラス」または「マイナス」となっていることがわかる。前期を終えて新しい授業形態に慣れた学生には、後期の習熟度別授業があまり刺激に繋がっていない可能性がある。特に2年連続で「マイナス」となっているのはやはり中位グループであり、こちらのグループの運用方法が有明高専の習熟度別授業の展開において最も大きな課題となる。

なお2020年度においては前期の変動値が全てマイナスとなっている。これは先に述べたTOEIC Bridgeテストのスコア算出方法の変化と、コロナウィルスの感染拡大による対面授業の時間数不足によるところが大きいと思われる。引き続きデータ収集を行うことでその原因が明らかとなるのを待ちたい。

V 分析結果と今後の習熟度別授業への提言

今回のTOEIC Bridgeスコアの分析によりわかった課題とは「中位グループの平均スコアの伸び幅が小さいこと」と「前期の伸び幅と比較して、いずれのグループにおいても後期の伸び幅が小さい」ことであった。一方で下位グループにおいては他のグループと比較して大きなスコアの上昇が見られ、現時点での有明高専での習熟度別授業は「特に下位グループの学生に年度前半で大きな効果を期待することができる」といえる。また上位グループに関しては大きな伸び幅は見られなかったが、後期の伸び幅が極端に下がることもなく、前後期ともに安定したスコア上昇効果を見込めることがわかる。まだ実質的に2年半のデータしか収集しておらず、習熟度別授業の非対象グループである3年の他コースのデータが不足しているため、習熟度別授業の効果に対して結論を下すにはやや時期尚早ではあるが、これらの分析結果を基にして以下の提言を行いたい。

（1）今後の上位グループ運営に対して

上位グループは一定の英語力をすでに獲得していると思われるが、スコアの伸び幅がまだ小さい。その理由として考えられるのは、精読中心の英文読解によりTOEIC BridgeテストのパートVのような長文読解でスコアを稼ぐことができていないからかもしれない。そうであればより早く英文を理解し余裕を持って問題に取り組むことで大幅なスコアアップを望むことが可能となる。よって長文速読のスキルを学んだり、ネイティブスピーカーの教員の下で使用頻度の高いフレーズを多く学習して、リスニングパートでも話の展開の先

を読んで解答できるような技術を身に着けると、効率的なスコアアップにつながるのではないだろうか。

（2）今後の中位グループ運営に対して

中位グループに関してはTAとして活動する専攻科生にとっても英語に対するモチベーションアップにつながる有意義な時間となっているようである。ただスコアアップの効果は他の2グループと比較するとかなり見劣りしてしまうのが実情である。もしもここにもう一名非常勤の英語教員を配属させることができるならば、相応の効果を見込めるかもしれない。TAの採用をこのまま続けるならば、小テストや模擬試験の類を教材として与えて、グループ内での競争意識をもう少し刺激する必要があると思われる。また英語ができることによってメリットを享受していることをTA自身が体現できればそれを中位グループに所属する学生のモチベーションアップにつなげることができるかもしれない。

（3）今後の下位グループ運営に対して

下位グループに関しては現状では非常に効果的な運用がなされているようだ。おそらく初歩から英語を学習しなおすことによって、中学時代から高専2年生までで教わってきたこと総復習の機会を得て、それがスコアに反映されているのだと思われる。一方で後期のスコアの伸び悩みは大変もったいない。これは英文法の基礎は再構築できたものの、より難しい英文を理解するための語彙力の不足によるものと思われる。よって下位グループにおいては後期により一層語彙力の増強を図るべく単語テストを実施したり、接尾辞・接頭辞の理解を深めたりすることが、より効率の良いスコアアップにつながると思われる。

VI まとめ

この報告により英語習熟度別授業そのものの効果についてある程度実証できたと思う。学生たちが受講している英語授業はこの授業だけではなく、検定教科書を使用した英語授業も実施されているため、そちらのおかげで学生の英語力が増強されていることも否めないが、グループ分けして行った学習の結果、それぞれのグループに特徴的な結果が表れており、これは英語習熟度別授業の効果によるものとみなしてよいだろう。

今後はこの結果を基にして、わずか1年間しか実施できない習熟度別授業を通してより効率よく英語学習を行い、その結果がTOEIC Bridgeのスコア上昇や4年次学生の英語授業に対するモチベーションアップ、およびTOEICスコア上昇へとつながっていくように工夫

を絶やさないようにしたい。その一環として2021年度には建築コース（Aコース）でも英語習熟度別授業を実施する予定である。そちらに関しては上位グループに TOEIC 受検経験が豊富な日本人英語教員を配置し、英語コミュニケーションのみならず、より実践的な学習方法を実施することになっている。中位・下位グループに関してはCLコースと同様の形式となるが、年度途中でのグループメンバーの入れ替えを TOEIC Bridge 模擬テストによって行い、今回の課題であった後期に見られるスコア上昇の中だるみを解消する計画である。

謝辞

最後に、習熟度別授業の開始を認めていただいた高橋薫前校長、現在も学生の英語力向上に取り組んでいただいている江崎尚和現校長には深く感謝したい。また英語習熟度別授業の実施に率先してご協力いただいている物質工学・環境生命コース（CLコース）の先生方にも謹んで感謝する。

「自然」の声を聴け

—英米文学作品における“Nature”をめぐって—

(2)

村田和穂
 <令和3年1月8日受理>

Listen to the Voice of “Nature”

—With Special Reference to “Nature” in English Language Literary Works—

Paper Two

MURATA Kazuho

As a continuation of my study of “Nature” in English (and Japanese) literary works, my second paper focuses on the following contents: the relationship between “Nature” and “God” (the second time) in Section 1; Infection and “Nature” in Section 2; *Natsume Soseki* and the “Supernatural” (in Japanese) in Section 3; “Nature” in Fielding (introductory) in Section 4; the concluding remarks on the epigraph in Section 5.

NATURE UNITES US

Every day, everywhere, our connections to **nature** are infinite. (The Nature Conservancy)

(自然は私たちを一つにする)

毎日、どこでも、私たちの自然との結びつきは無限である)

1. はじめに：「自然」と「神」の関係（2）

18世紀のイギリスの詩人、ポープ (Alexander Pope: 1688-1744) は、哲学詩とでもいうべき『人間論 (An Essay on Man)』(1734)の中で、「自然」と「神」の関係について次のように述べている：

All are but parts of one stupendous whole,
 Whose body **Nature** is, and God the soul; (Epistle I,
 267-268; p. 249)

(全ては一つのとても大きく大きな全体の部分に過ぎず、その全体としての体が**自然**であり、神はその魂である¹⁾)

慣用句でもある “body and soul” (肉体と精神) の

“body” が「自然」で “soul” は「神」というのは非常に興味深い見解である。ポープはマクロコスモス（大宇宙）を念頭に置き、このメタファー（隠喩）を用いているのだが、これはミクロコスモス（小宇宙）としての人間のイメージを敷衍したものと解釈できるだろう。この詩人は「自然」を「形而下」（有形で目に見えるもの）を総括するものとして “body” に、「神」を「形而上」（無形で目に見えないもの）を総括するものとして “soul” に見立てている。そもそも「肉体」と「精神」は互いに対立する「二元論」の典型として常に引き合いに出されるが、実は片方だけでは成り立たないので、二つが一つに結びついたユニットと見做すことも可能である。このように考えていくと、前回の論考で取り上げたデフォーの『ロビンソン・クルーソー (Robinson Crusoe)』(1719)

¹ 引用箇所における太字および下線はすべて筆者による（ただしイタリック体は原文のまま）。また引用英文につけた日本語訳もすべて筆者によるものである。

における“God and Nature”という結合表現²については、単純に相反する語の組み合わせと見ることができる一方で、“hendiadys”「二詞一意」³と解釈することも可能なのではないだろうか。

ポープの考える「自然」と「神」の関係は、彼の独創的な発想というよりは、むしろ18世紀の思潮の中で生み出されたと考える方が妥当と思われる。このことを踏まえて、17世紀にロンドンで発生したペストという伝染病とその被害を扱った英文学作品について、次のセクションで考察する。

2. 伝染病と「自然」

2020年は「新型コロナウイルス」の世界規模の感染拡大とその影響により人類の歴史に大きく刻まれることだろう。私たちはこの現象の意味を考え、そこから何かを学ばなければならない。そのヒントとなるのは、過去に大きな被害をもたらした伝染病を題材にした文学作品かもしれない。今回のコロナ禍で、フランスの作家カミュの『ペスト (La Peste)』(1947) が大きな注目を集めているが、デフォーによる『ペスト』(1722)—正確な表題は「疫病の年の記録 (A Journal of the Plague Year)」—も忘れてはならない作品である。これは1665年に実際にロンドンを襲ったペストによる未曾有の被害を描いた「小説」である。「小説」といっても、他のデフォー作品(例えば『ロビンソン・クルーソー』や『モル・フランダーズ』)とは質が異なり、架空の語り手である H. F. によるロンドンの惨状のリアルな描写のみならず被害の統計表まで盛り込んだ迫真のルポルタージュ(の体裁をとるフィクション)になっている。H. F. は語り手なので、当然ながらこの恐るべき災難を生き延びるわけだが、この疫病が終息した後を振り返って、感謝を込めて以下のような述懐をする：

... I reflect upon no Man for putting the Reason of those Things upon the immediate Hand of God, and the Appointment and Direction of his Providence; nay, on the contrary, there were many wonderful Deliverances of Persons from Infection, and

Deliverances of Persons when Infected, which intimate singular and remarkable Providence, in the particular Instances to which they refer, and I esteem my own Deliverance to be one next to miraculous, and do record it with Thankfulness. (p. 193)

((前略) 私は、このような事態(注：ペストで数万人が死亡したこと)の理由を神の直接の手に、そして摂理という神の取り決めや指示によるものとした人を誰一人非難しない、いや、それとは反対に、感染から救われた人たち、そして感染した人でも救われた人も大勢いたのだ。これこそが、奇しくも驚くべき神の摂理を暗に示すものであり、彼らが言及する個々の事例の中に存在するのだ。私自身、自分が救われたことがほとんど奇跡だと思うので、感謝を込めてこれを記録する)

このように、語り手は自身が救われたことを「摂理(Providence)」と受け止め、神に感謝しているのだが、それに続く考察には「自然」への言及が見られる。

But when I am speaking of the Plague, as a Distemper arising from **natural** Causes, we must consider it as it was really propagated by **natural** Means, nor is it at all the less a Judgment for its being under the Conduct of human Causes and Effects; for as the divine Power has form'd the whole Scheme of Nature, and maintains Nature in its Course; so the same Power thinks fit to let his own Actings with Men, whether of Mercy or Judgment, go on in the ordinary Course of **natural** Causes, and he is pleased to act by those **natural** Causes as the ordinary Means; excepting and reserving to himself nevertheless a Power to act in a **supernatural** Way when he sees occasion: Now 'tis evident, that in the Case of an Infection, there is no apparent extraordinary occasion for **supernatural** Operation, but the ordinary Course of Things appears sufficiently arm'd, and made capable of all the Effects that Heaven usually directs by a Contagion. Among these Causes and Effects this of the secret Conveyance of Infection imperceptible, and unavoidable, is more than sufficient to execute the Fierceness of divine Vengeance, without putting it upon **Supernaturals** and Miracle. (pp. 193-194)

(しかし、私がこの疫病を自然な原因から生じた病として語る時、それは実際に自然な手段で蔓延した

² 拙論「「自然」の声を聴け：序(1)」(2020) (『有明高専紀要』第55号) pp. 8-9

³ 卑近な例として、“ham and eggs”のように、「ハムと卵(目玉焼き)」が合体した一つの料理、即ち、「ハムエッグ」のようなものを指す。他にも“bread and butter”(バターを塗ったパン)、“rhythm and blues,” “death and honor (= honorable death)” など無数にある。

のであるが、それでもなお、人間の因果が導いたことに対する天罰でもあると私たちは考えなければならぬ。というのも、神の力は自然の全体系を創り上げていて、自然を自然の成り行きに任せているので、同じ神の力が、人間への彼自身の振る舞いを、それが慈悲であるにせよ裁きであるにせよ、自然な原因の通常の成り行き中で続けさせるのを妥当と考え、通常的手段としての自然な原因によって神は満足してふるまうのだ。それにもかかわらず、必要があれば、超自然な方法で行動に移す力を例外的に自らに確保しておく。今、明白なことは、伝染病の場合には、超自然な操作のための特殊な機会というわけではないが、通常成り行きが十分に用意され、天（すなわち神）⁴ が伝染病を通して通常導く全ての結果を実現したように思われる。これらの因果の中で、知覚不可能で免れることのできない感染の密かな伝播というこの事例こそが、それを超自然や驚異の実例に帰することはせず、神の復讐の激しさを見せつけるのに十分以上と言えるのだ

この引用文に、「自然」に関する語が実に9回も使用されている。その内訳は名詞“Nature”2例、形容詞“natural”4例、名詞“Supernaturals”1例、形容詞“supernatural”2例である。“Nature”「自然」と“Supernaturals”「超自然」はある意味で相反する語であるが、どちらも「神（“the divine Power” or “Heaven”）」の支配下に置かれているのがわかる。「超自然」とは、例えば「霊現象」等、目に見えない世界の現象に言及する際に使用される傾向があるが、この語がここで用いられているのはこの作品が書かれた当時、ペストの原因（病原体）が何であるか正確に解明されていないという時代的コンテクストを考慮すべきである（注：ペスト菌がフランス人のイェルサンと北里柴三郎によって発見されたのは1894年のことである）。このような中で、これを執筆した1720年初頭のデフォーには、原因不明のまま感染が拡大したこの伝染病は一見「超自然」に思われるが、それでも「自然」の一部であり、突き詰めると「神」の意思（ここでは「激しい怒り」）によってもたらされたものという認識がある。

次に、3度繰り返し使用されている「自然な原因（natural Causes）」とは、「自然災害」（日本人は今でも「天災」とも言う）の原因をイメージすれば解りやす

いかもしれない。巨大地震、火山噴火、落雷、豪雨、強風などがその代表例だが、全て「神」が計画したものと当时は理解されていた。下線部の「神の力は自然の全体系を創り上げ」の原文にある“Scheme (of Nature)”を「（自然の）計画（“A plan, design; a programme of action”）」（OED 5a; 1647~）と訳すことも可能かもしれないが、筆者は「体系」、即ち「明確な計画に従って構成要素が共同し相互に作用する一つの複雑な単位（“A complex unity in which the component elements co-operate and interact according to a definite plan;”）」（OED scheme 7a）と解釈したい。ただし、OEDでは、この語義の初例は1736年となっており、この作品の出版後である。それでもなお、この意味がこのコンテクストには最も適切であるように思われる。⁵ また、「（神の力は）自然を自然な成り行きに任せている」の箇所原文は“maintains Nature in its Course”であるが、所有代名詞“its”は直前の“Nature”を受けると筆者は読む。そもそも、“the course of nature”というフレーズは成句で、OEDによれば、元々は“the course of kind”であったものが変化したもので、⁶ 初例は14世紀とある（OED course 20）。『ジーニアス英和大辞典』（大修館書店）でも、“in the course of nature”を「自然の成り行きで、普通に行けば」、また“let nature take its course”を「自然の成り行きに任せる」と成句として扱っている。このように、一見「自然の成り行き」に見えるものも全ては神の意思が反映されている、というのがこの文の主旨である。そのような中で、語り手 H. F. はペストという疫病について言及する際にも、度々“Nature”という語を使用する：

There have been great Debates among our Physicians, as to the Reason of this; some will have it to be in the Nature of the Disease, (p. 154)

（医者たちの間で、このこと（注：感染者が他人に感染させようとする傾向）に関して、大いに議論がなされていて、その原因はこの病気の“Nature”に

⁵ 筆者が調べた限り“scheme of nature”を成句として記載している辞書はないが、コロケーション（連語）としては普通に使用されるようである。例えば、『ランダムハウス英和大辞典』（小学館）および『英和活用大辞典』（研究社）では“the (great) scheme of nature”をいずれも「大自然の仕組み」という日本語と共に記載している（“scheme”の項参照）。

⁶ “Kind”と“nature”は根本は同義語だが、英語本来のアングロ・サクソン語である“kind”が、（このフレーズにおいては）ラテン語起源の“nature”に取って代わられたという事情による。

⁴ “Heaven”は、OEDの語義（OED heaven 6a）“The power or majesty of heaven; He who dwells above; Providence, God. (With capital H.)”にあるように、「神」の同義語として使用される場合が多々ある。

あると主張する医者もいる)

The acute penetrating Nature of the Disease it self was such, and the Infection was receiv'd so imperceptibly, (p. 194)

(この病気自体の急性で浸透力の強い“Nature”は上述のようなもので、感染は気付かないまま伝わったのである)

But from the whole I found, that the Nature of this Contagion was such, that it was impossible to discover it at all, or to prevent its spreading from one to another by any human Skill. (p. 203)

(しかし、全体から私に分かったことは、この伝染病の“Nature”が上述のようなものなので、いかなる人間の技術で発見することも、人から人への感染を防ぐことも全く不可能であるということだった)

ここでの“Nature”を^{あえて}日本語に置き換えるなら「性質」という意味が最も適切と思われる。

一方、この疫病の潜伏期間について、H. F. は一般的な伝染病についての「検疫期間」(quarantine)の40日間に疑問を呈する：

Forty Days is, one would think, too long for Nature to struggle with such an Enemy as this [= “the Seeds of the Contagion”], and not conquer it, or yield to it: (p. 197)

(40日というのは“Nature”がこのような敵(「伝染病の種」)と格闘し、打ち勝つことも敗北することもない、というのには長すぎるようだ)

と述べ、この語り手は「せいぜい15、6日強 (above fifteen or sixteen Days at farthest)」が妥当という自説を披露する。この引用文での“Nature”には人間の「体力、活力」(『リーダーズ英和辞典(第2版)』では5aの語義)という意味が読み取れる。

とは言うものの、ここでの人間の「体力(活力)」にしても、あるいは前述した疫病の「性質」にしても、それぞれの文脈における表層的意味(むしろ便宜的意味と筆者は呼びたい)として理解されても、“Nature”という語にはさらに含意された深い層の意味があるように思われる。というのも「神の力は“Nature”の全体系を創り上げていて、“Nature”を自然の成り行きに任せている」と書いた作者であれば、少なくとも

同じ作品内で“Nature”を使用する際には、いかなる場合でも「全体系としての自然」の一側面を意味に反映させている、とは考えられないだろうか。要するに、デフォーは疫病の病原体も一つのマイクロコスモスと考えている、というのは深読みしすぎているのだろうか。

最後に、「自然」と「超自然」が共起する描写がもう1箇所、この作品の最後(終わってから2ページ目の)エピソードにあるので、引用する：

the Disease was enervated, and its Malignity spent, and let it proceed from whencesoever it will, let the Philosophers search for Reasons in Nature to account for it by, and labour as much as they will to lessen the Debt⁷ they owe to their Maker; those Physicians, who had the least Share of Religion in them, were oblig'd to acknowledge that it was all supernatural, that it was extraordinary, and that no Account could be given of it. (p. 247)

(疫病の威力が弱まり、その悪性は尽きたのだが、それがどこに起因するにせよ、自然哲学(科学)者たちにはこれを説明するのに自然の中に理由を捜し出し、そして自分たちの創造主(神)に負っている罪を減らすために望む限りの努力をしてもらいたい。内心にほんのわずかな信仰のかけらしかなかった医者たちはこの状況が全て超自然であり、途方もない異常なことであり、何一つ説明することができない、ということ認めざるを得なかったのである)

最初の下線部の“the Philosophers”は明らかに「自然哲学(科学)者(natural philosophers)⁸」を指している。彼らが「創造主(神)に負っている罪」とは何であろうか。ここでは、神の御業と考えられていた「風」や「雷」のような自然現象を完全に科学的に解明しようとする「人間至上主義」への警鐘と捉えることもできるであろう。科学と宗教の対立は何も18世紀のコンテクストに限った問題ではなく、現代まで連綿と議論されてきたトピックである。このセクションの最後

⁷ 名詞“debt”は通常では「借金」あるいは「恩義」という意味で使用されるが、「神学」のコンテクストでは「(宗教上の)罪(“a sin”)(OED debt 3)の意味になる。

⁸ 『リーダーズ英和辞典』(研究社)は、“natural philosophy”を「自然哲学《自然現象研究の意味で、19世紀前半ごろまでの用語；今の natural science, 特に physics に当たる》」と説明している。

に、ミステリー作家、ダン・ブラウンの小説『天使と悪魔 (Angels & Demons)』(2000) からの一節を紹介したい(この作品の舞台は現代のバチカン市国である):

“It [= Science] shatters God’s world into smaller and smaller pieces in quest of meaning . . . and all it finds is more questions.” (p. 341; Chapter 94)

(それ[科学]は神の世界を、意味の探求の中で、だんだん小さく粉砕していき . . . 結局分かったことはますます多くの疑問である)⁹

3. 夏目漱石と「超自然」

夏目漱石は、東京帝国大学の英文科専任講師であった時期の明治38年6月から40年3月にかけて「十八世紀英文学」という題目の講義を行っている。その講義録は一冊の本に纏められ、明治42年(1909年)に『文学評論』として刊行された。その構成は第一篇「序言」に続き、第二篇「十八世紀の状況一般」、第三篇「アヂソン及びスチールと常識文学」、第四篇「スウィフトと厭世文学」、第五篇「ポープといわゆる人工派の詩」、第六篇「ダニエル・デフォーと小説の組み立て」となっている。この論考は、漱石研究者だけでなく、英文学研究者にとっても非常に有益な知見を提供してくれる。特に、英文学作品における「自然」に関心を持つ者にとっては、第三篇でポープの詩の解説で漱石が試みた「超自然」についての考察は注目に値する。少し長いが引用する:

超自然とは字の示す如く**自然**を超越したものである。従って**自然**(大きな意味でいう)を借りなければ描写出来ないものである。しかし描写の手段からいえば借りるに違いないが、世界観からいえば、**自然**そのものが**超自然**の表現と断ずることも出来る。すると名は**超自然**でも実は**自然**に過ぎない。だから**自然**の活動を描写すれば直ちに**超自然**の描写になる。こうしてしまえば別に**超自然**という類別を設ける必要はない、全くの蛇足である。次にはその範囲を狭めて考えることも出来る。尋常の活動は**自然**として見做す。けれども尋常ならざるもの、普通の因

果法で解けぬもの、普通の経験に上らぬもの、これらは一括してこの名を付ける。すると吾人凡人も時によると**超自然**の活動をやらないとも限らない。草、木、山、川、禽、獣もその通り、—必ず遣るとは申さないが、もし遣ったならその時に限って**超自然**の名を付ける事が出来ることになる。

次には、自然界には**超自然**の要素を含んでいないと見る立場もある。(無論哲学的にいうのではない。)即ち**超自然界**は**自然界**と独立して存在している。これをあらわすに**自然**を借りるのは、借りなければ表せないから借りるだけで、同物だから、もしくは甲が乙を含んでいるから、片方で片方を説明するのではないという事に帰着する。(pp. 193-194)

一読しただけでは、非常に理屈っぽい文章で、非常に理屈っぽい書き手だと多くの読者が感じることだろう。しかし、繰り返し読むうちに、夏目漱石は英文学者として(「自然」に基づき)「超自然」の真の意味と描写の可能性を理論的に真摯に追求していたことが分かってくる。漱石は英文学の核心に触れるには“Nature”を正確に理解する事が不可欠と考えていたように思われる。この点において、筆者は漱石に大いに共鳴する。特に、下線部の「尋常ならざるもの、普通の因果法で解けぬもの」云々が「超自然」であるという説明は、前セクションのデフォーの引用に極めてよく似ている(漱石はデフォー作品を読んでいたので当然か)。上記の引用に続き、漱石は「超自然」を内的なもの(具体的には「心理上の問題」と外的なもの(例として、神や幽霊さらには「疫病神でも、福の神でも、雷様でも弁天様でも」と少し冗談を交えている)に区別しながら、以下のように論じていく:

(前略) ところがこれ(注: 外的な超自然)を描写するに、描写しようがないのでやむをえず**自然**を借りるのである。やむをえず借りるのだから、**自然**そのままを精細に叙述する必要はない、**超自然**をあらわし得る程度において**自然**を借りればいい。もしその程度を越えて、**自然**そのままをある通りに書き立てたならば、出来上ったものは予期の如き**超自然**ではない。やはり**自然**である。だから可笑しくなる。(p. 195)

さらに、ホメロスの『イリアス』におけるゼウス神の描写を引用し、以下のように論評する:

面白く出来ている。滑稽と思うのは悪い。けれども

⁹ この引用は一面では真実を言い当てているが、科学と宗教は常に対立の構図にあったわけではないことを三田一郎著『科学者はなぜ神を信じるのか』(講談社ブルーバックス)は教えてくれる。「無神論者」を公言していたアインシュタインやホーキングも「自然の法則」を作った「極めて高度な数学者」としての「神」の存在を認めざるを得なかった等、興味深い内容が満載である。ちなみに著者は理論物理学者にしてカトリックの聖職者でもある。

神らしくはない。神は神で明らかな神である。自然を借りなければ万事行動の出来ぬ神である。人間が霊に近づいて神になったといわんよりは、神が退化して人間になったと評する方が適当である。人間が神と兄弟分であるかの如き感がある。(p. 196)

このように漱石は、「超自然」界を否定はしないものの、¹⁰ それを文字で、言語で表現することは実際には不可能であることを看破している。それと同時に、一見「超自然」に見えるものも実は「自然」の一部であると認識していたことが窺える。

4. フィールドイングにおける「自然」(1)

18 世紀イギリスの代表的作家フィールドイング (Henry Fielding 1707-1754) の『トム・ジョーンズ』(1749)—正確な表題は「捨て子、トム・ジョーンズの物語 (The History of Tom Jones, a Foundling)」—は実に魅力的な小説である。筆者はこの論文を書くために、つまりは“nature”という語がどのように使用されているかを確認するために 20 年ぶりに『トム・ジョーンズ』を読み返したが、調査・研究を度外視して、読書の愉楽に浸ることができた。この作品の唯一無二の特徴を作家の小林信彦が簡潔に説明している。彼の『小説世界のロビンソン』から一部を引用する：

「トム・ジョーンズ」は全十八巻 (今風にいえば十八章に等しい) であるが、一卷ごとに前口上がついていて、作者が読者に、直接、語りかけてくる。落語でいえば、まくら。これが非常に芸がある。(中略) さて、このまくらの部分で、作家は、小説論・文章論・哲学さえも語ってしまう。つまり、「トム・ジョーンズ」は、作者の思想のごった煮なのである。小説の枠を壊さんばかりに、あらゆるものが詰め込まれている。(p. 150)

下線部の「作者の思想のごった煮」とは言い得て妙である。今回再読してみて、“nature”がフィールドイングの思想を最もよく表す語の一つとして要所要所で重要な意図を持って使用されているのが確認できた。しかし、筆者が使用するテキストで 871 ページ、総語数 34 万語を超える膨大な作品の中で 207 回も使用される“nature” (ちなみ“natural”は 73 回) の用例を

整理して体系的に記述する時間的余裕はなかった。今回は、残念だが、今の筆者にとって特に興味深い 3 つの用例のみを紹介するに留め、その他の例に関する考察は次回の課題にしたい。

前回の論考で、この論文タイトルにある「自然の声」とは「内なる声 (心の奥底から湧き上がる声にならない声)」のことではないかと述べたが (村田 2020: p. 13)、この見解を裏付ける例が『トム・ジョーンズ』に見つかる。以下の引用は、主人公トムが意中の女性ソファニアへの純愛を友情として諦め、別の裕福な女性との打算的な結婚を真剣に考えている場面からである：

This notion prevailed some moments, and he [= Tom Jones] had almost determined to be false to her [= Sophia] from a high point of honour; but that refinement was not able to stand very long against the voice of nature, which cried in his heart that such friendship was treason to love. (p. 728)

(この考え [注：ソファニアを諦め、経済的な理由で別の女性と結婚すること] は少しの間優勢になり、トムは名誉という高い観点からソファニアへの背信を決意する寸前だったのだが、頭でこしらえた精緻な思考は自然の声、即ちそれは彼の心の中でそんな友情なんて愛への裏切りだと叫ぶ声、に対してそれほど長くは持ちこたえることが出来なかったのである)

下線部の「自然の声、即ちそれは彼の心の中で・・・」と記されているように、「自然の声」の宿る場所は“heart” (「心」即ち「心臓」) とここでは見做すことができる。なお、この「声」が異議を唱える“refinement”は「思考、論証、論説において磨きをかける行為や実践、またその実例 (The act or practice of refining in thought, reasoning, or discourse; an instance of this)」(OED refinement 3) の意味になるので、「頭でこしらえた精緻な思考」と多少意識した。¹¹

「自然の声」ではないが、「自然の命令 (the dictates of nature)」という類似の表現もある。これは、別の作家の言説「熱情が人をそれとは正反対の方向に急き立てることが出来ないのは、急流の川が一隻のボートを流れに逆らって運ぶことが出来ないのと同じである (“zeal can no more hurry a man to act in direct opposition

¹⁰ 否定しないどころか、初期の『夢十夜』(1908: 明治 41 年) から窺えるように、夏目漱石は「超自然」現象に極めて強い関心を持っていた作家だと思われる。

¹¹ 名訳の誉れ高い朱牟田夏雄訳では、“refinement”を簡潔でしかもはるかに分かりやすい「人工的な考えかた」としてある (岩波文庫『トム・ジョーンズ』(四); p. 64 参照のこと)。

to itself than a rapid stream can carry a boat against its own current”」(p. 351) を引き合いに出し、語り手(兼作者フィールディング)は以下のように述べる:

I will venture to say that for a man to act in direct contradiction to the dictates of his nature is, if not impossible, as improbable and as miraculous as anything which can well be conceived. (p. 351)

(私はあえて言いたいのだが、人が自らの自然の命ずる声に真っ向から反対して行動することは、不可能ではないにしても、考えられる限り起こりそうにない、奇跡的とも言えることなのである)

次の例は、セクション2の最後で触れた「自然哲学(科学)者(natural philosophers)」と密接な関係にある。デフォーも「自然哲学」という学問に対し批判的な目を向けているが、フィールディングはもっと露骨に揶揄している。この語は、ロンドンの「機知と快楽の人(“men of wit and pleasure”)」、要するに当時の「粋な趣味人」(もちろんアイロニーである)、の描写に使用される:

But the science of gaming is that which above all others employs their thoughts. These are the studies of their graver hours, while for their amusements they have the vast circle of connoisseurship, painting, music, statuary, and natural philosophy, or rather unnatural, which deals in the wonderful, and knows nothing of nature, except her monsters and imperfections. (p. 614)

(しかし、(前述した諸々のことよりも)ギャンブルの技術がとりわけ彼らの頭を占めるものである。このようことは彼らのより真面目な時間に行う研究なのだ。一方で、娯楽のために彼らは、鑑定、絵画、音楽、彫刻、それに自然哲学、というよりはむしろ不自然哲学、即ち、それは驚異の世界を扱うも、自然のことは彼女の(注:自然の「女神」が産んだ)怪物と欠陥品を除けば、何も分かっていない学問といった非常に広範囲の趣味を持っている)

現代の「自然科学(natural science)」や「物理学(physics)」の前身にあたる「自然哲学」を作者は痛快なまでに扱き下ろしている。このような風刺的視点はフィールディング独自のものかもしれないが、当時の流行でもあった学問としての「自然哲学」への辛辣な「定義」(おそらく的を射ていたのではないか)に多

くの読者は快哉を叫び、関係者の一部は大いに眉をひそめたことだろうと筆者は想像を逞しくする。

5. おわりに

冒頭のエピグラフ(題辞)に引用した「自然は私たちを一つにする(NATURE UNITES US)」は自然保護団体 The Nature Conservancy が雑誌に掲載した広告の標語である(筆者は2019年から翌年にかけてTIME誌でしばしば目にした)。この広告には、2枚の写真が隣り合わせになって使用されている。1枚は森林の遠景写真で、雨上がりなのか、木々から水蒸気が濛々と湧き上がっている。もう1枚は茹で上がったブロッコリーの近景写真で、これも緑鮮やかな野菜から湯気が立ち上っている。この広告には、エピグラフに引用した英文以外にも以下の文が小さい文字サイズで記されている:

Healthy forests capture and slowly release rainwater into rivers and aquifers—providing reliable water that farmers use to grow the food we eat. Working together, we can build a planet where people and nature thrive.

(健康な森は雨水を捕獲し、ゆっくりとその水を川と帯水層に放つ—そして私たちが口にする食べ物を育てるために農家の人たちが利用する信頼のおける水を提供する。共同(協力)すれば、私たちは人間と自然が繁栄する惑星を築くことができる)

下線部の「健康な森(healthy forests)」や「信頼のおける水(reliable water)」というコロケーションは森や水があたかも人間であるかのような印象を読み手に与える。さらに、その森が雨水を「捕獲し(capture)」、それを「放つ(release)」となれば、完全に擬人化された表現と見てよいだろう。この広告文の書き手は、人間と「自然」が繁栄するためには、「自然」を人間のように扱う必要があると説いているかのようだ。また、エピグラフの引用の後半、「毎日、どこでも、私たちの自然との結びつきは無限である(“Every day, everywhere, our connections to nature are infinite”)」のメッセージは、森とブロッコリーの写真が示唆するように、森がしっかりと雨水を吸収し、その水が川や帯水層となり、農家はその水を使って育てる野菜を私たちは毎日食べている、という連携を意図しているのだろう。しかし、筆者は考える。この書き手と読み手が相互にイメージする「自然」とは「森」や「野菜」のことだが、私たち人間もそもそも「自然“(human

nature¹²⁾”」ではなかったか。私たち人間も、セクシ
ョン2で考察した「神の力により創り上げられた自然
の全体系」の一部であることを思い出してもよい時期
なのかもしれない。（つづく）

引用文献

- Brown, Dan (2000) *Angels & Demons*. New York: Atria Books.
 Defoe, Daniel (1722 [1998]) *A Journal of the Plague Year* (edited by
 Louis Landa). Oxford: Oxford University Press.
 Fielding, Henry (1749 [1996]) *Tom Jones* (edited by John Bender
 and Simon Stern) Oxford: Oxford University Press.
 Pope, Alexander (1966) *Poetical Works* (edited by Herbert Davis).
 London: Oxford University Press.
- 小林信彦 (1992) 『小説世界のロビンソン』新潮文庫（初版）
 夏目漱石 (1990 [1985]) 『文学評論』（下） 岩波文庫（第3刷）

¹² 筆者はここでの“human nature”を、慣用句としての「人性、人間性；《社》人間性（人間が社会的に習得する行動の型・態度・考えなど）」（『リーダーズ英和辞典』）という狭義の意味に囚われることなく、“human”（人間的な；思いやりのある）と“nature”（性質の人：『リーダーズ英和辞典』では3cの語義）が結合したもの、それが即ち「人間 (human being)」であるという意図で用いている。

研 究 活 動 概 要

本校教員・技術職員の発表した論文・著書及び講演題目等については、researchmap の上で公開していますので、下記 URL にアクセスの上、閲覧願います。

(URL) https://researchmap.jp/researchers?institution_code=6696*

令和2年度 図書・紀要委員

- 委員長 村 田 和 穂（図書情報管理部長／図書館長）
- 委 員 藤 崎 祐 二（図書情報管理部員／一般教育科）
- 委 員 南 部 幸 久（環境・エネルギー工学系）
- 委 員 南 明 宏（人間・福祉工学系）

有明工業高等専門学校紀要

第56号（2020年度）

令和3年2月5日発行

編 集 有明工業高等専門学校図書・紀要委員会

発 行 有明工業高等専門学校

〒836-8585 大牟田市東萩尾町150

電話（0944）53-8316

CONTENTS

Mean field approximation of the mixed spin system	MURAOKA Yoshinori	.....	1
An implementation report for mathematics seminar	AOKAGE Kazuya TANOUE Teruha YAMASAKI Shogo	.....	14
Relationship between mechanical properties of workpiece and cutting force in a drilling process ·	ISHIBASHI Daisaku SHINOZAKI Akira AKASHI Koji	.....	19
Introduction of bench drilling machine technical support system of mechanical training	ISHIBASHI Daisaku HORITA Takayuki IKEGAMI Katsuya SHINOZAKI Akira AKASHI Koji	.....	23
- For technological improvement of hole processing -			
The Development of PLC Teaching Application	YOSHITOMI Takashi NAKASHIMA Masahiro KOGA Tsukasa AOYAGI Yohei IKENOUE Masato HARAMAKI Shinya NOGUCHI Takuro MATSUNO Testuya	.....	27
Using Touch Panel Display in department crossing.			
Study on way of live streaming and funding promotion to share student's challenge	YANAGIHARA Kiyoshi KANBE Yoshimi	.....	33
Introduction of a new subject “Exercises on Engineering I” by second grade students and	TAKEUCHI Norio and 27 others	.....	37
subject teachers in the creative engineering department of Ariake Kosen			
Teaching Japanese English Learners Questioning Skills	MURAHATA Keisuke	.....	41
Analysis of Leveled English Classes.....	YAMASAKI Eiji Richard T. GRUMBINE MURAHATA Keisuke MURATA Kazuho	.....	50
at National Institute of Technology, Ariake College			
Listen to the Voice of “Nature”	MURATA Kazuho	.....	55
—With Special Reference to “Nature” in English Language Literary Works— Paper Two			