

線形および非線形制御系設計のためのモデルマッチング法

山本 祥弘
鳥取大学工学部知能情報工学科

Model Matching Method for Linear and Nonlinear Control System Design

Yoshihiro YAMAMOTO
Department of Information and Knowledge Engineering, Faculty of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: yamamoto@ike.tottori-u.ac.jp

Abstract: A new method of model matching control for linear and nonlinear discrete time systems is presented in this paper. The method is very simple and useful not only for linear but also for nonlinear systems. If there is no uncertainty like a model error, this method gives a closed loop system whose characteristic is exactly the same with the one of the desired model. To cope with the real applications, integral action is easily introduced with some other free parameters. This result is also extended for systems with time lag and multivariable systems.

Key Words: Control system design, Nonlinear system, Discrete time system, Model matching method

1. はじめに

定年退職者として「総説」の執筆を依頼された。しかし、筆者は「総説」を説くほどの大きな仕事をしてきたわけではなく、いくつかの分野でささやかな貢献をしてきたに過ぎない。そこで、この数年間での最も新しい仕事の一つを延べることで、その任にかえたい。制御系設計法の多くはシステムの数学的モデルに基づく場合が多く、従って、モデリングあるいはシステム同定の精度が制御系設計の結果に大きく影響する。しかし、システムをより正確に、あるいは応答のより広い範囲で表現するには、非線形同定法が必要となってくる。しかも、その同定結果を制御系設計に容易に用いることが出来ることが重要である。そこで、非線形問題に対する強力な武器であると言われているニューラルネットワーク（NN）の勉強を始めてみたが、その構造は階層型、学習アルゴリズムは勾配法では、たいした進展が期待できないことは明らかである。しかし幸運なことに、勾配法でなく最小2乗原理に基づく新しい学習アルゴリズムを開発することができた[1]。この結果は、その構造の若干の変形により、相互結合型NNにも適用可能である。これが後に有効となり、さらにその構造を拡張して、Double-Parasol型NNの構成に

到達した。これは、動的システムの同定により適した構造となっており、その後開発した制御系設計法であるTarget Following Control (TFC)と併せて、同定-制御の一つの方法を提案している[2]-[4]。

一方、同定法としては、フーリエ級数を有限項で打ち切った三角多項式をNNとして用いる考えに至り、これもまた別の同定-制御の方法を示している[5], [6]。

ところで制御系設計法は各種の方法が提案されているが、モデル参照型として、モデルマッチング法が古くから知られている[7]-[11]。しかし近年では、H無限大理論による最適化問題の一つと考えられているようである[12], [13]。

本報告では、かつて、筆者が提案した線形システムに対するモデルマッチング法[10]による制御信号が、より簡単に得られることを示し、さらに非線形システムにも適用可能であることを示す。

多くの制御系設計法は、ある種の数学的理論を背景にその理論が構成されていることが多く、そのための基礎勉強が必要となるが、ここで提案するモデルマッチング法は、大学初年級の知識のみで理解可能である。残る課題は、対象となるシステムのシステムモデルをいかに精度よく求めるかであるが、先に記した非線形システムに対する同

定法が有効となると考えている．もう一つは、与えられたシステム、およびそのシステムモデルに対して、どのような規範モデルを与えるかが重要であり、制御性能の成否を決定する要因となる．

本論の読者の中に、興味を持って本手法を応用し、実用に耐え得る有効なものへと格上げしていただくことを願っている．

2. パルス伝達関数

本節ではパルス伝達関数で表されるシステムを考える．すなわち、線形システムを対象とする．まず従来法の設計手順を示し、そこから提案する新しい方法が必然的に得られることを示す．

2. 1 従来法

次式で表されるスカラー線形システムを考える．

$$P(z)y(k) = R(z)u(k) \quad (1)$$

ここに $P(z)$ はシフトオペレータ z の n 次モニック多項式、 $R(z)$ は z の m 次安定多項式、 k は時間ステップを表す．ここで制御器 $u(k)$ を

$$u(k) = \frac{1}{KG(z)D(z)} \{C(z)u_d(k) + A(z)U(k) + B(z)y(k)\} \quad (2)$$

と仮定し、これを用いたシステム(1)の閉ループ系が規範モデルの特性と一致するように、 z の多項式 $A(z)$, $B(z)$, $C(z)$, $D(z)$, $G(z)$ およびスカラー K を定めることがモデルマッチング法の目的である．詳細は文献[0]を参照されたいが、結果は以下の通りである．

[設計手順]

1) 規範モデル

$$P_d(z)y_d(k) = R_d(z)u_d(k) \quad (3)$$

を定める．ただし、 $P_d(z)$, $R_d(z)$ はそれぞれ n_d 次、 m_d 次の安定多項式であり、相対次数の条件

$$n_d - m_d \geq n - m \quad (4)$$

を満たすものとする．

2) 必要ならば積分機能を設定する．

$$D(z) = (z-1)^\xi, \quad \xi = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

3) モニック安定多項式 $T(z)$ を定める．その次数は

$$\rho = 2n - n_d - m + \xi - 1 \quad (6)$$

とする．

4) 次式を満たす $Q(z)$, $S(z)$ を求める．

$$T(z)P_d(z) = Q(z)D(z)P(z) + S(z) \quad (7)$$

$$\deg Q(z) = \rho + n_d - \xi - n = n - m - 1$$

$$\deg S(z) = \rho + n_d - n + m = n + \xi - 1$$

5) 求める多項式を以下のように定める．

$$(1) \quad A(z) = A_1(z)D(z),$$

$$A_1(z) = KG(z) - Q(z)R(z) \quad (10a)$$

$$(2) \quad B(z) = -S(z) = Q(z)D(z)P(z) - T(z)P_d(z) \quad (10b)$$

$$(3) \quad C(z) = T(z)R_d(z) \quad (10c)$$

ここに、 $\deg G(z) = \deg Q(z)R(z) = n-1$ であり、さらに $\deg A_1(z) = n-2$ となるように K を定める．すなわち、 K は $R(z)$ の最高次の係数となる．

この設計手順は(2)を(1)に代入し、得られる閉ループ系のパルス伝達関数が規範モデルのそれと一致するように設計されている．求まる制御入力信号は因果律を満たす実現可能なものとなる．ところで、設計手順により得られた制御入力(2)を逆に辿ってみる．まず(2)より

$$\{KG(z)D(z) - A(z)\}u(k) = C(z)u_d(k) + B(z)y(k)$$

(10a)₁をもちいて

$$\{KG(z) - A_1(z)\}D(z)u(k) = C(z)u_d(k) + B(z)y(k)$$

さらに、(10a)₂, (10b), (10c) を用いて

$$Q(z)D(z)R(z)u(k) = T(z)R_d(z)u_d(k) + \{Q(z)D(z)P(z) - T(z)P_d(z)\}y(k)$$

となる．これを整理して

$$Q(z)D(z)\{P(z)y(k) - R(z)u(k)\} = T(z)\{P_d(z)y(k) - R_d(z)u_d(k)\}. \quad (11)$$

この形が新しく提案する方法を示唆している．

2. 2 提案法

システム(1)と規範モデル(3)が与えられたとき、制御の目的は、閉ループ系の特性が規範モデルのそれと一致させるように制御入力 $u(k)$ を決定することである．これと同値ではあるが、制御入力を適切に選ぶことにより、その閉ループ系が

$$P_d(z)y(k) = R_d(z)u_d(k) \quad (12)$$

となるように制御入力 $u(k)$ を求めることである．

すなわち、(1)、(3)を書き換えた二つの恒等式

$$P(z)y(k) - R(z)u(k) \equiv 0$$

$$P_d(z)y(k) - R_d(z)u_d(k) \equiv 0$$

が等価であること、従って、

$$P(z)y(k) - R(z)u(k) = P_d(z)y(k) - R_d(z)u_d(k) \quad (13)$$

が成立するように $u(k)$ を求めればよい．これより、

$$R(k)u(k) = \{P(z) - P_d(z)\}y(k) + R_d(z)u_d(k) \quad (14)$$

あるいは

$$u(k) = \frac{1}{K} \left\{ \frac{A(z)}{G(z)} u(k) + \frac{B(z)}{G(z)} y(k) + \frac{C(z)}{G(z)} u_d(k) \right\} \quad (15)$$

$$A(z) = KG(z) - R(z) \quad (16a)$$

$$B(z) = P(z) - P_d(z) \quad (16b)$$

$$C(z) = R_d(z) \quad (16c)$$

が求まる. ただしこれは $n = n_d = m + 1 = m_d + 1$ の場合であり、 $\deg G(z) = n - 1$ 、 $\deg A(z) = n - 2$ とすることにより、実現可能な制御入力 (MMC) が得られる. これを一般化し、さらに補償要素の導入を可能にするためには、モニック多項式 $T(z)$, $Q(z)$, $D(z)$ を用いて

$$\begin{aligned} Q(z)D(z)\{P(z)y(k) - R(z)u(k)\} \\ = T(z)\{P_d(z)y(k) - R_d(z)u_d(k)\} \end{aligned} \quad (17)$$

と表す. これより MMC は

$$\begin{aligned} Q(z)D(z)R(z)u(k) = \{Q(z)D(z)P(z) \\ - T(z)P_d(z)\}y(k) + T(z)R_d(z)u_d(k) \end{aligned} \quad (18)$$

となる. あるいは (10) を用いて (2) のように表すことも可能である.

(例題 1) 次のような 2 次のシステムと 1 次の規範モデル

$$P(z) = z^2 + p_1z + p_2, \quad R(z) = r_1z + r_2,$$

$$P_d(z) = z + p_d, \quad R_d(z) = r_d$$

を考え、 $D(z) = z - d$ とする. このとき $T(z) = z^2$, $Q(z) = 1$ とおくことができ、(18)は

$$\begin{aligned} (z - d)(r_1z + r_2)u(k) \\ = \{(z - d)(z^2 + p_1z + p_2) - z^2(z + p_d)\}y(k) \\ + r_dz^2u_d(k) \\ = \{(p_1 - p_d - d)z^2 + (p_2 - dp_1)z - dp_2\}y(k) \\ + r_dz^2u_d(k). \end{aligned}$$

となる. これより MMC は

$$\begin{aligned} u(k) = \frac{1}{r_1} \left\{ \frac{-r_2}{z} u(k) \right. \\ + \frac{(p_1 - p_d - d)z^2 + (p_2 - dp_1)z - dp_2}{z(z - d)} y(k) \\ \left. + \frac{r_dz^2}{z(z - d)} u_d(k) \right\} \end{aligned}$$

と求まる. ここで、 $d = 1$ が通常の積分器の導入であり、 $d = 0$ が積分器なし、その中間の $0 < d < 1$ のときは、積分機能の能力の何割かの導入となる.

具体的には数値例のグラフを参照されたい.

この結果は従来法でも導出可能であるが、より簡単に導かれている. さらに $T(z)$ の次数を大きくしたり、あるいは $T(z) = z^2 + t_1z + t_2$ のように自由パラメータを増やすことは可能であるが、その役割、指針については不明であり、オブザーバ理論と同様に、安定多項式である以外の条件をつけるのは困難と予測している.

3. 差分方程式系

前節では、パルス伝達関数で表されるシステムを対象としてきたが、そのままでは非線形系に拡張することは困難であるので、システムを差分方程式で表現してみる. 線形差分方程式系はパルス伝達関数と等価であるので、前節で述べた提案するモデルマッチング法がそのまま適用されるのは当然であるが、その結果が自然に非線形系に一般化できることが特徴である.

3. 1 線形系

線形システムを

$$y(k+1) = - \sum_{j=0}^{n-1} p_j y(k-j) + \sum_{j=0}^{n-1} r_j u(k-j) \quad (19)$$

で表し、規範モデルを

$$y_d(k+1) = - \sum_{j=0}^{n_d-1} p_{dj} y_d(k-j) + \sum_{j=0}^{n_d-1} r_{dj} u_d(k-j) \quad (20)$$

とする. このとき制御の目的は、その閉ループ系が

$$y(k+1) = - \sum_{j=0}^{n_d-1} p_{dj} y(k-j) + \sum_{j=0}^{n_d-1} r_{dj} u_d(k-j) \quad (21)$$

となるように、制御入力 $u(k)$ を求めることである. 従って、前節と同様に

$$\begin{aligned} Q(z)D(z) \left\{ y(k+1) + \sum_{j=0}^{n-1} p_j y(k-j) - \sum_{j=0}^{n-1} r_j u(k-j) \right\} \\ = T(z) \left\{ y(k+1) + \sum_{j=0}^{n_d-1} p_{dj} y(k-j) \right. \\ \left. - \sum_{j=0}^{n_d-1} r_{dj} u_d(k-j) \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

と置き、これから $u(k)$ を求めればよい. ここで重要なことは、(22)に $r_0 u(k)$ の項があり、従って $u(k)$

を利用可能な信号の関数として表現できることである．この場合は $r_0 \neq 0$ であればよい． $r_0 = 0$ の場合はむだ時間を含む場合であり、下記の別の項目として延べる．結論として、MMC 入力の導出のためには、 $r_0 u(k)$ の項の存在が本質であり、その他の項は線形である理由は何もない．これから当然のごとく、次節の非線形系への拡張が可能となる．(例題 2) (例題 1) と同じ問題を扱う．すなわち、システムと規範モデルは

$$\begin{aligned} y(k+1) &= -p_1 y(k) - p_2 y(k-1) + r_1 u(k) + r_2 u(k-1) \\ y_d(k+1) &= -p_d y_d(k) + r_d u_d(k) \end{aligned}$$

とする． $D(z) = z - d$ とするとき、 $T(z) = z$, $Q(z) = 1$ とおけばよい． $T(z)$ の次数の例題 1 との違いは、システム表現によるものである．このとき(22)は

$$(z-d)\{y(k+1) + p_1 y(k) + p_2 y(k-1) - r_1 u(k) - r_2 u(k-1)\} = z\{y(k+1) + p_d y(k) - r_d u_d(k)\}$$

となり、(例題 1) と同じ制御入力 $u(k)$ が求まる．上式で、 $zy(k+1)$ が消去されることが重要である．これにより、因果律を満たす実現可能な制御入力を求めることが可能となる．

3. 2 非線形系

ここで扱うシステムは

$$y(k+1) = ru(k) + f_k(y, u), \quad r \neq 0 \quad (23)$$

$$f_k(y, u) \equiv f(y(k), y(k-1), \dots, u(k-1), u(k-2), \dots)$$

であり、右辺第一項のみが重要である．また、規範モデルは

$$y_d(k+1) = f_{d,k}(y_d, u_d) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} f_{d,k}(y_d, u_d) \\ \equiv f(y_d(k), y_d(k-1), \dots, u_d(k), u_d(k-1), \dots) \end{aligned}$$

とする．補償を考慮しない最も簡単な場合は

$$\begin{aligned} y(k+1) - ru(k) - f_k(y, u) \\ = y(k+1) - f_{d,k}(y, u_d) \end{aligned} \quad (25)$$

より、

$$u(k) = \frac{1}{r} \{f_{d,k}(y, u_d) - f_k(y, u)\} \quad (26)$$

が MMC として求まる．これを制御入力として(23)に用いると、閉ループ系は

$$y(k+1) = f_{d,k}(y, u_d) \quad (27)$$

となっていることが容易に確かめられる．

実際への応用においては、(3)のシステム表現を正確に獲得することは困難である．代わりに、その推定値によるシステムモデル

$$y(k+1) = \hat{r}u(k) + \hat{f}_k(y, u), \quad \hat{r} \neq 0 \quad (28)$$

を利用することになり、実際の MMC は

$$u(k) = \frac{1}{\hat{r}} \{f_{d,k}(y, u_d) - \hat{f}_k(y, u)\} \quad (29)$$

となる．このとき、規範モデルとの正確な一致は期待できず、過渡特性は勿論のこと、定常特性においても偏差が発生する．そのための補償要素の導入として、

$$\begin{aligned} Q(z)D(z)\{y(k+1) - ru(k) - f_k(y, u)\} \\ = T(z)\{y(k+1) - f_{d,k}(y, u_d)\} \end{aligned} \quad (30)$$

が一つの方法である．ここに $Q(z)$, $D(z)$, $T(z)$ はすべてモニック多項式であり、

$$\deg Q(z)D(z) = \deg T(z) \quad (31)$$

とする．これにより y の最高次が消去され、実行可能な入力が求まる．また、 $D(z)$ は積分機能として他と区別している．これを用いた例は後記の数値例を参照されたい．

3. 2 むだ時間を含む非線形系

本稿で提案する手法は、むだ時間を含むシステムに対しても全く同じ考え方で適用可能であるが、因果律を満たす制御入力を得るために、若干の工夫が必要となる．1 ステップのむだ時間を含むシステムとして

$$y(k+1) = ru(k-1) + f_k(y, u), \quad r \neq 0 \quad (32)$$

$$f_k(y, u) \equiv f(y(k), y(k-1), \dots, u(k-2), u(k-3), \dots)$$

を考える．これは

$$y(k+2) = ru(k) + f_{k+1}(y, u) \quad (33)$$

と同じである．これに提案するモデルマッチング法を適用すると、制御入力 $u(k)$ に未来の出力 $y(k+1)$ が含まれ、実行不可能となる．なぜなら

$$\begin{aligned} f_{k+1}(y, u) \\ \equiv f(y(k+1), y(k), \dots, u(k-1), u(k-2), \dots) \end{aligned} \quad (34)$$

であり、右辺に $y(k+1)$ を含むからである．この問題を解決するために、この $y(k+1)$ に(32)を代入して、(33)の代わりに

$$y(k+2) = ru(k) + f_k(y, u) \quad (35)$$

$$f_k(y, u) \equiv f(y(k), y(k-1), \dots, u(k-1), u(k-2), \dots)$$

を扱えばよい． m ステップのむだ時間を含む場合も、システム、および規範モデルは

$$y(k+m+1) = ru(k) + f_k(y, u) \quad (36)$$

$$y_d(k+m+1) = f_{d,k}(y_d, u_d) \quad (37)$$

と表されているとして一般性を失わない．このとき MMC の設計手法は

$$\begin{aligned} Q(z)D(z)\{y(k+m+1) - ru(k) - f_k(y, u)\} \\ = T(z)\{y(k+m+1) - f_{d,k}(y, u_d)\} \end{aligned} \quad (38)$$

となるが、同じ次数のモニック多項式である $Q(z)D(z)$ と $T(z)$ は、最初の $m+1$ 項を等しくしなけ

ればならない. 例えば、

$$Q(z)D(z) = z^{m+1} + t_1 z^m + \dots + t_m z + q_{m+1} \quad (39)$$

$$T(z) = z^{m+1} + t_1 z^m + \dots + t_m z + t_{m+1} \quad (40)$$

とすることにより、因果律を満たした制御入力を得られる. また、

$$q_{m+1} = -1 - t_1 - \dots - t_m \quad (41)$$

と選ぶことにより、

$$Q(z)D(z) = (z^m + \dots)(z-1) \quad (42)$$

となって、積分機能を持たせることができる.

(例題3) $m=1$ の場合で、 $T(z) = z^2 + t_1 z + t_2$ 、

$$Q(z)D(z) = z^2 + q_1 z + q_2 \text{ とおくと}$$

$$\begin{aligned} ru(k) &= (q_1 - t_1)y(k+1) + (q_2 - t_2)y(k) \\ &\quad - q_1 ru(k-1) - q_2 ru(k-2) \\ &\quad - f_k(y, u) - q_1 f_{k-1}(y, u) - q_2 f_{k-2}(y, u) \\ &\quad + f_{d,k}(y, u_d) + t_1 f_{d,k-1}(y, u_d) + t_2 f_{d,k-2}(y, u_d) \end{aligned}$$

となり、 $q_1 = t_1$ が必要となる. このとき

$$\begin{aligned} ru(k) &= (q_2 - t_2)y(k) - t_1 ru(k-1) - q_2 ru(k-2) \\ &\quad - f_k(y, u) - t_1 f_{k-1}(y, u) - q_2 f_{k-2}(y, u) \\ &\quad + f_{d,k}(y, u_d) + t_1 f_{d,k-1}(y, u_d) + t_2 f_{d,k-2}(y, u_d) \end{aligned} \quad (*)$$

である. このとき、

$$q_2 = -1 - t_1$$

とすれば、積分機能を持つことを示す. そのために、 $u_d(k) \equiv 1$ のステップ応答において、閉ループ系は安定であり、すべての信号は有界なとき、その定常状態における値を

$$u(k) = u(k-1) = u(k-2) = \bar{u}, \quad y(k) = \bar{y},$$

$$f_k(y, u) = f_{k-1}(y, u) = f_{k-2}(y, u) = \bar{f},$$

$$f_{d,k}(y, u_d) = f_{d,k-1}(y, u_d) = f_{d,k-2}(y, u_d) = \bar{f}_d$$

とおくと、上の(*)から

$$\begin{aligned} (1+t_1+q_2)r\bar{u} &= (q_2-t_2)\bar{y} - (1+t_1+q_2)\bar{f} \\ &\quad + (1+t_1+t_2)\bar{f}_d \end{aligned}$$

となる. 従って、

$$q_2 = -1 - t_1$$

のときは

$$(1+t_1+t_2)\bar{y} = (1+t_1+t_2)\bar{f}_d = (1+t_1+t_2)\bar{y}_d$$

となり、 $1+t_1+t_2 \neq 0$ であれば

$$\bar{y} = \bar{y}_d$$

が成立する. すなわち、定常偏差 (オフセット) $= 0$ となり、積分機能の働きをしていることがわかる.

4. 多変数系

本稿で提案しているモデルマッチング法は多変数系にも拡張可能である. むだ時間を含まない場合は単純であるが、含む場合にはその含まれ方により、形式的な分類が必要となる.

4. 1 むだ時間を含まない場合

多変数系の非線形系を

$$\mathbf{y}(k+1) = \mathbf{R}\mathbf{u}(k) + \mathbf{f}_k(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \quad (43)$$

で表す. $\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{f}_k$ は n 次元ベクトルであり、 $\mathbf{R}$ は n 次正方形行列とする. また規範モデルを

$$\mathbf{y}_d(k+1) = \mathbf{f}_{d,k}(\mathbf{y}_d, \mathbf{u}_d) \quad (44)$$

とする. $\mathbf{R}$ が正則なとき、スカラーの場合と同様に

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(k+1) - \mathbf{R}\mathbf{u}(k) - \mathbf{f}_k(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \\ = \mathbf{y}(k+1) - \mathbf{f}_{d,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}_d) \end{aligned} \quad (45)$$

から、MMC は

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{R}^{-1} \{ \mathbf{f}_{d,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}_d) - \mathbf{f}_k(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \} \quad (46)$$

と求まる. これは補償要素を全く含まない場合であり、これを考慮するときは、

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}(z)\mathbf{D}(z) \{ \mathbf{y}(k+1) - \mathbf{R}\mathbf{u}(k) - \mathbf{f}_k(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \} \\ = \mathbf{T}(z) \{ \mathbf{y}(k+1) - \mathbf{f}_{d,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}_d) \} \end{aligned} \quad (47)$$

から $\mathbf{u}(k)$ を求めればよい. 例えば、 $\mathbf{Q}(z) = \mathbf{I}$, $\mathbf{T}(z) = z\mathbf{I}$, $\mathbf{D}(z) = (z-d)\mathbf{I}$ のときは

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(k) = \mathbf{R}^{-1} \{ -\mathbf{f}_k(\mathbf{y}, \mathbf{u}) - d(\mathbf{y}(k) - \mathbf{R}\mathbf{u}(k-1) \\ - \mathbf{f}_{k-1}(\mathbf{y}, \mathbf{u})) + \mathbf{f}_{d,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}_d) \} \end{aligned} \quad (48)$$

となる. また、システムでなくシステムモデル

$$\mathbf{y}(k+1) = \hat{\mathbf{R}}\mathbf{u}(k) + \hat{\mathbf{f}}_k(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \quad (49)$$

で対処する場合には

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(k) = \hat{\mathbf{R}}^{-1} \{ -\hat{\mathbf{f}}_k(\mathbf{y}, \mathbf{u}) - d(\mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{R}}\mathbf{u}(k-1) \\ - \hat{\mathbf{f}}_{k-1}(\mathbf{y}, \mathbf{u})) + \mathbf{f}_{d,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}_d) \} \end{aligned} \quad (50)$$

が実際のMMCとなる.

4. 2 むだ時間を含む場合

行列 $\mathbf{R}$ が正則でないときは、多変数のどれかにむだ時間を含まれることになるが、一般論での説明は冗長となるので、3変数の場合を例として述べる. すなわち、システムとして

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_i(k+1) &= \mathbf{r}_i^T \mathbf{u}(k) + \mathbf{s}_i^T \mathbf{u}(k-1) + \mathbf{t}_i^T \mathbf{u}(k-2) \\ &\quad + f_{i,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}), \quad i=1,2,3 \end{aligned} \quad (51)$$

を考える. これはまた

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(k+1) &= \mathbf{R}\mathbf{u}(k) + \mathbf{S}\mathbf{u}(k-1) + \mathbf{T}\mathbf{u}(k-2) \\ &\quad + \mathbf{f}_k(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (52)$$

と表される. このとき、行列 $\mathbf{R}$ のランクにより、

以下のように分類される。

[Case 1] $\text{rank}\mathbf{R} = \text{rank}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) = 3$:

この場合は $\mathbf{R}$ が正則であるので、4. 1 の結果が適用される。

[Case 2] $\text{rank}\mathbf{R} = \text{rank}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) = 2$:

このとき一般性を失うことなく $\text{rank}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = 2$ を仮定すると、 $\mathbf{r}_3 = c\mathbf{r}_1 + d\mathbf{r}_2$ を満たすスカラー c, d が存在する。そこで、新しい変数

$$y_4(k) = y_3(k) - cy_1(k) - dy_2(k) \quad (53)$$

を導入すると、

$$y_4(k+1) = \mathbf{q}_1^T \mathbf{u}(k-1) + \mathbf{q}_2^T \mathbf{u}(k-2) + f_{4,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \quad (54)$$

$$\mathbf{q}_1 = \mathbf{s}_3 - c\mathbf{s}_1 - d\mathbf{s}_2, \quad \mathbf{q}_2 = \mathbf{t}_3 - c\mathbf{t}_1 - d\mathbf{t}_2,$$

$$f_{4,k} = f_{3,k} - cf_{1,k} - df_{2,k}$$

と、むだ時間を含むサブシステムが陽に現れる。

すると全システム (51) は

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} y_1(k+1) \\ y_2(k+1) \\ y_4(k+2) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathbf{r}_1^T \\ \mathbf{r}_2^T \\ \mathbf{q}_1^T \end{pmatrix} \mathbf{u}(k) + \begin{pmatrix} \mathbf{s}_1^T \\ \mathbf{s}_2^T \\ \mathbf{q}_2^T \end{pmatrix} \mathbf{u}(k-1) \\ &\quad + \begin{pmatrix} \mathbf{t}_1^T \\ \mathbf{t}_2^T \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \mathbf{u}(k-2) + \begin{pmatrix} f_{1,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \\ f_{2,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \\ f_{4,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (55)$$

あるいは、等価であるが

$$\mathbf{y}_1(k+1) = \mathbf{R}_1 \mathbf{u}(k) + \mathbf{S}_1 \mathbf{u}(k) + \mathbf{T}_1 \mathbf{u}(k) + \mathbf{f}_{1,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \quad (56)$$

と表される。ここに記号の置き換えは自明であるので、省略する。

[Case 2-1] $\text{rank}\mathbf{R}_1 = \text{rank}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{q}_1) = 3$:

このときシステムは内部に 1 ステップのむだ時間を含み、 $\mathbf{R}_1$ が正則であるので、[Case 1] と同様に MMC を決定することができる。

[Case 2-2] $\text{rank}\mathbf{R}_1 = \text{rank}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{q}_1) = 2$:

このとき、 $\text{rank}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = 2$ を仮定しているので、 $\mathbf{q}_1 = c_1\mathbf{r}_1 + d_1\mathbf{r}_2$ を満たす c_1, d_1 が存在する。すると (54) を導いたと同様に、新しい変数を導入して

$$y_5(k+1) = \mathbf{q}_3^T \mathbf{u}(k-1) + \mathbf{q}_4^T \mathbf{u}(k-2) + f_{5,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \quad (57)$$

が導かれる。これは、システムが少なくとも 2 ステップのむだ時間を含んでいることを示している。そして、 $\mathbf{u}(k)$ の係数行列が正則であれば、

[Case 2-1] と同様に MMC を決定できる。しかし、正則でなければ、再び同様な変数変換を行い、得られる $\mathbf{u}(k)$ の係数行列が正則となるまで繰り返される。

[Case 3] $\text{rank}\mathbf{R} = \text{rank}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) = 1$:

この場合は、 $\mathbf{r}_2 = c\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_3 = d\mathbf{r}_1$ が成立する c, d が存在する。すると [Case 2] と同様にして、少なくとも 1 ステップのむだ時間を含むサブシステムが 2 つ存在することになる。その結果、適切な変数変換の後、全システムは

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} y_1(k+1) \\ y_4(k+2) \\ y_5(k+2) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \mathbf{r}_1^T \\ \mathbf{p}_1^T \\ \mathbf{q}_1^T \end{pmatrix} \mathbf{u}(k) + \begin{pmatrix} \mathbf{s}_1^T \\ \mathbf{p}_2^T \\ \mathbf{q}_2^T \end{pmatrix} \mathbf{u}(k-1) \\ &\quad + \begin{pmatrix} \mathbf{t}_1^T \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \mathbf{u}(k-2) + \begin{pmatrix} f_{1,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \\ f_{4,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \\ f_{5,k}(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (57)$$

となる。これはまた、入力変数の先頭行列のランクにより分類される。

[Case 3-1] $\text{rank}\mathbf{R}_2 = \text{rank}(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, \mathbf{q}_1) = 3$:

このとき 2 つのサブシステムはそれぞれ 1 ステップのむだ時間を含み、MMC は [Case 2-1] と同様に決定できる。

[Case 3-2] $\text{rank}\mathbf{R}_2 = \text{rank}(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, \mathbf{q}_1) \leq 2$:

この場合、2 つのサブシステムの一方は 1 ステップのむだ時間を含み、他方は 2 ステップ以上である場合、あるいはともに 2 ステップ以上のむだ時間を含む場合など、[Case 2-2] と同様な議論が、得られる $\mathbf{u}(k)$ の係数行列が正則となるまで繰り返される。

[Case 4] $\text{rank}\mathbf{R} = \text{rank}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3) = 0$:

この場合は $\mathbf{R} = \mathbf{0}$ のときであり、(52) で、 $\mathbf{R}$ の代わりに $\mathbf{S}$ を対象として、同じ議論が繰り返される。

5. 数値例

ここでは数値例によるシミュレーション結果を述べる。まず、システムとシステムモデルが次式によって表す。

$$\begin{aligned} y(k+1) &= 0.5y(k) - 0.06y(k-1) + 0.29 \sin y(k) \\ &\quad + 0.8(0.7u(k) - 0.4u(k-1)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+1) &= 0.5y(k) - 0.06y(k-1) + 0.29 \sin y(k) \\ &\quad + 0.7u(k) - 0.4u(k-1) \end{aligned}$$

システムとそのモデルとはゲインの違いを与えている。また、規範モデルは

$$\begin{aligned} y_d(k+1) &= 0.9y_d(k) - 0.14y_d(k-1) \\ &\quad + 0.15u_d(k) + 0.09u_d(k-1) \end{aligned}$$

とする。ここで、 $D(z) = z - d$ とし、 $T(z) = z^2$, $Q(z) = 1$ としたときの MMC は

$$\begin{aligned} (z-d)\{y(k) - 0.5y(k-1) + 0.06y(k-2) - 0.29 \sin y(k-1) \\ + 0.7u(k-1) - 0.4u(k-2)\} = z\{y(k) - 0.9y(k-1) \end{aligned}$$

$$-0.14y(k-2)+0.15u_d(k-1)+0.09u_d(k-2)\}$$
 を $u(k)$ で表すことにより求まる．実際には

$$(1-dz^{-1})\{y(k)-0.5y(k-1)+0.06y(k-2)-0.29\sin y(k-1) \\ +0.7u(k-1)-0.4u(k-2)\}=\{y(k)-0.9y(k-1) \\ -0.14y(k-2)+0.15u_d(k-1)+0.09u_d(k-2)\}$$
 から求めたほうが簡単である．

$y(0)=-0.3$ として初期値の違いを与えているが、ゲインも異なっているので、補償なしでは過渡特性は勿論のこと、定常偏差も 0 とはならない．そこで、 d の各値による違いを以下に示す．Fig.1 は $d=0$ であり、補償要素の全くない場合である．当然、大きな定常偏差（オフセット）が生じている．そこで、 $d=0.5$ 、 1 、 1.5 と大きくしていった場合が Fig.2、Fig.3、Fig.4 である． $d=0.5$ では、オフセットがほぼ半減し、 $d=1$ では完全に 0 となっている．すなわち、 $D(z)=z-1$ が積分器の働きをしていることが確認できる．また、 $d=1.5$ とさらに大きくすると、システムの出カゲインが大きくなりすぎて、 $d=0$ とは逆むきのオフセットを生じている．

一般に、オフセットはなしが好ましいことは当然であるが、積分器の導入は、システムモデル誤差に対する安定領域を狭くし、いわゆるロバスト性を弱くすることになる．このオフセットの大きさと安定領域とのトレードオフを図るのが $D(z)=z-d$ であり、中間 ($0 < d < 1$) の値が意味をもってくることになる．すなわち、 $D(z)=z-d$ は積分器の積分機能に対するパワーレベルを表しているとも考えられる．

6. まとめ

本論では、筆者の最近の研究の中から、モデルマッチング法について述べた．この方法は古くから議論されていたが、線形システムおよびその周辺に対象が限られていた．しかし、本論で提案した設計法は、その手法がより簡単になっていると同時に、非線形システムにも適用可能なものである．さらに、むだ時間系、多変数系にも拡張可能であり、最も簡潔であり、一般的な設計法であると考えている．この簡単な方法が今頃になって得られたかの最大の理由は、そのシステム表現にある．伝統的にはラプラス変換による伝達関数表現がよく知られているが、基本的に線形表現に限定される、その後は状態変数表現が活発となる．これはシステムの内部表現とその構造にも立ち入っており、数学的により厳密な理論と設計法の確立に貢献してきた．非線形にも拡張可能であるが、

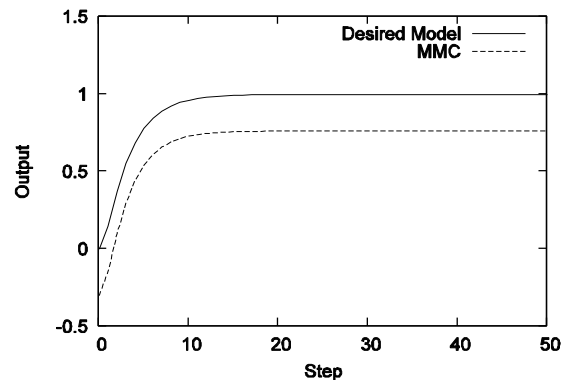


Fig.1 Step response with $d=0$

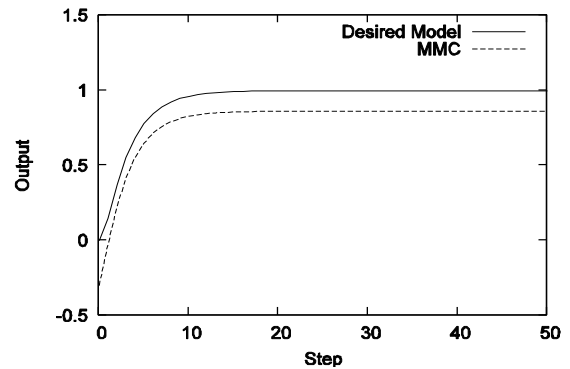


Fig.2 Step response with $d=0.5$

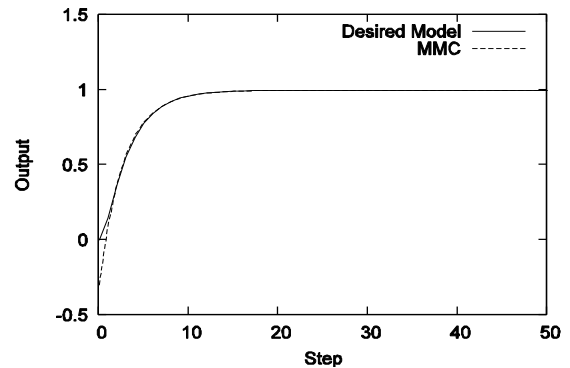


Fig.3 Step response with $d=1$

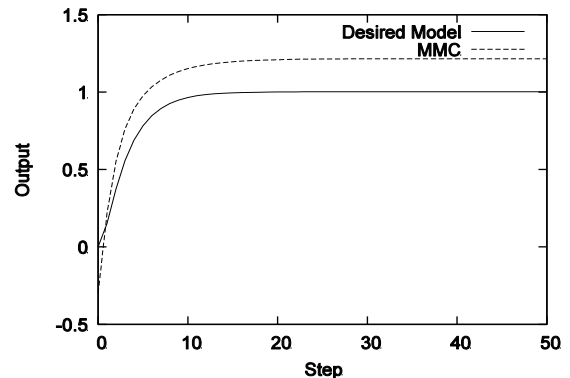


Fig.4 Step response with $d=1.5$

状態方程式、出力方程式をとともに非線形の一般形にすると、線形近似以外に対処の方法がなくなってしまう。非線形への拡張を可能とする本論の手法は差分方程式を用いており、唯一、現時点の制御入力変数が線形に存在することを仮定している。この場合、状態空間法で指摘された伝達関数法の欠陥である可制御性など内部情報の不足については、差分方程式についても注意を払う必要がある。

最後に、筆者の最近の研究の中で、さらに推し進めたいものに、線形計画法に対する新しい解法の研究[14]がある。これは超平面に対する法線ベクトルに着目した方法であり、考え方は筆者の古い研究[15]と同様である。この方法を巡回セールスマン問題など各種の数理計画問題の解法として拡張することが夢であったが、どなたかが引き継いで発展させていただけることを願っている。

参考文献

- [1] Y. Yamamoto and P. N. Nikiforuk : A New Supervised Learning Algorithm for Multilayered and Interconnected Neural Networks, IEEE Tr. on Neural Networks, vol.11, no.1, pp.36-46, 2000.
- [2] Y. Yamamoto : A Double Parasols Neural Network and A Target Following Control For Nonlinear Discrete Time Systems, International Journal of Intelligent Control and Systems, vol.14, no.2, pp.173-179, 2009.
- [3] Y. Yamamoto and S. Hasegawa : A New Neural Network and its Application to Nonlinear Discrete Time System, Proc. of IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, pp.66-70, 2009.
- [4] Y. Yamamoto : Target Following Control for Nonlinear Discrete Time Systems, Proc. of CACS International Automatic Control Conference, SaA06, 2009.
- [5] Y. Yamamoto : Trigonometric Polynomial Neural Network and its Application to Identification and Control, Proc. of the 11th International Conference on Control and Applications, 213-218, 2009.
- [6] Y. Yamamoto : Identification and Control of Nonlinear Systems using a Trigonometric Polynomial Neural Network, to appear in International Journal of Advanced Mechatronic Systems, 2010.
- [7] W. A. Wolovich : The use of state feedback for exact model matching, SIAM J. Control, vol.3, pp.512-523, 1972.
- [8] S.H.Wang and C.A.Desoer : The exact model matching of linear multivariable systems, IEEE, Tr. on AC, vol.17, pp.491-497, 1972.
- [9] K. Ichikawa : Control system design based on exact model matching techniques, Lecture Notes in Control and Information Science, 74, NewYork, Springer-Verlag, 1985.
- [10] Y. Yamamoto : Model matching and adaptive control with disturbance consideration, Tr. of SICE, vol.24, pp.100-102, 1988.
- [11] P. Colaneri and V. Kucera : The model matching problem for periodic discrete-time systems, IEEE Tr. on AC, vol.42, pp.1472-1476, 1997.
- [12] D.J.N.Limebear, et.al., On the design of robust degree of freedom controllers, Automatica, vol.29, pp.157-168, 1993.
- [13] T.Sogo:Calculation of non-causal solution for the model-matching problem and its application to preview feedforward control, Tr. of SICE, vol.42, pp.40-46, 2006.
- [14] Y. Yamamoto : A new method for solving a linear programming problem, The 49th IEEE Conference on Decision and Control, to be presented, 2010.
- [15] Y. Yamamoto, M. M. Gupta and P. N. Nikiforuk : Analysis and Synthesis of Nonlinear Systems Having Limit Surfaces with Prescribed Stability Properties, Journal of Mathematical Analysis and Applications, vol.111, pp.49-64, 1985.

(受理 平成22年10月29日)

次世代型知的電動車いすの開発に関する研究

小西 亮介

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コース

Study on the development of next generation type electric wheel chair

Ryosuke KONISHI

Electrical & Electronic Engineering Course, Information Electronics Major

Tottori University

Abstract: In this paper, I describe about the development of next generation type electric wheel chair. Speech recognition technique is auxiliarily used for start and stop. Wheel chair after start moves toward target by which information is obtained from EKF-SLAM algorithm every second moment. EKF-SLAM is calculated from both distance length and direction angle obtained from LRF, which put in the wheel chair. By using value of EKF-SLAM, this wheel chair automatically move into calculated length and angle, while map of neighbouring surrounding is drawn simultaneously

Key Words: LRF, speech recognition, EKF-SLAM algorithm

1. はじめに

ここでは、著者が鳥取大学に在籍した40年間のうち、特に最近約10年間に興味をもったインテリジェント（画像・音声技術）な技術を利用した室内移動ロボット（電動車いす）の開発に関する研究に絞って報告する。特に身体の不自由な人や日常に介助を必要とする高齢者や障害者の方々により安全で快適な車いすを提供することを目的としている。これまでにこの分野で行われてきた研究は大きく以下の2つに大別することができる。

一つはユーザインタフェースに関する研究である。人間の最も自然な情報伝達手段の一つに音声^{1, 2, 3, 4)}や画像処理を用いて顔の方向を検出し電動車いすを制御している⁵⁾。筋電位センサを用いるもの、舌先の動きを検出する舌圧センサを利用したものなど様々な電動車いすを制御する手法が提案されている。これらのなかで音声は人間にとって最も自然な情報伝達手段であり、音声インタフェースは、直感的で分かりやすく利便性も高いがこれまでの研究はインタフェースに関する議論が中心であるため、安全性に関する議論が少ないのが現状である。もう一方は、センサ等を用いてユーザの操作あるいは車いすの走行を補助する研究である。これにより人間の操作に対する負担を減らし、安全な走行を実現できる。後藤はレーザレンジファインダ（LRF）を車いすに搭載し、LRFの情報か

ら方向の安全圏を計算することでユーザのジョイスティック操作を補助するシステムを提案している⁶⁾。外界センサやカメラを用いる研究は、自律移動ロボットの分野で盛んに取り組まれている^{7), 8), 9)}。ここでは上記研究開発の動向を踏まえて、操作インターフェースとして音声を用いるとともにLRFで周囲環境地図を生成しながら、自律走行を可能にする機能を加味した電動車いすの開発について述べる。

2. システム構成

本システムではSUZUKI株式会社製電動車いすMC2000Sを用いる。車いす周囲の環境を取得するセンサとしてLRF、LRFの信号を処理するノートPC、車いすを制御するためにPICを用いる。LRFは車いすの中心線上かつ車いすの駆動中心の88cm前方、床面からの高さ49cmの位置に床面と平行になるように取り付けた。PICはMASTERとしてPIC18F2620を一つ、また、SLAVEとしてモータ制御用に一つ、左右エンコーダ信号取得のためのパルスカウンタ用に二つ、合計三つのPIC16F876を用いる。システム構成をFig.1に示す。システムの大まかな流れは以下になる。

1. LRFにより周囲環境情報を取得する。
2. PCはLRFのデータを取り込み、PICから送

られるオドメトリ情報と組み合わせSLAMを適用する。

3. SLAMの結果からPCからPICへ車いすの動作信号を送信する。
4. PICはPCから受信した動作信号をモータ制御用のPICを通して車いす本体のメインコントローラへ送信し、車いすを動作させる。

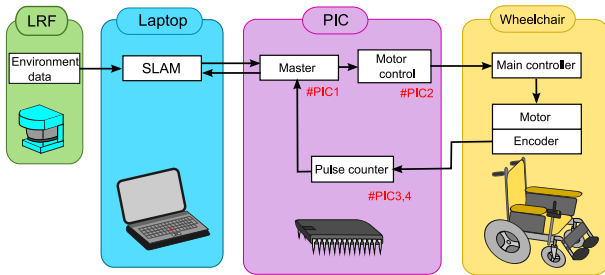


Fig.1 システムの構成

2.1 LRF

本システムで使用するLRFとしてSICK社製レーザレンジファインダLMS-200を用いる。外観をFig.2に示す。LMS200の仕様をTable1に示す。



Fig.2 LRFの外観

本システムで使用するLRFの測定原理はTOF（Time-of-Flight; 飛行時間）である。TOFとはレーザを発射してから測定対象にあたり、反射したレーザが再びLRFに戻ってくるまでの時間から対象物までの距離を求める手法である。測定対象物までの距離を d とすると、 d は光速 c 、レーザを発射し

てから戻ってくるまでの時間 Δt を用いて式(1)で表される。

$$d = \frac{c\Delta t}{2} \quad (1)$$

また、本研究で用いるLMS-200は測定可能距離0~8mあるいは0~80m、スキャン角度180°、角度分解能1.00°、0.50°、0.25°（0.25°の場合はスキャン角度100°）と測定条件を選択することが可能である。本研究では距離分解能が高く、なるべく高い分解能を維持したまま広い視野を確保できることが望ましい。したがって、測定距離0~8m、スキャン角度180°、角度分解能0.50°と設定した。また、LRFとPCはシリアル通信方式により通信する。通信速度は9600bpsと設定した。なお、通信速度は最大38400bps（専用機器を使用した場合は500kbps）まで設定が可能である。

Table 1 LRFの仕様

項目	仕様内容
型式	LMS200-30106
測定距離	0 - 80[m]
視野角度	0 - 180[deg]
角度分解能	0.25 - 1.00[deg]
システム誤差	± 15[mm]
統計的誤差	5[mm]
モータ回転速度	75[Hz]
レーザ光	905[nm]
レーザクラス	クラス1（アイ・セーフ）
電源電圧	24[V]
消費電力	20[W]
重量	4.5[kg]
外形寸法	156 x 155 x 210 [mm]

実際の操作をFig.3にフローチャートで示す。本システムでは距離分解能が高く、なるべく高い分解能を維持したままPCでLRFを駆動し周囲環境から距離情報を取得する。そのデータをもとにEKF-SLAMアルゴリズムにもとづく処理計算を行い車いすの位置・姿勢情報を得る。その後、ユーザが音声命令を行うと、その命令に従って進むべき方向（速度・角度）が計算されその方向への初期動作を行う。その後、EKF-SLAM処理によって、車いすの自己位置を推定すると同時に地図生成を行う。それを繰り返すことによって車いすを走行するシステムである。

LRFにより、周囲環境情報を取得し、そこから環境中の特徴量を抽出する。その後、抽出した特徴点をランドマークとして対応づける。特徴点データとPICから送られたオドメトリ情報に対して

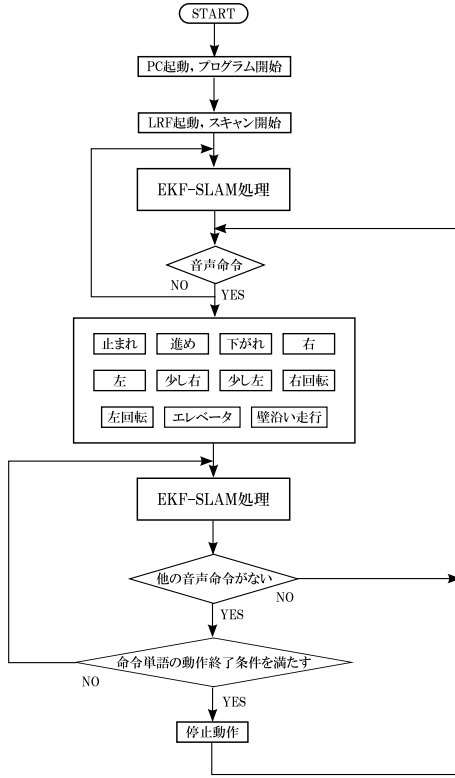


Fig.3 操作手順

EKF-SLAMを適用する。EKFは車いすの自己位置および姿勢情報を修得するが、周辺環境に対する自己位置を推定するためにはSLAMアルゴリズムが必要である。SLAMは外界センサを用いて自身の位置および周辺環境を同時に推定する手法である。SLAMでは事前にロボットに環境情報を入力する必要がないという利点がある。

2.2 EKF-SLAM アルゴリズム

LRF から得られた周囲環境情報からまず、環境中の特徴点を抽出する。その後、抽出した特徴点と過去に抽出された特徴点をランドマークとして対応づける。その後、特徴点データとオドメトリ情報に対して、EKF-SLAMを適用し、車いすの自己位置及び周辺環境を推定する。

2.2.1 特徴点抽出

本研究では環境の幾何形状に着目して計測データから特徴点を抽出する。抽出する特徴点として廊下の角¹⁰⁾や、平面の壁などの線^{11), 12)}などがある。本研究では比較的抽出が容易であることから、廊下の角を抽出し特徴点として用いる。特徴点抽

出処理として、角検出アルゴリズムと不連続点検出アルゴリズムを提案する。例としてFig.4に示す環境では角の形状が陽に表われる場所 (Fig.4の右上) とLRFのレーザ光が届かず廊下の角付近において死角となり、角の形状が不連続な点として表される場所 (Fig.4左上) が存在する。本研究ではこれら2種類の点を前者については角検出アルゴリズムにより抽出し、後者は不連続点検出アルゴリズムにより抽出する。以下に二つのアルゴリズムの詳細について述べる

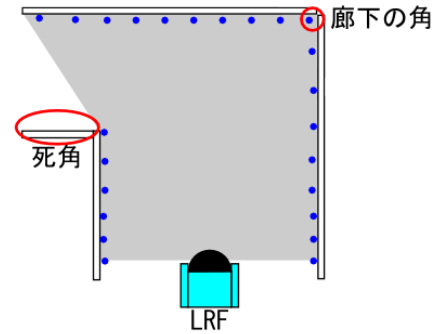


Fig.4 廊下の角の種類

2.2.2 角検出アルゴリズム

角検出アルゴリズムの処理をFig.5を用いて説明する。処理の流れは以下になっている。また、フローチャートをFig.6に示す。

1. LRF から得られた N 個の計測データ群 S の最初の点からある距離 a 離れた点を始点とし、最後の点から a 離れた点を終点とする。
2. LRF から得られた N 個の計測データ群 S から i 番目の点 s_i (最初は始点) からその前後に a 離れた2点 s_{i-n} , s_{i+m} の3点を取り出す。
3. 3点のなす角 ϕ_i を式 (2) より求める。
4. eq.3 より求めた α_i がしきい値 α_{th} より小さく、かつ極小値の場合、 s_i を廊下の角の点とする。
5. s_i が終点でないなら i を1増加させ2.に戻る。

$$\phi_i = \cos^{-1} \left(\frac{\overrightarrow{s_i s_{i-n}} \cdot \overrightarrow{s_i s_{i+m}}}{|\overrightarrow{s_i s_{i-n}}| |\overrightarrow{s_i s_{i+m}}|} \right) \quad (2)$$

$$\alpha_i = |90 - \phi_i| \quad (3)$$

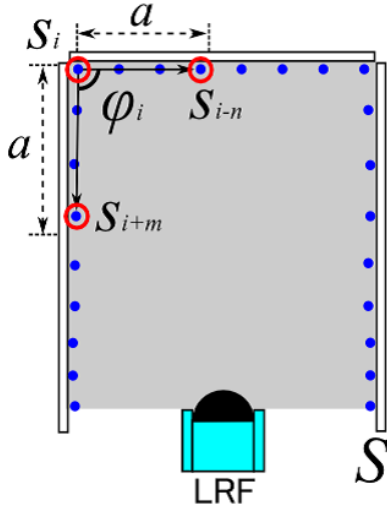


Fig.5 角検出アルゴリズム

Fig.7 に実際の環境を計測したデータ例を示す。Fig.8 はこの計測データについて、対象物の方向 θ における α_i の推移を示している。図に示すように角点では α_i の値が急激に変化していることがわかる。結果より、角点が正確に抽出できていることがわかる。

2.2.3 不連続点の検出

不連続点アルゴリズムの処理を Fig.9 を用いて説明する。同図のような環境ではレーザ光が届かず死角となる部分において LRF の計測データが急激に変化する。不連続点検出アルゴリズムではこの点を検出する。処理の流れは以下のようになっている。また、フローチャートを Fig.10 に示す。

1. N 個の計測データ群 S から i 番目の点 s_i の距離データを d_i とする ($0 < i < N - 1$)。
2. 式 (4) を用いて d_i と d_{i+1} の差分 Δd を求める。
3. Δd がしきい値 d_{th} より大きければ、 s_i , s_{i+1} を不連続点とする。
4. s_i が LRF の最後の点から一つ前の点でない場合 i を 1 つ増加させ 1. に戻る。

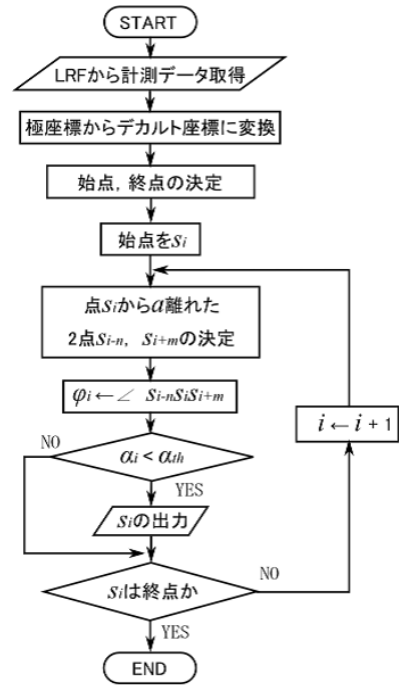


Fig.6 角検出アルゴリズムの処理の流れ

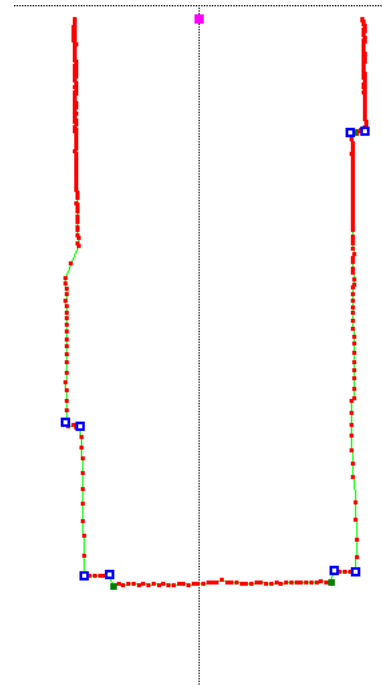


Fig.7 計測データの例

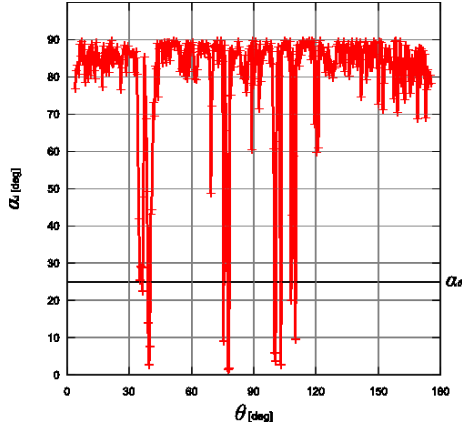
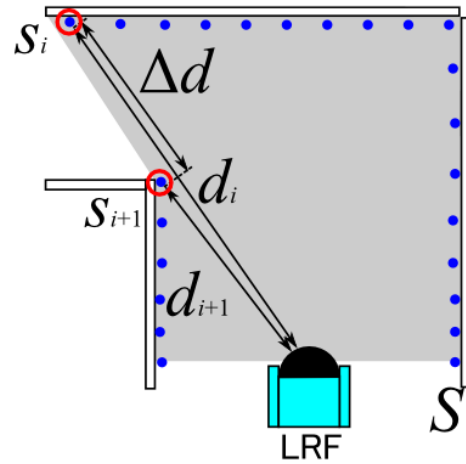
Fig.8 Fig.7における α_i の推移

Fig.9 不連続点検出アルゴリズム

$$\Delta d = |d_i - d_{i+1}| \quad (4)$$

Fig.11 に実際の環境を計測したデータ例を示す。Fig.12 はこの計測データについて、対象物の方向 θ における Δd の推移を示している。図のように不連続点では、 Δd の値が急激に変化していることがわかる。不連続点検出アルゴリズムを適用した結果を Fig.13 に示す。同図における○点はそれぞれ計測点、角点、不連続点を表している。結果より、不連続点が抽出できていることがわかる。しかし、 d_{th} によっては Fig.13 のように計測点の間隔が広いところで過検出が起きてしまうことが考えられる。そこで、不連続点検出アルゴリズムに改良を加え、過検出を減らすことを考える。詳細は省略する。なお、しきい値 d_{th} については 4.1 で述べる実験結果により決定する。

2.2.4 EKF-SLAM における状態方程式

EKF では状態ベクトルが車いすの位置及び姿勢であった。EKF-SLAM では、状態ベクトルが車いすの位置及び姿勢だけでなく、グローバル座標におけるランドマークの位置が含まれる。SLAM における状態ベクトルは以下のように表される。

$$\mu_k = \begin{pmatrix} x_k & y_k & \theta_k & m_{0,x} & m_{0,y} & 1 \\ \cdots & m_{N,x} & m_{N,y} & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

ランドマークの総数を N とすると、状態ベクトルの次元は $(3N + 3)$ である。また、その共分散行

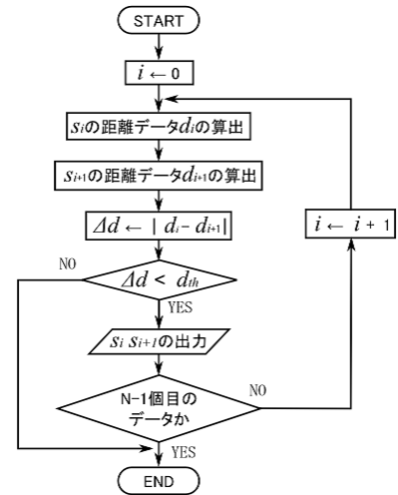


Fig.10 不連続点検出の処理の流れ

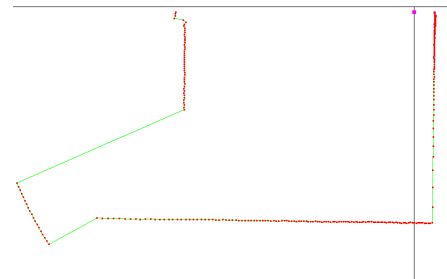


Fig.11 計測データ例 2

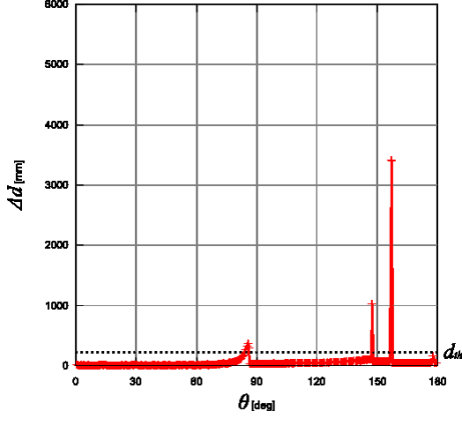


Fig.12 Fig.11 における推移

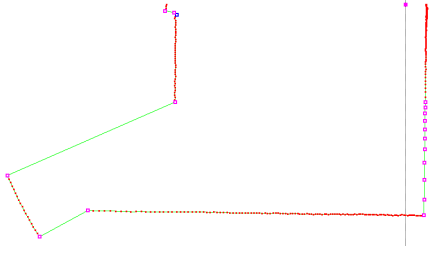


Fig.13 Fig.11 における不連続点検出結果

列 Σ_k の大きさは $(3N+3) \times (3N+3)$ となる．したがって，SLAM における状態方程式は以下のようになる

$$\begin{aligned} \mu_k &= \mu_{k-1} \\ &+ \begin{pmatrix} v_k \cos(\theta_{k-1} + \frac{\omega_k \Delta t}{2}) \Delta t \\ v_k \sin(\theta_{k-1} + \frac{\omega_k \Delta t}{2}) \Delta t \\ \omega_k \Delta t \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + \epsilon_k \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mu_k &= \mu_{k-1} \\ &+ \mathbf{F}_x^T \begin{pmatrix} v_k \cos(\theta_{k-1} + \frac{\omega_k \Delta t}{2}) \Delta t \\ v_k \sin(\theta_{k-1} + \frac{\omega_k \Delta t}{2}) \Delta t \\ \omega_k \Delta t \end{pmatrix} \\ &+ \epsilon_k \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここで，EKF-SLAM においては最初，ランドマークの座標は全て未知である．したがって，状態ベクトル及びその共分散の初期値は以下のように設定する．

$$\mu_0 = \begin{pmatrix} x_0 & y_0 & \theta_0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\Sigma_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \infty & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \infty \end{pmatrix} \quad (10)$$

EKF-SLAM ではロボットの初期位置がグローバル座標系の原点として扱われる．本研究では車いすの初期位置及び姿勢を $(x_0, y_0, \theta_0) = (0, 0, \frac{\pi}{2})$ とした．初期位置はわかっているの共分散行列の車いすの状態に関する部分はゼロ行列となり，ランドマークの位置は未知であるのでランドマークの位置に関する部分の値は無限大である．ここでに見られるように，共分散の値はカルマンゲインに影響を与える．カルマンゲインによって修正ステップにおける修正量の寡多が決定するため，共分散の値が極端に高い値であるとき，発散してしまう可能性がある．そこで，本研究では，初期値の値をある値 A として以下のように設定する．

$$\Sigma_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & A \end{pmatrix} \quad (11)$$

2.2.5 EKF-SLAM における観測方程式

EKF-SLAM における観測ベクトルは EKF のときと同様に LRF から見た特徴点の距離 r と方向 ϕ である．したがって，観測ベクトル，観測方程式は以下のようになる．

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_k &= \begin{pmatrix} r_k \\ \phi_k \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \sqrt{(m_{j,x} - x)^2 + (m_{j,y} - y)^2} \\ \text{atan2}(m_{j,y} - y, m_{j,x} - x) - (\theta - \theta_0) \\ 1 \end{pmatrix} \\ &+ \delta_k \end{aligned} \quad (12)$$

2.2.6 EKF-SLAMにおける予測, 修正, 更新の流れ

EKF-SLAMにおける各ステップの計算は以下のようになる。

$$\mu_k = \mu'_{k-1} + \mathbf{F}_x^T \begin{pmatrix} v_k \cos(\theta_{k-1} + \frac{\omega_k \Delta t}{2}) \Delta t \\ v_k \sin(\theta_{k-1} + \frac{\omega_k \Delta t}{2}) \Delta t \\ \omega_k \Delta t \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\Sigma_k = \mathbf{G}_k \Sigma'_{k-1} \mathbf{G}_k^T + \mathbf{F}_k \mathbf{R}_k \mathbf{F}_k^T \quad (14)$$

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H}_k \Sigma_k \mathbf{H}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (15)$$

$$\mathbf{K}_k = \Sigma_k \mathbf{H}_k^T (\mathbf{S}_k)^{-1} \quad (16)$$

$$\mu_k = \mu_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{h}_k) \quad (17)$$

$$\Sigma_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \Sigma_k \quad (18)$$

$$\mu'_k = \mu_k \quad (19)$$

$$\Sigma'_k = \Sigma_k \quad (20)$$

式(13), 式(14)では状態方程式に従い, 状態ベクトル及び共分散を予測する. ヤコビ行列 $\mathbf{G}_k$ は以下のようになる。

$$\mathbf{G}_k = \mathbf{I} + \mathbf{F}_x^T \begin{pmatrix} v_k \cos(\theta_{k-1} + \frac{\omega_k \Delta t}{2}) \Delta t \\ v_k \sin(\theta_{k-1} + \frac{\omega_k \Delta t}{2}) \Delta t \\ \omega_k \Delta t \end{pmatrix} \mathbf{F}_x \quad (21)$$

また, 式(14)の右辺第2項は $\mathbf{R}_k$ を状態ベクトルの次元まで拡張したものである. EKF-SLAMでは特徴点-ランドマーク間の対応関係が複数得られたときは, 式(15)~式(18)を対応関係が得られた特徴点の個数分繰り返す. ここで, ヤコビ行列 $\mathbf{H}_k$ は車いすの状態と対応関係のとれたランドマークの座標にしか依存していない. 式(19), 式(20)は修正後の状態及びその共分散をその時刻における最適な推定値として更新する。

2.2.7 新しく見つかったランドマークへの対応

ここで, 特徴点間の対応付けアルゴリズムで対応関係が推定されなかった特徴点への対応について述べる. 対応関係が推定されなかった特徴点は新しく観測されたランドマークとして状態ベクトルに追加される. このとき, 共分散行列も2.2.4で述べた初期値 A を設定して同時に拡張される. ここで, 状態ベクトルを追加すると共分散行列も増加するため, 時間の経過に従い, EKF-SLAMの演算量は時間の経過とともに増加する. また, 対応関係が推定されない特徴点は新しく見つかった特徴点だけでなく, 過検出による点であることも考

えられる. したがって, 過検出点まで含めて状態ベクトルを拡張してしまうと, 演算量が大幅に増加してしまうことが考えられる. そこで, 本研究では, これらの対応関係が得られなかった点を状態ベクトルに追加する前に一時的に保存しておく領域を確保し, その領域から新たに状態ベクトルに追加すべきランドマークを選び出す. 本研究ではこの領域を暫定ランドマークリストと呼ぶ. また, 暫定ランドマーク中に登録された特徴点を暫定ランドマークと呼ぶ.

暫定ランドマークリストを用いた状態ベクトルの追加は以下のようになる. まず, 新たに得られた特徴点を暫定ランドマークリストに登録する. その後, 次の対応関係推定時において, モデルとして状態ベクトルに登録されているランドマークだけでなく, 暫定ランドマークに登録されている暫定ランドマークを含めてモデルとし, 対応関係を推定する. ここで, 状態ベクトルに追加すべき暫定ランドマークは以降の観測データでも特徴点として抽出される可能性が高い. したがって, 各暫定ランドマークに評価値を設定し, 対応関係推定時に現在観測された特徴点と対応関係が得られるたびに評価値を足していく. そして, あるしきい値を設け, しきい値を超えた評価値をもつ暫定ランドマークを新しいランドマークとして状態ベクトルに追加する. この暫定ランドマークリストによって, 不要な特徴点が状態ベクトルに追加されることを防ぐことができる.

3. 地図生成

前述のEKF-SLAMを適用することにより, 車いすの状態に関する最適な推定量を得ることができる. よって, LRFのスキャンデータを用いて車いすの初期位置を原点とする周囲環境地図を構成することができる. 本研究では, LRF座標系で表現されたLRFのスキャンデータを車いすの現在位置, 及び姿勢を用いてグローバル座標に写像し, これを重ね合わせることで, 周囲環境地図を構成する. 処理の流れは以下のようになる

$$\begin{pmatrix} sx'_{k,l} \\ sy'_{k,l} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\mu_{k,\theta} - \theta_0) & -\sin(\mu_{k,\theta} - \theta_0) \\ \sin(\mu_{k,\theta} - \theta_0) & \cos(\mu_{k,\theta} - \theta_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} sx_{k,l} \\ sy_{k,l} \end{pmatrix} + d_{LRF} \begin{pmatrix} \cos \mu_{k,\theta} \\ \sin \mu_{k,\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mu_{k,x} \\ \mu_{k,y} \end{pmatrix} \quad (22)$$

処理結果をFig.14に示す. より, 正しく周囲環境が表現できていることがわかる. しかし, 単に重ね

合わせるだけでは、移動するに従いデータ数が膨大になる．また、後述する自動走行のための走行領域の検出時における処理の複雑性が増す．そこで、本研究では環境を格子状に区切り、その一つ一つの格子が占有されているかどうかを確率的に表現する占有格子地図 (Occupancy grid map) を用いる．ここで、各格子のことをセルと呼ぶ．占有格子地図におけるセルはその占有度合いに応じて 0～1 の値をもっており、数値が高いほど、そのセルが占有されている確率が高い．この占有格子地図を用いることで、セルの占有度合いを参照することで障害物の有無を判定でき、効率的に処理することが可能になる．占有格子地図の例を Fig.15 に示す．

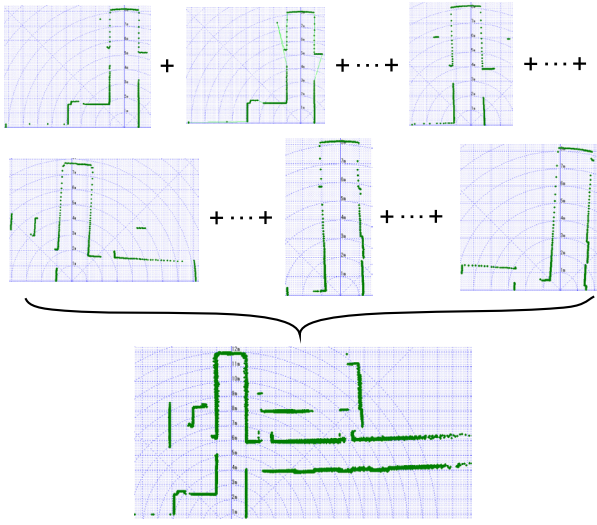


Fig.14 重ねあわせによる地図生成

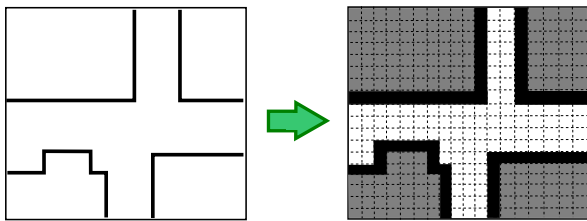


Fig.15 占有格子地図の概要

占有格子地図について述べる前に、センサのモデルを設定する必要がある．本研究で使用する LRF は非常に指向性が高い．したがって、Fig.16 のような直線状のビームモデルとする．このとき、時刻 $t = k$ における (i, j) 番目のセルの占有度 $p_{k,i,j}$ は以下の式で更新される．

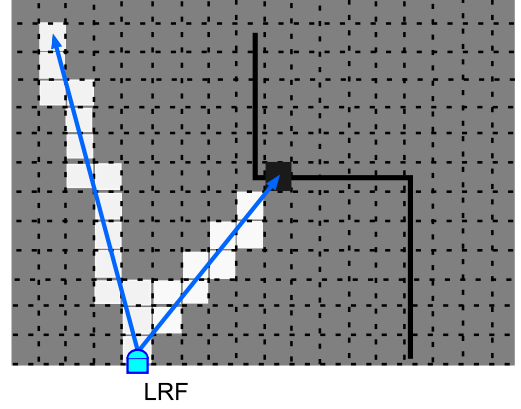


Fig.16 LRF のビームモデル

$$p_{k,i,j} = p_{k-1,i,j} + \frac{\rho_{k,i,j}}{1 - \rho_{k,i,j}} + \frac{p_0}{1 - p_0} \quad (23)$$

本研究では、 $p_0 = 0.5$ とすることでの右辺第 3 項を 0 とし、セルの更新における初期値の影響を取り除く．各セルの占有度は $\rho_{i,j}$ が 0.5 より小さければ占有度が減少し、0.5 より大きくなれば占有度が増加する．

センサモデルは LRF の測定点及び、LRF と測定点とを結ぶ線分上のセルにのみ適用する．したがって、それ以外のセルについては占有度の更新処理を適用しない．さらに、占有度に対して「空」、「未知」、「占有」の 3 種類のラベルをつけて区別する．具体的には占有度 0.25 以下で「空」、0.25～0.75 のとき「未知」、0.75 以上のとき「占有」とラベル付けする．各しきい値については経験的に設定した．また、各セルの大きさは一般に精度と処理時間とのトレードオフの関係にある．本研究では経験的にセルの大きさを 4cm×4cm の正方形とした．Fig.14 のデータに対して占有格子地図を生成した結果を Fig.17 に示す．図において、占有度は色の濃淡で表される．黒い部分ほど占有されている確率が高い．図より、確かに、廊下の壁などの障害物がある部分については黒く、走行可能な場所は白くなっていることがわかる．

4. 実験

4.1 特徴点抽出アルゴリズムの評価

2.2.1 で述べた特徴点抽出アルゴリズムの各しきい値を決定するため、様々な環境における特徴点抽出実験を行った．LRF の設定は視野角度 180°、角



Fig.17 占有格子地図生成結果例

度分解能 0.5° ，最大測定距離 8m とし，床に置いて計測した．実験は鳥取大学電気電子工学科棟4Fの3箇所を計測し，得られたデータに対してしきい値を様々に変えて特徴点抽出アルゴリズムを適用した．評価の指標には，適合率 (P)，再現率 (R) 及び F 値を用いる．適合率は過検出に対する指標を表し，再現率は欠落に対する指標を表す． F 値はそれらの調和平均で表され， F 値が高いほど精度が高い．三つの値は以下の式で表される．

$$P = \frac{\text{(抽出された正しいデータ数)}}{\text{(抽出された全データ数)}} \quad (24)$$

$$R = \frac{\text{(抽出された正しいデータ数)}}{\text{(抽出すべき正しいデータ数)}} \quad (25)$$

$$F = \frac{2PR}{P + R} \quad (26)$$

4.1.1 角検出アルゴリズム

初めに，角検出アルゴリズムの評価を行った．廊下の角検出において，しきい値 a を $60\text{mm} \sim 100\text{mm}$ の範囲とし 10mm 間隔で計測した．また， α_{th} を $15^\circ \sim 40^\circ$ まで 5° 間隔に変更し，適合率と再現率，及び F 値を求め，最適なしきい値を決定した． F 値をグラフにしたものを Fig.18 に示す．グラフより，しきい値 α_{th} が大きくなれば F 値が増加している傾向がわかる．また，点間隔 a については増加するに従い，若干ではあるが減少傾向にあることがわかった．実験より，点間隔 $a = 60\text{mm}$ ，しきい値 $\alpha_{th} = 35^\circ$ のとき最大値 0.822 を得た．

4.1.2 不連続点検出アルゴリズムの評価

不連続点検出において，しきい値 d_{th} を $100\text{mm} \sim 250\text{mm}$ までの範囲とし 10mm 間隔で変化させ，適合率と再現率， F 値を求め，最適な d_{th} を決定した．なお，この実験では述べた不連続点検出の改良を行っていない．Fig.19 に F 値をグラフにしたも

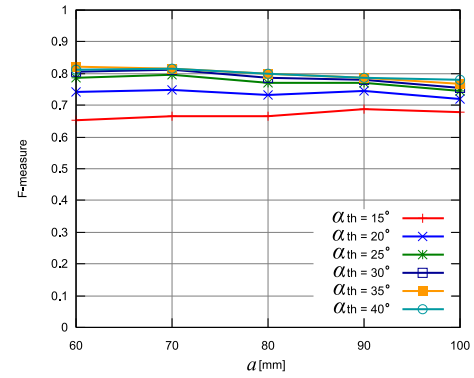


Fig.18 廊下の角検出結果

のを示す．図より d_{th} の増加にしたがって F 値が増加していることがわかる．ここで， $d_{th} = 100\text{mm}$ のとき再現率が 1.00 となっている．そこで，本研究における不連続点アルゴリズムは再現率を重視し， $d_{th} = 100\text{mm}$ を最適とし，適合率の改善を試みる．

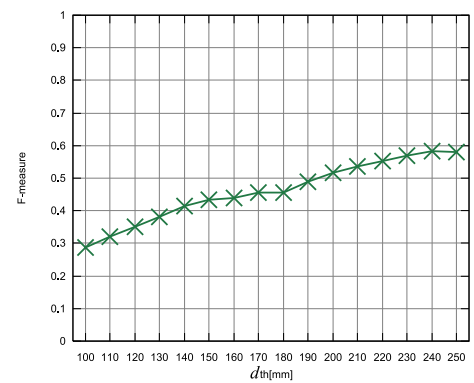


Fig.19 不連続点の検出結果

4.2 EKF-SLAM の評価実験

EKF-SLAM の性能を評価するため走行実験を行った．Fig.20 に示す環境において車いすをジョイスティックにより走行させ，EKF-SLAM を適用して自己位置推定，占有格子地図の生成を試みた．コース C は直進約 13m のコース，コース D は左旋回を含めた約 15m のコースである．車いすの走行速度は 1km/h である．両コースとも 5 回ずつ走行させ，自己位置推定結果と実際の位置とのずれを比較する．比較対象として，EKF-SLAM を適用した場合と，エンコーダ信号から得られるオドメトリのみを用いた場合とを比較した．ここで，グローバル座標は車いすの初期位置を原点，姿勢と

平行に y 軸，右手方向に x 軸とする．したがって，コース C ではグローバル座標が Fig.20 中の破線の xy 座標系となり，コース D においては中の点線の $x'y'$ 座標系となる．

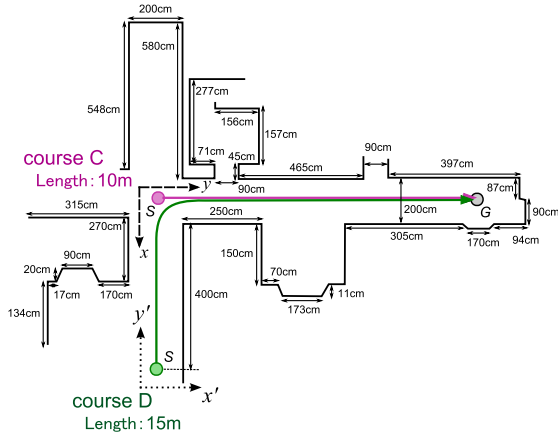


Fig.20 走行実験環境

Table2, Table3 にそれぞれのコースでの比較結果を示す．また，Fig.21, Fig.22 に走行時に作成した占有格子地図を示す．コース C においてはオドメトリのみと比べて推定結果が改善しているが差はあまり見られない．これはコース C は直進のみのコースであり，単純な動きであるために差が表れなかったものと思われる．3 回目の姿勢角推定結果の誤差が他と比べて高い．このとき，生成した占有格子地図は GOAL 地点付近の地図が歪んでいることがわかる．これは GOAL 地点付近では得られる特徴点の数が少なく，特徴点間の対応付け処理時に対応関係を誤ったためと考えられる．

コース D は右旋回動作が含まれたコースである．動作が増え，走行距離も長くなっているため，オドメトリのみでの推定結果は真値とのずれが大きくなっている．しかし，EKF-SLAM の結果については，ずれがコース C と同程度であることがわかる．また占有格子地図も作成できていることが確認できた．

5. まとめ

本章では，LRF のデータに EKF-SLAM を適用することで車いすの自己位置及び周囲環境を推定し，占有格子地図として表現する手法を検討，実装した．本研究では LRF のデータから環境中の幾何形状に注目して，廊下の角を抽出し，これをランドマークとすることで，EKF-SLAM を適用する．さ

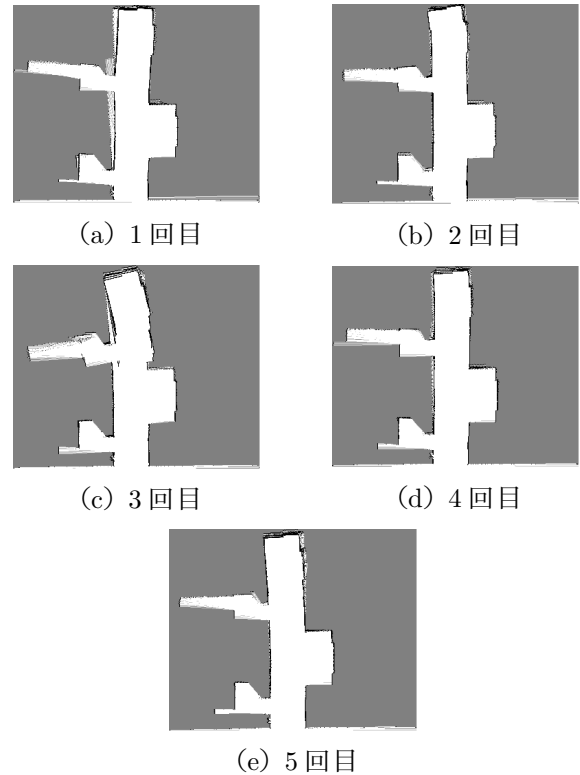


Fig.21 占有格子地図生成結果 (コース C)

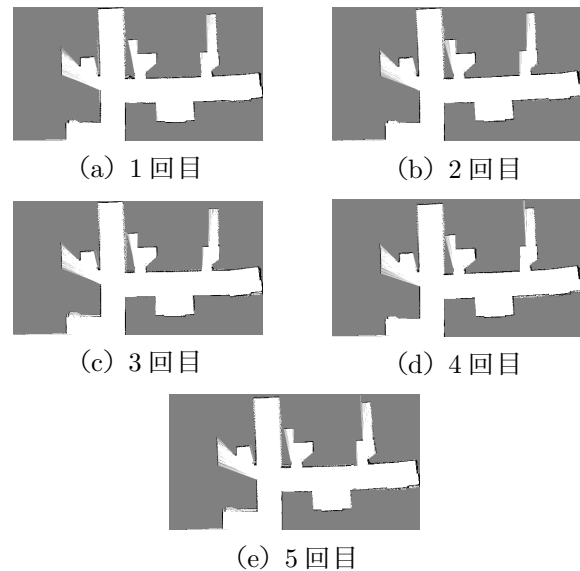


Fig.22 占有格子地図生成結果 (コース D)

Table 2 自己位置推定比較結果 (コース C)

回数	実際の位置, 姿勢			EKF-SLAM			Odometry		
	$x[\text{cm}]$	$y[\text{cm}]$	$\theta[^\circ]$	$x_{\text{error}}[\text{cm}]$	$y_{\text{error}}[\text{cm}]$	$\theta_{\text{error}}[^\circ]$	$x_{\text{error}}[\text{cm}]$	$y_{\text{error}}[\text{cm}]$	$\theta_{\text{error}}[^\circ]$
1	-23.5	1046	96	1.86	-12.65	0.52	2.92	-24.28	-2.57
2	-6	1030	92	-9.04	-10.80	5.31	10.87	-19.68	-2.47
3	-15.5	1007.5	87	-6.38	-15.10	16.27	0.23	-22.29	2.53
4	-13.5	1013	89	13.90	-16.78	2.24	4.20	-23.40	0.06
5	-14.5	1028	90	3.29	-16.26	2.31	13.43	-21.29	0.78
6	-1	1050.5	85	-8.46	-17.71	2.10	10.19	-23.74	-2.96

Table 3 自己位置推定比較結果 (コース D)

回数	実際の位置, 姿勢			EKF-SLAM			Odometry		
	$x[\text{cm}]$	$y[\text{cm}]$	$\theta[^\circ]$	$x_{\text{error}}[\text{cm}]$	$y_{\text{error}}[\text{cm}]$	$\theta_{\text{error}}[^\circ]$	$x_{\text{error}}[\text{cm}]$	$y_{\text{error}}[\text{cm}]$	$\theta_{\text{error}}[^\circ]$
1	1036.5	508	-1	-2.78	18.89	5.74	-10.11	-79.87	-5.87
2	1005.5	484	-3	-3.82	26.14	8.78	-6.67	-48.48	-2.16
3	998	502.5	3	-5.55	13.13	4.63	-10.19	-28.80	-3.16
4	968	515	1	-6.65	31.95	5.60	-6.31	-44.94	-3.50
5	981	504.5	-1	-6.40	28.27	4.69	-6.57	-31.22	-2.13

らに、得られた車いすの自己位置から LRF のデータを占有格子地図上に反映する。

走行実験を通して、EKF-SLAM の有効性が確認でき、また、占有格子地図についても正しく周囲環境を表現できることを確認した。本手法により、システムは占有格子地図を通して周囲環境を正確に把握することが可能となる。したがって、占有格子地図を用いて、障害物回避など、車いすの走行制御を行うができると考えられる。

本手法では、LRF のスキャンデータから特徴点として廊下の角を抽出している。しかし、平たい壁が続く廊下などを走行する場合、特徴点が抽出できないため、自己位置や周囲環境の推定精度が悪くなることが考えられる。したがって、今後の課題として抽出する特徴点の検討などがあげられる。

6. 謝辞

この論文は当研究室の齊藤剛史助教（現九工大准教授）、尾崎知幸技術専門職員との共同研究を筆者がまとめたものである。ここに心より感謝致します。具体的な実験ならびにデータ処理に関しては当研究室の院生村井彰君の修士論文に負うところが多大でここにお礼申し上げます。最後に本研究の一部は科学研究費基盤研究 (C) (21500515) の助成を受けたことについてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 橋場参生, 中島康博, 音声操作型電動車椅子の開発と評価, 信学技報, WIT2002-66, pp.29-34, (2002).
- 2) 高強, 西原主計, 音声制御の車椅子, 信学技報, SSS2003-1, pp.1-4, (2003).
- 3) 小宮加容子, 中島康博, 橋場参生, 景川耕宇, 黒須 顕二, 狭い空間における音声指令による電動車いす走行テスト, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.69, No.688, pp.210-217, (2003).
- 4) G. Pires, U. Nunes, A wheelchair steered through voice commands and assisted by a reactive fuzzy-logic controller, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.34, No.3, pp.301-314, (2002).
- 5) L.M.Bergasa, M.Mazo, A.Gardel, R.Barea, L.Boquete, Commands generation by face movements applied to the guidance of a wheelchair for handicapped people, International Conference on Pattern Recognition, Vol.4, No.12, pp.4660-4663, (2000).
- 6) 後藤 健志, レーザレンジファインダを用いた電動車椅子の操縦補助システム, 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻, 修士論文, (2002).

- 7) 石和 淳子, 富沢 哲雄, 大矢 晃久, 油田 信一, 測域センサを用いた移動ロボットの狭空間走行, 第6回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, Vol.2D3-1”, pp.587-588, (2005).
- 8) Ohnishi, N and Imiya, A, Corridor navigation and obstacle avoidance using visual potential field, In Canadian Conference on Computer and Robot Vision, pp.131-138, (2007).
- 9) 齊藤 豊, 安 弘, 吉野 貴光, 柏本 大輔, 益田 智, 勝又 幹夫, 岡本 孝一, 狭路走行を含む未知環境での車輪型移動ロボットの障害物回避法, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文集, Vol.2000, pp.101, (2000).
- 10) Denis Wolf and Gaurav S. Sukhatme, Online Simultaneous Localization and Mapping in Dynamic Environments, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2004).
- 11) 三澤 正志, 吉田 智章, 油田 信一, 自律的帰還機能を持つ荷物運搬用電動台車の開発, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.8, pp.55-62, (2007).
- 12) Young-Ho Choi and Tae-Kyeong Lee and Se-Young Oh, A line feature based SLAM with low grade range sensors using geometric constraints and active exploration for mobile robot, Autonomous Robots, Vol.24, pp.13-27, (2008).

(受理 平成22年10月29日)

Measurement of the Acidity and Fine-control of the Pore-opening Size of Zeolites

Miki NIWA

Department of Chemistry and Biotechnology, Graduate School of Engineering,
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: miki.niwa@gmail.com

Abstract: Zeolite has the fine property of strong acidity and micro porosity, with which active and selective catalysts are developed. Our studies on zeolites, measurement of the acidity using ammonia temperature programmed desorption and fine control of the pore-opening size by chemical vapor deposition of silica, are reviewed.

Key Words: Zeolite catalyst, Acidity, Silica CVD

1. Introduction

It is my proposal as Editor that the professor belonging to the Faculty of Engineering summarizes his/her study upon his/her retirement, and submits it to the Research Activity Report. Because this is not the duty, we can select either to write or not to write the review. I am not sure the statistics in detail, however more than 50 % of the retired professor seems to accept an invitation of the review submission. The submitted review is uploaded to the homepage of the Graduate School automatically, and therefore everybody can read the review freely. I think, therefore, that the submission of the review to the Graduate School of Engineering is, more or less, effective to make everybody known of our research activity in Tottori University. Google and Yahoo search engines probably will find the research activity uploaded in our home-page.

I want to review my studies on zeolite catalysts, because these are my most important studies carried out in this University as well as in Nagoya University [1]. However, the review on these studies is not new at all, because I had a lot of chance to summarize these investigations in various journals of the academic society. Therefore, I want to report our research activity which is strongly associated with the student activity. Some of them are thus personal reports which were not written in the published paper. This is consisted of two parts; first, zeolite acidity, and second, chemical vapor deposition of silica. The former part has already been published in Chonnam National University, Korea, because it was written upon request by Prof. Dr. Jong-Ho Kim who is used to

belong to our department.

2. Measurement of the acidity

2.1 Number of the acid site

Acidity of zeolite is created by an Al atom incorporated in the zeolite framework, and the acid strength is governed by the structure of the acid site consisting of Si, Al and O atoms. Number of the acid site is relatively easy to know the significance. The *h*-peak (high temperature peak) of the ammonia TPD tells us the number of ammonia adsorbed on the acid sites. However, in the usual conditions, the number of acid site is limited due to the spatial requirement. It is interesting to know the number of acid site on the Y zeolite, because it is limited by the surface concentration. One day, a student (Kageyama kun) reported me his experimental result of the Y zeolite acidity. I surprised to see his experimental result because the number of acid site was too large to be expected. Usually, number of the acid site is less than 1.5 mol kg^{-1} of the zeolite. If the number of the acid site is greater than this value, usually something is wrong.

Ammonia TPD experiment is easy to do in my laboratory, because everybody depends on the automatic apparatus. They measure the amount of sample and installed it in the TPD cell. After the sample is set in the apparatus, they have nothing to do, and next day the experimental result is shown on the computer desk. Therefore, nobody has the mistake of the experiment. What is the reason of the too large experimental finding? Because he measured the acidity of the ammonium Y zeolite was the reason. He did not know a precise procedure of the experi-

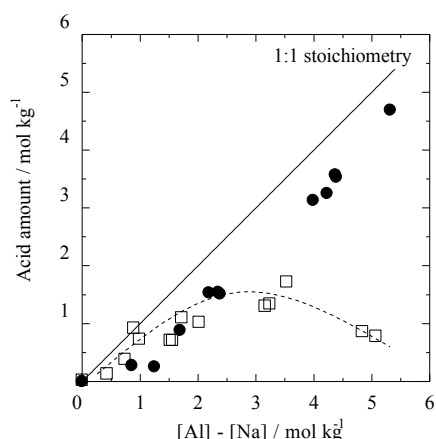


Fig. 1. Number of the acid site against the Al-Na concentration on *in situ* (●) and *ex situ* (□) prepared Y zeolites.

ment of zeolite, because he was an undergraduate student and studied the zeolite for just a few months. However, his mistake told us an important character of the zeolite acidity. Usually, we prepare the proton type zeolite by removing ammonia from the ammonium type zeolite at such a high temperature as 773 K. After the treated sample is stored in a sample bottle or exposed to the atmosphere, the experiment of the ammonia TPD is carried out. However, Kageyama kun skipped the pretreatment of the sample. From the observation, we understand that Y zeolite has shown the solid acidity due to the included Al atom even when the number of acid site is greater than 1.5 mol kg^{-1} , as far as it is unexposed to the atmosphere. We named such a prepared zeolite, *in situ* prepared Y zeolite, which is discriminated from the *ex situ* (usually) prepared zeolite. Figure 1 shows the experimental observations of the solid acidities of *in situ* and *ex situ* prepared Y zeolites [2]. *In situ* prepared Y zeolite shows the acidity which almost agrees with the number of Al up to 5 mol kg^{-1} of the framework concentration. However, the *ex situ* prepared Y zeolite shows the number of acid site which is less than 1.5 mol kg^{-1} , and the volcano-shape relation between the numbers of acid site and of Al concentration was observed. Too many atoms of Al do not show the solid acidity. From the observation, we can understand that the acid sites are collapsed when too many sites are condensed in a limited surface.

Because the specific surface area of zeolite is about

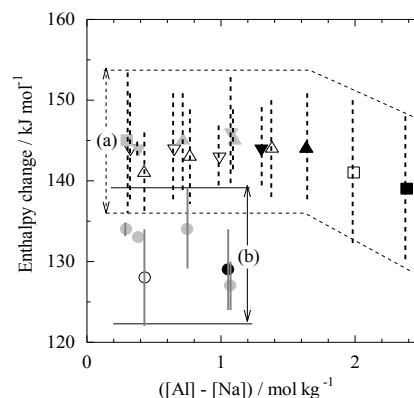


Fig. 2. ΔH as a parameter of the acid strength against the Al-Na concentration on H-mordenite (a) anZSM-5 (b).

$400 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, the maximum surface concentration of the acid site is *ca.* 2 nm^{-2} . In other words, the surface concentration of the acid site does not exceed 2 nm^{-2} . Acid sites do not exist when the surface concentration is over 2 nm^{-2} . On the highly condensed conditions, the acid sites interact mutually to destroy the site each other, *i.e.*, a spontaneous collapse of the acid site is expected. It is further proved by an experiment that water (humidity) helps to break the acid sites. Therefore, we named it a *maximum* surface concentration of the acid site. This is an important observation of the character of the acid site.

The concept of the maximum surface concentration of the acid site is an idea applicable also to the metal oxide monolayer catalysts. Vanadium, molybdenum, tungsten, and sulfated anion oxides loaded on tin, zirconium, and titanium oxides show the solid acidity of which the surface concentration do not exceed the value of *ca.* 2 nm^{-2} . Therefore, this value is useful to study the solid acidity.

2.2 Strength of the acid site

On the other hand, the concept of strength is not easy to understand. The most simple and incorrect idea is the strength measured from the temperature of the ammonia desorption. It looks like correct, but contains a serious mistake. Temperature of the ammonia desorption is influenced strongly by the experimental conditions as well as by the number of the acid site. It is not difficult to find the incorrect ex-

planations of the strength of acid sites even in the famous international journal. So many papers report the strength just by measuring the temperature of the ammonia desorption, but these are not correct.

We first observed that the temperature of ammonia desorption was influenced by the contact time of the carrier gas, W/F, when we studied the ammonia TPD in the occasion of the project of the reference catalyst, catalysis society of Japan. Temperature shifted to high with increasing the W/F by about 200 K. Such a large shift of the temperature was caused by changing the contact time of the carrier gas largely. Usually, it is difficult for a single researcher to change the W/F so largely, because the apparatus does not allow the experiments.

After many studies had been carried out, we arrived at the conclusion of a correct understanding of the ammonia TPD experiment. Equilibrium is kept always in the TPD experiment between ammonia molecules on the surface of zeolite and in the gas phase, and a small portion of ammonia molecules is desorbed to show the profile of desorption, *i.e.*, ammonia TPD.

Thermodynamics and material balance of the ammonia desorption provide us with a simple equation of the ammonia TPD shown below, *i.e.*,

$$C_g = -\frac{\beta A_0 W}{F} \frac{d\theta}{dT} = \frac{\theta}{1-\theta} \frac{P^0}{RT} \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \exp\left(\frac{\Delta S}{R}\right) \quad (1)$$

where θ , β , W , F , P^0 , R , and T are coverage by ammonia, ramp rate of the temperature elevation, weight of the zeolite, flow rate of the carrier, pressure at standard conditions, gas constant, and temperature. A_0 is the number of acid site, and ΔH and ΔS are changes of enthalpy and entropy upon the ammonia desorption. C_g is the concentration of ammonia in the gas phase, and this equation shows that C_g changes with the rate of decrease of θ with T , which is exactly the same as ammonia TPD profile.

The most important and fundamental observation of the TPD experiment is a constant ΔS independent of the zeolite species. Entropy increases upon desorption (phase transformation) and then mixing with helium carrier gas (mixing). The change of entropy upon mixing with helium carrier is calculated from the concentration of ammonia in the gas phase. ΔS upon desorption can be therefore calculated from the experimentally measured value. Finally, ΔS upon desorption is found to be ca. $95 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, which is

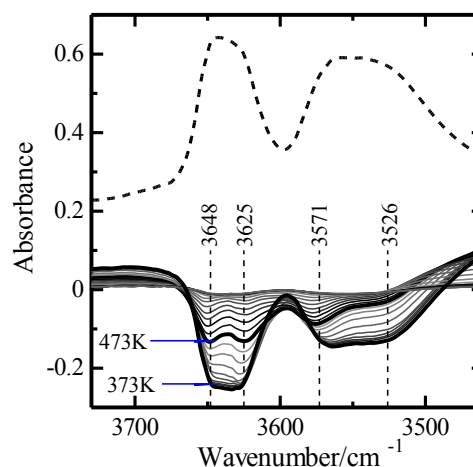


Fig. 3. An enlarged portion of the difference spectra in the region of the Brønsted OH measured by the IRMS-TPD of ammonia on H-Y zeolite: dotted line shows the reference spectrum before the adsorption of ammonia and solid lines show the difference spectra after the adsorption of ammonia.

very similar to the ΔS upon vaporization of liquid ammonia. This means that the change of entropy upon desorption is due to the change of translational energy of ammonia molecule, which supports the theoretical consideration of the ammonia TPD. A constant value of the ΔS gives us the strict background to confirm the validity of derived equation of ammonia TPD. In the laboratory, the ammonia TPD profile is calculated with the Microsoft Excel based on the above equation with a constant ΔS and assumed ΔH in order to simulate the experimentally observed one. Figure 2 shows thus determined ΔH for zeolites mordenite and ZSM-5 with different concentrations of acid sites. The measured ΔH as a parameter of the acid site strength depends on the zeolite crystal structure independent of the concentration of Al. This conclusion about the strength of acidity led to further investigation on the acidity and structure of zeolites.

2.3 Combined study on the zeolite acidity

Ammonia TPD has a serious drawback, because no information is provided for the structure of acid site.

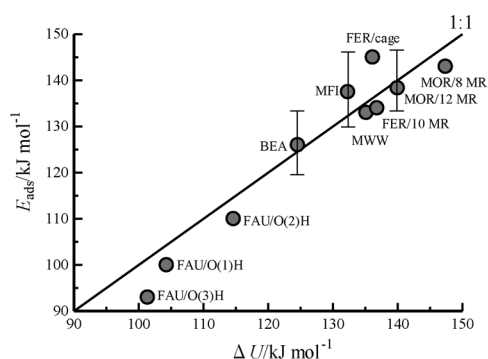


Fig. 4. Correlation between E_{ads} , DFT calculated energy for ammonia adsorption on the Brønsted OH sites and ΔU measured by IRMS-TPD. The value of E was calculated under the periodic boundary conditions of zeolites FAU, BEA, MOR, and CHA. Change of the internal energy for ammonia adsorption ΔU was corrected from ΔH due to the equation $\Delta H = \Delta U + RT$.

It is impossible with usual ammonia TPD to discriminate between Brønsted and Lewis acidities. In order to overcome the drawback, we proposed a method of IRMS-TPD experiment. In this experiment, infrared spectroscopy (IR) is measured simultaneously with the mass spectroscopy (MS). Thermal changes of not only ammonia in the gas phase but also ammonia species on the surface can be measured with this method. Ammonia adsorbed species is identified from the IR observation, and therefore Brønsted and Lewis acid sites can be discriminated. It is possible to measure the site of Brønsted OH independently, when more than two kinds of the site are observed. Thus, individual measurements of number and strength of the acid site becomes possible.

ΔH values as a parameter of the acid strength are now measured for each Brønsted OH on the zeolite, when they are discriminated. The precisely measurements of the ΔH for the Brønsted OH becomes possible by the advancement of the IRMS-TPD measurements. Interesting example of the IRMS-TPD experiment is the measurement on the Y zeolite acidity. Y zeolite has the unique property of the acid sites, because all T site are equivalent. In other words, there is only one kind of the T site. Four oxygen atoms surround the T -site in a tetrahedral configuration. Therefore, there are only four kinds of the Brønsted OH. However, a neutron diffraction

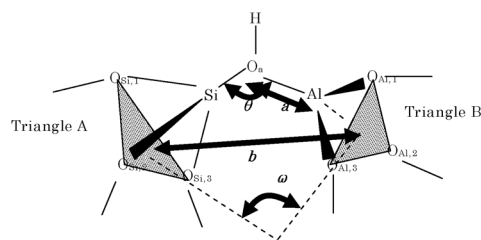


Fig. 5. A Brønsted OH cluster model surrounded by two triangles A and B with parameters of distance a , b and angle ω , θ .

study did not detect one of the four Brønsted OH sites. Experimentally, we can find four kinds of Brønsted OH, as shown in Figure 3 [3]. These sites are identified from the literature data, and by the comparison of IR observation with MS measured ammonia TPD, solid acidities of four kinds of acid sites are measured individually.

IRMS-TPD experiment provides us with an interesting observation of the Brønsted acidity, because the IR observation shows the precise band position of the OH site. Therefore, it is the first time for us to study the solid acidity in a molecular level. With the IRMS-TPD experiment, the precise study of the Brønsted acidity became possible.

Density functional theory (DFT) calculation is also carried out to study the solid acidity in detail. DFT calculated value of energy of ammonia adsorption is easily compared with the experimentally determined value. It is our important advantage that both experimental observation and theoretical calculation are given and compared. Now, we have arrived at a highly advanced stage of the investigation of the solid acidity of zeolites.

DFT calculation is a powerful technique to learn the physical chemistry of zeolite acidity. Without the technique, we have no chance to study the significance of the zeolite acidity. ΔH values measured by the ammonia TPD was once confirmed by the comparison with the values measured by micro-calorimeter. However, there was no further chance to confirm the ΔH values measured by ammonia TPD. The advancement of theoretical understanding of the strength of acidity provides us with a chance to study the solid acidity in more detail. What an impressionable and surprising time we expe-

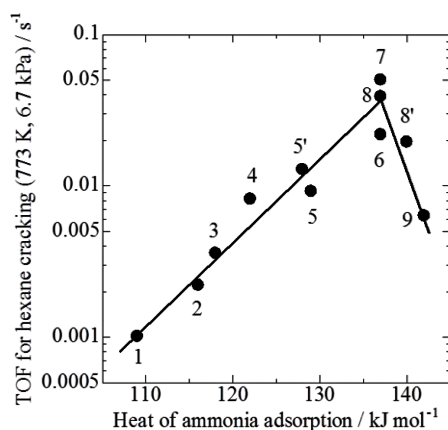


Fig. 6. Correlation between the TOF of hexane cracking at 773 K and the ΔH for ammonia adsorption on zeolites, H-Y (1), LaH-Y (2), BaH-Y (3), CaH-Y (4), ex-situ H- β (5), H- β (5'), H-ZSM-5 (6), EDTA-USY (7), ex-situ H-MCM-22 (8), H-MCM-22 (8'), and NaH-mordenite (9).

rienced, when we calculated the energy for ammonia desorption from the DFT; because the ΔH has been measured from the experiment of ammonia IRMS-TPD based on the derived equation, and also the energy for ammonia desorption is calculated from the quantum chemical theory; and both parameters agree well, as shown in Figure 4 [4].

2.4 Origin of the acidity strength and the cracking catalysis

Two important findings about the acidity are discussed. First topic is on the origin of the acidity. So often we have questions on the origin of the acidity. We stated that the strength is governed by the structure based on the experimental findings. DFT calculation gives us the value of energy as well as the precise parameter of the structure. Therefore, after the calculation, there are uncountable data of the structure of zeolite acidity which could be correlated with the energy parameter. Al-O bond distance and Si-O-Al angle are raised as key geometrical parameters to influence on the strength of acidity. However, precisely analysis of the structure and geometry tells us the strength of the acidity is correlated with both the distance and the angle between two neighbored triangles, as shown in Figure 5 [5]. This means that the compression by two neighbor triangles into the

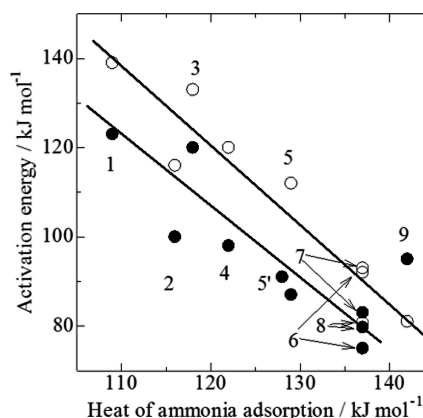


Fig. 7. Activation energy for the cracking of hexane (○) and octane (●) plotted against the ΔH on the zeolites, 1 to 9 referred to in Fig. 6.

cluster $\text{Si}(\text{OH})\text{Al}$ induces the strong Brønsted acidity. The compression to the Brønsted acidity from the surrounding triangle is estimated to be so weak in the meso-porous materials. In fact, the silico-alumino meso-porous materials do not show the strong acidity.

The most important and interesting observation is a relation between the catalytic activity and the solid acidity. Our interest is directed to understanding the activity for the cracking of alkane, octane and hexane. Our approaches to the understanding the catalysis are made by measuring turn-over frequency (TOF) and activation energy. The catalytic activity was measured by controlling the temperature and the partial pressure of alkane so that the mono-molecular reaction was measured. Number and strength of the Brønsted OH were measured in detail. When the multiple sites of the Brønsted OH exist, the accessible and active OH only is selected as active sites. Thus, TOF which is the rate divided by number of the active site is plotted against the ΔH , as shown in Figure 6 [6]. In the cracking of both octane and hexane, the volcano relationships were observed. In both cases, ZSM-5 and MCM-22 which have the ΔH about 135 to 140 kJ mol^{-1} showed the maximum values. Activation energies of the cracking were measured, and these values are plotted against the ΔH as a parameter of acid strength in Figure 7. Activation energies decreased with increasing the strength of acid sites. However, the cracking of octane on NaH-mordenite (in Figure, shown 9) deviates strongly from the rela-

tionship. Further precise study is required to understand the relationship more profoundly. Thus, it will be so interesting to apply the combined technique to understanding the acidity and catalytic activity on various zeolites synthesized and modified by various methods.

3. CVD of silica

3.1 Intention of the modification and findings

Once I was asked, "Why did you try the modification of zeolites by silica? What did you expect from the experiment?" Unfortunately, I did not have a clear and noble intention. I just tried the modification with an intention of changing the catalyst property. I expected first that the alkoxide modified the zeolite totally. To say correctly, I expected that the acidity would be modified by the deposition. Actually, a technical term of chemical vapor deposition was not on our ideas. We understood that our modification would be included in one of the supporting methods of metal oxide. The term of chemical vapor deposition (CVD) was used in the publication of the communication in *Chem. Commun.*, when the Editor changed the title of the paper into a vapor-phase deposition method [7].

The first reagent I have used is silicon tetra-ethoxide $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, which is usually abbreviated into TEOS. However, in the experiment using the reagent, the weight of catalyst did not increase as expected. I thought it was caused by molecular size largeness. And I looked for a smaller molecule, and found silicon tetra-methoxide $\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$ in a catalogue of Shinetsu Silicon. In the next experiment using the silicon-methoxide, I found the increase of weight by the deposition enough to modify the material.

Two experiments were carried out after the modification. Actually, I asked Mr. H. Itoh who was a graduate student to do the experiments; ammonia TPD and methanol conversion were tested on the modified zeolite (mordenite). Ammonia TPD was not changed after the modification. However, product distribution in the methanol conversion changed dramatically. Benzene and toluene were the large molecules formed from the methanol conversion. It was not difficult to reply the question; *i.e.*, only the pore

size is enclosed without the modification of inside structure [8].

Adsorption of water and *o*-xylene on the modified zeolite gave us further clear and interesting findings. Because water and *o*-xylene had the molecular diameters of 0.26 and 0.63 nm, respectively, I studied the adsorption of small and large molecules. Adsorption of water was not changed at all after the modification, but the adsorption of *o*-xylene was suppressed greatly. The adsorption amount of *o*-xylene was so small, and it was expected due to the adsorption on the external surface.

3.2 Excellent shape selective reaction and adsorption

During the study on the CVD of silica, I encountered excellent findings three times; (1) selective cracking of linear alkane in preference to branched alkane on mordenite, (2) selective formation of *p*-xylene among xylene isomers as a result of toluene alkylation and disproportionation on ZSM-5, and (3) separation of oxygen and nitrogen on zeolite A. Among them, the most important study that drew people's attention is undoubtedly the *p*-xylene selective formation. *Para*-xylene is an important raw chemical compound to produce plastics and fiber, and produced by many industrial companies. The first observation was revealed by an experiment of methanol conversion on HZSM-5. Products in the reaction included various alkanes, olefins, and aromatics. Product distribution of the methanol conversion changed small by the deposition of silica; however the distribution of xylene isomers changed greatly, and *o*- and *m*-xylenes were not formed at all with *p*-xylene remained formed selectively at the deposition of silica [9]. Figure 8 shows the excellent shape selectivity to form *p*-xylene among xylene isomers from methanol conversion on the SiHZSM-5, reported in 1986.

Should the study be carried out nowadays, most probably, we would make a patent claim to not only domestic but also international communities. But, we did not have such a research circumstance at the time of 1986, and also we did not understand correctly the importance of the technique. It was 1991 when we published the selective formation of *p*-xylene in the alkylation and disproportionation of toluene [10]. Obviously, it was too late to claim our priority of the

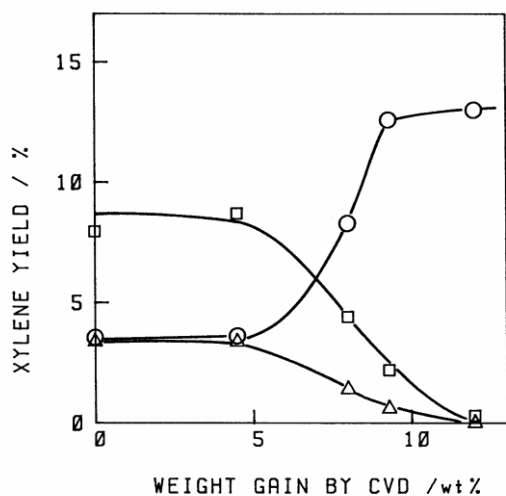


Fig. 8. Xylene isomers yields with increasing the amount of silica deposited on the HZSM-5. O- (Δ), m- ($\square$) and p- ($\circ$) xylenes were formed as a result of methanol conversion.

investigation. A similar study had already been published elsewhere. For example, Prof. Ikai Wang of National Taiwan University published the selective formation of *p*-xylene based on the silica modified HZSM-5. However, he visited us in Nagoya University before the publication, and then studied the CVD technique for their development of the selective catalytic process. (There was a group tour of research on the catalysis from Taiwan, and five to six researchers visited to Nagoya University.) He first proposed a method of *in situ* CVD method, where the extent of deposition was controlled by flowing methanol and toluene simultaneously with alkoxide in order to examine the degree of modification from the selectivity of *p*-xylene formation. This practical method first proposed by Wang was followed by Indian chemical industry and Prof. O' Connor of Cape town. Indian Petrochemicals led by Dr. Halgeri who is used to be a member of Ono laboratory of Tokyo Institute of Technology developed an industrial chemical process of *p*-diethylbenzene production. I guess that some other companies in the world utilized the CVD and a similar technique to develop the shape selective catalytic reaction, but it remained unopened yet.

3.3 Prospects in future study

This technique of silica CVD has been studied by many researchers in the world. On the other hand, similar techniques are studied recently for the development of the shape selective zeolite catalyst. One of them is chemical liquid deposition (CLD) using TEOS. Alkoxide is deposited on the zeolite in the liquid phase of such an organic solvent as heptane. Because of the organic solvent utilization, the temperature of CLD may be maintained at the temperatures lower than 373 K. The amount of deposited silica may be difficult to be correctly measured. Concept of the method is not different from that of CVD. However, fine and successful applications of the method have not seen before. Because I have not yet carried out the liquid phase deposition of silica, further comments on this method is difficult. However, I believe that the silica on the external surface of zeolite could be stabilized in a similar structure, when any kind of methods is adopted, as long as the process conditions are adequately controlled. Selection of the method to deposit the silica depends on the handling easiness and the required cost, *i.e.*, it depends on the economic balance of money and energy.

(Received, October 28, 2010)

References

- [1] M. Niwa, N. Katada, K. Okumura, "Characterization and Design of Zeolite Catalysts; Solid Acidity, Shape Selectivity and Loading Properties", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [2] N. Katada, Y. Kageyama, M. Niwa; "Acidic Property of Y- and Mordenite-Type Zeolites with High Aluminum Concentration under Dry Conditions", *J. Phys. Chem. B*, 104, 7561-7564 (2000).
- [3] K. Suzuki, N. Katada, M. Niwa, "Detection and Quantitative Measurements of Four Kinds of OH in HY Zeolite", *J. Phys. Chem., C*, 111, 894 -900, (2007).
- [4] K. Suzuki, G. Sastre, N. Katada, and M. Niwa, "Periodic DFT Calculation of the Energy of Ammonia Adsorption on Zeolite Brønsted Acid Sites to Support the Ammonia IRMS-TPD Experiment", *Chem. Lett.*, 38, 354-355 (2009).
- [5] N. Katada, K. Suzuki, T. Noda, G. Sastre, M. Niwa, "Correlation between Acid Strength and Local Structure in Zeolite", *J. Phys. Chem. C*, 113, 19208-19217 (2009).

- [6] N. Katada, K. Suzuki, T. Noda, W. Miyatani, F. Taniguchi, M. Niwa, „Correlation of the cracking activity with solid acidity and adsorption property on zeolites” *Appl. Catal., A: General*, 373, 208-213 (2010).
- [7] M. Niwa, H. Itoh, S. Kato, T. Hattori, Y. Murakami: "Modification of H-Mordenite by a Vapour-phase Deposition Method", *J. Chem. Soc. Chem. Commun.*, 819-820 (1982).
- [8] M. Niwa, S. Kato, T. Hattori, Y. Murakami, "Fine Control of the Pore-opening Size of the Zeolite Mordenite by Chemical Vapour Deposition of Silicon Alkoxide", *J. Chem. Soc., Faraday Trans. I*, 80, 3135-3145 (1984).
- [9] M. Niwa, M. Kato, T. Hattori, Y. Murakami, "Fine Control of the Pore-opening Size of Zeolite ZSM-5 by Chemical Vapor Deposition of Silicon Methoxide", *J. Phys. Chem.*, 90, 6233-6237 (1986).
- [10] T. Hibino, M. Niwa, Y. Murakami, "Shape Selectivity over HZSM-5 Modified by Chemical Vapor Deposition of Silicon Alkoxide", *J. Catal.*, 128, 551-558 (1991).

(受理 平成 22 年 10 月 29 日)

タンパク質のフォールディングを補助するシャペロニンの構造と働き

溝端 知宏・河田 康志

鳥取大学大学院工学研究科・鳥取大学大学院医学系研究科

Structure and function of chaperonins, molecular assistants of protein folding

Tomohiro MIZOBATA and Yasushi KAWATA

Graduate School of Engineering and Graduate School of Medical Science, Tottori University

Tottori 680-8552 Japan

E-mail: mizobata@bio.tottori-u.ac.jp

Abstract: Proteins in the cell are routinely exposed to various conditions that promote unfolding and irreversible aggregation. Chaperonins act to prevent protein denaturation and aggregation by sequestering aggregation-prone protein molecules and encouraging recovery. Chaperonin function is supported by various static and dynamic characteristics of its unique structure. This article summarizes some of our results regarding the structural characteristics that support the function of the *Escherichia coli* chaperonin GroE.

Keywords: Protein folding, Stress response, Molecular chaperones, Chaperonins

1. はじめに

タンパク質が生物の中で様々な生理的機能を果たす際、正しい立体構造が形成されている（フォールディングされている）ことが機能発現に不可欠である。環境要因によりこのタンパク質の構造が変化、もしくは失われる（変性する）とそのタンパク質の機能も失われ、大規模なタンパク質の変性は細胞の生存そのものを脅かす。生物にはこのようなタンパク質の大規模変性を防ぎ、細胞を守ることを専門とする分子シャペロンという一群のタンパク質が存在する [1]。

分子シャペロンは、細胞がストレスにさらされた際にタンパク質の構造の保護、タンパク質の増産、そして逆にタンパク質の分解促進など、タンパク質に関連するあらゆる経路のコントロールに関与する。分子シャペロンの中でもシャペロニンと呼ばれるタンパク質は、変性し、会合して沈殿を形成する恐れのあるタンパク質を直接認識し一時的に溶媒から隔離することで構造の再形成を促す。従って、シャペロニンの作用は細胞内におけるタンパク質の構造形成とその維持というシステムを理解する上で大変重要な位置を占める [2]。

2. 大腸菌シャペロニン GroE

大腸菌のシャペロニンタンパク質 GroE は代表的なシャペロニンタンパク質として国内外で熱心に研究されている。GroEL は大小 2 種類のタンパク質分子により構成され、分子量約 57,000 の GroEL タンパク質が 14 分子、分子量約 10,000 の GroES タンパク質が 7 分子会合し、合計 21 量体の複合体を形成する [3] (図 1)。複合体において GroEL は 7 員環のリング状構造を形成し、このリングが背中合わせに会合する形で 14 量体を構成する。GroES は 7 員環リング構造として複合体に結合する。

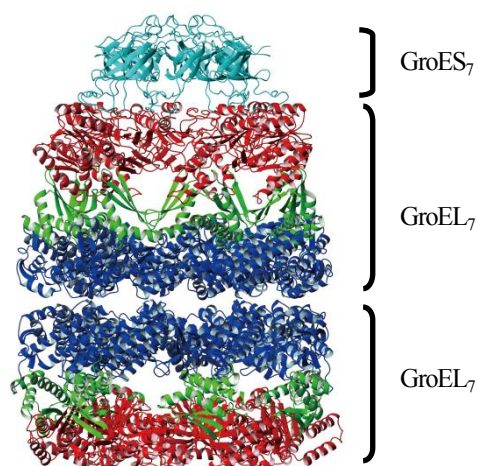


図 1. GroE の立体構造 [3]。GroEL はドメインを示す 3 色（赤、緑、青）で表示され、GroES はシアンで表示されている。本稿のタンパク質立体構造模式図は MOLMOL で作成した [4]。

図1に示したGroEL14量体の上下両端には変性タンパク質やGroESを結合する部位が1カ所ずつ存在する。GroELはアデノシン5' -三リン酸(ATP)を結合し、これを加水分解する活性をもっているが、興味深いことに、ATPを結合していないGroELは変性タンパク質と、ATPを結合したGroELはGroESと優先的に結合する性質を示す[5]。

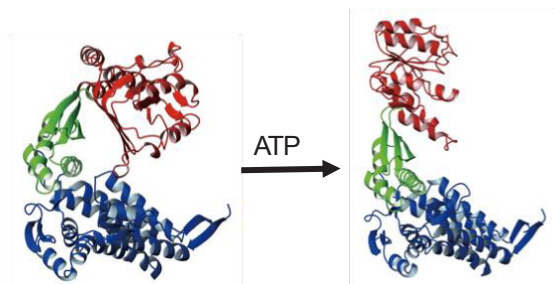


図2. GroESサブユニットのドメイン構造[3]。赤；頂上ドメイン，緑；中間ドメイン，青；赤道ドメイン。左側の構造がATPを結合していないGroELの構造で、ATPの結合に伴い、サブユニットの構造は右の構造へと変化する。

ATPの結合に応じて変性タンパク質とGroESに対する親和性を切り替えるGroELのサブユニット構造は3個の「ドメイン」と呼ばれる構造単位により構成される(図2)。赤道ドメイン(図2, 青)はGroELの7員環リング同士が会合する部位であり、14量体構造の中央(赤道)に位置する(図1参照)。ATPの結合・加水分解部位も赤道ドメイン内に存在する。GroELの頂上ドメイン(図2, 赤)はGroEL14量体の両端にある変性タンパク質・GroES結合部位を形成しており、ATPの結合状態に応じて変性タンパク質やGroESとの結合を切り替える働きを直接担当している。この2個のドメインの間に挟まれる形で中間ドメイン(図2, 緑)が存在し、赤道ドメインと頂上ドメインの間で情報を伝達する役割を担っている[6]。

GroEが変性タンパク質を認識し、GroESとともに自身の構造内部に取り込むまでの反応過程を図3に示した。疎水性の高い部位を露出させた変性タンパク質が近づくとGroELはその疎水部位を頂上ドメインで認識し、結合する。次に、変性タンパク質を結合した側のGroEL7員環にATPが結合するとGroELは大規模な構造変化を起

こし、GroESと結合する構造へと変化する。このとき、先に結合していた変性タンパク質はGroELのリング中央部に誘導され、この上にかぶさるようにGroESが結合してカプセル状のGroEL・タンパク質・GroES3者複合体を形成する。

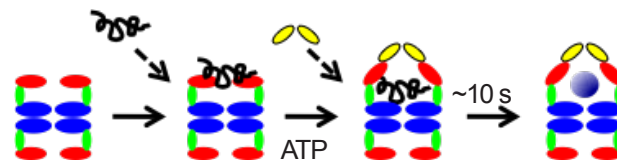


図3. GroEの反応メカニズムを示す模式図[2]。この図ではGroELが変性タンパク質と結合し、GroESとともにカプセル状の複合体に隔離して約10秒間、構造再形成を促すまでの反応過程を示す。

この複合体はGroELがATPをADPに加水分解するまで安定であり(10秒程度)、その後GroELのもう一方のリングに変性タンパク質やATPが結合することでGroESが解離し、そして閉じ込められたタンパク質が溶媒へ放出される。GroEはこのような変性タンパク質の結合と隔離を2つの部屋で交互に繰り返す、エンジンのような振る舞いを分子レベルで見せる。

我々は、大腸菌内におけるタンパク質の構造と機能維持に大きく関与するGroEの機能メカニズムをより詳細に理解することがタンパク質のフォールディング反応全般に対する理解につながると考え、様々な実験法を活用してGroEを解析し続けている。中でも、GroELのユニークな機能とそのサブユニットの構造との関係を明らかにするために、GroELの様々な変異体を用いて分子メカニズムの解析を続けてきた。

3. GroELサブユニットのドメイン間連携と機能：赤道ドメイン・中央ドメイン間ヒンジの役割

GroELサブユニットは3個の明確なドメインにより構成されているが、それぞれのドメインは蝶番(ヒンジ)と呼ばれる細い部位で連結されており、GroEの結晶構造解析によるとGroELはATPの結合と加水分解に応じてヒンジを支点にドメインの配置を変化させている。

GroEの機能発現にはGroELが変性タンパク質やGroESとのやりとりをダイナミックに変化させる必要があることが推定されたので、我々は特にドメインを連結

するヒンジ領域の重要性に注目し、ヒンジの動きに影響を及ぼすような遺伝子変異の導入とその性格付けを行ってきた。



図 4. Cys138 の位置。図は GroEL サブユニットの ATP を結合していない構造で、図中黄色が Cys138 を表す。

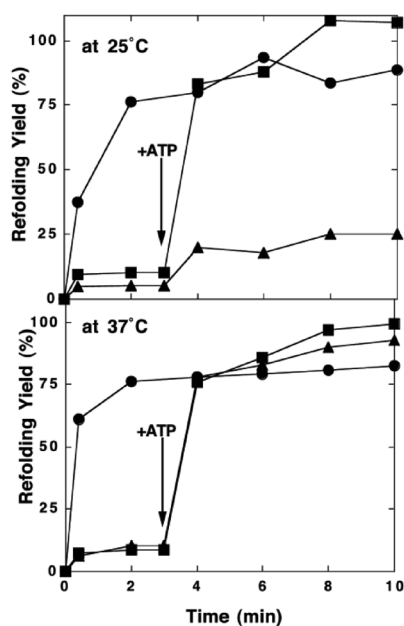


図 5. GroEL C138W 変異体は 37°C でタンパク質のフォールディングを補助するが 25°C では補助できない (文献 [7] より)。図中トリオースリン酸イソメラーゼ (TIM) のフォールディング反応におけるシャペロニンの効果。TIM は自発的に活性構造を開封させる能力を持つが (図中●), GroE が存在するとこれに結合し、フォールディングが停止する。■は野生型の GroEL を添加した反応で、▲が GroEL C138W を添加した反応である。▲では、反応温度により TIM の回復率が大きく変化している。

GroEL の Cys138 はサブユニットにおいて赤道ドメイ

ンと中間ドメインを連結するヒンジ 1 部位に存在し、GroEL の分子表面に露出している (図 4)。このシステイン残基をより側鎖の大きいトリプトファン残基に置換した変異体 (GroEL C138W 変異体) は、不思議なことに 37°C では野生型と同じ機能を発揮したが、25°C では変性タンパク質のフォールディングを補助することができなかった [7] (図 5, ▲)。

GroEL C138W に導入したトリプトファン残基が周りの溶媒環境に敏感な蛍光を発する特徴を利用し、ストップ・フロー蛍光解析装置を用いて ATP の結合に伴う GroEL C138W の動きを追跡した。すると、37°C で GroEL C138W は大きなシグナル変化を見せたが、25°C ではこの信号はほとんど抑制された [7] (図 6)。ATP の結合に伴い、GroEL の赤道ドメインと中間ドメインはヒンジ 1 を中心にその配置を変化させるが、25°C ではトリプトファンの立体障害によりこの変化が大幅に制限されていた。この実験結果より Cys138 近傍の分子内自由度の重要性が示された。

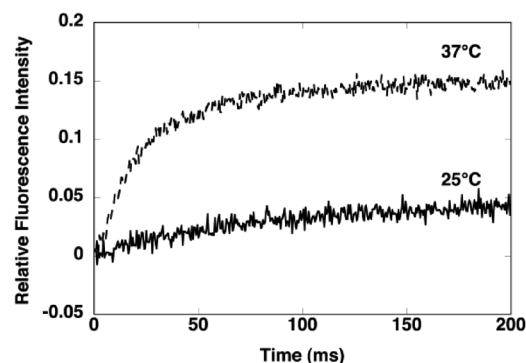


図 6. ATP の添加に伴う GroEL C138W のトリプトファン由来蛍光シグナル変化 (文献 [7] より)。ストップ・フロー蛍光解析により ATP 添加直後のシグナル変化を検出した。実験を行う温度に応じてシグナル変化の度合いが大きく異なることを観測した。

4. GroEL サブユニットのドメイン間連携と機能：中央ドメイン・頂上ドメイン間ヒンジの役割

GroEL の頂上ドメインと中間ドメインはサブユニット構造においてヒンジ 2 という別の部位により連結されている (図 7)。我々はこの部位にも立体障害を生み出すようなトリプトファン残基を導入することで C138W 変異と同じような性質を示す GroEL 変異体が作成できない

か、実験を試みた。

ヒンジ2の内部にはグリシン残基が3個含まれており (Gly374, Gly375, Gly192), この部位はきわめて自由度が高いことが推察された。この3カ所のアミノ酸残基をそれぞれトリプトファン残基に置換した。Gly374→Trp 変異と Gly375→Trp 変異については野生型と全く同じ性質

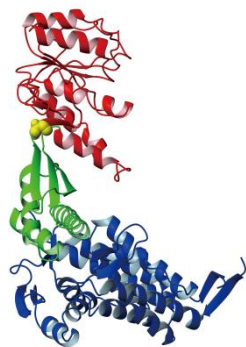


図 7. Gly192 の位置 (図中黄色)。GroEL の構造は ATP を結合した状態を表す。

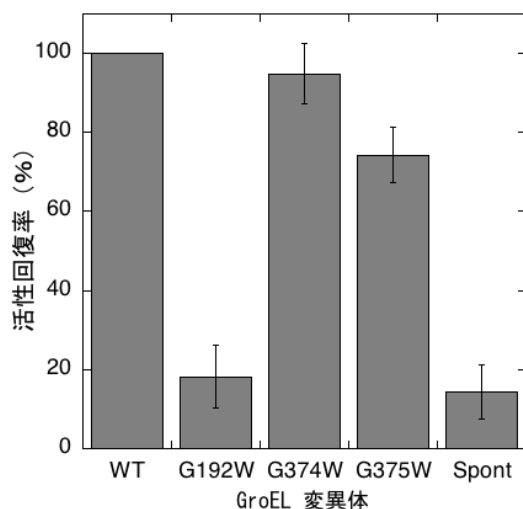


図 8. ヒンジ2部位に導入された GroEL を用いたタンパク質のフォールディング反応 (文献 [8]より)。実験には牛由来ローダニーズを使用し、ローダニーズが完全変性状態から活性を回復する度合いを百分率で示した。反応中に添加した GroE 変異体の種類を横軸に示す。なお、WT は野生型 GroEL を添加した反応、Spont は GroE を含まない自発的な回復反応の結果。図5のTIMの場合とは異なり、ローダニーズは単独で完全変性状態から回復する能力に乏しく、GroE の補助を必要とするタンパク質である。

を示す変異体が得られたが、Gly192 をトリプトファンに置換した場合、タンパク質のフォールディングを補助する能力が大幅に低下した変異体が得られた [8] (図8)。

より詳細な実験を行った結果、GroEL G192W 変異体は ATP が結合していない状態でも GroES と大変強く結合する性質を示すことが判明した。GroEL G192W 変異体はヒンジ2にトリプトファン残基を導入した結果 ATP 結合時の構造にサブユニットが「ロック」された構造をとるようになった [8] (図9)。

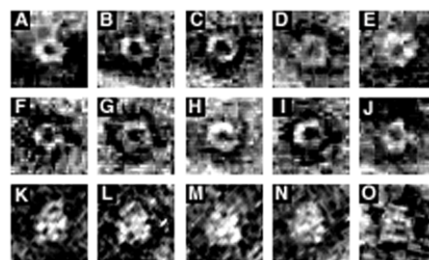


図 9. GroEL G192W 変異体の電子顕微鏡写真 (拡大図; 文献 [8]より)。図中 A~J は ATP を含まない GroEL G192W サンプルの電子顕微鏡写真より分子を上から眺めたイメージをサンプリングしたもの、K~O は同じ写真より分子を横から眺めたイメージをサンプリングしたものである。ATP が添加されていないにもかかわらず K~O のイメージでは GroES を結合する構造に近い GroEL の形状が確認できる (図1 参照)。

GroEL サブユニットの2箇所のヒンジにそれぞれ立体障害を導入するこれらの2種類の研究を通して、GroE の機能発現にはサブユニット全体の動的な振る舞い、特にヒンジを中心としたドメインオリエンテーションの変化がきわめて重要であることが明らかとなった。それと同時に、この2カ所のヒンジ部位は GroE の機能メカニズムにおいて異なる役割を持つこと：すなわちヒンジ2は変性タンパク質やGroES との結合に対応する頂上ドメインの構造を切り替えるために重要で、ヒンジ1はより基盤的な GroEL サブユニットの構造変化と GroEL サブユニット間の連携に重要であることが明らかとなった。

5. 変性タンパク質を閉じ込める空間内部の環境と GroE の機能

表 1. GroEL の C 末端アミノ酸配列領域と C 末端アミノ酸残基削除変異体 (文献 [9]より)

EL-WT	…TTECMVTDLPKNDAA DLGAAGGMGGMGGMGMM –548
EL-dC541	…TTECMVTDLPKNDAA DLGAAGGMGGM –541
EL-dC531	…TTECMVTDLPKNDAA D –531
EL-dC525	…TTECMVTDLP –525
EL-NE	…TTECMVTDLP <u>GGGAAG</u> LGAAGGMGGMGGMGMM –548
EL-HB	…TTECMVTDLP <u>IGIAAI</u> LGAAGGMGGMGGMGMM –548
EL-SC	…TTECMVTDLP <u>PNKADDA</u> LGAAGGMGGMGGMGMM –548
EL-SH	…TTECMVTDLP <u>PRQEGGE</u> LGAAGGMGGMGGMGMM –548

前述のように, GroEL・GroES が形成するカプセルに閉じ込められたタンパク質分子は, GroEL が ATP を ADP に加水分解するまでのおよそ 10 秒間, 溶媒から隔離された状態で構造の回復を試みる (図 3, 右端)。変性タンパク質を閉じ込める GroE カプセルの内側にはグルタミン酸やアスパラギン酸残基が数多く存在し, GroE カプセルの内側はかなり親水性の高い環境であると推定されている。以前の研究において, この親水環境をより疎水性の性質に変化させる変異や, GroE カプセル内の容積 (空間内体積) を減少させる変異を導入すると GroE の機能が損なわれる実験結果が報告されている [10]。我々もまた, GroE カプセルの内部に面した GroEL の特定部位に対し, その役割を同定するために変異を導入し, その効果を調べた。

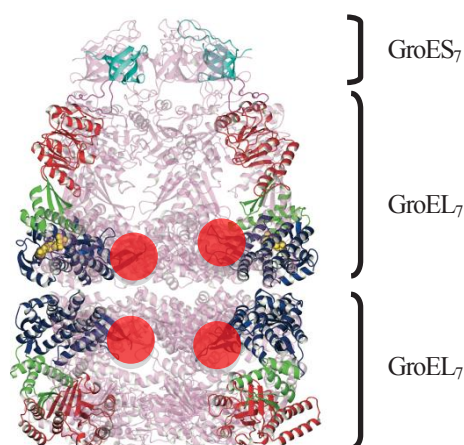


図 10. GroE の内部構造 (断面図) [9]。図 1 の構造を輪切りにし, 内部の構造を可視化した。赤色の円で示した部位に GroEL の C 末端領域が含まれている。

GroEL ポリペプチド鎖の C 末端部位は GroEL サブユニット内では赤道ドメインの内部に相当し, 更に C 末端部分は GroEL の立体構造においてカプセルの「底」の部分に相当する (図 10, 赤丸)。この部位のアミノ酸配列は「GGM」という 3 アミノ酸残基の配列が 4 回繰り返して連結している大変興味深い特徴がある (表 1)。X 結晶構造解析においては GroEL のこの C 末端配列領域の構造を確認することができず, 変性タンパク質を閉じ込めるカプセルの形成にこの部位がどのように役立つのかを実験的に確認するのを感じた。そこで, 我々はこの特徴的なアミノ酸配列を段階的に削除し, アミノ酸の削除が GroEL の働きに及ぼす影響を調べることでこの興味深い配列領域の具体的な役割を調べることにした。

遺伝子操作により GroEL の C 末端アミノ酸配列を削除していき, 特徴的な「GGM」配列をもたない GroEL の変異体をまず 3 種類 (EL-dC541, EL-dC531, EL-dC525) 作成した (表 1)。この変異体の働きを調べたところ, 「GGM」配列の少し上流に存在する別の配列, 「KNDAAAD」という配列部分を削除すると GroEL の機能が急激に損なわれることが明らかとなった (図 11) [9]。

この配列領域は負電荷をもつアスパラギン酸 (D) が 2 個, 正電荷をもつリジン残基 (K) が 1 個含まれ, 非常に親水性の強い配列領域であった。この配列領域を電荷の数がゼロの配列「GGGAAG」(EL-NE 変異体) や疎水性の強い配列「IGIAAI」(EL-HB 変異体) に置換した変異体は大腸菌の生育を支えることができなかった (表 1 および図 12, 左)。しかし「KNDAAAD」配列を並べ替えた変異体 (EL-SC 変異体; NKADDA) や, 同数

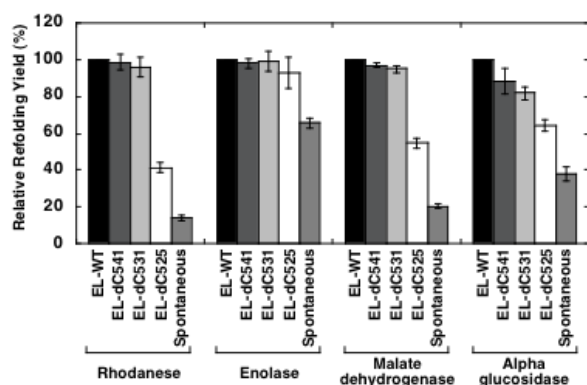


図 11. C-末端アミノ酸を順に削除した GroEL 変異体のフォールディング補助能力評価 (文献 [9]より)。4 種類のタンパク質のフォールディング反応を用いて GroEL と各変異体が活性の回復を補助するか、評価した。図中「100%」とは野生型 GroEL 存在下のフォールディング反応の活性回復率を指す。各酵素について、「Spontaneous」の値より大きいサンプルほど GroEL は積極的にフォールディングを補助していると判断できる。

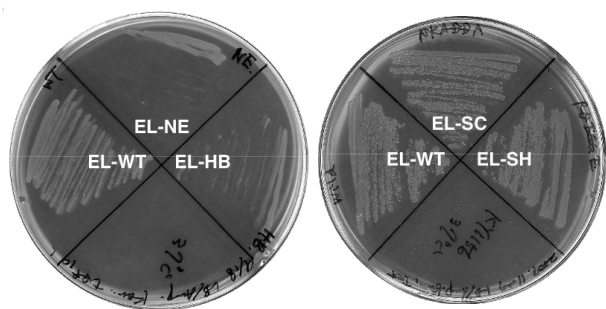


図 12. 各種 GroEL 変異体の機能の評価するための大腸菌生育実験 (文献 [9]より)。GroEL と GroES は大腸菌の生育に必須のタンパク質であり、その機能が失われると生育できない。そこで、野生型 GroEL 遺伝子の代わりに変異型の遺伝子を発現させ、大腸菌の生育の様子を観察することでその変異体が細胞内で機能するか否かを評価することができる。左の培養プレートでは EL-NE 変異体と EL-HB 変異体をもつ大腸菌は 37°C でほとんど生育できず、右のプレートでは EL-SC 変異体と EL-SH 変異体をもつ大腸菌は野生型 (EL-WT) GroEL をもつ大腸菌とほぼ同程度生育することが確認できた。

の電荷をもつアミノ酸配列に置換した変異体 (EL-SH 変異体; RQEGGE) は大腸菌の生育を支えることができた (図 12, 右) [9]。図 11, 図 12 の実験結果より、GroEL

の C 末端アミノ酸配列領域「KNDAAD」は、その静電的性質ゆえにシャペロニンの機能に重要であると考えられた。分子底部に電荷をもつアミノ酸残基を配置することで、カプセルの底面と変性タンパク質との不要な相互作用が防がれ、タンパク質が構造を回復するための微視的環境が整うと思われる。

6. 最後に

シャペロニンは原核・真核を問わずほとんどの生物において普遍的に存在し、細胞の生育に必要な重要な働きを担うタンパク質である。その構造はきわめて複雑で、GroEL・GroES・ATP が緻密に連携しながら多段階の反応メカニズムを実行し、変性したタンパク質のフォールディングを補助する。GroEL や GroES の複雑な構造に様々な変異を導入し、その変異の効果を機能的に評価する実験手法は GroE の反応機構に関する様々な興味深い側面を明らかにすることに貢献してきた。今後は、GroE の構造と機能との間に示唆されている様々な関係を更に解明するため、GroE の研究を積極的に行う。

参考文献

- [1]. Ellis, R. J. & van der Vies, S. M. (1991) Molecular chaperones, *Annual Review of Biochemistry*. 60, 321-347.
- [2]. Fenton, W. A. & Horwich, A. L. (2003) Chaperonin-mediated protein folding: fate of substrate polypeptide, *Quarterly Reviews of Biophysics*. 36, 229-256.
- [3]. Xu, Z., Horwich, A. L. & Sigler, P. B. (1997) The crystal structure of the asymmetric GroEL-GroES-(ADP)7 chaperonin complex, *Nature*. 388, 741-750.
- [4]. Koradi, R., Billeter, M. & Wuthrich, K. (1996) MOLMOL: a program for display and analysis of macromolecular structures, *J Mol Graph*. 14, 51-55, 29-32.
- [5]. Jackson, G. S., Staniforth, R. A., Halsall, D. J., Atkinson, T., Holbrook, J. J., Clarke, A. R. & Burston, S. G. (1993) Binding and hydrolysis of nucleotides in the chaperonin catalytic cycle: implications for the mechanism of assisted protein folding, *Biochemistry*. 32, 2554-2563.
- [6]. Kawata, Y., Kawagoe, M., Hongo, K., Miyazaki, T.,

Higurashi, T., Mizobata, T. & Nagai, J. (1999) Functional communications between the apical and equatorial domains of GroEL through the intermediate domain, *Biochemistry*. 38, 15731-15740.

[7]. Miyazaki, T., Yoshimi, T., Furutsu, Y., Hongo, K., Mizobata, T., Kanemori, M. & Kawata, Y. (2002) GroEL-substrate-GroES ternary complexes are an important transient intermediate of the chaperonin cycle, *J Biol Chem*. 277, 50621-50628.

[8]. Machida, K., Fujiwara, R., Tanaka, T., Sakane, I., Hongo, K., Mizobata, T. & Kawata, Y. (2009) Gly192 at hinge 2 site in the chaperonin GroEL plays a pivotal role in the dynamic apical domain movement that leads to GroES binding and efficient encapsulation of substrate proteins, *Biochim Biophys Acta*. 1794, 1344-1354.

[9]. Machida, K., Kono-Okada, A., Hongo, K., Mizobata, T. & Kawata, Y. (2008) Hydrophilic residues 526 KNDAAD 531 in the flexible C-terminal region of the chaperonin GroEL are critical for substrate protein folding within the central cavity, *J Biol Chem*. 283, 6886-6896.

[10]. Tang, Y. C., Chang, H. C., Roeben, A., Wischnewski, D., Wischnewski, N., Kerner, M. J., Hartl, F. U. & Hayer-Hartl, M. (2006) Structural features of the GroEL-GroES nano-cage required for rapid folding of encapsulated protein, *Cell*. 125, 903-914.

(受理 平成22年10月22日)

業績リスト

—2010—

機 械 工 学 講 座	37
応 用 数 理 工 学 講 座	41
知 能 情 報 工 学 講 座	43
電 気 電 子 工 学 講 座	47
応 用 化 学 講 座	53
生 物 応 用 工 学 講 座	58
土 木 工 学 講 座	59
社 会 経 営 工 学 講 座	64

機械工学講座

リンクルの幾何形状が薄膜のたわみ剛性に与える影響について

岩佐貴史

膜構造研究論文集, No.23, pp.23-27, 2009 年 12 月

衝撃応答時における衛星パネルの減衰モデルの導出とその有効性の検証

岩佐貴史, 施勤忠^{*1} (*¹宇宙航空研究開発機構)

日本機械学会論文集, 第 75 巻, 756 号, C 編, pp.2210-2216, 2009 年 8 月

電着銅薄膜を利用した二軸応力測定法 (粒子成長方向を利用した二軸応力比の符号判定方法)

小野勇一, 李成, 日本機械学会論文集(A 編), 第 75 巻, 759 号, pp.1624-1629, 2009 年 11 月.

Cyclic Stress Measurement Method Using Electrodeposited Copper Foil (Static Stress Effect on Grain Nucleation and Grain Growth)

Ono, Y., Li, C.

Journal of JSEM, Vol. 9, Special Issue, pp.112-117, Sep. 2009.

Simplified Model for Predicting the SRS Envelopes induced from V-band Clamp Separation Device

Shi, Q., Iwasa, T.

11th European Conference on Spacecraft Structures, Materials & Mechanical Testing, Toulouse, France, 15-17 September, 2009.

Cyclic Biaxial Stress Measurement Method Using the Grain Growth Direction in Copper Foil

Ono, Y., Li, C., Hino, D.

Proc. 4th International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, CD-ROM paper, No. MA-III-1, 2009.

Cyclic Pressure Measurement Method Using Electrodeposited Copper Foil

Ono, Y., Li, C., Maruhisa, T.

Proc. 4th International Symposium on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, CD-ROM paper, No. MA-V-1, 2009.

大学院材料力学入試問題集 2009 主要大学機械

工学系大学院 入学試験問題とその解答集

小畑良洋(分担)

大学院材料力学入試問題検討委員会(畑俊明他 13 名), NPO 法人固体の力学研究会, CD-ROM, 2009 年 4 月.

Determination of True Stress-Strain Curves of Sheet Metals in Post-Uniform Elongation Range

Hasegawa, K., Chen, Z., Nishimura, K., Ikeda, K.

Mater. Trans., Vol.50, No.1, pp.138-144, Jan. 2009.

Microstructural Features and Deformation-Induced Lattice Defects in Hot-Extruded Bi₂Te₃ Thermoelectric Compound

Chen, Z., Suzuki, K., Miura, S., Nishimura, K., Ikeda, K.

Mater. Sci. Eng. A, Vol.500, No.1-2, pp.70-78, Mar. 2009.

多素材押出し法によるクラッド鋼管の成形プロセスの開発

陳中春

ふえらむ, 第 14 巻, 5 号, pp.49, 2009 年 5 月

粉体を用いた加工プロセスの開発と新材料創製への応用

陳中春

塑性と加工, 第 50 巻, 587 号, pp.1075-1080, 2009 年 12 月

自動車排気熱発電用熱電変換材料の押出し成形

陳中春

財団法人 天田金属加工機械技術振興財団研究報告書, 第 22 巻, pp.36-40, 2009 年 12 月

表面転造 Cr-Mo 焼結鋼歯車の精度と強度

竹増光家^{*1}, 小出隆夫, 武田義信^{*2}, 新仏利伸^{*3}

(*¹諏訪東京理科大学, *²ヘガネスジャパン, *³ニッセー)

自動車技術会論文集, 第40巻, 第1号, pp.181-186, 2009年1月.

Hardened Layer and Bending Fatigue Strength of Induction Hardened Thermally Refined Steel Gears

Miyachika, K., Katanuma, H., Iwanaga, J. ^{*1}, Mada, H. ^{*2} (*¹Denki Kogyo Co., Ltd., *²Tottori Metal Heat Treatment Cooperative Association)

JSME Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.3, No.2, pp.136~145, March 2009.

Surface Densification Characteristics of Chromium Alloyed Sintered Steel Rollers and Gears by Finish Rolling

Takemasu, T. *, Koide, T., Yazaki, M. *, Sakurai, Y. *
(*Tokyo University of Science, Suwa)

Proc. of The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions (MPT2009-Sendai), pp.122~127, May 2009.

Load Bearing Capacity of Surface-Rolled High Density Sintered Metal Gears

Koide, T., Ishizuka, I., Takemasu, T. *, Miyachika, K., Fukai, Y. (*Tokyo University of Science, Suwa)

Proc. of The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions (MPT2009-Sendai), pp.313~316, May 2009.

Effects of Carburized Part, Case Depth and Helix Angle on Bending Fatigue Strength of Case-Carburized Helical Gears

Miyachika, K., Kazuaki, A., Koide, T., Mada, H. ^{*1}, Katanuma, H., Nojima, K. ^{*2}, Oda, S. ^{*3} (^{*1}Tottori Metal Heat Treatment Cooperative Association, ^{*2}Industrial Research of Institute of Tottori Prefecture, ^{*3}Fukuyama Univ.)

Proc. of The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions (MPT2009-Sendai), pp.338~343, May 2009.

A Study on Load Carrying Characteristics of Plastic Crossed Helical Gear

Takahashi, M. *, Takahashi, H. *, Koide, T. (*Kisarazu National College of Technology)

Proc. of The JSME International Conference on Motion and Power Transmissions (MPT2009-Sendai), pp.439~443, May 2009.

プラスチックはすば歯車対および平歯車対の寿命推定方法に関する一考察

高橋美喜男^{*1}, 高橋秀雄^{*1}, 滝 晨彦^{*2}, 小出隆夫
(*¹木更津高専, ^{*2}岡山理科大学)

日本機械学会論文集 (C編), 第75巻, 第755号, pp.2068-2074, 2009年7月.

Suitable Profile of Hardened Layer and Pre-Treatment Condition for Bending Fatigue Strength of Induction Hardened Gears

Miyachika, K., Katanuma, H., Takemura, Y.

Proceedings of The 17th IFHTSE Congress, NETSU SHORI, Vol.49, Special Issue Vol.1, pp.89~92, Aug. 2009.

Effects of Roller Configuration on Residual Stresses of Rollers Due to Case-Carburizing

Miyachika, K., Xue, W.-D. ^{*1}, Sawada, S. ^{*2}, Mada, H. ^{*2} (^{*1}TOPY Industry Co., Ltd., ^{*2}Sanyo Denki CE Co., Ltd., ^{*3}Tottori Metal Heat Treatment Cooperative Association)

Proceedings of The 17th IFHTSE Congress, NETSU SHORI, Vol.49, Special Issue Vol.1, pp.129~132, Aug. 2009.

Effects of Case Depth, Side-Face Carburizing and Helix Angle on Residual Stress and Bending Fatigue Strength of Case-Carburized Helical Gears

Miyachika, K., Ando, K. ^{*1}, Xue, W.-D. ^{*2}, Imaduddin H. B. W. N. (^{*1}Mitsui Ship & Building Co., Ltd., ^{*2}TOPY Industry Co., Ltd.)

Proc. of ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE2009, DETC2009/PTG-87313 on CD-ROM., Sept. 2009.

Residual Stresses of Spur Internal Gears Due to Case-Carburizing

Miyachika, K., Xue, W.-D. ^{*1} (^{*1}TOPY Industry Co., Ltd.)

Proc. of The Forth Asian Conference on Heat Treatment and Surface Engineering, pp.350~355, Oct. 2009.

Study on Machining Error in Ball End Milling of Spherical Surface

Tanaka H., Sato M., Yoshida H., Ohta S., Okamura S. Key Engineering Materials Vols.407-408, pp.456-459, 2009.

Transient Temperature Variation beneath Rake Face in End Milling

Sato M., Tamura N., Tanaka H.

Proceedings of The 5th International Conference on

Leading Edge Manufacturing in the 21st Century,
pp.457-460, 2009.

水溶性加工液代謝システムに関する研究(第3報) — 使用済み加工液の処理によるシステム評価 —

近藤康雄, 高田和也, 山口顕司^{*1}, 小幡文雄, 坂本 智^{*2} (*¹米子高専, ^{*2}島根大)
精密工学会誌, 75巻, 6号, pp.713-718, 2009年6月

ナノメートル画像計測におけるノイズ低減に関する研究(干渉補正法を用いた位相接続)

西本弘之^{*1}, 小幡文雄, 上原一剛, 山口顕司^{*2}, 木村勝典^{*1} (*¹鳥取県産技センター, ^{*2}米子高専)
日本シミュレーション学会論文誌, 第1巻, 第2号, pp.28-36, 2009年6月

Heat Flux Estimation at Heat Sources of Machine Tool by Solving Inverse Problems

Uehara, K., Obata, F.
Proceedings of the 5th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), pp.735-738, Dec. 2009.

高硬度鋼の高速切削加工におけるTiSiN被覆切削工具の摩耗メカニズム

石川剛史^{*1}, 小幡文雄, 井上謙一^{*1} (*¹日立ツール)
精密工学会誌, 75巻, 12号, pp.1439-1443, 2009年12月

Techniques of Reducing Aerodynamic Noises in 3/4 Open-Jet Wind Tunnels

Kudo, T.^{*1}, Maeda, K.^{*2}, Nishimura, M. (*¹ Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, ^{*2} Toyota Motor Corp.)
Journal of Environment and Engineering, Vol.4, No.2, pp.276-288, 2009.

Techniques for Reducing Low-Frequency Fluctuations in Aeroacoustic Wind Tunnels

Kudo, T.^{*}, Komatsu, Y.^{*}, Nishimura, M. (* Mitsubishi Heavy Industries, Ltd)
Journal of Environment and Engineering, Vol.4, No.2, pp.289-301, 2009.

お父さん・お母さんと一緒に作る児童・生徒のためのものづくり教育の実践

長島正明, 西村正治, 土井康作
砥粒加工学会誌, 第53巻, 4号, pp.16-19, 2009

年4月

材料特性に着目したプロペラファンの振動騒音解析

川崎 亮^{*}, 廣中康雄^{*}, 月居和英^{*}, 西村正治 (*三菱電機)
日本機械学会論文集(C編), 第75巻, 760号, pp.3129-3135, 2009年12月

空力騒音低減技術の最近の動向

西村正治
日本音響学会誌, 第65巻, 7号, pp.358-363, 2009年7月

ツインロータヘリコプタモデルの目標信号追従制御—ロータの推力制限を考慮した方法—

和田信敬, 南 昌行^{*}, 松尾祥也^{*}, 佐伯正美^{*} (*広島大学)
日本ロボット学会誌, 第27巻, 2号, pp.199-208, 2009年3月

Experimental Study about Internal Cavitating Flow and Primary Atomization of a Large-Scaled VCO Diesel Injector with Eccentric Needle

Oda, T., Goda, Y., Kanaike, S.^{*1}, Aoki, K.^{*2}, Ohsawa, K. (*¹Mitsubishi Motors Corporation, ^{*2}West Japan Railway Company)
Proceedings of The 11th Triennial International Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, CD-ROM, July 2009.

Interface Conditions of Finite Difference Compact Schemes for Computational Aeroacoustics,

Ikeda, T., Sumi, T., Kurotaki, T.,
AIAA J., Vol. 47, No. 11, pp. 2658-2665, Nov. 2009.

Numerical Investigation of Feedback Mechanism around Two Dimensional Airfoil,

Kurotaki, T., Sumi, T., Atobe, T., Hiyama, J.,
AIAA-2009-1113,
47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, Jan. 2009.

高次精度補間を導入した特性インターフェイス条件によるマルチブロック計算法,

住隆博, 黒滝卓司, 桧山淳,
日本航空宇宙学会論文集, 第57巻, 644号, pp.

196-209, 2009 年 5 月.

サイレント超音速機に関する調査研究 (その 2)

(社) 日本航空宇宙学会 (共著)

川添博光, 松野 隆

宇宙航空研究開発機構契約報告 JAXA-CR-08-002, 2009

Experimental and Computational Studies of Low-Speed Aerodynamic Performance and Flow Characteristics around a Supersonic Biplane

Kuratani, N.^{*1}, Ozaki, S.^{*1}, Obayashi, S.^{*1}, Ogawa, T.^{*1}, Matsuno, T., Kawazoe, H.

(^{*1}Tohoku University)

Trans. Jpn. Soc. Aeronautical and Space Sciences Vol. 52, No. 176, pp. 89-97, 2009.

An Application of DBD Plasma Actuator to Shock Wave Mitigation

Matsuno, T., Kanatani, T., Kawazoe, H., Obayashi, S.^{*1}

(^{*1}Tohoku University)

Proc. 9th International Symposium on Advanced Flow Information and Transdisciplinary Fluid Integration, pp. 18-19, 2009.

Aerodynamic Control of High Performance Aircraft Using Pulsed Plasma Actuators

Matsuno, T., Kawazoe, H., Nelson, R. C.^{*1}

(^{*1}University of Notre Dame)

AIAA Paper 2009-697, 2009.

New Measurement Method for Aerodynamic Force by a Single Video Camera

Nakanishi, T., Matsuno, T., Iwata, H., Kawazoe, H.

Space Technology Japan, Vol. 7, No. ists26, pp. Pe_59-Pe_64, 2009.

低速における超音速複葉翼の 3 次元空力性能評価
尾崎修一^{*1}, 小川俊広^{*1}, 大林茂^{*1}, 松野隆, 川添博光

(^{*1} 東北大学)

日本航空宇宙学会論文集 Vol. 57, No. 671, pp. 461-467, 2009.

Experimental Investigations of Rovibrational Temperatures Derived from Different Electronic state

Yamada, G., Takayanagi, H.^{*1}, Suzuki, T.^{*1}, Fujita, K.^{*1}

(^{*1}Japan Aerospace Exploration Agency)

AIAA Paper 2009-1594, 2009.

Vacuum-Ultraviolet Spectroscopy for Shock Layer Radiation Measurement

Yamada, G., Takayanagi, H.^{*1}, Suzuki, T.^{*1}, Fujita, K.^{*1}

(^{*1}Japan Aerospace Exploration Agency)

AIAA Paper 2009-4254, 2009.

Shock-Tube study of Shock Layer Radiation analysis

Yamada, G.

27th International Symposium on Space Technology, 2009-e-11s, 2009

再突入飛行技術向上を目的とした衝撃波管の開発

山田剛治, 鈴木俊之^{*1}, 高柳大樹^{*1}, 藤田和央^{*1}

(^{*1} 宇宙航空研究開発機構)

日本航空宇宙学会論文集 Vol. 57, No. 670, pp. 426-436, 2009.

Effect of Surface Wave Plasma on Wetting Characteristics of Material Surface

Katsuda T., Kawazoe H., Matsuno T., Takeuchi S., Takehisa T., 27th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, CD-ROM, No. ISTS 2009-e-14, pp.1-6, 2009.

Parameter Design of Plasma Actuator for the Separation Control of a Cylinder Wake

Ota K., Matsuno T., Kanatani T., Kawazoe H.

27th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, CD-ROM, No. ISTS 2009-e-24, pp.1-6, 2009.

Experimental Study on Aerodynamic Characteristics of a Silent Supersonic Aircraft in Low Speed Flight

Kawazoe H., Matsuno T., Obayashi S.^{*1}, Jeong S.^{*1}

(^{*1}Tohoku University)

6th International Conference on Flow Dynamics, No. CRF-3, pp.1-2, 2009.

応用数理工学講座

Domain boundary formation in helical multishell gold nanowire

Takeo Hoshi, Takeo Fujiwara, J. Phys.: Condens. Matter 21, 272201, 7pp, (2009)

Development of simulation package 'ELSES' for extra-large-scale electronic-structure calculation,

Takeo Hoshi and Takeo Fujiwara, J. Phys.: Condens. Matter 21, 064233 (4pp) (2009)

On an application of the QMR_SYM method to complex symmetric shifted linear systems

Toshiaki Sogabe, Takeo Hoshi, Shao-Lin Zhang, Takeo Fujiwara, Proc. Appl. Math. Mech. 7, 2020081 - 2020082 (2009)

Three-dimensional deformation analyses of the ultra-thin liquid film surface (Linearized analyses for the steady state)

Fukui, S., Hitomi, K., Shimizu, S., Saeki, F. and Matsuoka, H.

Microsystem Technologies, DOI 10.1007/s00542-008-0764-3, Published online: 14 January 2009.

A new evaluation method of surface energy of ultra-thin film

Matsuoka, H., Ono, K. and S. Fukui

Microsystem Technologies, DOI 10.1007/s00542-008-0762-5, Published online: 13 January 2009.

Analyses of Lubricant Deformation Caused by Gas Stresses and Surface Tension

Saeki, F., Fukui, S. and Matsuoka, H.

IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, No. 11, November 2009, pp. 5061-5064.

MEMS/NEMS 工学全集

福井茂寿

分担執筆, 第2節物理学基礎, 6. 統計力学の項, テクノシステム, pp. 78-82, 2009

液体メニスカスの動特性

松岡広成

インクジェット技術における微小液滴の吐出・衝

突・乾燥, 第2章第1節[2], 分担執筆, 技術情報協会, 2009

Transient Response of a Vertical Axis Wind Turbine to Abrupt Change of Wind Speed

Hayashi, T., Hara, Y., Azui, T., Kang, I.

Proc. European Wind Energy Conference and Exhibition 2009 (EWEC 2009), Marseille, France, (CD-ROM, PO.328), March 2009

Relation between an Overshoot Phenomenon and a Vortex Ring Observed in a Step-Like Wind Speed Variation Generated by a Wind Tunnel

Hara, Y., Kuroda, T., Hayashi, T.

Proc. 6th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT-09), Rome, Italy, pp. 131-134, Sep. 2009

Speed, Trajectory and Increment in the Number of Cells of Singly Flagellated Bacteria Swimming Close to Boundaries

Nakai, T., Kikuda, M., Kuroda, Y., Goto, T.

J. Biomech. Sci. Eng., Vol.4, No.1, pp.2-10, Jan. 2009.

Removal of histone tails from nucleosome dissects the physical mechanisms of salt-induced aggregation, linker histone H1-induced compaction, and 30-nm fiber formation of the nucleosome array

Hizume, K.^{*1}, Nakai, T., Araki, S.^{*1}, Prieto, E.^{*1}, Yoshikawa, K.^{*1}, Takeyasu, K.^{*1} (^{*1} Kyoto Univ.)

Ultramicroscopy, Vol.109, Issue 8, pp.868-873, Jul. 2009.

Re-examination of half-metallic ferromagnetism for doped LaMnO3 in a quasiparticle self-consistent GW method

Kotani T, Kino, H, JOURNAL OF PHYSICS-CONDENSED MATTER 21 記事番号: 266002 発行: JUL 1 2009

Pressure variation of the valence band width in Ge:

A self-consistent GW study Modak P, Svane A,

Christensen NE, Kotani T, van Schilfgaarde M, PHYSICAL REVIEW B79, 記事番号: 153203 発行: APR 2009

Electronic and optical properties of III-nitrides under pressure, Christensen NE, Gorczyca I,

Laskowski R, Svane A, Albers RC, Chantis AN,
Kotani T, van Schilfgaarde M., PHYSICA STATUS
SOLIDI B-BASIC SOLID STATE
PHYSICS246 ,570-575, MAR 2009

**Growth and characterization of epitaxial
Ba(Zn_{1/3}Ta_{2/3})O-3 (100) thin films**, Tang ZZ, Liu
SJ, Singh RK, Bandyopadhyay S, Sus I, Kotani T, van
Schilfgaarde M, Newman N, ACTA MATERIALIA 57,
432-440, JAN 2009

(受理 平成22年10月29日)

知能情報工学講座

Backup and Recovery Scheme for Distributed e-Learning System

Meguro, K., Motomura, S., Sasama, T., Kawamura, T., Sugahara, K.

IPSJ Journal, Vol. 50, No. 11, pp.2710-2716, 2009.

Toward the Marriage of XML and Mobile Agents - Utilizing XML-RPC as a Migration Media -

Meguro, K., Motomura, S., Kawamura, T., Sugahara, K.

Proceedings of the IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systemspp.35-40, 2009.

OnePort RMI: RMI Protecting Integrity and Confidentiality for Mobile Agents

Meguro, K., Motomura, S., Kawamura, T., Sugahara, K.

Proceedings of the IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systemspp.41-46, 2009.

Bypass Method Based on Neighbor Node Determination Algorithm for Automatic Human Tracking System

Kakiuchi, H., Iwasaki, S., Kawamura, T., Sugahara, K.

Proceedings of the IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systemspp.361-369, 2009.

On the Continuous Service of Distributed e-Learning System

Meguro, K., Motomura, S., Kawamura, T., Sugahara, K.

International Conference on Computer, Electrical, and Systems Science, and Engineering, Vol. 55, pp.276-280, 2009.

Distributed e-Learning System with Client-Server and P2P Hybrid Architecture

Meguro, K., Motomura, S., Kawamura, T., Sugahara, K.

International Conference on Computer, Electrical, and Systems Science, and Engineering, Vol. 55,

pp.271-275, 2009.

An Algorithm to Determine Neighbor Nodes for Automatic Human Tracking System

Kakiuchi, H., Kawamura, T., Shimizu, T., Sugahara, K.

Proceedings of IEEE International Conference on Electro/Information Technologypp.96-102, 2009.

Mental Rotation by Neural Network

Sasama, T., Mitumoto, H., Yoneda, K., Tamura, S.

The Fifth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing pp.819-822, 2009.

Sensor Disposition Problem in Wireless Ad-Hoc Sensor Networks

Yanaka, T., Sasama, T., Masuyama, H.

The First International Workshop on Mobile & Wireless Networks MoWiN, pp.485-493, 2009.

Performance Evaluation of Cost Effective Routing for Packet Transmissions in Mobile Ad Hoc Networks

Kishida, K., Sasama, T., Masuyama, H.

The First International Workshop on Mobile & Wireless Networks MoWiN, pp.494-501, 2009.

Energy Lesser Broadcasting Algorithms Using Transmission Ranges in Mobile Ad Hoc Networks

Sasama, T., Abe, Y., Masuyama, H.

The First International Workshop on Mobile & Wireless Networks MoWiN, pp.502-511, 2009.

多機能コンセントのスケジューリング機能による待機電力の削減

明山 寛史, 川村 尚生, 菅原 一孔, 齊藤 剛史, 小西 亮介

情報科学技術レターズ, Vol. 1, pp.173-179, 2009.

分散型 e-Learning システムにおける教師用機能の開発

平田 崇, 川村 尚生, 本村 真一, 笹間 俊彦, 菅原 一孔

情報科学技術レターズ, Vol. 4, pp.49-52, 2009.

分散型 e-Learning システムにおけるマルチメディアコンテンツの利用

山本 大介, 目黒 一成, 川村 尚生, 本村 真一,

笹間 俊彦, 菅原 一孔
情報科学技術レターズ, Vol. 4, pp.53-56, 2009.

モバイルエージェントを用いた人物追跡システムのモニタとシミュレータの開発

岩崎 慎弥, 柿内 博人, 川村 尚生, 清水 忠昭,
笹間 俊彦, 菅原 一孔
情報科学技術レターズ, Vol. 4, pp.43-48, 2009.

モバイルエージェント技術を用いた会議日程調整システムにおける一時的なシステム停止の実現

大西 貴之, 川村 尚生, 笹間 俊彦, 菅原 一孔
第 11 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム CDROM
論文集, pp.353-356, 2009.

モバイルエージェントの移動におけるトラフィック削減のためのコード転送方式

東野 正幸, 本村 真一, 笹間 俊彦, 川村 尚生,
菅原 一孔
第 11 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム CDROM
論文集, pp.357-359, 2009.

路線バスの遅れを考慮した経路探索システムの開発

高山 貴寛, 川村 尚生, 笹間 俊彦, 菅原 一孔
第 11 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム CDROM
論文集, pp.313-316, 2009.

一時的なシステム停止の可能なモバイルエージェント技術を用いた会議日程調整システム

大西 貴之, 川村 尚生, 笹間 俊彦, 菅原 一孔
電気・情報関連学会中国支部第 60 回連合大会講演
論文集, p.194, 2009.

路線バス経路探索システムにおける設置型端末機の開発

高山 貴寛, 川村 尚生, 笹間 俊彦, 菅原 一孔
電気・情報関連学会中国支部第 60 回連合大会講演
論文集, p.189, 2009.

コードキャッシングによるモバイルエージェントの高速な移動手法の提案

東野 正幸, 本村 真一, 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 60 回連合大会講演
論文集, p.191, 2009.

分散型 e-Learning システムにおけるエージェント

間通信の高速化

平田 崇, 目黒 一成, 川村 尚生, 笹間 俊彦, 菅
原 一孔
電気・情報関連学会中国支部第 60 回連合大会講演
論文集, p.193, 2009.

分散型 e-Learning システムにおける大容量マルチメディアデータのストリーミング配信

山本 大介, 目黒 一成, 川村 尚生, 本村 真一,
笹間 俊彦, 菅原 一孔
電気・情報関連学会中国支部第 60 回連合大会講演
論文集, p.192, 2009.

モバイルエージェントによる人物追跡システムにおける人物の探索方式について

岩崎 慎弥, 柿内 博人, 清水 忠昭, 川村 尚生,
笹間 俊彦, 菅原 一孔
電気・情報関連学会中国支部第 60 回連合大会講演
論文集, p.190, 2009.

ニューラルネットワークによるメンタルローテーション

笹間 俊彦, 光本 浩士^{*1}, 米田 和代^{*2}, 田村 進一^{*2} (^{*1}大阪電気通信大学, ^{*2}NBL)
第 29 回日本生産管理学会全国大会論文集,
pp.353-355, 2009.

Normalization of rotated pattern by neural network

笹間 俊彦, 竹谷 尚^{*1}, 光本 浩士^{*2}, 米田 和代,
田村 進一 (^{*1}津山高専, ^{*2}大阪電気通信大学,
^{*3}NBL)
第 29 回日本生産管理学会全国大会論文集,
pp.377-380, 2009.

Statistical Machine Translation adding Pattern-based Machine Translation in Chinese-English Translation

Murakami, J., Tokuhisa, M., Ikehara, S.
Proceedings of the International Workshop on Spoken
Language Translation 2009, (IWSLT 2009),
pp.107-112, Oct. 2009.

言語情報のみを用いた音節クラスタリングの音節波形接続型音声合成法への適用

植村 和久, 村上 仁一, 池原 悟
電子情報通信学会技術研究報告, 音声,
SP2008-136, pp.61-66, 2009 年 1 月

パターン翻訳と統計翻訳の統合

村上 仁一, 徳久 雅人, 池原 悟
言語処理学会第 15 回年次大会発表論文集,
pp.120-123, 2009 年 3 月

統計翻訳における人手で作成された大規模フレーズテーブルの効果

鏡味 良太, 村上 仁一, 徳久 雅人, 池原 悟
言語処理学会第 15 回年次大会発表論文集,
pp.224-227, 2009 年 3 月

日本語文法構造の変換による日英統計翻訳

岡崎 弘樹, 村上 仁一, 徳久 雅人, 池原 悟
言語処理学会第 15 回年次大会発表論文集,
pp.240-243, 2009 年 3 月

WHY 型 QA システムにおける回答抽出方法の改良

大友 謙一, 村上 仁一, 徳久 雅人, 池原 悟
言語処理学会第 15 回年次大会発表論文集,
pp.586-589, 2009 年 3 月

情緒推定用パターン辞書における情緒原因判断条件の改良

滝川 晃司, 徳久 雅人, 村上 仁一, 池原 悟
言語処理学会第 15 回年次大会発表論文集,
pp.829-832, 2009 年 3 月

Web ドキュメントを対象とした情緒的表現解析システムの試作

徳久 雅人
人工知能学会全国大会論文集, 3B3-3, 2009 年 6 月

日本語の同音異義語の認識

村上 仁一, 堀田 波星夫, 池原 悟
日本音響学会 2009 年秋期研究発表会, 1-R-16,
pp.175-178, 2009 年 9 月

波形接続型音声合成における位相情報を利用した音節境界位置の決定方法

橋本 浩志, 村上 仁一, 池原 悟
日本音響学会 2009 年秋期研究発表会, 3-P-21,
pp.411-412, 2009 年 9 月

ブログにおける情緒対象の分析システムの試作

徳久 雅人
電子情報通信学会技術研究報告, 思考と言語,
TL2009-25, pp.1-6, 2009 年 10 月

感情・情緒処理

徳久 雅人
言語処理学会 (編), 言語処理学事典, 共立出版,
pp.210-211, 2009 年 12 月

Short-Term Price Prediction and the Selection of Indicators

Tanaka-Yamawaki, M., Tokuoka, S., Awaji, K.
Progress of Theoretical Physics, Supplement. Vol. 179,
pp.17-25, 2009.

Parameter Selection for Price Prediction and SOM Visualization

Tanaka-Yamawaki, M.
APFA7 (7th International Symposium of Application of Physics on Financial Analysis), CD-ROM, March, 2009.

Effect of Reputation on the Formation of Cooperative Network of Prisoners

Tanaka-Yamawaki, M., Murakami, T.
New Advances in Intelligent Decision Technologies (Springer Berlin), SCI 199, pp.615-623, 2009.

Evolution of Cooperation in the Iterated Prisoner's Dilemma Considering Reputation

Tanaka-Yamawaki, M., Murakami, T.
9th Asia-Pacific Complex Systems Conference 'Complex '09' (Tokyo, Japan), CD-ROM, November, 2009.

歌唱採譜における基本周波数決定法の開発

尾崎 翔吾, 清水 忠昭, 田中 美栄子
第 21 回自律分散システム・シンポジウム資料 (SY0001/09/0000-0233, 2009 SICE), 21-1, pp.43-46, 2009.

評判を意識した繰り返し囚人のジレンマ

田中 美栄子, 村上 拓, 石橋 直樹
第 21 回自律分散システム・シンポジウム資料 (SY0001/09/0000-0233, 2009 SICE), 21-1, pp.181-186, 2009.

友人ネットワークの発展により IPD に出現するスケールフリー構造

小野 歩, 岡村 紘平, 田中 美栄子, 清水 忠昭
第 21 回自律分散システム・シンポジウム資料

(SY0001/09/0000-0233, 2009 SICE), 21-1, pp.187-190, 2009.

短期価格予測と指標の選択

田中 美栄子, 淡路 啓太, 徳岡 聖二, 中村 元紀

第 21 回自律分散システム・シンポジウム資料 (SY0001/09/0000-0233, 2009 SICE), 21-1, pp.197-202, 2009.

現実的な資産分布を持つ人工市場

原田 佑紀, 田中 美栄子, 清水 忠昭

第 21 回自律分散システム・シンポジウム資料 (SY0001/09/0000-0233, 2009 SICE), 21-1, pp.233-236, 2009.

評判付き囚人のジレンマ (RPD) における戦略と対戦相手の共進化

田中 美栄子, 村上 拓

日本物理学会講演概要集第 64 巻 2 号(熊本大学, 9/25-28, 2009), ISSN1342-8349, pp.207, 2009.

短期価格予測における連続値パターンの効用

田中 美栄子

第 25 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集(筑波大学), CD-ROM, July 2009.

ランダム行列との比較による株価日中変動の相関行列解析

田中 美栄子, 田中 瑤子, 伊藤 大哲

第 15 回創発システム・シンポジウム「創発夏の学校 2009」講演資料集, pp.137-138, 2009.

評判を考慮した繰り返し囚人のジレンマにおける戦略の変化

村上 拓, 田中 美栄子

第 15 回創発システム・シンポジウム「創発夏の学校 2009」講演資料集, pp.139-140, 2009.

しっぺ返し (TFT) はどのくらい強いのか

田中 美栄子

日本物理学会講演概要集第 64 巻 1 号(立教大学, 3/27-30, 2009), ISSN1342-8349, pp.304, 2009.

ランダム行列との比較による 1994 年 NYSE 株価 1 時間変動の相関行列解析 (1)

田中 美栄子, 田中 瑤子, 伊藤 大哲, 中村 元紀, 木戸 丈剛, 河村 綾, 佐藤 彰洋

素粒子論研究(京都大学基礎物理学研究所), Vol. 117-5, E85-E86, 2009.

ランダム行列理論との比較による 2002 年 NYSE 株価 1 時間変動の解析 (2)

田中 美栄子, 伊藤 大哲, 田中 瑤子, 木戸 丈剛

素粒子論研究(京都大学基礎物理学研究所), Vol. 117-5, E87-E88, 2009.

経済物理とその周辺 (5)

田中 美栄子(代表)

統計数理研究所共同研究レポート 226, 2009 年 3 月

第 21 回自律分散システム・シンポジウム資料

田中 美栄子(実行委員長)

(SY0001/09/0000-0233, 2009 SICE), 21-1, pp.43-46, 2009.

The Transcriptional Network that Controls Growth Arrest and Differentiation in a Human Myeloid Leukemia Cell Line

The FANTOM Consortium, the Riken Omics Sciences Center (著者 159 名中 65 番目 Kimura, S.)

Nature Genetics, Vol.41, No.5, pp.553-562, 2009.

Genetic Network Inference as a Series of Discrimination Tasks

Kimura, S., Nakayama, S., Hatakeyama, M.

Bioinformatics, Vol.25, No.7, pp.918-925, 2009.

Inference of Genetic Networks using Linear Programming Machines: Application of A Priori Knowledge

Kimura, S., Shiraishi, Y., Hatakeyama, M.

Proc. of the 2009 International Joint Conference on Neural Networks, pp.1617-1624, 2009.

電気電子工学講座

Temperature Imaging of Sub-millimeter-thick Water Using a Near-infrared Camera

Kakuta N., Kondo K., Ozaki A., Arimoto H., Yamada Y.

International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.52, pp.4221-4228, Sep. 2009.

Hardware Implementation of Adaboost-based Sign Recognition for Miniature Robot

Usui Y., Kondo K.

Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference, pp.490-493, Oct. 2009.

Travelable Region Detection by Monocular Vision for Indoor Vehicle Navigation

Kurata M., Kondo K.

International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia, pp.111-114, Oct. 2009.

The SIFT Image Feature Reduction Method Using the Histogram Intersection Kernel

Usui Y., Kondo K.

International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, pp.517-520, Dec. 2009.

形状特徴照合による家電種類画像認識システム

臼井 温, 宮崎善行, 近藤克哉

電子情報通信学会 2009 年総合大会, p.AS2-2, 2009 年 3 月.

FPGA を用いた小型自律ロボット向けビジョンセンサシステムの設計

臼井 温, 近藤克哉

第 11 回 DSPS 教育者会議予稿集, pp.81-82, 2009 年 9 月.

データ数が偏重したクラスタリング問題に対する自己組織化マップの応用に関する検討

藤沢大樹, 大木 誠

第 10 回自己組織化マップ (SOM) 研究会 2009 講演論文集, pp.61-66, 2009 年 3 月.

A Variable Step Size Algorithm for Speech Noise

Reduction Method Based on Noise Reconstruction System

Naoto Sasaoka, Masatoshi Watanabe, Yoshio Itoh, and Kensaku Fujii

IEICE Trans. Fundamentals, vol.E92-A, no.1, pp.244-251, Jan. 2009.

相互相関推定による可変ステップサイズを用いた騒音再合成法に関する一検討

島田康二, 笹岡直人, 竹本貴文, 伊藤良生, 藤井健作* (*兵庫県立大学)

電子情報通信学会技術研究報告, SIS2008-82, 2009 年 3 月

方程式誤差適応 IIR フィルタの収束速度に関する一検討

金川龍一, 樋口達也, 笹岡直人, 久野英治^{*1}, ジェームスオケロ^{*2}, 伊藤良生, 小林正樹^{*3} (*¹ 職業能力開発総合大学校, ^{*2} NEC, ^{*3} 中部大学)

電子情報通信学会 2009 年総合大会講演論文集, pp.357, 2009 年 3 月

A Study on Feed Back System of Variable Guard Interval for OFDM Systems

T. Nakanishi, H. Tanaka, N. Sasaoka, and Y. Itoh

Proc. of 2008 International Workshop on Smart Info-Media Systems (SISB 2008), AP-3, Mar. 2009.

A Study on Adaptive Notch Filter based on Fourier Sine Series Expansion

Y. Kinugasa^{*1}, M. Kobayashi^{*2}, C. WANG^{*2}, and Y. Itoh (*¹ Matsue College of Technology, ^{*2} Chubu University)

Proc. of 2008 International Workshop on Smart Info-Media Systems (SISB 2008), PP-3, Mar. 2009.

A Study on Block Adaptive Algorithm Based on Correlation for Equation Error IIR ADF

E. Kuno^{*1}, N. Sasaoka, R. Kanagawa, J. Okello^{*2}, M. Kobayashi^{*3}, and Y. Itoh (*¹ Polytechnic University, ^{*2} NEC, ^{*3} Chubu University)

Proc. of 2008 International Workshop on Smart Info-Media Systems (SISB2008), PP-37, Mar. 2009.

可変遅延を用いた相関関数に基づく方程式誤差アルゴリズム

久野英治^{*1}, 笹岡直人, ジェームスオケロ^{*2}, 金川龍一, 伊藤良生, 小林正樹^{*3} (*¹ 職業能力開発総

合大学校, *²NEC, *³ 中部大学)

Journal of Signal Processing 「信号処理」, Vol.13, No.3, pp.257-265, 2009 年 5 月

可変サイクリックプレフィクスを用いる適応 OFDM システムに関する一検討

石川裕貴, 笹岡直人, 伊藤良生

電子情報通信学会技術研究報告, SIS2009-12, 2009 年 6 月

Speech enhancement based on adaptive filter with variable step size for wideband and periodic noise

Naoto Sasaoka, Koji Shimada, Shota Sonobe, Yoshio Itoh and Kensaku Fujii (*University of Hyogo)

Proc. of 2009 52nd International Midwest Symposium on Circuits and Systems, pp.648-652, Aug. 2009.

騒音抑圧のための相関推定方程式誤差 IIR-ADF に関する一検討

長谷川輝, 笹岡直人, ジェームスオケロ*¹, 伊藤良生, 小林正樹*² (*¹NEC, *² 中部大学)

2009 年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ大会講演論文集, p.209, 2009 年 9 月

Speech Noise Reduction System Based on Adaptive Filter with Variable Step Size Using Cross-Correlation

Naoto Sasaoka, Akira Hasegawa, James Okello*, Yoshio Itoh (*NEC)

Proc. of 2009 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia, p.17, Oct. 2009.

可変ステップサイズによる広帯域及び周期性騒音抑圧方式に関する一検討

笹岡直人, 島田康二, 園延昇大, 伊藤良生, 藤井健作* (*兵庫県立大学)

第 52 回自動制御連合講演会, H5-3, 2009 年 11 月

A Study on Adaptive Algorithm Based on Correlation and Variable Delay for IIR ADF

Tatsuya Higuchi, Naoto Sasaoka, James Okello*¹, Yoshio Itoh and Masaki Kobayashi*²(*¹ NEC, *²Chubu University)

Proc. of International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2009), pp.409-412, Dec. 2009.

A Study on Tagging Filter Based on Allpass Filter

for Blind MIMO Equalization

Tomokazu Shimizu, James Okello*, Naoto Sasaoka and Yoshio Itoh (*NEC)

Proc. of 2009 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2009), pp.461-464, Dec. 2009.

Variable guard interval based on maximum delay estimation for adaptive OFDM systems

Naoto Sasaoka, Hideaki Tanaka, Yuki Ishikawa, Takaharu Nakanishi and Yoshio Itoh

IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E92-A, No.11, pp.2862-2865, Nov. 2009.

ノイズに対してロバストな pre-inverse 適応システムとアクティブノイズキャンセラへの応用

小林正樹*, 近藤浩行*, 笹岡直人, 伊藤良生 (*中部大学)

電子情報通信学会技術研究報告, SIS2009-37, 2009 年 12 月

タグフィルタを用いたブラインド MIMO 等化システムに関する一検討

清水智一, ジェームスオケロ, 笹岡直人, 伊藤良生 (*¹ NEC)

電子情報通信学会技術研究報告, SIS2009-46, 2009 年 12 月

Fast generation of view-direction-free perspective display from distorted fisheye image

Shigang Li and Ying Hai

IEICE Transaction on Information and Systems, Vol.E92-D, No.8, pp.1588-1591, 2009.

Synchronization of full-view image and GPS data for route map building

Ying Hai, Shigang Li and Yuto Mizuno

IAPR Conference on Machine Vision Applications (MVA), pp.78-81, 2009.

An easy camera pose method from fisheye image

Haijiang Zhu and Shigang Li

2009 World Congress on Computer Science and Information Engineering (SCIP), pp.81-85, 2009.

Extracting road information from a single side fisheye image of lane marking and stop line

Shigang Li and Tsuyoshi Kitamura

The 16th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Service (ITSWC), Stockholm, Sweden, September, 2009.

人体伝搬信号を用いたバイオメトリックス認証

中西功

電子情報通信学会和文論文誌, Vol.J92-A, No.12, pp. 980-986, 2009 年 12 月.

Biometric Person Authentication Using New Spectral Features of Electroencephalogram (EEG)

C. Miyamoto, S. Baba, I. Nakanishi

Proc. of 2008 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2008), pp.312-315, Mar. 2009

Noise Reduction System Using Signal and Noise Level Detectors in Frequency Domain

Y. Minato, I. Nakanishi

Proc. of 2008 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2008), pp.180-183, Mar. 2009

EEG Based Biometric Authentication Using New Spectral Features

I. Nakanishi, S. Baba, C. Miyamoto

Proc. of 2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2009), pp. 651-654, Dec. 2009

Speech Noise Reduction Using Sequential Spectrum Detection Based on Modified DFT Pair

I. Nakanishi, K. Fujii

Proc. of 2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2009), pp. 65-68, Dec. 2009

変形 DFT 対に基づく逐次スペクトル検出を用いた音声重畳雑音除去

中西功, 湊勇気, 藤井健作

信学技報, CAS2008-127, pp. 147-152, 2009 年 3 月

脳波を用いた個人認証に関する研究 —新たな特徴量による認証精度の検討—

馬場貞尚, 宮本千正, 中西功, 李仕剛

電子情報通信学会第 16 回バイオメトリックスシステムセキュリティ研究発表会予稿集, pp. 45-50,

2009 年 3 月

人体伝播信号を用いたバイオメトリックス認証

中西功, 友成永吉

電子情報通信学会第 18 回バイオメトリックスシステムセキュリティ研究発表会予稿集, pp. 29-34, 2009 年 6 月

メンタルタスク時の脳波を用いた個人認証の研究

中西功, 馬場貞尚, 宮本千正

情報処理学会コンピュータセキュリティシンポジウム 2009 論文集, vol.1, 2009 年 10 月

人体伝播信号を用いた個人認証の試み

中西功

第 24 回信号処理シンポジウム講演予稿集, pp. 396-401, 2009 年 11 月

脈波波形解析システムの解析結果を用いた総合脈波判定システムの構築

徳高 平蔵^{*1}, 柿原 俊幸, 倉田 将史, 藤村 喜久郎, 権田 英功^{*2}, 馬庭 芳朗^{*3}, 山本 雅司^{*4}, 李 仕剛^{*}, 大北 正昭 (^{*1}(有) SOM ジャパン, ^{*2}米子高専, ^{*3}養父市立南谷診療所, ^{*4}鳥取市鹿野温泉病院)

第 10 回自己組織化マップ研究会 2009 講演論文集, SOM2009-03, pp.11-16, 2009 年 3 月 10 日

自己組織化マップによる工場のオンラインデータの可視化 — データの前処理 —

藤村喜久郎, 田邊弥久

第 10 回自己組織化マップ研究会 2009 講演論文集, SOM2009-11, pp.57-60, 2009 年 3 月 10 日

Construction of a General Physical Condition Judgment System Using Acceleration Plethysmogram Pulse-Wave Analysis

Tokutaka, H., Maniwa, Y., Gonda, E., Yamamoto, M., Kakiyara, T., Kurata, M., Fujimura, K., Li, S., and Ohkita, M.

Proceedings of Advances in Self-Organizing Maps, 7th International Workshop WSOM 2009, FL(USA), pp.307-315, Jun. 8-10 2009.

脈波解析システムの解析結果を用いた病体例分類を含む総合脈波判定システムの構築

柿原 俊幸, 徳高 平蔵, 藤村 喜久郎, 倉田 将史, 李 仕剛, 権田 英功, 大北 正昭, 馬庭 芳朗, 山

本 雅司

日本知能情報ファジィ学会 ファジィ システム
シンポジウム 講演論文集, Vol. 25, pp.114-, 2009
年 7 月

自己組織化マップによる工場監視システムの解析

藤村 喜久郎, 和田 肇, 徳高 平蔵

日本知能情報ファジィ学会 ファジィ システム
シンポジウム 講演論文集, Vol. 25, pp.115-, 2009
年 7 月

Construction of the General Physical Condition Judgments System Using Acceleration Plethysmogram Analysis Results

Tokutaka, H., Gonda, E., Maniwa, Y., Yamamoto, M.,
Kakihara, T., Kurata, M., Fujimura, K., Li, S., and
Ohkita, M.

Proceedings of 16th Neural Information Processing
International Conference (ICONIP2009) Bangkok
(Thailand), Part II pp.794-801, Dec. 1-5 2009.

電力事業体における電力設備利用効率の D E A 解析

西守克己, 黒田敦史, 西村 亮, 石原永伯,
第 19 回日本知能情報ファジィ学会ソフトサイエ
ンス・ワークショップ講演論文集, pp.17-18, 2009
年 3 月.

包絡分析法による電力事業体における電力設備利 用効率の評価,

西守克己, 黒田敦史, 西村 亮, 石原永伯,
多値論理研究ノート, 第 32 巻, 第 5 号, pp.51-52,
2009 年 9 月.

集光型太陽光発電システムの市場動向・技術動向 とビジネスチャンス, ~集光型太陽光発電システム の性能評価と展望~

西守 克己

講座メガセミナー(メガセミナー・サービス)講演
集, 東京, 機械振興会館, pp.144-158, 2009 年 10
月. [招待講演]

包絡分析法における CCR および BCC 効率的フロン ティアの構成

西守 克己, 野口 和正, 西村 亮

第 14 日本知能情報ファジィ学会中国・四国支部大
会講演論文集, pp.3-4, 2009 年 12 月.

メキシコの乾燥地域における簡易な集光装置に よる太陽電池モジュールの発電出力向上の実証 実験

梅森隆文, 西村 亮, 西守克己, 石原永伯

太陽エネルギー189号(VOL.35, No.1), pp.43-pp.49,
2009 年 1 月

遺伝的アルゴリズムによる複数の小型風力発電 機の風の分布を考慮した最適配置決定

中島正典, 西村 亮, 西守克己, 石原永伯

電気学会 新エネルギー・環境研究会資料
(FTE-09-5), pp.27-32, 2009 年 3 月

Shielding of Drifting Pesticide Particles by Electrostatic Pesticide Spraying and Grounded Conducting Net for Compliance with Positive List System

Ryo Nishimura, Yoshifumi Hashimoto, Yuusuke
Tsutsui, Katsumi Nishimori and Naganori Ishihara
Proc. of 2009 Joint Conference
ESA/IEJ/IEA/IEEE-EPC/SFE, Boston, USA,
(CD-ROM), June 16-18, 2009

静電農薬散布におけるノズル電圧波形が葉への 農薬付着状態に及ぼす影響

西村 亮, 道原翔太, 西守克己, 石原永伯

静電気学会講演論文集'09, pp.243-244, 2009 年 9
月

太陽追尾を行わない太陽電池モジュールに集光す るための凸レンズの設計

西村 亮, 西守克己, 石原永伯

太陽/風力エネルギー講演論文集 (2009),
pp.137-140, 2009 年 11 月

単眼カメラを用いた中央走行型の屋内移動ロボッ ト

齊藤 剛史, 多田 直也, 小西 亮介

電学論(C), Vol.129, No.8. pp.1576-1583, 2009 年
8 月.

A Novel Transducer: From Lip Motion To Voice Message

Takeshi Saitoh, Tomoya Kato and Ryosuke Konishi

IAPR Conference on Machine Vision Applications
(MVA 2009), 13-7, pp.410-413, May, 2009.

Voice Activated Wheelchair with Collision Avoidance Using Sensor Information

Akira Murai, Masaharu Mizuguchi, Masato Nishimori, Takeshi Saitoh, Tomoyuki Osaki and Ryosuke Konishi
ICROS-SICE International Joint Conference 2009 (ICCAS-SICE09), 4A08-1, pp.4232-4237, Aug. 18-21, 2009.

Bird Tracking and Flapping Motion Recognition for Monitoring System

Kohei Maruyama, Takeshi Saitoh and Ryosuke Konishi
ICROS-SICE International Joint Conference 2009 (ICCAS-SICE09), 3B17-1, pp.3613-3618, Aug. 18-21, 2009.

Mobile Robot with Following Function and Autonomous Return Function

Naoki Tsuda, Shuji Harimoto, Takeshi Saitoh and Ryosuke Konishi
ICROS-SICE International Joint Conference 2009 (ICCAS-SICE09), 1B09-3, pp.635-640, Aug., 2009.

Mobile Robot with Following and Returning Mode

Naoki Tsuda, Shuji Harimoto, Takeshi Saitoh and Ryosuke Konishi
18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (IEEE RO-MAN2009), ThB1.3, pp.933-938, Sep., 2009.

Elevator Available Voice Activated Wheelchair

Akira Murai, Masaharu Mizuguchi, Takeshi Saitoh, Tomoyuki Osaki and Ryosuke Konishi
18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (IEEE RO-MAN2009), WeC1.2, pp.730-735, Sep., 2009.

エレベータによるフロア間移動が可能な音声操作型電動車いす

水口 正治, 村井 彰, 西森 雅人, 齊藤 剛史, 尾崎 知幸, 小西 亮介
電子情報通信学会 福祉情報工学会, vol.108, no.488, WIT2008-80, pp.67-72, 2009 年 3 月.

鳥害対策システムのための鳥追跡と羽ばたき動作の認識

丸山 康平, 齊藤 剛史, 小西 亮介
第 12 回 画像の認識・理解シンポジウム

(MIRU2009), IS2-65, pp.1301-1308, 2009 年 7 月.

発話シーンからのキーフレーム検出とキーフレームに基づく単語読唇

森下 和敏, 齊藤 剛史, 小西 亮介
第 12 回 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2009), IS1-58, pp.753-760, 2009 年 7 月.

割り箸原形の検査システムの開発

齊藤 剛史, 菅原 一孔, 小西 亮介
第 14 回パターン計測シンポジウム (第 80 回パターン計測部会研究会), pp.7-12, 2009 年 11 月.

An Orange-Emitting Long-Persistent Phosphor, $\text{Ca}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}, \text{Tm}^{3+}$

Miyamoto, H., Kato, Y., Honna, Y., Yamamoto, H., and Ohmi, K.
J. Electrochemical Society, Vol. 156, pp. 235-241, 2009.

Effect of Si-codoping on crystallographic and photoluminescent characteristics in $\text{CuAlS}_2:\text{Mn}$ red phosphor for near-UV excitation

Miyamoto, Y., Ohashi, K., Ohmi, K., and Yoshida, H.
Proc. 16th Int. Display Workshops pp. 997-1000, 2009.

Improvement in luminescent properties of emissive LCD consisting of RGB patterned phosphors and near-UV LED

Yata, T., Miyamoto, Y., Matsumoto, K., Nishiura, J., Koma, N., and Ohmi, K.
Proc. 16th Int. Display Workshops, pp.1009-1012, 2009.

Recent development of oxyfluoride phosphors for plasma display panels

Kunimoto, T., and Ohmi, K.
Proc. 16th Int. Display Workshops, pp. 1013-1016, 2009.

Recent progress of silicate phosphors for PDP application

Ohmi, K., and Kunimoto, T.
International Symposium for phosphor materials 2009, p. 12, 2009.

青色無機 EL 材料 $\text{Ba}_2\text{SiS}_4\text{:Ce}$ の製膜・アニール方法の検討

新田充、小谷剛史、大観光徳

電子情報通信学会技術研究報告、Vol. EID2008-58, pp.33-36, 2009 年 1 月。

Cap effect of $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ thick films during post-annealing process

T. Tokuda, S. Honda, K. Kinoshita, S. Kishida

Physica C 469, pp. 1509-1511 (2009).

Growth of Bi-2212 single crystals by a horizontal Bridgman method using different oxygen pressure.

M. Fujiwara, T. Makino, T. Nakabayashi, H. Tanaka, K. Kinoshita, S. Kishida

Physica C 469, pp. 1178-1181 (2009).

声紋による個人認証システムの構築

小林光, 田中章浩, 木下健太郎, 岸田悟

電子情報通信学会技術研究報告, vol. 108, no. 480, NC2008-105.

The Relationship between Data Retention Characteristics and the Physical Property of Pt Substrates in NiO-ReRAM

T.Makino, T.Okutani, K.Dobashi, M.Moriguchi, K.Kinoshita, and S.Kishida

Proc. International Symposium on Sputtering & Plasma Processes 2009, July 8-10, 2009, Kanazawa, Japan, pp.127-129 (2009).

The dependence of resistive switching characteristics on the relationship between bias polarity and electrode materials in NiO-ReRAM

T. Okutani, K. Kinoshita, T. Makino, M. Yokeda, K. Dobashi, Y. Sugiyama, and S. Kishida

Proc. International Symposium on Sputtering & Plasma Processes 2009, July 8-10, 2009, Kanazawa, Japan, pp.127-129 (2009).

新分析手法の適用による ReRAM 動作機構の解明

牧野達也, 木下健太郎, 土橋一史, 依田貴稔, 岸田悟

電子情報通信学会技術研究報告, vol. 109, no. 321, SDM2009-169, pp. 93-96.

Investigation of self-assembled monolayer treatment on SiO_2 gate insulator of

poly(3-hexylthiophene) thin-film transistors

Horii, Y.,^{*1,*4}, Ikawa, M.,^{*1}, Sakaguchi, K.,^{*1}, Chikamatsu, M.,^{*1}, Yoshida, Y.,^{*1}, Azumi, R.,^{*1}, Mogi, H.,^{*2,*3}, Kitagawa, M., Konishi, H.,^{*4}, Yase, K.^{*1} (^{*1}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ^{*2}Japan Chemical Innovation Institute, ^{*3}Shin-Etsu Chemical, ^{*4}Department of Chemistry and Biotechnology, Tottori University)

Thin Solid Films Vol.518, pp.642-646, 2009.

High efficient blue waveguide Stark-effect optical-modulators using ZnSe/ZnMgSSe asymmetric coupled quantum wells

Abe,T., Kozeni,H., Nishiguchi,T., Yamane,N., Fujinuma,R., Kasada,H., and Ando,K.

Ext. Abst. 28th Electronic Materials Symposium, Shiga, Japan, pp. 281-282, Jul. 2009.

High sensitive ultraviolet Schottky photodetectors of ZnSSe organic-inorganic hybrid structure on $\text{p}^+\text{-GaAs}$ substrate

Tanaka,K., Katada,D., Miki,K., Nomura,M., Inagaki,Y., Tani,T., Abe,T., Kasada,H., and Ando,K.

Ext. Abst. 28th Electronic Materials Symposium, Shiga, Japan, pp. 241-242, Jul. 2009.

X-ray absorption near edge structure of amorphous $\text{Ce}_x\text{Ru}_{100-x}$

Li, Y., Ohnishi, N., Nakai, I., Amakai, Y., and Murayama, S.

J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 78, pp. 094717/1-4, 2009.

Strong molecular field effect from Gd on 3d-electronic states of Cu in concentrated Gd-Cu non-crystalline alloys

Yano, K., Fukuoka, J., Yamada, S., Sakurai, H., Okada, S., Adachi, H., Kawata, H., Kita, E. and Nakai, I.

J. Phys.: Conference Series, Vol. 150, 042239, 2009.

応用化学講座

gem-Difluorinated cyclopropanes as key building blocks for novel biologically active molecules

Itoh, T.

Ed. Ojima, I. "Fluorine in Medicinal Chemistry and Chemical Biology", Wiley-Blackwell, London, UK Chapter 12, pp. 313-355 (2009).

Chemo-enzymatic Synthesis of Spiro Type gem-Difluorocyclopropane as Core Molecule Candidate for Liquid Crystal Compounds

Itoh, T., Kanbara, M., Nakajima, S., Sakuta, Y., Hayase, S., Kawatsura, M., Kato, T., Miyazawa, K., Uno, H.

J. Fluorine Chem., 130, 1157-1163 (2009).

Iron(III) Salt-Catalyzed Nazarov Cyclization/Michael Addition of Pyrrole Derivatives

Fujiwara, M., Kawatsura, M., Hayase, S., Nanjo, M., Itoh, T.

Adv. Synth. Catal., 351, 123-128 (2009).

Design of Alkylsulfate Ionic Liquids for Lubricants

Itoh, T., Watanabe, N., Inada, K., Ishioka, A., Hayase, S., Kawatsura, M., Minami, I., Mori, S.

Chem. Lett., 38(1), 64-65 (2009).

Possible Origin of Modified EAG-Activity by Point-fluorination of Insect Pheromones: A Mini Review,

Hayase, S., Renou, M., Itoh, T.

Future Med. Chem., 1, 835-845 (2009).

【総合論文】イオン液体を反応媒体とする酵素反応の新展開

伊藤敏幸

有機合成化学協会誌, 67, 143-155 (2009).

【特集号】人工的反応環境による酵素触媒反応の開発：イオン液体反応場を活用する酵素反応

伊藤敏幸

科学と工業(Kagaku to Kogyo (Osaka) –Science and Industry), 83 (12), 507-514 (2009).

Synthesis and conformational properties of tetranitroazacalix[4]arenes

Konishi, H., Hashimoto, S., Sakakibara, T., Matsubara, S., Yasukawa, Y., Morikawa, O., Kobayashi, K. *Tetrahedron Lett.*, Vol. 50, pp. 620–623, 2009.

The influence of heteroatoms on the conformational properties of heteracalix[4]arenes. Comparison of oxygen-, sulfur- and nitrogen-bridged [14]metacyclophanes

Yasukawa, Y., Kobayashi, K., Konishi, H.

Tetrahedron Lett., Vol. 50, pp. 5130–5134, 2009.

Synthesis and solid state structure of oxacalix[4]arenes bearing four nitro groups and four *tert*-butyl groups

Akagi, S., Yasukawa, Y., Kobayashi, K., Konishi, H.

Tetrahedron, Vol. 65, pp. 9983–9988, 2009.

Investigation of self-assembled monolayer treatment on SiO₂ gate insulator of poly(3-hexylthiophene) thin-film transistors

Horii, Y., (AIST), Ikawa, M., (AIST), Sakaguchi, K., (AIST), Chikamatsu, M., (AIST), Yoshida, Y., (AIST), Azumi, R., (AIST), Mogi, H., (Shin-Etsu, JCII), Kitagawa, M., (Tottori Univ.), Konishi, H., (Tottori Univ.), Yase, K. (AIST)

Thin Solid Films, Vol. 518, No. 3, pp. 642-646, 2009.

塗布型有機薄膜トランジスタにおける絶縁膜表面SAM処理の検討

堀井美徳（産総研光技術），井川光弘（産総研光技術），坂口幸一（産総研光技術），近松真之（産総研光技術），吉田郵司（産総研光技術），阿澄玲子（産総研光技術），茂木弘（信越化学,化学技術振興機構），北川雅彦（鳥大院工），小西久俊（鳥大院工），八瀬清志（産総研光技術）

電子情報通信学会技術研究報告, 109 巻, 19-20 号, 9-14 頁

One-Pot Synthesis of 1-Arylindole-3-carboxylates from 2-(2-Isocyanophenyl)acetates

Fukamachi, S., Konishi, H., Kobayashi, K.

Heterocycles, Vol. 78, No. 1, pp. 161–168, Jan. 2009.

Synthesis of 2-Benzothiophene-1(3*H*)-thione and Isothiochroman-1-thione Derivatives by Iodine-Mediated Cyclization of Lithium 2-(vinyl)dithiocarboxylate Derivatives

Fukamachi, S., Konishi, H., Kobayashi, K.

Heterocycles, Vol. 78, No. 1, pp. 169–176, Jan. 2009.

A Convenient Synthesis of 4-Hydroxy-2-oxo-1,2-dihydro-1,8-naphthyridine-3-carboxamide Derivatives

Kobayashi, K., Iitsuka, D., Fukamachi, S., Konishi, H.
Synthesis, No. 3, pp. 375–378, Feb. 2009.

Synthesis of 1*H*-isoindol-3-amine Derivatives by Iodine-Mediated Cyclization of 2-Vinylbenzamidine Derivatives

Kobayashi, K., Horiuchi, M., Fukamachi, S., Konishi, H.
Heterocycles, Vol. 78, No. 3, pp. 669–677, Mar. 2009.

A new synthesis of benzo[*b*]thiophenes utilizing an interrupted Pummerer reaction

Kobayashi, K., Horiuchi, M., Fukamachi, S., Konishi, H.
Tetrahedron, Vol. 65, No. 12, pp. 2430–2435, Mar. 2009.

One-Pot Synthesis of 2-Arylimino-2,3-dihydropyrido[3,2-*e*]-1,3-thiazin-4-ones by the Reaction of Secondary 2-Chloropyridine-3-carboxamides with Aryl Isothiocyanates

Kobayashi, K., Komatsu, T., Nakamura, D., Konishi, H.
Heterocycles, Vol. 78, No. 4, pp. 1041–1046, Apr. 2009.

Synthesis of 4-Alkylidene-4*H*-3,1-benzoxazine Derivatives by Acid Catalyzed Cyclization of 2-Isocyanophenyl Ketones in the Presence of a Vinyl Ether

Kobayashi, K., Okamura, Y., Konishi, H.
Synthesis, No. 9, pp. 1494–1498, May 2009.

One-Pot Synthesis of 3-Acyl-2-(alkylsulfanyl)-indoles and 2-(Alkylsulfanyl)indole-3-carboxylates from (2-Isocyanophenyl)methyl Ketones or (2-Isocyanophenyl)acetates

Fukamachi, S., Konishi, H., Kobayashi, K.
Synthesis, No. 11, pp. 1786–1790, Jun. 2009.

A Simple Method for the Synthesis of 3-Arylthieno[2,3-*b*]pyridines via Iodine-Mediated Cyclization of 3-(1-Arylalkenyl)-2-[(1-phenylethyl)-

sulfanyl]pyridines

Kobayashi, K., Nakamura, D., Shiroyama, Y., Fukamachi, S., Konishi, H.
Synthesis, No. 13, pp. 2179–2183, Jul. 2009.

Synthesis of 1,3-Diaryl-2-methoxyindenes by Hydriodic Acid-Catalyzed Cyclization of Aryl[2-(1-aryl-2-methoxyvinyl)phenyl]methanols

Kobayashi, K., Shirai, Y., Nagaoka, T., Konishi, H.
Synth. Commun. Vol. 39, No. 16, pp. 2866–2881, Aug. 2009.

Synthesis of Bis(indolyl)methane Derivatives by Acid-Catalyzed Reactions of Indoles with Vinyl Ethers

Kobayashi, K., Shirai, Y., Konishi, H.
Heterocycles, Vol. 78, No. 8, pp. 2033–2040, Aug. 2009.

One-pot Synthesis of 4-Substituted Isothiochroman-1-thiones from α -Substituted 2-Bromostyrenes and Carbon Disulfide

Fukamachi, S., Konishi, H., Kobayashi, K.
Heterocycles, Vol. 78, No. 8, pp. 2077–2083, Aug. 2009.

A convenient synthesis of 2-substituted indoles by the reaction of 2-(chloromethyl)phenyl isocyanides with organolithiums

Kobayashi, K., Iitsuka, D., Fukamachi, S., Konishi, H.
Tetrahedron, Vol. 65, No. 36, pp. 7523–7526, Sep. 2009.

One-pot Synthesis of Furo[3,4-*b*]pyridin-5(7*H*)-ones from 2-Bromopyridine-3-carboxylic Acid and Carbonyl Compounds

Kobayashi, K., Kozuki, T., Konishi, H.
Synthesis, No. 18, pp. 3026–3028, Sep. 2009.

Synthesis of 2-Thioxo-2,3-dihydropyrido[3,2-*e*]-1,3-thiazin-4-ones by the Reaction of *N*-Alkyl-2-chloropyridine-3-carboxamides with Carbon Disulfide

Kobayashi, K., Komatsu, T., Konishi, H.
Heterocycles, Vol. 78, No. 10, pp. 2559–2564, Oct. 2009.

One-Pot Synthesis of Quinoline-2(1*H*)-thiones from

2-Isocyanostyrenes via Electrocyclic Reaction of the Corresponding 2-Isothiocyanatostyrenes

Kobayashi, K., Fujita, S., Fukamachi, S., Konishi, H.
Synthesis, No. 20, pp. 3378–3382, Oct. 2009.

An efficient synthesis of 3-aryl-2-aryl(or methyl)sulfanylbzeno[b]thiophenes via cyclization of aryl 2-aryl(or methyl)sulfanylmethylsulfanyl-phenyl ketones

Kobayashi, K., Egara, Y., Fukamachi, S., Konishi, H.
Tetrahedron, Vol. 65, No. 46, pp. 9633–9636, Nov. 2009.

Reactions of 2-(Lithiomethyl)phenyl Isocyanides with Methyl 1-Methylindole-3-carboxylate: Elaborations of the Adducts to 5H-Benz[2,3]-azepino[5,6-c]indol-12-one and 2,3'-Biindolyl Derivatives

Kobayashi, K., Nakai, D., Fukamachi, S., Konishi, H.
Heterocycles, Vol. 78, No. 11, pp. 2769–2766, Nov. 2009.

One-Pot Synthesis of Three Types of 2,3-Disubstituted Thienopyridines from Halopyridinyl Ketones

Kobayashi, K., Kozuki, T., Konishi, H.
Heterocycles, Vol. 78, No. 12, pp. 2993–3000, Dec. 2009.

Preparation of Stable Chitosan-Carboxymethyl dextran Nanoparticles

Lin, Y.-S., Renbutsu, E., Morimoto, M., Okamura, Y., Tsuka, T., Saimoto, H., Okamoto, Y., Minami, S.
J. Nanosci. Nanotechnol., **9**, 2558–2565 (2009).

Preparation of Chitin Nanofibers with a Uniform Width as α -Chitin from Crab Shells

Ifuku, S., Nogi, M., Abe, K., Yoshioka, M., Morimoto, M., Saimoto, H., Yano, H.
Biomacromol., vol. 10, pp.1584–1588, Apr. 2009.

Synthesis of silver nanoparticles templated by TEMPO-mediated oxidized bacterial cellulose nanofibers

Ifuku, S., Tsuji, M., Morimoto, M., Saimoto, H., Yano, H.
Biomacromol., vol. 10, pp.2714–2717, July. 2009.

Fibrillation of dried chitin into 10-20 nm nanofibers by a simple method under acidic conditions

Ifuku, S., Nogi, M., Yoshioka, M., Morimoto, M., Yano, H., Saimoto H.
Carbohydr. Polym., vol. 81, pp.134–139, Feb. 2010.

Acetylation of chitin nanofibers and their transparent nanocomposite films

Ifuku, S., Morooka, S., Morimoto, M., Saimoto, H.
Biomacromol., vol. 11, pp.1326–1330, Mar. 2010.

Preparation of Biocompatible and Stable Chitosan-Carboxymethyl Dextran Nanoparticles

Lin, Y.-S., Arata, F., Morimoto, M., Saimoto, H., Tsuka, T., Imagawa, T.; Okamoto, Y.; Minami, S.
Advances in Chitin Science, **11**, 195–199 (2010).

Synthesis of New Chitosan Derivatives by a Regioselective Mannich Reaction

Saimoto, H., Morimoto, M., Hakone, Y., Tanaka, Y., Irida, Y., Taruno, Y., Shigemasa, Y., Ifuku, S.
Advances in Chitin Science, **11**, 457–462 (2010).

キチン・キトサンを活用した生分解性材料

森本 稔, 斎本博之, 重政好弘, “キチン・キトサン開発技術”, 平野茂博監修, シーエムシー出版, pp.273–281, 2009 年 4 月.

21世紀の紙「透明ナノペーパー」

伊福伸介
化学, pp. 60–61, 2009 年 7 月

海洋バイオマス由来の超微細繊維「マリンナノファイバー」の製造技術

伊福伸介
月刊ディスプレイ, pp. 71–75, 2010 年 3 月

情報リテラシにおける実験データ処理の導入の試み

榊原正明
大学教育年報, 第 14 巻, pp. 26–41, 2009 年 3 月

化学実験書の改訂とその教育的効果

榊原正明, 松本法子
大学教育年報, 第 14 巻, pp. 42–56, 2009 年 3 月

Anode properties of Ru-coated Si thick film

electrodes prepared by gas-deposition

Usui, H., Kashiwa, Y., Iida, T., Sakaguchi, H.
J. Power Sources, Vol. 195, pp. 3649-3654, Dec. 2009.

Anode Properties of LaSi₂/Si Composite Thick-Film Electrodes for Lithium Secondary Batteries

Sakaguchi, H., Iida, T., Itoh, M., Shibamura, N., Hirono, T.
IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng., Vol. 1, pp. 012030-1-5, Nov. 2009.

InSb/Al-O nanogranular films prepared by RF sputtering

Usui, H., Abe, S., Ohnuma, S.
J. Phys. Chem. C, Vol. 113, pp. 20589-20593, Nov. 2009.

Surfactant concentration dependence of structure and photocatalytic property of zinc oxide rods prepared using chemical synthesis in aqueous solutions

Usui, H.
J. Colloids and Interface Sci., Vol. 336, pp. 667-674, Apr. 2009.

The effect of surfactants on the morphology and optical properties of precipitated wurtzite ZnO

Usui, H.
Mater. Lett., Vol. 63, pp. 1489-1492, Apr. 2009.

第3章 負極材料

薄井洋行, 坂口裕樹
リチウムイオン電池の開発と市場, シーエムシー出版, pp. 28-45, 2010年3月.

第3章 第3節 [1] 金属系負極活物質の創製とサイクル特性向上技術

薄井洋行, 坂口裕樹
Li 二次電池電極材料のスラリー調整, 技術情報協会, pp. 339-351, 2009年12月.

第1章 第5節 [1] 電極作製にガスデポジション法を利用したリチウム二次電池の開発

坂口裕樹
高性能蓄電池, エヌティーエス, pp. 137-148, 2009年10月.

HZSM-5 Modified by Silica CVD for Shape-selective Production of *p*-xylene: Influence of *in situ* and *ex situ* Preparation Conditions of the Zeolite

Tominaga, K., Maruoka, S., Gotoh, M., Katada, N., Niwa, M.
Microporous Mesoporous Material, Vol. 117, pp. 523-529, 2009.

Periodic Density Functional Calculation on Brønsted Acidity of Modified Y-type Zeolite

Suzuki, K., Noda, T., Sastre, G., Katada, N., Niwa, M.
J. Phys. Chem., C, Vol. 113, pp. 5672-5680 2009.

Periodic DFT Calculation of the Energy of Ammonia Adsorption on Zeolite Brønsted Acid Sites to Support the Ammonia IRMS-TPD Experiment

Suzuki, K., Sastre, G., Katada, N., Niwa M.
Chem. Lett., Vol. 38, pp. 354-355, 2009.

Combined Study of Ammonia IRMS-TPD Experiment and DFT Calculation to Characterize Zeolite Acidity

Niwa, M., Katada, N.
J. Japan Petroleum Institute, Vol. 52, pp. 172-179, 2009.

Correlation between Brønsted Acid Strength and Local Structure in Zeolites

Katada, N., Suzuki, K., Noda, T., Sastre, G., Niwa, M.
J. Phys. Chem., C, Vol. 113, pp. 19208-19217 (2009).

Biodiesel Production Using Heteropoly Acid-Derived Solid Acid Catalyst H₄PNbW₁₁O₄₀/WO₃-Nb₂O₅,

Katada, N., Hatanaka, T., Ota, M., Yamada, K., Okumura, K., Niwa, M.
Appl. Catal., A: Gen., Vol. 363, pp. 164-168 (2009).

Characterization of Sulfated Zirconia Prepared Using Reference Catalysts and Application to Several Model Reactions,

Matsuhashi, H., Nakamura, H., Ishihara, T., Iwamoto, S., Kamiya, Y., Kobayashi, J., Kubota, Y., Yamada, T., Matsuda, T., Matsushita, K., Nakai, K., Nishiguchi, H., Ogura, M., Okazaki, N., Sato, S., Shimizu, K.,

Shishido, T., Yamazoe, S., Takeguchi, T., Tomishige, K., Yamashita, H., Niwa, M., Katada, N.
Appl. Catal., A: Gen., Vol. 360, pp. 89-97, 2009.

Generation of the active Pd cluster catalyst in the Suzuki-Miyaura reactions: Effect of the activation with H₂ studied by means of quick XAFS

Okumura, K., Matsui, H., Sanada, T., Arao, M., Honma, T., Hirayama, S., Niwa, M.
J. Catal., Vol. 265, pp. 89-98, 2009.

Promoting effect of Mo on the hydrogenolysis of tetrahydrofurfuryl alcohol to 1,5-pentanediol over Rh/SiO₂

Koso, S., Ueda, N., Shinmi, Y., Okumura, K., Kizuka, T., Tomishige, K.
J. Catal., Vol. 267, pp. 89-92, 2009.

Catalytic performance and characterization of Rh-CeO₂/MgO catalysts for the catalytic partial oxidation of methane at short contact time

Tanaka, H., Kaino, R., Okumura, K., Kizuka, T., Tomishige, K.
J. Catal., Vol. 268, pp. 1-8, 2009.

Highly Dispersed Pd Species Active in the Suzuki-Miyaura Reaction

Okumura, K., Matsui, H., Tomiyama, T., Sanada, T., Honma, T., Hirayama, S., Niwa, M.
Chemphyschem, Vol. 10, pp. 3265-3272, 2009.

Enhancement of the Catalytic Activity of a Dawson-type Heteropoly Acid Induced by the Loading on a Silica Support

Okumura, K., Ito, S., Yonekawa, M., Nakashima, A., Niwa, M.
Top. Catal., Vol. 52, pp. 649-656, 2009.

熱測定, 分光, 密度汎関数計算の三位一体型ゼオライト固体酸性質研究

丹羽 幹, 片田直伸, 鈴木克生
表面科学, 第 30 巻, 104-110 頁, 2009 年

シリーズ そこが知りたい: 触媒調製の標準化プロジェクト(ゼオライトのイオン交換)の紹介,

片田直伸
ゼオライト, 第 26 巻, 28-31 頁 (2009).

**参照触媒を利用した触媒標準化の試み(第 3 回):
ゼオライトのイオン交換の標準化,**

片田直伸
ペトロテック, 第 32 巻, 212-215 頁 (2009).

時分割 QXAFS 法による高活性パラジウム触媒の形成過程および動的挙動の解明

奥村 和
放射光, 第 3 号, 151-157 頁 (2009).

時分割 XAFS 法による高活性パラジウム触媒の形成過程および動的挙動の解明

奥村 和
表面技術, 第 60 巻, 561-565 頁 (2009).

生物応用工学講座

P450の分子構造：X線結晶構造解析を中心に

永野真吾、杉本 宏、城 宜嗣

450の分子生物学 第二版講談社サイエンティフィック pp35-45, 2009年8月

Mechanical Unfolding of Covalently Linked GroES: Evidence of Structural Subunit Intermediates

Sakane, I., Hongo, K., Mizobata, T., Kawata, Y.
Protein Sci., Vol.18, No.1, pp.252-257, 2009.

Gly192 at Hinge 2 Site in the Chaperonin GroEL Plays a Pivotal Role in the Dynamic Apical Domain Movement that Leads to GroES Binding and Efficient Encapsulation of Substrate Proteins

Machida, K., Fujiwara, R., Tanaka, T., Sakane, I., Hongo, K., Mizobata, T., Kawata, Y.
Biochim. Biophys. Acta/Proteins and Proteomics, Vol.1794, No.9, pp.1344-1354, 2009.

A Potentially Versatile Nucleotide Hydrolysis Activity of Group II Chaperonin Monomers from *Thermoplasma acidophilum*

Noi, K., Hirai, H., Hongo, K., Mizobata, T., Kawata, Y.
Biochemistry, Vol.48, No.40, pp. 9405-9415, 2009.

Electroreductive Coupling of Phthalimides with α,β -Unsaturated Esters: Unusual Rearrangement of Resulting Silyl Ketene Acetals

Kise, N.; Isemoto, S.; Sakurai, T.
Org. Lett., Vol.11, No.21, pp.4902-4905, Nov. 2009.

Novel Reactivity of Dibenzothiophene Monooxygenase from *Bacillus subtilis* WU-S2B

Ohshiro, T., Nakura, S., Ishii, Y*, Kino, K*, Kirimura, K*, Izumi, Y. (*Waseda Univ.)
Biosci. Biotechnol. Biochem., Vol.73, No.9, pp.2128-2130, Sep. 2009.

Theoretical and Experimental Studies of the Conversion of Chromopyrrolic Acid to an Antitumor Derivative by Cytochrome P450 StaP: The Biological Role of Water Molecules

Wang, Y., Chen, H., Makino, M., Shiro, Y., Nagano, S., Asamizu, S., Onaka, H., and Sason, S.
J. Am. Chem. Soc. Vol.131, No. 19, pp.6748-6762, Apr. 2009

土木工学講座

Capability for Growth in Nonlinear Response of SDOF with Bilinear Hysteresis

Taniguchi, T.

ASME Pressure Vessel and Piping Conference, Seismic Engineering, Paper No. PVP2009-77562, 2009.

Effective Mass of Fluid for Rocking Motion of Flat-Bottom Cylindrical Tanks

Taniguchi, T., Segawa, T.

ASME Pressure Vessel and Piping Conference, Seismic Engineering, Paper No. PVP2009-77580, 2009.

Fluid Pressure on Unanchored Rigid Flat-Bottom Cylindrical Tanks due to Uplift Motion and Its Approximation

Taniguchi, T., Ando, Y., Nakashima, T.

Journal of Engineering Structures, Vol.31, No.11, pp.2598-2606, Nov. 2009.

ダム湖における WEP システムから吐出される高濃度酸素水の流動メカニズム

矢島啓・増木新吾* (*松江土建)

水工学論文集, 第 53 巻, pp.1339-1344, 2009 年 2 月

殿ダム貯水池における選択取水設備の操作支援システムの設計

矢島啓・Chris Dallimore^{*1}・後藤誠志^{*2} (*¹ 西オーストラリア大学, ^{*2} 国土交通省)

河川技術論文集, 第 15 巻, pp.207-212, 2009 年 6 月

Brackish water thecamoebians as an indicators of sea-level changes in Lake Koyama-ike, Tottori Prefecture, southwest Japan, over the last 60 years

Ritsuo Nomura*, Shigenori Kawano* and Hiroshi Yajima (*Shimane University)

the Quaternary Research, 48 (5), pp.305-320, Oct. 2009.

Evaluation of the intrusion generated by a submerged contact chamber of hypolimnetic oxygenator in a reservoir

Hiroshi Yajima, Jorg Imberger* and Christopher Dallimore* (*the University of Western Australia)
Intl. J. of River Basin Management, Vol.7, No.4, pp.415-422, 2009.

幅水深比の小さな一様弯曲水路における砂堆発生時の局所流に関する 3 次元数値計算

梶川勇樹・檜谷治

水工学論文集, 第 53 巻 pp.883-888, 2009 年 2 月

3D numerical simulation of complex flow over wier Kajikawa, Y. and Hinokidani, O.

33rd IAHR Congress Proceedings, pp.2230-2237, Aug. 2009.

Report on fluctuation of groundwater in a sediment filled reservoir (dam farm land) in the Loess Plateau of China---Effect of water uptake by plants on groundwater level fluctuation in arid land

Yasuda, H., Hinokidani, O., Jinbai Huang, J., Saito, T., Anyoji, H., Kimura, R., and Zhang, X*. (*中国科学院水土保持研究所)

Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources. 22, pp.301-306, 2009.

技術者の徒然草 7

降雨による斜面崩壊の機構

榎 明潔

土木技術, 64 巻, 1 号, pp.83-88, 2009 年 1 月

技術者の徒然草 8

地方大学の土木工学科の悩み

榎 明潔

土木技術, 64 巻, 5 号, pp.89-95, 2009 年 5 月

技術者の徒然草 9

文明から離れて文明を見よう

榎 明潔

土木技術, 64 巻, 7 号, pp.69-73, 2009 年 7 月

スポットライト

機構解明の面白さ

榎 明潔

土木技術, 64 巻, 9 号, pp.76-77, 2009 年 9 月

「土・地盤の学問から学ぶ建築基礎設計」
傾斜地にある宅地の安全性 (斜面災害と斜面安定)

榎 明潔

建築技術, No.706, pp.127, 2009 年 9 月

「土・地盤の学問から学ぶ建築基礎設計」
傾斜地基礎の安定

榎 明潔

建築技術, No.706, pp.128, 2009 年 9 月

「土・地盤の学問から学ぶ建築基礎設計」
傾斜地基礎の沈下・排水

榎 明潔

建築技術, No.706, pp.129, 2009 年 9 月

「土・地盤の学問から学ぶ建築基礎設計」
傾斜地の建築基礎における地質学・土質力学の役割

榎 明潔

建築技術, No.706, pp.152-153, 2009 年 9 月

大山火山灰質土不攪乱試料のせん断強度特性－不飽和土として－

清水正喜

中国地方建設技術開発推進会議, 学官の技術研究
開発の成果発表, pp.2-7, 2009 年 10 月

Unconfined Compressive Strengths of Unsaturated
Soil Prepared from Slurry

Shimizu, M. & Kageyama, K.

Proc. of the 4th Asia Pacific Conference on
Unsaturated Soils, Vol.1, pp.3-8, Nov., 2009.

「土の一軸圧縮試験」

清水正喜 (分担執筆)

地盤工学会編「地盤材料試験の方法と解説」第 7
編第 2 章, pp.541-551, 2009 年 11 月

飽和粘性土の一次元圧密試験における一次および
二次圧密挙動

清水正喜, 谷川大輝

地盤工学会中国支部論文報告集, 第 27 巻, 1 号,
pp.105-112, 2009 年 12 月

第 44 回地盤工学研究発表会総括, 3 地盤材料, (5)
砂質土・強度

清水正喜

地盤工学会誌, Vol. 57, No. 12, p.23, 2009 年 12
月

速度比の基礎的性質に着目した不連続変形法

(DDA)による落石シミュレーション

島内哲哉^{*1}, 大西有三^{*2}, 西山哲^{*3}, 中村公一, 酒
井直樹^{*4} (*¹ 明治コンサルタント(株), ^{*2} 京都大学,
^{*3} 京都大学大学院, ^{*4} 防災科学技術研究所)
土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 1, pp.53-65, 2009.

Concerning the influences of velocity ratio and
topography model on the result of rockfall
simulation

Shimauchi, T.^{*1}, Nakamura, K., Sakai, N.^{*2}, Hagiwara,
I.^{*3}, Nishiyama, S.^{*4}, Ohnichi, Y.^{*4}.

(*¹ MEIJI CONSULTANTS CO., Ltd, ^{*2} National
Research Institute for Earth Science and Disaster
Prevention, ^{*3} SUNCOH CONSULTANTS CO., Ltd,
^{*4} Kyoto University)

The 9th International Conference on Analysis of
Discontinuous Deformation, 2009.

全骨材に溶融スラグを用いたコンクリートの物性
と品質改善

金子泰治, 井上正一, 黒田 保, 吉野 公

コンクリート工学年次論文集, 第 31 巻, 第 1 号,
pp.1825-1830, 2009 年 7 月

コンクリートの ASR 膨張に与えるアルカリ含有量
と促進養生条件の影響

黒田 保, 井上正一, 吉野 公, 西林新蔵* (*鳥取
大学名誉教授)

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 9 巻, pp.163-170, 2009 年 10 月

コンクリート診断士 合格必携 2009 年度版

笠井芳夫^{*1}, 田澤榮一^{*2}, 井上正一 他 9 名 (*¹ 日
本大学名誉教授, ^{*2} 広島大学名誉教授)
技術書院, 2009 年 2 月

コンクリート構造物の設計・施工・維持管理の基
本 -疲労限界状態に対する検討-

井上正一

(社)土木学会関西支部, pp.121-134, 2009 年 10
月

甦るコンクリート舗装 -20 年が経過した北条バ
イパス CRCP の評価と長寿命化-

吉岡靖彦^{*1}, 中村俊行^{*2}, 飯島尚^{*3}, 井上正一, 五
島泰宏^{*4} (*¹ 国土交通省, ^{*2} 日本道路協会, ^{*3} 建設
技術研究所, ^{*4} 大成ロテック (株))

セメント・コンクリート, No.750, pp.49-56, 2009

年 8 月

コンクリート工学ハンドブック

吉野 公 (分担執筆)

朝倉書店, pp.273-279, 2009 年 10 月

岩盤斜面安定解析のための 2 次元個別要素モデル

西村 強, 福田 毅*, 辻野 考治 (*地層科学研究所), 土木学会, 第 38 回岩盤力学シンポジウム講演集, pp.7-12. 2009 年 1 月

トンネル特性曲線による支保効果の定量的評価に向けてー共通効果と断面閉合効果についてー
木山 英郎, 西村 強, 畑 浩二*, 中岡 健一* (*大林組)

土木学会, 第 38 回岩盤力学シンポジウム講演集, pp.239-244. 2009 年 1 月

Distinct Element Analysis for Progressive Failure in Rock Slope

Tsuyoshi NISHIMURA, Kouji Tsujino and Tsuyoshi FUKUDA* (*Geoscience Laboratory)

Japanese Geotechnical Society, Proceedings of the International Symposium on Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation, Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation, pp.173-178. 2009.5.

An Investigation of Numerical Damping for Modeling of Impact

Tsuyoshi NISHIMURA

Society for Rock Mechanics & Engineering Geology (Singapore, SRMEG), Proceedings of the 9th International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, "New Developments and Applications". pp. 387-394, 2009.11.

Development of N-line numerical model considering the effects of beach nourishment

Shibutani,Y., Kuroiwa,M. Matsubara,Y., Kim,M. and Abualtaef,M.

Journal of Coastal Research Special Issue 56, pp.554-558, 2009

Three-dimensional numerical model for predicting

beach evolution after sand nourishment

Kuroiwa,M., Shibutani,Y. and Matsubara.Y

Proceedings of the 5th International Conference on Asian and Pacific Coast. Vol.4, pp.280-287, Oct.,2009

Applicability of 3D morphodynamic model to medium-term beach evolution

AHMED Khaled Seif,A. Kuroiwa,M., Abualtyef, M. and Matsubara,Y.

Proceedings of the 5th International Conference on Asian and Pacific Coast, Vol.4, pp.287-294, Oct., 2009

N-line model for predicting beach sedimentation in nourished beach with sand of mixed grain size

Shibutani,Y., Kuroiwa,M. and Matsubara,Y.

Proceedings of the 5th International Conference on Asian and Pacific Coast, Vol.4, pp.301-307., Oct.,2009

混合粒径砂による分級と移流拡散による土砂投入を考慮した等深線変化モデル

澁谷容子, 黒岩正光, 松原雄平

土木学会海洋開発論文集, 第 25 巻, pp.1131-1136, 2009 年 7 月

FAVOR 法を用いた海浜流モデルの開発と海浜流場に与える計算格子と渦動粘性係数の影響に関する一考察

黒岩正光, 高田哲史, 松原雄平

土木学会海洋開発論文集, 第 25 巻, pp.1239-1244, 2009 年 7 月

山口県光市室積海岸における海浜変形

三宅健一^{*1}, 松原雄平, 中山哲蔵^{*2}, 羽田野崇義^{*3}, 宇多高明^{*4}, 岡田新市^{*5} (*¹財団法人漁港漁場漁村技術研究所, ^{*2}水産総合研究センター, ^{*3}山口大学, ^{*4}(財)土木研究センター, ^{*5}山口県光市)
土木学会海洋開発論文集, 第 25 巻, pp.1179-1185, 2009 年 7 月

沖合養浜による土砂投入を考慮した 3 次元海浜変形予測モデルに関する研究

黒岩正光, 澁谷容子, 松原雄平, 口石孝幸^{*1} (*¹いであ株式会社)

土木学会海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.155-160, 2009 年 10 月

**移流拡散による土砂供給と沿岸・岸沖漂砂による
分級を考慮した等深線変化モデル**

澁谷容子, 黒岩正光, 松原雄平

土木学会海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.601-605,
2009 年 10 月

**Conditions of fault rupture and site location that
generate damaging pulse waves**

Kagawa, T.

6th International Conference on Urban Earthquake
Engineering, pp. 53-58, Mar. 2009.

**Study on probabilistic earthquake hazard analysis
applying the fault rupture model**

Kagawa, T.

SAFETY, RELIABILITY AND RISK OF
STRUCTURES, INFRASTRUCTURES AND
ENGINEERING SYSTEMS, CRC Press, CD-ROM,
Sep. 2009.

**断層モデルとの比較に基づく震源破壊進行を考慮
した経験的距離減衰特性の補正について**

鶴来雅人^{*1}・香川敬生・入倉孝次郎^{*2} (^{*1}地域地盤
環境研究所, ^{*2}愛知工業大学)

構造工学論文集, 第 55A 巻, pp. 353-363, 2009 年
3 月

**断層モデルとの比較に基づく震源破壊進行を考慮
した経験的距離減衰特性の補正について**

香川敬生

土木学会地震工学論文集, 第 30 巻, pp.59-64, 2009
年 12 月

**微動 H/V と重力探査による福井平野の地下構造推
定**

安井譲^{*1}・野口竜也・橋本勇一^{*1}・中谷英史・香川
敬生 (^{*1}福井工業大学)

土木学会地震工学論文集, 第 30 巻, pp.75-81, 2009
年 12 月

**Modification of the Network-MT method and its
first application in imaging the deep conductivity
structure beneath the Kii Peninsula, southwestern
Japan**

Yamaguchi S.*1, Uyeshima M.*2, Murakami H.*3,
Sutoh S.*1, Tanigawa D.*1, Ogawa T.*2, Oshiman
N.*4, Yoshimura R.*4, Aizawa K.*4, Shiozaki I.,
Kasaya T.*5(*1 Kobe Univ, *2 Univ Tokyo, *3 Kochi

Univ, *4 Kyoto Univ, *5 JAMSTEC)

Earth Planets and Space, Vol.61, No.8, pp. 957 - 971,
2009

**Magnetotelluric transect across the Niigata-Kobe
Tectonic Zone, central Japan: A clear correlation
between strain accumulation and resistivity
structure**

Yoshimura, R.*1, Oshiman, N.*1, Uyeshima, M.*2,
Toh, H.*3, Uto, T.*1, Kanezaki, H.*3, Mochido, Y,
Aizawa, K.*2, Ogawa, Y.*4, Nishitani, T.*5,
Sakanaka, S.*5, Mishina, M.*6, Satoh, H.*7, Goto,
T.*8, Kasaya, T.*8, Yamaguchi, S.*9, Murakami,
H.*10, Mogi, T.*11, Yamaya, Y.*11, Harada, M.*12,
Shiozaki, I., Honkura, Y.*4, Koyama, S.*2, Nakao,
S.*1, Wada, Y.*1, Fujita, Y.*1

Geophysical Research Letters, Vol.36, L20311, Oct 23,
2009

西南日本背弧における導体地球の長周期応答

南拓人*1, 藤浩明*1, 笠谷貴史*2, 下泉政志*3,
新貝雅文*3, 大志万直人*1, 吉村令慧*1, 塩崎一
郎, 山崎明*4, 藤井郁子*4, 村上英記*5, 山口寛
*6, 上嶋誠*7 (*1京都大, *2海洋研究開発機構,
*3九州職能大, *4気象庁, *5高知大, *6神戸大,
*7東京大)

Conductivity Anomaly 研究会論文集 2009,
pp. 56-64, 2009 年 9 月

**沈み込む海洋プレートの形状と脱水反応による
液体分布の解明**

塩崎一郎

鳥取大学, 平成 20 年度地震予知年次報告(機関別),
観測研究計画推進委員会, 科学技術・学術審議会
測地学分科会地震部会, pp. 298-301, 2009 年 7 月

**内陸地震の発生機構の解明一特に, 西南日本の地
震特性と深部構造の関連に着目して**

塩崎一郎

鳥取大学, 平成 20 年度地震予知年次報告(機関別),
観測研究計画推進委員会, 科学技術・学術審議会
測地学分科会地震部会, pp. 302-305, 2009 年 7 月

西南日本背弧の海底電磁気観測

藤浩明*1, 笠谷貴史*2, 下泉政志*3, 新貝雅文*3,
大志万直人*1, 吉村令慧*1, 塩崎一郎, 山崎明*4,
藤井郁子*4, 村上英記*5, 山口寛*6, 上嶋誠*7 (*1

京都大, *2海洋研究開発機構, *3九州職能大, *4
気象庁, *5高知大, *6神戸大, *7東京大)
Conductivity Anomaly 研究会論文集 2008, 27-34,
2008 年 3 月

**Estimation of S-wave Velocity Structure of Vertical
Section Orthogonal to the Fukui earthquake fault
based on microtremor observation**

Kojima, K. and Noguchi, T.

International Conference on Performance-Based
Design in Earthquake Geotechnical Engineering, June.
2009.

微動探査による島根県浜田市の地盤構造推定

野口竜也, 足立正夫^{*1}, 田原一志^{*2}, 山下毅^{*3}, 西
田良平^{*4} (*¹米子工業高校, *²今井産業, *³ニッポ
コーポレーション, *⁴放送大学)

土木学会地震工学論文集, 第 30 巻, pp.82-87, 2009
年 12 月

出雲平野および松江平野の深部地盤構造

足立正夫^{*1}, 野口竜也, 小村紘平^{*2}, 西田良平^{*3} (*¹
米子工業高校, *²鳥取市水道局, *³放送大学)

土木学会地震工学論文集, 第 30 巻, pp.97-103,
2009 年 12 月

**微動 H/V と重力探査による福井平野の地下構造推
定**

安井譲^{*1}, 野口竜也, 橋本勇一^{*1}, 中谷英史, 香川
敬生 (*¹福井工業大学)

土木学会地震工学論文集, 第 30 巻, pp.75-81, 2009
年 12 月

鳥取県弓ヶ浜半島における地震動特性

野口竜也, 大畑至^{*1}, 西田良平^{*2} (*¹JR 東海, *²放
送大学)

東濃地震科学研究所報告, NO.24, pp.1-14, 2009
年 3 月

(受理 平成 22 年 10 月 29 日)

社会経営工学講座

Operational software performance evaluation based on the number of debuggings with two kinds of restoration scenarios

K. Tokuno and S. Yamada

In Recent Advances in Stochastic Operations Research II, T. Dohi, S. Osaki, and K. Sawaki, Eds., Part D, pp. 253-269, World Scientific, Singapore, April 2009.

Software reliability assessment with 2-types imperfect debugging activities

S. Inoue and S. Yamada

In Recent Advances in Stochastic Operations Research II, T. Dohi, S. Osaki, and K. Sawaki, Eds., Part D, pp. 271-283, World Scientific, Singapore, April 2009.

Flexible stochastic differential equation modeling for open source software reliability assessment

Y. Tamura* and S. Yamada (*Yamaguchi University)

In Recent Advances in Stochastic Operations Research II, T. Dohi, S. Osaki, and K. Sawaki, Eds., Part D, pp. 285-300, World Scientific, Singapore, April 2009.

Software performability measurement based on availability model with user-perceived performance degradation

K. Tokuno and S. Yamada

In Advances in Software Engineering (Communications in Computers and Information Sciences 59), D. Slezak, T.-H. Kim, A. Kiumi, T. Jiang, J. Verner and S. Abrahão, Eds, pp. 264-271, Springer-Verlag, Berlin, December 2009.

Optimisation analysis for reliability assessment based on stochastic differential equation modeling for open source software

Y. Tamura* and S. Yamada (*Yamaguchi University)

International Journal of Systems Science, Vol. 40, No. 4, pp. 429-438, April 2009.

Bayesian optimal release time based on inflection S-shaped software reliability growth model

H.S. Kim^{*1}, D.H. Park^{*2}, and S. Yamada (^{*1} Customs

and Trade Laboratory, Korea Customs and Trade Development Institute, ^{*2} Hallym University, Korea)
IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E92-A, No. 6, pp. 1485-1493, June 2009.

Software reliability measurement based on a discrete binomial model with program size

S. Inoue and S. Yamada

Asia-Pacific Journal of Industrial Management, Vol. II, Issue 1, pp. 78-85, 2009.

Software reliability measurement with change of software failure-occurrence phenomenon

S. Inoue and S. Yamada

Asia-Pacific Journal of Industrial Management, Vol. II, Issue 1, pp. 86-92, 2009.

Performability modeling for software system with performance degradation and reliability growth

K. Tokuno and S. Yamada

IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science, Vol. E92-A, No. 7, pp. 1563-1571, July 2009.

Stochastic differential equation-based flexible software reliability model

P.K. Kapur^{*1}, S. Anad^{*1}, S. Yamada, and V.S-S. Yadavall^{*1} (^{*1} University of Delhi)

Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2009, Article ID581383, 15pp, 2009, doi: 10.1155/2009/581383.

Debugging process-oriented discrete software reliability modeling

S. Inoue, N. Iwamoto, and S. Yamada

International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 357-370, August 2009.

An embedded OSS reliability and optimization and incorporating imperfect debugging

Y. Tamura* and S. Yamada (*Yamaguchi University)

International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 371-384, August 2009.

Generalized Markovian software reliability

modeling and its alternative calculation

K. Tokuno, T. Kodera, and S. Yamada

International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 16, No. 5, pp. 385-402, October 2009.

Statistical analysis of process monitoring data for software process improvement

S. Yamada and A. Kawahara

International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 16, No. 5, pp. 435-451, October 2009.

JABEE（経営工学関連分野）の受審とその効果

小柳淳二, 松見吉晴, 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. 54, No. 5, pp. 272-276, 2009年5月.

Reliability modeling with imperfect debugging based on stochastic differential equation for an open source software

Y. Tamura* and S. Yamada (*Yamaguchi University)

Proceedings of the Fifteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, California, U.S.A., August 6-8, 2009, pp. 85-89.

Infinite server queueing modeling for discrete software reliability measurement

N. Iwamoto, S. Inoue, and S. Yamada

Proceedings of the Fifteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, California, U.S.A., August 6-8, 2009, pp. 90-94.

Software reliability modeling with changing of testing-environment at change-point

Y. Tobita, S. Inoue, and S. Yamada

Proceedings of the Fifteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, California, U.S.A., August 6-8, 2009, pp. 95-99.

Software reliability modeling based on PHM approach in an infinite server queueing model

S. Inoue and S. Yamada

Proceedings of the Fifteenth ISSAT International

Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, California, U.S.A., August 6-8, 2009, pp. 105-109.

A study on statistical analysis of process monitoring data for software process improvement

A. Kawahara and S. Yamada

Proceedings of the Fifteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, California, U.S.A., August 6-8, 2009, pp. 249-253.

A study on product quality prediction and development-period estimation based on software process data

S. Yamada and Y. Yamashita

Proceedings of the Fifteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, California, U.S.A., August 6-8, 2009, pp. 260-264.

Improvement in software projects by process monitoring and quality evaluation activities

T. Fukushima* and S. Yamada (*Nissin Systems Co., Ltd.)

Proceedings of the Fifteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, California, U.S.A., August 6-8, 2009, pp. 265-269.

A new analysis concept in application of software reliability growth models

T. Fujiwara* and S. Yamada (*Business Cube & Partners, Inc.)

Proceedings of the Fifteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, California, U.S.A., August 6-8, 2009, pp. 270-274.

Stochastic differential equation modeling based on component importance levels and optimal version-upgrade problem of OSS

T. Tanaka, Y. Tamura, and S. Yamada

Proceedings of the Fifteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, California, U.S.A., August 6-8, 2009, pp. 372-376.

Generalized Markovian software reliability modeling and its approximation

T. Kodera, K. Tokuno, and S. Yamada

Proceedings of the Fifteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, California, U.S.A., August 6-8, 2009, pp. 377-381.

Markovian performability modeling for hardware-software system

J. Takahashi, K. Tokuno, and S. Yamada

Proceedings of the Fifteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, California, U.S.A., August 6-8, 2009, pp. 382-386.

A method of reliability assessment based on Bayesian network for an embedded open source software

H. Takehara, Y. Tamura* and S. Yamada (*Yamaguchi University)

Proceedings of the Fifteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, California, U.S.A., August 6-8, 2009, pp. 387-391.

変化点におけるソフトウェア故障発生時間分布の変化を考慮した信頼性モデル

井上真二, 山田 茂

日本経営工学会中国四国支部研究論文発表会論文集, Vol. 16, 平成 21 年 12 月 2 日, 広島市, pp. 25-30.

プロセスデータに基づく統計的ソフトウェアプロジェクト評価法に関する考察

福田 篤*, 山田 茂 (*西川ゴム工業 (株))

日本経営工学会中国四国支部研究論文発表会論文集, Vol. 16, 平成 21 年 12 月 2 日, 広島市, pp. 31-36.

Reliability analysis methods for an open source software with their comparison of goodness-of-fit

Y. Tamura* and S. Yamada (*Yamaguchi University)

Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2009) (IEEE Catalog Number: CFP09IEI-USB), Hong Kong, December 9-11, 2009, pp. 208-212.

Two-dimensional software reliability measurement

S. Inoue and S. Yamada

Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2009) (IEEE Catalog Number: CFP09IEI-USB), Hong Kong, December 9-11, 2009, pp. 223-227.

OSS に対する決定論的カオスに基づく信頼性評価法とその応用

田村慶信*, 山田 茂 (* 山口大学)

統計数理研究所共同研究リポート 229 「最適化：モデリングとアルゴリズム 22」, pp. 217-225, 2009 年 3 月.

Software performability evaluation model with dynamic reliability growth process

得能貢一, 山田 茂

統計数理研究所共同研究リポート 229 「最適化：モデリングとアルゴリズム 22」, pp. 226-237, 2009 年 3 月.

2 次元ソフトウェア信頼性モデルに基づく最適リリース問題に関する一考察

井上真二, 山田 茂

統計数理研究所共同研究リポート 229 「最適化：モデリングとアルゴリズム 22」, pp. 238-243, 2009 年 3 月.

テスト環境の変更を考慮したソフトウェア信頼性モデルに関する一考察

井上真二, 桑田裕文, 山田 茂

数理解析研究所講究録 1636 「不確実性と意思決定の数理」, pp. 237-242, 2009 年 4 月.

オープンソースソフトウェアに対する SRGM に基づく予測精度の検証

田村慶信*, 田中智朗, 山田 茂 (* 山口大学)

数理解析研究所講究録 1636 「不確実性と意思決定の数理」, pp. 243-250, 2009 年 4 月.

アジャイル・ソフトウェア開発における定量的ソフトウェア品質評価法に関する考察

青木俊樹, 山田 茂

数理解析研究所講究録 1636 「不確実性と意思決定の数理」, pp. 251-258, 2009 年 4 月.

運用期間中の不確実性を考慮したソフトウェア最適リリース問題に関する研究

豊田寿行*, 山田 茂 (* 鳥取環境大学)
数理解析研究所講究録 1636「不確実性と意思決定の数理」, pp. 267-274, 2009 年 4 月.

組込み OSS に対するハザードレートモデルに基づく移植性評価と最適リリース問題への応用

竹原英秀, 田村慶信*, 山田 茂(* 山口大学)
第 11 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS) 論文集, 2009 年 11 月, 山口大学工学部, 宇部市, CD-ROM pp. 255-256.

チェンジポイントを考慮した環境関数に基づくソフトウェア信頼性計測に関する一考察

飛田裕一, 井上真二, 山田 茂
第 11 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS) 論文集, 2009 年 11 月, 山口大学工学部, 宇部市, CD-ROM pp. 258-259.

プロセスデータに基づく品質を考慮した開発期間の見積りに関する研究

山下知記, 山田 茂
第 11 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS) 論文集, 2009 年 11 月, 山口大学工学部, 宇部市, CD-ROM pp. 260-261.

ハードウェアおよびソフトウェアコンポーネントの故障/修復特性を同時に考慮したコンピュータシステムの性能評価法

高橋淳一, 得能貢一, 山田 茂
第 11 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS) 論文集, 2009 年 11 月, 山口大学工学部, 宇部市, CD-ROM pp. 262-263.

デバッグングプロセスを考慮した離散時間ソフトウェア信頼性モデル構築枠組み

岩本直樹, 井上真二, 山田 茂
第 11 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS) 論文集, 2009 年 11 月, 山口大学工学部, 宇部市, CD-ROM pp. 264-265.

マルコフ型ソフトウェア信頼性モデルに基づく信頼性評価尺度算出のための代替的計算法

小寺貴裕, 得能貢一, 山田 茂
第 11 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム (HISS) 論文集, 2009 年 11 月, 山口大学工学部, 宇部市, CD-ROM pp. 266-267.

An equilibrium of threshold policies in a queueing

system with observable and unobservable queues on arrivals

Koyanagi, J., Yoshida, K., Kawai, H.
15th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, pp. 191-195, 2009.

過疎地におけるバス時刻最適化問題

大本高志, 小柳淳二, 河合 一
数理解析研究所講究録 1636 「不確実性と意思決定の数理」, pp. 225-228, 2009.

Cumulative Damage Models

Takashi Satow
Stochastic Reliability Modeling, Optimization and Applications(Editors: Syouji Nakamura, Toshio Nakagawa), World Scientific, pp. 35-62, 2009.

供用期間を考慮した消波ブロックの損傷度に基づく予防保全問題

佐藤 毅, 杓見吉晴, 角 勇人, 平山隆幸*, 太田隆夫 (*三省水工)
土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol.B2-65, No.1, pp. 951-955, 2009.

An Inspection Threshold for Two-components Systems

Takashi Satow and Hajime Kawai
15th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, pp. 191-195, 2009.

過疎地域における社会基盤施設に対する経済的維持管理手法

佐藤 毅, 杓見吉晴
平成 21 年度 持続的過疎社会形成研究プロジェクト研究報告書, pp. 95-102.

地方における公共交通のサービス供給基準に関する研究

谷本圭志, 牧 修平*¹ (*¹ 東芝ソリューション株式会社)
運輸政策研究, Vol.11, No.4, Winter, pp.10-20, 2009 年 1 月

無人運転技術を用いた車両共有システムの導入に伴う環境影響に関する分析

谷本圭志, 川村周平

社会技術研究論文集 6, pp.68-76, 2009 年 3 月

公共交通サービスのミニマム水準の検討のための一考察 —生活環境への認知的な適応に着目した導出手法—

谷本圭志, 森山昌幸^{*1} (^{*1}バイタルリード)
運輸政策研究, Vol.12, No.1, pp.2-10, 2009 年 4 月

地方都市における路線バスの特典付き通学定期券の購入可能性分析

谷本圭志, 端詰将範^{*1} (^{*1}鳥取県)
IATSS Review, Vol.34, No.1, pp.26-33, 2009 年 6 月

地域公共交通計画策定のためのフレームワークの提案

喜多秀行^{*1}, 菊池武弘^{*2}, 竹内伝史^{*3}, 谷本圭志, 宮崎耕輔^{*4} (^{*1}神戸大学, ^{*2}NPO 法人ひらかわマイバスの会, ^{*3}岐阜大学, ^{*4}香川高等専門学校)
土木計画学研究・講演集, Vol.39, CD-Rom, 2009 年 6 月

様々な運行主体の重層的活用による地域公共交通計画

谷本圭志, 木下順久^{*1}, 浅田雅史^{*1} (^{*1}日南町)
土木計画学研究・講演集, Vol.39, CD-Rom, 2009 年 6 月

維持管理を目的とした生活道路の分類手法に関する研究

谷本圭志, 村田博美, 灘 英樹^{*1} (^{*1}境港市)
土木計画学研究・講演集, Vol.39, CD-Rom, 2009 年 6 月

地方部における公共交通の計画情報に関する考察 —活動の機会と活動ニーズの関係に着目して

谷本圭志, 喜多秀行^{*1} (^{*1}神戸大学)
土木学会論文集 D, Vol.65, No.4, pp.534-543, 2009 年 12 月

地方部における公共交通計画のためのアクセシビリティ指標の開発

谷本圭志, 牧 修平, 喜多秀行^{*1} (^{*1}神戸大学)
土木学会論文集 D, Vol.65, No.4, pp.544-553, 2009 年 12 月

「地域公共交通計画の新たな潮流」特集にあたって

谷本圭志, 喜多秀行^{*1} (^{*1}神戸大学)
土木学会論文集 D, Vol.65, No.4, pp.519-520, 2009 年 12 月

Analyses on Continuance of Unpopular International Airline by Local Government: A Case of Tottori Prefecture in Japan

Kei Fukuyama, Yuki Ikeda
Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.2389-2394, Dec. 2009.

鳥取市街地における地価決定要因の分析

福山 敬, 池田結樹, 桑原健介^{*1} (^{*1}システムプロ)
都市計画研究講演集 (日本都市計画学会・中国四国支部), 7, pp.29-30, 2009.

Roback モデルによる鳥取県のアメニティーの評価

福山 敬, 池田結樹, 永井真道^{*1} (^{*1}鳥取市)
都市計画研究講演集 (日本都市計画学会・中国四国支部), 7, pp.31-34, 2009.

SCGE Model Construction and Simulation Analysis of the Agricultural Subsidy Policy in China

Mu Yue-ying* and A. Koike (*China Agricultural University)
Journal of Quantitative & Technical Economics, Vol.26 No.1, pp.3-15, 2009.

Spatial Computable General Equilibrium model “RAEM-Light” for Highway Network Projects in Japan

A. Koike, L. Tavasszy^{*1} and K. Sato^{*2} (^{*1}TU Delft, ^{*2}Fukken Co., Ltd.)
Proceedings of 88th Annual Meeting of Transportation Research Board, DVD, 2009.

道路ネットワーク整備が人口・社会構成へ及ぼす影響分析-中国地方におけるパネルデータ分析-

小池淳司
IATSS Review, Vol. 34, No.1, pp. 6-14, 2009.

港湾貨物取扱貨物量の変化が中国地方の道路ネットワーク整備効果へ与える影響～東アジアの経済成長を視野に入れた検討～

佐藤啓輔*, 小池淳司, 川本信秀* (*復建調査設計)

IATSS Review, Vol.34, No. 1, pp. 34-44, 2009.

DEA 手法による公営企業の運営効率性評価-公営バス事業を事例とした評価-

平井健二^{*1}, 小池淳司, 喜多秀行^{*2} (*¹ 復建調査設計, ^{*2} 神戸大学)

土木計画学研究・論文集, Vol.26, pp.133-140, 2009.

防災計画のための空間被害分布分析

小池淳司, 山田勝也^{*} (*ライテック)

土木計画学研究・論文集, Vol.26, pp.141-148, 2009.

空間的応用一般均衡モデル「RAEM-Light」を用いた道路ネットワーク評価-地域間公平性の視点からの実務的アプローチ-

小池淳司, 佐藤啓輔^{*}, 川本信秀^{*} (*復建調査設計)

土木計画学研究・論文集, Vol.26, pp.161-168, 2009.

港湾取扱貨物量を明示化した道路ネットワーク評価モデルの構築-応用一般均衡モデル「RAEM-Light」をもちいたアプローチ-

小池淳司, 川本信秀^{*}, 佐藤啓輔^{*} (*復建調査設計)

土木計画学研究・論文集, Vol.26, pp.189-196, 2009.

空間的応用一般均衡分析における地域細分化による道路整備便益の影響分析

小池淳司, 片山慎太郎^{*1}, 川本信秀^{*2} (*¹ システム科学研究所, ^{*2} 復建調査設計)

土木計画学研究・論文集, Vol.26, pp.209-218, 2009.

Impact analysis on China cotton economy from cotton subsidies cancellation by developed countries: Based on the spatial computable equilibrium model

Mu Yue-ying^{*}, Xhao Xia^{*} and Koike Atsushi (*China Agricultural University)

Systems Engineering Theory & Practice, Vol.29, No.10, 2009.

The Optimum Risk Management Policy of a Road Network under the Decentralized Society in Japan

A. Koike, L. Tavasszy^{*1} and K. Sato^{*2} (*¹ TUDelft, ^{*2} Fukken Co., Ltd.)

Proceedings of Uddevalla Symposium, pp.673-688, 2009.

Spatial Equity Analysis on Expressway Network Development in Japan-Empirical Approach Using

the Spatial Computable General Equilibrium Model RAEM-Light-

A. Koike, L. Tavasszy^{*1} and K. Sato^{*2} (*¹ TUDelft, ^{*2} Fukken Co., Ltd.)

Journal of the Transportation Research Board, Vol.2133, 46-55, 2009.

EXCEL で学ぶ地域・都市経済分析

小池淳司 (分筆)

上田孝行^{*}編著 (*東京大学), 第3章, 第4章, コロナ社, 2009.

護岸被覆工の被災劣化に伴う反射率変化に関する予測診断システムの開発

松見吉晴, 河合直樹, 平山隆幸^{*1}, 太田隆夫, 大野賢一^{*2} (*¹ 三省水工, ^{*2} 鳥取大学総合メディア基盤センター)

海洋開発論文集, 第25巻, pp.169-174, 2009年6月

高潮災害を対象としたソフト防災に関する考察

松見吉晴, 雁津佳英

土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.1366-1370, 2009年10月

傾斜堤および傾斜護岸における断面変化のモデル化と性能評価

太田隆夫, 松見吉晴, 平山隆幸^{*}, 木村 晃 (*三省水工)

海洋開発論文集, 第25巻, pp.175-179, 2009年6月

人工リーフ背後の緩傾斜護岸における打ち上げ高・越波量について

太田隆夫, 木村 晃, 松見吉晴

土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.776-780, 2009年10月

日本海沿岸における台風通過後の異常高潮特性の解析

金 洙列, 松見吉晴, 安田誠宏^{*}, 間瀬 肇^{*}, 河合直樹 (*京都大学)

土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.B2-65, No.1, pp.376-380, 2009年10月

強風時の表層鉛直混合が高潮および物理環境へおよぼす影響

森 信人^{*}, 高田理絵^{*}, 安田誠宏^{*}, 間瀬 肇^{*}, 金

洙列 (*京都大学)

土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.B2-65, No.1,
pp.241-245, 2009 年 10 月

気象モデルによる 4 次元データ同化およびネスティングが高潮推算精度に及ぼす影響に関する研究

安田誠宏^{*1}, 山口達也^{*2}, 金 洙列, 森 信人^{*1},
間瀬 肇^{*1} (*¹京都大学, ^{*2}日本工営)

土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.B2-65, No.1,
pp.381-385, 2009 年 10 月

Evaluation of Typhoons due to Global Warming and Storm Surge Simulations by Using the General Circulation Model outputs

T. Yasuda*, H. Mase*, R. Takada*, S.Y. Kim, N. Mori*,
Y. Oku* (*Kyoto University)

Proc. of the 33rd Congress of IAHR, pp. 387-392,
2009.

Storm Surge Hindcast in Tosa Bay of Japan using a Coupled Model of Surge, Wave and Tide

S.Y. Kim, T. Yasuda*, H. Mase*, Y. Matsumi (*Kyoto
University)

Coastal Dynamics 2009, CD-ROM, No.19, 2009.

Effects of Wave Stress and Vertical Mixing on Storm Surge Simulation

N. Mori*, R. Takada*, H. Mase*, T. Yasuda*, S.Y. Kim
(*Kyoto University)

Coastal Dynamics 2009, CD-ROM, No.20, 2009.

Storm Surge Hindcast around West Coast of Japan Sea using a Coupled Model of Surge, Wave and Tide

S.Y. Kim, Y. Matsumi, T. Yasuda*, H. Mase* (*Kyoto
University)

Proc. 5th Int. Conf. on Asian and Pacific coasts,
pp.125-131, 2009

Numerical Study of Storm surges in the Seto Inland Sea By Multi Physics Model

T. Yasuda^{*1}, T. Yamaguchi^{*2}, S.Y. Kim, H. Shimada^{*1},
H. Mase^{*1} (*¹Kyoto University, ^{*2}Nippon Koei)

Proc. 5th Int. Conf. on Asian and Pacific coasts,
pp.170-176, 2009

人口減少高齢化構造からみた一般行政サービスの
の受益と負担を考慮した汚水処理事業経営

細井由彦, 増田貴則, 赤尾聡史, 麻本裕也

環境システム研究論文集, 第 37 巻, pp.145-152,
2009 年 10 月

公共財の供給を含む一般会計を考慮した人口減少高齢化社会における下水道事業経営

細井由彦, 灘 英樹^{*1}, 増田貴則, 赤尾聡史 (*¹
境港市)

環境工学研究論文集, 第 46 巻, pp.165-174, 2009
年 11 月

ガラス系再生材からの重金属溶出特性と地下水への影響評価

門木秀幸^{*1}, 貴田晶子^{*2}, 細井由彦 (*¹鳥取県衛生
環境研究所, ^{*2}国立環境研究所)

廃棄物資源循環学会論文誌, Vol.20, No.1, pp.24-38,
2009.

Identifying high-chlorine-consuming pipes in urban water distribution systems –Development of impulse-response method –

Aklog, D., Hosoi, Y.

Proceedings of the 8th International Symposium on
Water Supply Technology, pp.423-431, 2009.

**GIS を活用した水道原水の汚染リスク要因抽出に
流域情報の形態が与える影響について**

増田貴則, 田中春樹, 山田俊郎^{*1}, 秋葉道宏^{*1}, 細
井由彦 (*¹国立保健医療科学院)

環境工学研究論文集, 第 46 巻, pp.241-247, 2009
年 11 月

**Effect of surface state of paddy fields on pollutant
load outflow during a nonirrigation period**

Lee, H., Katayama, R., Masuda, T., Hosoi, Y.

Desalination and Water Treatment, Vol.4, pp.255-261,
2009.

講座による編集

土 木 工 学 講 座 71

不飽和土の三軸圧縮試験における乾燥とせん断に伴う側方変形挙動

清水 正喜^{*1}・下垣 克夫^{*1}・来海 康宏^{*2}

^{*1} 鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

^{*2} 鳥取大学工学部土木工学科

Lateral Deformation due to Drying and Shearing in Triaxial Compression Test of Unsaturated Soil

Masayoshi SHIMIZU^{*1}, Katsuo SHIMOGAKI^{*1} and Yasuhiro KIMACHI^{*2}

^{*1}Department of Management of Social Systems and Civil Engineering

Graduate School of Engineering, Tottori University

^{*2} Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Tottori University

Tottori, 680-8552 Japan

E-mail: mshimizu@cv.tottori-u.ac.jp

Abstract: The application of suction on a saturated soil specimen consolidated in an oedometer may cause the lateral shrinkage and therefore the condition of the one dimensional compression will not be implemented. This study tries to simulate such situation using triaxial testing apparatus and to quantify the lateral deformation due to drying and shearing. Main conclusions are as follows: (1) lateral shrinkage occurs when suction is applied under the anisotropic stress condition, and (2) with increasing the shear stress, the lateral compressive strain, which occurred due to the drying, will reduce and, at some raised level of the shear stress, it will turn to be expansive.

Key Words:, Triaxial tests, Unsaturated soil, Suction, Anisotropic consolidation, Lateral strain

1. はじめに

土の一次元圧縮試験において、ある荷重の下で飽和状態にある供試体にサクションを作用させて不飽和状態にすると、供試体が側方に収縮し、供試体と圧密容器の間に隙間が生じる可能性がある。隙間が生じると1次元圧縮という条件が満たされなくなる。本研究の目的は一次元圧密容器内で、飽和供試体にサクションを作用させて不飽和化したときの側方の変形量を定量的に評価することである。

過去の研究[1]において、ある荷重の下でサクションを作用させたときの側方収縮量をノギスと写真によって測定することを試みた。その結果、サクションの作用によって確かに収縮して供試体周面と容器との間に隙間が生じること、荷重を増加していくとその隙間が小さくなっていくことを明らかにすることができた。しかし、用いた方法（ノギス法と写真法）では測定精度に限界があり、収縮量を定量的に評価するには至らなかった。

本研究では、三軸圧縮試験によって、飽和状

態で擬似的な K_0 圧密状態をつくり、サクションを作用させたときに生じる側方のひずみを測定するという方法を採用した。三軸圧縮試験では、軸方向変位と体積変化量を測定できるので、それらの測定量から側方変位（ひずみ）を算定することができる。なお、擬似的な K_0 圧密状態は、経験式に基づいて算定した K_0 値に相当する応力比の下で行う異方圧密状態である。側方の変形を許さないという本来の K_0 状態である保証がないので擬似的と形容した。

2. 試料及び試験装置

2.1 試料

用いた試料は市販の粉末シルト（DL クレー）である。この試料は透水性がよいため、間隙水の排水・吸水に要する時間を短縮できる。図1に粒径加積曲線、表1に試料の物理的性質を示す。

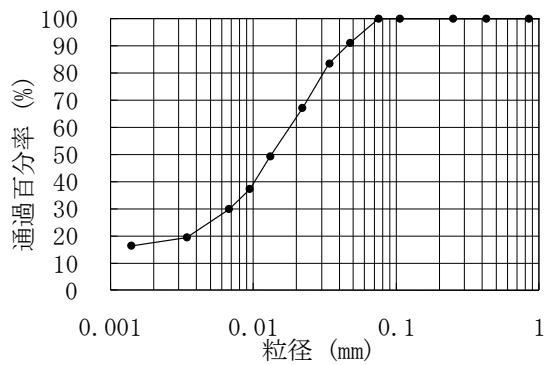


図1 粒径加積曲線

表1 試料の物理的性質

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)		2.703
コンシステンシー ¹⁾	w_L (%)	32.8
	w_p (%)	17.0
	I_p	15.8
粒度	シルト分 (%)	75
	粘土分 (%)	25

1) 液性限界，塑性限界の値は寺方[2]より引用した。

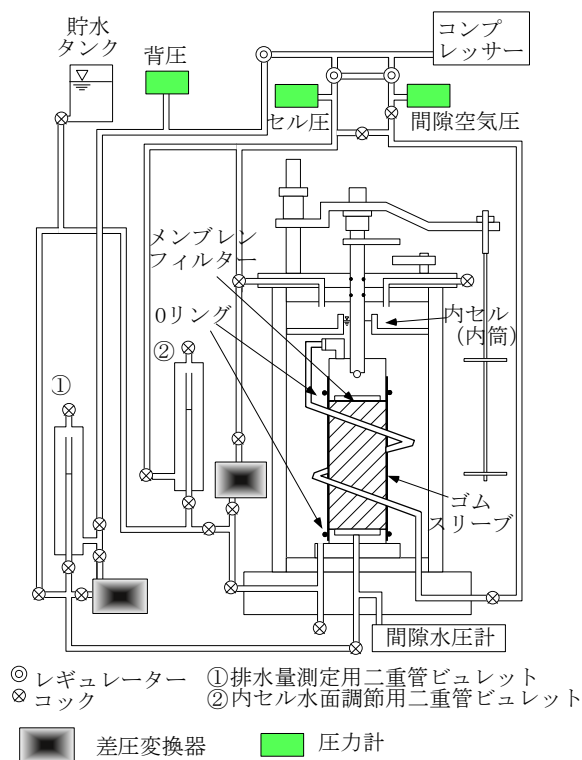


図2 不飽和度用三軸圧縮試験装置

2.2 試験装置

試験装置は不飽和土用三軸圧縮試験装置を用いた。図2に三軸圧縮試験時の装置の概略図を示す。

セル圧，間隙空気圧，背圧をレギュレーターにより個別に制御するとともに，供試体底面の間隙水压を計測した。供試体の体積変化量および排水量を，それぞれ内セルおよび二重管ビュレット（排水量測定用）内の水面変動量から測定した。

3. 方法

3.1 供試体作成

三軸セルにモールドを設置し，その中でスラリー状態から圧密して供試体を作成して三軸試験に供した。供試体作成方法は文献[3]で詳しく述べたので，ここではその概要を述べる。

モールドは，内径がペDESTALの外径にほぼ等しく，ペDESTALがモールド底部内面に接するように設置した。ペDESTAL側面にOリングを埋め込んで試料が漏れないようにした。

はじめに最大圧密圧力 50kPa で圧密した後，サクシオン 50kPa を作用させて不飽和化した。不飽和化が完了したら，試料をペDESTAL上に残したまま，モールドを引き上げて取り外した。供試体にゴムスリーブを被せて三軸圧縮試験に移行する。

用いた試料は，飽和状態では 50kPa で圧密しても自立しないので，サクシオンを作用させて不飽和化させることで自立できる状態にした。またこの試料はトリミングなどを行うと乱れ易いが，上記の方法では整形の必要がないので乱れを極力防ぐことができる。

3.2 三軸圧縮試験

作成した供試体は不飽和状態であるので，飽和状態で異方圧密を行うために，再度，飽和化した。飽和化は供試体の底面から給水することによって行った。飽和化が完了したら，有効拘束圧 $\sigma'_3=50\text{kPa}$ ($=\sigma_3-u_w$) で等方圧密した。ただし， $\sigma_3=340$ ， $u_w=290$ (kPa) を作用させた (u_w は間隙水压)。等方圧密後，軸方向荷重を増加させて，有効応力比 $R_{\text{net}} (=1/K_0)$ で異方圧密した。ここで $K_0 (= \sigma'_3/\sigma'_1)$ は Jaky の式： $K_0=1-\sin\phi'$ に基づ

いて推定した． ϕ' は過去の研究[2]を参考にして 36° にした．

異方圧密が終了すると，サクシオン s ($=u_a - u_w$) を 70kPa まで段階的に作用させて供試体を不飽和状態にした．サクシオンは，セル圧を 340kPa に保った状態で，間隙空気圧 $u_a=290$ kPa を作用させ，背圧（底面間隙水圧 u_w ）を 290kPa から段階的に 220kPa まで減少させることで作用させた．

次に，応力制御方式によってせん断した．サクシオン作用後の応力比 R_{net} ($=\sigma_{1net}/\sigma_{3net}$) は 2.5，正味の軸方向応力 σ_{1net} ($=\sigma_1 - u_a = \sigma_3 + q - u_a$) は 125kPa である．

応力制御によるせん断は次の三通りの方法で行った．

方法①：正味の側方拘束圧 σ_{3net} ($=\sigma_3 - u_a$) を 50kPa に保ち，軸方向応力 σ_{1net} を増加させた．常にセル圧 $\sigma_3=340$ ，間隙空気圧 $u_a=290$ ，間隙水圧 $u_w=220$ (kPa) である．

方法②：まず $\sigma_3=340$ kPa で一定にして， $u_a=340$ ， $u_w=270$ (kPa) に設定してサクシオン s を 70kPa に保ち， $\sigma_{3net}=0$ kPa にした．この時，ゴムスリーブにしわができたので，ゴムスリーブと供試体の間に隙間ができたと考え，5 分後に， $u_a=337$ ， $u_w=267$ (kPa) に設定し， $\sigma_{3net}=3$ kPa にして，ゴムスリーブと供試体を密着させた．その後， $\sigma_{3net}=3$ kPa の状態に保ち，軸方向荷重を増加，即ち σ_{1net} を増加させた．

方法③：まず $\sigma_3=340$ kPa で一定にして， $u_a=337$ ， $u_w=267$ (kPa) に設定して s を 70kPa に保ち， $\sigma_{3net}=3$ kPa に設定した．その後， $\sigma_{3net}=3$ kPa の状態に保ち， σ_{1net} を増加させた．

4. 結果及び考察

側方ひずみ (ϵ_3)，軸ひずみ (ϵ_1)，体積ひずみ (ϵ_v) はそれぞれの実験における異方圧密終了時を基準とする．ひずみは長さまたは体積が減少するとき正の値をとるように定義している．

4.1 異方応力状態・不飽和化過程（サクシオン増加段階）における側方ひずみの挙動

異方応力状態での不飽和化過程における ϵ_3 と経過時間の関係を図 3 と図 4 に示した．この過程

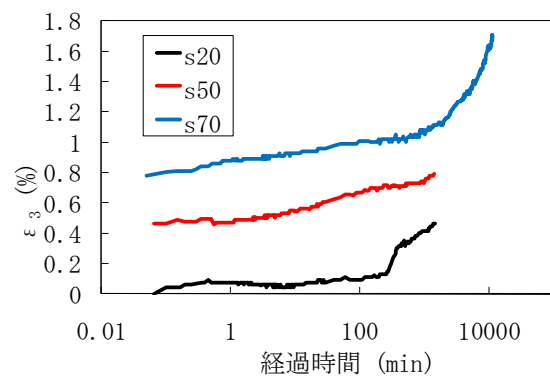


図 3 サクシオン増加段階（方法①）

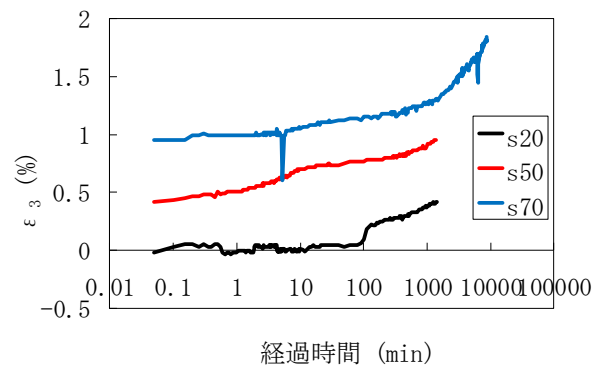


図 4 サクシオン増加段階（方法②）

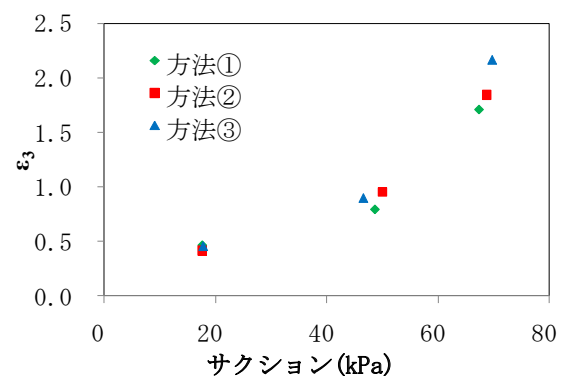


図 5 各サクシオン作用段階終了時のサクシオンと ϵ_3 の関係

の応力条件はすべての試験（方法①，②および③）で共通であるので，例として方法①と方法②の試験の結果を示した．図 3 は方法①の，図 4 は方法②の試験である．これらの図から，異方応力状態でサクシオンを作用させると側方に収縮することがわかる．

図 3 および図 4 の，各サクシオンの段階で生じたひずみ ϵ_3 をサクシオンに対してプロットすると

図 5 のようになった．サクシオンと ε_3 の間にはほぼ一義的な関係があることがわかる．

4.2 不飽和状態でのせん断過程におけるひずみの挙動

(1) 方法①

方法①の試験におけるせん断過程で生じた ε_3 , ε_1 および ε_v と時間の関係を図 6(a), (b) および (c) にそれぞれ示す．せん断応力レベルは応力比 R_{net} で表した．

図 6(a) より, $\sigma_{3net}=50\text{kPa}$ の時は, R_{net} が 5.4 より小さい時は経過時間約 100 分まではほとんど変化がなく, 経過時間約 100 分以降は側方に収縮している． R_{net} が 5.8 より大きいと経過時間約 300 分までは側方に膨張し, 経過時間約 300 分以降は収縮している．

図 6(b) より, 応力比が増加すると ε_1 が増加している．さらに, R_{net} が 6.5 より大きい応力比で経過時間が 10 分以降は, R_{net} が 6.1 より小さい応力比に比べて, ε_1 の増加量が大きいことがわかる．

図 6(c) より, R_{net} が 6.1 より小さい時は応力比が増加すると ε_v が増加しているが, R_{net} が 6.1 より大きい時は応力比が増加しても, ε_v の挙動がほとんど同じ変動傾向を示している．

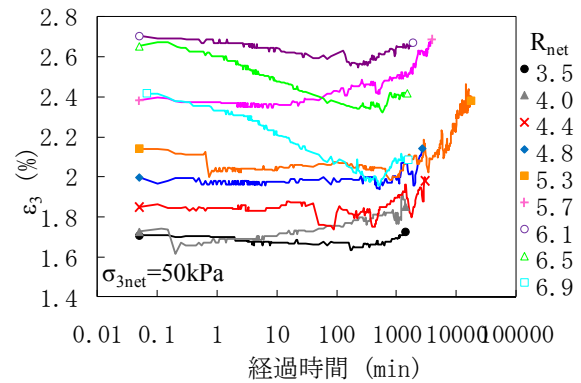
(2) 方法②

方法②の試験結果を図 7(a), (b) および (c) に示す．

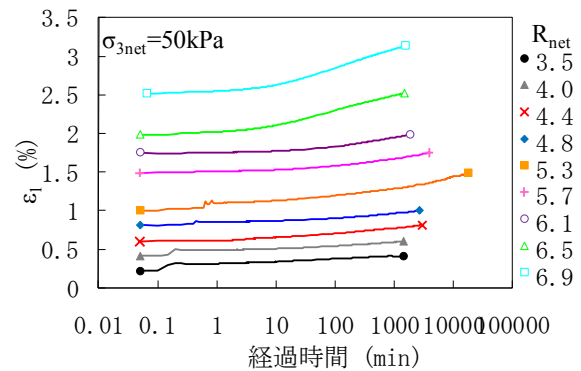
図 7(a) の $\sigma_{1net}=77.9\text{kPa}$ において, 経過時間 0.5 分までに急激に内セルの水面が上昇した．そのため, 内セルから水が溢れない様にするため, 排水コックと間隙空気圧コックを閉じた．これより, 経過時間 0.5~1 分の間は供試体が側方に膨張していない結果となった．経過時間 5~30 分で側方ひずみが 0.1% から 0.7% へ側方に収縮している．これは, 先に述べたが, 経過時間 5 分より前は $\sigma_{3net}=0\text{kPa}$ に, 経過時間 5 分より後は $\sigma_{3net}=3\text{kPa}$ に設定したためである．

図 7(b) より, 方法②の場合では, $\sigma_{1net}=77.9\text{kPa}$ の段階から側方に膨張していることがわかる．

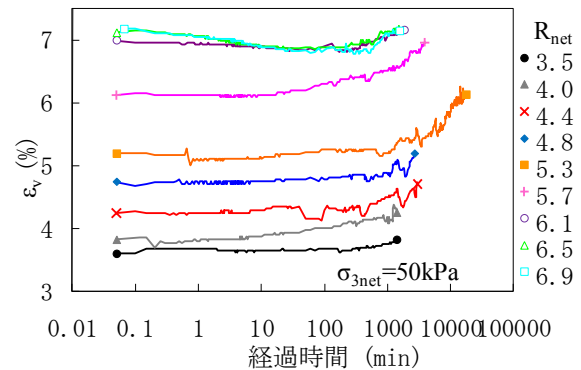
図 7(c) より, $\sigma_{1net}=130.7\text{kPa}$ と $\sigma_{1net}=151.2\text{kPa}$ の段階は ε_1 が増加している． $\sigma_{1net}=77.9\text{kPa}$ の段階は経過時間約 5 分の時点で ε_1 が増加しているが, ほとんど変化がないことがわかる．これは, 不飽和化終了時に比べて σ_{1net} が 50kPa 小さくなったことによる供試体の膨張が, 正味の側方拘束圧を



(a) 側方ひずみ ε_3



(b) 軸方向ひずみ ε_1



(c) 体積ひずみ ε_v

図 6 セン断時のひずみの挙動 (方法①)

約 0kPa にしたことによって応力比の増加による供試体軸方向の収縮によって相殺されたと考えられる．経過時間約 5 分の時点で ε_1 が増加しているのは, σ_{3net} を 0kPa から 3kPa に設定した影響であると考えられる．

図 7(c) より, $\sigma_{1net}=77.9\text{kPa}$ の段階は ε_1 がほとんど変化していなかったため, ε_3 と同様の挙動となった． $\sigma_{1net}=130.7\text{kPa}$ と $\sigma_{1net}=151.2\text{kPa}$ の段階は ε_v の挙動がほとんど同じ変動傾向を示している．

図 6(a) と図 7(a) より, 応力制御方式によるせ

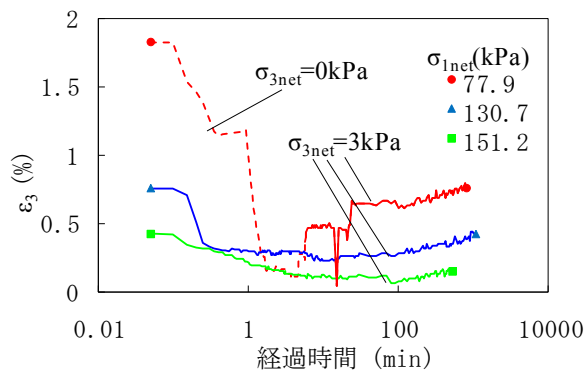
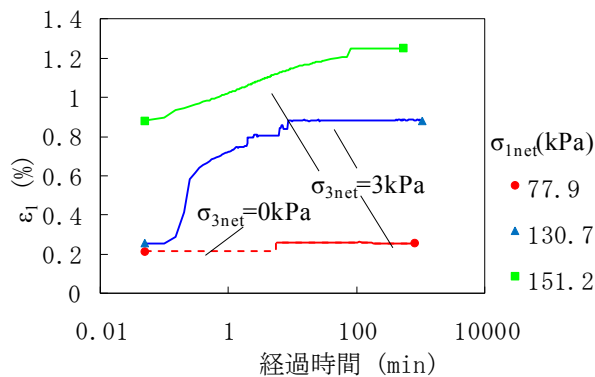
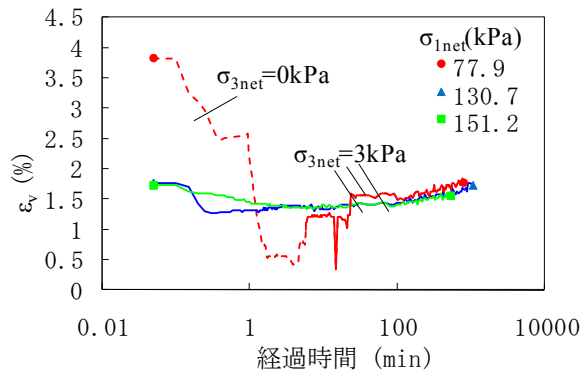
(a) 側方ひずみ ε_3 (b) 軸方向ひずみ ε_1 (c) 体積ひずみ ε_v

図7 セン断時のひずみの挙動 (方法②)

せん断の方法①の $R_{net}=3.5$ の試験開始時点の ε_3 (約 1.7) と方法②の $\sigma_{1net}=77.9\text{kPa}$ の試験開始時点の ε_3 (約 1.8) は同じような値となっている。 ε_1 と ε_v についても同様のことが言える。 ε_1 については方法①, 方法②ともに約 0.2, ε_v については方法①が約 3.6, 方法②が約 3.7 である。

方法①では, $R_{net}=6.9$ ($\sigma_{1net}=346\text{kPa}$) の段階までに, ε_3 は 0 にならなかった。方法②では $\sigma_{1net}=151\text{kPa}$ の段階の経過時間約 100 分で $\varepsilon_3=0.1$

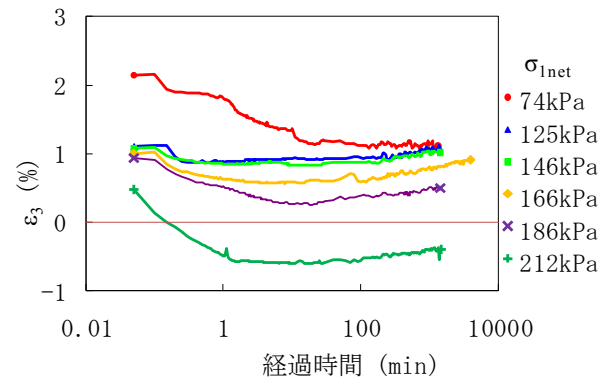
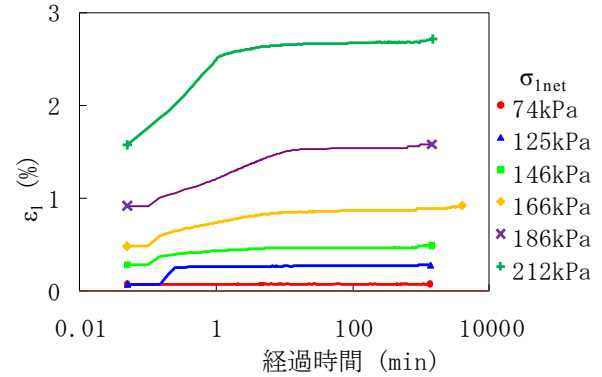
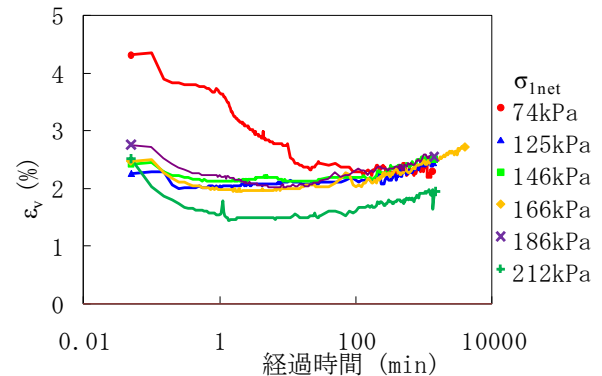
(a) 側方ひずみ ε_3 (b) 軸方向ひずみ ε_1 (c) 体積ひずみ ε_v

図8 セン断時のひずみの挙動 (方法③)

となり, 方法①とは違い ε_3 が 0 に近い値となった。これから, 側方ひずみの挙動と側方拘束圧や応力比の間に関連性があるのではないかと考える。

(3) 方法③

方法③の結果を図 8(a), (b) および (c) に示す。

図 8(a) より, $\sigma_{1net}=212\text{ kPa}$ の約 0.1 分で ε_3 が 0 となり, その後, マイナスの値となった。このことから, 軸方向の荷重を増加させることで供試体は側方に膨張し, 不飽和化時で側方に収縮した変

位よりも膨張させることができると分かった。

図 7(b)の $\sigma_{1net}=77.9\text{kPa}$ と図 8(b)の $\sigma_{1net}=74\text{kPa}$ では、どちらも ε_1 はほとんど変化していない。これは、せん断開始直前が $\sigma_{1net}=125\text{kPa}$ 、 $\sigma_{3net}=50\text{kPa}$ である状態をせん断開始時に σ_{1net} を約 75kPa に、 $\sigma_{3net}=3\text{kPa}$ に除荷したため、 σ_{1net} と σ_{3net} の応力の比によって軸方向に圧縮する変化量と σ_{1net} が減少したことによる軸方向への膨張する変化量が等しいことため、ほとんど変化しなかったと考えられる。

図 7(c)と図 8(c)のどちらも $\sigma_{3net}=3\text{kPa}$ に除荷した最初の段階では体積が膨張している。これは、正味の側方拘束圧と正味の軸方向応力が減少したことで、供試体全体が膨張したためである。図 7(c)では $\sigma_{1net}=130.7\text{kPa}$ から、図 8(c)では $\sigma_{1net}=125\text{kPa}$ から体積の変化がほとんどない状態となった。

5. 結論

本研究で得られた主な結果を列挙する。

- (1) 異方応力状態で供試体を不飽和化すると、供試体は側方に収縮する。
- (2) 異方応力状態で供試体を不飽和化した後に軸方向応力を増加させていくと、ある応力状態を境に供試体が側方に膨張する。
- (3) $\sigma_{3net}=3\text{kPa}$ において、軸方向の荷重を増加させることにより、不飽和化時で側方に収縮した量よりも大きな膨張量が生じる。

これより、異方応力状態で供試体を不飽和化した後に軸方向応力を増加させることで、異方応力状態で供試体を不飽和化した時に生じた供試体側方の収縮を打ち消すことができると考えられる。よって、一次元圧縮試験においても、不飽和化時に供試体が側方に収縮し、供試体と圧密容器の間に隙間が生じたとしても、 $\sigma_{3net}=0\text{kPa}$ であるため、供試体に荷重をかけることで供試体と圧密容器の間の隙間がなくなると考えられる。

今回の実験ではシルト試料を対象とした。今後、粘性土でも同じような現象が起こるかどうか検討する予定である。

参考文献

- [1] 秋原真人：不飽和土の一次元圧縮試験における側方収縮に関する検討，鳥取大学工学部土木工学科卒業論文，2009。
- [2] 清水正喜，寺方淳治，景山健：不飽和土のせん断強度特性に対する間隙比および圧密履歴の影響，第 44 回地盤工学研究発表会，No.317，2009。
- [3] 清水正喜，景山健：予圧密不飽和土の一軸圧縮強度特性，鳥取大学工学部研究報告，第 39 号，pp.59-63，2009。

(受理 平成 22 年 10 月 29 日)