



**福井大学大学院  
工学研究科  
研究報告**

**Vol.66** 2018 MARCH

目 次

【第 66 巻 10 月分】

ニュートリノ崩壊光子探索実験のための STJ 検出器較正用遠赤外パルス光源の開発  
.....浅野千紗 坂井誠 中村昂弘 西村航 吉田拓生 小川勇 岡島茂樹  
中山和也 金信弘 武内勇司 武政健一 若狭玲那 加藤幸弘 1

素粒子実験で用いる受光素子の微弱光検出能力の限界  
..... 関師太一 吉田拓生 11

【第 66 巻 3 月分】

分子動力学シミュレーションにおける高分子結晶ラメラ構造の生成法  
.....山田忠明 玉井良則 17

工学部学生対象の教職専門科目「理科教育法」の授業効果  
ーレポート等からみた受講前後の教職に対する意識の変容ー..... 葛生伸 23

シミュレーションによる超対称性粒子探索方法の検討  
..... 可児知之 瀧原諒 吉田拓生 31

高層ビルの強風時における振動計測へのサンプリングモアレカメラの適用  
.....中嶋友朗 仙波悠生 藤垣元治 37

把持動作の特徴を用いたスマートフォン個人認証手法  
..... 浜崎琢司 小高知宏 黒岩丈介 白井治彦 諏訪いずみ 43

車両運用計画導出における島モデル GA の適用  
..... 平方敦 小高知宏 黒岩丈介 諏訪いずみ 白井治彦 51

株価予測におけるビックデータの利用  
..... 柳瀬仁洋 小高知宏 黒岩丈介 白井治彦 59

RELAP5 を用いた鉛ビスマス冷却高速原子炉の核・熱連成解析  
..... 吉村紘一 Van Rooijen, Willem F.G. 67

プログラミング初学者用学習支援 Web システム ECLAT の実装と評価 .....	高原 渉 小高 知宏 黒岩 文介 諏訪 いずみ 白井 治彦	77
メカトロ教育用マイコンボード TK400 シリーズの開発と教育実践 .....	高田 直人 川谷 亮治	85
マイクロ引張試験片作製用磁性流体研磨装置の開発と特性評価 .....	松尾 悠 竹下 晋正	97
マイクロ抵抗溶接した Ti-Ni 合金とステンレス鋼の異材接合継手の引張強さ .....	八木 聡志 竹下 晋正	103

**Memoir of Graduate School of Engineering, University of Fukui  
Vol. 66, March 2018**

**CONTENTS**

**[Vol.66 October]**

**A Far-Infrared Pulsed Light Source to Calibrate STJ Detectors  
for Neutrino-Decay-Photon Search Experiments**

.....Chisa ASANO, Makoto SAKAI, Takahiro NAKAMURA, Wataru NISHIMURA,  
Takuo YOSHIDA, Isamu OGAWA, Shigeki OKAJIMA, Kazuya NAKAYAMA,  
Shin-Hong KIM, Yuji TAKEUCHI, Kenichi TAKEMASA, Rena WAKASA and  
Yukihiro KATO 1

**Limits of the Abilities for Feeble Light Detection of the Photosensors  
Used in Elementary Particle Experiments**

.....Taichi ZUSHI and Takuo YOSHIDA 11

**[Vol.66 March]**

**Generation Method of Polymer Crystalline Lamella in Molecular Dynamics Simulation**

.....Tadaaki YAMADA and Yoshinori TAMAI 17

**Effects on Practices in a Class “Instruction Method for Science Education” in Teacher  
Training Course for Engineering Students—Changes in Consciousness of Teachers  
Before and After Attendance from Reports—**

.....Nobu KUZUU 23

**Simulation for Supersymmetric Particle Searches**

.....Tomoyuki KANI, Ryo TAKIHARA and Takuo YOSHIDA 31

**Application of Sampling Moire Camera to Measurement of Vibration Caused by Strong  
Wind for High-Rise Building**

.....Tomoaki NAKAJIMA, Yusei SENBA and Motoharu FUJIGAKI 37

**The Smartphone authentication using holding behavior**

.....Takushi HAMASAKI, Tomohiro ODAKA, Jousuke KUROIWA,  
Haruhiko SHIRAI and Izumi SUWA 43

**Application of island model GA in railway rolling stock operation plan**

.....Atsushi HIRAKATA, Tomohiro ODAKA, Jousuke KUROIWA,  
Izumi SUWA and Haruhiko SHIRAI 51

<b>Use of Big Data in Stock Price</b> .....Yoshihiro YANASE, Tomohiro ODAKA, Jousuke KUROIWA and Haruhiko SHIRAI	59
<b>Coupled analysis of neutronics and thermal-hydraulics for lead bismuth cooled fast reactor with RELAP5</b> .....Koichi YOSHIMURA	67
<b>Implementation and Evaluation of The Programming Environment ECLAT for Novices</b> .....Wataru TAKAHARA, Tomohiro ODAKA, Jousuke KUROIWA, Izumi SUWA and Haruhiko SHIRAI	77
<b>Development and Educational Practice of TK400 Series Microcomputer Board for Mechatronics Education</b> .....Naoto TAKADA and Ryoji KAWATANI	85
<b>Development and Evaluation of Magnetic Fluid Grinding Apparatus for Producing a Micro-Sized Tension Test Specimen</b> .....Yu MATSUO and Kunimasa TAKESHITA	97
<b>Tensile Strength of the Micro-Resistance Welded Dissimilar Joint Composed of Ti-Ni Alloy and Stainless Steel</b> .....Satoshi YAGI and Kunimasa TAKESHITA	103

## ニュートリノ崩壊光子探索実験のための STJ 検出器較正用 遠赤外パルス光源の開発

浅野 千紗\* 坂井 誠\*\* 中村 昂弘\*\* 西村 航\*\* 吉田 拓生\*\* 小川 勇\*\*\* 岡島 茂樹\*\*\*\*  
中山 和也\*\*\*\*\* 金 信弘\*\*\*\*\* 武内 勇司\*\*\*\*\* 武政 健一\*\*\*\*\* 若狭 玲那\* 加藤 幸弘\*\*\*\*\*

### A Far-Infrared Pulsed Light Source to Calibrate STJ Detectors for Neutrino-Decay-Photon Search Experiments

Chisa ASANO\*, Makoto SAKAI\*\*, Takahiro NAKAMURA\*\*, Wataru NISHIMURA\*\*,  
Takuo YOSHIDA\*\*, Isamu OGAWA\*\*\*, Shigeki OKAJIMA\*\*\*\*, Kazuya NAKAYAMA\*\*\*\*\*,  
Shin-Hong KIM\*\*\*\*\*, Yuji TAKEUCHI\*\*\*\*\*, Kenichi TAKEMASA\*\*\*\*\*,  
Rena WAKASA\* and Yukihiro KATO\*\*\*\*\*

(Received October 2, 2017)

We have designed a far-infrared pulsed light source to evaluate and calibrate superconducting tunnel junction (STJ) detectors that we are developing to search for radiative decay of neutrinos and measure the energy of those decay photons. Those photons are predicted to be in the far-infrared region of wavelength 50 - 90  $\mu\text{m}$ . Measurement of this photon energy makes it possible to determine the unknown neutrino mass. This paper describes the pulsed light source we designed to reproduce the photons in the same wavelength range as expected for neutrino-decay photons.

**Key Words :** Neutrino mass, Neutrino-decay photon, Superconducting tunnel junction detector,  
Far-infrared molecular laser, Far-infrared pulsed light source

#### 1. はじめに

素粒子物理学の実験分野では、近年、宇宙由来のニュートリノや原子炉由来のニュートリノ、粒子加速器によって生成されるニュートリノなどを用いた実験が世界各地で行われるようになり、かつては謎

の素粒子と言われたニュートリノに関する理解が急速に深まりつつある<sup>[1]</sup>。特に、1998年にスーパーカミオカンデの大気ニュートリノの観測によって「ニュートリノ振動」、すなわちニュートリノのフレーバー ( $\nu_e$  か  $\nu_\mu$  か  $\nu_\tau$  かの別) が周期的に変化する現象が発見されたことで、ニュートリノには質量があることや、ニュートリノのそれぞれのフレーバーは質量固有状態の重ね合わせによってできていること、などが判明し<sup>[2]</sup>、その後、世界各地の実験グループにより、ニュートリノの3種の質量固有状態  $\nu_1$ ,  $\nu_2$ ,  $\nu_3$  の質量  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  の二乗差  $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$  ( $i, j = 1, 2, 3$ , ただし  $i \neq j$ ) やニュートリノ混合角  $\theta_{ij}$  (ニュートリノの各フレーバーを各質量固有状態の重ね合わせで表現する際のパラメーター) なども測定されるようになった。

このように、ニュートリノに関する理解は深まりつつあるものの、未解決の問題も多く残されている。そのうちの 하나가、ニュートリノの質量について、

\* 筑波大学 数理物質科学研究科

\*\* 大学院工学研究科 物理工学専攻

\*\*\* 遠赤外領域開発研究センター

\*\*\*\* 中部大学 工学部

\*\*\*\*\* 筑波大学 数理物質系

\*\*\*\*\* 近畿大学 理工学部

\* Graduate School of Pure and Applied Sciences, Univ. of Tsukuba

\*\* Applied Physics Course, Graduate School of Engineering

\*\*\* Research Center for Development of Far-Infrared Region

\*\*\*\* Faculty of Engineering, Chubu Univ.

\*\*\*\*\* Faculty of Pure and Applied Sciences, Univ. of Tsukuba

\*\*\*\*\* Faculty of Science and Engineering, Kindai Univ.

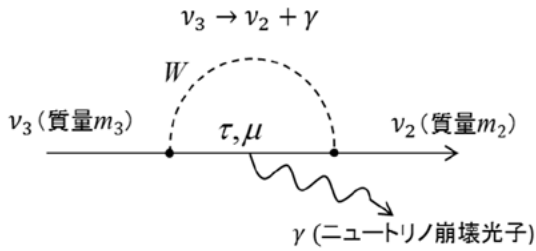


図1 ニュートリノの崩壊モードの一例

二乗差だけが分かっている、質量の値そのもの（上記  $m_1, m_2, m_3$  の値）がまだ決定されていないことである。目下、このニュートリノの質量を測定するために着目されている現象の一つが、ニュートリノ崩壊現象である。これは、図1のように質量の大きいニュートリノが光子  $\gamma$  を放出することによって質量の小さいニュートリノに崩壊するという現象で、実験ではまだ観測されていないが、理論的には、例えば、左巻きの Weak Boson  $W_L$  に加えて右巻きの  $W_R$  が存在する Left-Right Symmetric Model では、質量の最も大きいニュートリノの寿命は  $10^{17}$  年程度と予想されている<sup>[3]</sup>。かなりの長寿命ではあるが、宇宙にあまねく存在すると考えられている大量の宇宙背景ニュートリノを利用すれば、十分観測可能であると見積られている<sup>[3]</sup>。このニュートリノ崩壊は2体崩壊なので、例えば、 $m_1 < m_2 < m_3$  とするモデル（正常階層モデル）で予測される  $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$  崩壊によって飛び出す光子（ニュートリノ崩壊光子）のエネルギー  $E_\gamma$  は、 $\nu_3$  静止系で  $E_\gamma = \Delta m_{32}^2 / 2m_3$  と書け、 $\Delta m_{32}^2$  の値は  $2.46 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  と既に測定されているので<sup>[4]</sup>、このニュートリノ崩壊光子を検出し、 $E_\gamma$  を測定すれば、 $\nu_3$  の質量  $m_3$  を決定することができる。

宇宙背景ニュートリノとは<sup>[4]</sup>、ビッグバンによって宇宙が誕生したとき、光子や電子、クォークなどと共に大量に生成されたはずのニュートリノのことで、今でもフレーバー当たり  $110 \text{ 個/cm}^3$  の数密度で宇宙のいたるところに存在すると考えられている。このニュートリノは、宇宙が膨張し、冷えるにつれて運動エネルギーが下がり、今では温度  $1.9 \text{ K}$ （運動エネルギー  $0.6 \text{ meV}$  程度）で熱運動をしていると考えられているが、そのような低エネルギーのニュートリノを直接検出する手段がないことから、その観測に成功した人はまだ誰もいない。宇宙背景ニュートリノの崩壊光子を捉えることができれば、ニュートリノの質量を決定することができる上、宇宙背景ニュートリノの存在を検証することもできる。

ニュートリノの質量は他の素粒子に比べてかなり小さく、宇宙の密度ゆらぎの観測結果などから、95%の信頼度で  $m_1 + m_2 + m_3 < 0.23 \text{ eV}$  を満たすべきこ

とが報告されている<sup>[5]</sup>。この条件を満たしつつ、同時に質量二乗差の測定値<sup>[5]</sup>  $\Delta m_{32}^2 = m_3^2 - m_2^2 = 2.46 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  および  $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2 = 7.37 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$  も満たすようなニュートリノ質量の範囲を求めると、 $m_1 = 0 \sim 71 \text{ meV}$ ,  $m_2 = 9 \sim 72 \text{ meV}$ ,  $m_3 = 50 \sim 87 \text{ meV}$  となり、その  $\nu_3 \rightarrow \nu_2 + \gamma$  崩壊によって飛び出す光子のエネルギー  $E_\gamma = \Delta m_{32}^2 / 2m_3$  は、 $14 \sim 24 \text{ meV}$  と予測される。これは、波長  $50 \sim 90 \mu\text{m}$ 、周波数  $3 \sim 6 \text{ THz}$  程度の遠赤外領域の電磁波に相当する。なお、この  $E_\gamma$  は  $\nu_3$  静止系でのエネルギーであるが、宇宙背景ニュートリノの熱運動のエネルギーが、予測される  $\nu_3$  の質量  $m_3$  よりも十分小さいことから、実験室系での光子のエネルギーも、この  $E_\gamma$  にほぼ同じとみなしてよい。ただし、その光子の発生場所が地球から遠く離れていると、観測される  $E_\gamma$  は、赤方偏移の影響で元の値より小さくなる。

## 2. STJ 検出器

我々は、以上のような検討を経て、宇宙背景ニュートリノ崩壊光子を検出し、そのエネルギーを測定するための研究プロジェクト「Cosmic Background Neutrino Decay Search (COBAND) 実験」を立ち上げた<sup>[6],[7]</sup>。ニュートリノ崩壊光子のような、エネルギーの極めて低い光子を検出するためには、それよりもさらに小さい励起エネルギーを持つ物質に光子を吸収させる必要がある。我々は、このために超伝導体を用いた「超伝導トンネル接合素子検出器（Superconducting Tunnel Junction 検出器, STJ 検出器）」を開発しているところである（図2）。

ニオブやアルミニウム、ハフニウムなどを冷却し、超伝導化すると、超伝導電子対（クーパー対）を破壊するために必要となるエネルギー  $2\Delta$ （エネルギーギャップ）がそれぞれ  $3.1 \text{ meV}$ ,  $0.34 \text{ meV}$ ,  $0.04 \text{ meV}$  となり、エネルギー  $E_\gamma = 14 \sim 24 \text{ meV}$  程度のニュートリノ崩壊光子1個で多くの励起電子をたたき出し、光子のエネルギーに比例する大きさの信号を生成す

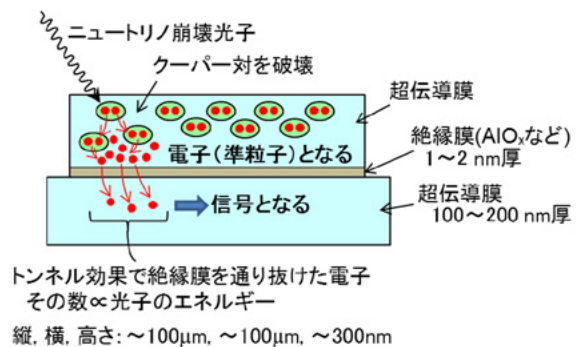


図2 STJ 検出器の模式図

ることができるはずである。

STJ 検出器は、2 層の超伝導膜で絶縁膜を挟んだ構造を持つジョセフソン素子の一種である。光子が超伝導膜に入射すると、その光子のエネルギーに比例する数のクーパー対が破壊され、その電子（準粒子）が伝導帯に持ち上げられる。そして、それらの電子がトンネル効果で絶縁膜を通り抜けると、信号として外に取り出される。

我々の STJ 検出器はまだ開発段階にあるが、その開発に当たっては、予測されるニュートリノ崩壊光子と同等の波長（50～90  $\mu\text{m}$ ）を持つ遠赤外光源を用いて、雛形検出器の性能評価や較正を行うことが必要不可欠となる。しかし、この波長領域は、レーザー装置などの光源開発分野で「未開拓波長帯」と呼ばれており、手軽に使える便利な光源がほとんどないため、現在は可視光レーザーなどを代用して STJ 検出器の性能評価を行っている。一例として、ニオブとアルミニウムを用いた Nb/Al STJ 検出器の、波長 465 nm の可視光パルスレーザーに対する応答を図 3 に示す<sup>[8]</sup>。

### 3. 遠赤外分子レーザー装置

予測されるニュートリノ崩壊光子と同等の波長（50～90  $\mu\text{m}$ ）を持つ光源を用いて雛形検出器の性能評価や較正を行うことができるようにするために、我々は、福井大学遠赤外領域開発研究センターが共同利用の装置として所有している「遠赤外分子レーザー装置」に着目した<sup>[9]</sup>。この装置は、図 4 のように CO<sub>2</sub> レーザーを 1 次光源として様々な種類の気体分子（CH<sub>3</sub>OH、CH<sub>3</sub>OD などのアルコール系）を励起させ、遠赤外領域の電磁波をレーザー発振させる装置

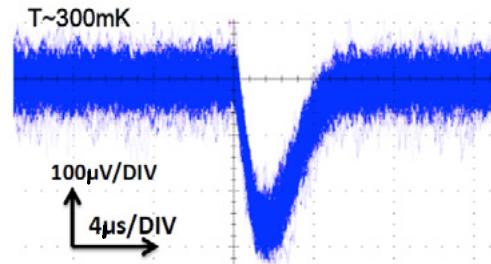


図 3 波長 465 nm、時間幅 60 ps の可視光パルスに対する Nb/Al STJ 検出器の応答

で、波長 40～500  $\mu\text{m}$ （光子のエネルギー 2.5 meV～31 meV）の間の約 70 本の単色発振線から任意の一つを選択できるようになっている。これらの発振線の内、本研究のために有用となるであろう波長 40～120  $\mu\text{m}$  付近の発振線を表 1 に示す<sup>[9]</sup>。希望する発振線を選択するには、1 次光源である CO<sub>2</sub> レーザーの発振波長と遠赤外分子レーザーの媒質分子を適切に選択する必要がある。

CO<sub>2</sub> レーザーは波長 9～11  $\mu\text{m}$  の間に 90 本以上の細かい発振線を持つ。このレーザーの共振器の一端に取り付けられた回折格子によってその内の一つを選択し、出力ミラーを動かしながら、選択した波長の電磁波が共振するように共振器長を微調整する必要がある。

遠赤外分子レーザーの中で使用する媒質は、エネルギー準位の複雑化を避けるために 6 原子以下の分子であることが望ましく、例えば波長 57.2  $\mu\text{m}$  の発振線が欲しい場合は CH<sub>3</sub>OD、波長 118.8  $\mu\text{m}$  が欲しいなら CH<sub>3</sub>OH を使用する。遠赤外分子レーザーの共振器長も、出力ミラーを動かしながら、発振させたい波長の電磁波が共振するように微調整する必要が

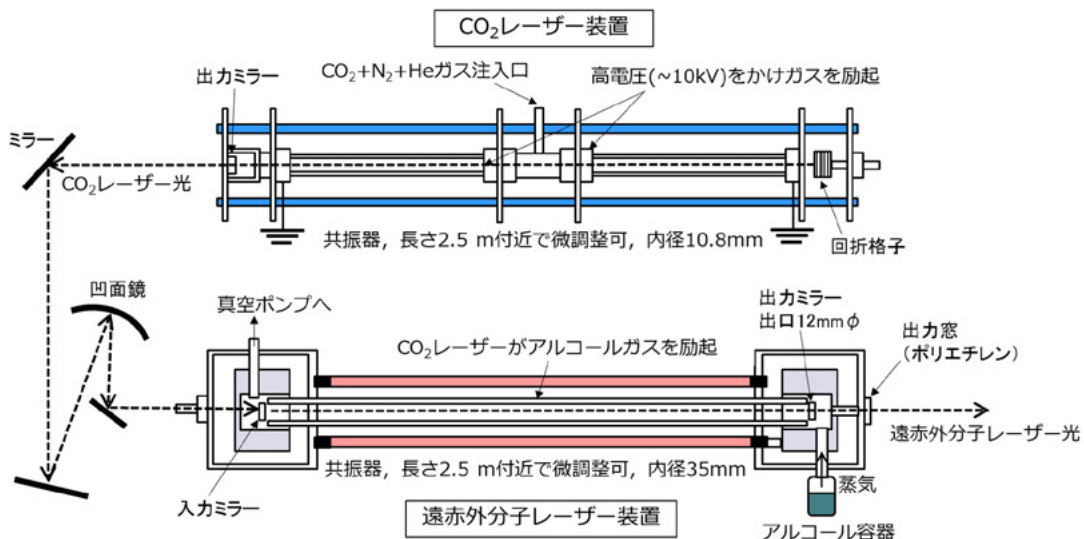


図 4 遠赤外分子レーザーの模式図



表1 遠赤外分子レーザーで発振可能とされている発振線の内、波長 $\lambda$ が40~120 $\mu\text{m}$ のもの

遠赤外分子レーザーの発振線						励起用CO <sub>2</sub> レーザーの発振線		
波長 ( $\mu\text{m}$ )	$E_{\gamma}$ (meV)	媒質分子 <sup>a)</sup>	偏光 方向 <sup>b)</sup>	発振線 確認 <sup>c)</sup>	出力 <sup>d)</sup> (mW)	発振線 の呼称	波長 ( $\mu\text{m}$ )	出力 <sup>e)</sup> (W)
41.4	30.0	CD <sub>3</sub> OH	⊥			10R(18)	10.260	
42.6	29.2	CD <sub>3</sub> OH	∥			9R(28)	9.230	
43.7	28.4	CD <sub>3</sub> OH	∥	○	—	10R(18)	10.260	—
44.0	28.2	CH <sub>2</sub> DOH	∥			9P(30)	9.639	
47.6	26.1	CH <sub>3</sub> OD	∥			9R(8)	9.342	
52.9	23.5	CD <sub>3</sub> OH	⊥	○	4.2	9R(34)	9.201	57
55.6	22.3	CD <sub>3</sub> OH	⊥			9R(28)	9.230	
57.2	21.7	CH <sub>3</sub> OD	⊥	○	72	9R(8)	9.342	73
61.6	20.2	CH <sub>3</sub> OH	⊥			9R(18)	9.282	
63.0	19.7	CH <sub>3</sub> OH	∥	×		10R(16)	10.274	
67.2	18.5	NH <sub>3</sub>	∥			9R(30)	9.220	
70.5	17.6	CH <sub>3</sub> OH	⊥			9P(34)	9.676	
77.3	16.1	CH <sub>3</sub> OH	∥			9R(8)	9.342	
77.3	16.1	NH <sub>3</sub>	∥			10R(14)	10.289	
81.6	15.2	CD <sub>3</sub> OH	∥			10R(16)	10.274	
86.4	14.4	CD <sub>3</sub> OH	⊥	○	—	10R(16)	10.274	—
96.5	12.9	CH <sub>3</sub> OH	∥			9R(10)	9.329	
102.0	12.2	CH <sub>2</sub> DOH	⊥			9P(16)	9.520	
103.1	12.0	CH <sub>3</sub> OD	⊥			9P(30)	9.639	
105.5	11.8	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	∥			9P(16)	9.520	
108.8	11.4	CH <sub>2</sub> DOH	∥			9P(12)	9.488	
109.3	11.4	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	∥			9P(24)	9.586	
112.5	11.0	CH <sub>2</sub> DOH	∥			9P(12)	9.488	
117.2	10.6	CH <sub>3</sub> OD	∥			9P(26)	9.604	
117.7	10.6	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	⊥			9R(20)	9.271	
118.8	10.5	CH <sub>3</sub> OH	⊥	○	38	9P(36)	9.695	76

<sup>a)</sup> Dは重水素を表わす。

<sup>b)</sup> ⊥: CO<sub>2</sub>レーザーの偏光方向に対して垂直, ∥: CO<sub>2</sub>レーザーの偏光方向に平行。

<sup>c)</sup> ○: 本研究で実際に発振させた発振線, ×: 発振を試みたが, 確認できなかった発振線, 空欄: 本研究ではまだ試みたことがない発振線。

<sup>d)</sup> 発振の確認は焦電検出器で行い, 出力はパワーメーターで測定した。ハイフン(—)は発振の確認だけ行って, 出力を測定しなかったことを表わす。

<sup>e)</sup> パワーメーターで測定した。ハイフン(—)は測定値の記録が残っていないことを表わす。

ある。一例として, 波長118.8 $\mu\text{m}$ の発振線に対して共振器長の微調整を行ったときの同調曲線を図5に示す。共振器長が発振線の半波長の整数倍だけ変化する毎にレーザーが共振し, 出力が大きくなる様子が見てとれる。

また, CO<sub>2</sub>レーザーの共振器の一端にミラーではなく回折格子を用いていることによって1次光源であるCO<sub>2</sub>レーザー光が偏光しているため, 遠赤外分子レーザーの発振線もCO<sub>2</sub>レーザーの偏光方向に対して平行または垂直のいずれかの方向に偏光している。このため, この遠赤外分子レーザーが, ある一

つのCO<sub>2</sub>レーザーの波長と媒質分子の組み合わせに対して同時に複数の発振線が発振する場合, 図5の

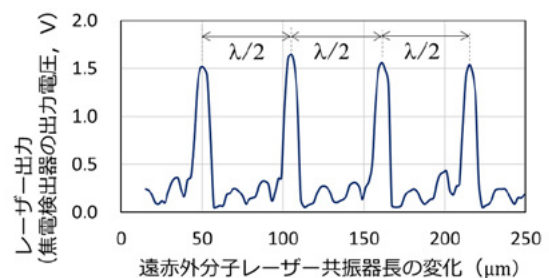


図5 波長118.8 $\mu\text{m}$ の発振線と同調曲線

ような共振器長の微調整に加えて、偏光板で不要な発振線を除去することもできる。

#### 4. 遠赤外分子レーザーのパルス化

我々の最終目標は、STJ 検出器でニュートリノ崩壊光子を検出し、その光子一つ一つのエネルギーを測定することである。このため、検出器の性能評価や較正を行う際には、平均光子数 1 個～数个程度の遠赤外パルス光を検出器に照射し、その応答を調べる必要がある。しかし、上述の遠赤外分子レーザー装置自体は連続波を発振するように作られているので、STJ 検出器の性能評価や較正に用いるためには、その連続波をパルス波に変換する必要がある。要求されるパルス時間幅は、STJ 検出器の応答時間と同程度以下、すなわち数  $\mu\text{s}$  程度以下である (図 3)。そこで、本研究では、連続波のレーザーを高速回転するミラーに反射させ、そのビームスポットが、パルス化したい位置に設置した開口 (検出器の受光面自体、あるいは検出器の上流に設置されたピンホールなど) を高速で横切るようにしてパルス化する方法や、通常型の 2.5 倍以上の高速で回転する高速チョッパーに、極細スリットを持つ特注のディスクを取り付けてパルス化する方法などを考案し、そのために必要となる光学系の設計を行った。

一般に、レーザービームは、完全に平行ではなく、空間中を僅かではあるが広がりながら伝播しており、ビーム軸に垂直な面上でビーム強度分布がガウス分布となることから、ガウスビームと呼ばれている。ガウスビームのビーム直径は、ガウス分布となるビーム強度分布の標準偏差  $\sigma$  の 4 倍で定義され、ビーム半径は  $\sigma$  の 2 倍で定義される。レーザーの出口から伝播距離  $z$  の位置でのビーム半径  $W(z)$  を表す式は、ガウスビームの伝播公式として知られ、ビーム径が最小となるレーザー出口でのビーム半径、すなわちウエスト半径 (腰半径)  $W_0$  と波長  $\lambda$  を用いて

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi W_0^2}\right)^2} \quad (1)$$

と表わすことができる。この式は、ガウスビームではこの  $W_0$  さえ分かれば、ビームが空間中をどのように広がりながら伝播していくかを波長毎に一意的に求められることを意味する。また、伝播の途中にレンズや球面鏡などの光学素子を置き、ビームを集束させたり発散させたりする場合でも、その伝播の様子を幾何光学的な光線行列 (ABCD 行列) を用いて追跡することができる<sup>[10]</sup>。

本研究で遠赤外分子レーザーの連続波をパルス化

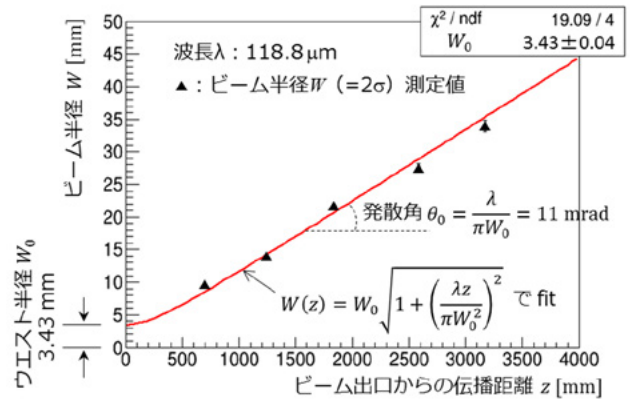


図 6 ビーム半径  $W(z)$  の測定結果

するための光学系を設計するに当たり、まず初めに波長  $118.8\mu\text{m}$  の発振線を用いてこのレーザーのビーム半径  $W(z)$  を測定し、ウエスト半径  $W_0$  を求めたところ、図 6 に示すように、 $W_0 = 3.43\text{ mm}$  となることが分かった。このウエスト半径は、レーザーの出口の大きさによって決まり、波長にはほとんどよらないと考えてよい。

#### 4.1 回転ミラーによるパルス化

回転ミラーを用いて連続波のレーザーをパルス化する場合、回転ミラーによる反射ビームのスポットが、パルス化したい位置に設置した開口 (検出器の受光面自体、あるいは検出器の上流に設置したピンホールなど) を横切る時間でパルス時間幅が決まるので、その時間幅を短縮するためには、ミラーの回転速度を大きくするとともに、ミラーからパルス化したい位置までの距離をできるだけ長く取り、さらに、パルス化したい位置にビームを集束させ、そこでのビームスポットを極力小さくする必要がある。

本研究では、中部大学の共同研究者が過去に別の目的で製作した図 7 の定速回転ミラーを使うことにしたため、ミラーの回転角速度は  $353\text{ rad/s}$  (実測値) で一定である。このミラーの回転軸は水平で、ミラ



図 7 回転角速度  $353\text{ rad/s}$  の回転ミラー

一は縦に回転するため、レーザーを水平に照射した場合、反射されたビームスポットは、上下方向に移動することになる。8面あるミラーの各面は平面で、大きさは  $39\text{ mm} \times 47\text{ mm}$  であるが、ミラーの設置位置を決める際には、ガウス分布するビームスポットの大部分がこのミラー内に収まるように留意する必要がある。これは、ガウスビームの一部分だけを反射させるような光学系を設計するためには波動光学的な解析が必要となり、本研究で用いた幾何光学的な光線行列による方法では対処できないためである。

さらに、本研究で対象とする遠赤外線は空気中の水分によって激しく吸収されることから、レーザー出口から検出器に至るまでの距離を無制限に長く取ることにはできない。例えば、波長  $57.2\text{ }\mu\text{m}$  の遠赤外線が気温  $26^\circ\text{C}$ 、湿度  $50\%$  の空气中を  $4\text{ m}$  進むと、その強度は元の  $0.5\%$  まで減衰する<sup>[11]</sup>。これ以上減衰すると、普段ビームプロファイルの測定などに用いている焦電検出器では感知できなくなる可能性が大きくなるため、注意を要する。

なお、本研究では、パルス化したい位置にビームを集束させるために用いる凹面鏡や凸面鏡などの光学素子は、特注品ではなく、市販品の中から選択することにした。

#### 4.1.1 凹面鏡を1個だけ用いた光学系

以上のような制約の下で、最初に試作した光学系を図8に示す。この光学系では、パルス化したい位置にビームを集束させるため、焦点距離  $750\text{ mm}$  の凹面鏡を1個だけ用いている。また、パルス時間幅の測定に用いたショットキーバリアダイオード (SBD) 検出器は、パルス光に対する応答は  $\text{ns}$  程度と十分速

いが、波長が短くなると感度が下がるので、表1の中で最も波長の長い  $118.8\text{ }\mu\text{m}$  の発振線を用いることを想定した設計になっている。

なお、本研究で用いた遠赤外分子レーザーはビームを水平方向に発振するので、図8の光学系を含め、本論文で示す光学系では、ビームはレーザー出口からパルス化する位置まで水平に伝播する。ただし、回転ミラーは縦に回転するので、このミラーで反射されたビームスポットは、上下方向に移動しながらパルス化する位置を横切ることになる。

図8には、実際に作製した光学系に加え、設計時に用いたシミュレーションの結果や SBD 検出器で直接測定したパルス波形の一例も示している。また、検出器の位置でのビームプロファイルも示しているが、これは、回転ミラーを止めた状態で直径  $2\text{ mm}$  の焦電検出器を  $2\text{ mm}$  ステップで動かしながら測定した結果である。シミュレーションは中部大学の中山和也氏が開発したガウスビームシミュレーターを用いて行った結果で、ガウスビームの集束や発散の様子を光線行列を用いた手法で計算し、表示している。上下の二つの曲線は、それぞれビームの中心から  $\pm 2\sigma$  の範囲を表わしている。凹面鏡で集光されたビームが、SBD 検出器を置いた場所付近で新たなウエスト (腰) を形成し、そこでビーム径が最小になっていることが分かる。

この光学系で、回転ミラーの回転角速度を  $\omega$  ( $= 353\text{ rad/s}$ )、回転ミラーからパルス化する位置 (今の場合、SBD 検出器の位置) までの距離を  $L$ 、縦に回転するミラーでの水平方向の反射角を  $\theta$ 、パルス化する位置でのビーム直径を  $2W'_0$  ( $=$ ガウス分布の  $4\sigma$ )、

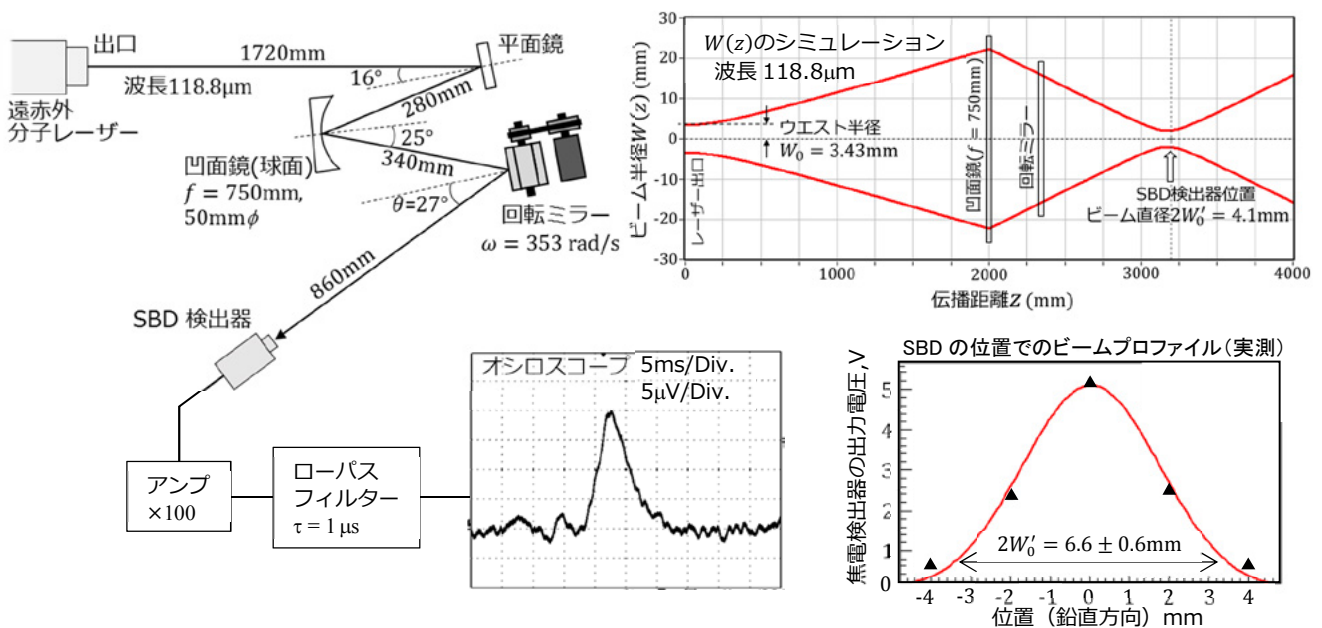


図8 回転ミラーと凹面鏡1個による光学系

パルス化する位置での開口径を  $d$  (今の場合, SBD 検出器の受光面の直径) とすると, 回転ミラーによって反射された後のビームスポットは, 半径  $L \cos \theta$  の円周上を角速度  $2\omega$  で縦に回転することになるので, 達成されるパルス時間半値幅  $\Delta t$  は近似的に次の式で見積もることができる.

$$\Delta t (\text{FWHM}) = \frac{2.35}{4} \times \frac{2W'_0 + d}{2\omega L \cos \theta} \quad (2)$$

ここで,  $2.35/4$  は,  $4\sigma$  の時間幅を半値幅に変換するための係数である.

図 8 の光学系では  $L = 860 \text{ mm}$ ,  $\theta = 27^\circ$  である. また, SBD 検出器は, 直径  $50 \mu\text{m}$  程度の細かいアンテナで受信した電磁波を SBD で検波する構造になっているため,  $d$  は  $50 \mu\text{m}$  程度となるが, これは  $2W'_0$  に比べて十分小さいので, 無視することにした. 回転ミラーを凹面鏡の上流に置けば  $L$  をもっと大きくすることができるが, この場合, 本来なら検出器に当たる直前または通り過ぎた直後の位置に来るべきビームスポットが, 凹面鏡によって検出器上に集光され, 結局パルス時間幅が長くなってしまふ恐れがあるため, ここでは回転ミラーは必ず凹面鏡の下流に置くことにした.

検出器の位置でのビーム直径を  $2W'_0$  として, 図 8 のシミュレーションから得られる  $2W'_0$  の値は  $4.1 \text{ mm}$  であったのに対して, 同図のビームプロファイルの測定結果から得られる  $2W'_0$  の実測値はやや大きく,  $6.6 \pm 0.6 \text{ mm}$  となった. このような差異が生じるのは, 凹面鏡に対するレーザービームの入・反射角が比較的大きく, シミュレーターが用いている近

軸近似 (レンズや球面鏡に対するビームの入・反射角が十分小さいことを前提とした近似) の限界を超えているためではないかと考えられる.

以上の結果, シミュレーションで得られる  $2W'_0$  から求めたパルス時間半値幅  $\Delta t$  は  $4.5 \mu\text{s}$  となり,  $2W'_0$  の実測値から求めた  $\Delta t$  は  $7.2 \pm 0.7 \mu\text{s}$  となった. 一方, SBD 検出器で直接測定した  $\Delta t$  は  $5.7 \pm 0.4 \mu\text{s}$  であった. いずれにせよ, この光学系で, 遠赤外分子レーザーの連続波を本研究の目標に近いパルス波に変換することができた. シミュレーションと実測で若干の差異はあるものの, 光学系を設計するための手段として, このシミュレーションが十分有用であることも分かった.

#### 4.1.2 光学系の改良

この方式の光学系でパルス時間幅をさらに短くするには, 回転ミラーからパルス化する位置までの距離  $L$  を大きくするとともに, パルス化する位置でのビーム直径  $2W'_0$  を小さくする必要がある. 一般に, ガウスビームのビーム直径を極力小さく絞りたい場合は, はじめに凸面鏡などを用いて一旦ビームを広げ, そこから焦点距離の短い凹面鏡を用いて大きな集束角で一気に集光する方法が有効となる. しかし, 集束角が大きくなると, 凹面鏡から集光位置までの距離が短くなるため, 回転ミラーからパルス化する位置までの距離  $L$  も短くなってしまふ.

このような相反する要求に対して, ビーム直径  $2W'_0$  を小さく絞りつつ同時に距離  $L$  を大きく取れるよう, 試行錯誤の末に辿り着いた最適解が, 図 9 に示す光学系である.

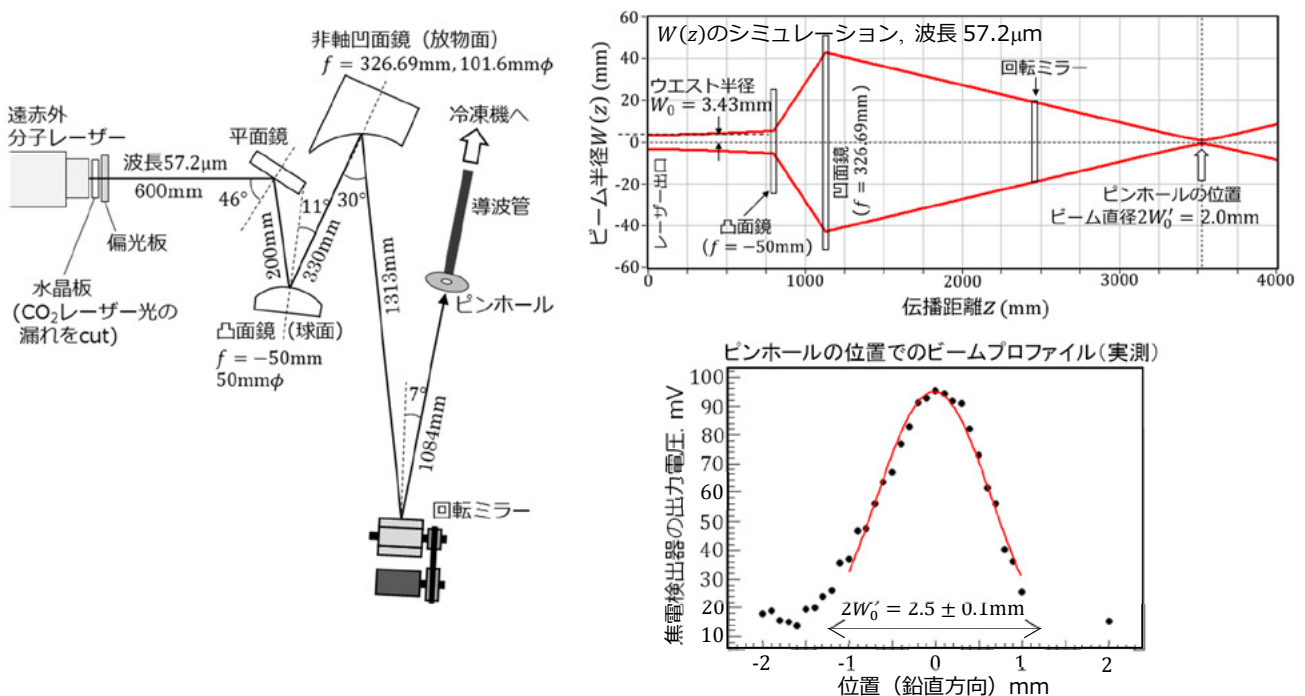


図 9 回転ミラーと凸面鏡・凹面鏡による光学系

想定したレーザーの発振線は、予測されるニュートリノ崩壊光子の波長  $50\sim 90\ \mu\text{m}$  の範囲にも入っている波長  $57.2\ \mu\text{m}$  の発振線である。凹面鏡には初めから光軸が  $30^\circ$  傾くように作られた非軸凹面鏡を用いた。回転ミラーでのビームの水平方向の反射角  $\theta$  は  $7^\circ$  である。また、実際の STJ 検出器は冷凍機の中に設置されるため、ビームをパルス化する位置には、検出器ではなく、冷凍機の中にビームを伝送するための導波管の入り口の開口（ピンホール）があるものとした。この場合、このピンホールの直径が(2)式の中の  $d$  となる。

この光学系では、(2)式中の  $L$  は  $1084\ \text{mm}$  となり、ピンホールの位置でのビーム直径  $2W'_0$  は、シミュレーションでは  $2.0\ \text{mm}$ 、一方、直径  $1\ \text{mm}$  の焦電検出器を動かしながら実測した結果では  $2.5\pm 0.1\ \text{mm}$  となった。ピンホールの直径  $d$  は、この位置でのビーム直径  $2W'_0$  と同じとするか、あるいは、ビームの全部ではなく一部分だけピンホールを通過させてもよいのであれば、 $2W'_0$  以下にしてもよい。ただし、 $d$  がレーザーの波長よりも小さくなると、ピンホールを通り抜けたビームが大きく回折し、導波管の中を通って行かなくなるので、ここでは、 $d$  は  $0.1\ \text{mm}\sim 2W'_0$  の範囲に設定するものとした。

こうして定めた  $d$  に対して、(2)式により見積もられるパルス時間半値幅  $\Delta t$  は、シミュレーションによる  $2W'_0$  を用いた場合で  $1.7\sim 3.1\ \mu\text{s}$ 、実測による  $2W'_0$  を用いた場合で  $2.0\sim 3.8\ \mu\text{s}$  となる。ここでは  $\Delta t$  自体の実測は行っていないが、この光学系を用いれば、

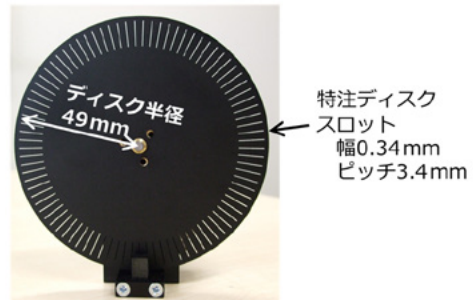


図10 高速チョッパー, Scitec Instruments社310CD

目標とする時間幅のパルスが得られるものと期待される。

#### 4.2 高速チョッパーによるパルス化

次に、もう1つのパルス化の方法として高速チョッパーを用いる方法を検討した。チョッパーとは、図10のような細いスロット状の穴を持つディスクが高速で回転するようになった装置で、このディスクを連続波ビームの光路に挿入することで、ビームがスロットを通過した時だけパルスとなって出てくる。ここでは、回転ミラーを用いた図9の光学系をチョッパー用に改造し、図11のような光学系を考案した。この光学系では、冷凍機にビームを伝送するための導波管の入り口直前にチョッパーを設置し、そのスロットが導波管の入り口のピンホールを横切る時間でパルス時間幅が決まるようになっている。チョッパーのディスク半径を  $r$ 、スロット幅を  $w$ 、ディスクの単位時間当たりの回転数を  $n$ 、導波管入り口

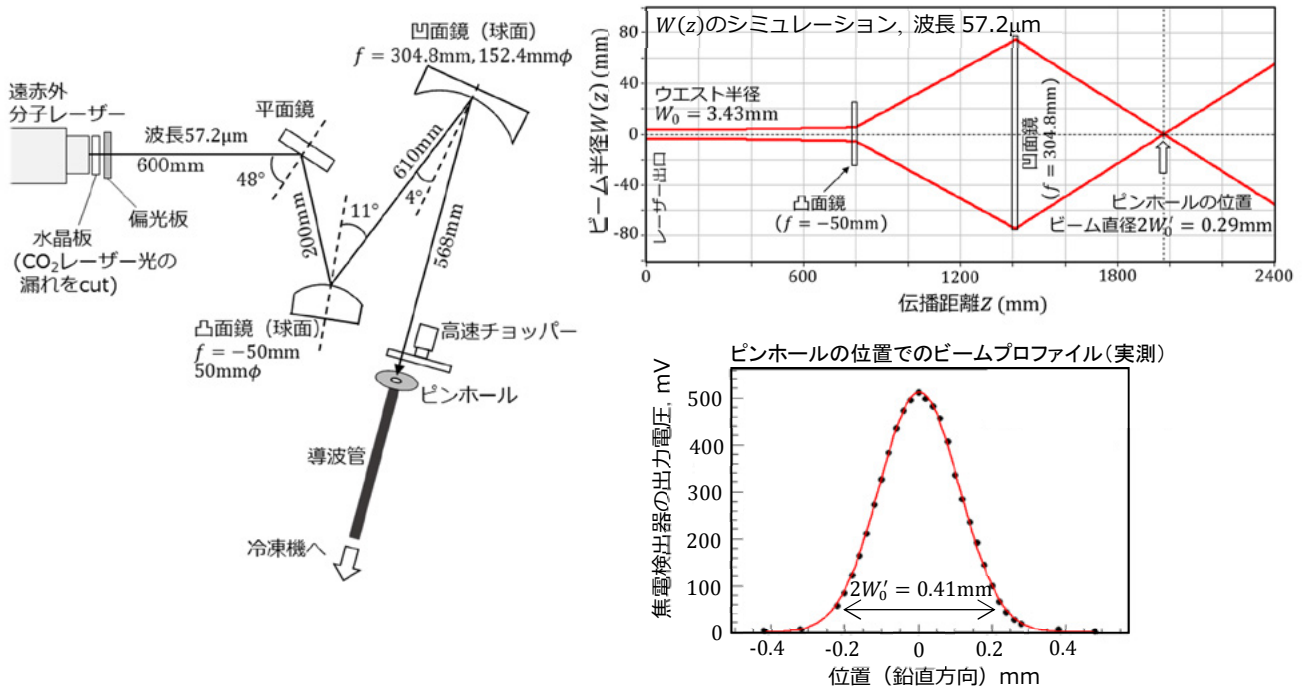


図11 高速チョッパー用の光学系

のピンホールの直径を  $d$  とすると、パルス時間半値幅  $\Delta t$  は近似的に次の式で見積もることができる。

$$\Delta t (\text{FWHM}) = \frac{2.35}{4} \times \frac{w + d}{2\pi r n} \quad (3)$$

この式から、パルス時間幅を短縮するためには、 $w$  や  $d$  を小さくし、 $r$  や  $n$  を大きくすればよいことが分かる。チョッパーの回転数  $n$  については、100 回転/s 程度が一般的であるが、ここでは市販品の中で最も高速の 270 回転/s (実測値) で回転するチョッパーを選択することにした。ディスクの半径  $r$  は 49 mm である。あとはチョッパーのスロット幅  $w$  とピンホールの直径  $d$  を小さくすれば、それだけパルス時間幅が短縮されることになる。しかし、スロット幅やピンホール径がその位置でのビーム径よりも小さくなると、ビームの一部分しか下流の検出器に届かないことになるため、ビームの損失を極力減らしながらパルス時間幅を短縮するためには、回転ミラーによる光学系と同様、凸面鏡や凹面鏡を組み合わせることでビームスポットを極力小さく絞り、その位置にチョッパーや導波管の入り口を設置する必要がある。

図 11 の光学系は、以上のような方針で考案された光学系である。想定したレーザーの発振線は、ここでも波長 57.2  $\mu\text{m}$  の発振線である。回転ミラーを用いたときと違って、チョッパーを用いる場合には集光用の凹面鏡からピンホールまでの距離を長く取る必要はないので、はじめに凸面鏡でビームスポットを極力大きく広げ、そこから大面積かつ焦点距離の極力短い凹面鏡で一気にビームを絞る方法が有効となる。図 11 の光学系で用いた凹面鏡は、市販品の中で最も面積の大きい凹面鏡である。

図 11 のシミュレーションの結果より、この光学系ではレーザーの出口から距離 1978 mm の位置に新たなウエストが形成され、そこでビームが最も絞られていることが分かる。チョッパーやピンホールをこの位置に置くとして、その位置でのビーム直径  $2W'_0$  は、シミュレーションで 0.29 mm、実測した結果では 0.41 mm となった。ビーム直径を実測する際には、焦電検出器の直径 2 mm の受光面を直径 0.14 mm のピンホールで覆って、実質の受光面をビーム直径よりも小さくした状態で測定した。

チョッパーのスロット幅  $w$  とピンホールの直径  $d$  は、その位置でのビーム直径  $2W'_0$  と同じとするか、あるいは、ビームの全部ではなく一部分だけピンホールを通過させてもよいのであれば、それ以下にしてもよい。ここでも  $w$  や  $d$  はレーザーの波長よりも大きい 0.1 mm  $\sim$   $2W'_0$  の範囲に設定できるものとする、(3)式により見積もられるパルス時間半値幅

$\Delta t$  は、シミュレーションによる  $2W'_0$  を用いた場合で 1.4  $\sim$  4.1  $\mu\text{s}$ 、実測による  $2W'_0$  を用いた場合で 1.4  $\sim$  5.8  $\mu\text{s}$  となる。ここでも、この光学系による  $\Delta t$  自体の測定は行っていないが、目標とする時間幅のパルスが得られるものと期待される。

特に、この光学系では、チョッパーのスロット幅  $w$  やピンホールの直径  $d$  をビーム直径  $2W'_0$  と同程度にすると、回転ミラーを用いた図 9 の光学系に比べてパルス時間幅はやや大きくなってしまふ。しかし、ビーム直径  $2W'_0$  が極めて小さいので、 $w$  や  $d$  を  $2W'_0$  より小さくすることによって、ビームを大きく失うことなくパルス時間幅を短縮することができる。この場合、ピンホールを丸い穴ではなく、チョッパーのスロットと同形にしてしまえば、さらに損失を減らすことができる。また、レーザー出口からピンホールまでの距離 1978 mm は、回転ミラーによる光学系の 3537 mm よりも大幅に短く、空気中の水分によるビーム強度の減衰を低減させる効果も期待できる。

## 5. おわりに

ニュートリノという素粒子は、1930 年に量子力学の創始者の一人でもある W. E. パウリが初めてその存在を予言して以来、時代時代の素粒子研究者に次から次へと無理難題を投げかけてきた。最初に予言されてから実際にその姿が捉えられるまで 26 年もの歳月を要した上、姿が見えるようになればなつたで、こんどは太陽から地球に飛んで来る電子ニュートリノ  $\nu_e$  が途中で半分以上消えてしまっているという。そのいわゆるニュートリノ振動という現象がやっと解明され、ニュートリノにも質量があることは分かったものの、「ではその質量は何グラムですか？」という初歩的な問いには、今もって誰も答えられないのである。

宇宙背景ニュートリノの崩壊現象を観測し、その崩壊光子のエネルギーを測定することができれば、ニュートリノの質量を決定することができる。そのためには、本論文でも述べた STJ 検出器の実用化が急務とされるところであるが、我々の遠赤外パルス光源がその一助となれば幸いである。

## 参考文献

- [1] 南方久和：日本物理学会誌 68-11, 723 (2013).
- [2] Y. Fukuda *et al.*: Phys. Lett., 81, 1562 (1998).
- [3] Shin-Hong Kim *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn., 81, 024101 (2012).

- [4] S. ワインバーグ著, 小松英一郎訳: ワインバーグの宇宙論 (上), 日本評論社, p.160 (2013).
- [5] C. Patrignani *et al.*: Chin. Phys. C, 40, 100001 (2016).
- [6] Shin-Hong Kim *et al.*: Physics Procedia, 37, 667 (2012).
- [7] Shin-Hong Kim *et al.*: JPS Conf. Proc., 1, 013127 (2014).
- [8] 武内勇司: 日本物理学会第 71 回年次大会講演 22aAN-6, 東北学院大学, 2016 年 3 月 22 日.
- [9] 中山和也, 岡島茂樹, 川端一男: J. Plasma Fusion Res., 87-12, 801 (2011).
- [10] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich 著, 尾崎義治, 朝倉利光訳: 基本光工学 1, 森北出版, p.84 (2009).
- [11] 中山和也: 博士学位論文, 中部大学, 平成 15 年度.

# 素粒子実験で用いる受光素子の微弱光検出能力の限界

図師 太一\* 吉田 拓生\*

## Limits of the Abilities for Feeble Light Detection of the Photosensors Used in Elementary Particle Experiments

Taichi ZUSHI\* and Takuo YOSHIDA\*

(Received October 2, 2017)

Some of particle detectors used in elementary particle experiments detect particles by sensing feeble light such as scintillation light generated by charged particles passing through matter. We carried out the experiments to evaluate the abilities for feeble light detection of some semiconductor photosensors including avalanche photodiodes and multi-pixel photon counters (MPPCs) selected as photosensor candidates for the particle detectors. As a result, we found that the MPPC was the most sensitive. In particular, the MPPC cooled down to  $-40^{\circ}\text{C}$  could detect with almost 100% efficiency quite feeble light pulses which contained only 7 photons on average.

**Key Words** : High Energy Physics, Elementary Particle, Photosensor, PMT, APD, MPPC

### 1. はじめに

素粒子物理学の実験を行うための測定装置には、高エネルギー粒子ビームの衝突反応によって生成される種々の娘粒子の飛跡を検出したり、運動量やエネルギーなどを測定したり、粒子の種類を同定したりするための様々な素粒子検出器が組み込まれている。このような素粒子検出器の中には、荷電粒子が物質を通過するとき生じるシンチレーション光やチェレンコフ光のような微弱な光信号を捉えることによって粒子を検出するものがある。例えば、ホドスコープや TOF カウンター、シンチレーションファイバー荷電粒子飛跡検出器、カロリメーター、チェレンコフカウンターなどである<sup>[1]</sup>。このような素粒子検出器では、より微弱な光信号を確実に検出し、その光量をより正確に測定することが、検出効率や測定精度の向上につながる。

従来、素粒子を検出するためのこのような微弱な光信号は、光電子増倍管 (PMT) などの電子管式受

光素子を用いて計測するのが通例となってきたが、本研究の目的は、そのような受光素子の代わりに半導体受光素子の一種であるアバランシェフォトダイオード (APD) やマルチピクセル・フォトンカウンター (MPPC) を用いて、光電子増倍管 (PMT) などでは検出効率が著しく低下するような極めて微弱な光信号を確実に検出し、その光量をより正確に測定する方法を確立することである。特に、本研究では、平均光子数 10 個以下の極めて微弱な光パルスを上記の半導体受光素子で検出する実験を行い、どのくらい微弱な光信号まで 100%に近い検出効率で検出でき、その光量を精度よく測定することができるか、その能力の限界を系統的に調べた。

### 2. 研究の方法

#### 2.1 微弱パルス光源の開発

本研究では、光パルス中の平均光子数を 0~数十個の範囲の任意の値に設定することができる微弱パルス光源が必要となる。しかも、その光パルスの時間幅は、実際の素粒子検出器の光信号に合わせて、数十 ns 以下であることが望ましい。そこで、発光ダイオード (LED) に時間幅 30ns 程度の高速度パルス電圧を印加する方式の微弱パルス光源を開発した。パ

\* 大学院工学研究科 物理工学専攻

\* Applied Physics Course, Graduate School of Engineering



ルス当たりの平均光子数は、LED に印加するパルス電圧の大きさと LED の光を減光するための ND フィルターによって調節することができるようにした。

このパルス光源で受光素子の性能評価を行う際には、想定する素粒子検出器の発光スペクトルや受光素子で高い量子効率を得られる波長領域に合致する色の LED を選択する必要がある。本研究では、カナダ Lumileds 社製の 3 種類の LED (型式: HPWN-MB00, HPWN-MC00, HPWN-MG00) を必要に応じて使い分けることにした。各 LED に対して実測した発光スペクトルを図 1 に示す。それぞれ青、青緑、緑の LED であるが、これらはそれぞれ青色プラスチックシンチレーター (発光波長 400~500nm, ピーク波長 430nm 付近), 青色シンチレーティングファイバーの発光を外に引き出すための波長変換材 Y-11 入り光ファイバー (発光波長 480~550nm, ピーク波長 500nm 付近), 蛍光材として 3HF を使用したプラスチックシンチレーター (発光波長 500~600nm, ピーク波長 530nm 付近) の発光スペクトルに近い LED として選択した。

受光素子の性能評価を行う際には、光源から受光素子まで外径 0.75mm の透明プラスチック光ファイバーで光パルスを伝送した。

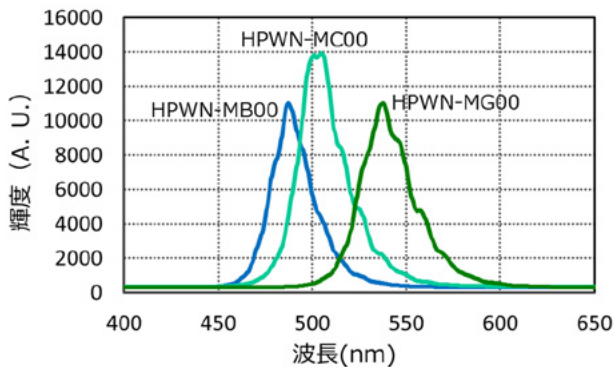


図 1 光源として用いた LED の発光スペクトル

## 2.2 素粒子検出器の受光素子に関する考察

一般に、微弱な光信号を検出する装置は、最初に受光面のところで光電効果によって光子を電子 (光電子) に変換し、その光電子を増倍させ、電気信号として取り出す仕組みになっている。入射する光信号が、例えば光子の数でせいぜい数個程度しかないほど微弱である場合、最初に光子を電子に変換する際の効率 (量子効率) が、受光素子を選択する上で本質的に重要なパラメーターとなる。もし量子効率が低く、光電子がひとつも得られなければ、そのあとの光電子増倍率がいくら大きくても信号は出てこないからである。光電子増倍管は、光電子増倍率が

極めて大きく (100 万倍程度)、ノイズも小さいという長所があるものの、量子効率がせいぜい 25% 程度しかないため、100% 近い効率で光信号を検出するためには、信号毎の入射光子数が平均値のまわりにポアソン分布することを考慮すると、信号当たり平均十数個以上の光子が必要となる。そこで、本研究では、光電子増倍管の代わりに、APD や MPPC など、70~95% に亘る高い量子効率を持つ半導体受光素子に着目し、微弱光検出能力の向上を図る。

## 2.3 APD の選択

半導体受光素子の一種である APD は、通常のフォトダイオードと違って、入射光によってたたき出された光電子を素子内で増倍させることができ、このため、入射光が微弱でも大きな電気信号を出力することができる。APD には、暗電流によるショット雑音や光電子増倍率の揺らぎに起因する過剰雑音などの影響で微弱光の検出効率が低下するという欠点があるが、この内、ショット雑音は APD を冷却することによって低減させることができる。

本研究では、素粒子検出器に適していると考えられる以下の 2 種類の APD を選択した。

### ▶ 浜松ホトニクス社製 APD S8664-55

これは、欧州 CERN の無機結晶  $\text{PbWO}_4$  を用いた電磁カロリメーターのために開発された APD である<sup>[2]</sup>。青色から赤色にわたる広い範囲の波長域で 80% 以上の量子効率を持つ。逆バイアス電圧をかけたときに pn 接合面付近にできる空乏層が厚いため、受光面の面積が  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$  と大きい割には静電容量が小さく (80pF)、ノイズを比較的強く抑えることができる。通常のシンチレーションカウンターやカロリメーターなど、受光面の大きい APD を必要とする検出器に適している。

### ▶ 浜松ホトニクス社製 APD S5343mod

これはシンチレーティングファイバー (Sci-Fi) 荷電粒子飛跡検出器用に開発された特注の APD で、受光面は直径 1mm の円形である<sup>[3],[4]</sup>。量子効率は、3HF 型 Sci-Fi の発光波長域 (500~600nm, 緑色) で 94% に達する。波長 450nm 付近 (青色) でも 80% 以上の量子効率を持つ。

## 2.4 MPPC の選択

MPPC も APD と同様に半導体受光素子の一種であるが、1つの MPPC 素子の中に小さい APD ピクセルが密に集積されており、その APD ピクセルをガイガーモードで動作させるため、通常の APD よりも大きな信号が得られる。また、ガイガーモードで動

作させることにより、1つのピクセルに何個光子が入射しても同じ大きさの信号が出て来るが、入射光が微弱で、1つのピクセルに複数の光子が入射する確率が極めて低い場合には、信号を出しているピクセルの数が、検出した光子の数、すなわち光電子数となる。1つのMPPCからは全てのAPDピクセルの出力を加算した信号が出力されるので、その波高から信号を出したピクセルの数が分かる。しかし、MPPCも半導体受光素子であるが故に、ノイズの発生頻度(ダークカウント)が高いという欠点を持つ。本研究では、MPPCに対してもAPDと同様、冷却することによってノイズを極力低減させる。

本研究では、浜松ホトニクス社製のMPPC S10362-11-100Cを選択した。このMPPCでは、1mm×1mmの受光面の中に100 $\mu$ m×100 $\mu$ mのAPDピクセルが100個集積されている。通常、MPPCの表面は保護用の透明の樹脂で覆われていて、その樹脂の表面での反射によって入射光が数%ほど失われるが、本研究では、この樹脂の無いMPPCを特別に作製してもらった。その影響もあって、量子効率、青色プラスチックシンチレーターの発光波長域(400~500nm)で70~75%に達する。なお、MPPCでは隣接するピクセルの境界付近に若干の不感領域ができるため、(ピクセル当たりの量子効率)×(受光面全体に占める有感領域の割合)をMPPCの量子効率と定義する。

## 2.5 受光素子の微弱光検出能力評価実験

本研究では、上述の微弱パルス光源を用いて、選択したAPDやMPPCの微弱光検出能力の限界を探る実験を行い、これまで一般的に用いられてきた光電子増倍管による結果と比較した。APDやMPPCは冷却する必要があるため、真空容器の中に設置し、ペルチェ素子を用いて-40℃まで冷却できるようにした。光パルス伝送用の透明の光ファイバーは、真空容器の亚克力窓に開けた小穴を通して容器内に挿入し、挿入後、真空漏れを防ぐために小穴の隙間を接着剤で塞いだ。

## 3. 実験結果

### 3.1 PMTによる微弱パルス光源のテスト

はじめに、光電子増倍管(PMT, 浜松ホトニクス H6520)を用いて、本研究の中で開発した微弱パルス光源の発光量を測定し、本研究で必要とする微弱な光パルスが得られることを確認した。図2は、発光ピーク波長500nmのLED(HPWN-MC00)を用いたときの結果である。横軸は、PMTに入射した光パル

スとその受光面からたたき出すパルス当たりの平均光電子数で、この値をPMTの量子効率(500nmの光に対して0.2)で割れば、パルス当たりの平均入射光子数が得られる。また、縦軸は、この光源の光パルスをPMTで検出したときの検出効率を測定した結果であるが、この検出効率は、光電子数にポアソン分布を仮定したときの予測値(図中の曲線)と一致している。

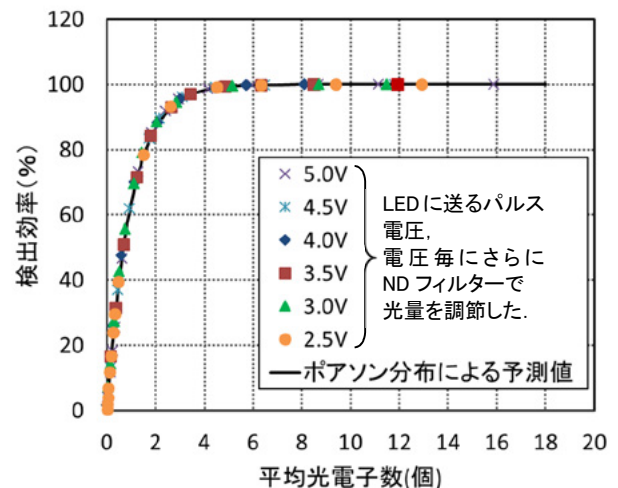


図2 PMTによる微弱パルス光源のテスト結果

図2の結果から、この光源には次のような特性があることが分かる。

- ▶ パルス当たりの平均光子数を0~数十個の範囲の任意の値に設定することができる。
- ▶ パルス毎の光子数が、理論どおり、設定した平均値のまわりにポアソン分布する。

本研究では97%以上の検出効率があれば「100%近い検出効率」が得られたものとみなすことにして、そのために必要な平均光電子数を求めることにすると、図2の測定結果から、このPMTでは平均光電子数が3.5個あればその要件を満たすことが分かる。このPMTの量子効率は、波長400nm付近で最も大きい23%、波長500nmで12%、530nm付近で8%であることから、それぞれの波長領域で平均光電子数が3.5個となるためには、平均入射光子数が15.2個、29.2個、43.8個必要となる。なお、PMTの検出効率には温度依存性はほとんどないことが知られているので、本研究では、PMTは常に室温中に置いた。

### 3.2 APDの微弱光検出能力

APD S8664-55とS5343modの検出効率の測定結果をそれぞれ図3、図4に示す。光源のLEDには、APDが最も高い量子効率を示す波長領域に合わせて、

HPWN-MG00 を選択した。横軸は、APD に入射した光パルスがたたき出すパルス当たりの平均光電子数で、測定した APD の出力信号から求めた。温度毎の測定点をつなぐ曲線は、ポアソン分布による予測値ではなく、単なるスプライン曲線である。

APD で微弱な光信号を検出する場合、暗電流によるショット雑音の影響で、信号とノイズを区別するためのしきい値を高く設定する必要があることと、光電子増倍率や入射光の波長に応じて増加する過剰雑音の影響で、出力信号の大きさの揺らぎがポアソン分布から予測される揺らぎの 1.5~2.5 倍に拡大されることなどから、100% 近い検出効率を得るために必要となる平均光電子数は、PMT など、そのような雑音のほとんどない受光素子を用いたときよりも大きくなる。しかし、APD を冷却することにより、ショット雑音の原因となる暗電流が減り、微弱光検出能力を向上させることができる。また、暗電流は APD の受光面の面積に比例して大きくなることから、受光面の大きい S8664-55 よりも、受光面の小さい S5343mod の方が有利である。

図 3、図 4 に示す結果の中で最も高性能であった

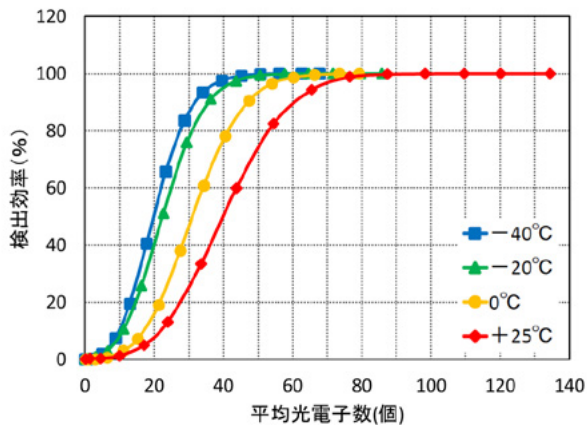


図 3 APD S8664-55 の検出効率

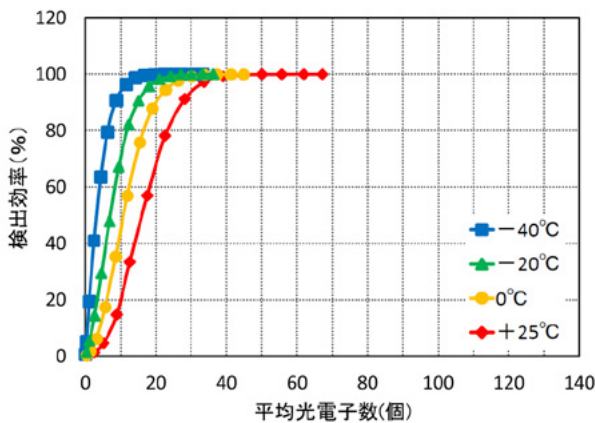


図 4 APD S5343mod の検出効率

のは、 $-40^{\circ}\text{C}$  に冷却した S5343mod で、光電子が平均 12.0 個あれば 97% 以上の検出効率を達成することができる。前述の PMT に比べると大きな値であるが、この APD の量子効率が波長 400nm 付近で 61%、波長 500nm 付近で 91%、波長 530nm 付近で最も大きい 94% であることから、それぞれの波長領域で平均光電子数が 12.0 個となるためには、平均入射光子数が 19.7 個、13.2 個、12.8 個あればよく、波長 500nm 付近の幅広い波長領域で APD の微弱光検出能力が PMT を上回ることになる。ただし、このときの APD の光電子増倍率は約 1200 倍で、APD には大きく、その過剰雑音の影響により、出力信号の大きさの揺らぎがポアソン分布から予測される揺らぎの 2.5 倍ほどに大きくなってしまい、入射した光信号毎の光子数、すなわち入射光量を測定する精度は、PMT よりも悪くなる。

### 3.3 MPPC の微弱光検出能力

MPPC S10362-11-100C の検出効率の測定結果を図 5 に示す。光源の LED には、MPPC が最も高い量子効率を示す波長領域に合わせて、HPWN-MB00 を選択した。横軸の平均光電子数は、信号を出すピクセル数の平均値で、測定した MPPC の出力信号から求めた。ここでも温度毎の測定点をつなぐ曲線は、単なるスプライン曲線である。

APD と同様、MPPC もノイズが多いので、信号に対するしきい値を高く設定しないとノイズと信号を区別することができないが、冷却によってノイズを低減させれば、微弱光検出能力を向上させることができる。図 5 の結果によると、この MPPC を  $-40^{\circ}\text{C}$  まで冷却すれば、97% 以上の検出効率を達成するために必要となる平均光電子数を 5.2 個まで減らすことができる。この MPPC の量子効率が波長 400nm 付近で 72%、波長 450nm 付近で最も大きい 75%、波長 500nm 付近で 69%、波長 530nm 付近で 62% であるこ

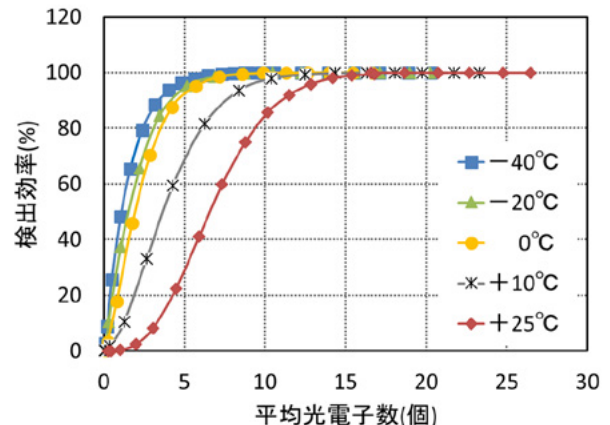


図 5 MPPC S10362-11-100C の検出効率

とから、それぞれの波長領域で平均光電子数が5.2個となるためには、平均入射光子数が7.2個、6.9個、7.5個、8.4個あればよく、波長400nmから500nm付近の幅広い波長領域でMPPCの微弱光検出能力がPMTやAPDを上回る。

#### 4. まとめと今後の課題

素粒子検出器の発光波長は、検出器の中で用いる発光体の種類によって様々であるが、2.1で述べたように、シンチレーターやその波長変換材を用いる場合は、400~600nmの範囲に収まる。また、チェレンコフ光を利用する場合には、もう少し短い波長まで検出できることが望ましい。

本研究では、着目した受光素子毎に、微弱な光信号に対して97%以上の検出効率を達成するために必要となる平均光電子数を測定したが、この平均光電子数を各受光素子の量子効率で割れば、各受光素子に入射する光信号中の平均入射光子数を求めることができる。ただし、受光素子の量子効率は入射光の波長の関数となるので、平均入射光子数も、図6に示すように、波長の関数となる。なお、本研究では、量子効率は、受光素子の製造元が提供する資料やカタログに記載されている量子効率のデータから引用した。

図6から分かるように、波長350nmから600nmに亘る領域で最も微弱光検出能力が高かったのは、MPPCである。このMPPCは、 $-40^{\circ}\text{C}$ に冷却した場合、入射する光信号中に平均7~8個の光子があれば、確実に検出することができる。また、波長の比較的長い500~600nm付近では、APD S5343mod (受

光面1mm $\phi$ )もMPPCに匹敵する高い検出能力を示す。しかし、受光面が大きい方のAPD S8664-55 (受光面5mm $\times$ 5mm)は、それだけノイズも大きくなるため、 $-40^{\circ}\text{C}$ まで冷却しても、50個近い数の光子が入射しないと、十分な検出効率が得られない。一方、波長の比較的短い400~500nm付近では、光電子増倍管(PMT)と $-40^{\circ}\text{C}$ のAPD S5343modは、ほぼ同等の性能を示す。特に、受光面がExtended Green BialkaliのできたPMTは、通常のBialkaliのPMTに比べて、波長450nm以上の領域で感度が低下しにくくなっている。

以上のように、本研究で調べた受光素子の中ではMPPCが最も高感度であったが、このMPPCの受光面は1mm $\times$ 1mmの正方形で、APD S5343modの受光面と同様に小さい。今後の課題として、もっと大きな受光面を持つMPPCについても性能評価を行う必要がある。また、本研究ではAPD、MPPCとも $-40^{\circ}\text{C}$ まで冷却したが、さらに低い温度まで冷却したときの性能評価も行いたい。

#### 参考文献

- [1] K. Kleinknecht: Detectors for Particle Radiation (2<sup>nd</sup> Edition), Cambridge University Press, p.1 (1998).
- [2] K. Deiters, *et al.*: Nucl. Instr. and Meth. A, 453, 223 (2000).
- [3] T. Okusawa, Y. Sasayama, M. Yamasaki, T. Yoshida: Nucl. Instr. and Meth. A, 459, 440 (2001).
- [4] T. Yoshida, T. Sora: Nucl. Instr. and Meth. A, 534, 397 (2004).

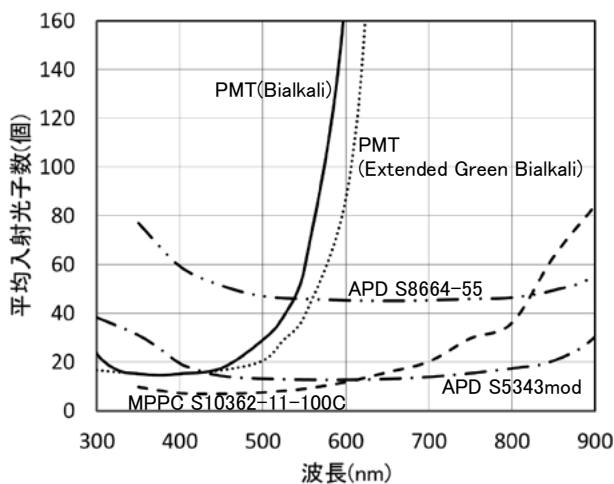


図6 各受光素子で97%以上の検出効率を達成するために必要となる平均入射光子数. APDとMPPCは $-40^{\circ}\text{C}$ , PMTは室温中で動作させた場合の結果。



# 分子動力学シミュレーションにおける高分子結晶ラメラ構造の生成法

山田 忠明\* 玉井 良則\*

## Generation Method of Polymer Crystalline Lamella in Molecular Dynamics Simulation

Tadaaki YAMADA\* and Yoshinori TAMAI\*

(Received January 19, 2018)

In order to study fracture and deformation of semicrystalline polymer materials using a molecular dynamics (MD) simulation, we have to generate lamella structures. In this study, a new method to generate the lamella structures was proposed and tested. The MD simulations were performed using *NVT* or *NPT* ensemble in the temperature range of 300-1000 K. The stability of crystals, molecular arrangements, and chain entanglements were examined carefully, using various initial chain arrangements and thermal histories. Obtained lamella structure shows satisfactory response to external stresses.

**Key Words :** Molecular Dynamics Simulation, Lamella, Polypropylene, Crystal

### 1. 緒言

高次構造を持つ高分子は結晶やアモルファス、ラメラ、タイ分子等様々な要素があるため、高分子材料の破壊機構については分子レベルで議論する必要がある。結晶性高分子は球晶という球状の結晶組織で構成される。球晶はラメラと呼ばれる板状結晶が放射状に伸びてできている。球晶内では結晶とアモルファスの積層構造になっており分子鎖はラメラに対して垂直方向に並んだ状態で結晶としてパッキングされている。ラメラ間には結晶同士を繋ぐタイ分子が存在する。タイ分子の形態は様々である。共有結合により結晶同士を結んでいる分子鎖、ループ同士の引っ掛かり、結晶から出た分子鎖がアモルファス内だけで絡み合う状態等が混合している<sup>[1]</sup>が、それらの存在比率は明確になっていない。しかしタイ分子は高分子の力学特性に大きな影響を及ぼすため決して無視できない存在であり、シミュレーションモデルにも取り入れなければならない。このような破壊に関する要素を分子レベルで調べるために、高

分子のモデルに対して応力印加のシミュレーションを行う。そのためには研究対象である高分子のモデルを作成しなければならない。結晶やアモルファスは比較的容易に作成できるが、それらを混合させ、しかもタイ分子を含む系を全原子モデルで作成するには試行錯誤が必要である。そこで、表面を含むモデルや特殊な分子鎖配置のモデルなどに対して様々な条件で熱処理することで温度や分子鎖配置による高分子の応答性を調べ、ラメラ構造のモデルを生成するのに適切な条件を決定した。

### 2. シミュレーション

s-PP 結晶は X 線回折実験<sup>[2]</sup>のデータを用いて初期構造を生成した。3次元周期境界条件を用いて結晶の分子鎖方向に無限に積層されたラメラ構造を生成した。最終的に作成したラメラ構造については結晶層の重合度は 32、アモルファス層の重合度は 32~128 である。総原子数は約 2 万である。ラメラ構造の結晶部分以外は密度が低くなるように分子鎖を配置し、アモルファス内で結晶同士を結び付ける分子鎖(entangled cilium)が絡み合うようにした。高温でアモルファス層の分子鎖を絡ませた後、冷却し、最後のサンプリングでセルの角度固定を解除した。分子

\* 工学研究科物理工学専攻

\* Applied Physics Course, Graduate School of Engineering

鎖の配置方法や熱処理条件の決定については3節で述べる．分子力場には AMBER を用いた．結合長は SHAKE 法を用いて拘束した．応力テンソルおよび温度は Parrinello-Rahman 法と能勢の方法で制御した．応力テンソル  $S$  と  $\Sigma = h_0^{-1}(S - p)(h_0^{-1})^T V_0$  により関係づけられる対称テンソル  $\Sigma$  ( $h$  はセルの稜ベクトルを成分とする行列,  $p$  は静水圧,  $V$  は体積であり, 添え字の  $0$  は基準状態を表す) の各成分を変化させることでサンプルに応力を印加した．シミュレーションには分子シミュレーションプログラム PAMPS を用いた．計算は主に京都大学情報メディアセンターのスーパーコンピュータを用いた．

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 結晶の熱的安定性

ラメラ構造を作成する上で結晶の熱的安定性を考慮する必要があるため温度を上げるシミュレーションを行った．s-PP I 型と II 型について表面を含む結晶モデルを作成し 300 K から 1000 K まで温度を上げる *NVT* シミュレーションを行った．温度は 100 K ずつ変化させた．1つの設定温度で 121 ps シミュレーションを行った．結果のスナップショットを図 1 に示す．重合度 48 の分子鎖を  $c$  軸方向に沿って 48 本 ( $a$  軸方向に 6 本,  $b$  軸方向に 8 本) 配置しており結晶層以外は真空となっている． $a$  軸,  $b$  軸方向の鎖の間隔は X 線回折実験<sup>[2]</sup>により得られた格子定数に合わせている．温度を上げることで表面から結晶内部に向かってコンフォメーション変化が進み, 900 K よりも高くすると結晶構造が崩れた．800 K や 900 K において *NPT* シミュレーションに切り替えることで, 崩れた部分でラメラ間のアモルファスを構成することを試みたが, アモルファスのように分子鎖同士が絡み合うための空間が足りないため, 絡み合わずに結晶の崩れが進行するのみとなった．したがってアモルファスを構成するためには密度の薄い部分を作るようにして分子鎖を配置するべきである．

#### 3.2 初期配置と熱処理方法の決定

アモルファスが絡み合うスペースを確保するために図 2 のように分子鎖をずらした初期配置で試験的にシミュレーションを行った．分子鎖の重合度は 48 (結晶部分の重合度は 24, アモルファス部分の重合度は 24) である．温度 300 K において 260 ps の *NVT* シミュレーションを行った結果, 図 3 に示したように突出した分子鎖は凝集した．したがって密度の低い部分で絡み合いを作るには前節で示したように高温でコンフォメーションを崩す必要があることがわ

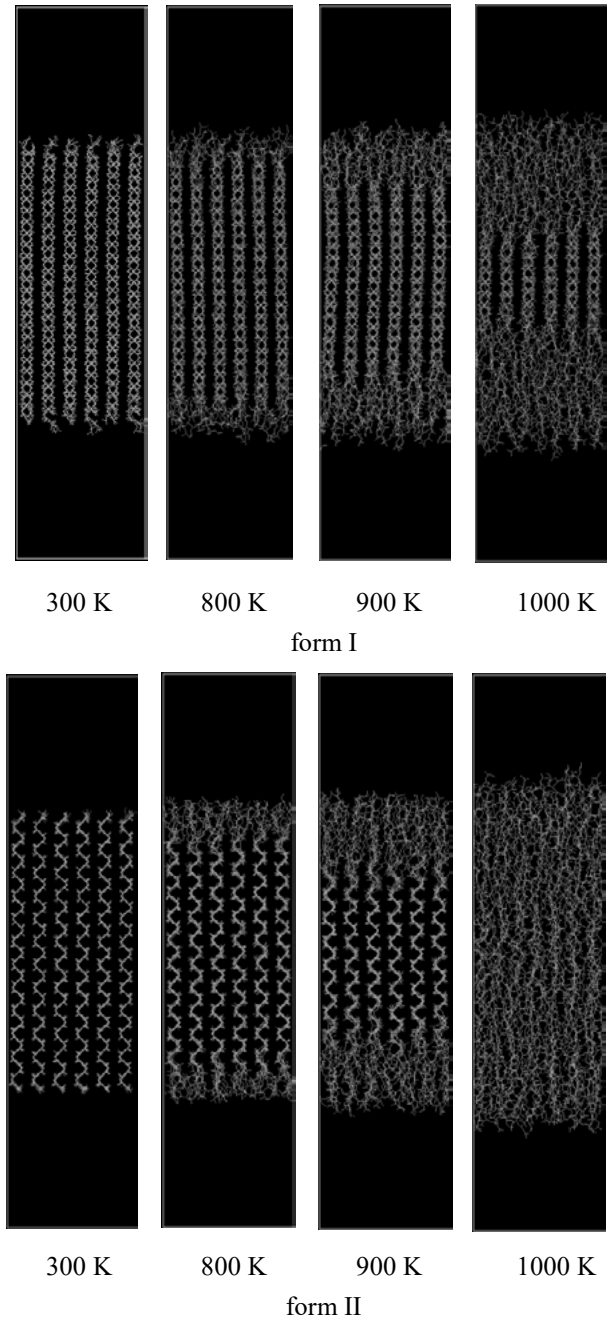


図 1 表面を含む s-PP 結晶モデルの温度を上げるシミュレーションの結果．( $ac$  平面のスナップショット) 400 K から 700 K は省略．

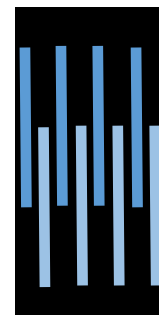


図 2 分子鎖をずらした初期配置の模式図

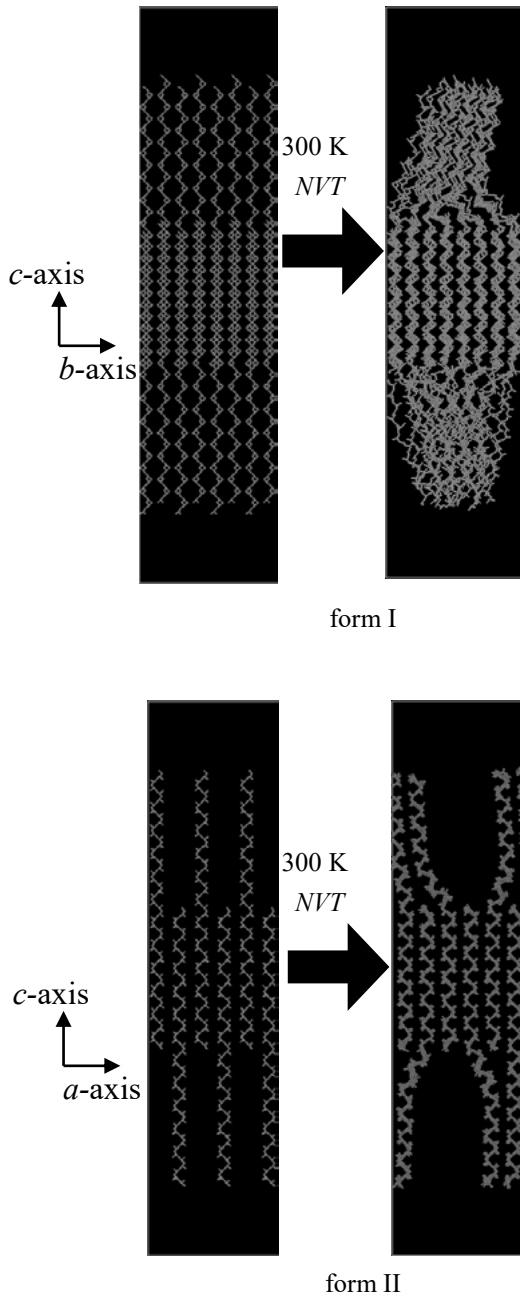


図3 300 Kにおけるずらした分子鎖配置の *NVT* シミュレーション.

かる. 図4にずらした分子鎖配置を用いて高温で *NVT* シミュレーションを121 ps行った時のスナップショットを示す. 低密度部分では近くの分子鎖同士で絡み合っていることがわかる. この状態から *NPT* シミュレーションに切り替えても結晶層の上面と下面のアモルファスが衝突するだけであり, 1層で絡み合ったアモルファスを作ることはできなかった.

アモルファス用の分子鎖は初期配置の段階で結晶の上面と下面の分子鎖をかみ合わせておくべきであるため図5のような初期配置を考案した. 結晶から突出した分子鎖によりアモルファス内で結晶同士が結び付けられる.

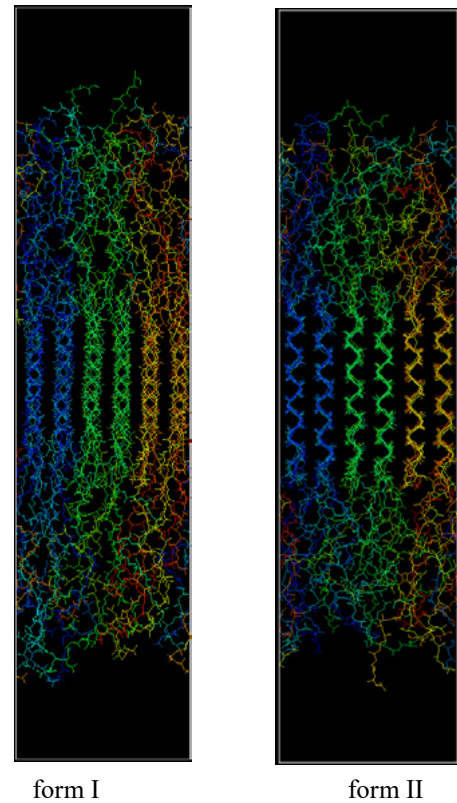


図4 ずらした分子鎖配置を用いて高温で *NVT* シミュレーションをした時のスナップショット. form Iは900 K, form IIは800 Kで121 ps行った. 絡み合い確認のため分子鎖に色を割り振った.

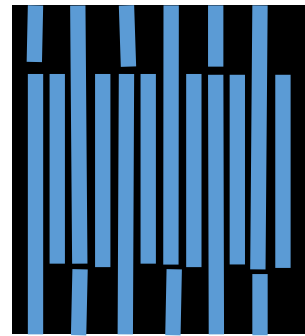


図5 長い分子鎖により上下をかみ合わせた初期配置の模式図. 突出させた分子鎖は周期境界を跨いでいる.

目的の温度である300 Kまでの熱処理過程を図6に示す. 結晶構造を維持するために, 最後の300 Kでの *NPT* シミュレーション以外はシミュレーションセルの角度は固定した. 分子鎖を配置しエネルギー極小化をした後, 低密度部分のコンフォメーション変化を促すために800 Kで *NVT* シミュレーションを行った. その後700 K, 600 Kにおいて20 ps ずつ *NPT* シミュレーションによりシミュレーションセルを縮めた. 高温において *NPT* シミュレーションを行うと



結晶構造は崩れやすいが、20 ps 程度であれば結晶構造を保つことができた (図 7)。アモルファス部分を十分絡ませるために、600 K において長時間(10021 ps)の *NVT* シミュレーションを行った。600 K では長時間シミュレーションしても結晶構造が崩れにくいのでこの温度において十分緩和させた。サンプリングの目的の温度である 300 K まで温度を下げながら *NPT* シミュレーションを繰り返し、最後のサンプリングでセル角度の固定を解除し 1 ns の *NPT* シミュレーションを行うことでラメラ構造のサンプルを得た。

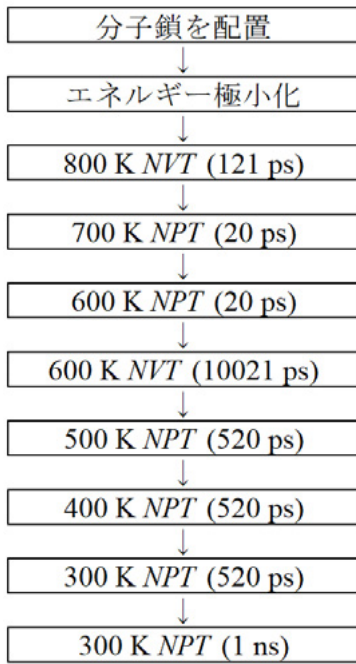


図 6 ラメラ構造を得るための熱処理過程

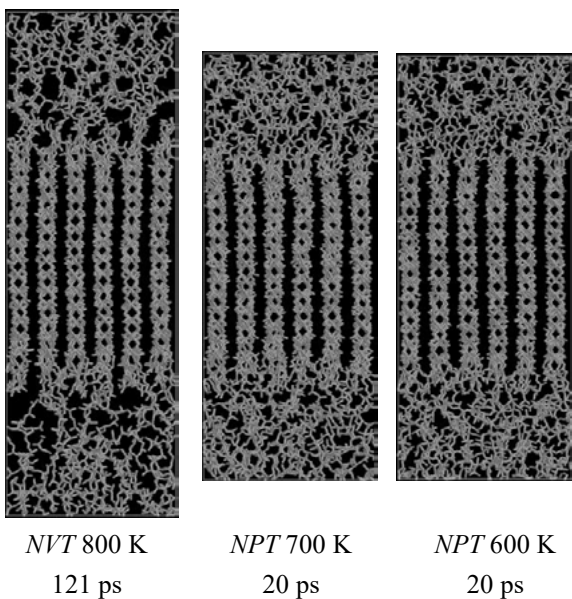


図 7 800 K(*NVT*)から 600 K(*NPT*)まで s-PP form I を熱処理した時のスナップショット。

### 3.3 密度の評価

このようにして得たラメラ構造の結晶層の厚さは約 6 nm, アモルファス層の厚さは約 4 nm であった。表 1 に得られた構造の結晶部分およびアモルファス部分の密度を示す。実験値と比較すると、それぞれ近い値になっていることが確認できる。

表 1 s-PP ラメラ構造の結晶とアモルファスの密度

	$\rho_{\text{crystal}} (\text{g/cm}^3)$	$\rho_{\text{amorphous}} (\text{g/cm}^3)$
Simulation	0.911	0.823
Experiment <sup>[3]</sup>	0.900	0.858

### 3.4 タイ分子数及びアモルファス重合度の調整

図 5 の初期配置では結晶を構成する分子鎖の 4 本中 1 本をタイ分子としていたが、図 8 のようにアモルファス内で独立した分子鎖を介在させることでタイ分子の本数を減らすことができる。ラメラ間の分子鎖の形態<sup>[1]</sup>は様々であるが、タイ分子の存在する割合については明確になっていない。そこで図 9 のようにタイ分子の配置を変えることでタイ分子の割合  $P_{\text{tie}}$  を 1/4, 1/8, 1/48 の 3 通りのモデルを作成した。これら 3 通りのモデルはアモルファスの重合度  $N_{\text{amo}}$  は 32 であるが  $P_{\text{tie}} = 1/48$  のモデルを基準として  $N_{\text{amo}} = 64, 128$  のモデルを作成した。図 10 に  $N_{\text{amo}} = 32, 64, 128$  の分子鎖配置後に 1 ps シミュレーションを進めた時のスナップショットを示した。アモルファス中の分子鎖はそれぞれ 24 本, 12 本, 6 本である。熱処理後、完成すると図 11 のようになる。

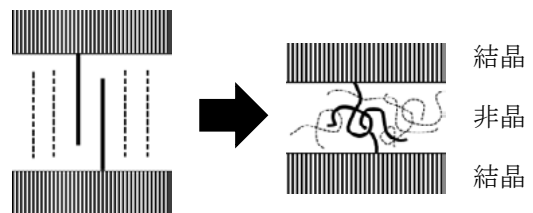
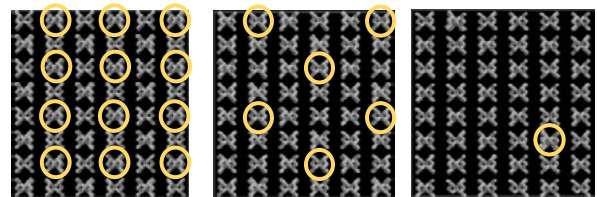


図 8 ラメラ間分子鎖(entangled cilium)の模式図



$P_{\text{tie}} = 1/4$        $P_{\text{tie}} = 1/8$        $P_{\text{tie}} = 1/48$

図 9 タイ分子の配置. *ab* 平面スナップショット. 丸を付けた分子鎖がタイ分子。

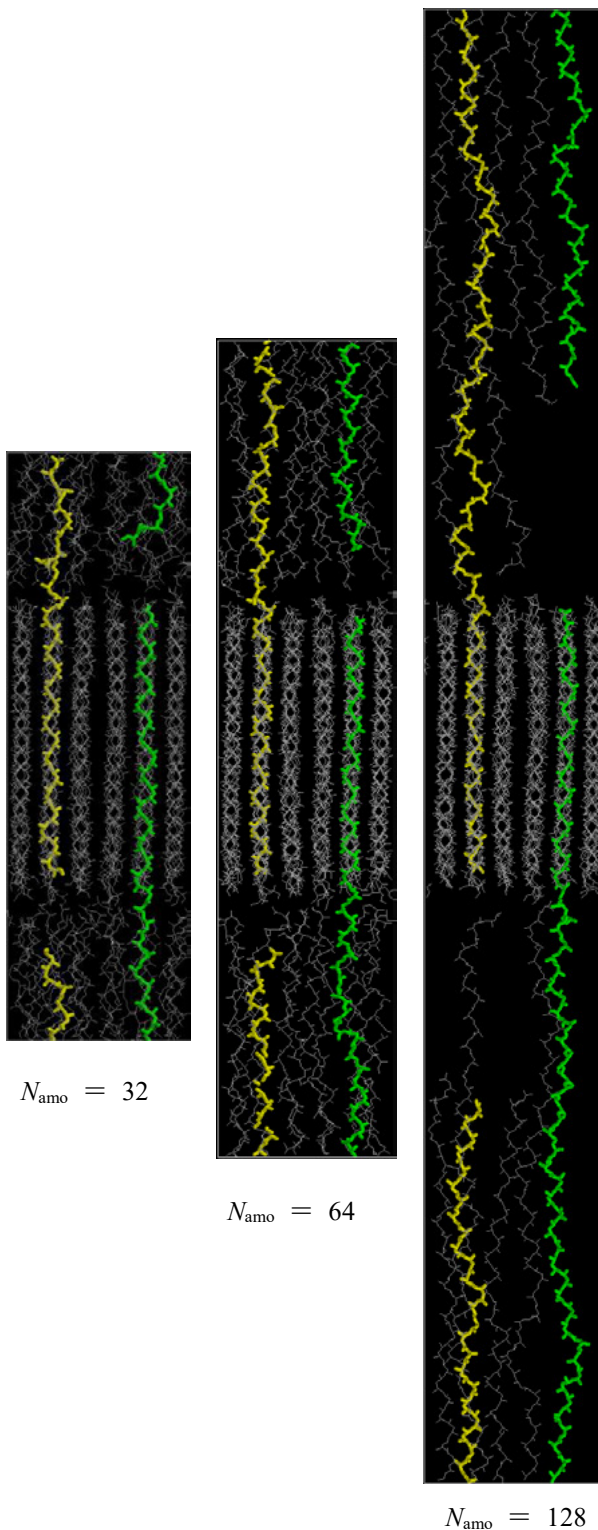


図10 アモルファス重合度を変える時のタイ分子の配置 ( $P_{\text{tie}} = 1/48$ ).  $ac$  平面スナップショット, 平面図のため 1 ps シミュレーションを進めた図を表示した. 色付きの太い分子鎖がタイ分子.

### 3.5 アモルファスの絡み合い

図12に s-PP form I のラメラ構造に剪断応力を印加した時のスナップショットを示す. アモルファス部分の絡み合いを見やすくするために2本のタイ分子を強調表示した. 結晶同士を結び付ける分子鎖が

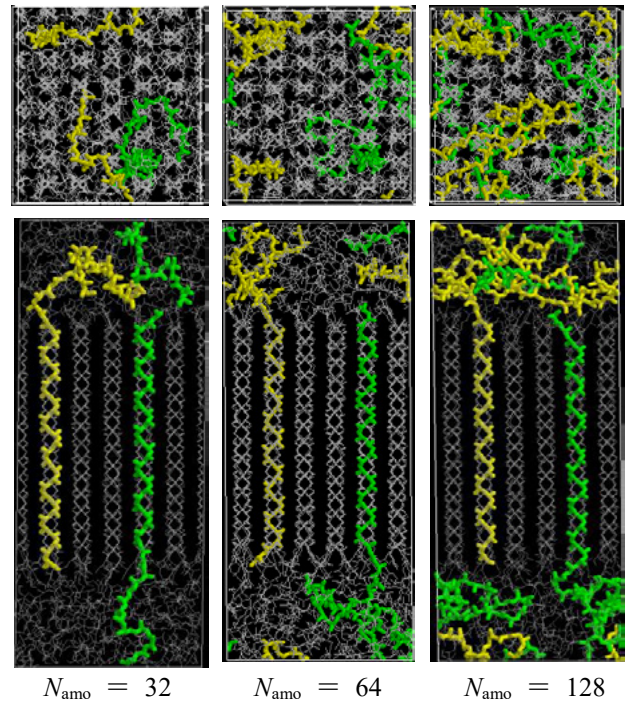


図11 サンプル完成時のタイ分子の様子. 上は  $ab$  平面スナップショット, 下は  $ac$  平面スナップショット,  $P_{\text{tie}} = 1/48$

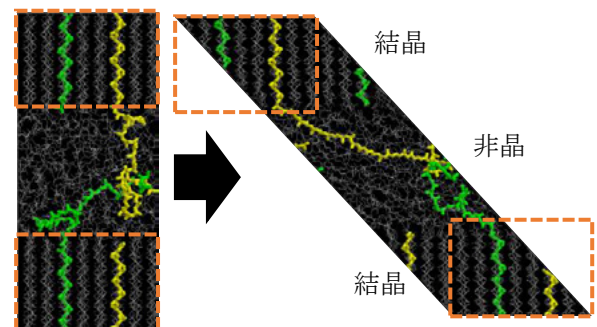


図12 s-PP form I ラメラ構造に剪断応力を印加した時の  $yz$  平面のスナップショット. アモルファスを中央に表示.

多いこのようなモデルはひずみ増加後に強い剛性を発揮した. 図5の初期配置から作成したモデルでタイ分子として機能する分子鎖を含むラメラ構造が生成できた.

### 3.6 構造の妥当性

図13に s-PP form I のラメラ構造に  $c$  軸方向の応力を印加した時の応力ひずみ線図を示す. 一連のデータ点の終点まで徐々に変形し, 次の設定応力で破断した. 初期配置で分子鎖をかみ合わせたモデルは破断応力が高くなったため, 強力な絡み合いを再現できたことがわかる. 400 K においてはアモルファスの流動性が高くなり, 応力ひずみ線が大きく乖離した部分に絡み合いの効果が表れたと考えられる. 実験<sup>4)</sup>ではひずみ 5%でラメラの分離による亀裂の

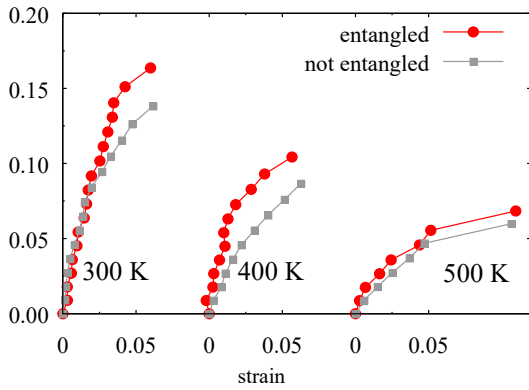


図 13 s-PP ラメラ構造に  $c$  軸方向の応力を印加した時の応力ひずみ線図. entangled は図 5 のような初期配置で作成した上下に突出した分子鎖が絡み合ったサンプル. not entangled は図 2 のような初期配置から作成した上下での絡み合いが不十分なサンプル.

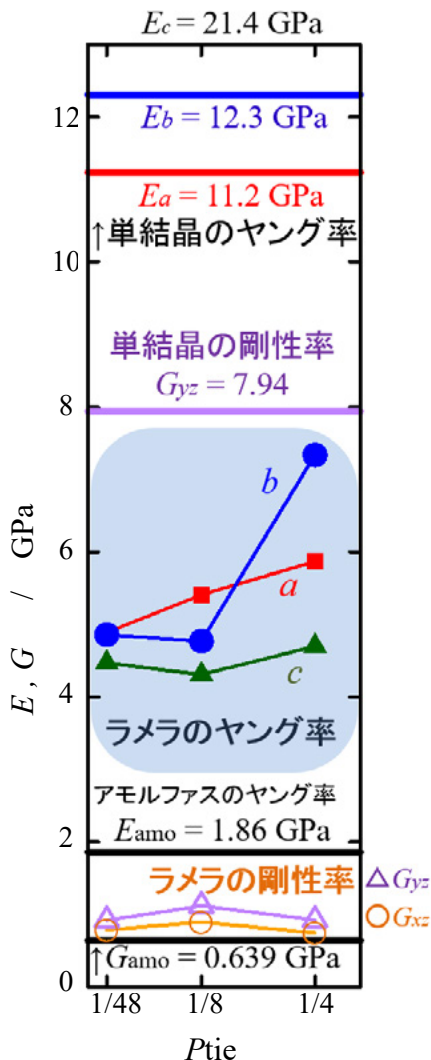


図 14 s-PP の弾性率. ラメラの  $a$  軸,  $b$  軸  $c$  軸延伸及び剪断応力印加の結果を点で, 単結晶とアモルファスの結果を線で示した.

拡大が確認されているが, 今回作成したモデルを用いたシミュレーションでもひずみ 5%付近で破断が起きたため実験とオーダーが一致した. 図 14 にシミュレーションにより得られた s-PP の弾性率をまとめた. PP の弾性率の実験値<sup>[3]</sup>は 1.032 GPa ~ 1.720 GPa であるが, ラメラ構造の剛性率  $G_{yz}$  の平均値は 1.01 GPa となり近い値となった. 球晶内のラメラには様々な方向に応力がかかるが, アモルファスの剪断変形が容易に起こるためラメラの剪断変形の結果が実験結果に近い値を示したと考えられる. このように, 破断ひずみや弾性率が実験値に近づいたことからラメラ構造がよく再現できたといえる.

#### 4 結論

分子シミュレーションを用いて破壊の研究を行うにあたって必要となる高分子のラメラ構造のモデルを作成した. 温度や分子鎖配置の違いによる高分子の応答性を理解することで, ラメラ構造のモデルを全原子モデルで生成することに成功した. 高分子の破壊の研究をするうえで重要な要素であるタイ分子を再現し, せん断応力印加時に剛性に影響を及ぼすことを確認した. アモルファス内でタイ分子同士が絡み合うことにより結晶同士をつないでいるモデルを用いたが, 球晶と呼ばれる結晶組織が崩壊する場合, 結晶同士を共有結合により繋ぐタイ分子やループ同士の引っ掛かりといった要素を考慮する必要がある. しかし, 球晶のような大きな系で鎖の初期配置を与えることはできない. 今回作成したモデルの数倍程度の規模で鎖を簡素化したモデルであれば, 複雑な形態をとるラメラ間分子鎖を含めてより発展させたシミュレーションすることができる.

#### 参考文献

- [1] B. Elvers, Eds., *Ullmann's Polymers and Plastics: Products and Processes*, Wiley-VCH, Weinheim (2016).
- [2] C. De Rosa and P. Corradini, *Macromolecules* **26**, 5711 (1993).
- [3] J. Brandrup and E. H. Immergut, Eds., *Polymer Handbook 3rd Ed.*, Wiley, New York (1989).
- [4] J. X. Li and W. L. Cheung, C. M. Chan, *Polymer* **40**, 2089 (1999).

## 工学部学生対象の教職専門科目「理科教育法」の授業効果 —レポート等からみた受講前後の教職に対する意識の変容—

葛生 伸\*

### Effects on Practices in a Class “Instruction Method for Science Education” in Teacher Training Course for Engineering Students —Changes in Consciousness of Teachers Before and After Attendance from Reports—

Nobu KUZUU \*

(Received January 29, 2018)

Practices in a class “Instruction Methods for Science Education” in the teacher training course for engineering students who will be high school teachers are reported. The fundamental knowledges and concepts on the science education introduced in first five lessons of ninety-minutes class lectures. After these lectures, the teaching practice training are done for all students. Based on the description in the initial and final reports, changes of perspectives on education and studies by taking the class are reported.

**Key Words** Evaluation of Teaching, Teacher Training Course, Engineering Students, Science Education

#### 1. 緒言

福井大学工学部では、教育職員免許状（以下「教員免許」）が取得できる。当初は高等学校の「工業」の免許のみ取得出来たが、1999（平成11）年度の大学改組以降理科の免許が取得できるようになった<sup>[1],[2]</sup>。以後の学科構成と取得できる教員免許の種類を表1に示す。取得できる免許状は高等学校I種免許状であり、中学校の免許は取得できない。

1999年度の改組では複数の教員が教育学部（旧）から工学部に移動した。それ以来、工学部の「理科教育法」を工学部教員から担当している。筆者は、前任者の退職に伴い、2009（平成21）年度から理科教育法の授業を担当している。

表2に示すように、教職専門科目は3年次から履修する<sup>[2]</sup>。そのため、2016年改組以前に入学した学生は理科教育法をまだ履修していない。そこで、2015

表1 福井大学工学部の学科構成と取得できる教育職員免許状（1999年～2015年入学生）

入学年度	学 科	教 科		定員
1999年度 と 2015年度	機械工学科	数学	工業	75
	電気・電子工学科	理科	工業	64
	情報・メディア工学科	数学	工業	65
	建築建設工学科	理科	工業	65
	材料開発工学科	理科	工業	75
	生物応用化学科	理科	工業	65
	物理工学科	理科	工業	51
	知能システム工学科	数学	工業	65
2016年度 と 2015年度	機械・システム工学科	工業		155
	電気電子情報工学科	工業		125
	建築・都市環境工学科	工業		60
	物質・生命化学科	理科		135
	応用物理学科	理科		50

\* 大学院工学研究科物理工学専攻

\* Applied Physics Course, Graduate School of Engineering

表 2 教育職員免許状取得に必要な科目。

教職に関する科目		
科目名	履修時期	備 考
教育学研究Ⅰ	3 後	教育地域科学部の科目を履修（各 2 単位）
教育心理学	4 後	
理科教育法Ⅰ	3 後	
教育課程研究	4 前	
学校教育相談研究Ⅰ	4 前	
教育実践研究Ⅶ	4 前	教育実習（事前事後学習含む；2 単位）
教科に関する科目		
物理学	各学科毎に指定された科目を履修。	
化学		
生物学		
地学		
その他教科専門科目	各学科の教育課程表にある教科専門科目を教職専門科目と併せて 47 単位以上になるように取得	
その他必要科目（*は卒業必修科目）	外国語*、情報処理基礎*、体育実技、憲法概論	

表 3. 教育職員免許状取得までの流れ。

時 期	項 目
1 年次 11 月	教員免許に関するガイダンス
2 年次 11 月	教員免許に関するガイダンス 教育実習仮申込み
2 年次後春休み	教育実習内諾
3 年次 6 月頃	教育実習正式依頼
3 年次後期～	教職専門科目受講開始
3 年次 12 月	教育実習事前学習 （教育実習実施者の報告会参加）
4 年次 4 月	教育実習事前学習 （ビデオ視聴、現職高校教員講話）
4 年次 5 月～9 月	教育実習（原則母校、中学校でも可）
4 年次 12 月	教育実習事後学習（教育実習報告会）

表 4 受講者の構成

学科年度	電気・電子工学科	建築・建設工学科	材料開発工学科	生物応用化学科	物理工学科	男	女	合計
2009	0	0	3	4	0	2	5	7
2010	0	0	3	1	7	9	2	11
2011	0	0	1	7	2	7	3	10
2012	1	0	8	3	2	10	4	14
2013	1	0	2	9	6	10	8	18
2014	0	1	2	8	8	13	6	19
2015	1	1	4	2	3	10	1	11
2016	1	1	2	1	7	11	1	12
2017	1	0	1	0	8	10	0	10

年以前の入学者に対する理科教育法の授業の実践を報告する。さらに、2016 年に実施した授業のレポートの記述をもとに、学生の意識やその変容をもとに授業に効果を考察する。

## 2. 教職課程の履修と授業の概要

表 5 授業内容の構成。

1 回目	受講についての注意、教師として社会人として生きること、受講者の自己紹介。
2 回目	理科教育の目的、理科の学習指導要領。
3 回目	指導案の書き方、模擬授業を行うにあたっての注意
4 回目	教育実習ビデオ（物理）視聴、ビデオの解説、意見交換
5 回目	アクティブ・ラーニングについて
6~14 回目	模擬授業（2 人一組）、質疑応答・意見交換。この間、時間が余る場合は筆者による実験教材の活用の模擬授業実施
15 回目	まとめ、意見交換

### 2.1 教員免許取得までのながれ

表 3 に教員免許取得までの流れを示す。11 月頃にガイダンスを行う。1 年次に対しては表 2 の科目以外に、憲法概論、体育実技など卒業必修単位以外の教育職員免許法<sup>1)</sup>で定められている科目の履修および教職科目取得にあたっての心構えを説明する。2 年次の学生はこの時点で教育実習の仮申込みを行う。さらに、2 年時終了の春休みに実習校（原則母校、中学校での実習可）の内諾を得、3 年次の 6 月頃に実習校に正式の申込を行う。3 年次後期からは教職専門科目を受講する。理科教育法は教育実習に先立って履修する必要があるため、3 年次後期に履修する。教育実習は教育実践研究Ⅶの一環として取得する。科目名にⅦが付いているは、教育地域科学部と併せて科目名が決められているからである。工学部学生対象の理科教育法も正式には「理科教育法Ⅰ」である。

教育実践研究Ⅶでは、事前事後学習が含まれている。3 年次の 12 月に事前学習として、同年に教育実習実施者の報告を聴講する。実施学生に対しては、事後学習となる。4 年次の 4 月に、事前学習として教育実習の映像教材の視聴と、現職高等学校教員による講話を聴く。教育実習は、実習校の指定する時期に 2 週間（実習校が指定する場合は 3 週間）実施する。多くの場合は 5~6 月または 9 月に実施する。

### 2.2 受講人数と構成

表 4 に筆者が担当した理科教育法Ⅰの受講者数を示す。おおよそ 10~20 人程度で材料開発工学科、生物応用化学科、物理工学科の学生が多い。電気・電子工学科や建築建設工学科の学生の履修は少ない。2015 年度以降女子学生の受講が減っている。

### 2.4 理科教育法の授業構成

授業構成を表 5 に示す。初回から 5 回目までは、理科教育の歴史、学習指導要領、指導案の書き方、

表 6 模擬授業の流れ

	項目
事前	前回授業後指導案、板書計画個別指導
当 日	授業内容の説明（模擬授業担当者）
	模擬授業（50分）
	受講者による感想・意見交換 教員による講評
翌週	意見交換メモを提出（模擬授業実施者）
	受講レポート提出
翌々週	模擬授業実施レポート提出

表 7 模擬授業の内容例

	分野	内容
1	物理	熱とは何か
2	物理	光の性質
3	物理	エネルギーの利用
4	化学	プラスチック
4	化学	食品の化学
5	物理	衣料の科学
6	生物	人の視覚と光
7	生物	微生物の存在
8	生物	微生物の人間生活
9	地学	地震による景観と災害
10	地学	太陽系の中の地球

授業の仕方などの講義を行う。その後、模擬授業を実施する。最後に全体の総括と意見交換を行う。

### 2.5 模擬授業

全員が模擬授業を実施する。原則として2人一組で50分の授業を前半、後半にわけて行う。受講者が少ない場合は、2回行う。時間数が余る場合は、授業担当者が教員免許状更新講習<sup>[4]</sup>などで紹介してきた学校授業で役立つ演示実験や最近の理科教育に関する講義などを行う。

模擬授業の流れを表6に示す。教科書として啓林館の「科学と人間生活」<sup>[5]</sup>を使用する。「科学と人間生活」はセンター試験科目になく、主に職業科などで使われる。一方、物理、化学、生物、地学の分野を満遍なく扱うとともに、生活関連の学習を意識している。そのために模擬授業に用いるのに適当であると判断した。さらに、職業科での使用が多いことから、多様な生徒を意識した模擬授業を意識してもらうにも有効と考えた。模擬授業の分野は物理、化学、生物、地学のいずれかにかたよらないように、表7に示す分野から選んで割り当てる。

最初の5回の講義の中で、指導案、板書計画の書き方、物理に関する教育実習のビデオ視聴を行い授業のやり方に学ぶ（表5）。

模擬授業の流れを表6に示す。模擬授業担当者は、事前に指導案、板書計画について教員と打ち合わせ

表 8 初回および最終レポート課題

<p>【初回授業出題レポート】教員免許取得を考えている工学部1年生を「想定読者」として下記の事を書け。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 自分の所属する学科を選んだ理由</li> <li>2) なぜ教員免許をとりたと思ったのか</li> <li>3) どのような教員になりたいのか</li> <li>4) 教員になるとしたら工学部出身であること、自分の学科の専門をどのように活かしたいと考えているか。</li> <li>5) 教員になれなかった場合、教員免許状を取るために受講した科目および教育実習はどのように将来の自分の仕事に役に立つと思うか。</li> </ol>
<p>【最終レポート】「理科教育法」受講前の理科教員志望の工学部学生を「想定読者」として下記の問に答えよ。</p> <p>問1 「理科教育法」の受講前後で、「理科教育」および「教師」という職業に対する考え方の変容を両者を対比する表を書き、それを参照しながら変容を述べよ。</p> <p>問2 将来教員になった場合、どのようにして自己学習・自己啓発をし、どのようにして教員としての力量を上げ、どのようにして人間的に成長していきたいと考えるか。そのような自分の生きる姿をどのような形で生徒に見せたらよいと考えるか。</p> <p>問3 もし君が「理科教育法」の授業を担当するとして、出題する試験問題またはレポート問題を考えよ。さらに、それに対する解答例を書け。</p>

理科教育法第6回模擬授業受講報告書

平成28年12月20日

YY工学科 14XXXXXX □△▽

1. 模擬授業概要

日時と場所:平成28年12月19日 8階 117M  
 指導者:□△ □◇(前半)、▽△ △◇(後半)  
 生徒:理科教育法受講生 10名  
 授業時間:50分間  
 単元:第4節 宇宙や地球の科学 第2章 自然景観と自然災害

2. 模擬授業内容に対して

高校教員が実際に授業をしているのではないかと錯覚するほど授業らしく、十分教育実習をこなせるレベルであったと感じた。具体的に良かった点として挙げると、

- ・生徒の様子を伺いつつ、生徒の質問に答えながらも時間に余裕があった。
- ・板書の構成が整理されていた。
- ・地形や地震についてよく理解していて、それを活かしてわかりやすく(誤解のないように)説明していた(特に、地震の距離による被害は指数関数的に減衰し、音や光も同様に指数関数的に減衰することを踏まえて例えとして音や光を挙げたのには感銘を受けた)。

などがある。

意見交換の際に具体的な地学の内容に関して指摘があり討論したが、自分は授業を受けていてあまり気にならなかった。科学と人間生活の履修では本履修くらい踏み込んで説明しているほうが良いと思う。改善点として挙げると、

- ・板書の赤チョークを黄色チョークに置いたほうがよい。
- ・図を楕圓に描いたほうがよい(凝縮化のところ)。
- ・配布プリントの説明がなかった。

などがあるが、どれもたいして気にならず生徒から指摘があつてからでも対応できることであると思う。

3. まとめ

完成度の高い授業だったと思うので、プレートの説明を下書きを用いて地震の発生を説明してみたり、凝縮化の実験を行うなど、生徒を驚かせるような工夫を加えてほしい。

以上

図 1 受講報告書の例

を行う。模擬授業当日、模擬授業実施者が5分程度授業の概要を説明したあと、50分の模擬授業を行う。授業開始・終了時の号令と意見交換の司会および記録は次回担当者が行う。最終回模擬授業では初回担当者が行う。

模擬授業終了後、受講者は全員実施した模擬授業に対して意見を言う。必ず良い点から指摘して、その後改善点を言うようにする。人の良い点に目を向

模擬授業実施事後報告書

平成 28 年 MM 月

〇〇B工学部 ●●工学科

3 年 ○△□▽

1. 模擬授業概要  
 実施日時 平成 28 年 XX 月 YY 日(月) 18:20 ~ 19:50  
 担当教科 物理分野 2「光の性質」  
 授業クラス 理科教育法 I 11 名(高校生を含む)
2. 模擬授業前  
 ● 模擬授業準備  
 模擬授業でのパートナー(○△)と打ち合わせ。学習指導案、様式計画、配布資料の作成、実践で使用するための準備、実践の事前試行。
3. 模擬授業中  
 模擬授業「光の性質」。  
 ● ○△：光の導入。生徒への質問「光から通ることができるものは?」、光(色)の見え方、光と媒質の関係性。  
 ● ○△：光の媒質の違いによる性質(特に色)ビの回による見え方、加法混色・減法混色。
4. 模擬授業後  
 模擬授業実施事後報告書の作成。
5. 工夫点  
 光の現象の身近な例を挙げたり、ビの回による光の見え方を詳しく述べたりすることにより、生徒に光について興味を持たせる。光の実験を多く行うことにより、生徒に光についてのイメージをはっきりと持たせる。
6. 反省及び今後の課題  
 実験を多く行ったが、あまり上手くいかなかった。明らかに実験の事前の検証が不十分だった。確実に成功するように実験の授業で行う実験環境をよく考慮し、使う器具及びその使用方法も工夫しなければならなかったと感じた。模擬授業後に先生先生に指摘されて驚いたことだが、今回の実践に関しては非常に良い市販の教材がある。それを使っても良かったのではないかと感じる。  
 また、確認をほとんど書かず、生徒が後日ノートを完てるもののようなことを授業で行ったのかわからないようになってしまった。せめて、重要な事項や事項を指図するか、授業内容をまとめたプリントを配布するべきだったように思う。  
 さらに、授業は物理の内容とつながっているが、物事の関係性を優先し、さまざまな分野を取り入れた結果、自分では上手く授業ができたように思っても、生徒にとっては話について来やすい授業になってしまった。もっと生徒と対話しつつ授業を進めるか、授業の冒頭でどのような内容の授業を行うのか説明するべきだったように思う。
7. 感想  
 大勢を相手に授業をする難しさをひしひしと感じた。明らかに授業準備が足りず、自分の授業も不足していた。今回は失敗ばかりだったが、これはこれで良い経験になったように思う。今後は、この経験を生かしてしっかりと授業準備を行い、生徒にとって良い授業を行いたいと思う。

図 2 授業報告書の例

平成 28 年 MM 月 DD 日

**理科教育法 I 模擬授業に対する意見、評価**

●模擬授業日時 2016 年 XX 月 YY 日(月)  
 ●場所 工学部 1 号館 1 階 117M 講義室  
 ●模擬授業講師 ○△ □◇ ○◇ △▽  
 ●記録者 ●● ▲▲、●● ◆◆

講師	よかった点	惜しかった点	改善点
○△	<ul style="list-style-type: none"> <li>・時間に余裕のある授業内容だった</li> <li>・板書の量が適切で字がとどまきれいだ</li> <li>・説明が上手、聞きやすかった</li> <li>・要点が抑えられていた</li> <li>・①などの番号が振られていて箇条と図の対応が分かりやすかった</li> <li>・立体的な図を時間をかけて丁寧に書いていた</li> <li>・板書の上に書きなおしてくれて見やすかった</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・具体的にどうなるかの説明が足りなかった</li> <li>・赤ばかり使っていた</li> <li>・図の色分けが若干少なくてわかりづらかった</li> <li>・指導案の指導上の留意点の内容が評価の観点になっていた</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地球全体の内部構造の図があればプレートの動く理由がより説明しやすくなると思った</li> <li>・「ひずみで破壊される」など現象の理由の説明を上手く言えなかった</li> <li>・表面の岩石が破壊されるとどんな地形が生まれるのか具体的に説明しやすかった</li> <li>・赤より黄色を使うとより見やすかった</li> </ul>
○◇	<ul style="list-style-type: none"> <li>・時間に余裕のある授業内容だった</li> <li>・板書の量が適切だった</li> <li>・説明が上手、聞きやすかった</li> <li>・覚えて欲しいところとそうでないところを明確にしていた</li> <li>・質問はないか確かめていた</li> <li>・考えさせられるようなまとめだった</li> <li>・要点が抑えられていた</li> <li>・音を使って生徒の注意を引きつけていた</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・図の説明が少なく理解しづらかった</li> <li>・地面の構造とプレートの断面の関係がわかりづらかった</li> <li>・文を黒板に書いた後、そのすぐ上段に黒板の解説文を書き始めたのでノートのスペースが狭くて少し困った</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・図を大きくすると説明しやすくなると思った</li> <li>・黒板は基本的な上から順に書いていくといいと思った</li> </ul>

図 3 意見交換記録の例

ける習慣をつけるためである。意見交換後、模擬授業実施者が総括をして、教員(筆者)が講評する。

受講者は翌週までに受講レポート(図 1)および次回担当者による意見交換記録(図 2)を、教員と模擬授業担当者に提出する。さらに、それらを読んで模擬授業担当者は実施レポートを提出する(図 3)。

3. 受講前後の意識の変容

表 9.1. 所属学科の選択理由と教員免許取得理由。

木造建築に興味あったが、次にやりたい職業が教師。
教えること好きで教員志望。電気系は自分にとって難解だが社会で役立つと思い電気・電子に入学。
高校の先生の影響で「教師」に憧憧。理科教育に必要な深い知識を得、資源の有効利用を学ぶため材料開発を選択。
教えることが好きで教師を目指した。化学の教員になりたかったので材料開発に入学。
教員採用試験ガイダンスで教員という職業に魅力を感じた。化学が好きで生物応用化学科に入学。
両親・親戚が教員。勉強の面白さを伝えるのが楽しい。多様な物理を学び、関連の仕事をしたく物理工学に入学。
物理現象の原理と式で表すことに惹かれ物理工学に入学。教え好きで、物理学の面白さ多くの人に伝えたい。
物理系のお話を聞くのが好きで物理工学科に入学。小中学生の頃教えることが楽しかった。教える仕事に就きたい。
高校の物理の先生が分かりやすく、理解がよくでき好きになった。そんな教員になりたいと思い物理工学科に入学。
小学生の頃から職業としての教師に憧れがあり、理科、特に物理学に興味あったので、物理工学科を選んだ。
難解な物理学、数学の修得のため物理工学科に入学。わかりやすく伝えることに自信があり、教員に向いている。

表 9.2 工学部出身であること教員としてどのように活かしたいと考えているか。

専門で学んだ力学の応用、建物の配線などの例が使える。理科では抽象的・理想的扱が多いので、工学知識を生かした調べ方、実用化方法等のイメージを持たせる。
化学のほとんどの範囲を深く学ぶので、高校理科より深く説明できる。
化学を深く学んできたので、実験・講義で学んだ深い経験や知識を活かした授業をしたい。
物理の様々な分野を学べたので、どの分野でも詳しく教えられるように活かしていきたい。
自分が物理学の学習で理解しにくかった点をできる限り簡潔にわかりやすく教え、興味を持たせたい。
物理の興味を促進するため、授業中に豆知識を話し、興味ある生徒への質問に対処できるようにしたい。
高校で可能な限り、多くの理科の実験をしたい。実験によって理科に興味があわく人を増やしたい。
大学で物理学を学んだので、高校で物理学をより深く教えることができると思う。
物理、化学の基礎が数学で、微積分の考え方や便利さを伝えたい。工学的な測定方法や計算の応用を紹介したい。

3.1 初回および最終レポート概要

前項で述べた模擬授業関係のレポート以外に初回および最終レポートを出題している。表 8 にそれぞれの課題を示す。2016(平成 28)年度のレポートの記述をもとに、受講前の意識、受講前後の変容をまとめた。以下の表では、記述内容を変えない範囲で要約する形で要約した。

表 9.3 教員になれなかった場合、教職科目・教育実習は将来の自分の仕事にどのように役に立つか。

項目	数
伝え方・コミュニケーションスキル	6
プレゼンテーション技術	2
指導力・育成力	3
まとめる力	1
責任感	1
他科目の学習（生物、地学等）	1

表 10.1 受講前後での「理科教育」に対する考えの変容。

受講前	受講後
社会で役立つ考え方、応用の仕方の基礎を学ぶ。	変化なし。
科目に対する多くの量の知識を与えることが必要。	実験・体験を通じた理解の大切さを認識。
自分の担当する科目だけ学べばよい。	物理・化学・生物・地学ある程度できる必要がある。
教科内容を正確に理解させる。	日常生活・他教科との関連の理解も大切。
わかりやすい授業を行うことが大切。	学ぶことの必要性を感じさせる授業をすべき。
知識の伝達が大切。	学ぶ姿勢を身に付けさせることが必要。
身の回りの不思議な現象の面白さを伝える。	論理的思考、生きる力を身に付けるのに最適な科目。
教育を通じて興味を持つ人を増やす。	興味に加え思考力も育てる。
基礎を効率よく修得させる。	自ら探究できるように基礎や思考の重要性を教える。

表 10.2.受講前後で「教師」に対する考えの変容

受講前	受講後
科目の基礎・応用・将来展望、他科目を理解。生徒の特性に応じた授業、集団生活のサポート。	左記の考えを確認。理想的な教育実現には明らかに負担が過大。制度見直し必要。
学校生活を通じて人間性を判断した上で接する必要。	受講前と変わらず。
教師は大変な仕事。	大変だが生徒とともに成長できるやりがいある仕事
教科の面白さを分かりやすく教える。	面白さの伝達に加え興味関心を引き出し考えさせる。
大変だけどやりがいありそう。	生徒第一に、生きる力を着ける。多大な努力時間必要。
学問に興味を持たせ、社会的に模範となる人物。	興味、必要性を感じさせる。教師も社会の要求を理解。
均等に教育。	教え方をきちんと考える
知識を理解させる。	生徒に学び方を教える。

### 3.2 初回レポートからみる受講当初の意識

初回レポートの「所属学科と教員免許取得理由」を表 9.1 に要約した。「教えるのが好きだから」「勉強の面白さを伝えるのが楽しい」「教師となるための基礎を学びたい」という回答が多い。本当にやりたいことの次が教職という学生や、軽い気持ちで参加

表 10.3.受講前後で「理科教育」「教師」に対する考えの変容に対するコメント。

1週間以上準備したが、内容を理解させるのは難しく、実験が失敗する等授業は難航。教師の見えない努力を実感。
AI導入に伴い「生きる力」（前例のない問題、感情の推量、社会変化への対応）の教育が教師の役割となるだろう。
知識のみを教えても理解が難しい。現象やその背景を深く伝えるための試行錯誤が必須。
討論を通じて理科の「必要性」感じさせることの重要性を認識。「模範となる人物としての教師像」が明確化。
正確に教えることに加え、生徒に興味を持たせ、面白さを伝えることの必要性を認識。
「知識の伝達」から「自ら学ぶ姿勢を身に付けさせる」ことに意識が変容。
社会での勉強の役立ちかた伝達のため、教科内容と生活や他教科との関連を教えることの必要性を認識。
生きるために必要な力をつけるためにも、積極的に考えさせる授業を組む努力の必要性を認識。
模擬授業準備段階で、当該分野の理解不足を実感。予想以上に教師は学ぶ必要があることを認識。
さまざまな授業形態を見て、知識重視の授業より生徒に体験を通して理解させることの大切さを認識した。

表 10.4 教師としての自己研鑽・自己啓発

「生徒の前で可能な限り完璧にすべき」と考え「前を歩き、道を示し、考えさせる人」なるように学び続けたい。
当初5年は、能力を高めるために試行錯誤。生徒の学習への興味を引き出すよう、生徒主体の授業をめざす。
将来の可能性を広げるように、感情豊かに生徒と接し将来の不安を軽減させたい。
学習指導・進路指導で重要なのは信頼関係と考える。生徒の立場になって相談に対応できる教員でありたい。
毎日の教育活動の反省に基づき、不足する知識・授業技術を向上させる必要がある。
生徒にこれまでの人生で学び、考え、行動してきたことを伝えて生徒たちに良い影響が与えられるようにしたい。
生徒の反応、演習・テストの結果から生徒の考え、理解度、つまずきポイントなどを把握しながら改善していきたい。
生徒の態度や点数が悪い原因は教師にあるという意識を常に持って臨機応変に授業を改善しながら教えたい。
教科と生活との関わりを伝えることや興味・関心を引き出す努力をしていきたい。
感想・質問を書かせ次回解説するなどの態度を見せ、生徒自身の人生の手本にしたい。
様々な事に好奇心を持ち、教員・生徒等の枠組みを外した交流をし、新しい知識・技能等を身に付けるようにしたい。
「我以外皆我師」の姿勢から、自ずと知識・技能等は身に付き、他人にも敬意を払い、人間的にも成長できるはず。
確固とした意志を持ち、生き生きと生活することによりしみ出て見える姿から生徒は感じ取り、学んでいくだろう。
学ぶプロセスを多角的にとらえ社会で求められている「学ぶ力」が備わるような教育を心掛けたい。
社会の要求を考慮し、学校外にも目を向け生徒と地域社会を絡ませ、生徒の社会性を高め、自らも成長していきたい。
経験の豊富な先輩教員の生の教育を学び、自分の教育を作り上げていくことが大切。
生徒の理解度や興味に応じた教育を考えていきたい。
あきらめず改善を繰り返していれば失敗できず、成功しかないことを自らが実践することで伝えたい。
人に喜ばれることを至上とし、「恩返し」よりも「恩送り」で、将来「相互支援社会」となるための種まきがしたい。



表 10.5 最終レポート課題を出すとしたら？
教育制度や自身の経験、現在の社会情勢やその風潮など多数視点を踏まえたうえで高校教育とは何かについて答えよ。自身が教師となった時どうすべきか？
自分が担当する科目の面白さと、将来の役立ち方を生徒に質問されたらどう答えるか。
理科教員の立場として「アクティブ・ラーニング」の必要性とその理由。
教員として働く上で絶対に忘れてはならないことは？
君にとって理科とは？
高校の教師に求められる力は何か？
教師として教えたいことは何か？
模擬授業を通じて学んだことは何か？
教育実習で学びたいことは何か？
自分の模擬授業の失敗点と後半の授業紹介された実験などを踏まえて改善法の提案。
学習指導案の作成。
摩擦なしで坂を下る物体の速度が時間一次関数となることを中学生にどう教えるか？

した教職関係のガイダンスで職業としての教師に魅力を感じたという者もいた。

表 9.2 に「教員になった場合、工学部出身であることをどのように活かすか」の記述をまとめた。電気・電子工学科と建築建設工学科の学生は、ある程度応用志向があるが、それ以外の者は物理や化学などどちらかというところ理学系の知識や考え方が役立つと答えている。

表 9.3 に「他の職業に就いた場合、教職課程の学習がどのように仕事に活かせるか」を、キーワードの件数でまとめた。伝え方・コミュニケーションスキル、プレゼンテーション技術、指導力・育成力など技法的なものが多かった。らかの意味で「ものの見方、考え方」につながる記述はなかった。

### 3.3 最終レポートからみる受講者の意識変容

表 10.1 に最終レポート課題「理科教育に関する考えの変容」の結果をまとめた。受講前は「化学だけ」といった狭い専門や「わかりやすく」「教科内容を正確に伝える」「知識の伝達」「基礎を効率よく修得」など知識・技能面の習得面に意識の重点があった。受講後は、「実験・体験を通じた理解」「日常生活や他教科とのつながり」「学ぶことの必要性」「『生きる力』『思考力』の体得」など、意欲や体系的・体験的理解の重要性を認識するように変容している。

表 10.2 に「教師に関する考えの変容」に関する認識の変容をまとめた。学習面以外の多角的な指導の必要性も認識していたが、負担が課題と感じた学生がいた。その他、「生徒とともに成長」「興味関心の引き出し」「興味関心の引き出し」「生きる力を身につける」「学ぶことの必要性を認識させる」「学び方を教える」など学習指導要領<sup>6)</sup>がうたっている「生き

る力」や「真の学力」といったことがらの重要性に気づいていることがわかる。

変容に対しては、表で比較するだけではなく、詳しい記述を書いている学生もいる。その結果を表 10.3 に要約した。記述のキーワードをあげると、「生きる力」「背景理解」「教師の試行錯誤」「必要性の認識」「社会でいかに役立つか」「理解不足の認識」「知識重視→体験を通じて学ぶこと」などが挙げられる。これ自身、生徒が能動的に「生きる力」や「真の学力」を身につけるだけではなく、教師自身の成長や試行錯誤どの努力と成長の必要性を認識していることがわかる。

最終レポート問題 2 の「教員になった場合の自己研鑽・自己啓発」に対する記述を表 10.4 に要約した。他の回答よりも項目が多いのは内容別に分けたためである。それぞれ自分の成長する姿、生きる姿勢などを見せて生徒とともに成長しようという姿勢がうかがえる。

問題 3 の「自分ならどのような課題を出題するか」に対する回答を表 10.5 に要約した。教師のあり方や考え方に関する問題。理解度や教科観などに関する問題も多かった。中には、学習指導案や授業の反省や説明法を問うものもあった。多くは、学ぶ意味、生活や社会での中の教育の役割など「知識・技能」中心から、知識・技能を大切にしつつも、さまざまな物事の関連、教師としての姿勢などを問うものに意識が変容していることを反映している。

## 4. 考察

### 4.1 学生の受講姿勢からみの変容

以前にも、理科教育法の実践報告を行った。その中で、受講生は何らかの意見を言う必要があり、いずれ自分も模擬授業を実施するという「当事者意識」をもっているために、模擬授業を真剣に受講し、意見を言えるようになっていたことを示した<sup>7),8)</sup>。今回も同様の結果であった。模擬授業に対する意見交換では、必ず良い点を先に指摘してから、改善点を述べるのが習慣づき、回を重ねるごとにポジティブな面を見出して意見が言えるようになってきた。毎回の授業でかならず意見を述べるために、12月初旬の教育実習の事前学習では、全員が質問するようになっている。

さらに、多くの学生が苦手な口述筆記ができるようになってくる。他の授業ではなかなか身につかないが、必要性があるということで身につくという体験をしている。

## 4.2 教育観の変容

多くの学生は受講当初「わかりやすく」「教科内容を正確に伝える」「知識の伝達」「基礎を効率よく修得」など知識伝達・技能修得中心の考えを記述していた。最終レポートでは、「実験・体験を通じた理解」「日常生活や他教科とのつながり」「学ぶことの必要性」「生きる力を身につける」「思考力を身につける」などに学習態度、意識、能力を身につけることの重要性を意識している。これらは、第2回授業で学習指導要領の解説をしたときに、ある程度説明した。しかし、あまり強調した記憶がないので、模擬授業とそれに対する意見交換という能動的な学習の中で自ら気づいて認識を深めていったものであろう。

アクティブ・ラーニングは、次期指導要領では「主体的・対話的で深い学び」という表現に変わっている。アクティブ・ラーニングの重要性を指摘した学生もある。これも、自身が模擬授業をして、意見を言うために受講するというある意味で「能動的授業」に参加することにより、経験的にアクティブ・ラーニングの意義を認識したものと考える。

## 5. おわりに

2009年から担当してきた工学部学生対象の理科教育法の授業での実践を報告した。さらに、2016年実施の授業の初回および最終レポートでの変容記述をもとに、学生に意識および教育観の変容をまとめた。その結果以下のようなことがわかった。

### 1) 受講当初の受講生の意識

初回のレポートでは、教員免許取得動機として「教えるのが好き」という人が多かった。教員になるにあたって、工学部で学んだことをいかに活かすかということについては、電気電子工学科、建築建設工学科の学生以外は、専門で学んだ化学や物理学が役に立つと述べ、工学部の答えはなかった。多くの学生は、知識や技能を身につけることが重要であると考えていた。

### 2) 受講前後の変容

知識や技能を身につけさせるということから、「考えること」「学ぶ意味を知ること」「社会で学ぶこ

とが役立つこと」「生活や他教科との関連を学ばせること」などの重要性を認識するようになってきた。さらに、自分ならばどのようなレポート課題を出題するかという課題の記述からも、同様の意識の変容がうかがえた。授業実践するなかで、自分自身が授業するという意識のもとに、他の人の授業を受講し、それに対して意見を述べることで「アクティブ・ラーニング」（「主体的・対話的で深い学び」）についても、講義や模擬授業でのコメントだけではなく、自ら体験的に重要性を認識していることがうかがえる。

著者自身学生時代に教職課程を履修し、企業などで働いた経験からも理科教育法で実践したことは、様々な職業で仕事をする時の能力育成や、社会人として仕事をする能力を向上していくためのヒントになるものと考えている。しかし、学生としては、どちらかというところ、教職課程を受講したときに、他の職業についての場合でプレゼン方法、伝え方、伝達力・指導力などどちらかというところテクニク的なことに役立つと考えている。その一方で、学び方やものの見方考え方などの重要性も認識している。このような観点の変容は、教職課程だけではなく、導入教育やキャリア教育でも必要な要素が入っている。筆者自身、キャリア教育や新入生の導入教育、技術者倫理教育に関わっているため、理科教育法の授業実践で伝えたことを、筆者自身の他の教育実践にも活かしていきたい。

[1] 福井大学基礎資料 2016.

[2] 福井大学学生便覧 (2015).

[3] 教育職員免許法 (法律第 147 号).

[4] 葛生 伸: 応用物理教育 36-1, 51 (2012).

[5] 文部科学省検定教科書「科学と人間生活」啓林館 (2011).

[6] 文部科学省, 学習指導要領.

[7] 葛生 伸: 第 26 回 物理教育に関するシンポジウム, 2A01 (2015.11.1) 福井大学.

[8] 葛生 伸: 日本理科教育学会全国大会発表論文集, 15, 269 (2017).



## シミュレーションによる超対称性粒子探索方法の検討

可児 知之\* 瀧原 諒\* 吉田 拓生\*

### Simulation for Supersymmetric Particle Searches

Tomoyuki KANI\*, Ryo TAKIHARA\* and Takuo YOSHIDA\*

(Received January 30, 2018)

In elementary particle physics, supersymmetry (SUSY) is a theory beyond the Standard Model. Supersymmetry would be an attractive solution to some of major concerns such as dark matter, the hierarchy problem, the grand unified theory problem, and so on. However, none of the SUSY particles have been discovered yet, although much experimental effort has been made so far using high-energy particle accelerators in the world. We carried out a theoretical simulation (PYTHIA) to search for SUSY particles by the Large Hadron Collider (LHC) at CERN, and found that there is a possibility of discovering the gluino, i.e. the supersymmetric partner of a gluon, if the gluino mass is below 3.4 TeV.

**Key Words** : Supersymmetric particles, Simulation, PYTHIA, Standard Model, LHC

#### 1. はじめに

2012年に欧州原子核研究機構 CERN の大型陽子・陽子衝突型加速器 (Large Hadron Collider, 通称 LHC) によってヒッグス粒子が発見された。この発見によって、現在の素粒子の標準理論が予言している粒子は全て発見されたことになる。しかし、標準理論だけでは理解不可能なことが自然界には数多く存在する。力の大統一の問題や宇宙に存在する暗黒物質の正体、ヒッグス粒子における階層性の問題などである。標準理論では解決できないこれらの問題を解決するために、現在最も注目されている理論の一つが“超対称性理論”である。

超対称性理論の超対称性とは、フェルミ粒子とボーズ粒子の入れ替えに対応する対称性のことで、この理論は、標準理論におけるフェルミ粒子には、それと対をなすボーズ粒子が存在し、一方、標準理論のボーズ粒子には、それと対をなすフェルミ粒子が存在するはずだと主張する。

一般に、超対称性理論で新たに予言される粒子は「超対称性粒子」と呼ばれる。現在、超対称性粒子は発見されていないことから、その質量は従来の加速器では生成できないくらい大きいことが分かっているが、その質量の値は分かっていない。超対称性粒子のエネルギースケールが弱・電磁相互作用統一のエネルギースケールの約 10 倍あれば、力の大統一は達成され、超対称性粒子が暗黒物質の候補となり、階層性の問題も解決されることが示されている。このエネルギースケールは現在の LHC で到達できるエネルギースケールの範囲内にあり、今後 LHC で超対称性粒子が発見される可能性は十分にあると言える。

本研究では、CERN の LHC で超対称性粒子を探索するためには、どのような実験を行えばよいか、「PYTHIA プログラム」と呼ばれるシミュレーションプログラムを用いて調べた。特に、超対称性粒子の質量は理論でも完全には予言できないため、それらの質量を様々に仮定した上でシミュレーションを行い、超対称性粒子が標準理論中の普通の粒子と区別できるか、詳しく調べた。

\* 大学院工学研究科物理工学専攻

\* Applied Physics Course, Graduate School of Engineering

#### 2. 研究の方法

### 2.1 LHC 実験

本研究では、LHC に注目して超対称性粒子探索のためのシミュレーションを行った。LHC は、最大の衝突エネルギーが 14 TeV を想定して作られた加速器であるが、加速器の性能を表す指標には、衝突エネルギーの他に、ルミノシティと呼ばれる量がある。加速器を用いた素粒子実験では、加速された粒子ビーム同士の衝突によって注目する素粒子反応が起こる単位時間当たりの回数  $Y$  は、その反応の反応断面積  $\sigma$  [b] に比例する。この時の比例定数がルミノシティ  $L$  [ $\text{b}^{-1}\text{s}^{-1}$ ] と言われ、

$$Y = L \times \sigma \tag{1}$$

で表せる。この式から、同じ反応断面積を持つ素粒子反応でも、ルミノシティが大きいほど反応が起きる回数も多くなることが分かる。ルミノシティを大きくするためには、衝突するビーム中の粒子の数を増やし、かつ、ビームを極力絞って狭い断面積の中に粒子を密集させることが有効となる。また、加速器を用いて一定期間実験を行った際に得られる素粒子反応の合計の数は、(1)式の両辺を時間で積分した式

$$\int Y dt = \sigma \times \int L dt \tag{2}$$

で表される。右辺の  $\int L dt$  は、積分ルミノシティ [ $\text{b}^{-1}$ ] と呼ばれる量である。

現在 LHC は、衝突エネルギーが 13 TeV、最大のルミノシティ  $1.2 \times 10^{10} \text{b}^{-1}\text{s}^{-1}$  で稼働しており、公表されている今後の LHC の稼働計画 (図 1) では、衝突エネルギーを最大の 14 TeV に上げ、加速器のルミノシティを現在の 10 倍以上にする計画が立てられている<sup>[4]</sup>。この計画によって、2037 年頃には積分ルミノシティが  $3000 \text{fb}^{-1}$  まで到達するといわれている。

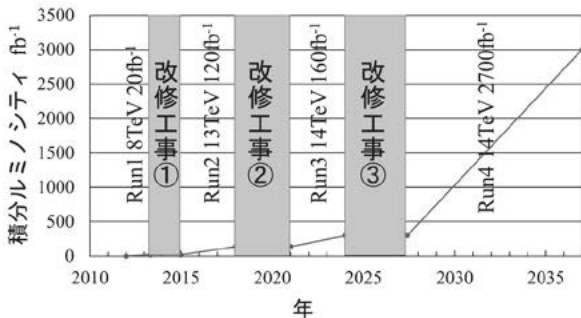


図 1 LHC の稼働計画

本研究では、図 1 のそれぞれの期間(Run 1~Run 4)での衝突エネルギーと積分ルミノシティで LHC が

実際に稼働するとして、超対称性粒子の探索のシミュレーションを行った。

### 2.2 超対称性粒子

標準理論は、スピン 0 のヒッグス粒子、スピン 1/2 のクォーク、レプトン、スピン 1 の光子、グルーオン、 $W^\pm$  粒子、 $Z^0$  粒子で構成されている (図 2)。また、これらの粒子の中で、クォークとレプトン ( $q, l$ ) には、電荷の正負のみが異なる反粒子と呼ばれる粒子 ( $\bar{q}, \bar{l}$ ) が存在する。超対称性粒子とは、標準理論にフェルミ粒子とボーズ粒子の入れ替えに対する対称性を持ち込んだ理論である。そのため、各超対称性粒子は、対になる標準理論の粒子とスピンが 1/2 だけ異なる (図 3)。また、超対称性粒子は、対になる標準理論の粒子と同じ質量領域には見つかっていないことから、超対称性は必ず破れていなければならないとされ、この超対称性の破れによって超対称性粒子の質量は、標準理論の構成粒子より大きくてもよいとされる。しかし、超対称性粒子がどの質量領域に存在するかは、理論的にも分かっていない<sup>[2],[3]</sup>。

クォーク スピン 1/2	$u$ $c$ $t$ $d$ $s$ $b$	ゲージ粒子 スピン 1	$\gamma$ $Z^0$ $W^\pm$ $g$
レプトン スピン 1/2	$e$ $\mu$ $\tau$ $\nu_e$ $\nu_\mu$ $\nu_\tau$	ヒッグス粒子 スピン 0	$H$

図 2 標準理論を構成する粒子

スクォーク スピン 0	$\tilde{u}$ $\tilde{c}$ $\tilde{t}$ $\tilde{d}$ $\tilde{s}$ $\tilde{b}$	ゲージノ スピン 1/2	$\tilde{\gamma}$ $\tilde{Z}^0$ $\tilde{W}^\pm$ $\tilde{g}$
スレプトン スピン 0	$\tilde{e}$ $\tilde{\mu}$ $\tilde{\tau}$ $\tilde{\nu}_e$ $\tilde{\nu}_\mu$ $\tilde{\nu}_\tau$	ヒグシーノ スピン 1/2	$\tilde{H}_1^0$ $\tilde{H}_1^-$ $\tilde{H}_1^+$ $\tilde{H}_2^0$

図 3 超対称性理論を構成する粒子

超対称性理論では、図 3 の中の性質の似通った 4 種類の中性超対称性粒子、すなわち、光子のパートナーであるフォティーノ  $\tilde{\gamma}$ 、 $Z^0$  粒子のパートナーであるジーノ  $\tilde{Z}^0$ 、中性のヒッグス粒子のパートナーである 2 種類の中性ヒグシーノ  $\tilde{H}_1^0$ 、 $\tilde{H}_2^0$  を混合させ、4 種類のニュートラリーノ ( $\tilde{\chi}_i^0, i = 1, 2, 3, 4$ ) という粒子の形で表現することもできる。その中の  $\tilde{\chi}_1^0$  は、最も質量が小さいため、崩壊する先がなく、安定となる。また、この  $\tilde{\chi}_1^0$  は、弱い相互作用と重力相互作用でし

か物質と相互作用しないので、検出器で検出される可能性はほとんどない。

現在、超対称性粒子はまだ一つも発見されておらず、その質量も特定されていないが、これまでの加速器による実験から、超対称性粒子がもし存在するならば、超対称性粒子の中の1つであるグルイーノの質量は、1900 GeV以上となることが分かっている[4]。

### 2.3 超対称性粒子の生成・崩壊

LHCのような高エネルギーのハドロン同士を衝突させる実験では、ハドロンの中のクォークやグルーオンが衝突し、散乱するところから衝突反応が始まる。このクォークやグルーオンのような強い相互作用をする粒子が衝突すると、始めに強い相互作用をする粒子が生成される確率が高くなる。超対称性粒子の中では、グルイーノ $\tilde{g}$ やスクォーク $\tilde{q}$ が生成されることになる。これらの粒子が生成される反応過程（プロセス）の例を図4に示す。

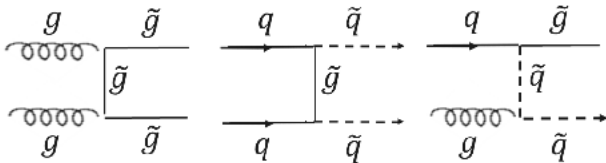


図4 LHCで起こる超対称性粒子生成反応の例

超対称性粒子がより軽い粒子に崩壊する時、その娘粒子には、標準理論の粒子以外に必ず別の超対称性粒子が含まれ、崩壊の途中で超対称性粒子がなくなることはない。娘粒子の中の超対称性粒子もまた同様の崩壊を繰り返し、最終的にこれ以上崩壊しない粒子 $\tilde{\chi}_1^0$ が残る。

グルーオンは、真空中からクォークと反クォーク対( $g \rightarrow q, \bar{q}$ )を叩き出すのに対して、グルイーノは、クォークと反スクォーク、又は、反クォークとスクォーク( $\tilde{g} \rightarrow q, \bar{q}$ ,  $\tilde{g} \rightarrow \bar{q}, q$ )に崩壊する。この時、質量がゼロのゲージ粒子であるグルーオンにとって、6種類のクォークのうち比較的軽い $u, d, c, s, b$ クォーク対( $\leq 10$  GeV)を叩き出すことは容易であるが、重たい $t$ クォーク対( $\geq 300$  GeV)を叩き出すことは容易ではなく、その確率は低くなる。それに対して、グルイーノは、標準理論のどの粒子よりも質量が大きい( $\geq 1900$  GeV)ことから、6種類すべてのクォークとスクォーク対に容易に崩壊することができる[5]。

この特徴から、超対称性粒子が発生している場合と発生していない場合では、クォークの中で最も重

い粒子である $t$ クォークの発生数に違いがあると考え、 $t$ クォークの発生数に着目してシミュレーションを行うことにした。

しかし、 $t$ クォークの同定は、実際の実験では100%の確率でできるわけではなく、 $t$ クォークの様々な崩壊パターンの様々な娘粒子のうち、どの粒子のどの物理量に注目するか、どのような検出器を使うか、などによって同定できる確率が異なってくる。今回のシミュレーションでは、 $t$ クォークは100%の確率で同定できるものとし、その確率の詳しい検討は、今後の課題とした。

### 2.4 PYTHIA プログラム

PYTHIA プログラムとは、高エネルギーの粒子と粒子の衝突反応を素粒子の標準理論や超対称性理論などに基づいてシミュレートすることができるプログラムであり、イベント生成プログラムと呼ばれている。PYTHIA プログラムを用いることで実際の衝突実験で起きるような粒子の生成や生成された粒子の崩壊の様子をシミュレートすることができる[6]。

PYTHIA プログラムでシミュレーションを行うには、衝突する粒子の種類、衝突エネルギーの大きさ、衝突時起きるプロセス(QCDプロセス、ヒッグスプロセス、超対称性プロセスなど)、そのプロセスの中の詳細なプロセス(サブプロセス)、イベント数(発生させる衝突反応の数)などを最初に指定する必要がある。さらに、超対称性粒子を発生させる超対称性プロセスを選択した場合は、各超対称性粒子の質量も入力する必要がある。

本研究では、LHCの実験に沿ってシミュレーションを行うため、衝突させる粒子として陽子を選び、図1で示したLHCの稼働計画に沿って、8 TeVで20 fb<sup>-1</sup>分のイベント数、13 TeVで120 fb<sup>-1</sup>分のイベント数、14 TeVで160 fb<sup>-1</sup>分のイベント数、14 TeVで2700 fb<sup>-1</sup>分のイベント数の合計3000 fb<sup>-1</sup>分のイベント数のシミュレーションを行った。

超対称性粒子の探索を効率よく行うためには、衝突反応によって超対称性粒子が生成されたイベントを超対称性粒子が生成されないイベントから容易に区別できるような特徴的な超対称性粒子生成・崩壊過程に注目する必要がある。

### 2.5 超対称性粒子の質量

前述の通り、PYTHIA プログラムで超対称性プロセスを選択する場合、各超対称性粒子の質量の値を指定する必要がある。現在のところ、超対称性粒子の質量は全く分かっていないが、どれか1つの超対称性粒子の質量を仮定すれば、他の超対称性粒子の

質量は、超対称性理論に基づいて決定することができる。そこで、本研究では、LHC による超対称性粒子を探索する際に重要な役割を果たすグルイーノの質量をはじめに仮定し、その質量の関数としてシミュレーションを行った。グルイーノ以外の超対称性粒子の質量は、超対称性粒子の中の mSUGRA モデル<sup>[3]</sup>に従って計算した。下の図 5 は、このようにして計算したニュートラリーノ  $\tilde{\chi}_1^0$  の質量を、グルイーノの質量の関数で表した結果である。

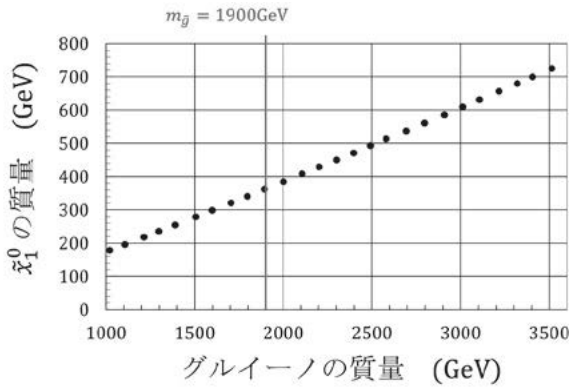


図 5 シミュレーションで使した超対称性粒子の質量

図 5 からグルイーノの質量とニュートラリーノ  $\tilde{\chi}_1^0$  の質量は直線的な関係にあることが分かる。また、図 5 中の実線は過去の実験から分かっているグルイーノの質量下限値 1900 GeV を示している。

### 2.6 超対称性粒子発生イベント

LHC による陽子・陽子衝突反応では、超対称性粒子が生成されない場合でも、図 6 のように標準理論による反応によって、1 個または 2 個の  $t$  クォークが生成される。それに対して、超対称性粒子のグルイーノが 2 個生成される場合には、図 7 のように 2 個のグルイーノの崩壊によって最大 4 個の  $t$  クォークが生成される。

このことから、3 個以上の  $t$  クォークが発生しているイベントは、標準理論では発生することがないグルイーノ由来の反応であり、超対称性粒子が発生している証拠となるイベントと見なすことができる。

#### 2.6.1 メインイベント

本研究では、 $t$  クォークが 3 個以上発生している時、超対称性粒子が必ず発生していることをシミュレーションによって確かめ、 $t$  クォークの発生数から超対称性粒子の探索が可能かどうか検証を行った。ここで、衝突反応によって生成された 2 個のグルイーノから 3 個以上の  $t$  クォークが生成されるイベントをメインイベントと呼ぶことにする。

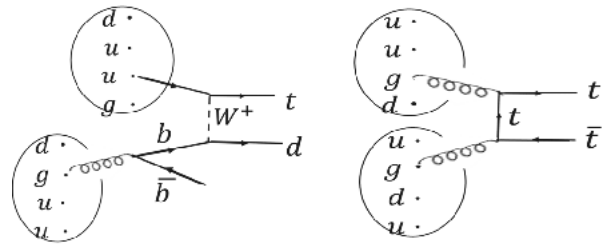


図 6 標準理論による  $t$  クォークの生成過程の例

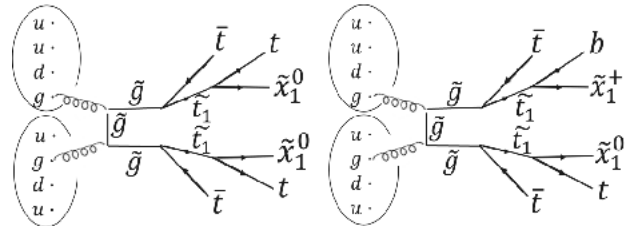


図 7 超対称性理論による  $t$  クォークの生成過程の例

メインイベントを PYTHIA プログラムで発生させる時、衝突時に起きるプロセスとして超対称性プロセスを選択し、グルーオン・グルーオンの衝突反応によって 2 個のグルイーノが生成されるサブプロセスとクォーク・反クォークによって 2 個のグルイーノが生成されるサブプロセスを選択した。この反応で発生したイベントの内、3 個以上の  $t$  クォークが生成されたイベントがメインイベントである。

このシミュレーションで発生させるイベントの数は、上述のサブプロセスの反応断面積と積分ルミノシティを(2)式に代入することで求めることができる。ただし、超対称性粒子の質量が異なれば、プロセスの反応断面積も異なるので、シミュレーションで使用する質量ごとにイベント数を求めなければならない。例として、グルイーノの質量が 1149 GeV の時の LHC の稼働期間ごとのイベント数を表 1 に示す。

表 1 グルーイーノの質量が 1149GeV の時に PYTHIA で発生させるサブプロセスのイベント数。

期間	衝突エネルギー (TeV)	反応断面積 ( $\times 10^{-12}$ mb)	積分ルミノシティ ( $\text{fb}^{-1}$ )	イベント数
Run 1	8	1.896	20	38
Run 2	13	53.49	120	6419
Run 3	14	78.76	160	12602
Run 4	14	78.76	2700	212652

これだけの数のイベントを PYTHIA で発生させ、その中に 3 個以上の  $t$  クォークが生成されるメイン

イベントがどれだけあるか調べた。表 2 は、グルイーノの質量が表 1 と同じ 1149 GeV の時の結果で、表 1 に示した数のイベントを PYTHIA プログラムで発生させ、それを 1 イベント当たり生成される  $t$  クォークの数で分類した表である。ここでは、 $t$  クォークが  $i$  個発生するイベントの数を  $n_i (i = 0 \sim 4)$  としている。なお、5 個以上の  $t$  クォークが生成されるイベントは発生しなかった。

表 2 グルイーノの質量を 1149 GeV としたときの PYTHIA の結果。  $n_i$  は 1 イベント当たり  $t$  クォークが  $i$  個発生するイベントの数。

期間	イベント数	$n_0$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
Run 1	38	15	8	13	2	0
Run 2	6419	1976	2475	1442	460	66
Run 3	12602	3967	4760	2817	925	133
Run 4	212652	64505	81149	49824	14971	2203
Run 1~Run 4	231711	70463	88392	54096	16358	2402

表 2 から、Run 1~Run 4 の期間で発生すると予測されるメインイベントの数は、Run 1~Run 4 の期間の  $n_3$  と  $n_4$  を合計して、18760 イベントとなる。

このようなシミュレーションを、図 5 に示されたグルイーノの各質量に対して行えば、超対称性粒子の質量におけるメインイベントの発生数を予測することができる。

### 2.6.2 バックグラウンドイベント

次に、超対称性粒子が発生しない標準理論の反応によってメインイベントと同じように  $t$  クォークが 3 個以上発生するイベントをバックグラウンドイベントと呼ぶことにする。

このバックグラウンドイベントを PYTHIA プログラムで発生させる際には、標準理論で  $t$  クォークが生成されるプロセス(トッププロセス)を選択した。イベント数はメインイベントのシミュレーションと同様に、トッププロセスの反応断面積と積分ルミノシティから求めることができる。下の表 3 は LHC の稼働期間ごとのトッププロセスのイベント数である。

表 3 PYTHIA で発生させるトッププロセスのイベント数。

期間	衝突エネルギー (TeV)	反応断面積 ( $\times 10^{-12}$ mb)	積分ルミノシティ ( $\text{fb}^{-1}$ )	イベント数 ( $\times 10^7$ )
Run 1	8	2.376	20	1.399
Run 2	13	69.95	120	8.394
Run 3	14	83.81	160	13.41
Run 4	14	83.81	2700	226.3

ここで、表 3 の Run 4 の期間はイベント数が多く、現在の計算機の環境 (CPU : Intel® Core™ i7-6700K, 4.00GHz, OS : Scientific Linux CERN 6) では、シミュレーションの実行に 1 年以上の月日を要するので、バックグラウンドイベントのシミュレーションは、Run 1~Run 3 までを対象として行った。

このシミュレーションで、あるグルイーノの質量に対してメインイベントだけが発生し、バックグラウンドイベントが発生していない場合、実際の実験でもシミュレーションの通りにメインイベントが観測されれば、超対称性粒子の存在が確認できたことになり、逆に、シミュレーションのようなメインイベントが観測されなかったときは、元々そのような質量の超対称性粒子は存在しないことになる。

## 3. シミュレーションの結果

### 3.1 バックグラウンドイベントの有無

表 3 の Run 1~Run 3 の期間に対してバックグラウンドイベントの有無を調べるシミュレーションを行ったところ、下の表 4 のような結果になった。ここでも 1 イベント当たり  $t$  クォークが  $i$  個発生するイベント数を  $n_i$  としている。このシミュレーションでは、はじめから PYTHIA プログラムの中で 1 個以上の  $t$  クォークが生成されるプロセスのみを選択しているため、 $n_0$  の値は 0 である。

表 4 PYTHIA によるバックグラウンドイベントのシミュレーション結果。  $n_i$  は 1 イベント当たり  $t$  クォークが  $i$  個発生するイベントの数。

期間	イベント数 ( $\times 10^7$ )	$n_0$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
Run 1	1.399	0	3928727	10061273	0	0
Run 2	8.394	0	19076204	64863796	0	0
Run 3	134.096	0	29526610	104569390	0	0

この表から、1 つのイベント中で  $t$  クォークが 3 個以上発生するイベントは発生していないことが分かる。よって、バックグラウンドイベントは Run 1~Run 3 までの期間では発生していないことが分かる。

### 3.2 メインイベントの発生数

PYTHIA プログラムを用いて 2.6.1 節で述べた方法でメインイベントの数を調べたところ、次の図 8 のような結果になった。この図はメインイベントの発生数をグルイーノの質量の関数でプロットしたものである。



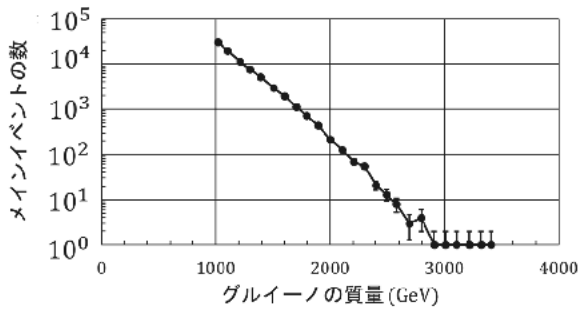


図 8 PYTHIA で求めたメインイベントの発生数

このシミュレーションではグルイーノの質量が 3500 GeV 以上の時には、メインイベントは発生しなかった。図 8 より、グルイーノの質量が 2100 GeV より小さい時、メインイベントの数は 100 イベント以上発生し、グルイーノの質量が 2500 GeV より小さい時、メインイベントの数は 10 イベント以上発生していることが分かる。

#### 4. まとめ

本研究の目的は、CERN の LHC で計画されている積分ルミノシティ 3000 fb<sup>-1</sup>分の陽子・陽子衝突実験で超対称性粒子は探索できるのか、できるとするならば、どのような方法で、どのような質量の領域を探索できるのか、PYTHIA プログラムを用いて調べることであった。その結果、1 イベント当たり 3 個以上の *t* クォークが生成されることを要求することで、バックグラウンドとなるイベントを排除することができ、超対称性粒子発生イベントを効率良く探索できることが分かった。生成された *t* クォークを 100% 同定できると仮定すると、この方法で質量 3.4 TeV までのグルイーノを探索できる可能性があることが分かった。

本研究では、陽子・陽子衝突で生成される 1 イベント当たりの *t* クォークの数を見ることで超対称性粒子の探索が可能になることを示したが、*t* クォークはすぐに崩壊するので、実際の実験では、*t* クォークの娘粒子の物理量を検出器で測定することによって、*t* クォークを同定しなければならない。今後の課題は、超対称性粒子発生イベント（メインイベント）で生成された 3 個以上の *t* クォークを全て十分高い確率で検出するにはどのようにすればよいかを探るために、実際の実験装置まで含めたより現実的なシミュレーションを行うことである。

#### 参考文献

[1] The HL-LHC Project, The High Luminosity Large

Hadron Collider,

<http://hilumilhc.web.cern.ch/>.

[2] 小林富雄：超対称性粒子とは何か，講談社，p.130 (2016).

[3] A Supersymmetry Primer,

<https://arxiv.org/pdf/hep-ph/9709356v7.pdf>.

[4] Nuclear and Particle Physics Proceedings 267-269 (2015) 277-286.

[5] 堺井義秀，山田憲和，野尻美保子：KEK 物理学シリーズ，素粒子物理学，共立出版，p.169 (2012).

[6] PYTHIA8 online manual,

<http://home.thep.lu.se/~torbjorn/pythia82html/Welcomeme.html>.

## 高層ビルの強風時における振動計測への サンプリングモアレカメラの適用

中嶋 友朗\* 仙波 悠生\* 藤垣 元治\*

### Application of Sampling Moire Camera to Measurement of Vibration Caused by Strong Wind for High-Rise Building

Tomoaki NAKAJIMA\*, Yusei SEMBA\* and Motoharu FUJIGAKI\*

(Received February 2, 2018)

Sampling moire camera was developed to measure the displacement of infrastructures effectively in real-time. An algorithm of a sampling moire method to analyze two-dimensional phase is embedded into the sampling moire camera. The sampling moire method is used for measuring the displacement of infrastructures. The sampling moire camera can measure and output displacement distributions for two directions in real-time from a two-dimensional grid image affixed on the ceiling of a building. In this paper, the sampling moire camera was applied to measure vibration of the building while rocking by a strong wind.

**Key Words** : Sampling Moire Method, Sampling Moire Camera, Building, Strong Wind, Measurement of Vibration

#### 1. 緒言

近年、橋梁などのインフラ構造物の老朽化が進行しており、社会問題となっている<sup>[1]</sup>。これに伴い、倒壊・崩落の危険性を考慮して、倒壊・崩落の前兆現象を事前に検査する技術の開発が必要視されている。

倒壊・崩落の可能性や修復の必要性を考察するには、定期的に大型構造物の変位を測定する必要がある<sup>[2]</sup>。変位の測定方法として、一般的にひずみゲージ法、レーザー変位計、ワイヤー式変位計などのセンサが用いられている。これらのセンサを用いた計測手法では設置が困難な場合が多く、計測位置のみの情報しか得ることができなかった。そのため、より設置が容易で効率的な計測手法が求められている。そのための手法として、光学的手法を用いる技術の

開発が進められている<sup>[3]</sup>。

本研究室では、構造物の変位を非接触にて計測する方法として、サンプリングモアレ法<sup>[4]-[6]</sup>を提案している。この手法は、格子画像に対してサンプリング処理を行うことで位相シフトされたモアレ画像を生成し、そこから位相分布を解析する空間的縞解析法<sup>[7][8]</sup>を2次元に拡張したものである。

サンプリングモアレ法は、遠隔から大型構造物の変位を精度よく計測できる手法である。その測定方法は、まず格子の描かれているパターンを計測対象に貼り、対象の変位前後をカメラで撮影する。その画像をサンプリングし、モアレ干渉縞を得ることで、位相シフト法が適用でき、モアレパターンの位相分布を求めることができる。得られた位相の変化から対象物の変位を精度よく測定することができるものである。さらに研究室では、このサンプリングモアレ法のアルゴリズムをハードウェア化して、カメラ内部に組み込むことで、リアルタイムに変位分布を計測して出力できるサンプリングモアレカメラを開発した<sup>[9][10]</sup>。

\*大学院工学研究科知能システム工学専攻

\*Human and Artificial Intelligent Systems Course,  
Graduate School of Engineering

サンプリングモアレ法の特徴のひとつとして、1フレームの撮影画像から2方向の位相分布を求めることができる点がある。橋梁の場合は、変位の鉛直方向成分を計測することが一般的である。そのため、橋梁の支点近くか遠方に、ほぼ水平に近い向きにカメラを設置して、鉛直方向の変位や、2成分を用いたわみ角を計測することに適用されている<sup>[6],[9]</sup>。

一方で、高層ビルや風力発電用タワー、鉄塔など、縦型の大型構造物やインフラ構造物は、構造的に、地面に対して水平方向に揺れることが多い。そのため、カメラを鉛直上向きに設置して、計測対象の頂上付近を撮影することで水平2方向成分を計測することができる。本研究では、サンプリングモアレ法のこの特徴を利用して、水平2方向変位計測を建物の変位計測に適用する。計測実験に、サンプリングモアレカメラを用いることで、高速に時系列の変位計測を行い、振動解析にも適用できることを示す。

## 2. 原理

### 2.1 サンプリングモアレ法

サンプリングモアレ法とは、1枚の格子パターンから位相分布を算出する空間的縞解析法を用いて2次元格子の位相解析を行う手法である。図1(a)のような格子模様をカメラで撮影すると、図1(b)に示すように白と黒以外に灰色のデータも存在する。この状態ではモアレ縞を観察することはできない。そこで等間隔に $N$ 画素ごと起点を変えながらサンプリング(間引き処理)を行う。図1(a)は $N=4$  pixelとした時の様子である。間引き処理を行うと、 $N=4$  pixelでは、図1(c)のように4画素おきにデータを持った4つの画像を得ることができる。これはそれぞれ左から1番目、2番目、3番目、4番目の画素から4画素ごとに間引いている。このように1画素ずつサンプリング点を変えることは、位相で考えると $\pi/2$ ずつシフトさせた状態になるので、位相シフト法に相当する。

しかしこのままでは間の3画素にデータがないので、データがない画素に各サンプリング点の輝度値のデータを補間する。すると図1(d)のような4枚のモアレ画像ができる。

位相シフトされたモアレ縞は近似的に余弦波の輝度分布をもっているとみなすと、 $n$ 回位相シフトさせた時、次式で表される。

$$I_n(x, y) = I_a(x, y) \cos\left\{\theta(x, y) + \frac{2\pi \times n}{N}\right\} + I_b(x, y) \quad (1)$$

ここで $I_a(x, y)$ はモアレ縞の振幅であり、 $I_b(x, y)$ は背景輝度、 $\theta$ はモアレ縞の位相である。 $I_H$ と $I_L$ をそれぞれ輝度の最大値と最小値とすると、 $I_a$ と $I_b$ は次式で表される。

$$I_a = \frac{I_H - I_L}{2} \quad (2)$$

$$I_b = \frac{I_H + I_L}{2} \quad (3)$$

$N$ 枚の場合、モアレ縞の位相 $\theta$ は次式で求められる。

$$\tan \theta = -\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)} \quad (4)$$

$N=4$ の場合、得られた4枚のモアレ画像から位相シフト法を適用すると、図1(e)のモアレの位相分布画像が得られる。

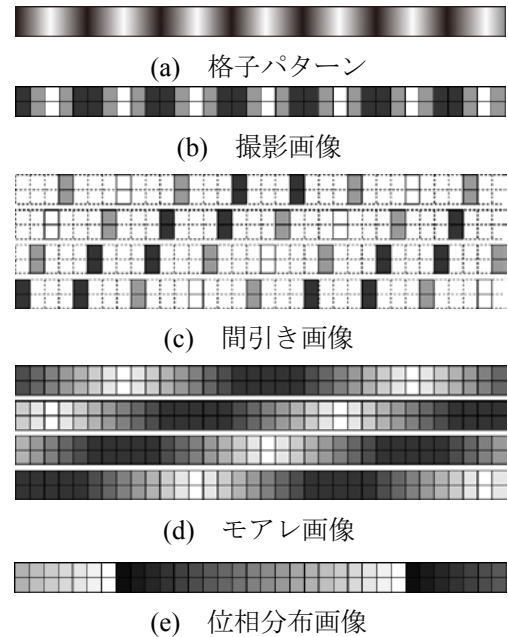
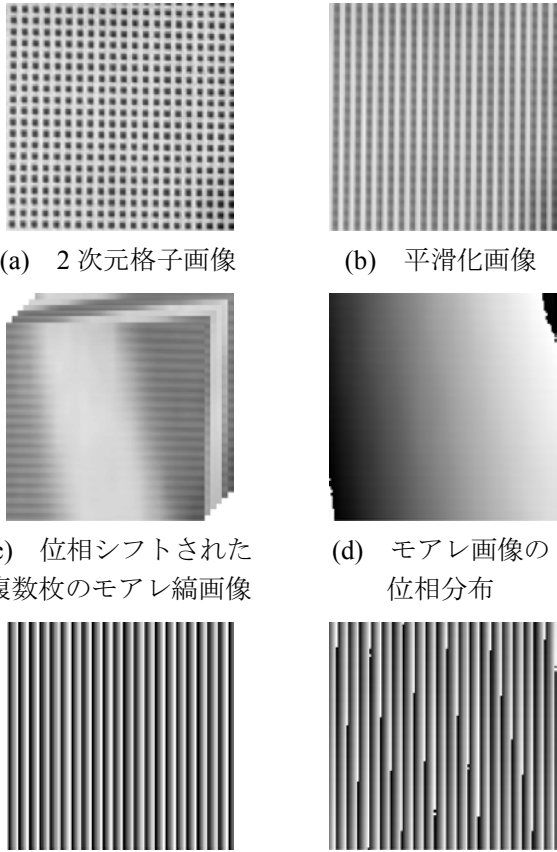


図1 サンプリングモアレ法の原理 ( $N=4$ の時)

撮影対象の格子模様を2次元格子模様にすることで、2次元での変位計測が可能となる。カメラで2次元格子を撮影すると、図2(a)のような格子画像が得られる。この格子画像に対して、水平方向の変位解析の場合は縦方向の平滑化、垂直方向の変位解析の場合は水平方向の平滑化を行う。平滑化を行うと図2(b)のような平滑化画像を得ることができる。得られた各平滑化画像に間引き処理と補間処理を行うことによって、図2(c)に示す複数枚のモアレ縞画像を得ることができる。これらの複数枚のモアレ縞画

像に位相シフト法を適用することによって、図 2 (d) に示す位相分布を得ることができる。次に撮影格子の位相を求めるために参照画像との演算を行う。参照画像とは、間引き間隔で位相が 1 周期となる位相分布のことである。図 2 (e) は間引き処理を行って位相を求めた図 2 (d) の参照画像である。参照画像の位相とモアレの位相分布の差から格子の位相を求めたものが図 2 (f) である。



(a) 2次元格子画像

(b) 平滑化画像

(c) 位相シフトされた複数枚のモアレ縞画像

(d) モアレ画像の位相分布

(e) 参照画像の位相分布

(f) 格子の位相画像

図 2 サンプルングモアレ法を用いた位相分布の解析

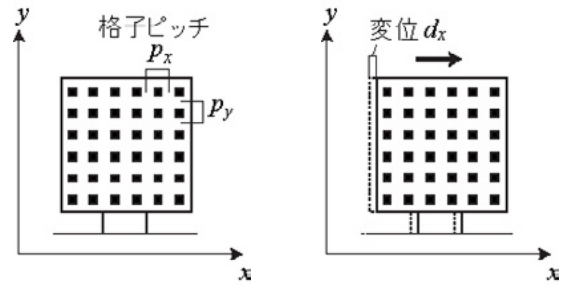
ここでサンプルングモアレ法を用いた変位計測手法の具体的な計測の流れを紹介する。まず、図 3 のように格子を貼ったターゲットを用意する。その格子画像を 1 枚撮影する。それにサンプルングモアレ法を適用し、得られた画像を変位前位相画像として記憶しておく。計測開始後、得られた画像を変位前と同様に解析し、変位後位相画像を求める。これらの画像の差をとり、位相差画像を求める。この位相差画像から、格子の 1 ピッチ( $p_x, p_y$ )あたりの位相差( $\Delta\phi_x, \Delta\phi_y$ )を解析して、次式から変位 $d_x, d_y$ を求める。

$$d_x = \frac{\Delta\phi_x}{2\pi} p_x \tag{5}$$

$$d_y = \frac{\Delta\phi_y}{2\pi} p_y \tag{6}$$

ゆえに、変位計測の分解能はターゲットに貼る格子のピッチに依存している。

また、式(5), (6)には、カメラの位置を表すパラメータが含まれない。これはカメラの位置を決めなくても変位が得られること、すなわち、キャリブレーションが不要ということを示している。格子模様さえ撮影できれば、たとえ斜め方向からでも、遠く離れていても計測を行うことができる。



(a) 変位前

(b) 変位後

図 3 ターゲットの動き

### 2.2 サンプルングモアレカメラ

サンプルングモアレカメラは、格子画像を撮影すると、カメラ内部で前述のサンプルングモアレ法の計算を行い、格子の位相分布と基準の位相分布との位相差分布をリアルタイムで出力することができる。内部構造は図 4 に示されるように、CMOS の撮像素子、FPGA (Field Programmable Gate Array)、メモリー、USB インターフェース、電源ユニットで構成されている。

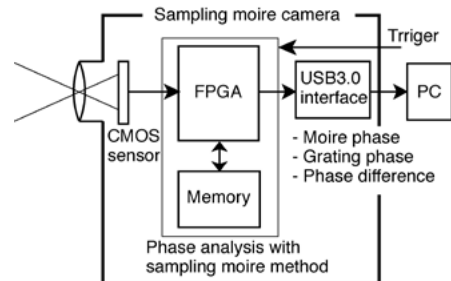


図 4 サンプルングモアレカメラの内部構成

撮影速度は撮影領域によって変わり、 $2048 \times 2048$  pixels の最大サイズするとき 14 fps.  $128 \times 128$  pixels の小サイズするとき 230 fps の速度で撮影し、位相分布をリアルタイムに出力することができる。また、あらかじめ撮影した基準となる格子画像の

位相分布をメモリーに保存しておき、それとの差をリアルタイムに出力することができる。基準との位相差は定数倍にすることで変位に換算が出来るので、リアルタイムに変位分布を出力するカメラと言える。

### 3. 建物の2方向変位計測および振動計測実験

#### 3.1 実験装置

サンプリングモアレカメラを用いて建物の振動計測実験を行った。対象とする建物は、図5に示す13階建ての建物である。この建物は、建物側面内側に取り付けられている非常階段の手すり付近からの隙間が1階から13階天井まで見通せる構造になっている。そこで、図6に示すように13階の天井に2次元格子のターゲットを取り付け、それを撮影できるように、1階部分に上向きにサンプリングモアレカメラを固定した。これにより、1階部分に対して、13階の天井の変位量が計測できるようになる。カメラのレンズ先端から2次元ターゲットまでの距離は51.5mである。ここで、建物の東西方向をx方向、南北方向をy方向とする。



図5 計測する建物

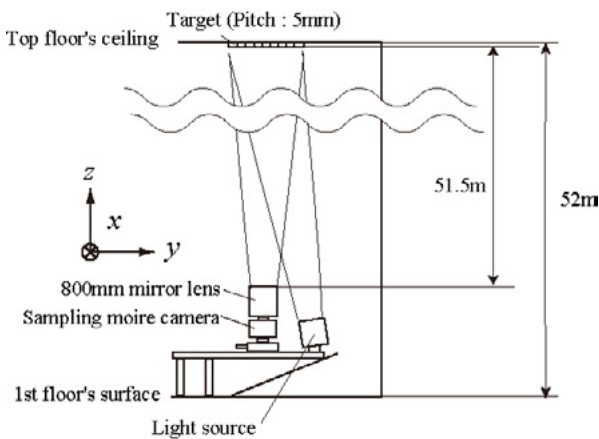


図6 構成図

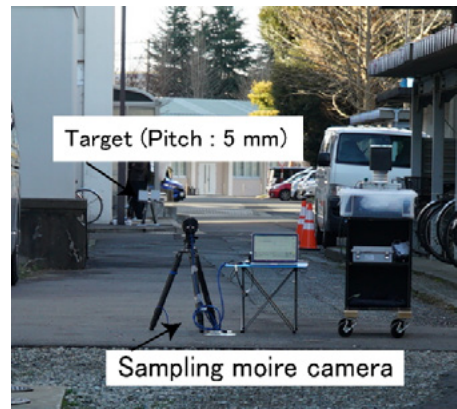
#### 3.2 計測精度確認実験

まず、屋外で同じ距離に設定し、変位計測を行うことで使用するサンプリングモアレカメラによる変位計測の計測精度の確認を行った。

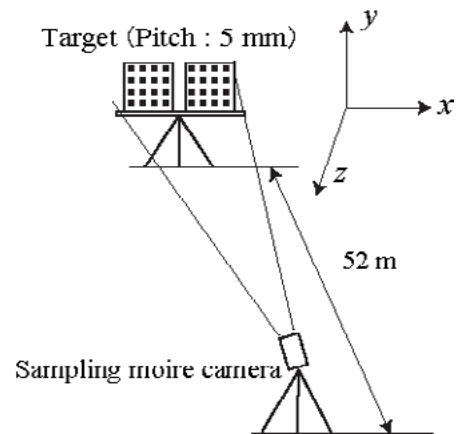
図7(a)に実験の様子を示す。サンプリングモアレカメラからターゲットの2次元格子までの距離は52mとした。サンプリングモアレカメラには、焦点距離800mmの反射型の望遠レンズを取り付けた。5.0mmピッチのターゲットの2次元格子はx方向に移動するステージの上に取り付けられており、遠隔制御で変位させることができる。

撮影速度25fpsで30秒間撮影した。撮影開始時から約10秒間は静止し、10秒後にアクチュエータを用いて右側のターゲットに変位1.000mmを与える。左側のターゲットには変位を与えない。アクチュエータは計測開始から約10秒後に動かし始め、10秒間にステージを動かす。変位の結果は右側のターゲットの変位から左側のターゲットの変位を引いたものを示す。この操作を行うことで、カメラ側の揺れによる変位を除去することができる。

撮影した画像から256×256画素の領域を切り出して、変位の解析を行った。結果を図8に示す。



(a) 実験の様子



(b) 構成図

図7 精度確認実験

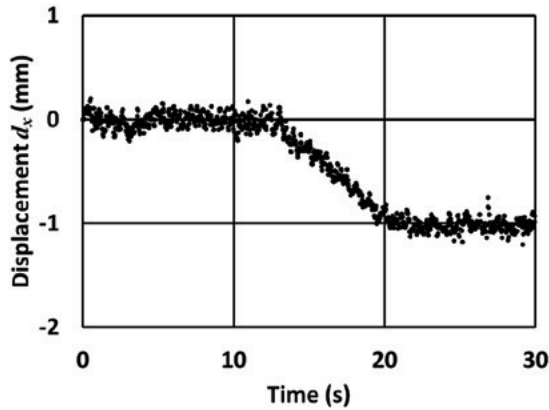


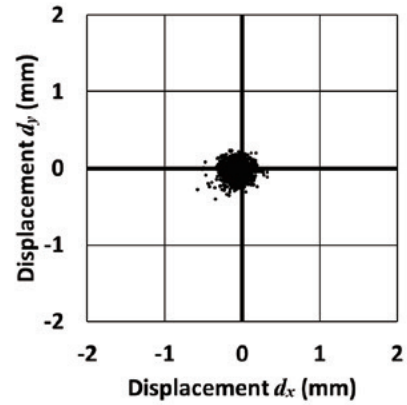
図8 精度実験での  $x$  方向の変位

このとき、標準偏差は動かす前は  $0.065$  mm、動かしたあとは  $0.053$  mm となり、 $0.100$  mm 以内に収まっており、真値とのずれも  $0.025$  mm 以内に収まっている。これらの結果から、 $52$  m 離れた距離での計測は精度よくできていることがいえる。精度確認実験で得られた結果をもとに、建物の揺れの計測を行った。

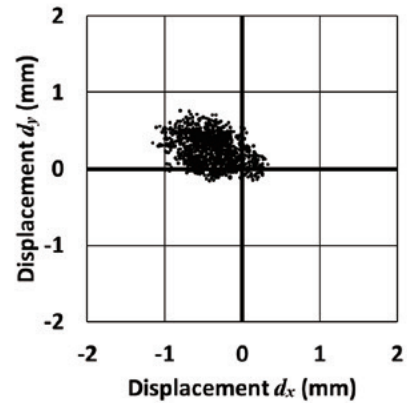
### 3.3 建物の変位計測実験

この状態で、台風が通過した日に計測実験を行った。撮影条件として、撮影時間  $300$  s、撮影速度  $4$  fps、画像サイズ  $256 \times 256$  pixel、格子間画素数  $15$  pixel、平滑化  $15$  pixel、間引き数  $15$  pixel とした。露光時間は風速  $4.0 \sim 10.0$  m/s、 $2.0 \sim 7.0$  m/s の時、 $15$  ms として。また、別の穏やかな天気の日にも同様の計測実験を行った。このときは、風速  $0.0 \sim 1.5$  m/s の時に  $10$  ms とした。

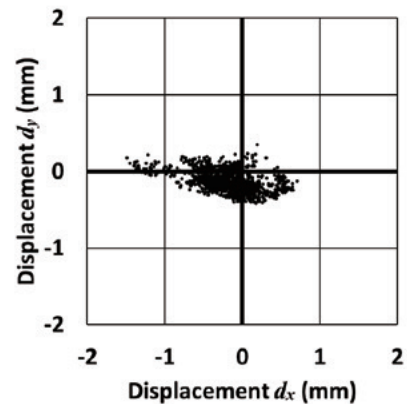
建物天井に貼り付けた格子は計測した建物に対して  $4$  度傾いていたため、その分の補正を行うことで  $x$  方向と  $y$  方向の変位をそれぞれ求めた。図9に風速が異なる時の計測された変位を示す。図9は、横軸に  $x$  方向、縦軸に  $y$  方向の変位をプロットしたものである。これらの結果より、風速が大きい方が変位は大きくなることがわかる。同様の計測実験を3回ずつ行ったが、それぞれ同様の傾向が見られた。さらに、揺れが大きい場合には、 $x$  方向（東西方向）に大きく揺れていることも確認できる。 $y$  方向（南北方向）の変位と比べて、 $x$  方向の変位の振幅が大きいことについて、 $x$ - $z$  面(南側と北側)には窓が多く、 $y$ - $z$  面には建物の内部に丈夫な壁部分が多いことが原因と考えられる。



(a) 風速  $0.0 \sim 1.5$  m/s



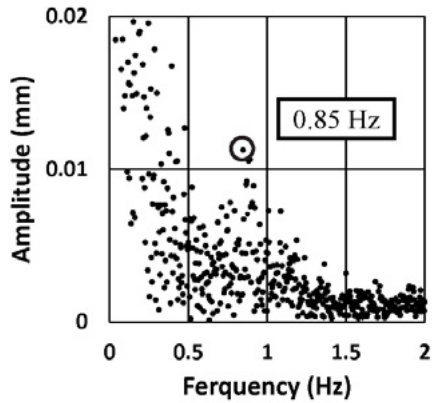
(b) 風速  $2.0 \sim 7.0$  m/s



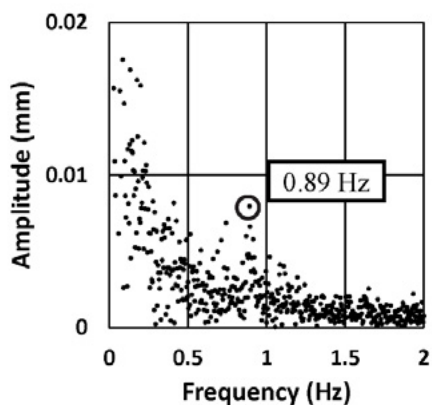
(c) 風速  $4.0 \sim 10.0$  m/s

図9 建物の変位  $d_x$ - $d_y$

次に得られた時系列のデータを元にして、フーリエ変換によって周波数解析を行った。結果を図10に示す。 $x$  方向の場合は  $0.85$  Hz、 $y$  方向の場合は  $0.89$  Hz にピークが現れた。この建物の設計上の固有周期（完成時）は、 $x$  方向に  $1.001$  秒、 $y$  方向に  $1.133$  秒であり<sup>[11]</sup>、それぞれ固有振動数に換算すると、 $x$  方向に  $0.999$  Hz、 $y$  方向に  $0.883$  Hz となる。これらの値と比較すると、それぞれ近い値が得られていることがわかる。



(a) x 方向



(b) y 方向

図 10 風速 4.0 ~ 10.0 m/s の時の  
周波数解析結果

#### 4. 結 言

本研究では、精度確認実験で距離 52 m 地点に設置したターゲットを 1 mm 動かした際、標準偏差 0.1 mm 以内での精度を確認することができた。その結果に基づき、サンプリングモアレカメラを風の影響による建物の振動の計測に適用し、東西方向と南北方向の建物の振動を確認することができた。変位結果を見ると、y 方向と比べて x 方向の変位の振幅が大きくなっていた。これは、計測した建物は、x-z 面には窓が多く、y-z 面には丈夫な壁が多いことが原因と考えられる。また、計測データからもフーリエ変換を行うことで、建物の 2 方向の固有振動数が読み取れ、設計値と近い固有振動数になっている。

今後として、風の影響で揺れているのは確認できたので、建物の振動と風の関係性がリアルタイムで分かるシステムへ改良していく必要が有る。

#### 謝 辞

本研究は、NEDO のインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクトとして行った。また、計測対象の建物に関する助言をいただきました福井大学学術研究院工学系部門の小林克巳特命教授および建物の設計資料のご提供とご説明をいただきました福井大学環境整備課環境施設係長三上高義氏に感謝いたします。その他、ご協力いただきました関係諸氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 田崎忠行：土木研究所資料 構造物メンテナンス研究センター設立記念講演会 講演概要集，25-38 (2009).
- [2] 小西真治：土木学会論文集 F, 64-4, 369-380 (2008).
- [3] 松田浩, 伊藤幸広: 実験力学, 11-3, 161-170 (2011).
- [4] 李志遠, 藤垣元治: よくわかる実験技術・学術用語第 2 版, 格内敏, 加藤健司, 加藤章, 新川和夫 編, 日本実験力学会, 44-47 (2012).
- [5] S. Ri, M. Fujigaki and Y. Morimoto: Sampling Moire Method for Accurate Small Deformation Distribution Measurement, *Experimental Mechanics*, 50-4, 501-508 (2010).
- [6] 藤垣元治, 原卓也: 検査技術, 18-11, 8-14 (2013).
- [7] 新井泰彦, 白木万博, 山田朝治, 横関俊介: 光学, 25-1, 42-47 (1996).
- [8] Y. Arai, S. Yokozeki, K. Shiraki, and T. Yamada, H : *Journal of Modern Optics*, 44-4, 739-751 (1997).
- [9] 藤垣元治, 原卓也, 生駒昇, 村田頼信: 実験力学, 12-3, 35-40 (2012).
- [10] M. Fujigaki, Y. Sasatani, A. Masaya, H. Kondo, M. Nakabo, T. Hara, Y. Morimoto, D. Asai, T. Miyagi, and N. Kurokawa : *Applied Mechanics and Materials*, 83, 48-53 (2011).
- [11] 福井大学総合研究棟 (仮称) 新営工事構造概要書, 12 (2000).

## 把持動作の特徴を用いたスマートフォン個人認証手法

浜崎 琢司\* 小高 知宏\* 黒岩 丈介\*\* 白井 治彦\*\*\* 諏訪 いずみ\*\*

### The smartphone authentication using holding behavior

Takushi HAMASAKI\*, Tomohiro ODAKA\*, Jousuke KUROIWA\*\*, Haruhiko SHIRAI\*\*\*  
and Izumi SUWA \*\*

(Received February 2, 2018)

In this study, the purpose is to establish an individual authentication system based on the smartphone holding behavior. We developed a system measured how one holds with the smart phone. Using this, we collected the smartphone holding data from 9 participants during operating the specified application. The data was classified for each participant by machine learning, and calculated FRR (False Rejection Rate) and FAR (False Acceptance Rate). It found to be 0.130 and 0.106 on average. For some users, both FRR and FAR were less than 0.05. For this reason, we think this method is useful for some users

**Key words** :Smart Phone, Biometrics, Holding behavior

#### 1. はじめに

現在、スマートフォンの総利用者数は若年層を中心に増加している。フィーチャーフォンと比較してタッチパネルが大きいこと直感的な操作が容易であること、機能が充実していることなどが人気の理由として挙げられている。そのためスマートフォン上に重要なデータを保持していることが多く、一度紛失してしまうとデータが盗まれていた、という事例が少なくない。それを防ぐため、様々な認証方法でスマートフォンをロックしている。

どのスマートフォンでも用いられている認証方法として、PIN 認証やパターン認証が挙げられる。PIN 認証とは数字を 4 桁から 8 桁までをパスワードとして入力する認証方法で、パターン認証とは縦横 3 点の合計 9 点ををどのようになぞるかをパスワードと

する認証方法である。どちらも簡単にパスワードを設定できるが PIN 認証は総当たり攻撃に対して弱く、パターン認証はタッチスクリーン上の指紋の汚れや覗き見などでパスワードが推測されやすいという欠点も存在する。そのため所有者以外の人間には破られにくい認証方法についての研究が盛んに行われている。

その認証方法の一つに、バイオメトリクス認証を用いて所有者を確認する手法がある。バイオメトリクス認証とは人間が持っている身体的、または行動的特徴を用いた認証方法である。身体的特徴を用いたバイオメトリクス認証では、指紋や虹彩などその個人特有の身体的特徴を用いて認証を行う。特徴を計測するためのカメラやセンサをスマートフォンに搭載することで、スマートフォン上でも認証を行うことが可能となる。既に実用化されており高い認証精度を誇っているが、別途特別に機材が必要となりコストがかかるというデメリットも存在する。行動的特徴を用いたバイオメトリクス認証では、例えば筆跡や歩行時の姿勢など個人の行動や癖から特徴を抽出し、それらを元に認証を行う。行動や癖を特徴として用いるという特性上、認証を行った形跡が残らない、又は他人に認証動作を覚えられにくいというメリットがある。

\* 大学院工学研究科 原子力・エネルギー安全工学専攻

\*\* 大学院工学研究科 知能システム工学専攻

\*\*\* 工学部技術部

\* Nuclear Power and Energy Safety Engineering Course,  
Graduate School of Engineering

\*\* Human and Artificial Intelligence Systems Course,  
Graduate School of Engineering

\*\*\* Technical Division



スマートフォン上での行動的特徴を用いた認証システムの例として、タッチジェスチャーやフリック操作から個人を特定する研究が行われている [1][2][3][4]。同様に、タッチスクリーンを用いた入力自体にも個人による特徴が表れているという研究結果が報告されている [5][6]。これらはスマートフォンに備え付けられているタッチスクリーンや加速度センサなどから特徴量を取得しているため、追加で機材を必要としないが、まだ精度の面で向上の余地があると考えられる。

しかし、これらの認証は主にログイン時での使用を目的としたものが多く、仮に攻撃者に突破された際でも継続的に本人確認を行うような仕組みの認証システムがスマートフォン上で実装されている例は少ない。

本研究では、スマートフォンの持ち方がユーザによって異なることに着目し、それを行動的特徴として捉えた。ここで、ユーザによって異なるスマートフォンの持ち方をスマートフォン把持動作と呼称する。把持動作を用いて、スマートフォンのログイン認証を破られた後のことを念頭に置いた認証手法を提案する。

本研究のためにスマートフォン把持動作の特徴計測システムを加速度センサを用いて構築した。本システムは加速度センサをバックグラウンドで起動し、その間スマートフォンの加速度センサの値を記録し続ける機能を有する。それを用いることで、ユーザがスマートフォンを操作している間の把持動作を調査することができる。得られたデータを機械学習によってユーザ毎に分類し、それらを元に FAR / FRR 値を算出した。本研究の実験を通して、把持動作でユーザを分類することが可能なのか、他ユーザに攻撃された際に有効なのかどうかを検証する。

## 2. バイオメトリクス技術を用いた侵入検知システムの構築

本研究ではユーザのスマートフォン把持動作を用いて、スマートフォン操作中も連続的に認証を行うシステムを構築する。本手法で構築するシステムの概要図を図1に示す。本システムを構築するためには大きく分けて、スマートフォン把持動作を取得する処理と、得られた把持動作データを学習し、それを元に正規ユーザかどうかを識別する処理の2つが必要である。把持動作取得処理はスマートフォン上でを行い、得られたデータをPC側に送信することでオフラインで解析を行った。なお、得られたデータはk近傍法を用いてユーザ分類を試みる。本章では計測に用いたシステムの概要とその設計について述べる。2.1節では把持

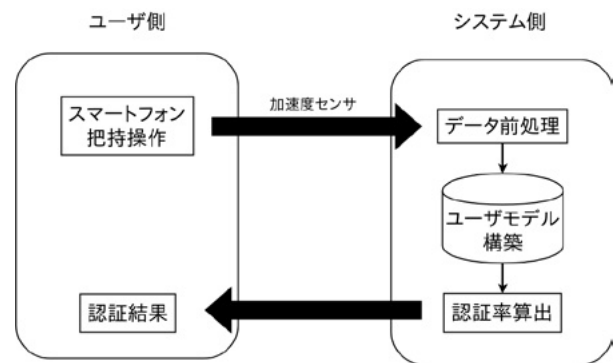


図1 本手法の概要図

動作取得処理について、2.2節では取得した把持動作データからユーザ分類を行う処理について述べる。

### 2.1 把持動作取得処理

把持動作を取得するためには様々な方法が考えられる。例えば、先行研究ではタッチスクリーンへの入力によって得られるタッチ位置やその圧力の大きさによって把持動作を判断している [6]。本研究ではユーザ毎の把持動作によって変化するスマートフォンの3軸方向の傾きを加速度センサで検出する。これは、歩行状態の検出等、ユーザの運動状態を検知するには有効な方法であることが理由である [7][8]。

また、ユーザがスマートフォンを把持している際、スマートフォンが受け取っている加速度を記録するためのアプリケーションが必要となる。計測を行う際は、なるべくユーザが操作に集中できるよう、使い慣れたアプリと併用して実験を行った方が良いと考えた。把持動作取得システムでは、他のアプリと併用して計測を行うことができるような機能があることが望ましい。つまり、バックグラウンドでも稼働する機能が必要である。以上より、把持動作取得処理には以下の2つの機能を搭載した。

- バックグラウンド稼働機能
- 加速度値記録機能

このアプリケーションは対象 OS を Android とし、開発言語は Java を用いている。

把持動作取得処理の概要を図2に示す。この処理では、ユーザが任意のアプリケーションを操作する際、バックグラウンドでユーザの把持動作の加速度データをテキスト形式で保存している。テキストは、x軸方向の加速度、y軸方向の加速度、z軸方向の加速度、計測時間の順で各行書き込まれる。この時の

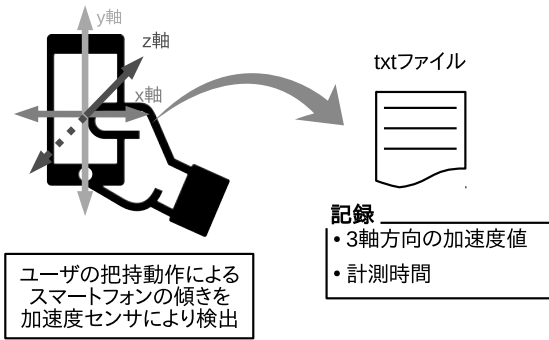


図2 把持動作取得処理の概要

サンプリングレートは50msとした。処理が終わった後、PC側へ送信し、オフラインで解析する。

## 2.2 ユーザの認証方法

次に、得られた把持動作データを解析し、ユーザを正規ユーザかそうでないか分類する処理について述べる。先ほど取得したスマートフォン把持動作について、タッチを用いたスマートフォン個人認証だと「タッチ操作中」、筆跡認証だと「サイン中」が動作区間となるため、これらと比較すると動作区間が大きくなる可能性が非常に高い。また、スマートフォン把持動作はユーザや使用されるアプリケーションによって計測時間が左右される可能性が高い。そこで、安定しない計測時間の中からユーザの特徴を抽出できる解析手法が必要である。

本研究では、ユーザの特徴を解析する手法として機械学習を用いる。本研究では、正規ユーザの把持動作データを取得できる環境であるため、機械学習の一種である教師あり学習を用いる。そうすることによって、定式化できないユーザの把持動作の特徴を計算する。

教師あり学習の基本的な処理の流れをまとめると以下のようになっている。まず、取得した把持動作データの前処理を行う。続いて、選択したアルゴリズムを基に学習モデルを構築する。最後に、その学習モデルに検査データを与え、このモデルの評価を行う。以下でそれぞれの段階について順に説明する。

### 2.2.1 加速度データ前処理

この処理では、ユーザから取得した加速度データを加工し、機械学習のアルゴリズムを上手く動作させやすくする。まず、3軸方向の加速度データと計測時間

を記録したファイルから、計測時間を取り除く。そして、残った3軸加速度のデータの尺度を揃えるため、標準化を行う。標準化とは、各列のデータについて、平均値  $\mu = 0$ 、分散  $\sigma^2 = 1$  となるように変換する処理である。以下のような計算式(1)、(2)で表される。

$$a^{std} = \frac{a - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (a - \mu)^2} \quad (2)$$

計算式(1)、(2)の  $a$  は各軸方向の加速度データ、 $\mu$  はその平均、 $\sigma$  は標準偏差を表す。

この処理により、加速度の外れ値の検出も容易になる。また、標準偏差の商を取っているため、加速度データは無次元量となる。よって、平均値や単位の違うデータ同士でも比較することが可能になる。

### 2.2.2 分類アルゴリズムの選定

続いて、先ほど前処理したデータを学習するアルゴリズムを選定する。本研究の目標は、スマートフォンを使用しているユーザが正規か非正規かを分類することであるため、分類問題に適したアルゴリズムを選択する必要がある。

本研究ではk近傍法(k-Nearest Neighbor algorithm)を用いてユーザの分類を行う。k近傍法とは、検査データの近くにある訓練データをk個取得し、その多数決により検査データのラベルを予測するというアルゴリズムである。アルゴリズムはシンプルだが、他の教師あり学習アルゴリズムと異なり、訓練データからパラメータを決定するような仕組みはなく、訓練データそのものを暗記する。訓練データをそのまま暗記するため、他のアルゴリズムと違って分類器のモデル構築に時間をかける必要がない。そのため、新しい訓練データにすぐに適応することができる。

このアルゴリズムを選んだ理由について、いくつか挙げられる。まず、本研究で扱う問題はスマートフォン把持動作によるユーザ分類であり、それを取得するために用いた特徴は3軸方向の加速度( $a_x, a_y, a_z$ )の3次元データである。このデータ量ならば、k近傍法のようなシンプルなアルゴリズムでも良い分類結果が得られるだろうと判断したためである。また、先行研究が少ないため、スマートフォン把持動作を用いてユーザ分類を行った場合、どれほどの認証精度を記録するのかという指標となるようなデータが少なかった。そのため、他の複雑な分類アルゴリズムを用いた場合の認証精度ではなく、まずシンプルな分類ア

ルゴリズムを使用した場合の認証精度を把握する必要があったためである。

この際、ユークリッド距離と標準ユークリッド距離、マハラノビス距離を用いて訓練データと検査データの距離判定を行い、どれが良い精度を示すか比較する。用いた計算式はそれぞれ次の通りである。

$$De(x_{test}, x_{train}^{(i)}) = \sqrt{\sum (x_{test} - x_{train}^{(i)})^2} \quad (3)$$

$$Dse(x_{test}, x_{train}^{(i)}) = \sqrt{\sum \left( \frac{x_{test} - x_{train}^{(i)}}{\sigma_x} \right)^2} \quad (4)$$

$$Dm(x_{test}, x_{train}^{(i)}) = \sqrt{(x_{test} - x_{train}^{(i)})^T \Sigma^{-1} (x_{test} - x_{train}^{(i)})} \quad (5)$$

ここで、 $x_{test}$  は検査データの 3 軸加速度ベクトル、 $x_{train}$  は訓練データの 3 軸加速度ベクトル、 $i$  は各ユーザの番号を示す。また計算式 (5) の  $\Sigma^{-1}$  はユーザ  $i$  の加速度データで計算された逆共分散行列を示す。

ユークリッド距離は、普段、実生活上で距離を計測される時に用いられている距離測定法である。

標準ユークリッド距離は、その名の通りユークリッド距離を標準化したものである。標準ユークリッド距離とユークリッド距離との相違点は、各次元の差の累乗和の平方根をその分散で割る点である。この計算によって、各次元の単位を無視することができ、また各次元の尺度を揃える働きがある。

マハラノビス距離は、各次元のデータ同士に相関が見られる場合に用いられる。ユークリッド距離や標準ユークリッド距離との違いは、各次元のデータの分散を考慮できるという点である。ユークリッド距離ではどの特徴も均一な尺度で距離を計測するため、各次元の分散によって尺度を変更していない。標準ユークリッド距離では各次元毎に尺度を揃えているが、次元間での相関までは計算されていない。マハラノビス距離では、分散が小さい次元では距離が大きくなり、分散が大きい次元では距離が小さくなる。また、この時、逆共分散行列  $\Sigma^{-1}$  が単位行列ならばユークリッド距離と等しくなり、対角成分以外を 0 にした場合、標準ユークリッド距離と等しくなる。これは対角成分に残っている数値は各次元データ毎の分散のみであり、各次元同士の共分散が 0 となるためである。

以上の距離測定法を用いて、出力された結果と付与されているラベルデータを比較することで、分類結果の正答率を調査できる。

### 2.2.3 k 分割交差検証法による学習モデル評価

教師あり学習の最後の段階として、構築した学習モデルの評価を行う必要がある。本研究の場合、学習モデルに対して未知のデータを与えた時、どれだけの精度でユーザを分類できるかを確認することで評価を行う。教師あり学習を用いて分類問題を解く場合、取得した訓練データ・検査データの分布が偏っていないか注意する必要がある。訓練データの分布が偏って居た場合、分類器そのものの性能が向上せず、検査データが偏っていた場合、正当な分類結果を示すことは難しい。また、訓練データを検査データとして使用しないように注意することも重要である。訓練データを検査データとして使用した場合もちろん正しく分類することが可能だが、未知のデータに対しても同じ結果であるのか分からない。つまり、実際使用した時の分類結果と違う精度を示す可能性がある。教師あり学習の評価段階では、未知のデータに対する分類性能を示すことが重要である。この未知データに対する分類性能のことを汎化性能と呼ぶ。また、学習データに対して過度に適応してしまい、未知データに対して性能が向上しないことを過学習と呼ぶ。

本研究では k 分割交差検証法 (k-fold cross-validation) と呼ばれる手法を用いて学習モデルの評価を行う。

k 分割交差検証法の手法について図 3 を用いて説明する。k 分割交差検証法では、まず取得したデータセットを k 個に分割する。なお、図の例では  $k=10$  としている。次に、分割されたデータセットのうち、先頭のデータを検査データ、残りを訓練データという風に分別する。この訓練データを入力した分類器を用いて、検査データの分類結果  $result_1$  を算出する。続いて、先頭から 2 番目のデータを検査データ、残りを

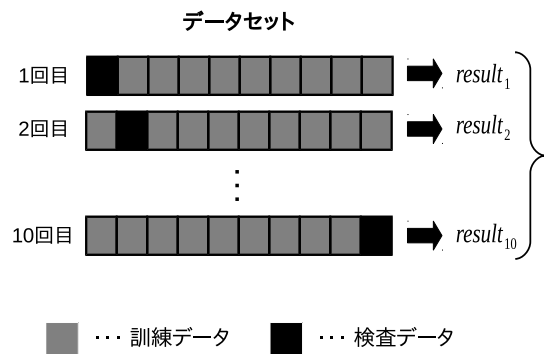


図 3 k 分割交差検証

訓練データとして、再び分類結果  $result_2$  を得る。これを末尾のデータまで  $k$  回計算を繰り返す。今回の例では 10 回の計算になり、分類結果は  $result_{10}$  の 10 個得られることになる。最後に、全ての分類結果の平均を算出することで、今回の分類結果の性能が示される。

$k$  分割交差検証法を用いるメリットとして、集められたデータが少数である場合でも全て有効に使うことができる点が挙げられる。 $k$  の値を大きくすることで、各検査データについて分類結果を算出するときの訓練データ数を増加させることができ、訓練データ不足による学習不足となる事態になりにくくなると考えられる。しかし、大きくし過ぎると、 $k$  分割交差検証法による計算量が増大し、各訓練データセットも似通ってくるため、過学習に陥りやすくなる。データセットが大きい場合、 $k$  の値を小さくすることで分類器の学習と評価のための計算量を削減しつつ、学習モデルの平均性能を評価することが可能である。

以上のユーザ分類処理のための計算は Python を用いて処理する。Python は汎用のスクリプト言語の一種であり、数値解析や機械学習のライブラリが豊富に揃っているためデータサイエンスの分野でよく用いられている。本研究では、オープンソースの機械学習ライブラリである scikit-learn を用いてユーザ認証処理を実装している。それと同時に、数値計算ライブラリである Numpy と Scipy も使用している。

### 3. スマートフォン把持動作を用いた個人認証による実験

本章ではその提案手法を用いて実際にユーザの分類結果を算出し、本手法の精度の確認を行う。本実験では、提案手法による分類結果の汎化性能の確認や、

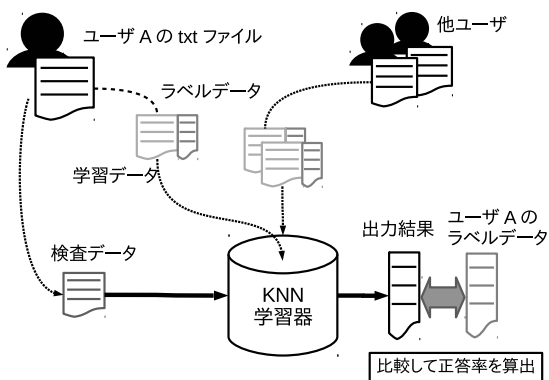


図4 分類結果算出までの過程

スマートフォン上で使用するアプリの違いで把持動作に違いは表れるのか、表れるとしたらどのようになるのかを検証した。3.1節では実験に用いた機材や実験を行う上での条件等を含めた実験環境について述べる。3.2節では取得されるデータセットを用いた認証結果の算出方法について詳しく述べる。取得した把持動作データセットの扱いについては3.3節で述べる。

#### 3.1 本実験の評価方法

本実験では被験者は大学生9名で行い、全員スマートフォンを使用した経験があることを確認している。被験者には着席したままスマートフォンを縦向きに保持し指定したアプリケーションを5分間操作してもらい、その操作を3セットずつ行ってもらった。本実験ではアプリケーションとして、ブラウザとパズルゲームを選択した。なお、ブラウザでは閲覧するサイトによって把持動作が変化する可能性もあるため、全被験者に同じニュースサイトを閲覧してもらうよう指示している。計測されたデータはPC側に送信され、 $k$  近傍法により被験者毎の分類結果を算出した。

#### 3.2 認証率の算出方法

本研究では  $k$  近傍によるユーザの分類結果を FAR (False Acceptance Rate : 他人受入率), FRR (False Rejection Rate : 本人拒否率) を用いて評価する。FRR は正規ユーザであるにも関わらず認められない割合を表し、FAR は非正規ユーザを正規ユーザと認めてしまう割合を表す。どちらも誤った分類の比率を表しており、0 に近いほど精度が良いことを示す。ここで、分類結果を算出するまでの過程を図4に示す。各ユーザから得られた把持動作データを計算式(1)を用いて標準化し、訓練データと検査データに分割する。全ユーザの訓練用データにユーザ毎に割り振られた固有の番号であるラベルデータを付与し、kNN 分類器に読み込ませることで学習を行う。最後に、学習させた kNN 分類器に検査データを読み込ませて、その検査データがどのユーザに最も近かったのかをユーザ番号で出力する。この際、ユークリッド距離と標準ユークリッド距離、マハラノビス距離をそれぞれ用いて訓練データと検査データの距離判定を行う。なお、用いるデータセットには前処理として計算式(1)を用いた標準化に加え、前処理を行わない生データの2種類を使用する。従って、計6パターンの分類結果を示す、

FRR を算出するために、kNN 分類器に調査したいユーザの検査データを読み込ませ、そのユーザのラ

ベルデータと出力結果を比較し、その正答率を FRR として算出している。FAR は、同じく kNN 分類器に本人以外の全ユーザの検査データを読み込ませ、本人と間違った割合を FAR として算出する。

### 3.3 実験データセット

取得した把持動作データセットの作成方法について、図 5 に示す。まず、使用したアプリケーション毎に把持動作データは分けておく。初めに、1 セット目の把持動作データを検査データとして用いる時、他セットの把持動作データを訓練データとして使用する。続いて、各ユーザの認証率を算出する時、FRR をそのユーザの検査データ、FAR をそれ以外のユーザの検査データを用いる。なお、距離判定に用いる逆共分散行列はそのユーザから得られた訓練データから算出される。この操作を全ユーザに対して行う。これを 3 セット分繰り返して行うことで交差検証を行う。それぞれ算出された認証率の平均をグラフ化することで本手法の認証精度を図る。訓練データ数は、全被験者の 3 軸方向加速度データ計 108,000 個、検査データ数は、FRR 算出時は同データ 6,000 個、FAR 算出時は同データ 48,000 個を用いている。これは、サンプリングレート 50ms の加速度データが 5 分間分蓄積されたデータ量が 6,000 個であり、訓練データは 9 名の被験者のデータを 2 セット分、検査データは FRR 算出時には被験者 1 名のデータを 1 セット分、FAR 算出時には被験者 8 名のデータを 1 セット分使用されていることから導かれる。

## 4. 実験結果と考察

本手法において、それぞれのアプリケーションにおいて最も認証精度が良いものを図 6、図 7 に示す。

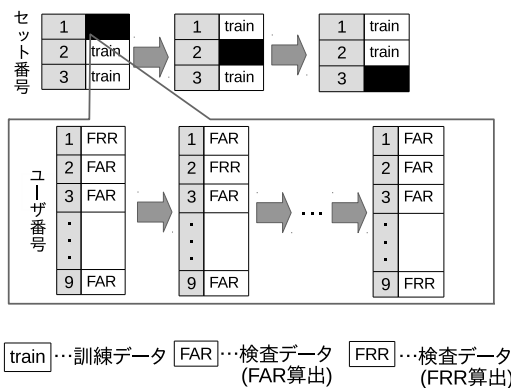


図 5 データセットの作成方法

各グラフの縦軸は FRR・FAR の認証率、横軸は k 近傍法のパラメータ k の値を示している。FRR・FAR のどちらも 0 に近いほど認証率が良いということを示す。なお、本実験の FRR・FAR はパラメータ k が 10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000 の場合の認証率を算出している。実線が FRR, 点線が FAR の値を示す。

本実験で最も良い分類結果を示したのは、ニュースサイト閲覧時は標準ユークリッド距離での距離判定(図 6)であり、パラメータ k=10000 の時、FRR=0.130, FAR=0.106 であった。パズルゲーム時では、マハラノビス距離での距離判定(図 7)であり、パラメータ k が 10000 の時、FRR=0.168, FAR=0.090 であった。全体の結果を見て、FRR が大きく FAR が小さいグラフが示されたことから、他人のなりすましには強いが本人拒否も起こりやすい認証システムであると言える。

2つのアプリケーション間で全ユーザ平均の認証精度を比較すると、ニュース閲覧時の方が良い認証精度を示しているが、大きな差は見られなかった。ユーザ別に見ると、ニュース閲覧時は FAR=0.012, FRR=0.008, パズルゲーム時は FRR=0.080, FAR=0.007 を記録しているユーザが見られた。これは、パズルゲームでの操作方法では把持動作データの分散が大きくなる傾向にあり、そのため k 近傍法による分類が若干困難になったと考えられる。

どちらのアプリケーションを使用した実験、また距離判定方法の違いによらず共通していることは、生データのまま k 近傍法を試みても、特に全ユーザ平均の FRR が 0.5 以上となる結果が多く見られたことである。このことから、生データでの認証処理では認証精度が向上しないということが分かる。これは、使用している 3 軸の加速度データ ( $a_x, a_y, a_z$ ) の各軸の特徴を抽出することができなかつたためであると考ええる。例えば、被験者によって y 軸方向の加速度  $a_y$  の平均値や標準偏差が異なっていることが分かっているが、標準化等の前処理を行っていないデータだとそれらの数値を抜き出すことができない。そのため、取得した加速度の値が単純に近かった被験者同士で誤認識しやすくなり、その結果認証率が向上しなかつたと考えられる。

また、どちらのアプリケーション使用時でも、ユークリッド距離での距離判定を用いた場合、標準化を行ったデータセットでも認証率が向上しなかつた。特に、計算式 (1) を用いたデータセットの場合の方が認証率が悪化していた。これは、他の距離判定方法では見られなかつた傾向である。理由として、ユークリッド距離は本手法で取り上げた他の距離判定方法と異なり、各軸の特徴量に重み付けを行うような操作をせず

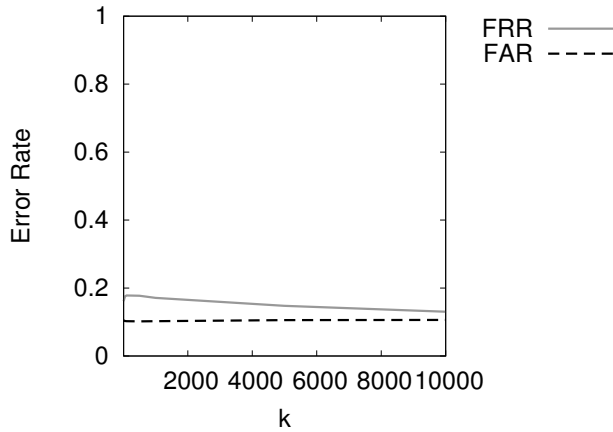


図6 ニュース閲覧時の認証結果

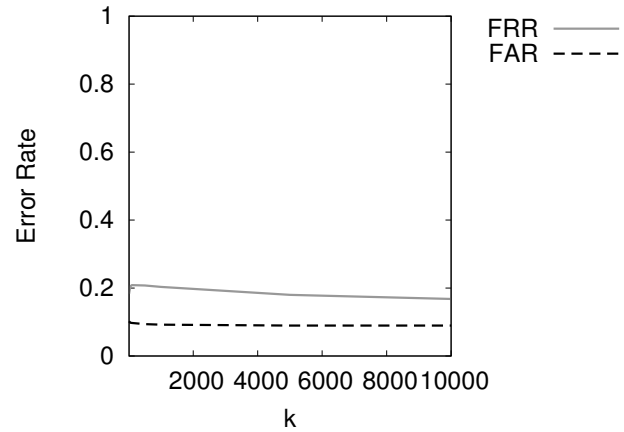


図7 パズルゲーム時の認証結果

等しく距離計算を行っていることが挙げられる。計算式(1)による標準化は、全ての特微量を平均値  $\mu = 0$ 、分散  $\sigma^2 = 1$  に変換するため、見かけ上検査データの近傍に類似した訓練データが多数出現することになる。ユークリッド距離では、単純に近くの訓練データと同じラベルのユーザであると判断してしまうため、ユーザで異なる特微量の標準偏差等を考慮できなかったことが原因であると考えられる。

それ以外の距離判定方法では、計算式(1)を用いた標準化でのデータセットでの認証精度は大きく向上していた。マハラノビス距離と標準ユークリッド距離は、各特微量の標準偏差、つまり各被験者の特微量ごとのバラつきを考慮できるため、上手く分類することが可能であったと考えられる。

本実験前の予想では、マハラノビス距離の方が標準ユークリッド距離よりも良い結果を示すだろうと考えていた。これは、マハラノビス距離では各特微量同士の共分散まで考慮することができ、これは標準ユークリッド距離ではここまで考慮されていないため、認証精度に差が出るであろうと考えたためである。しかし、結果としては予想通りマハラノビス距離の方が良い認証精度を示した実験もあったが、標準ユークリッド距離の方が良い結果を示した実験もあった。この2つの距離判定法について、マハラノビス距離の計算に用いられている共分散行列  $\Sigma$  の非対角成分を0にしたものが標準ユークリッド距離の計算方法であるため、類似した計算を行っていると言える。本実験では、被験者はスマートフォンを縦向きに持ってもらうという条件で各アプリケーションを操作しているため、3軸方向のうち標準偏差が大きくなる軸もあれば、小さくなる軸も見られる。そのため、共分

散を計算しても距離判定に大きな影響を及ぼさない数値が算出されていることが原因に挙げられる。また、計算コストに関して、標準ユークリッド距離の方が計算コストが小さいため、よりリアルタイム性が必要になる場合は標準ユークリッド距離を選択する方が良いと考える。

本実験では被験者が椅子に座っているという状況下において、加速度センサを用いてスマートフォン把持動作を取得した場合の認証結果が得られた。このことから、スマートフォンが盗難されパスワード等のログイン認証を突破された際にも一定の効果があり、ユーザの行動的特徴も得られていると考えられる。スマートフォンを持つだけで行動的特徴を取得することのできる手軽さは長所であると考えられる。ただし、立ち状態や電車内での使用等、使用状況を固定しない場合では、加速度センサから得られる値は大きく変化し、認証精度が悪化することが予想される。今後は、把持動作からユーザの体勢や状態に左右されにくい特徴を抽出すること、もしくはそのような外乱に強い認証アルゴリズムを考案することが課題として挙げられる。

また、本手法ではバックグラウンドでスマートフォンの使用ユーザを監視できることから、他の認証システムとの組み合わせも容易である。このことから、複数の認証方法と組み合わせることで認証精度を向上させることができるのではないかと考える。

本手法の認証精度を改善するためには取得する特微量を増加させることが考えられるが、それを行うことで計算コストが膨大になるというリスクもある。本手法で用いている  $k$  近傍法でも、パラメータ  $k=1$  ならば計算も時間はあまり掛からないが、良い認証

結果を示していた  $k=10000$  の時その何倍もの計算時間を要した。マハラノビス距離や標準ユークリッド距離でもユークリッド距離での距離判定時と比べて計算コストが増大するため、比較的計算に時間を要するという問題があった。そこで、学習モデル構築に時間を要するが計算コストの少ない SVM や線形判別等の教師ありアルゴリズムでの認証システムを試すことが改善案として考えられる。

## 5. まとめ

本研究ではスマートフォン把持動作を用いて継続的に本人認証を行うシステムの手法を提案した。加速度センサから把持動作を取得し、それを  $k$  近傍法によりユーザ識別を行うことで、本手法の精度を確認した。実験結果は、最も良い精度を記録したのはニュース閲覧時で  $FRR=0.130$ ,  $FAR=0.106$ , パズルゲーム時で  $FRR=0.168$ ,  $FAR=0.090$  であった。結果をユーザ別に見ると、 $FAR$ ,  $FRR$  共に  $0.05$  以下となるユーザが存在したことから、本手法は一部ユーザに有用であったと考えられる。

2つのアプリケーション間で全ユーザ平均の認証精度を比較すると大きな差は見られなかったがユーザ別に見ると、ニュース閲覧時は  $FAR=0.012$ ,  $FRR=0.008$ , パズルゲーム時は  $FRR=0.080$ ,  $FAR=0.007$  を記録しているユーザが見られた。これは、パズルゲームでの操作方法では把持動作データの分散が大きくなる傾向にあり、そのため  $k$  近傍法による分類が若干困難になったと考えられる。

また、実験結果から、データ前処理を行った方が認証精度が向上する傾向にあることが示された。同様に、ユークリッド距離を用いた場合よりも、標準ユークリッド距離やマハラノビス距離を用いた場合の方がユーザ分類の精度が高かった。理由として、ユークリッド距離は本手法で取り上げた他の距離判定方法と異なり、各軸の特徴量に重み付けを行うような操作をせず等しく距離計算を行っていることが挙げられる。マハラノビス距離と標準ユークリッド距離は、各特徴量の標準偏差、つまり各被験者の特徴量ごとのバラつきを考慮できるため、上手く分類することが可能であったと考えられる。

今後の改善策として、取得する特徴量を増やすことで認証精度向上を図ることや計算コストの削減等が挙げられる。

## 参考文献

- [1] 山田健一朗, 納富一宏, 斎藤恵一. スマートフォン操作時における行動的特徴量を利用した個人識別手法. パイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol. 16, No. 1, pp. 4148, 2014.
- [2] 渡邊裕司, 市川俊太ほか. スマートフォンにおけるタッチ操作の特徴を用いた継続的な個人識別システムの検討. コンピュータセキュリティシンポジウム 2012 論文集, Vol. 2012, No. 3, pp. 797804, 2012.
- [3] Tao Feng, Jun Yang, Zhixian Yan, Emmanuel Munguia Tapia, and Weidong Shi. Tips: Context-aware implicit user identification using touch screen in uncontrolled environments. In Proceedings of the 15th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, p. 9. ACM, 2014.
- [4] 渡邊裕司: スマートフォンにおけるタッチ操作の特徴による個人認証, 高精度化する個人認証技術, 株式会社エヌ・ティー・エス, pp. 193200 (2014).
- [5] Kolly, S. M., Wattenhofer, R. and Welten, S.: A personal touch: Recognizing users based on touch screen behavior, Proceedings of the Third International Workshop on Sensing Applications on Mobile Phones, ACM, p. 1 (2012).
- [6] Goel, M., Wobbrock, J. and Patel, S.: GripSense: using built-in sensors to detect hand posture and pressure on commodity mobile phones, Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology, ACM, pp. 545554 (2012).
- [7] 彭龍, 渡邊裕司ほか: スマートフォンの加速度センサを用いた歩行時の認証に関する一考察, コンピュータセキュリティシンポジウム 2013 論文集, Vol. 2013, No. 4,
- [8] 倉沢央, 川原圭博, 森川博之, 青山友紀ほか. センサ装着場所を考慮した 3 軸加速度センサを用いた姿勢推定手法. 情報処理学会研究報告ユビキタスコンピューティングシステム (UBI), Vol. 2006, No. 54 (2006-UBI-011), pp. 1522, 2006.

## 車両運用計画導出における島モデルGAの適用

平方敦\* 小高知宏\* 黒岩丈介\*\* 諏訪いずみ\*\* 白井治彦\*\*\*

### Application of island model GA in railway rolling stock operation plan

Atsushi HIRAKATA\*, Tomohiro ODAKA\*, Jousuke KUROIWA\*\*,  
Izumi SUWA\*\* and Haruhiko SHIRAI\*\*\*

(Received February 2, 2018)

In this paper, we applied island model GA for optimizing railway rolling stock operation plan. In island model GA, that performs evolutionary computation in each of many sub-populations. In the case of processing with the CPU, each sub-population is processed sequentially. GPU can be efficiently performed by distributing calculations within each sub-population to cores present in GPU.

We dealt with optimization of railway operation plan as one of optimization problems. When this method was used for deriving the railway operation plan with the GPU, the effect of shortening the calculation time was confirmed when processing was performed than using the CPU.

**Key words** :Railway operation plan, Genetic Algorithm, Graphic Processing Units, Island model

#### 1. はじめに

我々が日常的に利用する公共交通機関として鉄道が挙げられる。日本の鉄道技術は世界的に見ても先進的であり、秒単位の定時性を維持しつつ毎日の運行を行っている。近年注目される環境保全の面からも、公共交通機関の利用は推進されており、通勤や通学以外にも観光や貨物輸送への利用における再注目など、これからは我々の日々の生活に欠かせない存在になると考えられる。

日本の鉄道は高い定時運行制で知られているが、時として、事故や災害などによって列車ダイヤに乱れが生じることがある<sup>[1]</sup>。人身事故や自然災害などによる列車の運休や遅れは全国で毎日のように発生している。列車の運行が乱れた際には、現在の状況から運行

可能な区間を決定し、列車の運行時刻や乗務員の手配、充当する車両の手配を行なう必要がある。また、このような運転計画の策定は鉄道事業者が年に数回行なうダイヤ改正の際にも行われる。しかし、数カ月前から準備できるダイヤ改正のような場合と異なり、事故などの突発的な事象に対する列車の運転計画の策定には、なるべくダイヤの乱れを拡張させないという面から迅速な対応が求められる。

列車の運転計画における車両運用の策定は現在、熟練の技術者が経験則に基づき行っている。そのため、計画の策定には多くの時間を要し、計画自体の品質についても計画作成者の技量に依存していることから不安定である。また、運用作成技術を後継者に伝えるという点でも鉄道運用を担う事業者の負担となっている現状である。

そこで本研究では、車両運用計画の導出をPCを用いて自動で行なう。PCにより計画を導出することで、安定した品質の計画の導出が可能であることや、計画の作成にかかる時間の短縮が見込める。その中でも本研究では処理の高速化に焦点を絞る。GPUを用いた島モデルGAを車両運用計画の導出に用いることで、CPU

\* 大学院工学研究科 原子力・エネルギー安全工学専攻

\*\* 大学院工学研究科 知能システム工学専攻

\*\*\* 工学部技術部

\* Nuclear Power and Energy Safety Engineering Course,  
Graduate School of Engineering

\*\* Human and Artificial Intelligence Systems Course,  
Graduate School of Engineering

\*\*\* Technical Division



を利用した場合と、計算時間の短縮効果について比較し、検証を行なう。

本論文では、2章に車両運用計画の概要及び制約条件を示し、3章にアルゴリズムの設計を述べる。また、4章では車両運用計画の導出実験について述べる。5章では実験について考察し、6章では本研究で提案した手法について、総括する。

## 2. 車両運用計画の自動生成

本章では、車両運用計画問題の概要について触れ、自動生成する際に考慮しなくてはならない制約条件について述べる。

### 2.1 車両運用計画の概要

本節では現在の車両運用計画の概要と現状について述べる。

鉄道会社では、列車の運行内容を列車ダイヤで定めているが、それを実行するために、保有する各種の資源を効率良く運用することが求められる<sup>[2]</sup>。

前提として、鉄道の運行ダイヤは利用者である我々の生活ニーズを前提に取り決められることが通例となっている。鉄道会社が保有する資源には様々なものがあり、例えば運転士や車掌などの乗務員や線路設備、そして鉄道車両などがそれに当たる。中でも鉄道車両は非常に高価な資源であり、その導入にかかるコストは1ユニット数十億円以上となる場合も少なくない。また、車両のメンテナンスにかかる費用に関しても、保有する鉄道車両の数に比例して大きくなることから、出来る限り毎日の運行で使用される車両の数は少ないほうが望ましいと言える。

ここで、毎日運行されるすべての列車に対して保有している鉄道車両を割り当てる作業を車両運用計画という。現在、車両運用計画については人手による導出が主となっている。しかし、前述の通り人手による計画の導出は、品質の不安定さや計画導出にかかる時間といった点で鉄道事業者の大きな負担となっている。

そこで、車両運用計画問題を組合せ最適化問題として捉え、PCを用いて運用を導出するため、現在様々な研究が行われている。車両運用計画作成時における制約条件に対応させたシステムを用いた実験では、実在する時刻表データに対してアルゴリズムを適応させ、実際の運用に遜色ない運用導出を行なうことができていた<sup>[3]</sup>。しかし、運行する列車の数が多し路線にアルゴリズムを適用させる際には、必然的に計算量も多くなり実行時間が増えてしまうことが予想される。したがって、車両運用計画の自動導出を実現するシステ

ムにおいては、運用導出に必要な計算を削減すると同時に、より高速な演算処理を行なうことが要求される。

### 2.2 車両運用計画における制約条件

車両運用計画を取り決める際には、いくつかの制約条件について考慮する必要がある。

まず、どの列車にもいずれかの一つ以上の車両が必ず割り当てられなければならないということが挙げられる。複数の車両を増結して走行することもあるため、この場合には複数の車両をひとつの列車に対して割り当てることとなる。また、列車によっては途中駅で編成の一部を切り離す場合もあるが、この場合にも、切り離す車両と、切り離される車両が互いに一両以上存在しなくてはならない。この条件により、時刻表に記載されている全ての列車の運行が約束される。

また、終着駅に列車が到着した際には、折り返し列車として、到着時刻以降に駅を発車する列車に割り当てることができるが、到着してから発車するまでの時間(折り返し時間)にも制約が存在する。車両の車内清掃や、運転士の交代などの折り返し列車の準備作業には少なからず時間を要するため、折り返し時間を一定時間以上設けなければならない。

加えて、鉄道車両についても自動車などと同様に、車両検査が必要であり、規定の日数の経過に応じて全般検査・仕業検査・交番検査などを行なう必要がある。全般検査は車両の細かな部分まで丹念に検査するものであり、一般的な通勤車両については、2週間ほど検査に要する。このため、一定期間、検査中の車両を運用から外すことになる。したがって、運用計画を考える上で全般検査の存在を考慮する必要は基本的にないが、全般検査中の車両については運用に入ることができないため、通常の運用に使用できる車両の数が減ってしまう。したがって運用で使用する車両数は、保有車両数に対してなるべく少なくなるようにすべきである。仕業検査については比較的短時間で検査を実施可能であることから、運用の中に検査の時間を割くことが多い。したがって多くの日数を要する車両運用が組まれた場合には、運用の中に仕業検査のための時間を設ける必要がある。

これらの制約条件に加えて、各鉄道会社によってその地区特有の条件など、更に車両運用計画作成時における制約条件は増える場合も多い。また、制約条件ではないが、鉄道車両をメンテナンスする上で、単一の車両だけが走行距離が長くなってしまったり、または短くなってしまったりと好ましくない。保有している同一車種はなるべく均等な走行距離になるような運用を作成することにより、各車両のメンテナンス回数を均

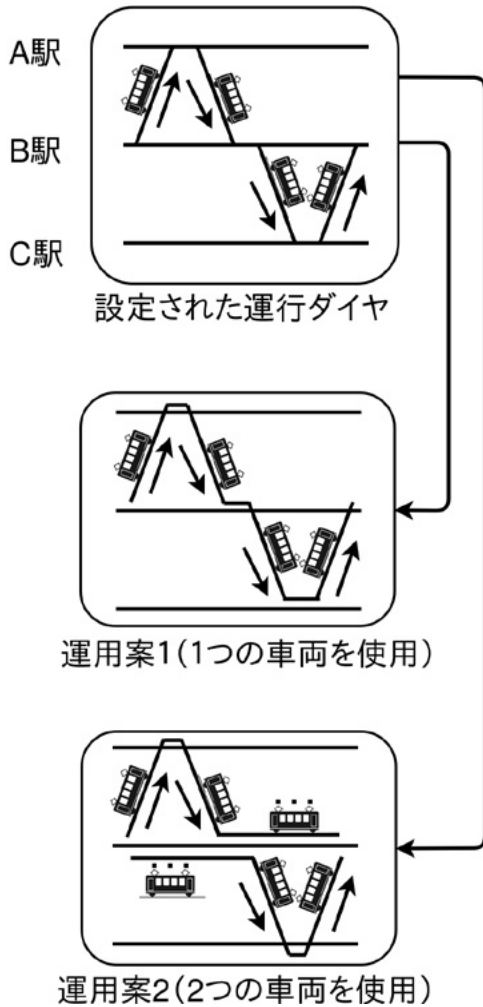


図1 列車ダイヤと運用計画の例

一化することができ、管理しやすくなる。各車両の走行距離を均一化するためには、1日ごとに割り当てる仕業を変えていき、各車両が運用計画内の全仕業に循環的に割り当てるようにすればよい。この複数日にわたる車両の循環的な使用計画を交番という<sup>[4]</sup>。交番を実現するためには、前日の仕業における最後の列車の終着駅と、翌日の仕業で最初に割り当てられる列車の始発駅が一致しなければならない。

上記のような制約条件を考慮した上で、車両運用計画を作成していくこととなる。全ての列車に対して列車を割り当てるという条件と、交番を実現するようにすることから、列車を頂点とみなし、列車が走っていない時間をアークとするネットワークモデルを作成し、各列車を一度ずつ通る巡回路を作成する。このような巡回路の導出が、交番を満たした車両運用計画の作成と同義である。このとき、総コストが小さくなるような巡回路を探索することにより、無駄の少ない効率の良い運用を導くこととなる。

図1は運用計画を作成する列車ダイヤをダイヤグラ

ムで示したものと、列車ダイヤに対する2つの運用案を示している。ダイヤグラムにおける横軸は時間、縦軸は位置を示している。斜めの線については列車を表しており、この列車ダイヤにおいては4本の列車が存在していることがわかる。右に示す運用案で色分けされている折れ線は車両の動きを意味しており、折れ線がそれぞれ車両運用に対応している。運用案1では全ての列車が1本の折れ線で表されていることから、1つの車両を用いて左のダイヤグラムのように設定された列車の運行を賄っているということになる。また、運用案2では全ての列車が2本の折れ線で表されていることから、2つの車両を用いて左のダイヤグラムのように設定された列車の運行を賄っているということになる。車両運用内で折れ線が水平になっている部分は車両の待機時間である。図1から、間合い時間の合計が長い車両運用の方が列車運行に用いる車両の数が多いことがわかる。したがって、間合い時間の合計が短い車両運用計画の方が車両の稼働率が効率化された運用ということになる。PCを用いて車両運用計画を導出する際には、間合い時間に着目して最適な運用を探索していけばよい。

### 3. アルゴリズムの設計

本章では、車両運用計画を自動導出する際に用いるアルゴリズムについて述べ、計算時間の短縮のために、具体的にどのような手法をとるかについて解説する。

#### 3.1 遺伝的アルゴリズムの導入

車両運用計画をPCで自動導出する際には、計算量の削減と処理の効率化が重要である。そこで本研究では、確率的探索手法として遺伝的アルゴリズムを用いる。遺伝的アルゴリズムとは、1975年にJohn Henry Hollandによって提唱された近似解導出のためのアルゴリズムである<sup>[5]</sup>。通常、生物というものは、交叉、突然変異、淘汰といったことを繰り返して、世代を重ねていくごとに周囲の環境に適合するように進化していく。遺伝的アルゴリズムでは、このような自然界での進化方法を元に、交叉、突然変異、淘汰といった処理をデータに対して行なう。これらの操作を任意の世代数行なうことにより、問題に適した解を探索することが可能である。このアルゴリズムは、組合せ最適化問題やNP問題などの様々な導出困難な問題に対して適用可能である。

そこで本研究では遺伝的アルゴリズムを用いて、車両運用計画問題を導出する。車両運用内での間合い時間を個体の環境適応度とし、進化的計算を繰り返して

表 1 上り列車の時刻表

列車名	A 駅	B 駅
0	600	630
2	800	830
4	1000	1030
6	1200	1230
8	1400	1430

表 2 下り列車の時刻表

列車名	B 駅	A 駅
1	700	730
3	900	930
5	1100	1130
7	1300	1330
9	1500	1530

最良の車両運用計画を探索する。その際、導出される車両運用計画については、前述の各制約条件が遵守されるものとする。個体の環境適応度である間合い時間の導出方法については次節で解説する。

また処理の効率化として、GPU を用いた並列処理を遺伝的アルゴリズムに適用する。この際、並列処理に特化した遺伝的アルゴリズムの一つである島モデル GA を用いるものとした。

### 3.2 運用作成時における間合い時間の算出

車両運用を作成する際には、時刻表データから間合い時間を算出し、各列車間の間合い時間表を作成する必要がある。ここでは任意の二つの列車が運用上連続する場合に、二つの列車を「つなぐ」と表現する。今回は、列車が到着する時刻から折り返しの列車が発車するまでの時刻を間合い時間として時間の差分を計算し、車両運用を作成するアルゴリズム上で参照できるものとした。

本研究で用いた時刻表のデータの例を表 1、表 2 に示す。ここで、表 1 はある路線の上り列車の時刻表のデータであり、表 2 はある路線の下り列車の時刻表の

表 3 時刻表データから算出した間合い時間

前\後	1	3	5	7	9
0	1800	9000	16200	23400	30600
2	81000	1800	9000	16200	23400
4	73800	81000	1800	9000	16200
6	66600	73800	81000	1800	9000
8	59400	66600	73800	81000	1800

データである。この例に示す路線では A 駅から B 駅までの間で列車を運行しており、上下 5 本ずつ計 10 本の列車が運行されている。実際にプログラムに与える時刻表データに含まれる情報は、各列車の列車名、始発駅の発車時刻、終着駅の到着時刻とした。ここで列車名というものは、運行される列車を識別するための名称であり、ここでは便宜上数字で表現している。基本的に始発駅を発車する時刻の早い列車から順に小さな数字が割り当てられるものとし、下り列車は奇数、上り列車は偶数で列車名を設定した。これらの取り決めは実際の鉄道においても適用される例が多い。これら 3 種類の情報(始発駅初時刻、終着駅着時刻、列車名)をテキストファイルとし、実行時に読み込まれるものとした。この時刻表のデータを差し替えることで、他の路線の車両運用計画についても、基本的にはアルゴリズムを変更することなく導出可能である。

表 3 は時刻表のデータである表 1 と表 2 から間合い時間を算出した例である。表の縦軸については、つなぐ前の列車、横軸についてはつなぐ後の列車を表している。また、間合い時間については秒単位で計算している。基本的には、つなぐ場合には上り列車から下り列車につなぐことが、着発駅が一致するという観点から通例となっている。また、表 3 では上り列車から下り列車につなぐ場合の全通りの間合い時間を示している。この表にある間合い時間に加えて実際には、下り列車から上り列車につなぐ場合の間合い時間の算出も必要となる。ここで、つなぐ前後の列車の上下は確実に逆でなければならないことはない。同一方向の列車同士であっても、つなぐ前の列車の終着駅からつなぐ後の列車の始発駅までの回送列車を設定することにより、つなぐことが可能となる。この場合は間合い時間に回送として走行する時間を加えることとなるが、回送列車は乗客を乗せずに走る列車なので、電力や人経費などの運行にかかるコストに対する利益がほぼないといえる。したがって回送を積極的に多用するような運用計画は望ましくないといえる。

ここで表 3 において、間合い時間を算出する例を簡単に述べる。例えば 2 列車から 3 列車につなぐ場合には、2 列車が終着駅である B 駅に到着する時刻が 08 時 30 分であるのに対し、3 列車が始発駅である B 駅を発車する時刻が 09 時 00 分であるので、両時刻の差は 30 分であることがわかる。ここでは秒単位で計算を行なうので、

$$30 \times 60 = 1800(\text{秒}) \quad (1)$$

の間合い時間が存在するという事となる。もし、2 列車から 5 列車につなぐ場合には同様に、2 列車の終着

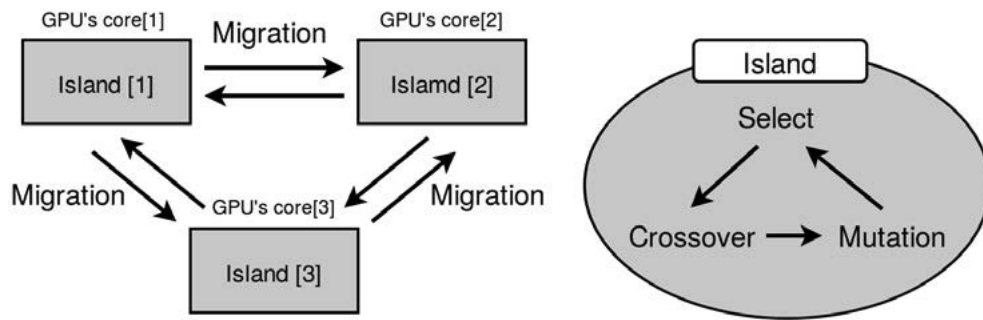


図2 実装した島モデル GA

駅着時刻と、5 列車の始発駅初時刻の差が 2 時間 30 分であることから、

$$2 \times 60 \times 60 + 30 \times 60 = 9000(\text{秒}) \quad (2)$$

の間合い時間となる。式 (1) と式 (2) を比較すると、前者のほうが間合い時間は短くなっていることがわかる。したがって、二つの列車のみで見た場合は、2 列車からつなぐべき列車は 5 列車ではなく 3 列車のほうが適切であるといえる。このような手法で車両運用計画を作成する路線で運行される列車の全てのつながりの組み合わせについて、間合い時間を算出した。

### 3.3 島モデル GA の実装

今回実装するアルゴリズムでは、時刻表のデータから列車間の間合い時間を算出した後、遺伝的アルゴリズムを用いて最適運用を求める。遺伝的アルゴリズムでは、個体(解)の特徴を示す遺伝子配列と、環境適応度の設定が必要となるが、今回遺伝子配列については車両が担当する列車の順序、環境適応度(評価関数)については列車間の間合い時間を用いるものとした。したがって、それぞれの個体の一つ一つの遺伝子要素については、運用中の列車一つ一つが対応していることとなる。初期の解集団を乱数を用いて作成し、環境適応度の優劣をもとに、交叉、突然変異、淘汰の処理を複数回繰り返すことにより、解の改善を行なう。また、本アルゴリズムでは、擬似乱数の生成手法として、高精度で高速な乱数生成が可能であるメルセンヌ・ツイスター (Mersenne Twister)<sup>[6]</sup> を用いるものとした。

遺伝的アルゴリズムを用いて組合せ最適化問題を解く際に、探索空間を広める方法としては、集団内に存在する個体の数を増やすこと<sup>[7]</sup>や集団そのものの数を複数設定することが挙げられる。そこで本研究では、後者の手法を島モデル GA として実装する。図 2 に本研究で実装する島モデル GA を示す。通常の遺伝的アルゴリズムのように、単一の母集団内で進化的計算を行なうのではなく、島モデル GA では複数の比較的

規模な母集団を設定し、それぞれの集団の中で進化的計算を行なう。本研究では CPU または GPU 上で、それぞれの母集団内での進化的計算を設定回数行なう。母集団内の進化的計算を CPU 上で行なう際には、それぞれの母集団の処理を逐次的に行なっていく。また、母集団内の進化的計算において GPU を併用する場合は、複数の母集団を GPU のコア 1 つ 1 つに割り振ることで、並列的に進化的計算を行なうものとした。

また、進化的計算を設定回数行なった後、移民と呼ばれる操作を行なう。この操作では、各母集団の中で環境適応度が最高となっている個体を他の母集団の環境適応度が最低の個体と入れ替える。この操作は、候補解が局所解に陥るのを防ぐ目的がある。確率的探索手法の短所である局所解への収束を防ぐことで、より最適解に近い解を得ることができる。したがって、並列処理に特化しているだけでなく、探索効率についても優れていると言える。最終的に全ての母集団内で環境適応度が最良である個体を参照し、その中でも環境適応度の値が最も優良である運用を出力し、実行を終えるものとした。

GPU に計算処理を担当させる際には、専用の書式で命令文を CPU から GPU に転送する必要がある。本研究において、GPU 上で動作する島モデル GA を実装する際には、NVIDIA 社が提供する CUDA という統合開発環境を用いる。この開発環境では C++ がベースとなる独自の言語で GPU での処理を記述する。通常、GPU のどのコアにどの処理を割り振るかといった定義は開発者が行なう必要があるが、この CUDA においてはコンパイル時に自動で処理が割り振られる。よって、煩雑な記述を開発者が行なう必要がなく、並列処理を伴うプログラムをスムーズに実装することが可能である。一般的に GPU では、複数のスレッドに対して並列的に計算を実行させることができる。したがって、逐次的に処理する CPU に比べて、高速に処理を実行できるケースが多い。本研究では CPU 上で処理を行なうアルゴリズムについては C++、GPU 上で処理を行な

うアルゴリズムについては CUDA を用いて実装を行った。

#### 4. 計画の導出実験

本章では、前章で実装したアルゴリズムを用いて、実際に車両運用計画の導出を行なう。

##### 4.1 島モデル GA の並列処理による高速化実験

本節の実験では、12本の列車が運行される時刻表のデータと、68本の列車が運行される時刻表のデータを用いた。また、架空の時刻表データを用いるのではなく、実際に存在する路線の時刻表データとした。また、実行環境として、CPUは intel core i7 2600K、GPUは NVIDIA 社の GTX-980 を用いた。使用した CPU 及び GPU の仕様については、表 4 と表 5 に示す。

また、今回の実験では、CPU による処理と GPU と CPU を併用した場合の処理の速度を比較するため、進化させる世代数は、各サブ集団とも 1000 世代固定とした。どのサブ集団においても、30 世代分進化処理を行なった後に、集団内での優良個体を交換する移民操作を行なう。実行開始から 1000 回目の進化処理が完了し、その時点での最良の運用を出力するまでの要した時間を記録した。

##### 4.2 島モデル GA の並列処理による高速化実験の結果

表 6 及び図 3 に 12 本の列車が運転される路線における車両運用計画の導出実験の結果を、表 7 及び図 4 に 68 本の列車が運転される路線における車両運用計画の導出実験の結果をそれぞれ示す。表 6、表 7 では左の列から設定した小規模な母集団(島)の数、CPU 上で

母集団内での演算を行なった場合の処理時間、GPU 上で母集団内での演算を行なった場合の処理時間を表している。また図 3、図 4 は表 6、表 7 をそれぞれグラフに表したものであり、グラフの縦軸は処理に要した時間、横軸は設定した世代数を示している。実線で示されるのが、各サブ集団の計算を CPU 上で逐次行っていた場合の処理時間である。また、破線で示されるのが、各サブ集団の計算を GPU のコア上で並列的に行なった場合の処理時間である。

表 6 及び図 3 から、12 本の列車が運転される路線の車両運用計画の導出において、単一の母集団で演算を行なう場合には CPU を用いたほうが高速な処理となっているが、その他の 50、100、150、200 個の母集団を設定した場合は GPU を用いた処理の方が高速で処理を行えている。両者の差はサブ母集団の数が大きくなるほど大きくなっていくことがグラフから読み取れる。また、今回実装した GPU を使用するアルゴリズムでは、200 個より多くの母集団を設定した場合に共

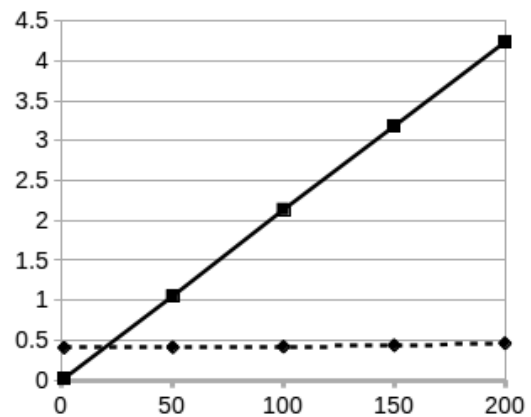


図 3 各実行環境における処理時間の比較 (12 本の列車が運行される場合)

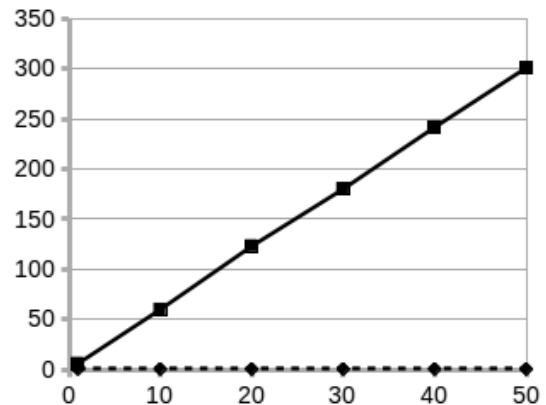


図 4 各実行環境における処理時間の比較 (68 本の列車が運行される場合)

表 4 intel core i7 2600K 諸元表

項目	数値
コア数	4 個
ベースクロック	3400MHz
ブーストクロック	3800MHz
メモリ量	32GB

表 5 GeForce GTX-980 諸元表

項目	数値
コア数	2048 個
ベースクロック	1126MHz
ブーストクロック	1216MHz
メモリ量	4GB

表 6 島の数による処理速度の比較 (12 本の列車が運行される場合)

島の数	CPU を使用した場合の処理時間	CPU と GPU を併用した場合の処理時間
1	0.023 [s]	0.407 [s]
50	1.054 [s]	0.412 [s]
100	2.136 [s]	0.419 [s]
150	3.183 [s]	0.436 [s]
200	4.236 [s]	0.461 [s]

表 7 島の数による処理速度の比較 (68 本の列車が運行される場合)

島の数	CPU を使用した場合の処理時間	CPU と GPU を併用した場合の処理時間
1	5.859 [s]	0.437 [s]
10	59.860 [s]	0.437 [s]
20	123.131 [s]	0.453 [s]
30	180.149 [s]	0.453 [s]
40	241.809 [s]	0.453 [s]
50	301.079 [s]	0.453 [s]

有メモリの使用量が容量を超過してしまった。この場合、適切な出力を得ることが出来ないため、処理時間を計測することが出来なかった。したがって、表 6 及び図 3 の実験結果では 200 個以上の母集団を設定した場合については省略している。

表 7 及び図 4 から、68 本の列車が運転される路線の車両運用計画の導出においては、1, 10, 20, 30, 40, 50 個の母集団を設定した場合に、GPU を用いた処理の方が高速で処理を行えている。両者の差はサブ母集団の数が大きくなるほど大きくなっていくことがグラフから読み取れる。また、今回実装した GPU を使用するアルゴリズムでは、50 個より多くの母集団を設定した場合に共有メモリの使用量が容量を超過してしまった。この場合、適切な出力を得ることが出来ないため、処理時間を計測することが出来なかった。したがって、表 7 及び図 4 の実験結果では 50 個以上の母集団を設定した場合については省略している。

## 5. 考察

本章では前章の車両運用計画の導出実験についての考察を行なう。

はじめに、12 本の列車が運転される路線での車両運用計画の導出において、母集団の数が 1 つの際に GPU を併用するよりも CPU を単独で用いた場合の方が処理時間が短い結果となったことについて考察する。GPU を用いる際には、あらかじめ CPU 上から計算に

必要となるデータを GPU との共有メモリに格納する必要がある。また、GPU 内のどのコアにどのような計算を割り当てるかなどの定義も行なう必要がある。これらの処理には非常に時間がかかり、ボトルネックになってしまう。したがって、これらの処理が必要ない CPU による処理の方が高速に処理を行なう結果となったと考えられる。この欠点を補うためには、計算に用いるデータ量をなるべく小さい形式にして GPU 上に転送することや、より高速にデータ通信を行えるような実行環境を整える必要があると言える。

次に、12 本の列車が運転される路線での車両運用計画の導出において、母集団の数が 50 個以上の際に GPU と CPU を併用した方が CPU を単独で用いた場合よりも処理時間が短い結果となったことについて考察する。この場合においても上述のボトルネックは存在する。しかし、今回実装したプログラムにおいては母集団の数が並列度となる。50 個の母集団を設定した場合には GPU 内の 50 個のコアで並列に処理を行なう。母集団の数が単一の場合は並列処理が行われないため、ボトルネックが足かせとなってしまいが、並列計算を行なう場合には、その効率がボトルネックによる損失を上回るものとなるため、このような結果になったと考えられる。

また、68 本の列車が運転される路線における車両運用計画の導出においては、設定したすべての島の数において、GPU を併用した場合に CPU を単独で用いた場合よりも処理時間が短い結果となったことについて

て考察する。運転される列車の本数が多い場合には、遺伝的アルゴリズム内での遺伝子配列が長くなる。その場合には個体の環境適応度の計算も複雑になるため、CPUによる逐次処理よりもGPUを併用した並列処理のほうが高速に計算を行なう結果になったものと考えられる。

また、12本の列車が運行される路線と68本の列車が運行される路線の両者において、島の数を増やすことによって、計算の並列度が上がり、CPUとGPUの処理に要する時間の差は更に広がるものと考えられるが、前章の結果で示したように列車本数が12本の場合には200個以上、列車本数が68本の場合には50個以上の母集団を設定した場合には、適切な処理が行えない結果となったため、アルゴリズムの改善や、実行する環境を変更する必要がある。

## 6. まとめと今後の課題

本章では車両運用計画を自動導出するにあたって提案した手法について総括し、今後の課題点について述べる。

本研究では、車両運用計画作成の自動化の手段として、島モデルGAの提案、及び設計と実装を行った。大規模な車両運用計画の導出においては、計算効率を高めることは非常に重要であり、その点において、本研究で示したアルゴリズムは有用であると言える。このシステムは鉄道事業者が車両運用計画を作成する際に有用であると考え、時刻表によって運行スケジュールが定められている他の交通機関の資源運用に対して応用することも期待できる。

今後の課題としては、各路線に存在する様々な制約条件への対応が必要である。本研究で構築したアルゴリズムでは、他路線への乗り入れや、逆に他路線から乗り入れてくる列車の存在を考慮していない。他路線との相互乗り入れを考慮する場合には、各路線の運用も考慮した上で効率的な運用を求めていかなければならない。また、各列車の発着駅での留置車両の許容数についても路線によっては考慮する必要がある。発着駅の規模が小さい場合には、1本や2本しか列車が存在できず、このような場合には、車両運用を計画する際にも多数の車両が発着駅に存在することのないようにしなければならない。加えて、運用計画を作成する路線で複数の車種を使用している場合には、それぞれの車種ごとに運用を決める必要がある。このとき、通勤通学時間帯には乗客収容力が高い車両を使用したり、保有している車両の編成数の割合によって、一日の中の列車の担当数を決めなければならない。他に

も現状では、路線ごとに様々な運用上の制約条件というものが存在しているが、こういった制約条件を考慮した運用を計画するアルゴリズムの構築には至っていない。制約条件を加えることによって各路線に適応した車両運用計画を生成するアルゴリズムを構築する必要がある。

## 参考文献

- [1] 椎名航一, 田村啓, 富井規雄: 利用者の視点から最適な運転整理案を迅速に導出するアルゴリズムの開発 (鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail) 講演論文集, Vol.19), 電気学会交通・電気鉄道技術委員会, pp.53-56(2012).
- [2] 今泉淳, 山岸雄樹, 森戸晋: 二段階数理計画アプローチによる鉄道車両運用計画の策定 (日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, Vol.53), 日本オペレーションズ・リサーチ学会, pp.14-29(2010).
- [3] 福村直登, 中村達也, 西森進矢, 坂口隆: 車両運用計画自動作成アルゴリズムの開発 (鉄道総研報告, Vol.22), 鉄道総合技術研究所, pp.5-10(2008).
- [4] (財) 鉄道総合技術研究所運転システム研究室: 鉄道のスケジューリングアルゴリズム, エヌ・ティー・エス (2005).
- [5] 倪永茂: 遺伝的アルゴリズムによる巡回セールスマン問題の一解法 (宇都宮大学国際学部研究論集, Vol.3), 宇都宮大学国際学部, pp.31-40(1997).
- [6] Matsumoto Makoto, Nishimura Takuji: Mersenne twister a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator (ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS), Vol.8), ACM, pp3-30(1998).
- [7] 平方敦, 小高知宏, 黒岩文介, 白井治彦: 車両運用計画最適化への並列処理技術の適用 (情報処理学会第78回全国大会講演論文集, Vol.1), 情報処理学会, pp.449-450(2016).

## 株価予測におけるビッグデータの利用

柳瀬 仁洋\* 小高 知宏\* 黒岩 丈介\*\* 白井 治彦\*\*\*

### Use of Big Data in Stock Price

Yoshihiro YANASE\*, Tomohiro ODAKA\*, Jousuke KUROIWA\*\* and Haruhiko SHIRAI\*\*\*

(Received February 2, 2018)

In this research, stock price is predicted using web data. Many researchers are conducting stock price prediction research. In overseas research, it was announced that highly accurate stock price prediction can be performed using emotional values. By analyzing Web data it has been shown that it helps to predict stock price from results. It is necessary to investigate the usefulness of previous research in Japan.

We investigated the relationship between web data and stock price in Japan by conducting stock price prediction using web data. And we made stock price prediction using decision tree analysis of machine learning. As a result of the experiment, stock price prediction of 63.8

**Key words** :Big data, stock price, emotion analysis, machine learning

#### 1. はじめに

本研究では、感情解析を用いてインターネット上のデータと株価の変動の間に相関関係があるかどうかを調査することを目的としている。

今日ではビッグデータを用いた研究が注目されている。またビッグデータは、日々増加しており様々な研究や開発に応用・発展されている。その中で、ビッグデータを解析して昨今では予測するのが非常に困難と言われていた経済状況の予測などの研究が注目されてきている。株価予測の分野も今日ではインターネット上で取得することができる SNS やニュース記事などの様々なデータを用いて予測するという研究が多くされてきている。<sup>[1]</sup>

その中でも 2010 年にアメリカの論文で発表された「Twitter mood predicts the stock market」<sup>[2]</sup> は、非常に

興味深い研究成果が挙げられている。アメリカ国内のインターネット上の Twitter ツイート文を感情解析することによってテキストデータを数値化してダウ平均株価との相関性を調査し実際に株価予測を行った。その結果約 87% の精度で株価を予測することが可能であると発表された。またこれによりインターネット上のテキストデータの感情値と株価の変動の間には、何かしらの相関関係があることが示された。

しかしながらこの先行研究はアメリカで研究されたものであり、当然言語が英語となっている。日本語と英語では、文法の構造や単語は大きく異なっている。また当然アメリカと日本では、表現方法が異なっておりさらに、Twitter の利用する用途やユーザー層が異なっていることが容易に予想できる。これらの理由により、日本国内でインターネット上のテキストデータを用いた株価予測でこの先行研究のような高い精度での予測が可能といった研究成果は少ない。

そこで本研究では、日本国内のインターネット上のニュース記事と日経平均株価との間に何らかの相関性がないかを調査した。国内で公開されているニュース記事で感情解析をして数値化し、この感情値を用いて実際に株価予測を行った。

\* 大学院工学研究科 原子力・エネルギー安全工学専攻

\*\* 大学院工学研究科 知能システム工学専攻

\*\*\* 工学部技術部

\* Nuclear Power and Energy Safety Engineering Course,  
Graduate School of Engineering

\*\* Human and Artificial Intelligence Systems Course,  
Graduate School of Engineering

\*\*\* Technical Division



テクニカル分析	価格分析	規則時系列分析	トレンド系分析
			オシレーター分析
		規則時系列分析	
	その他の分析	出来高	
		確率論	
		相対比較	

図1 テクニカル分析の種類

本稿では、2章では、株価予測についての現状と手法について述べる。3章では実際に本研究で行う株価予測の流れを説明し、4章では実際に行った実験内容の詳細を述べる。5章では実験結果と結果からの考察を述べ、6章でまとめと今後の課題を述べる。

## 2. 株価予測の手法

株価予測とは、市場に出回っている株価の推移を予測することである。主に投資家と呼ばれる人たちが、様々な情報を元に分析して予測の精度を高めている。本章では、株価予測における分析手法や本研究に株価予測手法の提案を行う。

### 2.1 株価予測の分析手法

株価予測の分析手法は、主に2種類に分類できる。それぞれテクニカル分析とファンダメンタル分析である。この2つの分析手法を説明する。テクニカル分析は、統計的に分析を行っていくものである。過去の株価の推移パターンや数値などの様々なデータを分析して予測を行う手法である。この分析法では、主に時軸と価格軸の統計を見て分析を行う。その中で規則的な時系列をみて行う分析手法を規則時系列分析と呼ばれる。規則時系列分析の中でも、市場の「上昇」、「下降」、「横ばい」の3つの状態の内今後どの状態になるのかまた、今現在どの状態となっているのかを分析する手法をトレンド系分析と呼ばれる。更に規則時系列分析には、オシレーター分析と呼ばれる分析方法もある。また不規則的に時系列を見る不規則時系列分析などがある。その他にもいくつかの分析手法は存在している。テクニカル分析の種類を分類を図1に示す。テクニカル分析は、投資家の中でも主に短期での株取引を行う時に重要視される分析である。ファンダメンタル分析とは、投資する企業の事業方針や、

行事また財政状況などの情報を元に分析を行う手法である。<sup>[5]</sup> ファンダメンタル分析では、テクニカル分析とは異なり、統計的に株価を予測するのではなく、安定性、成長性、収益性などの企業価値を見極める分析方法である。これらの企業価値を見極めるために様々な側面から指標を用いて分析する。例えば、安定性を分析する時に用いる指標は、自己資本比率や流動比率またキャッシュフローなどがある。重要な指標と言われる DER(Price Earnings Ratio) や PBR(Price Book-Value Ratio)、また ROE (Return on Equity) などがある。これらの指標の詳細を図2に示す。テクニカル分析とは逆にファンダメンタル分析では、長期的に投資を行う時に重要となる分析方法である。

### 2.2 ビックデータを利用した株価予測

近年では、ビックデータ解析が様々な研究分野で利用されている。それに伴い株価予測の研究にもビックデータを利用した研究が多く行われてきている。ビックデータを利用した株価予測は、株価の変動する要因と考えられる過去の株価の変動などの定量化されていないデータを株価予測に用いることができる。よって従来の定量的データのみを利用した株価予測の精度よりビックデータを用いた株価予測の精度が良くなるのが容易に考えられる。

様々な研究に多く用いられるようになったビックデータの中で主に株価予測で利用されているビックデータの種類の種類は、TwitterなどのSNSやニュースサイトといったテキストデータが主に利用されている。これらのテキストデータには、株価の変動の要因となる可能性がある定量化されていない様々なデータが多く含まれている。この定量化されていないデータを数値化させることによって株価予測に用いることが可能となる。この数値化して予測する手法の一つとして感情解析がある。感情解析とは、テキストデータの

PER	企業の利益に対する株価の割合
PBR	企業の資産に対する株価の割合
BPS	総資産からどれほどの利益を上げたのかを示す指標
ROE	資本からどれほどの利益を上げたのかを示す指標

図2 ファンダメンタル分析の指標例

単語毎に含まれている感情値の度合いを数値として抽出する解析手法のことである。感情解析の手法は先行研究でもこの手法が用いられているものがある。

### 3. 本研究における株価予測の手法

本章では、本研究で実際に使用した株価予測手法及び構築した株価予測システムについて述べる。

#### 3.1 本研究での解析目的

本研究では、自国である日本でのインターネット上のテキストデータと株価の変動に相関性があるのかを調査するのが目的である。先行研究で行われていた株価予測では、確かにかなり高い精度で株価の予測が行われていた。しかし先行研究の実施した地域は日本ではなくアメリカで実施された。当然アメリカと日本とは、言語が異なっており日本語と英語とは、単語や文法も異なってくる。

また文化も異なっているので、表現方法やインターネットの利用者層、使用目的などが異なると考えられる。よって先行研究で行われた感情解析と同じ着眼点で解析を行った時に似たような結果を得ることができるのかをまず確認する必要がある。よって日本国内でのインターネット上のテキストデータを使用して同様に感情解析及び株価予測を行い株価変動と相関が得られたかを確認する。

#### 3.2 本研究の解析の流れ

本研究で行う解析の主な流れを説明する。今回の解析手法では、大きく4つの工程となっている。この工程の流れは、以下に示す。また具体的な解析手法の流れを図3に示す。各工程の詳細な説明は次の節から行う。

1. インターネット上のテキストデータ・株価データの取得
2. テキストデータの加工
3. 定量化データの抽出及び数値化
4. データの分析・株価予測

#### 3.3 インターネット上のテキストデータ・株価データの取得

この節では、今回の研究で使用したデータについて述べる。本研究で扱うデータは、以下の2つである。

- 日経平均株価

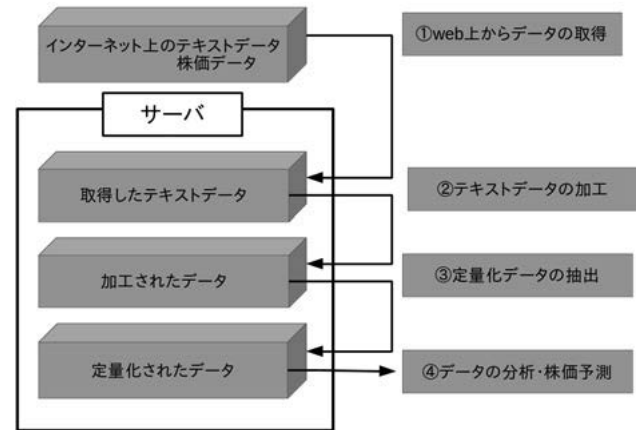


図3 システムの流れ

#### ● ニュース記事

今回の研究では、インターネット上のニュース記事と日経平均株価との相関性を調査する。ニュース記事の取得は、それぞれのニュースサイトのニュース記事がまとめられている Yahoo ニュース (<https://news.yahoo.co.jp/>) から取得することができる。また日経平均株価は、Yahoo ファイナンス (<https://finance.yahoo.co.jp/>) から取得することができる。

取得するニュースサイトは、一日に更新されたトップニュース記事を全てその日の終わりに取得する。取得するニュース記事は、日本国内の新聞社である、朝日新聞、毎日新聞、読売新聞、産経新聞の4社からニュース記事を取得する。取得した記事は、記事のタイトルとニュース記事の本文をまとめて保存しておく。本研究では、日経平均株価とそれぞれのニュース記事を、127日間作成したプログラムで取得しておきデータベースに保存されている。取得したニュース記事を本研究では、テキストデータとする。この保存したデータから本研究では、テキストデータの加工や感情解析および株価予測を行っていく。

#### 3.4 取得したテキストデータの加工

この節では、取得したテキストデータを感情解析できるようにするための加工手法を説明する。テキストデータの数値化を行うには感情解析を行わなければならない。しかしながら感情解析は単語に含まれる感情を解析するため、一つのつながった文章のままでは単語をその文章の中から見つけることが出来ず感情解析を行うことが出来ない。つまり取得して未加工のままのテキストデータからでは、感情解析

ができない。よって取得したテキストデータを単語毎に区切る加工を行わなければならない。今回テキストデータを加工するのに形態素解析を行う。

### 3.4.1 自然言語処理とテキストマイニング

自然言語処理とは、日本語や英語などの人間が使用している言語（自然言語）をコンピュータが処理することを意味する。自然言語処理の中でも今回はテキストマイニングと呼ばれる技術を使用する。テキストマイニングとは、大量の文字列からなるテキストデータから有益な情報を取得する技術のことである。主に形態素解析を行い文章であるテキストデータを名詞や動詞、形容詞などの単語ごとに区切りそこから単語の頻出頻度や出現傾向等を調べることで情報を取り出す。本来日本語は、英語などの言語と比較して単語に接頭辞や接尾辞のような形態素を付着することで意味をもたせる膠着語であったり、単語と単語の区切りに空白などを入れずにベタ書きで書かれていたりするのでテキストマイニングは困難とされていた。

しかし自然言語処理の技術が向上されてきたことによって日本語でもテキストマイニングすることが容易になった。今回のテキストマイニングでは、形態素解析を行う必要がある。次の節で形態素解析についての説明をする。

### 3.4.2 形態素解析

形態素解析とは、自然言語処理の技術のひとつである。そもそも形態素とは、文章のなかで意味を持った最も短い文字列のことである。形態素解析では、取得したテキストデータを形態素毎に区切り、さらに抽出した形態素の品詞情報なども解析する処理を行う。次の図4に実際にテキストデータの形態素解析を行った時の解析結果の例を示す。

形態素解析をパソコン上で行うには、形態素に区別するためにそれぞれの文法情報や品詞情報が掲載されている単語の辞書と専用の形態素解析エンジンが必要である。形態素解析エンジンの中には、インターネット上でオープンソースとして公開されているものがある。そういったオープンソースの一つが Mecab と呼ばれる形態素解析エンジンである。Mecab は、インターネット上で公開されているライブラリである形態素解析エンジンである。<sup>[3]</sup> この形態素解析エンジンは、奈良先端科学技術大学院出身の工藤拓氏によって開発されたライブラリである。このライブ

ライブラリは、様々なプログラム言語から応用して利用することができ、また自身のパソコン上からでも動作させることができる。Mecab を利用すれば Mecab の引数に形態素解析したいテキストデータを与えるだけでテキストデータの形態素解析を行うことができる。また形態素解析に必要な単語の辞書も Mecab のオープンソースの中に含まれており、Mecab 専用の IPA 辞書が存在している。本研究では、この Mecab ライブラリを使用して形態素解析を行う。

## 3.5 定量化データの抽出及び数値化

ここでは、上述した加工方法により加工されたテキストデータから定量化されたデータの抽出・数値化方法について述べる。Mecab によって形態素解析を行ったデータを解析処理する。今回の解析を行うことによって定量データではないテキストデータを数値化して定量データにすることが出来る。テキストデータを数値化された定量データにした後に株価変動と分析して株価予測を行う。今回の研究で用いる解析手法は、感情解析である。

### 3.5.1 感情解析

ここでは、本研究に用いる感情解析についてと実際の解析方法についての説明を行う。本研究での感情解析とは、テキストデータから解析を行うことである。形態素解析を行い加工された定量データを感情解析して数値化し、いくつかの種類の感情のどの感情が含まれているかを数値化する。またテキストデータから取得できる感情の種類はいくつか存在している。例えば、非常に高い精度で株価予測を行っている海外の先行研究では、[Calm], [Alert], [Sure], [Vital], [Kind],

例文：株価予測を行った。

文字列	読み	原形	品詞	活用	活用形
株価	カブカ	株価	名詞		
予測	ヨソク	予測	名詞		
を	ヲ	を	助詞		
行っ	オコ ナツ	行う	動詞	五段・ ワ行促 音便	
た	タ	た	助動 詞	特殊・ タ	基本 形
。	。	。	句点		

図4 形態素解析の例

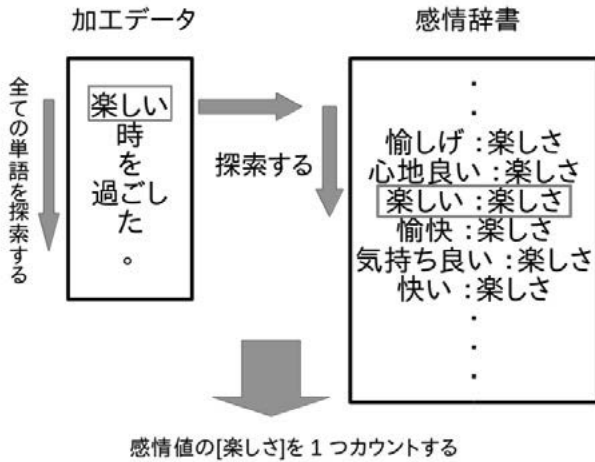


図5 感情解析の流れ

[Happy]の5種類の感情因子を用いた感情解析が行われている。他にもテキストデータの単語が、ネガティブかポジティブの2種類のみで感情解析を行うネガポジ解析と呼ばれるものもある。今回の研究では、インターネット上のニュースサイトからニュース記事を取得して、取得したテキストデータを形態素解析して取得した単語データに対して感情解析を行う。上記に例として述べたように感情解析の方法には、いくつもあり様々な感情因子で区別して解析を行うことができるが、今回は[喜び][怒り][哀しみ][楽しさ][愛しみ][憎しみ][穏やか]の7つの感情因子に分けて感情解析を行う。

図5に本研究で実装した感情解析の流れを示す。まずMecabによって形態素解析され形態素に区切られたニュース記事の単語を取り出す。取り出したそれぞれの単語に対して一つ一つの単語が上記に述べた7つの感情の中でどの感情が含まれているかを定める。全ての単語データを照合し終えたらそれを元にそれぞれの感情がそのテキストデータにいくつ含まれているかを算出する。この算出結果が今回の感情値となる。

今回の感情解析を行っていく中で、単語にどの感情が含まれているのかを判断するためには、あらゆる単語それぞれがどの感情に含まれているのかの情報が記載されている辞書を用いなければならない。本研究では、データソースであるWordNet, WordNet-Affect, 日本語WordNetを利用して辞書を作製する。<sup>[4]</sup> WordNetは英語版の概念辞書となっており、WordNet-AffectはWordNetの単語に感情をさらにラベリングするためのデータソースである。また日本語WordNetは、英語で構成されているWordNetを日本語に変換するた

## 例文

野球の試合を行ったが、結果は負けてしまった。  
残念だったが、初めてレギュラーになれて  
うれしかったが緊張した。

感情解析を行った結果

喜	怒	哀	楽	愛	憎	穏
1	0	2	0	0	0	0

図6 感情解析の例

めのデータソースとなっている。これらのデータソースは、インターネット上で公開されており研究のための利用が可能となっている。作成した感情辞書では、7000語以上の単語が掲載されておりそれぞれの単語に7つの感情のいずれかが付与されている。今回の研究では、感情解析はテキストデータを定量化するための一つ的手段とみなして、感情それぞれに意味がないものとしている。この感情辞書を用いてニュース記事の感情解析を行う。まずニュース記事の単語が感情辞書に含まれているか一つ一つの単語を感情辞書で検索をする。もしその単語が感情辞書に含まれているのであれば、その単語の感情をカウントする。ニュース記事全てが検索し終わった時にそれぞれの感情値がいくつあったかを算出する。具体的な動作例を図6に示す。また当然ニュース記事の中には、感情辞書に含まれていない単語もいくつか存在している。今回はそのような固有名詞やスラング、単語などはカウントしないものとする。最終的に一日分のニュース記事のテキストデータの感情解析を行い、感情値の合計値を定量データとする。

これで取得したニュース記事から感情解析をすることによって数値化された定量データの修得が出来る。次の節で取得した定量データを用いた分析方法について説明する。

## 3.6 データの分析・株価予測

この節では、これまでの方法で定量データにしたテキストデータであるニュース記事と日経平均株価を用いた株価予測の方法について述べる。

テキストデータであるニュース記事の感情解析の結果からまずそれぞれの感情因子の推移と日経平均株価の推移が時系列でどのようになっているのかを見る。これらをグラフにして時系列でどのように変

表 1 取得するニュースサイト名

ニュースサイト名	URL
朝日新聞	<a href="https://headlines.yahoo.co.jp/list/?m=asahi">https://headlines.yahoo.co.jp/list/?m=asahi</a>
毎日新聞	<a href="https://headlines.yahoo.co.jp/list/?m=mai">https://headlines.yahoo.co.jp/list/?m=mai</a>
読売新聞	<a href="https://headlines.yahoo.co.jp/list/?m=yom">https://headlines.yahoo.co.jp/list/?m=yom</a>
産経新聞	<a href="https://headlines.yahoo.co.jp/list/?m=san">https://headlines.yahoo.co.jp/list/?m=san</a>

化しているのかを確認する。今回グラフとして表示するデータは以下の通りである。

- 日経平均株価
- それぞれの感情値

これらのデータの推移を見て株価の変動とニュース記事との間の相関性の有無を確認する。

株価予測を行う前に感情値と相関係数を算出する。相関係数の算出は以下の式で行う。

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$r_{xy}$  は相関係数を表す。 $n$  組のデータ  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  がある時、これらの  $x, y$  のそれぞれの平均をそれぞれ  $\bar{x}, \bar{y}$  とする。相関係数は、2つの変数間の直接的な関係の強さを示す係数であり算出値は-1から1までの値となる。一般的に算出値の絶対値が1に近いほど関係性が強いと言える。相関係数の算出結果も加味しつつ株価予測を行う。以降に機械学習を用いた株価予測の手法を示す。

### 3.6.1 機械学習を用いた株価予測

機械学習とは、近年注目されている分野であり蓄積されたデータから傾向や特色などを機械が学ぶアルゴリズムのことである。今回の研究では、機械学習の中の一つである、決定木分析を行った。

決定木分析とは、学習時に決定木と呼ばれる探索木を作成し、予測時にはこの決定木を元に株価予測を行う学習方法である。決定木分析では、目的変数と呼ばれる最終的にこの変数がどうなるかを定める変数と説明変数と呼ばれる目的変数を決定するための条件となる変数が必要になる。本研究では目的変数は日経平均株価の増減とし、説明変数に7つの感情値とする。決定機分析による株価予測には、主な流れとして2つの作業が行われる。

まず学習作業である。学習作業では、感情値と日経平均株価を元に決定木を作製する。この時に株価が上昇する時の感情値の傾向と下降する時の傾向を学習している。次に予測作業である。予測作業では、感情値と学習時に作成した決定木を用いる。決定木を元にその日の感情値の条件にあった株価の変動を予測する。予測後その予測結果が実際に正しいのかを確認する。

決定機分析による株価予測によってどれほどの予測精度かを見ることにより株価とニュース記事との相関があるかを見る。精度が高ければ高いほど相関性があると言える。

## 4. 実験

本章では、3章で述べた株価予測システムを実装して実際に株価予測を行う。ここでは、実験の期間や使用したデータを述べる。

### 4.1 実験の期間及び使用したデータ

今回の実験の期間及び実験で使用したデータについて述べる。今回の研究では、日本国内のインターネット上のテキストデータが解析対象となっている。今回は、すでに述べたように4つのニュースサイトの記事をYahoo ニュース (<https://news.yahoo.co.jp/>) から取得する。表1に今回の実験で使用したニュースサイトと取得してきたURLを示している。実験を行う前に予め上記のサイトからニュース記事のデータを蓄積させておいたこれらのテキストデータを使用して解析を行う。また日経平均株価もYahoo ファイナンス (<https://finance.yahoo.co.jp/>) から取得しておいた。これらの2つのデータを学習期間と予測期間の2種類の期間を設けて取得する。それぞれの取得期間は表2のとおりとなっている。

表 2 データの取得期間

学習期間	80 日間
予測期間	47 日間

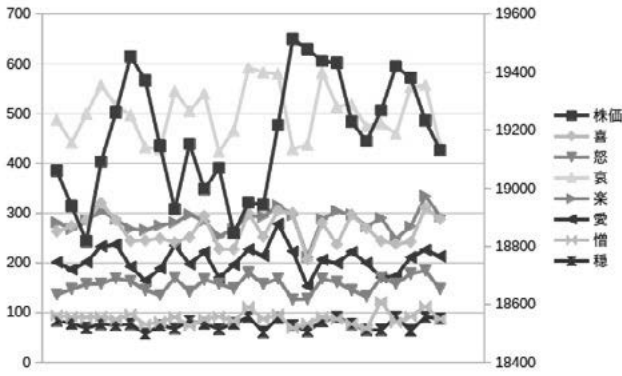


図 7 4つのニュース記事の感情解析の合計と日経平均株価の推移

表 4 相関係数の結果

パラメータ	相関係数
朝日新聞 [喜]	0.28
産経新聞 [憎]	-0.19
4 社合計 [憎]	-0.22

4.2 実験方法

実験方法について述べる。今回は、3章で述べた株価予測の方法に沿って行い実際に株価予測を行う。前節で述べた期間から4社のニュース記事と日経平均株価を取得しデータを蓄積していく。最終的に蓄積させたデータのグラフと株価予測での正解率を算出して関係性があるかを確認していく。また相関係数を求めて良い結果である3つのパラメータのみを用いた株価予測も行った。

5. 実験結果

本章では、4章で述べた実験条件を元に行った実験の結果を示す。まず、ニュースサイトを感情解析した結果を示す。全期間で取得したした4つのニュースサイトの感情解析をまとめた結果をグラフを図7に示す。グラフには、8つのデータの時系列変移が示されている。

また各ニュースサイトのそれぞれの感情値の結果を表3に示す。相関係数を求めて良い結果である3つの感情パラメータと相関係数を表4に示す。さらに株価予測の結果を表5に示す。

6. 考察

本章では、5章で示した実験結果を元に考察を行っていく。

まず実験全体についての考察を述べる。表3を見

表 5 感情解析の結果

ニュースサイト名	
総合	46.853
朝日新聞	39.459
毎日新聞	54.136
読売新聞	42.572
産経新聞	44.716
相関係数を利用した株価予測	正解率 (%)
高い相関性を示したパラメータを利用	63.825

ると[哀しみ]の感情値が多く総合では、学習期間は40807予測期間では23679となっており、他の感情値に比べて圧倒的に多く算出されていることがわかった。これは、感情辞書内の[哀しみ]の感情が含まれる単語の割合が多い彼ではないかと考えられ、実際に感情辞書での感情が含まれる単語の割合でみると実際の解析結果時の割合と概ね同じとなっていた。

また学習期間と予測期間の割合とそれぞれの期間での解析結果は、概ね等しいかった。これは、ニュースサイトで掲載されるニュース記事の量が等しいことが挙げられる。またニュースサイトによって感情値の量が異なるのは、一日に掲載される量の違いであり、より多くのニュース記事が掲載されているからであり、合計で最も掲載量が多かったのは毎日新聞である。

次にニュース記事の感情解析の合計値と日経平均株価の推移のグラフを見ると感情値の推移は、全ての感情値がほぼ同じような変化をしている。これは、一日の記事の掲載量の変化によって変動するからと考えられる。また日経平均株価が急に高くなる期間があるが、感情値の量はそれほど変化していないのがわかる。直接グラフを見ても感情値と日経平均株価の相関性が明確にわかる部分はなかったと言える。

表4での相関係数の結果を見ると、最も高い相関性を示したのも朝日新聞の[喜]である、0.28であった。これは、株価との間にやや相関があると言えるが、強い相関あるとは言えない。これら以外の結果もほとんど相関性があると言えるような結果ではなかった。次に表5の株価予測の結果を見る。なお今回の結果に正解率は、それぞれ1000回の試行回数を繰り返して行った平均の正解率である。感情解析の結果は、ほとんどのニュースサイトが50%を下回る結果となった。しかしながら相関係数の評価が高かった3つのパラメータを用いた株価予測の結果は最も良い結果となった。これにより相関係数が良ければ株価

表3 感情解析の結果

ニュースサイト名	期間	喜	怒	哀	楽	愛	憎	穏
総合	学習期間	21802	12405	40807	23012	15937	6952	6209
	予測期間	12810	7297	23679	13310	8939	3867	3397
朝日新聞	学習期間	5897	3170	10784	6316	4143	1769	1688
	予測期間	3581	1898	6468	3693	2426	1027	893
毎日新聞	学習期間	6488	3778	12267	6731	4839	2095	1800
	予測期間	3809	2183	7152	3908	2603	1172	1007
読売新聞	学習期間	2015	1357	4734	2480	1568	771	666
	予測期間	1222	812	2804	1518	861	389	362
産経新聞	学習期間	7402	4100	13022	7485	5387	2317	2055
	予測期間	4198	2404	7255	4191	3049	1279	1135

予測の結果が良くなることがわかる。今回の結果だけを見れば、関係性があるのではないかと考えられる。しかしながら結果としては、50%を下回っているのでこの原因を探る必要がある。下回ってしまった原因として考えられるのは、まず第一に相関係数が全体的に低かったことが挙げられる。実験から相関係数が高ければ予測結果が良くなることわかる。つまり相関係数をより高まれば株価予測の精度は上がるのではないかと考えられる。相関係数を上げるためには、ニュース記事のカテゴリ分けや感情辞書の変更または、感情値以外の数値化を行う必要があるのではないかと考えられる。相関係数を高めてから再実験を行う必要があると考えられる。

## 7. まとめと今後の課題

本研究では、インターネット上のテキストデータと株価の変動の間に相関性があるのかを調査した。先行研究によってインターネット上のテキストデータと株価の間には何かしらの関係性があると示された。しかしながらこの先行研究は、日本国内の研究ではなくアメリカの研究であり、使用したテキストデータの言語が英語でさらにインターネットの使用目的が異なっているため日本でも同様の結果となるとは言いがたい。実際に日本国内の株価予測の研究でこれほど精度の高い正解率を出せる研究はほとんどない。そこで本研究では、日本国内でのインターネット上のテキストデータに対して感情解析を行い、この感情解析の結果を元に日経平均株価の変動を予測することでを目的として、日本国内でのインターネット上のテキストデータと株価の変動の間に相関性の調査を行った。実際の研究では、日本国内でのニュースサイトのニュース記事をテキストデータとして取得し、ニュース記事に対して感情解析を行い株価予測を行っ

た。この実験の結果、ニュース記事と日経平均株価の推移に明確な関係性があるとは言いがたい結果となったが、最も良い正解率は、相関係数で高い評価を得たパラメータでの株価予測で63.825%となった。このことから相関係数が高ければ株価予測の精度が上がるということがわかった。今後の展望として、株価予測の正解率をより高めるために6章で考察した相関係数を良くする手法を実際に行い再実験を行う必要がある。

## 参考文献

- [1] 佐藤謙太, 小高知宏, 黒岩丈介, 白井治彦, テキスト解析による株価変動予測の試み, 平成26年度電気関係学会北陸支部連合大会, 2014
- [2] Xiao-Jun, Zeng Johan Bollen, Huina Mao, Twitter mood predicts the stock market, *Journal of Computational Science*, pp1-8, (2010)
- [3] Taku Kudo, Kaoru Yamamoto, Yuji Matsumoto, Applying Conditional Random Fields to Japanese Morphological Analysis, *Proceedings of the 2004 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, (2004).
- [4] Francis Bond, Timothy Baldwin, Richard Fothergill, Kiyotaka Uchimoto, Francis Bond and Timothy Baldwin and Richard Fothergill and Kiyotaka Uchimoto, *The 6th International Conference of the Global WordNet Association*, (2012).
- [5] 薄井 彰, 企業評価とファンダメンタル分析, 年報経営分析研究 (17), 2-9, 2001-03-31

## RELAP5 を用いた鉛ビスマス冷却高速原子炉の核・熱連成解析

吉村 紘一\*, Van Rooijen. Willem F.G.\*\*

### Coupled analysis of neutronics and thermal-hydraulics for lead bismuth cooled fast reactor with RELAP5

Koichi YOSHIMURA, Van Rooijen. Willem F.G.\*\*

(Received February 2, 2018)

Nuclear transmutation is a promising option to reduce the amount and lifetime of long-lived nuclear waste. In the present research, the steady state and transient behavior of a Lead-cooled Fast Reactor (LFR) were studied with a multiphysics calculation coupling neutronic and thermalhydraulic analysis. The results show that the LFR system has very good behavior under accident conditions, such as Unprotected Loss of Flow (ULOF).

Key Words : transmutation, lead bismuth cooled , LFR, RELAP5-3D, MA

#### 1. 序論

##### 1.1 背景

使用済燃料は原子力発電所の運転などにもない発生する。使用済燃料の中には燃料として再利用できるPuやUの他、長寿命核種のマイナーアクチノイド(MA:Minor Actinide)や核分裂生成物が含まれて

いる。長寿命核種は地層処分されることが検討されている。高速炉はMAを核分裂反応や中性子捕獲反応の起因による核変換で長寿命核種を短寿命核種にすることで地層処分の負担軽減が期待されている。

MAを添加した燃料を利用する原子炉は従来の原子炉に比べて安全に対する余裕が小さくなる核特性がある。MAを添加した燃料を利用する原子炉は定常運転時や過渡変化時の燃料・冷却材温度や密度変化による核特性の影響を詳細に確認することが必要である。

---

\*原子力・エネルギー安全工学専攻

\*\*付属国際原子力工学研究所

\*Nuclear power and Energy Safety Engineering Course, Graduate School of Engineering

\*\*Research Institute of Nuclear Engineering



1.2 目的

本研究の目的は大型核変換専用鉛ビスマス冷却の高速原子炉(LFR)を対象にRELAP5-3D<sup>[1]</sup>コードを用いて三次元の核と熱の連成解析によって核特性と熱特性の相互作用を詳細に確認する。鉛ビスマス冷却の高速原子炉の定常状態と過渡状態の解析をする。過渡変化時として冷却材流量低下時の流量半減期別の原子炉容器内の事象進展を確認する。MA含有量別の反応度温度計数と冷却材流量低下時の事象進展を確認する。

2. 方法

2.1 対象炉心

対象炉心の800MW級の鉛ビスマス冷却高速原子炉<sup>[2]~[5]</sup>の概念図を図1に示す。鉛ビスマス冷却高速原子炉(LFR)の基本仕様を表1に示す。原子炉容器は炉心部、蒸気発生器4基、主循環ポンプ2基のタンク型システムで構成されている。

Table 1 LFRの基本仕様

項目	仕様
熱出力	800MW
燃料	(Pu+MA) 窒化物
希釈材	Zr窒化物
燃料集合体数	91 体
冷却材	鉛ビスマス
炉心入口冷却材流量	56560 (kg/s)
炉心入口冷却材温度	573.15K

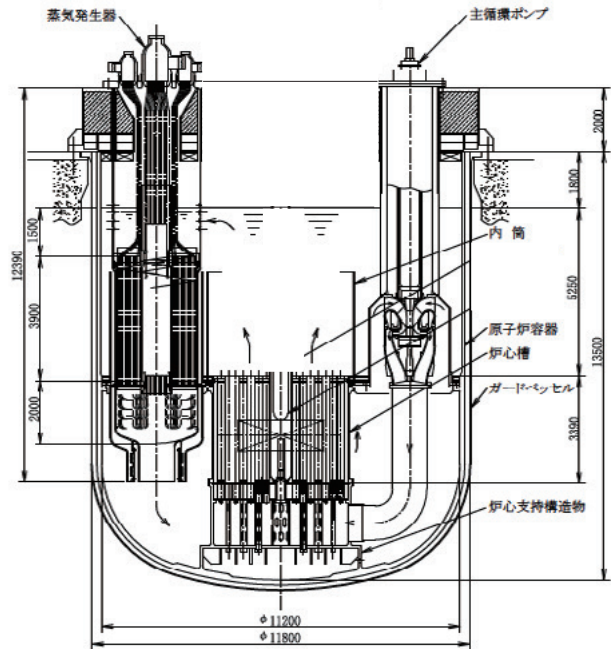


Figure 1 鉛ビスマス冷却高速原子炉の概念図<sup>[2]</sup>

鉛ビスマス冷却高速原子炉の核解析<sup>[6]</sup>の径方向を図2に、軸方向の断面組成図を図3に示す。核解析は中性子のエネルギー領域を4群、1/6 体系で解析をする。燃料割合を表2で解析した。燃料割合は出力分布の平坦化を目的として中性子漏れが少ない内側の燃料領域の富化度を低く中性子漏れが多い外側の富化度を高くした。

Table 2 LFRの平坦化炉心の燃料割合

燃料割合	ZrN	Pu/(Pu+MA)N
燃料領域 1-2	0.6	0.237
燃料領域 3-4	0.6	0.253
燃料領域 5-6	0.6	0.360

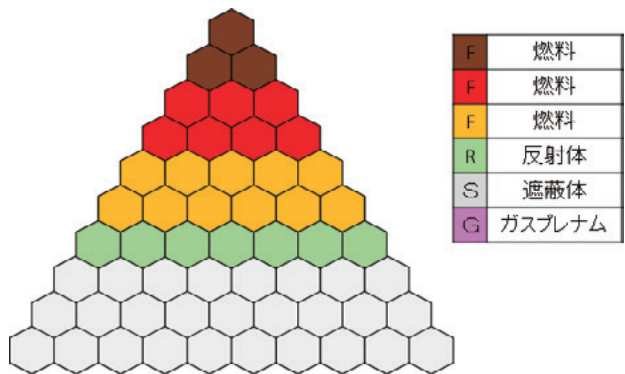


Figure 2 LFRの径方向断面図

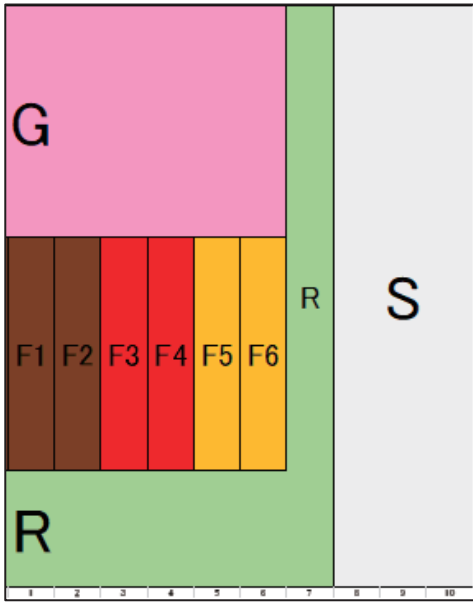


Figure 3 LFRの軸方向断面図

熱水力解析のノード図を図4に示す。熱水力解析は91体の燃料領域を6領域で模擬した。領域1は燃料集合体1体分、領域2は燃料集合体6体分、領域3は燃料集合体12体分、領域4は燃料集合体18体分、領域5は燃料集合体24体分、領域6は燃料集合体30体分を模擬した。遮蔽材領域は流路面積が大きく摩擦が少なく冷却材流量が過大に流入するため燃料領域の流量が減少する。燃料領域に除熱に必要な燃料集合体あたり610kg/sの冷却材流量を確保するため遮蔽材入口に損失係数を加えた。4基の蒸気発生器をAとBの2基で模擬した。蒸気発生器Aは蒸気発生器1基を蒸気発生器Bは蒸気発生器3基を模擬した。

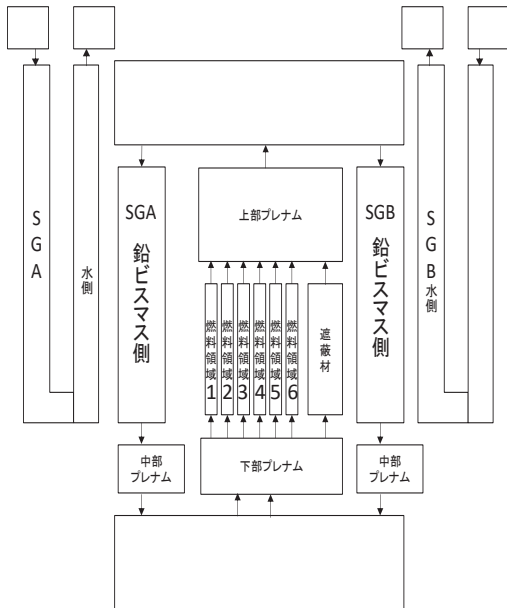


Figure 4 LFRのノード図

## 2.2 計算コード

本研究ではRELAP5-3Dコードを用いて鉛ビスマス冷却高速原子炉を対象に解析する。

RELAP5-3Dコードは全断面積・基本仕様を整備することで三次元の拡散理論を用いて中性子束分布, 実効増倍率等の詳細な解析が可能である。高速炉心解析コードERANOSは物質組成・集合体の基本仕様から全断面積, 中性子束分布, 実効増倍率の解析ができる。ERANOSで計算した全断面積の切片と温度・密度に対する傾きを用いてRELAP5-3Dコードは各断面積と拡散係数の熱構造物(燃料・被覆管)と冷却材の温度変化と冷却材の密度変化を伴う出力分布と温度分布の相互作用を含めた解析をする。

## 3. LFRの定常状態結果・考察

### 【出力分布】

径方向の出力分布を図5に示す。

径方向出力分布は外側の富化度を高く, 内側の富化度を低くしたため出力分布が平坦化した。燃料領域5の出力が最も高く集合体あたり9.8MWで, 最高値と平均値の比である径方向のピーキング係数は1.11であった。軸方向の出力分布は燃料領域中心部の中性子漏れが少ない領域の燃料領域下部から0.55mの出力が高く, 燃料領域下部と上部の中性子漏れが多い領域の出力が低かった。

### 【燃料・被覆管温度分布】

燃料中心温度分布を図6に被覆管温度分布を図7に示す。

燃料中心温度は出力が高い燃料領域ほど高い。各燃料領域内では軸方向の出力が最も高い燃料下部から0.55mが最高温度であった。出力が最も高い燃料領域5の燃料下部から0.55mの燃料中心温度は1512.3Kであった。最高燃料中心温度の1512.3Kは解離挙動を開始する温度2173Kに比べて661K余裕が大きい。

被覆管温度は出力が高い燃料領域ほど高い。各燃料領域内では冷却材温度の影響を受けるため燃料下

部から 0.75m が最高温度である。出力が最も高い燃料領域 5 の燃料下部から 0.75m の被覆管温度は 748.6K であった。最高被覆管温度の 748.6K は被覆管腐食量のための制限値 823K に比べて 74K 余裕が大きい。

【冷却材温度分布】

燃料集合体の冷却材温度分布を図 8 に示す。

冷却材の鉛ビスマスは燃料集合体下部から 573.15K 程度の温度で入ってくる。冷却材は燃料集合体下部から 1.35m~2.35m の燃料領域で各領域の出力に比例し温度上昇する。燃料領域と遮蔽材領域が混合した集合体の冷却材出口温度は 660.7K であった。

【冷却材流量】

炉心入口の鉛ビスマスの全冷却材流量は 56560kg/s である。冷却材は燃料集合体あたり燃料領域 1 で 610.4kg/s, 燃料領域 2 で 610.4kg/s, 燃料領域 3 で 610.5kg/s, 燃料領域 4 で 610.3kg/s, 燃料領域 5 で 610.8kg/s, 燃料領域 6 で 608.9kg/s であった。遮蔽材領域は 1036.9 kg/s であった。蒸気発生器の冷却材流量は蒸気発生器 A に 14153.0 kg/s, 蒸気発生器 B に 42388.0 kg/s であった。蒸気発生器 A は蒸気発生器 1 基, 蒸気発生器 B は蒸気発生器 3 基を模擬しているため流量は 1:3 程度に配分された。

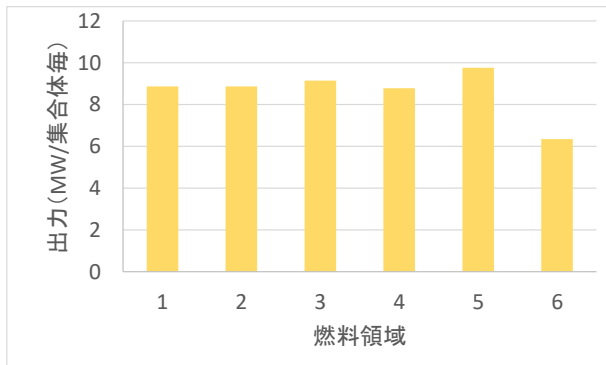


Figure 5 径方向の出力分布

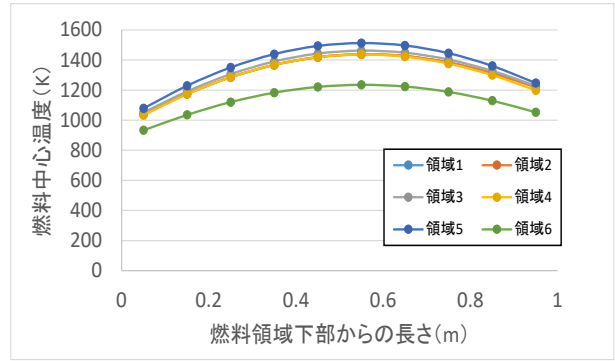


Figure 6 燃料中心温度分布

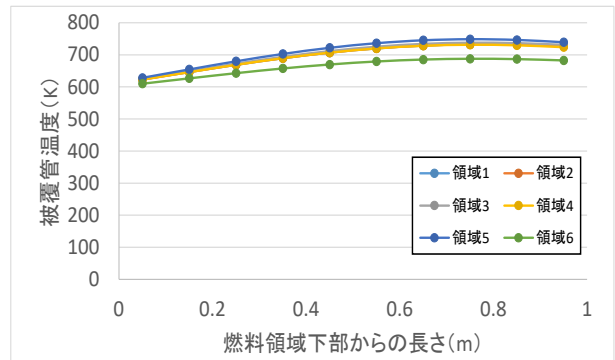


Figure 7 被覆管温度分布

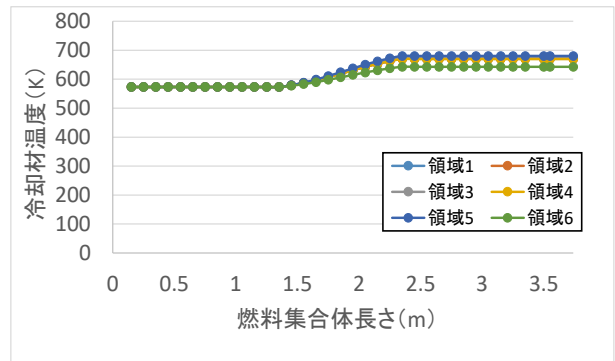


Figure 8 燃料集合体冷却材温度分布

4. LFRの一次系・二次系流量低下事故時の流量半減期別の影響

4.1 解析条件

鉛ビスマス冷却高速原子炉を対象とした前章の定常状態を初期条件にトリップ不動作で主循環ポンプ停止と主給水ポンプ停止に伴う一次系・二次系流量低下を模擬した事故解析をした。一次系・二次系流量低下事故は従来のナトリウム冷却高速炉では流量低下に伴いナトリウムが沸騰し核分裂出力により炉

心溶融に至る事象とされている。本研究の対象の原子炉の冷却材は鉛ビスマスでありナトリウムに比べて沸点が高く 1943K である。鉛ビスマスの高い沸点が流量低下時の冷却材温度上昇に伴う核分裂出力の影響を確認するためトリップ不作動で解析した。

一次系・二次系流量低下事故の解析条件を表 3 に示す。一次系流量低下として主循環ポンプ全 2 基停止、二次系流量低下として主給水ポンプ全 4 基停止を想定した。原子炉容器内の停止箇所を図 9 に示す。主循環ポンプ停止時の一次系流量は流量半減期を 10 秒と 120 秒の二種類で解析した。・主給水ポンプ停止時の二次系流量は流量半減期を 10 秒とした。補助給水系作動を想定し流量低下の下限を定常時の 10%とした。

Table 3 一次系・二次系流量低下事故の解析条件

項目	条件
解析コード	RELAP5-3D
対象炉心	高速原子炉
起因事象	一次系・二次系流量低下
初期条件	前章の定常状態
主給水ポンプ	4 基不作動
主循環ポンプ	2 基不作動
原子炉トリップ	不作動

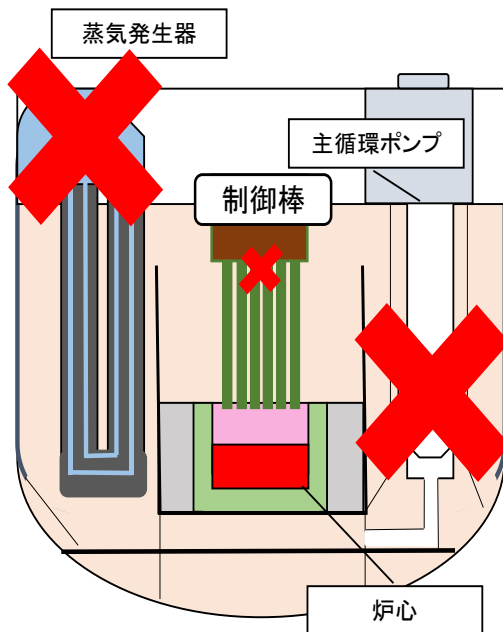


Figure 9 一次系・二次系流量低下時の停止箇所

## 4.2 流量半減期別の解析結果・考察

### 【一次系・二次系流量】

炉心入口の全冷却材流量を図 10 に示す。

炉心入口の全冷却材流量は事象発生に伴って定常時の 56560kg/s から事象発生後、流量半減期 10 秒時が 66 秒に、流量半減期 120 秒時が 800 秒に 565.6 kg/s 程度に低下した。事象後の蒸気発生器水側の入口流量は流量半減期 10 秒時、120 秒時共に A 基が 217.4 kg/s から 66 秒後に 21.7 kg/s 程度に、B 基が 652.3 kg/s から 66 秒後に 65.2 kg/s 程度に低下した。

### 【燃料・被覆管温度】

出力が最も高い燃料領域 5 の最上部被覆管温度を図 11 に、燃料領域中部の燃料中心温度を図 12 に示す。

流量半減期 10 秒時の被覆管温度は一次系流量低下に伴い 78 秒で 980.0K に上昇した。流量低下時に伴う被覆管最高温度の 980.0K は従来の原子炉の被覆管の安全評価指針で定められている 1473K 以下である。炉心温度上昇で負の反応度と流量低下による除熱量増加で炉心入口冷却材温度低下に伴う正の反応度によって 1200 秒で 719.5K に低下し安定した。

流量半減期 120 秒時の被覆管温度は一次系流量低下に伴い 54 秒で 752.5K に上昇した。流量低下時に伴う被覆管最高温度の 752.5K は従来の原子炉の被覆管の安全評価指針で定められている 1473K 以下である。炉心温度上昇で負の反応度による出力低下に伴って 432 秒で 654.4K に低下した。炉心入口温度低下で炉心温度低下が低下し出力上昇に伴って 1800 秒に 734.1K 程度に上昇し安定した。

燃料中心温度は流量低下に伴う出力低下によって低下した。炉心温度低下による出力上昇に伴って 1200 秒で流量半減期 10 秒時が 731.9K に、流量半減期 120 秒時が 719.0K に低下し安定した。燃料中心温度は定常状態時を上回ることなく損傷なく事象は収束した。

### 【冷却材温度】

燃料領域 5 の炉心出口冷却材温度を図 13 に炉心入口冷却材温度を図 14 に示す。

流量半減期 10 秒時の炉心出口冷却材温度は流量低下で 94 秒に 961.3K に上昇した。炉心温度上昇で負の反応度による出力低下と流量低下による除熱量増加で炉心入口冷却材温度低下に伴って 1200 秒で 708.3K に低下し安定した。

流量半減期 120 秒時の炉心出口冷却材温度は流量低下で 66 秒に燃料領域 5 が最も高く 709.8K に上昇した。炉心温度上昇で負の反応度による出力低下に伴って 440 秒で 646.2K に低下した。炉心温度低下が低下による出力上昇に伴って 1800 秒で 710.1K に上昇し安定した。

流量半減期 10 秒時の炉心入口冷却材温度は 573.3K から流量低下による除熱量増加によって 1200 秒で 521.9K に低下し安定した。

流量半減期 120 秒時の炉心入口冷却材温度は二次系流量低下による除熱量低下によって 166 秒で一時的に 656.6K に上昇した。二次系流量の低下の最大下限値は 10 % である。炉心出力は 10 % 以下になると除熱量が増加し冷却材温度が低下する。炉心入口冷却材温度は 1800 秒には 521.0K に低下し安定した。

### 【出力】

炉心出力を図 15 に示す。

流量半減期 10 秒時の全炉心出力は流量低下に伴い炉心温度の上昇による負の反応度で全出力が事象発生後 448 秒に 4.7 % に低下した。

流量半減期 120 秒時の全炉心出力は流量低下に伴い炉心温度の上昇による負の反応度で事象発生後 389 秒には 5.64 % に低下した。

### 【流量半減期 10 秒と 120 秒の比較】

流量半減期が短い流量半減期 10 秒時の被覆管温度上昇のピークは流量半減期 120 秒の 752.5K に比べて 224.6K 高く 977.1K で、炉心出口の冷却材温度のピークは流量半減期 120 秒の 709.8K に比べて 251.5K 高く 961.3K であった。温度上昇

による流量半減期 10 秒時の出力低下は 53 秒に 20 %、105 秒に 10 % に低下し、流量半減期 120 秒の出力低下は 133 秒に 20 %、210 秒に 10 % に低下した。流量半減期 10 秒は流量半減期が短いため温度上昇が高くなる。また、温度上昇が高くなると負のフィードバックが大きくなるため出力低下が早くなった。

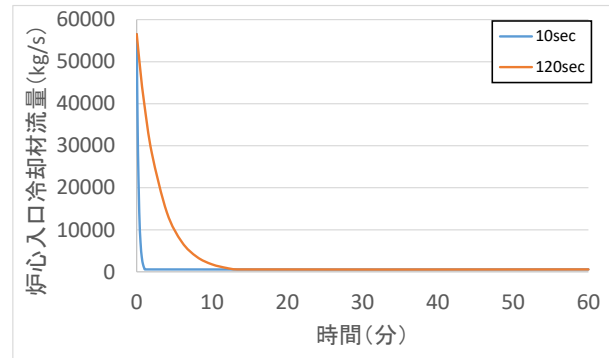


Figure 10 炉心入口冷却材流量

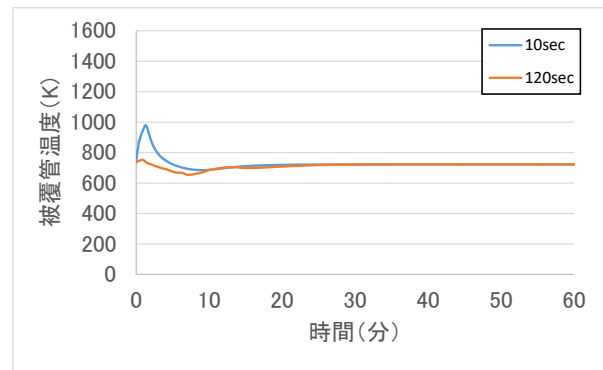


Figure 11 燃料領域 5 の最上部被覆管温度

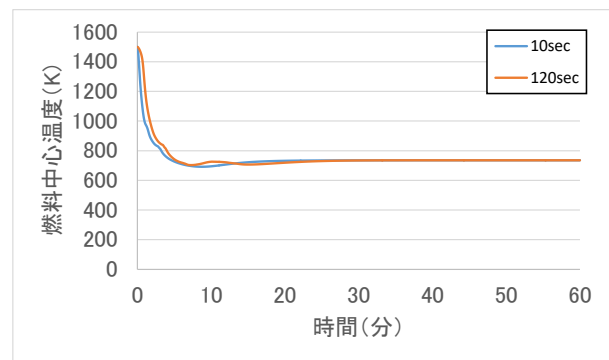


Figure 12 燃料領域 5 の中部燃料中心温度

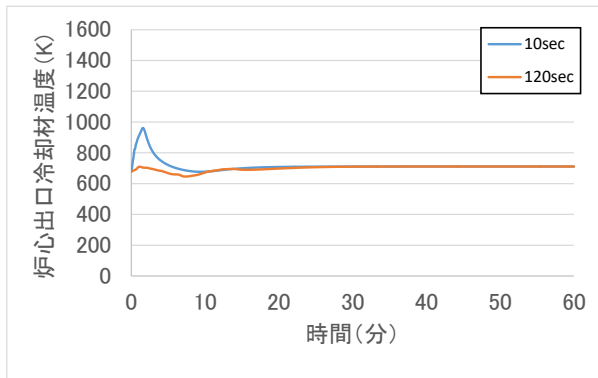


Figure 13 燃料領域5の冷却材出口温度

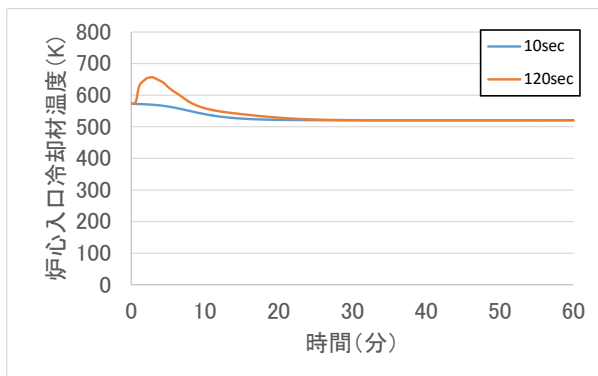


Figure 14 炉心入口冷却材温度

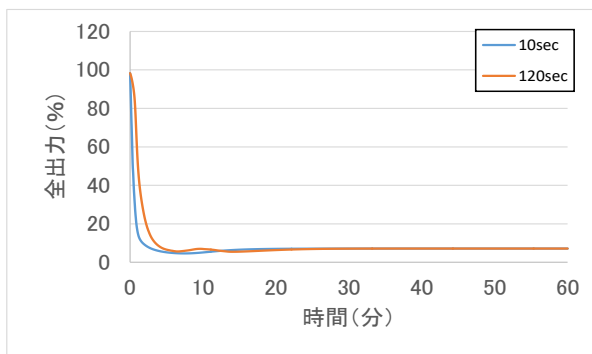


Figure 15 炉心全出力

## 5. LFRの一次系・二次系流量低下事故時のMA含有量別の影響

### 5.1 解析条件

前章の高速原子炉を対象とした一次系・二次系流量低下事故と同様の解析条件の流量半減期10秒で燃料割合のみ変更し事故解析をした.3種類のMA含有量別の燃料割合を表に示す.3種類のMA含有量別の温度係数を確認し事故時の事象進展の差を比較した.

Table 4 MA含有量別の燃料割合

領域	MAN	PuN
燃料領域 1-2	0.05	0.105
燃料領域 3-4	0.10	0.130
燃料領域 5-6	0.20	0.150

### 5.2 MA含有量別の解析結果・考察

#### 【炉心温度係数】

MA含有量別の温度係数を図16に示す.

温度変化に対して中性子の増倍の作用を表す反応度温度係数には冷却材密度変化と燃料温度変化が含まれている.反応度温度係数はMAが5.0%の燃料を利用する原子炉が $-1.126 \times 10^{-5} dk/kK$ で,MA10.0%が $-1.066 \times 10^{-5} dk/kK$ で,MA20.0%が $-9.459 \times 10^{-6} dk/kK$ であった.MA含有量が増加すると負の反応度温度係数が小さくなる.

#### 【一次系・二次系流量】

炉心入口の全冷却材流量を図17に示す.

炉心入口の全冷却材流量は事象発生に伴って定常時の56560 kg/sから66秒後に565.6 kg/s程度に低下した.蒸気発生器水側の入口流量はA基が217.4 kg/sから66秒後に21.7 kg/s程度に,B基が652.3 kg/sから66秒後に65.2 kg/s程度に低下した.

#### 【燃料・被覆管温度】

MA含有量別の出力が最も高い領域5の燃料領域最上部の被覆管温度を図18に示す.

被覆管温度は一次系流量低下に伴い事象発生後82秒にMA含有量が5.0%の時に939.3Kまで,MA含有量が10.0%の時に953.4Kまで,MA含有量が20.0%の時に979.0Kまで上昇した.炉心温度上昇で負の反応度による出力低下と流量低下による除熱量増加で炉心入口冷却材温度低下に伴って被覆管温度は事象後1200秒にはMA含有量が5.0%の時に727.1K程度,MA含有量が10.0%の時に726.2K程度,MA含有量が20.0%の時に725.5K程度に低下し安定した.

MA 含有量 5.0%に対する燃料領域 5 被覆管温度の差を図 19 に示す。

MA 含有量 5.0%に対する MA 含有量別の差は流量低下時の被覆管温度上昇時に含有量が増加するほど負の反応度温度係数が小さいため核分裂による出力低下が遅く被覆管温度上昇時に大きい。上昇のピークの 82 秒時点での含有量 5.0%に対する差は含有量 10.0%で 1.5%、含有量 20.0%で 4.2%になる。核分裂による出力低下し出力が崩壊熱中心になると MA 含有量別の差が小さくなる。

MA 含有量別の出力が最も高い領域の燃料領域中部の燃料中心温度を図 20 に示す。

燃料中心温度は流量低下に伴う出力低下によって低下した。燃料中心温度は被覆管温度がピーク値の事象発生後 82 秒に MA 含有量が 5.0% の時に 924.6K で、MA 含有量が 10.0% の時に 937.5K で、MA 含有量が 20.0% の時に 962.7K まで低下した。燃料中心温度は事象後 1200 秒には MA 含有量が 5.0%の時に 747.6K 程度、MA 含有量が 10.0%の時に 747.0K 程度、MA 含有量が 20.0% の時に 748.4K 程度に低下し安定した。

#### 【冷却材温度】

燃料領域 5 の炉心出口冷却材温度を図 21 に炉心入口冷却材温度を図 22 に示す。

炉心出口の冷却材温度は流量低下で事象発生後 97 秒に MA 含有量が 5.0% の時に 919.2K まで、MA 含有量が 10.0% の時に 933.2K まで、MA 含有量が 20.0% の時に 958.7K まで上昇した。1200 秒には MA 含有量が 5.0% の時に 712.9K 程度、MA 含有量が 10.0% の時に 712.5K 程度、MA 含有量が 20.0% の時に 712.4K 程度に低下し安定した。炉心入口冷却材温度は MA 含有量に関わらず流量低下による除熱量増加によって 573.3K から事象後 1200 秒で 521.9K 程度に低下し安定した。

#### 【出力】

炉心の全出力を図 23 に示す。

全炉心出力は流量低下に伴い炉心温度の上昇による負の反応度で低下した。全炉心出力は被覆管温度がピーク値の事象発生後 82 秒を比較すると MA 含有量が 5.0% の時に 10.6% で、MA 含有量が 10.0% の時に 11.0% で、MA 含有量が 20.0% の時に 11.7% まで低下した。

#### 【MA 含有量別の比較】

MA 含有量が多い燃料ほど流量低下時の被覆管温度上昇のピークと燃料中心温度は負の温度係数が小さくなるため出力低下が遅く温度が高くなった。被覆管温度の MA 含有量が 20.0% の時の温度上昇のピークは含有量が 5.0% の時と比較し 39.7K 高く、含有量が 10.0%の時と比較し 25.6K 高い。炉心出口冷却材温度は MA 含有量が 20.0% の時の温度上昇のピークは含有量が 5.0%の時と比較し 39.5K 高く、含有量が 10.0% の時と比較し 25.5K 高い。MA 含有量が多い燃料ほど流量低下時の炉心出口冷却材温度上昇のピークは負の温度係数が小さくなるため出力低下が遅く温度が高くなった。炉心出力は MA 含有量が多い燃料ほど負の温度係数が小さくなるため出力低下が遅い。

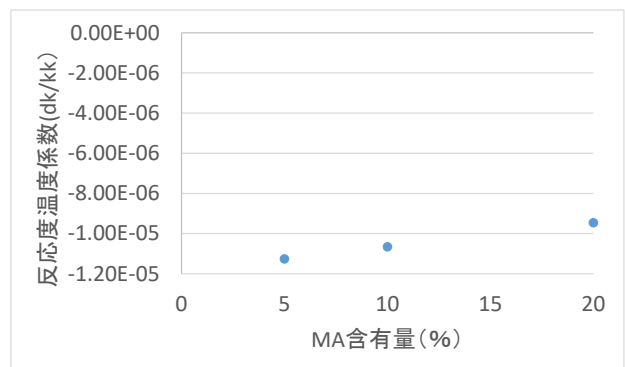


Figure 16 反応度温度係数

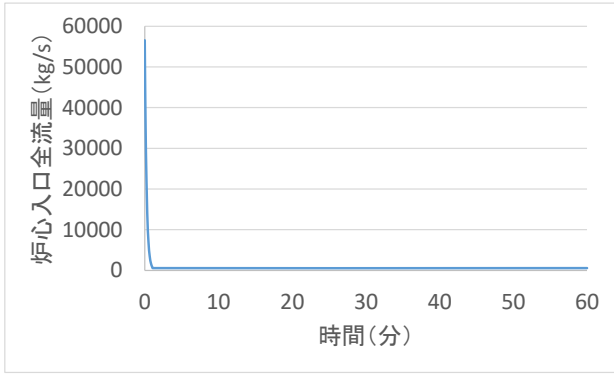


Figure 17 炉心入口冷却材流量

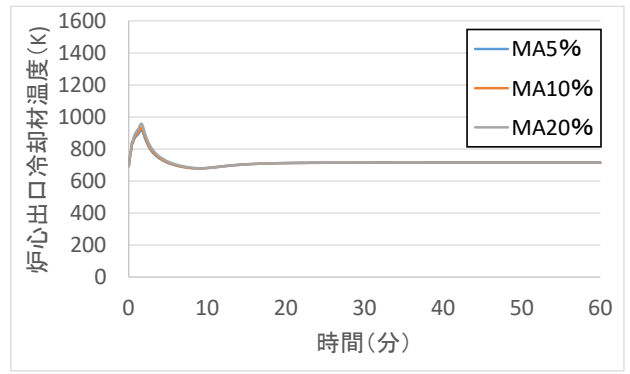


Figure 21 燃料領域5の炉心出口温度

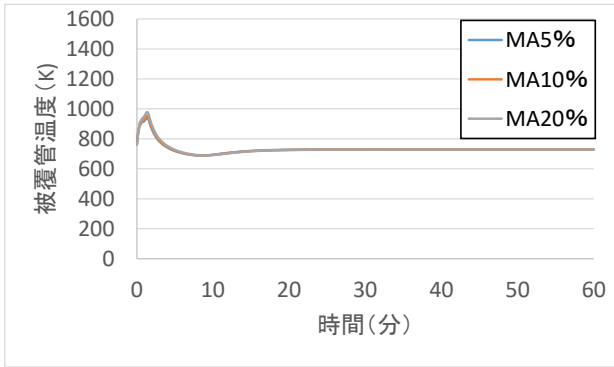


Figure 18 燃料領域5の被覆管温度

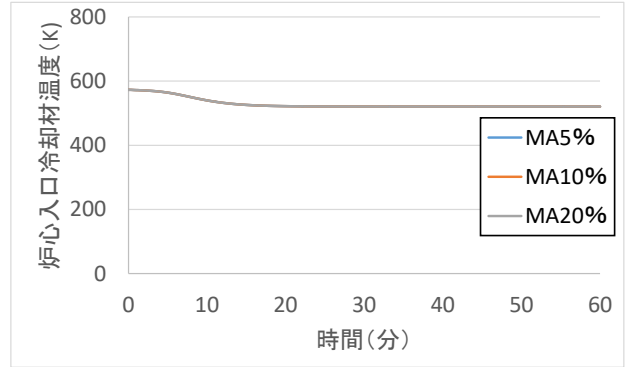


Figure 22 炉心入口温度

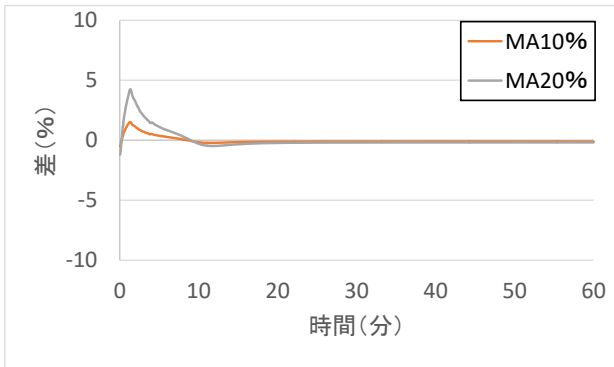


Figure 19 MAN含有量5.0%に対する燃料領域5被覆管温度の差

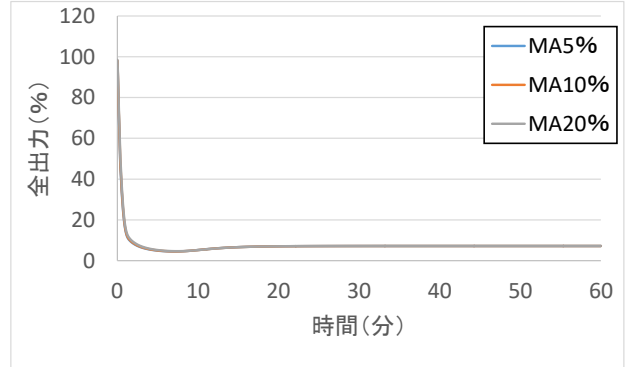


Figure 23 炉心全出力

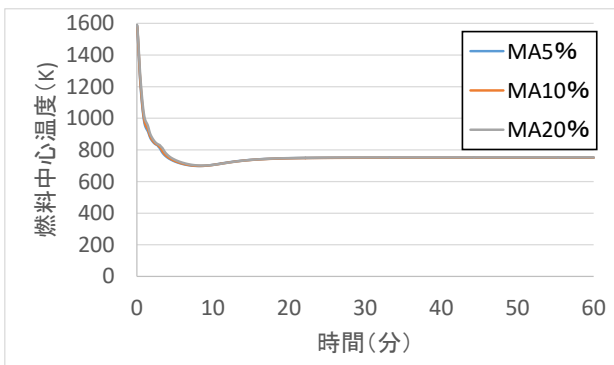


Figure 20 燃料領域5の燃料中心温度



## 6. 結 論

RELAP5-3D コードを用いて大型核変換専用鉛ビスマス冷却の高速原子炉 (LFR)を対象に核計算と熱水力計算の連成解析によって炉心部分の拡散係数,核分裂断面積,吸収断面積や散乱断面積の被覆管燃料温度や冷却材密度の変化に伴う核特性と熱特性の相互作用を含めた定常状態と過渡状態の解析をした.

LFR の過渡状態の解析では一次系・二次系流量低下事故時の 2 種類の一次系流量低下半減期の各パラメータの事象進展を確認した.流量半減期が長いほど流量低下時の被覆管・冷却材温度上昇のピークが低いため,主循環ポンプ停止に伴う事故時では流量半減期の設計によって炉心温度の上昇を抑えることができることを確認した.

MA 含有量別の反応度温度計数を比較し,一次系・二次系流量低下事故の各パラメータの事象進展を確認した.MA 含有別の事故時の事象進展の差を比較し,含有量が多いほど負の反応度が小さいため出力低下が緩やかで温度上昇のピークが高いことを確認した.

## 7. 謝 辞

本研究では, 日常の議論を通じて多くの修士論文の研究について知識や示唆を頂戴いたしました Rooijen 研究室の学生に深く感謝致します.

## 8. 参考文献

[1] The RELAP5-3D Code Development Team ,RELAP5-3D CODE MANUAL VOLUME II :USER' GUIDE AND INPUT REQUIREMENTS ,Original Manuscript Completed:February 1999 Revision 4.3 Completed:October 2015

[2] 辻本和文, 西原健司, 武居早憲, 菅原隆徳, 倉田有司, 斎藤滋, 大林寛生, 佐々敏信, 菊地 賢司, 手塚正雄, 大井川宏之 “鉛ビスマス冷却加速器駆動システ

ムを用いた核変換技術の成立性検討” JAEA-Research 2010-012 (july 2010)

[3] 秋本肇 “鉛ビスマス冷却加速器駆動核変換システム用熱設計解析コードの整備” JAEA-Data/Code 2014-031 (march 2015)

[4] 秋本肇,菅原隆徳 “鉛ビスマス冷却加速器駆動システムの熱設計 (1)定格運転条件に対する熱流動解析” JAEA-Data/Code 2016-008(September 2016)

[5] T. NISHI, M. TAKANO, K. ICHISE, M. AKABORI, and Y. ARAI: “Thermal Conductivities of Zr-based Transuranium Nitride Solid Solution” Nuclear Science and Technology, 48, p359–365 (2011)

[6] 菅原隆徳,平井康志,西原健司,岩元大樹, O. SAMBUU,牛尾直史 “加速器駆動核変換システム用三次元炉心解析コード ADS3Dの整備” JAEA-Data/Code 2014-024 (February 2015)

[7] T. SUGAWARA, K. NISHIHARA and K. TSUJIMOTO “Transient analyses for lead-bismuth cooled accelerator-driven system” Annals of Nuclear Energy, 55, p238-247(2013)

## プログラミング初学者用学習支援 Web システム ECLAT の実装と評価

高原 渉\* 小高 知宏\* 黒岩 丈介\*\* 諏訪 いずみ\*\*\* 白井 治彦\*\*\*\*

### Implementation and Evaluation of The Programming Environment ECLAT for Novices

Wataru TAKAHARA\*, Tomohiro ODAKA\*, Jousuke KUROIWA\*\*,  
Izumi SUWA\*\* and Haruhiko SHIRAI\*\*\*

(Received February 2, 2018)

In this paper, we developed programming environment using web system. Programming education are necessary to introduce an editor and a compiler to perform C language program learning. There are cases where complicated operations are required when executing. Therefore, we developed the system "ECLAT" for improving the efficiency of these tasks.

In this system, students can learn programming using the web browser. Our system does not need to introduce editor and compiler. and thus students can learn instantly. Also, our system is compatible with both PC and smartphone, many students can use it.

In order to evaluate the system, we experimented by conducting programming education for students using our system. . As a result, we confirmed that our system can support programming education.

**Key words :** Web system, Programming environment, Learning support system

#### 1. はじめに

現代では高度な情報化社会が進んでおり、実用的な情報教育において基本的な技能のひとつであるプログラミング能力の獲得が必要になってきている<sup>[1]</sup>。大学において、多くの学生は大抵の場合プログラミング初心者である。プログラミング初学者に対して、プログラムの動作について理解させることはとても難しい<sup>[2]</sup>。プログラミング初学者である学生に対して、教員がそれぞれの学生に丁寧な指導を行うとい

う方法は望ましいと考えられる。しかし、プログラミング演習における教員や TA (ティーチングアシスタント) の数および演習の時間的な制限によって、学生全員に対して丁寧な対応ができない場合も出てくる。そのため、学生の中ではプログラミングについて分からない点や疑問点が放置されるようになってしまい、学習速度に遅れが出てしまう場合がある。<sup>[3]</sup>

またプログラミング演習における事前準備として、エディタやコンパイラ等のインストールといったプログラミングに必要な環境を構築しなければならない。その上プログラムの実行方法についてもターミナルのコマンド入力を用いた複雑な方法で行う場合があり、プログラミング本来の学習以外の事に気を取られてしまい授業の効率が悪くなってしまうと考えられる。

これらの問題を解決するためには、プログラミング初学者を支援するためのシステムが必要となる。プログラミング演習における準備や学習に必要な操作

\* 大学院工学研究科 原子力・エネルギー安全工学専攻

\*\* 大学院工学研究科 知能システム工学専攻

\*\*\* 工学部技術部

\* Nuclear Power and Energy Safety Engineering Course,  
Graduate School of Engineering

\*\* Human and Artificial Intelligence Systems Course,  
Graduate School of Engineering

\*\*\* Technical Division

が複雑であるという問題について、それらをできるだけ簡略化するシステムが必要である。

そこで、本研究では「ECLAT」という手軽にプログラムを実行可能な Web システムの設計、実装を行った。ECLAT は Web ブラウザ上で動作するため、特別なソフトウェアのインストールや設定の必要がないように設計されている。そのためスムーズに学習を行うことが可能となると期待できる。

本研究では、ECLAT を用いたプログラミング演習を大学 1 年次生を対象に行い、学生を対象にアンケートを集計しシステム評価を行った。また、プログラミングツールとして適切な速度で応答するかどうかを検証するため、システムのターンアラウンドタイムの測定を行った。それらの結果を分析することで、スムーズなプログラミング学習が可能であるかどうかを検証する。

## 2. 既存のシステムの問題点と解決法

Web ブラウザ上でプログラムを実行することができるサービスとして、「ideone<sup>[4]</sup>」や「codepad<sup>[5]</sup>」といったシステムが挙げられる。これらのシステムは入力されたソースコードをコンパイルし実行結果を表示する機能を持つが、図 1 に示すようにプログラムの実行前に標準入力に指定する文字列をあらかじめ入力しなければならないというバッチ処理的な入出力といった仕様を持っている。すなわち、通常のプログラミングの入出力では「あなた名前はなんですか?」という出力を確認してから、標準入力に自分の名前を入力するという対話的な入出力を行うが、これらのシステムでは名前を入力するための問いが出力されることを見越して、既に入力を終えてなければならない。また条件分岐や繰り返し処理によって入力が要求される内容や回数が学習者の入力によって変わるプログラムを実装した場合、事前に標準入力を指定する方法において達成できず、直感的な入出力ができない場合が考えられる。

そのため、ideone や codepad では入出力に関してプログラミング初学者が直感的に学習の上では不向きであると考えられる。よって本研究では、初学者が直感的にプログラミング学習を可能とする環境の構築を目標に、対話的な入出力を実現するシステムや実行結果からソースコードへフィードバックしやすいシステムの開発を行った。

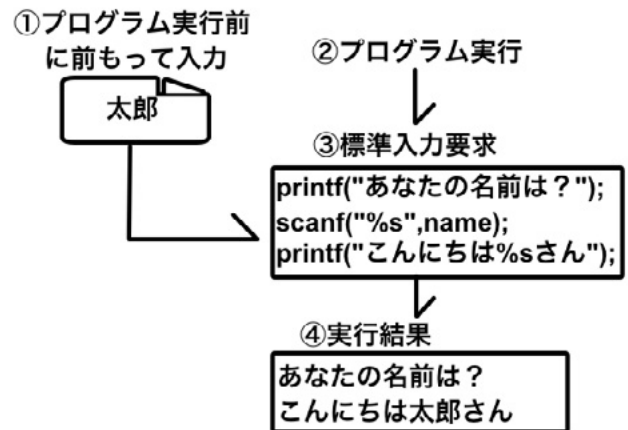


図 1 バッチ処理的な入出力

## 3. C 言語学習 Web アプリケーション「ECLAT」

ECLAT は、Web ブラウザ上で実行可能な C 言語プログラミング学習アプリケーションである。簡単な操作でプログラミング学習を行う事ができ、コンソール上で実行する場合と同じような対話的な入出力を行うことが可能である。プログラミングを行うために必要な環境の構築や複雑な操作を取り除くことで、スムーズな学習の実現を目的としている。また、PC とスマートフォンの両方に対応しているため、多くの学生が利用することができる。

### 3.1 システム構成

ECLAT のシステムは、クライアント側でソースコードの記述や実行結果などの表示、サーバ側でコンパイルやプログラムの実行などの処理を行う。ユーザがプログラムを記述し、実行するまでの流れを図 2 に示す。プログラムの記述を終えたら、プログラムを実行するためにソースコードの内容をサーバに送信する。次に受け取ったデータからファイルを作成し、コンパイルが成功した場合プログラムをサーバ側で実行する。実行中、C 言語における scanf 関数といった標準入力の要求を検知した場合、クライアント側に対して入力要求を行う。全ての処理が完了したら終了処理を行い、クライアント側に実行結果を表示する。またコンパイルに失敗した場合、エラーの内容をクライアント側に送信し、実行できないことを示す。

### 3.2 システム実装

クライアント側のシステムは主にプログラムの記述と実行結果の表示機能を持っており、HTML、

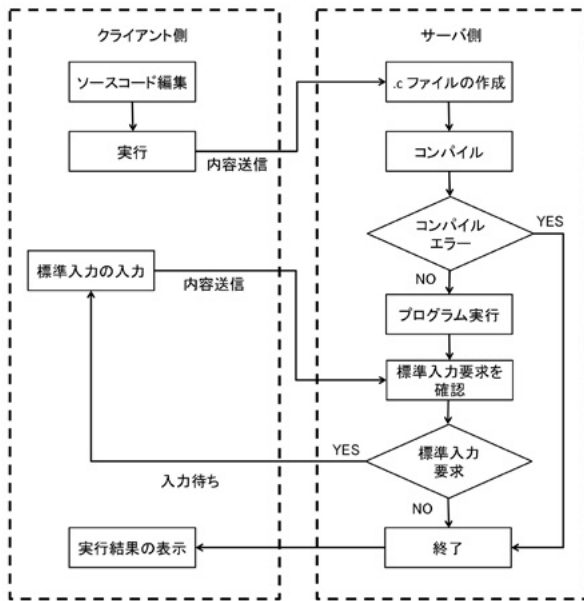


図2 ECLAT のクライアント側とサーバ側の処理

javascript、jQuery を用いて実装されている。またサーバ側ではプログラムのコンパイルや実行を行う機能を持っており、PHP を用いて実装されている。ECLAT の特徴として、C 言語における scanf 関数といった標準入力を利用するプログラムを実行した場合、コンソール上で実行する挙動とほぼ同じ働きをする対話的な入出力が可能となっている。

利用可能なプラットフォームとして、PC やスマートフォンなど Web ブラウザを扱えるほとんどの端末をサポートしている。ページを表示するためのスタイルは PC 版とスマートフォン版でそれぞれ最適化されており、利用しやすいように設計した。

### 3.2.1 画面設計

図3に、ECLAT のページにアクセスした際に表示される画面を示す。主要要素はソースコード記述部、入出力関連表示部、実行ボタン、入力確定ボタン、戻るボタン・進むボタンとなっており、この一画面の中にプログラムの記述や、実行、実行結果の表示といった基礎的な C 言語プログラムが可能であるように設計されている。

- ソースコード記述部

ユーザーがソースコードを記述するテキストエリアである。本システムの仕様上、強制的にインクルードされるヘッダファイルはソースコード記述部の上に記載されている。コンパイルエラーを検知した場合、エラーが起こっている行の

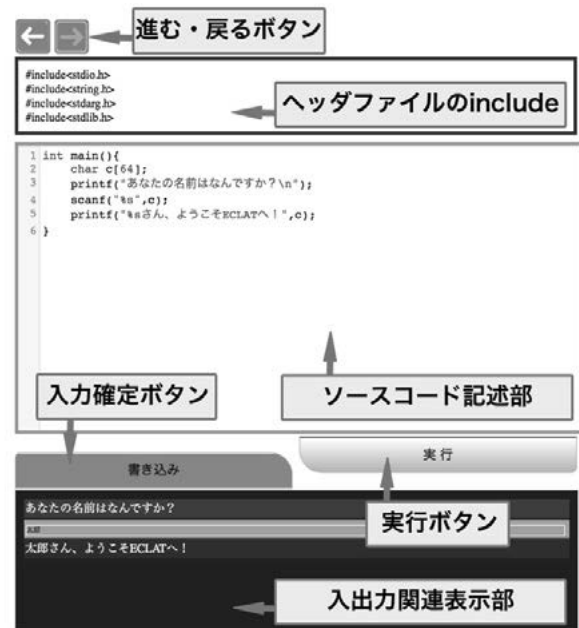


図3 ECLAT の画面説明

箇所を、赤く強調する機能を持つ。図4に、コンパイルエラーが発生するソースコードを記述し、ECLAT で実行した際に表示される例を示す。この図の上部に示すプログラムは、整数型 a を宣言しているが、誤って宣言していない b という変数を呼び出している。このプログラムをサーバ側でコンパイルすると、図4の下部に示すように、コンパイルエラーのログが出力される。図中の矢印で示されているように、この出力の中にはエラーが発生している箇所である行番号が示される。本システムでは、コンパイラが示すエラーが発生している行番号とユーザーの記述するエディタの行番号と関連付けて強調する機能を持つ。この機能により、ユーザーはエラーの箇所を素速く特定することができ、よりスムーズな学習に取り組むことができると考えられる。

また、ソースコードを編集するエディタ部には CodeMirror と呼ばれるプログラムの記述をサポートする様々な機能を持つ Javascript コンポーネントを用いている。本システムで導入している CodeMirror の機能については、次の節で説明する。

- 入出力関連表示部

プログラム実行後、実行結果の標準出力や例外出力、コンパイルエラーの内容を示すエリアである。出力される文字列は一行ずつ最下部に一定間隔で挿入され、一定以上出力されると古

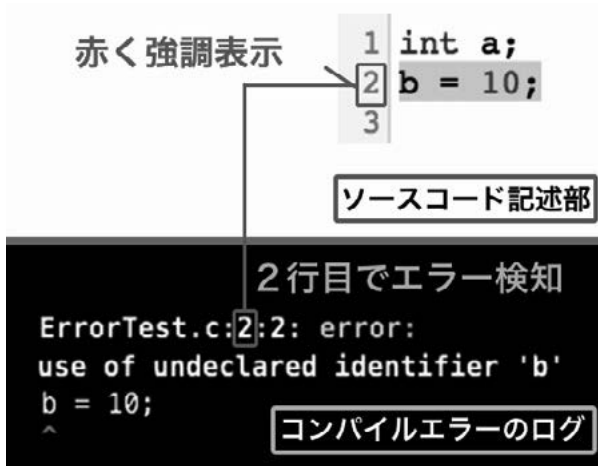


図4 エラー行の強調

い出力データは上部へと隠れるようになっている。隠れたデータはスクロールすることによって確認することができる。

標準入力を用いる場合（scanf関数の使用時）、それまでの標準出力が完了した後、入力欄が挿入される。入力欄に文字列を入力した後、「入力確定ボタン」もしくはEnterキーを押下することで、次の処理に進むことができる。

- 実行ボタン

ソースコードの記述を終えたら、このボタンを押すことでソースコード記述部の内容をサーバに送信し、実行結果を表示する。実行の開始から実行結果の表示まである程度の時間が必要となる。したがって連続でこのボタンを押すことで、プログラムの実行中に繰り返しサーバに対して実行要求を行ってしまうため、負荷がかかってしまう危険性が考えられる。そこで、サーバにデータを送信し、サーバから実行結果を受け取るまでは、このボタンを無効化し、押せなくなるように実装した。

- 入力確定ボタン

プログラムの実行中、標準入力の要求が発生した場合、実行結果表示部に入力欄が挿入される。ユーザはここに文字列を入力したのち、この入力確定ボタンを押すことでサーバに入力情報を送信することができる。入力確定ボタンの他に、キーボード上の「Enterキー」でも同様の処理を実行することができる。また、標準入力の要求がされていない状態の場合は押せないように無効化している。

- 戻るボタン・進むボタン

CodeMirrorのコードエディタの機能を用いることで、ソースコード記述部の書き込み履歴を参照し、ソースコードを前の状態に戻したり、進めたりすることができる。初期状態ではどちらのボタンも無効化している。戻るボタンについて、ソースコードが変更されたタイミングでボタンの押下が可能になり、これ以上戻せない状態になった場合はボタンが無効化される。進むボタンについて、戻るボタンが押下されたタイミングで押下可能になり、これ以上戻れない場合はボタンが無効化される。

### 3.3 サーバ側の実装

サーバ側では、MACアドレスと関連付けたユーザの管理や、ユーザから送信されたソースコードのコンパイルやプログラムの実行を行い、実行結果を送信する役割を持つ。本システムでは、実装にPHPを用いて構成した。

#### 3.3.1 ユーザ管理

図5に示すように、本システムではユーザの使用する端末のMACアドレスをもとに、ユーザ毎に作業フォルダを割り当てる。この処理を行うことで以下の作業を実現できる。

- コンパイル・実行の処理の並列化
- テキストデータの保持

コンパイル・実行の処理の並列化について、一つのソースコードのファイルや実行ファイルで複数のユーザの処理を行うと、処理が混雑してしまって期待通りの実行結果にならない場合がある。ユーザ毎に作業フォルダを分けることで、円滑にコンパイル・実行の処理を行うことが可能になる。テキストデータの保持について、保存されている作業フォルダと同じMACアドレスからログインされた場合、前回編集していたソースコードの情報を送信することができる。そのため、誤って作業中にWebブラウザを閉じてしまった場合でも、スムーズに作業を再開することが可能である。

ユーザ毎に管理しているファイルを以下に示す。

- ECLAT用編集ファイル
- 本システムで機能するソースコードファイル

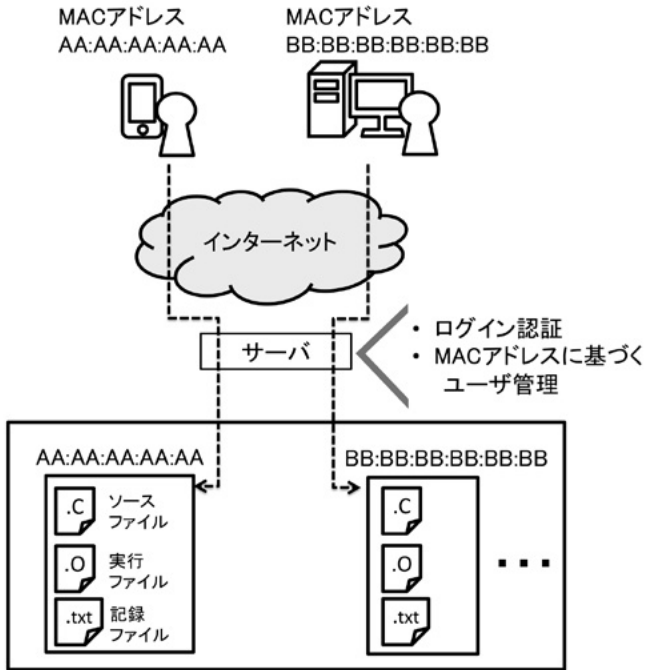


図 5 MAC アドレスに紐付けたユーザ管理

- 実行ファイル
- 出力用テキストファイル
- 入力用テキストファイル
- プログラム実行状態管理ファイル

ECLAT 用編集ファイルは、ユーザがブラウザ上で編集する部分の内容をそのまま記録している。ログイン要求のあったユーザの持つ MAC アドレスと作業フォルダの情報が一致した場合、このファイルの内容をクライアント側に送信する。送信されたデータはソースコード記述部に表示され、前回操作した状態から編集を始めることができる。

本システムで機能するソースコードファイルについて、ECLAT 用編集ファイルをコンパイルし実行した場合、特に入出力に関してシステムの仕様上機能しない。そのため、サーバ側でこのファイルを書き換えることで、本システムで機能するソースコードファイルにする必要がある。

実行ファイルは、コンパイルが成功した場合に生成される。実行したタイミングで時間を計測し、一定時間を超えた場合はプログラムを中断することで、サーバに対する負担軽減を図る。その際はクライアント側にそれまで出力された結果の後に「タイムアウト」と表示される。

出力用テキストファイルについて、プログラムを実

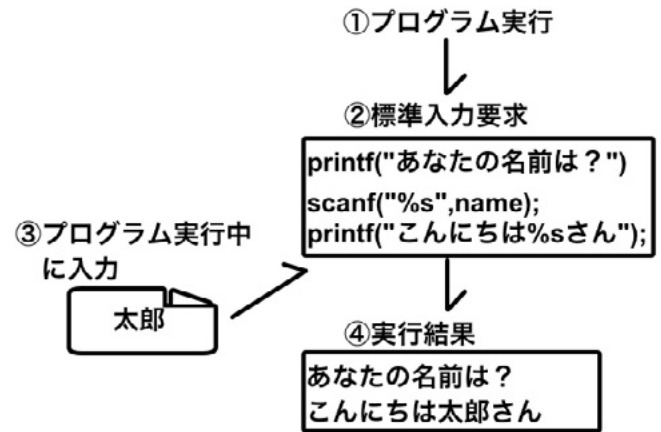


図 6 対話的な入出力

行する際のコマンドに対して、標準出力や例外出力をこのファイルに書き込む。また、コンパイルエラーが発生した場合も、エラーの内容をこのファイルに記録する。このファイルの内容をクライアント側に送信することによって、実行結果を表示することが可能になる。

入力用テキストファイルは、クライアント側から送信された標準入力に対する入力の内容を記録するファイルである。入力待ち状態であるプログラムが再開されると、このファイルを読み込むことで処理を進めることができる。

プログラム実行状態管理ファイルは、プログラムが実行され、どのような状態であるのかを示すファイルである。プログラム実行中、このファイルを参照することで標準入力の確認を行うことができる。

### 3.3.2 対話的な標準入出力

標準入力とは、C 言語における `scanf` 関数などのようにプログラム実行中にユーザからの入力を受け付ける機能のことである。図 6 に示すようにプログラムの実行中に標準入力に指定する文字列を入力できるという対話的な入出力ができ、直感的な操作を実現する。

図 7 に標準入力を含むプログラムを実行した時の処理の流れを示す。基本的に、標準入力を用いるプログラムはユーザが何を入力すればよいのかを提示する文字列を先に出力しておく必要がある。そのため、図 7 で示すプログラムは、最初に名前を入力を促す文字列を表示し、その後ユーザに対して標準入力を要求するものを使用した。プログラム実行中、サーバは常に実行状態を管理するファイルを監視する。`scanf`

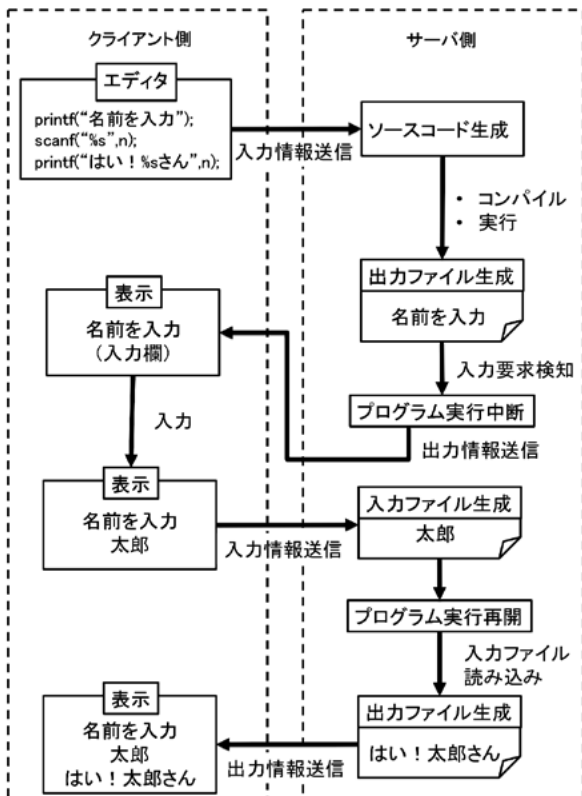


図7 標準入出力における処理の手順

関数といった標準入力を扱う関数を用いると、実行状態から入力要求状態に変化し、プログラムを一時停止する。入力要求状態を検知すると、クライアント側に入力要求を通知する。クライアント側から入力情報が送信されたらプログラムが再開され、入力情報が記録されたファイルを読み込み、実行状態に戻る。

プログラムが標準入力を要求しているかどうかの検知方法について、あらかじめコンパイル前にソースコードを追記し、scanf 関数の機能の拡張を行う。新たに独自に定義した scanf 関数の処理では、「入力要求」状態を示すファイルの作成を行う。プログラム実行と同時に、その状態ファイルを定期的に確認する処理を並列に実行する。

プログラムを一時停止する方法として、kill コマンドの一時停止シグナルを用いる手法で実装した。プログラム実行時、そのプログラムのプロセス ID をファイルに記録しておく。プログラムを一時停止するタイミングでそのプロセス ID をもとに、kill コマンドを実行する。クライアント側から入力情報が送信されプログラムを再開するタイミングでは、同じように kill コマンドの一時停止からの再開シグナルを用いて再開を行う。

クライアント側からの入力情報プログラムが読み

込む方法として、コンパイル前にソースコードを追記する手法を用いた。クライアント側から標準入力として送られてきた情報は、サーバ側のファイルに記録される。プログラムが入力待ち状態の一時停止から再開された後、標準入力に用いる文字列が記録されたファイルの内容を読み込む。

これらの手法を用いることで、ユーザ視点では通常の C 言語学習で扱うような本来の scanf 関数と同じ使い方ができ、内部の仕様に気にすること無く対話的な入出力のできるプログラミングに取り組むことができる。

入力関数について、scanf 関数の他にも fgets 関数など様々な存在するが、本システムでは仕様として scanf 関数のみ扱えるものとなっている。しかし、この手法を応用することによって様々な出力関数に対応させることが可能である。

#### 4. 実験

本研究では、142 名の学生に ECLAT を用いた C 言語プログラミング演習を行い、システム評価を行った。評価方法として、アンケートの集計や、システムの応答速度（ターンアラウンドタイム）の測定を行い、ECLAT のプログラムツールとしての優位性を検証する。

##### 4.1 ターンアラウンドタイムの検証

ターンアラウンドタイムとは、プログラムを記述したのち、処理を開始してから次の要求の受け入れが可能になるまでの時間のことである。本研究におけるターンアラウンドタイムの定義は、ユーザによって「実行ボタン」が押下されてから実行結果が表示し始めるまでの時間とする。また、scanf 関数の使用によって標準入力が要求される場合のプログラムのターンアラウンドタイムについては、「実行ボタン」が押下されてから最初の入力欄が表示され始めるまでの時間とする。時間を計測するため、クライアント側の処理としてターンアラウンドタイムを計測したデータをサーバ側に送信する機能を実装した。この機能によって、ユーザがプログラムを実行するたびに実行結果の表示にどれだけの時間がかかったのかを確認することができる。

図 8 に、ユーザから集計したターンアラウンドタイムを新しいものから順に 2500 個抽出したものをヒストグラムにして示す。この結果について、最頻値として 100 ミリ秒から 200 ミリ秒のターンアラウンドタイムが 901 回として現れていることが分かった。

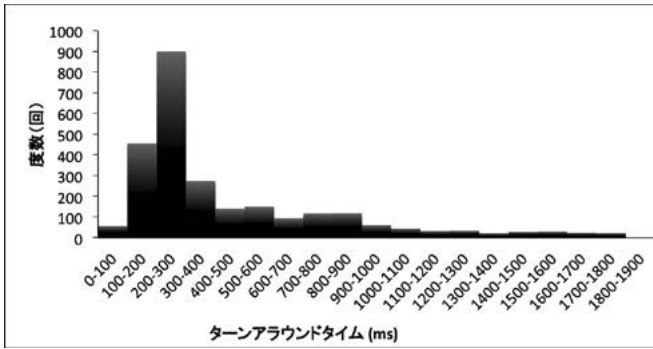


図8 ターンアラウンドタイムの結果

また次に多く計測されたされたターンアラウンドタイムとして、先程よりも速い値である100ミリ秒から200ミリ秒で456回であった。なお、全体の平均は560ミリ秒であった。

#### 4.2 ユーザアンケート

本実験では、ECLATを用いた講義を受けた学生に対し、システムの利便性や学習意欲についての調査としてアンケートの集計を行った。対象とした学生は、福井大学物質生命化学科の1年生102名と、福井工業大学電気電子工学科の1年生40名の計142名である。アンケートは学生がECLATを用いた学習についてどのように感じたかについて、選択肢を用意した。また、自由に意見を記述できる項目も用意した。表1にアンケートの内容を示し、集計結果を表2に示す。質問1以外の質問については4段階の評価で回答を行う。

質問1について、本システムを利用した経験があるかどうかの確認を行った。結果、全ての学生が「はい」と回答したことから、利用率の高さが伺える。

質問2では本システムのインターフェイスについて、適切なサイズや色に設定されているかどうかの検証を行った。結果は8割もの学生が「見やすい」と答えたことからおおむね視覚的な問題はないものと考えられる。

質問3は本システムを利用する上での確に扱えスムーズに学習を進められるかどうかを検証した。「あった」と答えた学生がそれぞれ3割を示していることから、多くの学生がどう操作すればいいのか分からないという場合があることが分かった。

質問4では本システムの持つエラー行の強調機能およびコンパイルエラーの出力に関して、学生が適切にエラーに対処できているかどうかを確認した。自信を持って簡単だったと回答した学生はわずか3割程度であった。プログラミングにおいて、コンパイルエ

表1 アンケート内容

質問1 「ECLAT」を用いたプログラミング学習の経験があるか
(以下、「ある」と答えた者を対象に回答)
質問2 ボタンやエディタ部、実行結果表示部のパーツについての全体的な見やすさ
質問3 使い方が分からなかったり操作を間違えたりすることがあるか
質問4 コンパイルエラーが発生した際、間違いの箇所がどこにあるかを見つけることができたか
質問5 プログラムを実行してから結果が表示されるまでの時間について、どのように感じたか
質問6 「ECLAT」を用いて学習したことで、C言語をもっと学びたいと思うようになったか
質問7 プログラミングの学習について、これからも「ECLAT」を使って学習したいと思うか
質問8 その他、自由記入

表2 アンケート結果 (142名回答)

質問1	ある			ない
	100%			0%
質問2	見やすい			見辛い
	19%	64%	14%	3%
質問3	無かった			あった
	29%	36%	31%	4%
質問4	簡単			難しい
	24%	46%	25%	5%
質問5	早い			遅い
	46%	39%	13%	3%
質問6	思う			思わない
	12%	57%	19%	11%
質問7	思う			思わない
	16%	53%	19%	12%

ラーは基本的に初学者ほど修正する作業が大変なので、そのような原因が結果に反映されていると考えられる。

質問5では、プログラムが実行されてから実行結果を表示するまでの時間、つまりシステムのターンアラウンドタイムについて、学生がどの程度快適に感じるかを検証している。結果は「早い」と感じた学



生がほとんど占めている。この結果から、プログラムの実行確認がテンポよく行われ、スムーズな学習が実現されていることが分かる。

質問6および質問7では、本システムについての満足度を評価している。結果はどちらもほぼ同じ割合となっており、「とても思う」「やや思う」と答えた学生が7割を占めている。また、ほとんどの学生がこの2つの質問に対して同じ回答を選択していることから、多くの学生はこれからもECLATを用いてC言語プログラミングをやっていきたいと感じていることが分かる。

## 5. 考察

本研究で開発したWeb上でC言語プログラミングが実行可能なアプリケーション「ECLAT」の評価を行った。評価方法として、本システムECLATを学生に利用してもらうことで、システムの応答速度を表すターンアラウンドタイムの計測を行う。また、ECLATを用いた学習を通して感じたことをアンケートによって集計を行った。結果、ターンアラウンドタイムやページの見やすさについて、学生にとって快適であるという評価が得られた。

また、本システムを利用したことによってC言語プログラミングについての学習意欲の向上が見られた。これは、特別な準備や操作を省くことで学生にかかる負担を軽減することで、プログラミング本来の面白さに触れることが可能になったことが一つの要素であると考えられる。

ECLATを使っていて、よく操作を間違えてしまう学生が全体の7割ほど現れた原因として、ECLATの使い方を解説したページを用意しなかったことが原因となっていると考えられる。操作方法は、プログラミング演習の際に口頭で行ったが、聞き逃したり忘れてしまったりしてしまった学生のために、丁寧な操作方法を示したページの用意が重要であることが分かった。

また、コンパイルエラーの発生の際、エラーの原因を見つけることに対して難しいと答えた学生が7割以上占めていた。プログラミング初学者はエラーを発見してそれを訂正することはとても難しいので、ECLATにはコンパイルエラーの出力を解析してクライアント側のソースコードエディタにエラーと思われる行を赤く強調する機能を実装した。しかし、コンパイラの出力するエラー行の出力リストはプログラムの根本的なエラーを示さない場合があるので、本来修正すべき行を赤く強調できない場合がある。このことが原因となり、コンパイルエラーを修正する作

業を難しく思った学生が多く占めたのではないかと考えられる。

## 6. まとめと今後の課題

本システムはWebブラウザ上で動作するので、開発環境を整える負担が少なくスムーズに学習に取り組むことが可能となる。また、プログラムのコンパイルや実行の操作を簡単に行うことができるため、プログラミング学習に対して集中的に学ぶことができる。

今後の展望について、ECLATはユーザアンケートの結果から、ECLATの使い方について分からない点やつまずいてしまった点が見られた。これはECLATの使い方を口頭のみで伝えていたことが原因であると分析し、今後は使い方を丁寧に示したページを実装することを目標とする。またコンパイルエラーが発生した場合に表示されるエラーリストとして、出力される文字列が全て英語であるので、英語に不慣れなプログラミング初学者にとっては混乱を招く原因になっている要因があると考えられる。そのため、英語のエラー文を日本語で分かりやすく表示するための機能の実装が必要になると考えられる。

本研究で扱うプログラミング言語について、コンパイラ言語であるC言語を対象にしている。C#やJavaといった他の言語を扱いたい場合、本システムを応用することで簡単に実装可能である。そのため他の言語についてのプログラミング演習でECLATを用いることを考えた場合についても、対応可能であると考えられる。

## 参考文献

- [1] 田口浩. 個々の学習者の理解状況と学習意欲に合わせたプログラミング教育支援. 情報処理学会論文誌, Vol. 48-2, pp. 958-968, Feb 2007.
- [2] A. Oram. Making Software: エビデンスが変えるソフトウェア開発, pp. 107-120. Theory in practice series. オライリー・ジャパン, 2011.
- [3] 耕大山本, 将寿春原, 克紀大金, 勝一中村, 節雄横山, 庸造宮寺. エラー要因事例ベースの動的学習手法を導入したc言語教育システムの開発と基礎的評価. 電子情報通信学会技術研究報告. ET, 教育学, Vol. 108, No. 146, pp. 67-72, jul 2008.
- [4] ideone. <https://ideone.com>.
- [5] codepad. <http://codepad.org>.

# メカトロ教育用マイコンボード TK400 シリーズの開発と教育実践

高田 直人\* 川谷 亮治\*\*

## Development and Educational Practice of TK 400 Series Microcomputer Board for Mechatronics Education

Naoto TAKADA\* and Ryoji KAWATANI\*\*

(Received January 31, 2018)

Sensors, microcomputers and actuators are the indispensable elements which should be learned in mechatronics education. Especially, selection of microcomputer and its programming development environment is very important and related to a learning arrival target and task assignment of learning. So, we have initiated develop the microcomputer board TK400 series for mechatronics education everyone easy to use.

In this paper, we introduce the development background of the TK400 series for mechatronics education and several examples of educational practice.

**Key words :** Mechatronics, Microcomputer Board, Mechatronics Education, Education Practice

### 1. 緒言

工学を学ぶ者にとって、ものづくりの構想・設計・製作・評価は欠かすことのできない能力の一つである。これらの能力の育成方法の一つとして、メカトロニクス教育（以下、メカトロ教育と称す）が行われている<sup>[1]~[3]</sup>。例えば、与えられた仕様を満たすロボットを構想・設計・製作し、さらに課題をクリアするプログラムを作成することは、学習到達目標や成果がわかりやすく、ハードウェアとソフトウェアの両分野について総合的に学習できるという意味で、優れた題材の一つである。さらに、半導体集積化技術の進化により、マイコンだけでなく、さまざまな物理量を計測するセンサとインタフェース回路が集積化され、安価に入手できるようになった。このため、さまざまなアクチュエータと組み合わせることにより、所属学科の特色を活かしたロボット

の製作が可能になっている。

ところで、メカトロ教育では、センサ・マイコン・アクチュエータは必須のハードウェア要素である。この中でも特に、マイコンの選定が極めて重要であり、このハードウェア仕様とプログラム開発環境によって学習到達目標や課題設定が左右される。そこで筆者らは、指導者側にとっても学生側にとっても利用しやすい専用マイコンボードの開発を行い、メカトロ教育やフィードバック制御の学習に活用してきた。

本稿では、メカトロ教育用マイコンボード TK400 シリーズの開発背景を紹介すると共に、それらを活用した教育実践について述べる。

### 2. マイコンボード TK400 シリーズの開発

#### 2.1 開発の経緯<sup>[4][5]</sup>

筆者の一人が所属する機械工学科では、創成教育の一環として、学生自らが創造し、製作を行い、成果の発表と評価を行う機械創造演習という創成科目を学部3年生を対象として2006年度からスタートさせている。その中で筆者らは、自律移動ロボットの構想・設計・製作を通して、メカトロニクスの基

\* 長野県飯田 OIDE 長姫高等学校

\*\* 機械工学専攻

\* Iida OIDE Osahime Senior High-School

\*\* Mechanical Engineering Course, Graduate School of Engineering

礎を習得させることを目的とした移動ロボットプロジェクト（以下、ロボプロと称す）に関わっている。ロボプロの演習開始当初は、二輪独立駆動型の移動ロボットに搭載するマイコンとして、16ビットマイコンである H8/3052F（ルネサスエレクトロニクス）を搭載した市販のマイコンボードを採用した。しかし、汎用のマイコンボードであるため、センサや DC モータを利用するにはインタフェース回路の自作が必要であった。一方、ロボプロの受講生は、電子回路製作の経験がない者がほとんどであり、はんだ付けの経験も乏しく、部品の名称やその極性の有無についても知識をもっていない。そのため、ユニバーサル基板やプリント基板への部品実装に多くの時間と労力を費やしていた。また、基板完成後の動作確認においても、テスタなどの扱い方や確認方法の説明などにも時間が必要であった。部品の実装や配線・確認作業は、電気系のものづくりに関する知識と技能を育むという面において効果が期待できる。しかし、所定の動作が得られずにトラブルがひとたび生じると、ロボプロの受講生だけではその原因を特定することは困難である。ロボットを製作する前段階における本質的でない部分での時間の浪費は、限られた人員による指導者側の負担を増大させるだけでなく、受講生のモチベーションを低下させてしまうという課題があった。さらに、ロボットを希望通りに動かすためには適切なプログラムが不可欠であるにもかかわらず、マイコンを活用することで、どの様なことが可能になるのかに関する体験的な学習とマイコンのプログラミング経験が十分でないといった課題があった。そこで 2007 年 12 月に、二輪独立駆動型の移動ロボットに搭載することを前提にして、指導者側にとっても学生側にとっても活用しやすいメカトロ教育用マイコンボードの開発に着手した。

## 2.2 マイコンボード TK400 の開発

### 2.2.1 設計仕様

メカトロ教育用に特化したマイコンボードの開発コードネームは、筆者らの名前から TK400 とし、2008 年 4 月からの適用を目指した。設計するにあたって前提とした主な条件を以下に示す。

- (1) 使用目的は学生を対象としたメカトロ教育用
- (2) マイコンは入手が容易であり、C 言語による開発環境を整えやすい 16 ビットマイコンから H8/3694F（ルネサスエレクトロニクス）を採用 32KByte のフラッシュ ROM, 2KByte の RAM を搭載し、メカトロ教育には十分と考えられる 37 本の I/O 端子、拡張性を高める I<sup>2</sup>C バスインタフェー

スを内蔵したシングルチップマイコンである。

- (3) ガラスエポキシ製両面プリント基板による製作キット形式の採用

マイコンボードは、学生が搭載部品をはんだ付けすることで完成させるキット形式とした。電子部品の実装を通して、はんだ付け技能の習得、部品の名称や使い方、さらには市場における部品単価の相場などを知ること、電気系ものづくりのセンスとスキルについて学習することができる。

- (4) シリアルポート (D-Sub9 ピン) コネクタ搭載

標準コネクタを搭載することで専用ケーブルを不要とし、プログラムの書き込みやデバッグ、外部機器との通信など幅広く対応できる。

- (5) マイコン駆動用電源 (乾電池) 搭載

外部電源を供給することなく、マイコンボード単体で動作が可能となるようにボード上にマイコン駆動用電源 (006P 型 9V 乾電池) を搭載する。これにより自由度の高い利用形態が可能となる。

- (6) LCD (液晶ディスプレイ) 搭載

教育を目的とするマイコンボードにとって、数字や文字の表示は学習効果を高める上で極めて有効な機能である。LCD (16 文字 × 2 行) は入手が容易で安価であり、その扱いも容易である。

- (7) LED とオシロスコープ用チェック端子の搭載

LED はマイコンからの信号出力確認用として最も原始的な表示器であるが、プログラム学習における第一歩として有効活用できる。さらに、プログラムの実行確認や処理時間の実時間計測にはオシロスコープによる周期計測が必須になる。そこでマイコンの出力端子に割り付けた LED と並列に、オシロスコープのプロブを接続できるプロブ用チェック端子を搭載する。

- (8) DC モータ用駆動回路の搭載

メカトロ教育において、二輪独立駆動型の移動ロボットの制御は、最もよく使われる題材の一つである。そこで、数アンペの駆動電流にも対応できる DC モータ用駆動回路を標準搭載し、DC モータからのケーブルを接続するだけで使用できるようにする。駆動回路はブラシ付き DC モータ用とし、正転、逆転、停止、ブレーキの 4 状態が可能であり、さらに DC モータの速度制御を可能とする PWM 制御機能対応とする。

- (9) RC サーボ端子の搭載

RC (ラジコン) サーボはパルス信号によって位置決め制御が可能なアクチュエータの一つである。移動ロボットの走行系として DC モータ用駆動回路だけでなく、さまざまな機械的な機構を駆動するためのアクチュエータは、メカトロ教育における多彩

な学習を可能にする。このため、RC サーボを接続するだけで使用を可能にする RC サーボ端子を搭載する。

#### (10) 各種センサの接続を可能にするアナログ/デジタル入力端子の搭載

メカトロ教育では、センサからの信号処理と利用方法の学習が重要である。さまざまな物理量を計測するセンサの出力信号形態には、アナログ系とデジタル系がある。どの形態でも接続が可能な入力端子を複数搭載する。

#### (11) メカニカルスイッチの搭載

マイコンプログラミングでは、入力信号を意図的に与えるスイッチが必須である。このため故障が少なく丈夫で安価なメカニカルスイッチを複数個搭載する。

以上の設計仕様に基づいて製作した TK400 の外観を図 1 に示す。

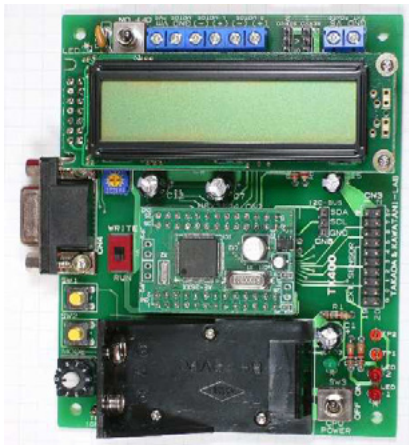


図 1 メカトロ教育用マイコンボード TK400

マイコンボードのサイズは 90mm × 110mm である。プリント基板の四隅に開けられた固定用穴の間隔は 5mm の整数倍とし、ロボット製作時における設計や加工を容易にする工夫を行っている。DC モータと DC モータ用電源の接続には、電線の太さと接続の利便性を考慮し、ねじ式のターミナルブロック端子を使用した。また、センサからの信号線が集中する場所には、配線がコンパクトに収まるようストレートピンヘッダを採用し、ピンソケットで接続できるようにしている。

### 2.2.2 学習テキスト

TK400 はキット形式としたため、製作手順などをまとめたテキストが必須である。そこで、両面プリント基板におけるはんだ付けの注意点や部品実装の手順に加え、部品の外観と名称、抵抗のカラーコードやコンデンサの標記数字の解説、極性の有無や実装方法などを自主的に学べるように意図した製作

テキストを作成した。さらに、全ての部品の単価も掲載し、市場価格の相場と部品に対するコストも意識できるように配慮している。また、回路図や外観寸法なども掲載し、製作後も参考資料として活用できるように工夫した内容になっている。

### 2.2.3 ボードサポートライブラリ関数

TK400 のような組込用マイコンのプログラムを作成しようとした場合、マイコンのポート設定やタイマなど内蔵周辺機能モジュールの初期設定などが不可欠である。これらの設定はマイコンの内部構造を理解していないと記述できないが、プログラム作成上、本質的でない部分が多い。特に、メカトロ教育の導入段階で重要なことは、マイコンを使うとどのようなことが可能になるのかの概念の理解と、繰り返し処理やフロー制御など基本的なプログラミングスタイルの習得である。筆者らは、マイコンの内部構造に詳しくなくても容易にプログラムを記述でき、アルゴリズムの本質について思考を集中できるように、マイコン固有の内部モジュールに関する設定は全て関数化し、簡単なコマンドと引数を与えるだけで設定を可能にする TK400 ボードサポートライブラリ関数を作成した。これは、CPU 動作環境設定、メカニカルスイッチ、アナログ/デジタルセンサ入力、DC モータ制御、ラジコンサーボ制御、シリアル通信機能、LCD 出力、時間待ち、の 8 分野である。本ライブラリ関数を利用することにより、TK400 がもつ機能を最大限発揮させることが可能になる。

### 2.2.4 プログラム開発環境

プログラムの開発言語にはさまざまなものがあるが、我々は C 言語を採用した。Arduino などのマイコンボードは、共通プラットフォームとよばれる開発環境下で、専用の簡易言語を利用することにより、全く知識をもたない人でも容易にプログラム作成を行える利点がある。その一方で制約事項も多く、簡易言語による学びには技術の発展性に課題も多い。工学部系の学生にとって、専用マイコンボードと C 言語という学習環境は、組み込み開発として実践に近い環境であり、ハードウェアもソフトウェアも学習目的に応じて深く学ぶことができる利点があると考える。

プログラムの開発環境は、プログラム作成時に試行錯誤を繰り返し、扱う時間も長時間に及ぶため、その選択は重要である。多くの場合、マイコンメーカーが提供するマイコンごとに最適化された統合開発環境と呼ばれるソフトウェアを教育現場でもそのまま活用している。しかし、これは学生にとって必ずしも使いやすい開発環境ではない。筆者らはプログ

ラム開発環境の重要性についても着目し、メーカ純正品ではないが、十分な知識を持たない学生でも操作がわかりやすいサードパーティによる統合開発環境 YellowIDE (エル・アンド・エフ社) を採用している。YellowIDE は、ANSI 規格に準拠した C コンパイラを搭載した GUI による統合開発環境である。プロジェクトの作成や割り込みに関する設定手順が簡素化されており、学生でも容易に扱うことができる。さらに詳細設定機能により、メモリ管理などが必要な上級者にも対応している。このほかにも以下に示す特徴をもつ。

- (1) ターミナルソフト機能を搭載しているため、プログラム開発画面上でシリアルポートへのデータ送信やモニタが可能である。
- (2) 標準入出力デバイスとしてシリアルポートが設定されているため、printf 関数や scanf 関数などが使用できる。このため、マイコンに対してパソコンのキーボードからデータを入力したり、マイコンから送信されたデータをターミナルソフトの画面上に表示することができる。これらの機能の利用により、言語学習を効率よく行うことができる。
- (3) プログラムの書き込み (ターゲットマイコンへのプログラム転送) 機能を装備しているため、コンパイルが完了すると直ちにプログラム転送ができる。
- (4) 異なるマイコンファミリ (例えば H8, H8S, SH, RX マイコン) でも共通の環境でプログラム開発できる。
- (5) C ソースコードはメーカ純正品のプログラム開発環境とほぼ互換性をもつ。

### 2.2.5 TK400 から TK400A へ

TK400 の開発当初、アナログ/デジタル入力専用端子は 20 極 (10 × 2 ピン) 構成とした。しかし TK400 を実際に活用してみると、5V の電源を必要とするセンサへの接続が複雑になることがわかった。この点を改善するために、コネクタの信号配列を 30 極 (10 × 3 ピン) 構成に変更したものが TK400A である。

入力端子の外観を図 2 に示す。各入力端子におけるピン配列を電源 (5V) - 信号 - GND という構成にし、3 端子のピンソケットを使用することにより、各センサへの電源供給が可能になり、さまざまなアナログセンサやデジタルセンサを容易に接続できるようになった。このピン配列はこれ以後、TK400 シリーズの共通仕様になっている。

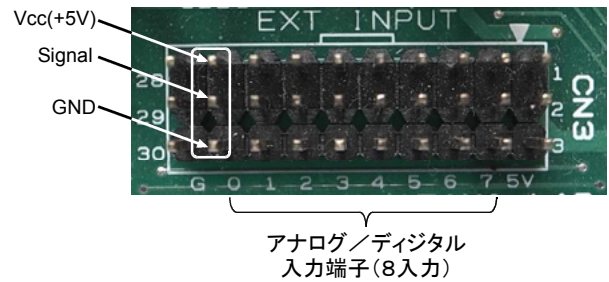


図 2 アナログ/デジタル入力専用端子のピン配列

## 2.3 TK400SH の開発

### 2.3.1 TK400SH の開発背景

センサ入力と DC モータ用駆動回路を搭載した TK400 (A) は、メカトロ教育だけでなく、フィードバック制御の学習にも適用が可能である。その適用事例として、車輪型倒立ロボットの開発を行った<sup>[6]</sup>。しかし、DC モータ系のフィードバック制御システムを構成しようとする、DC モータの回転角度や角速度が必要であり、そのためにはロータリエンコーダのパルスカウント機能が求められる。TK400 (A) にはその入力端子をもたないため、当初は外付けの電子回路基板を製作し、I<sup>2</sup>C バスで接続していた。さらに、制御器の実装には、浮動小数点を有する数値演算が必要であり、TK400 (A) に搭載したマイコンでは十分な計算能力を有していなかった。また、メカトロ教育の場面では、センサ入力だけでなく、自由に利用できる汎用 I/O ポートが必要になった。以上のことから、2011 年に TK400 (A) の設計仕様を継承し、マイコンボード上の部品レイアウトをほぼ同じにした TK400SH の開発を行った。

### 2.3.2 TK400SH のハードウェア仕様

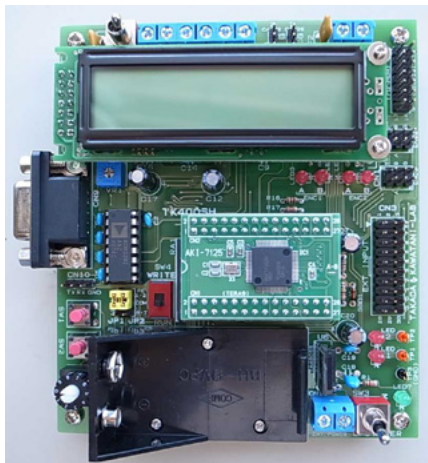
TK400 (A) の上位に位置するメカトロ教育用マイコンボード TK400SH は、搭載するマイコンとして、組み込み機器用 32 ビット RISC マイクロコンピュータである SH (SuperH) シリーズ (ルネサスエレクトロニクス) の中から SH7125 を採用した。このマイコンは、ロータリエンコーダからのパルス信号をカウントする 2 チャンネルの位相計数モードを搭載している。最大 50MHz のクロックで動作し、乗算器内蔵により計算能力が向上しており、37 本の汎用 I/O 端子と 8 本の入力専用端子をもつ。

TK400SH の主な機能を以下に示す。

- (1) マイコン: SH7125F  
内蔵フラッシュ ROM 128KByte, RAM 8KByte
- (2) LED × 2 (オシロプロープ用チェック端子付)
- (3) LCD (2 行 × 16 文字) × 1

- (4) タクトスイッチ × 2
- (5) 10進ロータリディップスイッチ × 1
- (6) DC モータ駆動回路 (TB6549PG) × 2  
最大定格負荷 30V, 3.5A, PWM 制御機能付
- (7) ラジコンサーボ用端子 × 2
- (8) アナログ/デジタル入力専用端子 × 8  
A/D 変換器の分解能は 10 ビット
- (9) 汎用 I/O 端子 × 8
- (10) ロータリエンコーダ入力用端子 × 2  
電源供給が可能であり, 2 相信号入力対応
- (11) シリアルコミュニケーションポート × 2  
TTL/RS232 レベルの選択が可能
- (12) マイコン動作電源搭載  
006P 型 9V 乾電池を搭載し, 6V ~ 12V の外部電源の利用も可能. マイコンと周辺回路の電源電圧は 5V であり, 1A までの負荷電流を安定供給できる低損失型の電源回路を搭載.

TK400SH の外観を図 3(a) に示す. 基板サイズは TK400(A) よりも少し大きくなり, 100mm × 115mm である.



(a) TK400SH (100mm × 115mm)



(b) LFTK400SH (100mm × 85mm)

図 3 メカトロ教育用マイコンボード (LF)TK400SH

図 3(b) は表面実装部品を使用して小型化した互換品の LFTK400SH である.

### 2.3.3 TK400SH の利用形態

TK400SH は TK400(A) と同様に製作テキストを作成し, 学生がはんだ付けを体験できるようにすると共に, 株式会社バイナスからは完成品を購入できるようにした. さらに, 株式会社エル・アンド・エフの協力により, TK400SH を小型化(100mm × 85mm)した互換品の LFTK400SH を購入できる.

### 2.3.4 (LF)TK400SH 用ボードサポートライブラリ関数

(LF)TK400SH がもつ機能を最大限発揮できるようにしたボードサポートライブラリ関数は, TK400(A) と互換性を維持するためにできる限り関数名を統一している. 作成した関数は以下に示す 9 分野 51 関数である.

- (1) I/O ポート初期設定, スイッチ・センサ入力
- (2) DC モータ制御, RC サーボモータ制御
- (3) A/D 入力, 2 相ロータリエンコーダ入力
- (4) 汎用 I/O ポート
- (5) シリアルコミュニケーションインタフェース
- (6) 時間待ち
- (7) LCD 出力
- (8) DC モータ制御基板専用
- (9) I<sup>2</sup>C バスインタフェース

### 2.3.5 (LF)TK400SH を活用したフィードバック制御用学習教材

フィードバック制御について学習するために, (LF)TK400SH を制御用マイコンボードとして活用した教育教材の事例を紹介する<sup>[7]~[11]</sup>. なお, TK400 シリーズを搭載した実験装置には, MCORE という名称をつけている. これらのマイコンボードが, メカトロニクス (Mechatronics) の学習の中で核 (Core) になってもらいたい, という筆者らの願いが基になっている.

#### (1) 二輪独立駆動型ロボット MCORE-CART

図 4 は, 安価で入手が容易な模型用のギヤボックス, タイヤセット, ユニバーサルプレートで構成した二輪独立駆動型の台車である. これは, 駆動輪の速度制御系や台車の位置制御系を対象にした実験教材で, 駆動輪には回転角度センサとしてロータリエンコーダを取り付けてある. 台車系は低次のモデルでその動特性を近似でき, フィードバック制御の学習においてシミュレーションと実際の応答がよく一致する. この台車の活用をとおして, 古典制御や現代制御理論の理解を深めることができる.

#### (2) 車輪型倒立ロボット MCORE-IP

図 5 は, MCORE-CART の本体部分に傾斜角度を

検出する回転角度センサを設けることにより、倒立させてバランスを取ることを目的とした制御対象である。

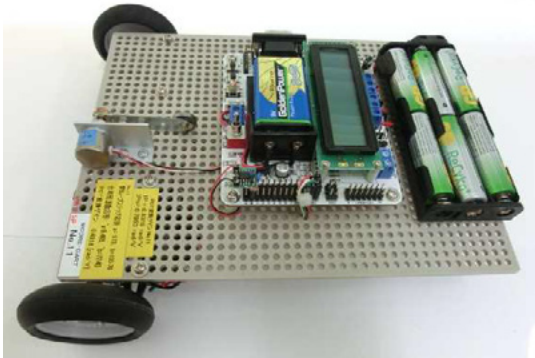


図4 二輪独立駆動型ロボット M-CORE-CART

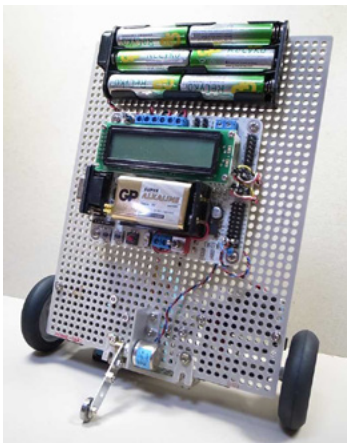


図5 車輪型倒立ロボット M-CORE-IP

### (3) 台車型倒立振り子 M-CORE-IPn

図6は、M-CORE-CART上に回転角度センサを置き、それに適当な長さのアルミ製の棒を取り付けることで、台車型倒立振り子にしたものである。

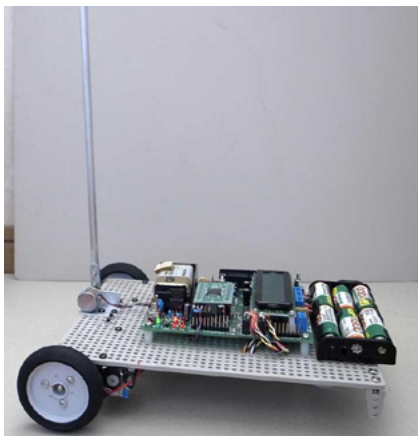


図6 台車型倒立振り子 M-CORE-IPn

### (4) 磁気浮上実験装置 M-CORE-Magnet

図7は電磁石に適切な電流を流し、鉄球を空中浮上させることを目的とした実験装置である。製作費用を削減するために、鉄球の位置の計測にアルミパイプと回転角度センサを使用している。元々はマイコン H8/3052F で構成されていた装置を TK400SH に置き換えたものである。

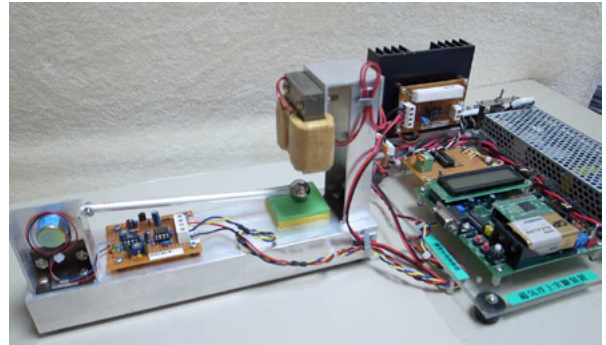


図7 磁気浮上実験装置 M-CORE-Magnet

## 2.4 TK400RXの開発

### 2.4.1 開発の背景

(LF)TK400SHの開発から5年が経過し、その間にマイコンとその周辺技術が著しく進化した。また、開発当時は主流であったマイコンも次世代のマイコンへと移行してきた。さらに Arduino マイコンの台頭がある。オープンソースの開発環境とオープンハードウェアによる資産が数多く公開され、誰でも自由に利用するため、ホビー分野だけでなく教育分野にも一気に普及し、制御系の実験装置も作られるようになった<sup>[12]</sup>。

その一方で制約も多く、特にタイマ割り込みに関しては、設定時間の範囲に大きな制約がある。メカトロ教育からフィードバック制御教育までを視野に入れた場合、サンプリング時間ごとに制御器などの数値計算を行うために  $100\mu\text{s} \sim 50\text{ms}$  程度の範囲で任意に設定できるタイマ割り込みが必須である。メカトロ教育用マイコンボードを利用する対象者も学生だけでなく、制御の研究や一般のエンジニアにも利用してもらうためには、これまで以上に高性能なマイコンボードが必要になった。

そこで、これまで開発してきた TK400(A)、(LF)TK400SH の設計仕様を継承しつつ、新しいマイコンを採用することで数値計算能力のさらなる向上、CAN を含むシリアル通信機能の充実、高分解能な A/D、D/A 変換器の搭載、DC モータ駆動回路の多チャンネル化など、より多くの機能をもったマイコンボード TK400RX を 2016 年に開発した<sup>[13]</sup>。

## 2.4.2 LFTK400RX のハードウェア仕様

TK400RX は、株式会社エル・アンド・エフにより商品化され、LFTK400RX として 2017 年から製造・販売・サポートが行われている。図 8 に示す基板のサイズは LFTK400SH と同じ 100mm × 85mm である。TK400SH までははんだ付けを体験できるキット形式を選択可能であったが、LFTK400RX では高密度実装のため、完成品のみでの利用になる。

主な構成を以下に示す。

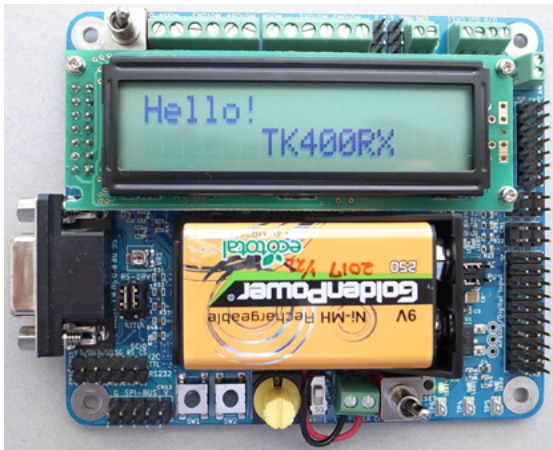


図 8 マイコンボード LFTK400RX

### (1) マイコン RX62T

CPU 32 ビット RX CPU

積和演算器と FPU（浮動小数点プロセッサ）搭載

ROM 256K バイト, RAM 16K バイト

ボード上での動作周波数(CPU 96MHz, 最大動作周波数 100MHz)

CPU リセットスイッチ搭載

### (2) LCD(2 行 × 16 文字) × 1

### (3) LED × 2

ポートに直接接続されており、プログラムで点滅制御が行える。オシロスコープ用チェック端子を設け、プログラムの処理時間の計測などに使用できる。

### (4) タクトスイッチ × 2, 10 進ロータリディップスイッチ × 1

### (5) ブラシ付き DC モータ駆動回路 × 4

モータ用電源入力(2.5V ~ 15V), 定格出力電流 1.2A (ピーク 4.5A), 最大 PWM 周波数 400kHz

### (6) ラジコンサーボ用端子 × 2

市販のラジコンサーボのコネクタを接続するだけで直ちに利用することができる。サーボ用電源は外部から供給する仕様になっており、4.8V ~ 6V を推奨。

### (7) アナログ/デジタル入力 × 8

12bit 分解能をもつ A/D 入力を 8 チャンネル搭載。

基準電圧は 4.096V/5.0V のどちらかを選択できる。アナログ入力時以外はデジタル入力として動作。

### (8) アナログ出力 × 2

12bit 分解能をもつ D/A 変換器を 2 チャンネル搭載。基準電圧は 4.096V/5.0V のどちらかを選択できる。

### (9) 汎用 I/O ポート × 1 (8 入出力)

### (10) ロータリエンコーダ入力 × 2

2 相ロータリエンコーダを直接接続でき、オープンコレクタ出力型でも TTL 出力型でも接続可能。電源供給機能も搭載。

### (11) シリアルコミュニケーションポート × 3

通信速度は 100bps ~ 150kbps の範囲で設定可能。TTL/RS232 レベルのどちらかを選択可能であり、フロー制御にも対応可能。

### (12) I<sup>2</sup>C 端子 × 1

シリアルコミュニケーションポートと兼用。最大 400kHz のクロック周波数まで対応可能。

### (13) SPI (Serial Peripheral Interface) × 1

最大 3 デバイスまで接続可能。

### (14) CAN × 1

ISO11898-1 仕様に準拠した CAN (Controller Area Network) モジュールを搭載。標準 ID フォーマット, 拡張 ID フォーマットのどちらにも対応でき、最大 1Mbps までの通信速度の設定が可能。接続と切り離しが可能な終端抵抗と CAN トランシーバを搭載しているため、CAN を搭載した機器や複数の LFTK400RX を直接接続することができる。

### (15) マイコン駆動用電源搭載 (006P 型乾電池)

外部電源接続端子を設けているので、乾電池以外の電源供給も可能。低損失型の安定化電源回路を搭載しており、マイコンを含め周辺回路に 5V, 1A までの負荷電流を安定供給できる。

### (16) 基板サイズ 100mm × 85mm

TK400SH より多機能であっても互換品の LFTK400SH と同じ基板サイズである。LCD や電池ケース, 入力端子や汎用 I/O ポートなどの接続端子は、従来の機種と同じ位置にしてあるため、マイコンボードの置き換えが可能である。

## 2.4.3 タイマ割り込み

LFTK400RX に搭載されているマイコンが持つタイマ機能の内、ユーザが自由に利用できるタイマ割り込みは 3 系統 (CMT0, CMT1, CMT3) である。タイムベースとなる 48MHz のクロックを分周することにより、0.3  $\mu$ s ~ 0.7s の範囲で割り込み時間を設定し、利用することができる。また、タイマ割り込みそれぞれに優先順位を割り当て、複数のタイマを同時に使用する多重割り込み処理を行うことも可能である。



#### 2.4.4 離散時間制御器における数値計算能力

現代制御理論に基づいて設計された制御器は式(1)のように離散化され、プログラムによる計算式としてマイコンに実装される。ここで、 $z[k]$ 、 $y[k]$ 、 $u[k]$ はそれぞれ状態量、観測量と操作量を意味する。

$$\begin{cases} z[k+1] = A_d z[k] + B_d y[k] \\ u[k] = C_d z[k] + D_d y[k] \end{cases} \quad (1)$$

モデル化された制御対象は、高次の制御器であるほど積和演算が増え、より多くの計算時間が必要になる。そこで代表的な次数をもつ制御器に対して、式(1)の数値計算に要する時間を計測した結果の一例を表1に示す。LFTK400RXに使用しているマイコンは、積和演算器と単精度浮動小数点演算器を搭載しているため、TK400(A)、(LF)TK400SHよりも大幅に計算時間が短縮されており、高い数値計算能力を有していることがわかる。

なお、図4から図7の制御用学習教材は、いずれもわずかなプログラムの修正だけでLFTK400RXで制御することが可能である。

表1 TK400シリーズの数値計算能力

制御器の次数	TK400(A)	(LF)TK400SH	LFTK400RX
2次	1.31ms	0.25ms	1.61 $\mu$ s
4次	3.0ms	0.59ms	3.44 $\mu$ s
6次	4.8ms	0.98ms	5.92 $\mu$ s

#### 2.4.5 LFTK400RX用ボードサポートライブラリ関数

ボードサポートライブラリ関数は、2.3.4で述べた9分野の関数にD/A出力とCAN通信に関する機能を加え、11分野75関数を作成した。

TK400シリーズのボードサポートライブラリ関数は、製造販売とサポートを行っているエル・アンド・エフ社のホームページから無償でダウンロードして利用することができる。さらに、関数のソースコードは全て公開しており、利用者が使用目的に応じてカスタマイズすることも可能である。

#### 2.5 TK400シリーズの機能比較

表2は2008年から開発を行ってきたTK400シリーズにおける主な機能を比較したものである。

TK400(A)に搭載したマイコンH8/3694は、製造が収束しているため、現在では新規購入することができない。開発当初のTK400(A)の機能と比べ、LFTK400RXではマイコンの性能が大きく向上して

いるだけでなく、周辺機能の種類が大幅に増えている。特にシリアル通信の一つであるCANは、車載用装置に使われていることから、CANを活用したメカトロ教材の製作が可能である。

表2 TK400シリーズの主な機能の比較

シリーズ	TK400	TK400A	(LF)TK400SH	LFTK400RX
開発年	2008	2010	2011	2016
搭載マイコン	H8/3694 16bit		SH7125 32bit	RX62T 32bit.FPU搭載
ボード上の動作周波数	20MHz		CPU : 50MHz 周辺 : 25MHz	CPU : 96MHz 周辺 : 48MHz
内臓タイマ機能	16bitタイマ×4ch 8bitタイマ×2ch		16bitタイマ×8ch	16bitタイマ×16ch
主な機能	LCD(16文字×2行)		LCD(16文字×2行)	LCD(16文字×2行)
	スイッチ類(3)		スイッチ類(3)	スイッチ類(3)
	モニタ用LED(2)		モニタ用LED(2)	モニタ用LED(2)
	RCサーボ制御(2)		RCサーボ制御(2)	RCサーボ制御(2)
	DCモータドライバ(2)		DCモータドライバ(2)	DCモータドライバ(4)
	シリアルポート(1)		シリアルポート(2) (TTL/RS232選択可)	シリアルポート(3) (TTL/RS232選択可) (フロー制御対応)
	アナログ入力(8) (10bit ADC)		アナログ入力(8) (10bit ADC)	アナログ入力(8) (12bit ADC : 8) ロータリ
	—		エンコーダ入力(2)	エンコーダ入力(2)
	—		汎用I/O(8)	汎用I/O(8)
	—		—	アナログ出力(2) (12bit DAC)
12C(1)		—	12C(1)	
—		—	SPI(1)	
—		—	CAN(1) (トランシーバ搭載)	

### 3. TK400シリーズを活用した教育実践

#### 3.1 大学・社会人教育における活用

##### 3.1.1 機械創造演習

2.1節でも述べたように、TK400シリーズを開発するきっかけとなったのが、機械工学科3年生を対象として2006年度にスタートした機械創造演習である。本演習は、通年で実施される必修科目で、前後期それぞれ15コマ(2.5時間/コマ)の演習時間が割り当てられている。本演習では、3~4のプロジェクトが用意されており、学生の希望に基づいて配属を決定する。筆者の一人が担当しているのはプロジェクトの1つであるロボプロである。

本プロジェクトの目的は、自律移動ロボットの構想・設計・製作を通して、ハードウェアからソフトウェア、さらには期限までにロボットを完成させる工程管理などを総合的に体験することで、メカトロニクスの基礎や開発プロジェクトにおけるスケジューリングの重要性などを習得させることである。

表3は、演習開始から2017年度までに使用したマイコンボードの変遷を示したものである。TK400シリーズの開発に合わせて、使用するボードを更新している。なお、2017年度にTK400SHからLFTK400SHに変更したのは、演習を受講した学生

表3 機械創造演習におけるマイコンボードの変遷

年度	マイコンボード	人数/グループ
2006	H8/3052	5
2007	H8/3052	5
2008	TK400	5~6
2009	TK400	4~5
2010	TK400A	4
2011	TK400A	6
2012	TK400A	3
2013	TK400A	3
2014	TK400SH	4
2015	TK400SH	4
2016	TK400SH	4
2017	LFTK400SH, RX	4

からの「ボードのサイズを小さくして欲しい」との要望に答えるためである。また、同年度は、オムニホイールを利用してロボットを製作したグループがあり、LFTK400SH が駆動できる DC モータの最大数から、LFTK400RX を使用させた。2018 年度以降は LFTK400RX を利用する予定である。同表に、グループあたりの学生数もまとめてある。2011 年度まではグループの構成人数が 4～6 名であったが、2012 年度と 2013 年度に 3 名としたところ、学生の負担が大きくなった。そのため、2014 年度以降は 4 名としている。プログラム開発だけでなくロボット本体の製作を考えたとき、1 グループあたり 4 名が適切な人数であると考えられる。

ところで、ロボプロではプログラミングの学習が必須となる。汎用マイコンボード H8/3052 を使用していた 2006 年度と 2007 年度は、おおよそ 6 コマを使用してボードならびにセンサ・DC モータ用の回路製作ならびに動作確認を行い、その後プログラミングの学習をスタートさせていた。それに対して、2008 年度から TK400 に更新したことで、2 回で回路製作が完了し、プログラミングの学習を開始することができるようになった。そのため、前期終了までに基本的なライトレースロボットの製作が可能となった。さらに、2014 年度以降は完成品の (LF)TK400SH を使用することで、プログラミングを体験しながら理解する時間をより多く取れるようになった。

TK400 シリーズのプログラミング用のテキストは、当初自作のものを使用した。そのテキスト中に、ロボプロ用に用意したサンプルを豊富に盛り込むことで、自習できる環境を整えた。教員や TA は受講

生からの質問に対応する形をとるので、負担軽減につながる。2016 年度からは、本演習での実体験を基に書籍「実験で学ぶメカトロニクス ～ TK400SH ボード実習～」を出版<sup>[14]</sup>し、それをテキストとして採用している。

ロボプロでは、年度末にチャレンジマッチと称する成果発表会を開催している。これまでのロボプロにおける目標課題を紹介する。2006 年度と 2007 年度は演習の立ち上げということもあり、ライトレースを基本課題とした。また、2008 年度と 2009 年度は、TK400 の導入開始ということで、ライトレースと壁をトレースする課題とした。2010 年度以降は、1.5m × 1.5m の競技フィールド(白色)を用意し、以下に示す課題を設定した。

-2010 年度 3 × 3 区画の格子状のコースの格子点上のいずれか 1 箇所には円筒が置かれており、それを倒すことなくゴールエリアに運ぶ。使用するセンサは、フォトセンサ(ライトレース用)と測距センサ(円筒検出用)である。また、この年度からラジコンサーボを使用することを要求する課題となった。

-2011 年度 3 × 3 区画の格子状のコースのどれか 1 つの区画中央にピンポン球が 1 個置かれており、それをゴールエリアに運ぶ。ただし、コース上には 1 箇所、障害物となる円筒が置かれており、それを回避しなければならない。

-2012 年度 2 × 2 区画の格子状のコースの 2 箇所の区画中央付近にそれぞれピンポン球が 1 個置かれており、それらをゴールに置かれた箱に入れる。2011 年度は単にピンポン球をゴールに運べばよかったが、2012 年度は箱に入れる必要がある。そのため、ロボット上にラジコンサーボを駆動源とするアーム機構が必要となる。

-2013 年度 黒テープで作られた四角の枠内に置かれた 5 個のピンポン球をゴールに置かれた箱に運搬する。

2012 年度ならびに 2013 年度のロボットの基本構成として

- (1) 移動用の 2 個の DC モータ
- (2) ライトレース用の 5 個のフォトセンサ
- (3) 2 個もしくは 3 個の測距センサ
- (4) 2 個のラジコンサーボ

が必要となる。シリアルポート、I<sup>2</sup>C バスインタフェース端子を除いて、ほぼすべての TK400A の入出力端子を利用することになる。この意味で、TK400A を利用して、機械創造演習内で製作を完了できる課題はこの程度ではないか、と考える。

そのために、2014 年度から TK400SH を利用する

こととした。なお、2014年度から2016年度は同じ課題とした。その課題を以下に示す。

3×3区画の格子状のコースを2013年度までに利用した競技フィールド上に作成する(図9)。格子点上の2箇所に円筒を置き、スタート時にロボットに搭載した2個のピンポン球をそれぞれ円筒に投入する。ただし、円筒の1つは開口部が上であるが、もう1つは開口部が下になっているため、円筒を反転させる必要がある。そのための機構をロボット上に搭載させる必要がある。学生が製作したロボットの一例を図10に示す。本課題では、ロボット駆動用の2個のDCモータと2個のラジコンサーボに加えて、ロボットの構成によっては1～2個のDCモータが必要となる。(LF)TK400SHで利用可能なDCモータ用拡張基板を用意し、それを利用させている。

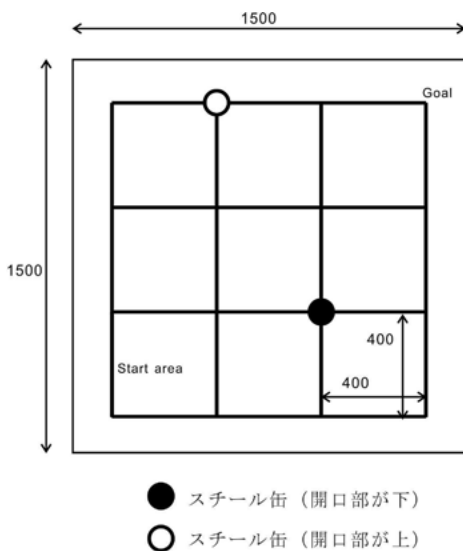


図9 課題コース例

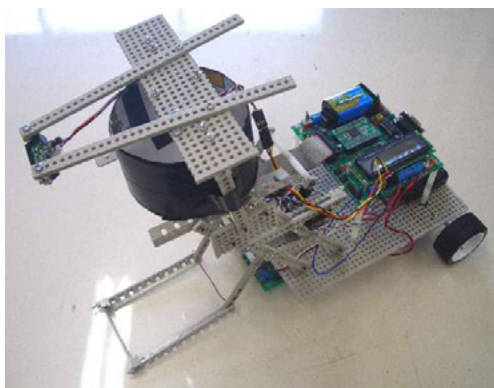


図10 製作したロボットの一例

2017年度は、競技フィールドを20度傾斜させ、坂道をラインレースする課題とした。ラインレースの際に、ロボット上に円筒を置き、それを倒さ

ないでゴールに運ばなければならない。そのため、円筒を倒さないように何らかの制御が必要となる。学生が考えた制御方策はアクティブ方式とパッシブ方式に分類できる。前者に対しては、これまでの課題にないセンサを利用する必要がある。今年度はI<sup>2</sup>Cバスを利用した方位センサや傾斜を計測するための加速度センサを採用するグループがあった。また、ロボットの駆動においても、オムニホイールを使用したり、これまでの二輪独立駆動方式ではなく、操舵方式を採用するグループがあり、多様なロボットの開発が行われた。

### 3.1.2 機械工学実験

講義で学ぶフィードバック制御を実体験させることを目的として、これまで機械工学科3年生を対象に磁気浮上実験を行ってきた(図7)。本実験は電磁石に流す電流を適切に制御することで、鉄球を安定に空中に浮上させることを目指している。2016年度から、図4に示すMCORE-CART(TK400SH搭載)を制御対象として、周波数応答やPID制御を体験する実験に変更した。2～4名のグループに対して、MCORE-CARTとPCをそれぞれ1台用意する。MCORE-CARTはシミュレーション結果とよく一致する実験結果が得られるために、教育上有用な実験装置であると考えられる。また、MCORE-CARTは、筆者の一人が担当している高度ポリテクセンターにおける社会人を対象にしたセミナーでも活用している。本セミナーは、MCORE-CARTを利用して線形制御理論を学習した後、理解を確認するための応用事例として、図6に示すMCORE-IPnの安定化制御に挑戦してもらう内容となっている。受講者からは高評価を得ている。

### 3.2 高等学校における活用<sup>[13]</sup>

図4に示すMCORE-CARTは、学生・社会人だけでなく工業を学ぶ高校生に対する制御教育用としても活用できる。筆者の一人が所属する高校では、3年生を対象にフィードバック制御実習を2017年度から実施している。3年生の実習は、テーマの一部が選択になっており、その内の一つがフィードバック制御実習である。2017年度は対象となる38名中15名が自らの意志で本実習を選択した。生徒は3年生の4月までに、指数関数、三角関数、微分と積分を、さらに専門科目の電気基礎において、複素数を使った計算について学習済みである。

この実習の目的を以下に示す。

- (1) 授業で学ぶ数学がフィードバック制御の中でのように活用されるのか、について学習する。
- (2) 駆動輪の速度制御系とMCORE-CARTの位置制

御系を対象とし、各種制御方式によって何がどのように改善できるのか、について学習する。

実習は9授業時間(150分×3回)を使い、制御対象に対して代表的な制御方式を適用することにより、安定条件や特性の改善について、実験をとおして体験的に学ぶ内容になっている。

実験内容は以下のとおりである。

- (1) 導入：いくつかの時間関数の応答、一次・二次システムにおける特性多項式と極、極と安定性、応答性の関係。
- (2) 速度制御系(駆動輪の速度制御)実験  
P制御とPI制御による速応性と定常偏差の改善。
- (3) 位置制御系(駆動輪の回転角度制御)実験  
周波数応答実験によるボード線図作成とMCORE-CARTのパラメータ同定ならびにP制御、PD制御、PID制御による安定性と定常偏差の改善。  
実習風景を図11に示す。



図11 高校生に対する制御学習風景

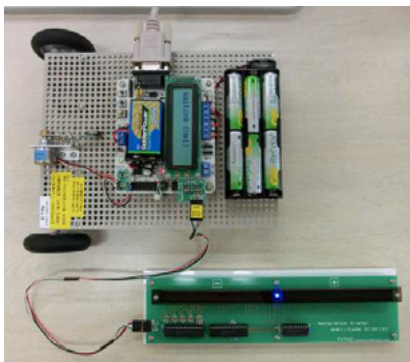


図12 周波数応答実験における入力信号視覚装置

実習はMCORE-CARTとPCを一人一台の環境で行い、制御系の設計や実験データの数値処理にはフリーソフトのScilabを利用している。図12は位置制御系における周波数応答実験の様子である。振幅と周波数を(LF)TK400SHに設定すると、台車が前後方向に移動する。このときの駆動輪回転角を

(LF)TK400SHが取得し、シリアル通信によってパソコンに転送することにより、Scilab上でゲインと位相差を求めている。

また、正弦波入力信号に対して、前後方向に動作する台車から、振幅と位相差の関係を視覚的に実感してもらうために、正弦波入力信号の振幅を80個のバー型LEDで表示する「基準信号表示装置」を製作した。この表示装置は省配線化のためにI<sup>2</sup>Cバスで接続している。(LF)TK400SHはI<sup>2</sup>Cバスをもたないが、汎用I/Oポートを利用したインタフェース回路を設けることで接続が可能になる。

なお、(LF)TK400SHの上位互換性をもつLFTK400RXを搭載すれば、I<sup>2</sup>Cバス端子に直接接続して使用することが可能である。

フィードバック制御実習を学んだ生徒に対して、実験報告書の提出と記述式のアンケートを実施している。回答として得られた主な感想を以下にまとめる。

- (1) 基準信号表示装置を活用した周波数応答実験について

- ・出力信号(台車の動き)と入力信号の動きや遅れが目で確認できたので、わかりやすかった。
- ・もし基準信号表示装置がなかったら、車体と信号の差はグラフでしかわからないけれど、表示器があることにより、一目で差がわかった。
- ・実際に車体の動きと信号の動きを目で見て比較することができるので、どのくらいの差が生まれているのかが一目でわかるので、とてもわかりやすかった。
- ・表示器と実際のロボットの動きとでは、意外に遅延があることに驚いた。

- (2) フィードバック制御実習全般について

- ・P制御からPD、PID制御まで3つの制御をとおして、微分・積分を加えることにより(応答が)目標値に近づき、定常偏差がほぼゼロになったとき、フィードバック制御の良さを知ることができた。
- ・数学で習った微分や積分が制御で扱われていることがわかり、とても興味深く学べてよかったと思った。実際にさまざまな制御を試し、グラフで表示したりロボットを動かしたりと、一目でわかる環境で勉強しやすかった。
- ・フィードバック制御の実習をとおして、改めて数学が大切だと感じた。
- ・フィードバック制御の実習ではたくさんの計算を必要としたので、とても苦労した。グラフもたくさん読み取らなければいけないのも苦労した。

#### 4. 結 言

本稿では、筆者らが開発したメカトロ教育用マイコンボード TK400 シリーズについて、開発の背景から開発の経過について述べた上で、活用事例として大学ならびに高校での取り組みについて紹介した。

TK400 シリーズの開発のきっかけとなった機械創造演習を受講する学生の多くはプログラミングの初心者であり、ほとんどがマイコンを扱った経験をもたない。そのような学生が与えられた課題をクリアするロボットを期間内に完成させる過程で、TK400 シリーズのマイコンボードが果たす役割は大きいと考える。2018 年度以降に利用する予定の LFTK400RX は本シリーズの最上位に位置しており、潜在能力の非常に高いマイコンボードである。学生に対して過負荷にならないように注意しながら、有効に活用方法を検討していきたいと考える。また、(LF)TK400SH や LFTK400RX を搭載した MCORE-CART は、簡単な構造ではあるが、線形制御理論の学習用教材としては有用な制御対象であり、現在、機械工学実験や社会人を対象にしたセミナーで活用している。MCORE-CART はアレンジを加えることでさまざまな制御対象に変わり得る<sup>[15][16]</sup>。この特長を活かして、これからも教材開発を進めていく予定である。

一方、MCORE-CART を活用した高校生に対する制御教育では、フィードバック制御実習のアンケート結果から、実験を通して制御効果を体験的に理解することについて、概ね良好な反応が得られた。その一方で、授業で学ぶ数学がフィードバック制御の中でどのように活用されるのか、という学習においては、数式がもつ意味の理解には大きな障壁があると感じた。授業で学ぶ数学は計算テクニックに偏りがちであり、数式と物理的な現象との対応関係について学ぶ機会が少ない。このため、数式の意味について戸惑う場面が多かった。その一方で、制御対象の伝達関数から、2 次方程式で表される特性方程式の解は、中学で学ぶ「解の公式」によって求められることに大きな反応があった。高校生に対してフィードバック制御について教える場面においては、工学的センスを育むためにも、数式の見方や解釈のしかたに関する助言や指導が必要であると考え。今後、MCORE-CART を有効活用しながら、高校生向けのフィードバック制御学習について学習内容を工夫していく予定である。

#### 参考文献

- [1]水川, 安藤, 春日: "大学学部向けロボット教材開発とその活用実践", 日本ロボット学会誌, 24-1, pp.10--15 (2006).
- [2]竹澤, 長松, 高島, 中村, 大竹, 吉田: "就職活動支援に連携した自律型ロボットものづくり教育", 工学教育, 60-4, pp.44--49 (2012).
- [3]戸田, 奥村, 富山, 古田: "実践して理解する大学新入生向けオリジナルロボット製作実習", 日本ロボット学会誌, 31-2, pp.147--153 (2013).
- [4]川谷: "自律移動型ロボットを対象としたメカトロ教育", SI2007, pp.175--176 (2007).
- [5]高田, 川谷: "マイコンボード TK400 を活用したメカトロニクス教育実践", 工学教育, 64-1, pp.45--53 (2016).
- [6]川谷, 高田: "メカトロ教育用マイコンボードの開発とその応用事例", Robomech2010, 1P1-G10 (2010).
- [7]川谷, 高田: "初学者向けの制御教育用教材の開発", SI2014, 1E1-4, pp.351--354 (2014).
- [8]川谷, 高田: "マイコンボード TK400 を活用したメカトロ教育の事例紹介", 第 57 回自動制御連合講演会, 1A07-6, pp.556--559 (2014).
- [9]川谷, 高田: "マイコンボード TK400SH とその応用事例の紹介", SI2011, 2G1-5, pp.1457--1460, (2011).
- [10]川谷, 高田: "制御教育用教材 MCORE-IP の紹介と活用事例", 工学教育, 61-2, pp.67--72 (2013).
- [11]川谷: "フリーソフトで学ぶ線形制御", 森北出版 (2008).
- [12]平田: "Arduino による Ball & Beam 実験装置", 計測と制御 3 月号, 54, pp.188--191 (2015).
- [13]高田, 川谷: "メカトロ教育用マイコンボード TK400RX の 開 発 ", SI2017, 2C3-04, pp.1721--1725 (2017).
- [14]川谷, 高田: "実験で学ぶメカトロニクス TK400SH ボード実習", 東京電機大出版局, (2015).
- [15]武市, 川谷, 高田: "MCORE-CART を利用したシーソー系の安定化制御", Robomech2017, 2P2-K10 (2017).
- [16]川谷, JIN, 武市, 高田: "台車系を利用した制御理論学習システムの開発", SI2017, 2C3-05, pp.1726--1730 (2017).

## マイクロ引張試験片作製用磁性流体研磨装置の開発と特性評価

松尾 悠\* 竹下 晋正\*

### Development and Evaluation of Magnetic Fluid Grinding Apparatus for Producing a Micro-Sized Tension Test Specimen

Yu MATSUO\* and Kunimasa TAKESHITA\*

(Received February 2, 2018)

The tension properties of micro-sized metallic materials and their joints are the most basic mechanical properties. Nevertheless the conventional JIS standard for tension test is not sufficient to evaluate them. Therefore, it is required to produce a micro-sized tension test specimen of high precision. Magnetic fluid grinding is considered suitable for this purpose because this method enables high precision grinding to a local region.

In this study, we developed a magnetic fluid grinding apparatus for micro-sized round tension test specimen, and evaluated the effect of the upper roller pressing load, the magnet moving speed and the specimen rotating speed. In addition, tension test was carried out using a micro-sized tension test specimen of Ti-Ni alloy produced under appropriate grinding conditions and resulting in the usefulness the magnetic fluid grinding apparatus developed.

**Key Words :** Tension Test, Micro-Sized Round Specimen, Removal Machining, Magnetic Fluid Grinding

#### 1. 緒言

近年、マイクロマシンや医療関連微小器具等の発展は著しい。それに伴って製品を構成するマイクロサイズの金属材料や接合継手の機械的性質を評価する重要性が増してきている。とりわけ引張特性は最も基本となる機械的性質であるが、従来の JIS 規格引張試験ではマイクロサイズの部材を評価するには十分と言えず、マイクロサイズの金属部材を対象とした引張試験規格が必要とされている<sup>[1]</sup>。これまでに、種々の金属材料に対してマイクロサイズ引張試験に関する研究がなされているものの、それらの研究では、主に薄板状試験片を使用しており<sup>[2][3]</sup>、丸棒試験片を使用した研究は筆者の調査した範囲では行われていない。同一素材の板状試験片と丸棒試験片による引張試験を行った場合、くびれ挙動や断面応

力分布は断面形状に依存するため、引張特性は必ずしも一致しないことが報告されている<sup>[4][5]</sup>。そのため、マイクロサイズの金属部材の引張特性評価に際しては、薄板状試験片のみならず丸棒試験片による引張試験も実施されることが望ましい。しかしながら、マイクロサイズの丸棒試験片の作製にあたって、従来の機械加工法では、加工対象物が小さすぎるため困難である。加えて、マイクロサイズの引張試験の場合には、試験片の表面粗さが引張試験結果に影響を及ぼすことが報告されている<sup>[2]</sup>。したがって、マイクロサイズの丸棒引張試験片の作製に際しては、マイクロサイズの部材に適用でき、かつ母材の表面粗さを大きくすることがない、高精度なマイクロ加工方法が求められる。

ところで、製品の最終仕上げ工程や精密加工の研磨技術として磁性流体研磨が注目されている。磁性流体研磨とは、磁性流体中に混合した非磁性体である砥粒の受ける磁気排出力（磁気浮揚力）を利用した研磨法である<sup>[6]</sup>。この研磨法は、従来のラッピングやポリシングのような砥粒が固体に支持された方法

\* 大学院工学研究科機械工学専攻

\* Mechanical Engineering Course, Graduate School of Engineering

と違い、砥粒が液体により支持されている。そのため、支持剛性が小さく砥粒 1 個あたりに作用する加工圧が小さくなり、切り込み量が減少し、加工変質層が小さく高精度な表面研磨を行うことができる<sup>[7][8]</sup>。また、磁性流体が磁場に感応する性質を利用し、磁場により磁性流体を制御することで、局所領域の研磨が可能となる<sup>[9]</sup>。これらのことから、磁性流体研磨は、マイクロサイズの部材を対象とした、局所領域への高精度研磨加工が期待できると考えられる。

そこで、本研究では、マイクロサイズの丸棒型引張試験片を作製するための磁性流体研磨装置を開発し、上部ころ押付け荷重、磁石移動速度、試験片回転速度等の研磨条件が研磨特性に及ぼす影響を調査する。さらに、適切な研磨条件で作製したマイクロサイズ丸棒型引張試験片を用いた引張試験を行い、本作製法の有用性を示す。

## 2. 実験装置及び方法

### 2.1 マイクロ引張試験片作製用磁性流体研磨装置の開発

#### 2.1.1 磁性流体研磨の原理

本研究では、第 1 章で述べたように、マイクロ引張試験片の作製に、磁性流体研磨を用いた。砥粒が流体に支持された流体研磨では、被研磨物の運動に抗する力が作用しないため、何らかの方法でこれを得る必要がある。本研究で適用する、磁性流体研磨では、被研磨物の運動に抗する力は、磁性流体の特性の一つである磁気排出力がこれにあたる。磁気排出力に関する模式図を Fig.1 に示す。磁性流体は高磁場側に引きつけられるため、磁性流体中の非磁性体は相対的に低磁場側に排出される。排出される非磁性体に作用する力が磁気排出力であり、これを利用した研磨法が磁性流体研磨である<sup>[6][10]</sup>。磁性流体研磨では、非磁性体の砥粒を磁性流体中に分散させ、砥粒に作用する磁気排出力で研磨する。

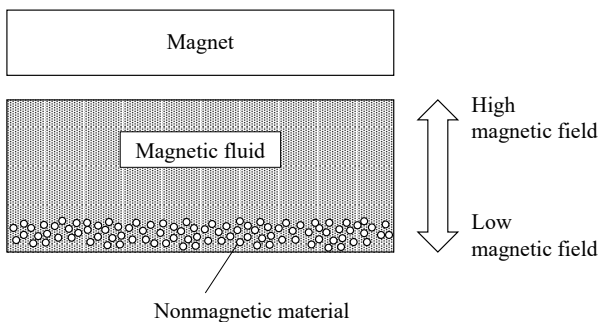


Fig.1 Schematic representation showing magnetic discharge force.

#### 2.1.2 マイクロ引張試験片作製法

磁性流体研磨によるマイクロ引張試験作製法の概略図を Fig.2 に示す。(a)は正面図、(b)は断面図である。Fig.2 に示されるように、砥粒を混合した磁性流体を磁石で保持し、その中で試験片を回転させた。このとき、砥粒は鉛直下方向の磁気排出力を受ける。この磁気排出力が、試験片の回転運動に抗する力となり、試験片表面が研磨される。さらに、従来の磁性流体研磨に関する研究において、加工時に磁性流体に荷重を付加することで、研磨効率が增大するとの報告がなされている<sup>[8][11]</sup>。そこで、本研究においても、加工時に磁性流体に荷重を付加することとした。また、通常サイズの JIS 規格引張試験片では、平行部を有するダンベル型に加工する必要があるが、マイクロ引張試験片でも同様である。しかしながら、前述した研磨法では、磁性流体を保持するための磁石が固定されていることから、局所研磨が行われる。そこで、本研究では、磁石を左右移動させることで平行部の加工を試みた。

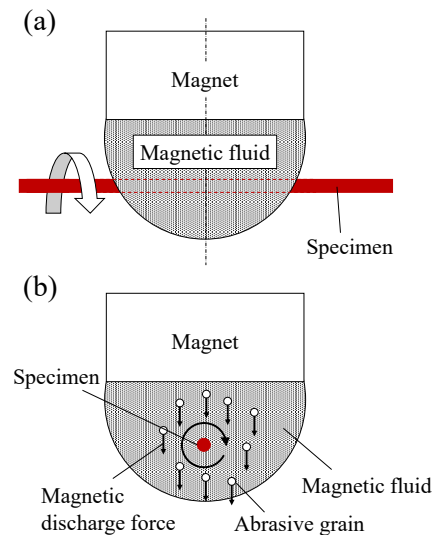


Fig.2 Schematic representation grinding showing a specimen subjected to magnetic fluid grinding, (a) Front view and (b) Sectional view.

#### 2.1.3 マイクロ引張試験片作製用磁性流体研磨装置

前述したマイクロ引張試験片作製法を基に、マイクロ引張試験片作製用磁性流体研磨装置を開発した。Fig.3 に装置の外観を示す。試験片は、ピンバイスを用いてチャッキングした。試験片を回転させるため、ピンバイスを取り付けた軸を、プーリーとベルトを用いてモーターと連動させた。試験片の回転速度は、モーターコントローラを用いて変化させた。平行部を加工するため、電動スライダのステージ上に磁石と固定し、これらを試験片の軸方向に往復運動させた。その際のステージの移動速度は、電動ス

ライダ専用のドライバを用いて設定し、変化させた。Fig.4 に磁性流体を除いた加工領域周辺の画像を示す。Fig.4 に示されるように、本研究では加工圧力を増加させるため、試験片をころを用いて上下から挟み込み、研磨した。上部のころは磁石に取り付け、下部のころはテフロン板の溝に固定した。

上部のころの押付け荷重は、質量  $M$  の磁石、上部のころ及び磁石固定用アルミブロックに対して、プーリーと吊り糸を用いて、他端に質量  $m$  の重りを接続し、これを調節して付加した。このとき、上部のころの押付け荷重  $F$  は、式(1)で表される。 $g$  は重力加速度である。

$$F = Mg - mg \quad (1)$$

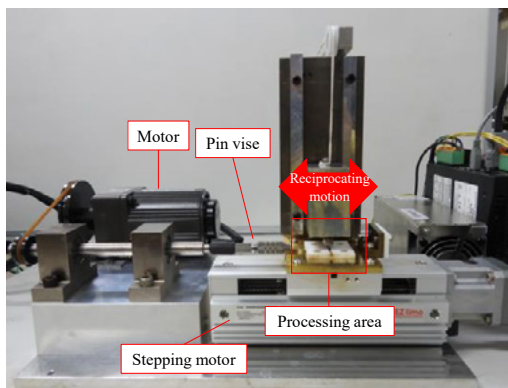


Fig.3 Appearance of a magnetic fluid grinding machine for producing a micro-sized tension test specimen.

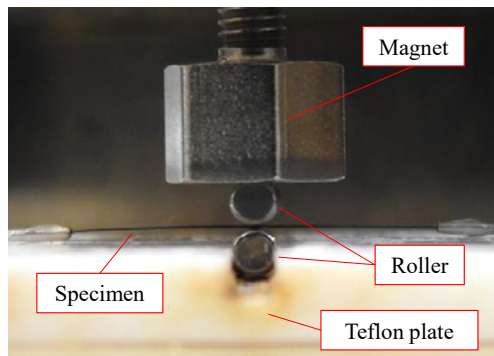


Fig.4 Appearance of enlarged processing area.

Note that magnetic fluid between upper and lower rollers is removed.

## 2.2 実験方法

実験条件を Table 1 に示す。マイクロ引張試験片に対する評価項目は、研磨部の表面粗さと直径減少量とした。表面粗さ  $R_a$  は、平行部における試験片軸方向の長さ  $140\mu\text{m}$  での  $R_a$  を任意の 3 箇所測定し、これらの値の平均値とした。直径減少量  $\Delta D$  は、平行部における任意の 7 箇所での直径減少量  $\Delta D$  を測定し、これらの値の平均値とした。

Table 1 Experimental conditions.

Magnetic fluid	W-40(Water based)
	Saturation magnetization:380G
	Density: $1.29 \times 10^3\text{kg/m}^3$
	Viscosity: $2.5 \times 10^{-2}\text{Pa} \cdot \text{s}$
Workpiece	Super plastic Ti-Ni alloy ( $\phi 100\mu\text{m} \times 50\text{mm}$ , $R_a: 0.10\mu\text{m}$ )
Magnet	SmCo <sub>5</sub> (Magnetic attraction:2.9N)
Roller	SUJ2( $\phi 2\text{mm} \times 4.4\text{mm}$ )
Abrasive grains	Diamond
	Grain size:1 $\mu\text{m}$
	Concentration:10mass%
Grinding time	3600s

## 2.3 実験パターン

本実験では、磁石移動速度、試験片回転速度、上部のころ押付け荷重の研磨条件が研磨特性に及ぼす影響を調査した。実験パターンを以下に示す。

- 試験片回転速度：600~1000rpm  
(磁石移動速度 1.0mm/s, 上部のころ押付け荷重  $9.8 \times 10^{-2}\text{N}$  に固定)
- 上部のころ押付け荷重：  $4.9 \times 10^{-2}$ ~ $9.8 \times 10^{-1}\text{N}$   
(磁石移動速度 1.0mm/s, 試験片回転速度 1000rpm に固定)
- 磁石移動速度：0.1~50mm/s  
(試験片回転速度 1000rpm, 上部のころ押付け荷重  $9.8 \times 10^{-2}\text{N}$  に固定)

それぞれの実験パターン毎に、同一実験条件で 5 回の実験を実施した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 直径減少量に及ぼす影響

#### 3.1.1 試験片回転速度

Fig.5(a)に直径減少量  $\Delta D$  と試験片回転速度の関係を示す。試験片回転速度 600~1400rpm の範囲では、直径減少量  $\Delta D$  は 5~7 $\mu\text{m}$  程度であり、試験片回転速度は直径減少量に影響を及ぼさないことがわかる。磁性流体研磨に利用される磁気排出力は、磁性流体と磁石の磁氣的性質や砥粒の体積には大きく依存するが<sup>[1]</sup>、試験片回転速度にはほとんど影響を受けないと考えられる。磁気排出力以外の研磨に起因する力として、試験片回転速度に影響を受けると考えられる、粘性抵抗力が挙げられる。しかしながら、試験片回転速度 600~1400rpm の範囲では、磁気排出力による研磨が支配的であり、粘性抵抗力は、直径減少量に影響を及ぼさなかったと考えられる。



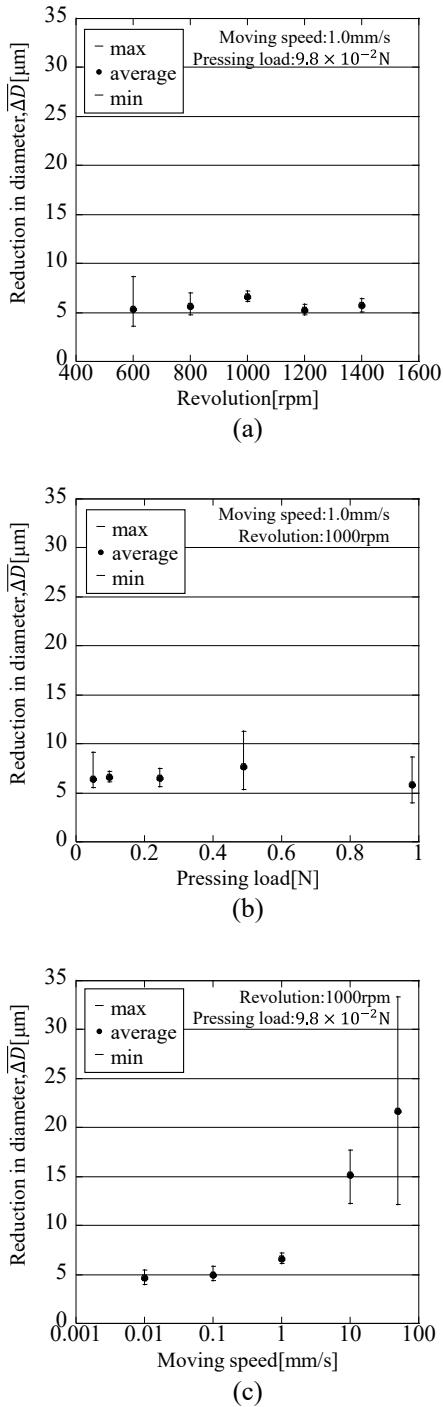


Fig.5 Variations of reduction in diameter with respect to (a)revolution, (b)pressing load and (c)moving speed.

### 3.1.2 上部ころ押付け荷重

Fig.5(b)に直径減少量 $\Delta D$ と上部ころ押付け荷重の関係を示す。上部ころ押付け荷重 $4.9 \times 10^{-2} \sim 9.8 \times 10^{-1}$ Nの範囲では、試験片回転速度の場合と同様に、直径減少量 $\Delta D$ は $5 \sim 7 \mu\text{m}$ 程度であり、上部ころ押付け荷重は直径減少量に影響を及ぼさないことがわかる。Fig.6に研磨時の試験片表面近傍の模式図を示す。上部ころ押付け荷重は、ころと試験片が接近する位置

で磁性流体に作用する<sup>[12]</sup>。したがって、Fig.6に示される(a)の砥粒には磁気排出力 $F_M$ のみが作用し、(b)の砥粒には磁気排出力 $F_M$ に加え上部ころ押付け荷重に起因した力 $F_R$ が作用する。研磨加工を支配する因子は、加工圧力とすべり速度(砥粒と加工物の相対速度)である<sup>[13]</sup>。(a)の砥粒に作用する磁気排出力 $F_M$ は、法線方向と接線方向の力に分解でき、法線方向の成分である $F_M \sin \theta$ は加工圧力として作用し、接線方向の成分である $F_M \cos \theta$ はすべり速度を増加させる力として作用するため、研磨に有効な力として作用していると考えられる。しかしながら、(b)の砥粒に作用する磁気排出力 $F_M$ と上部ころ押付け荷重 $F_R$ に起因した力は、試験片表面で鉛直下方向に働くため、加工圧力としては作用するが、すべり速度を増加させる力としては作用せず、研磨に有効な力として作用していないと考えられる。したがって、上部ころ押付け荷重は、 $4.9 \times 10^{-2} \sim 9.8 \times 10^{-1}$ Nの範囲では、直径減少量に影響を及ぼさなかったと考えられる。

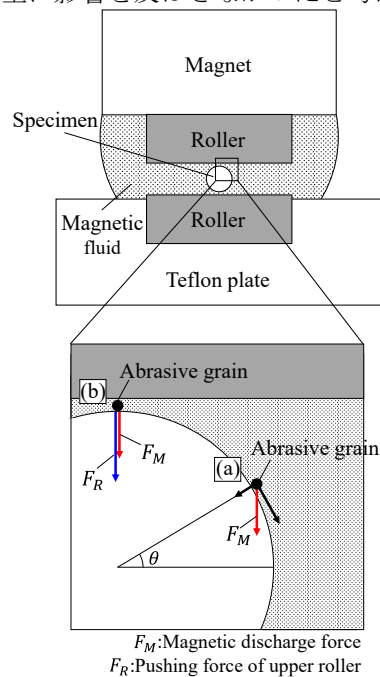


Fig.6 Schematic representation showing abrasive grains on the rotating surface of specimen during the magnetic fluid grinding.

### 3.1.3 磁石移動速度

Fig.5(c)に直径減少量 $\Delta D$ と磁石移動速度の関係を示す。磁石移動速度 1mm/s までは、直径減少量 $\Delta D$ は $5 \mu\text{m}$ 程度であるが、磁石移動速度 1~50mm/s の間では、直径減少量 $\Delta D$ が大幅に増大していることがわかる。本研磨方法では、磁石を試験片軸方向に往復運動させている。そのため、磁性流体中の砥粒には、試験片周方向のすべり速度だけではなく、試験片軸方向のすべり速度も生じていると考えられる。その

ため、磁石移動速度の増大に伴い、試験片軸方向のすべり速度も増大する。その結果、磁石移動速度1~50mm/sの間で直径減少量 $\overline{\Delta D}$ が大幅に増大したと考えられる。

### 3.2 表面粗さに及ぼす影響

Fig.7(a)~(c)に各研磨条件が表面粗さ $\overline{R_a}$ に及ぼす影響を示す。

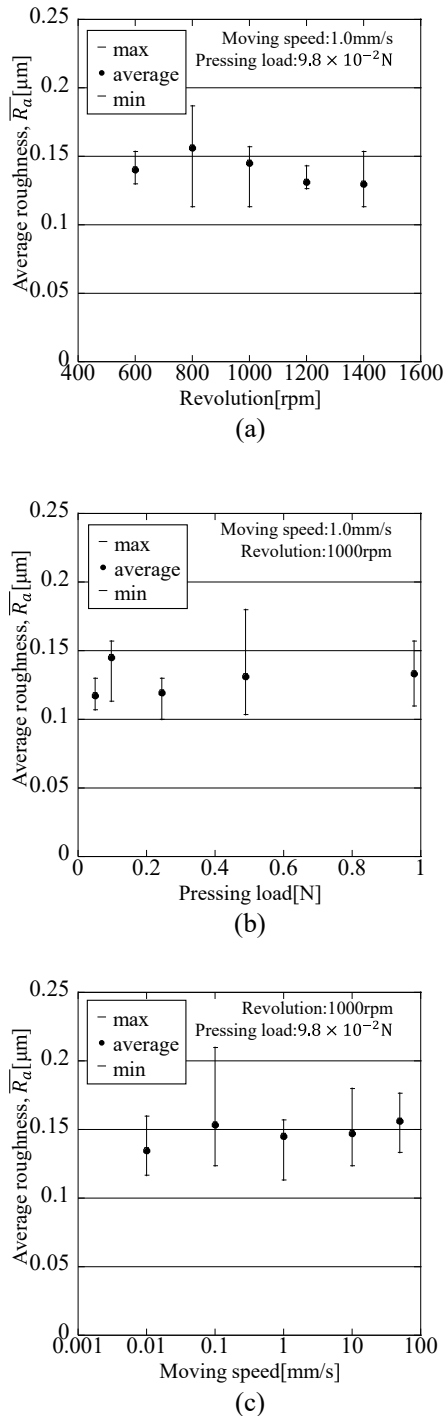


Fig.7 Variations of average roughness with respect to (a)revolution, (b)pressing load and (c)moving speed.

試験片回転速度 600~1400rpm, 上部押付け荷重 $4.9 \times 10^{-2}$ ~ $9.8 \times 10^{-1} \text{ N}$ , 磁石移動速度 0.1~50mm/s の範囲では、いずれの場合も $\overline{R_a}$ は 0.2 $\mu\text{m}$ 以下であることがわかる。研磨前の試験片の表面粗さ( $R_a$ : 0.10 $\mu\text{m}$ )と比較しても 2 倍以下であり、良好な表面粗さが得られた。

ところで、磁気排出力 $F_M$ は、式(2)で表される<sup>[7]</sup>。

$$F_M = V\{(\rho_0 - \rho)g - \overline{M}\nabla H\} \quad (2)$$

ここで、 $V$ は砥粒の体積、 $\rho_0$ は砥粒の密度、 $\rho$ は磁性流体の密度、 $g$ は重力加速度、 $\overline{M}$ は砥粒の位置における磁性流体の平均磁化、 $\nabla H$ は磁束勾配である。式(2)より、磁気勾配を一次元モデルで簡略化し、試験片周辺の磁気排出力 $F_M$ を算出すると、 $1.07 \times 10^{-7} \text{ N}$ 程度となる。これは、非常に微小な力であることから、砥粒の試験片への押し込み深さが小さくなり、そのため良好な表面粗さが得られたと考えられる。

### 4. 引張試験

本マイクロ引張試験片作製法の有用性を示すため、本加工法で作製したマイクロ引張試験片を用いて、試験速度 2.5 $\mu\text{m/s}$ , 標点間距離 1.028mm で引張試験を行った。マイクロ引張試験片には、比較的实验結果にばらつきが少なかった、試験片回転速度 1000rpm, 上部ころ押付け荷重 $9.8 \times 10^{-2} \text{ N}$ , 磁石移動速度 1.0mm/s の研磨条件で作製した 5 本を用いた。Fig.8 にマイクロ引張試験機を示す。引張荷重の測定には、ロードセルを使用した。引張応力は、引張荷重を試験片平行部での元断面積で除した値とし、ひずみは、標点間距離の変化を拡大撮影画像から計測し、その値を基に算出した。Fig.9 に応力-ひずみ曲線の一例を示す。この例では、引張強さは 1483MPa, 破断ひずみは 19.4%であった。これらの値は、Table2 に示す、Ti-Ni 合金を取り扱う古河テクノマテリアルの技術資料<sup>[14]</sup>と比較すると、データの範囲内であることがわかる。また、Fig.10 に破断箇所の画像を示す。破断箇所は研磨部であり、ネッキングを呈した破断であることがわかる。

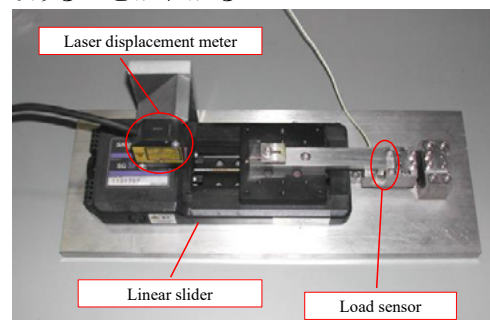


Fig.8 Appearance of a micro tension testing machine.

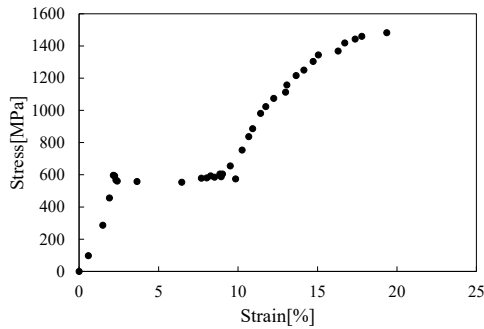


Fig.9 Typical stress-strain curve of a machined Ti-Ni alloy specimen.

Table 2 Mechanical property of Ti-Ni alloy.

Tensile strength [MPa]	1176~1960
Fracture strain [%]	~25

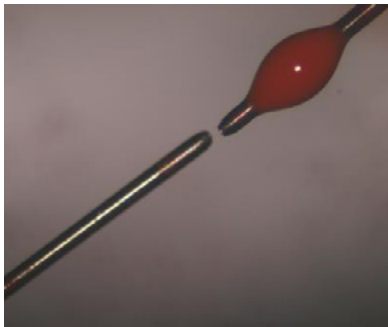


Fig.10 Photograph of a specimen after fracture.

## 5. 結 言

- (1) 磁性流体研磨を適用した，マイクロ引張試験片作製用磁性流体研磨装置を開発した。
- (2) 開発装置を用いて，Ti-Ni合金( $\phi 100\mu\text{m}$ )のマイクロ引張試験片を作製できた。
- (3) 平均表面粗さ $\bar{R}_a$ は， $0.2\mu\text{m}$ 以下であり，研磨前の $R_a(0.10\mu\text{m})$ の2倍程度であった。
- (4) 平行部でネッキングを呈する，引張試験を行うことができた。

## 参考文献

- [1] 三沢俊平：微小試験片材料評価技術の進歩，日本金属学会会報，第31巻(1992)，第11号，pp.1008-1009.
- [2] 鈴木茂和，木下博嗣：微小試験片による引張強度とひずみの評価，福島工業高等専門学校研究紀要，第56号(2015)，pp.13-17.
- [3] 箕島弘二，米田敬詞，米津明生，崎原雅之，黒田浩一：微小引張試験片を用いた局所機械的特性

評価法の開発と塑性加工材への適用，日本機械学会論文集(A編)，第76巻(2010)，第764号，pp.493-499.

- [4] 佐藤四郎：アルミニウム合金板状引張試験の形状が機械的性質に及ぼす影響(第3報)，軽金属，vol.20(1970)，pp.342-348.
- [5] 田川哲也：溶接接合教室 3-2 材料の機械的特性試験，溶接学会誌，vol.77(2008)，No.4，pp.304-311.
- [6] 山口博司：磁性流体，森北出版(2011)，pp.98-100.
- [7] 河田研治，谷泰弘：磁性流体を用いた磁気浮揚研磨法の研究(第1報)，精密工学誌，vol.53(1987)，No.6，pp.953-958.
- [8] 梅原徳次，加藤康司，渡辺純：磁性流体研磨の研究(第3報 浮子を用いた円筒面の研磨特性)，日本機械学会論文集(C編)，第55巻(1989)，第519号，pp.2879-2884.
- [9] 梅原徳次，加藤康司，水口信一，中村茂：磁性流体を用いた局所領域の微小研磨，精密工学誌，vol.60(1994)，No.11，pp.1606-1610.
- [10] 山口博司：磁性流体，森北出版(2011)，pp.110-111.
- [11] 河田研二，谷泰弘：磁性流体を用いた磁気浮揚研磨法の研究(第2報)，精密工学誌，vol.55(1989)，No.4，pp.691-696.
- [12] 日本トライボロジー学会編：トライボロジーハンドブック，養賢堂(2001)，p.34.
- [13] 梅原徳次：研磨技術とトライボロジー，表面技術，vol.49(1998)，No.9，pp.922-927.
- [14] 古河テクノマテリアル：技術資料「古川 NT 合金(形状記憶合金・超弾性合金)について」(1997)，NT合金の諸特性.

# マイクロ抵抗溶接した Ti-Ni 合金とステンレス鋼の異材接合継手の引張強さ

八木 聡志\* 竹下 晋正\*

## Tensile Strength of the Micro-Resistance Welded Dissimilar Joint Composed of Ti-Ni Alloy and Stainless Steel

Satoshi YAGI\* and Kunimasa TAKESHITA\*

(Received February 2, 2018)

Laser welded joints of Ti-Ni alloy and stainless steel have been reported to have low joint strength because brittle intermetallic compounds are formed. In order to avoid formation of brittle intermetallic compounds, Pd was interposed as an insert material between the base materials and performed micro-resistance welding of Ti-Ni alloy round bar and stainless steel round bar. The joint strength of the joints welded by the method was investigated in comparison with that of the joints which the base metal was welded by direct.

The results indicated that, Pd interposed as an insert material suppresses formation of brittle intermetallic compounds. The joint strength of the joint was improved and reached the maximum value of 699 MPa. With respect to length of base metals melted  $L$  value, there was a threshold value and when the  $L$  value exceeded the value, the joint strength decreased.

**Key Words:** Micro-Joining, Micro-Resistance Welding, Joint Strength, Dissimilar Joint, Stainless Steel, Ti-Ni Alloy

### 1. 緒言

近年、マイクロマシンの発展は著しく、それに伴って優れた機械的性質、耐食性及び形状記憶特性や超弾性特性を有する Ti-Ni 合金が重要性を増してきている<sup>[1]</sup>。また、この合金は耐食性と関連して生体適合性が良好なことから、医療分野での利用が進み<sup>[2]</sup>、形状記憶特性を利用した能動屈曲電子内視鏡<sup>[3]</sup>や、超弾性特性を利用した生体管路挿入ワイヤ<sup>[4]</sup>などに利用されている。一方で、これらの医療関連微小器具には耐食性、生体適合性が良好なステンレス鋼も用いられ、高機能化の観点から Ti-Ni 合金と機械的接合法で接合されている<sup>[5],[6]</sup>。しかしながら、医療関連微小器具の更なる小型化や高機能化のためには、Ti-Ni 合金とステンレス鋼の冶金的なマイ

クロ接合が求められている<sup>[6]</sup>。

Ti-Ni 合金とステンレス鋼の冶金的な接合例としては、レーザー溶接した継手の引張強さが報告されているが、継手部が脆いためにその値は 127~159MPa である<sup>[7]</sup>。レーザー溶接を行うと、脆い金属間化合物である  $\text{TiFe}_2$  及び  $\text{TiCr}_2$  を有する凝固部で継手破壊が生じる<sup>[8]</sup>。更に、BAg-8 ろう材による Ti-Ni 合金とステンレス鋼のろう付においても、母材・ろう材間に Fe-Ti 系金属間化合物層が形成され、そのために継手の引張強さが 200~250MPa 程度であることが報告されている<sup>[9]</sup>。したがって、継手強度の向上のためには、脆弱な Fe-Ti 系金属間化合物及び  $\text{TiCr}_2$  の生成を抑制する必要がある、溶加材の利用や、短時間で接合する溶接法が望ましいと考えられる。

Ni をインサートしたレーザー溶接では、 $\text{TiFe}_2$  及び  $\text{TiCr}_2$  の減少により、継手の引張強さが最大 372MPa に達したことが報告されている<sup>[8]</sup>。また、BAg-8 に Ni を添加したろう材による Ti-Ni 合金とステンレス鋼のろう付では、母材・ろう材間に Fe-Ti

\* 大学院工学研究科機械工学専攻

\* Mechanical Engineering Course, Graduate School of Engineering

系金属間化合物層が形成されず、継手の引張強さが約 400MPa まで上昇することも報告されている<sup>[9]</sup>。

しかしながら、Ni の影響で脆弱な金属間化合物の生成を回避できたものの、代わりに Ni<sub>3</sub>Ti が形成され、それ以上の継手強度は得られていない<sup>[8],[9]</sup>。

Ti-Ni 合金とステンレス鋼の冶金的な接合やマイクロ接合において、接合後の継手の引張強さが 400MPa を上回るような例は報告されていない。引張強さを向上させるためには、脆弱な Fe-Ti 系金属間化合物及び TiCr<sub>2</sub> だけでなく、溶加材と母材が反応することによって形成される金属間化合物も考慮しなければいけない事柄である。

ところで、形状記憶合金の中に Ti-Ni-Pd 3 元合金や Ti-Pd 合金があり、高温形状記憶合金として開発されている<sup>[10],[11]</sup>。これらの合金は、脆い金属間化合物を生成しないと考えられる。また、Ti-Pd 合金は Ti-Ni 合金と完全に溶け合う、いわゆる全率固溶体を形成する<sup>[12]</sup>。そのため、Ti-Ni 合金が融解し、その融液中に Pd が溶解した場合、全率固溶体の形成が期待できる。すなわち、Ti-Ni 合金とステンレス鋼の溶接で Pd をインサートした場合、Ti-Ni 合金側で脆弱な金属間化合物の生成を回避できる可能性がある。また、Ti-Pd 合金の Pd を Fe あるいは Cr で置換した TiPd-Fe、TiPd-Cr 合金において、形状記憶効果が現れることが確かめられている<sup>[11]</sup>。このことから Fe あるいは Cr が、Pd が溶解した Ti-Ni 合金中に拡散する場合、脆弱な金属間化合物の生成を回避できる可能性がある。一方で、Pd は Fe と合金を形成する。この Fe-Pd 合金は、強磁場形状記憶合金として知られ靱性において優れている<sup>[13]</sup>。そのため、Fe と Pd が反応した場合、脆弱な金属間化合物の生成を回避できると考えられる。すなわち、Ti-Ni 合金とステンレス鋼の溶接で Pd をインサートした場合に、ステンレス鋼側でも脆弱な金属間化合物の生成を回避できることが期待できる。

そこで本研究では、Ti-Ni 合金とステンレス鋼の間に Pd をインサート材として介在させ、マイクロ抵抗溶接をして高強度の接合を試みる。更に、Ti-Ni 合金とステンレス鋼を直接マイクロ抵抗溶接した場合と、継手の引張強さを比較・検討する。

## 2. 実験方法

### 2.1 接合部材

母材には、直径 100 $\mu$ m、長さ 20mm の Ti-Ni 合金細線（組成：Ti-56mass%Ni）及び SUS304 ステンレス鋼細線を用いた（以後 NT、SUS と略記する）。それぞれの母材の端面をエメリー紙の#2000 まで機

械的研磨及び、1 $\mu$ m ダイヤモンドスラリによるバフ研磨を施した。

Pd をインサートして NT と SUS のマイクロ抵抗溶接をする場合は、電解めっき法で、SUS 端面にめっき層厚さ 1.5 $\mu$ m の Pd めっきを施した。

### 2.2 接合装置及び接合方法

Fig.1 にマイクロ抵抗溶接装置の概略図を示す。接合に際して、まずステージ上で接合部材どうしを CCD カメラで拡大した画面を見ながら設置した。設置の際は、X-Y-Z リニアステージを調整して端面どうしを突合せ、接合部材の中心軸を合せた。その際に、画面から NT 及び SUS の電極端からの突出し長さを計測した。左側のステージにはバネとスライドレールが取り付けられており、バネの復元力（ばね定数 0.11N/mm）を利用して接合部材の端面どうしを加圧した。通電時には、突合せ部に、Ar ガスを流量 0.4L/min（ノズル半径 0.75mm）で上下から吹き付け、接合部の酸化軽減を図った。通電には電圧制御式直流電源装置を用い、接合部材どうしを突合せた状態で電極間に直流電圧を印加した。また、通電時には、電極間に流れる電流をホール素子型電流検出器で計測し、併せて左側のステージの変位（電極間隔の変位量）をレーザー変位計で計測した。

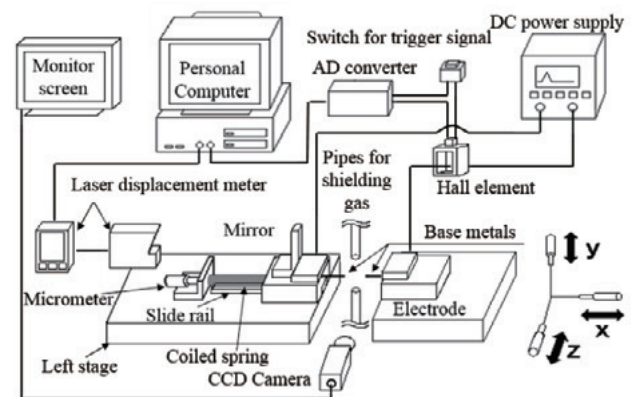


Fig. 1 Schematic drawing of experimental setup for micro-resistance welding.

接合実験では、予備通電を何回か行った後に最終通電を行った。ここで、予備通電の目的は、(1)繰返し通電により接合部材端面どうしの接触状態の改善を行うことと、(2)最終通電時の最高電圧値の決定に必要な電流値データを得ることである。予備通電終了後は、予備通電時に得た電流値データを基に最終通電での最高電圧値を決定した。また、予備通電では、通電終了毎に電極間の抵抗値を抵抗計で計測した。

### 2.3 予備通電

Fig.2 に予備通電時に電極間に印加した電圧波形を示す。Fig.2 中の  $V_p$  は、予備通電毎に順次増加させた。Fig.3 に一回目の予備通電時に計測された電流波形  $I_1$  及び、8 回目の予備通電時に計測された電流波形  $I_8$  をそれぞれ示す。また、この例では予備通電を 8 回行い、 $V_p$  を 1.50V から 2.70V まで予備通電毎に増加させた。

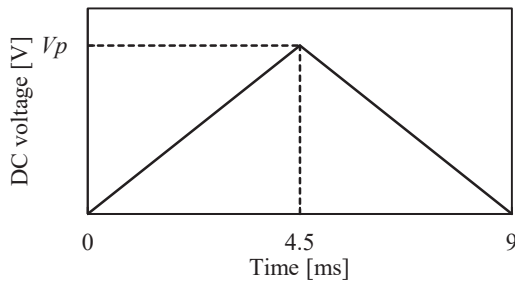


Fig. 2 DC voltage pattern used for each preliminary energizing.

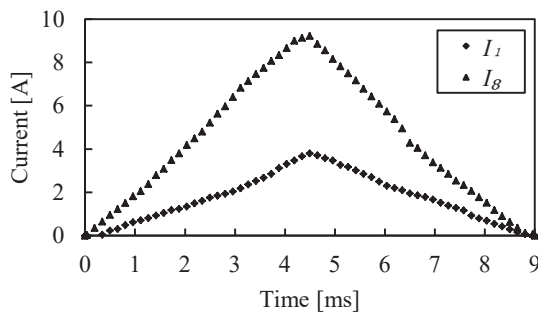


Fig. 3 Electric current curves recorded during 1st and 8th preliminary energizings.

繰り返し通電により接合部材端面どうしの接触状態が改善されると、Fig.4 に示されるように電極間抵抗値の変化が小さくなる。そこで、予備通電で接合部材どうしの接触状態の改善が充分になされたかどうかを判断するために、式(1)で定義される判定値  $T_i$  を導入した。ここで、 $i$ : 予備通電の回数、 $V_{ip}$ :  $i$  回目の予備通電時の最大電圧値、 $I_{ip}$ :  $i$  回目の予備通電時の最大電流値、 $V_i(n)$ :  $i$  回目の予備通電時のサンプリング番号  $n$  における電圧値、 $I_i(n)$ :  $i$  回目の予備通電時のサンプリング番号  $n$  における電流値、 $k$ : AD 変換の際のサンプリング回数である。なお、 $k$  に関しては通電開始から最大電圧  $V_p$  に達する時刻 (=4.5ms)までを対象とした。

$$T_i = 1 - \sum_{n=1}^{k-1} \left( \frac{V_i(n+1) - V_i(n)}{V_{ip}} \right) \left| \frac{V_i(n+1) + V_i(n)}{V_{ip}} - \frac{I_i(n+1) + I_i(n)}{I_{ip}} \right| \quad (1)$$

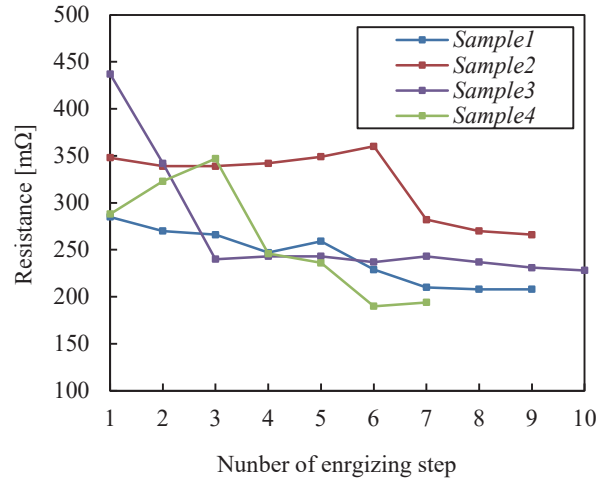


Fig. 4 Changes in resistance between electrodes with repeated preliminary energizings.

Fig.5 に、Fig.3 の電流波形に対応したそれぞれの  $V_i(n)/V_{ip}$  と  $I_i(n)/I_{ip}$  の関係を示す。8 回目の予備通電では  $I_8(n)/I_{8p}$  の値が  $V_8(n)/V_{8p}$  の値に対して、概ね傾き 45 度の直線関係となり、接合部材端面どうしの接触状態がほぼ均一になっていることがわかる。また、1, 8 回目の  $T_i$  はそれぞれ  $T_1=0.14$ ,  $T_8=0.04$  であった。そこで、 $T_i < 0.05$  となったとき、接合部材端面どうしの接触状態の改善が充分になされたとし、予備通電を終了した。

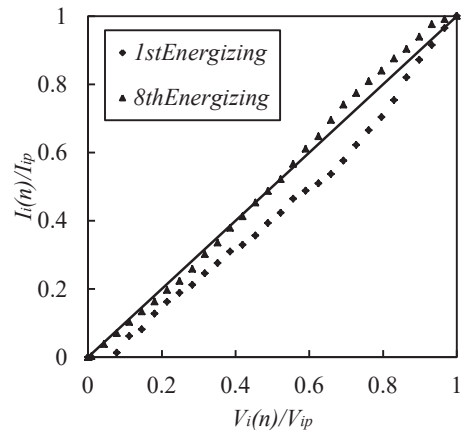


Fig. 5 Plots of  $I_i(n)/I_{ip}$  against  $V_i(n)/V_{ip}$  for 1st and 8th preliminary energizings.

### 2.4 最終通電

最終通電では、継手部で接合部材どうしを十分に融解させるためのジュール熱を発生させる。適切なジュール熱量を推定する指標として、式(2)で表わされるジュール熱量値  $Q_p$  を用いた。

$$Q_p = \sum_{n=1}^{k-1} \left( \frac{V(n+1) + V(n)}{2} - \frac{I(n+1) + I(n)}{2} \times R_{cer} \right) \times \frac{I(n+1) + I(n)}{2} \times \frac{t(n+1) + t(n)}{2} \quad (2)$$

ここで、 $R_{cer}$ は式(3)で表わされる接合部材と電極間の接触抵抗値である。

$$R_{cer} = R_a - R_{cp} - R_{NT} - R_{SUS} \quad (3)$$

なお、 $R_{NT}$ 、 $R_{SUS}$ は、それぞれ以下の式(4)、(5)で表わされる。

$$R_{NT} = \rho_{NT} \frac{L_{NT}}{S} \quad (4)$$

$$R_{SUS} = \rho_{SUS} \frac{L_{SUS}}{S} \quad (5)$$

ここで、 $R_a$ ：電極間の抵抗値、 $R_{cp}$ ：接合部材端面間の接触抵抗、 $R_{NT}$ 及び $R_{SUS}$ ：NT及びSUSの電気抵抗、 $\rho_{NT}$ 及び $\rho_{SUS}$ ：NT及びSUSの比電気抵抗、 $L_{NT}$ 及び $L_{SUS}$ ：NT及びSUSの突出し長さ、 $S$ ：接合部材の断面積である。 $R_{cp}$ の値は、接合部材端面どうしの接触状態の改善が充分になされたとして、無視した。また、 $\rho_{NT}$ は伊藤らの研究<sup>[14]</sup>で、 $\rho_{SUS}$ は田中らの研究<sup>[15]</sup>で用いられている値と同一とした。なお、このときの温度は室温 25℃として計算した。

最終通電時に電極間に印加した電圧波形は、Fig.2に示される予備通電時のそれと同様とした。この例では、2.3章で予備通電を終了した接合部材に  $V_p = 2.8V$  の電圧波形を印加して最終通電を行い、その結果  $Q_p = 45mJ$  であった。Fig.6に最終通電後の接合部材の継手部画像を示す。Fig.6から、融液が加圧力によって継手部から押し出され、余盛が形成されたことがわかる。そこで、 $Q_p = 45mJ$  のとき、継手部の接合部材どうしを十分に融解できるとした。



Fig. 6 External view of a joint.

## 2.5 最終通電時の最大電圧値の決定

最終通電では、 $Q_p = 45mJ$  のとき、継手部の接合部材どうしを十分に融解できた。そこで最終通電では、継手部に  $Q_p = 45mJ$  の熱量が与えられるように、式(6)で表わされる  $V_{p(F)}$  の値を設定した。

$$V_{p(F)} = \frac{3(Q_p + I_{p(F)}^2 t_p R_{cer(F)})}{2I_{p(F)} t_p} \quad (6)$$

ここで、 $V_{p(F)}$ ：最終通電時の最大電圧値、 $I_{p(F)}$ ：最終通電時の最大電流値、 $R_{cer(F)}$ ：最終通電時の接合部材と電極間の接触抵抗値、 $t_p$ ：通電開始から最大

電圧  $V_p$  に達する時刻(=4.5ms)である。最終通電では、予備通電終了時に接合部材端面どうしの接触状態の改善が充分になされ、最終通電時には電圧波形と同一形状の電流が電極間に流れることとした。そのため、 $I_{p(F)}$ 、 $R_{cer(F)}$  は式(7)、(8)で与えられる。

$$I_{p(F)} = \frac{V_{p(F)}}{V_{p(F-1)}} I_{p(F-1)} \quad (7)$$

$$R_{cer(F)} = R_{cer(F-1)} \quad (8)$$

ここで、 $V_{p(F-1)}$ ：最終通電時の一つ前の予備通電時の最大電圧値、 $I_{p(F-1)}$ ：最終通電時の一つ前の予備通電時の最大電流値、 $R_{cer(F-1)}$ ：最終通電時の一つ前の予備通電時の接合部材と電極間の接触抵抗値である。式(6)~(8)から、 $V_{p(F)}$  は式(9)で表わされる。

$$V_{p(F)} = V_{p(F-1)} \times \left( \frac{3Q_p}{2I_{p(F-1)} t_p (V_{p(F-1)} - I_{p(F-1)} R_{cer(F-1)})} \right)^{1/2} \quad (9)$$

## 2.6 引張試験

接合後の継手は、Fig.7に示される磁性流体研磨装置で継手部余盛を除去し、砂時計型試験片に加工した後、室温で引張試験を行った。Fig.8にマイクロ引張試験機を示す。引張試験時の初期クロスヘッド間隔は4mm、試験速度は10µm/sとした。引張強さは、最大引張荷重を試験片の最小元断面積で除した値とした。

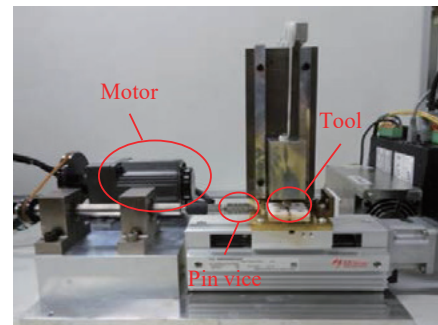


Fig. 7 Magnetic fluid grinding machine for producing a micro-sized tension test specimen.

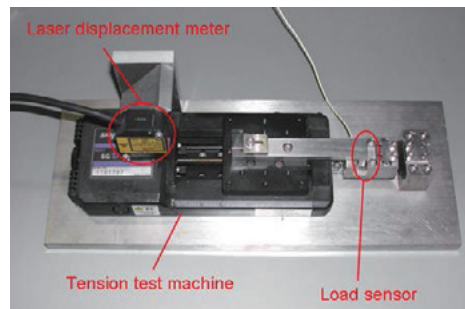


Fig. 8 Micro tensile testing machine.

## 2.7 レーザー変位計による融解長さの計測

接合実験の通電中は、レーザー変位計で電極間隔の変位量を計測した。継手部の母材やインサート金属は、融解直後にほとんどが加圧力によって押し出され余盛となる。Fig.9に2.3章及び2.4章の接合部材を例にした、レーザー変位計で計測された変位を示す。また、このとき計測された変位から、式(10)で表わされる変位量 $D$ を定義し、Fig.9中にこの例での $D_i(i=9)$ を示す。

$$D_i = \frac{1}{221} \left( \sum_{n=2380}^{2600} d_i(n) - \sum_{n=1}^{221} d_i(n) \right) \quad (10)$$

ここで、 $D_i$  :  $i$  回目の通電時の変位量、 $d_i(n)$  :  $i$  回目の通電時のサンプリング番号  $n$  における変位である。また、 $n=1\sim 221$  は  $0\sim 34\text{ms}$  間、 $n=2380\sim 2600$  は  $366\sim 400\text{ms}$  間におけるサンプリング番号である。Fig.9 から、変位が急激に上昇してピーク値をとり、その後急激に下降して徐々に緩やかに下降していくことがわかる。また、6 回目の予備通電時では上昇前と下降後で変位量がほとんど認められず  $D_6=0\mu\text{m}$  であった。一方 7 回目、8 回目の予備通電時及び最終通電時では、上昇前と下降後で変位量が認められ  $D_7=3\mu\text{m}$ 、 $D_8=5\mu\text{m}$ 、 $D_9=6\mu\text{m}$  であった。このことから、7 回目、8 回目の予備通電時及び最終通電時には、継手部の母材やインサート金属が融解して、その直後にほとんどが加圧力によって押し出されたと考えられる。そこで、この例では、最終通電時及びその一つ前の通電時、その二つ前の通電時に継手部の母材やインサート金属が融解したとして、それぞれの通電時の変位量  $D_9$ 、 $D_8$ 、 $D_7$  の和を融解長さ  $L$  とした。この例での融解長さ  $L$  を Fig.9 中に示す。

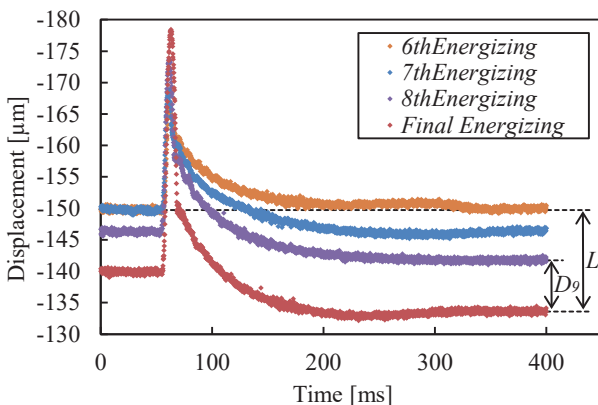


Fig. 9 Variations of displacement between electrodes with time for each energizing.

## 2.8 破断面観察方法

引張試験後、破断面を走査型電子顕微鏡 (SEM)

の反射電子像による観察及び、エネルギー分散型 X 線分析 (EDX) による元素分析を行った。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 引張試験結果

接合後、NT と SUS の直接マイクロ抵抗溶接 (以後直接溶接と略記する) で接合した継手 6 本と、Pd をインサートしてマイクロ抵抗溶接 (以後 Pd インサート溶接と略記する) で接合した継手 13 本の引張試験を行った。Fig.10 に引張強さと融解長さの関係を示す。直接溶接で接合した継手の引張強さは、最高 634MPa、最低 501MPa であり試験片 6 本の平均引張強さは 558MPa であった。Pd インサート溶接で接合した継手の引張強さは、最高 699MPa、最低 503MPa であり、試験片 13 本の平均引張強さは 592MPa であった。また、Fig.10 に示されるように Pd インサート溶接の場合、引張強さが 600MPa 以上の継手は 7 本中 6 本が  $L < 15\mu\text{m}$  であり、一方引張強さが 600MPa 以下の継手は 6 本中 5 本が  $L \geq 15\mu\text{m}$  であった。

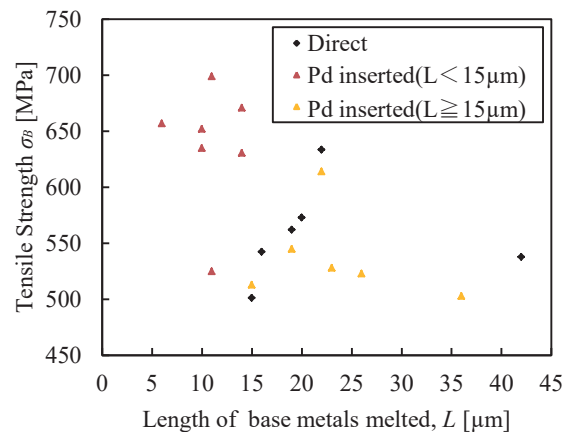


Fig. 10 Plots of tensile strengths against length of base metals melted.

### 3.2 冷却速度

本研究では、抵抗溶接でマイクロサイズの試験片を接合したため、継手部での冷却速度比較的大きいと考えられる。そこで、本溶接法による冷却速度を、比較的大きな部材をレーザー溶接した場合のそれと比較する。比較的大きな部材の寸法は、長さ 100mm、幅 50mm、厚さ 0.6mm の Ti-Ni 合金薄板及び SUS304 薄板とした。温度解析には、シミュレーション・ソフト(Quick Welder)を用いた。継手部断面中央での温度履歴曲線から、1700~1590K の温度範囲での平均冷却速度を算出した。また、マイクロ抵抗溶接の場合の温度解析には、筆者の一人が作成したシミュレーション・ソフト<sup>[14],[15]</sup>を用いた。Fig.11 に、それぞれ



の場合の継手部断面中央での温度履歴曲線を示す。マイクロ抵抗溶接の場合の平均冷却速度は  $8.8 \times 10^4 \text{K/s}$ 、比較的大きな部材をレーザー溶接した場合のそれは  $8.6 \times 10^2 \text{K/s}$  であり、マイクロ抵抗溶接の場合が 100 倍以上大きい。そのため、マイクロ抵抗溶接時の凝固の際に、金属元素が拡散可能な時間が短くなり、その結果金属間化合物の成長が抑制できたと考えられる。

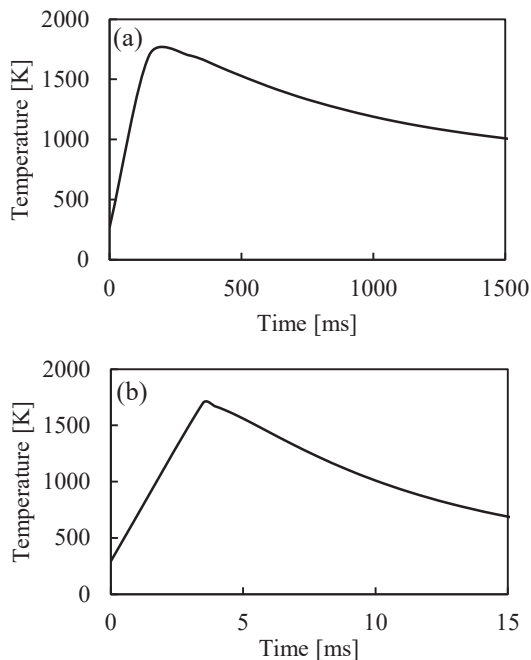


Fig. 11 Temperature histories at the middle points in the cross sections of the weld joints: (a) laser welding and (b) micro-resistance welding.

### 3.3 直接溶接

Table 1 に直接溶接で接合した継手 J1~J6 の引張強さ  $\sigma_B$  値を示す。

Table 1 values of tensile strength  $\sigma_B$  for the joints directly welded.

joint ID	J1	J2	J3	J4	J5	J6
$\sigma_B$ [MPa]	634	573	562	542	538	501

Fig.12(a)に継手 J1 の、Fig.12(b)に継手 J4 の、Fig.12(c)に継手 J6 の破断面 (SUS 側) の SEM 画像を示す。Fig.12(a)から継手 J1 の破断面では、半分以上の領域でディンプル模様が、残りの領域で比較的平坦な面及びリバーパターン模様が確認でき、延性破面と脆性破面が混在することがわかる。Fig.12(b)から継手 J4 の破断面では、継手 J1 の場合と同様の模様が確認できるが、比較するとディンプル模様が確認できる領域が狭く、リバーパターン模様が確認できる領域が広いことがわかる。さらに、Fig.12(c)

から継手 J6 の破断面では、比較的平坦な面及びリバーパターン模様が確認できる領域が大部分を占めていることがわかる。このことから、 $\sigma_B$  値が高い継手ほどディンプル模様が確認できる領域が広く、 $\sigma_B$  値が低い継手ほど比較的平坦な面及びリバーパターン模様が確認できる領域が広い。

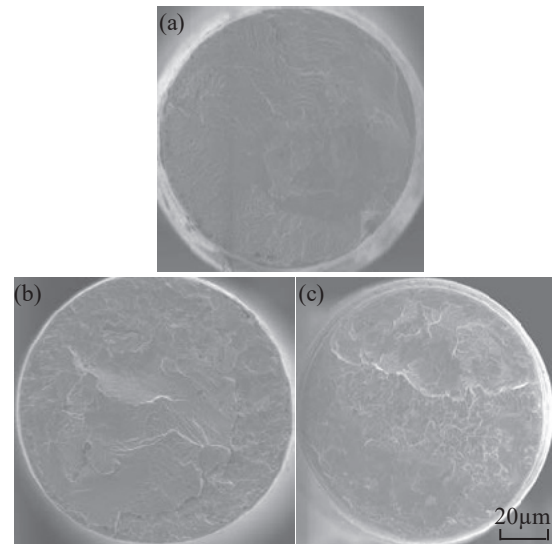


Fig. 12 SEM photographs showing fracture surfaces of the directing welded for: (a) J1, (b) J4 and (c) J6.

Fig.13(a)に継手 J1 の、Fig.13(b)に継手 J6 の破断面 (SUS 側) での EDX 画像を示す。Fig.13(a)から継手 J1 の破断面では、比較的平坦な面及びリバーパターン模様が確認できる領域で、Fe 元素が存在していることがわかる。また、Fig.13(b)から継手 J6 の破断面では、比較的平坦な面が確認できる領域で Fe 元素、Ni 元素及び Ti 元素が、リバーパターン模様が確認できる領域で Ti 元素及び Ni 元素が存在していることがわかる。このことから、リバーパターン模様が確認できる領域では、主に Ti 元素及び Ni 元素が存在し、これらの元素が金属間化合物を形成したことで脆性破壊が起きたと考えられる。

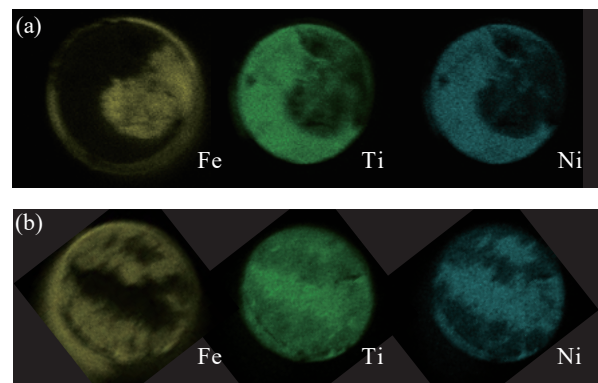


Fig. 13 EDX images observed at the fracture surfaces of the joints directing welded for: (a) J1 and (b) J6.

### 3.4 Pd インサート溶接

Table2 に Pd インサート溶接で接合した継手 J7~J19 の  $\sigma_B$  値及び  $L$  値を示す。

Table 2 values of  $\sigma_B$  and  $L$  for the joints welded with insert Pd.

joint ID	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13
$\sigma_B$ [MPa]	699	671	657	652	635	631	614
$L$ [ $\mu\text{m}$ ]	11	14	6	10	10	14	22

J14	J15	J16	J17	J18	J19
545	528	525	523	513	503
19	23	11	26	15	36

Fig.14(a)に継手 J7 の, Fig.14(b)に継手 J8 の, Fig.14(c)に継手 J16 の, Fig.14(d)に継手 J19 の破断面 (SUS 側) の SEM 画像を示す. Fig.14 から継手 J7, J8 の破断面ではディンプル模様が, 継手 J16, J19 の破断面ではリバーパターン模様が主に確認でき, 直接接合の場合と同様に,  $\sigma_B$  値が高い継手ほどディンプル模様が確認できる領域が広く,  $\sigma_B$  値が低い継手ほどリバーパターン模様が確認できる領域が広い。

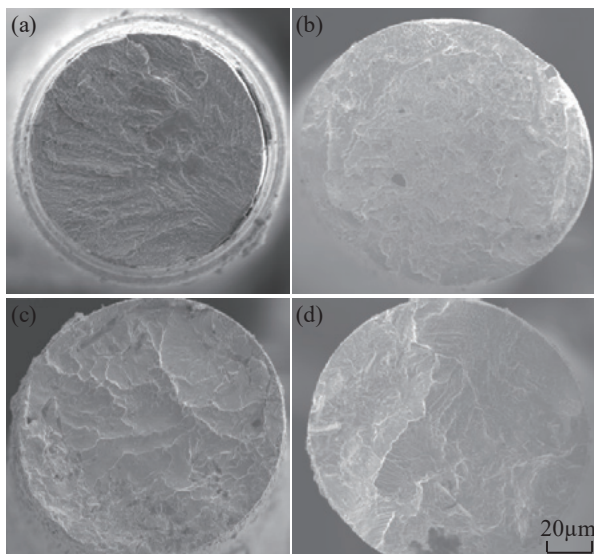


Fig. 14 SEM photographs showing fracture surfaces of the joints welded with insert Pd for: (a) J7, (b) J8, (c) J16 and (d) J19.

Fig.15(a)に継手 J8 の, Fig.15(b)に継手 J16 の, Fig.15(c)に継手 J19 の破断面 (SUS 側) での EDX 画像を示す. Fig.15(a)から継手 J8 の破断面ではディンプル模様が確認できる領域で, Pd 元素が存在していることがわかる. このことから, Pd が他の元素と合金を形成したことによって延性破壊が起きたと考え

られる. すなわち, Pd が存在する範囲で脆弱な金属間化合物の生成を回避できたと考えられる. また, Fig.15(b), (c)から継手 J16, J19 の破断面では, リバーパターン模様が確認できる領域で Ti 元素及び Ni 元素が存在していることがわかる. 直接溶接の場合と同様に Ni-Ti 系金属間化合物が形成されたことが強度低下の原因と推察される. この場合は,  $L$  値の増加に伴って, 融解した NT に Pd が希釈され, その結果 Ni-Ti 系金属間化合物の生成を回避することが困難になったと考えられる. また, Fig.15(c)から継手 J19 の破断面では, 比較的平坦な面及び微細なリバーパターン模様が確認できる領域で, Pd 元素及び Fe 元素が存在していることがわかる.  $L$  値の増加に伴って, SUS が融解したため Fe-Pd 合金が形成され, その結果引張強さが低下したと考えられる.

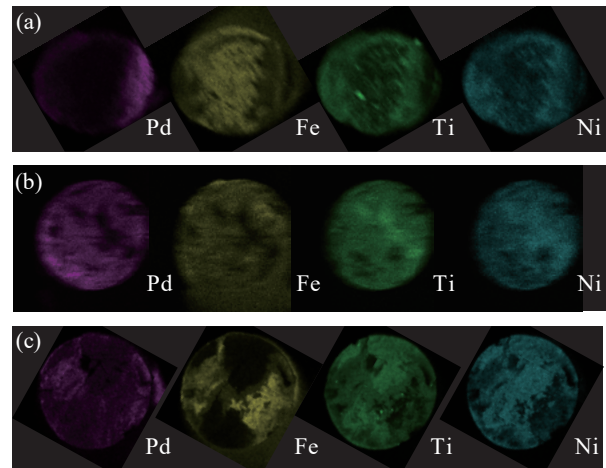


Fig. 15 EDX images observed at the fracture surfaces of the joints welded with insert Pd for: (a) J8 and (b) J16 and (c) J19.

## 4. 結言

Pd をインサート材として介在させ Ti-Ni 合金とステンレス鋼をマイクロ抵抗溶接した場合と, Ti-Ni 合金とステンレス鋼を直接マイクロ抵抗溶接した場合について, 継手の引張強さを比較・検討した. 得られた知見を以下に示す.

- (1) 直接マイクロ抵抗溶接した場合, 引張強さが最大値 634MPa に達した.
- (2) Pd をインサート材として介在させた場合, 継手の引張強さが向上し, 最大値 699MPa に達した. 母材融解長さ  $L$  値に関して, しきい値があり  $L$  値がその値を越えると引張強さが低下した.
- (3) Pd が存在する範囲で, 脆弱な金属間化合物の生成を抑制でき継手破断面でディンプル模様が確認できた. しかしながら,  $L$  値がしきい値を越えた継手では主に脆性破面が確認された.

## 参考文献

- のマイクロ接合, 溶接学会論文集第, 31 巻第 2 号(2013), pp126-132.
- [1] 樋口俊郎: マイクロマシン技術総覧, (株)産業技術サービスセンター(2003), pp631-642.
  - [2] 西田稔, 山内清, 大方一三: 形状記憶合金の基礎と応用, 資源と素材, Vol.115(1999), pp.713-718.
  - [3] W.makishi, T.matsunaga, M.esashi and Y.HAga : Active Bending Electric Endoscope Using Shape Memory Alloy Coil Actuators, IEEJ Transactions on Sensors and Micromachines, 127-2(2007), pp75-81. (in Japanese)
  - [4] S.Saitoh and D.kawanabe : 生体管路挿入用ワイヤ, IPP No., Wo2004/084739. (in Japanese)
  - [5] <http://www.furukawa-ftm.com/nt/faq.htm> (HP : Furukawa Techno Material Co.Ltd.)
  - [6] Hastings John M.et al. : 形状記憶合金成形ワイヤまたはプルワイヤを用いるカテーテルならびにその製造方法, IPP No., Wo2008/115665. (in Japanese)
  - [7] QIU Xiao-ming, SuN Da-qian, LI Ming-gao, LIU Wei-hong : Microstructures and properties of welded joint of TiNi shape memory alloy and stainless steel, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, vol14, (2004), pp 475-479.
  - [8] H.M. Li, D.Q. Sun, X.L. Cai, P. Dong, W.Q. Wang : Laser welding of TiNi shape memory alloy and stainless steel using Ni interlayer, Materials & Design, vol.39 (2012), pp 285-293.
  - [9] 関政則, 山本弘樹, 野尻誠, 上西啓介, 小林鉦二郎: Ti-Ni 形状記憶合金とステンレス鋼のろう付, 日本金属学会誌, 第 64 巻第 8 号(2000), pp632-640.
  - [10] 石田章子, 澤口孝宏, 佐藤守夫: 形状記憶合金薄膜とその応用, 金属, Vol.74 No.2(2004), pp33-37.
  - [11] 佐分利敏夫: ニッケル・チタン系形状記憶合金の開発研究の現状, 金属, Vol.59 No.8(1989), pp11-18.
  - [12] 宮崎修一, 佐久間俊雄, 渋谷壽一: 形状記憶合金の応用展開, シーエムシー出版(2006), p18.
  - [13] 掛下知行: 期待される強磁性形状記憶合金, 金属, Vol.74 No.2(2004), pp15-19.
  - [14] 田中優, 山口毅, 竹下晋正: 2 段抵抗ろう付法における接合過程の数値シミュレーション, 溶接学会論文集第, 28 巻第 1 号(2010), pp1-9.
  - [15] 伊藤拓, 竹下晋正: 数値シミュレーション援用抵抗ろう付法による Ti-Ni 合金とステンレス鋼

## 福井大学工学部及び大学院工学研究科紀要編集委員会

前田 寧	紀要編集委員長		
吉田 達哉	機械工学専攻	小森 理	電気・電子工学専攻
石井 大輔	情報・メディア工学専攻	明石 行生	建築建設工学専攻
岡田 敬志	材料開発工学専攻	杉原 伸治	生物応用化学専攻
田嶋 直樹	物理工学専攻	片山 正純	知能システム工学専攻
中根 幸治	繊維先端工学専攻	川崎 大介	原子力・エネルギー安全工学専攻

工学研究科研究活動一覧

<http://www.eng.u-fukui.ac.jp/ResearchActivities/index.html>

福井大学附属図書館 学術機関リポジトリ (工学研究科関連)

<http://repo.flib.u-fukui.ac.jp/dspace/handle/10098/572>

このページ内の「日付」ボタンをクリックすると年代順のリストが表示されます。

国立情報学研究所 論文情報ナビゲータ (福井大学関連) のURL (書誌情報のみ)

[http://ci.nii.ac.jp/vol\\_issue/nels/AA12208150\\_jp.html](http://ci.nii.ac.jp/vol_issue/nels/AA12208150_jp.html)

## 福井大学工学研究科研究報告

2018年3月23日 印刷

2018年3月27日 発行

## 福井大学大学院工学研究科

〒910-8507 福井市文京3丁目9-1

電話 (0776) 27-8016 (総合戦略部門研究推進課)

印刷所 能登印刷株式会社

