

鳥取大学大学院工学研究科/工学部

研 究 報 告

Reports of the Graduate School/ Faculty of Engineering
Tottori University



Vol.48 February 2018

平成30年2月

研究報告第48巻 (通巻51号)

総説

- 1) 研究活動の総括にかえて
— Hopf/Hopf モード相互作用のノーマルフォーム
藤村 薫 1
- 2) II-VI族化合物半導体から酸化物エレクトロニクスとニューラルネットワークまで
— 大学における教育・研究生活40年を振り返って —
岸田 悟 7
- 3) プロセス制御から生産情報システムへ
北村 章 24
- 4) Software Reliability Modeling Research and Its Brief History in My Career
山田 茂 34
- 5) 液相電解自動合成法によるオリゴ糖の自在合成を目指して
野上 敏材 44
- 業績リスト -2017- 53

講座による編集

○地域安全工学センター

・2016年鳥取県中部の地震の背景と強震動

- 香川 敬生・野口 竜也 91

REPORTS OF THE GRADUATE SCHOOL/FACULTY OF ENGINEERING
TOTTORI UNIVERSITY
Volume 48, February 2018

1) Normal Form for Hopf/Hopf Mode Interaction	
Kaoru FUJIMURA	1
2) Development of Materials for II-VI Compounds to Oxide Electronics & Neural Networks - Remembering Study Life for 40 Years in the Department of Information Electronics	
Satoru KISHIDA	7
3) From Process Control to Manufacturing Information System	
Akira Kitamura	2 4
4) Software Reliability Modeling Research and Its Brief History in My Career	
Shigeru YAMADA	3 4
5) Towards Development of a Practical Method for Oligosaccharide Synthesis Based on Automated Electrochemical Solution-Phase Synthesis	
Toshiki NOKAMI	4 4
Abstracts – 2017 –	5 3
○Center for Regional Management and Safety Engineering	
• Seismological Background and Strong Ground Motions of the 2016 Central Tottori Earthquake	
Takao KAGAWA, Tatsuya NOGUCHI	9 1

研究活動の総括にかえて — Hopf/Hopf モード相互作用のノーマルフォーム

藤村 薫

鳥取大学大学院工学研究科応用数理工学講座

Normal Form for Hopf/Hopf Mode Interaction

Kaoru FUJIMURA

Department of Applied Mathematics and Physics, Graduate School of Engineering

Tottori University, Tottori 680-8552, Japan

Email: kaoru@damp.tottori-u.ac.jp

Abstract: Hopf/Hopf mode interaction is governed by amplitude equations in $\mathbb{R}^4$. In this report, we derive a normal form to the amplitude equations by conducting a near-identity transformation. In the course of the derivation, the 1 : 2 and 1 : 3 resonances are shown to arise naturally.

Key Words: Mode interaction, Amplitude equations, Normal form, Near-identity transformation.

1. はじめに

私は、1978 年 4 月に日本原子力研究所において研究活動の一步を踏み出し、1997 年 4 月に鳥取大学工学部応用数理工学科に着任した。振り返ってみると 40 年にわたってもっぱら流れの安定性、とくにモード相互作用を記述する振幅方程式を中心とした弱非線形解析に関する研究を続けてきたことになる。

無限次元力学系である流体方程式から低次元力学系である振幅方程式を導出することによって、流体方程式の解の局所分岐構造など定性的性質を調べることが可能である。振幅方程式は、弱非線形解析を行う上での礎であり、私はこれまで様々な流体系に対して振幅方程式を導いてきた。

本稿では、過去 40 年にわたって行った研究内容を懐古的に紹介する代わりに、振幅方程式について最近行ったある練習問題に対する解答*を紹介することで、定年退職予定者に課せられる研究報告（総説）執筆の責を果たすことにしたい。

2. 振幅方程式

まず、流体方程式の厳密解として定常解（主流）が求められていると仮定する。レイノルズ数に代表される制御パラメーター R を変化させるとき、主

流について線形化された流体方程式の固有値 $\sigma \in \mathbb{C}$ が、 $R = R_c$ において複素 σ 平面上の虚軸を複素共役対として横切る状況（Hopf 分岐）を考える。線形臨界点 $R = R_c$ 近傍において、流れに含まれる攪乱 $\hat{\psi}(\mathbf{x}, t)$ を

$$\hat{\psi} = z(t) \phi(\mathbf{x}) e^{i\omega t} + \bar{z} \bar{\phi} e^{-i\omega t} + \text{h.o.t.}, \quad (\omega \in \mathbb{R}) \quad (1)$$

と書こう。ここで、 $\phi(\mathbf{x})$ は固有関数、h.o.t. は高次の項、また、overbar は複素共役を意味する。

複素振幅 $z(t)$ の時間発展を記述する振幅方程式としてもっとも簡単でよく知られたものは Landau によって 1944 年に導入された Stuart-Landau 方程式

$$\frac{dz}{dt} = \sigma z + \lambda |z|^2 z, \quad (\sigma, \lambda \in \mathbb{C}) \quad (2)$$

である。この方程式は、 $R = R_c$ 近傍において、多重尺度法（たとえば [2]）や中心多様体定理の方法（たとえば [3]）などを用いることで導出される。（定常解を記述する分岐方程式に関しては Liapunov-Schmidt 法もしばしば用いられる。）

さて、この方程式の右辺の形は、流体方程式を用いなくても、対称性の議論だけから決定することが可能である（同変分岐理論 [4]）。いま、(2) 式の右辺を $g(z)$ と書こう。円周群 S^1 の $\mathbb{C} \equiv \mathbb{R}^2$ 上の作用

$$\theta \cdot z = e^{i\theta} z \quad (\theta \in S^1, z \in \mathbb{C})$$

*当初は研究の一環として行った解析であるが、この総説の締め切り直前になって、2 重 Hopf 分岐のノーマルフォームを求める問題が文献 [1] の練習問題として記載されていたことに気づいた。

に対してベクトル場 $g(z)$ が

$$g(\theta \cdot z) = \theta \cdot g(z) \quad \text{for all } \theta \in S^1 \quad (3)$$

を満たすとき、(2) は $z \rightarrow e^{i\theta} z$ の下に不変である。(3) 式が成り立つためには、ベクトル場 $g(z)$ は $z(p(u) + iq(u))$, $u = |z|^2$, $p, q: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ の形をとることが簡単な計算から分かる。不変多項式 p と q を原点周りで Taylor 展開して最低次の近似で打ち切ると、(2) 式が得られる。

ところで、(2) 式の右辺はもっとも単純な形か？という問いに対する答えはノーマルフォームによって与えられる。

§3 ならびに §4 では文献 [1], [5] にしたがってノーマルフォーム導出の要点を述べ、§5 ならびに §6 では Hopf/Hopf 相互作用にそれを適用する。

3. 近恒等変換とノーマルフォーム

次の一般的な n 次元振幅方程式を出発点にする：

$$\frac{dx}{dt} = g(x), \quad g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n.$$

原点における $g(x)$ の Jacobi 行列を Λ と名付け、

$$\frac{dx}{dt} = g(x) = \Lambda x + g_2(x) + O(\|x\|^3)$$

の形に書こう。

さて、 $x = y + P_2(y) + \dots$ によって定義される近恒等変換を導入すると、次を得る：

$$\frac{dy}{dt} = \left[Id - \frac{dP_2}{dy} + \dots \right].$$

$$[\Lambda(y + P_2(y) + \dots) + g_2(y + P_2(y) + \dots) + \dots].$$

我々の目的は、近恒等変換によってノーマルフォームに含まれる項を最小限に抑えることである。たとえば $O(\|x\|^2)$ では

$$-\frac{dP_2}{dy} \Lambda y + \Lambda P_2(y) + g_2(y) = 0$$

を満たすように $P_2(y)$ を選ぶことができるなら、2 次の非線形項 $g_2(y)$ をノーマルフォームから消し去ることが可能であろう。

$$L_2 P_2(y) := \frac{dP_2}{dy} \Lambda y - \Lambda P_2(y)$$

によって定義される線形写像 L_2 に対して $H_2 = L_2(H_2) \oplus G_2$ が成り立つとき、 G_2 は $L_2(H_2)$ の補

空間である。 $G_2 = \emptyset$, すなわち $L_2(H_2) = H_2$ ならば、2 次の非線形項はすべて消去することができる。逆に、 G_2 が空でないときは、 G_2 を張る非線形項は消去できない。

4. $n = 2$ の例：Hopf 分岐のノーマルフォーム

議論を具体的に進めるための取りかかりとして、文献 [5] の Hopf 分岐 ($n = 2$) の例を復習しよう。 $\omega t \rightarrow t$ によって (1) 式から ω を 1 を消去する。

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} y_r \\ y_i \end{pmatrix}$$

を仮定し、近恒等変換に含まれる 2 次の非線形関数 $P_2(y)$ として

$$P_2^r(y) = a_1 y_r^2 + b_1 y_r y_i + c_1 y_i^2,$$

$$P_2^i(y) = a_2 y_r^2 + b_2 y_r y_i + c_2 y_i^2$$

を導入する。すなわち H_2 は

$$H_2 = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} y_r^2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_r y_i \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_i^2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ y_r^2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ y_r y_i \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ y_i^2 \end{pmatrix} \right\}$$

のように 6 つのベクトルによって生成される。各々の成分に対して L_2 を作用させると

$$\Lambda y = \begin{pmatrix} -y_i \\ y_r \end{pmatrix}$$

より以下を得る：

$$L_2(H_2) = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} -2y_r y_i \\ -y_r^2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_r^2 - y_i^2 \\ -y_r y_i \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2y_r y_i \\ -y_i^2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_r^2 \\ -2y_r y_i \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_r y_i \\ y_r^2 - y_i^2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_i^2 \\ 2y_r y_i \end{pmatrix} \right\}. \quad (4)$$

$H_2 = \text{span}\{e_1, \dots, e_6\}$ と略記すると、

$$(e_1 \cdots e_6) L_2^T a = (e_1 \cdots e_6) b$$

を満たすベクトル a が求まれば、ノーマルフォームから $g_2(z)$ に含まれる項 $(e_1 \cdots e_6)b$ を消去することができる。ただし、 $a = (a_1 \cdots a_6)^T$, $b = (b_1 \cdots b_6)^T$ である。さて、(4) 式が与える L_2^T は

$$L_2^T = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

であるが、この行列は正則であるため、

$$L_2(H_2) = H_2,$$

すなわち、 $G_2 = \emptyset$ であり、 H_2 を張る要素の一次結合によって得られる 2 次の非線形多項式 $g_2(z)$ はすべて消去することが可能であることが分かる。

つぎに、新しい近恒等変換 $y = z + P_3(z)$ を導入しよう。

$$P_3^r(z) = a_3 z_r^3 + b_3 z_r^2 z_i + c_3 z_r z_i^2 + d_3 z_i^3,$$

$$P_3^i(z) = a_4 z_r^3 + b_4 z_r^2 z_i + c_4 z_r z_i^2 + d_4 z_i^3$$

とおく。さて、2 次の非線形項を消去したのと同じ手順で 3 次の非線形項をできる限り消去することを考える。これまで用いた表記を

$$P_2 \rightarrow P_3, g_2 \rightarrow g_3, H_2 \rightarrow H_3, L_2 \rightarrow L_3$$

のように転用すると、 H_3 は

$$H_3 = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} z_r^3 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} z_r^2 z_i \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} z_r z_i^2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} z_i^3 \\ 0 \end{pmatrix}, \right. \\ \left. \begin{pmatrix} 0 \\ z_r^3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ z_r^2 z_i \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ z_r z_i^2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ z_i^3 \end{pmatrix} \right\}$$

のような 8 つのベクトルによって張られる。各々の成分に対して L_3 を作用させると

$$\Lambda z = \begin{pmatrix} -z_i \\ z_r \end{pmatrix}$$

より以下を得る。

$$L_3(H_3) = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} 3z_r^2 z_i \\ z_r^3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} z_r^3 - 2z_r z_i^2 \\ -z_r^2 z_i \end{pmatrix}, \right. \\ \left. \begin{pmatrix} 2z_r^2 z_i - z_i^3 \\ -z_r z_i^2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3z_r z_i^2 \\ -z_i^3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} z_r^3 \\ -3z_r^2 z_i \end{pmatrix}, \right. \\ \left. \begin{pmatrix} z_r^2 z_i \\ z_r^3 - 2z_r z_i^2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} z_r z_i^2 \\ 2z_r^2 z_i - z_i^3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} z_i^3 \\ -3z_r z_i^2 \end{pmatrix} \right\}. \quad (5)$$

$H_3 = \text{span} \{e_1, \dots, e_8\}$ と略記すると、

$$(e_1 \cdots e_8) L_3^T a = (e_1 \cdots e_8) b$$

を満たすベクトル a が求まれば、ノーマルフォームから $g_3(z)$ に含まれる項 $(e_1 \cdots e_8)b$ を消去することができる。ただし、 $a = (a_1, \dots, a_8)^T$,

$b = (b_1, \dots, b_8)^T$ である。さて、(5) によって与えられた L_3^T は

$$L_3^T = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 0 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -3 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -2 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

である。この行列の行列式は 0 であり、 $\text{rank} = 6$ 。すなわち、 $\dim G_3 = 2$ である。0 固有値に属する L_3^T の固有ベクトル (kernel) は、

$$(1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1)^T, (0, -1, 0, -1, 1, 0, 1, 0)^T$$

のように求められる。これより、

$$(e_1 \cdots e_8) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_r(z_r^2 + z_i^2) \\ z_i(z_r^2 + z_i^2) \end{pmatrix},$$

$$(e_1 \cdots e_8) \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ -1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -z_i(z_r^2 + z_i^2) \\ z_r(z_r^2 + z_i^2) \end{pmatrix}$$

を得る。すなわち、これらの線形結合はノーマルフォームから消去できないが、それ以外の 3 次の非線形項は変換 $y = z + P_3(z)$ によって消去することが可能である。

こうして得られた結果は式 (2) がノーマルフォームであり、それ以上に簡単化することはできないことを示している。

5. $n = 4$ の例：2重 Hopf 分岐

さて、 $R = R_c$ において線形化された流体方程式の固有値が $\pm i\omega_1$ と $\pm i\omega_2$ で複素 σ 平面の虚軸を同時に横切る場合の Hopf/Hopf モード相互作用を考える。攪乱は

$$\hat{\psi} = z_1 \phi_1 e^{i\omega_1 t} + \bar{z}_1 \bar{\phi}_1 e^{-i\omega_1 t}$$

$$+ z_2 \phi_2 e^{i\omega_2 t} + \bar{z}_2 \bar{\phi}_2 e^{-i\omega_2 t} + \text{h.o.t.} \quad (6)$$

と表すことができる。 ω_1 と ω_2 が $\omega_1/\omega_2 = l/m$ ($l, m \in \mathbb{N}$: 互いに素) であるとき、振幅方程式は

変換 $(z_1, z_2) \rightarrow (e^{il\theta} z_1, e^{im\theta} z_2)$, $\theta \in [0, 2\pi)$ の下で
 不変でなければならないため、

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= (p_1^r + ip_1^i)z_1 + (q_1^r + iq_1^i)\bar{z}_1^{m-1}z_2^l, \\ \dot{z}_2 &= (p_2^r + ip_2^i)z_2 + (q_2^r + iq_2^i)z_1^m\bar{z}_2^{l-1} \end{aligned} \quad (7)$$

の形をとることが分かる．ここで、 $p_1^r, p_1^i, p_2^r, p_2^i, q_1^r, q_1^i, q_2^r, q_2^i : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ は θ -不変量 $u = |z_1|^2$, $v = |z_2|^2$, $w = z_1^m \bar{z}_2^l + \bar{z}_1^m z_2^l$ の関数として表される
 不変多項式である．(7) 式は $O(2)$ 対称性の下で得
 られる定常モード間 $l : m$ 共鳴の振幅方程式 [6] と、
 各項の係数が複素数、実数の違いがある点を除くと
 同一である．

$(l, m) = (1, 2)$ の場合、 $p_1^r, p_1^i, p_2^r, p_2^i, q_1^r, q_1^i, q_2^r, q_2^i$
 を原点周りで Taylor 展開して 2 次で打ち切ると、

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_1(\sigma_1 + \lambda_{11}u + \lambda_{12}v) + \kappa_1 \bar{z}_1 z_2, \\ \dot{z}_2 &= z_2(\sigma_2 + \lambda_{21}u + \lambda_{22}v) + \kappa_2 z_1^2 \end{aligned} \quad (8)$$

を 1 : 2 共鳴に対する振幅方程式として得る．

$(l, m) = (1, 3)$ の場合には、同様にして

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_1(\sigma_1 + \lambda_{11}u + \lambda_{12}v) + \kappa_1 \bar{z}_1^2 z_2, \\ \dot{z}_2 &= z_2(\sigma_2 + \lambda_{21}u + \lambda_{22}v) + \kappa_2 z_1^3 \end{aligned} \quad (9)$$

が 1 : 3 共鳴の振幅方程式として得られる．これら
 2 種類の共鳴を除くと、 $l : m$ 共鳴を記述する振幅
 方程式は $l + m - 1$ 次以上の位相のカップリングを
 記述する共鳴項を含まなければならないが、これは
 絶対値を介した 3 次のカップリング項よりも高次
 であるため、共鳴の効果は相対的に弱いと考えられ
 る．そのため $l + m \geq 4$ の場合については立ち入ら
 ないことにする．

6. 2重 Hopf 分岐のノーマルフォーム

いよいよ $n = 4$ の場合のノーマルフォームを導
 こう．§3 と同様に、 $\omega_1 t \rightarrow t$ とすることによって
 (ω_1, ω_2) を $(1, \omega)$ に変換しておき、

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega \\ 0 & 0 & \omega & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_{1r} \\ y_{1i} \\ y_{2r} \\ y_{2i} \end{pmatrix}$$

を仮定する．2 次の非線形関数 $\mathbf{P}_2(\mathbf{y})$ は ${}_4C_1 + {}_4C_2 = 10$ 個の単項式:

$$y_{1r}^2, y_{1i}^2, y_{2r}^2, y_{2i}^2, y_{1r}y_{1i}, y_{1r}y_{2r},$$

$$y_{1r}y_{2i}, y_{1i}y_{2r}, y_{1i}y_{2i}, y_{2r}y_{2i}$$

を用いて表すことができる． $n = 2$ の場合と同様の
 記法を用いると煩雑ではあるが、

$$\begin{aligned} H_2 = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} y_{1r}^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_{1i}^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_{2r}^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_{2i}^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_{1r}y_{1i} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \right. \\ \begin{pmatrix} y_{1r}y_{2r} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_{1r}y_{2i} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_{1i}y_{2r} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_{1i}y_{2i} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} y_{2r}y_{2i} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} 0 \\ y_{1r}^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ y_{1i}^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ y_{2r}^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ y_{2i}^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ y_{1r}y_{1i} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} 0 \\ y_{1r}y_{2r} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ y_{1r}y_{2i} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ y_{1i}y_{2r} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ y_{1i}y_{2i} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ y_{2r}y_{2i} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ y_{1r}^2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ y_{1i}^2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ y_{2r}^2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ y_{2i}^2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ y_{1r}y_{1i} \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ y_{1r}y_{2r} \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ y_{1r}y_{2i} \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ y_{1i}y_{2r} \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ y_{1i}y_{2i} \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ y_{2r}y_{2i} \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \left. \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ y_{1r}^2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ y_{1i}^2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ y_{2r}^2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ y_{2i}^2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ y_{1r}y_{1i} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ y_{1r}y_{2r} \end{pmatrix}, \right. \\ \left. \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ y_{1r}y_{2i} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ y_{1i}y_{2r} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ y_{1i}y_{2i} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ y_{2r}y_{2i} \end{pmatrix} \right\} \end{aligned}$$

のような 40 個のベクトルによって生成される．
 各々の成分に対して L_2 を作用させると

$$\Lambda \mathbf{y} = \begin{pmatrix} -y_{1i} \\ y_{1r} \\ -\omega y_{2i} \\ \omega y_{2r} \end{pmatrix}$$

より例えば

$$L_2 \begin{pmatrix} y_{1r}^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2y_{1r}y_{1i} \\ -y_{1r}^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad L_2 \begin{pmatrix} y_{1i}^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2y_{1r}y_{1i} \\ -y_{1i}^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

などから、40 個のベクトルで張られる $L_2(H_2)$ を求
 めることができる．

$H_2 = \text{span}\{\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_{40}\}$ と略記すると,

$$(\mathbf{e}_1 \cdots \mathbf{e}_{40}) L_2^T \mathbf{a} = (\mathbf{e}_1 \cdots \mathbf{e}_{40}) \mathbf{b}$$

を満たすベクトル $\mathbf{a}$ が求まれば, ノーマルフォームから $\mathbf{g}_2(\mathbf{z})$ に含まれる項 $(\mathbf{e}_1 \cdots \mathbf{e}_{40})\mathbf{b}$ を消去することができる. ただし, $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_{40})^T$, $\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_{40})^T$. さて, L_2^T は 20 次正方行列 $\tilde{L}_2^{(1)}, \tilde{L}_2^{(2)}$ を用いて

$$L_2^T = \begin{pmatrix} \tilde{L}_2^{(1)} & 0 \\ 0 & \tilde{L}_2^{(2)} \end{pmatrix}$$

と書くことができるが, その詳細は割愛する. 計算の結果,

$$\det \tilde{L}_2^{(1)}, \det \tilde{L}_2^{(2)} \propto (4 - \omega^2)^2 (1 - 4\omega^2)^2 \quad (10)$$

を得るため, $\omega \neq 2$ もしくは $1/2$ の場合には正則である. したがって,

$$H_2 = L_2(H_2),$$

すなわち, $G_2 = \emptyset$ であり, H_2 を構成する要素の一次結合によって得られる 2 次の非線形多項式 $\mathbf{g}_2(\mathbf{z})$ は, すべて消去することが可能であることが分かる.

一方, $\omega = 2$, もしくは $1/2$ である場合には行列式は 0 になる. この場合の kernel, すなわち $\tilde{L}_2^{(1)}, \tilde{L}_2^{(2)}$ の固有ベクトルはそれぞれ

$$(0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0)^T,$$

$$(0, 0, 0, 0, 0, -1, 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 0)^T,$$

と

$$(1, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 0)^T,$$

$$(0, 0, 0, 0, 2, 0, 0, 0, 0, 0, -1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$$

であり, 対応する多項式はそれぞれ

$$\begin{pmatrix} -y_{1r}y_{2i} + y_{1i}y_{2r} \\ y_{1r}y_{2r} + y_{1i}y_{2i} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -y_{1r}y_{2r} - y_{1i}y_{2i} \\ -y_{1r}y_{2i} + y_{1i}y_{2r} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ y_{1r}^2 - y_{1i}^2 \\ 2y_{1r}y_{1i} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 2y_{1r}y_{1i} \\ -y_{1r}^2 + y_{1i}^2 \end{pmatrix}$$

のように求められる. つまり,

$$\begin{pmatrix} i(y_{1r} - iy_{1i})(y_{2r} + iy_{2i}) \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} (y_{1r} - iy_{1i})(y_{2r} + iy_{2i}) \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ (y_{1r} + iy_{1i})^2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ i(y_{1r} + iy_{1i})^2 \end{pmatrix}$$

の線形結合で表される 2 次の項は近恒等変換によって消去することができない. なお, $\omega = 2$ (もしくは $1/2$) は, 周波数比が $1:2$ (もしくは $1:1/2$) の高調波 (分数調波) 共鳴の場合に相当する. これら 4 つの項は 2 次の共鳴項であり, (8) 式の 2 次の共鳴項に一致する.

つぎに, 新しい近恒等変換 $\mathbf{y} = \mathbf{z} + \mathbf{P}_3(\mathbf{z})$ を導入しよう. $\mathbf{P}_3(\mathbf{z})$ は ${}_4C_1 + 2 \times {}_4C_2 + {}_4C_3 = 20$ 個の単項式

$$z_{1r}^3, z_{1i}^3, z_{2r}^3, z_{2i}^3, z_{1r}^2 z_{1i}, z_{1r} z_{1i}^2, z_{1r}^2 z_{2r}, z_{1r} z_{2r}^2, z_{1r}^2 z_{2i}, z_{1r} z_{2i}^2, z_{1i}^2 z_{2r}, z_{1i} z_{2r}^2, z_{1i}^2 z_{2i}, z_{1i} z_{2i}^2, z_{2r}^2 z_{2i}, z_{1r} z_{1i} z_{2r}, z_{1r} z_{1i} z_{2i}, z_{1r} z_{2r} z_{2i}, z_{1i} z_{2r} z_{2i}$$

の線形結合によって表される.

さて, 2 次の非線形項を消去したのと同じ手順で 3 次の非線形項をできる限り消去することを考える. 詳細は省略するが, H_3 は 80 個のベクトルによって生成される. 各々の成分に対して L_3 を作用させると

$$\Lambda \mathbf{z} = \begin{pmatrix} -z_{1i} \\ z_{1r} \\ -\omega z_{2i} \\ \omega z_{2r} \end{pmatrix}$$

より, 少し長い計算の結果,

$$L_3^T = \begin{pmatrix} \tilde{L}_3^{(11)} & \tilde{L}_3^{(12)} & 0 & 0 \\ \tilde{L}_3^{(21)} & \tilde{L}_3^{(22)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{L}_3^{(33)} & \tilde{L}_3^{(34)} \\ 0 & 0 & \tilde{L}_3^{(43)} & \tilde{L}_3^{(44)} \end{pmatrix}$$

$$\tilde{L}_3^{(12)} = -Id_{(20)}, \tilde{L}_3^{(21)} = Id_{(20)}, \tilde{L}_3^{(34)} = -\omega Id_{(20)},$$

$$L_3^{(43)} = \omega Id_{(20)}, \tilde{L}_3^{(11)} = \tilde{L}_3^{(22)} = \tilde{L}_3^{(33)} = \tilde{L}_3^{(44)}$$

を得る. ここで, $Id_{(20)}$ は 20 次単位行列である.

$\omega \neq 3$ もしくは $1/3$ の場合には, Mathematica を用いると

$$\text{rank} \begin{pmatrix} \tilde{L}_3^{(11)} & \tilde{L}_3^{(12)} \\ \tilde{L}_3^{(21)} & \tilde{L}_3^{(22)} \end{pmatrix} = 36,$$

$$\text{rank} \begin{pmatrix} \tilde{L}_3^{(33)} & \tilde{L}_3^{(34)} \\ \tilde{L}_3^{(43)} & \tilde{L}_3^{(44)} \end{pmatrix} = 36$$

であり,

$$\det \begin{pmatrix} \tilde{L}_3^{(11)} & \tilde{L}_3^{(12)} \\ \tilde{L}_3^{(21)} & \tilde{L}_3^{(22)} \end{pmatrix}, \det \begin{pmatrix} \tilde{L}_3^{(33)} & \tilde{L}_3^{(34)} \\ \tilde{L}_3^{(43)} & \tilde{L}_3^{(44)} \end{pmatrix} \\ \propto 0^4 \omega^4 (1 - \omega^2)^8 (9 - \omega^2)^2 (1 - 9\omega^2)^2 \quad (11)$$

であることが分かる. 結局,

$$\begin{pmatrix} i(z_{1r} + iz_{1i})(z_{1r}^2 + z_{1i}^2) \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} (z_{1r} + iz_{1i})(z_{1r}^2 + z_{1i}^2) \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} (z_{1r} + iz_{1i})(z_{2r}^2 + z_{2i}^2) \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} i(z_{1r} + iz_{1i})(z_{2r}^2 + z_{2i}^2) \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 0 \\ i(z_{2r} + iz_{2i})(z_{2r}^2 + z_{2i}^2) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ (z_{2r} + iz_{2i})(z_{2r}^2 + z_{2i}^2) \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} 0 \\ (z_{2r} + iz_{2i})(z_{1r}^2 + z_{1i}^2) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ i(z_{2r} + iz_{2i})(z_{1r}^2 + z_{1i}^2) \end{pmatrix}$$

の線形結合で表現される 3 次の項は消去することができないことが結論される..

一方, $\omega = 3$ もしくは $1/3$ の場合には, rank はいずれも 34 になる. この場合, $1:3$ もしくは $1:1/3$ 共鳴が 3 次で発生可能であり,

$$\begin{pmatrix} i(z_{2r} + iz_{2i})(z_{1r} - iz_{1i})^2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} (z_{2r} + iz_{2i})(z_{1r} - iz_{1i})^2 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} i(z_{1r} + iz_{1i})(z_{1r}^2 + z_{1i}^2) \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} (z_{1r} + iz_{1i})(z_{1r}^2 + z_{1i}^2) \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} (z_{1r} + iz_{1i})(z_{2r}^2 + z_{2i}^2) \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} i(z_{1r} + iz_{1i})(z_{2r}^2 + z_{2i}^2) \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} 0 \\ i(z_{2r} + iz_{2i})(z_{2r}^2 + z_{2i}^2) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ (z_{2r} + iz_{2i})(z_{2r}^2 + z_{2i}^2) \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} 0 \\ (z_{2r} + iz_{2i})(z_{1r}^2 + z_{1i}^2) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ i(z_{2r} + iz_{2i})(z_{1r}^2 + z_{1i}^2) \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} 0 \\ i(z_{1r} + iz_{1i})^3 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ (z_{1r} + iz_{1i})^3 \end{pmatrix}$$

の線形結合で表される項が近恒等変換によって消去不可能であることを示している. これら 12 項のうち, 第 1, 2 項および第 11, 12 項が 3 次の共鳴項であって, (9) の共鳴項に一致することが結論される.

7. おわりに

近恒等変換を用いて 2 重 Hopf 分岐のノーマルフォームを 3 次までの近似で求め, 周波数比が

$1:2$, $1:3$ である場合にはそれぞれ 2 次, 3 次の共鳴項がノーマルフォームに含まれることを示した. これらは同変分岐理論にもとづく共鳴方程式に含まれる項と同一である.

まったく同様の手順を踏むことで高次まで首尾一貫してノーマルフォームを導出することができ, 4 次で打ち切ったノーマルフォームには $1:4$ 共鳴と $2:3$ 共鳴の振幅方程式に含まれる非線形項が, また 5 次で打ち切ったノーマルフォームには $1:2$ 共鳴と $1:5$ 共鳴の非線形項が同様に現れるはずであるが, ここでは 3 次までの近似で解析を終える.

一般に, $l:m$ 共鳴に対する振幅方程式を導出する場合, 最初に周波数比を $l:m$ に固定した上で攪乱を (6) 式の形に表す必要があるが, 近恒等変換を用いたノーマルフォームの導出では, $l:m$ 共鳴に関する先見的な仮定を行うことなく, 周波数比が (10), (11) 式のように自然に導かれることを示すことができた.

参考文献

- [1] Wiggins, S. : Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos, Springer-Verlag, New York, 1990.
- [2] Fujimura, K. : The equivalence between two perturbation methods in weakly nonlinear stability theory for parallel shear flows, Proc. R. Soc. Lond. A, **424**, pp.373–392, 1989.
- [3] Fujimura, K. : Centre manifold reduction and the Stuart-Landau equation for fluid motions, Proc. R. Soc. Lond. A, **453**, pp.181–203, 1997.
- [4] Golubitsky, M., Stewart, I.N., Shaeffer, D.G. : Singularities and Groups in Bifurcation Theory, Vol.II, Springer-Verlag, New York, 1988.
- [5] Guckenheimer, J., Holmes, P. : Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields, Springer-Verlag, New York, 1983.
- [6] Dangelmayr, G. : Steady-state mode interactions in the presence of $O(2)$ -symmetry, Dynamics and Stability of Systems, **1**, pp.159–185, 1986.

(受理 平成 29 年 10 月 27 日)

II-VI族化合物半導体から酸化物エレクトロニクスと ニューラルネットワークまで —大学における教育・研学生活 40 年を振り返って—

岸 田 悟

鳥取大学大学院工学研究科 情報エレクトロニクス専攻 電気電子工学講座

Development of Materials for II-VI Compounds to Oxide Electronics & Neural Networks
- Remembering Study Life for 40 Years in the Department of Information Electronics-

Satoru KISHIDA

Department of Information Electronics, Graduate School of Engineering

Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan

E-mail: kishida@eecs.tottori-u.ac.jp

Abstract: This paper states the research and development (R&D) on II-VI semiconducting compounds to oxide electronics and neural networks at the Department of Information Electronics, the Graduate School of Engineering, Tottori University for these 40 years.

Key Words: II-VI compound, Opto-electronics, High-Tc superconducting oxides, Oxide Electronics, Surface analysis, Neural networks, Bio-inforamation, Neuroscience

1. まえがき

筆者は、鳥取で生まれ、鳥取で育ち、鳥取県で初等教育課程・中等教育課程・高等教育課程を過ごした。つまり、65 歳になるまで鳥取県内以外で生活したのは 46 歳の時の英国ケンブリッジ大学にて文科省在外研究員として 10 カ月(310 日)だけだった。だから、履歴書には、「1970 年に鳥取大学工学部電子工学科入学し、1977 年に同大学大学院修士課程電子工学専攻を修了し、同大学工学部の助手として着任」と記述され、40 年が経過した。工学部報告の記事を依頼されたときに、教育、研究やマネジメントに関して記述しようとしたが、あまりにも煩雑なので、僅かであるが研究に関する成果に絞って記述することにした。よって、鳥取大学、工学部や学科の学生や教職員の皆様が行われる“教育”，“研究”や“学び”の活動に少しでも参考になれば幸いである。

2. 電子工学専攻・修了から学位取得までの研究
—「吾十有五而志于学。三十而立(吾、十ゆう五にして学に志す。三十にして立つ。)」—電子回

路工学研究室・電子素子応用工学研究室

昭和 46 年入学してから 4 年目は卒業研究を行うために電子回路工学研究室に配属された。この研究室では電気電子回路に係る勉強をさせていただいたが、研究は准教授の松浦興一先生を中心に行われていた。学部 4 年と修士 2 年間は II-VI 族化合物半導体の光物性に関する研究を行なった。ZnS は蛍光材料としてブラウン管などに使用されていたが、電子デバイスとして使用するために不可欠な電気伝導型(p と n 型)の制御が困難であった。つまり、IV 族半導体の Si のように III 族や V 族の材料を添加することによって伝導型の制御が容易ではなかった。にもかかわらず、ZnS が研究されたのは、青色を発する電子デバイス(発光素子)が望まれていたからである。結局 1977 年から 1987 年ぐらいまで、この研究に従事することになった。しかしながら、この頃から鳥取大学でも「世界で最初の」とか「学術講演会での発表」とか等の言葉が私を研究者への道に向かわせたかもしれない。

研究成果は、ZnS, ZnSe, ZnTe, CaTe の結晶成長と光物性、PbSnTe 半導体レーザを用いた実験な

どに関するものであり、客観的にみて顕著な研究成果は ZnS や ZnSe における真性格子欠陥の光物性に関するものである。この時期はまさに「吾十有五而志于学、三十而立」の時期で成果というよりも、いかに多くのことを学ぶか、いかに先生の良いところを吸収するかという時期なので、あまり厳密に記述することができない。この研究に対する姿勢は、あたかも「必ず果(はた)し遂(と)げんと思はん事は、機嫌を言ふべからず」(徒然草・第 155 段)であり、「偽(いつは)りても賢(けん)を学ばんを、賢といふべし。」(徒然草・第 85 段)のようでした。

主だった研究成果は、II-VI族化合物半導体の ZnS や ZnSe の真性格子欠陥(陰イオン空孔)の導入とそれらによる光物性に関するものである。陰イオン空孔である S(硫黄)や Se(セレン)空孔の論文は当時の *physica status solidi(b)* を中心に多数掲載された[1-11]。この時期に真性格子欠陥の光物性に関する研究は世界で数名であり、S や Se 空孔に関係した発光帯や光吸収帯で世界に向けて研究成果を公表した。また、この時期にコンピュータ制御の分光測定装置の開発でも発表した[12,13]。

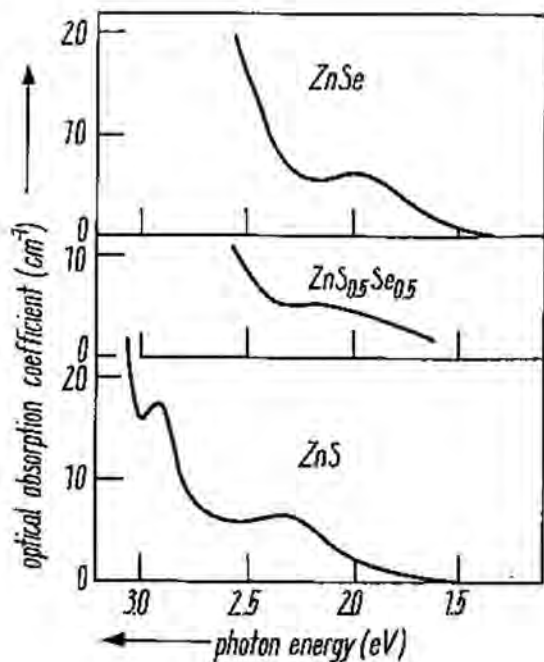


図1 中性子線照射した ZnS, ZnS_{0.5}Se_{0.5}, ZnSe の光吸収スペクトル (77K)

3. 助教授(38 才から 52 歳までの研究成果—「四十而不惑、五十而知天命(四十にして惑はず、五十にして天命を知る)」—電子素子応用工学研究室、電磁エネルギー工学研究室

助教から助教授(准教授)までは、大げさに言えば高等教育機関における教育と研究に全力投球でした。教育・研究に関わる英国ケンブリッジ大学・留学は教育や研究を振り返る機会でした。文科省在外研究員としての職種は日本で准教授なのに、なぜかケンブリッジ大学では客員教授でした。多くの友人や Liang 教授を含む研究者に恵まれ、夢のような生活を送りました。この時期に研究室の教授の退職に伴い、電子素子応用工学研究室に助教で異動し、ここで新しい二つの研究テーマを持つことになりました。のんきな私でも、「昇華法による ZnSe 単結晶の真性格子欠陥の光物性に関する研究」という題目の博士論文で博士(学術)を神戸大学から平成元年 8 月に取得した。主査の山本恵一先生からは「学位は取得した時が始まりで、何をしたか」が問われるという意味の激励をいただきました。ともあれ、この時期では学位を取得するには「論文博士」と「課程博士」があり、課程博士は退職して入学する必要がある。論文博士は 6, 7 件の論文が必要であったようだ。私の場合には 23 件の論文があり、そこには 6 件の酸化物高温超伝導体に関する JJAP(日本応用物理学会論文誌)レターが含まれていた。つまり、学位論文をまとめながら、通常の教員の仕事しながら、酸化物高温超伝導の研究を行い、研究成果を出してきたことになる。おかげで、学位を取得した後の研究は全力で、酸化物高温超伝導の研究とニューラルネットワークの研究に取り組むことに何の抵抗もなかった。余談になるが、この後に、東京大学の教授の方(超伝導関係の研究者ではない)が鳥取大学に来られた時、声高く、「JJAP などは論文ではない。論文とは JAP(Journal of Applied Physics), APL(Applied Physics Letter), PRL(Physical Review Letters), Science, Nature を示すとおっしゃっていたのを思い出した。現在の世界中の研究者が評価に使用しているのは、Impact-Factor(雑誌毎の評価), Impact-Point(研究者毎の評価), Citation(引用件数)や Read(閲読された回数)などであり、リアル・タイムでメールが送信されている。研究者にとって大変な社会ですね。これ以上は言及しませんが、私の先生の一人は 35 年間で 44 件、内訳は JAP(9), APL(7 件), Phy.Rev.B(3 件), PRL(1 件)でした。私はというと、40 年間で Scientific Report (1 件),

JMC(Journal of Material Chemistry)(3 件), APL(5 件), JAP(5 件), JJAP_Letter(>10 件), JJAP & Physica C(130 件)であるので, 研究の質では及びませんが, 研究成果の量であれば, はるかに越えていました. 留学から帰国した時の古い話ですが, 研究者の評価は英国では質(最上位の 3 件)で, 米国では質と量で評価すると聞いたことがあります. ちなみに, 130 件以上書いた論文の JJAP & Physica C と最高峰の Nature のインパクト・ファクターはそれぞれ 1.0 と 33 でした. 負け惜しみを言えば, Physica C クラスの論文を 33 件書けば, Nature を書いたことと同じになるのかなと考えたりもしました.

1986 年頃は日本においても騒がしい時期であったように思います. 応用物理学会や電子情報通信学会に限られるが, 3 つの騒動は, (1)超伝導の研究は金属・合金系から酸化物材料に展開したこと, (2) 低抵抗 p 型 ZnSe が GaAs 基板上に形成されたとか, (3)ニューラルネットワークの研究が再浮上してきたことなどである. 結果として, 一つを捨てて, 二つの騒動の研究テーマを選ぶことになった. さらに, 表面・界面分析を専門とする研究室であったので, 単結晶育成技術や低温測定技術は活かすことになった. 魔法瓶に液体窒素を入れてはんだごてのヒータで加熱して超伝導体の抵抗-温度特性を測定していた.

さて, 酸化物高温超伝導材料の開発とデバイス化に関する卓越した研究成果をまとめた.

3.1 Bi 系($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$)酸化物超伝導単結晶の育成に関する研究[19, 20]

(1) 自己フラックス法による Bi-2212 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$) 単結晶育成と大型化

電子素子応用工学研究室では, 物質の表面構造(低速電子線回折・反射型高速電子線回折), 表面組成(オージェ電子分光法・走査型オージェ電子顕微鏡)や化学状態分析(X 線光電子分光)などを専門分野としていたので, 単結晶が必要となる. つまり, 単結晶では結晶粒界などの欠陥や非化学量論組成からのずれなどの問題を考慮する必要がない. だから, セラミクスや多結晶などの材料では表面分析が十分な性能を発揮することができない. また, セラミクスによる固体反応焼成法は主に材料開発のために行われた. 一般に, 酸化物超伝導材料の形態はセラミクス, ウィスカーを含む単結晶, テープ, 厚膜や薄膜な形態で作製されてきた.

セラミクスや薄膜の形態で行われていた研究を進めながら, 自己フラックス法による単結晶の育成を行った. 蒸気圧が低く, 大気中で作製でき

る材料ばかりなので, II-VI 族化合物の単結晶育成ほどには時間も労力もかからなかった. すぐに大きな Bi 系超伝導単結晶を育成することができた. これにより, 多くの大学や研究機関に先駆けて表面・界面分析を行い, 鳥取大学で超伝導研究を行っていることが広報された. 同時に, 単結晶は国内外の超伝導研究者に配布され, 酸化物高温超伝導研究の発展に貢献した.

(2) 垂直ブリッジマン法による単結晶の育成(世界初)

オランダのハーグで開催された国際結晶成長学会において化合物半導体などで使用されている垂直ブリッジマン法を Bi 系酸化物高温超伝導材料の単結晶育成に適用しようと考えた. それから, 2 年後に実験が始まった. 装置の振動を最小限に抑制しながら長時間の結晶成長を行うので, 工学部機械実習工場の皆様に助力をいただき, 装置を設計・製作した. これは現在, 米子高専・准教授の田中博美君が行った. 彼は鳥取県中部から通学しながら, 卒業研究から博士後期課程修了するまで 6 年間, さらに鳥取大学では初めての文科省学術研究員(フェロー)を獲得して 3 年間, SPring-8 で仕事をした. 最初は, 回転がなく垂直のみで坩堝の先端の角度を最適化したが, 最初の 1 回で大型化に成功してしまった.

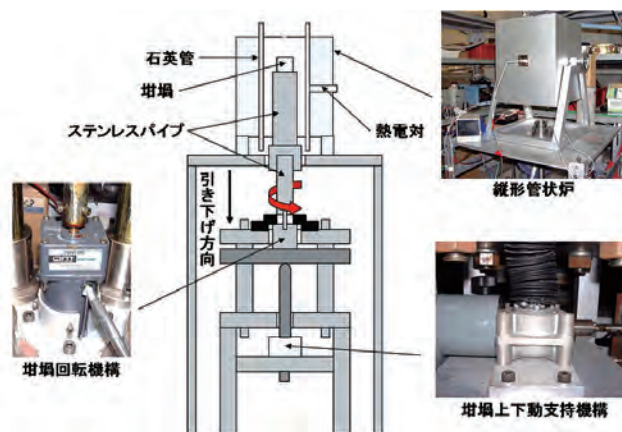


図2 垂直ブリッジマン単結晶育成装置

あえて, 個人名を書いたのは, 私は教職員の皆様にも恵まれており, 研究室に配属された学生は

皆、優秀でかつ誰もが頑張り屋だった。だから、本学の学生表彰者は多数いて、就職をし、社会でも力をいかに発揮しているものと確信している。

(3) ウィスカー(髭状の)単結晶の成長法の高性能化(世界初)

Bi 系超伝導ウィスカー単結晶は、鉄板上に熔融した Bi 系超伝導材料を流し込み、急冷した非晶質(ガラス状)で板状の材料を作製する。その後、大気中あるいは酸素雰囲気中で熱処理をすることによってウィスカーを育成する方法が行われていた。最初に、作製されたのは我々が実験を開始する 3 年前であった。その後に、ウィスカーでテラヘルツ発信及び受信のデバイスとして注目され、必要となったとき、国内外のどの研究機関でもウィスカーを育成することができなかった。英国留学前の 1998 年 8 月 11 日に S 君と熔融材料を流し込む鉄板表面を機械実習工場で行った。たったこれだけの作業と単結晶成長の熔融材料の組成の調整によって大型化が図られた。そういえば、単結晶の育成においても CuO 結晶を Bi 系超伝導体と間違えたが、今回は育成した時にガラス状の非晶質表面が光沢を失っていたので、光学顕微鏡や SEM 写真でウィスカーを確認した。その後は、育成条件を最適化することによって実験に使用できるサイズのウィスカー育成に国内外のどの機関よりも先駆けて成功した。その後、 Al_2O_3 を種としたウィスカー育成法を開発し、従来よりも成長速度が速く、しかも長い(大型)ウィスカーの育成に成功した。結果として、超伝導デバイスの発展に大きく寄与した。

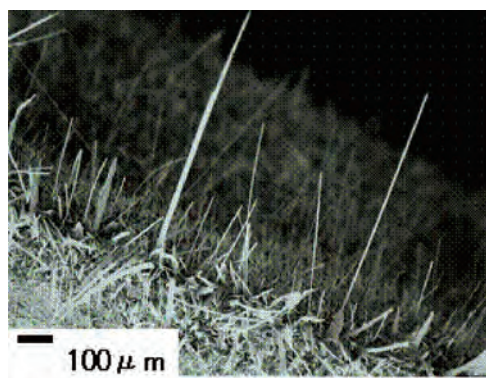


図 3 Bi 系超伝導ウィスカー結晶の SEM 写真

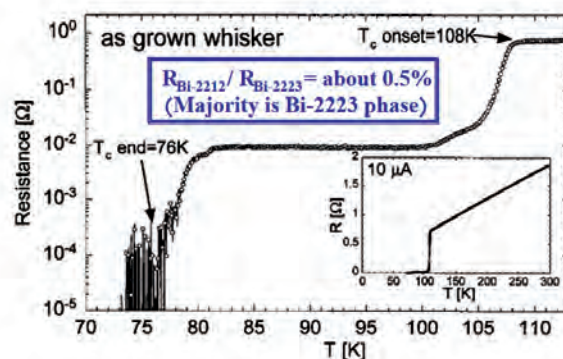


図 4 Bi 系超伝導ウィスカーの抵抗-温度特性

3.2 超伝導単結晶を用いた表面分析 [14-18, 21-24]

Bi 系超伝導単結晶を用いて各種の表面分析を行った。従来、超高真空とか極真空の雰囲気を準備することは容易ではなく、それらの雰囲気が必要不可欠な表面分析装置や薄膜成長装置を入手することは高価でしかも取扱いが極めて難しい装置であった。表面分析に関する研究に従事するようになって、装置を維持することも使用することにも多くの時間と費用が必要であった。見習いで始めた 1988 年頃では、低速電子線回折装置で表面構造を測定するのに、1 週間近くのベキングが必要であり、測定を失敗すると、すべてが無となることも多くあった。この時期に表面分析を専門分野として仕事している優秀な研究者と知り合い、物質材料研究所や産業総合研究所と共同研究を現在も行っている。

(1) RHEED(反射型高速電子線回折)パターンによる表面結晶構造の解析

N 先生が中心で装置を管理し、実験をしていた。Bi 系超伝導単結晶は、雲母のようにへき開性があり、へき開は Bi-O の二重層で容易に行われる。これは Bi-O の二重層間が結合力が弱く、へき開した最表面は Bi-O 層であり、高分解能透過型顕微鏡写真による断面の原子像は平坦でなく、ウェーブしていることがわかっている。また、この頃に RHEED パターンによる表面構造解析に関する解説書を書いた。この分野で著名な名古屋大学の先生の指導を受けた時、社会ではストリーク・パターンが平坦な表面から得られると勘違いしていた。ストリ

ークであっても、平坦な表面ではない。理想的な平坦な表面構造からの RHEED パターンは Si (111) 面から得られるように、ストリーク状の斑点でなければならない。斑点がなければ、島状成長の透過回折パターンか反射電子線照射領域よりも小さなサイズの単結晶であればストリーク状の回折パターンになってしまう。とはいえ、本当の単結晶表面からの RHEED パターンの観測は Bi 系超伝導単結晶を持っているものだけが可能であった。

(2) LEED (低速電子線回折) パターンによる表面結晶構造の解析 (世界初)

低速電子線回折は最表面の表面結晶構造を解析するために使用する。電子線のエネルギーが小さいので、表面と電子線が相互作用することにより生じる回折パターンから表面構造を決定する。Bi 系超伝導単結晶の測定には単結晶表面にカプトンテープを張り付け、テープの端を直線導入機に巻き付けて測定チャンバー内の真空が超高真空になったらテープを直線導入機に巻き付けて単結晶表面をへき開する。これによって、最も清浄な表面を得ることができる。この表面は真空中へき開によってのみ得られ、清浄表面とは、バルク内部の結晶構造、不純物がない及び構成元素の化学結合状態が理想的な化学量論組成に基づくものであると、厳密に定義される。

これらの予備知識で当時、日本に数台しかなかった装置を用いて Bi 系単結晶の表面構造を観察した。LEED パターンは、 $\sim 1 \times 5$ 構造で超格子構造を持つことがわかった。LEED パターンの解析は通常の 3 次元ではなく、2 次元構造なので簡単である。 1×5 構造とは、結晶表面の周期構造が $a \times b$ 軸の格子間隔に対して大きさが逆数であるが、結晶方位は回折パターンの面内でお互いに垂直である。Bi 系超伝導単結晶、特に $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_y$ (Bi-2212) は真空中へき開が容易に行われるので、理想的な試料である。しかしながら、Bi-O 層間に金属原子が取り込まれるインターカレーションという事実もあるが、これは c 軸方向の電気的特性に影響を与える。へき開面の LEED パターンの結果は、最表面の結晶構造分析である。しかしながら、断面 TEM 像と違って、回折パターンが得られる表面領域の大きさは非常に広い。

Bi 系超伝導単結晶の LEED パターンの結果から、多く単結晶表面はシングルドメインであるが、一部にはダブルドメインによるパターンが観察された。これは、同じ表面に ab 軸が垂直な二つのドメインが存在することを意味している。また、単結晶表面は c 軸に垂直な ab 面が観察されるが、 1×5

構造の長周期構造を持ち、しかも整数の 5 ではなく、5 に近い変調構造(波型)を有することが明らかになった。我々は、高分解能 TEM 測定することなく、最表面が波型であることを観測できたことになる。

(3) XPS (X 線光電子分光法) による化学状態分析 (日本トップ 3)

XPS 研究に関わった頃は日本でも安価な装置が市販されている状況であり、鳥取大学でも ESCA750 装置を所有していた。XPS 装置は表面組成分析と表面に存在する構成元素の化学結合状態を分析できる唯一の表面分析装置であるが、利用方法は極めて難しい。なぜなら、材料を大気中に放置すると、表面に化学あるいは物理吸着する不純物(酸素や炭素を含む)によって、真の表面の構成元素の化学結合状態や表面組成が変化する。これを防ぐために測定装置内にある Ar^+ エッチング装置を用いて表面の不純物を除去することができる。一般に、単一の金属表面であれば、この手法で、この清浄化方法として問題ないが、化合物、特に酸化物であれば、この清浄化方法では表面組成の定量化や構成元素の化学結合状態は厳密に求められない。したがって、最初に、超伝導セラミックスの XPS スペクトルで学会発表した時に当時の電総研の友人(その後は私の XPS 研究の指導教員)からコメントをいただいた。それが材料の組成を変えても、異なる価数の不純物を入れても価数変化が観測できないとかの問題が生じる。Bi 系超伝導材料の Cu の価数は試料の超伝導特性に影響を与えるので、Cu 価数を正確に決める必要があった。

Bi 系超伝導単結晶は、いつでも真空中へき開と近い表面状態で表面分析が可能であり、大気中放置による表面劣化や生成される化合物まで明らかにすることができた。さらに、単結晶と金属の界面分析結果と電気的特性の関係についても研究を行った。また、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_1\text{O}_y$ (Bi-2201) 超伝導単結晶も容易に育成され、超伝導特性と Cu 金属の化学結合状態分析との関係を明らかにした。

さらに、SPRing-8 の建設に加わるようになった。図 5 は、高分解能 X 線光電子分光装置(ULVAC-PHI, SPRing-8 BL15 NIMS)を示している。また、図 6 は、Bi 系ウィスカーと単結晶の XPS 測定結果を示している。図に示されるように、明らかに両方の試料で Ca_2p コアレベルからの XPS スペクトルが異なっていることがわかる。この違いが Bi 系ウィスカーの抵抗-温度特性や高臨界電流密度(J_c)に関係することを田中博美・博士が発見した。

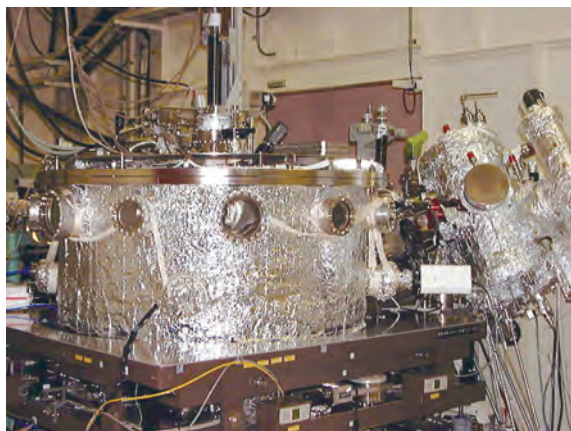


図5 高分解能 X 線光電子分光装置
 (ULVAC-PHI, SPring-8 BL15 NIMS)

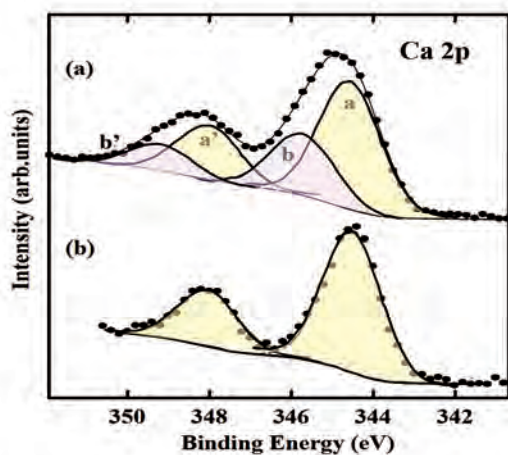


図6 Bi 系単結晶とウィスカーの
 XPS スペクトル

(4)HR-TEM (高分解能透過型電子顕微鏡) による原子レベル結晶構造解析 (世界初)

物質材料研究所に世界一の分解能を持つ透過型電子顕微鏡があるが、共同研究により Bi-2212 単結晶の原子像を観察した。これ以降に、鳥取大学でも HR-TEM が購入され、Bi 系ウィスカー単結晶

を用いた原子像の観察に成功した。しかしながら、Bi 系ウィスカー単結晶は、Bi-2212 相からの X 線回折パターンを示すが、抵抗-温度特性は Bi-2223 相が支配的な結果となった。しかも、ウィスカーの臨界電流密度は単結晶よりも大きく、ウィスカー内部にピン止め中心となる不完全性が存在するとなることを確認した。また、XPS 研究は、Bi-2212 単結晶と Bi 系ウィスカーの Sr : Ca の組成比が異なることが明確にされ、これが臨界電流密度の向上に寄与することを示した。

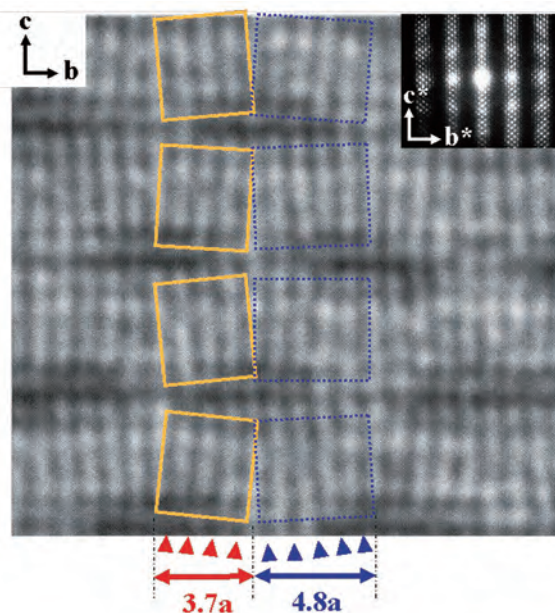


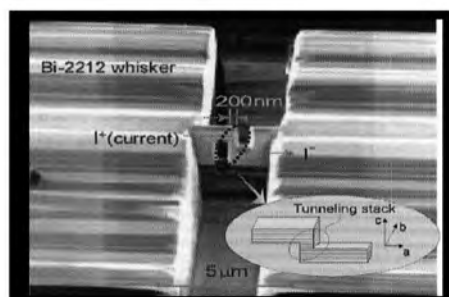
図7 Bi 系超伝導ウィスカーの
 HR-TEM 画像(原子像)

4. 教授(52 才から 65 歳までの研究成果—「五十而知天命。六十而耳順。七十而従心所欲。不踰矩(五十にして天命を知る。六十にして耳(みみ)従ふ。七十にして心の欲するところに従へども矩(のり)を踰(こ)えず」)—電子物理工学研究室、電磁エネルギー応用工学研究室

4.1 ウィスカー単結晶を用いた酸化物高温超伝導 IJJ(真性ジョセフソン接合)デバイスの開発と特性の観測 [79]

Bi 系ウィスカー単結晶の育成に成功し、東北大学・山下 努・教授に送った。この頃は、東北大学と共同研究をしており、50 万円程度の消耗品を購入することができ、1 年に 3-4 回は東北大学に

出張した。山下研究室にはデバイス製作や特性を評価する多くの装置や機器があり、すぐにウィスカー単結晶でデバイスを製作し、学会発表した。



FIBによるBi系ウィスカーの加工例

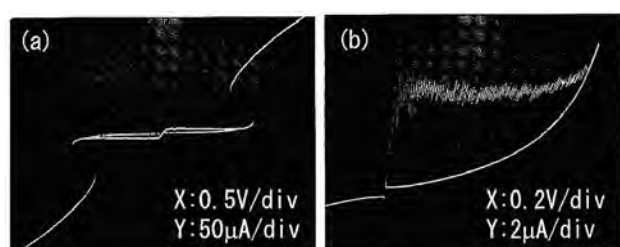


図8 (a) 3D-FIBで製作されたIJJのI-V特性と (b) 拡大された結果 (in-plane area of $0.9 \mu\text{m}^2$) [79]

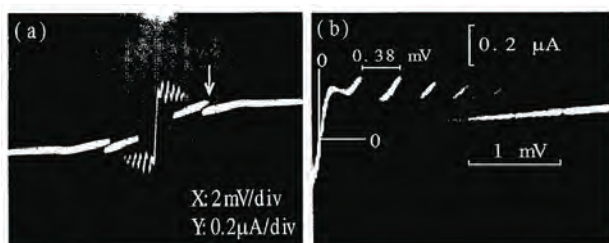


図9 (a) 3D-FIBで製作されたIJJのI-V特性と (b) 拡大された結果 (in-plane area of $0.6 \mu\text{m}^2$) [79]

文科省在外研究員で留学する前にウィスカーを育成に成功して10カ月の英国留学を終え、帰国した時には、修士のS君は超伝導デバイスに使用できる十分な大きさと特性を有するウィスカーを作製していた。以後、ウィスカーの育成の改良やデバイス製作に関する研究で大きな成果を挙げるようになった。

4.2 Bi系酸化物高温超伝導単結晶を用いた抵抗変化型メモリ (ReRAM) の開発とスイッチング機構の解明

Pt/Bi-2212 単結晶/Au 構造の抵抗変化型メモリ (ReRAM) を製作して I-V 特性を測定した。これまでに ReRAM のスイッチング機構のモデルは NiO 薄膜型のフィラメントによるモデルと SrTiO_3 単結晶によるモデルが提唱されていた。後者の単結晶型モデルは低抵抗酸化物であれば、例えば Ga をヘビードープした ZnO や Nb をドープした SrTiO_3 等が報告されていた。Bi 系超伝導体の抵抗は酸素量によって制御される。

図10はPt/Bi-2212 単結晶/Au 構造の初期状態、低抵抗状態と高抵抗状態の概念図を、図11は本構造の電流-電圧 (I-V) 特性を示している。作製したままの構造の I-V 特性は、メモリーのスイッチング特性を示さなかった。水素処理すると、Pt 上部電極から Bi 系超伝導単結晶に H_2 が拡散することによって、酸素還元状態の分布が形成される。Bi 系単結晶がまた、ReRAM のスイッチング機構の解明に役立つことになった。

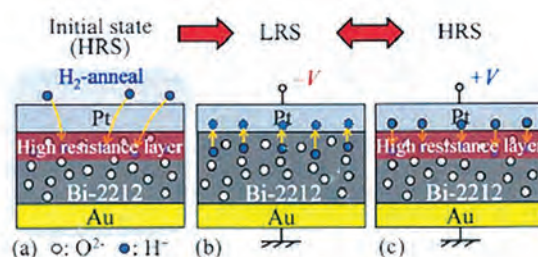


FIG. 3. Schematics showing the movement of hydrogen ions until stabilization of (a) the initial state, and during the resistive switching to (b) LRS and to (c) HRS.

図10 水素処理したPt/Bi-2212 単結晶/Au 構造

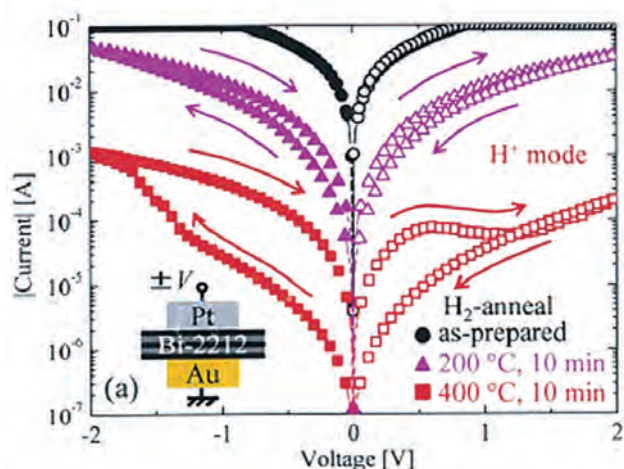


図 1 1 Pt/Bi-2212 単結晶/Au 構造の電流－電圧特性

4.3 酸化物エレクトロニクス(フレキシブル透明 ReRAM の開発, ソフトコンタクト ReRAM, イオン液体を用いたメモリなど)に関する研究

この研究分野では、木下健太郎・准教授が中心で行われた。図 12 は、(a)AFM のカンチレバーのチップ上に製作された ReRAM 構造と(b)低いワイヤ容量と高抵抗でセットライン及び低抵抗でリセット・ラインを示している。

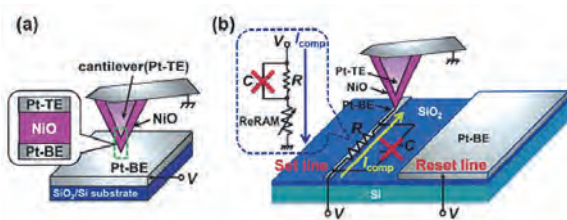


図 1 2 (a)AFM のカンチレバーのチップ上に製作された ReRAM 構造と(b)低いワイヤ容量と高抵抗でセットライン及び低抵抗でリセット・ライン

これらのソフトコンタクトの研究成果は、APL(Applied Physics Letters)に加えて、第 1 原理計算の結果と共に Scientific Reports(インパクト・ファクタ 5.6)に掲載された。これには、応用数理工学科の教員の皆様にご支援いただきました(電気情報系学科と機械物理系学科の融合)。フレキシブル透明メモリは企業との共同研究であった(企業との先端技術の融合)。さらに、コンタクト・ブリッジメモリにイオン液体を用いた世界で最初のメモリは工学部附属グリーンケミストリ・センターとの先端技術の融合で成しえた快挙であり、JMC(Journal of Material Chemistry: インパクト・ファクタ 4.8)の雑誌に 3 件掲載された(電気情報系学科と化学・バイオ系学科)。

高等教育機関における今後の研究は、工学部・工学研究科である以上、現在あるいは未来の社会で役立ってこそその学部・研究科であると考えている。このためには、一つの専門分野ではなく、多くの先端技術が融合して研究成果をできるだけ早く社会に役立つようにすることであると考えている。

最後になりましたが、研究成果を書いていくと、学生、学内外の研究者が思い出され、筆が進みませんでした。同時に、時間の制限から残り 200 件程の論文、査読付プロシーディングス、研究報告、著書などが記載できなかったことをご了承ください。

5. 工学部における教育活動および管理運営

JABEE(日本技術者教育認定機構)[112]の認定学科(日本で電気電子工学分野 4 番目)となり、他の学科(土木工学科を除く)に啓蒙の活動した。結果として、8 学科中 6 学科まで JABEE 認定学科となった。また、学科の教授と保護者会及び学外・学科同窓会を開催した。同窓会は関東と関西を交互に開催して教員と卒業生(社会人)の連携を強化することができた。また、保護者会は学科から工学部さらに大学(農学部)へと発展し、現在も行われている。同窓生による講演会の実施、入学者確保のための高校訪問や出前授業(高専や高校)などなど、すべてを記載する時間はない。TEDREC や TiFREC の活動の一環として博士後期課程の学生の財的支援、博士前期・後期課程の学生のための海外を中心とした国際学会発表の財的支援なども行った。TEDREC ニュースでは学会発表の報告なども掲載した。また、私の記憶間違いも多々ある

かもしれません。ご容赦ください。

学会発表などは積極的に進め、学部4年生・博士前期課程・博士後期課程の学生が国内学会などで発表した件数や国内外の国際会議などで発表した件数は500件を越えている。学会発表などの経験は、学術講演会という同じ土俵で研究者の出身大学や略歴などが関係なく、研究結果のみが勝負であり、プレゼンテーション能力などの鳥取大学の人間力(知力・体力・気力・コミュニケーション力・実践力)を育むことができる。様々に獲得した研究費の中から、学生諸君の出張費等を捻出し、学生の負担が殆どないようにした。結果として、多くの表彰(学内外)を受けることができました。

6. おわりに

鳥取大学での教育・研究生活が終わろうとし、その準備を始めていた12月中旬に私にとって“ビッグ・ニュース”が飛び込んできた。1988年に始まった酸化物高温超伝導体の開発とデバイス化、それに伴う各種表面分析の応用研究は、田中博美・博士(米子高専・准教授)と元・鳥取大学の木下健太郎・博士(現在、東京理科大学・准教授)と彼らを結びつけた入江善博・博士(入江産業㈱社長)によって大きな研究成果となった。

本稿では、本学4年次に研究室配属されたときから、43年に及ぶ研究生活を送ってきて得られた成果を気の向くままに記録したものである。大学に入学した時から、研究者を目指したわけではないので、人よりも多くの時間を要したが、多くのことを学ばせていただきました。結果として、高等教育機関での長くて短い教育・研究生活を楽しく過ごさせていただきました。得られた教育・研究に関する成果は卒業論文、修士論文や学位論文で得られたものであり、多くの喜怒哀楽の思い出が昨日のことにように思い出されます。

卒業生全員、とりわけ学部、修士、博士あるいは社会人として関わりました皆様に心から御礼申し上げます。そして、鳥取大学、工学部、学科の教職員の諸先輩並びに後輩の皆様に感謝申し上げます。現役の学生の皆様、教職員も皆様そして関係者に皆様に心から御礼を申し上げます。鳥取大学、工学部そして学科の更なる発展を確信しております。

最後になりましたが、私の生き方の指針となった言葉を記載しました。そのような生き方が十分にできたとは言えませんが、できないことはできるように生きて行きたいと思えます。

- 「三学の教え：少にして学べば、則ち壮にして為すこと有り。壮にして学べば、則ち老いて衰えず。老いて学べば、則ち死して朽ちず」(佐藤一斎(幕末・儒学者), ”言志四録”)
- 「いかほど学び方よくても怠(おこた)りてつとめざれば、功はなし。また人々の才と不才とによりてその功いたく異なれども、才不才は、うまれつきたることなれば、力に及びがたし。されどたいていは、不才なるひと(つまり才能のないと思われるひと)といえども、怠らずつとめだにすれば、それだけの功はあるものなり」(本居宣長(江戸時代・学者), ”うひい)やまぶみ”)

文 献

- [1] S. KISHIDA, K. MATSUURA, H. FUKUMA, F. TAKEDA and I. TSURUMI, “Optical Absorption Bands in Neutron-Irradiated ZnSe and $\text{ZnS}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$ Crystals”, phys. stat. sol. (b) **113**, pp. K31-K33(1982).
- [2] K. MATSUURA, S. TERATANI, S. KISHIDA and I. TSURUMI, “Temperature Dependence of the Half-Width of the 2.3eV Optical Absorption Band in Neutron-Irradiated ZnS”, phys. stat. sol. (a), **35**, pp. K57-K60(1976).
- [3] S. KISHIDA, K. MATSUURA, H. NAGASE, M. MORI, F. TAKEDA and I. TSURUMI, “The Photosensitive Optical Absorption Bands in Zn-Treated and Neutron-Irradiated ZnSe Single Crystals”, phys. stat. sol. (a) **95**, pp. 155-164(1986).
- [4] K. MATSUURA, S. KISHIDA and I. TSURUMI, “Annealing of the F^+ -EPR Centers and the 2.3 and 2.9eV Optical Absorption Bands in Zinc Sulfide Crystals”, phys. stat. sol. (b) **140**, pp. 347-354(1987).
- [5] K. MATSUURA, S. KISHIDA, Y. FUKATA and I. TSURUMI, “Correlation between the 1.1 and 1.45eV Emission Bands and the F^+ Optical Absorption Bands in ZnS Crystals”, phys. stat. sol. (b) **143**, pp. 275-280(1987).
- [6] K. MATSUURA, S. KISHIDA, K. YOSHIDA and I. TSURUMI, “Optical Bleaching of the F^+ Optical Bands in ZnS Crystals”, phys. stat. sol. (b) **142**, pp. 617-627(1987).

- [7] K. MATSUURA, S. KISHIDA, I. TSURUMI and M. KITAGAWA, "Electron-Irradiation Effects on the F^+ Bands and the Near-Infrared Emissions ZnS Crystals", *phys. stat. sol. (b)* **142**, pp. K79-K83 (1987).
- [8] S. KISHIDA, K. MATSUURA, H. NAGASE and I. TSURUMI, "Annealing Characteristics and Temperature Dependence of the Photosensitive 1.9eV Absorption Bands in the Zn-Treated ZnSe Crystals", *phys. stat. sol. (a)* **103**, pp. 613-618 (1987).
- [9] S. KISHIDA, K. MATSUURA, H. MORI, T. YANAGAWA, I. TSURUMI and C. HAMAGUCHI, "The 2.5eV Emission Band in the Se-Treated ZnSe Crystals", *phys. stat. sol. (a)* **106**, pp. 283-289 (1988).
- [10] S. KISHIDA, K. MATSUURA, A. MATSUOKA and I. TSURUMI, "The Transient Behaviors of the 2.5eV Emission Band in the Se-Treated ZnSe Crystals", *phys. stat. sol. (a)* **105**, pp. K165-K168 (1988).
- [11] S. KISHIDA, K. MATSUURA, H. MORI, Y. MIZUGUCHI and I. TSURUMI, "Temperature Dependence of the 2.5eV Emission Band in Se-Treated ZnSe Crystals", *phys. stat. sol. (a)* **109**, pp. 617-623 (1988).
- [12] K. MATSUURA, T. YAMASAKI, S. KISHIDA, H. TAKI and I. TSURUMI, "Circuit for extension of an interrupt input of a personal computer PC8001mkII", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 58 (1987) 142-143.
- [13] K. MATSUURA, K. FUKUSHIMA, K. SUZUKI, S. OTSUKA, S. KISHIDA and I. TSURUMI, "A 5ns-64 Channel Photon Counter", *J. Spectrosc. Soc. Japan* Vol. 35, No. 6 (1986) 470-477.
- [14] H. TOKUTAKA, S. KISHIDA, K. NISHIMORI, N. ISHIHARA, Y. WATANABE, Y. NOISHIKI and T. KAWAI, "Surface Analysis of $YBa_2Cu_3O_x$ and Bi-Sr-Ca-Cu-O Superconductors by Auger Electron Spectroscopy", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 28, No. 2, pp. L222-L225 (1989).
- [15] S. KISHIDA, H. TOKUTAKA, S. NAKANISHI, K. NISHIMORI, N. ISHIHARA, H. FUJIMOTO, "LEED-AES and XPS Studies of Bi-Sr-Ca-Cu-O Single Crystal Surfaces", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 28, No. 3, L406-L408 (1989).
- [16] S. KISHIDA, H. TOKUTAKA, S. NAKANISHI, Y. WATANABE, H. FUJIMOTO, K. NISHIMORI, N. ISHIHARA, W. FUTO, S. TORIGOE and H. HARADA, "XPS Studies of Bi-Sr-Ca-Cu-O Single Crystal and Ceramics Surfaces", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 28, No. 6, pp. L949-L951 (1989).
- [17] K. NISHIMORI, H. TOKUTAKA, S. NAKANISHI, S. KISHIDA and N. ISHIHARA, "Off-Angle SiC(0001) Surface and Cu/SiC Interface Reaction", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 28, No. 8, pp. L1345-L1348 (1989).
- [18] S. KISHIDA, H. TOKUTAKA, H. FUJIMOTO, K. NISHIMORI, N. ISHIHARA, "LEED-AES Observations of 7K- and 80K-phase Bi-Sr-Ca-Cu-O Single Crystals", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 28, No. 8, pp. L1389-L1392 (1989).
- [19] 岸田 悟, "酸化物超電導単結晶の製造方法", 特開平 7-232997.
- [20] S. KISHIDA, H. TOKUTAKA, S. NAKANISHI, H. FUJIMOTO, K. NISHIMORI, N. ISHIHARA, Y. WATANABE and W. FUTO, "THE PREPARATION CONDITIONS AND CHARACTERISTICS OF THE Bi-Sr-Ca-Cu-O SINGLE CRYSTALS", *J. Crystal Growth*, **99**, pp. 937-941 (1990).
- [21] S. Kishida, H. Tokutaka, F. Toda, H. Fujimoto, W. Futo, K. Nishimori and N. Ishihara, "XPS Studies of 80K-Phase Bi-Sr-Ca-Cu-O Single Crystals", *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 29, No. 3, pp. L438-L440 (1990).
- [21] H. Tokutaka, N. Ishihara, K. Nishimori, S. Kishida and T. Takabuchi, "The Comparison of the Background Removal Methods in XPS Spectra", *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 29, No. 11, pp. 2512 (1990).
- [22] S. Kishida, H. Tokutaka, H. Higashi, K. Nishimori and N. Ishihara, "THE PREPARATION CONDITIONS OF THE FLAT 80K-PHASE Bi-Sr-Ca-Cu-O THIN FILMS BY RF MAGNETRON SPUTTERING", *Applied Surface Science* **48/49**, pp. 446-449 (1991).
- [23] K. Nishimori, H. Tokutaka, T. Tamon, S. Kishida and N. Ishihara, "SURFACE STUDY OF SINGLE CRYSTAL 80K Bi-Sr-Ca-Cu-O SUPERCONDUCTOR WITH Si AND Nb BY RHEED AND XPS DEPTH PROFILE", *Applied Surface Science* **48/49**, pp. 450-453 (1991).
- [24] H. Tokutaka and S. Kishida, "SURFACE CHARACTERIZATIONS OF Bi-Sr-Ca-Cu-O THIN FILMS AND BULK SINGLE CRYSTALS", *Applied Surface Science* **48/49**, pp. 425-429 (1991).
- [25] S. Kishida, H. Tokutaka, M. Katayama, M. Chihaya, K. Nishimori and N. Ishihara, "GROWTH OF 80K-PHASE (Bi,Pb)-(Sr,Ca)-Cu-O SINGLE CRYSTALS", *Physica C* **185-189**, pp. 443-444 (1991).
- [26] H. Imao, S. Kishida, H. Tokutaka and T. Ikeuchi, "PREPARATION CONDITIONS OF Bi-BASED SUPERCONDUCTING CERAMICS WITH HIGH CRITICAL CURRENT DENSITY", *Physica C*, **185-189**, pp. 2397-2398 (1991).
- [27] G. Oya, N. Aoyama, S. Kishida and H. Tokutaka, "CRITICAL CURRENT AS A FUNCTION OF TEMPERATURE IN SUPERCONDUCTING SINGLE CRYSTAL (Bi,Pb)₂Sr₂CaCu₂O_y",

Physica C , **185-189**, pp.2453-2454(1991).

[28] K.Yamano, K.Nishimori, H.Tokutaka, S.Kishida and N. Ishihara, "OBSERVATION OF METAL FILM GROWTH ON THE SURFACE OF 80K-PHASE Bi-BASED BULK SINGLE CRYSTALS BY RHEED", Physica C , **185-189**, pp.2015-2016(1991).

[29] S.Kishida, H.Tokutaka, M.Katayama, M.Chihaya, H.Imao, K.Nishimori and N. Ishihara, "GROWTH OF 80K-PHASE (Bi,Pb)-(Sr,Ca)-Cu-O BULK SINGLE CRYSTALS USING THE FLUX CONTAINING Li OR Sb", Physica C, **190**, pp.110-111(1991).

[30] S.Kishida, H.Tokutaka, W.Futo, H.Fujimoto, K.Nishimori and N. Ishihara, "X-ray Photoelectron Spectroscopy Studies of 7K-Phase Bi-System Single Crystals", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.30, No.5, pp.926-928 (1991).

[31] S.Kishida, H.Tokutaka, M.Chihaya, W.Futo, F.Toda, K.Nishimori and N. Ishihara, "Formation of Au Electrodes on 80K-Phase Bi-Sr-Ca-Cu-O Single Crystal Surfaces and Their Characteristics by XPS", IEICE TRANSACTIONS, Vol.E74, No.7, pp.1967-1971(1991).

[32] S.Kishida, H.Tokutaka, M.Katayama, M.Chihaya, K.Nishimori and N. Ishihara, "Crystal Growth of the High Quality 80K-Phase Bi-Sr-Ca-Cu-O Bulk Single Crystals", Proc. 4th Int. Symposium on Superconductivity(ISS'91), Oct 14-17, 1991, Tokyo, Springer-Verlag, pp.477-480.

[33] 岸田 悟, 徳高平蔵, 西守克己, "臨界温度 80K の超伝導物質 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 単結晶と薄膜の X 線光電子分光法による表面分析", 分析, Vol.40, No.11, pp.823-827(1991).

[34] G.Oya, N.Aoyama, A.Irie, S.Kishida and H.Tokutaka, "Observation of Josephson Junctionlike Behavior in Single-Crystal $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ ", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.31, No.7A, pp.L829-L831(1992).

[35] H.Imao, S.Kishida and H.Tokutaka, "Effects of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ Doping into $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ on Superconducting Properties", phys. stat. sol. (a), Vol.137, pp.173-178(1993).

[36] S.Kishida, H.Tokutaka, H.Kinoshita and K.Fujimura, "Preparation of As-Deposited 80K-Phase Bi-Sr-Ca-Cu-O Films by RF Magnetron Sputtering", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.32, Suppl.32-3, pp.700-702(1993).

[37] S.Kishida, H.Tokutaka, M.Katayama, K.Nishimori, N.Ishihara, T.Yumoto, "Crystal

Growth of Bi-Sr-Ca-Cu-O ($c_0=39\text{\AA}$) Single Crystals", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.32, Part 2, No.3B, pp.L398-L399(1993).

[38] H.Imao, S.Kishida and H.Tokutaka, "Effects of a various Pb-oxides doping on the superconductivity of Bi-Sr-Ca-Cu-O ceramics", Physica C, Vol.235-240, pp.475-476(1994).

[39] S.Kishida, T.Yumoto, H.Tokutaka, K.Fujimura and S.Nakashima, "Growth of High Quality Bi-Sr-Ca-Cu-O Single Crystals by the Self-Flux Method with a Temperature-Holding Process", Physica C, Vol.235-240, pp.521-522(1994).

[40] H.Imao, S.Kishida and H.Tokutaka, "Effects of the Preparation Conditions of Bi-Based Superconducting Ceramics on Superconductivity", phys. stat. sol. (a), Vol.148, pp.537-543(1995).

[41] S.Kishida, T.Yumoto, S.Nakashima, H.Tokutaka and K.Fujimura, "Effects of Temperatures and Periods for Melting on Growth of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Single Crystals", J. Crystal Growth, Vol.153, pp.146-150(1995).

[42] S.Kishida, S.Nakashima, H.Tokutaka, K.Fujimura, "Effects of Cooling Rates and Temperatures Ending the Growth on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Single Crystal Growth", phys. stat. sol. (a) Vol.151, pp.17-22(1995).

[43] S.Kishida, M.Tokimoto, H.Tokutaka, K.Fujimura, "Deteriorated Layer Formed on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Single Crystal Surfaces", phys. stat. sol. (a) Vol.151, pp.387-392(1995).

[44] 上村 彰, 大嶋重利, 神戸士郎, 奥山克郎, 岸田 悟, 徳高平蔵, " $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 単結晶の磁束量子観察", 電気学会論文誌 (Trans. IEE of Japan) A, Vol.115, No.3, pp.207-212(1995).

[45] 岸田 悟, 徳高平蔵, "低速電子線回折及び高速電子線回折による固体表面の構造解析", J. Surface Analysis, Vol.2, No.2, pp.229-235(1996).

[46] 岸田 悟, "入門講座 反射高速電子線回折", ぶんせき, No.12, pp.966-972(1996).

[47] H.Sumii, T.Yanagida, Y.Sugano, Y.Ikeda, S.Kishida and H.Tokutaka, "Optimization of Contact Process with Monte Carlo Study for Advanced CMOS Devices", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.35, Part 1, No.2, pp.1120-1125(1996).

[48] 徳高・藤村・岸田共訳, "コホネン著「自己組織化マップ」", シュプリンガー・フェアラーク東京(1996).

[49] K.Harada, S.Kishida, T.Matsuoka, T.Maruyama,

- H. Tokutaka, K. Fujimura, T. Koyanagi and T. Fujii, "Effects of He Gas Addition on the Production of Active Particles in rf Magnetron Sputtering", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 35, Part 1, No. 6A, pp. 3590-3594 (1996).
- [50] K. Harada, S. Kishida, T. Matsuoka, T. Maruyama, H. Tokutaka and K. Fujimura, "Effects of O_2^+ and O^+ on the Growth of $BiSrCaCuO$ Superconducting Films in rf Magnetron Sputtering", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 35, Part 1, No. 8A, pp. 4297-4301 (1996).
- [51] H. Imao, K. Toyoda, S. Kishida and H. Tokutaka, "Effect of Preparation Conditions on the Growth of Bi-based Superconducting Single Crystals", Physica C, Vol. 282-287, pp. 473-474 (1997).
- [52] S. Kishida, E. Hosokawa, T. Tanikawa, H. Tokutaka and K. Fujimura, "Growth of $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_y$ Single Crystals in Oxygen-Reduced Atmospheres", Physica C, Vol. 282-287, pp. 477-478 (1997).
- [53] H. Sumi, H. Inoue, Y. Sugano, N. Ito, S. Kishida, and H. Tokutaka, "Characteristics of Sputtered TiN Films by Optimized Metallic Mode Deposition", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 36, Part 1, No. 2, pp. 556-600 (1997).
- [54] A. Tanaka, S. Kishida, A. Shibasaki, H. Tokutaka and K. Fujimura, "Growth of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ Single Crystals Using a Vertical Bridgman Method", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 36, Part 2, No. 6B, pp. L761-L763 (1997).
- [55] 中村 誠, 岸田 悟, 鈴木峰晴, 表面分析研究会, "電子分光法による酸化シリコン測定時のダメージについて", 表面科学, Vol. 18, No. 8, pp. 21-25 (1997).
- [56] S. Kishida and E. Hosokawa, "Optimum Growth Condition of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ Single Crystals in a Vertical Bridgman Method", J. Crystal Growth, Vol. 192, pp. 136-140 (1998).
- [57] A. Tanaka, S. Kishida, A. Shibasaki, E. Hosokawa, H. Tokutaka, K. Fujimura, "Growth of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ single crystals by a vertical Bridgman method and their characterization", J. Crystal Growth, Vol. 182, No. 1-2, pp. 60-64 (1998).
- [58] 渡部 徹, 岸田 悟, 石原顕永, 山内康弘, 徳高平蔵, "ニューラルネットワークの定量分析への適用", 表面科学, Vol. 19, No. 2, pp. 98-105 (1998).
- [59] 田中章人, 山内康弘, 岸田悟, 細川英治, 谷川泰造, 徳高平蔵, "清浄化した Bi 系単結晶の X 線光電子分光法による状態分析", 真空, Vol. 41, No. 3 (1998) pp. 198-201.
- [60] 山内康弘, 佐藤直樹, 細川英治, 岸田 悟, 徳高平蔵, "BaRbBiO 超伝導体の X 線光電子分光測定", 真空, Vol. 41, No. 3 (1998) pp. 194-197.
- [61] 渡部 徹, 岸田 悟, 石原顕永, 河相幸昭, 徳高平蔵, 福島 整, "ニューラルネットワークの化学分析への適用", 表面科学, Vol. 19, No. 6, pp. 46-54 (1998). (日本表面科学会「表面科学技術賞」表彰)
- [62] A. Tanaka, S. Kishida, Y. Yamauchi and H. Tokutaka, "Surface of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ Single Crystals Heated in Air", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 4, No. 4A, pp. 2024-2027 (1998).
- [63] F. Toda, T. Yamada, S. Kishida and H. Tokutaka, "XPS Study of Junction Interface in In/BaRbBiO Films", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, No. 5A, pp. 2482-2484 (1998).
- [64] S. Kishida, E. Hosokawa and W. Y. Liang, "Growth of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ by a Self-Flux Method Using Precursors", J. Crystal Growth, Vol. 205, pp. 284-288 (1999). (鳥取大学・科学研究業績賞)
- [65] S. Kishida, N. Sato, S. F. W. Rrycroft, W. Y. Liang, S.-J. Kim and T. Yamashita, "GROWTH of Bi-BASED WHISKERS AND THEIR CHARACTERIZATION", Singapore J. Physics, Vol. 15, No. 1, 1999, pp. 101-106.
- [66] 徳高・藤村・岸田共著, "自己組織化マップの応用 —多次元情報の 2 次元可視化—", 海文堂出版株式会社, 東京, 1999 年 2 月 20 日.
- [67] S.-J. Kim, Yu. I. Latyshev, T. Yamashita, N. Sato and S. Kishida, "Submicron scale High-Tc superconducting stacks for single Cooper-pair tunneling", Physica B, Vol. 284-8, pp. 1814-1815, 2000.
- [68] S. Kishida, M. Nakamura and W. Y. Liang, "Growth of large $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ single crystals by a vertical Bridgman method", J. Crystal Growth, Vol. 216, pp. 220-224 (2000).
- [69] 岸田 悟, "家族と過ごしたケンブリッジから...", 鳥取大学「葦」, 第 35 号, pp. 8-12 (2000).
- [70] Sang-Jae Kim, Yuri I. Latyshev, Tsutomu Yamashita and Satoru Kishida, "Fabrication of Ultra-small and Long Intrinsic Josephson Junctions on Bi-2212 Single Crystal Whiskers", IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 948-951 (2001).
- [71] K. Maki and S. Kishida, "Growth of La-doped $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ Single Crystals by a self-flux method", Physica C, Vol. 357-360, pp. 716-718 (2001).
- [72] Y. Yamauchi, S. Kishida, M. Kimura, H. Yoshikawa, S. Fukushima and H. Tokutaka, "X-ray photoelectron spectroscopy studies of La-doped $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$

- Single Crystals”, *Physica C*, Vol. 357-360, pp. 410-413 (2001).
- [73] H. Tanaka, M. Nakamura and S. Kishida, “Growth of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Single Crystals By A Modified Vertical Bridgman Method”, *Physica C*, Vol. 357-360, pp. 722-725 (2001).
- [74] M. Nakamura and S. Kishida, “Annealing Characteristics of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Single Crystals Grown By A Vertical Bridgman Method”, *Physica C*, Vol. 357-360, pp. 821-823 (2001).
- [75] H. Imao, S. Kishida and H. Tokutaka, “Growth of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Single Crystals By A Self-Flux Method”, *Physica C*, Vol. 357-360, pp. 719-721 (2001).
- [76] K. Maki and S. Kishida, “Growth of La-doped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Single Crystals by a self-flux method”, *Physica C*, Vol. 357-360, pp. 716-718 (2001).
- [77] D. Okai, S. Ohshima, S. Kishida and T. Hatano, “Temperature Dependence of the Surface Resistance of a Bi-Sr-Ca-Cu-O Whisker Measured by the Probe-Coupled Microstrip Resonator Method”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 40, pp. L669-L671 (2001).
- [78] S. Kishida, T. Hirao, S.-J. Kim and T. Yamashita, “Growth of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Superconducting Whiskers”, *Physica C*, Vol. 362, pp. 195-199 (2001).
- [79] S.-J. Kim, Yu. I. Latyshev, T. Yamashita and S. Kishida, “New Approach for Fabricating Submicron Scale Intrinsic Josephson Junctions using High- T_c Superconducting Materials”, *Physica C*, Vol. 362, pp. 150-155 (2001).
- [80] T. Kawae, S.-J. Kim, K. Nakajima, T. Yamashita and S. Kishida, “Electrical Properties of Bi-2212 Whisker Using Ag Film Electrodes”, *Physica C*, Vol. 362, pp. 333-337 (2001).
- [81] T. Kawae, K. Inomata, S.-J. Kim, Y. I. Latyshev, K. Nakajima, T. Yamashita, S. Kishida and T. Hatano, “Junction area dependence of critical current density in Bi-2212 stacked junction”, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 14, pp. 1102-1105 (2001).
- [82] M. Ogura, T. Kitagawa, K. Matsumoto and S. Kishida, “Effect of in situ and ex situ annealing on the growth of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ sputtered films”, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 15, pp. 472-474 (2002).
- [83] H. Uemoto, K. Maki and S. Kishida, “Growth of La Doped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Single Crystals by a Self-Flux Method”, *J. Crystal Growth*, Vol. 237-239, pp. 753-755 (2002).
- [84] H. Tanaka and S. Kishida, “Growth of large $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ single crystals by a modified vertical Bridgman method”, *J. Crystal Growth*, Vol. 237-239, pp. 749-752 (2002).
- [85] S. Kishida and H. Uemoto, “CHARACTERIZATIONS OF BI-BASED WHISKERS BY THE METHOD OF Al_2O_3 -SEEDED GLASSY QUENCHED PLATELETS”, *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 16, No. 20, pp. 4497-4501 (2002).
- [86] H. Uemoto, H. Tanaka, T. Hirao, S. Kishida, S.-J. Kim and T. Yamashita, “Bi-based superconducting whiskers grown at various O_2 gas flow rates”, *Physica C*, Vol. 378-381, pp. 303-305 (2002).
- [87] Hiroya Imao and S. Kishida, “Re-growth of large Bi-2212 single crystals by a self-flux method”, *Physica C*, Vol. 378-381, pp. 660-663 (2002).
- [88] H. Tanaka, S. Kishida and H. Deguchi, “Effects of rotating crucibles on the growth of Bi-2212 single crystals by a modified vertical Bridgman method”, *Physica C*, Vol. 378-381, pp. 674-677 (2002).
- [89] K. Matsumoto, M. Ogura, K. Katsurahara, S. Kishida, T. Mizutani, H. Yoshikawa, S. Fukushima and H. Tokutaka, “Phase control of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ superconducting sputtered films using He gas”, *Physica C*, Vol. 378-381, pp. 1256-1259 (2002).
- [90] K. Matsumoto, M. Ogura, K. Katsurahara, S. Kishida and H. Tokutaka, “Growth of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconducting films using the radio-frequency magnetron sputtering method”, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 15, pp. 1757-1759 (2002).
- [91] M. Ogura, K. Matsumoto, K. Katsurahara and S. Kishida, “ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ superconducting sputtered films grown using the targets with various compositions”, *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 15, pp. 1753-1756 (2002).
- [92] M. Ogura, K. Matsumoto, K. Katsurahara, S. Kishida, H. Yoshikawa and S. Fukushima, “Preparation of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ superconducting films by a rf magnetron sputtering method with multi-targets”, *Physica C*, Vol. 392-396, pp. 1306-1309 (2003).
- [93] H. Tanaka, S. Kishida, H. Yoshikawa, A. Kimura, A. Tanaka and S. Fukushima, “XPS study on the Bi-2212 single crystals grown by a modified vertical Bridgman method”, *Physica C*, Vol. 392-396, pp. 153-156 (2003).
- [94] M. Mizutani, H. Uemoto, M. Okabe and S. Kishida,

- “Effect of atmospheres on characterization of Bi-based superconducting whiskers”, *Physica C*, Vol. 392-396, pp. 508-511 (2003).
- [95] H. Uemoto, M. Mizutani, S. Kishida and T. Yamashita, “Growth mechanism of Bi-based superconducting whiskers”, *Physica C*, Vol. 392-396, pp. 512-515 (2003).
- [96] O. Nagashima, H. Tanaka, Y. Ebara and S. Kishida, “Improvement of superconductivity in Bi-2212 single crystals grown by a vertical Bridgman method”, *Physica C*, Vol. 392-396, pp. 505-507 (2003).
- [97] 田中博美, 永島 法, 岸田 悟, 吉川英樹, 木村昌弘, 田中彰博, 福島 整, “坩堝回転機構付垂直ブリッジマン法で育成した $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ 超伝導単結晶の光電子分光”, *真空*, Vol. 46, No. 3, pp. 207-209 (2003).
- [98] 小椋 満, 松本浩介, 葛原 宏治, 岸田 悟, 吉川英樹, 福島 整, “多元高周波マグネトロンスパッタ法による $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ 超伝導薄膜の作製”, *真空*, Vol. 46, No. 3, pp. 265-268 (2003).
- [99] K. Matsumoto, M. Ogura, S. Kishida and H. Tokutaka, “Growth of Phase-Controlled $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ Thin Films Prepared by Off-Axis Sputtering using He Gas”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 42, pp. 2671-2674 (2003).
- [100] H. Tanaka, M. Okabe, S. Kishida, H. Yoshikawa, M. Kimura, A. Tanaka, S. Fukushima, K. Ando, “Chemical Properties of the Bi-based superconducting whiskers studied by X-ray photoelectron spectroscopy”, *Physica C*, Vol. 412-414, pp. 279-282 (2004).
- [101] S. Kishida, M. Mizutani, M. Okabe and H. Imao, “Growth mechanism of Bi-based whiskers in a method of Al₂O₃-seeded quenched glassy platelets”, *Physica C*, Vol. 408-410, pp. 874-875 (2004).
- [102] H. Imao, T. Nishimura and S. Kishida, “Preparation of Bi-2223 Phase Superconducting Ceramics in Various Oxygen-reduced Atmosphere”, *Physica C*, Vol. 408-410, pp. 889-890 (2004).
- [103] M. Seki, S. Ysuike, T. Tokuda and S. Kishida, “Preparation of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ thick films”, *Physica C*, Vol. 412-414, pp. 1358-1361 (2004).
- [104] Nagashima, H. Tanaka, Y. Echizen and S. Kishida, “Growth of high quality $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ single crystals by modified vertical Bridgman method”, *Physica C*, Vol. 412-414, pp. 607-609 (2004).
- [105] K. Katsurahara, N. Yagi, N. Fujiwara, S. Kishida, H. Yoshikawa and S. Fukushima, “ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ thin films deposited using Bi-Sr-Cu-O and Ca-Cu-O targets”, *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, Vol. 29, No. 4, pp. 1405-1408 (2004).
- [106] N. Fujiwara, T. Onishi, K. Katsurahara and S. Kishida, “ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ thin superconducting films deposited by rf magnetron sputtering under magnetic field”, *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, Vol. 29, No. 4, pp. 1401-1404 (2004).
- [107] M. Seki, S. Yasuike, T. Tokuda and S. Kishida, “Preparation of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ thick films on MgO by chemical solution deposition”, *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, Vol. 29, No. 4, pp. 1397-1400 (2004).
- [108] M. Okabe, M. Mizutani, K. Murakami and S. Kishida, “Growth of Bi-based whiskers from the glassy quenched platelets including SiO_2 , TiO_2 and Al_2O_3 ”, *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, Vol. 29, No. 4, pp. 1413-1416 (2004).
- [109] 野地・福永・岸田共著, “例題で学ぶ電磁気学”, 森北出版
- [110] N. Fujiwara, T. Onishi and S. Kishida, “Deposition of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ (Bi-based) Superconducting Thin Films by rf Magnetron Sputtering Method Under External Magnetic Field”, *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, Vol. 15, No. 2, pp. 3074-3077 (2005).
- [111] H. Tanaka, Y. Echizen, S. Kishida, K. Ando, “Enlargement Effect of the Crucible Size on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ Single Crystals Grown by a Modified Vertical Bridgman Method”, *IEEE Trans on Applied Superconductivity*, Vol. 15, No. 2, pp. 3133-3136 (2005).
- [112] 大北正昭, 岸田 悟他, “電気電子工学科における教育改革”, *工業教育*, Vol. 53, No. 3, pp. 81-86 (2005).
- [113] T. Onishi, N. Fujiwara, S. Kishida, “Effect of magnetic field during deposition on growth of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ superconducting films”, *Physica C*, Vol. 426-431, pp. 1439-1443 (2005).
- [114] Y. Ebara, K. Hidaka, S. Kishida, “Superconducting characterization of non-superconductors/high-Tc cuprate superconductors”, *Physica C*, Vol. 426-431, pp. 1434-1438 (2005).
- [115] Y. Echizen, H. Tanaka, S. Kishida, “Growth of Bi-2212 single crystals by a vertical Bridgman method using large crucibles”, *Physica C*, Vol. 426-431, pp. 583-587 (2005).

- [116] K. Murakami, T. Nakamura, S. Yasuike, T. Tokuda, S. Kishida, "Preparation of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y/\text{NiO}/\text{Ni}$ tapes by chemical solution method", *Physica C*, Vol. 426-431, pp. 1155-1158 (2005).
- [117] M. Okabe, S. Kishida, "Effect of Al_2O_3 seeding on growth of Bi-based whiskers in glassy quenched platelet method", *Physica C*, Vol. 426-431, pp. 579-582 (2005).
- [118] H. Imao, S. Kishida, "Growth of Bi-2212 superconducting single crystals by a self-flux method with large crucibles", *Physica C*, Vol. 426-431, pp. 573-578 (2005).
- [119] Y. Echizen, H. Tanaka, S. Adachi, T. Ishigaki, S. Kishida, " $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ single crystal growth in Bridgman-Stockbarger method using different oxygen partial pressure", *Physica C*, Vol. 445-448, pp. 455-458 (2006).
- [120] T. Yamane, S. Kishida, H. Tanaka, H. Yoshikawa and H. Imao, "Fabrication of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y/\text{Al}_2\text{O}_3$ -particles on MgO films by rf magnetron sputtering method", *Advances in Science and Technology*, Vol. 47, pp. 159-164 (2006).
- [121] S. Maehashi, K. Murakami, T. Nakamura, S. Kishida, "Preparation of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ tapes on various metals by chemical solution deposition", *Physica C*, Vol. 445-448, pp. 730-732 (2006).
- [122] T. Tokuda, K. Hidaka and S. Kishida, "Cap effect of $(\text{Bi}, \text{Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ thick films during post-annealing process", *Physica C*, Vol. 469, pp. 1509-1511 (2009).
- [123] T. Makino, T. Nakabayashi, H. Tanaka, K. Kinoshita and S. Kishida, "Growth of Bi-2212 single crystals by a horizontal Bridgman method using different oxygen pressure", *Physica C*, Vol. 469, pp. 1178-1181 (2009).
- [124] K. Kinoshita, T. Makino, T. Yoda, K. Dobashi, S. Kishida, "Synchrotron radiation x-ray photoemission spectroscopy and high-resolution transmission electron microscopy analysis of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ superconducting whiskers with high critical current density", *Virtual Journal of Applications of Superconductivity* (Vol. 17 Iss. 9 Novemver 1 2009 : *J. Appl. Phys.* Vol. 106 pp. 083907(1-3)), *Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology* (Vol. 20 Iss. 18 Novemver 2 (2009) : *J. Appl. Phys.*, Vol. 106 pp. 083907(1-3)).
- [125] T. Hinoki, C. Kuhara, H. Agura, K. Yazawa, K. Kinoshita, K. Ohmi, S. Kishida, "Effect of organic-buffer-layer on electrical property and environmental reliability of Ga-doped ZnO films prepared by RF plasma assisted DC magnetron sputtering on plastic substrate", *Thin Solid Films*, Vol. 519, pp. 1525-1529 (2010).
- [126] T. Hinoki, K. Yazawa, K. Kinoshita, K. Ohmi, S. Kishida, "Ga doped ZnO thin films prepared by RF plasma assisted DC magnetron sputtering under reductive atmosphere without heating substrates", *Phys. Status Solidi C*, Vol. 7, No. 6, pp. 1559-1561 (2010).
- [127] K. Kinoshita, T. Makino, T. Yoda, K. Dobashi, S. Kishida, "Analysis on resistive switching of resistive random access memory using visualization technique of data storage area with secondary electron image", *Advances in Science and Technology*, Vol. 75, p. 49 (2010).
- [128] K. Kinoshita, T. Hinoki, K. Yazawa, K. Ohmi, S. Kishida, "Mechanism of Resistive Memory Effect in Ga Doped ZnO Thin Films", *Phys. Status Solidi C*, Vol. 7, No. 6, p. 1712 (2010).
- [129] K. Kinoshita, T. Okutani, H. Tanaka, T. Hinoki, H. Agura, K. Yazawa, K. Ohmi, S. Kishida, "Flexible and Transparent ReRAM with GZO-Memory-Layer and GZO-Electrodes on Large PEN Sheet", *Proceedings of IEEE International Memory Workshop*, pp. 74-76 (2010).
- [130] 土橋一史, 木下健太郎, 牧野達也, 奥谷匠, 依田貴稔, 花田明紘, 岸田 悟, "NiO を用いた抵抗変化型メモリ (ReRAM) の結晶性とメモリ特性", *真空*, Vol. 53, No. 3, pp. 129-131 (2010).
- [131] 吉田大一郎, 木下健太郎, 出口恭平, 高橋智一, 大観光徳, 岸田 悟, "高周波マグネトロンスパッタ法による BaTiO_3/Pt 自立膜の作製と評価", *真空*, Vol. 53, No. 5, p. 371 (2010).
- [132] 出口恭平, 木下健太郎, 吉田大一郎, 花田明紘, 岸田 悟, " BaTiO_3 自立薄膜におけるクラック密度の低減と配向性の成長基板温度依存性", *真空*, Vol. 53, No. 6, p. 421 (2010).
- [133] 田中隼人, 木下健太郎, 奥谷匠, 牧野達也, 檜木利雄, 大観光徳, 岸田 悟, "Ga ドープ ZnO 薄膜における不揮発性抵抗変化現象の成膜雰囲気依存性", *真空*, Vol. 53, No. 3 pp. 220-222 (2010).
- [134] 奥谷匠, 木下健太郎, 田中隼人, 牧野達也, 檜木利雄, 大観光徳, 岸田 悟, "大面積透明フレキシブルオール Ga ドープ ZnO 抵抗変化メモリ (ReRAM) の作製と評価", *真空*, Vol. 53, No. 3, pp. 217-218 (2010).

- [135] K. Kinoshita, T. Okutani, H. Tanaka, T. Hinoki, K. Yazawa, K. Ohmi, S. Kishida, "Opposite bias polarity dependence of resistive switching in n-type Ga-doped-ZnO and p-type NiO thin films", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 96, p. 143506 (2010).
- [136] H. Tanaka, H. Yoshikawa, C. Tsumura, S. Fukushima, Y. Matsui, S. Nakagawa, K. Kinoshita and S. Kishida, "Synthesis and Precise Analysis of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_y$ Superconducting Whiskers", *Advances in Science and Technology*, Vol. 75, pp. 192-196 (2010).
- [137] 木下健太郎, 岸田 悟, 大観光徳, 奥谷匠, 田中隼人, 檜木利雄, "回路パターンを有する電極体およびその製造方法", 特願 2011-84216, 特許第 5690635 号.
- [138] K. Kinoshita, T. Okutani, S. Kishida, "Flexible and transparent ReRAM with GZO memory layer and GZO-electrodes on large PEN sheet", *Solid State Electronics*, Vol. 58, pp. --- (2010).
- [139] S. Kishida, "Introduction of TEDREC and research topics", 2nd APTECS (International Seminar on Applied Technology Science and Arts) Institute Technology Sepuluh Nopember ITS-Surabaya Jawa, Timur, Indonesia, Dec. 21-22, 2010.
- [140] T. Yoda, K. Kinoshita, T. Makino, K. Dobashi, S. Kishida, "Study on Fabrication of Forming-Free Resistance Random Access Memory (ReRAM)", *physica status solidi c*, Vol. 8, No. 2, pp. 546-548 (2011).
- [141] K. Kinoshita, A. Sakaguchi, A. Harada, H. Yamaoka, S. Kishida, Y. Fukaya, T. Nokami, and T. Itoh, "Improvement of Switching Endurance of Conducting-Bridge Random Access Memory by Addition of Metal Ion-Containing Ionic Liquid", *Jpn. J. Appl. Phys.* accepted 2017.
- [142] T. Moriyama, S. Hida, T. Yamasaki, T. Ohno, S. Kishida, and K. Kinoshita, "Experimental and Theoretical Studies of Resistive Switching in Grain Boundaries of Polycrystalline Transition Metal Oxide Film", *MRS Advances* accepted 2017.
- [143] T. Moriyama, T. Yamasaki, S. Hida, T. Ohno, S. Kishida, and K. Kinoshita, "Switching mechanism in resistive random access memory by first-principles calculation using practical model based on experimental results", *Jpn. J. Appl. Phys.* Accepted 2017.
- [144] T. Moriyama, T. Yamasaki, T. Ohno, S. Kishida, and K. Kinoshita, "Resistance given by tilting grain surface with micro surface structures in polycrystalline metal oxide", *J. Appl. Phys.*, **120**, 215302-1-215302-9 (2016).
- [145] A. Harada, H. Yamaoka, S. Tojo, K. Watanabe, A. Sakaguchi, K. Kinoshita, S. Kishida, Y. Fukaya, K. Matsumoto, R. Hagiwara, H. Sakaguchi, T. Nokami, T. Itoh, "Improved Performance of a Conducting-Bridge Random Access Memory using Ionic Liquids" [Back coverに採択], *Journal of Materials Chemistry C*, **4**, 7215-7222 (2016).
- [146] T. Moriyama, T. Yamasaki, T. Ohno, S. Kishida, and K. Kinoshita, "Formation Mechanism of Conducting Path in Resistive Random Access Memory by First Principles Calculation Using Practical Model Based on Experimental Results", *MRS advances*, DOI: 10.1557/adv.2016.461 (2016).
- [147] K. Kinoshita, R. Koishi, T. Moriyama, K. Kawano, H. Miyashita, S. S. Lee, and S. Kishida, "Simulation Study on Reproducing Resistive Switching Effect by Soret and Fick Diffusion in Resistive Random Access Memory", *MRS advances*, DOI: 10.1557/adv.2016.449 (2016).
- [148] K. Kimura, K. Ohmi, S. Kishida, and K. Kinoshita, "Influence of ultraviolet irradiation on data retention characteristics in resistive random access memory", *Appl. Phys. Lett.*, **108**, 123501-1-123501-5 (2016).
- [149] K. Kinoshita, Sang-Gyu Koh, T. Moriyama, and S. Kishida, "Finding Oxygen Reservoir by Using Extremely Small Test Cell Structure for Resistive Random Access Memory with Replaceable Bottom Electrode", *Scientific Reports*, srep18442, (2015), 1-8, DOI: 10.1038 (2015).
- [150] A. Harada, H. Yamaoka, K. Watanabe, K. Kinoshita, S. Kishida, Y. Fukaya, T. Nokami, T. Itoh, "Copper Ion Containing Ionic Liquids Provides Improved Endurance and Switching Voltage Distributions of Conducting-Bridge Random Access Memory (CB-RAM)", *Chemistry Letter*, **44**, pp. 1578-1580 (2015).
- [151] A. Harada, H. Yamaoka, R. Ogata, K. Watanabe, K. Kinoshita, S. Kishida, T. Nokami and T. Itoh, "Enhanced stability of the HfO_2 electrolyte and reduced working voltage of a CB-RAM by an ionic liquid [Inside front coverに採択].", *Journal of Materials Chemistry C*, **3**, pp. 6966-6969 (2015).
- [152] 花田明紘, 三浦寛基, 野津武志, 大沢仁志, 伊奈稔哲, 鈴木基寛, 河村直己, 水牧仁一郎, 宇留賀朋哉, 木村滋, 岸田 悟, 木下健太郎, "ペロブスカイト酸

- 化物への水素イオン導入によって誘起される抵抗スイッチング効果の発現機構”, 表面科学, **35**, pp.356-360(2014).
- [152] Sang-Gyu Koh, S.Kishida, and K.Kinoshita, “Extremely small test cell structure for resistive random access memory (ReRAM) element with removable bottom electrode”, Appl. Phys. Lett., **104**, 083518-1-083518-4(2014).
- [153] T.Moriyama, K.Kinoshita, R.Koishi and S.Kishida, “Pulse Switching Property of Reset Process in Resistive Random Access Memory (ReRAM) Consisting of Binary-Transition-Metal-Oxides”, ECS Transactions, **50**, pp.55-60(2013).
- [154] S.Hasegawa, K.Kinoshita, S.Tsuruta, and S.Kishida, “Physical Properties Elucidation of Filaments in Conducting-Bridge Random Access Memory Consisting of Metal-Oxide”, ECS Transactions, **50**, (2013), pp.61-67(2013).
- [155] 高 相圭, 木下 健太郎, 福原 貴博, 岸田 悟, “微細キャパシタ構造における ReRAM フィラメントのメモリ特性”, 真空, **56**, pp.176-178(2013).
- [156] 吉田 大一郎, 木下 健太郎, 三浦 寛基, 高橋 智一, 岸田 悟, “BaTiO₃ 薄膜の自立化に伴う特性変化”, 真空, **55**, 399-402(2012).
- [157] A.Hanada, K.Kinoshita, and S.Kishida, “Resistive switching by migration of hydrogen ions”, Appl. Phys. Lett., **101**, 043507-1-043507-4(2012).
- [158] K.Kinoshita, H.Tanaka, M.Yoshihara, and S.Kishida, “Insight into Distribution and Switching of ReRAM Filaments Based on Analysis of Variations in Memory Characteristics”, J. Appl. Phys., **112**, 044503-1-044503-4(2012).
- [159] H.Tanaka, K.Kinoshita, M.Yoshihara, and S.Kishida, “Correlation between filament distribution and resistive switching properties in resistive random access memory consisting of binary transition-metal oxides”, AIP Advances, **2**, 022141-1-022141-6(2012).
- [160] 田中 隼人, 木下 健太郎, 吉原 幹貴, 岸田 悟, “遷移金属酸化物抵抗変化メモリ (ReRAM) におけるフィラメント分布と動作特性の関係”, 真空, **55**, pp.183-186(2012).
- [161] 鶴田 茂之, 木下 健太郎, 中林 竜也, 岸田 悟, “HfO₂-CB-RAM の基本メモリ特性”, IEICE, **J95-C**, pp.53-57(2012).
- [162] T. Sasaki, K. Kinoshita, S. Kishida, Y. Hirata and S. Yamada, “Ensemble Learning in Systems of Neural Networks for Detection of Abnormal Shadows from X-ray Images of Lungs”, Journal of Signal Processing, **16**, pp.343-346(2012).
- [163] A.Hanada, K.Kinoshita, K.Matsubara, T.Fukuhara, and S.Kishida, “Developmental Mechanism for the Resistance Change Effect in Perovskite Oxide-Based Resistive Random Access Memory Consisting of Bi₂Sr₂CaCu₂O₈₊. Bulk Single Crystal”, J. Appl. Phys., **110**, 084506-1-084506-5(2011).
- [164] K.Kinoshita, T.Yoda, and S.Kishida, “Correlation between Resistance-change Effect in Transition-metal Oxides and Secondary-electron Contrast of SEM Images”, J. Appl. Phys., **110**, 064503-1-064503-5(2011).
- [165] 依田 貴稔, 木下 健太郎, 土橋 一史, 北村 健一, 岸田 悟, “遷移金属酸化物における抵抗スイッチング現象と二次電子放出効率との相関関係”, 表面科学, **32**, pp.422-427(2011).
- [166] 花田 明紘, 木下 健太郎, 松原 勝彦, 福原 貴博, 岸田 悟, “銅酸化物高温超伝導体単結晶を用いた抵抗変化メモリのスイッチングメカニズム”, 表面科学, **32**, 428-432(2011).
- [167] K.Kinoshita, T.Makino, T.Yoda, K.Dobashi, and S.Kishida, “Analysis on Data Storage Area of NiO-ReRAM with Secondary Electron Image”, J. Mater. Res., **26**, pp.45-49(2011).
- [168] K. Kinoshita, T. Okutani, H. Tanaka, T. Hinoki, H. Agura, K. Yazawa, K. Ohmi, and S. Kishida, “Flexible and transparent ReRAM with GZO memory layer and GZO-electrodes on large PEN sheet”, Solid-State Electronics, **58**, pp.48-53(2011).

プロセス制御から生産情報システムへ

北村 章

鳥取大学大学院工学研究科情報エレクトロニクス専攻

From Process Control to Manufacturing Information System

Akira Kitamura

Department of Electrical Engineering and Computer Science, Graduate School of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan

E-mail: kitamura@eecs.tottori-u.ac.jp

Abstract: In this report, the application results of optimal control theory for steel manufacturing process, robust scheduling in machine assembly process and the application of manufacturing information system, in which automatic risk assessment by probabilistic inference is realized, are described. These techniques are based on the intelligent manufacturing system consisted of theory for manufacturing universality, real process data and information and know-how which the technical operator of the manufacturing site express.

Key Words: Optimal regulator, Recursive parameter estimation, Robust control, Robust scheduling, Ontology, probabilistic inference

1. はじめに

筆者は、企業と本学において、約 40 年に亘り、生産設備の最適制御、製造工程の最適スケジューリング、および、製造におけるヒトの発する情報をシステム科学として捉える生産情報学について研究してきた。これらは、生産に関わる理論、製造データ、および、人によるテキスト情報を活用した知的生産システムとして集約される。本報告では、筆者の研究経緯に沿って、製造プロセスの最適制御、生産スケジューリング、および、生産情報システムの事例を述べる。

2. 製造プロセスの自動制御の事例

鉄鋼製造プロセスにおける、制御理論の応用事例として、最適制御やパラメータ推定の応用事例を紹介する。

2.1 最適制御理論の応用

鋼板や帯鋼の圧延機では、一般に油圧圧下による AGC (Automatic Gauge Control) によって板厚が制御される。とくに、ゲージメータ AGC では、ゲージメータ式と呼ばれる板厚モデルによって圧延機出側直下の板厚を予測し、目標値からの偏差がゼロになるようにフィードバック制御を行う。

そこでは、板厚精度を向上させるために、AGC 系の動特性を材料硬度（塑性係数）によらず、つねに適正化する必要がある。ここでは、最適レギュレータを用いて制御ゲインの最適設計を行った例について紹介する[1]。図 1 に板厚制御系と実機適用結果を示す。制御の概要を以下に記述する。

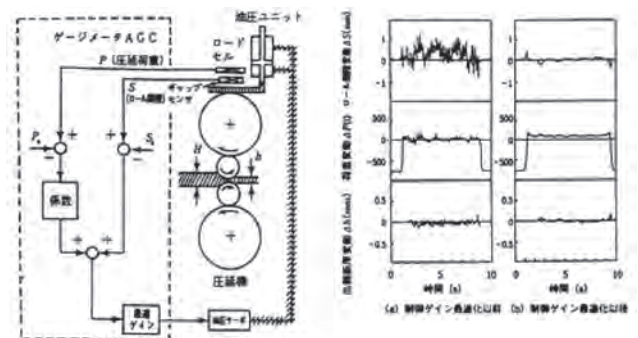


図 1 最適制御ゲインによる板厚 AGC

- ①モデル（伝達関数）は、圧延特性解析から得られた理論式を線形化した圧延特性式と油圧圧下系動特性で記述される。
- ②最適レギュレータを用いて最適制御ゲイン K_0 を解析的に導出する。
- ③評価関数は出側板厚偏差と入力ペナルティ項の二乗積分の和とする。
- ④制御ゲインを未知数として構成したリカッチ方程式を解析的に求解することで、最適制御ゲイン

ンを圧延特性パラメータで表現する.

制御系の伝達関数を $G(s)$ と最適レギュレータによる最適ゲイン K_o を以下に示す.

$$G(s) = \frac{1}{s^3 + 2\eta\omega s^2 + \omega^2 s + K\{M + Q(1-k)\}\omega^2/(M+Q)} \quad (1)$$

$$K_o = \frac{\omega}{4\eta_o} \cdot \frac{M+Q}{M+Q(1-k)}, \quad \eta_o = \sqrt{2}/2 \quad (2)$$

ここで, M : ミル定数, Q : 材料硬度 (塑性係数),

ω : 油圧圧下系固有周波数, η : 減衰係数

⑤最適制御ゲインの適用により, 材料硬度が変わっても, 常に最適な応答を得る.

2.2 適応制御の応用

STR (Self Tuning Regulator) による, 圧延機の適応制御について紹介する[2]. 前項で述べたように, ゲージメータ AGC の最適制御ゲインは, 塑性係数や減衰係数によって記述されるが, 塑性係数は帯鋼内の温度分布によって変動する. また, 減衰係数やミル定数 M も経時的に変動する. そこで, 動特性の変化を時々刻々推定し, その情報によって制御ゲインを適応修正する. これによって, AGC 系の動特性を帯鋼内のパラメータ変動に煩わされず, 常に最適な状態を維持することができる. 概要を図 2 に示す.

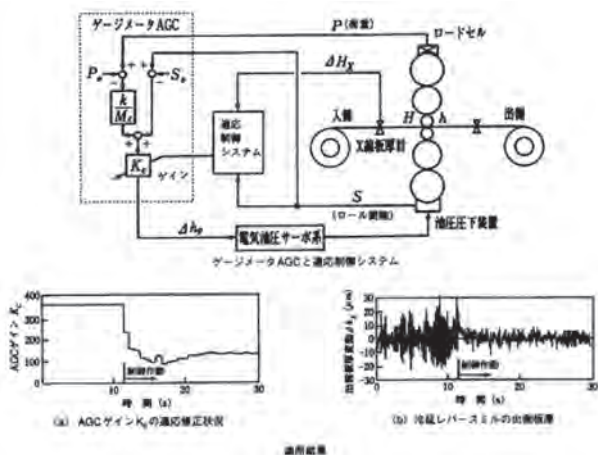


図 2 適応制御による板厚制御

- ①AGC 系の伝達関数を差分によって離散化し, 逐次推定に用いる線形予測式を構成する.
- ②板厚計による入り側板厚変動とロール間隙変動のデータを用いて, 線形予測式の係数パラメータを逐次推定する.
- ③推定されたパラメータを用いて AGC の制御ゲ

インを制御周期毎に (2) 式を適応修正し, 最適な値に逐次更新する.

④ ①~③を制御周期毎に繰り返す.

次に, パラメータの逐次推定法によるロール偏芯制御技術を紹介する[3]. 圧延機のロールには, 固有の幾何学的な偏芯がある. 偏芯は, ロール 1 回転毎の周期的外乱であり, 高周波の板厚変動を引き起こす. また, ゲージメータ AGC では, 偏芯に対しては, 誤制御となる. そこで, ロール偏芯を保証することによって板厚精度の向上を図る必要がある. すなわち, 各ロールの偏芯量と位相量を推定し, 圧延時にこれらの推定量に基づいて予測制御を行う.

ここでは, 偏芯量と位相角の各パラメータの推定に, 適応制御で用いたパドメータの逐次推定手法を適用する. 図 3 に実機システムと適用結果を示す. 特徴は以下の通りである.

①偏芯による荷重変動を各ロールの幾何学的偏芯によって形成される正弦波の重ね合わせでモデル化する.

$$\Delta P_e = M \sum_l \sum_m e_{Rlm} \sin(m\theta_l(j) + \Phi_{lm}) \quad (3)$$

($j=1, 2, \dots$)

②上記モデルをベクトル表現し, 偏芯量と位相角で構成される未知ベクトルを逐次推定法によって, 時々刻々, 推定する.

③推定されたパラメータを用いて各ロールの偏芯を予測し, その値に応じて圧下量を操作し, 偏芯を補償する.

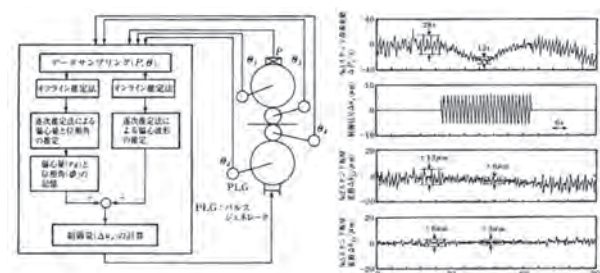


図 3 逐次推定法によるロール偏芯制御

2.4 ロバスト制御の応用

連続铸造機 (連铸) は, タンディシュに注入された溶湯 (溶けた鉄) を連続的に強冷却して鋼を製造する設備である. 連铸の铸型内湯面レベル制御の精度は, 铸片の品質や操業の安定化に大きな

影響を与える。タンディッシュから鋳型への溶湯の注入は、スライドバルブによって操作される。系の動特性を考察すると、スライドバルブの非線形性に加え、バルジングによる低周波外乱が存在する。そこで、 H^∞ 制御によって、ロバスト安定を達成し、低周波外乱を抑制する制御系を設計する[4]。図4に制御システムと実機適用結果を示す。

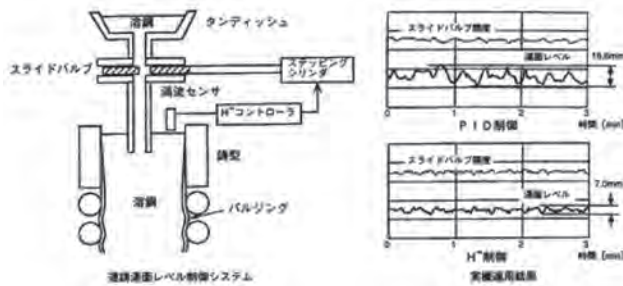


図4 H^∞ 制御による連铸の湯面レベル制御

- ①鋳型を積分特性で表し、ステッピングシリンダと渦流センサの特性を1次遅れ+無駄時間系で近似する。
- ②感度関数は外乱（バルジングなどによる変動）を入力とし、湯面レベルを出力とする伝達関数となり、相補間感度関数は、外乱を入力とし制御器の出力信号を出力とする伝達関数となる。
- ③混合感度問題では、感度関数と相補間感度関数をそれぞれの重み関数で整形する。ここでは、バルジングによる低周波外乱を抑制するため、感度関数に対応する重み関数において、低周波のゲインを大きくする。

2.5 非線形性システムの適応型制御

系の非線形性や経時的な変化に起因して要求品質を満たさぬ場合があり、これに対応するため、様々な工夫がなされている。そこで、製鋼工程において、アドバンスト制御による最適化制御について紹介する。

高炉で製造された溶銑には、炭素、珪素、燐などの成分が含まれている。転炉では、これら成分を調整処理し、所定の性質を実現する。転炉製鋼の概要を図5に示す。また、ランスからの酸素通入による吹錬とともに造滓材として副原料が投入され、その結果、滓化によってスラグが生成される。滓化の過程では、脱燐が行われる。このとき、溶鋼中に残る燐の濃度が目標濃度以下となるように適切な量の副原料を投入する必要がある。

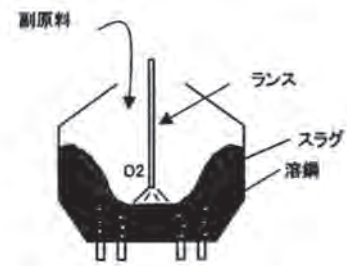


図5 転炉製鋼の概略

必要以上の副原料を投入すれば、燐濃度は目標値を下回り、かつ余分な副原料コストが発生する。従来は、現場作業者の経験的な操作によって副原料投入量を決定していた。

ここでは、燐バランスや熱収支を記述する非線形の特性格方程式が基本となる。一方、耐火物の溶損による炉内状況の変化やランスの変化に起因する経時的な特性の変化が発生する。これらに対応するために、モデルの適応修正技術やこれに基づく最適化制御技術の確立が課題である。そこで、燐化合物生成の理論モデルに操業中に得られるデータを活用し、時々刻々、オンラインでモデルを適応修正し、推定精度を高精度化する。また、修正されたモデルに基づいて、最適化計算によって投入量を決定する。これらを特徴とする転炉副原料の最適投入量制御システムを紹介する[5]。

転炉吹錬の基本式を以下に示す。(4)式はスラグ中燐濃度 Psl と溶鋼中燐濃度 Pst の燐分配を表わし、(5)式は燐収支モデルを示す。

$$\log Lp = \log \frac{Psl}{Pst} = \frac{P1}{Ttd + 273} + P2 \cdot \log(TFe \cdot 100) + P3 \cdot CS + P4 \cdot CS^2 + P5 \cdot \log(CaO \cdot 100) + P6 \cdot \log(MgO \cdot 100) + P7$$

$$Pin = Wsl \cdot Psl + Wst \cdot Paim \quad (5)$$

ここで、(4)式では、 Ttd : 吹き止め時の溶鋼温度、 TFe : 溶鋼中酸化鉄の重量比、 CS : 塩基度、 CaO : 溶鋼中酸化カルシウムの重量比、 MgO : 溶鋼中酸化マグネシウムの重量比、 $Pi (i=1, \dots, 7)$: 係数パラメータを表し、(5)式では、 Pin : 投入される燐の総重量、 Wst : 溶鋼の総重量、 $Paim$: 溶鋼中燐の目標濃度を表す。耐火物の溶損による炉内状況の変化やランスの変化に起因する経時的な特性の変化に適応的に追従し、モデルの精度を維持、向上させる必要がある。そこで、(4)式を、

$$y = \left[\frac{1}{Ttd + 273} \log(TFe \cdot 100) \quad CS \quad CS^2 \quad \log(CaO \cdot 100) \quad \log(MgO \cdot 100) \quad 1 \right] \times [P1 \quad P2 \quad P3 \quad P4 \quad P5 \quad P6 \quad P7]^T = x \cdot p \quad (6)$$

の線形結合式と考え、未知パラメータ P_i ($i=1, \dots, 7$) を推定し、モデルを修正する。

次に、副原料投入量の最適化制御を行う。(5)式の等式制約条件や CS , Wsl に与えられた不等式制約を満たしつつ、副原料のコストを最小にするために以下の評価関数を設定し、非線形計画法によって以下の評価指標 J を最小化する。

$$J = W1 \cdot [Pin - Wsl \cdot Psl - Wst \cdot Paim] + W2 \cdot a \cdot Wssk + W3 \cdot b \cdot Wro + W4 \cdot \exp(Wsl_{low} - Wsl) + W5 \cdot \exp(CS_{low} - CS) + W6 \cdot \exp(CS - CS_{up}) \quad (7)$$

ここで、右辺第2項と3項は、副原料である焼石灰とロー石のコストを評価し、 a, b は、それぞれの単価を表す。スラグ重量 Wsl は下限値 Wsl_{low} を、また、塩基度 CS については、上下限值 CS_{up}, CS_{low} の制約を満たす必要があり、それらは、右辺第3～5項のペナルティ項として反映させている。また、 $W1, \dots, W6$ は、重み係数である。制御システムの概念図を図6に示す。

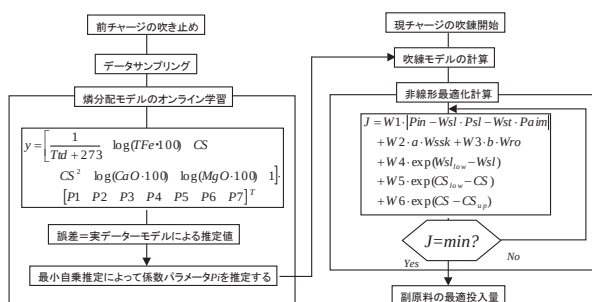


図6 転炉副原料の最適投入量制御システム

400 チャージ分の実操業データを用いて、本システムの有用性を考察した。ここでは、(3.2)式の燐目標値 $Paim$ に実操業によって得られた溶鋼中燐濃度の実績値を与え、(3.4)式を最適化した。決定変数として得られた $Wssk, Wro$ の値を実操業値と比較し、各チャージごとにプロットした結果を図7に示す。

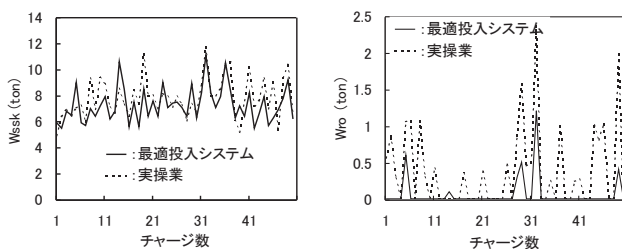


図7 最適投入システムの制御結果

3 製造工程の最適スケジューリングの事例

製造工程の最適スケジューリングの事例として、ロバストスケジューリングの開発事例を紹介する[6]。ロバストスケジューリングとは、生産設備の突然の故障や部材切れなどに柔軟に対応するスケジューリングのことである。ロバスト性を実現するには、製造工程スケジュールに「余裕」を設ける必要があるが、一方では、生産性を確保するためには、その充当率を考慮する必要がある。

ここでは、受注時期が不明な製品を含む多品種少量製造工程において、充当率と製造リードタイムの最適化を目的としたロバストスケジューリング手法を開発した。製造工程をカラーペトリネット (CPN: Colored Petri Net) でモデル化し、多目的最適化手法によって最適スケジュールを決定している。また、段取り時間の変動をポアソン分布で考慮することで、その影響を最小に抑えている。プレス設備による加工工程を対象とし、シミュレーションによってその有効性を検証した。

生産スケジューリングでは、作業間にタイムバッファを設け、作業遅れに対応可能なスケジュールを作成するロバストスケジューリングが提案されている。しかし、現実の製造プロセスでは、大ロット製品と小ロット製品の製造を適正な割合にすることで利益を確保している。本研究では、大ロット製品と小ロット製品を多目的最適化により適正なバランスで製造するロバストスケジューリングを提案する。ここでは、タイムバッファにおける段取り時間の変動を統計的に考慮し、製品の充当率の向上を図る。また、CPNによりモデル化した製造工程のシミュレーションと多目的最適化により最適スケジュールを決定する。

3.1 スケジューリング対象

スケジューリング対象とする機械加工用プレス機による工程において、大ロット製品はロットサイズの大きな製造の主となる製品であり、受注日や納期などの受注内容は既知であることが多く、スケジュールの作成が比較的容易である。一方、小ロット製品は多品種少量であり、受注内容は未知であることが多いため、正確なスケジュールの決定は困難である。これより、製品を大ロット製品と小ロット製品に分けてスケジューリングする。各作業工程は段取り（治具の脱着や寸法調整）と加工から成り、実際の段取り時間と計画した段取り時間に誤差が生じて後工程に影響することがある。そこで、段取り時間の変動を統計的に考慮し、

影響を最小に抑える。

3.2 ロバストスケジューリング手法

本研究では，リードタイム(LT)と余剰時間(SPT)を，製造工程をシミュレートするCPNと多目的最適化手法(NSGA-II)により最小化することを特徴とするロバストスケジューリングを提案する．その構成を以下に示す．

(1) 大ロット製品の工程スケジューリング

LT を考慮しつつ，スケジュールを決定する．

(2) 小ロット製品の工程スケジューリング

(1)の作業間にあるタイムバッファ(TB)に小ロット製品の製造工程を組み込む． TB は，段取り時間(ST)と小ロット製品の製造工程が組み込まれるバッファ(SMT)から成る(図8)． SMT 内の SPT が最小となる最適なスケジュールを決定する．また，段取り時間の変動をポアソン分布を仮定してパラメータ λ により，その分布を調整する．

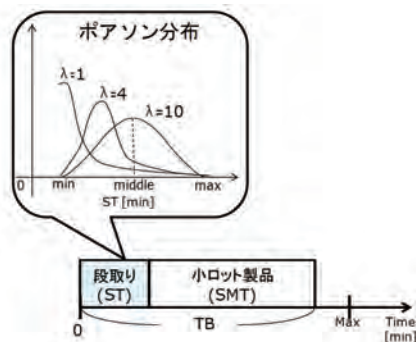


図8 小ロットサイズの工程スケジューリング

ここで，目的関数を(8)式，(9)式に示す．

$$LT = \max(et_i) \rightarrow \min \quad (8)$$

$$SPT = \frac{1}{\sum_{i=1}^{PRESS} TB_i} \sum_{i=1}^{PRESS} \left\{ \sum_{j=1}^{TB} spt_{ij} \right\} \rightarrow \min \quad (9)$$

また，製造工程のCPNモデルを図9に示す．

3.3 シミュレーションによる検証

FIFO(First In First Out)，単目的最適化(LT 最小化)及び提案手法により LT ， SPT 及び小ロット製品の充当率(AP)を比較して検証する．また，提案手法により得られたパレート解集合(図10)において，最も原点に近い値を最適解として選択する．

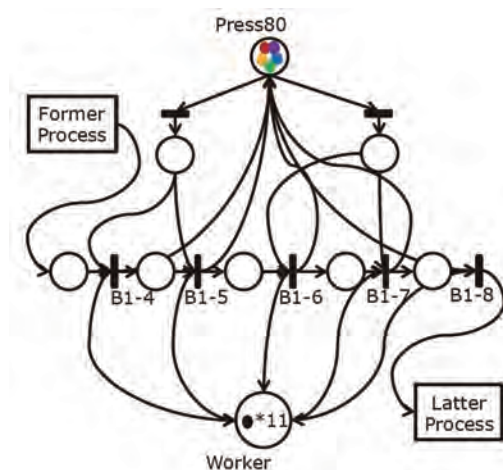


図9 製造工程のカラーペトリネットモデル

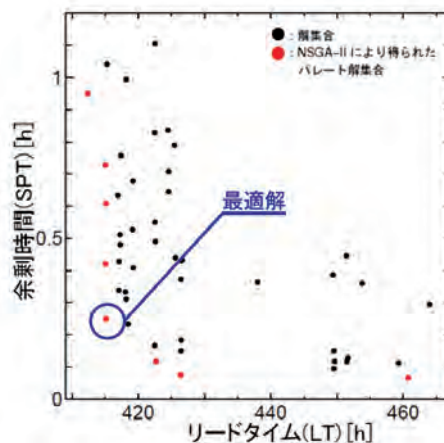


図10 ロバストスケジュールによる解集合

FIFOと単目的最適化及び提案手法を比較した結果を表1に示す．

表1 スケジューリング結果の比較

手 法	リードタイム(LT) [h]	余剰時間(SPT) [min]	製品充当率 [%]
FIFO	422.30	79.67	41.08
単目的最適化(LT最小化)	408.25	45.80	55.01
提案手法	415.12	13.40	87.29

まず，FIFOと提案手法を比較すると，提案手法は LT と SPT ともに短く，充当率も大きいため，効率的な生産であると言える．これは，大ロット製品の製造における待ち時間と小ロット製品の受注はFIFOの影響が大きいと考えられる．FIFOは，作業工程がスケジュールの後半部分に多く存在し，スケジュールの後半に受注した小ロット製品の製造工程は組み込むことができない．一方，提案手法はFIFOに比べて LT と TB のバランスが適正であり，充当率の向上につながったと考えられる．次に，単目的最適化と提案手法を比較すると，提案

手法は LT が長いが、 SPT は短く、充当率は大きくなっている。これは、単目的最適化はスケジュールの前半部分に作業工程多く存在するためである。結果として、提案手法が最も効率的な生産であるといえる。

段取り時間の変動の影響を見るため、ポアソン分布($\lambda=1, 10$)と固定値(ST)を比較する。また、実際の段取り時間の変動を正規分布と仮定し、シミュレーション結果との誤差(DT)を検証する。このとき、 DT は以下の(10)式により算出する。

$$DT = \frac{1}{\sum_{i=1}^{PRESS} TB_i} \sum_{i=1}^{PRESS} \left\{ \sum_{j=1}^{TB_i} |spt_{ij} - st_{ij}| \right\} \rightarrow \min \quad (10)$$

得られた結果を表2に示す。ポアソン分布の $\lambda=1, 10$ の場合、リードタイムはほぼ同一である。これは、固定値は平均値の35[min]であり、ポアソン分布は平均35[min]となる値に設定しているためである。また、 $\lambda=1$ の場合、 SPT と DT ともにより短くなっている。 $\lambda=1$ のポアソン分布は正規分布とほぼ等しいため、その影響が現れている。その結果、実際のデータにより求めた分布を ST に適用することで、小ロット製品の充当率が増加し、ロバストスケジューリングの効果が得られる。

表2 段取り時間変動の影響

手 法	リードタイム(LT) [h]	余剰時間(SPT) [min]	DT [min]
従来(35[min]に固定)	415.08	21.00	34.55
提案手法(ポアソン分布 $\lambda=1$)	426.43	9.67	2.63
提案手法(ポアソン分布 $\lambda=10$)	415.18	10.7	19.3

大ロット製品と小ロット製品の作業工程スケジューリングで構成されるロバストスケジューリングを提案した。その結果、大ロット製品のスケジューリングでは、リードタイムとタイムバッファのバランスを適正化した。また、小ロット製品のスケジューリングでは、段取り時間の変動を統計的に考慮することで影響を最小に抑え、タイムバッファの効率化により小ロット製品の充当率が向上した。

4. 生産情報学とその応用

4.1 生産情報学のコンセプト

製造に関わる理論は、物理的、数学的普遍性に基づいており、主に数式やモデルで表現される。製造の全てを説明できないが、実データの存在しない領域での予測性は高い。製造プロセスで計測されるデータは、正しく測定されていれば、測定

領域において製造の真実を表している。大量データの分析により統計解析モデルを構築できるが、理論的普遍性を陽に表現しておらず、データ領域外での予測性は乏しい。一方、多くの工場では、操業オペレータや技術スタッフの経験知やノウハウによる製造が行われている。ヒトのノウハウは個人に帰属し、共有化が困難である。また、経験知だけでは新製品の早期量産化はできない。現実には、これらの理論、データ、およびヒトのノウハウを組み合わせた生産活動が行われている。そこで、コンピュータ援用による製造支援を考えるには、これら3要素を組み合わせたシステムの構築が有効である。すなわち、製造に関わる理論・データ・ノウハウの融合による知的生産システムの実現により、安定生産や生産性・品質の向上、あるいは新製品の早期量産化が期待される。その概念を図11に示す。

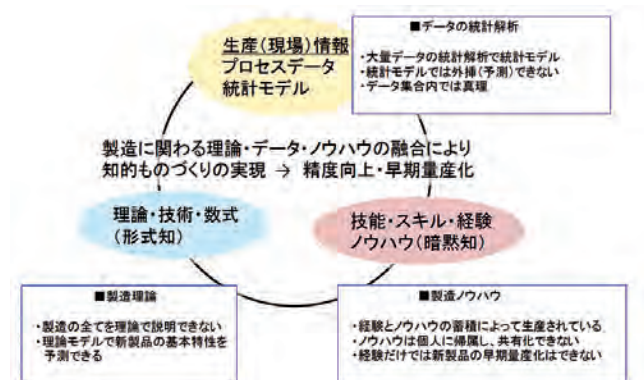


図11 知的生産システムのコンセプト

4.2 生産情報学の事例（リスクアセスメント）

上記の生産情報学のコンセプトに基づく製造事業所のリスクアセスメントシステムを紹介する。

製造現場（石油精製事業所）では、設備運転員の各個人が経験したヒヤリハット報告の情報を共有することによって、重大な事故や災害を未然に防止する活動が行われている。しかし、ヒヤリハットは操業者の知見やノウハウが含まれており、大量に蓄積されるものの、十分に活用されていない。ここでは、大量のヒヤリハットデータに確率推論手法を適用する事で、設備運転員に事故や不具合に関わる「気づき」を与えて事故の「芽を摘む」ことを目的とする。

解析に用いたヒヤリハット報告の例を以下の図12に示す。基本データとともに、自然文で書かれた体験内容や離散表現（チェック）で書かれたヒューマンファクターで構成されている。

図 12 ヒヤリハット報告書の例

ヒヤリハット報告書について、ヒューマンファクター（HF）と自由記述による「自然文ヒヤリハット体験内容」の知識体系を類別して分析対象とした。また、分析用データベースは機械学習を行うことによって全9年間分へ展開して推論対象を拡充することで、推論に活用する情報を充実させる。機械学習では、人手によって類別された1年分の類別結果を教師情報としてルールを作成し、これらのルールに従って、他年度データを類別する事で、全データの活用を可能とする。リスクアセスメントのための事故予兆の確率推論システムの概要を図13に示す。推論は、実プロセスで起こり得るTAG発報を受けて確率推論を行うアップストリーム分析と理論オントロジーに記載した事故や危険の背景にある理論項目から、関連するヒヤリハット報告に紐付くTAGを推論するダウンストリーム分析で構成されている。ここで、TAGは、各

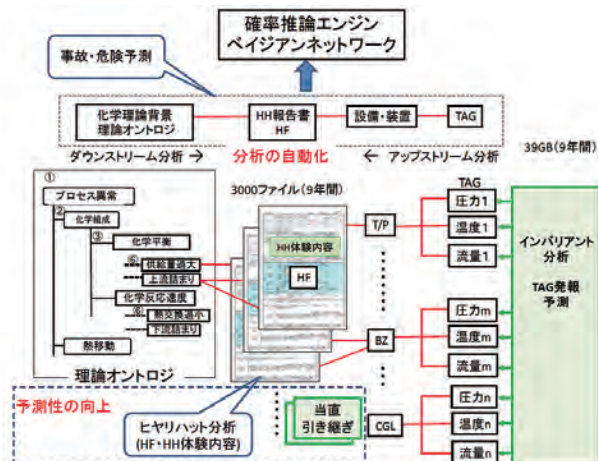


図 13 事故予兆の確率推論システム

種センサの識別番号を表しており、生産情報学では、製造データから得られた製造の異常（発報）情報を表す。

4.2.1 理論オントロジー

ヒヤリハット報告に含まれる現場で発生する事象の原因を化学理論的に分類し、木構造に体系化した理論オントロジーを利用する。理論オントロジーは、生産情報学における普遍的理論背景となる。本オントロジーの概要を図14に示す。本オントロジーでは事象の原因が化学理論知識として抽象-具体の関係を表す *is-a* 関係に基づき、ルート（親ノード）から順に6桁の数字と共に階層的に体系化されている。現場で発生する事象の原因は、プロセス異常、火災の危険、有害物危険、測定装置異常、機械的危険、プラント外、及び安全設備・手順異常のいずれかに分類できる。例えば、プロセス異常のさらなる原因は、化学組成、熱移動、物質移動のいずれかに分類できる。その中でも化学組成のさらなる原因は、原料組成変化、化学平衡、化学反応速度のいずれかに分類できる。このように最大で六階層まで分類する。本オントロジーの末端ノードに位置する概念は事象の本質的な原因である。本オントロジーのルートから順に、理論的一次原因、理論的二次原因、理論的三次原因、理論的四次原因、理論的五次原因、理論的六次原因（本質的な原因）とする。

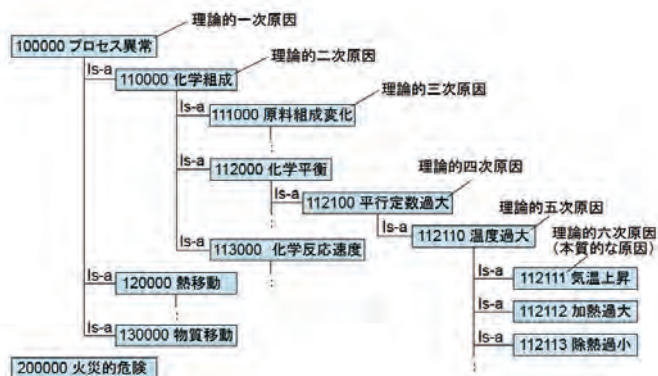


図 14 理論オントロジーの構成

本オントロジーのルートから論理的に展開された理論的原因が、対応するヒヤリハットに紐付けられている。ここでは、1件のヒヤリハットにつき、一連の理論的原因が紐付けられている。紐付けの概要を図15に示す。例えば、特定のヒヤリハットにおいて、プロセス異常が原因であり、その中でも木構造の分枝として、順に化学組成→化

学平衡→平衡定数過大→温度過大→気温上昇が原因であると展開した場合は、理論的一次原因として100000 プロセス異常、二次原因として110000 化学組成、三次原因として112000 化学平衡、四次原因として112100 平衡定数過大、五次原因として112110 温度過大、六次原因として112111 気温上昇を紐付けた。

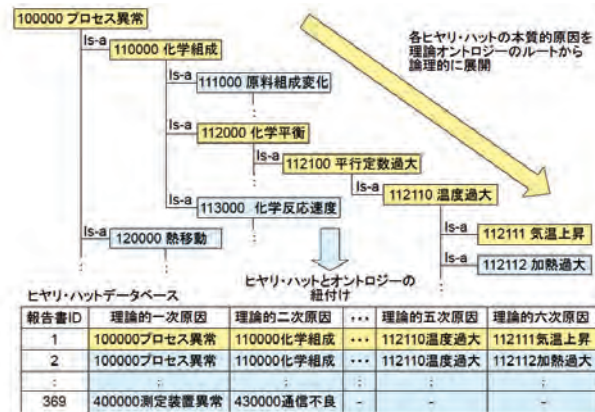


図 15 理論オントロジーとヒヤリハットの紐付け

4.2.2 自然文の分類

確率推論によって階層的な事故や危険に関わる「不具合」とその「対策」を分析するため、ヒヤリハット報告について三段階の分類を行い、これらを教師データとした。例として、不具合（一般的不具合）の分類を表 3 に示す。これらの教師データをもとに、機械学習によって、全 9 年間のデータを分類する。

表 3 自然文の分類（一般的不具合）

第一級不具合	第二級不具合	第三級不具合	第三級不具合内容
	ずれ・漏み	ずれ	蓋のずれ、密封部のずれ
		漏み	ノズルの漏み、ノズルが漏れ、フィルターが破れ、ネジが緩み、ソケットの漏み、押さえネジの漏み
	破損	割れ	ガラスの割れ、ガラスにひび、紙が割れ、筒部分に穴
		折れ	蓋みぎの足が取れ、折損、スバチのネジ曲がり
		変形	蓋が見づらく、汚れて取扱いにくい
	欠陥	不足	ハンドルがない、つけていたアースがなくなる、キャップがついていない、テープが剥がれ残骸もない、ボルトの締め止め
		劣化	塗料が薄く、保護材の劣化、保護はがれ、ドレン弁が閉まっている、ベント弁が閉まっている、バルブが閉、コック弁のみ閉止、コックが閉、弁の抜け込み
	弁の状態変化	弁の開き	弁の開き、元弁開度が微開、パイプが微開
		弁の微開	バルブ全開、弁が全開
		弁が全開	弁の開き、元弁が閉まって、ロード弁の不具合
		弁の閉じ	LSの不具合、故障、ブレーキが壊れた、切込ラインの破れ、ポンプが空回り、過剰の容器で溢れない、OH(自動応動)されていない
	機械異常	精製装置の異常	ファンリングの抜け、ゴミやスケールで機器がトラブル、制御異常、制御切れ、オーバートリップ、トリップ
		電入によるトラブル	電源が不調、サーボモーター、プロジェクタが動かさない、ファイルサーバの不具合、予備カードが壊れた
		表示の異常	ハウリング音、画面に白色のま、DCSアラームがチェック

4.2.3 ヒヤリハットデータの確率推論

確率推論(ベイジアンネットワーク)によって、

発報 TAG 群(製造プロセスの異常情報)に関わり、ヒヤリハットに含まれる重大な事象を推論する。推論に用いるデータベースの概要を表 4 に示す。

表 4 オンロトロジーとヒヤリハットの紐付けデータ

報告書No.	理論的一次原因	理論的二次原因	...	心理面	技術面	...	思い込み	経験不足	...	結果の重大性	T0001	T0002	...
1	火災の危険	危険物漏洩	...	1	0	...	1	0	...	火傷・けが	1	0	...
2	火災の危険	危険物漏洩	...	1	0	...	1	0	...	品質低下	0	1	...
3	有毒物の危険	有毒液体噴出	...	0	1	...	0	1	...	火傷・けが	0	0	...
4	火災の危険	危険物漏洩	...	0	0	...	0	0	...	公害	1	0	...

HH番号

理論オントロジー(全六次)

人的要因(HHより)

HHより TAG発報情報

T0001	T0002	...	不具合第一	不具合第二	...	対策第一	対策第二	...
1	0	...	材料の異常	噴出・吹き出し	...	作業	調整・変更	...
0	1	...	機器の不具合	欠陥・欠損	...	作業	補修・修復	...
0	0	...	材料の異常	噴出・吹き出し	...			...
1	0	...	機器の不具合	ずれ・緩み	...	確認・連絡	異常ないか確認	...

分析データベース(9年間)に基づいて確率推論を行った。ここでは、TAG「PC43202」と「PC43203」を発報させ、自然文のうち不具合の分析を行った。ここで、これらのTAGは、接触改質装置の水素ガスの圧力調節計を表す。証拠状態を、それぞれが最大値となる確率推論の連鎖「人的エラー」→「不注意」→「不注意による落下」「作業の不注意」となる。このように、アップ及びダウンストリーム分析では、各ノードで最も高い確率を示すイベントを証拠状態(確率値=1.0)として推論を連続的にを行い、各階層で最も関係の強い事象を抽出する。推論事例を図 16 に示す。

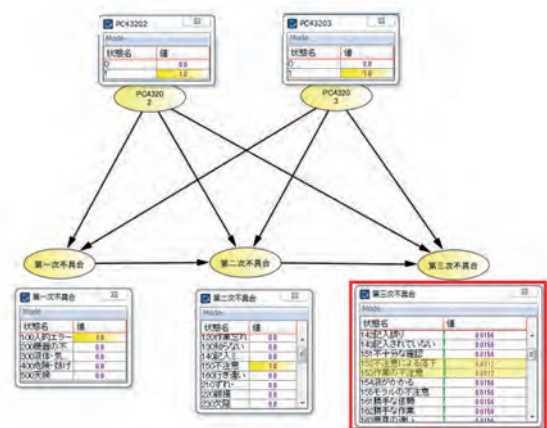


図 16 自然文(不具合)の推論例

次に、自然文のうち、対策の分析を行った。証拠状態を、それぞれが最大値となる確率推論の連鎖「作業」→「調整・変更」→「弁の調整」となる。「対策」の推論事例を図 17 に示す。

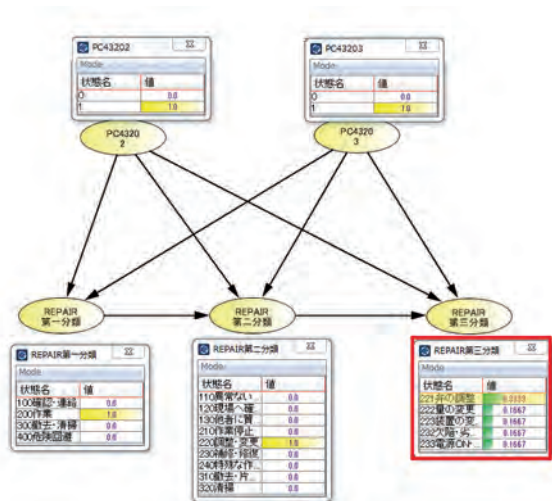


図 17 自然文（対策）の推論例

上記の方法を用いて複数の TAG を発報させたときの確率推論の結果の事例を表 4 に示す。

表 4 自然文の推論結果

発報 TAG	PC43202	PC43203	PC43202 と PC43203
不具合 (FAULT)	第一次不具合 第二次不具合 第三次不具合	第一次不具合 第二次不具合 第三次不具合	第一次不具合 第二次不具合 第三次不具合
対策・行動 (REPAIR)	第一次対策 第二次対策 第三次対策	第一次対策 第二次対策 第三次対策	第一次対策 第二次対策 第三次対策
装置情報	装置番号 装置名	装置番号 装置名	装置番号 装置名
理論的原因	理論的原因 理論的原因 理論的原因 理論的原因 理論的原因 理論的原因	理論的原因 理論的原因 理論的原因 理論的原因 理論的原因 理論的原因	理論的原因 理論的原因 理論的原因 理論的原因 理論的原因 理論的原因
Human Factor (人的要因)	人的要因 人的要因	人的要因 人的要因	人的要因 人的要因
結果の重大性	結果の重大性	結果の重大性	結果の重大性

選択不可：同一推論値 DBIに情報なし

ここで、証拠状態とした 4 件の TAG は、常圧蒸留装置の TAG であり、2 件の装置は、それぞれ、**F-2201A : CRUDE HEATER** (原油加熱炉) と **D-2201B : DESALTER** (脱塩器) である。2 件の TAG (PC2205 と PC2222) による推論において、液体・気体の不具合は「加熱炉の燃料 (オイル・ガス)」であり、対策・行動が「燃料の調整」となる。また、2 件の TAG (PC2201 と T2203) による推論において、液体・気体の不具合は「脱塩する原油」である。

本研究では、モデル事業で技術スタッフや運転員 (操業オペレータ) が、インバリエント分析 (NEC 社製プロセス異常検知システム) によって得られ

る意味のある発報 TAG を用いて確率推論を行い、連動した事故予兆や危険度を分析して実証を行う。そこで、現場で容易に実行できるプログラムを開発した。ここでは、上記で示したように、ある証拠状態のもとで、条件確率値が最大になる事象を連続的に証拠状態とし、自動的に推論を行う方法を「一括推論」とする。また、手動で証拠状態を設定して推論を行う方法を「逐次推論」としている。以下に、アップストリーム分析時のプログラム実行画面を示す。ここで、証拠状態とは、ベイジアンネットワークにおいて、特定の事象 (ノード) が発生させる事を言う。

インバリエント分析で抽出された TAG を発報させて確率推論を行った。その結果を図 18 に示す。



図 18 発報 TAG による確率推論結果

ここで、理論的原因が「選択不可」となっているのは、関わるヒヤリハットデータの数が少なく、計算結果に統計的意味を持たないことを意味している。

また、この事例について、モデル事業所の熟練技術スタッフによって作成された事故予兆シナリオを図 19 に示す。ここで、シナリオとは、確率推論結果に基づいて自己の経験に照らして実際に起こりえるであろう事故や危険の予兆を想像したものである。確率推論の結果は複数個のヒヤリハット報告を統計処理した情報であることから、シナリオ作成者の持つ個々のヒヤリハットの記憶量よりも、保有する経験知の広さや深さによって、その内容が異なる。この例では、不具合の具体的な事象を示している「不具合」の欄の「液体」と自己の経験知 (装置番号 **T-8302** **T-8305** は分解軽質軽油を貯蔵するタンクに付与されている) を用いて分解軽質軽油を想像し、「撤去と清掃の対策」を予兆している。また、「圧力低下」については想像することなく、直接的にシナリオに記載されている。

発報TAGはC-4503に付属する計器であり、装置番号「T-8302・T-8305」より当該装置の処理油種の一部である分解軽質軽油の量の急激なDOWNや急な性状の変化があったのではとの予測が出来る。
一方、不具合、対策・行動の項より、当該装置についている循環冷却水のメインストレーナーの詰まりが発生し、そのストレーナーバイパスを急激に開けたことによりその量が一時的に上昇し、当該タワーの圧力低下に結び付くのでは？との予測もできる。

図 19 確率推論結果のシナリオ作成例

一方、本確率推論に関わる事象が発生したときに作成されたヒヤリハット報告を図 20 に示す。確率推論の結果には、ヒヤリハット内の「圧力の低下」や「清掃」が含まれており、確率推論の正当性が示されている。また、「後でわかった」が確率推論では「知識不足」として反映されており、確率推論の妥当性が見出せる。モデル事業所の評価として「本事例については事故までには至らないと考えるが、装置の変動の気付きとして評価できる」としている。

C-4503 のオフガスが4800→3300m3N/hへ急激に変化した。原因が判らず HMFの圧力が低下してびびりした。当日 CLOタンク T-8302 開放清掃準備で T-8305 → T-8302 切り替えを実施しており、T-8302 には置換用に TLGO が張り込まれていたため切り替えによるフィードの性状変化によるものと 後でわかった。

図 20 確率推論結果に関連するヒヤリハット

ヒューマンファクターの分析に加え、ヒヤリハット報告に記述された自然文（ヒヤリハット体験内容）を階層構造に類別してデータベース化して確率推論を行った。また、意味のある発報 TAG を用いた確率推論を行い、その結果から技術スタッフによって事故や危険に関わる予兆を見出すシナリオを作成した。

本事例では、図 11 の知的製造において、意味のある発報 TAG 群がプロセスデータから得られた製造情報であり、ヒヤリハットにはヒト（操業オペレータ）の経験知やノウハウが含まれている。また、理論オントロジーは石油化学（石油精製に関わる危険性）の普遍的知識である。本研究では、これらを紐付けしたデータベースに確率推論を適用して事故予兆を行い、その「気付き」と人の経験知からシナリオを想像することを特徴とするリスクアセスメントシステムの構築を目指している。

なお、本項目の内容は、経産省「平成 28 年度 IoT 推進のための新産業モデル創出基盤整備事業（自主保安高度化に向けた実証事業）」の成果として公表する。

4. おわりに

筆者は、企業において、主に制御理論を応用したプロセス制御システムや最適化理論によるスケジューリング技術を開発してきた。これらの技術

は、これらの手法は数理科学を基盤としており、理論的な最適性は保証されている。しかし、現実の様々な変化や誤差に対しては脆弱である。大学では、現場で発生する変動や現実の操業ノウハウを考慮したロバストスケジューリングや人（操業者や技術スタッフ）の発信する情報を含むヒヤリハット報告をビッグデータとして活用したリスクアセスメントシステムを開発してきた。これらは、理論、プロセスデータ、および人の経験知やノウハウによる知的生産システムとして統合化するとともに、生産情報学として体系化される。

参考文献

- [1] 北村, 能勢, 小西, 中田, 高橋: 油圧圧下 AGC の最適制御ゲインの設計, システム制御情報学会論文誌, Vol. 2, No. 5, pp. 147-154, 1989
- [2] 中山, 北村, 能勢, 小西: 圧延板厚制御系 STR システム, 第 27 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 481-482, 1988
- [3] 北村, 高橋, 能勢, 小西, 菊地: 逐次推定法による圧延のロール偏心制御, システム制御情報学会論文誌, Vol. 2, No. 9, pp. 287-300, 1989
- [4] 村上, 西田, 三木, 松浦, 中尾: 連続铸造機湯面レベルの H^∞ 制御, システム制御情報学会論文誌, Vol. 10, No. 11, pp. 607-615, 1997
- [5] S. Nisino, T. Omori, A. Kitamura, S. Kimura, R. Misumi and K. Semura: Optimum Calculation Method of Flux, Volume for Converter in Kakogawa Works; Proc. of Japan-U. S. A. Symposium on Flexible Automation, pp. 405-411, 1998
- [6] 楠本, 北村, 中村: 段取り時間を考慮した多品種少量製品製造向けロバストスケジューリング, 第 56 回システム制御情報学会研究発表講演論文集, T13-4, pp. 283-284, 2012
- [7] 北村ほか: 平成 28 年度 IoT 推進のための新産業モデル創出基盤整備事業(自主保安高度化に向けた実証事業) 報告書, <http://www.nedo.go.jp/content/100865368.pdf>

Software Reliability Modeling Research and Its Brief History in My Career

山田 茂
鳥取大学大学院工学研究科社会経営工学講座

Shigeru YAMADA
Department of Social Management Engineering, Graduate School of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: yamada@sse.tottori-u.ac.jp

Abstract: Software reliability is one of the most important characteristics of software quality. Its measurement and management technologies during the software life-cycle are essential to produce and maintain quality/reliable software systems. In this paper, we discuss software reliability modeling and its applications. As to software reliability modeling, hazard rate and NHPP models are investigated particularly for quantitative software reliability assessment. Further, imperfect debugging and software availability models are also discussed with reference to incorporating practical factors of dynamic software behavior. Finally, the history of my software reliability modeling research effort is briefly summarized in Appendix.

Key Words: Product quality/reliability assessment, Software reliability growth modeling, Hazard rate, Nonhomogeneous Poisson process, Imperfect debugging, Software availability, Markov process.

1. Introduction

A *software reliability model (SRM)* is a mathematical analysis model for the purpose of measuring and assessing software quality/reliability quantitatively. Many software reliability models have been proposed and applied to practical use because software reliability is considered to be a “*must-be quality*” characteristic of a software product. The software reliability models can be divided into two classes as shown in Figure 1. One treats the upper software development process, i.e., design and coding phases, and analyzes the reliability factors of the software products and processes, which is categorized in the class of static model. The other deals with testing and operation phases by describing a software failure-occurrence phenomenon or software fault-detection phenomenon, by applying the stochastic/statistics theories and can estimate and predict the software reliability, which is categorized in dynamic model.

In the former class, a *software complexity model* is well known and can measure the reliability by assessing the complexity based on the structural characteristics of products and the process features to produce the products. In the latter class, a *software reliability growth model* is especially well known.

Further, this model is divided into three categories:

(1) *Software failure-occurrence time model*

The model which is based on the software failure-occurrence time or the software fault-detection time.

(2) *Software fault-detection count model*

The model which is based on the number of software failure-occurrence or the number of detected faults.

(3) *Software availability model*

The model which describes the time-dependent behavior of software system alternating up (operation) and down (restoration or fault correction) states.

The software reliability growth models are utilized for assessing the degree of achievement of software quality, deciding the time to software release for operational use, and evaluating the maintenance cost for faults undetected during the testing phase. We discuss the software reliability growth models.

2. Software Reliability Growth Modeling

Generally, a mathematical model based on stochastic and statistical theories is useful to describe the software fault-detection phenomena or the software failure-occurrence phenomena and estimate the

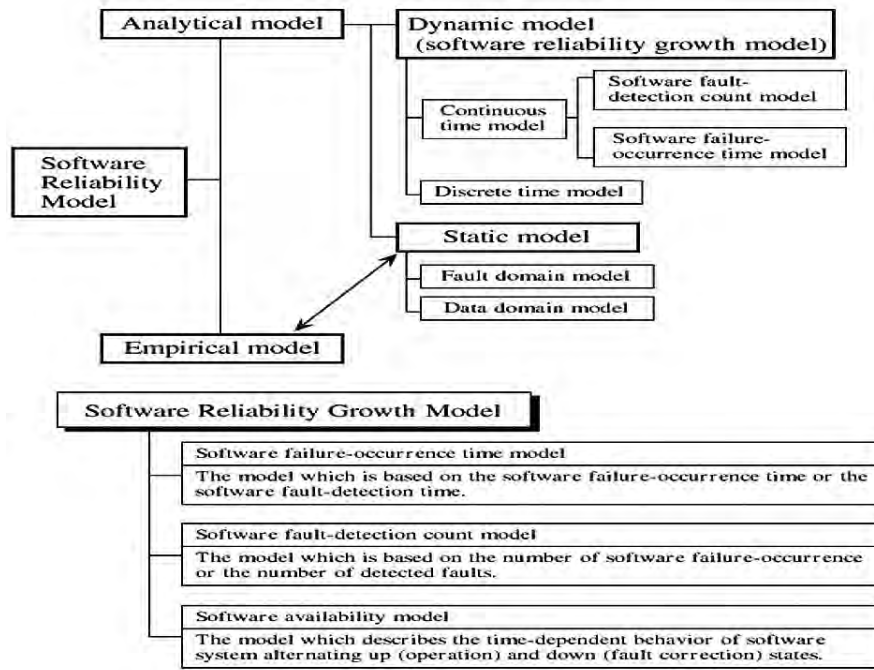


Fig. 1 Hierarchical classification of software reliability model.

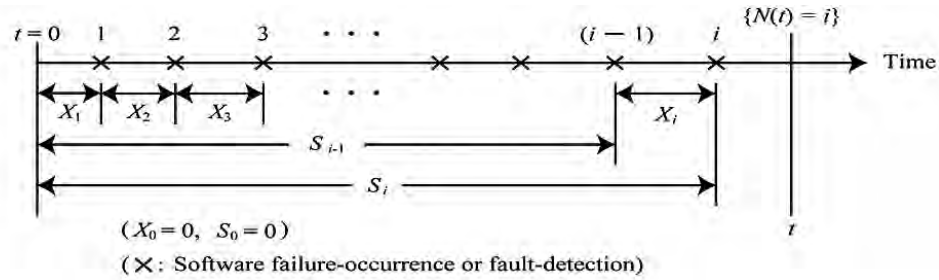


Fig. 2 The stochastic quantities related to a software fault-detection phenomenon or a software failure-occurrence phenomenon.

software reliability quantitatively. During the testing phase in the software development process, software faults are detected and removed with a lot of testing-effort expenditures. Then, the number of faults remaining in the software system decreases as the testing goes on. This means that the probability of software failure-occurrence is decreasing, so that the software reliability is increasing and the time interval between software failures becoming longer with the testing time.

A mathematical tool which describes software reliability aspect is a *software reliability growth model*.

Based on the plausible definitions, we can develop a software reliability growth model based on the assumptions used for the actual environment during the testing phase or the operation phase. Then, we can define the following random variables on the number

of detected faults and the software failure-occurrence time (see Figure 2):

$N(t)$ = the cumulative number of software faults (or the cumulative number of observed software failures) detected up to time t ,

S_i = the i -th software-failure occurrence time ($i=1,2,\dots; S_0=0$),

X_i = the time interval between $(i-1)$ -st and i -th software failures ($i=1,2,\dots; X_0=0$) .

Figure 2 shows the occurrence of event $\{N(t)=i\}$ since i faults have been detected up to time t . From these definitions, we have

$$S_i = \sum_{k=1}^i X_k, \quad X_i = S_i - S_{i-1}. \quad (1)$$

Assuming that the hazard rate, i.e., the software failure rate, for $X_i(i=1,2,\dots)$, $z_i(x)$, is proportional to the current number of residual faults remaining in the system, we have

$$z_i(x) = (N-i+1)\lambda(x) \quad (i=1,2,\dots,N; x \geq 0, \lambda > 0), \quad (2)$$

where N is the initial fault content and $\lambda(x)$ the software failure rate per fault remaining in the system at time x . If we consider two special cases in Eq. (2) as

$$\lambda(x) = \phi \quad (\phi > 0), \quad (3)$$

$$\lambda(x) = \phi x^{m-1} \quad (\phi > 0, m > 0), \quad (4)$$

then two typical software hazard rate models, respectively called the Jelinski-Moranda model and the Wagoner model can be derived, where ϕ and m are constant parameters. Usually, it is difficult to assume that a software system is completely fault free or failure free. Then, we have a software hazard rate model called the Moranda model for the case of the infinite number of software failure occurrences as

$$z_i(x) = Dk^{i-1} \quad (i=1,2,\dots; D > 0; 0 < k < 1), \quad (5)$$

where D is the initial software hazard rate and k the decreasing ratio. Eq. (5) describes a software failure-occurrence phenomenon where a software system has high frequency of software failure occurrence during the early stage of the testing or the operation phase and it gradually decreases thereafter. Based on the software hazard rate models above, we can derive several software reliability assessment measures. For example, the *software reliability function* for is given as

$$R_i(x) = \exp \left[- \int_0^x z_i(x) dx \right] \quad (i=1,2,\dots), \quad (6)$$

Further, we also discuss NHPP models, which are modeled for random variable $N(t)$ as typical software reliability growth models. In the NHPP models, a *nonhomogeneous Poisson process (NHPP)* is assumed for the random variable $N(t)$, the distribution function of which is given by

$$\Pr\{N(t) = n\} = \frac{\{H(t)\}^n}{n!} \exp[-H(t)] \quad (n=1,2,\dots),$$

$$H(t) = E[N(t)] = \int_0^t h(x) dx, \quad (7)$$

where $\Pr[\cdot]$ and $E[\cdot]$ mean the probability and expectation, respectively. $H(t)$ in Eq. (7) is called a mean value function which indicates the expectation of $N(t)$, i.e., the expected cumulative number of faults detected (or the expected cumulative number of software failures occurred) in the time interval $(0, t]$, and $h(t)$ in Eq. (7) called an *intensity function* which indicates the instantaneous fault-detection rate at time t .

From Eq. (7), various software reliability assessment measures can be derived. For examples, the expected number of faults remaining in the system at time t is given by

$$n(t) = a - H(t), \quad (8)$$

where $a \equiv H(\infty)$, i.e., parameter a denotes the expected initial fault content in the software system. Given that the testing or the operation has been going up to time t , the probability that a software failure does not occur in the time interval $(t, t+x](x \geq 0)$ is given by conditional probability $\Pr\{X_i > x | S_{i-1} = t\}$ as

$$R(x|t) = \exp[H(t) - H(x+t)] \quad (t \geq 0, x \geq 0). \quad (9)$$

$R(x|t)$ in Eq. (9) is a so-called *software reliability*. Measures of *MTBF (mean time between software failures or fault-detections)* can be obtained follows:

$$MTBF_i(t) = \frac{1}{h(t)}, \quad (10)$$

$$MTBF_c(t) = \frac{t}{H(t)}. \quad (11)$$

$MTBFs$ in Eqs. (10) and (11) are called *instantaneous and cumulative MTBFs*, respectively.

It is obvious that the lower the value of $n(t)$ in Eq. (8), the higher the value for specified x in Eq. (9), or the longer the value of $MTBFs$ in Eqs. (10) and (11), the higher the achieved software reliability is. Then, analyzing actual test data with accepted NHPP models, these measures can be utilized to assess software reliability during the testing or operation phase, where statistical inferences, i.e., parameter estimation and goodness-of-fit test, are usually performed by a method of maximum likelihood.

Table 1 A summary of NHPP models.

NHPP model	Mean value function $H(t)$	Intensity function $h(t)$	Environment
Exponential software reliability growth model	$m(t) = a(1 - e^{-bt})$ ($a > 0, b > 0$)	$h_m(t) = a(1 - e^{-bt})$	A software failure-occurrence phenomenon with a constant fault-detection rate at an arbitrary time is described.
Modified exponential software reliability growth model	$m_p(t) = a \sum_{i=1}^2 p_i (1 - e^{-b_i t})$ ($a > 0, 0 < b_2 < b_1 < 1,$ $\sum_{i=1}^2 p_i = 1, 0 < p_i < 1$)	$h_p(t) = a \sum_{i=1}^2 p_i b_i e^{-b_i t}$	A difficulty of software fault-detection during the testing is considered. (b_1 is the fault-detection rate for easily detectable faults; b_2 is the fault-detection rate for hardly detectable faults)
Delayed S-shaped software reliability growth model	$M(t) = a[1 - (1 + bt)e^{-bt}]$ ($a > 0, b > 0$)	$h_M(t) = ab^2 t e^{-bt}$	A software fault-detection process is described by two successive phenomena, i.e., failure-detection process and fault-isolation process.
Inflection S-shaped software reliability growth model	$I(t) = \frac{a(1 - e^{-bt})}{1 + ce^{-bt}}$ ($a > 0, b > 0, c > 0$)	$h_I(t) = \frac{ab(1+c)e^{-bt}}{(1+ce^{-bt})^2}$	A software failure-occurrence phenomenon with mutual dependency of detected faults is described.
Testing-effort-dependent software reliability growth model	$T(t) = a[1 - e^{-rW(t)}]$ $W(t) = \alpha(1 - e^{-\beta t^m})$ ($a > 0, 0 < r < 1, \alpha > 0,$ $\beta > 0, m > 0$)	$h_T(t) = ar\alpha$ $\cdot \beta m t^{m-1} e^{-rW(t)}$	The time-dependent behavior of the amount of testing effort and the cumulative number of detected faults is considered.
Testing-domain-dependent software reliability growth model	$D(t) = a[1 - \frac{1}{v-b}(v e^{-bt} - b e^{-vt})]$ ($v \neq b$)	$h_D(t) = \frac{avb}{v-b}$ ($e^{-bt} - e^{-vt}$)	The testing domain, which is the set of software functions influenced by executed test cases, is considered.
Logarithmic Poisson execution time model	$\mu(t) = \frac{1}{\theta} \ln(\lambda_0 \theta t + 1)$ ($\lambda_0 > 0, \theta > 0$)	$\lambda(t) = \frac{\lambda_0}{\lambda_0 \theta t + 1}$	When the testing or operation time is measured on the basis of the number of CPU hours, and exponentially decreasing software failure rate is considered with respect to the cumulative number of software failures.

a = the expected number of initial fault content in the software system.
 b, b_i, r = the parameter representing the fault-detection rate.
 c = the parameter representing the inflection factor of test personnel.
 p_i = the fault content ratio of Type i fault ($i = 1, 2$).
 α, β, m = the parameters which determine the testing-effort function $W(t)$.
 v = the testing-domain growth rate.
 λ_0 = the initial software failure rate.
 θ = the reduction rate of software failure rate.

To assess the software reliability actually, it is necessary to specify the mean value function $H(t)$ in Eq. (7). Many NHPP models considering the various testing or operation environments for software reliability assessment have been proposed in the last decade. Typical NHPP models are summarized in Table 1. As discussed above, a software reliability growth is described as the relationship between the elapsed testing or operation time and the cumulative number of detected faults and can be shown as the reliability growth curve mathematically. Among the NHPP models in Table 1, exponential and modified exponential software reliability growth models are appropriate when the observed reliability growth curve shows an exponential curve. Similarly, delayed S-shaped and inflection S-shaped software reliability

growth models are appropriate when the reliability growth curve is S-shaped.

In addition, as for computer makers or software houses in Japan, *logistic curve* and *Gompertz curve models* have often been used as software quality assessment models, on the assumption that software fault-detection phenomena can be shown by S-shaped reliability growth curves. In these deterministic models, the cumulative number of faults detected up to testing t is formulated by the following growth equations:

$$L(t) = \frac{k}{1 + m e^{-\alpha t}} \quad (m > 0, \alpha > 0, k > 0). \quad (12)$$

$$G(t) = k a^{(b^t)} \quad (0 < a < 1, 0 < b < 1, k > 0). \quad (13)$$

In Eqs. (12) and (13), assuming that a convergence value of each curve ($L(\infty)$ or $G(\infty)$), i.e., parameter k , represents the initial fault content in the software system, it can be estimated by a regression analysis.

3. IMPERFECT DEBUGGING MODELING

Most software reliability growth models proposed so far are based on the assumption of perfect debugging, i.e., that all faults detected during the testing and operation phases are corrected and removed perfectly. However, debugging actions in real testing and operation environments are not always performed perfectly. For example, typing errors invalidate the fault-correction activity or fault-removal is not carried out precisely due to incorrect analysis of test results. We therefore have an interest in developing a software reliability growth model which assumes an *imperfect debugging* environment. Such an imperfect debugging model is expected to estimate reliability assessment measures more accurately.

A. Imperfect debugging model with perfect correction rate

To model an imperfect debugging environment, the following assumptions are made:

- (1) Each fault which causes a software failures is corrected perfectly with probability $p(0 \leq p \leq 1)$. It is not corrected with probability $q(=1-p)$. We call p the perfect debugging rate or the perfect correction rate.
- (2) The hazard rate is given by Eq. (5) and decrease geometrically each time a detected fault is corrected (see Figure 3).
- (3) The probability that two or more software failures occur simultaneously is negligible.
- (4) No new faults are introduced during the debugging. At most one fault is removed when it is corrected, and the correction time is not considered.

Let $X(t)$ be a random variable representing the cumulative number of faults corrected up to the testing time t . Then, $X(t)$ forms a *Markov process*. That is, from assumption (1), when i faults have been corrected by arbitrary testing time t ,

$$X(t) = \begin{cases} i, & \text{with probability } q, \\ i+1, & \text{with probability } p, \end{cases} \quad (14)$$

(see Fig. 4). Then, the one-step transition probability for the Markov process that after making a transition

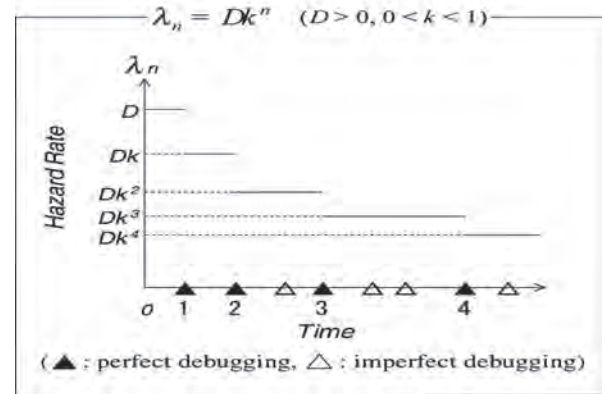


Fig. 3 Behavior of hazard rate.

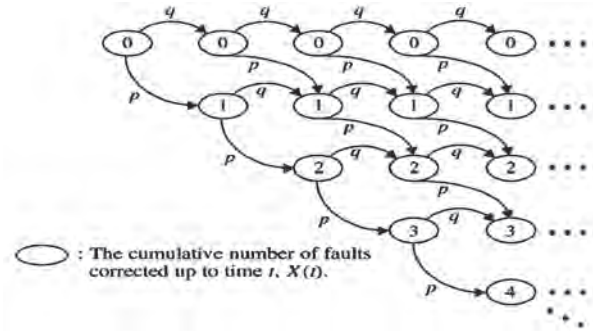


Fig. 4 A diagrammatic representation of transitions between states of $X(t)$.

into state i , the process $\{X(t), t \geq 0\}$ makes a transition into state j by time t is given by

$$Q_{ij}(t) = p_{ij}(1 - \exp[-Dk^i t]), \quad (15)$$

where p_{ij} are the transition probabilities from state i to state j and are given by

$$p_{ij} = \begin{cases} q, & (i = j) \\ p, & (i, j = 0, 1, 2, \dots) \\ 0, & (\text{elsewhere}). \end{cases} \quad (16)$$

Eq. (15) represents the probability that if i faults have been corrected at time zero, j faults are corrected by time t after the next software failure occurs. Therefore, based on Markov analysis by using the assumptions and stochastic quantities above, we have the software reliability function and the mean time between software failures for $X_i(i=1, 2, \dots)$ as

$$R_i(x) = \sum_{s=0}^{i-1} \binom{i-1}{s} p^s q^{i-1-s} \exp[-Dk^s x], \quad (17)$$

$$E[X_i] = \int_0^\infty R_i(x) dx = \frac{\left(\frac{p}{k} + q\right)^{i-1}}{D}. \quad (18)$$

And if the initial fault content in the system, N , is specified the expected cumulative number of faults debugged imperfectly up to time t is given by

$$M(t) = \frac{q}{p} \sum_{n=1}^N \sum_{i=0}^{n-1} A_{i,n} (1 - \exp[-pDk^i t]), \quad (19)$$

where $A_{i,n}$ is

$$A_{i,n} = \frac{A_{0,1} \equiv 1}{\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n-1} (k^j - k^i)} \quad \left. \vphantom{\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{n-1} (k^j - k^i)} \right\} \quad (20)$$

$(n = 2, 3, \dots; i = 0, 1, 2, \dots, n-1)$

B. Imperfect debugging model for introduced faults

Besides the imperfect debugging factor above in fault-correction activities, we consider the possibility of introducing new faults in the debugging process. It is assumed that the following two kinds of software failures exist in the dynamic environment, *i.e.*, the testing or user operation phase:

- (F1) software failures caused by faults originally latent in the software system prior to the testing (which are called inherent faults),
- (F2) software failures caused by faults introduced during the software operation owing to imperfect debugging.

In addition, it is assumed that one software failure is caused by one fault and that it is impossible to discriminate whether the fault that caused the software failure that has occurred is F1 or F2. As to the software failure-occurrence rate due to F1, the inherent faults are detected with the progress of the operation time. In order to consider two kinds of time dependencies on the decreases of F1, let $a_i(t) (i=1,2)$ denote the software failure-occurrence rate for F1. On the other hand, the software failure-occurrence rate due to F2 is denoted as constant $\lambda (\lambda > 0)$, since we assume that F2 occurs randomly throughout the operation. When we consider the software failure-occurrence rate at operation time t is given by

$$h_i(t) = \lambda + a_i(t) \quad (i=1,2). \quad (21)$$

From Eq. (21), the expected cumulative number of software failures in the time interval $(0, t]$ (or the expected cumulative number of detected faults) is given by

$$\left. \begin{aligned} H_i(t) &= \lambda t + A_i(t), \\ A_i(t) &= \int_0^t a_i(x) dx \quad (i=1,2) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Then, we have two imperfect debugging models based on an NHPP, where $h_i(t)$ in Eq. (21) and $H_i(t)$ in Eq. (22) are used as the intensity functions and the mean value functions ($i=1,2$) for an NHPP, respectively. Especially, exponential and delayed S-shaped software reliability growth models are assumed for describing software failure-occurrence phenomena attributable to the inherent faults (see Table 1).

4. SOFTWARE AVAILABILITY MODELING

Recently, software performance measures such as the possible utilization factors have begun to be interesting for metrics as well as the hardware products. That is, it is very important to measure and assess *software availability*, which is defined as the probability that the software system is performing successfully, according to the specification, at a specified time point. Several stochastic models have been proposed so far for software availability measurement and assessment. One group has proposed a software availability model considering a reliability growth process, taking account of the cumulative number of corrected faults. Others have constructed software availability models describing the uncertainty of fault removal. Still others have incorporated the increasing difficulty of fault removal.

The actual operational environment needs to be more clearly reflected in software availability modeling, since software availability is a customer-oriented metrics. In existing models the development of a plausible model is described, which assumes that there exist two types of software failure occurring during the operation phase. Furthermore, an operational software availability model is built up from the viewpoint of restoration scenarios.

The above models have employed Markov processes for describing the stochastic time-dependent behaviors of the systems which alternate between the up state, operating regularly, and the restoration state (down state) when a system is inoperable. Several stochastic metrics for software availability measurement in dynamic environment are derived from the respective models.

We discuss a fundamental software availability model below.

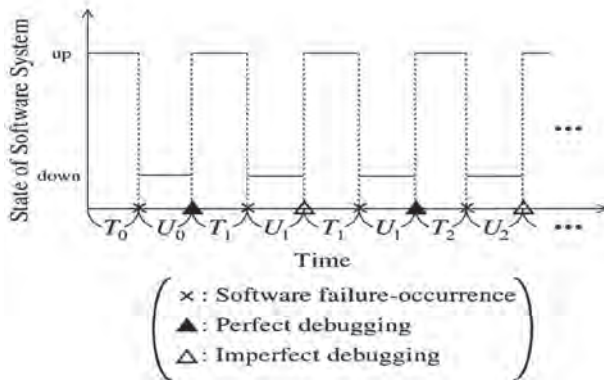


Fig. 5 Sample behavior of the software system alternating between up and down state.

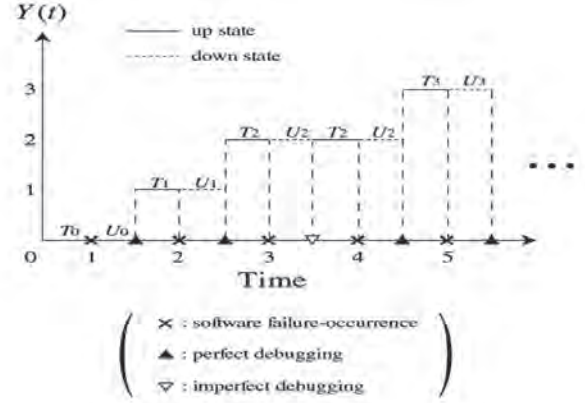


Fig. 7 A sample realization of $Y(t)$.

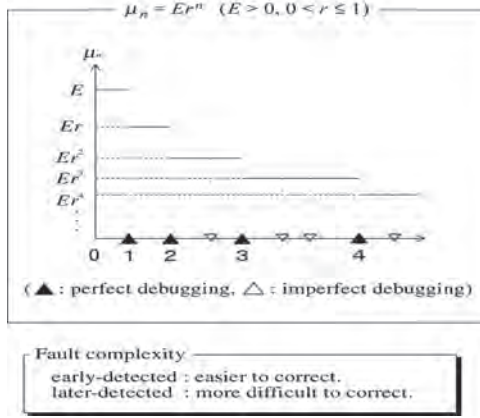


Fig. 6 Behavior of restoration rate.

A. Model description

The following assumptions are made for software availability modeling:

- (1) The software system is unavailable and starts to be restored as soon as a software failure occurs, and the system cannot operate until the restoration action is complete (see Figure 5).
- (2) The restoration action implies debugging activity, which is performed perfectly with probability a ($0 < a \leq 1$) and imperfectly with probability b ($=1-a$). We call a the perfect debugging rate. One fault is corrected and removed from the software system when the debugging activity is perfect.
- (3) When n faults have been corrected, the time to the next software failure occurrence and the restoration time follow exponential distributions with means of $1/\lambda_n$ and $1/\mu_n$, respectively.

- (4) The probability that two or more software failures will occur simultaneously is negligible.

Consider a stochastic process $\{X(t), t \geq 0\}$ with the state space (W, R) where up state vector $W = \{W_n; n=0,1,2,\dots\}$ and down state vector $R = \{R_n; n=0,1,2,\dots\}$. Then, the events $\{X(t)=W_n\}$ and $\{X(t)=R_n\}$ mean that the system is operating and inoperable, respectively, due to the restoration action at time t , when n faults have already been corrected.

From assumption (2), when the restoration action has been completed in $\{X(t)=R_n\}$,

$$X(t) = \begin{cases} W_n, & \text{with probability } b, \\ W_{n+1}, & \text{with probability } a, \end{cases} \quad (23)$$

We use the Moranda model in Eq. (5) to describe the software failure-occurrence phenomenon, i.e., when n faults have been corrected, the software hazard rate λ_n (see Figure 3) is given by

$$\lambda_n = Dk^n \quad (n=0,1,2,\dots; D>0, 0<k<1) \quad (24)$$

The expression of Eq. (24) comes from the point of view that software reliability depends on the debugging efforts, not the residual fault content. We do not note how many faults remain in the software system.

Next, we describe the time-dependent behavior of the restoration action. The restoration action for software systems includes not only the data recovery and the program reload, but also the debugging activities for manifested faults. From the viewpoint of the complexity, there are cases where the faults detected during the early stage of the testing or operation phase have low complexity and are easy to

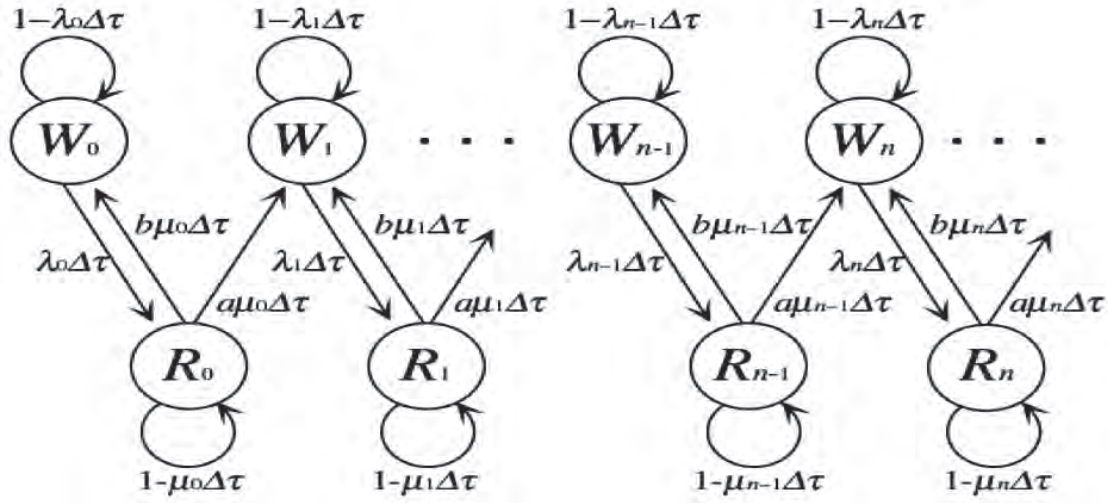


Fig. 8 A state transition diagram for software availability modeling.

correct/remove, and as the testing is in progress, detected faults have higher complexity and are more difficult to correct/remove. In the above case, it is appropriate that the mean restoration time becomes longer with the increasing number of corrected faults. Accordingly, we express μ_n as follows (see Figure 6):

$$\mu_n = Er^n \quad (n=0,1,2,\dots; E>0, 0<r<1) \quad (25)$$

where E and r are the initial restoration rate and the decreasing ratio of the restoration rate, respectively. In Eq. (25) the case of $r=1$, i.e., $\mu_n = E$, means that the complexity of each fault is random.

Let T_n and U_n ($n=0,1,2,\dots$) be the random variables representing the next software failure occurrence and the next restoration time intervals when n faults have been corrected, in other words the sojourn times in states W_n and R_n , respectively. Furthermore, let $Y(t)$ be the random variable representing the cumulative number of faults corrected up to time t . The sample behavior of $Y(t)$ is illustrated in Figure 7. It is noted that the cumulative number of corrected faults is not always coincident with that of software failures or restoration actions. The sample state transition diagram of $X(t)$ is illustrated in Figure 8.

B. Software availability measures

We can obtain the state occupancy probabilities that the system is in state W_n and R_n at time point t as

$$P_{W_n}(t) \equiv \Pr\{X(t) = W_n\} = \frac{g_{n+1}(t)}{a\lambda_n} + \frac{g'_{n+1}(t)}{a\lambda_n\mu_n} \quad (n=0,1,2,\dots), \quad (26)$$

$$P_{R_n}(t) \equiv \Pr\{X(t) = R_n\} = \frac{g_{n+1}(t)}{a\mu_n}, \quad (27)$$

respectively, where $g_n(t)$ is the probability density function of random variable S_n , which denotes the first passage time to state W_n , and $g'_n(t) \equiv dg_n(t)/dt$. $g_n(t)$ and $g'_n(t)$ can be given analytically.

The following equation holds for arbitrary time t :

$$\sum_{n=0}^{\infty} [P_{W_n}(t) + P_{R_n}(t)] = 1. \quad (28)$$

The *instantaneous availability* is defined as

$$A(t) \equiv \sum_{n=0}^{\infty} P_{W_n}(t), \quad (29)$$

which represents the probability that the software system is operating at specified time point t . Furthermore, the *average software availability* over $[0, t]$ is defined as

$$A_{av}(t) \equiv \frac{1}{t} \int_0^t A(x) dx, \quad (30)$$

which represents the ratio of system's operating time to the time interval. Using Eqs. (26) and (27), we can express Eqs. (29) and (30) as

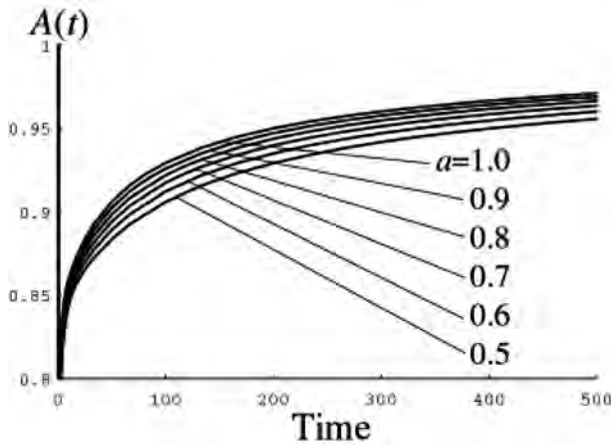


Fig. 9 Dependence of perfect debugging rate a on $A(t)$.

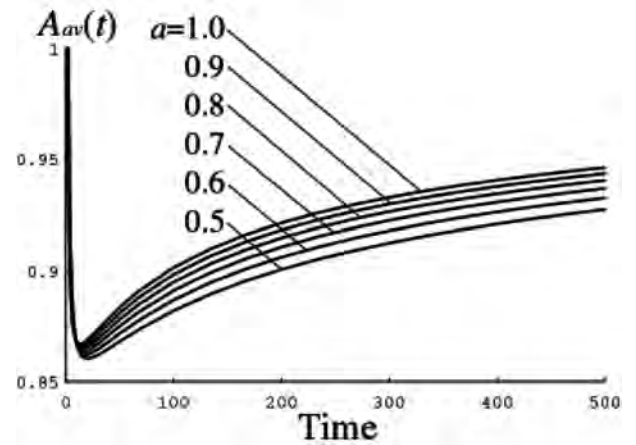


Fig. 10 Dependence of perfect debugging rate a on $A_{av}(t)$.

$$A(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{g_{n+1}(t)}{a\lambda_n} + \frac{g'_{n+1}(t)}{a\lambda_n\mu_n} \right] = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{g_{n+1}(t)}{a\mu_n}, \quad (31)$$

$$A_{av}(t) = \frac{1}{t} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{G_{n+1}(t)}{a\lambda_n} + \frac{g_{n+1}(t)}{a\lambda_n\mu_n} \right] = 1 - \frac{1}{t} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{G_{n+1}(t)}{a\mu_n}, \quad (32)$$

respectively, where $G_n(t)$ is the distribution function of S_n .

Figures 9 and 10 show numerical illustrations of $A(t)$ and $A_{av}(t)$ in Eqs. (31) and (32), respectively.

REFERENCES

- [1] S. Yamada and Y. Tamura, *OSS Reliability Measurement and Assessment*, Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
- [2] S. Yamada, *Software Reliability Modeling: Fundamentals and Applications*, Springer-Verlag, Tokyo/Heidelberg, 2014.
- [3] S. Yamada, *Elements of Software Reliability: Modeling Approach* (in Japanese), Kyoritsu Publishing, Tokyo, 2011.
- [4] S. Yamada, *Fundamentals and Applications of Software Engineering* (in Japanese), Surikogaku-sha, Tokyo, 2013.
- [5] S. Yamada and T. Fukushima, *Quality-Oriented Software Management* (in Japanese), Morikita Publishing, Tokyo, 2007.
- [6] S. Yamada, *Software Reliability Modeling* (in Japanese), JUSE Press, Tokyo, 1994.
- [7] S. Yamada and M. Takahashi, *Introduction to Software Management Models* (in Japanese), Kyoritsu Publishing, Tokyo, 1993.

APPENDIX

Professor Shigeru Yamada's Research Effort for Software Reliability Modeling

1975: BSE degree in Industrial Engineering received from Hiroshima University
 1977: MS degree in Industrial Engineering received from Hiroshima University
 1977–1980: Denso Co. (Quality Assurance Division)
 1983: Ph.D. degree in System Engineering received from Hiroshima University
 1983–1988: Assistant Professor/Senior Lecturer at Okayama University of Science

• November 1985: "Method of Software Reliability Assessment" ^{*}, Soft Research Center, Tokyo

* extended version from Ph.D. Thesis: "A Study on Software Reliability Growth Models Based on Nonhomogeneous Poisson Process and Its Statistical Inferences"

1988–1993: Associate Professor at the Department of Engineering, Hiroshima University

• May 1989: "Software Reliability Assessment Technologies, HBJ Publishing, Tokyo

• May 1990: "Software Reliability: Theory and Practical Application", Soft Research Center, Tokyo (Co-authored with Dr. H. Ohtera)

• May 1992: Best Author Award from Information Processing Society of Japan ^{*}

* S. Yamada, "Principles and Current Views in Software Quality Assessment: Quantitative Software Quality Assessment Method Based on Software Reliability Growth Models," IPSJ Magazine, Vol. 32, No. 11, pp. 1189–1202, 1991.

• March 1993: Telecom System Technology Award from Telecommunications Advancement Foundation ^{*}

* Shigeru Yamada: "Software Quality/Reliability Measurement and Assessment: Software Reliability Growth Models and Data Analysis," Journal of Information Processing, Vol. 14, No. 3, pp. 254–266, 1991.

• March 1993: "Introduction to Software Management Model," Kyoritsu Publishing, Tokyo (Co-authored with Dr. M. Takahashi)

Professor Shigeru Yamada's Research Effort for Software Reliability Modeling

1993-present: Professor at the Dept. of Social Management Engineering, Graduate School of Engineering, Tottori University

• November 1994: "Software Reliability Model-Fundamentals and Applications-," JUSE Publishing, Tokyo

• November 1998: "Statistical Quality Control for TQM," Corona Publishing, Tokyo (Co-authored with Dr. M. Kimura and Dr. M. Takahashi)

• February 1999 – present: Member of Deming Prize Committee

• May 1999: Takagi Prize 1998 (Best Paper Award) from Reliability Engineering Association of Japan *

* "Performance Evaluation Modeling for Fault-Tolerant Software Systems with Processing Time Limit," Journal of Reliability Engineering Society of Japan, Vol. 20, No.7, pp. 422-432, 1998. (Co-authored with Ms. M. Yamamoto and Dr. M. Kimura)

• December 2003: International Leadership Award in Reliability Engg. Research, (ICQRIT and SREQOM), India.

• March 2004: Research Achievement Award 2003 from President of Tottori University

• November 2004: "Software Reliability: Model, Tool, Management," Society of Project Management, Narashino (Co-authored with Dr. T. Fujiwara)

• March 2006: Best Paper Award from Society of Project Management*

* "The Proposal and the Trial for Software Quality Management System in the Global Era" Journal of the Society of Project Management, Vol. 7, No. 2, 21-26, 2001. (Co-authored with Dr. K. Yasuda, A. Ooishi, and N. Yoshida)

• March 2007: "Quality-Oriented Software Management~Project Management for Highly Quality Software Development-," Morikita Publishing, Tokyo (Co-authored with Dr. T. Fukushima)

• March 2007: Fellowship Recognition from Operations Research Society of Japan

• August 2007: Leadership Award in Appreciation for Outstanding Contribution to ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design from ISSAT, U.S.A.

• December 2009: International Leadership and Pioneering Research Award in Software Reliability Engineering, SREQOM, India

• March 2010: Research Achievement Award on "Software Reliability Engineering" from President of Tottori University

• November 2010: Exceptional International Leadership and Contribution Award in Software Reliability, ICRITO' 2010, India

• August 2011: "Elements of Software Reliability – Modeling Approach –," Kyoritsu Publishing, Tokyo

• February 2012: "Project Management," Kyoritsu Publishing, Tokyo (Co-authored with Dr. K. Esaki, Mr. H. Takane, and Dr. M. Takahashi)

• June 2012: 2011 Best Paper Award from IEEE Reliability Society Japan Chapter*

* "Codesign-Oriented Performability Modeling for Hardware-Software Systems," IEEE Transactions on Reliability, Vol. 60, No. 1, pp.171-179, 2011. (Co-authored with Dr. K. Tokuno)

• July 2013: "Fundamentals and Applications for Software Engineering," Surikogaku-sha, Tokyo (Co-authored with Dr. Y. Tamura)

• Marh 2014: "Software Reliability Modeling: Fundamentals and Applications", Springer-Verlag (Springer Briefs in Statistics), Tokyo/Heidelberg

• May 2014: The Korean Reliability Society's Certificate of Appointment "Honorary Canon", KORAS, Korea

• August 2014: Leadership Award for Outstanding Contributions to ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design from ISSAT, U.S.A.

• November 2014: Project Management Service Award from Society of Project Management

• February 2015: The Title of "Honorary Professor" Recognition from Amity University, India

• April 2016: "OSS Reliability Measurement and Assessment", Springer International Publishing (Springer Series in Reliability Engineering), Switzerland (Co-authored with Dr. Y. Tamura)

• March 2017: Contribution Award for Promoting OR from Operations Research Society of Japan

• August 2017: Research Award from ISSAT (International Society of Science and Applied Technologies), Piscataway, New Jersey, U.S.A.

(Academic Publication Effort: Authored Books:13, Book Chapters: 62, Refereed Journal Papers: 291, Refereed Conference/Symposium Papers: 342, Survey Papers: 25, Keynote Address: 11, Invited Talk: 46 since March 1976 up to 2017)

液相電解自動合成法によるオリゴ糖の自在合成を目指して

野上 敏材

鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科工学専攻応用化学コース

Towards Development of a Practical Method for Oligosaccharide Synthesis Based on Automated Electrochemical Solution-Phase Synthesis

Toshiki NOKAMI

Department of Engineering, Graduate School of Sustainable Sciences

Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan

E-mail: tnokami@chem.tottori-u.ac.jp

Abstract: The author and his co-workers are developing a method for automated solution-phase synthesis of oligosaccharides based on electrochemical oxidation. In this article how the author connected the dots of oligosaccharide synthesis and electrochemical oxidation and merged into the automated electrochemical synthesizer are described.

Key Words: Automated synthesis, Electrochemical Oxidation, Oligosaccharide, Glycosylation

1. はじめに

頂いた執筆依頼を読みながら、ご退職予定の江坂享男先生（現名誉教授）に原稿をお願いしたのを懐かしく思い出した。さて、この歴史ある工学部研究報告であるが、年1回業績リストを作成する機会を除けば、構成員ですら存在を意識することは無いだろう。また、オンラインの業績報告やデータベースも存在する昨今、なぜ部局独自の業績リストを作成する必要があるのだろうか、編集委員会委員として考える機会があった。

この種の報告には、少なくとも2つの意義があると思う。まずは工学部の学科間や研究室間で業績を毎年、定量的に比較するための情報を提供する意義である。これは専門が違うため普段意識することの無い他学科や他研究室との間に競争意識を植え付ける意義があると思う。もう1点は自らが1年間の研究活動を振り返る意義である。どうしても成果が出る年もあればそうでもない年もある。業績リストを見ながら、理由を考えることは無意味ではないし、報告書を作成するともなればこれまでの歩みを振り返る貴重な機会となる。また、気楽に読める内容を含むのであれば、他の業績報告などとの差別化も可能なのではないだろうか。そこで、今回は筆者が着任するまでの歩みに

も触れつつ、これまでの研究について化学や有機化学を専門としない方にも分かり易く紹介する機会にしたいと思った。

2. 糖鎖自動合成との出会い

早いもので、当学部に採用して頂いてから丸5年が過ぎようとしている。この間に改組があり、初めて講義を担当した物質工学科2年生も修士課程を修了して4月から社会人となっている。筆者の所属する化学・バイオ系学科応用化学コース伊藤研究室は伊藤敏幸教授が主宰し、准教授の野上、早瀬修一助教を加えたスタッフ3名で教育・研究を行っている。なお、院生、学部生、事務補佐員を加えるとこの3~4年間は25名以上のメンバーが在籍している。研究テーマは多岐に渡っており、イオン液体、酵素反応、フッ素化学、計算化学、電気・電子デバイスなど、有機合成化学をベースに様々な研究を手がけている。ここに筆者が参画してからは糖鎖合成や有機電池のテーマが加わり、数名の院生と学部生とで構成される研究チームが多数存在するような体制で日々研究に励んでいる。このように、多くの研究テーマを抱えるのか、一つの研究テーマとその周辺に絞って徹底的にやる

のかは、研究室の主宰者によって大きく好みが別れるところである。しかしながら筆者が大学院生～講師として過ごした吉田潤一先生の研究室（京大院工）でも有機合成化学に基づく幅広い研究テーマが行われていたため、特に違いを感じることも無く今に至っている。筆者が取り組んでいる糖鎖合成の研究テーマも学生時代に当時助教授として吉田研に在籍されていた山子茂先生（京大化研）が数名の学生さんと共に進んでいたテーマの延長線上にあり、学生時代に研究室で学んだことが大きな財産となっており、研究室内に色々な研究テーマがあるのはむしろ重要だと感じている。

そもそも、筆者が何故糖鎖に興味を持ったのかははっきりとは分からない。自分が取り組んでいた遷移金属触媒反応や水中での有機反応などをこの先研究者としてずっとやり続けることがイメージ出来なかったのが理由かもしれない。一方、糖鎖については研究室で取り組んでいる先輩や後輩が居たが、必ずしも彼らは順風満帆という訳ではなく、正直しんどい割に論文が出ない研究テーマという印象であった。しかも不勉強で糖鎖自体がどれほど大切な生体分子なのかもよく分からなかったが、そのよく分からない部分に魅かれたのかもしれない。このように漠然と糖鎖に対する興味は持っていたが、筆者自身が学生時代に糖や糖鎖を扱ったことは無く、2004～2005 年にかけてスイス連邦工科大学チューリヒ校(ETH チューリヒ)での博士研究員（ポスドク）時代にご指導頂いた Peter H. Seeberger 先生（現マックスプランク研究所ポツダム、ドイツ）の研究室で行った糖鎖合成が初めてかつ貴重な経験となった。チューリヒでの1年間は筆者にとって充実した日々であったが、駆け出しの合成屋として世界のトップレベルとの埋めようも無い差や、自らの能力・経験値の低さを実感した。ただ、スイスでの生活は快適であり、雪の降る地域で暮らしたことの無かった筆者にとって日常風景さえも新鮮であった。しかし、年末にもなると午後4時には暗くなり、アパートと丘の上のキャンパスとの行き帰りの雪道は寒く長く感じられた（図1）。



図1 ホンガーベルグキャンパスの中通り、年末に降った雪は2月末に帰国するまで融けなかった

当時、Seeberger先生はマサチューセッツ工科大学(MIT)からETHチューリヒに異動して間もなく、研究室はお世辞にも充実していると言えるような状況では無かった。また、MITの新進気鋭の若手科学者として先生を一躍有名にし、*Science*誌を飾った自動合成装置も誰も居ない実験室にひっそりと鎮座していた¹。ただし、異動とほぼ同時に新しい自動合成装置の開発も始まっており、悪戦苦闘するポスドクのWerz博士（現ブラウンシュバイク工科大学准教授）らの様子を装置の傍らで見守ることもあった。装置自体は非常に洗練された形になっていたが、ベースになっている固相合成法と呼ばれる合成手法はお世辞にも糖鎖合成に向いている方法とは言えなかった（ただし1984年にMerrifield博士はペプチド固相合成法の開発でノーベル化学賞を受賞）。合成方法を大まかに説明すると、次のようなものである（図2）。まず、固相合成には担体と呼ばれる、糖を固定化するための樹脂製ビーズが必要であり、まずこの樹脂上に糖Aを導入する。その上で、次の反応部位を準備する脱保護反応（脱保護）とグリコシル化反応（グリコシル化）と呼ばれる糖と糖を繋ぐグリコシド結合の形成とを繰り返して糖鎖を伸長させる。最後に糖鎖を樹脂上から切り出せば、保護基のついた状態のオリゴ糖 $B-(B)_{n+1}-A$ が得られる。ただし、この時点では長さが異なるオリゴ糖の混合物であり、目的のオリゴ糖を分離精製する必要があるのは固相合成法でも後述の液相合成法でも同じである。

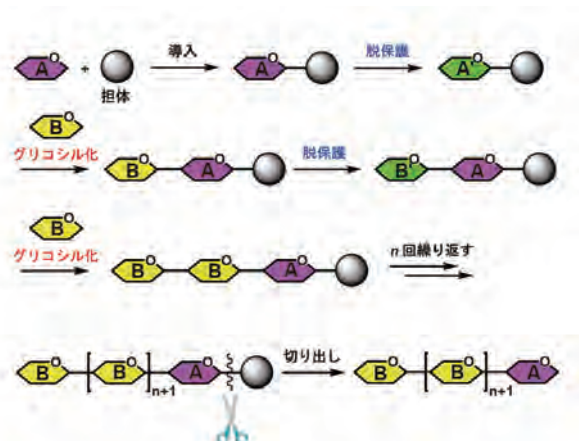


図2 固相合成法によるオリゴ糖合成の概略

筆者が初めて三糖（糖が3個連なった糖鎖）を固相合成した際、最終的に樹脂から切り出された三糖はわずか10 mgであった。しかも糖鎖中の水酸基（OH基）が保護基と呼ばれる置換基で修飾されていた状態であったため、保護基を外した純粋な三糖に換算すれば、数 mg程度得られたに過ぎなかった。合成屋としてのプライドは遥か彼方の日本に置いて来たが、その日はさすがに凹んだ。しかし、冷静に周りを見渡すと、固相合成法でオリゴ糖の大量合成など出来ている研究室メンバーはポストドクを含め誰一人いなかった。従って、ペプチド合成などでは有用だと言われている固相合成法が、糖鎖合成においてはこれほどまでに無力だということを自ら経験することになった。しかし、この体験が筆者のポストドク時代における最大の収穫であった。

3. オリジナルな自動合成法を求めて

スイスに渡って8ヶ月、研究は遅々として進む気配がなかったものの、ETHチューリヒの院生はもちろん、各国を代表する大学から集まったポストドク仲間とのディスカッションや実験は非常に楽しかった。そして、2年目を飛躍（観光のためヨーロッパ各地を飛び回る？）の年にしたいと思っていた矢先、日本で職を得ることになった。2005年3月、糖鎖合成修行の道半ばで戻った出身研究室の吉田研では、電解合成と新たに有機二次電池のテーマとが与えられた。その他は特に具体的な指示もなく、駆け出しの助手として自らが手を動

かして行う研究テーマを考えた時、どうしても糖鎖の自動合成が気になった。しかし、固相合成を改良するつもりは微塵もなく、固相合成から脱却して、大量合成が可能な自動合成法を開発したいと思った。その際、やはり液相合成法（いわゆる普通の化学合成法、原料や反応剤は全て溶媒に均一に溶かして反応を行う）に基づくオリゴ糖の自動合成が望ましく、出来れば自動合成装置が複雑にならないような手法が理想的であるとの結論に至った。

そのような考えの下、改めて学生時代に学んだ化学を思い起こしてみると、電解反応が適しているように感じた。吉田研ではカチオンプール法と呼ぶ、低温条件下で電解反応によって非常に不安定な化学種である炭素カチオンを発生・蓄積する手法を開発していた（Olah博士は超強酸を用いた炭素カチオンの発生手法の開発や構造の解明で1994年のノーベル化学賞を受賞）。この手法は炭素カチオンの発生・蓄積だけでなく、炭素カチオンを反応中間体として経由する有機合成にも応用可能な手法であったが、合成装置のセットアップなどが面倒くさいと感じられた。幸運なことに、助手として着任してすぐ渋谷章人くん（元武田薬品工業）が学部4年生として、Albert A. Bowersくん（現ノースカロライナ大学助教）がイリノイ大シカゴ校からの短期留学生として研究に加わった。彼らはカチオンプール法とほとんど同じ条件で、糖鎖合成に適した中間体の電解反応による発生・蓄積に成功し、2007年に論文を発表した²。その後、自動合成のアイデアは抱きつつも、眞鍋史乃博士（理化学研究所）らと共同で反応中間体に関する基礎的な研究を行ったり³⁻⁶、他の研究テーマ⁷⁻⁹に時間を割いたりしている間に、5年近い月日が流れた。

2012年は研究の上でも環境の上でも大きな変化が訪れた。存在をどこで知ったのか、今となっては記憶も定かでは無いが、テクノシグマ（岡山市）が売り出している極低温反応装置（UCリアクター）を見たとき、糖鎖自動合成装置のイメージがほぼ出来上がった。ちょうどその時、宇部興産財団から助成金を頂けたのでそれを全額つぎ込んで装置を作りたいと思った。幸運は重なるもので、劉知岳くんが台湾交通大学から短期留学生として、林竜太朗くん（現吉田研博士3年生）が4年生として研究に加わった上にテクノシグマのサポートもあって、スムーズに装置製作と試験に取り掛かることが出来た（図3）。



図3 液相電解自動合成装置（1号機）の外観

装置の詳細を述べる前に筆者らが開発しているオリゴ糖の液相電解自動合成法について、その原理を紹介したい（図4）。液相電解合成法では単糖Aと任意数の単糖Bを足し合わせて目的の長さのオリゴ糖 $A-(B)_{n+1}-B$ を作る際に固相合成法で必要となるグリコシド結合形成後の脱保護が省略できる。ただ、その代わりに「活性化」と呼ばれるプロセスが必要となる。まず、単糖Aを活性化して反応中間体A'とする。ここに反応相手となる単糖Bを加えてグリコシル化を行い、目的の二糖A-Bを得る。後はこの操作（活性化とグリコシル化）をn回繰り返せば、オリゴ糖 $A-(B)_{n+1}-B$ が得られる。これだと、単に「脱保護」が「活性化」に代わったのと、糖鎖が伸びる方向が $B \leftarrow A$ から $A \rightarrow B$ になっただけと思われるかもしれない。それはある意味正解であるが、「脱保護」と「グリコシル化」は互いに反応を邪魔し合うため、基本的には同じ反応容器内で行うことが出来ない。固相合成法でそれが可能なのは途中で洗浄操作が入るためであり、この洗浄操作を可能にしているのが糖鎖の担体への固定化である。一方、液相電解自動合成法は代わりに「活性化」を行い、反応中間体を低温で蓄積する必要があるものの、「活性化」と「グリコシル化」は同じ反応容器内で連続的に行うことが出来る。また「活性化」は電気化学的に行う（糖を電極上で酸化的に活性化すること）で自動化や精密化が出来るのも大きなメリットである。

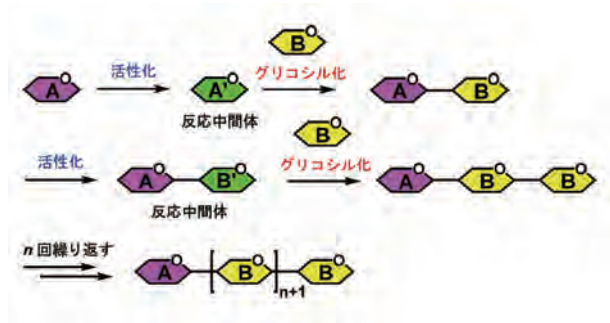
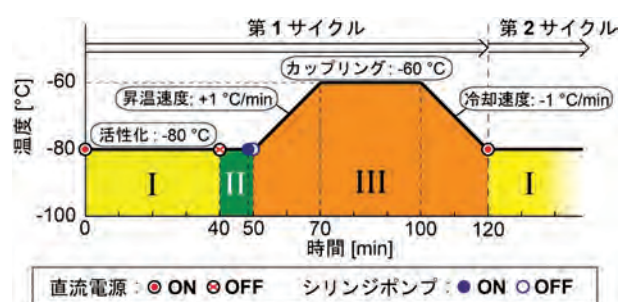


図4 液相電解自動合成法によるオリゴ糖合成の概略

二糖A-Bの合成を例に、基本的な合成スケジュール（第1サイクル目）は図5に示すようなものである。このI～IIIの操作を任意の回数だけ自動で繰り返すのが液相電解自動合成装置である。電気化学的な活性化を行うのは通常の電解セル①と直流安定電源②であるが、温度を自動で制御するために極低温反応槽③を用いた。単糖Bを溶液の状態に添加するためにはシリンジポンプ④を用い、低温装置の温度制御も含めた合成スケジュールの管理は自動制御プログラムを内蔵したパソコン⑤で行った。この装置の開発で時間を要したのは温度制御、特に $-50 \sim -80^\circ\text{C}$ という低温領域で温度を上げ下げした場合に所要時間短縮しつつ制御の精度を保つのに苦心した。また、自動制御に関しても開発当初はシーケンサーを用いていたが、制御可能なパラメータ数の制約や操作性に難があり、最終的にはLabVIEW®を用いて操作性の高いプログラムへと改良した（図6）。そして、装置と基本的な合成条件を確立したところで、筆者は鳥取大に異動することになった¹⁰。



- I. 単糖Aを低温条件下、電気化学的に活性化して反応中間体A'へと変換
- II. 反応中間体A'に対して単糖Bを添加
- III. グリコシル化を促進するために温度を制御

図5 合成スケジュール

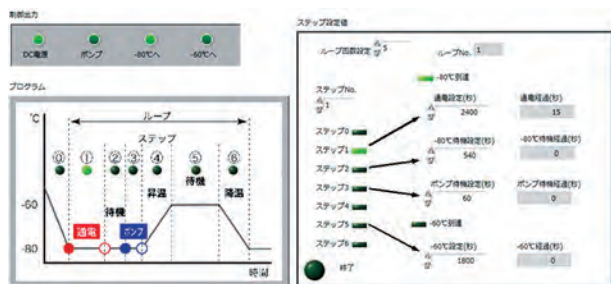


図6 自動合成装置の操作画面

4. 人の役に立つ化学を目指して

新しい環境で研究を始めるにあたって、これまでとは違ったアプローチで研究に取り組みたいと思っていた。特に自動合成装置なんて人の役に立つものが作れてなんぼのものではないだろうかと思うようになった。そのような観点で何報かの論文を眺めていると神崎浩先生ら(岡山大農学部)が土壤中の菌から発見された TMG-キトトリオマイシンが目に留まった¹¹(図7)。この物質は微生物・昆虫のグリコシダーゼ(キチンの糖鎖構造を切断して分解する酵素、以下では単に酵素と呼ぶ)を阻害するが、哺乳類や植物の酵素は阻害しない。微生物・昆虫と哺乳類とで持っている酵素の構造が違うのが原因ではあるが、無差別に阻害する化合物もある。キチンはカニ殻だけでなく、微生物や昆虫にも広く存在する重要な成分であるため、その合成や分解は生物の生死にも関わる重要な生体内の化学プロセスである。TMG-キトトリオマイシンはキチンに類似した構造的特徴から、微生物と昆虫が持つ酵素を選択的に阻害し、哺乳類や植物の酵素を阻害することはない。従って、TMG-キトトリオマイシンが抗菌剤・殺虫剤として働く可能性が示唆されている。

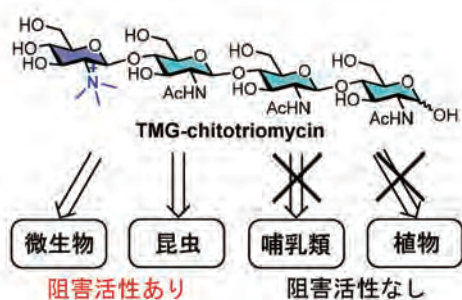


図7 TMG-キトトリオマイシンと各種の

グリコシダーゼに対する阻害活性

さて、構造をご覧頂くと分かるように、TMG-キトトリオマイシンはグルコサミンが4つ繋がった比較的単純な四糖である。ただし、末端のグルコサミンはアミノ基がアンモニウム塩と呼ばれる正電荷を帯びた構造(以下 TMG)になっており、他の3つはカニ殻の構成成分であるキチンと同じ構造(キトトリオース)である。化学合成は残念ながら俞飴(Biao Yu)博士ら(上海有機化学研究所)によって達成されていたが、将来的に大量供給が可能な方法とは思えなかった¹²。何故なら、Yu 先生らの方法では繰り返し構造であるにも関わらず、四糖を4つの異なる糖鎖ビルディングブロックを用いて合成していたからである(図8)。一方、筆者らは四糖を2つの糖鎖ビルディングブロックで順次つなげて行く方法を考えた。そしてこれが液相電解自動合成の有用性を示す良い例になると思う、TMG-キトトリオマイシンの全合成を磯田悠太くん(現博士2年)の卒業研究テーマに設定した。

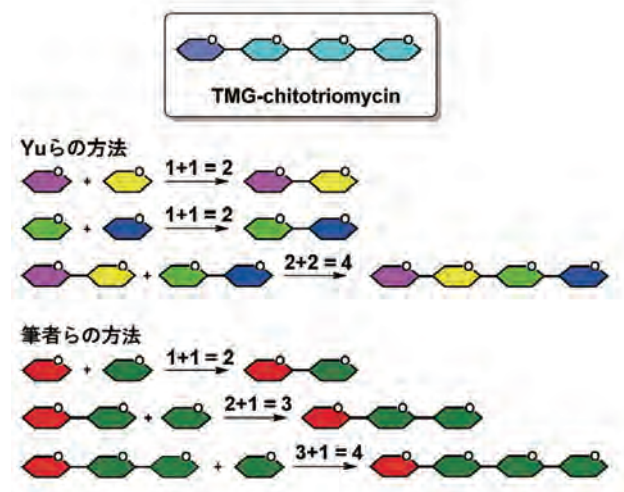


図8 合成アプローチの比較(色の違いは糖鎖ビルディングブロックの構造の違いを意味する)

磯田くんが最初に取り組んだのはキトトリオース三糖の合成であるが液相電解自動合成法はこの検討段階から威力を発揮した。すなわち、筆者らの自動合成装置は単に合成を自動化するだけではなく、データの再現性が極めて高い。従って、わずかな合成収率の変化も議論に値し、研究を進める上で再現性やデータの信頼性の確認に大きく時間を割く必要が無い。具体的には図9に示すよ

うな種々の単糖の糖鎖ビルディングブロックを合成し、自動合成装置を用いて合成した三糖の収率を比較、最適な構造を選定した。続く末端の TMG 部分との連結も保護基を適切に選択することで、まずまずの選択性で目的の TMG-キトトリオマイシン前駆体の液相電解自動合成を達成した。ここまでの成果を論文として発表しようとした。しかし論文改訂の最終段階で学術誌の編集者から「脱保護までしていないから、合成した化合物を TMG-キトトリオマイシン前駆体と呼ぶことは認められない、TMG-キトトリオマイシン前駆体候補化合物と呼びなさい」とクレームがついた¹³。

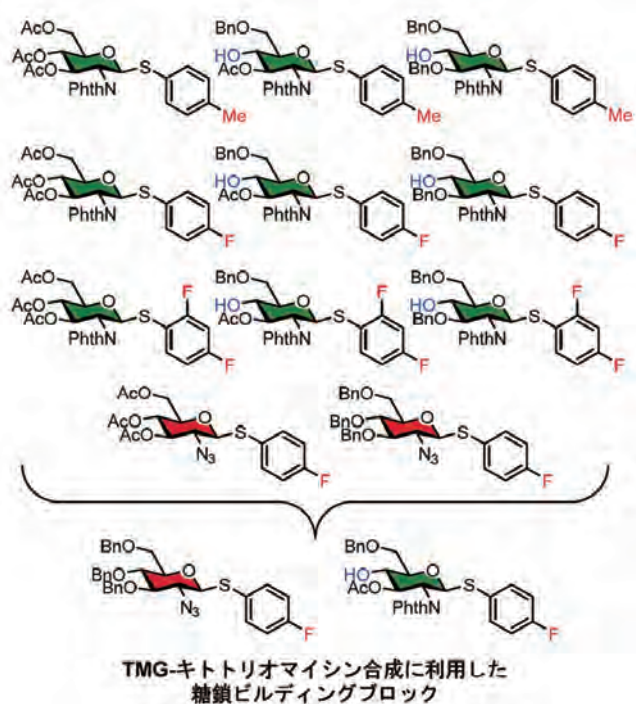


図9 検討した糖鎖ビルディングブロック

正直、脱保護が可能なことは専門家なら誰でも容易に想像出来ると思われたが、実証していないので要求通りに加筆した。論文タイトルはシンプルの方が読者にとって分かり易く、目にも留まり易いので、渋々要求に応えた。これでいよいよ前駆体を脱保護して TMG-キトトリオマイシンの合成を完了しない訳に行かなくなったが、糖鎖全体を覆う保護基全部の脱保護は筆者にとっても学生さんにとっても初めての経験であった。そこで、地域学部の田村純一先生（現農学部）、武田尚子博士に脱保護と脱保護後の分離精製についてご指導頂き、田村研の装置もお借りすることでスムーズに研究を前進させることが出来た。また、一柳剛

先生（農学部）からは鍵中間体であるアジド糖の合成について相談に乗って頂いた。このアジド糖のグリコシル化反応については特許出願に繋がる発見があり、今後さらに優れた方法へと改良される可能性が高い¹⁴。この発見も磯田くんと当時4年生の北村京くん（修士2年）のデータを元に彼らとの議論の中で生まれたアイデアがきっかけとなっており、若者の可能性を強く感じる経験となった。脱保護については多少の紆余曲折があったものの、前述のようなサポートもあって、研究開始から約2年で合成を完了し¹⁵、共同研究者の大沼貴之先生（近畿大農学部）にサンプルとして提供することも出来た。現在は TMG-キトトリオマイシンが持つ阻害剤としてのポテンシャルを様々な酵素で明らかにする生化学的アプローチと筆者らが得意とする TMG-キトトリオマイシン誘導体の開発という合成化学的アプローチの二本立てで研究が進展している。なお、誘導体の合成に関しては高橋宗治くん（修士1年）を中心に検討が進められている。

この他にも、現在進行中の関連プロジェクトについて紹介させて顶きたい。先にも述べたが、伊藤研究室ではイオン液体を用いた様々なプロジェクトが行われている。このイオン液体と同じ構造を糖鎖に導入することで、糖鎖合成の効率化を図る取り組みを行っており、佐々木紀彦くん（現九州大学博士1年）が4年生と修士課程の3年間でほぼゼロから研究を大きく進展させた¹⁶⁻¹⁷。また、糖鎖ビルディングブロックについてもこれまで述べたグルコサミンだけでなく、マンノース¹⁸やグルコースにも適用範囲は広がりつつあり、インドからの留学生である Sujit Manmode 君（博士2年生）を中心に検討が進められている。この他にも天然には存在しないグルコサミンの環状オリゴ糖合成にも挑戦しており、田部七太くん（修士1年）が中心となって合成を行っている。さらに、(株)コガネイ（東京都小金井市）との共同研究により、液相電解自動合成装置（2号機）の完成が近づいている。これらの糖鎖自動合成に関連する研究プロジェクトはいずれも今後の成果が楽しみであると同時に、単にスゴイとかやっている人間が楽しいというだけではなく、「実用化出来た！」と胸を張って言えるような成果が出せるまで、この場所で努力を続けたい（図10）。



図 10 今年 33 年ぶりの豪雪となった
(居室から学生会館・図書館方面を望む)

5. おわりに

液相電解自動合成法は、単に 2 つの化学（電解反応とオリゴ糖合成）を組み合わせ、自動化したに過ぎない。しかし、これらを組み合わせるというコンセプトを自動合成装置で実証した点については新しい取り組みであった。院生であった当時、この 2 つの化学は筆者の目には完全に別々の化学として映り、その接点を見出すことが出来なかった。しかし、ポストドク時代の経験を踏まえて、2 つの化学を結び付けることが出来た。かつて、スティーブ ジョブスが語っていた、*connecting the dots*（過去を振り返り、別々の経験や知識どうしを結びつけて新しいものを生み出す）という行為を筆者も行ったと言えるかもしれない。ただ、筆者自身はまだ何も達成していないと感じている。今は DNA やペプチドに比べてマイナーな糖鎖にも DNA やペプチドに匹敵するポテンシャルがあると信じており、来るべき日に備えて研鑽を積みたい。

最後になるが、充実した教育・研究活動の場を与えて下さり、ご指導頂いている伊藤敏幸先生と化学バイオ系学科の先生方ならびに日夜努力している共同研究者諸氏に深謝する。なお、同学科の坂口裕樹先生、薄井洋行先生、道見康弘先生ならびに農学部の方村純一先生、一柳剛先生との研究や学会を通じた交流は、電気化学と糖質化学分野の研究を行う上で大きな励みとなっており、改めて感謝する次第である。また、技術職員や事務職員をはじめ、教育・研究活動を支えて頂いている工学部の関係各位にもこの場を借りて感謝申し上げる。

参考文献

- [1] Plante, O.J., Palmacci, E.R., Seeberger, P.H. : Automated Solid-Phase Synthesis of Oligosaccharides, *Science*, 291, pp.1523-1527, 2001.
- [2] Nokami, T., Shibuya, A., Tsuyama, H., Suga, S., Bowers, A.A., Crich, D., Yoshida, J. : Electrochemical Generation of Glycosyl Triflate Pools, *J. Am. Chem. Soc.*, 2007, 129, 10922-10928.
- [3] Nokami, T., Tsuyama, H., Shibuya, A., Nakatsutsumi, T., Yoshida, J. : Oligosaccharide Synthesis based on a One-pot Electrochemical Glycosylation-Fmoc Deprotection Sequence, *Chem. Lett.*, 37, pp.942-943, 2008.
- [4] Nokami, T., Shibuya, A., Manabe, S., Ito, Y., Yoshida, J. : α and β -Glycosyl Sulfonium Ions; Generation and Reactivity, *Chem. Eur. J.*, 15, pp.2252-2255, 2009.
- [5] Nokami, T., Nozaki, Y., Saigusa, Y., Shibuya, A., Manabe, S., Ito, Y., Yoshida, J. : Glycosyl Sulfonium Ions as Storable Intermediates for Glycosylations, *Org. Lett.*, 13, pp.1544-1547, 2011.
- [6] Nokami, T., Shibuya, A., Saigusa, Y., Manabe, S., Ito, Y., Yoshida, J. : Electrochemical Generation of 2,3-Oxazolidinone Glycosyl Triflates as an Intermediate for Stereoselective Glycosylation, *Beilstein J. Org. Chem.*, 8, pp.456-460, 2012.
- [7] Nokami, T., Ohata, K., Inoue, M., Tsuyama, H., Shibuya, A., Soga, K., Okajima, M., Suga, S., Yoshida, J. : Iterative Molecular Assembly Based on the Cation-Pool Method. Convergent Synthesis of Dendritic Molecules, *J. Am. Chem. Soc.*, 130, pp.10864-10865, 2008.
- [8] Nokami, T., Watanabe, T., Musya, N., Morofuji, T., Tahara, K., Tobe, Y., Yoshida, J. : Direct Dendronization of Polystyrenes Using Dendritic Diarylcarbenium Ion Pools, *Chem. Commun.*, 47, pp.5575-5577, 2011.
- [9] Nokami, T., Matsuo, T., Inatomi, Y., Hojo, N., Tsukagoshi, T., Yoshizawa, H., Shimizu, A., Kuramoto, H., Komae, K., Tsuyama, H., Yoshida, J. : Polymer-Bound Pyrene-4,5,9,10-Tetraones for Ultrafast-Charge and -Discharge Lithium-Ion Batteries with High Capacity, *J. Am. Chem. Soc.*, 134, pp.19694-19700, 2012.

- [10] Nokami, T., Hayashi, R., Saigusa, Y., Shimizu, A., Liu, C.Y., Mong, K.K., Yoshida, J. : Automated Solution-Phase Synthesis of Oligosaccharides via Iterative Electrochemical Assembly of Thioglycosides, *Org. Lett.*, 15, pp.4520-4523, 2013.
- [11] Usuki, H., Nitoda, T., Ichikawa, M., Yamaji, N., Iwashita, T., Komura, H., Kanzaki, H. : TMG-chitotriomycin, an enzyme inhibitor specific for insect and fungal β -N-acetylglucosaminidases, produced by actinomycete *Streptomyces anulatus* NBRC 13369, *J. Am. Chem. Soc.*, 130, pp.4146-4152, 2008.
- [12] Yang, Y., Li, Y., Yu, B. : Total Synthesis and Structural Revision of TMG-chitotriomycin, a Specific Inhibitor of Insect and Fungal β -N-Acetylglucosaminidases, *J. Am. Chem. Soc.*, 131, pp.4146-4152, 2009.
- [13] Nokami, T., Isoda, Y., Sasaki, N., Takaiso, A., Hayase, S., Itoh, T., Hayashi, R., Shimizu, A., Yoshida, J. : Automated Electrochemical Assembly of the Protected Potential TMG-chitotriomycin Precursor Based on Rational Optimization of the Carbohydrate Building Block, *Org. Lett.*, 17, pp.1525-1528, 2015.
- [14] 特願 2017-045179, 野上敏材, 伊藤敏幸
- [15] Isoda, Y., Sasaki, N., Kitamura, K., Takahashi, S., Manmode, S., Takeda-Okuda, N., Tamura, J., Nokami, T., Itoh, T. : Total Synthesis of TMG-chitotriomycin Based on Automated Electrochemical Assembly of a Disaccharide Building Block, *Beilstein J. Org. Chem.*, 13, pp.919-924, 2017.
- [16] Nokami, T., Sasaki, N., Isoda, Y., Itoh, T. : Ionic Liquid Tag with Multiple Functions in Electrochemical Glycosylation, *ChemElectroChem*, 3, pp.2012-2016, 2016.
- [17] Sasaki, N., Nokami, T., Itoh, T. : Synthesis of TMG-chitotriomycin Precursor Based on Electrolyte-Free Electrochemical Glycosylation Using an Ionic Liquid Tag, *Chem. Lett.*, 46, pp.683-685, 2017.
- [18] Manmode, S., Sato, T., Sasaki, N., Notsu, I., Hayase, S., Nokami, T., Itoh, T. : Rational Optimization of the Mannoside Building Block for Automated Electrochemical Assembly of the Core Trisaccharide of GPI Anchor Oligosaccharides, *Carbohydr. Res.*, 450, pp.44-48, 2017.

(受理 平成 29 年 9 月 25 日)

業績リスト

—2017—

機 械 工 学 講 座	53
応 用 数 理 工 学 講 座	59
知 能 情 報 工 学 講 座	62
電 気 電 子 工 学 講 座	67
応 用 化 学 講 座	73
生 物 応 用 工 学 講 座	77
土 木 工 学 講 座	79
社 会 経 営 工 学 講 座	83

機械工学講座

Wood as prospective materials for sustainable development- Evaluation of tactile warmth by heat transfer analysis

Obata, Y.

Journal of Thermal Stresses, Vol.39, No.6, pp.722-733, Jun. 2016.

A Precise Connection Method for Surface Shape Data Measured by the Grating Projection Method

Iwasa, T., Harada, T.

Transaction of JSASS, Vol.59, No.4, pp.251-257, Jul. 2016.

凹面ターゲットマーカを用いた3次元形状計測データのマッチング精度検証

岩佐貴史, 原田卓, 実験力学, 第16巻, 3号, pp.221-225, 2016年9月.

2016 大学院材料力学入試問題集 主要大学機械工学系大学院 入学試験問題と解答集 (ISBN978-4-908577-69-7)

大学院材料力学入試問題検討委員会: 畑俊明^{*1}, 伊藤勝悦^{*2}, 土田栄一郎^{*3}, 須見尚文^{*1}, 辻知章^{*4}, 小畑良洋, 石原正行^{*5}, 河村隆介^{*6}, 森本卓也^{*7} (^{*1}静岡大, ^{*2}神奈川大, ^{*3}埼玉大, ^{*4}中央大, ^{*5}大阪府大, ^{*6}宮崎大, ^{*7}島根大), NPO 法人固体の力学研究会, CD-ROM (pdf), pp.84-88, 2016年5月.

Microstructure and Thermoelectric Properties of Hot-extruded Bi-Te-Se Bulk Materials

Wang, Z, Akao, T., Onda, T., Chen, Z.

J. Alloys and Compounds, Vol. 663, pp. 134-139, Apr. 2016.

Fabrication and Thermoelectric Properties of Cu-doped Bi-Te-Se Bulk Materials

Wang, Z, Yokoyama, Y., Akao, T., Onda, T., Chen, Z.

J. Jpn Soc. Powder Powder Metallurgy, Vol. 63, No.7, pp. 613-617, Jul. 2016.

Preparation of a Novel Antiviral Material by Mechanical Milling

Onda, T., Yoneda, Y., Akao, T., Motoike, K., Ito, H., Ito, T., Chen, Z.

J. Jpn Soc. Powder Powder Metallurgy, Vol. 63, No.7,

pp. 668-674, Jul. 2016.

Formation of Te-rich Phase and its Effect on Microstructure and Thermoelectric Properties of Hot-extruded Bi-Te-Se Bulk Materials

Wang, Z, Akao, T., Onda, T., Chen, Z.

J. Alloys and Compounds, Vol. 684, pp. 516-523, Nov. 2016.

人工膝関節置換術における3次元術後設置評価技術の検証

井上貴之, 阿部信寛, 藤原一夫, 橋詰博行, 中島義和, 杉田直彦, 光石衛, 陳中春

日本コンピュータ外科学会誌, Vol. 18, No.2, pp. 71-79, 2016年10月.

Thermal Conductivity of Aluminum-Graphite Composites Fabricated by Hot Extrusion

Yi, L., Yoshida, N., Takano, M., Akao, T., Onda, T., Chen, Z.

Proc. of the 9th Pacific Rim Inter. Conf. on Adv. Mater. & Process. (PRICM9), pp, 211-214, Aug. 2016.

Microstructure and Thermoelectric Properties of Bi-Te-Sb Bulk Materials Fabricated from Rapidly Solidified Powders

Wang, Z., Takeda, N., Akao, T., Onda, T., Chen, Z.

The 35th Inter. Conf. on Thermoelectrics & the 1st Asian Conf. on Thermoelectrics (ICT/ACT 2016), Wuhan, May 2016.

In-Situ Synthesis and Toughness Enhancement of Alumina-matrix Composites

Goto, M., Akao, T., Onda, T., Chen, Z.

The Joint Symp. on Mech. and Mater. Eng. (JSMME 2016), Sep. 2016.

Microstructure and Thermoelectric Properties of Bi-Te-Sb Bulk Materials Fabricated from Rapidly Solidified Powders

Wang, Z, Miura, K., Yokoyama, Y., Akao, T., Onda, T., Chen, Z.

The Joint Symp. on Mech. and Mater. Eng. (JSMME 2016), Sep. 2016.

Microstructure and Thermoelectric Properties of Cu-doped Bi-Te-Se Bulk Materials Fabricated by Hot Extrusion

Yokoyama, Y., Wang, Z., Akao, T., Onda, T., Chen, Z.
The Joint Symp. on Mech. and Mater. Eng. (JSMME 2016), Sep. 2016.

Microstructure and Thermal Conductivity of Aluminum-Graphite Composites Fabricated by Hot Extrusion

Yi, L., Yoshida, N., Akao, T., Onda, T., Chen, Z.
The Joint Symp. on Mech. and Mater. Eng. (JSMME 2016), Sep. 2016.

Effect of Processing Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Maraging Steels Fabricated by Laser Additive Manufacturing

Nakata, N., Mutua, J., Akao, T., Onda, T., Chen, Z.
The Joint Symp. on Mech. and Mater. Eng. (JSMME 2016), Sep. 2016.

電着ニッケル薄膜を利用した繰返し応力測定法（成長粒子の発生密度と優先方位に着目した方法）

小野勇一，八木康行，原田拓也
実験力学，第 15 巻，4 号，pp.282-288，2016 年 1 月。

電着金属薄膜を用いた応力測定法（解説）

小野勇一
実験力学，第 16 巻，3 号，pp.201-206，2016 年 9 月。

電着ニッケル薄膜を用いた繰返し応力測定法（計測可能な応力と雰囲気温度の検討）

小野勇一
実験力学，第 16 巻，3 号，pp.215-220，2016 年 9 月。

Reply trees in Twitter: data analysis and branching process models

Nishi, R., Takaguchi, T., Oka, K., Maehara, T., Toyoda, M., Kawarabayashi, K. and Masuda, N.
Social Network Analysis and Mining, Vol. 6, Article-No. 26, Dec. 2016.

Temperature Variations in Drilling of CFRP/Aluminum and CFRP/Titanium Stacks

Masahiko Sato, Hisataka Tanaka, Kanae Yamamoto
International Journal of Automation Technology, Vol.10, No.3(2016), pp. 348-355, 2016.

Roundness in Drilling of Low-rigidity Workpiece

Akihiro Fukuma, Masahiko SATO, Kanae YAMAMOTO, Takashi MATSUNO
Proceedings of 2nd International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies, 73, 2016.

引張・圧縮・表面摺動後の高張力鋼板の平面曲げ疲労強度

松野崇，桜田栄作*，瀬戸厚司*（* 新日鐵住金株式会社）
塑性と加工，57 巻 666 号，pp.660-666，2016 年 7 月。

Global Trajectory Design for Position and Attitude Control of an Underactuated Satellite

Yoshimura, Y.*¹, Matsuno, T., Hokamoto, S.*².(*¹ Tokyo Metropolitan Univ., *²Kyushu Univ.)
Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.59, No.3, pp.107-114, May 2016.

Synergy Effect of Shear Angle and Anisotropic Material Ductility on Hole-Expansion Ratio of High-Strength Steels

Matsuno, T., Sato, K.*，Okamoto, R.*，Mizumura, M.*，Suehiro, M.*（*Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp.）
Journal of Materials Processing Technology, Vol.230, pp.167-176, Apr. 2016.

Microstructure characterization of fine grains near hot-sheared surface formed during hot-stamping process

Matsuno, T., Sekito, Y.*，Kawasaki, K.*（*Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp.）
Journal of Materials Processing Technology, Vol.229, pp.570-581, Mar. 2016.

密度の異なる Ni-Mo プレアロイ合金焼結浸炭焼入れ歯車の曲げ疲労強度と空孔を考慮した FEM による歯元曲げ応力解析

永田尊礼*¹，竹増光家*¹，小出隆夫，西田 智*²（*¹ 諏訪東京理科大学，*² 神戸製鋼所）
粉体および粉末冶金（粉体粉末冶金協会誌），第 63 巻，1 号，pp.17-22，2016 年 1 月。

Active mass damper system for high-rise buildings

using neural oscillator and position controller considering stroke limitation of the auxiliary mass

Hongu, J., Iba, D*, Nakamura, M*, Moriwaki, I*. (*Kyoto Institute Tech.)

Proc. of SPIE, Smart Structures and NDE 2016, 97993A, 12 pages, Mar. 2016.

Effect of loading rate on viscoelastic properties and local mechanical heterogeneity of freshly isolated muscle fiber bundles subjected to uniaxial stretching

Tamura, A., Hayashi, S. *¹, Matsumoto, T.*² (*¹Toyota Central R&D, *²Nagoya Institute of Technology)
Journal of Mechanics in Medicine and Biology, **16**, pp. 1650086-1-17, Apr. 2016.

神経振動子と位置制御器を組み合わせたアクティブ動吸振器（補助質量の加速度応答を考慮した制振のためのPD制御器設計法）

本宮潤一, 射場大輔*, 中村守正*, 森脇一郎* (*京都工芸繊維大学)

日本機械学会論文集, 第 82 巻, 837 号, pp.1-12, 2016 年 5 月.

プラスチックねじ歯車対の歯面温度推定に関する一考察

高橋美喜男*, 板垣貴喜*, 高橋秀雄*, 小出隆夫 (*木更津高専)

日本設計工学会誌, 第 51 巻, 6 号, pp.419-426, 2016 年 6 月.

ホブ切り歯車の単一ピッチ誤差測定の新たな手法（ガウシアンフィルタを通した歯すじ形状測定結果の適用）

金 明洙*¹, 射場 大輔*², 巽 友洋*², 本宮 潤一, 中村 守正*², 森脇 一郎*² (*¹大阪精密機械, *²京都工芸繊維大学)

日本機械学会論文集, 第 82 巻, 839 号, pp.1-10, 2016 年 7 月.

Experimental evaluation of a control system for active mass dampers consisting of a position controller and neural oscillator

Sasaki, T*, Iba, D*, Hongu, J., Nakamura, M*, Moriwaki, I*. (*Kyoto Institute Tech.)

MOVIC2016 & RASD2016 Journal of Physics: Conference Series, Vol.744, No.1, 12 pages, Jul. 2016.

Tooth Root Bending Stress Analysis of Pre-alloyed

Sintered Steel Gears with Different Densities using FEM Model Considering Voids

Nagata, T. *¹, Takemasu, T. *¹, Koide, T., Hirose, N.*² (*¹Tokyo University of Science, Suwa, *²Höganäs Japan K.K.)

Journal of Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, Vol. 63, No. 7, pp.568-572, Jul. 2016.

Effects of translational and rotational accelerations on traumatic brain injury in a sport utility vehicle-to-pedestrian crash

Tamura, A., Koide, T., King H. Yang *. (*Wayne State Univ.)

International Journal of Vehicle Design, Vol.72, No.3, pp. 208-229, Aug. 2016.

Fatigue Life Prediction of Plastic Helical Wheel Meshed With Worm

Teshima, T., Koide, T., Ueda, A*, Tamura, A., Hongu, J. (*AMTEC INC.)

Proc. of the 6th Joint Symposium on Mechanical and Materials Engineering between Northeastern University and Tottori University, A2-3, p.10, Sep. 2016.

Development of a biaxial tensile tester for soft biological materials

Tamura, A., Kawaguchi, Y., Sone, Y., Koide, T.

Proc. of the 6th Joint Symposium on Mechanical and Materials Engineering between Northeastern University and Tottori University, A2-6, p.13, Sep. 2016.

Application of Lean Alloy Steel to PM Gear

Itahara, T. *¹, Hirose, N. *¹, Bergman, O. *², Takemasu, T. *³, Koide, T. (*¹Höganäs Japan K.K., *²Höganäs AB, Sweden, *³Tokyo University of Science, Suwa,)

Proceedings of World PM2016 Congress & Exhibition on CD-ROM, Paper No.3296062(5pages), Oct. 2016.

Stress Analysis In Durability Tests of Sintered Steel Gears with Different Densities using FE-simulation Considering Voids

Takemasu, T. *¹, Nagata, T. *¹, Koide, T., Hirose, N. *², (*¹Tokyo University of Science, Suwa, *²Höganäs Japan K.K.)

Proceedings of World PM2016 Congress & Exhibition on CD-ROM, Paper No._3294877 (5pages), Oct. 2016.

Effects of anatomical site and loading rate on tensile behavior of fiber bundles isolated from nerve roots

Tamura, A., Sakaya, M., Koide, T.

Proc. of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress & Exposition on CD-ROM, Paper No. IMECE2016-66016 (7pages), Nov. 2016.

Comparative analysis on traumatic brain injury risk due to primary and secondary impacts in a vehicle-pedestrian sideswipe accident

Tamura, A., Hasegawa, J.[†], Koide, T. (Tokyo Metropolitan Univ.)

Proc. of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress & Exposition on CD-ROM, Paper No. IMECE2016-66021(10pages), Nov. 2016.

密度の異なる Ni-Mo プレアロイ合金焼結浸炭焼入れ歯車の面圧疲労強度と空孔を考慮した FEM による接触応力解析

永田尊礼^{*1}, 竹増光家^{*1}, 小出隆夫, 西田 智^{*2} (^{*1} 諏訪東京理科大学, ^{*2} 神戸製鋼所)

粉体および粉末冶金 (粉体粉末冶金協会誌), 第 63 巻, 12 号, pp.995-1001, 2016 年 12 月.

分散最適化における情報マスキング法とリアルタイムプライシングへの応用

和田一真, 桜間一徳

計測自動制御学会論文誌, vol. 52, no. 12, pp. 671-677, 2016 年 12 月.

Adding a Heuristic Input for Improved Backward Tracking Control of a Tractor-trailer Mobile Robot

Araki, N.*, Inoue, T.*, Nakatani, S. (*University of Hyogo)

ICIC Express Lett., vol. 10, no. 11, pp. 2555-2561, Nov. 2016.

スペースデブリの近傍からの姿勢・運動計測

菊池直彦^{*1}, 西田信一郎 (^{*1} 小松製作所)

日本航空宇宙学会論文誌, Vol. 64, No. 5, pp.253-260, 2016 年 10 月.

Graphical and scalable multi-agent simulator for real-time pricing in electric power grid

Miura, M., Tokunaga, Y., Sakurama, K.

Artificial Life and Robotics, Vol. 21, No. 2, pp. 181-187, Jun. 2016.

分散最適化に基づくロボット群による複数極値探索

桜間一徳, 安木洋介, 西田信一郎

システム制御情報学会論文誌, vol. 29, no. 4, pp. 155-161, 2016 年 4 月.

大学院生の科学コミュニケーション能力向上に

向けた課題解決型学習の試み

中谷真太郎, 川口夏樹^{*1}, 荒木望^{*1}, 佐藤孝雄^{*1}, 小西康夫^{*1} (^{*1} 兵庫県立大)

工学教育, 第 64 巻, 2 号, pp.7-12, 2016 年 3 月.

Basic study on active acoustic shielding (improving the method to enlarge the AAS window)

Murao, T.*, Nishimura, M., Sakurama, K., Nishida, S. (* nanyang technological university)

JSME Mechanical Engineering Journal, Vol. 3, No. 1, pp. 15-003222016, Feb. 2016.

ネットワーク上の分散制御器の設計理論

桜間一徳

計測自動制御学会会誌「計測と制御」, vol. 55, no. 11, pp. 972-977, 2016 年 11 月.

Distributed control of networked multi-agent systems for formation with freedom of special Euclidean group

Sakurama, K.

In Proc. of the 55th IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, Nevada, USA, 12-14 Dec. 2016.

Control of large-scale cyber-physical systems with agents via a representative model

Sakurama, K.

In Proc. of the 4th IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications, Nagoya, Japan, 6-7 Oct. 2016.

Masking method for local information on distributed optimization with constraints

Wada, K., Sakurama, K.

In Proc. of the 4th IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications, Nagoya, Japan, 6-7 Oct. 2016.

Multi-robot formation control over distance sensor network

Sakurama, K.

In Proc. of the 6th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems, Tokyo, Japan, 8-9 Sep. 2016.

Source seeking by distributed swarm robots with sample variance control

Sakurama, K., Nishida, S.

In Proc. of American Control Conference, Boston, Massachusetts, USA, 6-8 Jul. 2016.

Control Education Efficacy Evaluation Through Flight Control Experiment

Sato, T.*, Kawaguchi, N.*, Nakatani, S., Araki, N.*, Konishi, Y.* (*University of Hyogo)

In Proc. of IFAC Symposium on Advances in Control Education, vol. 49, no. 6, pp. 1–3, Bratislava, Slovakia, Jun. 2016

R&D Activities on Automated Fiber Placement Technology at Nagoya University

Ikeda, T., Sakai, T., Fujii, Y., Yokosu, A., Asai, S., Takekami, H., Arai, M., Ishikawa T., and Moriya, K. 17th US-Japan Conference on Composite Materials, Aug. 2016, Hokkaido

Development of an in-situ prepreg forming technique with a diode laser

Asai, S., Fujii, Y., Yokosu A., Sakai, T., Ikeda, T., and Ishikawa, T.

13th International Conference on Flow Processes in Composite Materials, Jul. 2016, Kyoto.

Radiative Transfer In A Rigid Carbon Material Under Arcjet Flow Condition

Sakai, T., Horiuchi, T., Suzuki, T., Fukui, H., Ishida, Y.

AIAA Paper 2016-0245, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Jan. 2016, San Diego.

船用ディーゼルノズルの噴霧特性と内部流れに関する研究

横部澄人*¹, 大澤克幸, 小田哲也, 住隆博*², 薮田圭一郎*³, 中村昂祐 (*¹ 三井造船, *² 佐賀大学, *³ アイシン・エーアイ)

日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 51 巻, 1 号, pp. 110-116, 2016 年 4 月.

Multiobjective Design Exploration of Propeller Airfoils at Low-Reynolds and High-Mach Numbers Conditions towards the Mars Airplane

Morizawa, S., Nonomura, T., Oyama, A., Obayashi, S., and Fujii, K.

Transaction of the Japan Society for Aeronautical Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol.14, No.ists20, pp. Pk_47-Pk_53, 2016.

Plate-angel Effects on Acoustics Waves from Supersonic Jet Impinging on Inclined Plates

Nonomura, T., Honda, H., Nagata, Y., Yamamoto, M., Morizawa, S., Obayashi, S. and Fujii, K.

AIAA Journal, Vol.54, No.3, pp.816-827, 2016.

Aileron Effect by the Elevon on the Aerodynamic Characteristics of a Mars Exploration Airplane with a Deployable-Wing

Morizawa, S., Sakamoto, K., Yasuda, A., Miyazaki, S., Kawazoe, H.

The 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, D1-2, Toyama, Japan, Oct. 25-27, 2016.

Development of Serrated Multi-Electrode Plasma Actuators for Enhanced Force Production

Matsuno, T., Sugahara, M., Kawazoe, H., Nishida, H*. (*Tokyo University of Agriculture and Technology)

54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech, AIAA 2016-1691, Jan. 2016.

Wind tunnel evaluation based design of lift creating cylinder using plasma actuators

Kanazaki, M*, Matsuno, T., Maeda, K, Kawazoe, H. (*Tokyo Metropolitan University)

Int. J. of Automation and Logistics, Vol.2, Issue 1-2, pp. 45–59, Feb. 2016.

Vectored Jet Control for Trielectrode Plasma Actuator with Serrated Electrode

Matsuno, T., Sugahara, M., Koyama, J., Fujita, N., Yamada, G., Kawazoe, H.

Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol.14, No.ists30, pp. Pe_55-Pe_61, Sep. 2016.

Multiple Additional Sampling by Expected Improvement Maximization in Efficient Global Optimization for Real-World Design Problem

Kanazaki, M*, Imamura, T**, Matsuno T., Chiba, K**. (*Tokyo Metropolitan University)

(**University of Tokyo)

(***The University of Electro-Communications)

The 20th Asia-Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, Canberra, Australia, 16-18 Nov. 2016, pp.183-194.

Experimental Parametric Study of Fins Mounted Vertically over the Wing

Takanashi, S*, Omori, T*, Sunada, Y*, Imamura, T*, Kanazaki, M**, Chiba, K***, Matsuno, T.

(*University of Tokyo)

(**Tokyo Metropolitan University)

(***The University of Electro-Communications)

The 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Toyama, Japan, 25-27 Oct. 2016.

ディーゼルエンジン燃焼計算の実用化研究（燃焼計算の速度向上方法）

北田泰造，口田征人*，林 伸治*，酒井康行*，川添博光

（*三菱自動車工業（株））

自動車技術会論文集，Vol. 47， No. 2， pp. 253-260， 2016.

ディーゼルエンジン燃焼計算の実用化研究（排出ガス予測精度向上法）

北田泰造，口田征人*，林 伸治*，酒井康行*，川添博光

（*三菱自動車工業（株））

自動車技術会論文集，Vol. 47， No. 2， pp. 261-266， 2016.

Electron Density Measurements behind a Hypersonic Shock Wave in Argon

Yamada, G., Kawazoe, H., Obayashi, S*.

(* Tohoku University)

Journal of Fluid Science and Technology, Vol.11, No.1, 2016, JFST0005.

火星探査に向けた展開翼型惑星探査航空機の高速空力特性，航空宇宙技術

山田剛治，宮崎綾，川添博光

航空宇宙技術，Vol. 15， pp. 9-14， 2016.

Aerodynamic Characteristics of a Deployable-Wing Airplane with an Elevon for Mars Exploration

Yamada, G., Miyazaki, A., Kawazoe, H.

Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, pp.241-248, 2016.

応用数理工学講座

High-Accuracy Numerical Integration of Charged Particle Motion — with Application to Ponderomotive Force

Furukawa, M., Matsuyama, A., Ohkawa, Y.
Plasma and Fusion Research, Vol.11,
pp.1303003-1-1303003-4, 2016.

Extension of numerical matching method to weakly nonlinear regime — beyond the Rutherford theory of magnetic island evolution

Furukawa, M., Tokuda, S.
26th IAEA Fusion Energy Conference, Proceeding
(TH/P1-14) 2016.

Hybrid numerical solvers for massively parallel eigenvalue computation and their benchmark with electronic structure calculations

Imachi H. and Hoshi T.
J. Inf. Process. 24, pp. 164-172 (2016) .

One-hundred-nm-scale electronic structure and transport calculations of organic polymers on the K computer

Imachi H. Yokoyama S., Kaji T., Abe Y., Tada T.,
Hoshi T.
AIP Conf. Proc. 1790, 020010, 4pp. (2016) .

Extremely scalable algorithm for 10^8 -atom quantum material simulation on the full system of the K computer

Hoshi T., Imachi H., Kumahata K., Terai M.,
Miyamoto K., Minami K. and Shoji F.
Proc. ScalA16 in SC16, pp.30-40 (2016).

Thermo-molecular gas-film lubrication dynamics considering boundary temperature and ambient gas (2 - DOF numerical analysis by t - MGL equation)

Fukui, S., Okamura, Y., Nakasuji, A., Matsuoka, H.
Microsystem Technologies, Vol. 22, Issue 6, pp.
1337-1349, 2016.

Theoretical study of surface interaction stresses considering one-dimensional material distributions in the in-plane direction based on the

Lennard-Jones potential

Matsuoka, H., Tanaka, T., Fukui, S.
Microsystem Technologies, Published online, DOI:
10.1007/s00542-016-3194-7, 2016.

Theoretical study of surface interaction pressures of two-dimensional periodic material distributions based on the Lennard-Jones potential

Matsuoka, H., Kitahama, N., Fukui, S.
Microsystem Technologies, Vol. 22, Issue 6, pp.
1419-1428, 2016.

Effects of surface roughness on characteristics of liquid transfer due to breakage of liquid meniscus bridge

Matsuoka, H., Miyamoto, M., Fukui, S.
Microsystem Technologies, Vol. 22, Issue 6, pp.
1397-1404, 2016.

Real-Contact Area between an Elastomer and a Flat Plane Observed by Surface Plasmon Resonance: Optical Model Calculations

Maegawa, S., Matsuoka, H., Fukui, S., Itoigawa, F.*,
Nakamura, T.* (*Nagoya Institute of Technology)
Tribology Letters, Vol. 64, Issue 1, Article 7, 2016.

すべり摩擦に表れる振動の対策

中野健^{*1}, 田所千治^{*2}, 前川覚^{*3}, 角直広^{*4} (*1 横浜
国立大学, *2 埼玉大学, *3 鳥取大学, *4 長岡技術科
学大学)
トライボロジスト, 第 61 巻, 7 号, pp. 416-422,
2016 年 07 月.

New insight into the mechanism of static friction: A theoretical prediction of the effect of loading history on static friction force based on the static friction model proposed by Lorentz and Persson

Maegawa, S., Itoigawa, F., Nakamura, T.
Tribology International, Vol.102, pp.532–539, 2016.

Effect of surface grooves on kinetic friction of a rubber slider

Maegawa, S., Itoigawa, F., Nakamura, T.
Tribology International, Vol.102, pp.326–332, 2016.

Effect of stress distribution at contact interface on static friction force: numerical simulation and model experiment

Maegawa, S., Itoigawa, F., Nakamura, T.
Tribology Letters, Vol.62, Article 15, 2016.

Discussion on surface plasmon resonance technique in the Otto configuration for measurement of lubricant film thickness

Maegawa, S., Yamaguchi, J., Itoigawa, F., Nakamura, T.
Tribology Letters, Vol.62, Article 14, 2016.

In situ observation of adsorbed fatty acid films using surface plasmon resonance

Maegawa, S., Koseki, A., Itoigawa, F., Nakamura, T.
Tribology International, Vol.97, pp.228–233, 2016.

Two-layer with hardness distribution around tool edge for reducing cutting forces in CFRP machining

Maegawa, S., Hayakawa, S., Itoigawa, F., Nakamura, T.
International Journal of Automation Technology, Vol.10, pp.364–371, 2016.

Dynamics in sliding friction of soft adhesive elastomer: Schallamach waves as a stress-relaxation mechanism

Maegawa, S., Itoigawa, F., Nakamura, T.
Tribology International, Vol.96, pp.23–30, 2016.

Mechanism for changes in cutting forces for down-milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates: modeling and experimentation

Maegawa, S., Morikawa, Y., Hayakawa, S., Itoigawa, F., Nakamura, T.
International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.100, pp.7–13, 2016.

A role of friction-induced torque on sliding friction of rubber materials

Maegawa, S., Itoigawa, F., Nakamura, T.
Tribology International, Vol.93, pp.182–189, 2016.

Reduction of cutting tool wear using extremely short time intermittent-cutting

Terasaka, Y., Itoigawa, F., Maegawa, S., Nakamura, T.
Proceedings of 7th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes, pp.385–389,

2016.

Wear and failure of CVD diamond coated tool in end-milling of WC-Co die materials – influence of particle size of WC powder and depth of cut

Miyami, T., Itoigawa, F., Maegawa, S., Nakamura, T.
Proceedings of 7th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes, pp.380–384, 2016.

Tool wear properties of sharpened CVD diamond coated tool in turning of cemented carbide rod

Suganuma, S., Itoigawa, Hayakawa, S., F., Maegawa, S., Nakamura, T.
Proceedings of 7th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes, pp.375–379, 2016.

Investigation of tool wear process and cutting forces in machining to carbon-fiber-reinforced plastics composites

Maegawa, S., Hayakawa, S., Itoigawa, F., Nakamura, T.
Proceedings of 7th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes, pp.370–374, 2016.

Transient motion of and heat transfer in a rarefied gas between plane parallel walls with different surface properties

Doi, T.
Phys. Fluids, Vol. 28, No. 9, 092002, Sep. 2016.

Transient Couette flow of a rarefied gas between plane parallel walls with different surface properties

Doi, T.
Phys. Fluids, Vol. 28, No. 2, 022006, Feb. 2016.

Steady distribution of cells in a one-dimensional biased random walk model of bacterial chemotaxis

Goto, T., Nakai, T., J. Biomechanical Science and Engineering, Vol.11, No.2, Paper No.15-00587 (9p.), Jun. 2016.

Comparative CFD Analysis of Vertical Axis Wind Turbine in Upright and Tilted Configuration

Chowdhury, A. M*, Akimoto, H*, Hara, Y. (*KAIST)

Renewable Energy, Vol. 85, pp. 327-337, Jan. 2016.

Science and Technology 2016, Tokyo, Japan, SuP1-A-2, Dec. 2016.

Experiment and Numerical Simulation of an Aluminum Circular-Blade Butterfly Wind Turbine

Hara, Y., Shiozaki, A.^{*1}, Nishiono, H.^{*1}, Saito, S.^{*2}, Shioya, K.^{*2}, Sumi, T.^{*3}, Matsubara, Y., Yasumoto, Y.^{*4}, Takagaki, K., Kogo, S. (*¹Sinfonia Technology, *²Nikkeikin Aluminium Core Technology, *³Saga University, *⁴Tottori Prefectural Government) Bulletin of the JSME, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.11, No.2, p. JFST0010, Mar. 2016.

小形垂直軸風車の研究開発

原 豊

ターボ機械, 第44巻, 7号, pp.411-419, 平成28年7月.

Experimental Study on the Effects of Relative Rotor Location to Duct Exit on Energy Recovery from Duct-Exhaust Flow using a Butterfly Wind Turbine

Kawanishi, M., Hara, Y., Takagaki, K., Hara, T., Hori, K., Yoshida, S.* (*Kyushu University) Proc. 15th World Wind Energy Conference and Exhibition, Tokyo, Japan, D-4-4, Oct. 2016.

Performance Prediction of Triangular-Blade Butterfly Wind Turbine with Mechanical Over-Speed Control System

Okutani, M., Hara, Y., Mishima, K., Tagawa, K., Yoshida, S.* (*Kyushu University) Proc. 15th World Wind Energy Conference and Exhibition, Tokyo, Japan, D-5-1, Oct. 2016.

Numerical Analysis of Flow Field around an Endplate of Straight-Blade Vertical Axis Wind Turbine

Hara, Y., Furukawa, Y., Sumi, T.^{*1}, Akimoto, H.^{*2}, Yoshida, S.^{*3}. (*¹Saga University, *²Osaka University, *³Kyushu University) Proc. 15th World Wind Energy Conference and Exhibition, Tokyo, Japan, D-5-2, Oct. 2016.

Potential of Miniature Butterfly Wind Turbine for Application to Energy Harvesting

Hara, Y., Hori, K., Kawanishi, M., Yamanaka, Y., Yamamoto, S., Yoshida, S.* (*Kyushu University) Proc. International Symposium on Micro-Nano

知能情報工学講座

筋力係数推定のための Ridge 回帰に基づくモデル構築 -リハビリテーションへの応用を目指した汎化性能向上-

平野雄也, 櫛田大輔, 北村章

第 60 回システム制御情報学会研究発表講演会, 313-3, 2016 年 5 月

EMG に基づく筋の定量的評価とリハビリテーションへの応用

上田晃嗣, 櫛田大輔, 青木隆尚, 北村章 (鳥取大学)

電気学会論文誌 C, 第 136 巻, 7 号, pp. 893-899, 2016 年 7 月

INTERACTIVE PLANNING GUIDANCE SYSTEM FOR MANUFACTURING PROCESS BY SVM AND THE PARTICLE FILTER CONSIDERING PRODUCTION KNOW-HOW

Hamamoto, K. and Kitamura, A.

Proceedings of the 20th International Conference KES-2016, Volume 96, pp. 859-868. Sept. 2016.

鳥取県内の地域コミュニティにおける保健医療福祉システムへの取り組み

櫛田大輔^{*1}, 松本浩実^{*2}, 深田美香^{*1} (^{*1} 鳥取大学, ^{*2} 鳥取大学附属病院)

電子情報通信学会, 第 99 巻, 10 号, pp. 965-969, 2016 年 10 月

「介護予防」～「健康寿命を伸ばして元気に生きる秘訣!」～

山本美輪, 野口佳美, 中条雅美, 酒井知恵子, 谷村千華, 三好陽子, 西尾育子, 吉村純子, 大庭桂子, 太田典子, 櫛田大輔, 松井幸子, 村瀬由貴, 櫻井優祐 (鳥取大学)

シニア生活応援 BOOK 介護ガイド Ai アイ"[鳥取県版], 第 11 巻, pp.92-101, 2016 年 11 月

ビジョンセンサを用いたベッド上における患者の姿勢推定 ～深度分割マッチングによる姿勢精度の向上～

吉田泰丘, 櫛田大輔, 北村章 (鳥取大学)

第 25 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文, pp.126-127, 2016 年 11 月

SAS 簡易診断のための非拘束呼吸推定システム

中川剛毅, 櫛田大輔, 北村章 (鳥取大学)

第 25 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文, pp.136-137, 2016 年 11 月

Kinect と筋骨格モデルを用いた歩行時の下肢筋活動の推定

平野雄也^{*1}, 櫛田大輔^{*1}, 北村章^{*1}, 松本浩実^{*2} (^{*1} 鳥取大学, ^{*2} 鳥取大学附属病院)

第 25 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文, pp.132-133, 2016 年 11 月

自律移動型双腕ロボットによる車椅子の把持計画

森直人, 竹森史暁, 北村章, 櫛田大輔 (鳥取大学)

第 25 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文, pp.14-15, 2016 年 11 月

自律移動型双腕ロボットによる車椅子利用者のための人追従制御

本池優菜, 竹森史暁, 北村章, 櫛田大輔 (鳥取大学)

第 25 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文, pp.16-17, 2016 年 11 月

Kinect を用いた筋骨格モデルに基づく歩行時の下肢筋活動推定

平野雄也^{*1}, 櫛田大輔^{*1}, 松本浩実^{*2} (^{*1} 鳥取大学, ^{*2} 鳥取大学附属病院)

第 43 回中四国リハビリテーション医学研究会, pp.32-33, 2016 年 12 月

自律移動型双腕ロボットによる車椅子利用者のための人追従制御

竹森史暁, 本池優菜

とっとりイノベーションミーティング, 2016 年 12 月

SAS 診断のための睡眠中における無拘束呼吸計測システム

中川剛毅, 櫛田大輔, 北村章

第 16 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2016), 1E2-4, pp.343-348, 2016 年 12 月

ベイジアンネットとオントロジーによるプラント事故の原因推定

松井亮太, 北村章

第16回システムインテグレーション部門講演会
(SI2016), 1J2-2, pp.844-847, 2016年12月

大気圧センサとデジタル道路地図に格納された標高データの融合による道路の網羅的な標高推定の研究 -スマートフォン内蔵センサの活用-
斉藤智一, 横田孝義, SCI'16, システム制御情報学会, 京都, pp.60-66, 2016年5月

Object detection by following saccadic movement
Yoshito Yabuta, Proceedings of MECHATRONICS - REM 2016, pp.182-186, Compiègne - France, Jun. 2016. (USB Proceeding)

Fast Optimization Algorithm for Conveyance Orders and Paths of Conveyance Robots in Warehouse, Tsubasa Tamura, Takayoshi Yokota, The Sixth International Conference on Transportation and Logistics(T-LOG2016), Hsinchu, Taiwan, September 2016, (USB Proceeding)

倉庫内搬送作業における高速な経路生成アルゴリズムの提案
田村翼, 横田孝義, 平成28年度(第67回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2016年10月

気圧センサとDRM標高データの大域的マップマッチングによる標高推定方法の開発
斉藤智一, 横田孝義, 平成28年度(第67回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2016年10月

間欠的なプローブデータに対応した高精度マップマッチング手法の提案
濱岡達哉, 横田孝義, 第18回IEEE広島支部学生シンポジウム HISS, 2016年11月

既存のサービスシステムの変更を不要とする認証シャッターの提案
本村真一, 川村尚生
学術情報処理研究, No.20, pp.112-118, 2016年9月

利用者による個人情報保護手法の決定を可能とするフレームワークの提案
松永崇秀, 山口哲敬, 高橋健一, 川村尚生, 菅原一孔
情報処理学会論文誌, Vol.57, No.9, pp.2058-2063, 2016年9月

人物追跡システムにおける局所化された隣接関係の計算

四元辰平, 谷川浩三, 辻美希, 高橋健一, 川村尚生, 菅原一孔
電子情報通信学会論文誌, Vol.J99-D, No.5, pp.468-477, 2016年5月

バス経路検索履歴データを用いた移動希望特性の分析

香川喬之, 桑野将司, 福山敬, 谷本圭志, 川村尚生, 菅原一孔
交通工学論文集, Vol.2, No.2, pp.115-124, 2016年2月

個人情報保護フレームワークにおけるプログラム変換手法の改良

松永崇秀, 高橋健一, 川村尚生, 菅原一孔
コンピュータセキュリティシンポジウム 2016(CSS2016), 2016年10月

論理型モバイルエージェントフレームワークの開発とマイクロサービスアーキテクチャとの調和

東野正幸, 川村尚生
合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2016(JAWS-2016), pp.235-236, 2016年9月

人物追跡システムの福祉施設への応用

遠藤佑貴, 四元辰平, 高橋健一, 川村尚生, 菅原一孔
合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2016(JAWS-2016), pp.170-174, 2016年9月

不愉快な通知を用いた入力促進システムの実現に向けた不愉快度の調査

吉田壘, 高橋健一, 川村尚生, 菅原一孔
合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2016(JAWS-2016), pp.250-255, 2016年9月

人物追跡システムにおけるセンサの不確実性に対応するための隠れ隣接関係の導出

四元辰平, 塩塚大, 高橋健一, 川村尚生, 菅原一孔
合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2016(JAWS-2016), pp.154-161, 2016年9月

プログラム変換による個人情報保護の実現に向けたフレームワークのプロトタイプ実装

松永 崇秀, 八木 良太, 高橋 健一, 川村 尚生, 菅原 一孔

第 73 回コンピュータセキュリティ(CSEC)研究発表会, 2016 年 5 月

カメラ間人物対応付けに向けた共起属性の抽出

中野 翔太, 四元 辰平, 吉村 宏紀, 西山 正志, 岩井 儀雄, 菅原 一孔

電子情報通信学会技術研究報告, pp.59-64, 2016 年 1 月

バスネットの運賃管理システムの機能拡張

唐 国元, 笹間 俊彦, 川村 尚生, 菅原 一孔

電気・情報関連学会中国支部第 67 回連合大会講演論文集, pp.R16-25-23, 2016 年 10 月

福祉施設向けの人物追跡システム

遠藤 佑貴, 四元 辰平, 高橋 健一, 川村 尚生, 菅原 一孔

電気・情報関連学会中国支部第 67 回連合大会講演論文集, pp.R16-20-08, 2016 年 10 月

多機能バス停とその実運用に関する研究

森山 義隆, 川村 尚生, 菅原 一孔

電気・情報関連学会中国支部第 67 回連合大会講演論文集, pp.R16-25-21, 2016 年 10 月

入力促進に向けた通知の不愉快度調査

吉田 塁, 高橋 健一, 川村 尚生, 菅原 一孔

電気・情報関連学会中国支部第 67 回連合大会講演論文集, pp.R16-25-19, 2016 年 10 月

省エネルギーを目指した家電制御への快適性指標の導入

木村 祥, 笹間 俊彦, 川村 尚生, 菅原 一孔

電気・情報関連学会中国支部第 67 回連合大会講演論文集, pp.R16-16-06, 2016 年 10 月

個人情報の利用目的の考察

藤本 浩, 松永 崇秀, 高橋 健一, 川村 尚生, 菅原 一孔

電気・情報関連学会中国支部第 67 回連合大会講演論文集, pp.R16-25-20, 2016 年 10 月

バス乗り換え案内システムにおける経路探索用

ネットワーク構築の高速化

早川 寛人, 笹間 俊彦, 川村 尚生, 菅原 一孔

電気・情報関連学会中国支部第 67 回連合大会講演論文集, pp.R16-25-22, 2016 年 10 月

Photonic integrated circuits unveil crisis-induced intermittency

Andreas Karsaklian Dal Bosco, Yasuhiro Akizawa, Kazutaka Kanno, Atsushi Uchida, Takahisa Harayama, Kazuyuki Yoshimura

Optics Express, Vol.24, No.19, pp.22198-22209, Sept. 2016.

Existence of discrete solitons in discrete nonlinear Shrödinger equations with non-weak couplings

Kazuyuki Yoshimura

Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, Vol.33, No.2, pp.379-400, July 2016.

Symmetric Potential Lattice and Smooth Propagation of Tail-Free Discrete Breathers

Yusuke Doi, Kazuyuki Yoshimura

Physical Review Letters, Vol.117, No.1, 014101, July 2016.

音声分析を用いた自転車シミュレータ運転時の疲労測定法の基礎的検討

松村寿枝^{*1}, 川村絵美^{*1}, 小坂洋明^{*1}, 吉村宏紀^{*2}, 清水忠昭^{*2} (*¹奈良高専, *²鳥取大学)

電気学会論文誌 C, Vol.136-C, No.1, pp.92-98, 2016 年 1 月

入力文字数制限のない平仮名空中手書き文字の分割法

重本賢太郎^{*1}, 鈴木慶^{*1}, 清水忠昭^{*1}, 吉村宏紀^{*1}, 松村寿枝^{*2} (*¹鳥取大学, *²奈良高専)

情報処理学会論文誌, Vol.57, No.5, pp.1514-1523, 2016 年 5 月

Mobility of Discrete Breather in Truncated Pairwise Interaction Symmetric Lattices

Yusuke Doi, Kazuyuki Yoshimura

Proc. of the 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, p.685, Nov. 2016.

Existence and stability of odd and even parity discrete breathers in Fermi-Pasta-Ulam lattices

Proc. of the 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, pp.679-682, Nov. 2016.

Common-signal-induced synchronization in photonic integrated circuits driven by constant-amplitude random-phase light

Takuma Sasaki, Izumi Kakesu, Atsushi Uchida, Satoshi Sunada, Kazuyuki Yoshimura, Kenichi Arai, Proc. of the 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, pp.566-569, Nov. 2016.

Chaos synchronization and nonlinear dynamics in a photonic integrated circuit with two semiconductor lasers

Shoma Ohara, Andreas Karsaklian Dal Bosco, Kazusa Ugajin, Atsushi Uchida, Takahisa Harayama, Kazuyuki Yoshimura
Proc. of the 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, pp.562-565, Nov. 2016.

Fast physical random bit generation using a photonic integrated circuit

Yuta Terashima, Kazusa Ugajin, Atsushi Uchida, Takahisa Harayama, Kazuyuki Yoshimura
Proc. of the 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, pp.481-484, Nov. 2016.

Intermittent dynamics in lasers: Distribution mapping and random number generation

Andreas Karsaklian Dal Bosco, Naoki Sato, Shoma Ohara, Yuta Terashima, Atsushi Uchida, Takahisa Harayama, Kazuyuki Yoshimura
Proc. of the 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, pp. 477-480, Nov. 2016.

Fundamental Study on Fatigue Measurement Indexes using Speech Analysis

Toshie MATSUMURA, Emi KAWAMURA, Hiroki YOSHIMURA Tadaaki SHIMIZU
ICEE 2016 Okinawa, ID 900100, July. 2016.

Genetic Network Inference using Hierarchical Structure

Kimura, S., Tokuhisa, M., Okada-Hatakeyama, M.
Frontiers in Physiology, Vol.7, 12 pages, 2016.

Simultaneous Execution Method of Gene Clustering and Network Inference

Kimura, S., Tokuhisa, M., Okada-Hatakeyama, M.
In Proc. of the 2016 Conference on Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology, 7 pages, Oct. 2016.

Recommending Paragraphs of Wikipedia Pages as a Travel Guide

Tokuhisa, M., Ishihara, Y., Kimura, S., Oku, K.* (*Ryukoku University)
In Proc. of IEEE 9th International Workshop on Computational Intelligence and Applications, pp.57-62, Nov. 2016.

Wikipedia からの旅行者向け解説文章の推薦

石原有規, 徳久雅人, 木村周平, 奥健太* (*龍谷大学)
電子情報通信学会技術研究報告, Vol.115, No.445, pp.19-23, 2016 年 2 月

病院ブログ記事からの動詞対の抽出

竹内希史, 徳久雅人, 木村周平
電子情報通信学会技術研究報告, Vol.115, No.445, pp.35-39, 2016 年 2 月

次数相関を利用した遺伝子ネットワークの同定精度の改善

北澤甲次, 徳久雅人, 木村周平
平成 28 年度 (第 67 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, 2016 年 10 月

旅行支援のための情報を提示する車載器の試作

徳久雅人, 木村周平
観光情報学会第 14 回研究発表会講演論文集, pp.5-8, 2016 年 11 月

相関ヒストグラムを用いた小児急性脳症の判別

西山正志, 臼井愛美, 岩井儀雄, 大栗聖由, 前垣義弘
電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J99-D, No.12, pp. 1132-1141, 2016 年 12 月

Synthesizing Realistic Image-based Avatars by Body Sway Analysis

Nishiyama, M., Miyauchi, T., Yoshimura, H., Iwai, Y.
4th International Conference on Human-Agent
Interaction (HAI), pp. 155-162. Singapore, Singapore,
Oct. 2016.

**Person Re-identification using Co-occurrence
Attributes of Physical and Adhered Human
Characteristics**

Nishiyama, N., Nakano, S., Yotsumoto, T., Yoshimura,
H., Iwai Y., Sugahara, K.
23rd International Conference on Pattern Recognition
(ICPR), pp. 2086-2091, Cancún, Mexico, Dec. 2016.

カメラ間人物対応付けに向けた共起属性の抽出

中野翔太, 四元辰平, 吉村宏紀, 西山正志, 岩井
儀雄, 菅原一孔
電気情報通信学会 PRMU 研究会, pp.59- 64, 2016
年 1 月

**動的な多人数ターンテイキング環境下での参加
状態推定の提案**

江良樹哉, 吉村宏紀, 西山正志, 岩井儀雄
電気情報通信学会 PRMU 研究会, pp.43-48, 2016
年 2 月

**小児急性脳症の判別のための相関ヒストグラム
を用いた特徴抽出**

臼井愛美, 西山正志, 岩井儀雄, 大栗聖由, 前垣
義弘
第 22 回 画像センシングシンポジウム (SSII),
IS3-11, pp. 1-6, 2016 年 6 月

**物体認識のための注視点を用いた特徴抽出の提
案**

松本 陸, 吉村宏紀, 西山正志, 岩井儀雄
第 22 回 画像センシングシンポジウム (SSII),
IS1-09, pp. 1 - 7, 2016 年 6 月

解像度推定による低画質顔認識の性能改善

尾原 啓司, 吉村 宏紀, 西山 正志, 岩井 儀雄
画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2016), 2016
年 8 月

**視線変化に基づく特徴抽出を用いた人物画像の
性別推定**

松本 陸, 吉村宏紀, 西山正志, 岩井儀雄
電子情報通信学会 PRMU 研究会, pp. 221-226, 2016
年 9 月

**カメラ映像を用いた身体動揺の計測による人物
対応付けの検討**

神谷卓也, 吉村宏紀, 西山正志, 岩井儀雄,
第 6 回 バイオメトリクスと認識・認証シンポジウ
ム, pp.94-95, 2016 年 11 月

**小児急性脳症の判別における複数エポックの統
合手法による性能評価**

近藤貴大, 西山正志, 岩井儀雄, 大栗聖由, 前垣
義弘
第 18 回 IEEE 広島学生シンポジウム(HISS), pp.
162-165, 2016 年 11 月

**砂丘における自己位置推定のための稜線情報の
検討**

川口三郎, 吉村宏紀, 西山正志, 岩井儀雄
第 18 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム
(HISS), pp. 406-409, 2016 年 11 月

**実写アバタとのインタラクションに向けた視線
解析に基づく情報提示方法の検討**

井上路子, 吉村宏紀, 西山正志, 岩井儀雄
第 18 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム,
pp.154-157, 2016 年 11 月

**インタラクション前の実写アバタの待ち状態の
検討**

大野 礼人, 宮内 翼, 吉村 宏紀, 西山 正志, 岩
井 儀雄
HAI シンポジウム, 2016 年 12 月

揺れと影に頑健な屋外背景差分法の提案

豊田将志, 吉村宏紀, 西山正志, 岩井儀雄
電子情報通信学会 PRMU 研究会, pp.71-76, 2016 年
12 月.

**解像度推定を用いたダウンサンプリングによる
低画質人物認識**

尾原啓司, 吉村宏紀, 西山正志, 岩井儀雄
電気情報通信学会 PRMU 研究会, pp.65-70, 2016
年 12 月

電気電子工学講座

強度変調放射線治療の線量分布検証における線量分布の高解像度評価

小野康之, 近藤克哉, 三柴 数

映像情報メディア学会誌, 70 巻, 12 号, pp.J265 - J274, 2016 年 12 月

Display Electronic Systems: Augmented Reality in the Next Decade

Oyamada, Y.

Proc. Int. Display Workshop, pp.1274-1277, Dec. 2016.

Reconstruction of 3D Temperature Distributions in Free Convection Field around a Small Heated Sphere in Water

Miyake, T., Kakuta, N*, Fujioka, R*, Oyamada, Y., Mishiba, K., Kondo, K. (*Tokyo Metropolitan University)

Proc. 4th Int. Forum on Heat Transfer, pp.1997-1 ~ 1997-6, Nov. 2016.

細胞相互の輝度の違いが大きな場合の細胞検出

近藤克哉, 三柴 数, 小山田雄仁, 吉川雅基, 栗政明弘* (*東北医科薬科大)

電子情報通信学会技術研究報告, 116 巻, 298 号, MI2016-62, pp.1 - 4, 2016 年 11 月

A Framework for Improvement of Importance Map for Image Retargeting Assisted by Light Field Images

Mishiba, K., Oyamada, Y., Kondo, K.

Proc. IEEE 5th Global Conf. on Consumer Electronics, pp.105~106, Oct. 2016.

Sparse Representation using Weighted Graph Fourier Transform based on Color-Depth Correlation for Depth Map Compression

Kanamori, T., Mishiba, K., Oyamada, Y., Kondo, K.

Proc. IEEE 5th Global Conf. on Consumer Electronics, pp.29~30, Oct. 2016.

Wavelet-Based Depth Map Estimation for Light Field Cameras

Mishiba, K., Oyamada, Y., Kondo, K.

Proc. IEEE 5th Global Conf. on Consumer Electronics,

pp.167~168, Oct. 2016.

Simultaneous Imaging of Temperature and Concentration of Ethanol-water Mixtures in Microchannel using Near-infrared Dual-wavelength Absorption Technique

Kakuta, N*¹., Yamashita, H*¹., Kawashima, D*¹., Kondo, K., Arimoto, H*²., Yamada Y*³. (*¹Tokyo Metropolitan University, *²National Institute of AIST, *³The University of Electro-Communications)

Measurement Science and Technology, vol.27, no.11, pp.115401-1~115401-12, Sep. 2016.

P2-invariant を用いた文書画像検索

大西友貴, 小山田雄仁, 三柴 数, 近藤克哉

電子情報通信学会技術報告, 116 巻, 208 号, PRMU2016-56, pp.13-18, 2016 年 9 月

Depth Map Estimation using Census Transform for Light Field Cameras

Tomioka, T., Mishiba, K., Oyamada, Y., Kondo, K.

Proc. 41st IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing, pp.1641~1645, Mar. 2016.

Visualization of Free-convection Temperature Field around a Small Heated Sphere in Water

Kakuta, N*¹., Fujioka, R*¹., Kondo, K., Miyake, T., Arimoto, H*²., Yamada, Y*³. (*¹Tokyo Metropolitan University, *²National Institute of AIST, *³The University of Electro-Communications)

Proc. Pacific Rim Thermal Engineering Conf., pp.15097-1~15097-5, Mar. 2016.

Single Image Super Resolution by L2 Approximation with Random Sampled Dictionary

Fujisawa, T*¹., Yoshida, T*²., Mishiba, K. Ikehara, M*¹. (*¹Keio University, *²Nagaoka University of Technology)

IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E99-A, No.2, pp.612~620, Feb. 2016.

パワースケジューリングを用いる Pre-inverse 型 ANC

皆木亮祐, 大槻和志, 笹岡直人, 伊藤良生

信学技報, 第 115 巻, 522 号, pp.293-298, 2016 年 3 月

Impact and High-Pitch Noise Suppression Based on Spectral Entropy

Kawamura, A.^{*1}, Hayasaka, N.^{*2}, Sasaoka, N.,
(^{*1}Osaka University, ^{*2}Osaka Electro-Communication University)

IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E99-A, No.4, pp.777-787, Apr. 2016.

外部雑音を用いない Pre-inverse 型 ANC システムに関する研究

岡野圭佑, 皆木亮祐, 大槻和志, 笹岡直人, 伊藤良生

第 29 回 回路とシステムワークショップ論文集, pp.75-76, 2016 年 5 月

PAPR による騒音フレーム検出を用いる突発性騒音抑圧法

濱橋直也, 大槻和志, 笹岡直人, 伊藤良生

第 29 回 回路とシステムワークショップ論文集, pp. 330-335, 2016 年 5 月

チャネル増加容量に基づくランクアダプテーションに関する一検討

青野和紀, 加藤賢晃, 大槻和志, 笹岡直人, 伊藤良生

信学技報, 第 116 巻, 82 号, pp.23-27, 2016 年 6 月

Pre-inverse Active Noise Control System with Auxiliary Filter

Otsuki, K., Sasaoka, N., Minagi, R., Itoh, Y.

Proc. The 31th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, pp.831-834, Jul. 2016.

ALE 及び SSCF アルゴリズムを用いる IIR 型適応ノッチフィルタに関する一検討

土屋信, 塩貝一樹^{*1}, 笹岡直人, 伊藤良生, 小林正樹^{*2} (^{*1}新居浜高専, ^{*2}中部大学)

信学技報, 第 116 巻, 204 号, pp.33-37, 2016 年 8 月

Threshold Decision for Rank Adaptation Based on Cumulative Channel Capacity

Aono, K., Sasaoka, N., Itoh, Y.

Proc. 2016 International on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, pp.302-306, Oct. 2016.

A frequency synchronization method for multiple

access in direct spectrum division transmission

Abe, J.^{*}, Nakagawa, T. (^{*}NTT)

2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) Proc., pp. 1-6, Dec. 2016.

Attempt on the Extraction of EEG Using the ECG at the Time of Walking and Stepping Motion

Fujimura, K., Nishioka, K., Nakanishi, I. Li, S.

Joint 8th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 17th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, pp. 714-717, Aug. 2016.

Modeling of "High-Class Feeling" on a cosmetic package design

Nakajima, K.^{*1}, Lee, N.^{*1}, Tobitani, K.^{*1}, Katahira, K.^{*1}, Nagata, N.^{*1}, Shiraiwa, A., Nikata, K.^{*2}, Arakawa, K.^{*3}, Ishii, K.^{*4}, Tsukiyama, F.^{*4}, Kobayashi, S.^{*4} (^{*1}Kwansei Gakuin University, ^{*2}Kanazawa College of Art, ^{*3}Meiji University, ^{*4}KOSE Corporation)

22nd Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2016) Proc., pp. 319-324, Feb. 2016.

足ふみ運動時の心電図を利用した脳波波形抽出に関する試み

藤村喜久郎, 岡崎翔平

第 17 回 自己組織化マップ研究会 2016 講演論文集, SOM2016-07 (pp.07-01 to 07-04), 2016 年 03 月.

3 次元造形物体の感性評価における主要因子

片平建史^{*1}, 武藤和仁^{*1}, 李奈榮^{*1}, 飛谷謙介^{*1}, 白岩史, 中島加恵^{*1}, 長田典子^{*1}, 岸野文郎^{*1}, 山本倫也^{*1}, 河崎圭吾^{*2}, 荷方邦夫^{*2}, 浅野隆^{*2} (^{*1}関西学院大学, ^{*2}金沢美術工芸大学大学院)

日本感性工学会論文誌, 第 15 巻, 4 号, pp. 563-570, 2016 年 8 月.

対象物観察時の視線方向と評価内容の関係

白岩史, 猪股健太郎^{*1}, 益田綾子^{*2}, 浅野隆^{*3}, 荷方邦夫^{*3}, 河崎圭吾^{*3}, 古橋清一^{*2}, 長田典子^{*1}, 小村規夫^{*2} (^{*1}関西学院大学, ^{*2}本田技術研究所, ^{*3}金沢美術工芸大学大学院)

電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, 第 116 巻, 229 号, HIP2016-47, pp.25-28, 2016 年 9 月.

両眼視差と運動視差による面再構成白岩史, 林武文*¹ (関西大学)

平成 28 年電気学会 電子・情報・システム部門大会 講演論文集, TC17-8, pp.583-588, 2016 年 9 月.

心電図を利用した脳波波形抽出に関する試み - 差分値の三値正規化-

藤村喜久郎, 岡崎翔平, 岡田尚也

第 32 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集 FSS2016(佐賀大学), TB1-4(pp.315 - 318), 2016 年 09 月.

視線計測を用いた自動車運転時の顕著性マップモデルにおける評価の比較足立翔一・白岩史・李仕剛*¹ (*¹ 広島市立大学)

ViEW2016 ビジョン技術の実利用ワークショップ 講演概要集, IS1-17, pp.141-145, 2016 年 11 月.

自己組織化マップの応用のいろいろ - 巡回セールスマン問題・脈波・脳波-

藤村喜久郎

平成 28 年度 日本知能情報ファジィ学会中国・四国支部大会, 特別講演 SS1(6 ページ), 2016 年 12 月.

脳波による運転者認証とその評価

中西功

ドライバ状態,(株)技術情報協会, 2016 年 4 月

Intra-Palm Propagation Signals as Suitable Biometrics for Successive Authentication

Inada, T., Sodani, Y., Nakanishi, I.

Journal of Computer Technology and Application, Vol. 7, No. 2, pp. 65-72, Feb. 2016.

離散球面画像における FAST の実現

北村理知, 李仕剛, 中西功

電気学会論文誌 C, Vol. 136, No. 6, pp. 838-843, 2016 年 6 月

全天周注視軌跡マップの作成

藤浦達也, 李仕剛, 中西功

電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J99-D, No. 7, pp. 679-682, 2016 年 7 月

A Study on EEG evoked by Invisible Visual Stimulation Toward Continuous User Verification

Hattori, M., Izumi, Y., Nakanishi, I.

Proc. of International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC2016), pp. 629-632, Jul. 2016

Unconscious Biometrics for Continuous User Verification

Nakanishi, I.

Proc. of the 8th International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS2016), Auckland, New Zealand, pp. 20-25, Nov. 2016

継続認証実現に向けた知覚できない視覚刺激による誘発脳波に関する一考察

服部雅史, 泉佑樹, 中西功

電子情報通信学会技術報告, BioX2016-5, pp.37-40, 2016 年 6 月

人体伝搬信号による個人認証の照合性能向上への取り組み ~ 複合正弦波入力導入と伝搬経路の違いによる照合性能への影響 ~

西竜太郎, 大串達, 村上寛大, 中西功

電子情報通信学会技術報告, BioX2016-6, pp.41-44, 2016 年 6 月

知覚できない聴覚刺激による誘発電位に関する検討

原田秀喜, 神戸健太, 圓岡岳泰, 中西功

電子情報通信学会技術報告, BioX2016-10, pp. 51-54, 2016 年 10 月

漸次性特徴漸次性特徴を導入した変形 DFT による ASA に基づく音声分離

市川元大, 中西功

第 18 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム講演論文集, pp. 343-346, 2016 年 11 月

Shift Scheduling for Part Time Employee in Large-Scale DIY Shop

Ohki, M.

Proc. 14th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature PPSN2016, pp.27-39, Sep. 2016.

An Effective Cooperative GA for Shift Scheduling of Short Time Employee in Large-Scale Home Improvement Retailer

Ohki, M.

Proc. International Conference on Soft Computing

MENDEL2016, pp.1-8, June 2016.

Studies on interface of Cu/Al and Al/SiO₂/Si

Yoshihiro Irie, Hiromi Tanaka, Kentaro Kinoshita, Satoru Kishida
Procedia Engineering, Vol.141, pp.144-151(2016).

Influence of ultraviolet irradiation on data retention characteristics in resistive random access memory

K. Kimura, K. Ohmi, S. Kishida and K. Kinoshita
APPLIED PHYSICS LETTERS 108, 123501 (2016)

Improved performance of a conducting-bridge random access memory using ionic liquid

A.Harada, H.Yamaoka, S. Tojo, K.Watanabe, A.Sakaguchi, K.Kinoshita, S.Kishida, Y. Fukaya, K.Matsumoto, R.Hagiwara, H.Sakaguchi, T.Nokamiac and T.Itoh
J. Materials Chemistry C, Vol.4, pp.7215-7222 (2016).

Pulse Switching Property of Reset Process in Resistive Random Access Memory (ReRAM) Consisting of Binary-Transition-Metal-Oxides

T.Moriyama, T.Yamasaki, T.Ohno, S.Kishida and K.Kinoshita
MRS Advanced Materials, Vol.461, pp.1-6(2016).

Formation Mechanism of Conducting Path in Resistive Random Access Memory by First Principles Calculation Using Practical Model Based on Experimental Results

Takumi Moriyama, Takahiro Yamasaki, Takahisa Ohno, Satoru Kishida, and Kentar Kinoshita
MRS Advances, 2016, DOI: 10.1557/adv.2016.461.

ハードカーネルで再構成された CT 画像の MTF 測定

三塚 丈, 澤 和宏, 竹花慶紀, 田中章浩, 木下健太郎, 岸田 悟
信学技報, Vol.NC2015-80(2016-03), pp.59-63.

フリッカー値を用いた中枢性疲労の測定

福永 匠, 藤原直樹, 井上涼太, 田中章浩, 木下健太郎, 岸田 悟
信学技報, Vol.NC2015-101(2016-03), pp.185-188.

Oxide electronics from high-T_c superconductors to resistive-random access memory (Re-RAM) and so on

S.Kishida
International Conference on Engineering and Applied Science 2016

Resistance Given by Tiling Grain Surface with Micro Surface Structure in Polycrystalline Metal Oxide

T.Moriyama, T.Yamasaki, T.Ohno, S.Kishida and K.Kinoshita
J. Appl. Phys., 120, (2016), 215302-1-215302-9.

Rare-earth-free white emitting Ba₂TiP₂O₉ phosphor: revealing its crystal structure and photoluminescence properties

T. Hasegawa^{*1}, S. W. Kim^{*1}, S. Kamei^{*1}, T. Ishigaki, K. Uematsu^{*1}, K. Ohmi, K. Toda^{*1}, M. Sato^{*1} (^{*1} Niigata Univ.)
DALTON TRANS., 45(28), 11554-11559, (2016).

Influence of ultraviolet irradiation on data retention characteristics in resistive random access memory

K. Kimura, K. Ohmi, S. Kishida, and K. Kinoshita, Appl. Phys. Lett., 108, 123501-1-123501-5, (2016).

マイクロリアクター法による組成・合成条件の最適化法

大倉央^{*1}, 石垣雅, 大観光徳 (^{*1}メルケ)
次世代蛍光体材料の開発, シーエムシー出版, 第1編, 第4章, pp.45-56, 2016年7月

CuAlS₂:Mn 導電性薄膜蛍光体を用いた電流注入型 EL 素子の検討

足立尚義, 林翔太, 石垣雅, 大観光徳
信学技報 EID2013-18, pp.65-68, 2016年1月.

界面活性剤を用いない微粒子蛍光体を塗布した無機薄膜エレクトロルミネッセンス(EL)素子

畑山進也, 上田祥平, 石垣雅, 大観光徳
映像学技告 IDY2016-1, pp.29-32, 2016年1月.

太陽電池用波長変換膜に用いる $\text{YVO}_4\text{:Bi,Eu}$ ナノ蛍光体の合成 ～pH 制御による Bi,Eu の高濃度付活～

坂田陵輔, 永山凌, 石垣雅, 大倉央, 大観光徳
映像学技告 IDY2016-1, pp.13-16, 2016 年 1 月.

ZnSTe coherently grown onto GaP substrates by molecular beam epitaxy using ZnS buffer layers

Ichino, K., Kashiyama, S., Nanba, N., Hasegawa, H., Abe, T.,

Proc. The 17th International Conference on II-VI Compound and Related Materials, Paris, France, 13-18, Sep. 2015.

Phys. Status Solidi B, Vol. 253, No. 8, pp. 1476-1479, Aug. 2016.

Development of ZnSe-based organic-inorganic hybrid UV-APDs array

Abe, T., Inoue, R., Fujimoto, T., Tanaka, K., Uchida, S., Kasada, H., Ando, K., Ichino, K.,

Proc. The 17th International Conference on II-VI Compound and Related Materials, Paris, France, 13-18, Sep. 2015. (invited)

UV-APDs using ZnSe-based organic-inorganic hybrid structure with long lifetime and device integration

Abe, T., Inoue, R., Fujimoto, T., Tanaka, K., Uchida, S., Kasada, H., Ando, K., Ichino, K.,

Proc. The 17th International Conference on II-VI Compound and Related Materials, Paris, France, Sep. 13-18, 2015. (invited talk)

Phys. Status Solidi C, Vol. 13, No. 7-9, pp. 677-682, Jul. 2016.

Quantum confined Stark effect of polar and non-polar ZnO/ZnMgO quantum wells grown by MBE

Abe, T., Motoyama, T., Yamamoto, M., Yamamoto, A., Iwagashita, S., Kasada, H., Ando, K., Ichino, K.,

Proc. The 17th International Conference on II-VI Compound and Related Materials, Paris, France, Sep. 13-18, 2015.

Phys. Status Solidi C, Vol. 13, No. 7-9, pp. 602-605, Jul. 2016.

Conductivity control of Sn-doped alpha-Ga₂O₃ thin films grown on sapphire substrates

Akaiwa, K^{*,**}, Kaneko, K^{**}, Ichino, K., Fujita, S^{**},
(*Tottori University, **Kyoto University)

Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 55, No. 12, pp. 1202BA-1--8, Dec. 2016.

Conductivity control of Sn-doped corundum-structured Ga₂O₃ films on sapphire

Akaiwa, K^{*,**}, Kaneko, K^{**}, Ichino, K., Fujita, S^{**},
(*Tottori University, **Kyoto University)

Abst. Collaborative Conference on 3D & materials Research 2016, Incheon/Seoul, South Korea, 20-24, June 2016, p.318 (invited).

Conductivity control of Sn-doped corundum-structured Ga₂O₃ films on sapphire

Akaiwa, K^{*,**}, Kaneko, K^{**}, Ichino, K., Fujita, S^{**},
(*Tottori University, **Kyoto University)

Abst. Energy Materials Nanotechnology Meeting on Epitaxy 2016, Budapest, Hungary, 4-8, Sep. 2016, A-20 (invited)

Miniaturisation of Zn/Br Redox Flow Battery Cell and Investigation of Electrode Materials Influence on Its Characteristics

Nagai, Y., Komiyama, R., Miyashita, H., Lee, S.-S.
Micro and Nano Letters, Vo.11, pp.577-581, Oct. 2016.

Simulation Study on Reproducing Resistive Switching Effect by Soret and Fick Diffusion in Resistive Random Access Memory

Kinoshita, K., Koishi, R., Moriyama, T., Kawano, K.,
Miyashita, H., Lee, S.-S., Kishida, S.

MRS Advances, doi: 10.1557/adv.2016.449, pp.1-6, Jun. 2016.

A Wireless Sensor Network Platform for Water Quality Monitoring

Kageyama, T., Miura, M., Maeda, A., Mori, A., Lee, S.-S.

Proc. of IEEE Sensors 2016, pp.1442-1444, Oct. 2016.

The Effect of Short Beam Length and Gap Distance on the Resonance Frequencies in Fishbone-Shaped Microelectromechanical System Resonator

Takahashi, R., Miyashita, H., Kinoshita, K., Lee, S.-S.

Proc. of IEEE Sensors 2016, pp. 1574-1576, Oct. 2016.

Inkjet-Printed Silver-Nanoparticle THz Metamaterial

Kashiwagi, K., Xie, L., Li, X., Kageyama, T., Miura, M., Miyashita, H., Kono, J., Lee, S.-S.

Proc. of the 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), W5P.11.04.pdf (in CDROM 2 pages), Sep. 2016.

Polarization Dependence of IR Transmittance of Checkerboard Patterns Containing both Capacitive and Inductive Self-Complementary Patterns

Higashira, T., Kageyama, T., Kashiwagi, K., Miyashita, H., Takano, K., Nakajima, M., Lee, S.-S.

Proc. of the 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2016), W5P.11.13.pdf (in CDROM 2 pages), Sep. 2016.

Development of a Sensor Node of Wireless Sensor Network System for Water Quality Monitoring

Kageyama, T., Miura, M., Lee, S.-S.

Proc. of the 7th Japan-China-Korea MEMS/NEMS Conference 2016, pp. 97-98, Sep. 2016.

A Feasibility Study of Chlorophyll Sensor Using a Simple Optical Setup

Taie, M., Kageyama, T., Maeda, A., Mori, M., Miura, M., Lee, S.-S.

Proc. of Optofluidics 2016, pp. 1-2, July 2016.

Bias Voltage Determination for Investigation of the Influence of Short Beam Length Variation in Fishbone-Shaped MEMS Resonator on Resonance Frequency

Takahashi, R., Miyashita, H., Kondo, M., Kageyama, T., Lee, S.-S.

Proc. of Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro and Nano Technology (APCOT) 2016, pp. 35-36, Jun. 2016.

Development of Ohmic Contact Type RF MEMS Switch and Investigation of DC Bias Resistance Influence on Its RF Characteristics

Kageyama, T., Kato, M., Miyashita, H., Lee, S.-S.

Proc. of Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro and Nano Technology (APCOT) 2016, pp. 37-38, Jun. 2016.

Design of Microheater for Fast VOC Gas Desorption in a Micropreconcentrator

Oyama, K., Sagasaki, H., Iwata, M., Kageyama, T., Miyashita, H., Lee, S.-S.

Proc. of Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro and Nano Technology (APCOT) 2016, pp. 269-270, Jun. 2016.

A Simple Fabrication Method of Handheld Liquid Chromatography with Nanochannel

Miyashita, H., Lee, S.-S.

Proc. of Asia-Pacific Conference of Transducers and Micro and Nano Technology (APCOT) 2016, pp. 365-366, Jun. 2016.

Miniaturization of Zn/Br Redox Flow Battery Cell

Nagai, Y., Komiyama, R., Miyashita, H., Lee, S.-S.

Proc. of IEEE NEMS 2016, A4P-8-63 (4 pages), Apr. , 2016.

応用化学講座

Ionic Liquid Tag with Multiple Functions in Electrochemical Glycosylation

Nokami, T., Sasaki, N., Isoda, Y., Itoh, T.
ChemElectroChem, Vol.3, No.12, pp.2012-2016, Dec. 2016.

Extraction of Polysaccharides from Japanese Cedar Using Phosphonate-Derived Polar Ionic Liquids Having Functional Groups

Fukaya, Y., Asai, R., Kadotani, S., Nokami, T., Itoh, T.
Bull. Chem. Soc. Jpn., Vol.89, No.8, pp.879-886, Aug. 2016.

Development of Solvent-Driven Iron-Catalyzed Reactions

Itoh, T.
Heterocycles, Vol.92, No.8, pp.1373-1795, Aug. 2016.

Influence of Chirality on the Cyclohexene-Fused C₆₀ Fullerene Derivatives as an Acceptor Partner in a Photovoltaic Cell

Sugawara, K., Nakamura, N., Yamane, Y., Hayase, S., Nokami, T., Itoh, T.
Green Energy and Environment, Vol.1, No.2, pp.149-155, Jul. 2016.

Improved Performance of a Conducting-Bridge Random Access Memory using Ionic Liquids

Harada, A., Yamaoka, H., Tojo, S., Watanabe, K., Sakaguchi, A., Kinoshita, K., Kishida, S., Fukaya, Y., Matsumoto, K., Hagiwara, R., Sakaguchi, H., Nokami, T., Itoh, T.
J. Mater. Chem. C, Vol.4, No.30, pp.7215-7222, Jun. 2016.

Recent Progress on Nazarov Cyclization, Use of Iron Salt as Catalyst in an Ionic Liquid Solvent System

Itoh, T., Nokami, T., Kawatsura, M.
Chem. Rec., Vol.16, No.3, pp.1676-1689, Jun. 2016.

CO₂ Solubility in Ether Functionalized Ionic Liquids on Mole Fraction and Molarity Scales

Kanakubo, M., Makino, T., Taniguchi, T., Nokami, T.,

Itoh, T.
ACS Sus. Chem. Eng., Vol.4, No.2, pp.525-535, Feb. 2016.

Generation, Characterization, and Reactions of Thionium Ions Based on the Indirect Cation Pool Method

Shimizu, A., Takeda, K., Mishima, S., Saito, K., Kim, S., Nokami, T., Yoshida, J.
Bull. Chem. Soc. Jpn., Vol.89, No.1, pp.61-66, Jan. 2016.

立体選択的ルテニウム触媒アリル位置換反応

川面 基¹, 皆川真規¹, 伊藤敏幸² (¹日本大学, ²鳥取大学)
有機合成化学協会誌, 第74巻, 1号, pp.45-55, 2016年1月

Carbohydrate Derivatives

Nokami, T.
Science of Synthesis, Section 30.1.3. ed. by Murai, T. Thieme, Stuttgart, pp.267-291, 2016.

第10章 イオン液体の設計・合成・精製・再生の最近の進歩

伊藤敏幸
イオン液体研究最前線と社会実装, 監修 渡邊正義, CMC 出版, 東京, pp.96-108, 2016

One-Pot Synthesis of 3-Substituted 3,4-Dihydro-1,2,3-benzotriazine Derivatives Based on the Reaction of o-Bromobenzyl Azides with Butyllithium

Kobayashi, K., Chikazawa, Y.
Helv. Chim. Acta, Vol.99, No.1, pp.33-36, Jan. 2016.

Synthesis of 6,7-Dihydropyrido[2,3-d]pyrimidin-5(8H)-one Derivatives Based on the Reaction of 1-(4-Chloropyrimidin-5-yl)alk-2-en-1-one Derivatives with Primary Amines

Kobayashi, K., Ono, R., Ishitobi, K., Chikazawa, Y., Hiyoshi, H., Umez, K.
Heterocycles, Vol.92, No.2, pp.260-271, Feb. 2016.

A Convenient Synthesis of 1-Alkoxy-2-alkyl-1,2-dihydroisoquinoline-3,4-diones Utilizing the Reaction of 2-(Dialkoxymethyl)phenyllithiums with Dimethyl Oxalate

Kobayashi, K., Honda, Y., Kuroda, M.
Helv. Chim. Acta, Vol.99, No.2, pp.125-129, Feb. 2016.

Synthesis of *N,N*-Disubstituted 1-Aryl-1,3-dihydro-2*H*-isoindole-2-carbothioamides

Kobayashi, K., Shigemura, Y., Tanmatsu, M.
Heterocycles, Vol.92, No.5, pp.844-856, May. 2016.

Synthesis of 2-Aryl-2,3-dihydro-1,8-naphthyridin-4(1*H*)-ones by Deprotective Cyclization of *N*-{3-[(2*E*)-3-Arylprop-2-enoyl]pyridin-2-yl}-2,2-dimethylpropanamides in Water

Kobayashi, K., Kosuna, R., Imaoka, A.
Helv. Chim. Acta, Vol.99, No.5, pp.405-410, May. 2016.

Synthesis of 1-Aroyl-1,2-dihydro-3*H*-indol-3-ones via Cyclization of *N*-[2-(2-Chloroacetyl)phenyl]-benzamides with Triethylamine in the Presence of Di-*tert*-butyl Dicarboxate

Kobayashi, K., Kado, D., Nishikawa, K.
Heterocycles, Vol.92, No.6, pp.1063-1074, Jun. 2016.

A Convenient Synthesis of 2-Alkyl-3-aryl-2,3-dihydro-1*H*-isoindol-1-ones by the Reaction of *N*-Alkyl-*N*-[(2-bromophenyl)methyl]benzamides with Butyllithium

Kobayashi, K., Chikazawa, Y.
Tetrahedron, Vol.72, No.33, pp.5100-5105, Aug. 2016.

Synthesis of 3-Hydroxy-1,3-dihydro-2*H*-pyrrolo[2,3-*b*]-, -[2,3-*c*]-, or -[3,2-*c*]pyridin-2-ones from the Respective *N*-Pyridinylpivalamides and α -Keto Esters

Kobayashi, K., Kosuna, R., Chikazawa, Y.
Heterocycles, Vol.92, No.9, pp.1643-1653, Sep. 2016.

Synthesis of 2-Alk(or Aryl)oxy- and 2-(Alkyl(or Aryl)sulfanyl)-4*H*-3,1-benzothiazine Derivatives Carrying a (*Z*)-Halomethylidene Substituent at the 4-Position

Kobayashi, K., Nogi, T.
Heterocycles, Vol.92, No.10, pp.1810-1821, Oct. 2016.

An Efficient Synthesis of 3-(Arylsulfanyl)quinolin-

4(1*H*)-ones via Cyclization of *N*-{2-[2-(Arylsulfanyl)acetyl]phenyl}benzamides with *N,N*-Dimethylformamide Dimethyl Acetal

Kobayashi, K., Nishikawa, K., Nogi, T.
Heterocycles, Vol.92, No.12, pp.2225-2234, Dec. 2016.

Synthesis of 1-Aryl-1,3-dihydrobenzo[*c*]thiophenes by Acid-Mediated Cyclization of 1-[Aryl(methoxy)-methyl]-2-[(*tert*-butylsulfanyl)methyl]benzenes

Kobayashi, K., Shigemura, Y.
Heterocycles, Vol.92, No.12, pp.2261-2271, Dec. 2016.

Synthesis of 3,4-Dihydro-2*H*-1,3-benzoxazine-2-thiones via Cyclization of 2-(1-Isothiocyanatoalkyl)phenols

Kobayashi, K., Inouchi, H., Matsumoto, N., Chikazawa, Y.
Heterocycles, Vol.93, No.1, pp.63-74, Dec. 2016.

人工ペプチドによる自己集合性材料—ウイルスキャプシドと光誘起ナノファイバー

松浦和則
生物物理, 56 巻, 2 号, pp.94-97, 2016 年 3 月

**学術賞 (天然物・生体関連化学分野)
生体分子認識に基づいた機能性バイオマテリアルの創成**

松浦和則
化学と工業, 69 巻, 3 月号, pp.196, 2016 年 3 月

Peptide Nanospheres Self-Assembled from a Modified β -Annulus Peptide of *Sesbania* Mosaic Virus

Matsuura, K., Mizuguchi, Y., Kimizuka, N.
Biopolymers: Peptide Science, Vol.106, No.4, pp.470-475, Apr. 2016.

Encapsulation of CdTe Quantum Dots in Synthetic Viral Capsids

Fujita, S., Matsuura, K.
Chemistry Letters, Vol.45, No.8, pp.922-924, Aug. 2016.

Self-Assembly of Ni-NTA-Modified Beta-Annulus Peptides into Artificial Viral Capsids and Encapsulation of His-Tagged Proteins

Matsuura, K., Nakamura, T., Watanabe K., Noguchi, T., Minamihata, K., Kamiya, N., Kimizuka, N.

Org. Biomol. Chem., Vol.14, No.33, pp.7869-7874, Aug. 2016.

Light Responsive Metal–Organic Frameworks as Controllable CO-Releasing Cell Culture Substrates

Diring, S., Carné-Sánchez, A., Zhang, J., Ikemura, S., Kim, C., Inaba, H., Kitagawa, S., Furukawa, S.

Chemical Science, Vol.8, No.3, pp.2381-2386, Dec. 2016.

Bio-based Wrinkled Surfaces Induced by Wood Mimetic Skins upon Drying Effect of Mechanical Properties on Wrinkled Morphology

Izawa, H., Okuda, N., Moriyama, A., Miyazaki, Y., Ifuku, S., Morimoto, M., Saimoto, H.

Langmuir, Vol.32, pp.12799-12804, Nov. 2016.

Protein/CaCO₃/chitin Nanofiber Complex Prepared from Crab Shells by Simple Mechanical Treatment and Its Effect on Plant Growth

Aklog, Y. F., Egusa, M., Kaminaka, H., Izawa, H., Morimoto, M., Saimoto, H., Ifuku, S.

International Journal of Molecular Science, Vol.17, No.10, pp.1600, Sep. 2016.

Biomaterials Based on Freeze Dried Surface-Deacetylated Chitin Nanofibers Reinforced with Sulfobutyl Ether β -Cyclodextrin Gel in Wound Dressing Applications

Tabuchi, R., Azuma, K., Izumi, R., Tanou, T., Okamoto, Y., Nagae, T., Iohara, D., Uekama, K., Otagiri, M., Hirayama, F., Ifuku, S., Anraku, M.

International Journal of Pharmaceutics, Vol.511, No.2, pp.1080-1087, Sep. 2016.

Preparation of Chitin Nanofibers by Surface Esterification of Chitin with Maleic Anhydride and Mechanical Treatment

Aklog, Y. F., Nagae, T., Izawa, H., Morimoto, M., Saimoto, H., Ifuku, S.

Carbohydrate Polymers, Vol.153, No.20, pp.55-59, Nov. 2016.

Salinity-dependent Toxicity of Water-dispersible, Single-walled Carbon Nanotubes to Japanese Medaka Embryos

Kataoka, C., Nakahara, K., Shimizu, K., Kawase, S., Nagasaka, S., Ifuku, S., Kashiwada, S.

Journal of Applied Toxicology, Vol.37, No.4, pp.408-416, Apr. 2016.

Chitin Nanofibrils Suppress Skin Inflammation in Atopic Dermatitis-like Skin Lesions in NC/Nga Mice

Izumi, R., Azuma, K., Izawa, H., Morimoto, M., Nagashima, M., Osaki, T., Tsuka, T., Imagawa, T., Ito, N., Okamoto, Y., Saimoto, H., Ifuku, S.

Carbohydrate Polymers, Vol.146, pp.320-327, Aug. 2016.

Fully Biobased Oligophenolic Nanoparticle Prepared by Horseradish Peroxidase-catalyzed Polymerization

Izawa, H., Miyazaki, Y., Ifuku, S., Morimoto, M., Saimoto, H.

Chemistry Letters, Vol.45, No.6, pp.631-633, Mar. 2016.

Enzymatic Hydrolysis of Chitin Pretreated by Rapid Depressurization from Supercritical 1,1,1,2-Tetrafluoroethane toward Highly Acetylated Oligosaccharides

Villa-Lerma, G., González-Márquez, H., Gimeno, M., Trombotto, S., David, L., Ifuku, S., Shirai, K.

Bioresorce Technology, Vol.209, pp.180-186, Jun. 2016.

Bio-based Epoxy/chitin Nanofiber Composites Cured with Amine-type Hardeners Containing Chitosan

Shibata, M., Enjojia, M., Sakazume, K., Ifuku, S.

Carbohydrate Polymers, Vol.144, pp.89-97, Jun. 2016.

Biom mineralization of Calcium Phosphate Crystals on Chitin Nanofiber Hydrogel for Bone Regeneration Material

Kawata, M., Azuma, K., Izawa, H., Morimoto, M., Saimoto, H., Ifuku, S.

Carbohydrate Polymers, Vol.136, pp.964-969, Jan. 2016.

キチンナノファイバー添加小麦粉による製パン性の向上

田中裕之, 江草真由美, 竹村圭弘, 岩田侑香里,

永江知音, 伊福伸介, 上中弘典
日本食品科学工学会誌, 第 63 巻, 1 号, pp.18-24
2016 年.

Facile Preparation of Cyclodextrin-grafted Chitosans and Their Conversion into Nanoparticles for an Anticancer Drug Delivery System

Izawa, H., Yamamoto, K., Yoshihashi, S., Ifuku, S., Morimoto, M., Saimoto, H.

Polymer Journal, Vol.48, pp.203-207, Feb. 2016.

Dependence of Intestinal Absorption Profile of Insulin on Carrier Morphology Composed of β -Cyclodextrin-grafted Chitosan

Daimon, Y., Kamei, N., Kawakami, K., Takeda-Morishita, M., Izawa, H., Takechi-Haraya, Y., Saito, H., Sakai, H., Abe, M., Ariga, K.

Molecular Pharmatics, Vol.13, No.12, pp.4034-4042, 2016.

Effect of Phosphorous-doping on Electrochemical Performance of Silicon Negative-electrodes in Lithium-ion Batteries

Domi, Y., Usui, H., Shimizu, M., Kakimoto, Y., Sakaguchi, H.

ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol.8, No.11, pp.7125-7132, Mar. 2016.

Improved Electrochemical Performance of Lanthanum Silicide/silicon Composite Electrode with Nickel Substitution for Lithium-ion Batteries

Domi, Y., Usui, H., Takemoto, Y., Yamaguchi, K., Sakaguchi, H.

J. Phys. Chem. C, Vol.120, No.30, pp.6333-6339, Jul. 2016.

Improved Electrochemical Performance of a $\text{Ge}_x/\text{Si}_{1-x}$ Alloy Negative Electrode for Lithium-ion Batteries

Domi, Y., Usui, H., Takemoto, Y., Yamaguchi, K., Sakaguchi, H.

Chem. Lett., Vol. 45, No.10, pp.1198-1200, Oct. 2016.

Electrochemical Lithiation and Sodiation of Nb-doped Rutile TiO_2

Usui, H., Domi, Y., Yoshioka, S., Kojima, K., Sakaguchi, H.

ACS Sustainable Chem. Eng., Vol.4, No.12, pp.6695-6702, Oct. 2016.

Niobium-doped Titanium Oxide Anode and Ionic Liquid Electrolyte for a Safe Sodium-ion Battery

Usui, H., Domi, Y., Shimizu, M., Imoto, A., Yamaguchi, K., Sakaguchi, H.

J. Power Sources, Vol.329, pp.428-431, Oct. 2016.

Preparation of Next-generation Rechargeable Battery Anodes Using Aerosol Process and Evaluation of Their Charge-discharge Performances

Usui, H., Sakaguchi, H.

J. Aerosol Res., Vol.31, No. 4, pp.247-253, Dec. 2016.

コラム 3 金属リチウム負極におけるデンドライト形成

道見康弘, 坂口裕樹, 化学の要点シリーズ 16 金属界面の基礎と計測, 共立出版, pp.152, 2016 年 11 月

Synthesis and Characterization of Black Pigments Based on Calcium Manganese Oxides for High Near-infrared (NIR) Reflectance

Oka, R., Masui, T.

RSC Advances, Vol.6, pp.90952-90957. Sep. 2016.

生物応用工学講座

Stereoselective Intramolecular Coupling of Barbituric Acids with Aliphatic Ketones and O-Methyl Oximes by Electroreduction: Radical Cyclization Mechanism Supported by DFT Study

Kise, N., Tuji, T., Sakurai, T.

Tetrahedron Lett., Vol.57, No.32, pp.1790-1793, Apr. 2016.

Electroreductive Intermolecular Coupling of Uracils with Aromatic Ketones: Synthesis of 6-Substituted and cis-5,6-Disubstituted 5,6-Dehydro-1,3-dimethyluracils and Their Transformation to 6-Substituted 1,3-Dimethyluracils, trans-5,6-Disubstituted 5,6-Dihydro-1,3-dimethyluracils and 4,5,5-Trisubstituted 3-Methyloxazolizin-2-ones

Kise, N., Hamada, Y., Sakurai, T.

J. Org. Chem., Vol.81, No.12, pp.5101-5119, Jun. 2016.

Electroreductive Intermolecular Coupling of Coumarins with Benzophenones: Synthesis of 4-(2-Hydroxyphenyl)-5,5-diaryl- γ -butyrolactones, 2-(2,2-Diaryl-2,3-dihydrobenzofuran-3-yl)acetic acids, and 4-Diarylmethylcoumarins

Kise, N., Hamada, Y., Sakurai, T.

J. Org. Chem., Vol.81, No.22, pp.11043-11056, Nov. 2016.

Peroxidase-catalyzed Oxyfunctionalization Reactions Promote by the Complete Oxidation of Methanol

Ni, Y., Fernandez-Fueyo, E., Gomez Baraibar, A., Ullrich, R., Hofrichter, M., Yanase, H., Alcalde, M., van Berkel, W. J., Hollmann F.

Angew. Chem. Int. Ed. Engl., Vol.55, No.2, pp.798-801, Jan. 2016.

Structural Analysis and Physiological Properties of Exopolysaccharides Secreted by a Newly Isolated *Pseudomonas stutzeri* BL58 under Alkaline Conditions

Yamada, H., Yoshida, S., Nozaki, K., Doi, T., Nkakamura, H., Yanase H.

J. Biotechnol. Biomater., Vol.6, No.4, doi: 10.4172/2155-952X.1000250. Oct. 2016.

Unique C-Terminal Region of Hap3 is Required for Methanol-regulated Gene Expression in the Methylophilic Yeast *Candida boidinii*

Oda, S., Yurimoto, H., Nitta, N., Sakai, Y.

Microbiology Vol.162, No.5, pp.898-907, May. 2016.

Anthocyanin Suppresses the Toxicity of A β Deposits in *in vitro* and *in vivo* Models of Alzheimer's Disease

Yoshida-Yamakawa, M., Uchino, K., Watanabe, Y., Adachi, T., Nakanishi, M., Ichino, H., Hongo, K., Mizobata, T., Kobayashi, S., Nakashima, K., Kawata, Y.

Nutr. Neurosci., Vol.19, No.1, pp.32-42, 2016.

Structural Basis of Cu, Zn-Superoxide Dismutase Amyloid Fibril Formation Involves Interaction of Multiple Peptide Core Regions

Ida, M., Ando, M., Adachi, M., Tanaka, A., Machida, K., Hongo, K., Mizobata, T., Yoshida-Yamakawa, M., Watanabe, Y., Nakashima, K., Kawata, Y.

J. Biochem. Vol.159, No.2, pp.247-260, Feb. 2016.

Suppression of Amyloid Fibrils Using the GroEL Apical Domain

Ojha, B., Fukui, N., Hongo, K., Mizobata, T., Kawata, Y.

Sci. Rep. Vol.6, pp.31041, Aug. 2016.

Modulating the Effects of the Bacterial Chaperonin GroEL on Fibrillogenic Polypeptides Through Modification of Domain Hinge Architecture

Fukui, N., Araki, K., Hongo, K., Mizobata, T., Kawata, Y.

J. Biol. Chem. Vol.291, No.48, pp.25217-25226, Nov. 2016.

Characterization of the Novel Mutant A78T-HERG from a Long QT Syndrome Type 2 Patient: Instability of the Mutant Protein and Stabilization by Heat Shock Factor 1

Kondo, T., Hisatome, I., Yoshimura, S., Mahati, E., Notsu, T., Li, P., Iitsuka, K., Kato, M., Ogura, K., Miake, J., Aiba, T., Shiimizu, W., Kurata, Y., Sakata,

S., Nakasone, N., Ninomiya, H., Nakai, A., Higaki, K., Kawata, Y., Shirayoshi, Y., Yoshida, A., Yamamoto, K.
 Biosci. Biotechnol. Biochem. Vol.80, No.2, pp.368-375, 2016.
 J. Arrhythm., Vol.32, No.5, pp.433-440, Oct. 2016.

X-Ray Digital Aggregated Dynamics of Intrinsically Disordered Proteins

Hara, N., Matsushita, Y., Ikezaki, K., Sekiguchi, H., Fukui, N., Kawata, Y., Sasaki, Y. C.
 Biophys. J., Vol.110, No.3, Sup.1, p553a, Mar. 2016.

蛋白質の立体構造形成と凝集形成

河田康志（鳥取大学）

日本白内障学会誌, 28 巻, 1 号, pp.18-26, 2016 年 6 月.

Crystal Structure of D-Stereospecific Amidohydrolase from *Streptomyces* sp. 82F2 - Insight into the Structural Factors for Substrate Specificity

Arima, J., Shimone, K., Miyatani, K., Tsunehara, Y., Isoda, Y., Hino, T., Nagano, S.
 FEBS J., Vol.283, No.2, pp.337-349, Jan. 2016.

極限環境微生物遺伝子資源の応用

石野園子, 鈴木宏和, 河原林裕（九州大学）

IFO Res. Commun., 30 巻, pp.103-117, 2016 年 12 月.

Purification and Characterization of a Novel Alginate Lyase from the Marine Bacterium *Cobetia* sp. NAP1 Isolated from Brown Algae

Yagi, H., Fujise, A., Itabashi, N., Ohshiro, T.
 Biosci. Biotechnol. Biochem. Vol.80, No.12, pp.2338-2346, Dec. 2016.

Conjugative Plasmid Transfer from *Escherichia coli* is a Versatile Approach for Genetic Transformation of Thermophilic *Bacillus* and *Geobacillus* species.

Tominaga, Y., Ohshiro, T., Suzuki, H.
 Extremophiles, Vol.20, No.3, pp.375-381, May. 2016.

A Thiostrepton Resistance Gene and Its Mutants Serve as Selectable Markers in *Geobacillus kaustophilus* HTA426

Wada, K., Kobayashi, J., Furukawa, M., Doi, K., Ohshiro, T., Suzuki, H.

土木工学講座

Masses of Fluid for Cylindrical Tanks in Rock with Partial Uplift of Bottom Plate

Taniguchi, T., Katayama Y*. (* Kyoto City)
Journal of Pressure Vessel Technology. ASME, Vol. 138, Issue 5, pp. 051301-1-051301-13, Oct. 2016.

Analysis of Maximum Elasto-Plastic Response of Multi-Degree-of-Freedom Oscillators Based on A Modal Combination of Equivalently Linearized Response of Each Mode

Taniguchi, T., Nishiraku, H*, Ono, Y. (* Chodai Co. Ltd.)
ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 8: Seismic Engineering, Paper No. PVP2016-63865, pp. V008T08A010; 10 pages, Jul. 2016.

Contribution of the Bending Stiffness of the Tank Bottom Plate and Out-of-Round Deformation of Cylindrical Shell to the Tank Rocking Motion

Taniguchi, T., Nakashima, T*, Yoshida, Y. (* JIP Techno Science Corporation)
ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 8: Seismic Engineering, Paper No. PVP2016-63916, pp. V008T08A011; 7 pages, Jul. 2016.

A Static Analysis of Uplift during Strong Earthquakes of Unanchored Flat-Bottom Cylindrical Shell Tanks

Nakashima, T*, Taniguchi, T. (* JIP Techno Science Corporation)
ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 8: Seismic Engineering, Paper No. PVP2016-63928, pp. V008T08A012; 9 pages, Jul. 2016.

RC 床版の内部水平ひび割れ部を平板とみなした場合の動的応答の特徴

中山昭二*, 谷口朋代, 小野祐輔 (*株式会社ソーキ)
コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 16 巻, pp.347-352, 2016 年 10 月.

SPH法による石積擁壁の模型振動実験の再現解析

小野祐輔, 内藤正輝*¹, 酒井久和*¹, 太田直之*² (*¹法政大学, *²鉄道総合技術研究所)
土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.I_515-I_522, 2016 年 6 月.

Determined Soil Characteristic of Palu in Indonesia by Using Microtremor Observation

Putra, R. R.*¹, Kiyono, J.*², Yoshimoto, Y.*², Ono, Y. Syahril*¹(*¹Padang State University, *²Kyoto University)
Int. J. of GEOMATE, Vol.10, No.2, pp.1737-1742, 2016.

橋梁構造物の耐災害性能向上に向けた河川内橋脚への洪水時における作用外力の評価

渡邊学歩*, 赤松良久*, 入江貴博*, 小野祐輔 (*山口大学)
土木学会論文集 A2 (応用力学), Vo.71, No.2, p.I_359—I_368, 2016 年 2 月.

Seismic Reinforcement for Traditional Timber Gate Utilizing External Stairs

Mukaibo, K., Tanahashi, H.*, Yoshitomi, S.*, Suzuki Y.* (*Ritsumeikan Univ.)
Proc. of World Conference on Timber Engineering 2016, Aug. 2016.

Earthquake response analysis of traditional timber gate of Higashi-honganji temple based on 3D analytical model

Yoshitomi, S.*, Mukaibo, K., Tanahashi, H.*, Suzuki, Y.* (*Ritsumeikan Univ.)
Proc. of World Conference on Timber Engineering 2016, Aug. 2016.

Development and application of seismic reinforcement design method for traditional wooden houses in heavy-snow regions by taking advantage of structural features

Sato, E.*, Mukaibo, K., Suzuki, Y.* (*Ritsumeikan Univ.)
Proc. of World Conference on Timber Engineering 2016, Aug. 2016.

Characteristics of biodegradation found in roof structure of wooden historical buildings

Fujiwara, Y.*¹, Fujii, Y.*¹, Mukaibo, K., Suzuki, Y.*²

(^{*1}Kyoto Univ., ^{*2}Ritsumeikan Univ.)

Proc of World Conference on Timber Engineering
2016, Aug. 2016.

高山伝統構法木造建築物の3次元地震応答解析による積雪荷重の影響

村田晶^{*1}, 清水一史^{*1}, 吉富信太^{*2}, 向坊恭介 (^{*1}金沢大, ^{*2}立命館大)

歴史都市防災論文集, Vol.10, pp.1-8, 2016 年 7 月.

高山市伝統木造軸組構法建物における柱脚特性を考慮した全体架構モデルの応答解析

吉富信太^{*1}, 河村拓実^{*1}, 村田晶^{*2}, 向坊恭介 (^{*1}立命館大, ^{*2}金沢大)

歴史都市防災論文集, Vol.10, pp.9-14, 2016 年 7 月.

階段を利用した伝統木造二重門の制震補強

向坊恭介, 鈴木祥之^{*} (^{*}立命館大)

歴史都市防災論文集, Vol.10, pp.31-38, 2016 年 7 月.

蘇った加子母明治座=地芝居小屋の耐震改修に関する調査研究=

鈴木祥之^{*1}, 齋藤幸雄^{*2}, 向坊恭介, 石黒恵之^{*3}, 佐藤英佑^{*1} (^{*1}立命館大, ^{*2}齋藤構造研究室, ^{*3}川端建築計画)

京都歴史災害研究, 第 17 号, pp.23-32, 2016 年 3 月.

アルカリシリカ反応がコンクリートの力学的性質に与える影響

中島俊介^{*}, 黒田保, 吉野公, 金氏裕也 (^{*}五洋建設)

コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 16 巻, pp. 33-38, 2016 年 10 月.

高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究

堤嵩示, 吉野公, 黒田保, 吉澤千秋^{*} (^{*}JFE ミネラル)

コンクリート工学年次論文集, 第 38 巻, 第 1 号, pp. 69-74, 2016 年 7 月.

高炉スラグ細骨材を多量に使用したコンクリートの性質

博多正貴, 吉野公, 黒田保, 吉澤千秋^{*} (^{*}JFE ミネ

ラル)

コンクリート工学年次論文集, 第 38 巻, 第 1 号, pp. 2229-2234, 2016 年 7 月.

ダム貯水池の異高同時選択取水による取水特性の検討

泉谷隆志・矢島啓・鈴木伴征^{*1} (^{*1}八千代エンジニアリング(株))

土木学会論文集 B1 (水工学), 第 72 巻, 4 号, pp.I_685-690, 2016 年 2 月.

矢島湖における浅場整備が沿岸域の底質巻き上げに与える影響

矢島啓

土木学会論文集 B1 (水工学), 第 72 巻, 4 号, pp.I_637-642, 2016 年 2 月.

堰下流部における潜り噴流流れの再現性に関する鉛直 2 次元モデルおよび 3 次元モデルの比較

梶川勇樹, 檜谷治

土木学会論文集 B1 (水工学), 第 72 巻, 4 号, pp.I_553-I_558, 2016 年 2 月.

矢島湖におけるリアルタイム水質予測システムの開発

矢島啓・中田一騎・本村真一・新谷哲也^{*1}・菅原庄吾^{*2}・清家泰^{*2} (^{*1}首都大学東京, ^{*2}島根大学)
土木学会河川技術論文集, 第 22 巻, pp.385-390, 2016 年 6 月.

高次精度移流解法(WENO法)を用いた津波による港湾内の地形変化に関する数値計算

梶川勇樹, 黒岩正光, 中山仁成^{*1} (^{*1}株式会社エイト日本技術開発)

土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 72 巻, 2 号, pp.I_265-I_270, 2016 年 10 月.

NEWS 型三軸傾斜計計測結果からの変動検知方法に関する検討

中村公一

地盤と建設, 第 34 巻, 1 号, pp.11-17, 2016 年 12 月.

NEWS 型三軸傾斜計の温度特性を考慮した斜面変動検出方法に関する検討

安住晴, 中村公一, 島内哲哉^{*1}, 小野和行^{*2}, 酒井直樹^{*3}, 西山哲^{*4} (^{*1}オフィス im3, ^{*2}日本総合建設, ^{*3}防災科学技術研究所, ^{*4}岡山大学大学院)

第60回地盤工学シンポジウム, pp.103-110, 2016年12月.

3次元格子ばね解析法による円孔周辺の変形解析と連結形式の影響

西村強, 文村賢一*, 河野勝宣, 三橋大地 (*大成建設(株))

第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 2016年1月.

緑色岩時すべりのすべり面粘土ー北海道常呂帯仁頃層群緑色岩を基岩とする北陽 A-160 地すべりの例ー

前田寛之*, 河野勝宣 (*札幌工科専門学校)

日本地すべり学会誌, 第53巻, 第1号, pp.13-16, 2016年1月.

Precipitation of calcium compound on silicate rock surface

Nara, Y.*¹, Kuwatani, R., Kohno, M., Hamada, Y., Kato, M.*², Sato, T.* and Sato, T.*³. (*¹ 現 京都大学, *² 北海道大学, *³ 日本原子力研究開発機構)

Creative Development of Rock Mechanics and Engineering, Proceedings of the 2016 Korea-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, May, 2016.

落石の斜面衝突運動に関する室内模型実験と数値解析

河野勝宣, 土田章仁*¹, 北迫勝也*², 池添保雄, 西村強 (*¹ アサヒコンサルタント(株), *² 大成建設(株))

材料, 第65巻, 第5号, pp.377-383, 2016年5月.

岩石の透水試験における環境温度の制御の重要性

加藤昌仁*¹, 奈良禎太*², 福田大祐*¹, 河野勝宣, 佐藤稔紀*³, 佐藤努*¹, 高橋学*⁴ (*¹ 北海道大学, *² 京都大学, *³ 日本原子力研究開発機構, *⁴ 産業技術総合研究所)

材料, 第65巻, 第7号, pp.489-495, 2016年7月.

Importance of temperature control during permeability test for measuring hydraulic constants of rock

Kato, M.*¹, Nara, Y.*², Kohno, M., Sato, T.*³, Fukuda, D.*¹, Sato, T.*¹ and Takahashi, M.*⁴. (*¹ 北海道大学, *² 京都大学, *³ 日本原子力研究開発機構, *⁴ 産業技術総合研究所)

Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future (Resat Ulusay et al. editors), Proceedings of EUROCK 2016 - the 2016 ISRM International Symposium, pp.259-263, Aug., 2016.

A 3D Distinct Element-Based Model for Deformation and Failure of Rock

Nishimura, T., Fumimura, K.*¹, Kohno, M. and Daichi, M. (*大成建設(株))

Harmonizing Rock Mechanics with Sustainable Economic Development (Proceedings of 9th Asian Rock Mechanics Symposium), Proc.No.PO4-P74, Oct., 2016.

Physical and mechanical properties of artificial rock based on clay mineral content and type

Kohno, M. Takehara, Y. and Nishimura, T.

Harmonizing Rock Mechanics with Sustainable Economic Development (Proceedings of 9th Asian Rock Mechanics Symposium), Proc.No.PO7-P111, Oct., 2016.

Diffuse Seismicity in Seismic Hazard Assessment for Site Evaluation of Nuclear Installations

Kagawa, T. and 23 coauthors.

Safety Report Series, No. 89, IAEA, Vienna, ISBN 978-92-0-101716-1, Jun. 2016.

14.4 電磁氣的構造

村上英記*¹, 塩崎一郎(*¹ 高知大学)

日本地質学会編「日本地方地質誌 7.四国地方」, 朝倉書店, 2016.

鳥取砂丘の自然電位分布から地下水を探るー繰返し測定(2014から2015年度)からみえたことー

塩崎一郎
山陰海岸国立公園鳥取砂丘景観保全調査報告書, 鳥取砂丘再生会議(保全再生部会), pp.16-24, 2016.

1943年鳥取地震の学校被害地点における微動探査を用いた地盤構造推定と地震動評価

吉田昌平, 野口竜也, 香川敬生

土木学会論文集 A1, Vol.72, No.4(地震工学論文集 第35巻), pp. I_404-I_412, 2016年5月.

鳥取県内の地震観測点における地盤構造の把握とサイト特性の評価

野口竜也, 西川隼人*¹, 吉田昌平, 香川敬生 (*¹

舞鶴高専)

土木学会論文集 A1, Vol.72, No.4(地震工学論文集
第35巻), pp. I_646-I_658, 2016年5月.

**高密度臨時地震観測に基づく 2016 年熊本地震の
本震における益城町役場周辺 の造成宅地を対象
とした強震動の広域推定**

秦吉弥^{*1}, 後藤浩之^{*2}, 吉見雅行^{*3}, 古川愛子^{*2},
盛川仁^{*4}, 池田隆明^{*5}, 香川敬生 (*¹ 大阪大学, ^{*2}
京都大学, ^{*3} 産業技術総合研究所, ^{*4} 東京工業大
学, ^{*5} 長岡科学技術大学,)

第44回地盤震動シンポジウム「2016年熊本地震
で何が起きたか」, 日本建築学会, 2016年12月.

**長期避難者への支援と避難者の意向ー全国の動向,
鳥取県内の長期避難者への意向調査**

浅井秀子

東日本大震災合同調査報告 建築編 10 建築計
画, 日本建築学会, 東日本大震災合同調査報告編
集委員会, pp.105~111, 2016年7月.

社会経営工学講座

OSS Reliability Measurement and Assessment

Yamada, S., Tamura, Y.* (*Yamaguchi University)
Springer-Verlag (Springer Series in Reliability Engineering), Switzerland, April 2016 (全 185 頁) .
(ISBN978-3-319-31817-2)

Component-Oriented Reliability Assessment Approach Based on Decision-Making Frameworks for Open Source Software

Yamada, S., Tamura, Y.* (*Yamaguchi University)
in Principals of Performance and Reliability Modeling and Evaluation---Essays in Honor of Kishor Trivedi on his 70th Birthday--- (Springer Series in Reliability Engineering), L. Fiondella and A. Puliafito, Eds., pp. 587-608, Springer-Verlag, London, April 2016.

Indentification Method of Fault Level Based on Deep Learning for Open Source Software

Tamura, Y.*, Yamada, S. (*Yamaguchi University)
in Software Engineering Research, Management and Applications (Studies in Computational Intelligence, Vol. 654), Roger Lee, Ed., pp. 65-75, Springer-Verlag, Switzerland, June 2016.

An Extended Binomial-Type Software Reliability Model with Testing-Environmental Factors

Inoue, S., Yamada, S.
Journal of Japan Industrial Management Association (日本経営工学会論文誌), Vol. 66, No. 4E, pp. 406-415, January 2016.

Practical Reliability and Maintainability Analysis Tool for an Open Source Cloud Computing

Tamura, Y.*, Yamada, S. (*Yamaguchi University)
Quality and Reliability Engineering International, Vol. 32, No. 3, pp. 909-920, April 2016. (DOI: 10.1002/qre.1802)

Optimal Software Reliability Model Selection Based on Deep Learning

Tamura, Y.*, Matsumoto, M., Yamada, S. (*Yamaguchi University)
Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Management Science and Applications (ICIMSA 2016), pp. 71-81, Jeju, Korea,

May 2016.

Generalized Linear Modeling for Predicting Software Quality from Process Data

Inoue, S., Yamada, S.
Amity Journal of Interdisciplinary Research, Vol. 1, No. 1, pp. 52-58, July 2016.

Reliability and Interaction Analysis Based on Fault Data Clustering and Neural Network for Cloud Software with Big Data

Tamura, Y.*, Yamada, S. (*Yamaguchi University)
Amity Journal of Interdisciplinary Research, Vol. 1, No. 1, pp. 75-80, July 2016.

Qualitative Quality Analysis of Process Factors Based on Software Design Review Record Affecting Software Reliability

Sato, T., Yamada, S.
Proceedings of the 22nd ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, Los Angeles, pp. 117-121, California, U.S.A., August 4-6, 2016.

Extended Discrete Binomial Software Reliability Models with Testing Environment

Inoue, S., Yamada, S.
Proceedings of the 22nd ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, pp. 127-131, California, U.S.A., August 4-6, 2016.

Deep Learning Approach for Reliability Assessment of Cloud Software

Tamura, Y.*, Yamada, S. (*Yamaguchi University)
Proceedings of the 22nd ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, pp. 138-142, California, U.S.A., August 4-6, 2016.

Statistical Process Control Assessment for Open Source Software and Its Application

Yamada, S., Yamaguchi, M.
Proceedings of the 22nd ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, pp. 162-166, Los Angeles, California, U.S.A., August 4-6, 2016.

Jump Diffusion Process Model Considering the Optimal Data Partitioning for Cloud with Big Data

Takeuchi, T., Tamura, Y.*, Yamada, S. (*Yamaguchi University)

Proceedings of the 22nd ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, pp. 167-171, Los Angeles, California, U.S.A., August 4-6, 2016.

Estimation of Detectable Number of Software Faults under Budget Constraint

Hotta, K., Inoue, S., Yamada, S.

Proceedings of the 22nd ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, pp. 172-175, Los Angeles, California, U.S.A., August 4-6, 2016.

Discrete Software Reliability Modeling Based on a Discrete Modified Weibull Distribution

Hosokawa, Y., Inoue, S., Yamada, S.

Proceedings of the 22nd ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, pp. 176-180, Los Angeles, California, U.S.A., August 4-6, 2016.

An Optimal Release Problem Based on a Change-Point Hazard Rate Model

Inoue, S., Yamada, S.

Proceedings of the 7th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM 2016), pp. 154-161, Seoul, Korea, August 24-26, 2016.

A Testing-Resource Allocation Problem with Multiple Constraints for Software Development

Minamino, Y., Inoue, S., Yamada, S.

Proceedings of the 7th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM 2016), pp. 357-364, Seoul, Korea, August 24-26, 2016.

Open Source Software Reliability Assessment Based on Deep Learning

Tamura, Y.*, Matsumoto, M., Yamada, S. (*Yamaguchi University)

Proceedings of the 7th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM 2016), pp. 509-516, Seoul, Korea, August 24-26, 2016.

Analysis of Process Factors Affecting Software Quality Based on Design Review Record and Product Metrics

Sato, T., Yamada, S.

International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 23, No. 4, pp. 1650011 (11 pages), August 2016. (DOI: 10.1142/S02185393165011X)

NHPP-Based Change-Point Modeling for Software Reliability Assessment and Its Application to Software Development Management

Minamino, Y., Inoue, S., Yamada, S.

Annals of Operations Research, Vol. 244, No. 1, pp. 85-101, September 2016. (DOI: 10.1007/S10479-016-2148-X)

Reliability Computing and Management Considering the Network Traffic for a Cloud Computing

Tamura, Y.*, Yamada, S. (*Yamaguchi University)

Annals of Operations Research, Vol. 244, No. 1, pp. 163-176, September 2016. (DOI: 10.1007/S10479-016-2140-5)

Bivariate Change-Point Modeling for Software Reliability Assessment with Certainty of Testing-Environment Factor

Inoue, S., Ikeda, J., Yamada, S.

Annals of Operations Research, Vol. 244, No. 1, pp. 209-220, September 2016. (DOI: 10.1007/S10479-015-1869-6)

Quantitative Interdependency Analysis Based on Deep Learning for Cloud and Database Software

Tamura, Y.*, Ashida, S.*, Yamada, S. (*Yamaguchi University)

Proceedings of the Thirteenth International Conference on Industrial Management (ICIM 2016), pp.325-331, Hiroshima, Japan, September 21-23, 2016.

Software Quality Management Based on Process and Product Metrics Analysis with Software Factory

Sato, T., Yamada, S.

Proceedings of the Thirteenth International Conference on Industrial Management (ICIM 2016),

pp.332-339, Hiroshima, Japan, September 21-23, 2016.

A Software Testing-Resource Allocation Problem with Multi-Attributes for Module Testing

Minamino, Y., Inoue, S., Yamada, S.

Proceedings of the Thirteenth International Conference on Industrial Management (ICIM 2016), pp.340-345, Hiroshima, Japan, September 21-23, 2016.

Statistical Prediction of Software Quality Based on Generalized Linear Models

Inoue, S., Yamada, S.

Proceedings of the Thirteenth International Conference on Industrial Management (ICIM 2016), pp. 403-408, Hiroshima, Japan, September 21-23, 2016.

A Method of Statistical Process Control for Successful Open Source Software Projects and Its Application to Determining the Development Period

Yamada, S., Yamaguchi, M.

International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 1650018 (17 pages), October 2016. (DOI: 10.1142/S0218539316500182)

Software Reliability Model Selection Based on Deep Learning with Application to the Optimal Release Problem

Tamura, Y.*, Yamada, S. (*Yamaguchi University)

Journal of Industrial Engineering and Management Science, Vol. 1, No. 1, pp. 43-58, 2016. (DOI: 10.13052/jiems2446-1822.2016.003)

品質マップによるソフトウェア品質分析手法の提案

佐藤孝司, 山田茂

プロジェクトマネジメント学会誌, Vol. 18, No. 5, pp. 35-40, 2016 年 10 月.

Comparison of Big Data Analysis for Reliable Open Source Software

Tamura, Y.*, Yamada, S. (*Yamaguchi University)

Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and

Engineering Management (IEEM 2016), 5pp, Bali, Indonesia, December 4-7, 2016.

Fault Identification Tool Based on Deep Learning for Fault Big Data

Tamura, Y.*, Ashida, S.*, Yamada, S. (*Yamaguchi University)

Proceedings of the 2016 International Conference on Information Science and Security (ICISS 2016), pp. 69-72, Pattaya, Thailand, December 19-22, 2016.

OSS プロジェクトデータに基づく統計的プロセス管理法とその応用に関する研究

山田茂

日本オペレーションズ・リサーチ学会誌 (オペレーションズ・リサーチ), Vol. 61, No. 10, pp. 666-667, 2016 年 10 月.

ソフトウェア信頼性評価への複雑性尺度およびテスト環境データの適用

井上真二, 山田茂

日本信頼性学会誌 (信頼性), Vol. 38, No. 6, pp. 372-377, 2016 年 11 月.

クラウドとビッグデータにおけるフォールト検出パターンを考慮した 2 次元確率微分方程式モデルに基づく最適メンテナンス問題

田村慶信*, 山田茂 (*山口大学)

統計数理研究所共同研究レポート 369 「最適化：モデリングとアルゴリズム 28」, pp. 1-8, 2016 年 3 月.

多属性効用理論を用いたチェンジポイントモデルに基づくソフトウェア最適リリース問題に関する研究

南野友香, 井上真二, 山田茂

統計数理研究所共同研究レポート 369 「最適化：モデリングとアルゴリズム 28」, pp. 79-84, 2016 年 3 月.

ソフトウェア信頼性評価のための MTBF 推定～複数回のテスト環境変化を考慮した場合～

井上真二, 谷口沙紀, 山田茂

統計数理研究所共同研究レポート 369 「最適化：モデリングとアルゴリズム 28」, pp. 85-90, 2016 年 3 月.

モバイルクラウドに対する最適データ分割を考

慮したソフトウェアの最適メンテナンス問題

田村慶信*, 信川ゆみ, 山田茂 (*山口大学)
 京都大学数理解析研究所講究録 1990「不確実・不
 確定性の下での数理意思決定モデルとその周辺」,
 pp. 183-190, 2016 年 4 月.

**多属性効用理論に基づいた最適リリース時刻お
よびチェンジポイントの推定に関する研究**

南野友香, 井上真二, 山田茂
 京都大学数理解析研究所講究録 1990「不確実・不
 確定性の下での数理意思決定モデルとその周辺」,
 pp. 191-197, 2016 年 4 月.

**ロジスティック回帰に基づくテスト環境要因を考慮
したソフトウェア信頼性評価に関する一考察**

井上真二, 山田茂
 京都大学数理解析研究所講究録 1990「不確実・不
 確定性の下での数理意思決定モデルとその周辺」,
 pp. 198-203, 2016 年 4 月.

予算制約下におけるソフトウェア信頼度の推定

堀田健太, 井上真二, 山田茂
 第 18 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS)
 論文集, 2016 年 11 月, 山口大学, 宇部市, pp.
 125-128.

**OSS プロジェクトデータに基づく統計的プロセス
管理法とその応用に関する研究**

山口真和, 井上真二, 山田茂
 第 18 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS)
 論文集, 2016 年 11 月, 山口大学, 宇部市, pp.
 133-136.

**離散時間ワイブル型ソフトウェア信頼性評価モ
デル**

細川裕貴, 井上真二, 山田茂
 第 18 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS)
 論文集, 2016 年 11 月, 山口大学, 宇部市, pp.
 358-361.

**クラウドデータの運用環境を考慮したソフトウ
ェア信頼性評価法**

竹内智哉, 山田茂, 田村慶信* (*山口大学)
 第 18 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS)
 論文集, 2016 年 11 月, 山口大学, 宇部市, pp.
 362-365.

An On-Demand Bus Model with Single Line and**Two Reservation Types**

Koyanagi, J and Oseki, T
 Proceedings of the 22nd ISSAT International
 Conference on Reliability and Quality in Design, Los
 Angeles, U.S.A., pp. 153-156.

**A Queueing Analysis of Electric Vehicles at a
Charger in each Service Area on an Expressway**

Koyanagi J. and Hajime Danno.
 Proc. of 7th Asia-Pacific Int. Symp. on Advanced
 Reliability and Maintenance Modeling, Seoul, Korea,
 pp. 219-226.

**活動機会に着目した地域のアクセシビリティ指
標に関する研究**

谷本圭志, 土屋哲
 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 第 72 巻, 第 1
 号, pp.88-98, 2016 年 2 月.

**自治体・大学間連携の生産性に関するネットワ
ーク論的分析**

山口健太郎*¹, 谷本圭志 (*¹株式会社三菱総合研究
 所)
 社会技術研究論文集, 第 13 巻, pp.13-21, 2016 年
 5 月.

**賃走履歴データを用いたタクシー事業者の付随
的サービスの供給可能性に関する分析**

土屋哲, 谷本圭志
 第 36 回交通工学研究発表会論文集, pp.521-526,
 2016 年 8 月.

**The Contribution of Social Context to
Participatory Planning Processes within a
Japanese Community**

Chosokabe, M., Umeda, H., Sakakibara, H.
 Group Decision and Negotiation, Vol. 25, Issue. 5, pp
 923-940, Sep. 2016.

**移動販売サービスによる買い物環境の改善効果
に関する研究ー中山間地域における実証分析を
通して**

土屋哲, 谷本圭志, 倉持裕彌*² (*²鳥取環境大学)
 農村計画学会論文集, 第 35 巻, pp.225-230, 2016
 年 11 月.

**郊外共同住宅居住者の住宅ニーズとまちなかへ
の転居の住環境条件に関する研究**

長曾我部まどか, 小川宏樹^{*3} (^{*3}徳島大学)
都市計画論文集, 第 51 巻, 3 号, pp. 972-978, 2016
年 11 月.

地域の持続可能性に基づいた地元建設業の維持に関する分析枠組みの一試論—災害対応を対象として—

山口真司^{*4}, 谷本圭志, 後藤忠博^{*5} (^{*4}鳥取県 県土整備部, ^{*5}株式会社オリエンタルコンサルタンツ)

土木学会論文集 F4 (建設マネジメント) 特集号,
第 72 巻, 4 号, pp. I_89-I_96, 2016 年 12 月.

バス経路探索履歴データを用いた移動希望特性の分析

香川喬之, 桑野将司, 福山敬, 谷本圭志, 菅原一
孔

交通工学論文集, Vol.2, No.2 (特集号 A),
pp.A_115-A_124, 2016 年 2 月.

A study on factors and structures of uneasiness feelings of residents in Sanin region in Japan

Fukuyama, K., Kuwano, M., Gotoh, S., and Tanaka,
S.

In Kobayashi, K., Westlund, H., Matsushima, K., and
Ohno (Eds.) Social Capital and Development Trends
in Rural Areas, Vol.11, MARG, pp.145-155, Mar.
2016.

特例市規模の都市を対象とした応用都市経済モデルの開発

別所和希, 福山敬

交通学研究, Vol.59, pp.45-52, 2016 年 3 月.

The Yonmenkaigi System Method for Disaster Restoration of a Local Community in Korea

Na, J.

Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol.218,
pp.76-84, May 2016.

バス経路探索システムのログデータを用いた交通特性分析

木下礼央, 桑野将司, 香川喬之, 福山敬, 谷本圭
志, 菅原一孔

土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), Vol.53,
pp.873-882, 2016 年 5 月.

地域コミュニティ復興計画づくりにおける四面

会議システム WS による場づくり

羅貞一, 福山敬, 松見吉晴

土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), Vol.53,
pp.1523-1529, 2016 年 5 月.

コミュニケーションと政策の実現可能性—社会ネットワークの観点から

大平悠季, 織田澤利守^{*1}, 松井宏樹^{*1} (^{*1}神戸大学
大学院)

土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), Vol.53,
pp.3208-3216, 2016 年 5 月.

An analysis of urban activities considering concentration of life related facilities and out-home activities

Shimizu, R., Kuwano, M. and Tsukai, M^{*1} (^{*1}
Hiroshima University)

Proceedings of the 14th WCTR (USB), D4-PO2, Jul.
2016.

Application of the Yonmenkaigi System Method for Sustainable Community Recovery of a Flood Damaged Community in Korea

Na, J., Matsumi, Y.

Proceedings of the 12th International Conference on
The International Institute for Infrastructure
Resilience and Reconstruction, Kandy, Sri Lanka,
pp.63-70, Aug. 2016.

人口減少かの地方都市生活圏の居住地変化の解明—鳥取県東部圏域を対象に—

高橋明日美, 大平悠季, 桑野将司, 福山敬, 太田
はるか

土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), Vol.54,
pp.898-906, 2016 年 11 月.

ソーシャルネットワーク再現手法を用いた人のつながりと生活安心感の関連性分析

桑野将司, 福山敬, 井上航^{*1} (^{*1}セントラルコンサル
タント株式会社)

土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5,
pp.I_415-I_422, 2016 年 12 月.

社会ネットワークを通じた相互作用と混雑を考慮した最適交通料金政策の進化的遂行

大平悠季, 織田澤利守^{*1} (^{*1}神戸大学大学院)

土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5,
pp.I_373-I_382, 2016 年 12 月.

太平洋沿岸域の波候の統計学的特性について

木村 晃*, 太田隆夫 (*鳥取大学名誉教授)
土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.72, No.2,
pp.I_127-I_132, 2016 年 10 月.

消波ブロック被覆堤における消波工の被災・補修過程のモデル化

河村裕之*, 太田隆夫, 松見吉晴, 平山隆幸* (*三省水工)
土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.72, No.2,
pp.I_1123-I_1128, 2016 年 10 月.

フレアブロックを組み合わせた人工リーフの波浪低減効果

太田隆夫, 松見吉晴, 竹鼻直人*¹, 村上啓介*² (*¹神戸製鋼所, *²宮崎大学)
土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.72, No.2, No.2,
pp.I_1171-I_1176, 2016 年 10 月.

Evaluation of life cycle cost for wave-dissipating works considering occurrence probability of high waves

Ota, T., Kawamura, H. *, Matsumi, Y., Hirayama, T. * (*三省水工)
Journal of Coastal Research Special Issue No. 75,
pp.675-679, March 2016.

ニューラルネットワークを用いた九州西岸域のあびき予測に関する基礎的研究

中條壯大*¹・山口龍太*²・外村隆臣*³・金 洙列 (*¹大阪市立大学, *²日本港湾コンサルタント, *³熊本大学)
土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No.2,
pp.I_181-I_186, 2016年10月.

第二室戸台風にもとづく大阪湾の高潮と浸水範囲におよぼす気候変動の感度評価

澁谷容子*¹・中條壯大*²・金 洙列・森 信人*³・間瀬 肇*³ (*¹鳥取大学男女共同参画推進室, *²大阪市立大学, *³京都大学)
土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No.2,
pp.I_217-I_222, 2016 年 10 月.

水位上昇速度に着目した八代海湾奥での高潮災害の特徴分析と水防活動の関連について

中條壯大*¹・藤木秀幸*²・金 洙列 (*¹大阪市立大学, *²熊本大学)

土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 72, No.2,
pp.I_25-I_30, 2016 年 6 月.

九州周辺海域におけるあびきの伝播, 増幅に及ぼす微気圧変動および潮汐変動の影響について

山口龍太*¹・高山勇斗*²・金 洙列・加藤将也*²・藤木秀幸*³・中條壯大*⁴ (*¹日本港湾コンサルタント, *²大成建設, *³熊本大学, *⁴大阪市立大学)
土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 72, No.2,
pp.I_312-I_317, 2016 年 6 月.

Assessment of storm surge on the middle coast of Vietnam

Thuy, N. B.*¹, Kim, S., Chien, D. D.*², Dang, V. H.*³, Cuong, H. D.*¹, Wettre, C.*⁴ and Hole, L. R.*⁴ (*¹Vietnam national Hydrometeorological Forecasting Center, *²Vietnam institute of meteorology, *³Institute of Marine Geophysics, Vietnam, *⁴Division of Oceanography and Maritime Meteorology, Norway)
Journal of Coastal Research, Vol.33, No.3,
pp.518-530, 2016.

A real-time forecast model using artificial neural network for after-runner storm surges on the Tottori coast, Japan

Kim, S., Matsumi, Y., Pan*¹, S. and Mase, H. *² (*¹Cardiff University, UK, *²京都大学)
Ocean Engineering, Vol.122, pp.44-53, 2016

Wave forecasts using an artificial neural network for port construction works management

Tsuda, M.*, Kim, S. and Matsumi, Y. (*東亜建設)
PIANC-COPEDEC IX, pp. 1-11, 2016.

Overview of a real time storm surge forecast system on the Tottori coast, Japan

Kim, S., Matsumi, Y. and Mase, H. * (*京都大学)
International Conference on Sustainability in Civil Engineering 2016, pp.251-254, 2016.

The impact of wave on coastal inundation

Khanh, N. P.*¹, Thanh, L. N.*², Ba, T. N.*¹, Kim, S. and Hole, L. R.*³ (*¹Vietnam national Hydrometeorological Forecasting Center, *²Key Laboratory of River and Coastal Engineering, *³Division of Oceanography and Maritime Meteorology, Norway)

The 8th Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics in Naval Architecture, ocean Technology and Constructions, APHydro 2016, pp.20-23, 2016.

流域汚濁負荷量と湖水中有機物量の関係についての概念的食糧網モデルを用いた考察

加藤伸悟, 増田貴則

水環境学会誌, Vol.39, No.1, pp.1-15, 2016 年 1 月.

Site selection for catch crop processing facilities

Matsuoka M.^{*1}, Masuda T., Hase T.^{*2}, Yamada M.^{*3}, Fujiwara T.^{*1} (^{*1}Kochi University, ^{*2}Center for Environmental Science in Saitama, ^{*3}National Institute for Environmental Studies)

Lett. Spat. Resour. Sci., Vol.10, pp.1-15, Mar. 2016.

Effects of hydraulic retention time on cultivation of indigenous microalgae as a renewable energy source using secondary effluent

Takabe Y., Hidaka T.^{*1}, Tsumori J.^{*1}, Minamiyama M.^{*1} (^{*1}Public Works Research Institute)

Bioresour. Technol., Vol.207, pp.399-408, May 2016.

Biodegradation property of 8:2 fluorotelomer alcohol (8:2 FTOH) under aerobic / anoxic / anaerobic conditions

Yu X.^{*1}, Takabe Y., Yamamoto K.^{*2}, Matsumura C.^{*2}, Nishimura F.^{*1} (^{*1}Kyoto University, ^{*2}Hyogo Prefectural Institute of Environmental Sciences)

J. Water Environ. Technol., Vol.14, No.3, pp.177-190, June 2016.

水質保全計画におけるノンポイント負荷の割合と原単位は妥当か

増田貴則

環境技術, Vol.45, No.7, pp.27-33, 2016 年 7 月.

Effects of CO₂ addition on energy production by indigenous microalgae cultivation with treated effluent in wastewater treatment

Takabe Y., Hidaka T.^{*1}, Tsumori J.^{*1}, Minamiyama M.^{*1} (^{*1}Public Works Research Institute)

J. Water Environ. Technol., Vol.14, No.5, pp.386-397, Oct. 2016.

Control of disinfection byproduct (DBP) precursors by soil aquifer treatment (SAT): what

length of hydraulic retention time (HRT) is necessary?

Phattarapattamawong S.^{*1}, Takabe Y., Echigo S.^{*2}, Itoh S.^{*2} (^{*1}King Mongkut's University of Technology Thonburi, ^{*2}Kyoto University)

Water Sci. Technol. Water Supply, Vol.16, pp.1648-1658, Dec. 2016.

講座による編集

地域安全工学センター 91

2016 年鳥取県中部の地震の背景と強震動

香川 敬生・野口 竜也

鳥取大学 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 土木工学講座

Seismological Background and Strong Ground Motions of the 2016 Central Tottori Earthquake

Takao KAGAWA, Tatsuya NOGUCHI

Civil Engineering Course, Department of Management of Social Systems and Civil Engineering
Graduate School of Engineering, Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan

E-mail: kagawa@cv.tottori-u.ac.jp

Abstract: Seismological background and characteristics of the generated strong ground motions of the 2016 Central Tottori Earthquake are discussed in this paper. Seismicity in the area has been activated including several earthquakes with magnitude around 4 since October 2015, before the earthquake with magnitude 6.6 occurred on October 21, 2016. Strong ground motions with maximum JMA seismic intensity 6 lower hit the area. It is found that the observed ground motions were strongly affected by local surface geology at each site.

Key Words: The 2016 central Tottori earthquake, Seismological Background, Strong ground motion, Surface geology

1. はじめに

2016 年 10 月 21 日 14 時 7 分、鳥取県中部地域において、気象庁 (JMA) マグニチュード 6.6 の地震 (以後、本震と称する) が発生した。この地震に先立って、本震の北東 10km 程の地域では、2015 年 10 月、12 月にもそれぞれマグニチュード 4.3, 4.2 を最大とし、最大震度 4 を観測する群発地震が発生していた。2016 年 9 月末には、最大マグニチュード 3.9 の群発地震活動が本震の震源域近傍域へと移動し、本震当日の 12 時 12 分には本震震源域でマグニチュード 4.2 の地震が発生し、本震を迎えることとなった。鳥取県中部地域では、1983 年 10 月にもマグニチュード 6.2 の地震が発生し、被害を生じている。本論前半では、本震に至るこのような地震活動の背景についてまず整理する。

この本震によって、倉吉市、湯梨浜町龍島 (りゅうとう、東郷支所)、北栄町土下 (はした、北条支所) の 3 観測点での震度 6 弱を始め、鳥取県中部の多くの観測点で、何らかの被害が懸念される震度 5 強以上の揺れを観測した。震度 6 弱を観測した上記 3 地点では、その基となった計測震度も 5.8 と全点で共通であったが、最大加速度値は倉吉で約 $1,380\text{cm/s}^2$ 、上下 (北条支所) で約 275cm/s^2 と大きく異なり、その原因が地震動の周

期特性、ひいては局所的な地盤の震動特性に依存していることが分かった。本論後半では、既往調査結果を基に、主に地盤震動特性と本震時の揺れの関連について考察をおこなう。

2. 本震に至る地震学的背景

2. 1 2015 年 10 月からの地震活動

本震の前年にあたる 2015 年 10 月 17 日に、前述した 1983 年の地震 (M6.2) の震源域で M3.8 の地震が発生し、湯梨浜町龍島において震度 4 を観測した (図 1)。同地点で震度 4 を観測する地震が 2015 年 12 月末までに計 4 回発生し、最大マグニチュードは 4.3 (10 月 18 日発生) であった。地震活動はその後も間欠的に継続していたが、2016 年 4 月以降はやや収まりを見せていた (図 2)。同年 8 月末より、M2.9 の地震を筆頭に 2015 年の活動域やや西で新たな活動が始まり、9 月末にはこれまで活動の見られなかった本震の震源域付近で M3.9 を最大とする活動が見られるようになった。山陰地域では地震活動がこのような集中する傾向があり、その中で M5.5 程度の地震を発生させる場合が過去に散見された。一方で、新たな集中域付近には鳥取県が地震被害想定 [2] でも検討していた M7

クラスの震源断層（大立断層・田代峠-布江断層）が存在し、やや規模の大きい地震の前駆的な活動である可能性も懸念され、鳥取県庁危機管理課との連絡を密にしていた。しかし、本震当日に発生したM4.2の地震（前震）の発生を受けても、直後に本震が発生することを想定することは出来なかった。直接モニター出来ない地下での破壊現象を予測するという、直前での地震発生予測の難しさを実感することになった。

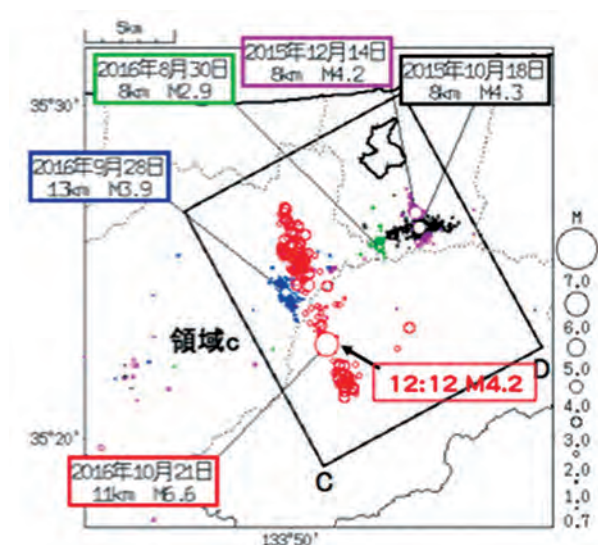


図1 2015年10月以降の鳥取県中部域の震央分布（地震調査研究推進本部[1]に加筆）

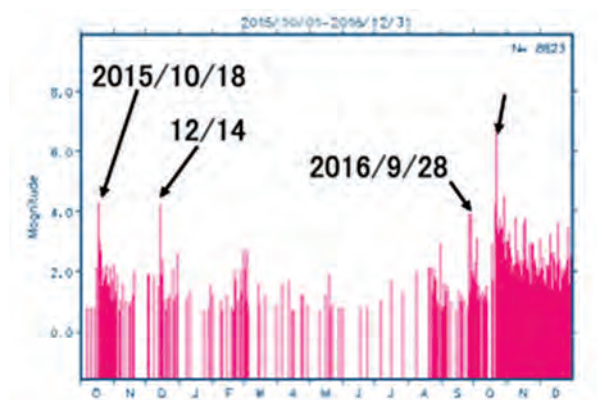


図2 2015年10月から本震までの地震発生状況（横軸は時間、縦軸はマグニチュード）

2.2 中国地域の長期評価

直前予測は困難であるが、もう少し長い目で見ただ地震発生の予測は行われていた。2016年7月1日

に、政府地震調査研究推進本部は中国地域の地震の長期評価を公表した[3]。鳥取県と島根県東部を含む中国地域北部では、「今後30年にマグニチュード6.8以上の内陸地殻内地震が発生する確率は40%」と全国的に見ても非常に高い数値が示された（図3）。この評価はふた通りの方法で実施され、それぞれの地域で大きい方の評価結果が採用されている。ひとつは、活断層の活動履歴を調査して評価するもので、この方法では活断層が多く分布する西部（山口県、広島県西部、島根県西部）の確率が最も高くなり、北部の確率は3～7%になる。もうひとつの方法は、1923年から2015年まで93年間の地震活動に基づくもので、同期間にM6.8以上が2回（1943年鳥取地震、2000年鳥取県西部地震）、M5.0以上が約150回も発生している同地域の確率が40%と高くなったものである。通常は地震活動による評価よりも活断層による評価の方が高確率になるが、明瞭な活断層がほとんど存在しないにも関わらず地震活動が活発な特殊な地域であることにより、活断層が多い地域よりも地震発生確率が高く評価されている。

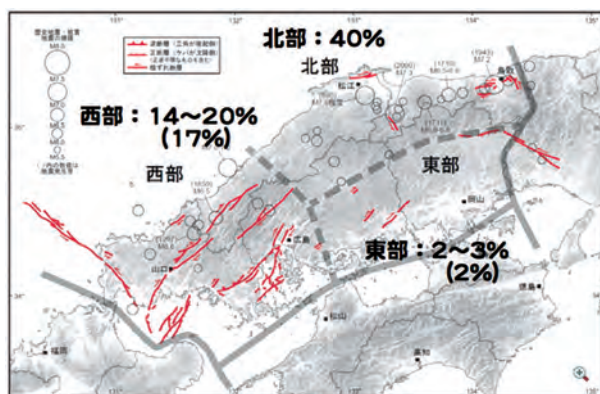


図3 2016年7月に公表された中国地域の評価（地震調査研究推進本部、2016）

2.3 山陰ひずみ集中帯

このように鳥取県を含む中国地域北部で地震活動が活発な理由として、近年になってGNSS(GPS)観測による地殻ひずみの集中（山陰ひずみ集中帯）が想定されている[4]。山陰沿岸域の観測点が、中国山地以南の観測点に対して、1年あたり東に最大4mm程度変動している、というものである。このような動きが500年蓄積すると2mの変動となり、マグニチュード7クラスの地震を発生させ得るだけのひずみとなる。このようなひずみの蓄積がこの地域の活発な地震活動の要因となり、M7

クラスの地震をも発生させていると考えられる。その割に明瞭な活断層が少ないのは、大山をはじめとする第四紀の火山活動により活動の痕跡が覆われたこと、また地域の活断層がまだ新しく動き始めたものであるため地表に明瞭な痕跡を残すまでに至っていない、と考えられている。

この地域にひずみを集中させている要因を探る研究が鳥取大学を中心に継続して行われている[5]。それには、太陽活動など自然界の電磁変動に起因する導電体としての地球の応答を観測することで、地殻内部の比抵抗分布を推定する方法(MT法)が用いられている。その結果、山陰地域でひずみが集中し、地震活動が帯状に分布する場所では、地殻深部に比抵抗の小さい、水を含む軟らかい部分が存在することが発見されている。地殻深部の弱い領域が、その上部で地震を発生させる要因となっていると考えられている[6]。

山陰地域(中国地域北部)にはこのような地震学的な背景があり、2016年10月21日の鳥取県中部の地震の発生に至ることになった。

3. 本震の震源断層と地震動の放射

この地震による地震動は、気象庁、防災科学技術研究所、自治体震度計、大学によって記録された。また、国土地理院による地殻変動の観測も行われている。

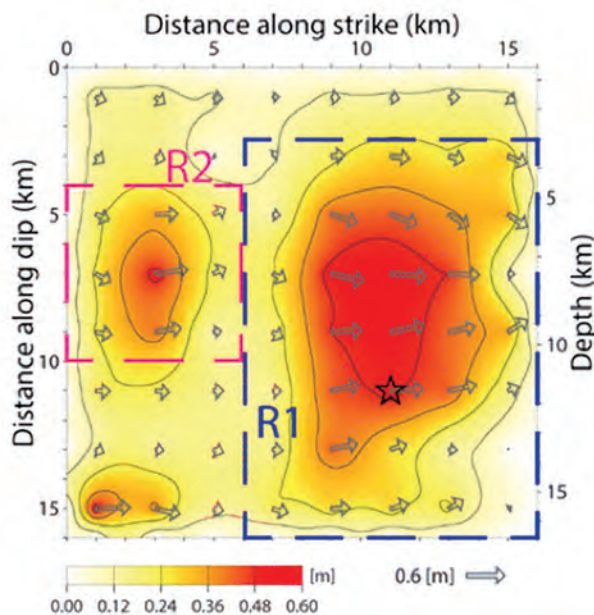


図4 強震観測記録に基づく断層すべり分布
(Kubo et al., 2016)

発生直後の余震分布、地殻変動を説明する震源断層モデル[7]を参考に、防災科学技術研究所によって強震観測網の記録を再現する震源断層破壊モデルが推定されている[8]。図4にそのすべり分布を示す。長さ・幅ともに16km、走向N162E(図の左側が北)、傾斜88度の断層面に、最大0.6mのほぼ横ずれのすべりが想定されている。星印で示される破壊開始点(震源)から上方北寄りに破壊が進行し、ひとつ目の大きなすべり(強震動生成域:R1)を形成した後、ふたつ目のすべり(R2)が破壊したことが分かる。このことにより、断層中央やや北付近に位置する倉吉市から北部の湯梨浜町、北栄町に向けて強震動が放射されたと考えられる。

4. 観測された地震動と被害

2016年鳥取県中部の地震では、前述のように倉吉市役所(防災科学技術研究所K-NET(強震ネット)のTTR005を活用)において約 $1,380\text{cm/s}^2$ の最大加速度(EW成分)が記録された。計測震度は5.8(震度6弱)と評価されている。湯梨浜町龍島、北栄町土下の2観測点でも、同様に震度6弱(計測震度も5.8と同じ値)が観測された。その他、鳥取県内では、鳥取市鹿野町鹿野、同鹿野町鹿野小学校(K-NET TTR004)、鳥取市青谷町青谷、三朝町大瀬、湯梨浜町久留、北栄町由良宿で震度5強と、屋内外で被害を生じる強震動が観測された。これら観測された地震動と被害、また地盤の関係について、既往研究[9, 10]を参照しつつ検討する。

4. 1 強震観測記録の特徴

図5~7に、震度6弱を観測した3地点における水平動最大成分の波形および応答スペクトルを示す。図の左は、上から観測加速度およびそれを積分した速度、変位波形を示している。倉吉市の変位波形に永久変位が見られるが、測地衛星(ALOS2)による地殻変動[7]と方向、量ともに対応している。図の右には減衰5%の擬似速度応答スペクトルを、応答加速度・応答変位軸とともに表示している。応答スペクトル中の破線は、1995年兵庫県南部地震のJR鷹取駅や2016年熊本地震の益城町役場など、震度7相当で周辺に大被害を生じた記録のレベルを参考として示している。一般的な木造家屋の固有周期は0.3から0.5秒程度であり、この周期帯の地震動に建物が共振した

場合にまず初期的な損傷を受ける．それによって構造が弱化することで固有周期が長くなり，周期 0.5 秒から 3 秒帯域の地震動でさらに共振すると倒壊に至ると考えられている．

地震発生直後には，熊本地震の記録よりも大きい，倉吉市役所での大加速度が注目された．図 5 からは，確かに 0.4 秒程度以下の短周期のレベルは大被害を生じた神戸市内や益城町の地震動に匹敵している．このため，棟瓦の落下や壁の亀裂・剥落，墓石の倒壊など，短周期の地震動による被害を広範囲に生じたと考えられる．しかし，周期 0.5 秒以上の地震動は小さく，初期の損傷によって建物固有周期が長周期に移動した場合，それに共振する地震動のレベルが小さいためそれ以上に破壊が進行しなかったと考えられる．実際，倉吉市街域で倒壊まで至った構造物は見られなかった．

湯梨浜町龍島の NS 成分（図 6）は，周期 0.5 から 1.5 秒程度が大きく，破線で示した既往被害地震のスペクトルと共通の形状を示している．しかし，レベルがやや小さく，周辺に顕著な建物被害は見られない．この記録に特徴的なのは，加速度波形に強い非線形応答を示すパルス状の片振れが見られていることである．実際，震度計設置点周辺では地盤の沈下が観察されている．

次に北栄町土下（図 7）であるが，震度 6 弱を観測した 3 地点の中では最大加速度が最も小さく，最大速度が大きい．応答スペクトルでは，周期約 1.5 秒で破線の被害地震レベルに届いている．しかし，一般的な木造家屋の固有周期にあたる 0.3 から 0.5 秒のレベルが小さい．このため，健全な木造家屋が共振して被害を生じることはなく，観測点周辺に大きな被害は生じていない．一方で，北栄町の一部地域では老朽化した木造建物の倒壊や大破が集中して見られた．これらは概して開口部が大きく柱や壁の少ない作業小屋などで，非住家で十分にメンテナンスが施されていない建物であったと思われる．老朽化によって耐震性が低下し，既に固有周期が長周期化していたことが示唆

される．ここでも，震度計設置点周辺地盤の沈下が観察されており，周期 1.5 秒の単調な波形を形成した要因に非線形応答の影響が示唆される．

このように，同じ計測震度 5.8（震度 6 弱）であっても地震動の周期特性は大きく異なり，周期毎の地震動強さに見合った被害が周辺に見られているように思われる．計測震度など単一の地震動特性値のみで判断するのではなく，観測波形に基づく地震動の周期特性を把握しておくことが，初動段階で重要であることが示唆される．

この他，特徴的な観測記録を図 8～10 に示す．図 8 は，北栄町由良宿（ゆらしゅく：大栄庁舎）の記録である．計測震度は 5.4（震度 5 強）であり，観測点直近では大きな被害は見られないが，図 6 の北栄町土下よりも建物倒壊が集中した地域（北栄町西園地区）に近く，木造家屋の固有周期に対応する周期 0.3 から 0.5 秒のレベルは土下サイトよりも大きい．

図 9 に湯梨浜町久留（ひさどめ：羽合庁舎）の記録を示すが，震度 6 弱を観測した湯梨浜町龍島や北栄町土下のほぼ中間に位置するものの，地震動のレベルは小さく，計測震度は 5.2（震度 5 強）である．周辺に大きな被害は見られない．周期特性としては，0.2 から 2 秒まで広く卓越しているように見える．

これらに加えて，2015 年 10 月からの群発活動に対応するため著者らが独自に観測点を設置していた，湯梨浜町高辻（たかつじ）でも本震観測記録を得ることができた[11]．図 10 にその記録を示すが，木造家屋に影響する周期 0.5 秒程度がやや大きいことが分かる．周辺では棟瓦の落下などが散見されており，計測震度は 5.4（震度 5 強）である．なお，速度波形や変位波形には，明瞭なパルス状の波形が見られ，図 4 に示した断層面でのふたつの大すべり（強震動生成域）に対応したものと考えられる．

これら観測点の諸元と，得られた記録の特性値について，表 1 にまとめて示す．

表 1 観測点と記録の概要

観測点名	別称	設置・管理者	緯度	経度	震度階(計測震度)	最大加速度(Gal)
倉吉市役所	K-NET TTR005	防災科学技術研究所	N35.4290	E133.8253	6 弱 (5.8)	1381
湯梨浜町龍島	東郷支所	鳥取県	N35.4674	E133.8962	6 弱 (5.8)	565
湯梨浜町久留	羽合庁舎	鳥取県	N35.4901	E133.8647	5 強 (5.2)	254
北栄町土下	北条支所	鳥取県	N35.4793	E133.8217	6 弱 (5.8)	275
北栄町由良宿	大栄庁舎	鳥取県	N35.4902	E133.7582	5 強 (5.4)	646
高辻		鳥取大学工学部	N35.4582	E133.9169	5 強 (5.4)	391

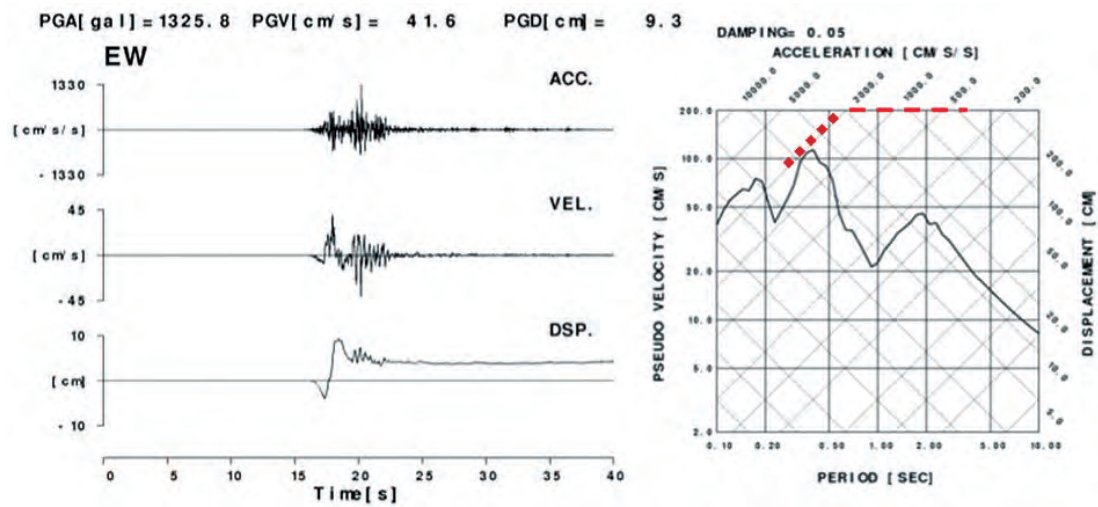


図5 倉吉市役所における観測記録（東西成分）

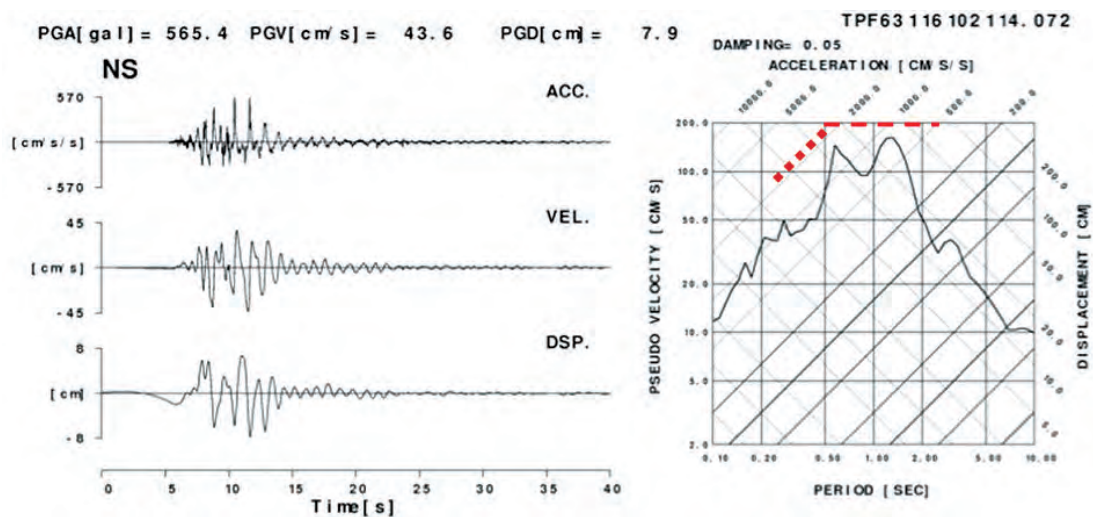


図6 湯梨浜町龍島(東郷支所)における観測記録（南北成分）

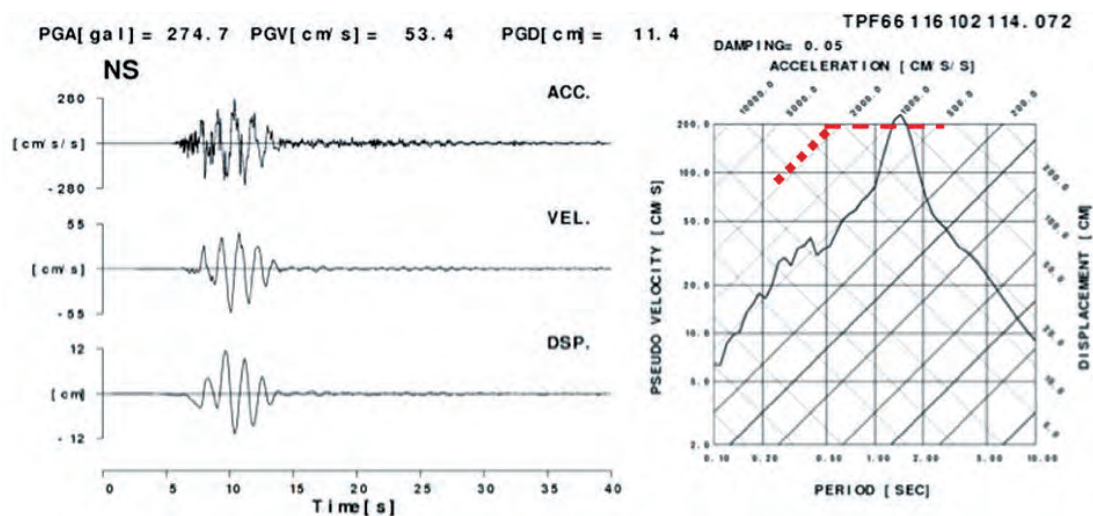


図7 北栄町土下(北条支所)における観測記録（南北成分）

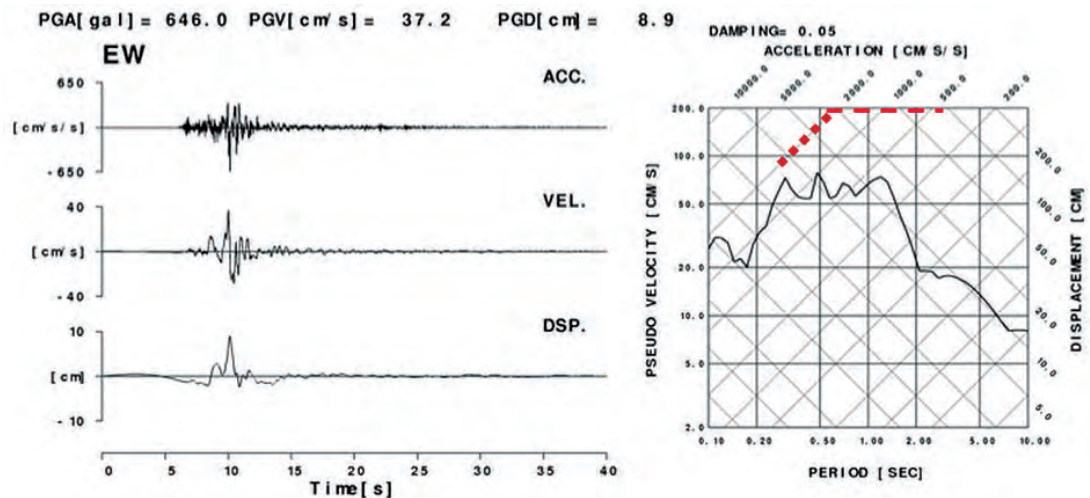


図8 北栄町由良宿(大栄庁舎)における観測記録(東西成分)

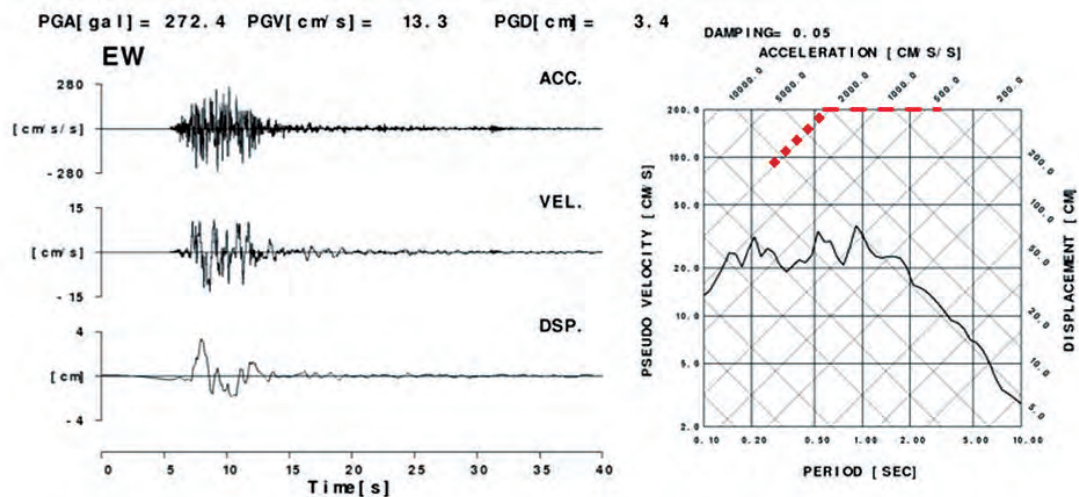


図9 湯梨浜町久留(羽合庁舎)における観測記録(東西成分)

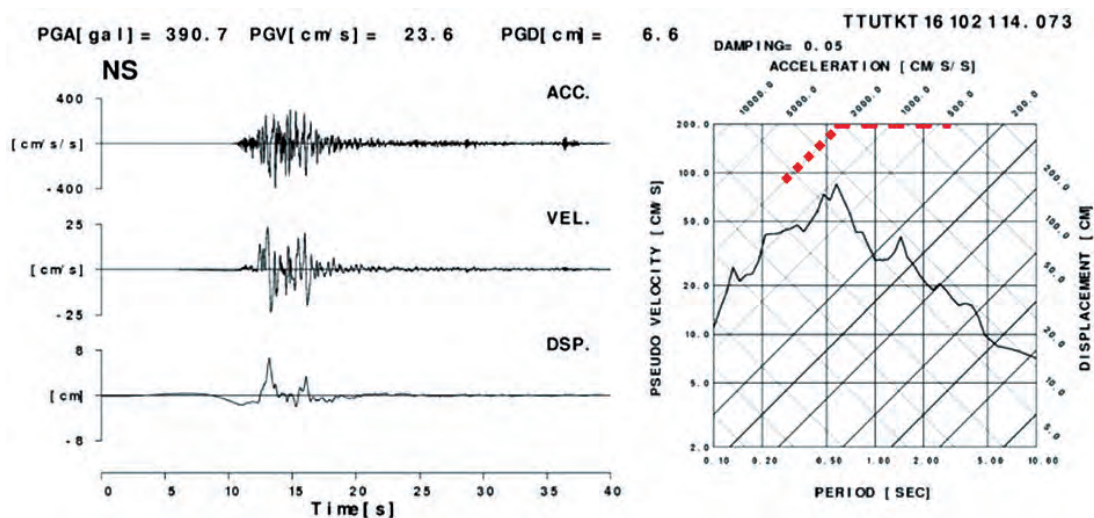


図10 湯梨浜町高辻(鳥取大学設置)における観測記録(南北成分)

4. 2 地盤卓越周期との関係

前述した観測地震動の周期特性は地点によって大きく異なり、観測点直下の地盤震動特性に大きく影響されていると考えることができる。図 11 に、常時微動 3 成分観測から推定した該地域の地盤卓越周期分布を示す[12]。倉吉周辺では 0.3 ～0.4 秒付近が卓越し、図 5 に示した観測記録にもその特徴が見られる。一方、日本海沿岸には地盤の周期 1 秒以上が卓越する地域が点在していることが分かる。図中の黒点は常時微動を観測した地点を示しており、日本海沿岸の北栄町では他に比べて観測点が粗で、空間分解能にはやや難がある。それでも北栄町由良宿で短周期が、湯梨浜町久留で長周期成分が大きいなど、本震記録に見られる周期特性は地盤卓越周期を反映しているように見える。

しかし、湯梨浜町龍島および北栄町土下では、図 11 に示した、常時微動による地盤の卓越周期よりも長い周期が観測記録で大きくなっているようである。これら 2 地点では、前述のように観測点近傍で地盤沈下が見られており、地盤の非線形応

答によって軟弱層の剛性が低下し、微動など弱震時よりも長い周期特性を示したことが考えられる。また、減衰が大きくなることで地震動のレベルが低下したことも推定される。

4. 3 非線形地盤応答

ここでは、前節で問題となった地盤の非線形応答に着目して検討を進める。弱震時と強震時で地盤が線形応答をしていれば、両者の増幅特性はほぼ共通になり、強震時の非線形性が大きければ乖離することになる。そこで、弱震時（前駆的中小地震および余震）の平均的な増幅特性と強震（本震）時のその対数軸上の差（増幅特性の比に相当）を周波数で積分した DNL という指標が提案されている[13]。これを各観測点に適用したところ、湯梨浜町龍島および北栄町土下の 2 観測点が有意に大きく、非線形応答の影響が強いことが分かった。図 12 にその事例を示す。

図 11 からは、これら 2 観測点よりも湯梨浜町久留の方が地盤の卓越周期が長く、厚い軟弱層による地震動の増幅が懸念されるものの観測記録は周

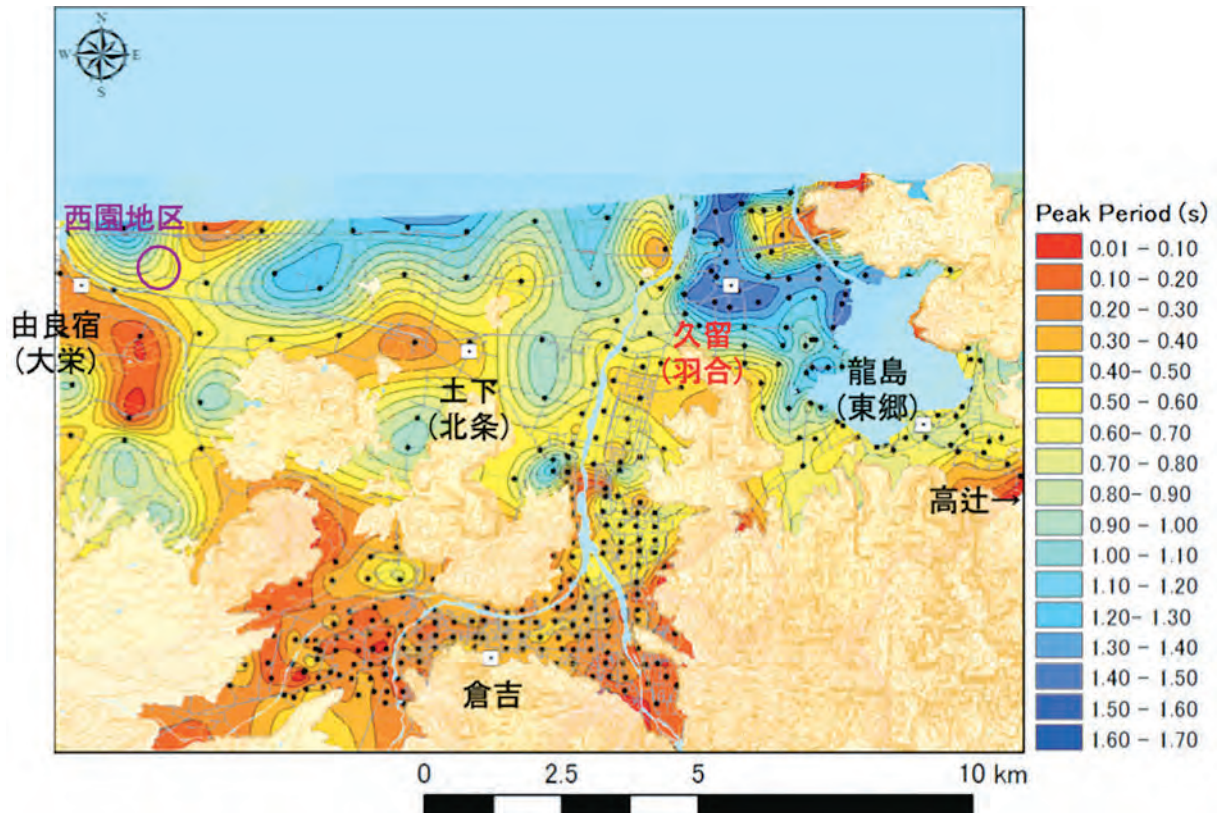


図11 常時微動を用いた地盤卓越周期の分布
(野口・香川(2014)に観測点を追加)

辺に比べて著しく小さく、非線形地盤応答が懸念される。しかし、この地点では弱震時と強震時の増幅特性に大きな変化が無く、非線形応答の影響は小さい。また、周辺では地盤沈下なども見られていない。入力地震動の周期特性とも関連していると思われるが、この地点における本震時の地盤の振る舞いは、今後注目したい課題のひとつである。

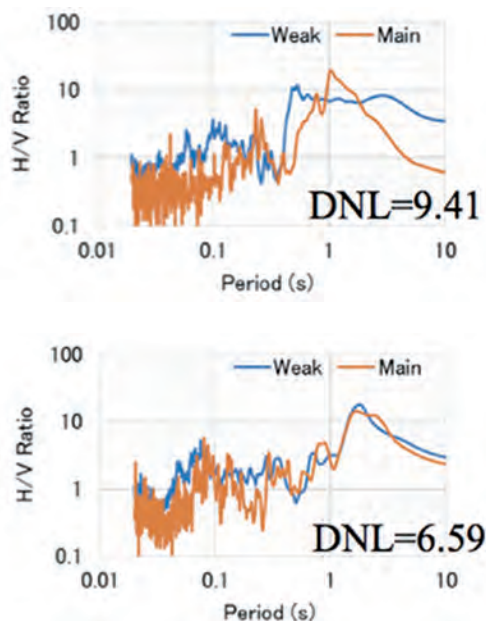


図12 湯梨浜町龍島(東郷：上)と久留(羽合：下)における弱震時と強震時の増幅特性とDNL

次に、非線形応答を示した2観測点での地盤ひずみを簡易的に推定してみる。地表から深さ30mまでの地盤の平均S波速度と、強震時の地動最大速度を用いて地盤のひずみを簡易推定する方法が提案されている[14]。これを適用すると、湯梨浜町龍島で 1.2×10^{-3} 、北栄町土下で 9.9×10^{-4} と、ほぼ 1×10^{-3} 程度のひずみが想定される。

これを別の視点から考察してみる。図13は、湯梨浜町龍島における前震(10月21日12時12分, M4.2)、本震(14時7分, M6.6)、直後の余震(14時30分, M4.4)の3成分加速度波形と、H/Vスペクトル比(水平動をNS, 平均, EWとして上下動で除した3本の線)を示している。地震動のH/Vスペクトル比は対象地点を水平成層構造でモデル化した平面波入射の地盤応答に対応するとされ[15]、卓越周期は対象地点の地盤応答を反映したものと考えられる。(図12も同様に地震動のH/Vスペクトル比を地盤応答として示していた。)図13の縦の破線は、弱震(前震、余震)に見られる卓越周期を結んだものである。これを指

標とすると、中間に図化した本震の卓越周期が長周期側に移動していることが分かる。長い方のピーク周期(より深い地盤に対応)が、弱震時の約0.5秒から強震時には約0.8秒に1.6倍ほど伸びている。これをS波速度の変化に換算すると、逆数の約1/1.6だけ遅くなっていることに対応する。S波速度の2乗に比例する剛性の低下に換算すると約0.4になる。

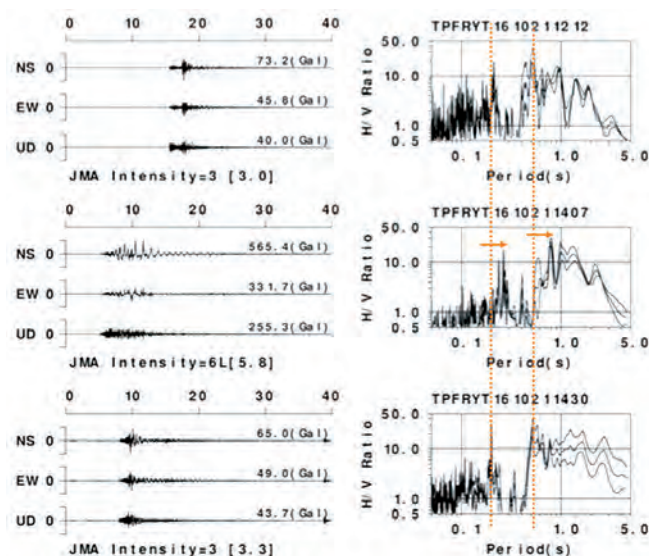


図13 湯梨浜町龍島における前震、本震、余震時の加速度波形と地盤応答の変化

同様の検討を北栄町土下で実施すると、剛性低下は0.36程度となった。これらを一般的な地盤の非線形応答特性と比較すると 1×10^{-3} 程度のひずみに相当し、先の簡易検討とも矛盾しない。液状化には至らないものの、十分に大きな非線形応答を示すレベルと考えられる。図6に見られた片振れパルス状の波形や周辺の沈下は、本震時のこのような震動特性を反映したものと思われる。北栄町土下のボーリングではN値の小さいシルト層が厚く堆積しており、この層が大きな非線形応答に寄与したものと思われる。図13からは、本震で見られた非線形応答が、約23分後の余震では十分に回復していると推定され、興味深い。

強震時の非線形応答による地盤卓越周期や増幅特性の変化が懸念されるため、図11に示した常時微動による卓越周期分布のみではなく、強震動を受けた際の地盤の非線形応答を踏まえて地域の想定地震動を検討せねばならないことが示唆される。今後の地震防災を考えるにあたって、今回の地震から学ぶべき課題のひとつである。

4. 4 余震観測の事例

著者らは、本震直後から2016年12月上旬まで、のべ12点において臨時余震観測を実施した。その一例として、倉吉市街での観測事例について述べる。図5に本震観測波形を示した倉吉市役所は、主として流紋岩より構成される打吹山の麓の高台にある。一方、多くの建物被害を生じた市街域は平地に位置している。本震直後に被害が報告されていた白壁土蔵群に近い大岳院、その南で倉吉市役所との中間にあたる倉吉市北庁舎、北には小鴨川堤防脇の倉吉東中学校に、本震当日に臨時余震観測点を設置させて頂いた。

図14は、倉吉市役所を含むこれら4観測点における同時観測記録の一例(10月24日20時5分、M3.8)である。図からは、倉吉市役所のみが他の3地点とは異なり、最大加速度が2倍程度の地震動を記録していることが分かる。周期特性からは、倉吉市役所では周期0.1秒付近の短周期が他の3観測点よりも大きい。一方、市街域の3地点では共通して周期約0.3~0.4秒が大きく、図11に示した微動卓越周期分布とも整合している。このことから、倉吉市街域で棟瓦の落下や土壁の剥落な

どの被害を生じた地震動は、倉吉市役所で観測された本震記録とは異なる特性を持っていたことが示唆される。

これら余震観測記録を用いて市街域における本震時の地震動を推定する研究も実施しているが、その結果については別途報告したい。

5. おわりに

本稿では、2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震について、その発生に至る背景と、観測された地震動の特徴と地盤応答との関連について考察した。その結果を以下にまとめる。

- ・中国地域北部は活断層が少ないものの地震活動は活発であり、被害地震の発生確率が高く評価されている。
- ・その要因として、地殻深部の流体(水)によるひずみの集中が想定されている。
- ・鳥取県中部では2015年10月より間欠的に群発地震活動が継続し、2016年9月末には今回の地震の震源域付近に活動が移動していた。
- ・2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震では、破壊開始点から倉吉市街および日本海

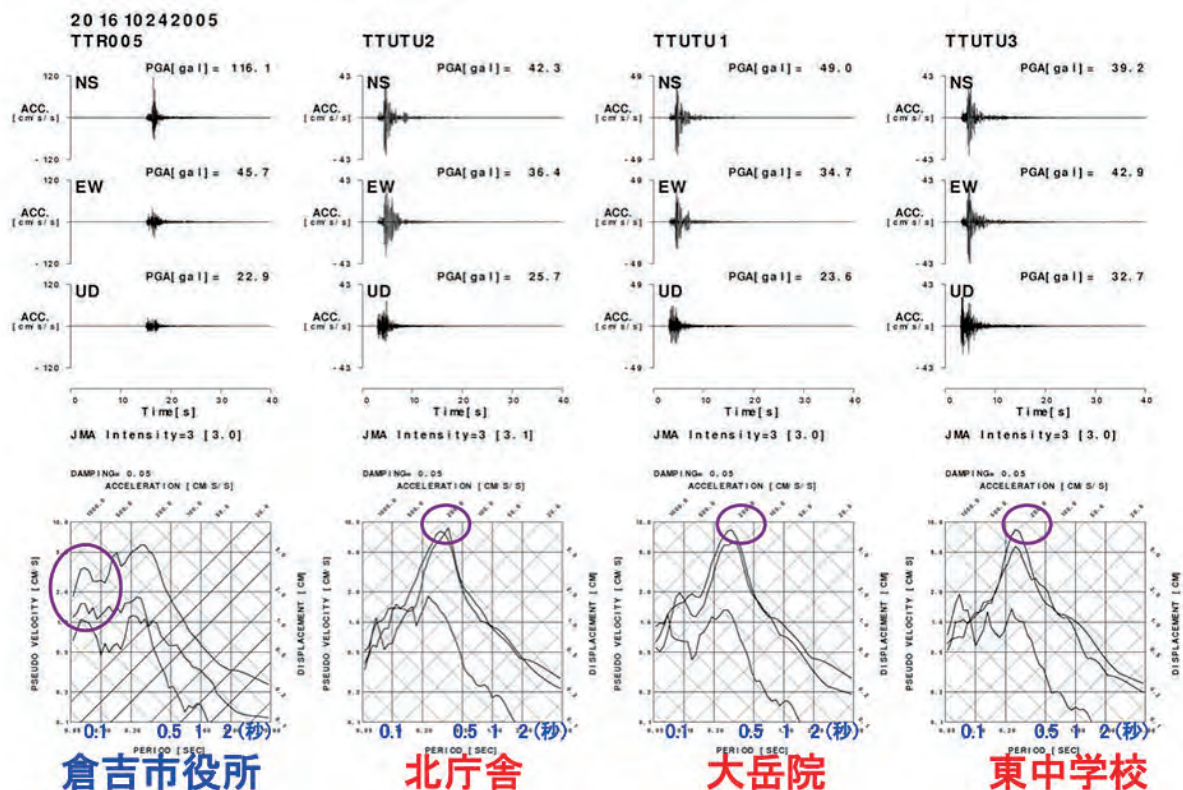


図14 余震観測に見られる倉吉市役所と市街域の地震動特性の違い

沿岸に向けて強い地震動が放射された。

- ・倉吉地域では短周期が卓越した地震動が観測された。これによる家屋の初期的な損傷は懸念されるが、より長周期の地震動成分が小さかったため、それ以上に破壊が進行せず倒壊など大被害には至らなかったと考えられる。
 - ・日本海沿岸域には地盤の卓越周期が長い地区があり、被害が集中した一因と考えられる。
 - ・これら本震時の地震動の卓越周期は、常時微動を用いて評価した地盤の卓越周期分布と概ね対応している。
 - ・一部の観測点では、地盤の非線形応答により常時微動など弱震時よりも地盤の卓越周期が長くなったことが確認された。
 - ・非線形応答の有無は、地盤の卓越周期から想定される地盤の軟弱性とは必ずしも対応しておらず、地震被害想定においての課題となろう。
- 以上の観点を反映して今後も調査研究を継続し、地域の地震防災に資する必要がある。

謝辞

解析にあたって、鳥取県および防災科学技術研究所の観測記録を利用しました。余震観測には、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画による観測装置の貸与を受け、観測点の設置には現地の皆様にご協力頂きました。地震活動図の作成には、東京大学地震研究所の地震活動解析システム[16]を利用しました。記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 政府地震調査研究推進本部，2016 年 10 月 21 日鳥取県中部の地震の評価，2016.
- [2] 鳥取県防災局防災危機管理課，鳥取県地震防災調査研究報告書 2005.
- [3] 政府地震調査研究推進本部，中国地域の活断層の地域評価，2016.
- [4] Nishimura, T. and Takeda, Y.: San-in shear zone in southwest Japan, revealed by GNSS observations, *Earth, Planets and Space*, 69:85, doi: 10.1186/s40623-017-0638-8, 2017.
- [5] 塩崎一郎・大志万直人：山陰地方東部の深部比抵抗構造探査の意義，月刊地球，Vol. 22(1)，2000.
- [6] 飯尾能久：内陸地震はなぜ起こるのか？，近未来者科学ライブラリー，Vol. 12，174p.，2009.
- [7] 国土地理院：平成 28 年（2016 年）10 月 21 日鳥取県中部の地震の震源断層モデル，2016.
- [8] Kubo, H., Suzuki, W., Aoi, S., and Sekiguchi, H.: Source rupture process of the 2016 central Tottori, Japan, earthquake (M_{JMA} 6.6) inferred from strong motion waveforms. *Earth Planets and Space*. 69:127, doi: 10.1186/s40623-017-0714-3, 2017.
- [9] Kagawa, T., Noguchi, T., Yoshida, S., and Yamamoto, S.: Effect of the surface geology on strong ground motions due to the 2016 Central Tottori Earthquake, Japan. *Earth Planets and Space*. 69:106, doi: 10.1186/s40623-017-0689-0, 2017.
- [10] 香川敬生：2016 年 10 月 21 日鳥取県中部の地震 (M6.6) について，地震ジャーナル，63，地震予知総合研究振興会. pp.14-22, 2017.
- [11] 香川敬生・野口竜也・吉田昌平・山本真二：2016 年鳥取県中部の地震における鳥取大学の強震観測記録 -鳥取県湯梨浜町高辻の記録-，京都大学防災研究所年報，No.60 B，pp.350-353, 2017.
- [12] 野口竜也・香川敬生：微動および重力探査による倉吉平野臨海部の地盤構造推定，土木学会論文集 A1，70(4)，pp.888-896, 2014.
- [13] 野口科子・笹谷努：2003 年宮城県沖スラブ内地震における表層地盤の非線形応答とその強震動への影響，地震 2，No. 63，pp.165-187, 2011.
- [14] 山口亮・翠川三郎：観測記録に基づく地盤増幅率の非線形特性のモデル化，日本地震工学会論文集，No.14(1)，pp.56-70, 2014.
- [15] Kawase, H., Sánchez-Sesma, F. J., Matsushima, S.: The optimal use of horizontal- to-vertical (H/V) spectral ratios of earthquake motions for velocity structure inversions based of diffuse-field theory for plane waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, No.101(5)，pp.2001-2014, 2011.
- [16] 鶴岡弘：WWW を用いた地震情報検索・解析システムの開発，情報処理学会研究報告；データベースシステム 115-9，情報学基礎 49-9，pp.65-70, 1998.

(受理 平成 29 年 10 月 24 日)

鳥取大学大学院工学研究科研究報告編集委員会

編集委員長	桑野 将司（社会基盤工学専攻）
編集委員	中井 唱（機械宇宙工学専攻）
	大木 誠（情報エレクトロニクス専攻）
	鈴木 宏和（化学・生物応用工学専攻）

研究報告 第48巻

平成30年2月9日発行

発行者 鳥取大学大学院工学研究科

〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101番地

※著作権法により、当本の一部または全部を無断で複写、複製、
転載することを禁じます。