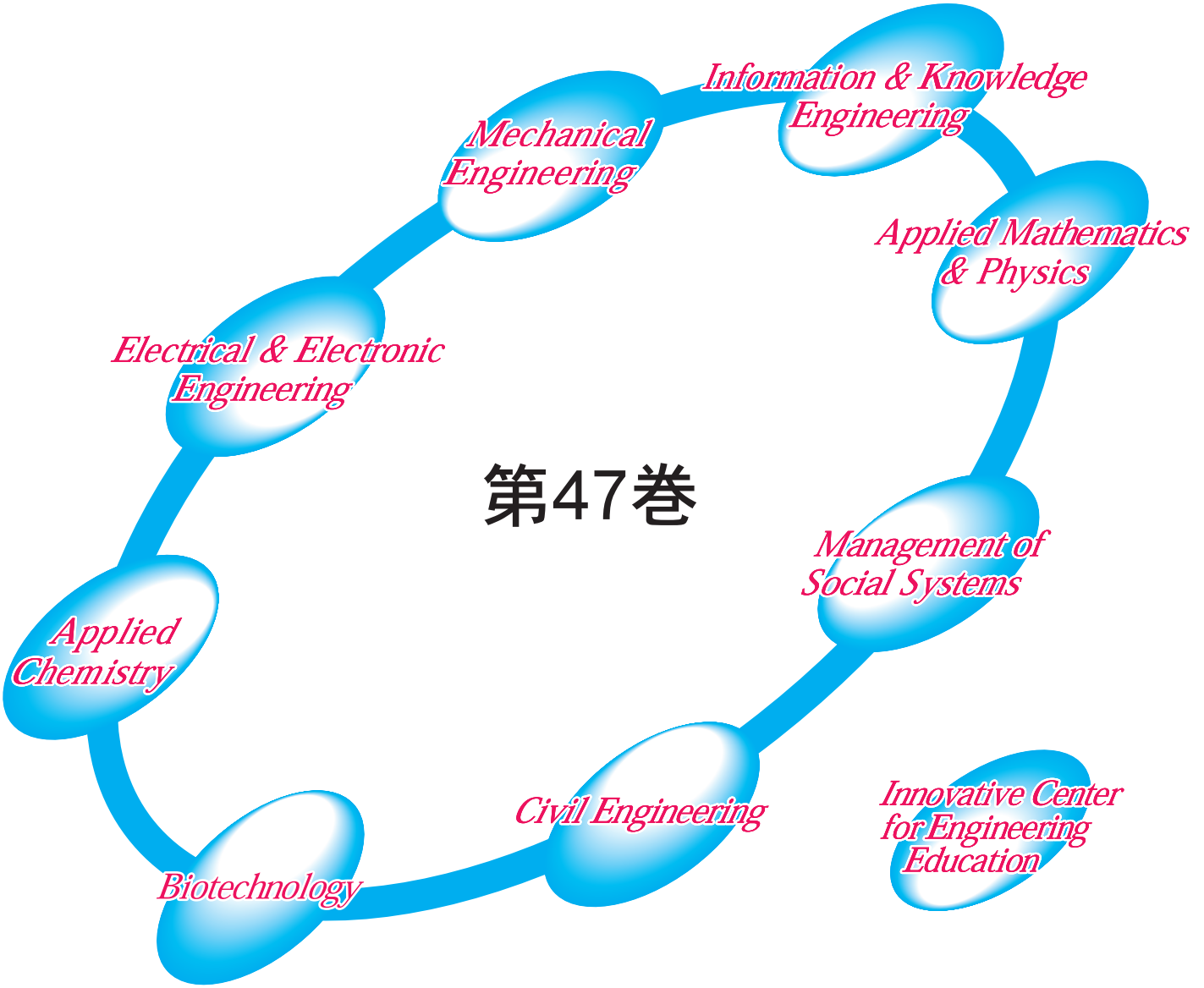
ISSN 0385-8596

鳥取大学大学院工学研究科/工学部

研　究　報　告

Reports of the Graduate School/ Faculty of Engineering
Tottori University



第47巻

Vol.47 December 2016
平成28年12月

研 究 報 告 第 ４ ７ 巻　（通巻５０号）

総説

１）情報機器ハードウェアのナノテクノロジー
　　― 分子流体潤滑理論との40年 ―
　福井　茂寿 …… 1

２）再生可能バイオマス資源のバイオリファイナリー
　簗瀬　英司 …… １２

３）鳥取砂丘海岸の保全とサンドリサイクルについて
　松原　雄平 …… ２８

４）次世代高性能不揮発性メモリReRAMの研究開発
　木下　健太郎 …… ３３

業績リスト － 2016 － …… ３９

講座による編集

〇電気電子工学講座
・Electronic Organic Thin Film Devices for Solar Energy Harvesting
　北川　雅彦 …… ７７

REPORTS OF THE GRADUATE SCHOOL/FACULTY OF ENGINEERING
TOTTORI UNIVERSITY
Volume 47, December 2016

1） Nanotechnology for Information Storage Equipment
- Struggling with the Molecular Fluid-Film Lubrication Theory for 40 Years -
Shigehisa FUKUI …… 1

2） Evaluation of the Beach Nourishment Work in Tottori Sand Dune Coast
Yuhei MATSUBARA …… 12

3） Microbial cell factory design for renewable resource biorefineries
Hideshi Yanase …… 28

4） Template of Reports of the Faculty of Engineering Tottori University
Kentaro Kinoshita …… 33

Abstracts － 2016 － …… 39

○Electrical & Electronic Engineering Course
・Electronic Organic Thin Film Devices for Solar Energy Harvesting
Masahiko Kitagawa …… 77

情報機器ハードウェアのナノテクノロジー
— 分子流体潤滑理論との 40 年 —

福井　茂寿
鳥取大学大学院工学研究科 機械宇宙工学専攻 応用数理工学講座

Nanotechnology for Information Storage Equipment
- Struggling with the Molecular Fluid-Film Lubrication Theory for 40 Years -

Shigehisa FUKUI
Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Graduate School of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: fukui@damp.tottori-u.ac.jp

Abstract: This paper states the research and development (R&D) of the flying head sliders with nanometer spacing in the HDD (Hard Disk Drive) and its generalized gas-film lubrication theory based on the molecular gas dynamics, which the author experienced and struggled in NTT laboratory and Tottori University for these 40 years.

Key Words: Molecular gas-film lubrication, Long wave equation, Lubrication, Tribology, Head disk interface, Hard disk drive

１．まえがき

筆者は、NTT 研究所および鳥取大学で 40 年の間、情報ナノシステムの微小メカニズムの高機能化の研究を進めてきた。具体的には、コンピュータ用記憶装置であるハードディスク装置（HDD：Hard Disk Drive）の機構部の中枢である浮動形磁気ヘッドと記録ディスク間のトライボロジー（摩擦潤滑学）であり、特に超微小すきまで空気浮上するメカニズムの作動性解析である。以下では、まず、企業の研究所で開発しその後も研究を深化させた、微小すきまを対象にした分子気体潤滑（MGL）理論の構築について述べ、さらに大学に移ってからの気体および液体薄膜の特性の解明について､折々の出来事を思い起こしながら述べる。

２．学生時代

2.1　中学高校のころ

高校 2 年生の進路を考えている時期が、明治元年から数えて 100 年目である「明治百年」（1968 年）であった。たまたま見た NHK のドキュメンタリーで、日本が明治初年に外国人技術者による技術指導により先進国の仲間入りとなった様子に感激し、自分にも将来何か後進国に技術指導ができればと考えた。道路や建物を造る土木・建築技術もさることながら、これからは飛行機などもよいのではと考え、大学は航空工学科を選んだ。航空や宇宙ということばに、かっこよさを感じたのも手伝った。

小中学生の頃は、工作少年であった。テレビ番組で鉄道模型（O ゲージ）を知り、簡単な O ゲージ鉄道模型組立キットから始まり、ゲルマニウムラジオ、月刊誌「模型とラジオ」、「初歩のラジオ」を経てアマチュア無線に興味を持ち、中 1 で電話級アマチュア無線技士の試験に合格した。真空管（MT 管）式の受信機製作用のパーツ購入のため、小遣いをため込んでは大阪の日本橋の電気街（東京の秋葉原に相当）によく通った。高校では勉強が忙しくなり、無線いじりをやや休止していた時期の進路選択が上記の航空工学ということであるが、所詮工作少年の延長線上であった。

2.2　大学のころ

京都大学に入学したのは 1970 年。学生紛争のためその前年には東大の入試がなく、入学した頃も学生運動で学内は騒然としていた。高校時代に縁がなかった運動部に入部しようと思い、目新しかったカヌー部に入った。500 m や 1,000 m の平坦な水路でタイムを競うカヤックカヌーで、練習には京都市内から滋賀の琵琶湖南の瀬田川に足しげ

く通った。当時はまだカヌーの競技人口が少なく、インカレにも出場し 3 回生後半からは主将も務めた。主将の約 1 年間は下宿を瀬田川近くに移し、1 時間近くかけて大学に通った。4 回生の最後まで部に残った同期の 4 人とは、今も親しい。そんな学生生活のお蔭で、勉強は随分おろそかになり、講義に出るのがやっとの学生であった。しかも、筆者の 4 回生の時には、大学紛争のあおりで卒論が簡略化され（?）、輪講そのものは密度濃くやるものの、卒業時には卒論を書くこともなくタイトルと名前を書いた表紙 1 枚だけを卒論代わりに提出して卒業できた。今ではとても考えられないことであろう。

大学院修了までに、流体力学や熱統計力学を興味を持って勉強した。流体力学では、玉田珖教授の講義と今井功先生の「流体力学」（岩波全書）を精読し、学部の卒論では徳岡辰雄教授の元でランダウ・リフシッツの「流体力学 I, II」（ランダウの理論物理学教程の 1 冊）を輪講した。徳岡先生は有理連続体力学が専門であるが、卒論（輪講）で取り上げる本は学生が相談して選べた。ランダウの流体力学は、それまでに読んだどの流体力学の本とも一味違い、独特の洗練されたスタイルに感激した。

また、神元五郎教授の熱統計力学の講義では、久保亮五先生の「統計力学」（共立全書）や V. Kruger の Physical Gas Dynamics を解読した内容に妙にひかれ、その後の Kinetic Theory of Gases（気体分子運動論）や分子気体力学の勉強への導入となった。修士論文では、二つの緩和時間を持つ粘弾性流体における衝撃波の構造というテーマを自ら設定し、数値解析を試みた。当時の計算機はごく簡単な演算しかできなかったので、小さなプログラムを組み、なんとか形を作って修了した。

３．NTT 研究所その１：磁気記録研究室

3.1　HDD 用浮動ヘッドの開発

修士課程を修了して入社したのは、電々公社（現 NTT）の武蔵野電気通信研究所で、航空や宇宙には関係なさそうであった（高校時代の将来に対する志も変わっていた）。当時から、NTT 研究所は日本の電気通信事業の中心で、研究所の規模は東洋一といわれ、優秀な学生を沢山採用しているとされていた。同期入社には、井元信之（阪大教授）、向井孝彰（大阪市大教授）、桑野博喜（東北大教授）などの各氏がおり、各分野で活躍している。

また、その頃 NTT 研究所は国内の大手電気メーカを牽引して国産初のコンピュータである DIPS を開発しつつあった。配属された研究室は電子装置研究部の磁気記録研究室で、DIPS コンピュータ用記憶装置としてハードディスク（HDD: Hard Disk Drive）の研究実用化を進めていた（図 1 参照）[1-3]。特に、この HDD の機構部分を担務したが、その重要課題は、記録密度を向上させるため、記録再生を行う磁気ヘッドを 0.1 ミクロン（10^{-7} m）程度の超微小な浮上すきまで、回転する磁気ディスク上に浮上させる技術であった（一般に、(ビッ

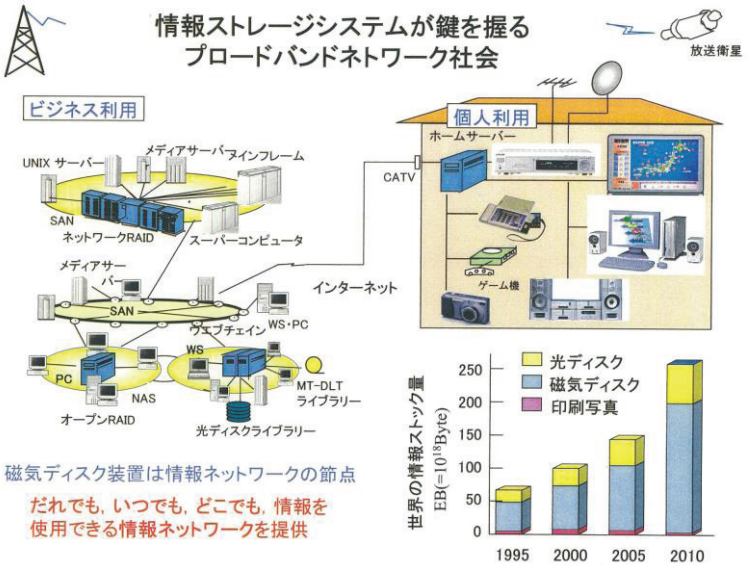


図１　ネットワーク社会における情報ストレージシステム[2]

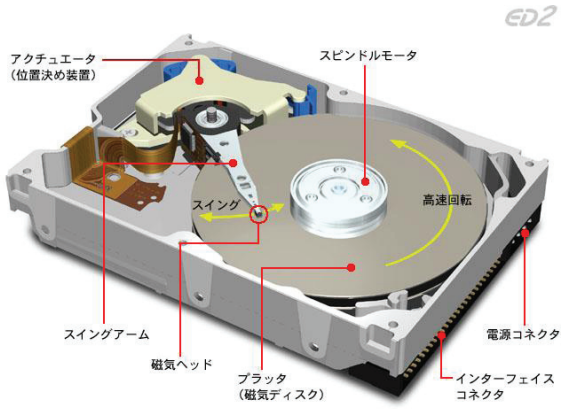


図２　パソコンの中のハードディスク装置

ト価格)＝１／(面記録密度)＝(浮上すきま量)$^{2.4}$ であるとされており、すきま量の低減が必須である。図 2、3 参照)。この様な相対運動する二物体間の界面現象は「トライボロジー（摩擦潤滑学)」と呼ばれ、対象とする微小すきま量からナノトライボロジーと呼ばれる[4-7]。面記録密度およびすきま量の年次推移は、図 4、5 の様に、著しい[8]。

所属した研究室では、故金子礼三（和歌山大名誉教授)、小野京右（東工大名誉教授)、三矢保永（名大名誉教授)、木暮賢司（元日本工学会事務長）等の諸先輩の指導を受けたが、いずれも個性豊かで、あたかも研究技術者の梁山泊のようであった。

筆者は、入社 3 年目から NTT 研究所で開発中の HDD（愛称 PATTY）の浮動形磁気ヘッドの浮上設計と試作を担当した。PATTY 装置の記憶容量が 800MB で、大きさは湯たんぽ大であったが、そこに搭載した浮上すきま量 0.2 μm 程度の浮動ヘッドを設計し、当時では世界一の記録密度を持つ HDD 開発の実現に寄与できた。（HDD の記録密度競争は熾烈で、残念ながらその後米国企業に抜かれてしまったのだが・・。）

更なる大容量 HDD（愛称 GEMMY）では、開発ターゲットを、安定浮上が期待できる負圧利用形スライダの開発研究、発熱振動の低減を狙いにヘリウムを装置内に封入した HDD の実現などとして進められた。いずれも実用化には至らなかったが、後年米国企業で実用化されたものも多く、先駆的な開発戦略であった。筆者にとっては実用化研究で得るところが大きかった。この挑戦の終盤で、新たに金子特別研究室が開設され、研究開発の現場からより研究に近い環境に異動することになる。

3.2 気体潤滑理論との対峙 [9]

話は前後するが、筆者は NTT 入社時点では超微小すきまの気体の発生圧力の理論式（修正レイノルズ方程式）どころか、そもそも流体潤滑理論（レイノルズ方程式）も知らなかった。少し勉強してみたが、粘性流体力学の基礎を勉強していた筆者には、流体潤滑理論が大胆な仮定に基づいているため、正直こんな理論でよいのかと思えた。その後現在に至るまで、その潤滑理論の革新と精緻化を進めることになるのだから、妙なものである。しかも、対象とする浮上量は航空機の高度 1 万 m（10^4 m）の飛行から HDD の 0.1 ミクロン（10^{-7} m）程度の超低空飛行に軌道修正にな

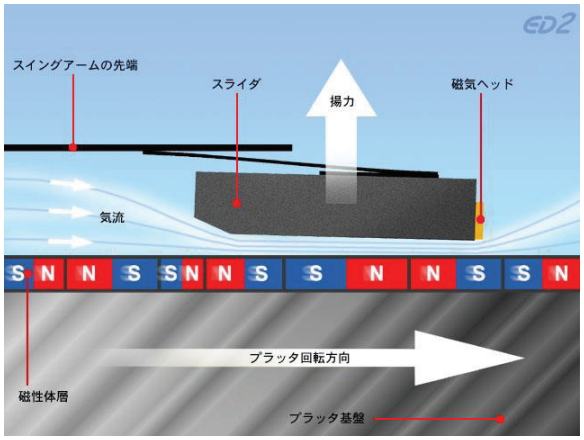


図３　回転走行する記録ディスク上を浮上する浮動型磁気ヘッド

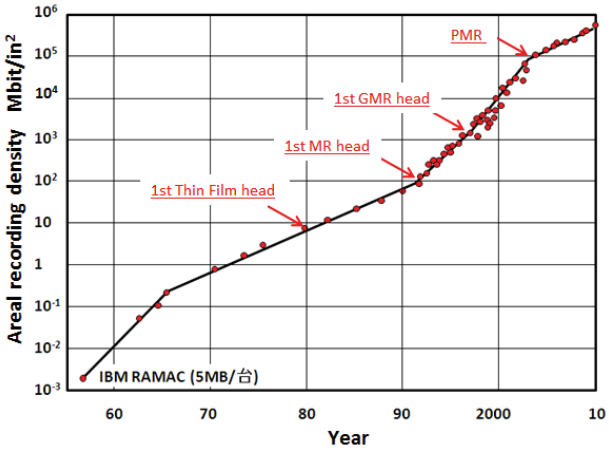


図４　面記録密度の年次推移 [8]

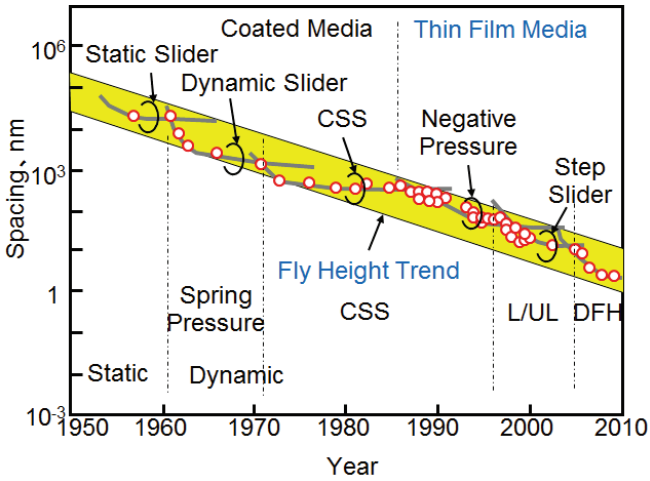


図５　磁気ヘッドすきま量の年次推移 [8]

った。高度が 10^{10} 以上も減少し、筆者の浮かない人生の始まりである。

さて、超微小すきまの浮上理論の構築には、気体の粒子性のパラメータであるクヌッセン数 K_n（式(1)）が無視できない場合を扱う「希薄気体力学（分子気体力学）」の知見が必要である[10]。

$$K_n = \lambda / h, \qquad (1)$$

ここで、λ は分子平均自由行程、h は代表長である。

この希薄気体力学（分子気体力学）では、クヌッセン数 Kn が同じであれば、真空装置や宇宙空間における現象（λ：大）と、大気圧環境下の超微小すきまにおける現象（h：小）を等価的に扱える。すなわち、HDD の超微小すきまの現象は、小さな宇宙の現象とも言えるのである。

筆者が NTT 研究所に入所した 1970 年代後半の当時は、微小すきまに対する気体潤滑理論として、流体力学で著名な Reynolds による古典的な気体潤滑理論を修正した「修正レイノルズ方程式」（Burgdorfer, 1959）しかなかった[11]。この修正レイノルズ方程式では、クヌッセン数 Kn が十分小さい場合、すなわち大気圧では数ミクロン程度で成り立つ「スリップ流れ近似」を用いており、方程式の妥当性も数ミクロン程度であろうとされていた。1 ミクロン以下の超微小すきまでの妥当性についての実験的検証が行われ[12, 13]、更なる超微小すきま量に対する理論展開が望まれていた。

古典的な気体潤滑理論およびスリップ流れ近似に基づく修正レイノルズ方程式の基本形は、それぞれ以下のようなものである。

$$\frac{d}{dX}\left(PH^3\frac{dP}{dX} - \Lambda PH\right) = 0 \qquad (2)$$

$$\frac{d}{dX}\left\{\left(1+\frac{6K_n}{PH}\right)PH^3\frac{\partial P}{\partial X} - \Lambda PH\right\} = 0 \qquad (3)$$

ここで、P は発生する圧力、H はすきま量で、超微小なすきまで浮上する物体の発生圧力を与える式である。式(2), (3)の左辺第 1 項はともに圧力差による流れ（ポアズイユ流れ）の流量、第 2 項はせん断流れ（クエット流れ）の流量であり、すきま形状 H から発生圧力 P の分布が算出できる（表 1 右蘭参照）。非線形方程式であるため、大型コンピュータによる数値解析によって特性解析や設計を行った。

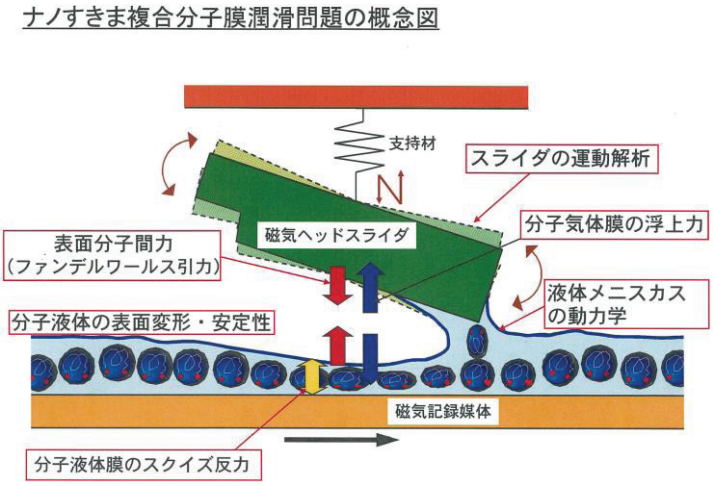
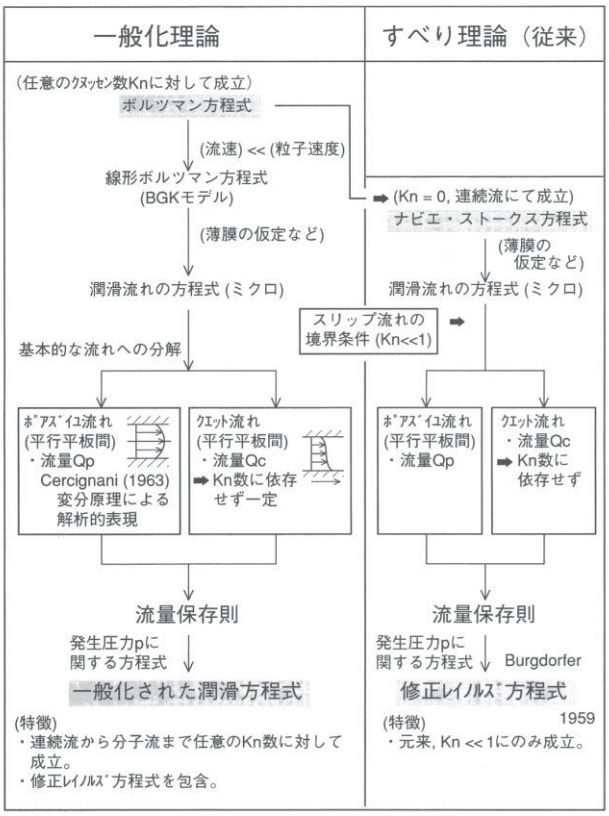


図６　ナノメートルすきまの気液潤滑問題

表１　一般化された潤滑方程式の導出



４．NTT 研究所その２：金子特別研究室

4.1　新しい気体潤滑理論の構築

更なる超微小すきまの浮上理論の構築には、任意のクヌッセン数（任意のすきま量）における気体の確率統計的挙動を記述する「ボルツマン方程式」を取り扱う必要があるが、その分子気体力学の基礎については。大学院当時に曽根良夫先生（京大名誉教授）から手ほどきを受けていた [10]。ボルツマン方程式に基づいた超微小すきまの潤滑理論の構築に取り組んでいる際に、京大に曽根先生を何度か尋ね、有益な指針を頂いていたのだが、筆者の理解度が及ばずしばらくの間模索を続けた。

その後、超微小すきまを対象にした薄い気体膜での流れ問題は、ボルツマン方程式に対しても潤滑問題の仮定（薄膜の仮定）に基づいて２つの基本的な流れであるポアズイユ流れとクエット流れの重ね合わせで表現でき、それぞれの流量を精緻に算出すればよいことが解り、ようやくボルツマン方程式に基づく気体潤滑方程式（分子気体潤滑 (MGL: Molecular Gas-film Lubrication) 方程式)が完成した[14-17]（表１左蘭、図７参照）。

$$\frac{d}{dX}\left(\frac{Q_P}{Q_{Pcon}}PH^3\frac{dP}{dX}-\Lambda PH\right)=0 \qquad (4)$$

ここで、Q_P は、任意のクヌッセン数 Kn に対するポアズイユ流れの流量、Q_{Pcon} は連続流（Kn=0）のポアズイユ流れの流量である。この Q_P は、ボルツマン方程式を流れの問題に適用し、数値計算により高精度なデータベースも用意した[18, 19]。

この理論と実験的検証を、機械学会論文集３編として 1987 年に、また拡張した理論と精緻な流量データベースを米国機械学会(ASME) Journal of Tribology に 1988 年と 1990 年に発表した。筆者自身の学位取得とほぼ同時に、日本機械学会論文賞（1987 年度）、NTT 研究開発賞（1988 年度）を頂いた。国外でも評価を受け、ASME に発表した最初の論文[16]は、分子動力学シミュレーションで著名な Alder (Lawrence Livermore Labo)らによる DSMC（直接シミュレーションモンテカルロ法）解析との比較によって妥当性が示され[20]、超微小すきまヘッドの浮上特性解析の分野のみならず、分子気体力学の分野、MEMS／NEMS（マイクロ／ナノ電気機械システム）分野[21]などの様々な分野で引用されていった。引用回数が現在までに約 550 回になり、流量係数データベースの論文[19]および関連論文数編を含め 1,500 回を超えている（Google Scholar）。この理論（方程式）については、第一人者である UC Berkeley 校の Prof. Bogy も注目し、論文著者の氏名（福井・金子）から FK 方程式と呼び始めたが、筆者は「分子気体潤滑（MGL : Molecular Gas-film Lubrication）」と名付

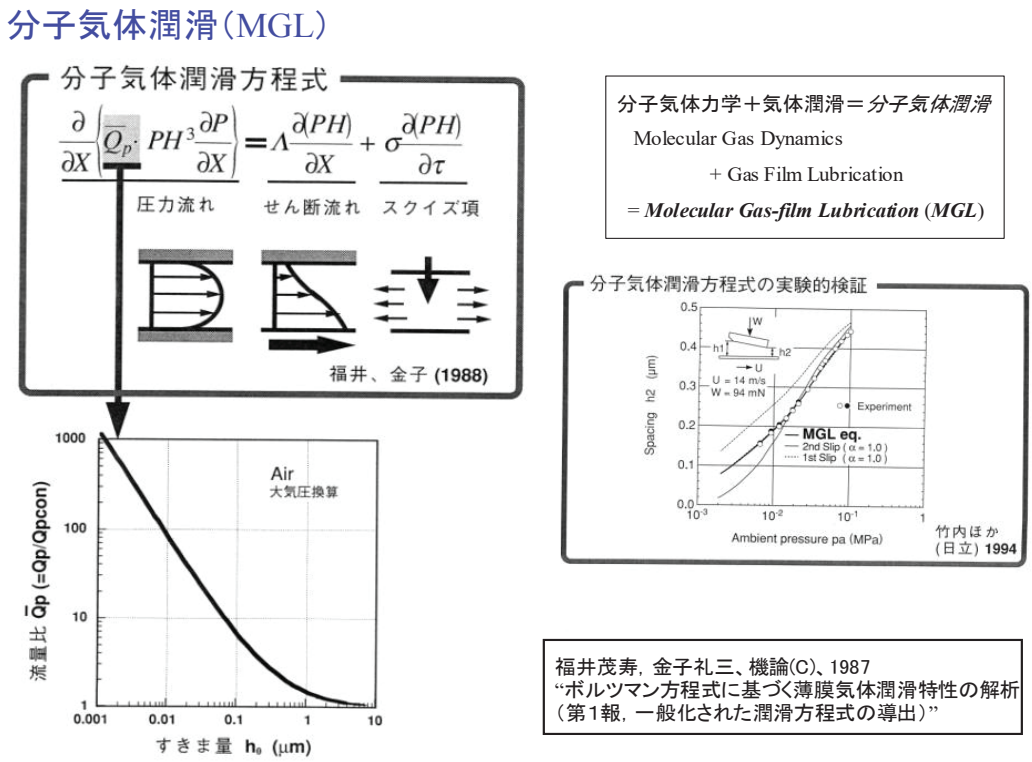


図７　分子気体潤滑（MGL）方程式と実験的検証 [14-16]

け、現在では MGL 方程式として広く用いられている。この MGL 理論の導出と様々な解析をまとめて、Handbook of Micro/nanotribology (1995)の 1 つの章（Molecular Gas-film Lubrication (MGL)）として 50 ページ弱にまとめ掲載された[22]。

4.2 分子気体潤滑（MGL）の水平展開

MGL方程式の基本形が出来上がった1990年代当時には、NTT研究所では電気通信の伝送路が電線から光ファイバに急速に変わりつつあり（光化）、オプティクス（光学）に基づく研究開発に力を入れ始めていた。筆者もこれまでの金子特別研究室を離れ、新設のオプトメカトロニクス研究部に異動し、部長補佐でのマネージメントの経験を経て、機構制御研究グループのリーダーとなって、新規な研究の展開に腐心した。

一方で、分子気体潤滑（MGL）理論の進展として、MGL理論の相補的な解析手法である「モンテカルロ直接シミュレーション（DSMC）法」を用いた分子気体潤滑解析の予備検討を試みた。さらに特筆すべきは、グループに入ってきたばかりの渡辺敏雄君と行った「触感制御（伝達）の研究」である[23]。遠隔地に触感を伝えることを目論んだもので、超音波振動子を用いて平板に進行波を発生させ、その振動面を指で触れると、触感が振動しない時の「ざらざら」から「つるつる」に変化することを、被験者を使って示した。振動板と指との間に生じる気体のスクイズ反力によるものと関連づけた。筆者がこの研究に関与したのは短い期間であったが、その後も渡辺君の研究がしばらく続き、論文は現在まで引用が続いている（google引用回数約150回）。

そうこうするうちに、金子特別研究室でプローブ型顕微鏡（STMやAFM）応用による超小型大容量の磁気記録装置の開発プロジェクトの話が始まり、筆者は再度金子特別研究室に復帰しリーダーとして活動を始めた。

まさにその矢先の1994年の12月に、当時鳥取大学の共通講座におられ大学の先輩でもある故大西善元教授から電話を頂き、4月から新設される応用数理工学科に来ないかとのお誘いを頂いた。上述の新規のプロジェクトが始まったばかりであったため、お断りする積りで年末に鳥取を訪れたのだが、金子礼三室長とも相談し温かい了解も頂き、大学に移ることを決意した。

５．大学における教育と研究：鳥取大学の 22 年

5.1 新設の応用数理工学科へ

1995 年（平成 7 年）4 月に、工学部 8 番目の学科として応用数理工学科が発足し、筆者が赴任した。当時は、鳥取大学工学部に、NTT 研究所同期入社で先輩である安東孝止（鳥取大学名誉教授）、高校の同級生の細井由彦（鳥取大学理事）の両氏が在籍しており、心強かった。その 4 年後（1999 年 3 月）から卒業生を送り出し、同時に学年進行で応用数理工学専攻ができた。以来、2016 年 3 月までに学部卒業生 650 名余り、大学院（修士）220 名余りを世に送り出した。2015 年春の改組により、学科は機械物理系学科に統合・再編され、応用数理工学科は現在の在学生の卒業とともに名実ともになくなる。

赴任当時は新設のため学生は 1 年生約 40 名のみで、担当講義はわずかであった。学年進行と共に増えていったが、数年間は卒業生もなく、就職支援も不要であった。また、当初は社会開発システム工学科棟の一部に居り、学科事務室も共用であった。1999 年 3 月に応用数理工学科棟が新装さ

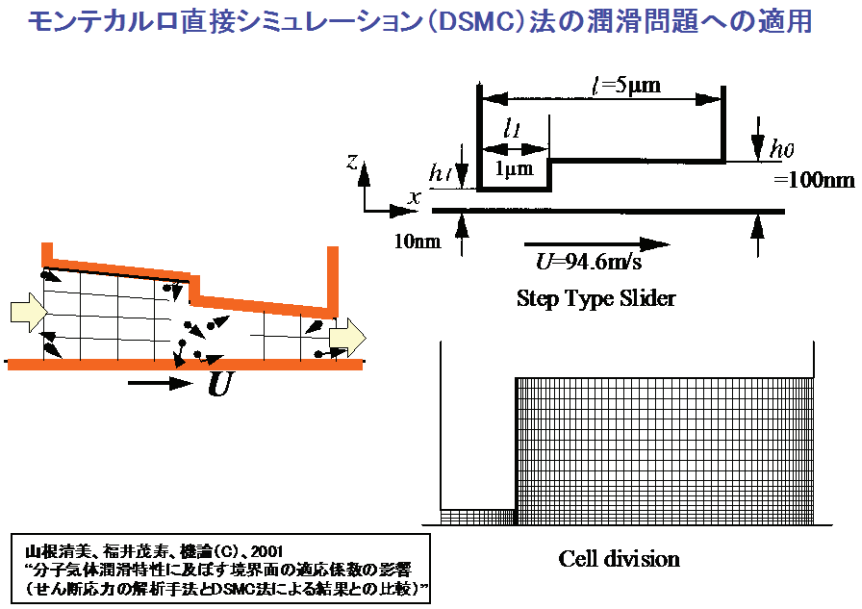


図８　モンテカルロ直接シミュレーション（DSMC）法の分子気体潤滑問題への適用 [24, 25]

れ引っ越し、実験室を含め広く立派になった。

5.2　研究室の立ち上げ

学年進行で学生が増えていくまでは、研究室立ち上げに専念できたが、NTT 研究所の頃と比べ、何もないところから始まった。研究費は、幸いにして、筆者が大学に移った年に HDD 開発に関する産学連携の情報ストレージ研究推進機構 SRC（Storage Research Consortium）が発足し、それ以来毎年 SRC の助成金の恩恵に浴した。SRC の HDI（ヘッド・ディスク・インターフェース）部会では、企業側約 6 社、大学側メンバーとして、NTT 研究所の先輩である金子、小野、三矢（いずれも前出）、三宅正二郎（日本工大教授）の諸先生の他、短期間であったが加藤康司（東北大名誉教授）、加藤孝久（東大教授）、中尾政之（同）の各先生、後には NTT から福沢健二（名大教授）、NEC から柳沢雅広（早稲田大教授）、多川則男（関西大教授）、日立から谷弘詞（同）の諸先生方が参画した。いずれも、マイクロ／ナノトライボロジー（摩擦潤滑学）分野で活躍する研究者である。

科学研究費も、基盤研究 C から基盤研究 A まで、ほぼ毎年 1 つか 2 つを頂いた。また人的にも、1996 年に修士学生として山根清美君（現松江高専 教授）を受け入れた。NTT 研究所時代に始めていた直接シミュレーションモンテカルロ（DSMC）法による分子気体潤滑解析を、1998 年からの博士課程の研究テーマとして精力的に進めてもらい、学位取得のみならず機械学会論文賞（2003 年度）を受賞し[24, 25]（図 8 参照）、現在松江高専で教育研究に励んでいる。

分子気体潤滑（MGL）の理論、DSMC 法による検証、MGL 方程式による浮上特性解析などの一連の展開に対し、米国機械学会（ASME）トライボロジー部門シーゲート賞（2005 年）、鳥取大学学長表彰・研究功績賞（2005 年度）、機械学会船井特別賞（2008 年度）を受けた。

5.3　液体薄膜・分子間力の研究への展開 [26]

1999 年 4 月には、松岡広成先生（現准教授）に加わって頂いた。松岡先生は、東大加藤孝久研究室で液体超薄膜の研究で 1996 年 3 月に学位取得後、その当時は出光興産の研究所に在籍した。松岡先生の学生時代の成果は、すでに米国機械学会（ASME）の Best paper award（1997）[27]、日本トライボロジー学会奨励賞（1998）、英国機械学会（IMechE.）の論文賞（1998、2000）を受賞していた。

研究室では、それまでの気体薄膜による潤滑理論・浮上特性解析が中心であったが、松岡先生が着任後には、液体超薄膜の諸特性・分子間力の解明の研究が開始された。研究室のコンセプトを、情報ナノシステムにおける気体や液体の超薄膜の特性の解明に拡張し、後には大学院改組の際に研究室名もそれまでのシミュレーション力学研究室からナノシステム解析学研究室に変更し、よりパワフルになっていった。

まず、液体薄膜の変形・流動現象については、気体潤滑の場合と同様、潤滑理論が適用されるが、厚膜に対する古典的な扱いと異なり、液体の分子間力の統計的な発現であるラプラス圧や界面に働く分子間力（分離圧）など薄膜特有の力をも考慮した理論展開（長波方程式）がある[28]。この方程式を一般化し、HDD 用の液体薄膜の変形や流動現象の詳細な解析を試みた（図 9 参照）[29-31]。

2006 年 10 月には、佐伯文浩君（現津山高専 准教授）が博士課程に入学し、液体超薄膜の長波方程式による液膜流動と安定性の研究を進め[32]、

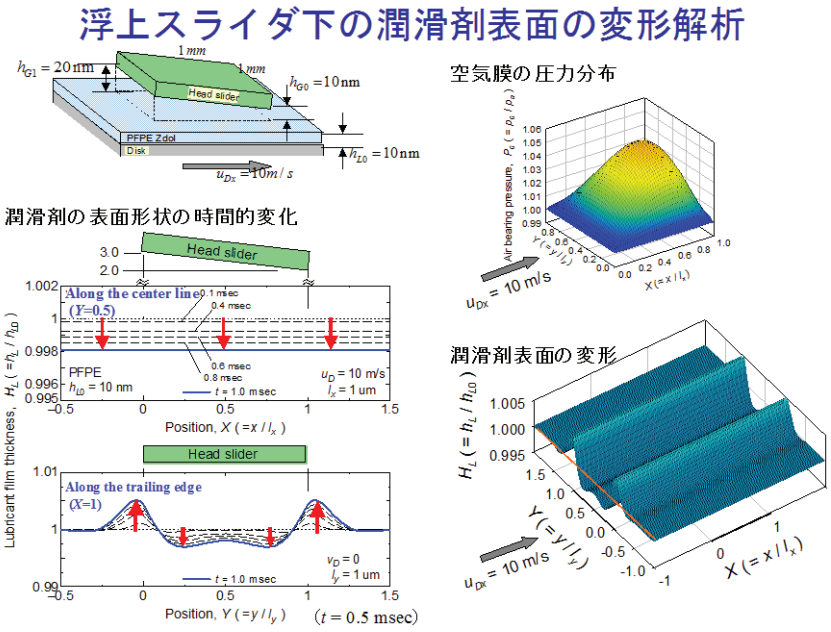


図９　浮上ｽﾗｲﾀﾞ下の液体薄膜（潤滑剤）表面の変形特性 [30, 31]

学位を取得し混相流学会の学生優秀講演賞を受賞した（2011 年度）。現在は津山高専で教育研究を続けている。

つぎに、液体メニスカスや分子間力の研究では、松岡先生は鳥取大学着任後にも、液体メニスカスの振動伝達特性のテーマでトライボロジー学会論文賞（2001 年度）を[33]（図 10 参照）、表面力ダイナミクスについて機械学会奨励賞（2003 年度）、同船井賞（2003 年度）を、物体間に働く分子間力の一般化理論とその浮動ヘッドへの応用で機械学会論文賞（2004 年度）[34]（図 11 参照）、鳥取大学科学研究業績表彰（2004 年度）を、それぞれ受賞した。また、それまでの一連の業績に対し、船井情報科学振興賞（2009 年度）の受賞に至った。

5.4　研究の更なる充実のためのマネージメント

これらの研究を成功裏に遂行するため、研究費の獲得に種々苦心し、特に科研費申請に積極的にチャレンジした。筆者が研究代表者として大学在籍の 22 年間で、科研費 A、科研費 B（4 回）、科研費 C（3 回）に恵まれ、また上述の SRC 助成金を現在に至るまで頂いている。

さらには、2001～2003 年度までは、三矢保永先生（当時名大教授）を中心に文部科学省の「革新的技術開発研究推進費（21 世紀 COE）」補助金に参加し[2]、プロジェクト「複合ナノ構造表面による磁気記録用機能性トライボシステムの開発」を関連する 4 つチームで推し進めた。この期間を一つのピークとして、多様な研究者と様々な議論を重ね、人・もの（設備・お金）ともに充実していき、自ずと学術的な成果も挙がっていった。

（4 つのチームは、以下である。i) 評価システム：名大三矢保永・福沢健二、ii) 形成法：東大加藤孝久・東工大益子正文、iii) 潤滑シミュレーション・アクティブヘッド：福井茂寿・東大鈴木健司、iv) 実用化構成：日立 GST 三枝省三・富士通研千葉洋（敬称略。所属は当時））。

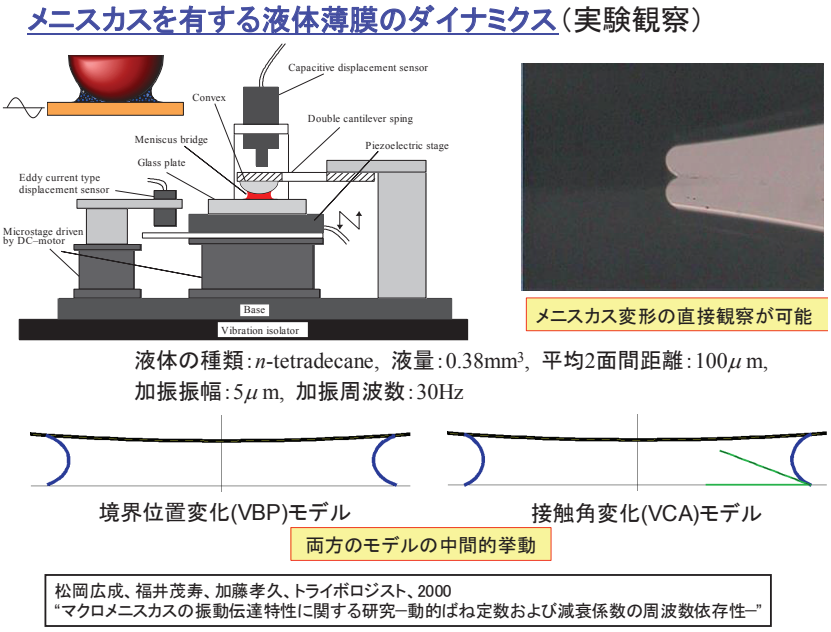


図 10　液体ﾒﾆｽｶｽ架橋を有する液体薄膜のﾀﾞｲﾅﾐｸｽ [33]

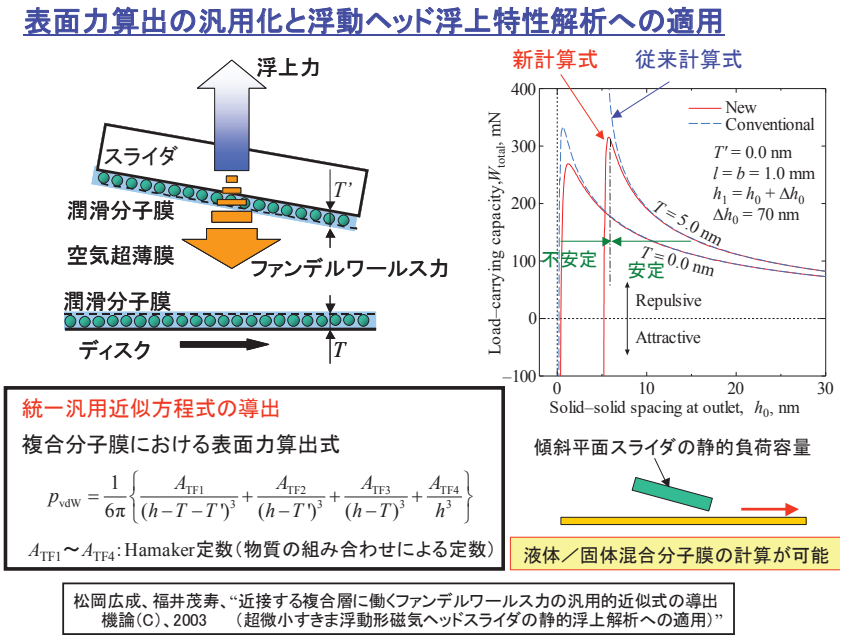


図 11　表面力算出の汎用化と浮動ﾍｯﾄﾞ浮上特性解析への適用 [34]

研究室の最近の研究テーマは、やはり HDD 用ヘッド・ディスク・インターフェースの諸現象や将来方式を見据えて、次のようである。1) 境界面温度を考慮した分子気体潤滑理論（t-MGL 理論）の構築、2) BPM ディスク上の浮動ヘッドスライダの動特性、3) 液体超薄膜の変形・流動特性の解明、4) 液体メニスカス架橋の静・動特性、5) 潤滑材の浮動ヘッドスライダへの移着現象（Lub Pick-up）の解明、6) 媒体分布を有しナノメートルオーダで隣接する物体間の分子間力解析などがある[35-39]。

5.5 大学での教育および管理運営

教育の一環として、院生・学生諸君の研究成果を可能な限り高め、学会発表を積極的に進めた。院生・学生諸君にとっては、外部からのコメントを受ける刺激と充実感が味わえ、また研究の取りまとめ・発表の準備を含め教育効果が高いと考えた。様々に獲得した研究費の中から、学生諸君の出張費等を捻出し、学生の負担が殆どない様にした。22 年間の院生・学生の学会発表件数は、260 件余りである。ベストプレゼンテーション賞、優秀講演論文賞なども多数頂き、院生・学生諸君のインセンティブを高められたと思う。このようにしてナノシステム解析学研究室から卒業・修了した学生は、約 140 名に達する。

また、学会活動の場は、機械学会、トライボロジー学会および米国機械学会（ASME）であるが、学会の役職として、機械学会の部門長（2005 年度）、トライボロジー学会の理事（2003-04 年度）、機械学会の理事（2013-14 年度）を務め、また国内会議（2004）・国際会議（2009）の実行委員長等も可能な限り引き受けた。

近年、大学では教育（講義）をきちんと行うことの重要性が叫ばれ、筆者も様々に努力して講義を続けた。TA（Teaching Assistant）のおかげで、随分助かっている。授業アンケートも講義の工夫により何とか及第点を続けている。研究室の院生・学生とのゼミ・輪講も時間をかけて丁寧に進めたいと思っていた（学生諸君には迷惑な話だったろうと思うが、愛のムチと思ってほしい）。

教授になり何年か経つと、管理的業務も増え、各種委員会の委員、学科長（コース長）・専攻長や副学部長・副研究科長などの役職を務めた。所属学科の事情もあり、筆者は学科長（コース長）を都合 8 年間、副学部長・副研究科長を 2005-06 年度の 2 年間務めた。お陰で工学部・工学研究科の大体のことは解るようにはなった。副学部長・副研究科長を務めた時は、大学が独立行政法人化された直後で、当初は副学部長・副研究科長は 2 名体制でスタートしたが（もう一人は、田中久隆 現研究担当理事）、全く忙殺されてしまい、任期 2 年目途中から負担軽減のため 3 人体制となったが（細井由彦 現企画担当理事が加わる）、任期終了時にはもう沢山という感じであった。院生・学生と研究テーマを少しずつ推し進めるのが性に合っているようだ。これ以降も学科長（コース長）を務めたが、執行部の方々に色々注文を付け続けた。

６．最後に

本稿では、学生生活を終えてから 40 年間の、NTT 研究所での研究開発、鳥取大学で教員・院生・学生との教育研究を振り返り、微力ながらも様々に知恵を絞って続けた「研究」の流れをまとめた。振り返ってみると、実に色んなトライアルがあったという実感とともに、うまく行かなかったことや判断のミス等も多々思い出される。本稿は、後者に余り触れていない、果敢に挑戦し奮闘努力した部分の記録である。

文　献

[1] 日本機械学会編、究極のメカを追求する磁気ディスク装置「HDD」、*先端事例から学ぶ機械工学*、第 6 章 (2011) 丸善

[2] 三矢保永（代表）、「複合ナノ構造表面による磁気記録用機能性トライボシステムの開発―超高記録密度の小形大容量次期ディスク装置の開発―」、産学官連携イノベーション創出事業費補助金（独創的革新技術開発研究提案公募：21 世紀 COE）に係る総合研究報告書、2004

[3] 小野京右・中山正之・吉村茂・多川則男・市原順一、*記憶と記録－情報機械学のすすめ－* テクノライフ選書、オーム社、1995

[4] 金子礼三、*ゼロ摩耗への挑戦 マイクロトライボロジーの世界*、ﾃｸﾉﾗｲﾌ選書、オーム社、1995

[5] 三矢保永、“ナノトライボロジー－ナノ分子膜潤滑の特徴－”、*日本機械学会誌*, 第105巻、2002, pp. 466-469.

[6] 福井茂寿、“磁気ヘッドとディスクのすきま : 10nm―ハードディスク装置のナノの世界―“、*機械学会誌*、Vol. 108, No.1042 (2005) pp. 718-719

[7] 福井茂寿、“ハードディスクのナノテクノロジー“、*風紋*（鳥取大学広報誌）、24 号、2010

[8] 多川則男・谷弘詞・小金沢新治、“磁気ディスク装置におけるトライボロジー技術の進展とそ

の将来展望”、*トライボロジー会議 2015 春姫路予稿集* (2015) A24
[9] 福井茂寿、”ナノ気体潤滑膜”、*マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック*、分担執筆、エヌ・ティー・エス、（2006）pp.212-227
[10] 曽根良夫・青木一生、*分子気体力学* (1994) 朝倉書店
[11] Burgdorfer, A. “The Influence of the Molecular Mean Free Path on the Performance of Hydrodynamic Gas Lubricated Bearings”, *ASME J. Basic Eng*., Vol. 81 (1959) pp.94-100
[12] Hsia, Y-T. and Domoto, G.A., “An Experimantal Investigation of Molecular Rarefaction Effects in Gas Lubricated Bearings at Ultra-Low Clearances”, *ASME J. Lubr. Technol*., Vol. 105 (1983) pp.111-118
[13] 大久保俊文・岸上順一・福井茂寿・安田享祐、“可視レーザ干渉を利用した浮動ヘッドスライダ浮上特性の精密測定”、日本機械学会論文集（C 編），53 巻第 487 号 (1987) pp. 839-847
[14] 福井茂寿・金子礼三、“ボルツマン方程式に基づく薄膜気体潤滑特性の解析（第 1 報，一般化された潤滑方程式の導出）”、日本機械学会論文集（C 編），53 巻第 487 号 (1987) pp. 829-838
[15] Fukui, S. and Kaneko, R., "Analysis of Ultra-thin Gas Film Lubrication Based on the Linearized Boltzmann Equation (Influence of Accommodation Coefficient)", *JSME International J*., Vol. 30, No. 268 (1987) pp. 1660-1666
[16] Fukui, S. and Kaneko, R., "Analysis of Ultra-Thin Gas Film Lubrication Based on the Linearized Boltzmann Equation: First Report-Derivation of a Generalized Lubrication Equation Including Thermal Creep Flow", *Trans. ASME, J. Tribology*, Vol. 110 (1988) pp. 253-262
[17] Fukui, S. and Kaneko, R, "Experimental Investigation of Externally Pressurized Bearings under High Knudsen Number Conditions", *Trans. ASME, J. Tribology*, Vol. 110 (1988) pp. 144-147
[18] Cercignani, C. and Daneri, A., “Flow of a Rarefied Gas Between Two Parallel Plates”, *J. Appl. Phys*., Vol. 34, (1963) pp.3509-3513
[19] Fukui, S. and Kaneko, R., "A Database for Interpolation of Poiseuille Flow Rates for High Knudsen Number Lubrication Problems", *Trans. ASME, J. Tribology*, Vol. 112 (1990) pp. 78-83
[20] Alexander, FJ, Garcia, AL and Alder, BJ, “Direct simulation Monte Carlo for thin-film bearings”, *Phys. Fluids*, Vol.6 (1994) 3854
[21] 福井茂寿、“MEMSへの空気軸受の適用”、*トライボロジスト*、第 49 巻 第 2 号 (2004) pp. 134-140
[22] Fukui, S. and Kaneko, R., “Molecular Gas-Film Lubrication (MGL)”, in *Handbook of Micro/Nano tribology*, Chap. 13, ed. B.Bhushan, CRC Press, 1995, pp. 559-604
[23] Watanabe, T. and Fukui, S., "A Method for Controlling Tactile Sensation of Surface Roughness Using Ultrasonic Vibration", *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation* (1995) pp. 1134-1139
[24] 山根清美・福井茂寿、"分子気体潤滑特性に及ぼす境界面の適応係数の影響（せん断応力の解析手法と DSMC 法による結果との比較）"、日本機械学会論文集（C 編）、67 巻、663 号 (2001) pp. 3618-3626
[25] Fukui, S. and Yamane, K., "DSMC/MGL Comparisons of Stresses on Slider Air Bearing with Nano Meter Spacings", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 38 (2002) pp. 2153-2155
[26] 松岡広成、”マイクロ／ナノトライボロジーとその応用”、*マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック*、分担執筆、ｴﾇ･ﾃｨｰ・ｴｽ、（2006）pp.504-538
[27] Matsuoka, H. and Kato, T., “An Ultrathin Liquid Film Lubrication Theory – Calculation Method of Solvation Pressure and Its Application to the EHL Problem”, *ASME J. Tribology*, Vol.119, No.1 (1997) pp. 217-226
[28] Oron, A., “Long-scale evolution of thin liquid films”, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 69, No.3 (1997) pp.931-980
[29] Saeki, F., Fukui, S. and Matsuoka, H., “Lubricant Deformation Analyses Caused by Gas Stresses and Surface Tension,” *IEEE, Trans. on MAG*. Vol. 45, No. 11 (2009) pp. 5061-5064.
[30] Fukui, S., Hitomi, K., Shimizu, S., Saeki F. and Matsuoka, H., “Three-dimensional deformation analyses of the ultra-thin liquid film surface (Linearized analyses for the steady state)”, *Microsyst Technol*, Vol. 16 (2010) pp.85–92, DOI 10.1007/s00542-008-0764-3
[31] Matsuoka, H., Oka, K., Yamashita, Y., Saeki, F. and Fukui, S., “Deformation characteristics of ultra-thin liquid film considering temperature and film thickness dependence of surface tension”, *Microsyst Technol*, Vol. 17 (2011) pp. 983-990,

Published online, 18 January (2011), DOI 10.1007/s00542-011-1223-0
[32] Saeki, F., Fukui, S. and Matsuoka, H., “Optical interference effect on pattern formation in thin liquid films on solid substrates induced by irradiative heating”, *Physics of Fluids*, Vol. 23, 112102 (2011).
[33] 松岡広成・福井茂寿・加藤孝久、“マクロメニスカスの振動伝達特性に関する研究－動的ばね定数および減衰係数の周波数依存性－”、トライボロジスト、45 巻、10 号、(2000) pp.757-768
[34] 松岡広成・福井茂寿，”近接する複合層に働くファンデルワールス力の汎用的近似式の導出（超微小すきま浮動形磁気ヘッドスライダの静的浮上解析への適用）”，日本機械学会論文集，第 69 巻，686 号，C 編，(2003)，pp. 2810-2817.
[35] Matsuoka, H., Kitahama, N. Tanaka, T., Fukui, S., “Theoretical study of van der Waals deipersion pressures considering one-dimensional material distributions in the in-plane direction”, *Microsyst Technol*, Vol. 20, Issue -9, pp. 1397-1403, Published online, 30 March (2014), DOI 10.1007/s00542-014-2129-4
[36] Fukui, S., Wakabayashi, R. and Matsuoka, H., “Static Flying Characteristics of Heat-Assisted Magnetic Recording Heads in He-enclosed HDDs”, *IEEE Trans. Mag*, Vol.50, No.11, Article No. 3303204 (2014), DOI10.1109/TMAG.2014.2320961
[37] Fukui, S., Okamura, Y., Nakasuji, A. and Matsuoka, H., “Thermo-molecular gas-film lubrication dynamics considering boundary temperature and ambient gas (2-DOF numerical analysis by t-MGL equation)”, *Microsyst Technol*, Vol. 22 (2016) pp. 1337-1349, Published online, 09 Jan (2016), DOI 10.1007/s00542-015- 2808-9
[38] Matsuoka, H., Miyamoto, M. and Fukui, S. “Effects of surface roughness on characteristics of liquid transfer due to breakage of liquid meniscus bridge”, *Microsyst Technol*, Vol. 22 (2016) pp. 1397-1404, Published online, 13 Jan (2016), DOI 10.1007/s00542-015-2867-6
[39] Matsuoka, H., Kitahama, N. and Fukui, S., “Theoretical study of surface interaction pressures of two-dimensional periodic material distributions based on the Lennard-Jones potential” *Microsyst Technol*, Vol. 22 (2016) pp. 1419-1428, Published online, 02 Mar (2016), DOI 10.1007/s00542-016-2881-8

（受理　平成 28 年 11 月 4 日）

再生可能バイオマス資源のバイオリファイナリー

築瀬　英司
鳥取大学大学院工学研究科生物応用工学講座

Microbial cell factory design for renewable resource biorefineries

Hideshi Yanase
Biotechnology Cource, Department of Chemistry and Biotechnology,
Graduate School of Enginnering
Tottori University, 680-8552 Japan
E-mail: yanase@bio.tottori-u.ac.jp

Abstract: Biorefineries, which are based on renewable biomass, can contribute to establish our future sustainable society. To establish sustainable society, we should replace the present manufacturing process based on fossil non-renewable resources with the biorefinery process. From such a viewpoint, we focused on the development of microbial cell factories capable of producing biofuels, chemical building blocks, and pharmaceuticals.

Key Words: Biomass, Biofuel, Biorefinery, Cell factory, Chemical building block, Metabolic engineering, Pharmaceuticals

1. はじめに

2100 年の地球は、気温が 6℃上昇することにより海面も6m上昇し、重篤な異常気象に加え、世界の主要都市は水没する危機に瀕すると予想されている。その原因の一つには、産業革命後の石炭から石油・天然ガスの大量消費に伴う温暖化ガス（Green House Gas: 二酸化炭素やメタンなど）の発生にあるとされている。2015 年 11 月 30 日から 12 月11日まで、フランス・パリで気候変動枠組条約第 21 回締約国会議（COP21）、京都議定書第 11 回締約国会議（CMP11）が開催され、日本の 2020 年以降の新たな温室効果ガス排出削減目標は、2030 年度に 2013 年度比▲26.0%（2005 年度比▲25.4%）の水準（約 10 億 4,200 万 t-CO_2）と設定されている。このような切迫した地球温暖化を回避し、持続性社会を構築するためには、これまでの石油などの化石資源を大量に消費してエネルギーや化学製品を生み出す生産プロセス（オイルリファイナリー）から、太陽光と二酸化炭素と水から生み出されるバイオマスを原料として環境調和型プロセスにより輸送用燃料、様々な化成品基材、そして先端材料を生産可能なシステム（バイオリファイナリー）への転換がEUや米国の国家戦略として位置づけられている。本稿では、原料とするバイオマス資源が食糧と競合しないように、非可食部バイオマスである草や木などのリグノセルロース系バイオマス資源を原料とし、生物反応を利用することで輸送用燃料、化成品基材、および医薬品基材へと高効率で変換できるバイオリファイナリープロセスの開発について、特に、プロセスの触媒素子として最も重要な Microbial cell factory(微生物細胞工場）の開発研究を紹介する（図 1）。

図1.オイル・リファイナリーからバイオ・リファイナリーへの転換

2. 輸送用代替燃料・第二世代バイオエタノール

地球規模でのバイオマス生産量は年間 2,000 億トンに達しており、これは年間エネルギー総消費量の 10 倍以上に相当する。バイオマス資源のエネルギー変換技術は熱化学的な変換と生物化学的な変換技術に大別されるが、現在の燃料流通と内燃機関を考慮すると、ガスよりも液体が石油に代替可能な燃料として実用に近いとされ、バイオテクノロジー、すなわち発酵性の微生物を利用したバイオマス資源からの燃料用エタノール生産技術が開発されている。エタノールは 5.8×10^{8} kcal/kl、つまり石油の約 2/3 の燃焼熱を有し、燃焼効率もよく、燃焼の際には窒素酸化物や一酸化炭素の生成量も少ないことから、内燃機関の燃料としてガソリンに代替可能である。また、エタノールは酢酸、アセトアルデヒド、ブタノール、エチレンなどの化成品製造の出発物質としても有用である。そのため、長期的な展望に立つと、食糧とは競合しない未利用リグノセルロース系バイオマス資源からエタノール（第二世代バイオエタノール）を生産することは地球環境保全の観点からも重要な意義をもっている。

2.1 未利用セルロース系バイオマスの原料化

我が国における潜在的な発酵原料としては、森林間伐材、稲藁、籾殻、バガス、茅等の未利用農林産廃棄物に加え、建築廃材、古紙・廃紙、都市ゴミ等のリグノセルロース系産業廃棄物が想定され、これら廃棄物の総廃棄量は年間約 4,000 万トンに達している。すなわち、これら未利用リグノセルロース系バイオマスをエタノールに変換すると、理論的には 1,000 万トンのエタノールの製造が可能となり、我が国のガソリン需要の約 1/4 をまかなうことになり、温室効果ガスの 25％削減を達成できる。一方、リグセルロース系バイオエタノールのグローバルな商業展開を前提とした場合には、既にプランテーションに実績のある油ヤシ、ユーカリ、農産廃棄物としてのコーンストーバ、サトウキビ・バガスの原料化も対象となる。

これらリグノセルロース系バイオマスを原料とした第二世代バイオエタノール製造プロセスでは、リグニンにより被覆された植物細胞壁多糖を露出させる前処理原料化工程と、前処理物の高効率な糖化・発酵工程の開発が必要である（図2）。木質系バイオマスは稲藁、コーンストーバやサトウキビバガスなどの草本系バイオマスに比較して前処理原料化が難しいとされ、その前処理技術に関しては、蒸煮、水蒸気爆砕、加圧熱水、アンモニア爆砕、粉砕、ソルボリシス、オゾン酸化、酸処理、アルカリ処理、マイクロ波処理、など様々な方法が検討されてきた。一般的に、爆砕、蒸煮などの水熱反応が広葉樹材に利用されているが、杉などの針葉樹材である難分解性バイオマスにも適用できる前処理法としてマイクロ波ソルボリシス法を選択し、3 次元電磁界シミュレーションを用いてマイクロ波照射装置の電磁界分布やマイクロ波増感作を最適化した新方式の連続式マイクロ波照射装置が開発されている。マイクロ波照射前処理杉材に市販のセルロース分解酵素カクテルを添加して 50℃にて保持することで、15％前処理物から90%以上の収率で酵素糖化されることが報告されている。開発したマイクロ波照射前処理と糸状菌由来のセルラーゼ酵素カクテルを用いる糖化法の組み合わせは、針葉樹と同様に建築廃材、ユーカリ材、コーンストーバなどの原料化に有効である。

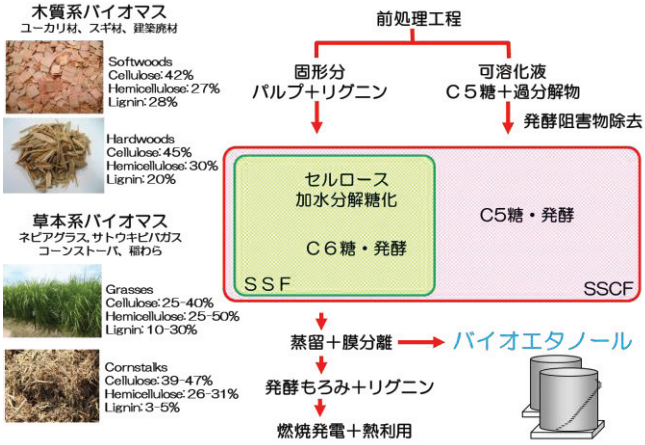


図 2. リグノセルロース系バイオエタノール転換バイオプロセス

2.2 高速発酵細菌の発酵特性

現状の第 2 世代バイオエタノール製造プロセスでは、リグノセルロース系バイオマスを物理的あるいは熱化学的前処理により原料化した後、その前処理物に対して糸状菌由来のセルラーゼ酵素カクテルと発酵菌を加えてワンポッドで糖化と発酵を行う同時糖化並行発酵（SSCF: Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation）が商用プロセスとして想定されている。嫌気的な生育条件下で糖質からエネルギーを獲得することによりエタノールを代謝産物として生成する細菌は数多く報告されているが、糖質から理論収率に近い量のエタノールを効率よく生産する細菌は、*Zymomonas mobilis* と我が国で単離された新種の *Zymobacter palmae* に限定される（表1）。多様なリグノセルロース系バイオマスに最適な発酵菌の育種を目標とし、*Zm. mobilis* と *Zb. palmae* の代謝工学的な育種を並行して実施したが、本稿では木質系バイオマス

原料に最適な *Zm. mobilis* に焦点を絞り紹介する[1,2]。

表1. エタノール発酵細菌の発酵特性

Zm. mobilisおよびZb. palmaeのエタノール発酵特性

発酵特性	*Zymomonas mobilis*（グラム陰性細菌）	*Zymobacter palmae*（グラム陰性細菌）	Saccharomyces（酵母）
分離源	ブルケ酒（メキシコ）	椰子発酵液（沖縄）	醸造菌
エタノール生成速度 hr	120～200 g/l・hr	20～30 g/l・hr	15～30 g/l・hr
	（菌体再循環連続発酵）	（固定化菌体連続発酵）	（固定化菌体連続発酵）
エタノール濃度	12%	7-8%	12%
エタノール回収率	95～97%	95-97%	93～95%
糖代謝経路	ED経路	ED経路	EMP経路
ATP生成量（/mol Glc）	1 mol	1 mol	2 mol
発酵性糖　（リグノセルロース系）			
グルコース	++	++	++
キシロース	-	-	-
マンノース	-	+	+
セロオリゴ糖	-	-	-
非晶性セルロース	-	-	-
結晶性セルロース	-	-	-

グラム陰性の通性嫌気性細菌である*Zm. mobilis*は、省エネルギー的な解糖系であるEntner-Doudoroff（ED）経路を利用するために、エタノール生産性は酵母よりも5倍程度優れており、菌体リサイクル連続発酵によるエタノール生産速度は120～200 g/l・hrに達する。筆者らは、*Zm. mobilis*のゲノムDNAの完全解読に成功し、*Zm. mobilis*のゲノムサイズは2,157,589塩基で2000の遺伝子がコードされている（図3）。解読したゲノム情報に基づき、*Zm. mobilis*の解糖経路やその糖代謝周辺の代謝経路の特徴を明らかにしている（図4）。商用化プロセスとして、SSCFプロセスに求められる発酵菌の能力は、セルラーゼによるセルロース糖化反応と発酵が同時に進行することが前提であり、発酵菌には①酸性側（pH4.5-5.0）での発酵能力、②高温での発酵能力（35℃以上）に加えて、③高濃度原料仕込みを可能にするための高濃度グルコース耐性、④高濃度エタノール耐性、⑤前処理工程で副生して発酵菌の成育や発酵能を阻害するとされるヘミセルロースおよびリグニン由来過分解物に対する耐性、がある。自然界から新たに分離した*Zm. mobilis*株に対して①～⑤の発酵特性を検討した。その結果、分離株は、初発pHを4.0とした酸性条件下においても速やかに発酵して理論収率でエタノールを生産するとともに、37℃までは生育と発酵速度に遅延は認められず、40℃においても発酵能は観察された。さらに、SSCFプロセスでの原料高濃度仕込みを想定し、高濃度のグルコースとエタノールに対する耐性を検討した結果、180 g/lのグルコースは48時間以内に完全に消費して理論収率でエタノールを生産した。また、初発エタノール濃度が7.5%まではエタノールに耐性をもつことが明らかになった。さらに、セルロース系バイオマスの前処理工程で副生する発酵阻害物（酢酸、フルフラール類、およびリグニン由来芳香族アルデヒド類）に対する耐性を検討した結果、酢酸濃度は1%以上、ベンズアルデヒドは10 mM、ハイドロキシベンズアルデヒドは5 mM、シリンガアスデヒドは20 mM、バニリンは10 mM、フルフラールは20 mM、HMFは20 mMの濃度で耐性を示し、分離菌が酢酸とともにフルフラールやリグニン過分解物に耐性を有することが明らかになった。

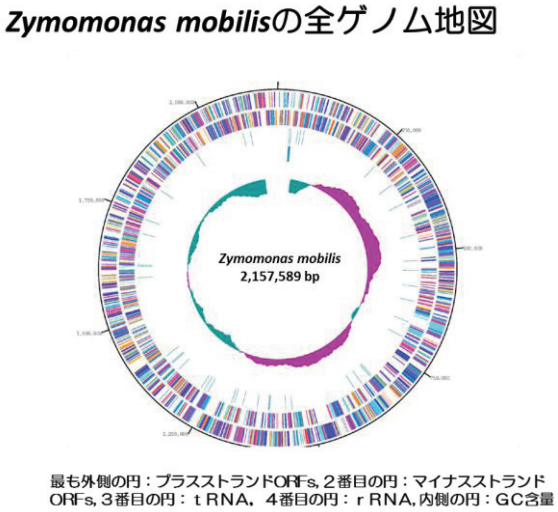


図3. *Zymomonas mobilis*の全ゲノム解読

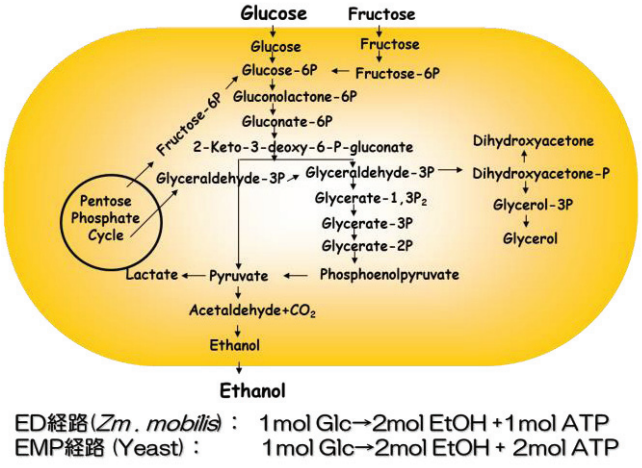


図4. 発酵細菌のエタノール生合成経路

2.3 リグノセルロース由来難発酵性糖のC5・C6糖同時並行発酵細菌のメタボリックエンジニアリング

リグノセルロース系バイオマス前処理物の糖化液中には、グルコースに加えヘミセルロース由来の難発酵性糖質であるキシロースやマンノースが混在し、エタノール収率の低下の原因となる。高効率なエタノール回収を可能にするためには、混在する糖質の発酵能、すなわち C5・C6 同時並行発酵菌の開発が不可欠である(図5)。

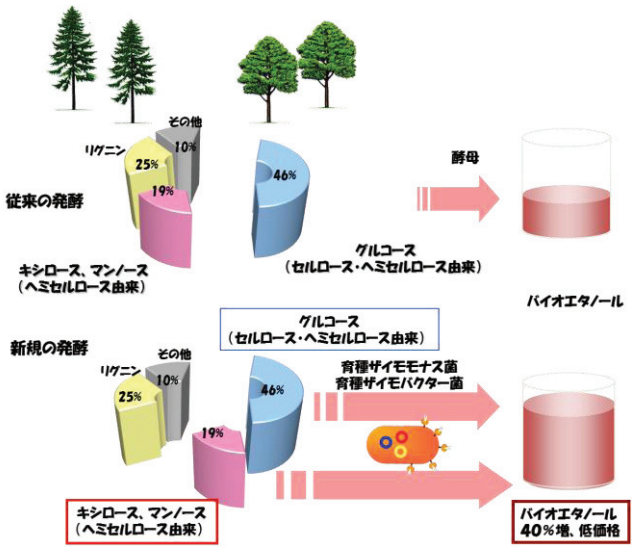


図5. C5・C6 糖同時並行発酵性の賦与

① キシロース並行発酵性の賦与

一般的に細菌におけるキシロース代謝は酵母とは異なり、細胞内に取り込まれたキシロースはキシロースイソメラーゼ(XI)により異性化されてキシルロースへと変換された後、キシルロキナーゼ(XK)によりキシルロースリン酸へとリン酸化を受けてペントースリン酸(PP)経路により代謝される。*Zm. mobilis* はキシロースを PP 経路に導入するための XI と XK の両遺伝子(*xylA*、*xylB*)を欠損している。一方、*Zm. mobilis* での細胞内へのキシロース取り込みにはグルコース輸送タンパク質として働くグルコースファシリテーター(Glf)が関与する。そこで、キシロースを PP 経路に導入するための大腸菌由来の *xylA* と *xylB*、および PP 経路 flux 向上のためのトランスアルドラーゼ遺伝子(*tal*)とトランスケトラーゼ遺伝子(*tkt*)を導入した(図6)。導入したキシロース異化代謝酵素遺伝子は *Zm. mobilis* 株内で高発現し、40 g/l のキシロースを唯一の炭素源として生育し、48 時間で完全に消費して理論収率のエタノールを生産した。キシロースからのキシリトール等の副産物の蓄積は認められなかった[1]。

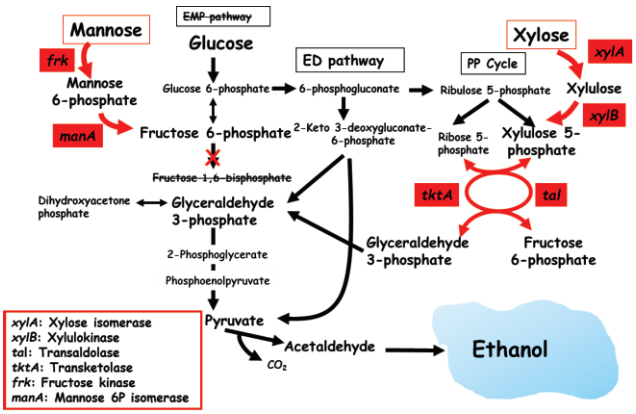


図6. C5・C6糖異化代謝経路の導入

② マンノース並行発酵性の賦与

Zm. mobilis はグルコース輸送促進タンパク質を介してマンノースを細胞内に取り込むが、エタノールに変換できない。一方、*Zm. mobilis* のフルクトース発酵の初発酵素であるフルクトキナーゼ(FRK)はマンノースのリン酸化反応も触媒することから、マンノース発酵性の賦与は細胞内でリン酸化されたマンノースをフルクトース6リン酸へと異性化するホスホマンノースイソメラーゼ遺伝子(*manA*)の導入により可能になる。そこで、大腸菌由来の *manA* を *Zm. mobilis* に導入することで、40 g/L マンノースを唯一の炭素源として生育し、理論収率のエタノール生産株を育種した[1]

2.4 実用的 C5・C6 同時並行発酵細菌のメタボリックエンジニアリング

リグノセルロース系バイオマス前処理糖化液の完全発酵に最適な発酵菌を育種するために、マンノースとキシロース異化代謝遺伝子群の共発現株を育種した。*manA* を *Zm. mobilis* の染色体 DNA 上に組込み、さらにキシロース異化代謝酵素遺伝子群をプラスミドとして導入することで、グルコース混在下でのキシロースとマンノースからの理論収率での速やかなエタノール生産を確認した[1]。すなわち、1つの菌株によりリグノセルロース系バイオマス前処理糖化液に含まれる主要な糖成分から理論収率でのバイオエタノールを生産する C5・C6 糖並行発酵性 *Zm. mobilis* を育種することができた。そこで、C5・C6 糖並行発酵性 *Zm. mobilis* のパフォーマンスを確かめるために、実際の稲わら前処理液と廃木材前処理液を原料とした並行発酵性試験を実施した(図7)。実液に含まれるグルコース、キシロース、およびマンノースを完全に並行発酵して、

理論収率に近いエタノールを生産した。

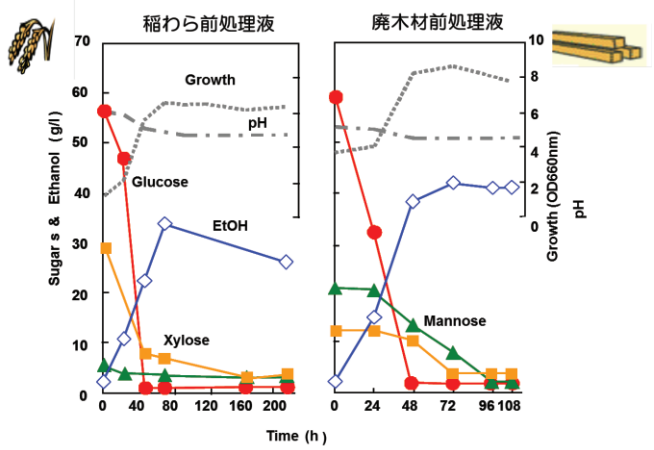


図7. 組換え *Zm. mobilis* による稲わらと廃木材の前処理液の発酵

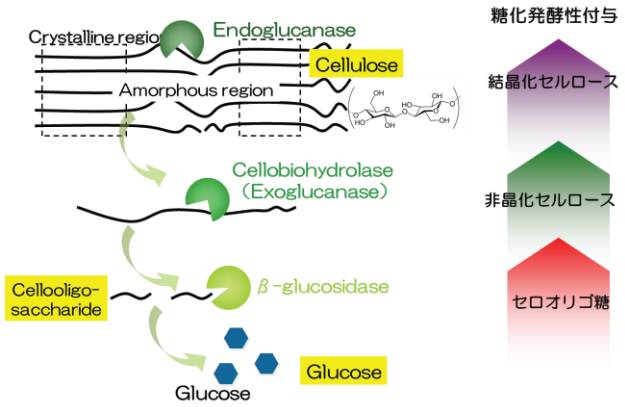


図8. セルロース糖化発酵菌の育種

2.5 セルロース直接発酵発酵細菌のメタボリックエンジニアリング

先に述べたように、前処理した廃木材や稲わらの糖化工程は糸状菌由来のセルラーゼを利用する酵素糖化が主流となっているが、十分量の酵素を使用した糖化処理においてもセルロース部分分解物であるセロオリゴ糖が残存する(図8)。また、バイオエタノール製造プロセスにおいて、酵素糖化工程は前処理工程とともにコスト削減が必須とされている。筆者らは、酵素糖化液に含まれるセロオリゴ糖からのエタノール回収と酵素糖化工程のコスト削減を目標に、発酵細菌へのセルロース糖化発酵性の賦与を検討した。*Zm. mobilis* に草食動物である牛の胃袋に生息するルーメン細菌由来の β-グルコシダーゼ遺伝子(*bgl*)を導入した。先ず、*bgl* を *Ruminococcus albus* の染色体 DNA よりクローン化して *Zm. mobilis* に導入した。発現させた Bgl の大部分は細胞質内に局在したことから、*bgl* の分泌シグナル領域を *Z. mobilis* 由来来のペリプラズム局在性酵素の分泌シグナル領域と交換して導入した。その結果、発現した Bgl がペリプラズムに局在することにより、22 g/L セロビオースから理論収率に近い 10.7 g/L エタノールを生産した[3,4]。

さらに、クローン化したセルラーゼ遺伝子を *Zm. mobilis* の細胞表層に高密度で発現提示させることにより効率よくセルロースを糖化させるために、発酵細菌に独自の細胞表層提示システムを開発した(図9)。

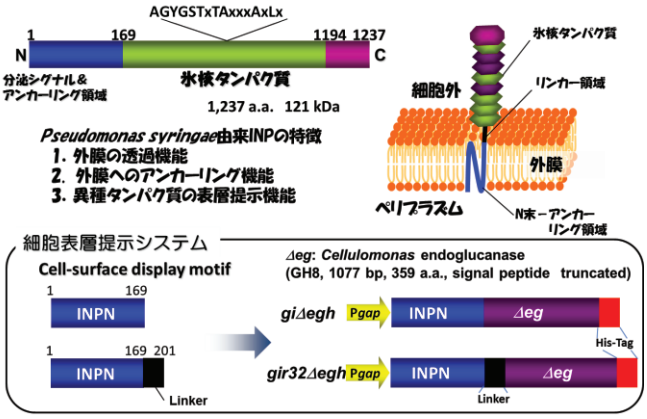


図9. 新規氷核タンパク質遺伝子を利用したセルラーゼの細胞表層提示システム

植物病原性グラム陰性細菌である *Pseudomonas syringae* は細胞表層に氷核蛋白質を表層提示する。そこで、*P. syringae* 由来ゲノム DNA から新規な氷核蛋白質遺伝子をクローン化し、詳細に遺伝子構造を解析した結果、N 末領域に細胞外膜へのアンカーリング領域を見いだした[5,6]。そこで、氷核蛋白質遺伝子の N 末アンカーリング領域(INPN)をセルラーゼの細胞表層提示に利用するシステム開発を行った。*Zm. mobilis* 由来高発現プロモーター制御下に INPN を挿入し、INPN に分泌シグナル領域を欠損させたエンドグルカナーゼ遺伝子を連結した細胞表層提示セルラーゼ遺伝子を構築して導入した。導入エンドグルカナーゼに対する蛍光標識抗体を用いて、発酵細菌におけるエンドグルカナーゼの細胞表層提示を観察したと

ころ、融合遺伝子を導入した発酵細菌は蛍光顕微鏡下で細菌細胞に蛍光が認められ、エンドグルカナーゼが細胞表面に提示して発現されていることが明らかになった。さらに、エンドグルカナーゼとセロビオハイドロラーゼの細胞表層提示を可能にして、セルロースから直接エタノールを生産できる発酵菌を育種している。

以上のように、木質系バイオマスを原料とした SSCF に最適な高速発酵菌の育種に成功した。

2.6 NEDOプロジェクト「木質バイオマスからの高効率バイオエタノール生産システムの研究開発と実証試験

商用レベルでのセルロース系バイオエタノール製造の実証は、平成 13～17 年度 NEDO「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発」、平成 17～20 年度 NEDO「バイオマスエネルギー先導技術研究開発」、平成 20～24 年度 NEDO「バイオマスエネルギー加速的先導技術研究開発」、平成 26 年度 NEDO「新エネルギーベンチャー技術革新事業」において実施した。平成 20～24 年度は木質系バイオマスからの第二世代バイオエタノールを高効率で生産する目的で、鳥取大学大学院工学研究科、京都大学生存圏研究所、日本化学機械製造株式会社、トヨタ自動車株式会社の 4 法人から構成するプロジェクトを立ち上げ、マイクロ波照射による新規な前処理法・前処理装置の開発、前処理バイオマスの高効率酵素糖化条件の確立、低コスト基材を用いた発酵阻害物除去法の開発、発酵細菌の SSCF 最適化を実施し、これら要素技術を統合して木質バイオマスからのバイオエタノールを生産するベンチスケールでの新規な一貫プロセスを開発した（図10，11）。

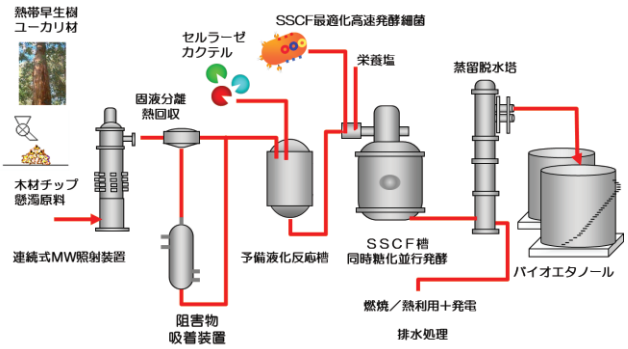


図10. 木質バイオマスからのバイオエタノール一貫製造プロセス

図11. 木質系バイオエタノール製造ベンチプラント

① マイクロ波照射前処理工程

木質系バイオエタノール生産の低減には、転換効率の高さと設備費・運転費の低減を両立させることが重要である。そこで、はじめに 3 次元電磁界シュミレータによる計算機実験と実測実験により、民生用 1.5kw のマグネトロンを 8 ポートもつ新規な超低コストマイクロ波照射前処理装置を開発した[7-10]。この装置は、アイソレータやEHチューナーなどのマイクロ波を制御する高価な付帯装置を用いることなく、マグネトロンをガラスの遮蔽板を介してステンレスパイプに直結させたシンプルな構造をもつ。本前処理装置を用い、ユーカリ・グロビュラスを固形分 15%以上で前処理を実施し、従来の添加触媒量比の 1/50 に低減した処理条件を設定し、触媒回収を不要とする高効率かつ低コストプロセスを開発した。この前処理条件では、ベンチプラントで反応温度 190℃が最適温度となり、触媒量の多い条件に比較すると発酵阻害物質の生成量が増加した。これに対応するため、発酵菌の阻害耐性強化を行うとともに、残滓リグニンからの発酵阻害物質吸着剤を開発した。糖化残滓および SSCF の残滓リグニンを熱処理することにより、発酵阻害物質を強力に吸着する担体の製造に成功した。このリグニン由来吸着体は、発酵阻害物質を吸着した後は熱処理によりリサイクルでき、最終的には燃焼によりエネルギー回収される。リグニン由来吸着体を組み込んだプロセスでは、吸着体の購入や廃棄の必要がなく、可溶部の発酵阻害物質を吸着除去により廃水処理の負荷を軽減するメリットをもつ。NEDO プロジェクトでは、開発した吸着体を用いて処理したマイクロ波前処理可溶化液の *Zm. mobilis* による C5・C6 糖並行発酵

(CF:Co-Fermentation)に成功した。吸着体は、SSCF反応槽に添加するオール・イン・ワンプロセスにおいても強力な阻害低減効果を発揮し、理論収率に近いエタノールの生産が可能になった。

② SSCF(同時糖化並行発酵)工程

マイクロ波照射前処理ユーカリ材スラリーを直接の原料として、セルラーゼ酵素カクテルとSSCFに最適な育種*Zm. mobilis*を加え、ワンポットでセルロース糖化とC5・C6糖の並行発酵が同時に進行するSSCFプロセスを開発した。ユーカリ材を原料としてマイクロ波照射誘電加熱処理して得られるパルプ固形物(セルロース)および黒液(ヘミセルロース可溶化液)の糖化・並行発酵条件を設定した。SSCFプロセスの開発にあたって、第1段階として黒液を含まないMW前処理パルプ固形物の同時糖化発酵(SSF:Simultaneous Saccharification and Fermentation)プロセス条件について、添加セルラーゼ酵素カクテル量、糖化・発酵のpHと温度条件を最適して、ベンチプラントにて実証試験に成功した。次に、黒液とパルプ固形物をワンポットで糖化と発酵を行うSSCFプロセスの最適化を検討した。SSF条件下にて、先に開発した残渣リグニンを活用した新規低コスト阻害物吸着基材により発酵阻害物を吸着除去したMW処理可溶化液とパルプ固形物を原料として、セルラーゼ酵素カクテルとC5・C6糖並行発酵性*Zm. mobilis*を加えて糖化並行発酵が進行するSSCFプロセスを開発した。最終的に、ベンチプラントでのSSCF条件を最適化するために、セルラーゼ酵素カクテル添加量と酵素糖化効率、および予備液化と育種*Zm. mobilis*発酵速度との相関を詳細に検討して、ユーカリ材前処理固形パルプ＋発酵阻害物吸着処理可溶化液にセルラーゼ酵素カクテルを添加して予備液化した後に、育種*Zm. mobilis*を植菌してSSCFを継続するL+SSCF(Liquefaction followed by SSCF)プロセスを開発した。

③ ベンチプラント実証試験

L+SSCFのベンチプラント実証試験では、ユーカリ材チップを150 g dry weight%でマイクロ波照射前処理をおこなった固形物(パルプ)と発酵阻害物吸着処理可溶化液を原料として、30 L発酵槽からなるベンチプラントにてSSCFを実施した。その結果、最終エタノール濃度64 g/L、エタノール生産速度1 g/L・h、エタノール回収率90%以上を達成し、商用レベルでのセルロース系バイオエタノール製造プロセスであることを実証することができた(図12)。なお、製造したバイオエタノールは、輸送用燃料やプロピレン生産原料として使用できる高い品質をもつことも示され、代替燃料用途に加え化成品原料としての利用も期待されている。

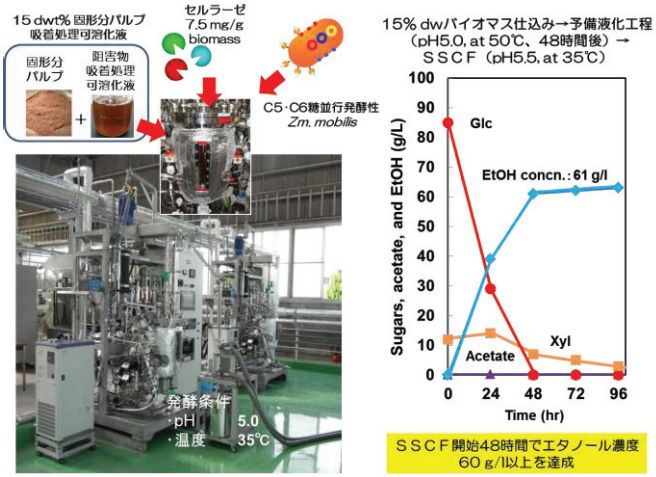


図12. ベンチプラントによるユーカリ材MW前処理MashのL＋SSCF

2.7 第二世代バイオエタノールの展望

セルロース系バイオエタノールの商業製造を加速するためには、低コストでシンプルなプロセスを開発することで安価で安定したバイオエタノールを供給することが可能になる。過去20年の間で、バイオエタノール製造プロセスはSHF (Separated Hydrolysis and Fermentation) から SSF (Simultaneous Saccharification and Fermentation)、そして SSCF (Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation)へと改良されている。これらのプロセス改良はセルロース系バイオエタノールを穀物由来セルロース価格に引けをとらない価格に近づけている。ブラジルのサトウキビからのバイオエタノール価格は0.23-0.29 $/L、EU の砂糖大根と米国のトウモロコシからのバイオエタノール価格は0.29 $/Lと0.53 $/Lと報告されている[11]。これら第一世代バイオエタノール価格に比較して、2011 年に発表された NREL 報告書では、コーンストーバを原料としたエタノール販売価格 (MESP) を0.57 $/Lと設定しており、今後のセルロース製造価格の基準になるとされている[12]。このエタノール価格を達成するためには、さらなる発酵菌の強靭 (Robust)化とともに、バイオマス前処理物の酵素糖化に使用するセルラーゼ酵素カクテルの高活性化と低コスト製造、発酵阻害物質の生成を抑えながら高い糖化効率を与える前処理反応の開発が重要な鍵と考えている。

3. 化成品合成基材・バイオジオール

米国のエネルギー省(DOE)が策定したバイオマスを原料とする重要な化成品基材 Top 30 にジアルコールである 2,3-ブタンジオールがリストアップされている。2, 3-ブタンジオールはブタジエンを経て合成ゴム(タイヤ)の原料であるばかりでなく、化成品基材としてインク、香水、殺虫剤、軟化試薬、爆薬、可塑剤の原料として有用である。さらに、光学純度の高い 2, 3-ブタンジオールは医薬品や液晶などの付加価値の高い化合物の合成素材として利用される可能性を有している。工業的には 2, 3-ブタンジオール合成は、ナフサを原料とし 2-ブテンオキシドを過塩素酸水溶液中で加水分解する方法で製造されている。2, 3－ブタンジオールは化学変換により汎用な溶剤であるメチルエチルケトンに変換されることや、アセチル化した後に酢酸を脱離する方法により1, 3－ブタジエンへと変換されることが報告されている。中でも、1, 3－ブタジエンはヘキサメチレンジアミンやアジピン酸、1, 4－ブタンジオール等といった多種類の化合物を合成可能な出発物質であり、これら技術の確立は石油由来の既存合成樹脂をバイオマス由来に置き換えられる可能性があるため、その製造技術は非常に重要であり、セルロース系バイオマスを原料とした微生物発酵法が注目されている。

3.1 ブタンジオール発酵生産菌の検索

筆者らは、第二世代バイオエタノール生産菌として、先の *Zymomonas mobilis* に加え、新種の発酵菌として分離された *Zymobacter palmae* にも注目した。本菌は酵母や *Zm. mobilis* と同様にグルコースから理論収率でのエタノールを発酵生産する(表1)。そのため、第二世代バイオエタノール製造に最適な発酵菌として位置づけ、NEDO 事業においても育種研究を実施してきた。その育種研究の過程で *Zb. palmae* のゲノム DNA の完全解読に成功し、糖代謝とその周辺代謝経路を予測したところ、*Zb. palmae* に 2,3-ブタンジオール生合成経路の存在を世界で初めて発見し、2,3-ブタンジオール発酵生産の検討を開始した。なお、本研究は、平成23～26年度JST「先端的低炭素化技術開発:セルロースからのポリマー原料の革新的製造プロセス研究開発」の一部として実施した。

① *Zymobacter palame* の発酵特性

新規エタノール発酵細菌である *Zb. palmae* は沖縄の椰子樹液の発酵液から分離されたグラム陰性の通性嫌気性細菌であり、酵母と同程度のエタノール発酵性を示す。エタノール生成速度は 30 g/L.h、エタノール収率は 95-97%、エタノール耐性は 7%程度、グルコース耐性は 20%、発酵温度は 37℃が最適であり、バイオエタノール生産菌として有用である。一方、発酵性糖種はグルコース、フルクトース、ガラクトース、スクロース、マルトースなど酵母と同様な発酵特性を示す[13]。

② 全ゲノム DNA 完全解読

Zb. palmae の育種研究を加速させるために、世界に先駆けて *Zb. palmae* のゲノム DNA の完全解読を開始した。解析法としては、ショットガンシークエンス解析と GAP クローズ解析を組み合わせて実施した。*Zb. palmae* のゲノム DNA ライブラリーから約 44,500 クローンの塩基配列を決定した。解析情報量としては冗長度 7.7 で、全ゲノムDNAを網羅する完全解読を終了した。これら塩基配列情報に基づき、遺伝子機能予測解析(アノテーション)を行った。すなわち、RNA 領域の予測、遺伝子領域の予測を行い、解析領域を決定した後、相同性検索やドメイン検索により遺伝子機能解析を行い、*Zb. palmae* のゲノム DNA は 3,023,645 bp で、2,247 の遺伝子がコードされていると結論した(図 13)。

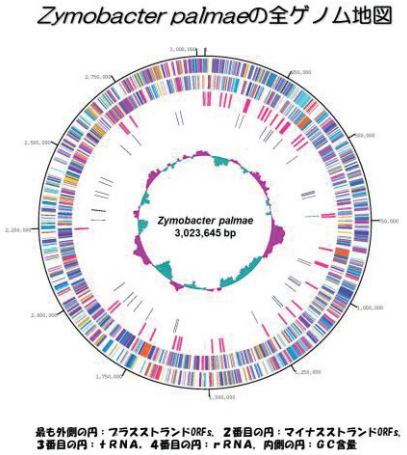


図13. *Zymobacter palmae* の全ゲノム DNA 解読

ゲノム情報に基づく *in silico* スクリーニングにより、糖輸送、糖代謝、エネルギー代謝、を構成する酵素遺伝子の構成を検討した。エネルギー代謝の核となる解糖系は、一般的な EMP 経路とは異なり、省エネルギー的な代謝経路である ED 経路が稼働していることが明らかになった(図 14)。ED経路により生成されるピルビン酸は、大腸菌などの一般的な細菌とは異なり、アセチル CoA を経ることはなく、直接、アセトアルデヒドへと脱炭酸された後、エタノールへ変換される。これまでにエタノール発酵菌として伝統的に利用されている酵母や *Zm. mobilis* と同様な代謝を経ることが明らかになった。さらに興味深いことに、酵母や *Zm. mobilis*

には報告されていない 2,3-ブタンジオール合成経路を見出した。解糖系で生成されるピルビン酸がアセト乳酸合成酵素によりアセト乳酸へと変換された後、アセト乳酸脱炭酸酵素によりアセトインへ、最終的にアセトインはアセトイン脱水素酵素により 2,3-ブタンジオールへと変換される経路である。しかし、リグノセルロース由来の難発酵性糖質であるキシロース、マンノース、アラビノースの異化代謝に関連する酵素遺伝子群は欠損していることも明らかになった。

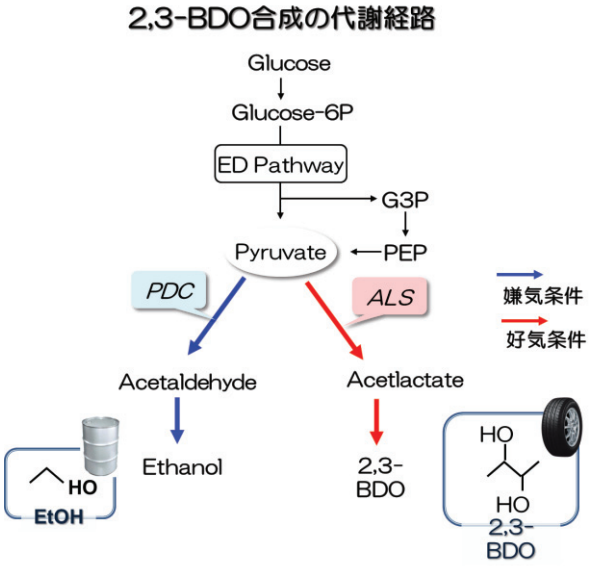


図14. *Zymobacter palmae* のアルコール生合成経路

3.2 *Zymobacter palmae* による 2,3-ブタンジオール生産

Zb. palmae はエタノール発酵菌として分離されたことから、酸素を供給しない嫌気的な培養条件では、グルコースから理論収率でのエタノールを生産する（図15）。そこで、嫌気的な培養条件下と酸素を供給する好気的な培養条件下での発酵代謝物を詳細に分析した。その結果、*Zb. palmae* は嫌気的な条件下では主要な発酵産物としてはエタノールを生産・蓄積するに対し、好気的に条件下では有機酸とともに 2,3-ブタンジオールを蓄積することが明らかになった。そこで、培養時の通気量、培地 pH と2,3-ブタンジオール生産との相関を詳細に検討し、2,3-ブタンジオール生産の最適な条件を設定した。さらに、大量培養を想定し、ジャーファーメンターを用いた 2,3-ブタンジオール生産を検討し、50 g/L のグルコースを炭素源として、18 時間という短時間で、理論収率の 85%での 2,3-ブタンジオール生産に成功した（図16）。得られた収率と生産速度は、既報の他のバクテリアを利用した発酵結果よりも優れていた。その結果、*Zb. palmae* は既報の 2,3-ブタンジオール発酵生産微生物である *Klebsiella* sp.、*Bacillus* sp.、*Panibacillus* sp.に比べて高い生産速度(2.3 g/L・h^{-1})であった。

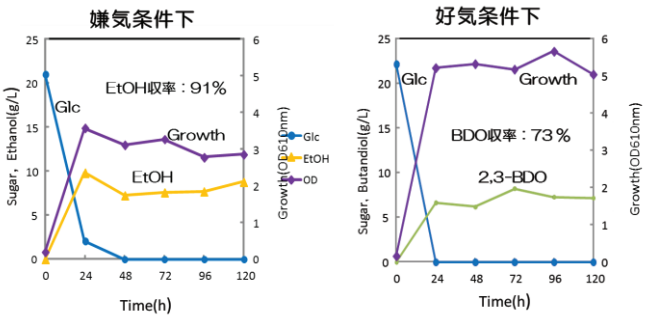


図15. 培養条件による発酵産物の生産制御

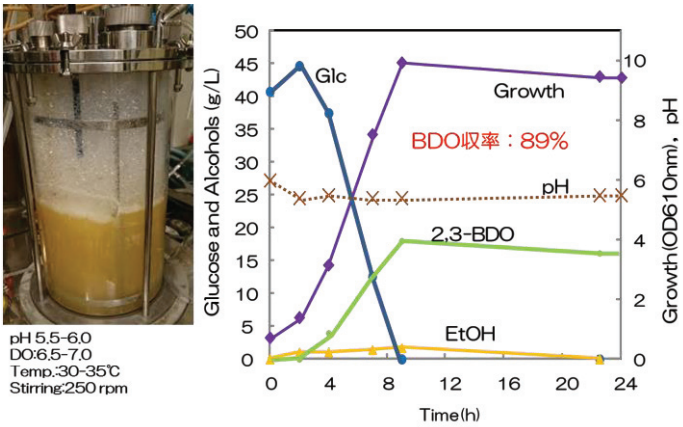


図16. 通気・攪拌培養での *Zb. plamae* による 2,3-BDO の発酵生産

以上の結果から、*Zb. palmae* は酵母や *Zm. mobilis* とは異なり、培養時の通気量によりエタノールから2,3-ブタンジオールへと発酵転換することが可能であった。そこで、ピルビン酸からのエタノール代謝と 2,3-ブタンジオール代謝の分岐酵であるピルビン酸脱炭酸酵素とアセト乳酸合成酵素の発現を嫌気条件下と好気条件下で比較した。その結果、嫌気条件下で高い活性を示したピルビン酸脱炭酸酵素活性は好気条件下では著しく低下するのに対し、アセト乳酸合成酵素は好気条件下で誘導発現することが明らかになった。環境中の酸素濃度により発現制御される転写機構は大変興味深い。

3.3 リグノセルロース系バイオマス由来難発酵性糖質からの 2,3-ブタンジール生産性の賦与

Zb. palmae の発酵性糖種の拡大を検討した。

① 遺伝子操作技術の開発

Zb. palmae への糖発酵性遺伝子の導入と発現には、独自の宿主-ベクター系の開発が必須となる。そこで、遺伝子導入に利用するベクタープラスミドとして、広宿主域性多剤薬剤耐性プラスミドの *ori* とマーカー遺伝子として薬剤耐性遺伝子を連結したプラスミドを選択し、遺伝子導入法としてエレクトロポレーション法を組み合わせたシステムを開発し、初めて *Zb. palmae* の遺伝子操作が可能になった[4]。

② キシロース並行発酵性の賦与

ゲノム情報に基づき、*Zb. palmae* に導入すべきキシロース異化代謝経路上の酵素遺伝子を選択した。大腸菌由来のキシロースイソメラーゼ(XI)、キシルロキナーゼ(XK)、ペントースリン酸回路を活性化するためのトランスアルドラーゼ遺伝子(*tal*)とトランスケトラーゼ遺伝子(*tkt*)を広宿主域性プラスミドに挿入して導入した。大腸菌由来の 4 種のキシロース代謝酵素遺伝子群を導入したザイモバクターによるキシロース発酵性を検討した(図17)。40g/L のキシロースを唯一の炭素源として生育し、24 時間で消費して、理論収率での 2,3-ブタンジオール合成が可能になった(図18)。一方、酵母によるキシロース発酵で収率低下の原因となるキシリトールなどの副産物の蓄積は認められなかった。

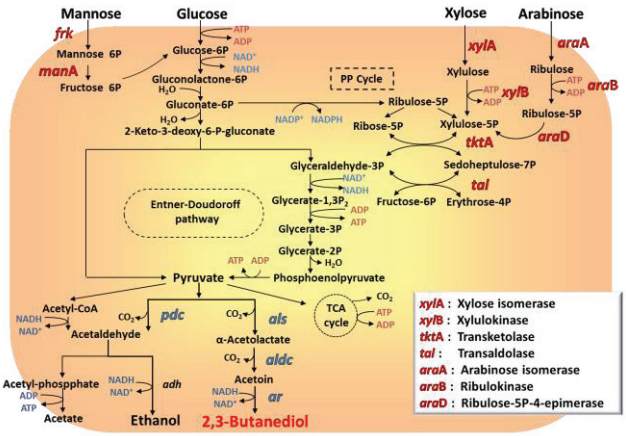


図17. *Zb. palmae* への C5・C6糖並行発酵性の賦与

セルロース系バイオマスの前処理糖化液中には、グルコースとキシロースが混在しており、従来の育種発酵菌ではグルコース消費後にキシロース発酵が開始し、発酵速度とエタノール収率を低下させる。しかし、*Zb. palmae* 育種株は40g/L グルコースと40g/L キシロースを同時に消費し、理論収率に近い 2,3-ブタンジオールを生産する同時並行発酵が可能であった。C5 糖と C6 糖を同時に並行発酵できる微生物は *Zb. palmae* が最初の報告である。その後、C^{14} ラベルしたキシロースをもちいトレーサー実験により、*Zb. palmae* はグルコースとキシロースの取り込み機構を異にするトランスポーターを明らかにした[2]。

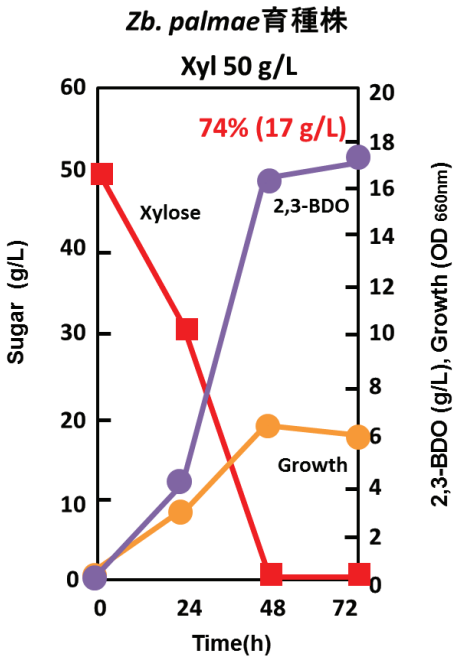


図18. キシロースからの 2,3-BDO 発酵生産

③ マンノース並行発酵性の賦与

マンノース発酵性賦与には、細胞内に取り込んだマンノースを解糖系に導入するためにマンノースリン酸化酵素とリン酸化したマンノースをグルコース 6 リン酸へと異性化するホスホマンノースイソメラーゼが必要とされている。そこで、*Zm. mobilis* 由来の広い基質特異性を特徴とするフルクトキナーゼ(frk)と大腸菌由来のホスホマンノースイソメラーゼ(manA)を *Zb. palmae* に導入して発現させた。frk と manA を導入により、ホスホマンノースイソメラーゼとフルクトキナーゼの高い酵素活性が認められ、マンノースを唯一の炭素源として生育して、2,3-ブタンジオールを生産した。

④ 実用的な C5・C6 糖同時並行発酵菌の育種

キシロース発酵性酵素遺伝子群とマンノース発酵性酵素遺伝子群の安定した発現を可能にするために、構築した人工キシロースオペロン(Xt)と人工マンノースオペロン(opm)のザイモバクター染色体DNAへの組み込みを行った。組み込み標的遺伝子としては、レバンスクラーゼ遺伝子とエンドグルカナーゼ遺伝子を用いた。キシロース発酵性遺伝子をレバンスクロース遺伝子に挿入した染色体組み込みベクターを作製した

後、*Zb. palmae* に形質転換して相同組換えによる組み込みを行った。次に、マンノース発酵性遺伝子をエンドグルカナーゼ遺伝子に挿入した染色体組み込みベクターを作製した後、相同組換えによる染色体DNA組み込みを行った。Xt とopm を染色体DNAに組み込んだ育種 *Zb. palmae* は、一つの株で、グルコース、キシロース、およびマンノースを唯一の炭素源として利用して理論収率でエタノールを生産した。また、育種株はキシロースとマンノースの並行発酵も可能であった。

3.4 草本系バイオマスおよび大型藻類由来アラビノース発酵性賦与

バイオマス原料として草本系および非可食性の大型藻類に多く含まれるアラビノースからの 2,3-ブタンジオール生産を検討した。アラビノース発酵性を賦与するためには、細胞内に取り込んだアラビオースをリブロースに異性化後、リン酸化してリブロース5リン酸へとリン酸化し、次にキシルロース 5 リン酸に変換することでペントースリン酸化経路に導入することが出来る。そこで、大腸菌由来のアラビノースイソメラーゼ（*araA*）、リブロキナーゼ（*araB*）、リブロー-5 リン酸-4-エピメラーゼ(*araD*)、トランスケトラーゼ（*tkt*）、トランスアルドラーゼ（*talA*）の遺伝子群を導入した（図16）。これら 6 種の酵素遺伝子を導入した *Zb. palmae* 株はアラビノースを炭素源として生育し、2,3-ブタンジオールを生産した（図19）。

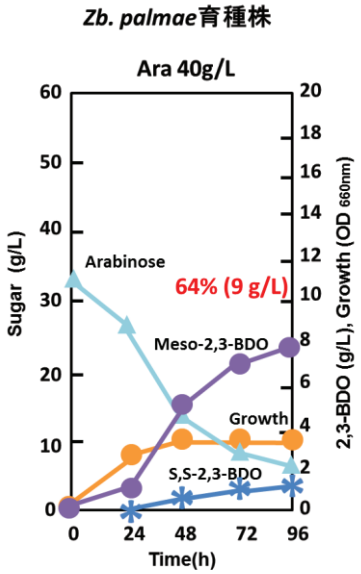


図19. アラビノースからの 2,3-BDO 発酵生産

3.5 バイオジオールの展望

微生物が生産するバイオジオール類には、本稿で紹介した 2,3-ブタンジオールとともに、1,3-プロパンジオール 1,2-プロパンジオール、1,4-ブタンジオールが化成品基材としてリグノセルロース系バイオマス資源を原料として発酵による生産が期待されている。発酵法が石油化学産業における大量製造に近づき、追い越すためには、発酵液からのバイオジオール回収工程の高効率化も重要となる。回収法としては、蒸留回収、有機溶媒回収、イオン交換樹脂への吸着回収、などが確立されているが、新しい技術としてナノ濾過膜とイオン交換処理と組み合わせた回収法も実用化に近いとされている（図20）。バイオジオールは、バイオエタノールに比較して市場価格も 1000-5000$/ton と高く設定されており、未利用セルロース系バイオマスからの一貫製造プロセスが構築されれば、発酵法でのバイジオール製造は商業レベルで稼働が可能になると期待している。

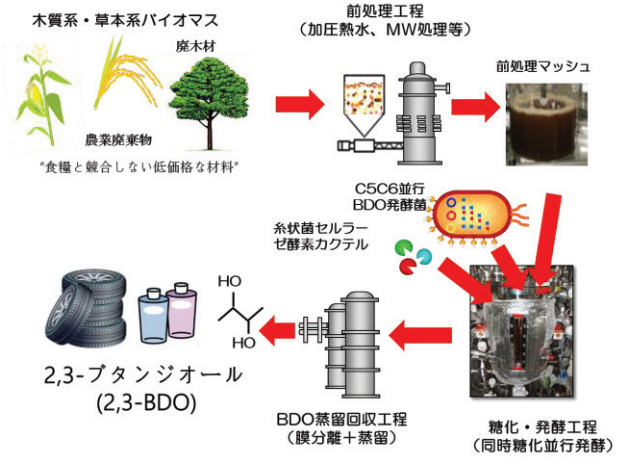


図20. 木質系・草本系バイオマスからの 2,3-BDO 製造プロセス

4. 化粧品/医薬品基材・超高分子ブランチ多糖

リグノセルロース系バイオマスを原料として発酵生産する第二世代バイオエタノールは輸送用代替燃料として、また、酢酸、アセトアルデヒド、ブタノール、エチレンなどの化成品製造の出発物質としも有用であるが、発酵原料としても注目されている。すなわち、エタノールは蒸留により高い純度での回収が容易なクリーンな液体であり、かつ水に混ざりやすいという優れた特性から、バイオプロセスを利用したコモディティーケミカルズやファインケミカルズの合成ための発酵原料としても期待されている（図21）。そこで、先に紹介した第二世

代バイオエタノールを原料として、より付加価値の高い、ファインケミカルズの製造ができないか、その利用の検討を開始した。微生物に報告されているファインケミカルズとしては、糖脂質、有機酸、バイオサーファクタント、ポルフィリン、イソプレノイド等がターゲット化合物となるが、筆者らは微生物が細胞外に生産する多糖体であるEPS（Exopolysaccharide）に着目した。EPS には抗癌作用、炎症作用、免疫賦活化作用、抗糖尿病作用、抗肥満作用、抗酸化作用等の多様な生理活性が知られている（表2）。また、EPSにはユニークなレオロジー特性が報告され、食品テクスチャーの改質とともに化粧品基材としての利用も報告されている。

以下に、バイオエタノールからの生理活性 EPS 生産について紹介する。なお、本研究は、平成7～12年度 METI 事業「アルコールを原料としたバイオケミカルズに関する研究開発」で実施した。

図21. バイオエタノールの工業的用途

表2. 多糖の生理活性機能と用途

生理活性機能：
制癌作用、抗炎症作用、免疫賦活化作用、抗糖尿病作用、抗肥満作用、抗酸化作用、抗酸化作用　等
ゲル化・レオロジーコントロール特性の利用用途：
液体の流動性改変、サスペンジョンの安定化、粒子の塊状化、物質の被覆、乳化物の作製、イオン交換担体、分子ふるい担体、油の回収、船底摩擦抵抗軽減剤
微生物発酵性多糖体の用途
キサンタンガム（*Xanthomonas campestris*：マンノース、グルコース、グルクロン酸） 食品工業（漬け物、マヨネーズ、ドレッシング、ソース、缶詰、レトルト　食品、冷凍即席 麺、塩辛）芳香剤
ジュランガム（*Pseudomonas elodea*：グルコース、グルクロン酸、ラムノース） 食品工業（ゼリー、ジャム、水羊羹）、芳香剤
ウェランガム（*Alcaligenes sp.*:グルコース、グルクロン酸、ラムノース、マンノース） 農薬、ボールペン、高流動コンクリート
プルラン（*Aureobasidium pullulans*:分岐マルトトリオース） 食品工業（豆腐、スープの素）、医薬（カプセル）

4.1 EPS生産微生物の検索

微生物は植物感染時のシグナル伝達やストレス環境下での耐性獲得のために細胞外に多糖を分泌して身にまとうことが報告されている。新規なEPSを生産する微生物を取得するために、ストレスを与えた環境下で生育する微生物のスクリーニングを行った。通常、微生物は中性付近で旺盛に生育するとされていることから、酸性条件下やアルカリ条件下で生育する微生物をスクリーニングした。次に、酸性やアルカリ性条件下で生育してきた微生物に対して、一般的な微生物が成育できない高濃度エタノールを単一の炭素源として生育する微生物を選択した。その結果、鳥取市内の土壌から純粋分離した *Pseudomonas stutzeri* BL58 株がアルカリ条件下、エタノールを炭素源とし、高粘性の多糖体を生産することを見出しました（図22）。

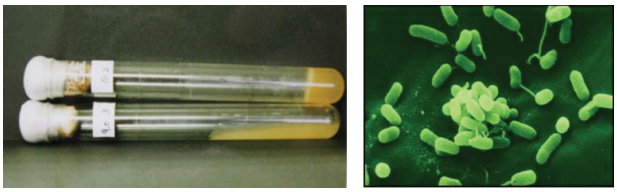


図22. EPS 生産細菌の検索

4.2 EPS発酵生産の最適化

P. stutzeri BL58 は高粘性の多糖を生産したが、生育速度と多糖生産性は低いものであった。そこで、多糖生産性の向上を目指し、培養条件の最適化を検討した。培地の初発 pH、培養温度、炭素源、窒素源を対象に菌の生育と多糖生産量の相関をとり、最終的に最適な培地と培養条件を設定した。その結果、培地の初発 pH は 10 付近という強アルカリ条件で、30℃、通気攪拌培養することで、5%エタノールから 12 g/L の多糖を細胞外に分泌生産することができた。さらに、商用化を目指して、培養のスケールアップを検討した。30-L 容全自動バイオリアクターを用いた多糖生産実験では、炭素源とするバイオエタノールを逐次添加することにより、短時間の培養で高収率の多糖を生産することに成功した（図23）。

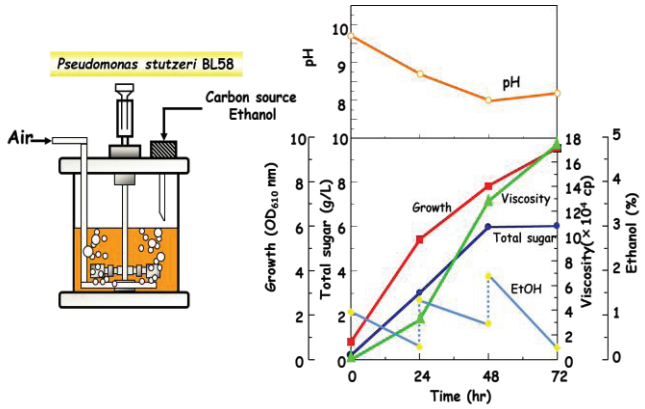


図23. バイオエタノール逐次添加による BL58 ポリマー発酵生産

さらに、*P. stutzeri* BL58 株の多糖生産に利用可能な炭素源の種類を検討した結果、リグノセルロース系バイオマス由来の難発酵性糖質であるキシロース、ガラクトース、マンノースに加え、バイオディーゼル油製造時に副産物として問題となっているグリセリンからもエタノールと同様に高収率での多糖生産が明らかになった。

4.3 EPS の精製回収

培養終了後の培養液は、非常に粘度が高く、スライムの様相を示す。一般的に、培養液中に蓄積された多糖体はアセトンやエタノールなどの有機溶媒の添加により、溶解度が変化して沈殿として回収できるが、BL58 株が生産する多糖は有機溶媒を分子内マトリックスに包括して、膨潤するために有機溶媒沈殿法が利用できない。そこで、多糖回収条件を詳細に検討し、培養液を希釈後、遠心分離により菌体を除き、その上澄みを活性炭処理、珪藻土処理後、UF膜による透析後、スプレイドライあるいは凍結乾燥法により粉末とする調製法を確立した。なお、有機溶媒を分子内マトリックスに包括する多糖の特性は、石油産業でのオイル回収添加剤として有望とされている。

4.4 EPSの物性

P. stutzeri BL58が生産する多糖精製標品（BL58ポリマーと称する）の暫定規格をまとめた。食品や化粧品の規格を満たす結果となった。そこで、食品物性改質のための増粘剤や化粧品基剤としての利用を想定し、レオロジー特性を評価した。BL58 バイオポリマーは水溶液ではユニークな物性を示し、0.5％溶液までは高粘調なゾルを形成し、1%以上ではエラスティクなゲルを形成した。水溶液のゲル特性の温度による影響として、40℃以下で高粘調なゲルを形成し、40℃以上では粘性は低下した。一方、pH 変化ではむしろアルカリ側で高い粘性を示し、ボレート緩衝液中では完全なゲルを形成することが明らかになった。ユニークな BL58 ポリマーの物性は、レオロジーコントロール剤として化粧品の基剤としての開発が期待されている。

4.5 EPS の糖鎖構造解析

BL58 ポリマーユニークなレオロジー特性は、その糖鎖構造に起因する。そこで、糖鎖構造解析を行った。先ず、得られた培養液から BL58 ポリマーを精製し、HPLC 分析に供した結果、その溶出パターンから分子量がおよそ 1,800kDa の多糖体であることを確認した。次に、構成糖を、精製ポリマーの TFA による酸加水分解と加水分解物のアルジトールアセテート誘導体の GC-MS および NMR 分析により同定を検討した。糖鎖の結合様式は、精製ポリマーのメチル化誘導体を加水分解後、アルジトールアセテート化した誘導体のGC－MS分析により決定した（図24）。また、解析中に、構成糖として未知の糖質の存在が認められたことから、精製ポリマーの部分加水分解物から未知糖質を分取後、NMR、CI－MS等により構造を決定した。以上の解析結果から、BL58ポリマーの構成糖とその糖鎖結合を決定した。すなわち、構成糖は、4－グルコース－1にエステル結合を、4－マンノース－1にエステル結合を、さらに3位にエステル結合をもつグルコース、そして、未知糖質は 3-O-カルボキシエチルラムノース

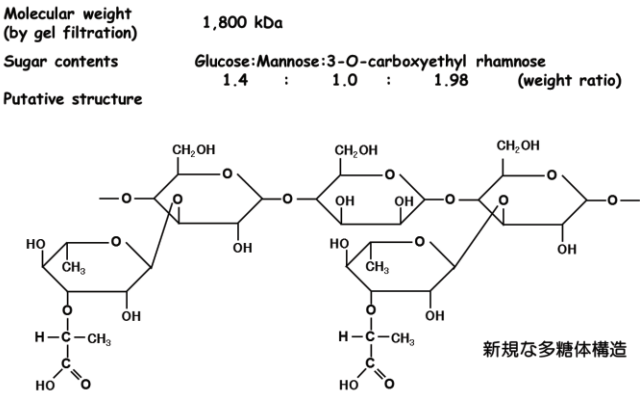


図24. BL58 ポリマーの糖鎖構造

であると結論した。構成糖比は、グルコース:マンノース:3－O－カルボキシエチルラムノースが重量比、1.4:1.0:1.98で、グルコースとマンノースが 1,4 結合したものを主鎖とし、枝分かれ構造としてグルコースの

3位の位置に3-O-カルボキシエチルラムノースがエステル結合した構造を推定した。

糖鎖構造決定から、BL58 ポリマーが新規の超高分子ブランチ多糖であることが明らかになった。

4.6 EPSの安全性試験

本多糖体の糖鎖構造として特徴的なことはグルコース、マンノースなどの中性糖に枝分かれ構造として3－O－カルボキシエチルラムノースが結合していることであり、この高分子ブランチ多糖の構造がユニークな物性とともに、新たな生理活性の発現が期待できる。そこで、化粧品基剤としての用途を目指し、基準とされる安全性試験を実施した。

① 急性毒性試験（マウス単回投与毒性試験）

BL58 ポリマーの急性蓄性値 LD50 は 1000mg／kg 以上であり、急性毒性は認められなかった

② ウサギ眼刺激性試験

10 週令の日本白色種、雄ウサギ 3 羽を使用し、右目の結膜嚢内に検体 0. 1ml を点眼した. 観察期間を通じて全例に炎症など変化は認められず Draize の基準による点数は 0、DraizeKayandCalanda の眼粘膜刺激性の分類では Non−irritating と判定された。

③ ウサギ皮膚 1 次刺激性試験

10 週令の日本白色種、雄ウサギ 3 羽を使用し、背部皮膚に検体を閉塞貼付し観察した. 全観察期間を通じて全例に変化は認められなかった. 全例の皮膚 1 次刺激性評点は 0 であり刺激性無しと判定された。

④ ヒト皮膚刺激性試験

パネル健常成人 45 名について上腕内側部にフインチヤンバーを貼付、皮膚刺激の程度を観察した. 皮膚 1 次刺激性に関する安全性に問題はないと判定された。

⑤ 小核試験（染色体異常誘発作用試験）

ICR 雄性マウス（6 週令、SPF）を 1 群 5 匹として、強制経口投与で行った。BL58 投与区は小核保有の多染性赤血球の有意な増加を示さなかった。従って BL58 は染色体異常誘発を起こさないと判定された。

⑥ Rec アッセイ（DNA 修復試験）

Bacillus subtilis H17Rec^{+}及び M45Rec^{-}を用いた. *Bacillus subtilis* H17Rec 及び M45Rec−とも生育阻止帯は認められなかったことから DNA 損傷作用はないと判定された.

⑦ 環境汚染度試験（ヒメダカによる急性奉性試験）

JIS K OlO2:「工場排水試験方法」の魚類による急性奉性試験の項に準拠し、ヒメダカによる 48hr 急性奉性試験を実施した。検体の 48hrLC50（Medianlethalconcentration）は 100mg／L 以上であり死亡率 0 で毒性は見られなかった.

4.7 EPS の生理学的評価試験

医薬等への利用を想定して、BL58 ポリマーの基本的な生理活性試験を検討した。

① 抗菌性、抗ウイルス性試験

大腸菌 K12 株の増殖をバイオポリマー500 μg／ml 以上で顕著に低下した. ヒトインフルエンザウイルス（HINl 型、H3N2 型）を MDCK 培養細胞に感染後、感染阻害を評価した結果、バイオポリマー（15. 6〜2000／μg／ml）での感染阻害活性を示した。

② 皮膚感作性抑制試験

モルモット（雌、5 匹／群）の皮膚に 2%DNCB と BL58（0.1%ほたは 0.5%）のエマルジョンを塗布して皮膚感作反応を惹起させた。BL−58 は皮膚感作性に頃著な抑制を示さないことが示唆された。

③ 抗原性試験

モルモットを使用した能動的全身性アナフイラキシー（ASA）反応により検討した. 陽性対照の EA（卵白アルブミン）に比べて症状発現時間の遅延と少数の症状発現を示したことにより、BL58 は弱い抗原性を持つと考えられた。

④ ヒト癌細胞増殖抑制試験

バイオポリマーの生理活性について調査するために、各種腫瘍細胞をに対する細胞増殖抑制作用について検討を行った。白血病細胞並びに肝臓系細胞を利用してバイオポリマーの細胞増殖作用をMTT試験により観察した。HL60（急性前骨髄性白血病細胞），U−937（単球性白血病細胞），HepG2（肝癌細胞），MRC5（正常肺細胞）の四種類を使用した。HL60（急性前骨髄性白血病細胞）に対しては、バイオポリマー50mg%添加72時間培養のHL60細胞はほとんどが生存し、増殖性を保持していた。一方、U937（単球性白血病細胞）に対しては、HL60とは全く様相が異なり、50mg%ポリマーの添加で細胞の増殖は止まり、逆に初発細胞数より生存細胞数が減少した。バイオポリマー添加前後での細胞の様子は顕著で、添加後では細胞が破壊され、生存している細胞が減少しているのが明確に見られた。HL60とU937は共に白血病細胞であるが、バイオポリマーに対する感受性が明らかに異なっており、分化の方向あるいは増殖に対する情報伝達への作用機序については今後に残された課題である。HepG2（肝ガン細胞）に対しては、50mg%のポリマー添加では、無添加に比べて65%の細胞数となり、初発細胞数に近い数に相当した。また、ポリマー添加培養後の細胞はシャーレにしっかりと接着し、細胞死は認められず、HepG2細胞の成長抑制活性が示された。

⑤ 抗炎症試験

興味深い抗炎症活性が観察された。マウスに、肺炎を誘発させる薬剤を投与して、肺炎を誘発させる系に、バイオポリマーを同時に投与して、肺の炎症を抑えるかを、解剖して観察した。その結果、薬剤を投与したマウスの肺は重篤な炎症を起こし呼吸困難となり死亡するのに対し、バイオポリマー投与では、0．4mg／kgの投与で完全に炎症を抑える事が明らかになった（図25）。抗炎症効果のメカニズム解明が課題である。

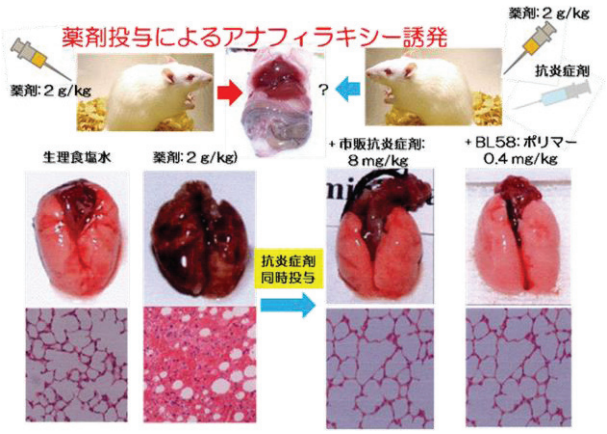


図25．BL58 ポリマーの抗炎症作用試験

4.8 超高分子ブランチ多糖の展望

鳥取市内の土壌から分離された微生物、*P. stutzeri* BL58 株が、第二世代バイオエタノールやバイオディーゼル油廃棄物であるグリセリンを原料として細胞外に著量のバイオポリマー、BL58 バイオポリマーを生産することを見出し、そのユニークな物性を利用した用途開発を検討した。用途開発のためには、BL58 ポリマーを安価に、且つ安定して供給することが重要であり、そのための最適な培養条件と調製法を検討し、大量調製のための調製法を確立するに至った。一方、BL58 バイオポリマーの用途先を食品、化粧品、あるいは医薬に求める場合には、BL58 バイオポリマーの安全性評価は大変重要な課題となる。そのためには、精製標品を対象とした安全性試験とともに、物質としての構成成分とその構造を知り、得られる知見から BL58 ポリマーの安全性を評価することも不可欠である。この様な観点から、BL58 ポリマーの未知の構成糖質を様々な機器分析により分析して、3-O-carboxyethyl rhamnose と推定して、基本糖鎖構造を明らかにすることができた。また、化粧品や食品を対象とした基本的な安全性試験では、充分な安全性を示すことができた。BL58 ポリマーの生物活性効果の試験研究を行うぃ、多様な生理活性発現を明らかにすることができた。特に、炎症性細胞との関わりを検討し、BL58 バイオポリマーが血液中の好中球を活性化しないが、マクロファージを誘引することが観察されている。これらの生物活性試験結果は、BL58 ポリマーが消炎剤や抗ショック剤として大変有望であることを示唆しており、医療分野においてもその用途か期待されている。

5．おわりに

産業革命以降の化石資源の大量消費は、今日の経済基盤を構築したが、反面、地球規模での温暖化を加速させるに至った。この様な社会基盤の変革を可能にする一つのテクノロジーが再生可能なバイオマス資源を原料として生物反応を活用することで従来の石油由来の製品を製造する技術、すなわちバイオリファイナリープロセスである。しかし、従来のオイルリファイナリーからバイオリファイナリーへの技術転換の実現には課題も多く、その普及を妨げているのが製造コスト問題である。原油価格が高く設定されていた数年前までは、バイオマスを原料としたバイオアルコール類の製造コストはその技術革新により石油と競争できるまでにコスト削減されていた。しかし、シェールガスやシェールオイルの増産に加え、OPEC の原油増産が引き金となり、現在の原油価格は低迷しており、バイオマス由来燃料の製造コストは大変厳しい状況にある。この様な状況を打破するために、製造対象を燃料などのコモディティーケミカルから、より高付加価値の香料、化粧品基材、医薬品原料などへと製造転換するための技術開発が国内外で盛んになっている。筆者らも、輸送用代替燃料である第二世代バイオエタノールから始まり、香料・化成品基材としてのバイオジオール、さらには医薬品への利用が期待できる超高分子ブランチ多糖など、コモディティーケミカルからファインケミカルへとターゲットを拡大し、これら化合物を未利用リグノセルロース系バイオマスから製造できる微生物細胞工場（セルファクトリー）を開発してきた。今後は、世界中のバイオテクノロジー研究者がさらなる技術革新を達成して製造コスト削減を可能にすることでバイオリファイナリー産業が成長・拡大するとともに、製品製造工程で排出される GHG が大幅に削減されることで地球温暖化防止と持続的社会構築を実現できるものと確信している。

参考文献

[1] Yanase, H. *et al.*, *Appl Microbiol Biotechnol.*, 94, 1667 (2012)

[2] Yanase, H. *et al.*, *Appl Environ Microbio.l,* 73, 2592 (2007)

[3] Yanase, H. *et al.*, *Biotechnol Lett.,* 27, 259 (2005).

[4] Yanase, H. *et al.*, *J Biotechnol.,* 118, 35 (2005).

[5] Kojima, M. *et al.*, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 96, 1093 (2012)

[6] Kojima, M. *et al.*, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 97, 5137 (2013)

[7] Hasegawa, N. et al., IEICE Transactions on Electronics E97.C, 986 (2014)

[8] 三谷友彦、渡辺隆司、マイクロ波プロセス技術Ⅱ、シーエムシー出版、262-272 (2013).

[9] Watanabe, T. and T. Mitani, The Role of Green Chemistry in Biomass Processing and Conversion, John Wiley & Sons, 281-291 (2012).

[10] 渡辺隆司、最新マイクロ波エネルギーと応用技術、産業技術サービスセンター、701-710 (2014).

[11] Balat, M., *Energy Conversion and Management,* 52, 858 (2011)

[12] Humbird, D. *et al.*, Process design and economics for biochemical conversion of lignocellulosic biomass to ethanol dilute-acid pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover, Technical Report, NREL/TP-5100-47764 (http://www.osti.gov/bridge) (2011)

[13] Bisaria,V.S.(ed): Bioprocessing of Renewable Resourves to Commodity Bioproducts, pp.169-200, WILEY, (2015)

（受理　平成28年10月27日）

鳥取砂丘海岸の保全とサンドリサイクルについて

松原　雄平
鳥取大学工学部　社会システム土木系学科

Evaluation of the Beach Nourishment Work in Tottori Sand Dune Coast

Yuhei MATSUBARA
Department of Social System and Civil Engineering, Faculty of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: matubara@cv.tottori-u.ac.jp

Abstract: As a beach protection work against the coastal erosion the artificial sand-fill project has been exceeded in the coastal zone in Tottori Prefecture. The project has been continued as a pilot work of Tottori prefecture as long as more than 10 years.　However the effects of the project are not evaluated quantitatively. In this article the nourished sand movement is examined from the field data. Finally the beach nourishment work is found to be effective for the shoreline protection in Tottori Sand dune Coast.
Key Words: Sediment transport, Beach nourishment, Artificial sand fill, Computer simulation, Field measurements,

１．はじめに

本学の大学院を修了し、工学部土木工学科の助手として野田英明先生の下で海岸工学の研究を始めたのが昭和 53 年４月である。浅学非才の学徒であった筆者を助手として採用された野田教授には、研究者としての心構えや覚悟を御教示いただいた。

何かに秀でた能力を持ち合わせているわけでもない若き学徒の研究者への資質、どの分野の研究で育てるべきかなど様々な心労をおかけしていたのであろうと、大学での 38 年間を過ごし、同じ立場にある今になって、当時の野田先生教授の心境を推察申し上げる次第である。

これまで海岸ないし沿岸で生起する現象に関する諸問題を扱ってきたが、この間、研究室の併設等で、道上正規先生、鈴木幸一先生や岡田憲夫先生などに師事させて頂いた。また、研究室に配属された多くの卒業生や、共同研究等を通して連携頂いた行政や企業の方々との出会いから様々な知見と知恵を学んだ。筆者が何らかの社会的貢献をしたというならば、それらは多くの先生方、卒業生そして行政ならびに企業の方々との出会いと連携から創出されたものである。

以下では、海岸工学の研究として筆者が様々な形で関わってきた鳥取砂丘海岸の保全に関する研究の中から、サンドリサイクル事業の一端について紹介したい。

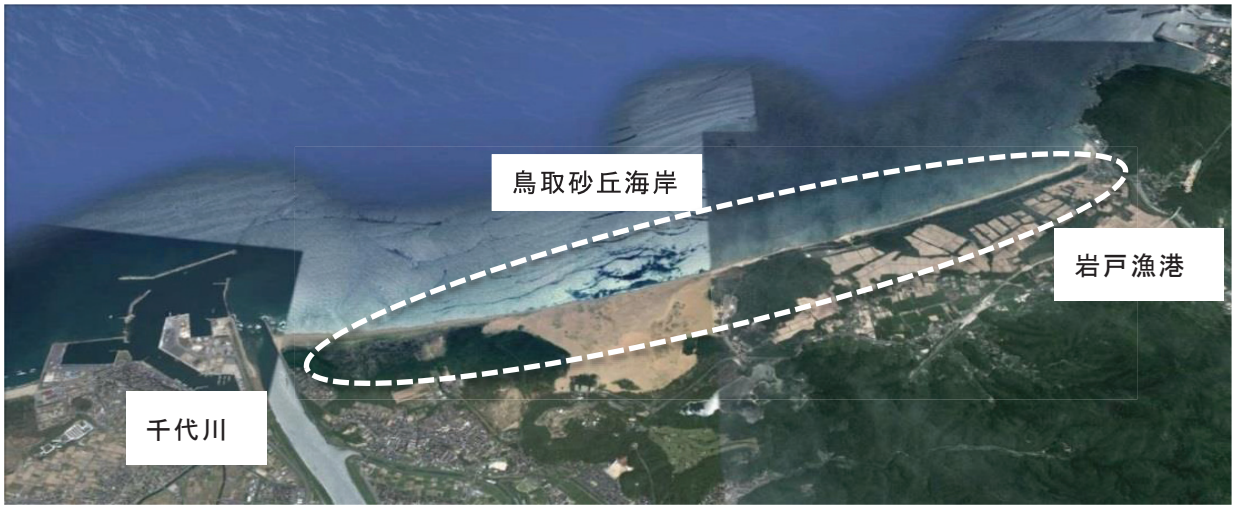


図１　鳥取砂丘海岸概要図（Google　Earth より）

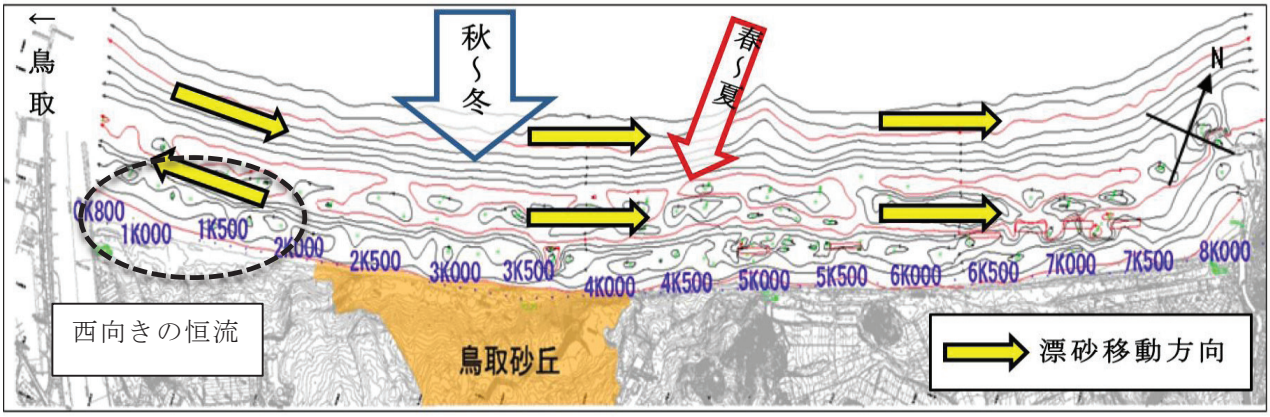


図２　卓越波向と漂砂移動方向の模式図（砂丘前面において移動方向が異なることに注意）

２．砂丘海岸の保全

2.1　鳥取砂丘海岸の概要

鳥取砂丘海岸は、一級河川千代川を介して、中国山地から供給された土砂によって形成された鳥取県東部に位置する東西約 7km の砂浜海岸である．図 1 に示すように、西側には千代川河口および鳥取港が,東端には岩戸漁港と塩見川が位置し,千代川河口から岩戸漁港までの一帯の海岸が鳥取砂丘海岸である.国と鳥取県は､昭和 40 年代から,千代川の治水目的で千代川河口の付け替え工事ならびに鳥取港の整備事業を進め、港湾．漁港の機能強化に伴う防波堤,導流堤の建設などの施設整備が行われた。施設整備の効果はあったものの、河口域ならびに砂丘海岸での土砂移動のメカニズムが変化、移動量のバランスが崩れた。結果として海岸前面で侵食が進み、逆に港湾・漁港域では堆砂問題が発生している.

このため鳥取県内の海岸侵食の抜本的対策として、鳥取県は「鳥取沿岸の総合的な土砂管理ガイドライン」を策定し，平成 17 年度から鳥取港および塩見川に堆積した土砂を鳥取砂丘海岸の沖合および陸上に投入するサンドリサイクルを

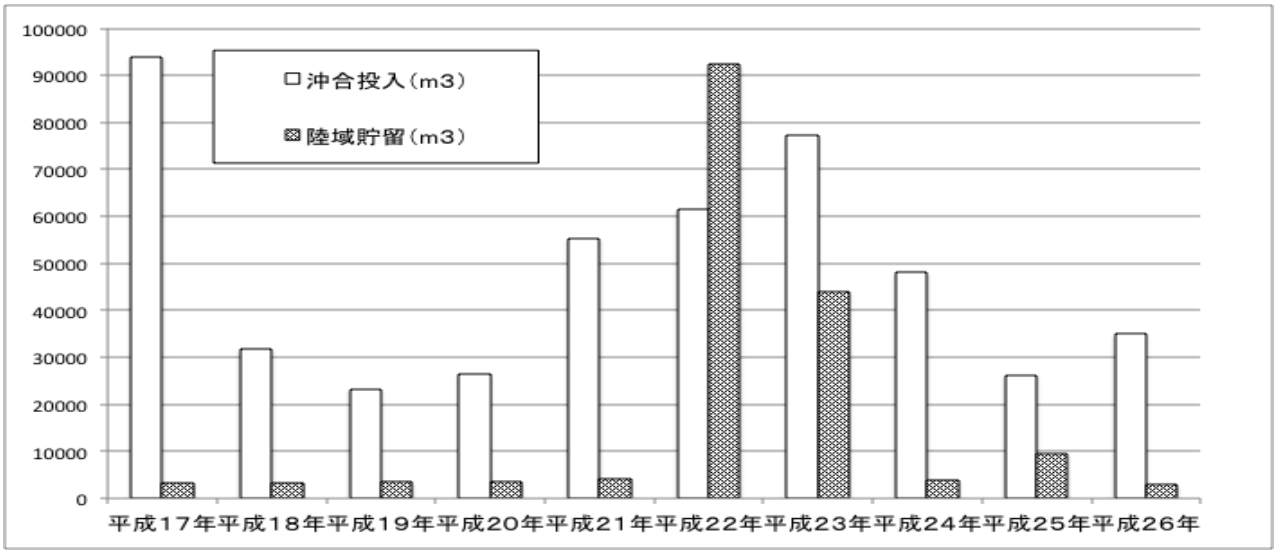


図３　　サンドリサイクルでの年度別土砂投入量

実施している（鳥取県(2005,2011)）．以下では、鳥取砂丘海岸に来襲する波浪特性を概観し、実施されているサンドリサイクル事業の効果について述べる。

2.2　鳥取砂丘海岸への波浪と砂移動

近年、爆弾低気圧等の来襲で波浪災害が報告されているが、鳥取県東部では鳥取港沖合において長期間の波浪観測を実施している。平成 16～27 年までの観測データを季節的にみると，春季から夏季にかけては，東あるいは北方向からの波浪が卓越し，波高 2m を超過する波はほとんどない．一方，秋季から冬季にかけては，北北西方向からの波浪が卓越し波高 3～4m の高波浪が頻来する．この波浪特性の季節変化によって、海浜地形も季節的な変化を示し、特に秋季から冬季の高波浪によって海底地形は大きく変化する．

図 2 は、鳥取砂丘海岸に来襲する波浪の模式図ならびに浅海部から沖合域までの水深帯での砂移動の方向を示したものである。前述のように、鳥取砂丘海岸の土砂は千代川から供給されることから，従来の砂丘海岸での平均的な砂移動は，岩戸漁港に向かう東向きの土砂移動であった．現在も沖合域での砂移動は年間を通して東向きの安定した流れ（恒流）が卓越する（宇田ら（1986））。しかし 鳥取港の東側から鳥取砂丘前面付近の浅海部では、河口部に設置された導流堤の影響を受け西向きの恒流が生じている．即ち，鳥取砂丘前面で砂の移動方向が東西に分かれ、結局、鳥取砂丘前面から土砂が東西に輸送される仕組みになっている。必然的に，鳥取砂丘に繋がる前面海岸の侵食が進むことになり、これを防ぐためにサンドリサイクルによる海岸保全が行われている．

2.3　サンドリサイクルの概要

サンドリサイクルは、総合的な土砂管理として平成 17 年度から始まり，鳥取港および塩見川に堆積した土砂を，鳥取砂丘海岸への沖合投入および陸上養浜する方式で実施されている(安本ら、（2006a,b）)．これまでに行われた土砂投入量を図 **3** に示す．

同図からわかるように、平成 17 年度から平成 26 年度までに延べ約 66 万㎥もの土砂が投入されており，特に、平成 22 年度から 23 年度にかけては，通常の土砂投入に加えて，国道 9 号駟馳山バイパスの工事掘削土砂約 8 万㎥の大量の土砂が陸上養浜されている．陸上養浜は、海岸線から浜崖の間に砂を投入貯留しておき、波の遡上によって養浜砂が海域に自然に投入されていくことを期待する土砂投入法である。沖合投入よりも海岸への土砂堆積の効果があるとされている。

2.4　サンドリサイクルの効果検証

図 4 は，3400m，4300m の 2 地点において、平成 16 年 9 月の海岸線を基準として、各年度毎に計測した水際線（以下、汀線）の岸・沖方向への変化量を示したものである。平成 16 年の海岸線から汀線が侵食され後退すれば、汀線変動距離は負となり，逆に堆積傾向であれば正値となる。

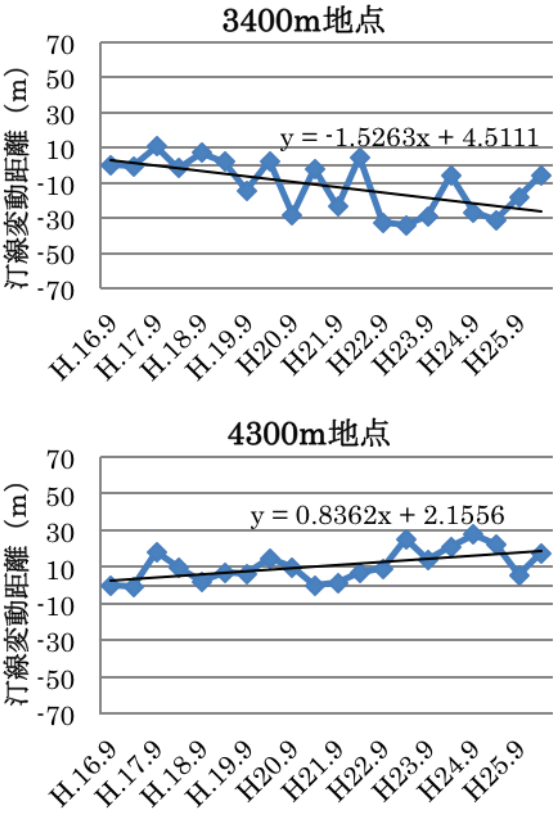


図 4 平成 16 年基準の汀線経年変化

併せて線形近似曲線により、当該地点の海岸の侵食・堆積傾向の経年変化を見ることができる。なお、3400m 地点は、前出の図 2 において 3k400、また 4300m 地点は、沖合の土砂投入付近であり、図 2 では、4K300 と記述された汀線位置である。

これらの 2 葉の図から、鳥取砂丘前面である 3400m 地点で汀線変動量は前進後退を繰り返しな

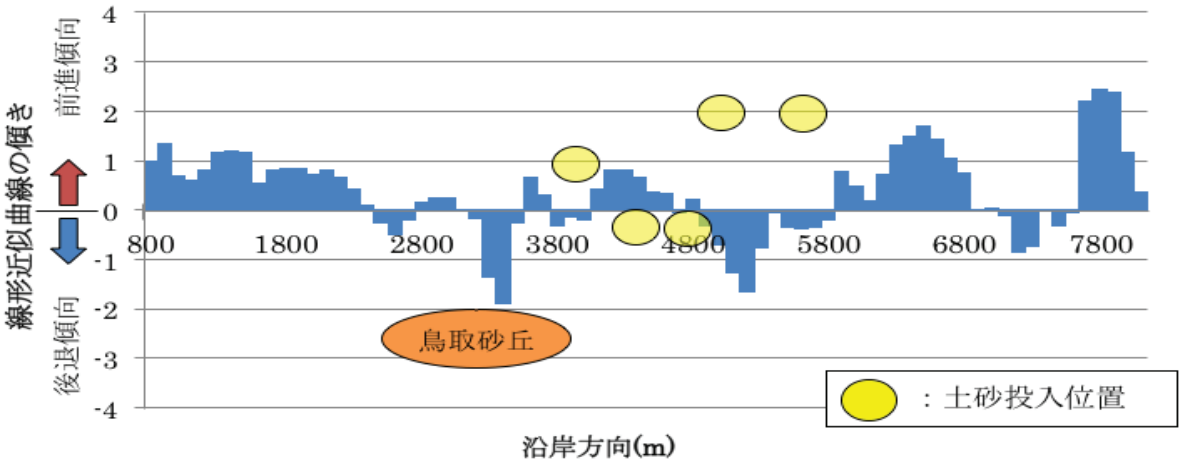


図５　平成 16 年 9 月を基準とした場合の平成 26 年 2 月時点までの汀線変化傾向

から、一定して負値を示し、かつ経年的にその傾向が顕著になっていることがわかる。

すなわち 3400m 近傍では海岸の侵食が進みつつあることを示している。一方、サンドリサイクルで土砂投入がなされている 4300m 地点では、汀線変動量は一定して正値をとり、海浜は前進傾向が進行しつつあることがわかる。この傾向は、近似直線で確認でき、その勾配で侵食・堆積の進行程度も把握できる。

図 5 は、鳥取砂丘海岸全体の汀線変動の前進・後退の状況を近似曲線の勾配で示したものである。縦軸のゼロは汀線変動がないことを示しており、図中の丸印は沖合ならびに陸上域での土砂養浜個所を示している。この図から、横軸の沿岸方向距離 800～2800 付近では汀線変動の勾配が正となっており海岸は堆積傾向にあることがわかる。これは前出の図 1 でも確認されることである。しかし、汀線距離 3000 付近ならびに 4600～5800 付近では汀線変動の傾きが負となり、侵食傾向となっている。特に、鳥取砂丘前面の汀線変動から、侵食傾向となっており顕著である。

また図３で示したように平成 22 年、23 年度は集中的に大量の土砂の沖合養浜および陸上養浜が行われている。短期・大量の養浜の汀線変動への

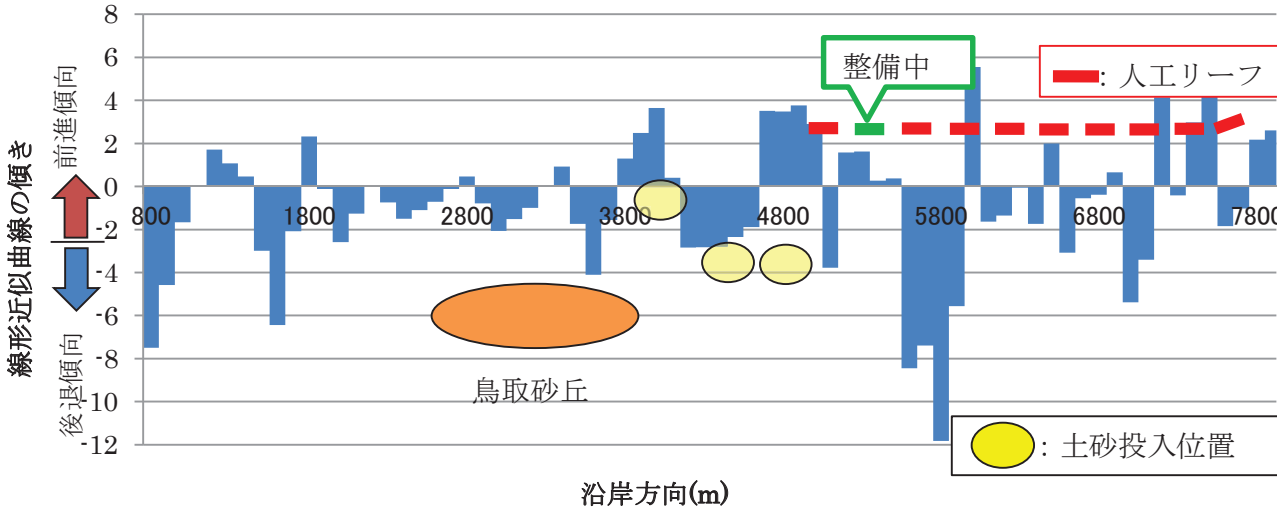


図６　平成 24 年 3 月を基準とした場合の平成 26 年 4 月時点までの汀線変動傾向

影響については注目する必要があると考えられることから、平成 24 年 3 月を基準とした平成 26 年 4 月時点の汀線経年変化を**図 6** に示す．同図中の 4000m，5000m，6000～8100m付近では，線形近似曲線の傾きが正の値，つまり，海岸線の前進傾向が見られる．また，平成 16 年 9 月を基準とした**図 5** と比較すると， 800～2500m，5600～5900m は後退傾向が顕著になっている．特に，5800m地点の後退が大きく現れているが、4800 より岩戸漁港側は、人工リーフ設置区間である。構造物の影響を明瞭にうけて、汀線の前進後退が発生する領域である。例えば、5300～5500m前面の人工リーフは現在も整備中であるため，侵食がすすんでいるが、整備完了後は堆積傾向に移るものと思われる。このことから、今後、同エリアの汀線変動について観測を続ける必要がある．

3. まとめ

鳥取砂丘海岸では、海岸侵食対策として平成 17 年度からサンドリサイクル事業を実施しており

延べ 66 万㎥の土砂が投入されてきた。特に，平成 22 年，平成 23 年に限っては多量の陸上および沖合養浜が行われたが、一時的には海浜の前進に貢献したと言える。しかし、大量の土砂投入が維持的に実施されなければ、全体的な汀線後退傾向を押しとどめ、明確な養浜効果を確認するには至らないであろう。また、仮に養浜が十分に行われ海浜が回復されても，来襲波浪が厳烈であれば、当然侵食されるのが自然である。豪州のゴールドコーストはまさにその例であって、大量の土砂投入で形成された砂丘海岸が連続する高波で消失している。同海岸では、再び土砂投入が再開されて砂浜の回復が期待されている。このように、来襲波の波浪特性と侵食との関係については、今後，さらに検討を重ねる必要があり、また投入土砂の量と投入時期あるいは場所についても検討する必要があろう。

この原稿をまとめるにあたり，鳥取大学工学研究科海岸工学研究室の黒岩正光教授ならびに鳥取大学男女共同参画センターの渋谷蓉子特命准教授には貴重なご意見を頂いた。また、本文中の資料は井出正志（2012）、畑中英史（2013）および太田啓吾（2014）の三氏の卒業論文の資料を参照させていただいた。また、鳥取県県土整備部河川課ならびに東部総合事務所の委員会資料を参照させて頂いた。ここに、記して深甚の謝意を表する。
なお、この小論の内容の多くは、鳥取県生活環境部の砂丘再生会議保全再生部会の報告書からも引用していることを付記する。

参考文献

宇田高明・岡村真・西村洋人（1986）：鳥取海岸の沖合部における地形変化、第 33 回海岸工学論文集、pp. 282-286
鳥取県（2005）：鳥取沿岸の総合的な土砂管理ガイドライン
鳥取県(2011)：平成 23 年度鳥取県東部土砂管理協議会資料
安本善征・宇田高明・松原雄平・佐藤慎司(2006a)：鳥取沿岸の総合的な土砂管理ガイドラインの策定と実施、海洋開発論文集，第 22 巻、pp415-420.
安本善征・宇田高明・松原雄平(2006b)：鳥取沿岸の侵食実態と総合的な土砂管理の検討、千代川右岸流砂系の例、海岸工学論文集，第 53 巻、pp/415-420.

（受理　平成 28 年 11 月 22 日）

次世代高性能不揮発性メモリ ReRAM の研究開発

木下　健太郎
鳥取大学工学部電気電子工学科

Template of Reports of the Faculty of Engineering Tottori University

Kentaro Kinoshita
Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: kinoshita@ele.tottori-u.ac.jp

Abstract: 筆者は，半導体メモリ素子の微細化・高性能化の限界の壁を打ち破り，半導体業界に漂う停滞感を払拭したいという強い思いを持って，次世代メモリの研究開発に様々な角度から取り組んできた．次世代メモリとして期待される抵抗変化型メモリ ReRAM の高性能化及び抵抗変化機構の解明から，新規高速抵抗スイッチング現象の発見，固液融合型高性能メモリの提案といった，次々世代を担うメモリ素子の提案まで，幅広く，しかし，一貫してメモリ素子にこだわって研究を継続して来た．本総説は，筆者が鳥取大学工学研究科にて行ってきたこれらの研究成果について簡単に整理したものである．

Key Words: Resistive random access memory, Metal oxides, High performance, Mechanism elucidation, Transparent, Flexible

１．はじめに

ReRAM は電極/金属酸化物/電極のサンドウィッチ構造をとり，上下電極間に電圧を印加することで生じる可逆的かつ巨大な抵抗の変化を利用したメモリである．低抵抗と高抵抗をそれぞれ"0"と"1"に対応させることでメモリ素子として機能し，高密度化に有利である点，電源を OFF にしても記憶データを保持する点，高抵抗から低抵抗或いは低抵抗から高抵抗への抵抗スイッチングに要する速度がマイクロ秒からナノ秒オーダーと高速(Flash ではデータの書き換えに 1 ミリ秒程度の時間を要する)である点など優れた特徴を持ち，微細化の限界に直面した Flash の次世代メモリとして研究開発が進められて来た．簡易構造故の高密度化への優位性に加え，抵抗の変化が 5, 6 桁に及ぶケースもあることから，低抵抗と高抵抗の間の抵抗も利用することで，"0", "1", "2", ･･･と多値記憶が可能になり，メモリセルの実効的な高密度化が期待されている．

一般的に，ReRAM は高抵抗から低抵抗へのスイッチング(セット)と低抵抗から高抵抗へのスイッチング(リセット)に極性の異なるバイアス電圧の印加を必要とする「バイポーラ型」(図 1(a))と同一極性の電圧印加でセット，リセットを繰り返すことが可能な「ユニポーラ型」(図 1(b))，印加電圧の極性とは無関係にセット，リセットの両方が可能な「ノンポーラ型」に分類される．セット時の急激な電流増加により，素子が破壊されるのを防ぐため，電流リミッターによって電流を制限する必要がある．図 1(a)と(b)において，セット後の電流が一定値に保たれているのは，このためである．ReRAM の抵抗スイッチング機構の詳細は明らかにされていないが，その起源は大きく 2 つに分類される．金属酸化物層内の酸素イオン或いは酸素欠損が拡散することで生じる局所的な酸化/還元反応により抵抗スイッチングが引き起こされる「陰イオン拡散型」と，電極を構成する金属原子(金属イオン)が金属酸化物層内を拡散し，上下電極を繋ぐ金属ブリッジが形成/断裂されることで抵抗スイッチングが生じる「陽イオン拡散型」である．陽イオン拡散型の ReRAM は Conducting-Bridge Random Access Memory (CB-RAM)と呼ばれ，陰イオン拡散型と区別されることが多い．陰イオン拡散型，陽イオン拡散型共に金属酸化物層として多種多様な材料が用いられるが，前者では電極材料が比較的自由に選択されるのに対し，後者では一方の電極に電気化学的に活性な (標準電極電位が低い)金属を，対極に不活性な (標準電極電位が高い)金属が使用される．これにより，活性金属のみが電気化学反応によっ

て金属酸化物層中に溶出し，安定した抵抗スイッチングが実現される．一方，単に ReRAM と呼ばれる場合には前者の，且つ陰イオンが金属酸化物層を構成する酸素イオンである素子を意味する．

筆者らは ReRAM と CBRAM の両者についてその高性能化とスイッチング機構の理解に貢献して来たのと同時に，新原理に基づく高性能抵抗変化メモリを実現している．以降，これらの研究成果について簡単に紹介する．

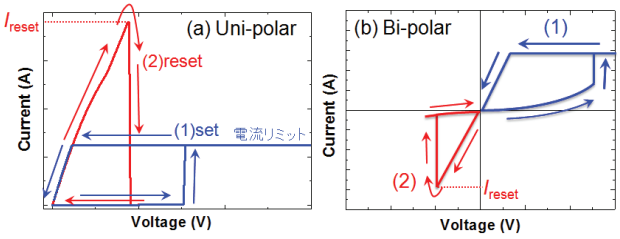


図 1 (a)ユニポーラ型と(b)バイポーラ型 ReRAM の電流-電圧特性.

2．研究成果の紹介

2.1 原子間力顕微鏡(AFM)書き込み技術の確立

ReRAM のメモリ効果は，前述のサンドウィッチ構造に電圧を印加し，フォーミングと呼ばれる絶縁破壊に類似の現象を生じさせることによって発現する．フォーミングによって，TMO 膜中にフィラメント(FL)と呼ばれる伝導パスが形成され，この内部でメモリ効果が生じる．FL の直径が 10 nm 以下と細く，分析が困難であることから FL の物性解明は長く滞っていた．そこで，我々は AFM の探針で NiO 膜表面へ電圧を直接印加しながら走査することで，探針の直下に FL を連続的に形成させ，FL で満たされた領域を形成する手法を考案した．その結果，任意面積，任意形状の領域に高抵抗状態と低抵抗状態を自在に書き込むことが可能となった．図 2(a)と 2(b)に低抵抗(a, c)と高抵抗(b, d)を交互に書き込むことで得られた Conducting AFM 電流像と，走査電子顕微鏡(SEM)により撮影した同領域の 2 次電子像をそれぞれ示す．ここで，図 2(a)の明るい領域と暗い領域はそれぞれ低抵抗と高抵抗を意味する．低抵抗領域と高抵抗領域の低抵抗領域に跨る領域 (図 2(a)中の黄色実線)の SEM 像には形状変化が確認されず，NiO の抵抗スイッチング現象に高い繰り返し耐性が期待されることが示された．また，図 2(b)の明るいコントラストと暗いコントラストの領域が，それぞれ低抵抗と高抵抗領域に対応していることが分かる．2 次電子像のコントラストよりキャリア型を判断する EL-Gomati ら[1]やその他[2]の報告に基づけば，低抵抗領域のキャリア型は p 型，高抵抗領域は i 或いは n 型になっていることが示唆される．故に，抵抗スイッチング現象は，強電界による酸素イオンの移動に伴う電界ドーピングによって生じることが示唆された．この結果は，AFM チップにより金属酸化物薄膜に局所的に電圧を印加することで，高抵抗領域と低抵抗領域を自由に作り分け，フォトリソグラフィーの技術的制限を受けない，超微細回路の作製が可能であることを意味しており，特許権も取得している[3]．図 3 に本手法により描かれた鳥取大学のキャラクター「とりりん」の画像を示す．図 2(a)と同様に，明るい領域と暗い領域はそれぞれ低抵抗と高抵抗がそれぞれ書き込まれた領域である．現在，本手法は抵抗変化領域の物性を評価するための一般的な手法となっており，本手法の原理について報告した Applied Physics Letters 掲載の論文 [4]は引用数 148 件に上る．

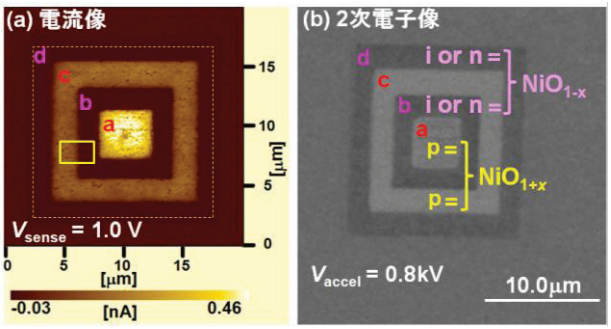


図 2 AFM 書き込み技術により形成された低抵抗領(a, b)域及び高抵抗領域 (c, d)の(a) 電流像．明るいほど抵抗が低いことを意味する．同領域の(b) 2 次電子像.

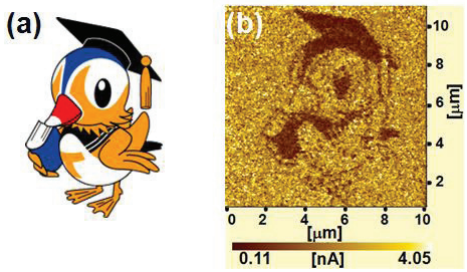


図 3 (a) 鳥取大学のキャラクター「とりりん」と(b)AFM 書き込み技術により描かれた「とりりん」.

2.2 交換可能な下部電極を有する超微細抵抗変化メモリテストセルを用いた酸素貯蔵庫の探索

AFM カンチレバー先端に形成された Pt/NiO 構

造を外部 Pt 電極に接触させることで, Pt/NiO/Pt 構造の超微細 ReRAM を作製する手法を提案した[5]. これによりフォトリソグラフィーやエッチング無しで直径 10nm の ReRAM セルを容易に作製することが可能となった. 本手法は NiO/Pt 構造に Pt コートカンチレバーを接触させて Pt/NiO/Pt 構造を構成する従来法[4]に比べ, ドリフト耐性が遙かに高く, NiO 膜中に形成されたフィラメントを長時間に亘って繰り返し観測することも可能である. これにより, 超微細 ReRAM では抵抗のばらつきが深刻化することが確認された.

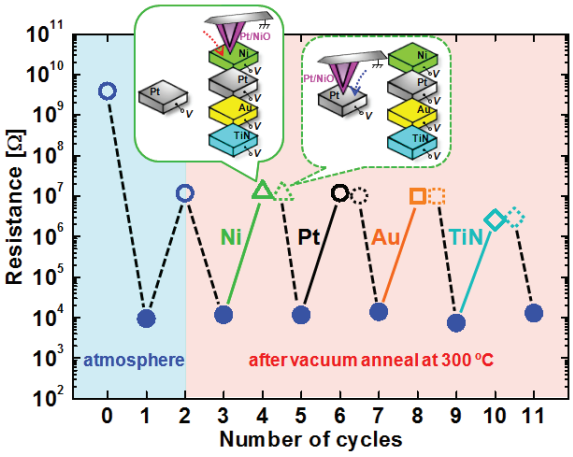


図 4 先端に Pt/NiO 構造が作り込まれた AFM 探針をスイッチング毎に Ni⇒Pt⇒Au⇒TiN の順に移動させ, 下部電極を変更することで得られたスイッチング特性の下部電極材料依存性. セット及び抵抗値の読み出しは, 全て専用の Pt 電極(吹き出し中の孤立 Pt 電極)にて行われた.

更に, 本手法適用の下, スイッチング毎に探針を移動させ, 下部電極を変更することで, 同一素子におけるスイッチング特性の下部電極材料依存性を調査することが可能となった. 大気中でフォーミングを済ませた後, 電極の表面吸着水の影響を避けるため, 真空中 300°C で電極をアニールし, 真空を破ることなく室温にて, Ni⇒Pt⇒Au⇒TiN の順にリセットを試みた結果を図 4 に示す. ここで, セット及び抵抗値の読み出しは, 全て専用の Pt 電極 (図 4 吹き出し中の孤立 Pt 電極)にて行われた. 結果は, 電極種 (触媒能の有無や酸素透過性)に依らずリセットが生じることを示しており, 電極が酸素の貯蔵庫の役割を果たし, 電極とフィラメントの間で酸素イオンを交換することで抵抗スイッチングが生じるとする従来モデルと整合しない. 本研究は固体内拡散の駆動力として, 従来考慮されなかった Soret 力(温度勾配起因の駆動力)が, 金属酸化物内の酸素欠損の移動を生じさせることを示唆しており, 微細固体拡散デバイスにおける温度分布制御の重要性を示している. 本研究成果は Scientific Reports [6]等の学術誌に掲載された他, 韓国チェジュにて開催された IUMRS-ICAM 2015 及び米国フロリダにて開催された Energy Material Nanotechnology (EMN) 2014 fall meeting にて招待講演を行った.

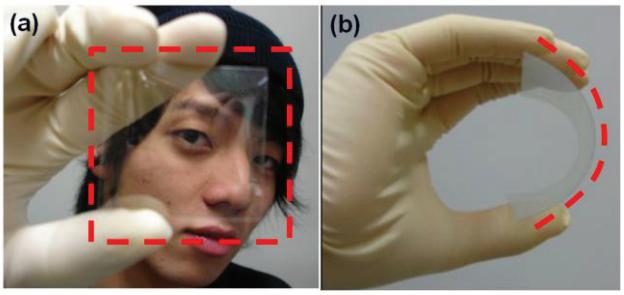


図 5 大面積オール GZO フレキシブルメモリの(a)透明性と(b)柔軟性.

2.3 ReRAM の透明化とフレキシブル化

スパッタ技術を駆使し, Ga 添加 ZnO (GZO)膜の抵抗率制御と高均質化の両立を室温にて実現した. より具体的には, GZO 膜をスパッタ成膜する際に供給する水素の濃度と, スパッタ時に DC 出力に重畳する RF 出力を適切に調整することで, GZO の膜質を制御することが可能となった. これにより, プラスチック基板上に高抵抗の GZO メモリ層と低抵抗の GZO 電極を同一 GZO ターゲットを用いて連続成膜することで, 大面積オール GZO 透明フレキシブルメモリの作製が可能となった. GZO 電極上に GZO メモリ層がホモ成長されることで, 従来のヘテロ構造と比較して, 折り曲げ耐性が大幅に向上した. 図 5(a)と 5(b)に本研究で作製された大面積オール GZO フレキシブルメモリの透明性と柔軟性をそれぞれ示す. これらの成果は Solid-State Electronics [7]に掲載された他, 日経 Tech-On や Semiconductor 誌などの業界誌でも紹介され, 2010 年秋季第 71 回応用物理学会学術講演会にて招待講演を行った.

2.4 データ保持特性に対する紫外線照射の影響

Pt/NiO/ITO/Glass の透明電極を有する ReRAM 構造を作製し, 紫外線 (330-440nm)照射がメモリ特性に及ぼす影響を調査した. 図 6(a)と 6(b)に本研究の測定配置と, NiO, ITO, Glass それぞれの透過スペクトルを示す. 本研究により, 紫外線照射によって抵抗スイッチングが誘起されることが初

めて明らかにされただけでなく，生じるスイッチングが波長に依存することが分かった．即ち，荷電子帯→酸素欠陥準位の電荷励起により高抵抗化が，荷電子帯→伝導体の励起により低抵抗化がそれぞれ発生した (図 6(c)と 6(d))．この結果は，酸素欠損がその荷電状態に応じて凝集又は分散することで，スイッチングが生じることを示唆する．特に低抵抗化は自由電子の励起によって格子の歪が生じ，O_2^{3-}-V_O^{1-}ペアが生成されることで引き起こされた可能性がある．ここで，V_O は酸素空孔を表わす．O_2^{3-}は酸素イオンが隣の酸素イオンサイトに飛び込み，ホールをトラップした酸素イオン分子を形成することで発生し，残された酸素イオンの抜け穴 V_O に電子がトラップされることで V_O^{1-}が生成される．実際にハロゲン化アルカリでは X 線照射等により，これと類似の現象が起こることが知られているが [8]，遷移金属酸化物中で，しかも紫外線照射により O_2^{3-}-V_O^{1-}ペアの存在が確認された例はない．故に，本研究は V_O フィラメントの一部が，酸素イオンの僅かな移動によって断裂した瞬間に生じる，急激な抵抗の変化を利用することで，初めて O_2^{3-}-V_O^{1-}ペアの観測を可能とした，物理的にも興味深い例であると言える．これらの成果は Applied Physics Letters [9]に掲載された他，2016 年 10 月にハワイにて開催された PRiME 2016/230th ECS Meeting にて招待講演を行った．

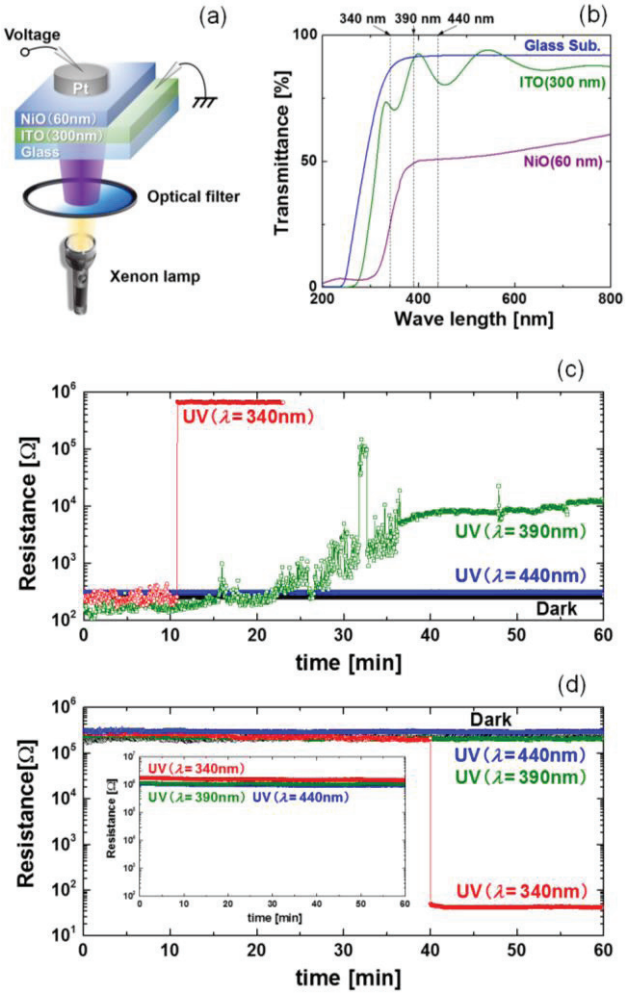


図 6 (a)測定配置．(b) 透過スペクトル．紫外線照射下における(c) 高抵抗状態及び(d) 低抵抗状態のデータ保持特性．挿入図: 紫外線照射下における初期状態のデータ保持特性．

2.5 水素イオン拡散型新メモリの実現

層状ペロブスカイト酸化物である $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (Bi-2212)に水素を取り込むことで，水素イオンの拡散によって動作する新規 ReRAM の作製に成功した．水素イオン移動型は従来の酸素イオン移動型に比べて高速書き替えが可能である．更に，水素イオンと酸素イオンでは電圧応答速度が異なることを利用して，印加電圧のパルス幅によってイオンの移動を選択的に制御し，各イオンの移動よって独立に抵抗変化を誘起できることが明らかになった．酸素欠損と水素の両方を導入した Bi-2212 における抵抗スイッチングの印加パルス幅 t_{width} 依存性を図 7 に示す．パルス高さ V_p は±2 V である．高速パルス(t_{width}=100ns, 1μs)では正極性パルスで高抵抗化，負極性パルスで低抵抗化が生じる一方，低速パルス(t_{width}=10μs, 100μs, 1ms)では，正極性パルスで低抵抗化，負極

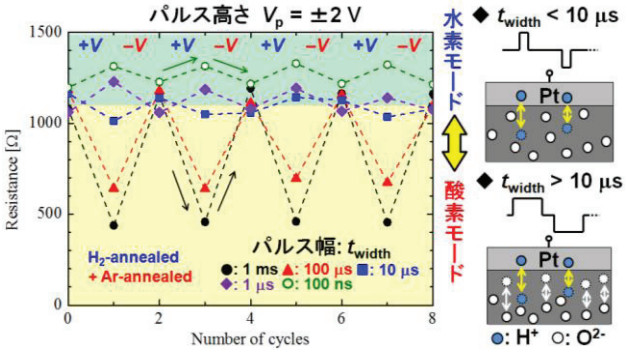


図 7 酸素欠損と水素の両方を導入した Bi-2212 における抵抗スイッチングの印加パルス幅 t_{width} 依存性．t_{width} < 10 μs の高速パルス印加時には水素イオンのみが(上図)，t_{width} > 10 μs の低速パルス印加時には酸素イオンと水素イオンの両方が，それぞれ拡散することで抵抗スイッチングが生じる．

性パルスで高抵抗化が生じることが分かる．これは，高速パルス印加時には，酸素イオンに比べて軽い水素イオンのみが拡散することで抵抗の変化が生じ (図 7 上図)，低速パルス印加時には酸素イオンと水素イオンの両方が拡散し(図 7 下図)，水素イオン拡散による抵抗変化よりも，より大きな抵抗の変化を引き起こす，酸素イオン拡散誘起の抵抗変化が支配的になった結果であると考えられる．

本研究は，酸化物抵抗変化メモリの本質的なメモリ機構の理解に迫るだけでなく，移動イオン種の選択によって高速性やデータ保持特性等の基本的なパラメータを制御し，各々が独立に抵抗変化を誘起する複数のイオン種を共存させることで，全く新しい「波長選択型機能素子」の実現が可能であることを意味する．これらの成果は Applied Physics Letters [10]に掲載された他，International Union of Materials Research Societies - Conference in Asia 2011 において Outstanding Poster Award を受賞している．

2.6 次世代導電性ブリッジメモリ(CBRAM)の提案

Cu/HfO_2/Pt の CBRAM 構造において，HfO_2 結晶粒界 (図 8(a))に毛管凝縮した水分が Cu イオンの電気化学的拡散を通じてスイッチングを促進することが示された [11]. この結果を基に，電子材料の知識を頼りに，構成素材とその結晶性を重視することで行われてきた従来の CBRAM 開発方針を改め，(1)細孔空間の形とサイズ，(2)細孔壁表面の物理・化学的性質，(3)添加溶媒の性質を考慮した新たな設計指針，「細孔エンジニアリング」，を提案した (図 8(b)). 現在，イオン液体の添加による動作電圧とばらつきの低減 [11], Cu 含有イオン液体の添加によるスイッチング回数の向上 [12] 等，細孔エンジニアリングに基づく高性能化を達成している．今後，細孔エンジニアリングの忠実な実施を可能とするには，「高度に制御された孔」が必要となる．そこで，メモリ層に金属有機構造体 (MOF)を用いることを検討している．MOF の理想的な細孔環境は CBRAM の大幅な性能向上のみならず，そのサブナノメートルからナノメートルサイズの細孔を一つのユニットセルに用いることで，メモリの超高密度化が可能実現され得る．本コンセプト及び研究成果は 2016 年の応用物理学会誌 2 月号 [13]にて紹介された他，本成果に関する論文[14, 15]はそれぞれ Journal of Materials Chemistry C の inside front cover と back cover に選出された．今後，固体材料と液体材料の融合により，固体のみ，液体のみ，では不可能であった高性能デバイスの創生を可能にするものと期待する．

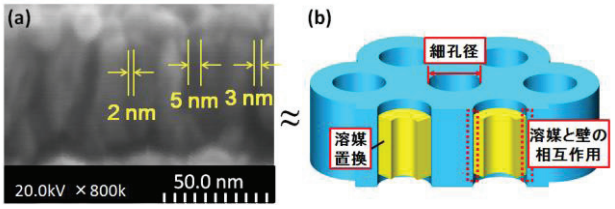


図 8 (a) HfO_2 薄膜の断面 SEM 像. (b)細孔エンジニアリングのコンセプト図: (1)細孔空間の形とサイズ，(2)細孔壁表面の物理・化学的性質，(3)添加溶媒の性質を考慮することで CBRAM の高性能化が実現される．

3．まとめ

言うまでもないことだが，世界の情報量は加速度的に増加し続けている．故に，半導体メモリ素子の微細化・高性能化を継続するためのブレークスルーは，実現「したい」ではなく「しなければならない」問題である．本総説で紹介した成果は何れも，まだ途上であるがブレークスルーに繋がり得る研究だと信じて，今日まで地道に取り組んできた．本総説を手にした学生達が，「自分がやってやる！」という気持ちになってくれたなら，これほど嬉しいことはない．

謝辞

本総説は著者が 2015 年度の鳥取大学研究業績表彰の栄誉を賜り，これまでの研究成果について紹介さて頂く機会を頂いて，執筆の運びとなったものです．この場をお借りして，お世話になった方々に御礼を申し上げます．

参考文献

[1] M. El-Gomati, F. Zaggout, H. Jayacody, S. Tear and K. Wilson: Why is it possible to detect doped regions of semiconductors in low voltage SEM: a review and update, Surf. Interface Anal., 37, pp. 901-911, 2005.

[2] P. Kazemian, S. A. M. Mentink, C. Rodenburg and C. J. Humphreys: High resolution quantitative two-dimensional dopant mapping using energy-filtered secondary electron imaging, Journal of Applied Physics, 100, p. 054901, 2006.

［3］木下健太郎, 岸田悟, 大観光徳, 奥谷匠, 田中隼人, 檜木利雄：回路パターンを有する電極体およびその製造方法, 特許第 5462113 号.

［4］C. Yoshida, K. Kinoshita, T. Yamasaki, and Y. Sugiyama: Direct observation of oxygen movement during resistance switching in NiO/Pt film, Appl. Phys. Lett., 93, pp. 042106-1-042106-3, 2008.

［5］S.-G. Koh, S. Kishida, and K. Kinoshita: Extremely small test cell structure for resistive random access memory (ReRAM) element with removable bottom electrode, 104, pp. 083518-1-083518-4, 2014.

［6］Kentaro Kinoshita, Sang-Gyu Koh, Takumi Moriyama, and Satoru Kishida: Finding Oxygen Reservoir by Using Extremely Small Test Cell Structure for Resistive Random Access Memory with Replaceable Bottom Electrode, Scientific Reports, srep1844, pp. 1-8, 2015, DOI: 10.1038

［7］K. Kinoshita, T. Okutani, H. Tanaka, T. Hinoki, H. Agura, K. Yazawa, K. Ohmi, and S. Kishida：Flexible and transparent ReRAM with GZO memory layer and GZO-electrodes on large PEN sheet, Solid-State Electronics, 58, pp. 48-53, 2011.

［8］D. Pooley: F centre production in alkali halides by radiationless electron hole recombination, Solid State Commun. 3(9), pp. 241-243, 1965; H. N. Hersh: Proposed Excitonic Mechanism of Color-Center Formation in N&ali Halides, Phys. Rev., 148, pp. 928-932, 1966; Y. Toyozawa: SYMMETRY BREAKING EXCITONIC INSTABILITIES IN DEFORMABLE LATTICE, Physica B+C, 117-118, pp. 23-29, 1983; J. D. Konitzer and H. N. Hersh: Color centers in X-rayed or ultraviolet-irradiated potassium iodide, J. Phys. Chem. Solids, 27(4), pp. 771-781, 1966.

［9］K. Kimura, K. Ohmi, S. Kishida, and K. Kinoshita: Influence of ultraviolet irradiation on data retention characteristics in resistive random access memory, Appl. Phys. Lett., 108, pp. 123501-1-123501-5, 2016.

［10］A. Hanada, K. Kinoshita, and S. Kishida: Resistive switching by migration of hydrogen ions, Appl. Phys. Lett., 101, pp. 043507-1-043507-4, 2012.

［11］K. Kinoshita: Improving Memory Performance of Cu/HfO_2/Pt Conducting-Bridge RAM by Solvent Substitution, ECS Transactions, 69, pp. 11-17, 2015.

［12］A. Harada, H. Yamaoka, K. Watanabe, K. Kinoshita, S. Kishida, Y. Fukaya, T. Nokami, and T. Itoh: Copper Ion Containing Ionic Liquids Provides Improved Endurance and Switching Voltage Distributions of Conducting-Bridge Random Access Memory (CB-RAM), Chemistry Letter, 44, pp. 1578-1580, 2015.

［13］木下健太郎: 細孔エンジニアリングによる導電性ブリッジメモリ(CBRAM)の高性能化,「応用物理」学会誌第 85 巻第 2 号, pp.132-136 (2016 年 2 月号)研究紹介.

［14］A. Harada, H. Yamaoka, R. Ogata, K. Watanabe, K. Kinoshita, S. Kishida, T. Nokami and T. Itoh: Enhanced stability of the HfO_2 electrolyte and reduced working voltage of a CB-RAM by an ionic liquid, Journal of Materials Chemistry C, 3, pp. 6966-6969, 2015.

［15］A. Harada, H. Yamaoka, S. Tojo, K. Watanabe, A. Sakaguchi, K. Kinoshita: Improved Performance of a Conducting-Bridge Random Access Memory using Ionic Liquids, Journal of Materials Chemistry C, 4, pp. 7215-7222, 2016.

（受理　平成 28 年 11 月 15 日）

業績リスト

—2016—

機械工学講座	３９
応用数理工学講座	４５
知能情報工学講座	４９
電気電子工学講座	５４
応用化学講座	５８
生物応用工学講座	６６
土木工学講座	６８
社会経営工学講座	７１

機械工学講座

Random Error Reduction Method for One-shot Shape Measurement using the Grating Projection Method
Iwasa, T. Tanaka, H. and Fujigaki, M.
Transaction of JSASS, Vol. 58, No. 6, November 2015, pp.337-344.

Development of Shape Measurement System for Vibrating Membranes
Iwasa, T. and Susaki, K.
Journal of Materials and Metallurgy, Vol. 14, No. 1, March, 2015. pp.72-75.

Wooden Tactile Warmth for Human and its Evaluation
Obata, Y.
International Symposium on Frontier Researches in Sustainable Humanosphere, Kyoto, Japan, November 69-73, 2015.

Design Verification for Large-Scale High-Precision Space Smart Structure System
Kogiso, N., Tanaka, H., Iwasa, T., Akita, T., Sakamoto, H., Ikeda, T., Senda, A., Ogi, Y. and Ishimura, K.
ICMR-2015 3rd International Conference on Materials and Reliability, Jeju, Korea, November 23-25, 2015.

Connection Accuracy of Multiple 3D Shape Data Sets due to Feature-Point Matching with Virtual Targets
Harada, T. and Iwasa, T.
26th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, Kobe, Japan, 14-15 October, 2015.

Proposal of Connection Method for Precise Shape Measurement Data using Virtual Targets
Harada, T. and Iwasa, T.
30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe, Japan, 4-10 July, 2015.

皺・折り目を含む薄膜の衝撃過渡振動応答の空間分布特性
岩佐貴史，田中博之
実験力学会，日本実験力学会, Vol.15, No. 4, 2015.、pp.270-276.

面計測と点計測を統合した大型宇宙構造物の高精度形状計測法の提案
岩佐貴史, 岸本直子, 樋口健, 藤垣元治, 小木曽望
航空宇宙技術，日本航空宇宙学会， Vol. 14, 2015, pp.95-103.

2015　大学院材料力学入試問題集　主要大学機械工学系大学院　入学試験問題と解答集（ISBN978-4-9906866-4-2）
大学院材料力学入試問題検討委員会：畑俊明[*1], 伊藤勝悦[*2], 土田栄一郎[*3], 須見尚文[*1], 辻知章[*4], 小畑良洋, 石原正行[*5], 河村隆介[*6], 森本卓也[*7]（[*1]静岡大，[*2]神奈川大，[*3]埼玉大，[*4]中央大，[*5]大阪府大，[*6]宮崎大，[*7]島根大）
NPO 法人固体の力学研究会， CD-ROM (pdf), pp.100-103, 2015 年 5 月.

Formation of Ceramic-Metal Composite Layers on Die Steels by Electron Beam Irradiation
Akao, T., Sakurai, Y., Onda, T., Uehara, K., Chen, Z.
J. Mater. Metal., Vol. 14, No. 2, pp. 152-158, June 2015.

In-situ Synthesis of Al-based Composites Reinforced with TiB_2-TiC-Al_2O_3 Ceramic Particulates
Akao, T., Tonoko, K., Onda, T., Chen, Z.
J. Sustain. Res. Eng., Vol. 2, No. 2, pp. 45-52, Sept. 2015.

Fabrication of Aluminum-Graphite Composites by Hot Extrusion
Takano, M., Akao, T., Onda, T., Chen, Z.
J. Mater. Metal., Vol. 14, No. 3, pp. 227-231, Sept. 2015.

遺伝的アルゴリズムを用いた多工程円筒深絞り加工用金型寸法自動探索法
杉本義徳，上原一剛，篠原祐介，中川祐基，小幡文雄，陳中春
設計工学，第 50 巻，9 号，pp. 480-486, 2015 年 9 月

骨盤の解剖学的基準面に関する自動決定法の検討
井上貴之，藤原一夫，藤井洋佑，阿部信寛，尾崎敏文，中島義和，杉田直彦，光石衛，陳中春
臨床バイオメカニクス, 第 36 巻, pp. 145-150, 2015

年 10 月

ナビゲーションシステムを用いた人工膝関節の術中動態解析
井上貴之，阿部信寛，宮澤慎一，藤原一夫，中島義和，杉田直彦，光石衛，尾﨑敏文，陳中春
日本機械学会論文集, 第 81 巻, 830 号, pp. 15-00229, 2015 年 10 月

Fabrication and Thermoelectric Properties of Cu-doped Bi-Te-Se Bulk Materials
Wang, Z.-L., Yokoyama, Y., Akao, T., Onda, T., Chen, Z.
The 3rd Inter. Conf. on Powder Metall. in Asia (APMA 2015), Nov. 2015.

Preparation of a Novel Antiviral Material by Mechanical Milling
Onda, T., Yoneda, Y., Akao, T., Motoike, K., Ito, H., Ito, T., Chen, Z.
The 3rd Inter. Conf. on Powder Metall. in Asia (APMA 2015), Nov. 2015.

Formation of Te-rich Phase and its Effect on Thermoelectric Properties of Hot-extruded Bi-Te-Se Bulk Materials
Wang, Z.-L., Akao, T., Onda, T., Chen, Z.
第 66 回塑性加工連合講演会講演論文集，pp. 237-238，2015 年 10 月

Extrusion Behavior and Thermal Conductivity of Aluminum-Graphite Composites
Yi, L.F., Takano, M., Akao, T., Onda, T., Chen, Z.
第 66 回塑性加工連合講演会講演論文集，pp. 239-240，2015 年 10 月

中温廃熱エネルギー回収を目的としたバルク熱電変換材料の開発
陳中春
公益財団法人 日本板硝子材料工学助成会 成果報告論文集，第 33 巻，pp. 130-137, 2015 年 8 月

Bending Fatigue Strength of Induction Hardened Gears Assembled with Vehicle's Engine Flywheel
Miyachika, K., Yi, L., Nakako, M., Sakamoto, K. and Ono, Y.
Journal of Materials and Metallurgy, Vol.14. No.2, pp.222-226, June 2015.

Taming Macroscopic Jamming in Transportation Networks
Ezaki, T., Nishi, R. and Nishinari, K.
Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, Vol.2015, P06013, June 2015.

電着銅薄膜を用いた繰返し応力測定法（成長粒子のフラクタル性を利用した方法）
小野勇一，渡部翔太
実験力学，第 15 巻, 2 号, pp.132-137, 2015 年 7 月.

Jam-absorption driving with a car-following model
Taniguchi, Y., Nishi, R., Ezaki, T. and Nishinari, K.
Physica A, Vol.433, pp.304-315, Sept. 2015.

ねじりと曲げを受けるマグネシウム合金の初期疲労損傷に関する研究
小野勇一，井上裕也，香川愛智，益田賢
日本機械学会論文集，第 81 巻, 829 号, p.15-00141, 2015 年 9 月.

Stress Measurement Using EBSD Analysis of Grown Grains in Electrodeposited Nickel Foil
Ono, Y.
ATEM'15 Abstruct book, OS7-17, Oct. 2015.

Effective Stress Intensity Factor Range of Surface Crack Measured by Digital Image Correlation Method
Ono, Y and Togashi, M.
Proc. 10th ISEM’15, CD-ROM, Nov. 2015.

Mesoscale Simulation of the Early Evolution of Ductile Fracture in Dual Phase Steels
Matsuno, T., Teodosiu, C.[*1], Maeda, D. [*2], Uenishi, A[*2]([*1] ADESCO Ltd., [*2]Nippon Steel and Sumitomo Metal Corp.)
International Journal of Plasticity, Vol.74(2015), pp.17-34.

Effect of Shearing Clearance and Angle on Stretch-Flange Formability Evaluated by Saddle-Type Forming Test
Matsuno，T.，Nitta，J. [*1]，Sato，K. [*1]，Mizumura，M. [*1]，Suehiro，M. [*1]([*1]Nippon Steel and Sumitomo Metal Corp.)
Journal of Materials Processing Technology，Vol. 223（2015），pp.98-104.

穴広げ率と切り口の疲労特性に及ぼす穴抜きパン

チコーティングの影響
松野崇，佐藤浩一[*1]，上西朗弘[*1]，樋口成起[*2]，増田哲也[*2]，清水崇行[*2]（[*1] 新日鉄住金株式会社、[*2] 大同特殊鋼株式会社）
塑性と加工，56 巻 649 号（2015），pp. 137-142.

Friction Properties of Laminated Composite Materials of alpha-Tricalcium Phosphate-filled Poly(vinyl alcohol) Hydrogels
Yamamoto, K., Iwai, T.[*], Shoukaku, Y.[*] ([*] Kanazawa University)
Tribology Online, Vol. 10, No. 6, pp.413-419, 2015.

A driven active mass damper by using output of a neural oscillator (Effects of position control system changes on vibration mitigation performance)
Hongu, J., Iba, D[*]., Sasaki, T[*]., Nakamura, M[*]., Moriwaki, I[*]. ([*]Kyoto Institute Tech.)
Proc. of SPIE, Smart Structures and NDE 2015, 943510, 9 pages, Mar. 2015.

Effects of ground impact on traumatic brain injury in a fender vault pedestrian crash
Tamura, A., Koide, T., Yang, K.H[*]. ([*]Wayne State Univ.)
Int. J. of Vehicle Safety, Vol.8, No.1, pp.85-100, Mar. 2015.

Strain rate effects on the tensile behavior of fiber bundles isolated from nerve root
Tamura, A., Murakami, J., Sone, Y., Koide, T.
Proc. of 2015 Sustainable Research and Innovation Conference on CD-ROM, May 2015.

Pedestrian accident reconstruction using a human body finite element model
Tamura, A., Koide, T.
Proc. of ASME 2015 International Design & Engineering Technical Conference and Computers & Information in Engineering Conference on CD-ROM, DETC2015-46969, Aug. 2015.

Gear and Bearing Failure Detection Using Vibration Monitoring and Mahalanobis-Taguchi Systems
Koide, T., Matsuura, D.[*], Tamura, A., Yasugi, T., Mori, T. ([*]Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)
Proc. of ASME 2015 International Design and Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference on CD-ROM, DETC2015-46599, Aug. 2015.

プラスチックねじ歯車対の寿命推定方法に関する一考察（無潤滑の場合）
高橋美喜男[*]，高橋秀雄[*]，小出隆夫，板垣貴喜[*]（[*]木更津高専）
日本設計工学会誌，第 50 巻，8 号，pp.409-414，2015 年 8 月

神経振動子と位置制御器を組み合わせた制御系によって駆動されるアクティブ動吸振器を利用した構造物の振動制御
本宮潤一，射場大輔[*]，中村守正[*]，森脇一郎[*]（[*]京都工芸繊維大学）
日本機械学会論文集，第 81 巻，825 号，pp.1-20，2015 年 8 月

神経振動子を組み込んだアクティブ動吸振器システムで利用する PD 制御器の設計法
本宮潤一，射場大輔[*]，中村守正[*]，森脇一郎[*]（[*]京都工芸繊維大学）
日本建築学会構造系論文集，第 80 巻，714 号，pp.1261-1269，2015 年 8 月

Pedestrian kinematics and brain injury risk involved in a sideswipe accident
Tamura, A., Koide, T.
Proc. of AP Biomech 2015 on CD-ROM, Sep. 2015.

Strength of plastic helical wheels meshed with various types of worms
Nomura, M, Koide, T., Ueda, A. [*], Ishida, Y., Tamura, A. ([*]Amtec Inc.)
Journal of Materials and Metallurgy, Vol.14, No.3, pp.232-235,238, Sep. 2015.

Strain rate effects on the tensile behavior of fiber bundles isolated from nerve root
Tamura, A., Murakami, J., Sone, Y., Koide, T.
J. of Sustainable Research in Engineering, Vol.2, No.2, pp. 63-69, Oct. 2015.

Synchronization of Matsuoka Neural Oscillator to Meshing Frequency for Estimation of Angular Position of Gears
Iba, D[*]., Hongu, J., Hiramatsu, H[*]., Nakamura, M[*].,

Iizuka, T*., Masuda, A*., Sone, A*., Moriwaki, I*. (*Kyoto Institute Tech.)
Proc. of 2015 IFToMM World Congress, S34: OS6-017, pp.1-6, Oct. 2015.

Design method of PID controllers for active mass damper systems incorporating neural oscillators
Hongu, J., Iba, D*., Sasaki, T*., Nakamura, M*., Moriwaki, I*. (*Kyoto Institute Tech.)
Proc. of 16th Asia Pacific Vibration Conference, No.527, pp.708-713, Nov. 2015.

Visual Measurement for On-orbit Reflector Assembly
Nishida, S., Kamimura, H.
Journal of Robotics and Mechatronics , Vol.25, No.5, pp.480-488, 2015

REX-J ミッションにおける画像処理を用いたテザー移動の評価
鈴木悟史*1, 吉井正広*1, 中西洋喜*2, 山隅允裕*2, 小田 光茂*2, 上田敦史*1, 渡邊恵佑*1, 加藤裕基*1, 星亜友美*1, 西田信一郎(*1:JAXA, *2:東京工大)
日本機械学会論文集，81 巻，824 号，DOI: 10.1299/transjsme.14-00298, 2015 年

An Optical Navigation System for Capturing Space Debris
Nishida, S., Kodama, M., Kikuchi, M.
Proc. of the 7th Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, pp.1-6, 2015

Distributed Controllers for Multi-Agent Coordination via Gradient-Flow Approach
Sakurama, K., Azuma, S*., Sugie, T*. （*Kyoto University）
IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 60, No. 6, pp. 1471-1485, 2015

A Study on Control Method of New Type UAV
Nishigaki, K., Kawakami, K., Nishida, S., Nishimura, M., Sakurama, K.
Journal of Materials and Metallurgy, Vol. 14, No. 2, pp. 149-151, 2015

A Study on Path Planning Method for Exploration Robot Taking Account of Communication Transmissibility
Ota, Y., Nishida , S., Miura, M., Sakurama, K.
Journal of Materials and Metallurgy, Vol. 14, No. 3, pp. 236-238, 2015

Necessary and Sufficient Condition for Average-consensus of Networked Multi-Agent Systems with Heterogeneous Time-Delays
Sakurama , K., Nakano, K*. (The University of Electro-Communications)
International Journal of Systems Science, Vol. 46, No. 5, pp. 818-830, 2015

分散制御と価格調整によるネットワークフロー制御
桜間一徳，三浦政司
電子情報通信学会和文論文誌 A， J98-A， No. 3, pp. 267-273, 2015

Distributed Control of Networked Multi-agent Systems for High-dimensional Coordination
Sakurama, K., Azuma, S*., Sugie, T*. （*Kyoto University）
The 54th IEEE Conf. on Decision and Control, 2015

Real-Time Pricing via Distributed Negotiations between Prosumers in Smart Grids
Sakurama, K. and Miura, M.
IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies in Asia, 2015

Complete Distributed Optimization with Constraints on Networked Multi-Agent Systems
Sakurama, K. and Miura, M.
European Control Conference, 2015

Effects of Insufficient Time-Scale Separation in Cascaded, Networked Systems
Sakurama, K., Verriest, E. I*., Egerstedt, M*. (*Georgia Institute of Technology)
American Control Conference, 2015

Distributed Optimization based on Networked Multi-agent Systems and Its Application to Negotiation-based Real-time Pricing
Sakurama, K. and Miura, M.
The 20th International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2015

Graphical and Scalable Multi-Agent Simulator for Real-time Pricing in Electric Power Grid
Miura, M., Sakurama, K., Tokunaga, Y.
The 20th International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2015

In-Situ Ablation Measurement for An Ablative Heat Shield Using An Embedded Sensor
Sakai T., Nakazawa H., Dantsuka Y., Kitagawa K., Hirai K., and Ishida Y.
The International Symposium of Shock Waves (Tel Aviv, Israel), July, 2015.

In-Situ Ablation Measurement of a Low Density Ablator Using an Embedded Sensor
Dantsuka Y., Nakazawa H., Kitagawa K., Hirai K., Ishida Y., and Sakai T.
The 30th International Symposium on Space Technology and Science (Kobe, Japan), July 2015

A unified approach to an augmented Burgers equation for the propagation of sonic booms
Yamamoto M., Hashimoto A., Aoyama T., and Sakai T.
The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.137, No.4, pp. 1857-1866, Apr. 2015.

In-Situ Measurement of Ablation Fronts of A Low Density Ablator With An Ablation Sensor
Sakai T., Nakazawa H., Dantsuka Y., Watanabe K. Kitagawa K., Hirai K., and Ishida Y.
53rd Aerospace Sciences Meeting (Florida, USA) AIAA Paper 2015-1451, January, 2015.

Spray Characteristics and Inside Flow of a Marine Diesel Injector
Yokobe, S.[*], Oda, T., Ohsawa, K., Sumi T., Shuhei Sugata, Keiichiro Yabuta ([*]Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd.)
Proc. of 2015 JSAE/SAE Powertrains, Fuels & Lubricants International Meeting, JSAE20159249, pp.1-6, Sep. 2015.

Experimental Study of Impact Behavior of High-Speed Fine Droplet onto Dry Surfaces
Oda, T., Matsuo R.[*1], Sota, M.[*2], Yamamoto, K., Yokohata, H.[*1], Ohsawa, K. ([*1]Mazda Company, [*2]Sanyo Special Steel Co., Ltd.)
Proc. of 13th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, B4-2-128, pp.1-8, Sep. 2015.

Vectored Jet Control for Trielectrode Plasma Actuator with Serrated Electrode
Matsuno, T., Sugahara, M., Koyama, J., Fujita, N., Yamada, G., Kawazoe, H.
Proceedings of International Symposium on Space Technology and Science, No. 2015-e-18, 2015.

Experimental Optimization of Plasma Aerodynamic Control and Their Flow Analysis
Matsuno, T., Kanazaki, M., Haruna, K., Yamada, G., Kawazoe, H.
ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015 (AJK2015-FED), No. AJK2015-14712, 2015.

プラズマアクチュエータの動向：流体計測法
松野隆，本阿弥眞治，藤井孝藏，関本諭志，飯田明由
プラズマ核融合学会誌，第 91 巻，10 号，2015，pp. 661-664. 2015 年 10 月

Multi-Electrode Plasma Actuator to Improve Performance of Flow Separation Control
Asaumi, N., Matsuno, S., Matsuno, T., Sugahara, M., Kawazoe, H.
Proceedings of International Gas Turbine Congress 2015 (IGTC2015), No. WeAMF.4, 2015.

Efficient global optimization applied to multi-objective design optimization of lift creating cylinder using plasma actuators
Kanazaki, M., Matsuno, T., Maeda, K, Kawazoe, H.
The 6th International Conference on Computational Methods (ICCM2015), No. 1169-3494, 2015.

Numerical Study on Performance Improvement Mechanism of Tri-Electrode Plasma Actuator
Nishida, H., Tamura, M., Matsuno, T.
AIAA Paper 2015-2809, 2015.

Efficient Global Optimization Applied to Aerodynamic Drag Reduction around Cylinder Using Plasma Actuators in Wind Tunnel

Experiment
Kanazaki, M., Matsuno, T., Maeda, K, Kawazoe, H.
IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC) 2015, No. 15669, 2015.

プラズマアクチュエータの動向：はじめに
野々村拓，瀬川武彦，深潟康二，松野隆，清水一男，白石裕之
プラズマ核融合学会誌，第 91 巻，10 号，2015，pp. 648-650. 2015 年 10 月

プラズマアクチュエータの動向：基礎的な流れ場に対する実験的・数値的研究
深潟康二，青野光，藤井孝藏，山田俊輔，石川仁，松野隆
プラズマ核融合学会誌，第 91 巻，10 号，2015，pp. 657-660. 2015 年 10 月

プラズマアクチュエータの動向：まとめ
野々村拓，瀬川武彦，深潟康二，松野隆，清水一男，白石裕之
プラズマ核融合学会誌，第 91 巻，10 号，2015，pp. 671-673. 2015 年 10 月

Multiobjective Design Exploration of Propeller Airfoils at Low-Reynolds and High-Mach Number Conditions towards Mars Airplane
Morizawa, S., Nonomura, T., Oyama, A., Obayashi, S., Fujii, K.,
Proceedings of International Symposium on Space Technology and Science, No.2015-k-54, 2015.

A Study on Knocking Prediction Improvement Using Chemical Reaction Calculation
Kitada, T., Kuchita, M., Hayashi, S., Shirota, T., Sakai, Y. and Kawazoe, H.
SAE paper 2015-01-1905 (Journal article), pp.1-8, 2015.

Spectroscopic Flow Evaluation of Nonequilibrium CO2-Ar Plasma Flow in an Arc-jet Facility
Nishida, G., Yamada, G. and Kawazoe, H.
Journal of Materials and Metallurgy, Vol.14, No.1, pp.76-80, 2015.

Temperature Evaluation of CO2-N2-Ar Plasma Flows Using the Area Intensity Method
Yamada, G., Otsuta, S. and Kawazoe, H.
Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol.12, pp.89-96, 2015.

Aerodynamic Characteristics of a Deployable-Wing Airplane with an Elevon for Mars Exploration
Yamada, G., Miyazaki, A., and Kawazoe, H.
7th Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Cairns, No.249, pp.1-8 (Journal article), 2015.

Aerodynamic characteristics of a silent supersonic biplane model using a new force balance
Shohei Miki, Hiromitsu Kawazoe, Shigeru Obayashi（Tohoku Univ.）
13th ICFD Symp., No.CRF-44, pp.1-2, 2015.

Spectroscopic diagnostics of weakly-ionized argon surface wave plasma based on CR model
H. Kawazoe, S. Takeuchi, G. Yamada, M. Setou, M. Matsuno
EPS2015 Symp., No.P2-304, pp.1-4, 2015

圧縮性流体力学
麻生　茂（九大），川添博光，澤田恵介（東北大）
丸善出版，第 4、6，7，8 章，pp.49-64，pp.77-133，2015

応用数理工学講座

Simulated annealing applied to two-dimensional low-beta reduced magnetohydrodynamics
Chikasue, Y., Furukawa, M.,
Physics of Plasmas, Vol.22, No.2, pp.022511-1 - 022511-10, 2015.

Adjustment of vorticity fields with specified values of Casimir invariants as initial condition for simulated annealing of an incompressible, ideal neutral fluid and its MHD in two dimensions
Chikasue, Y., Furukawa, M.,
Journal of Fluid Mechanics, Vol.774, pp.443-459, 2015.

Experimental observation of response to resonant magnetic perturbation and its hysteresis in LHD
Y. Narushima, S. Sakakibara, S. Ohdachi, Y. Suzuki, K.Y. Watanabe, S. Nishimura, S. Satake, B. Huang, M. Furukawa, Y. Takemura, K. Ida, M. Yoshimura, I. Yamada and LHD Experiment Group,
Nuclear Fusion, Vol.55, No.7, pp.073004-1 - 073004-7, 2015.

Pressure driven MHD instabilities in the intrinsic and externally enhanced magnetic stochastic region of LHD
S. Ohdachi, Y. Suzuki, H. Tsuchiya, K.Y. Watanabe, S. Sakakibara, Y. Narushima, X.D. Du, T.F. Ming, M. Furukawa, K. Toi, I. Yamada and LHD Experiment Group,
Nuclear Fusion, Vol.55, No.9, pp.093006-1 - 093006-7, 2015.

講座： 粒子運動論 ～惑星から荷電粒子まで 1. はじめに
古川勝
プラズマ・核融合学会誌, 第 91 巻, 1 号, pp.48-50, 2015 年 1 月

講座： 粒子運動論 ～惑星から荷電粒子まで 5. おわりに
古川勝
プラズマ・核融合学会誌，第 91 巻，3 号，p.214, 2015 年 3 月

Simulating Customer-to-Customer Interaction In a B2B Financial Service Business by Empirical Agent-Based Modeling
Mizuno, M., Toya, K., Ozawa, K., Nemoto, Y., Tanno, S., Arai, K., Oura, K., Ishii, A., and Ohnishi, T.,
Proceedings of 9th EAI International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies(BICT2015) Dec. 2015, Boston.

Mathematical model for hit phenomena and its application to analyze popularity of weekly TV drama
Ishii, A., Kitao, A.
arXiv:1501.00758 [physics.soc-ph]

Suzuki Coupling Reactions Catalyzed by PdO Dispersed on Dealuminated Y Zeolite in Air under Ambient Conditions
Okumura, K., Mushiake, T., Matsui, Y., and Ishii, A.
ChemPhysChem Volume 16, Issue 8, June 8, 2015, Pages: 1719?1726 DOI: 10.1002/cphc.201500118

Formation of Self-assembled Multi-layer Stable Palladium Nanoparticle for Ligand-free Coupling Reactions
Arisawa, M., Al-Amin, M., Honma, T., Tamenori, Y., Arai, S., Hoshiya, N., Sato, T., Yokoyama, M., Ishii, A., Takeguchi, M., Miyazaki, T., Takeuchi, M., Maruko, T., Shuto, S.
Royal Society of Chemistry Advances 5 (2015) 676-683

ヒット現象の数理モデル
石井晃
組織科学 48(4) (2015) 5-20 （2015 年 6 月）

ヒット現象の数理 映画から AKB 総選挙まで
石井晃、太田奨
応用数理、25(2) (2015) 50-58

ヒット現象の数理モデル
石井晃、川畑泰子
人工知能学会誌 第 30 巻 1 号 (2015) p.97-103

A Efficient numerical solver for first-principles transport calculation based on real-space finite-difference method
Shigeru Iwase, Takeo Hoshi, Tomoya Ono,

Phys. Rev. E 91, 063305, 9pp. (2015).

Thermo-molecular Gas-film Lubrication Dynamics Considering Boundary Temperature and Ambient Gas (2-DOF Numerical Analysis by t-MGL Equation)
Okamura, Y., Nakasuji, A., Matsuoka, H., Fukui, S.
Proceedings of 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2015), 2015.

Theoretical Study of Surface Interaction Pressures of Two-dimensional Periodic Material Distributions Based on the Lennard-Jones Potential
Matsuoka, H., Kitahama, N., Fukui, S.
Proceedings of 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2015), 2015.

Theoretical Analyses of Interaction Stresses Acting Between Solid Surfaces with One-Dimensional Material Distribution Based on Lennard-Jones Potential
Miyake, R., Tanaka, T., Matsuoka, H., Fukui, S.
Proceedings of 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2015), 2015.

Effects of Surface Roughness on Breakage Characteristics of Liquid Meniscus Bridge
Shinohara, R., Miyamoto, M., Kondo, D., Matsuoka, H., Fukui, S.
Proceedings of 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2015), 2015.

Effects of Solid Surface Roughness on Vibration Transfer Characteristics of Liquid Meniscus Bridge
Kondo, D., Miyamoto, M., Shinohara, R., Matsuoka, H., Fukui, S.
Proceedings of 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2015), 2015.

Change of Flow Characteristics of Liquid Nano-Step due to Heating
Fujikawa, S., Matsuoka, H., Fukui, S.
Proceedings of 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE 2015), 2015.

A Novel Cutting Concept of CFRP Composites for Extending the Life of Tool
Maegawa, S[*1]., Morikawa, Y[*2]., Hayakawa, S[*2]., Itoigawa, F[*2]., Nakamura, T[*2]. （[*1] Nagoya Institute of Technology（Present Affiliation: Tottori University）, [*2] Nagoya Institute of Technology）
Key Engineering Materials, Vol.656-657, pp.198-203, 2015.

Effects of fiber orientation direction on tool-wear processes in down-milling of carbon fiber-reinforced plastic laminates
Maegawa, S[*1]., Morikawa, Y[*2]., Hayakawa, S[*2]., Itoigawa, F[*2]., Nakamura, T[*2]. （[*1] Nagoya Institute of Technology（Present Affiliation: Tottori University）, [*2] Nagoya Institute of Technology）
International Journal of Automation Technology, Vol.9, No.4, pp.356–364, 2015.

ゴム半球と剛平面の接触における真実接触面積の接触応力依存性とその簡易推定法
前川 覚[*1], 糸魚川 文広[*2], 中村 隆[*2]（[*1]名古屋工業大学（現鳥取大学）, [*2]名古屋工業大学）
日本機械学会論文集C編, Vol.81, No.830, p.15-00316, 2015.

Optical measurements of real contact area and tangential contact stiffness in rough contact interface between an adhesive elastomer and a glass palate
Maegawa, S[*1]., Itoigawa, F[*2]., Nakamura, T[*2]. （[*1] Nagoya Institute of Technology（Present Affiliation: Tottori University）, [*2] Nagoya Institute of Technology）
Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol.9, No. 5, p. JAMDSM0069, 2015.

Effect of normal load on friction coefficient for sliding contact between rough rubber surface and rigid smooth plane
Maegawa, S[*1]., Itoigawa, F[*2]., Nakamura, T[*2]. （[*1] Nagoya Institute of Technology（Present Affiliation:

Tottori University), *2 Nagoya Institute of Technology)
Tribology International, Vol.92, No.12, pp.335–343, 2015.

Development of novel tool for cutting of carbon-fiber-reinforced plastics – positive use of abrasive wear at tool edge for reduction in cutting force
Maegawa, S*1., Hayakawa, S*2., Itoigawa, F*2., Nakamura, T*2. (*1 Nagoya Institute of Technology (Present Affiliation: Tottori University), *2 Nagoya Institute of Technology)
Mechanical Engineering Journal, Vol.2, No. 6, p.15-00295, 2015.

Suppression of tool wear by extremely short-duration cutting
Terasaka, Y*2., Itoigawa, F*2., Maegawa, S*1., Nakamura, T*2. (*1 Nagoya Institute of Technology (Present Affiliation: Tottori University), *2 Nagoya Institute of Technology)
Mechanical Engineering Journal, Vol.2, No. 6, p.15-00348, 2015.

Enhancing cutting performance of diamond coating tool by edge sharpening with short pulse laser
Suganuma. S*2., Itoigawa, F*2., Hayakawa, S*2., Maegawa, S*1., Nakamura, T*2. (*1 Nagoya Institute of Technology (Present Affiliation: Tottori University), *2 Nagoya Institute of Technology)
The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, B23(0520), 2015.

Basic study on failure process of CVD diamond coating tool in machining of cemented carbide materials
Minami, T*2., Itoigawa, F*2., Maegawa, S*1., Nakamura, T*2. (*1 Nagoya Institute of Technology (Present Affiliation: Tottori University), *2 Nagoya Institute of Technology)
The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, B42(0522), 2015.

Suppression of tool wear by extremely short cutting in machining of Inconel 718
Terasaka, Y*2., Itoigawa, F*2., Maegawa, S*1., Nakamura, T*2. (*1 Nagoya Institute of Technology (Present Affiliation: Tottori University), *2 Nagoya Institute of Technology)
The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, B35(0521), 2015.

Novel design concept for Rayleigh step bearing with high robustness against step height change due to frictional wear
Mori, S*2., Itoigawa, F*2., Maegawa, S*1., Nakamura, T*2. (*1 Nagoya Institute of Technology (Present Affiliation: Tottori University), *2 Nagoya Institute of Technology)
Proceedings of Malaysian International Tribology Conference 2015, pp.80–81, 2015
.

Measurements of surface displacement field for multi-contact interface of elastomers
Maegawa, S*1., Itoigawa, F*2., Nakamura, T*2. (*1 Nagoya Institute of Technology (Present Affiliation: Tottori University), *2 Nagoya Institute of Technology)
Proceedings of Malaysian International Tribology Conference 2015, pp.82–83, 2015.

Development of Otto-ATR Raman spectroscopy for thin lubricant films
Yada S*2., Maegawa, S*1., Itoigawa, F*2., Nakamura, T*2. (*1 Nagoya Institute of Technology (Present Affiliation: Tottori University), *2 Nagoya Institute of Technology)
Proceedings of Malaysian International Tribology Conference 2015, pp.167–168, 2015.

SPR microscopy with ATR Otto configuration for observing thin boundary lubrication film
Yamaguchi J*2., Maegawa, S*1., Itoigawa, F*2., Nakamura, T*2. (*1 Nagoya Institute of Technology (Present Affiliation: Tottori University), *2 Nagoya Institute of Technology)
Proceedings of Malaysian International Tribology Conference 2015, pp.169–170, 2015.

Poiseuille flow and thermal transpiration of a rarefied gas between parallel plates II: effect of nonuniform surface properties in the longitudinal direction

Doi, T.
Z. Angew. Math. Phys. Vol.66, pp.3405-3423, Sep. 2015.

Poiseuille flow and thermal transpiration of a rarefied gas between parallel plates: Effect of nonuniform surface properties of the plates in the transverse direction
Doi, T.
ASME J. Fluids Eng. Vol.137, 101103 (9 pp), Oct. 2015.

Plane Poiseuille flow and thermal transpiration of a highly rarefied gas between the two walls of Maxwell-type boundaries with different accommodation coefficients: Effect of a weak external force
Doi, T.
Z. Angew. Math. Phys. Vol.66, pp.1805-1820, Apr. 2015.

ロータの軸振動解析モデルの計算精度向上のための嵌め合い部のモデル化
長江信顕[*1]，村山知章[*1]，山地成一[*1]，後藤知伸（[*1] 川重テクノロジー），日本機械学会論文集，第 80 巻，830 号，DOI: 10.1299/transjsme.15-00174, 15 pages, 2015 年 3 月

Analysis of the velocity correlation in the collective motion of bacteria
Nakai, T., Goto, T.
J. Aero Aqua Bio-mechanisms., Vol.4, No.1, pp.32-36, Aug. 2015

A One-dimensional Discrete Model of Biased Random Walk Relating to Bacterial Chemo-taxis
Goto, T., Nakai, T.,
J. Aero Aqua Bio-mechanisms, Vol.4, No.1, pp.18-24, Jun. 2015

Effects of Blade Section on Performance of Butterfly Wind Turbines as Double-Blade VAWTs
Hara, Y., Sumi, T., Emi, T., Yokoyama, M., Akimoto, H[*1]., Kawamura, T[*2]., Nakamura, T[*3]. ([*1]KAIST, [*2]Computational Fluid Dynamics Consulting Inc., [*3]MODEC)
Bulletin of the JSME, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 10, No. 1, p. JFST0003, Feb. 2015.

バタフライ風車に関する研究の紹介
原　豊
日本風力エネルギー学会誌，第 39 巻, 1 号, (通巻 113), pp. 29-31，平成 27 年 5 月

Numerical Simulation of Flow Field around A Circular-Bladed Butterfly Wind Turbine
Hara, Y., Sumi, T., Matsubara, Y., Yasumoto, Y[*]. ([*]Tottori Prefectural Government)
Proc. ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, Seoul, Korea, pp.1613-1619, No. 22038, July, 2015.

Experiments and 2D-CFD Analysis on the Possibility of Duct-Flow Power Generation Using a Butterfly Wind Turbine
Hara, Y., Kogo, S., Takagaki, K., Kawanishi, M., Sumi, T[*1]., Yoshida, S[*2]. ([*1]Saga University, [*2]Kyushu University)
Proc. 13th Asian International Conference on Fluid Machinery, Tokyo, Japan, No. 187, Sep. 2015.

知能情報工学講座

Interactive Planning Guidance System for Manufacturing Process by SVM and the Particle Filter Considering Production Know-how
Yasukawa, S., Kitamura, A.
Proceedings of International Symposium on Scheduling 2015, 7A2, pp.258-263, July 2015.

Emergency Response Nurse Scheduling with Medical Support Robot by Multi-Agent and Fuzzy Technique
Kono, S., Kitamura, A.
Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE, pp.8169-8172, Aug. 2015.

製造と市場のサイクルにおける制約理論に基づく最適ペーシングシステム
平本竜一，北村章，大田住吉[*1]（[*1]京都学園大学）
システム制御情報学会論文誌，第 28 巻，2 号，pp.66-72，2015 年 2 月

RCGA とファジィ推論を用いた看護師の判断モデルの構築 ～入院患者のベッド上における転倒危険度の推定～
櫛田大輔，安藤泰正，北村章，深田美香
電気学会論文誌 C，第 135 巻，5 号，pp.498-504，2015 年 5 月

歩行者モデルを用いた電動車椅子の動的障害物回避
中野裕介，竹森史暁
Conference Digest of ROBOMECH2015，第 15 巻，2 号，p.63，2015 年 5 月

双腕型移動マニピュレータを用いた車椅子補助のための動的経路計画
村垣光基，竹森史暁
Conference Digest of ROBOMECH2015，第 15 巻，2 号，p.64，2015 年 5 月

簡易診断のための加速度センサを用いた睡眠中呼吸の計測と解析
中川剛毅，櫛田大輔，北村章
第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会，115-2，2015 年 5 月

ファジィ推論とアソシエーション分析による組立工程の不具合対策支援システム
濵本紘希，平尾勇樹，北村章，有田貴司[*1]（[*1](株)ジャパンディスプレイ）
第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会，145-5，2015 年 5 月

マルチエージェントシステムとファジィ契約ネットを用いた看護師と自律ロボットの協調型タスク割り当てシステム
河野真也，岡田美穂，北村章
第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会，356-2，2015 年 5 月

生産ノウハウを考慮したSVM と粒子フィルタによる対話型生産設備導入計画ガイダンスシステム
安川史苑，北村章
第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会，356-3，2015 年 5 月

EMG に基づく筋状態の定量的評価とリハビリテーションへの応用
上田晃嗣，櫛田大輔，青木隆尚，北村章
平成 27 年電気学会電子･情報･システム部門大会，GS2-7，pp.1101-1106，2015 年 8 月

医療従事者の経験則を考慮した知的な転倒予防システム
櫛田大輔
日本転倒予防学会誌，第 2 巻，2 号，p.40，2015 年 10 月

熟練看護師を対象とした転倒アセスメントスコアシートの重要項目抽出の試み
山﨑慎治，櫛田大輔，北村章，深田美香
日本転倒予防学会誌，第 2 巻，2 号，p.64，2015 年 10 月

対向二輪型アクティブキャスタを用いた移動ロボットによる車椅子の移動支援
村垣光基，竹森史暁，北村章，櫛田大輔
第 24 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集， pp.104-105，2015 年 11 月

オントロジーによる製造知識の体系化とベイジアンネットワークによる不具合原因探索支援システム
濵本紘希，北村章
第 24 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集， pp.164-165，2015 年 11 月

ビジョンセンサを用いた入院患者のベッド上における姿勢推定
吉田泰丘，櫛田大輔，北村章
第 24 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集， pp.150-151，2015 年 11 月

入院患者の転倒危険度推定のための看護師判断モデルに基づく知識抽出 ～転倒アセスメントスコア評価のデータマイニング～
山﨑慎治，櫛田大輔，北村章，深田美香
第 16 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(SI2015), 2A1-5, pp.1099-1103, 2015 年 12 月

無線 LAN の電界強度の方向依存性を利用した屋内位置推定方式の研究 ： 多方向依存性を考慮したシーンアナリシス（ITS 情報処理，一般） 各宮悠平、今宮秀晴、横田孝義，_電子情報通信学会技術研究報告．ITS 114(508), pp. 33-38, 2015-03-02

単眼カメラを用いた車両追跡と加速度制約条件を用いた車間距離推定方式の研究，
辻　和史，横田孝義，第１４回情報科学技術フォーラム，M-004，2015 年 9 月，情報処理学会

Wi-Fi の電界強度情報とその方向依存性を考慮した屋内位置推定手法の研究：アクセスポイント数による影響 今宮秀晴，横田孝義，第１４回情報科学技術フォーラム，M-010，2015 年 9 月，情報処理学会

割込需要による外乱を考慮した物流倉庫内の搬送経路最適化手法の研究　～ 反復的 GA による割込需要への適用 ～田村　翼，横田孝義，信学技報 115(366), pp. 37-42, 2015-12-17 電子情報通信学会

気圧センサとディジタル道路地図情報の融合による標高推定手法の開発 齊藤智一，横田孝義，電子情報通信学会技術研究報告 ITS 115(366), pp. 43-48, 2015-12-17 電子情報通信学会

主成分分析を用いた特徴空間内での無線 LAN 位置推定方式の検討　～ 特徴空間内のユークリッド距離による位置推定 ～
横田孝義，電子情報通信学会技術研究報告．ITS 115(365), pp.179-184, 2015-12-17

Automatic Human Tracking System using Localized Neighbor Node Calculation
Yotsumoto, T., Tanigawa, K., Tsuji, M., Takahashi, K., Kawamura, T., Sugahara, K.
Sensors & Transducers, Vol.194, No.11, pp.54-61, Nov. 2015.

Automatic Human Tracking System using Localization of Neighbor Node Calculation
Yotsumoto, T., Tanigawa, K., Tsuji, M., Takahashi, K., Kawamura, T., Sugahara, K.
The Ninth International Conference on Emerging Security Information, Systems and Technologies (SECURWARE 2015), pp.139-145, Aug. 2015.

Reduction of Neighbor Node Calculations for Automatic Human Tracking System
Tsuji, M., Yotsumoto, T., Takahashi, K., Tanigawa, K., Kawamura, T., Sugahara, K.
The Ninth International Conference on Emerging Security Information, Systems and Technologies (SECURWARE 2015), pp.154-159, Aug. 2015.

A Framework to Mitigate Debugging Difficulty on Agent Migration
Osaki, S., Higashino, M., Takahashi, K., Kawamura, T., Sugahara, K.
Proceedings of the 7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2015), pp.190-197, Jan. 2015.

強度行動障害のある人の支援を目的とした行動測定支援アプリケーションと情報共有支援システムの検討
東野 正幸[*1], 川村 尚生, 井上 雅彦[*2] ([*1] 産学・地域連携推進機構, [*2] 医学系研究科臨床心理学講座)
電子情報通信学会技術研究報告, Vol.114, No.497, pp.41-43, 2015 年 3 月

不愉快を用いた動機づけによる入力促進システム
吉田 塁，川上 鉄平，高橋 健一，川村 尚生，菅原 一孔

合同エージェントワークショップ＆シンポジウム 2015（JAWS-2015）, 2015 年 8 月

モバイルエージェントシステムのためのエージェント検索機能の提案
灘本 拓, 高橋 健一, 東野 正幸, 川村 尚生, 菅原 一孔
合同エージェントワークショップ＆シンポジウム 2015（JAWS-2015）, 2015 年 8 月

モバイルエージェントシステムのデバッグに関する研究の展望
東野 正幸, 灘本 拓, 高橋 健一, 川村 尚生, 菅原 一孔
合同エージェントワークショップ＆シンポジウム 2015（JAWS-2015）, pp.185-186, 2015 年 10 月

個人情報保護を目的としたフレームワークの提案
松永 崇秀, 高橋 健一, 川村 尚生, 菅原 一孔
コンピュータセキュリティシンポジウム 2015, 2015 年 10 月

バス乗車支援モバイルアプリケーションの構築に関する研究
吉田 真人, 川村 尚生, 菅原 一孔
電気・情報関連学会中国支部第 66 回連合大会講演論文集, 2015 年 10 月

多数のセンサと SVM を用いた家電の電源制御システム
橋本 知樹, 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 66 回連合大会講演論文集, 2015 年 10 月

多機能バス停およびコンテンツ管理アプリケーションの開発
森山 義隆, 川村 尚生, 菅原 一孔
電気・情報関連学会中国支部第 66 回連合大会講演論文集, 2015 年 10 月

プログラムの変換による個人情報の保護
松永 崇秀, 高橋 健一, 川村 尚生, 菅原 一孔
電気・情報関連学会中国支部第 66 回連合大会講演論文集, 2015 年 10 月

入力促進に対する動機づけの観点からの考察
吉田 塁, 川上 鉄平, 高橋 健一, 川村 尚生, 菅原 一孔
電気・情報関連学会中国支部第 66 回連合大会講演論文集, 2015 年 10 月

多機能コンセントシステムを用いた非可聴音を利用した部屋推定による省電力手法に関する研究
武田 真悟, 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 66 回連合大会講演論文集, 2015 年 10 月

Order Estimation of Japanese Paragraphs by Supervised Machine Learning and Various Textual Features
Murata, M., Ito, S., Tokuhisa, M., Ma, Q.* (*Ryukoku University)
Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, Vol. 5, No. 4, pp.247-255, Oct. 2015.

Deep Belief Network を用いた検索用語の予測
馬青*，谷河息吹*，村田真樹 （*龍谷大学）
自然言語処理(言語処理学会誌), Vol. 22，No. 4, pp.225-250, 2015 年 12 月.

クラスタリングを利用した語義曖昧性解消の誤り原因のタイプ分け
新納浩幸*1，村田真樹，白井清昭*2，福本文代*3，藤田早苗*4，佐々木稔*1， 古宮嘉那子*1，乾 孝司*5 （*1 茨城大学, *2 北陸先端科学技術大学院大学, *3 山梨大学，*4NTT，*5 筑波大学）
自然言語処理(言語処理学会誌), Vol. 22，No. 5, pp.319-362, 2015 年 12 月.

Machine Translation Method Based on Non-Compositional Semantics (Word-Level Pattern-Based MT)
Sakata, J., Murakami, J., Tokuhisa, M., Murata, M.
The 2015 Conference of the Pacific Association for Computational Linguistics (PACLING 2015), May. 2015.

One Touch Character: A Simplified Japanese Character Input Method for Mobile Computing
Higashida, M.*1, Ishida, T*1., Murakami, J., Oku, M.*2 (*1Kyoto University, *2NTT)
2015 International Conference on Culture and Computing, pp.119-126, Oct. 2015.

Levenshtein Distance を用いた Pattern Based SMT

力久剛士, 村上仁一, 徳久雅人
言語処理学会第 21 回年次大会, P1-21, pp.83-86, 2015 年 3 月.

名詞述語文の意味解析のためのパターン辞書の作成と運用
藤原竜樹, 徳久雅人, 村上仁一, 村田真樹
言語処理学会第 21 回年次大会, P1-30, pp.119-122, 2015 年 3 月.

ブログから観光開発案を分析する際の分析者間の比較
高原明日美, 徳久雅人, 村上仁一, 村田真樹
言語処理学会第 21 回年次大会, P2-9, pp.155-158, 2015 年 3 月.

ロジスティック回帰分析を用いたパターンに基づく統計翻訳
春野瑞季, 村上仁一, 徳久雅人
言語処理学会第 21 回年次大会, A1-1, pp.245-248, 2015 年 3 月.

多量の対訳句と少量の対訳文を用いた統計翻訳
池淵堅斗, 村上仁一, 徳久雅人
言語処理学会第 21 回年次大会, A5-1, pp.720-723, 2015 年 3 月.

モノリンガルデータを増加させた場合の統計翻訳の精度調査
善行佑介, 村上仁一, 徳久雅人
言語処理学会第 21 回年次大会, P4-17, pp.956-959, 2015 年 3 月.

対訳句と対訳文を用いた日本語文の語順変更の効果
畑中勇輝, 村上仁一, 徳久雅人
言語処理学会第 21 回年次大会, P4-18, pp.960-963, 2015 年 3 月.

冗長な文章の人手による分析
村田真樹, 徳久雅人, 馬青* （*龍谷大学）
言語処理学会第 21 回年次大会, P4-24, pp.984-987, 2015 年 3 月.

論文からの記載必要項目の抽出と文章作成支援
岡田拓真, 村田真樹, 徳久雅人, 馬青* （*龍谷大学）
言語処理学会第 21 回年次大会, P4-25, pp.988-991, 2015 年 3 月.

語義曖昧性解消の誤り分析
新納浩幸[*1], 白井清昭[*2], 村田真樹, 福本文代[*3], 藤田早苗[*4], 佐々木稔[*1], 古宮嘉那子[*1], 乾 孝司[*5] （[*1]茨城大学, [*2]北陸先端科学技術大学院大学, [*3]山梨大学, [*4]NTT, [*5]筑波大学）
言語処理学会第 21 回年次大会併設ワークショップ「自然言語処理におけるエラー分析」（兼：Project Next NLP 報告会）, pp.1-34, 2015 年 3 月.

観光開発の発案を支援するための文抽出
徳久雅人, 高原明日美, 村田真樹, 村上仁一
観光と情報, Vol.11, No.1, pp.35-44, 2015 年.

存在属性付き結合価パターンを用いた存在性解析の試み
徳久雅人
電子情報通信学会技術研究報告, 思考と言語, Vol.115, No.69, pp.19-24, 2015 年 6 月

観光地巡りを盛り上げるための観光地情報表示アプリの開発
徳久雅人, 沖本観月, 村田真樹, 村上仁一
第 12 回観光情報学会全国大会講演予稿集, pp.66-67, 2015 年 6 月

Improvement of Reliabilities of Regulations using a Hierarchical Structure in a Genetic Network
Kimura, S., Tokuhisa, M., Okada-hatakeyama, M
Proc. of the 2015 International Joint Conference on Neural Networks, pp.485-491, 2015.

Appearance-Based Gaze Estimation for Digital Signage Considering Head Pose
Yoshimura, H., Hori, M., Shimizu, T., Iwai, Y.
International Journal of Machine Learning and Computing, Vol. 5, No. 6, pp. 507-511, Dec. 2015

Multi-sensor-based Ambient Sensing System for the Estimation of Comfort/Discomfort to Lighting Condition During Desk Work
Yoshimizu, K., Takemura, N., Iwai, Y., Sato K.
Journal of Information Processing, Vol. 23, No. 6, pp. 776-783, 2015

Expression transmission using exaggerated animation for Elfoid

Hori, M., Tsuruda, Y., Yoshimura, H., Iwai Y.
Front. Psychol. 6:1219, Aug. 2015.

Evaluation and Fair Comparison of Human Tracking Methods with PTZ Cameras
Yildiz, A., Takemura, N., Iwai, Y., Sato, K.
Proc. Int'l Conf. on Human-Computer Interaction, Los-Angeles, USA, Aug. 2015

追随効果を用いた案内システムにおける肉体的・心理的負担の評価
牧村悠司，吉村宏紀，西山正志，岩井儀雄
IEEE 広島支部学生シンポジウム, pp. 219-222, 2015 年 11 月

実写アバタの動作に対する違和感の評価方法の提案
前田良輔，吉村宏紀，西山正志，岩井儀雄
IEEE 広島支部学生シンポジウム，pp. 200-203, 2015 年 11 月

低解像度顔認識のための解像度推定法の提案
尾原啓司，吉村宏紀，西山正志，岩井儀雄
IEEE 広島支部学生シンポジウム，pp. 468-471, 2015 年 11 月

実写アバタ生成に向けた部位毎の重心動揺の計測
宮内 翼，吉村 宏紀，西山 正志，岩井儀雄
IEEE 広島支部学生シンポジウム，pp. 464-467, 2015 年 11 月

画像認識の識別器と人間の視線方向変化との関連性の検証
松本陸，吉村宏紀，西山正志，岩井儀雄
IEEE 広島支部学生シンポジウム, pp. 209-212, 2015年11月

自然な実写アバタに向けた身体動揺の計測と再現
宮内翼，吉村宏紀，西山正志，岩井儀雄
HAIシンポジウム，pp. 317-324，2015年12月

密接距離で使用するロボットのためのアイコンタクト推定方法の提案
大野礼人，堀磨伊也，吉村宏紀，西山正志，岩井儀雄
第 18 回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2015), 2015 年 7 月

自動対話プレゼンテーションに向けた多人数ターンテイキング推定の提案
江良樹哉 ，堀磨伊也，吉村宏紀，西山正志，岩井儀雄
第18回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2015), 2015年7月

複数の明るさ可変背景モデルを用いた移動物体の抽出
豊田将志 ，堀磨伊也，吉村宏紀，西山正志，岩井儀雄
第18回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2015), 2015年7月

電気電子工学講座

環境配慮行動のためのモチベーティブ・コミュニケーションモデルにおける動機の内在化
白岩　史, 片平建史[*1], 饗庭絵里子[*2], 飛谷謙介[*1], 長田典子[*1], 藤巻志保[*3], 吉田　功[*3], 小村規夫[*3]
（[*1] 関西学院大学, [*2] 電気通信大学, [*3] 株式会社本田技術研究所）
電子情報通信学会論文誌 D, 第 J98-D 巻, 第 2 号, pp.300-308, 2015 年 2 月

心電図の波形を利用した脳波波形の抽出に関する試み
藤村喜久郎, 前垣義弘
第16回自己組織化マップ研究会2015講演論文集, SOM2015, pp.7-1 - 7-5, 2015 年 3 月

バイノーラル音響システムにおける車両接近方向の分類マップ
藤村喜久郎, 西岡謙
第 31 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, TC3-2, 2015 年 9 月

筋電からの情報を活用した脳波波形解析の試み −心電図の活用−
藤村喜久郎, 前垣義弘
第 19 回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, SOFT2014, A101, 2015 年 3 月

急性脳症の早期診断のための脳波波形解析の検討
内田裕, 藤村喜久郎, 前垣義弘, 中西功
第 20 回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, SOFT2015, S1-3, 2015 年 12 月

Improvement of Colorization-Based Coding using Optimization by Novel Colorization Matrix Construction and Adaptive Color Conversion
Mishiba, K., Yoshitome, T.
IEICE TRANS.INF and SYST. Vol.E98-D, No.11, pp.1943-1949, Nov. 2015.

Image Retargeting Method by Similarity Transformation, Cropping and Letterboxing Operators
Mishiba, K., Oyamada, Y., Kondo, K.
Proc. of IEEE Global Conference on Consumer Electronics 2015, pp.208-209, Oct. 2015.

Resolution Improvement of Point Dose Distribution in Intensity Modulated Radiation Therapy
Ono, Y., Mishiba, K., Oyamada, Y., Hirata, Y., Kondo, K.
Proc. of International Symposium on Communications and Information Technologies 2015, pp.137-140, Oct. 2015.

Exploiting Photogrammetric Targets for Industrial AR
Naik, H. [*1], Oyamada, Y., Keitler, P. [*1], Navab., N. [*2]
（[*1] EXTEND3D, [*2]Technical University of Munich）
Proc. of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), pp. 144-147, Oct., 2015.

Augmented Reality Visualization Fusion
Oyamada, Y.
International Display Workshop, pp. 1284-1286, Dec. 2015. (招待講演)

水中の微小発熱球周りの自然対流場の 3 次元温度分布の推定
三宅智洋, 角田直人[*1], 藤岡良太[*1], 近藤克哉, 有本英伸[*2], 山田幸生[*3]（[*1] 首都大, [*2] 産総研, [*3] 電通大）
日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集, H215(2pages), 2015 年 10 月.

近赤外吸収イメージング法を用いた中和反応界面近傍の濃度の計測
川嶋大介[*1], 角田直人[*1], 近藤克哉, 有本英伸[*2], 山田幸生[*3]（[*1] 首都大, [*2] 産総研, [*3] 電通大）
日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集, G221(2pages), 2015 年 10 月.

２眼画像の自己相似性を利用した鼻息像の生成
近藤克哉, 土井理恵子, 領家和男, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.114, no.496, pp.57-60, 2015 年 3 月.

Spherical FAST Corner Detector
Kitamura R., Li S., Nakanishi I.
Proc. of 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA2015), pp.

2597-2602, Aug. 2015

A Sequential Processing Model for Speech Separation Based on Auditory Scene Analysis
Nakanishi I., Hanada J.
Proc. of 2015 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2015), pp. 124-128, Nov. 2015

Brain Waves as Unconscious Biometrics towards Continuous Authentication - The Effects of Introducing PCA into Feature Extraction –
Nakanishi I., Yoshikawa T.
Proc. of 2015 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2015), pp. 422-425, Nov. 2015

手のひら伝搬信号を用いた個人認証　～ 多変量解析を用いた特徴抽出 ～
大串達，中西功
電子情報通信学会技術報告，BioX2015-2，pp.5-9，2015 年 6 月

離散球面画像における FAST の実現
北村理知，李仕剛，中西功
映像情報メディア学会技術報告，ME2015-71，pp. 21-26, 2015 年 6 月

全天周画像を用いた注視軌跡マップの作成
藤浦達也，李仕剛，中西功
第 18 回画像の認識・理解シンポジウム予稿集，pp. 1-2, 2015 年 7 月

聴覚情景分析に基づく音声分離の逐次処理モデルの提案
中西功，花田純一，馬場美咲
電子情報通信学会技術報告，SIS2015-16, pp.7-12，2015 年 9 月

手のひら伝搬信号認証における入力スペクトルの安定化と識別優位成分抽出に関する検討
大串達，中西功
第 5 回バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム予稿集，p. 78-79，2015 年 11 月

離散球面画像における FAST の実現
北村理知，李仕剛，中西功
第 17 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム講演論文集, pp. 456-459, 2015 年 11 月

全天周注視軌跡マップの作成
藤浦達也，李仕剛，中西功
第 17 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム講演論文集, pp. 460-463, 2015 年 11 月

手のひら伝搬信号を用いた個人認証 - 認証に有効な周波数成分の抽出 –
大串達，中西功
第 17 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム講演論文集, pp. 476-479, 2015 年 11 月

太陽電池と白炭電極を用いた電気透析による塩水の脱塩
中居康浩，西村亮，安東孝止，笠田洋文，舟木佑太，星野真男
太陽エネルギー，41 巻，4 号，pp. 51-56，2015 年 7 月

静電効果を用いた農薬散布の効率化
西村亮
電気学会パルスパワーおよび放電の農水系利用調査専門委員会編, 電気学会技術報告第 1350 号, pp. 23-24, 2015 年 11 月

研究所紹介　鳥取大学工学部附属先端融合研究センター
岸田悟
MRS-J, 第 27 巻, 第 2 号，pp.2-3，2015 年 2 月. (2015)2-3

Construction of Measurement Systems for Fatigue using Flicker Values
Naoki Fujiwara, Akihiro Tanaka, Ryouta Inoue, Kentaro Kinoshita, Satoru Kishida
2015 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), 2G-4, pp.426-430, 2015.

Development of MTF Measurement Algorithm for CT Images with High Noise by a Radial Edge Method
Kazuhiro Sawa, Yoshinori Takehana, Jo Mitsuzuka, Akihiro Tanaka, Kentaro Kinoshita, Satoru Kishida
2015 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), 2F-4, pp.397-400, 2015.

Ar ガスクラスターイオンビームによる $BaTiO_3$ 単結晶の表面清浄化と XPS 測定
關雅志，田中博美，片岡範行，岸田悟
Journal of Surface Analysis，第 22 巻，第 2 号，pp.103−109，2015 年．．

A Parameter Free Nurse Scheduling
Ohki, M.
Proc. of 2015 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), #15152, pp.1-7, Aug. 2015.

An Approach to Measure ``the Consensus Degree of a Purpose'' on a Group Decision Making
Ohki, M.
Proc. of 2015 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), #15053, pp.1-6, Aug. 2015.

ZnSe-based organic–inorganic hybrid structure ultraviolet avalanche photodiodes with long lifetime and its device integration
R. Inoue, T. Abe, T. Fujimoto. N. Ikadatsu, K. Tanaka, S. Uchida, A. Tazue, H. Kasada, K. Ando, and K. Ichino
Appl. Phys. Express, Vol.8, No.2, p. 22101, Jan. 2015

Room temperature ferromagnetism in conducting α-$(In_{1-x}Fe_x)_2O_3$ alloy film
K. Akaiwa, K. Kentaro, S. Fujita, E. Chikoidze, and Y. Dumont
Appl. Phys. Lett. Volume 106, Issue 6, pp 062405-1-4, February 2015

Characteristics of H-Shaped Fractal Antenna Having VO_x Absorber for Multi-Band Microbolometer
Takebe, K., Higashira, T., Takano, K., Miyashita, H., Lee, S.-S.
Proc. of 10th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE NEMS 2015), pp. 466-469, Apr. 7-11, Xi'an, China, 2015.

Tentative Bonding Effect for Maintaining Alignment Accuracy in Bonding Utilizing Thick SU8 as an Adhesive Material
Kondo, M., Matsuoka, N., Miyashita, H., Lee, S.-S.
Proc. of 10th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE NEMS 2015), pp. 487-490, Apr. 7-11, Xi'an, China, 2015.

Influence of Metal Resistivity on Transmittance of Checkerboard Patterns in Infrared Region
Higashira, T., Kageyama, T., Kashiwagi, K., Miyashita, H., Takano, K., Nakajima, M., Lee, S.-S.
Proc. of the 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2015), WS-3135894 (in CDROM 2 pages), Aug. 24-28, Hong Kong, China, 2015.

Simple Low Cost Fabrication Method of Microfluidic Device Using Polyimide as a Structure and Adhesive Material
Komiyama, R., Kondo, M., Miyashita, H., Miura, M., Lee, S.-S.
Proc. of the 6th Japan-China-Korea MEMS/NEMS Conference 2015, pp. 87-88, Sep. 23-25, Xi'an, China, 2015.

Reproducing Resistive Switching Effect by Soret and Fick Diffusion in Resistive Random Access Memory (ReRAM)
Kinoshita, K.., Koishi, R., Moriyama, T., Kawano, K., Miyashita, H., Lee, S.-S., Kishida, S.
Proc. of the 2015 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp.1166-1167, Sep. 27-30, Sapporo, Japan, 2015.

Fabrication and Performance Evaluation of Si-Based Micropreconcentrator for Cancer Biomarker Detection
Oyama, K., Miyashita, H., Lee, J.-O., Lee, S.-S.
Tech. Digest of the 17th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (microTAS 2015), pp. 817-819, Oct. 25-29, Gyeongju, Korea, 2015.

Design and Fabrication of a Micro Reactor Integrated with pH Electrodes and Micro Mixer for Nanophosphor Synthesis
Komiyama, R., Miyashita, H., Okura, H., Ishigaki, T., Kageyama, T., Ohmi, K., Lee, S.-S.
Tech. Digest of the 17th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life

Sciences (microTAS 2015), pp. 2035-2037,Oct. 25-29, Gyeongju, Korea, 2015.

A Microfluidic Device Fully Integrated with Three pH Sensing Electrodes and Passive Mixer for Nanoparticle Synthesis
Komiyama, R., Miyashita, H., Okura, H., Kageyama, T., Ohmi, K., Lee, S.-S.
Proc. of IEEE Sensors 2015, pp. 1176-1179, Nov. 1-4, Busan, Korea, 2015.

Trace Level VOC Gas Detection of Developed CNT Based Micropreconcentrator for Breath Analysis
Oyama, K., Komiyama, R., Miyashita, H., Lee, J.-O., Lee, S.-S.
Proc. of IEEE Sensors 2015, pp. 201-204, Nov. 1-4, Busan, Korea, 2015.

Turbidity Monitoring of Lake Water by Transmittance Measurement with a Simple Optical Setup
Komiyama, R., Kageyama, T., Miura, M., Miyashita, H. Lee, S.-S.
Proc. of IEEE Sensors 2015, pp. 1090-1093, Nov. 1-4, Busan, Korea, 2015.

ポリイミドを構造体兼接着剤として用いたマイクロ流体デバイスの作製法
小宮山　凌平，近藤　正大，宮下 英俊，李 相錫
第 62 回応用物理学会春季学術講演会，東海大学湘南キャンパス，2015

国際会議報告：IRMMW-THz2014 報告
李　相錫
電気学会論文誌 E（センサ・マイクロマシン部門誌），Vol. 135, No. 1, NL1_1, 2015.

国際会議報告：The 18th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS 2014) 報告
宮下　英俊[*1]（[*1]鳥取大学）
電気学会論文誌 E（センサ・マイクロマシン部門誌），Vol. 135, No. 2, NL2_1, 2015.

応用化学講座

Lipase-mediated Dynamic Kinetic Resolution (DKR) of Secondary Alcohols in the Presence of Zeolite Using an Ionic Liquid Solvent System.
Shimomura, K.; Harami, H.; Matsubara, Y.; Nokami, T.; Katada, N.; Itoh, T.
Catalysis Today, **2015**, Vol. 255, pp. 41-48, Dec. 2014

Switching the reaction pathways of electrochemically generated beta-haloalkoxy-sulfonium ions - synthesis of halohydrins and epoxides
Shimizu, A.*; Hayashi, R.*; Ashikari, Y.*; Nokami, T.; Yoshida, J.* (Kyoto Univ.)
Beilstein J. Org. Chem., **2015**, Vol. 11, pp. 242-248, Feb. 2015

Esterification of Carboxylic Acids with Alkyl Halides Using Electroreduction
Miyamoto, Y.*; Yamada, Y.*; Shimazaki, H.*; Shimada, K.*; Nokami, T.; Nishiwaki, K.*; Kashimufta, S.*; Matsumoto, K.* (*Kinki Univ.)
Electrochemistry, **2015**, Vol. 83, pp. 161-164, Mar. 2015

Automated Electrochemical Assembly of the Protected Potential TMG-chitotriomycin Precursor Based on Rational Optimization of the Carbohydrate Building Block.
Nokami, T.; Isoda, Y.; Sasaki, N.; Takaiso, A.; Hayase, S.; Itoh, T.; Shimizu, A.; Hayashi, R.; Yoshida, J.
Org. Lett., **2015**, Vol. 17, pp. 1525-1528, Mar. 2015

Development of n-Type Semiconductor Based on Cyclopentene or Cyclohexene-fused [C_{60}]-Fullerene Derivatives.
Yamane Y.; Sugawara K.; Nakamura, N.; Hayase, S.; Nokami,T.; Itoh, T.
J. Org. Chem. **2015**, Vol. 80, pp. 4638-4649, Apr. 2015

The β-Silyl Effect on the Memory of Chirality in Friedel-Crafts Alkylation Using Chiral α-Aryl Alcohols.
Nokami, T.; Yamane, Y.; Oshitani, S.; Kobayashi, J.; Matsui, S.; Nishihara, T.; Uno, H.; Hayase, S.; Itoh, T.
Org. Lett., **2015**, Vol. 17, pp. 3182-3185. Jun. 2015

Enhanced Stability of the HfO_2 Electrolyte and Reduced Working Voltage of a CB-RAM by an Ionic Liquid.
Harada, A.; Yamaoka, H.; Ogata, R.; Watanabe, K.; Kinoshita, K.; Kishida, S.; Nokami, T.; Itoh, T.
J. Mater. Chem. C, **2015**, Vol. 3, pp. 6966-6969, Jul. 2015

Design of Phosphonium Alkyl PEG Sulfate Ionic Liquids as a Coating Materials for Activation of *Burkholderia cepacia* Lipase.
Matsubara, Y.; Kadotani, S.; Nishihara, T.; Fukaya, Y.; Nokami, T.; Itoh, T.
Biotechnol. J. **2015**, Vol. 10, pp. 1944-1951. Oct. 2015

Copper Ion Containing Ionic Liquids Provides Improved Endurance and Switching Voltage Distributions of a CB-RAM.
Harada, A.; Yamaoka, H.; Watanabe, K.; Kinoshita, K.; Kishida, S.; Fukaya, Y.; Nokami, T.; Itoh, T.
Chem. Lett., **2015**, Vol. 44, pp. 1578-1580, Nov. 2015

Electrochemical Na-insertion/extraction properties of phosphorus electrodes in ionic liquid electrolytes
Shimizu, M.; Usui, H.; Yamane, K.; Sakata, T.; Nokami, T.; Itoh, T.; Sakaguchi, H.
Int. J. Electrochem. Sci. **2015**, Vol. 83, pp. 10132-10140, Dec. 2015

Chemical Glycosylations by Single Electron Transfer.
Nokami T.; Itoh, T.; Mong, K.-K.
Israel J. Chem. **2015**, Vol. 55, pp. 297-305. Apr. 2015

Chapter 5: Ionic liquid mediated activation of lipase-catalyzed reaction.
Itoh, T.
Ed. Handay, S. "Ionic Liquids-Current State of the Art", InTech, Croatia, pp. 121-137, Apr. 2015

イオン液体を用いたリグノセルロースの三成分分離技術(第２章セルロースのミクロフィブリル化,ナノファイバー化, 第８節)

伊藤敏幸
セルロースナノファイバーの調製，分散・複合化と製品応用-分離・解離技術/表面改質/凝集対策-，情報技術協会(東京), pp 171-180，2015 年 1 月

電解グリコシル化反応を利用したオリゴ糖自動合成システムの開発.
野上敏材，伊藤敏幸，吉田潤一
Electrochemistry **2015**, Vol. 83, pp. 472-476, Jun. 2015

電解グリコシル化
野上敏材
「糖鎖の新機能開発・応用ハンドブック~創薬・医療からヘルスケアまで～」第 4 編　監修 秋吉一成，エヌ・ティー・エス（東京）, pp. 337-338, 2015 年 8 月

Gallery「日本のイオン液体化学」
伊藤敏幸
化学と工業, **2015**, Vol. 68（No. 10）, pp. 910-911, Oct. 2015

Protective effect of chitin urocanate nanofibers against ultraviolet radiation
Ito, I., Yoneda, T., Omura, Y., Osaki, T., Ifuku, S., Saimoto, H., Azuma, K., Imagawa, T., Tsuka, T., Murahata, Y., Ito, N., Okamoto, Y., Minami, S.
Marine Drugs, Vol.13, pp.7463-7475, Dec. 2015.

Chitin nanofiber elucidates the elicitor activity of polymeric chitin in plants
Egusa, M., Matsui, H., Urakami, T., Okuda, S., Ifuku, S., Nakagami, H., Kaminaka, H.
Frontiers in Plant Science, Vol.6, pp.1098, Dec. 2015.

Characterization of chitosan nanofiber sheets for antifungal application.
Egusa, M., Iwamoto, R., Izawa, H., Morimoto, M., Saimoto, H., Kaminaka, H., Ifuku, S.
International Journal of Molecular Sciences, Vol.16, pp.26202-26210, Nov. 2015.

Surface-deacetylated chitin nano-fiber/hyaluronic acid composites as potential antioxidative compounds for use in extended-release matrix tablets
Tabuchi, R., Anraku, M., Ifuku, S., Ishiguro, T., Iohara, D., Hirayama, F.
International Journal of Molecular Sciences, 16, pp.24707-24717, 2015.

Biomineralization of calcium phosphate crystals on chitin nanofiber hydrogel for bone regeneration material
Kawata, M., Azuma, K., Izawa, H., Morimoto, M., Saimoto, H., Ifuku, S.
Carbohydrate Polymers, 136, pp. 964-969, 2016.

Bio-based wrinkled surfaces harnessed from biological design principles of wood and peroxidase activity
Izawa, H., Okuda, N., Ifuku, S., Morimoto, M., Saimoto, H., Rojas. O. J.
ChemSusChem, 8, pp. 3892-3896, 2015.

Effects of oral administration of chitin nanofiber on plasma metabolites and gut microorganisms
Azuma, K., Izumi, R., Kawata, M., Nagae, T., Osaki, T., Murahata, Y., Tsuka, T., Imagawa, T,. Ito, N., Okamoto, Y., Morimoto, M., Izawa, H., Saimoto, H., Ifuku, S.
International Journal of Molecular Sciences, 16, pp. 21931-21949, 2015.

Facile preparation of cyclodextrin-grafted chitosans and their conversion into nanoparticles for an anticancer drug delivery system
Izawa, H., Yamamoto, K., Yoshihashi, S., Ifuku, S., Morimoto, M., Saimoto, H.
Polymer Journal, 48, pp.203-207, 2016.

Effects of surface-deacetylated chitin nanofibers in an experimental model of hypercholesterolemia
Azuma, K., Nagae, T., Nagai, T., Izawa, H., Morimoto, M., Murahata, Y., Osaki, T., Tsuka, T., Imagawa, T., Ito, N., Okamoto, Y., Saimoto, H., Ifuku, S.
International Journal of Molecular Sciences, 16, pp.17445-17455, 2015.

Preparation of a protein-chitin nanofiber complex from crab shells and its application as a reinforcement filler or substrate for biomineralization
Ifuku, S., Urakami,T., Izawa, H., Morimoto, M., Saimoto H.

RSC Advances, 5, pp. 64196-64201, 2015.

Preparation of polybenzoxazole nanofibers by a downsizing process
Ifuku, S., Maeta, H., Izawa, H., Morimoto, M., Saimoto, H.
RSC Advances, 5, pp.35307-35310, 2015.

Bioactive gyroid scaffolds formed by sacrificial templating of nanocellulose and nanochitin hydrogels as instructive platforms for biomimetic tissue engineering
Torres-Rendon. J. G., Femmer. T., Laporte. L. D., Tigges. T., Gremse. F., Zafarnia. S., Lederle. W., Ifuku, Wessling. S. M., Hardy. J. G., Walther. A.
Advanced Materials, 27, pp.2989-2995, 2015.

Novel 1,8-naphthalimide derivative with an open space for an anion: uinique fluorescence behaviour depending on the binding anion's electrophilic property
Izawa, H., Nishino, S., Sumita, M., Akamatsu, M., Morihashi, K., Ifuku, S., Morimoto, M., Saimoto, H.
Chemical Communications, 51, pp.8596-8599, 2015.

Favorable effects of superficially deacetylated chitin nanofibrils on the wound healing process
Izumi, R., Komada, S., Ochi, K., Karasawa, L., Osaki,T,. Murahata, Y., Tsuka, T., Imagawa, T., Itoh, N., Okamoto, Y., Izawa H., Morimoto, M., Saimoto, H., Azuma, K., Ifuku, S.
Carbohydrate Polymers,123, pp.461-467, 2015.

Preparation of zwitterionically charged nanocrystals by surface TEMPO-mediated oxidation and partial deacetylation of alpha-chitin.
Ifuku, S., Hori, T., Izawa, H., Morimoto, M., Saimoto, H.
Carbohydrate Polymers, 122, pp.1-4, 2015.

Formation of elastic gels from surface-deacetylated chitin nanofibers reinforced with sulfobutyl ether □-cyclodextrin
Anraku, M., Iohara, D., Uekama, K., Ifuku, S., J. D. Pipkin, Hirayama, F.
Chemistry Letters, **44**, pp.285-287, 2015.

A green apporach to endow chitin nanofiber with fluorescence
Dutta, A. K., Izawa, H., Morimoto, M., Saimoto, H., Ifuku, S.
Journal of Chitin and Chitosan Science, 3, pp.53-56, 2015.

Effect of a silane coupling agent on the mechanical properties of a microfibrillated cellulose composite
Ifuku, S. Yano, H.
International Journal of Biological Macromolecules, 74, pp.428-432 .2015.

Biological adhesive based on carboxymethyl chitin derivatives and chitin nanofibers
Azuma, K., Nishihara, M., Shimizu, H., Itou, Y., Takashima, O., Osaki, T., Itoh, N., Imagawa, T., Murahata, Y. , Tsuka, T., Izawa, H., Ifuku, S., Minami, S., Saimoto, H., Okamoto, Y., Morimoto, M.
Biomaterials, 42, pp.20-29 ,2015.

Preparation of chitosan nanofibers from completely deacetylated chitosan powder by a downsizing process
Y. F. Aklog, A. K. Dutta, Izawa, H., Morimoto, M., Saimoto, H., Ifuku, S.
International Journal of Biological Macromolecules, 72, pp.1191-1195 ,2015.

Facile preparation of silver nanoparticles immobilized on chitin nanofiber surfaces to endow antifungal activities
Ifuku, S., Tsukiyama, Y., Yukawa, T., Egusa, M., Kaminaka, H., Izawa, H., Morimoto, M., Saimoto, H.
Carbohydrate Polymers, 117, pp.813-817 ,2015.

Facile preparation of surface *N*-halamine chitin nanofiber to endow antibacterial and antifungal activities
Dutta, A. K., Egusa, M., Kaminaka, H. Izawa, H., Morimoto, M., Saimoto, H., Ifuku, S. Carbohydrate Polymers, 115, pp.342-347, 2015.

Chitin, chitosan, and its derivatives for wound healing: old and new materials
Azuma, K., Izumi, R., Osaki, T, Ifuku, S., Morimoto, M., Saimoto, H., Minami, S., Okamoto, Y.
Journal of Functional Biomaterials, *Journal of* Functional Biomaterials, 6, pp.104-142 , 2015.

廃カニ殻由来の新繊維「キチンナノファイバー」
伊福伸介
コンバーテック，１２月号, pp.92-94 2015.

キチンナノファイバーの製造開発とその実用化に向けて（下）
伊福伸介
加工技術，１１月号, pp.616-620 , 2015.

キチンナノファイバーの製造とその誘導体の合成
伊福伸介
キチン・キトサン研究, 21, pp.204-208, 2015.

キチンナノファイバーの製造開発とその実用化に向けて（上）
伊福伸介
加工技術，１０月号, pp.25-30,2015.

カニ殻由来の新素材「キチンナノファイバー」の製造と実用化に向けた取り組み
伊福伸介
不織布情報，９月号, pp.7-11,2015.

カニ殻由来の新繊維「キチンナノファイバー」を配合した透明シート
伊福伸介
ウェブ・ジャーナル，８月号, pp.9-11,2015.

カニ殻由来の新繊維「キチンナノファイバー」の補強繊維としての応用
伊福伸介
マテリアルステージ, 15, pp.33-36, 2015.

カニ殻由来の新繊維「キチンナノファイバー」の製造とその利用開発
伊福伸介
化学と生物, 53, pp473-477, 2015.

カニ殻由来の機能性素材「キチンナノファイバー」の製造と応用
伊福伸介
機能材料, 35, pp.17-23, 2015.

キチンナノフィバーの機能性食品への応用
東和生，大崎智弘，岡本芳晴，斎本博之，伊福伸介
New Food Industry, 57, pp.7-13, 2015.

廃カニ殻由来の新繊維「マリンナノファイバー」の製造とその利用開
伊福伸介
食品と開発, 50, pp77-79, 2015.

キチンナノファイバー添加小麦粉による製パン性の向上
田中裕之，江草真由美，竹村圭弘，岩田侑香里，永江知音，伊福伸介，上中弘典
日本食品科学工学会誌，第 63 巻，pp.18-24，2015 年

第八章　キチン・キトサンナノファイバーを用いた抗菌材料
伊福伸介
抗菌技術と市場動向, pp.10-108, 2015

機能性化粧品素材—素材開発と安全性—、第五章、カニ殻由来の機能性素材「キチンナノファイバー」の製造と美容効果
伊福伸介
pp.143-149, 2015. SBN978-4-7813-1145-6

糖鎖の新機能開発・応用ハンドブック 創薬・医療から食品開発まで、第二章、第三節キチンナノファイバー
伊福伸介
pp.560-562, 2015. ISBN978-4-86043-409-0

セルロースナノファイバーの調製、分散・複合化と製品応用、Chapter 2: キチンナノファイバーの単離技術と利用開発
伊福伸介
pp.185-188, 2015. ISBN:978-4-86104-566-0

Formation and Field-assisted Dissolution of Anodic Films on Iron in Fluoride-containing Organic Electrolyte
Shahzad, K[*1]., Tsuji, E., Aoki, Y[*1]., Nagata, S[*2]., Habazaki, H[*1]. ([*1]Hokkaido University, [*2]Tohoku University)
Electrochim. Acta, Vol.151, pp.363-369, 2015.

Highly Durable Platelet Carbon Nanofiber-Supported Platinum Catalysts for the Oxygen Reduction Reaction
Tsuji, E., Yamasaki, T[*1]., Aoki, Y[*1]., Park, S.G[*2]., Shimizu, K[*3]., Habazaki, H[*1]. ([*1]Hokkaido University, [*2]Chungbuk National University, [*3]i-SEM Laboratory)
Carbon, Vol.87, pp.1-9, 2015.

Corrosion Protection of Iron Using Porous Anodic

Oxide/Conducting Polymer Composite Coatings
Konno, Y*., Tsuji, E., Aoki, Y*., Ohtsuka, T*., Habazaki, H*. (*Hokkaido University)
Faraday Discuss., Vol.180, pp.479-493, 2015.

Growth of Barrier-type Anodic Films on Magnesium in Ethylene Glycol Electrolytes Containing Fluoride and Water
Habazaki, H*1., Kataoka, F*1., Shahzad, K*1., Tsuji, E., Yamasaki, T*1., Aoki, Y*1., Nagata, S*2., Skeldon, P*3., Thompson, G.E.*3., (*1Hokkaido University, *2Tohoku University, *3 The University of Manchester)
Electrochim. Acta, Vol.179, pp.402-410, 2015.

Redox-induced Proton Insertion and Desertion of Zircon-type Neodymium Chromate(V)
Aoki, Y*., Kuroda, K*., Tsuji, E., Habazaki, H*. (*Hokkaido University)
Solid State Ionics, Vol.285, pp.175-179, 2015.

Formation of Self-Organized Porous Anodic Films on Iron and Stainless Steel
Habazaki, H*., Shahzad, K*., Hiraga, T*., Tsuji, E., Aoki, Y*. (*Hokkaido University)
ECS Transactions, Vol.69, pp.211-223, 2015.

GDOES Depth Profile Analysis of Interfacial Enrichment of Copper during Anodizing of Al-Cu Alloy
Habazaki, H*1., Uemura, M*2.., Fushimi, K*1., Tsuji, E., Aoki, Y*1., Nagata, S*2. (*1Hokkaido University, *2Tohoku University)
Journal of The Surface Finishing Society Japan, Vol.66, pp.670-672, 2015.

Characterization of Corrosion-resistant, Nanometer-thick, Layer-by-layer Aluminosilicate Coatings Prepared on Stainless Steel
Habazaki, H*1., Kimura, T*1., Aoki, Y*1., Tsuji, E., Yano, Y*2., Shimizu, K*3., Hassel, A.W*4. (*1Hokkaido University, *2JFE Steel Corporation, *3i-SEM Laboratory, *4Johannes Kepler University Linz)
Electrochim. Acta, Vol.201, pp.311-319, 2015.

Lipase-mediated Dynamic Kinetic Resolution (DKR) of Secondary Alcohols in the Presence of Zeolite Using an Ionic Liquid Solvent System
Shimomura, K., Harami, H., Matsubara, Y., Nokami, T., Katada, N., Itoh, T.
Catal. Today, Vol.255, pp.41 – 48, 2015.

Relationship between Activation Energy and Pre-exponential Factor Normalized by Number of Brønsted Acid Sites in Cracking of Short Chain Alkanes on Zeolites
Katada, N., Sota, S., Morishita, N., Okumura, K*1., Niwa, M*2. (*1Kogakuin University, *2Nagoya Industrial Science Research Institute)
Catal. Sci. Technol., Vol.5, pp.1864 – 1869, 2015.

Assignments of Bending Vibrations of Ammonia Adsorbed on Surfaces of Metal Oxides
Suganuma, S., Murakami, Y., Ohyama, J., Torikai, T*1., Okumura, K*2., Katada, N. (*1MicrotracBEL Corp., *2 Kogakuin University)
Catal. Lett., Vol.145, (10) pp.1904 – 1912, 2015.

参照触媒利用の手引第６版で広がるデータの世界
片田直伸
触媒, 第 57 巻, 3 号 pp.174 – 180, 2015 年.

Catalytic Liquid-phases Oxidation of Acetaldehyde to Acetic Acid over a Pt/CeO_2-ZrO_2-SnO_2/γ-Alumina Catalyst
Choi, P.-G., Ohno T., Masui T., Imanaka, N.
J. Environ. Sci., Vol.36, pp.63-66, Oct. 2015.

Novel Environment-friendly Green Pigments for Over-glazed Decoration of Arita Ware
Masui, T. Shiraishi, A., Nakado, H., Takeuchi, N., Wendusu, Imanaka, N.
J. Jpn. Soc. Colour Mater., Vol.88, pp.203-207, July 2015.

Selective Liquid Phase Oxidation of Cyclohexane over Pt/CeO_2-ZrO_2-SnO_2/SiO_2 Catalysts with Molecular Oxygen
Imanaka, N., Masui, T., Jyoko K.
J. Adv. Ceram., Vol.4, pp.111-117, June 2015.

Novel Environment Friendly Inorganic Red Pigments Based on $Bi_4V_2O_{11}$
Wendusu, Shiraishi, A., Takeuchi, N., Masui, T., Imanaka, N.
RSC Advances, Vol.5, pp.44886-44894, May 2015.

Improvement of Toluene Oxidation Catalysis by Cu Doping into Co_3O_4 in $Pt/Co_3O_4/CeO_2$-ZrO_2-SnO_2/γ-Al_2O_3 Catalysts
Masui, T., Kamata, T., Fukuhara, N., Imanaka, N.
Bull. Chem. Soc. Jpn., Vol.88, No.5, pp.746-751, May 2015.

Aspects of Rare Earth Oxides Affecting Direct NO Decomposition Catalysis
Tsujimoto, S., Masui, T., Imanaka, N.
Eur. J. Inorg. Chem., 2015, pp.1524-1528, Mar. 2015.

Direct NO Decomposition Over C-type Cubic Y_2O_3-Pr_6O_{11}-Eu_2O_3 Solid Solutions
Masui, T., Uejima, S., Tsujimoto, S., Nagai, R., Imanaka, N.
Catal. Today, Vol.242, Part B, pp.338-342, Mar. 2015.

Novel Environmentally Friendly Inorganic Red Pigments Based on Calcium Bismuth Oxides
Wendusu, Yoshida, T., Masui, T., Imanaka, N.
J. Adv. Ceram., Vol.4, pp.39-45, Mar. 2015.

Catalytic Liquid Phase Oxidation of 1,4-dioxane Over a Pt/CeO_2-ZrO_2-Bi_2O_3/SBA-16 Catalyst
Choi, P.-G., Ohno, T., Fukuhara, N., Masui, T., Imanaka, N.
J. Adv. Ceram., Vol.4, pp.71-75. Mar. 2015.

Novel Environment-friendly Green Pigments Based on Rare-earth Cuprate
Masui, T., Takeuchi, N., Nakado, H., Imanaka, N.
Dyes Pigm., Vol.113, pp.336-340, Feb. 2015.

Analysis of the Deterioration Mechanism of Si Electrode as a Li-Ion Battery Anode Using Raman Microspectroscopy
Shimizu, M., Usui, H., Suzumura, T., Sakaguchi, H. J. Phys. Chem. C, Vol.119, No.6, pp.2975−2982, Jan. 2015.

Nb-Doped Rutile TiO_2: a Potential Anode Material for Na-Ion Battery
Usui, H., Yoshioka, S., Wasada, K., Shimizu, M., Sakaguchi, H., ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol.7, No.12, pp.6567−6573, Mar. 2015.

Electrochemical behavior of SiO as an anode material for Na-ion battery
Shimizu, M., Usui, H., Fujiwara, K., Yamane, K., Sakaguchi, H., J. Alloys Compd., Vol.640, pp.440−443, Mar. 2015.

Silicon-based Anodes and Optimized Interface between Electrodes and Electrolytes for Next Generation Lithium-Ion Battery
Usui, H., Narita, M., Fujita, Y., Sakaguchi, H., J. Surf. Sci. Soc. Jpn., Vol.36, No.7, pp.334−338, Jul. 2015

Effect of Film-forming Additive on Electrochemical Performance of Silicon Negative-Electrode in Lithium-Ion Batteries
Domi, Y., Usui, H., Shimizu, M., Miwa, K., Sakaguchi, H., Int. J. Electrochem. Sci., Vol.10, No.11, pp.9678−9686, Sep. 2015.

Electrochemical Na-insertion/extraction properties of Sn-P anodes
Usui, H., Sakata, T., Shimizu, M., Sakaguchi, H., Electrochemistry, Vol.83, No.10, pp.810−812, Oct. 2015.

Electrochemical Na-insertion/extraction properties of phosphorus electrodes in ionic liquid electrolytes
Shimizu, M., Usui, H., Yamane, K., Sakata, T., Nokami, T., Itoh, T., Sakaguchi, H., Int. J. Electrochem. Sci., Vol.10, No.12, pp.10132−10144, Dec. 2015.

酸化物系負極材料の研究開発
薄井洋行，坂口裕樹，ナトリウムイオン二次電池の開発と最新技術，第 1 編第 6 章，技術教育出版社，pp.86−98，2015 年 11 月

ナトリウム貯蔵性化合物の創製とその二次電池負極への応用
薄井洋行，坂口裕樹，FB テクニカルニュース，古河電池，71 号，pp.1−8，2015 年 11 月

Self-assembled Artificial Viral Capsid Decorated with Gold Nanoparticles
Matsuura, K., Ueno, G., Fujita S.
Polymer J., Vol.47, No.2, pp.146-151, Feb. 2015.

A Photoinduced Growth System of Peptide Nanofibres addressed by DNA Hybridization

Furutani, M., Uemura, A., Shigenaga, A.*, Komiya, C.*, Otaka, A.*, Matsuura K. (*Tokushima University)
Chem. Commun., Vol.51, No.38, pp.8020-8022, April 2015.

Encapsulation of Guest Materials into Artificial Viral Capsids self-assembled from Viral Peptide
Matsuura, K., Fujita S.
Peptide Science 2015 ed. by Hojo, H., Inazu, T., Katayama H., The Japanese Peptide Society, pp. 87-88, 2015.

ウイルス由来ペプチドから自己集合したナノマテリアルの創製
松浦和則
化学工業，第 66 巻，4 号，pp.245-250，2015 年 4 月

ウイルス由来ペプチドの自己集合によるナノカプセル
松浦和則
DDS キャリア作成プロトコル集，丸山一雄 監修，シーエムシー出版，pp.139-148, 2015.

自己組織性人工ウイルス殻の創製
松浦和則
自己組織化マテリアルのフロンティア　次世代を担う研究者による提案ー未来を創るエキゾチック自己組織化戦略，編集代表 中西尚志，フロンティア出版，pp.1-8, 2015.

ペプチドの自己集合によるウイルス様ナノカプセルの構築
松浦和則
化学と工業、第 68 巻，2 号，p.158, 2015.

支部便り　中国四国支部　第 3 回エキゾチック自己組織化材料シンポジウム
松浦和則
化学と工業、第 68 巻，3 号，p.281, 2015.

支部便り　中国四国支部　おもしろワクワク化学の世界 2015 鳥取化学展
松浦和則
化学と工業、第 68 巻，113 号，p.1049, 2015.

Facile Morphological Control of Fluorescent Nano/Microstructures via Self-Assembly and Phase Separation of Trigonal Azobenzenes Showing Aggregation-Induced Emission Enhancement In Polymer Matrices
Han, M., Takeoka, Y*., Seki, T*. (*Nagoya University)
J. Mater. Chem. C, Vol.3, No.16, pp.4093-4098. March 2015.

Elucidation of Isomerization Pathways of a Single Azobenzene Derivative Using an STM
Kazuma, E*1., Han, M*2,3., Jung, J*1., Oh, J*1., Seki, T*3., Kim, Y*1. (*1RIKEN, *2Tottori University, *3Nagoya University)
J. Phys. Chem. Lett., Vol.6, No.21, pp.4239-4243. October 2015.

Synthesis of 7-Alkyl-6-amino-7*H*-pyrrolo[2,3-*d*]pyrimidine-6-carbonitriles by the Copper-Catalyzed Reaction of 4-(Alkylamino)-5-iodopyrimidines with Propanedinitrile
Kobayashi, K., Nakazawa, K., Yuba, S., Hiyoshi, H*., Umezu, K*. (*Ihara Chemical Industry Co., Ltd.)
Heterocycles, Vol.90, No.1, pp.216-225, Jan. 2015.

Synthesis of 6-Aminoindolo[2,1-*a*]isoquinoline-5-carbonitriles by the Cu-Catalyzed Reaction of 2-(2-Bromophenyl)-1*H*-indoles with $CH_2(CN)_2$
Kobayashi, K., Ezaki, K., Hanioka, D., Nozawa, I.
Helv. Chim. Acta, Vol.98, No.2, pp.179-183, Feb. 2015.

One-Pot Synthesis of 3-Acetyl-2-aryl-3,4-dihydroquinazolines from *N*-[2-(Azidomethyl)-phenyl]benzamides Utilizing Intramolecular Aza-*Wittig* Reaction
Kobayashi, K., Matsumoto, N., Nagashima, M., Inouchi, H.
Helv. Chim. Acta, Vol.98, No.2, pp.184-190, Feb. 2015.

Synthesis of *N*-Substituted (*Z*)-3-Arylbenzo-[*c*]thiophen-1(3*H*)-imines by the Reaction of 1-[Aryl(methoxy)methyl]-2-lithiobenzenes with Isothiocyanates Followed by Acid-Mediated Cyclization
Kobayashi, K., Shigemura, Y., Ezaki, Y.
Heterocycles, Vol.91, No.3, pp.526-536, Mar. 2015.

A Facile Synthesis of 1-Substituted 3-Alkoxy-1*H*-isoindoles Based on the Reaction of 2-(Dialkoxymethyl)phenyllithiums with Nitriles, Followed by Acid-Catalyzed Cyclization
Kuroda, M., Kobayashi, K.
Helv. Chim. Acta, Vol.98, No.3, pp.279-286, Mar. 2015.

One-Pot Synthesis of 3-Alkoxy-2,3-dihydro-1*H*-isoindol-1-ones by the Reactions of 2-(Azidomethyl)benzoates with NaH
Kobayashi, K., Chikazawa, Y., Ezaki, K.
Helv. Chim. Acta, Vol.98, No.5, pp.604-610, May 2015.

Two-Step Synthesis of 5-Hydroxy-5,7-dihydro-6*H*-pyrrolo[2,3-*d*]pyrimidin-6-one Derivatives from 4-Chloro-6-methoxy-2-(methylsulfanyl)pyrimidine
Kobayashi, K., Ono, R., Yuba, S., Hiyoshi, H*., Umezu, K*. (*Ihara Chemical Industry Co., Ltd.)
Heterocycles, Vol.91, No.6, pp.1177-1185, Jun. 2015.

Synthesis of 3-substituted 2-bromoquinolines utilizing 2-bromo-3-lithioquinolines generated by the reaction of 2-(2,2-dibromoethenyl)phenyl isocyanides with butyllithium
Kobayashi, K., Nozawa, I.
Tetrahedron, Vol.71, No.28, pp.4575-4670, Jul. 2015.

Synthesis of 10-Substituted Pyrido[2,3-*b*][1,8]-naphthyridin-5(10*H*)-ones (Anthyridin-5(10*H*)-ones) Based on the Reaction of Bis(2-chloropyridin-2-yl)methanone with Primary Amines
Kobayashi, K., Komatsu, T., Yuba, S., Chikazawa, Y., Tanmatsu, M.
Heterocycles, Vol.91, No.7, pp.1439-1444, Jul. 2015.

Synthesis of 1,3-Dihydro-3-oxo-2-benzofuran-1-carboxylates *via* Intramolecular Cyclization of 2-[2-(Dimethoxymethyl)phenyl]-2-hydroxyalkanoates Followed by Oxidation
Kobayashi, K., Kuroda, M., Shigemura, Y.
Helv. Chim. Acta, Vol.98, No.10, pp.1364-1371, Oct. 2015.

生物応用工学講座

Crystal structures of apo-DszC and FMN-bound DszC from *Rhodococcus erythropolis* D-1
Gua, L., Lee, W. C., Wang, S., Ohshiro, T., Izumi, Y., Ohtsuka, J., Tanokura, M. FEBS J., Vol.282, pp.3126-3135, 2015.

Unique plasmids generated via pUC replicon mutagenesis in an error-prone thermophile derived from *Geobacillus kaustophilus* HTA426
Kobayashi, J., Tanabiki, M., Doi, S., Kondo, A., Ohshiro, T., Suzuki, H. Appl. Environ. Microbiol. Vol.81, pp.7625-7632, 2015.

Thermoadaptation-directed evolution of chloramphenicol acetyltransferase in an error-prone thermophile using improved procedures.
Kobayashi, J., Furukawa, M., Ohshiro, T., Suzuki, H. Appl. Microbiol. Biotechnol. Vol.99, 5563-5572, 2015.

Characterization of *Lactobacillus salivarius* alanine racemase: short-chain carboxylate-activation and the role of A131
Kobayashi, J. Yukimoto, J., Shimizu, Y., Ohmori, T., Suzuki, H., Doi, K., Ohshima, T. SpringerPlus Vol.4, pp.639, 2015.

Thermoadaptation-directed enzyme evolution in an error-prone thermophile derived from *Geobacillus kaustophilus* HTA426
Suzuki, H., Kobayashi, J., Wada, K., Furukawa, M., Doi, K. Appl. Environ. Microbiol. Vol.81, pp.149-158, 2015.

Polyamino acid display on cell surfaces enhances salt and alcohol tolerance of *Escherichia coli*
Suzuki, H., Ishii, J., Kondo, A., Yoshida, K. Biotechnol. Lett. Vol.37, pp.429-435, 2015.

Ultrasonication-dependent formation and degradation of α-synuclein amyloid fibrils
Yagi, H., Mizuno, A., So, M., Hirano, M., Adachi, M., Akazawa-Ogawa, Y., Hagihara, Y., Ikenoue, T., Lee, Y., Kawata, Y., Goto, Y.
Biochim. Biophys. Acta/Proteins and Proteomics, Vol.1854, No.3. 209-217, 2015.

Effects of C-terminal truncation of chaperonin GroEL on the yield of in-cage folding of the green fluorescent protein
Ishino, S., Kawata, Y., Taguchi, H., Kajimura, N., Matsuzaki, K., Hoshino, M.
J. Biol. Chem., Vol.290, No.24. 15042-15051, 2015.

Cryogenic coherent X-ray diffraction imaging for biological non-crystalline particles using the KOTOBUKI-1 diffraction apparatus at SACLA
Oroguchi, T., Sekiguchi, Y., Kobayashi, A., Masaki, Y., Fukuda, A., Hashimoto, S., Nakasako, M., Ichikawa, Y., Kurumizaka, H., Shimizu, M., Inui, Y., Matsunaga, S., Kato, T., Namba, K., Yamaguchi, K., Kuwata, K., Kameda, H., Fukui, N., Kawata, Y., Kameshima, T., Takayama, Y., Yonekura, K., Yamamoto, M.
J. Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, Vol.48, No.18, 184003, 2015.

書評「ヴォート基礎生化学第４版」
河田康志
生化学，87 巻，1 号，pp.156-157, 2015 年 1 月

Intermolecular Reductive Coupling of Esters with Benzophenones by Low-valent Titanium: Synthesis of Diarylmethyl Ketones Revisited
Kise, N., Sakurai, T.
J. Org. Chem., Vol.80, No.7, pp.3496-3503, Apr. 2015.

Electroreductive Coupling of 1,3-Dimethyluracils with Aromatic Ketones: Synthesis of 6-Substituted 1,3-Dimethyluracils
Kise, N., Miyamoto, H., Hamada, Y., Sakurai, T.
Tetrahedron Lett., Vol.56, No.31, pp.4599-4602, Jul. 2015.

Complete Enzymatic Oxidation of Methanol to Carbon Dioxide: Towards More Eco-Efficient Regeneration System for Reduced Nicotinamide Cofactors, (VIP: Very Important Publication)
Kara, S*, Schrittwieser, J.H.*, Gargiulo,S.*, Ni, Y.*, Yanase, H., Opperman, D.J.*, Berkel, W.J.H.*, and Hollmanna, F.* (* Delft University of Technology)

Adv. Synth. Catal, Vo.357, pp.1687-1691. Mar. 2015

Peroxydase-Catalyzed Oxyfunctionalization Reactions Promote by the Complete Oxidation of Methanol,
Ni,Y.*, F-Fueyo, E.*, Baraibar, A.G.*, Ullrich, R.*, Hofrichter, M.*, Yanase, H., Alcalde, M.*, Berkel,W.J.H.*, and Hollmann, F.* (* Delft University of Technology)
Angew. Chem.,16, DOI:10.1002/anie.201507881, Nov. 2015.,

高速発酵細菌の利用による木質バイオマスの高効率同時糖化並行発酵
築瀬英司, 渡辺隆司* (* 京都大学・生存圏)
BIO INDUSTRY, Vol.32, No.5, pp.10-17, 2015 年 5 月

組換え微生物によるカロテノイド生産
原田尚志、小島基、鈴木宗典、金本浩介
日本生物工学会誌、第 93　巻第 7 号、pp. 397-402, 2015 年 7 月

The crystal structure of heme acquisition system A from Yersinia pseudotuberculosis (HasAypt): Roles of the axial ligand Tyr75 and two distal arginines in heme binding
Kanadani, M., Sato, T., Hino, T., Nagano, S., Ozaki, S.-I.
J. Inorg. Biochem. Vol. 151, pp. 26-33, Oct. 2015

Expression, purification, crystallization of the human adiponectin receptors, AdipoR1 and AdipoR2
Tanabe, H., Motoyama, K., Ikeda, M., Wakiyama, M., Terada, T., Ohsawa, N., Hosaka, T., Hato, M., Fujii, Y., Nakamura, Y., Ogasawara, S., Hino, T., Murata, T., Iwata, S., Okada-Iwabu, M., Iwabu, M., Hirata, K., Kawano, Y., Yamamoto, M., Kimura-Someya, T., Shirouzu, M., Yamauchi, T., Kadowaki, T., Yokoyama S.
J. Struct. Funct. Genomics Vol. 16, pp. 11-23, Mar. 2015

Crystal structures of the human adiponectin receptors
Tanabe, H., Fujii, Y., Okada-Iwabu, M., Iwabu, M., Nakamura, Y., Hosaka, T., Motoyama, K., Ikeda, M., Wakiyama, M., Terada, T., Ohsawa, N., Hato, M., Ogasawara, S., Hino, T., Murata, T., Iwata, S., Hirata, K., Kawano, Y., Yamamoto, M., Kimura-Someya, T., Shirouzu, M., Yamauchi, T., Kadowaki, T., Yokoyama S.
Nature Vol. 520, pp. 312-316, Apr. 2015

Structure and mechanism of the mammalian fructose transporter GLUT5
Nomura, N., Verdon, G., Kang, H.J., Shimamura, T., Nomura, Y., Sonoda, Y., Hussien, S.A., Qureshi, A., Coincon, M., Sato, Y., Abe, H., Nakada-Nakura, Y., Hino, T., Arakawa, T., Kusano-Arai, O., Iwanari, H., Murata, T., Kobayashi, T., Hamakubo, T., Kasahara, M., Iwata, S.
Nature Vol. 526, pp. 397-401, Oct. 2015

Crystal structure of the anion exchanger domain of human erythrocyte Band 3
Arakawa, T., Yurugi- Kobayashi, T., Alguel, Y., Iwanari, H., Hatae, H., Iwata, M., Abe, Y., Hino, T., Ikeda-Suno, C., Kuma, H., Kang, D., Murata, T., Hamakubo, T., Cameron, A.D., Kobayashi, T., Hamasaki, N., Iwata, S.
Science Vol. 350, pp. 680-684, Nov. 2015

土木工学講座

Simplified Rocking Model of Unanchored Cylindrical Tank Including Baseplate Uplift and Cross Sectional Deformation of Tank Shell due to Seismic Load
Kobayashi, N*., Tashita, T*., Takizawa, S*., Taniguchi, T. (* Aoyama Gakuin University)
ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 8: Seismic Engineering, ASME, Paper No. PVP2015-45082, pp. V008T08A027-; 9 pages, Jul. 2015.

Approximation of Uplift of Flat-Bottom Cylindrical Tanks and Effects of Out-of-Plane Deformation of Cylindrical Shell on it
Taniguchi, T., Nakashima, T*[1]., Okui, D*[2]., (*[1] JIP Techno Science Corporation, *[2] Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)
ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, Vol. 8: Seismic Engineering, ASME, Paper No. PVP2015-45083, pp. V008T08A011-; 6 pages, Jul. 2015.

平板の動的応答に着目したコンクリートの内部水平ひび割れ検出に関する基礎的研究
中山昭二*, 谷口朋代, 小野祐輔（*（株）ソーキ）
コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集，第 15 巻，pp.235-240，2015 年 10 月

PSO を用いたレイリー波分散曲線のインバージョン
小野祐輔
土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71，No.4，pp.I_846-I_854，2015 年 10 月

2008 年岩手・宮城内陸地震における荒砥沢地すべりの解析シミュレーション
嶋中貴史*，小野祐輔，竹澤麻衣*，野畑拓也*，酒井久和*（*法政大学）
土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71，No.4，p.I_846-I_854，2015 年 10 月

高山町家の構造的特長を生かした耐震補強設計法の開発
佐藤英佑*，向坊恭介，鈴木祥之*（*立命館大学）
歴史都市防災論文集，第 9 巻, pp.115-122, 2015 年 7 月

石場建てを考慮した岐阜県高山市伝統構法建物の 3 次元地震応答解析
清水一史*[1]，村田晶*[1]，吉富信太*[2]，向坊恭介（*[1] 金沢大学，*[2] 立命館大学）
歴史都市防災論文集，第 9 巻, pp.123-126, 2015 年 7 月

環境水理学
矢島啓（分担執筆，第 3 章主査）
土木学会水工学委員会環境水理部会，土木学会，丸善，pp.55-99，2015 年 3 月

ダム貯水池における水温予測精度向上のための放射推定
矢島啓，山本茂友
土木学会論文集 B1（水工学），第 71 巻，4 号，pp.I_775-I_780，2015 年 2 月

利根川上流域を対象とした水蒸気フラックスの最大化による可能最大降水量(PMP)の推定，
橋本健*[1]，矢島啓（*[1] パシフィックコンサルタンツ株式会社）
土木学会論文集 B1（水工学），第 71 巻，4 号，pp.I_487-I_492，2015 年 2 月

河床変動解析による矢田川弁天淵の消失原因の究明
梶川勇樹，檜谷治
土木学会論文集 B1（水工学），第 71 巻，4 号，pp.I_901-I_906，2015 年 2 月

透過型砂防堰堤による流木の捕捉と土砂動態への影響
加藤陽平*[1]，檜谷治，梶川勇樹，永谷直昌（*[1] いであ株式会社）
土木学会論文集 B1（水工学），第 71 巻，4 号，pp.I_985-I_990，2015 年 2 月

気候変動による沿岸外力特性の変化が海浜に及ぼす影響 －鳥取県浦富海岸－
林 健太郎*[1]，澁谷 容子，黒岩 正光，森 信人*[2]，間瀬 肇*[2]（*[1] 三井海洋開発株式会社，*[2] 京都大学）
土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.71，No.2，p.I_419-I_424，2015 年 9 月

鳥取砂丘海における大規模養浜の効果と安定性の検討
澁谷 容子, 田村 直貴[*1], 黒岩 正光, 太田啓吾[*2]（[*1]日本港湾コンサルタント, [*2]神戸市）
土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.71(2015), No.2, p.I_479-I_484, 2015 年 9 月

土砂の浚渫と投入過程を考慮した 3 次元海浜変形予測モデル
安本 善征[*1], 黒岩 正光,澁谷 容子, 松原 雄平, 小坂田祐紀[*2]（[*1]鳥取県県土整備部, [*2]いであ株式会社）
土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, p.I_787-I_792, 2015 年 11 月

三次元格子ばね解析法による円孔周りの応力・変形解析
文村賢一[*], 西村 強, 河野勝宣（[*] 大成建設(株)）
第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.13-18, 2015 年 1 月

北海道常呂帯仁頃層群緑色岩における非地すべり地の断層ガウジと 2006 年豊実地すべりのすべり面粘土の類似性
前田寛之[*1], 河野勝宣, 辻 健史[*2], 久保仁美[*2], 青木秀晃[*2]（[*1] 札幌工科専門学校, [*2] 北見工業大学卒業生）
日本地すべり学会誌（地すべり）, 第 52 巻, 第 1 号, pp.15-20, 2015 年 1 月

A distinct element modeling with spring parameters-elastic constants relation and its numerical application
Fumimura, K.[*], Nishimura, T., Kohno, M.（[*] 大成建設(株)）
Innovations in Applied and Theoretical Rock Mechanics, Proceedings of the 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics (ISRM Congress 2015), Proceedings No. 331, May, 2015.

An interstratified illite/smectite mineral vein found in chaotic rock from the Nikoro Group in the accretionary Tokoro Belt, northeastern Hokkaido, Japan
Maeda, H.[*], Kohno, M.（[*] 札幌工科専門学校）
Clay Science, Vol.19, No.1, pp.5-9, Mar., 2015

室内模型実験に基づく落石の斜面衝突時の速度変化に関する研究
河野勝宣, 北迫勝也, 池添保雄, 西村 強
土木学会論文集 C（地圏工学）, 第 71 巻, 第 2 号, pp.81-91, 2015 年 5 月

Strong Ground Motion Simulations of the Mw 7.9 Wenchuan Earthquake Using the Empirical Green's Function Method
Xia, C., Zhao, B., Horike, M., Kagawa, T.
Bull. Seism. Soc. Am., Vol.105, No.3, pp.1383-1397, doi: 10.1785/0120140001, Jun. 2015.

多数の断層破壊シナリオによる強震動のばらつき分布
香川敬生
土木学会論文集 A1,Vol.71, No.4(地震工学論文集第 34 巻), pp. I_191-I_197, Sep. 2015

多数の断層破壊シナリオによる強震動周期特性の空間分布
香川敬生
日本地震工学会論文集, Vol.15, No.7, pp.7_90-7_99, Dec. 2015.

鳥取型防災教育推進事業について
香川敬生, 浅井秀子, 野口竜也
日本地震学会モノグラフ, No.4（学校・社会教育による地震知識の普及）, pp.155-160, Jul. 2015

日本地震工学会の研究ロードマップとその補遺について
香川敬生
日本地震学会モノグラフ, No.3（日本の原子力発電と地球科学）, pp.50-55, Mar. 2015

四国地方の比抵抗構造-Network-MT 再解析
村上英記[*1], 山口覚[*2], 塩崎一郎（[*1]高知大学, [*2]神戸大学）
Conductivity Anomaly 研究会論文集 2015, pp. 21-28, 2015 年

鳥取大学全学共通教育「教養科目」地学を考える -全学共通科目アンケート調査報告書 2012 をふまえて-
塩崎一郎
大学教育年報, 第 20 号, 12-17, 鳥取大学教育支援機構教育センター, 2015 年

自然電位法を用いた大山火山の熱的特徴および地下水流動に関する基礎的研究
塩崎一郎
平成 26 年度地域貢献支援事業/大学開放推進事業報告書【ダイジェスト版】，鳥取大学，7，2015 年

今日から学ぶ高校地学
塩崎一郎
平成 26 年度地域貢献支援事業/大学開放推進事業報告書【ダイジェスト版】，鳥取大学，18，2015 年

鳥取平野南部地域における微動探査に基づく地震動評価のための地盤構造モデルの構築
野口竜也，石田勇介[*1]，香川敬生（[*1]パシフィックコンサルタント）
土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71，No.4, [特]地震工学論文集, Vol.34, p.I_888-I_896，2015 年 10 月

強震動推定の適用性確認のための墓石の転倒解析の活用に関する基礎的研究−2000 年鳥取県西部地震における墓地を例として−
秦吉弥[*1]，古川愛子[*2]，野口竜也，香川敬生（[*1]大阪大学，[*1]京都大学）
土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71，No.4, [特]地震工学論文集, Vol.34, p.I_111-I_122，2015 年 10 月

鳥取県内の地震観測点における地盤構造の推定
野口竜也，西川隼人[*1]，香川敬生，吉田昌平（[*1]舞鶴高等専門学校）
第 133 回物理探査学会講演論文集，2015 年

鳥取県内の地震観測点におけるサイト特性の評価
西川隼人[*1]，野口竜也，香川敬生，**吉見和**（[*1]舞鶴高等専門学校）
第 133 回物理探査学会講演論文集，2015 年

ADR による体積含水率原位置測定結果の温度補正と年変動に関する検討
友行功美，中村公一，地盤と建設， 2015 年 12 月

微動およびボーリングデータによる鳥取市街地の地盤構造
池田理紗，中村公一，野口竜也
日本地震学会 2015 年度秋季大会講演予稿集，2015 年 10 月

定住促進の視点からみた地域外人材の役割とその支援について−「地域おこし協力隊」事業を事例として−
浅井秀子，熊谷昌彦*（* 米子高専），古川正悟
日本建築学会技術報告集，第 21 巻，第 47 号，pp.291-296，2015 年 2 月

島嶼における高齢者の冬期居住施設「生活支援ハウス」の利用実態と課題−島根県の事例−
浅井秀子，熊谷昌彦*（* 米子高専）
日本建築学会技術報告集，第 21 巻，第 48 号，pp.789-794，2015 年 6 月

地震災害における災害公営住宅居住者の意向調査−新潟県中越地震・能登半島地震・東北地方太平洋沖地震の事例−
浅井秀子，熊谷昌彦*（* 米子高専），月舘敏栄**（** 八戸工大），樋口　秀***（*** 長岡技科大），秋山由衣**（** 八戸工大）
日本建築学会技術報告集，第 21 巻，第 49 号，pp.1217-1222，2015 年 10 月

通電方法の相違が電気防食工法を適用した鉄筋コンクリートの ASR 膨張に与える影響
黒田　保，吉野　公，井上正一*，西林新蔵*（* 鳥取大学名誉教授）
コンクリート工学年次論文集，第 38 巻，第 1 号，pp.69-74，2015 年 7 月

促進養生したコンクリートの ASR 膨張に与える温度履歴の影響
中島俊介，黒田　保，吉野　公，井上正一*，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 15 巻，pp.511-516，2015 年 10 月

社会経営工学講座

Software quality analysis for agile development
Yamada, S.
(Keynote Addresses) in the 4th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (ICRITO'2015) --- Trends and Future Directions ---, B. Shukla, S.K. Khatri, and P.K. Kapur, Eds., pp. 4--8, Excellent Publishing House, New Delhi, India, September 2, 2015

Software reliability analysis considering the fault detection trends for big data on cloud computing
Tamura, Y.*, Yamada, S. (*山口大学)
in Industrial Engineering, Management Science and Applications 2015 (Lecture Note in Electrical Engineering 349), M. Gen, K.J. Kim, X. Huang, and H. Yabe, Eds., pp. 1021--1030, Springer-Verlag, Heidelberg, May 2015.

AIR application for reliability analysis considering debugging process and network traffic in mobile clouds
Tamura, Y.*, Yamada, S. (*山口大学)
Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 50, No. 1, pp. 165--175, January 2015.

Reliability analysis based on jump diffusion model with two-Wiener process for cloud computing with big data
Tamura, Y.*, Yamada, S. (*山口大学)
Entropy (MDPI), Vol. 17, No. 7, pp. 4533--4546, July 2015.

An all-stage truncated multiple change-point model for software reliability assessment
Inoue, S., Taniguchi, S., Yamada, S.
International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 1550017 (17 pages), August 2015.

Multi-attribute utility theory for estimation of optimal release time and change-point
Minamino, Y., Inoue, S., Yamada, S.
International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 1550019 (13 pages), August 2015.

Software reliability assessment with multiple change of testing-environments
Inoue, S., Yamada, S.
IEICE Transanctions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E98-A, No. 10, pp. 2031--2041, October 2015.

Cost optimization based on decision making and reliability modeling for big data on cloud computing
Tamura, Y. *, Yamada, S. (*山口大学)
Communications in Dependability and Quality Management, Vol. 18, No. 4, pp. 5--19, 2015.

On multiple changes of testing-environment in software reliability assessment
Inoue, S., Yamada, S.
Proceedings of the Ninth International Conference on Mathematical Methods in Reliability (MMR 2015), Tokyo, Japan, June 1--4, 2015, pp. 768--775.

Three dimensional Wiener process model and optimal software maintenance planning
Tamura, Y. *, Yamada, S. (*山口大学)
Proceedings of the Ninth International Conference on Mathematical Methods in Reliability (MMR 2015), Tokyo, Japan, June 1--4, 2015, pp. 863--870.

Optimal maintenance problem based on hazard rate model for mobile cloulds
Nobukawa, Y., Tamura, Y., Yamada, S.
Proceedings of the 21st ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, Philadelphia, Pennsylvania, U.S.A., August 6--8, 2015, pp. 84--88.

Estimating optimal software release time based on a change-point model by multi-attribute utility theory
Minamino, Y., Inoue, S., Yamada, S.
Proceedings of the 21st ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, Philadelphia, Pennsylvania, U.S.A., August 6--8, 2015, pp. 89--93.

Software quality prediction based on generalized linear models

Inoue, S., Yamada, S.
Proceedings of the 21st ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, Philadelphia, Pennsylvania, U.S.A., August 6--8, 2015, pp. 94--98.

Reliability assessment based on jump diffusion model for cloud computing under the influence of big data
Tamura, Y. *, Yamada, S. (*山口大学)
Proceedings of the 21st ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, Philadelphia, Pennsylvania, U.S.A., August 6--8, 2015, pp. 99--103.

Software quality assessment modeling for agile development
Yamada, S., Kii. R.
Proceedings of the 21st ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, Philadelphia, Pennsylvania, U.S.A., August 6--8, 2015, pp. 198--202.

Hazard rate model considering various factors for mobile clouds
Matsumoto, M., Tamura, Y., Yamada, S.
Proceedings of the 21st ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, Philadelphia, Pennsylvania, U.S.A., August 6--8, 2015, pp. 203--207.

All-stage truncated modeling with multiple change-points for software reliability assessment
Taniguchi, S., Inoue, S., Yamada, S.
Proceedings of the 21st ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, Philadelphia, Pennsylvania, U.S.A., August 6--8, 2015, pp. 208--212.

Discrete software reliability model based on a generalized linear modeling approach
Iwasaki, Y., Inoue, S., Yamada, S.
Proceedings of the 21st ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, Philadelphia, Pennsylvania, U.S.A., August 6--8, 2015, pp. 213--217.

Software quality analysis practice and verification
Sato, T., Yamada, S.
Proceedings of the 9th International Conference on Project Management (ProMAC 2015), Sapporo, Japan, October 14--17, 2015, pp. 380--386.

Bootstrapping interval estimation for software reliability assessment based on an S-shaped discretized model
Inoue, S., Yamada, S.
Proceedings of the 2nd East Asia Workshop on Industrial Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea, November 6--7, 2015, pp. 89--95.

Mobile application for reliability assessment based on three noisy models for cloud computing
Tamura, Y. *, Yamada, S. (*山口大学)
Proceedings of the 2nd East Asia Workshop on Industrial Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea, November 6--7, 2015, pp. 104--109.

A method of reliability assessment based on hazard rate by clustering approach for cloud computing with big data
Tamura, Y. *, Nobukawa, Y., Yamada, S. (*山口大学)
Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEE IEEM 2015), Singapore, December 6--9, 2015, IEEE Catalog Number CFP15IEI-USB., 5pp.

A method of reliability assessment based on neural network and fault data clustering for cloud with big data
Tamura, Y. *, Yamada, S. (*山口大学)
Proceedings of the 2nd International Conference on Information Science and Security 2015 (2nd ICISS 2015), Seoul, Korea, December 14--16, 2015, pp. 181--184.

クラウド上のビッグデータによる外的要因を考慮したソフトウェアの最適メンテナンス問題
田村慶信*，山田茂 (*山口大学)
京都大学数理解析研究所講究録「不確実性の下での数理モデルとその周辺」, pp. 247--253, 2015 年 4 月.

ソフトウェア信頼性評価のためのチェンジポイントモデルに基づいた MTBF の推定に関する一考

察
井上真二，山田茂
京都大学数理解析研究所講究録「不確実性の下での数理モデルとその周辺」，pp. 256--261, 2015 年 4 月.

On hazard rate modeling with change-point and change-point detection method for software reliability assessment
井上真二，山田茂
統計数理研究所共同研究リポート 367「最適化：モデリングとアルゴリズム 27」，pp. 81--86, 2015 年 3 月.

クラウドコンピューティングに対する 2 次元 Wiener 過程を有する確率微分方程式モデルに基づく最適メンテナンス問題
田村慶信*，山田茂 (*山口大学)
統計数理研究所共同研究リポート 367「最適化：モデリングとアルゴリズム 27」，pp. 87--94, 2015 年 3 月.

バス経路検索履歴データを用いた潜在交通需要分析
香川喬之，桑野将司，福山　敬，谷本圭志，川村尚生，菅原一孔
第 35 回交通工学研究発表会論文集（研究論文），pp. 237-244, 2015 年 5 月

GIS を用いた買い物困難度の把握と食料品店等の撤退可能性に関する研究－鳥取県東部地域を対象に－
高橋明日美，福山　敬，桑野将司
土木計画学研究・講演集(CD-ROM), Vol.52, No.113, 2015 年 11 月

ソーシャルネットワーク再現手法を用いた人のつながりと地域特性の関連性分析
桑野将司，井上　航，福山　敬
土木計画学研究・講演集(CD-ROM), Vol.52, No.85, 2015 年 11 月

社会ネットワークに基づくミュニケーション行動と政策分析
大平悠季，織田澤利守*1（*1 神戸大学）
土木計画学研究・講演集(CD-ROM), Vol.52, No.103, 2015 年 11 月

山陰地方およびその周辺中山間地域における生活不安感の要因に関する研究
福山　敬，桑野将司
都市計画論文集, Vol. 50, No.3, pp. 892-897, 2015 年 12 月

ソーシャルネットワークを考慮した生活関連施設の利用可能性の分析
桑野将司，福山　敬
土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.71，No.5，p. I_293-I_303，2015 年 12 月

地域間交通基盤整備の分権的意思決定のタイミングと投資水準に関する分析
池田結樹*，福山　敬（*兵庫県但馬県民局）
土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.71，No.5，p.I_347-I_358，2015 年 12 月

地域コミュニティ復興計画づくりに有効な参加型手法の実践とその検証
羅 貞一，楊　勇，福山　敬，松見吉晴
土木学会論文集 F6（安全問題），Vol.71, No.2 特集号，p.I_131-I_138，2015 年 12 月

外出活動の時間的集約性を考慮した部門別エネルギー消費原単位に関する分析
桑野将司，塚井誠人*（*広島大学）
社会技術研究論文集，Vol.12，pp.23-33，2015 年

フェイス・ツゥ・フェイスのコミュニケーションと都市・地域空間構造
大平悠季，津田　宙*1，織田澤利守*2（*1 (株)九州旅客鉄道大分工務センター，*2 神戸大学）
土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol.71，No.5，p.I_129-I_142，2015 年

The Yonmenkaigi System Method for Disaster Restoration of a Local Community in Korea
Na, J.
Proceedings of 11th International Conference of The International Institute for Infrastructure Resilience and Reconstruction, Session Ⅲ, No.1, Seoul, Korea, Aug. 2015

Implementation of Participatory Methods for Disaster Recovery as Community Building of a Local Community in Korea
Na, J.

Abstract booklet of The 6th Conference of the International Society for Integrated Disaster Risk Management (IDRIM -TIFAC 2015), p.63, New Delhi, India, Oct. 2015

数値波動水路における透水層の抵抗力算定法の比較
太田隆夫，河村裕之[*1]，松見吉晴，藤井　優[*2]，大野賢一[*3]（[*1]三省水工，[*2]広島市役所，[*3]鳥取大学大学評価室）
土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.71，No.2，pp.I_85-I_90，2015 年 6 月

ニューラルネットワークによる高潮予測モデル
金　洙列，松見吉晴，出田裕二郎，間瀬　肇[*]，森　信人[*]，安田誠宏[*]（[*]京都大学）
土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.71，No.2, pp. I_223-I_228, 2015 年 11 月

気候変動に伴う最大クラス台風経路と高潮偏差および再現期間の推定—伊勢湾における検討—
澁谷容子[*1]，中條壮太[*2]，森　信人[*3]，金　洙列，間瀬　肇[*3]（[*1]鳥取大学男女共同参画推進室，[*2]熊本大学, [*3]京都大学）
土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.71，No.2, pp. I_1513-I_1518, 2015 年 11 月

東京湾における高潮災害ポテンシャルの評価に関する検討
中條壮大[*1]，藤木秀幸[*1]，金 洙列，森 信人[*2]，澁谷容子[*3]，安田誠宏[*2]（[*1]熊本大学, [*2]京都大学，[*3]鳥取大学男女共同参画推進室）
土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.71，No.2, pp. I_199-I_204, 2015 年 11 月

The role of sea surface drag in a coupled surge and wave model for Typhoon Haiyan 2013
Kim, S., Mori, N[*]., Mase H[*]., Yasuda, T[*].（[*]京都大学）
Ocean Modelling, Vol. 96, pp.65-84, 10.1016/j.ocemod.2015.06.004

Real-time wave prediction using artificial neural network
Kim, S., Matsumi, Y., S. Pan, S[*1]., Mase, H[*2].（[*1] Cardiff University，[*2]京都大学）
SCACR2015 – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research 28th September – 1st October 2015 – Florence, Italy

Storm surge simulations of Typhoon Haiyan 2013 using a parametric wind and pressure model
Kim, S., Mori, N[*1]., Shibutani, Y[*2]., Yasuda, T[*1]., Mase, H[*1]., Oh, J[*3].（[*1]京都大学，[*2]鳥取大学男女共同参画推進室，[*3] Seoul National University）
The 25th International Ocean and Polar Engineering Conference Kona, Big Island, Hawaii, USA, 2015

Impact of Future Tropical Cyclones on Storm Surges around the Korean Peninsula
Oh, J[*1]., Kim, S., Suh, K[*1]., Yasuda, T[*2]., Mase, H[*2].（[*1] Seoul National University，[*2]京都大学）
5th International Summit on Hurricanes and Climate Change, Crete, Greece, 2015

Storm surge forecast using a neural network –Case Study of Sakai Minato and Hamada, Japan–
Kim, S., Matsumi, Y., Izuta, Y., Mase, H[*]., Mori, N[*]., Yasuda, T[*].（[*]京都大学）
COASTAL STRUCTURES & SOLUTIONS TO COASTAL DISASTERS JOINT CONFERENCE, Boston, US, 2015.

Combined use of sugars and nutrients derived from young maize plants for thermophilic L-lactic acid fermentation
Akao, S., Nagare, H.[*1], Maeda, M.[*1], Kondo, K.[*2], Fujiwara, T.[*2] ([*1]Okayama Univ., [*2]Kochi Univ.)
Industrial Crops and Products. Vol.69, pp.440-446, 2015.

利根川・荒川流域の水道原水データを用いた一般細菌表流水汚染と集水域属性の回帰分析
増田貴則，伊藤香織，加藤伸悟
土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.71，No.4，pp.I_1249-I_1254，2015 年 3 月

ヌマエビを用いることによる流れ藻の削減効果
増田貴則，大竹智子
土木学会論文集 G(環境)，Vol.71，No.7，pp.Ⅲ_137-Ⅲ_143，2015 年 11 月.

ワークショップにおける相互補完的対話の分析
長曽我部まどか，榊原弘之[*1]（[*1]山口大学）
都市計画論文集，第 50 巻，1 号，pp. 28-36，2015 年 4 月

官民の役割分担に着目した移動販売の持続可能性の改善に関する考察ー中山間地域を対象としてー
倉持裕彌[*2]，谷本圭志，酒井裕規[*3]，土屋哲（[*2]鳥取環境大学，[*3]神戸大学）
運輸政策研究，第 18 巻，2 号，pp.2-11，2015 年 7 月

高齢者の買い物頻度と生活機能の関連分析 ー中山間地域を対象としてー
倉持裕彌[*2]，谷本圭志
土木学会論文集 G（環境），第 71 巻，6 号，（環境システム研究論文集 第 43 巻），II_359-II_368，2015 年 10 月

中山間地域における移動販売サービスの顧客層に関する実証分析
谷本圭志，倉持裕彌[*2]，土屋哲
都市計画論文集，第 50 巻，3 号，pp.324-330，2015 年 10 月

まちなか居住エリアにおける DIY 型賃貸借の普及に向けた課題
長曽我部まどか，小川宏樹[*4]（[*4]和歌山大学）
都市計画論文集，第 50 巻，3 号，pp. 458-463，2015 年 10 月

中山間地域における高齢者の買い物行動と健康維持に関する実証分析
倉持裕彌[*2]，谷本圭志
都市計画論文集，第 50 巻，3 号，pp.1281-1288，2015 年 10 月

商品補充を考慮した移動販売車両の巡回計画に関する研究
土屋哲，谷本圭志，梶本剛志[*5]（[*5]コープこうべ）
土木計画学研究・講演集，第 52 巻，CD-ROM，2015 年 11 月

中山間地域における移動販売サービス開始初期の利用者特性分析
土屋哲，谷本圭志，倉持裕彌[*2]
農村計画学会論文集，第 34 巻，pp.225-230，2015 年 11 月

観光客の過剰な流入による地域住民の外出控えに関する一考察　離島におけるケーススタディ
宮崎耕輔[*6]，谷本圭志，森山昌幸[*7]（[*6]香川高等専門学校，[*7]株式会社バイタルリード）
農村計画学会論文集，第 34 巻，pp.231-236，2015 年 11 月

地方部における建設企業の持続可能性に関する一考察
谷本圭志，後藤忠博[*8]（[*8]株式会社オリエンタルコンサルタンツ）
土木学会論文集 F4（建設マネジメント）特集号，第 71 巻，4 号，I_181-I_188，2015 年 12 月

コミュニティ・ガバナンスにおける社会的文脈の遷移過程に関する研究ー自転車交通問題を例としてー
長曽我部まどか，武吉弘樹[*9]，榊原弘之[*1]（[*9]大分県）
土木学会論文集 D3（土木計画学），第 71 巻，5 号，pp. 69-80，2015 年 12 月

過疎地域における給油所の持続可能性に関する概略分析
谷本圭志，土屋哲
土木学会論文集 D3（土木計画学），第 71 巻，5 号，（土木計画学研究・論文集 32 巻），I_261-I_268，2015 年 12 月

Effects of small group discussion: Case Study of Community Disaster Risk Management in Japan
Chosokabe, M., Tsuguchi, Y., Sakakibara, H., Nakayama, T., Mine, S., Kamiya, D., Yamanaka, R. and Miyaguni, T.
Outlooks and Insights on Group Decision and Negotiation, Volume 218 of the series Lecture Notes in Business Information Processing, pp 3-12, Jun. 2015.

Location and Structure of Suburban Core for the Polycentric Urban Form- Case Study on Wakayama City, Japan -
Ogawa, H. and Chosokabe, M.
The International Symposium on City Planning 2015, Full paper, CD-ROM, Jun. 2015.

The Contribution of Social Context to Participatory Planning Processes within a Japanese Community
Chosokabe, M., Umeda, H. and Sakakibara, H.
Group Decision and Negotiation, Online First, Dec.

2015.

講座による編集

電 気 電 子 工 学 講 座　　77

Electronic Organic Thin Film Devices for Solar Energy Harvesting

Masahiko Kitagawa
Department of Information and Electronics, Graduate School of Engineering
Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: kitagawa@ele.tottori-u.ac.jp

Abstract: We have established fabrication process of a multi-layered P3HT/PCBM based bulk-heterojunction photovoltaic cells with the P3HT layer as the hole transport layer and the PCBM layer as the electron transport layer between the electrodes and a blended P3HT/PCBM layer in order to widen the photon harvesting layer. Current density has increased about 1 mA/cm2 by the insertion of P3HT layer and the resulting conversion efficiency has been improved about 20% compared with the single layer device. The device with a cm-scale active area with an efficiency of ~1% has been fabricated by the developed method. We have fabricated the P3HT/PCBM p-i-n BHJ cells for the first time. The device structure was ITO/MoO3/P3HT(p)/P3HT:PCBM(i)/PCBM(n)/Ag. In the as-fabricated cells, the open circuit voltage of p-i-n BHJ cells with PCBM concentration 10 mg/ml, 15 mg/ml and 20 mg/ml were 0.56V, 0.71V and 0.74V respectively, and increased compared with 0.50V in the ordinary BHJ (i-type) cell. After post annealing, the short-circuit current density of p-i-n BHJ cell with PCBM concentration 10 mg/ml has been improved by 20% compared with the ordinary i-type cell and the power conversion efficiency has been also improved by 10% up to over 2%. We have discussed the molecular distribution within the organic layers. We have demonstrated that the organic p-i-n BHJ structure is useful to enhance and optimize power conversion efficiency of the organic thin film BHJ cells.

Key Words: Organic Semiconductor, Thin Film Device Fabrication, Nano Technology, Characterization and Properties, Solar Cells, Efficiency, Cell Design, pin multilayer, dye-doping intermediate level

1. Introduction

Bulk-Heterojunction (BHJ) organic thin film photovoltaic (PV) cells are promising as future energy sources for electricity and as novel smart energy sources compatible with the advanced organic electronic systems such as organic computers. The organic thin film solar cell is thus promising as a solar cell of the next generation because of its light weight, cheapness and ease of fabrication. BHJ generates charge carries at the hetero-interfaces between the electron donor (D, p-type organic semiconductor) and acceptor (A, n-type organic semiconductor) molecules such as Poly(3-hexylthiophene) (P3HT) and [6,6]–phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PCBM), respectively. BHJ forms three-dimensionally stacked molecular junctions, i.e. D/A interfaces which have been expected to act as photoelectric conversion region throughout the BHJ layer independent of layer thickness [1]. Thick BHJ layer has a potential for fabrication of high efficiency solar cell .

Development of oxide interfacial layer using such as MoO_3 and V_2O_5 as an anode interface and the effect of P3HT:PCBM composition on the carrier mobility has been discussed [2]. Furthermore, BHJ has been improved by optimization of morphology and appropriate thermal annealing to result in the enhancement of conversion efficiency [3] and henceforth improved efficiencies up to 6% by single cell [4] and 6.5% by tandem cells, although investigation on enlargement of thickness and area of the photon harvesting BHJ layer including organic junction structures have been still limited up to now.

In addition, active area dependence of characteristics is also important to realize organic thin film PV cells, nevertheless many efforts have demonstrated on the small size device [1].

Molecular distribution within BHJ layer plays an important role to improve the photovoltaic characteristics. Phase separation has been characterized by utilizing structures of organic layers, composition ratio, thermal annealing. It has been shown that vertical molecular distribution within BHJ thin films is not uniform and is reversed [4]. Reversal of molecular distribution has been studied by segregation and stacking layers in BHJ cells [5]. A so-called p-i BHJ cells have been successfully reported [3]. However, to our best knowledge, investigation of structurally designed control of p-i-n molecular distribution and interface structure are not enough and the optimal structure has not been clarified yet.

Evaporated small molecular organic p-i-n structure have been expected to lead to optimization of molecular distribution including organic/electrodes interface by the sole presence of p-layer and n-layer as anode and cathode electrode interfacial layers, respectively, as an analogy of inorganic cells [2]. In our previous study, we have fabricated p-i/n BHJ cell in which open circuit voltage (V_{OC}) increased about 65% while short circuit current density (J_{SC}) decreased about 70% compared with the ordinary i-type cell by stacking the n-layer onto the p-i-layer [1]. Effective n-layer depositions onto i-layer by solution process have not been reported up to now.

In this study, we have studied detailed dependence of the P3HT/PCBM BHJ PV cells on the composition ratio and thickness of the BHJ layer in order to investigate the effect of inserting P3HT layer as the hole transport layer and PCBM layer as the electron transport layer between electrode and blended P3HT/PCBM layer as a structure for p-i and p-i-n junctions to widen the photon harvesting layer. We have also tried to enlarge the size of active area up to cm scale. In this study, we have fabricated the organic p-i-n BHJ cells by optimizing PCBM concentrations for n-layer deposition and have studied their current-voltage characteristics. We have elucidated the n-layer thickness dependence of the photovoltaic characteristics in organic p-i-n BHJ cells. We have discussed the molecular distribution within BHJ layer based on cell characteristics and film thickness of organic layers.

2. Experimental

2.1 Widening of BHJ layer and dissolution owing to successive coating

The device structures were ITO/MoO_3/P3HT:PCBM/Ag, ITO/MoO_3/P3HT/P3HT:PCBM /Ag and ITO/MoO_3/P3HT/P3HT:PCBM/PCBM /Ag. The buffer layer of 10 nm MoO_3 was evaporated onto the 150 nm thick ITO substrate under a vacuum of ~10^{-3}Pa. The blended P3HT:PCBM in which composition ratio has been varied between 0.6 and 1.6 to optimize the cell characteristics using the ratio of the weight of PCBM divided by that of P3HT ($R=W_{PCBM}/W_{P3HT}$) was dissolved in chloroform under air ambient. The blended P3HT/PCBM layer with the thickness between 50 nm and 160 nm has been deposited on top of the P3HT layer whose thickness was 15 nm after depositing top BHJ layer taking dissolution into consideration and also the 20 nm thick PCBM layer has been deposited on the top BHJ layer furthermore by successive spin coating under air ambient. Finally the 100 nm thick Ag was evaporated on the active layer. The active area of the devices was 0.04 cm^2. The wide area device with area from 0.04 to 1 cm^2 was prepared by changing the Ag electrode area. All cells were not annealed.

2.2 Modified i-layer thickness dependence and annealing effect

Figure1 shows the molecular structure of the P3HT and PCBM used in this study.

Figure2 shows a schematic diagram of the device structure for p-i-n BHJ cell.

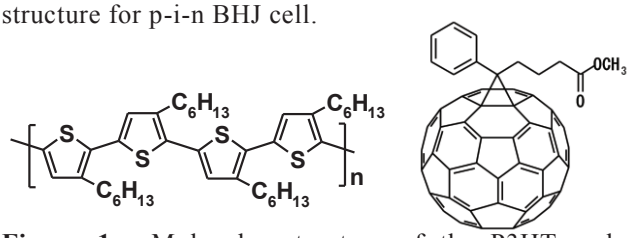


Figure 1. Molecular structure of the P3HT and PCBM

The device structures were indium tin oxide (ITO)/MoO_3/P3HT(p)/ P3HT:PCBM(i)/PCBM(n)/Ag

(p-i-n type) and ITO/MoO_3/P3HT:PCBM/Ag (i type) as reference. MoO_3 was evaporated onto the ITO coated glass substrates. Organic layers were deposited by the spin coating using chloroform solutions. The composition ratio of P3HT:PCBM blends for active layer was 1:0.8 by weight. The typical p-i layer thickness was 85 nm. PCBM concentrations were 10 mg/ml, 15 mg/ml and 20 mg/ml. The corresponding n-layer thickness were 10 nm, 20 nm and 70 nm, respectively. Ag was evaporated as cathode. The active area of the device was 0.04 cm^2. The cells were thermally annealed at 100 °C for 3 min. The film thickness was measured by the ultraviolet-visible differential interference optical spectromicroscopy (Otsuka Elec. co., FE-3000). The current-voltage characteristics under AM1.5 was measured by using the calibrated solar simulator (Yamashita Denso co., YSS-50A) under simulated AM 1.5G illumination of 100 mW/cm^2.

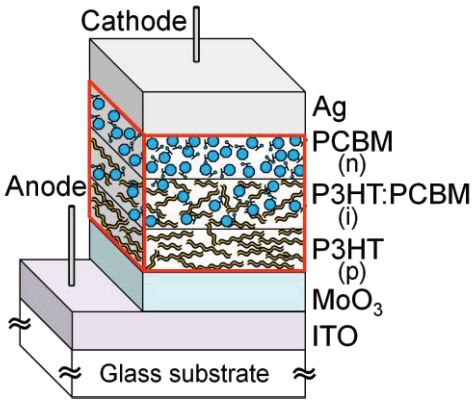


Figure 2. Device structure for p-i-n BHJ cell

3. Results and Discussion

3.1 Widening of BHJ layer and dissolution owing to successive coating

Figure3 (a)(b) shows weight ratio (R) dependence of photoelectrical conversion characteristics of the BHJ PV cells. Short circuit current density (J_{SC}), fill factor (*FF*) and efficiency (*Eff*) showed significant R dependence with optimal ratio of 0.7~0.8, while the open circuit voltage (V_{OC}) indicated linear dependence against R. This V_{OC} dependence is different from those reported since V_{OC} is affected by the difference between the LUMO level of PCBM mixed with P3HT and the Fermi level of Ag [3]. The appropriate composition ratio is *R*=0.7~0.8. The maximum efficiency was obtained at R=0.8 with

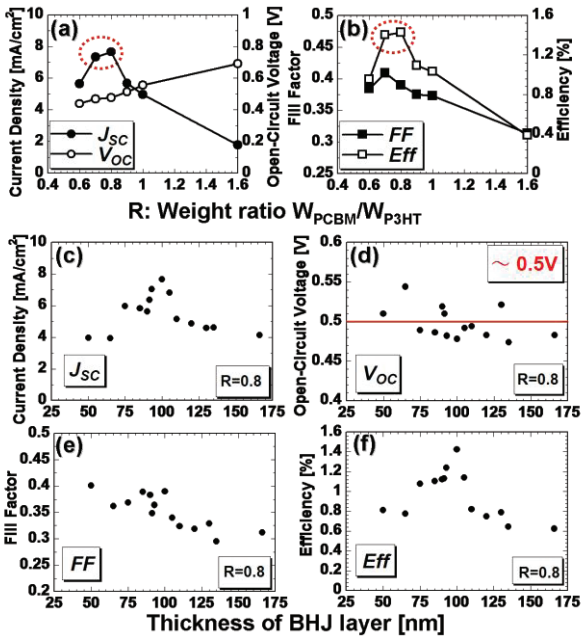


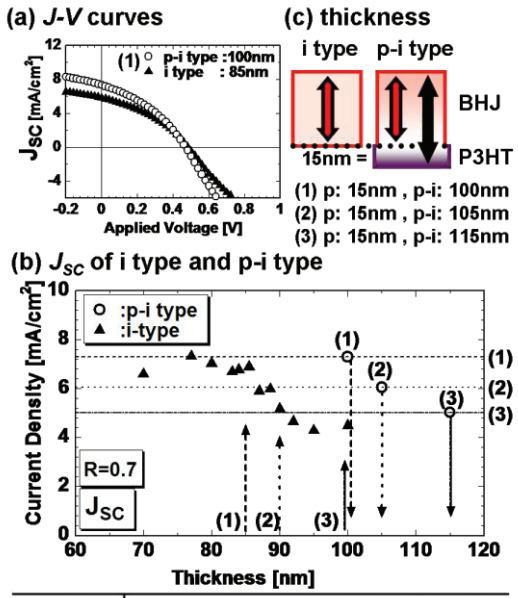
Figure 3. Dependences of (a) short circuit current density (J_{SC}) and open circuit voltage (V_{OC}), (b) fill factor (*FF*) and efficiency (*Eff*) on the composition ratio (R=W_{PCBM}/W_{P3HT}) and (c) J_{SC}, (d) V_{OC},(e) *FF*,(f) *Eff* on thickness of the BHJ layer for ITO/MoO_3/P3HT:PCBM/Ag cells

cell performance of J_{SC}=7.66 mA/cm^2, V_{OC}=0.478 V, *FF*=0.389, and *Eff*=1.43%, thus the composition ratio of R=0.7~0.8 has been selected as reasonable in the examination of thickness dependence of cell characteristics.

Figure3(c)-(f) shows the BHJ thickness dependence of the characteristics for the BHJ PV cells with R=0.8. The thickness of the BHJ layer has been varied from 50 nm to 160 nm. The J_{SC} and the *FF* changed significantly around an optimum of about 100 nm depending on thickness. On the other hand, the V_{OC} exhibits the constant value of 0.5±0.03 V. As a consequence, the optimal thickness of the BHJ layer was determined to be 100 nm in ITO/MoO_3/P3HT:PCBM(R=0.8)/Ag cell.

Therefore, we have investigated the modified ITO/MoO_3/P3HT(p)/P3HT:PCBM(i)/Ag cell (p-i type) with the three kinds of i and p-i types of PV cells with the thickness of the BHJ layer of about100 nm in the fabrication of multi-layered organic thin film PV cells under air ambient.

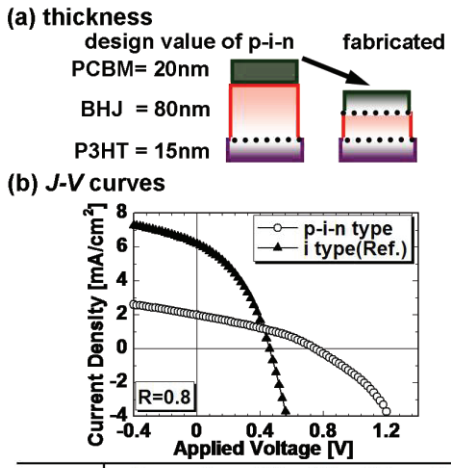
Figure 4. shows the BHJ and P3HT/BHJ thickness dependence of the characteristics for the modified BHJ PV cells with R=0.7 together with that of the ordinary BHJ (i type) cells. Three kinds of devices with different thickness have been fabricated



Thickness [nm]	J_{SC} [mA/cm²]	V_{OC} [V]	FF	Eff [%]	Rsh [Ω]	Rs [Ω]
(1) 100(p-i)	7.30	0.469	0.362	1.24	3784	799
85 (i)	5.79	0.483	0.364	1.02	4984	1021
(2) 105(p-i)	6.06	0.399	0.335	0.81	3147	973
90 (i)	5.18	0.440	0.319	0.73	3724	1287
(3) 115(p-i)	5.03	0.408	0.322	0.66	3584	1256
100 (i)	4.49	0.407	0.308	0.56	3465	1539

Figure 4. (a) Short circuit current density (J_{SC}) against applied voltage curves, (b) dependence of J_{SC} on the thickness for ITO/MoO_3/P3HT:PCBM(R=0.7)/Ag cells and ITO/MoO_3/P3HT/P3HT:PCBM(R=0.7)/Ag cells, (c) Thickness of p-i type is P3HT(15nm)/BHJ(i as following;(1) p:15 nm, p-i:100 nm, (2) p:15 nm, p-i: 105 nm, (3) p:15 nm, p-i:115 nm.

The J_{SC} of both i type cell and p-i type cell varied depending on thickness of organic layer, the p-i type enhanced the current even in thicker film region than 100 nm where the current could not be carried as well in the i(BHJ) type cell. The current density has been increased about 1 mA/cm² by comparing the results of i type (85 nm) and p-i type (100 nm) cells in which the same amount of PCBM are present and act as photon harvesting molecules in the active i(BHJ) layer, thus it is considered that generated hole carriers in the BHJ layer arrive at the P3HT layer and are efficiently transported through the thin P3HT layer which works as hole transporting and electron blocking layer and also suppresses recombination between MoO_3 and the blended P3HT:PCBM layer.



Structure	J_{SC} [mA/cm²]	V_{OC} [V]	FF	Eff [%]	Rsh [Ω]	Rs [Ω]
p-i-n type	1.98	0.749	0.332	0.49	14945	4858
i type	6.16	0.460	0.387	1.10	5540	810

Figure 5. (a) Thickness of design value for ITO/MoO_3/ P3HT/P3HT:PCBM(R=0.8)/PCBM/Ag cell, (b) short circuit current density (J_{SC}) against applied voltage for ITO/MoO_3/P3HT/P3HT:PCBM(R=0.8)/PCBM/

Furthermore, we have investigated the modified ITO/MoO_3/P3HT(p)/P3HT:PCBM(i)/ PCBM(n)/Ag cell (p-i-n type) similarly under air ambient. Figure 5 shows the characteristics for the p-i-n BHJ PV cell together with the ordinary BHJ (i type) cell whose thickness of BHJ was 80 nm. In the p-i-n cell, V_{OC} increased about 40% and J_{SC} decreased about 70% compared with the ordinary one. The increase of V_{OC} suggests that the P3HT/P3HT:PCBM/PCBM multi-layer-structured cells can be fabricated and the deterioration of J_{SC} implied that blended P3HT:PCBM active layer had been dissolved indefinitely by the

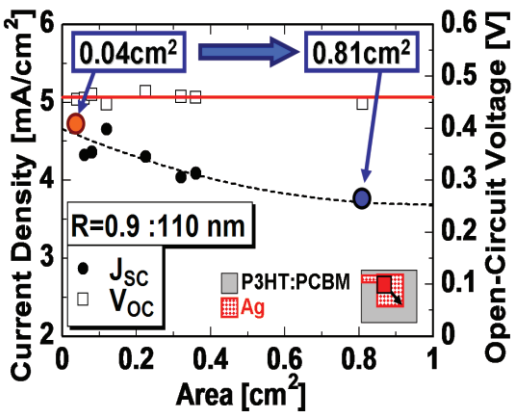


Figure 6. Short circuit current density (J_{SC}) and open circuit voltage (V_{OC}) curves against the active area for ITO/MoO_3/P3HT:PCBM(R=0.9)/Ag cells whose thickness is 110nm.

solvent.

Thus, if thickness of the BHJ layer could be maintained, the improvement of the short circuit current might well be expected [5].

Figure 6 shows the active area dependence of the characteristics for the BHJ PV cells with R=0.9. The J_{SC} were decreased depending on the active area, whereas the V_{OC} and the FF are not affected. It was necessary to keep uniformity of organic film to enhance organic thin film wide area PV cell characteristics.

3.2 Modified i-layer thickness dependence and annealing effect

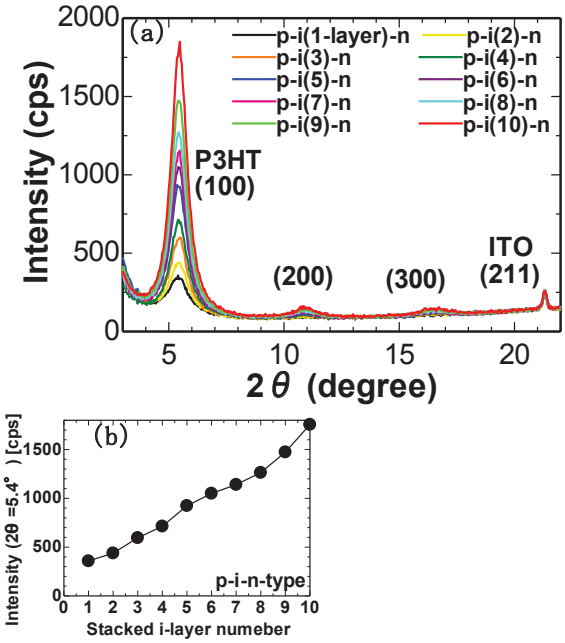


Figure 7. BHJ and P3HT/BHJ thickness dependence
(a)XRD pattern (b)2 θ =5.4° X-ray Intensity
(c) 2 θ =5.4° Ful width at half maximum

Figure 7 shows the film thickness dependence of X-ray intensities of pin-layers together with i-layers those thicknesses were changed by the coating times of each layer. The film thickness was measured at the same time by the optical method. Figure 8 shows also the film thickness dependence of absorption intensities of pin- and i-layers those thicknesses were thus determined.

Figure 9 shows current-voltage characteristics of organic p-i-n BHJ cells fabricated with different PCBM concentrations for n-layer together with the reference i-type cell. In the as-fabricated cells, V_{OC} of p-i-n BHJ cells with PCBM concentration 10 mg/ml, 15 mg/ml and 20 mg/ml were 0.56V, 0.71V and 0.74V respectively, and increased compared with i-type cell of 0.50V. V_{OC} increases in the p-i-n BHJ structure is considered to be due to contribution from lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) of PCBM for forming junction at the cathode interface and acting effective carrier extraction layer, and V_{OC} seemed to approach to the theoretical value which depends on the energy level difference between the highest occupied molecular orbital (HOMO) of the electron donor and the LUMO of the acceptor.

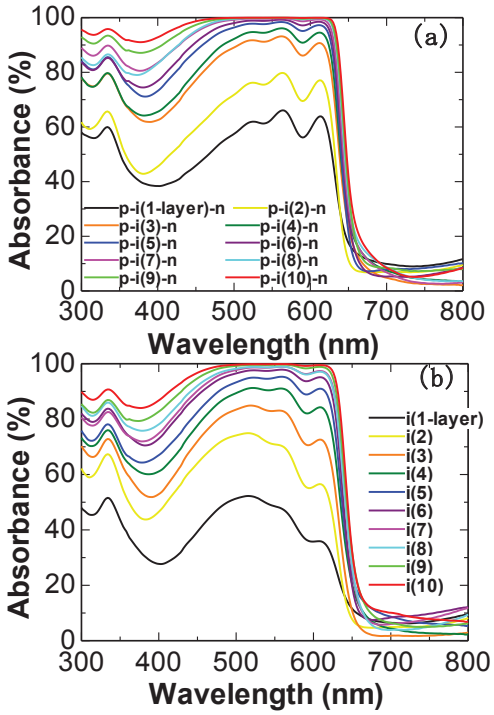


Figure 8. BHJ and P3HT/BHJ thickness dependence of absorbance
(a) p-i-n BHJ (b) i BHJ

Figure 10 shows current-voltage characteristics

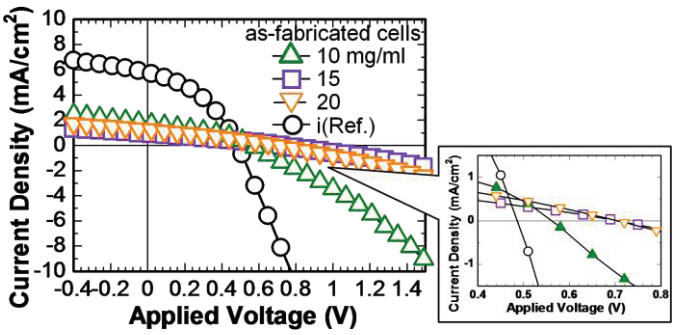


Figure 9. Current-voltage characteristics of p-i-n BHJ cells with different PCBM concentrations for n-layer

of organic p-i-n BHJ cells after post annealing at 100 °C for 3 min. The characteristics before and after post annealing are summarized in Table 2.

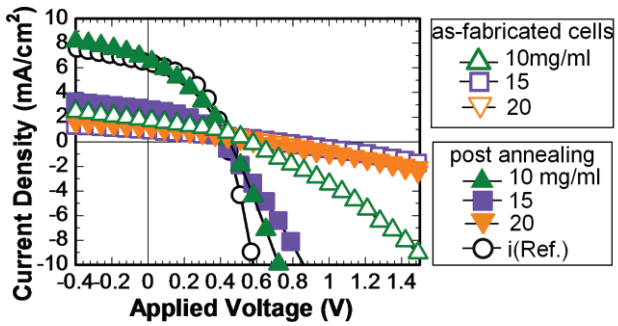


Figure 10. Current-voltage characteristics of p-i-n BHJ cells after post annealed

Table 1: Photovoltaic characteristics of the cells

Preparation Conditions	PCBM Concentration	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (V)	FF (%)	Eff (%)	R_{sh} (Ω)	R_s (Ω)
as-fabricated cells	10mg/ml	**1.75**	**0.56**	34.5	0.36	13333	3200
	15mg/ml	0.92	**0.71**	28.2	0.19	24945	13745
	20mg/ml	1.25	**0.74**	28.2	0.26	18990	9961
	——	5.50	**0.50**	35.4	**0.98**	5036	1191
post annealing	**10mg/ml**	**6.63**	**0.45**	**34.5**	**1.03**	**3707**	**913**
	15mg/ml	2.61	0.43	40.8	0.45	13728	1527
	20mg/ml	1.14	0.65	27.5	0.21	18338	9991
	——	**6.97**	**0.41**	42.1	**1.21**	5617	565

Post annealing on p-i-n BHJ cells improved BHJ/PCBM interface of as-deposited inferior electrical contact and thus enhanced cell performance. In particular, the drastic increase in J_{SC} of p-i-n BHJ cell with PCBM concentration 10 mg/ml was observed in comparison with the reference i-type cell. The improvement in J_{SC} is ascribed to n-layer which acts as an electron transport layer. At higher PCBM concentrations of 15 mg/ml and 20 mg/ml, increase in J_{SC} was small. The resulting difference with the 10 mg/ml case is due to the increases of PCBM aggregates by thermal that annealing caused degraded performance [18].

The shunt resistance (R_{sh}) in the p-i-n BHJ cell with 15 mg/ml and 20 mg/ml were 2.5 and 3.2 times of R_{sh} of ordinary i-layer. This is consistent with the report of the result employed high PCBM composition within BHJ layer in single layer P3HT/PCBM cell [14]. Therefore, we must accept the idea that the increase of PCBM concentration promotes the growth of aggregate of PCBM within n-layer while changes molecular distribution within BHJ layer with the increase of PCBM concentrations owing to n-layer deposition. The series resistance (R_S) was also affected by the PCBM concentrations. These results suggest that the concentration profile of PCBM has varied by decreasing stacked n-layer thickness. The R_S of p-i-n BHJ cell with PCBM concentration of 20 mg/ml did not decrease even after post annealing, and remained to be 10 times larger than that for 10 mg/ml. Thus, we have realized that interface forms an inappropriate structure for the current extraction owing to the enlarged and enriched PCBM aggregates accompanying with n-layer thickness increase and the PCBM composition change within BHJ layer. V_{OC} in both p-i-n and i type after post annealing have decreased. However, in each p-i-n cells with high PCBM concentration, V_{OC} kept high compared with that of the ordinary i-type reflecting a thick PCBM rich interface layer. On the contrary, in the optimum 10 mg/ml condition, J_{SC} increased while V_{OC} decreased only a little. Thus, the optimized p-i-n structure was found to give rise the potential to increase the short-circuit current density while maintaining high open-circuit voltage.

Figure 11 shows current-voltage characteristics of the optimized p-i-n BHJ cell with PCBM concentration of 10 mg/ml together with the reference i-type cell. The optimized characteristics are summarized in Table 3.

J_{SC} has improved by 20% compared with the ordinary i-type cell after post annealing. Power conversion efficiency has also improved by 10%. The i-layer

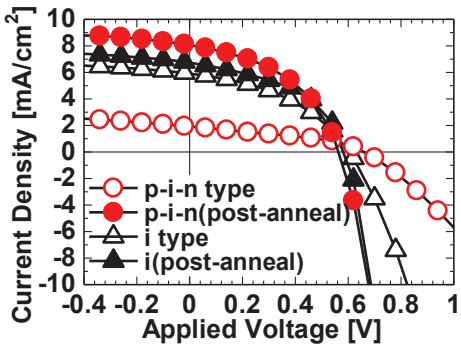


Figure 11. Current-voltage characteristics of optimized p-i-n type (PCBM solution :10 mg/ml)

thickness of the p-i-n BHJ cell decreased 13 nm compared with the ordinary i-type cell resulting from

dissolution of i-layer by PCBM solution span for n-layer deposition.

We have estimated molecular distribution in the organic layer from a comparison of photovoltaic characteristics in p-i-n BHJ cell before and after post annealing, organic layer thickness and the molecular diffusion by thermal annealing [10,19,20]. Figure 10 shows a schematic diagram of organic layers for model structure and an estimated structure.

Table 2: Photovoltaic characteristics of optimized cells (PCBM solution :10 mg/ml)

device structure	J_{SC} [mA/cm^2]	V_{OC} [V]	FF	Eff [%]	R_{sh} [Ω]	R_s [Ω]
p-i-n	1.92	**0.73**	0.35	0.48	14174	2521
(post-anneal)	**8.07**	0.57	0.45	**2.07**	7524	455
i	**5.92**	0.61	0.42	**1.50**	10136	885
(post-anneal)	**6.73**	0.59	0.47	**1.88**	8481	483

It is considered that molecular distribution within organic layers were P3HT-rich at the anode side while PCBM-rich at the cathode side due to molecular diffusion which occurred during annealing between the P3HT-layer and BHJ layer and also between BHJ-layer and PCBM layer [19,20]. These P3HT-Rich region and PCBM-Rich region act as a hole transport layer and an electron transport layer, respectively, and redistributed the inverted molecular distribution throughout organic layers [5]. Therefore, the increase of J_{SC} in p-i-n BHJ structure is larger than that of the ordinary i-type cell in spite that the i-layer thickness is small compared with that of the i-type cell.

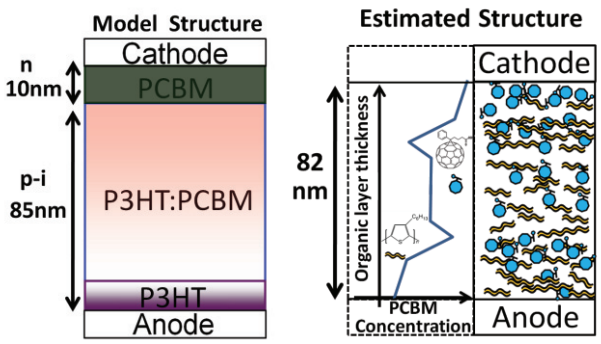


Figure 12. Schematic diagram of organic layers for a model structure and an estimated structure

4. Conclusions

We have elucidated the effect of insertion of P3HT as the hole transport layer and PCBM as the electron transport layer between electrode and P3HT/PCBM BHJ layer by spin coating based on the detailed composition ratio and thickness dependence of the BHJ layer. The p-i type BHJ PV cells enhanced the current in thicker film region than 100 nm where the current decreased in pure i-type cells and hence this structure is useful to widen the photon harvesting layer of the organic thin film BHJ PV cells. The p-i-n type BHJ cell could be fabricated, although the dissolution couldn't be avoided.

We also have made clear n-layer solution concentration dependence of the photovoltaic characteristics in P3HT/PCBM p-i-n BHJ cell by changing PCBM concentrations for n-layer deposition, and have revealed the n-layer dependence on the photovoltaic characteristics in organic p-i-n BHJ cells for the first time. The short-circuit current density of p-i-n BHJ cell with PCBM concentration 10 mg/ml has improved by 20% compared with i-type cell and power conversion efficiency has also improved by 10%. We have demonstrated that organic p-i-n BHJ structure is useful to enhance power conversion efficiency of the organic thin film BHJ cells by optimizing the molecular distribution within organic layers.

Acknowledgment

The author express his sincere thanks to Professor emeritus Hiroshi Kobayashi for guiding, Mr. Satoshi Okamura for the work at Tottori Prefecture, Dr. Hiroyuki Kusano, Director of the division of mechanical and material research of Industrial Institute Tottori Prefecture for the collaboration for regionally oriented works and especially the late emeritus Professor Tetsuro Tanaka, Kyoto University for guiding him to semiconductor research and development. The author greatly acknowledge MITI, Japan and Tottori Prefecture for financial support through the years of 1999~2000, 2003~2006 and thereafter. Finally, he is deeply thanking to the graduate students and under-graduate students those who had shared priceless and splendid times with him.

References

[1] H. Kitami, T. Sakai, T. Hishinuma, A. Sanda, H.

Kusano, and M. Kitagawa, *SOLMAT*. **95** 357-360 (2011).

[2] K. Suemori, T. Miyata, M. Yokoyama, and M. Hiramoto, *Appl. Phys. Lett*. **86**, 063509 (2005).

[3] L. Zeng, C.W. Tang and S.H. Chen, *Appl. Phys. Lett.* **97** 053305 1-3 (2010).

[4] P.G. Karagiannidis D. Georgiou, C. Pitsalidis, A.Laskarakis, and S. Logothetidis, *Mat. Chem. and Phys*. **129** 1207 (2011).

[5] J.Y. Oh, W.S. Jang, T.I. Lee, J.M. Myoung, and H.K. Baik, *Appl. Phys. Lett.* **98** 023303 1-3 (2011).

[6] A. Kumer, G. Li, Z. Hong, and Y.Yang, *Nanotechnology* **20** 165202 1-4 (2009).

[7] T. Hishinuma, H.Kusano and M. Kitagawa PVSEC-21 4D-5P-05 139(2012)

[8] Vishal Shrotriya, Gang Li, Yan Yao, Chin-Wei Chu, and Yang Yang, *Appl. Phys. Lett.* **88** (2006) 073508

（受理　平成２８年１１月２１日）

鳥取大学大学院工学研究科研究報告編集委員会

編集委員長　薄井　洋行（化学・生物応用工学専攻）
編 集 委 員　櫻間　一徳（機械宇宙工学専攻）
有井　士郎（情報エレクトロニクス専攻）
小野　祐輔（社会基盤工学専攻）

研究報告　第 47 巻

平成２８年１２月２６日発行

発行者　鳥取大学大学院工学研究科
〒680-8552　鳥取市湖山町南４丁目 101 番地

※著作権法により、当本の一部または全部を無断で複写、複製、転載することを禁じます。