

翠巒





初夏の紅葉：伊藤 裕子 氏 撮影

も く じ

巻頭言

近年の産業の特質と工学の行方・続編.....	東北大学大学院工学研究科長 内田 龍男	1
------------------------	---------------------	---

企業紹介

『現場対応力を武器に先端技術で更なる発展を目指して』	株式会社登米精巧 代表取締役社長 後藤 康治	2
『機能性セラミックで環境保全に貢献する』	株式会社セイスイ 代表取締役社 庄子 政巳	6

研究プロフィール

MEMS技術を用いた環境発電の研究	東北大学大学院工学研究科 教授 桑野 博喜	10
エネルギーシステムから未来社会を設計する	東北大学大学院工学研究科 教授 中田 俊彦	15
コピキタス半導体チップ<いつでもどこでもだれでも必要な情報を入手>	東北大学大学院工学研究科 教授 伊藤 隆司	19
材料製造プロセスにおける流動・伝熱・物質移動現象 <材料の構造形成との関わりを明らかにすることを目指して>	東北大学大学院工学研究科 教授 塚田 隆夫	23
永久磁石の高性能化を目指して	東北大学大学院工学研究科 教授 杉本 諭	27
建築計画研究と実践	東北大学大学院工学研究科 教授 小野田 泰明	31
共同研究センターからイノベーション拠点へ<共同研究センターの現状と課題>	東北大学未来科学技術共同研究センター 教授 小澤 純夫	37
コピキタスネットワークへの挑戦 <次世代ネットワークのための高機能通信プロトコル>	東北大学大学院情報科学研究科 教授 加藤 寧	41
マテリアルフロー・アカウンティングと産業エコロジー	東北大学大学院環境科学研究科 教授 長坂 徹也	45
常識を越えた非接触エネルギー伝送<世界を広げ実用の域に>	東北大学大学院医工学研究科 教授 松木 英敏	49

第1回青葉工学振興会賞

ボトムアップ的手法を利用した高分子と金属ナノ粒子の精密集積からなる光機能性ナノデバイスの創製	東北大学多元物質科学研究所 准教授 三ツ石 方也	53
---	--------------------------	----

第13回青葉工学研究奨励賞

高感度広ダイナミックレンジイメージセンサに関する研究	東北大学大学院工学研究科 博士後期課程3年 赤羽 菜々	54
動脈硬化症発生メカニズム解明を目的とした細胞共培養血管モデルの開発	東北大学大学院工学研究科 助教 坂元 尚哉	55
社交ダンスパートナーロボットに関する研究	東北大学大学院工学研究科 博士後期課程3年 竹田 貴博	56
自己組織化による次世代集積回路形成プロセスの創製	東北大学大学院工学研究科 助教 福島 誉史	57
2進数系と非2進数系を融合したハードウェアアルゴリズムの高水準設計技術に関する研究	東北大学大学院情報科学研究科 助教 本間 尚文	58
平成19年度 財団法人青葉工学振興会 事業報告		59
編集後記	理事 東北大学大学院工学研究科 教授 石田 清仁	

題字の翠巒(すいらん)とは「みどりの山」又は「みどりの連山」のことであるが
代わって青葉山の意に用いたものである。なお、武山斌郎元青葉工学振興会理事長の揮毫によります。



巻頭言

近年の産業の特質と工学の行方・続編

東北大学大学院工学研究科長 内田 龍 男

昨年の巻頭言で「近年の産業の特質と工学のゆくえ」と題して自動車産業と対極的な位置にあるエレクトロニクス産業を比較し、それぞれの特質について書かせて頂いた。また、先進国型産業の例として、自動車産業とスイスの時計産業を取り上げた。そしてその重要な特徴が普及品から高級品までの大きい価格差と販売量の関係を有するピラミッド型の製品構成であること、一方のエレクトロニクス産業は同一製品の価格差が非常に小さいことを対比して示した。今回はその続編として、別の観点から企業の生き残りと発展を生物の進化と対比して述べてみたい。

生物の進化で成功するためには二つのタイプがあると言われている。一つは高等生物型で、爬虫類や哺乳類のように高度な生命体に進化したものである。生長に時間がかかるので生まれてからも生長を続け、成熟するまで親が守り育てる場合もある。環境により適合していくために進化を続けるが、先鋭化しすぎると環境の変化に対して脆弱になる。弱肉強食の過当競争で最も優位な進化を遂げた恐竜が、環境の変化で絶滅に追い込まれることになったことはよく知られている。これに対して人類は高等生物型であるが、柔軟性の高い方向を選択したと言われている。まず人種間の混血を可能にしていること、肉体的過当競争に特別な優位性はもたなかったが、親が子育てをする時期を利用して子供へ情報伝達を行う仕組みを作ったこと、さらに仲間同士で情報交換を行うシステムを発達させたこと、これによって更に頭脳が発達していったことなどである。

もう一つの成功のタイプはアメーバのような下等生物型である。生命体としては一見単純に見えるものであるが、細胞機能としては決して下等とは言えない。大量に増殖し、時には世代毎に変異し、どんな環境にも短時間で適合しあらゆる環境に進出する。

産業で言えば、自動車産業は古典的ともいえる一貫した自動車技術を基盤とし、そこに部品、材料、生産方式、信頼性、エレクトロニクスなどの最新

技術を次々と導入して高度化、高級化、高信頼化を図ってきた。これに対してエレクトロニクス産業は電子回路技術や半導体技術を基盤として幅広い応用分野を切り開いてきた。その世代交代も著しく早い。極めて高度な技術・頭脳集約型でありながら大量生産でコストダウンを図ってきた。

自動車産業は明らかに高等生物型と見ることができ、しかしこれが恐竜型となるか人類型になるかは今後の展開の如何によるのではないかと考えられる。一方のエレクトロニクス産業は一面ではアメーバ型のように見える。しかし一方では人類型の側面を見ることができ、人類型を選択する場合に、情報をいかに有効な進化につなげるか、また個別の優劣を競うのではなく総合力をいかに有効に駆使するかが重要である。すなわち、ハードとソフト、ネットワークを総合的に組み合わせた新たなシステム製品を生み出し続けていく総合電器メーカーの体質が有効であろうと考えられる。しかしこの二十年ほどで、総合電器メーカーは、その利益率の低さを金融や株主から批判されて改善を迫られ、カンパニー制の採用、利益の低い分野の廃止、あるいは別会社への切り離しなどを行って本来の特質を失いかけている。

いずれにしても、アメーバ型、人類型のどれが優れているのかではなく、体質に合った生き方を戦略的に選択し、その優位性を生かし、更なる進化につなげることが重要である。

生物の進化、企業の戦略、人の生き方など、いずれも共通することや学ぶことが多いことを改めて認識させられる。

企 業 紹 介



現場対応力を武器に先端技術で更なる発展を目指して

株式会社登米精巧

代表取締役 **後 藤 康 治**

1. 会社の歩み

私は、宮城県北の登米市の精密機器（OA）メーカーに勤務し、製造、技術、管理部門を経験し、35歳で退職しました。その後、そこで培った技術、技能、管理能力をベースに、前の勤務先及びその親会社の支援により独立し、平成元年1月に資本金800万円にて法人化しました。

当初は組立、プレス工場としてスタートしましたが、当時はバブル絶頂期とはいえ、人の確保と資金調達に苦労しました。その後、バブルが崩壊しましたが受注だけは確保できました。しかし優秀な人材が採用出来ない状況でしたので、沿岸部の方に人材の確保を目的に、苦しいながらも本吉工場を平成3年に設立しました。



図1：本社工場全景



図2：本吉工場全景

平成4年10月に資本の増資にあたり、(財)宮城県企業振興協会（現（財）みやぎ産業振興機構）の資本参加企業となりました。その後、各種工作機械の導入を行い、自前で治工具や金型の道具が製作出来るようになりました。そして、開発設計に力を入れる為、CADの導入を図り、一貫生産（設計・製作・組立・販売まで）が出来る体制に

なりました。

本格的に機械装置（資源財）の設計製作販売を扱うエンジニアリング部門と、創業当初より行っている量産の組立、プレス部品加工（消費財）を扱う製造部門の2本柱で事業を運営出来る体制を確立する事ができました。

その後も、時代の変化（ニーズ）に敏速に対応出来る体質の会社を目指し、高度な経験と知識を持った少数精鋭の技術屋集団として、更なる努力を重ねてまいりました。



図3：工場内風景



図4：自動検査装置

取引先は当初県内の2社でしたが、経営の安定と事業の拡大を目標に、営業活動を行い大手家電メーカーとの取り引きが成功したのを機に、現在では、東北、関東、関西まで取引先が拡大し、業種もOA関連部品を主体に、半導体装置、携帯電話、自動車、住宅、ITなど幅広く取り引きが出来るようになりました。

その間、体質の強化としてISO9001とISO14001の取得を行い、工場の増設拡大と各種のNC機などの設備導入を行ってきました。

今までの技術の積み重ねにより、自社製品の開発を行いました。販売の難しさにより断念し、現在はOEM生産に力を注いでおります。

弊社は男子型の物づくり工場で、危険の伴う作業もありますが、創業以来無災害記録を更新中で、平成17年7月に宮城労働局より最優秀賞を受賞させて頂きました。

本年で創業20周年を迎え、得意先、関係各位、社員の協力を得て、売上げの増収と人材の増員が出来ました。

会社設立に当たっての経営戦略として、大手企業と中小企業の良い所を取り入れた特徴ある会社を目指し、

- ①先進技術・創造型製造企業
- ②高付加価値の追求できる企業
- ③開かれた経営
(社員経営参加・第三者資本参加による経営健全化)
- ④仕事と余暇(レクリエーション)の調和のとれた働きやすい職場
- ⑤社会貢献の出来る企業

等に取り組んでまいりました。

2. 生産準備支援企業を目指して

大手企業は人手の掛かる大量生産品の製造を大量消費国に移管している中で、弊社の様な独立型中小企業が国内で生き残るためには、「単なる組立、加工業だけでは生き残れない」と思い、そこで現場対応力を武器に物作りの課題を敏速かつ的確に解決し、新しい物づくりを生み出せる「生産準備支援企業」を目指す事業展開で、川下から川上へという目標を持ち続け、プレス加工→金型加工→金型設計→装置組立→機械設計販売まで出来る管理技術、製造技術、開発技術を磨き、設備も充実させてきました。

また、顧客のニーズに応じた設備、装置、部品等の一貫生産が出来る体制を確立し、若い力を集結させ、顧客の抱えている問題(コスト、作業改善、装置開発など)を解決出来る体制と、豊富な経験と知識を持った少数精鋭の技術屋集団の会社で、顧客の価値創造に貢献出来る体質を整え、設計から販売まで自社で行える自己完結型の一貫生産体制をとり「出来ないものは無い」というチャレンジ精神で、絶えず新しい技術習得と製品づくりに取り組んできました。



図5：順送プレス機



図6：プレスブレーキ



図7：門形マシニングセンター



図8：マシニングセンター

3. Q, D, Cを武器に独自性を貫く(物作りプロ集団)

物作りの基本を忠実に、設計部門は顧客の要求事項をベースにV A (機能分析)を設備、装置等の構想図設計時、部品一つ一つの機能を高め、デザインレビューを行いコスト低減を図ることにより価値を高めます。製造部門ではI E (工程分析)で人、方法、材料、設備の4M管理を取り入れ、生産性の向上と改善に努める事で、ムリ、ムダ、ムラの無い最適な方法で進めています。

また全社的に、TQC (総合的品質管理) 統計的な考え方を導入し、現場、現物、現実等により製品や品質のデータを捉え分析し、品質管理方法を基礎に、高品質の製品の提供をすべく活動を実施しています。

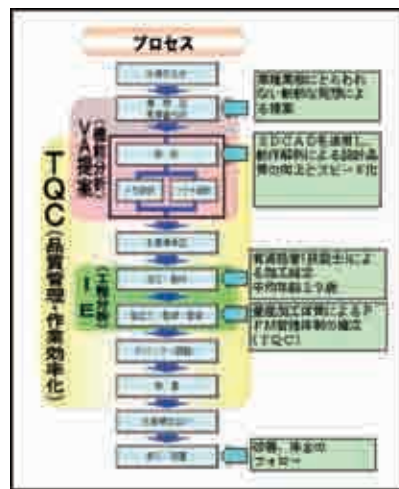


図9：工程フロー図

4. 人材(人財)育成

中小企業が生き残っていくためには、「大手メーカー以上に力(技術、管理、製造力)が無いと生きていけない」。その為には人を育成し、技術を蓄積し、設計したものが、キチンと反映出来るような現場の技術力が必要であると考えています。

初めに社風、思想、道徳、躰等の考え方を徹底させ、方針管理の展開によって維持管理を行います。

理論、知識等は、「年間人材育成計画」に基づき全社員が

自分のレベルに合わせた通信教育の受講や社内講習会等によって習得しています。また大学校に御協力頂き、弊社独自のカリキュラムで講習会やセミナーを開催し実施しております。その他必要となる外部講習会へも積極的に参加しております。

固有技術、技能の向上策として、「指導は出来るだけ製造現場に近い所で行う」という事で、OJTを主体に職場内で教育を行っています。社員の平均年齢が29歳とまだ若い為、熟練技能等は、視聴覚教材を利用して学んだり、外部で定年退職した熟練技能者を招き、社内で直接現場、現物による指導を実施しております。

このように、全員が最大限の力を発揮できるよう、きめ細かい教育・研修を行っています。



図10：フライス



図11：旋盤



図12：大学校でのセミナー風景



図13：技能伝承風景

人財育成の証として、国家資格の技能検定制度を活用して受験を行い、現在では1級合格者も出すことが出来るようになりました。その合格者には、技術、技能継承の実績を評価し、報酬や昇格等でインセンティブを与えたりしております。

このように様々な人財の育成を確実に歩み続けた事によって、平成20年12月に宮城県知事より技能検定功勞事業所として受賞する事ができました。

5. 市場ニーズの見極めによる、更なる発展を目指して

弊社は、ローテクとハイテクの融合による、新たなイノベーションにより、顧客の要望に総合的に応えられる「生産準備支援企業」として体質強化を行い、各種の機械、合理化設備、装置、部品等の製品開発と設計の進化を図り、基礎技術と先端技術により、独自性と独創的な製品を開発出来る企業となり、新たな顧客拡大に繋げて行きたいと考えております。

また既存事業の設備、技能面の強化として、超精密、極小加工に対応できるインフラの強化を行い、物作りの会社として、多岐に渡る顧客要求、高品質を確実に提供し、継続的な価格競争力の向上、そして短納期対応が出来る体制を構築し、競争力のある企業を目指していきます。

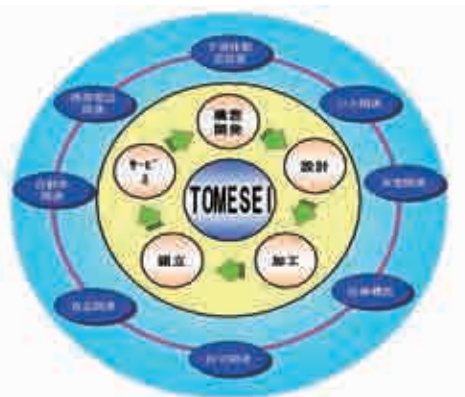


図14：一貫生産体制と取引業種

6. 今後の展開

アメリカ発のサブプライムローン問題に端を発して、金融市場の不安定によって世界同時大恐慌となり、製造業も過去に類が無い大打撃を受け、先が見えない厳しい状況が続いています。

その厳しい状況の中でも、「今は長期的な視点に立って現状を見直し、筋肉質で強靱な体質、魅力ある会社作りをする時期」とプラス思考に捉え、人財育成と意識改革を徹底的に進め、組織の活性化を図ります。また、業務改善を邁進し、無駄を徹底的に省き、絶えず他社の先を行く先端技術、新製品開発、生産性向上等の改善により、現状の顧客と更なる信頼関係の構築を行いつつ、営業を強化し新たな取引先拡大に繋げるとともに、海外市場も視野に入れた経営で取り組み、不況の荒波を乗り越えて行きたいと考えています。

また、今回このような機関誌にご紹介頂いたのを機に、弊社が弱い異業種、産学連携等、読者様との交流のきっかけになればと期待しております。

是非、技術交流、商品開発等に興味のある方は、ご連絡頂ければと思います。お待ちしております。



図 15：組立風景



図 16：自社製品(スリーブカシメ機)

【会社概要】

本社工場	宮城県登米市迫町新田字日向97-1
本吉工場	宮城県本吉郡本吉町小金山38-3
本社電話	0220-28-2888
設 立	平成元年1月19日
資 本 金	3千8百万円
従 業 員	95名

※詳細は当社ホームページを御覧下さい。

<http://www.tomeseicoh.co.jp>

【事業内容】

- ・機械、省力機器の設計、製作組立販売
- ・精密機械部品製造販売
- ・精密金型、板金、精密プレス部品加工、ユニット組立、販売
- ・機械、装置、その他のメンテナンス、オーバーホール

【著者略歴】

代表取締役社長
後藤 康 治

1952年3月生

1973年 迫りコー(株) 入社

製造部・資材部・管理 各部長職を歴任

1988年 迫りコー(株) 退社

1989年 (株)登米精巧 設立 代表取締役就任 現在に至る

2000年 (財)みやぎ産業振興機構 評議員就任

2004年 (独)東北職業能力開発大学校 運営委員就任

2006年 (社)みやぎ工業会 理事就任

2006年 登米市産業振興会 総務企画委員長就任

2006年 登米市商工振興審議会 委員就任



機能性セラミックで環境保全に貢献する

株式会社 セイスイ

代表取締役社長 庄子政巳

1. 会社の歩み

当社は平成元年の会社設立以来、東北大学等の各研究機関の指導を仰ぎながら一貫して機能性セラミック（商標名：メカセラ）を使用した環境浄化を追及して参りました。1989年には農業集落排水処理場向け脱臭装置や工場・百貨店等の厨房から排出される含油排水処置装置などを開発しました。1999年には宮城県中小企業創造法認定および補助金を受け東北大学工学部との共同研究により、汚泥削減型メカセラ装置を開発し、現在、農業集落排水処理施設を中心に日本全国で200箇所以上に設置されています。2003年には東北大青葉山キャンパス内に研究室を開設し各研究機関との連携強化を図っております。

最近では2008年度みやぎものづくり大賞優秀賞を受賞するなど各方面から高評価を頂いております。

2. システムの概要

2-1 装置構成

図1にメカセラ装置の外観を示します。本システムはセラミック充填塔・薬液注入装置・操作盤から構成されています。処理の概要は低濃度の次亜塩素酸ナトリウム溶液を機能性セラミックボールが充填された塔の中を通過させる事により、高い酸化力をもつ活性酸素種を発生させ、それを含んだ水を排水に注入し浄化を図るものであります。この時メカセラシステムへ供給する水として水道水・地下水の他、各排水処理場での処理水を使用する事も可能である為、ランニングコストを抑える事ができます。



図1：メカセラ装置

2-2 セラミックボール

本システムの鍵となる機能性セラミックボール（メカセラボール）は種々の金属酸化物を配合し高温焼成したものであります。基本組成は図2に示す通りですが、この他にも用途にあわせた様々なボールを用意しております。




	外観	ベース組成
黒玉		酸化鉄 大：φ 25mm 小：φ 15mm
白玉		アルミナ 大：φ 25mm 小：φ 15mm
茶玉		酸化チタン 大：φ 25mm 小：φ 15mm

図2：ボール外観

3. メカセラシステムの効果

本システムは前述の通り、塩素-セラミック間の反応による高い酸化力によって表1の様々な施設・用途で適用が可能です。

表1：メカセラシステム適用項目

効果	適用施設
脱臭	排水処理施設全般
汚泥削減	農業集落排水処理施設 公共下水道
油分分解 (鉍物油・動植物油)	油水分離槽 (グリストラップ)
スケール分解	冷温水施設 (クーリングタワー等)
殺菌	排水処理施設全般
排ガス浄化	工場等全般

4. メカセラシステム適用事例

4-1 農業集落排水処理施設汚泥削減

現在、地球規模の環境問題として地球温暖化が大きな問題となっております。温暖化の要因は、人間活動によって発生するCO₂、CH₄、N₂Oですが、特に重要な物質はCO₂であります。CO₂の温室効果への寄与率は55%を占めており、化石燃料の使用過多によるところが大きい原因となっております。汚泥処理における焼却処分は化石燃料の消費が多量であり京都議定書によるCO₂削減問題・エネルギー問題の観点上、好ましくありません。また汚泥処理費用はかなりの負担となっております対策が求められています。本項では、汚泥の非燃焼削減方式である機能性セラミック触媒装置を用いた汚泥減容の技術について、実証試験事例を紹介いたします。

公共下水道整備の遅れている農村部では図3のような施設で生活雑排水等の処理が行われています。



図3：農業集落排水処理施設

その排水は通常微生物処理により浄化されますが、処理の際に不可避免的に余剰汚泥が発生します。その汚泥の処理は地域にもよりますが処理場1箇所につき年間数百万円程度かかっており、何箇所か処理場を抱えている自治体ではトータルの汚泥処分費用はかなりのものとなっております。

そこでメカセラシステムによる汚泥削減効果の実証試験を行った結果を以下に示します。処理場の排水処理フロー及びメカセラ注入箇所は図4の通りです。メカセラ水の注入量は流入排水量に対し15%程度であり、これを各槽に振分けて注入し曝気攪拌して処理を行います。この時、図5に示したような原理で汚泥が削減されると考えられます。

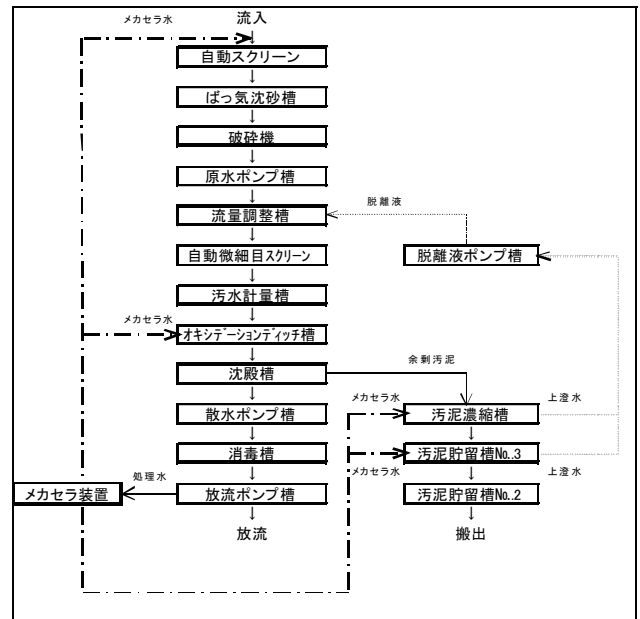


図4：汚泥削減試験フロー

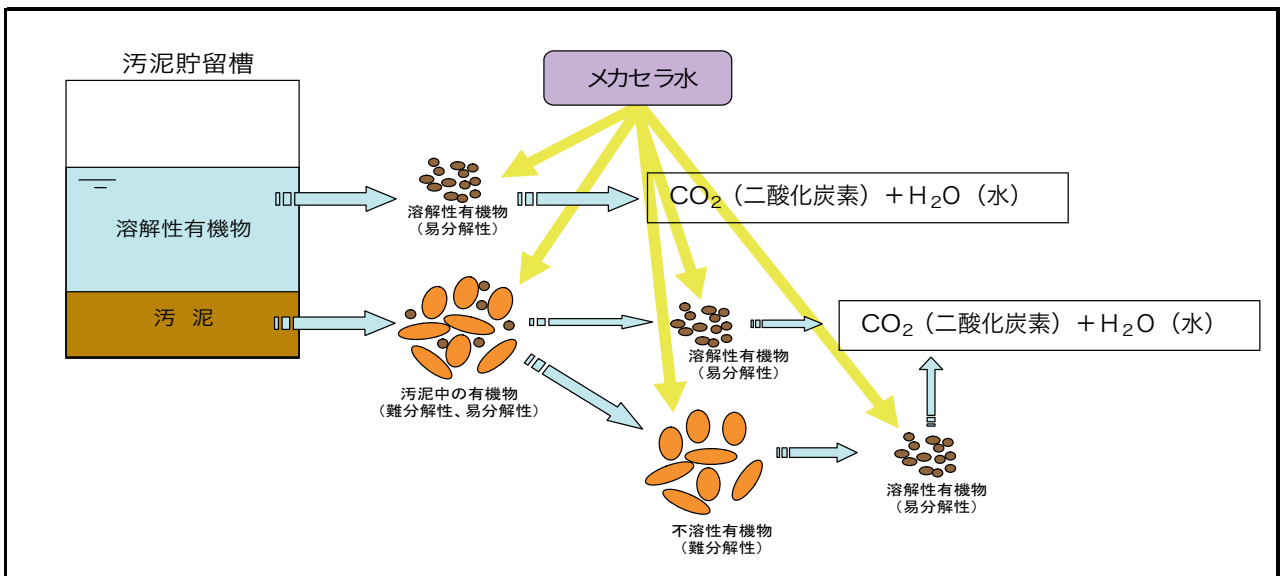


図5：汚泥削減原理

図6は汚泥量の推移を表しております。メカセラ導入した場合（青）、従来の汚泥発生量（赤）と比べかなり低くなる事が確認でき、処理水の状態も良好でした。

このようにメカセラシステムはいかなる処理場にも後付けで設置が可能であり、また処理場における現状の運転条件を大きく変える事無く汚泥の削減が図れる事が実証されております。

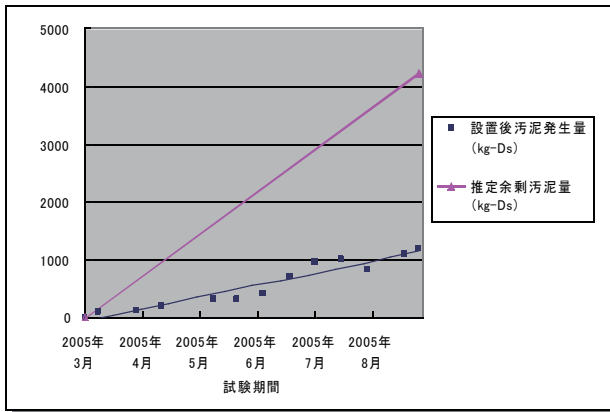


図6：汚泥量推移

4-2 厨房排水の浄化

一般に厨房排水は水と油脂類の比重差を利用した油水分離槽により油脂分が除去されています。分離された油脂分が徐々に溜まってくる為、本来定期的に取り除く必要がありますが費用面・作業面等の点からそのままにされる場合が多い状況となっております。それにより溜まった油脂分が腐敗し悪臭が発生したり、流出し放流水質が悪化する等の問題を抱えています。そこで油水分離槽にメカセラ装置を導入し浄化を行いました（図7）。



図7：厨房排水用メカセラ装置設置状況

図8にメカセラ導入前後の分離槽の状態を示します。この場合も注入メカセラ水量は流入水量に対し15～20%程度であり、導入後、2週間～1ヶ月程度で浄化されました。

油水分離槽メカセラ導入前



油水分離槽メカセラ導入後



図8：メカセラ導入前後の油水分離槽の状況

4-3 スケール除去

ビル・工場等のクーリングタワーでは循環水の一部が蒸発するため、水中の溶存塩類が濃縮します。そのためスケールとなってルーバ・ケーシング等に堆積し冷却能力が低下します。また循環水に雑菌が繁殖している場合は循環により繰り返し汚染される状況にあります。



図9：向流型クーリングタワー

そこで循環水経路の中にメカセラシステムを組み込みスケールの除去を行った結果、図10の通り除去できる事が確認できました。

クーリングタワーメカセラ導入前



メカセラ導入後



図10：クーリングタワーの状態

5. その他

最近では図11のようなプラスチックボールの周りにメカセラボールを組み込んで受水タンク・排水処理場の各反応槽等に浮かべて浄化できるタイプを開発しております（商品名：メカセラマルチェコ、特許申請中）。



図11：メカセラ浮遊タイプ

6. おわりに

以上のように当社メカセラシステムは様々な施設・用途で活用されております。現在地球温暖化・水不足等の環境問題やエネルギー枯渇の問題が顕在化し、早急な対応が地球レベルで求められております。しかし経済発展との兼ね合いもあり、その舵取りは容易なものではありません。当社が培ってきた機能性セラミックを中心とした独自技術で少しでも問題解決に貢献できるよう今後も精進して参りました

いと考えております。

最後にこれまで東北大学の諸先生方には御指導頂き、高いモチベーションを持って研究を続ける事ができました。ここに感謝の意を表します。

【会社概要】

会社名	株式会社 セイスイ
所在地	
本社	宮城県仙台市宮城野区小田原1丁目7-25 TEL：022-292-5595 FAX：022-292-5598
東京営業所	東京都台東区東上野6丁目2-3 TEL：03-3844-2052 FAX：03-3844-2053
研究室	宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468
設立	平成元年6月
資本金	2千5百万円

【著者略歴】

代表取締役社長
しょうじ まさみ
庄子政巳

昭和10年 5月	宮城県仙台市生まれ
昭和29年 3月	宮城県仙台第二高等学校卒業
昭和58年	機能性セラミックの研究開始
平成元年 6月	株式会社セイスイ 設立
現在に至る	

研究プロフィール



MEMS技術を用いた環境発電の研究

東北大学大学院工学研究科
ナノメカニクス専攻 教授
桑野博喜

1. はじめに

工学研究科ナノメカニクス専攻情報ナノシステム研究室は、2003年4月に桑野がNTTから東北大学に教授として赴任した際に設立されました。学部は工学部機械知能・航空工学科ナノメカニクスコースに属しています。ひずみ、加速度、力などの力学センサとガスセンサなどの化学センサの汎用マイクロ構造の研究、多機能化の研究および、マイクロエネルギーシステムの研究、さらに基盤となるマイクロマシニング技術の研究を行っています。

本報告では、従来の一次電池、二次電池などとは異なる、MEMS技術を用いたマイクロ発電技術、特に環境発電について紹介します。

2. マイクロ発電研究開発の背景

ここで報告するMEMS技術を用いた環境発電は、小型燃料発電、マイクロガスタービン発電などとともにマイクロ発電技術の一つです。マイクロ発電には以下の三つの観点から大きな期待が寄せられています。

- 1) 高付加価値
- 2) 新製品、新市場の開拓
- 3) 環境問題へのソリューションの一つ

高付加価値エネルギーとしてのマイクロ発電の意義は、持ち運ぶことおよび高エネルギー密度であることです。このようなマイクロエネルギーは現在、パソコン用、携帯電話用のリチウムイオン二次電池として実現されています。さらに長寿命、高出力密度、および安全性、低環境負荷性を目指して二次電池のさらなる高性能化として研究開発が進められています。一方で高密度を目指して次世代携帯電話、PC用のマイクロ発電技術として小型燃料発電装置の研究開発が進められています。マイクロエネルギー源の一つとしてエチルアルコールを用いた小型燃料発電ではリチウムイオン二次電池の100倍近い10,000Wh/kgの高エネルギー密度が期待できます。この他、MIT、東北大などで研究開発が為されているマイクロタービンもこのような高付加価値のマイクロ発電としての機能をねらいとしています。

二番目の新製品、新市場の開拓では、従来とは全く異なる新しい産業分野の開拓が考えられます。例えば、大量の超小型センサを散布して三次元的な空間情報を取得するセンサネットワークへの適用が考えられます。また、 1cm^3 以下、特に 1mm^3 程度のマイクロ発電デバイスが可能になれば家電はもとより、これまで考えられなかった製品に使用れることが考えられ、全く新しい製品、サービスが生まれることが期待されます。

三番目の環境問題、特にエネルギー問題、地球温暖化問題への貢献はいうまでもなく望まれているものです。本稿で述べる環境発電技術やバイオ発電などMEMS技術を使ったこれまでにないマイクロ発電技術が研究されています。一つのデバイスの発電量は小さなものですが必要な場所で発電を行うので送電ロスがないことや化石エネルギーを使わないことなどのメリットが考えられます。

過去を振り返るとマイクロエネルギーが最も意識的に研究され商品化されたのは腕時計であると考えられます。腕時計においては1930年前後から半円形ロータによりぜんまいを巻き上げ機械エネルギーとして蓄積することが行われています。1950年代半ばからボタン電池（一次電池）によりモータを動かす腕時計が開発されています。19xx年半ばからロータの回転運動を電磁誘導により発電するマイクロ発電が開発されました。その後、光による発電や体温と外気の温度差による発電などが開発されました。これらは、その後のマイクロ発電を研究する際の基盤となっています。

1994年からMITなどにおいてMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いた極めて野心的なマイクロガスタービン発電の研究が開始¹⁾されました。東北大でも2000年に同様の研究が田中らにより発表²⁾されています。このようなマイクロ発電の研究は、Power MEMS国際ワークショップ（2008年は11月に桑野をGeneral Chairとして仙台で行われた）や日本機械学会マイクロエネルギー研究会（主査；桑野）など国内外で盛んになってきています。

本稿では、センサネットワークなどへの応用を目指して振動、熱などの周辺環境の低密度のエネルギーを電気エネルギーに変換することを目指したMEMS技術を用いた環

境発電技術の研究について紹介します。

3. 環境発電の研究

環境中に存在する振動、熱、風などを利用して電気エネルギーに変換する発電素子が注目されています。ユビキタスネットワークサービスの一種であるセンサネットワークでは、環境、農業・漁業、健康・福祉などの分野で大量のセンサを用いて種々の計測がなされます。大量に分散されたそれぞれのセンサには電力を供給することが必要です。電力の供給には商用の有線による電力供給、一次電池、二次電池による電力供給、無線による電力供給などが考えられます。このような従来のエネルギーの他に現在、一方で人間の周辺に存在する振動、熱、風、バイオなどのエネルギーを電気エネルギーに変換するMEMS技術を用いたマイクロ発電デバイスすなわち環境発電^{3,4)}デバイスの研究が進められています。このような環境発電デバイスについてその方法、デバイス作製法、特性について紹介を致します。

3-1 マイクロ圧電発電デバイス

周辺環境の振動を利用して発電を行うマイクロ発電デバイスを開発しました⁵⁾。その構造をFig. 1に示します。デバイスはカンチレバー構造をとっており、Siカンチレバー上にはPZT圧電体が成膜されています。PZT薄膜は下部電極のPt/Cr薄膜と上部電極のAu/Crに挟まれています。外部振動によってカンチレバーが振動し、圧電薄膜に応力が発生し分極することにより発電を行うものです。

PZTの成膜法として本研究ではRFマグネトロンスパッタリング法により行いました。高い圧電性を得るためには、結晶構造、結晶配向性を考慮した膜質の良い成膜を行う必要があります。特に、PZTは(111)面に配向する時に高い圧電性を示します。このため、スパッタ時の成膜温度、使用ガス、RFパワーを変化させ、最適な成膜条件⁶⁾を模索しました。また、成膜後に700℃においてアニーリングを行うことにより、膜質の改善を試みています。実験条件をTable 1に示します。結晶配向性の評価にはX線回折法(X-ray diffraction : XRD)を用いました。この結果、最も良い(111)配向が得られたのは、成膜温度350℃、使用ガスAr、O₂、RFパワー100Wで成膜を行ったものでした。このXRD結果をFig. 2に示します。40度に非常に大きなピークが見られますが、これは下部電極Ptの(111)面による回折です。PZTの(111)面による回折は38度に見られ、アニーリングによって結晶配向性が改善されていることが確認されました。

デバイスの作製には厚さ200μmのシリコン(100)基板を用いました。作製プロセスをFig. 2に示します⁶⁾。シリコン基板を1100℃で3時間熱酸化することにより、表面に1μm程度のSiO₂膜を形成します(a)。フッ酸緩衝溶液を用いたエッチングによりSiO₂膜をパターニングします(b)。Ti、Pt、PZTの順にスパッタリングにより成膜を行います(c)。700℃でアニーリングを行った後、高速原子線装置

(FAB)を用いてPZT、Ti、Ptのパターニングを行います(d)。上部電極としてCr、Auをスパッタリングにより成膜し、リフトオフによりパターニングを行います(e)。反応性イオンエッチング(Reactive ion etching : RIE)を用いたシリコンエッチングによりカンチレバーをリリースします(f)。以上のプロセスにより長さ1200μm、幅600μm、厚さ50μmのカンチレバーを持つデバイスを作製しました。共振周波数を下げるため、カンチレバーの先端には0.42mgの重りを形成しています。デバイスの顕微鏡写真をFig. 4に示します。

加振装置を用いてデバイスに外部振動を与え、発電特性を評価しました。その結果、カンチレバーの共振周波数8.81kHzにおいて発電出力の最大値を確認しました。また、Fig. 5に示すようにインピーダンスマッチングを行った結果、カンチレバー変位3.51μm、負荷抵抗12kΩにおいて、最大出力418pWを達成しました。

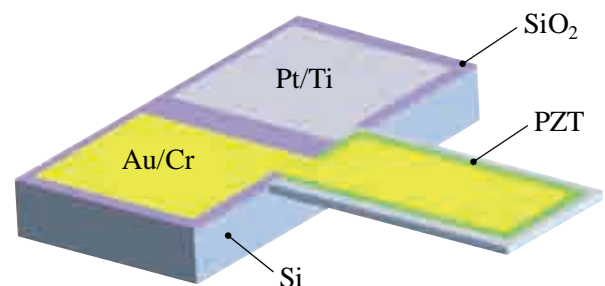


Fig. 1 : マイクロ圧電発電デバイスの構造

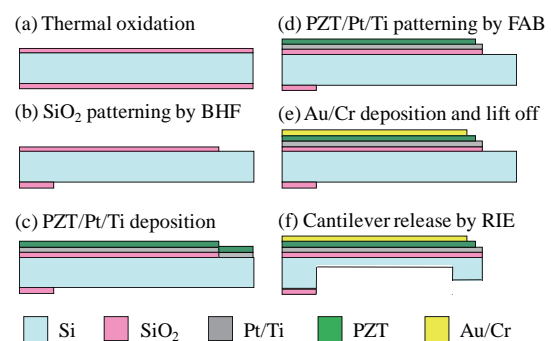


Fig. 2 : 圧電マイクロ発電デバイスの作製プロセス

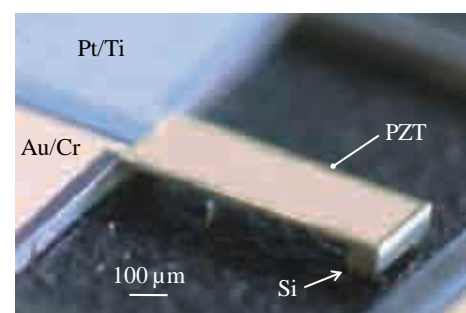


Fig. 3 : 作製したマイクロ圧電発電デバイス写真

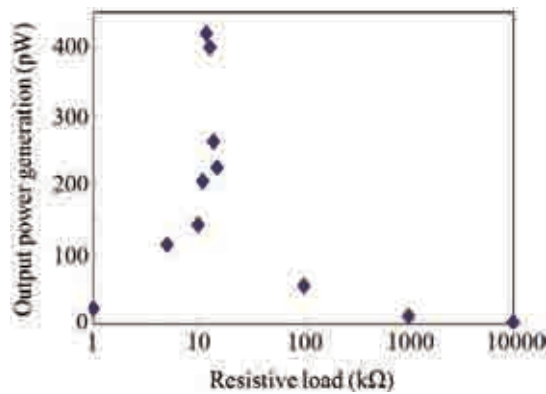


Fig. 4 : マイクロ圧電発電デバイスの発電特性

3-2 マイクロ静電誘導発電デバイス

静電誘導を用いたマイクロ振動発電デバイス⁷⁾を研究しています。静電誘導発電の原理を Fig. 6 に示します。半永久的に電荷が薄膜表面近傍に存在しているエレクトレット薄膜を利用します。それぞれの対向電極は、エレクトレット薄膜とコンデンサを形成しています。対向電極には、電荷が誘導され、対向電極の距離や重なり面積の変化によって、対向電極の電荷が変化し、電流 I として出力されます。本研究では、対向電極の距離を変化させることにより、電荷を誘導し、発電することにしました。



Fig. 5 : エレクトレットを用いた静電誘導発電概念図

Fig. 5 において、 Q_1 を電極1の帯電電荷、 Q_2 を電極2の帯電電荷、 d をエレクトレット膜厚、 g を空気層の間隔、 ϵ_0 を真空中の誘電率、 ϵ_e をエレクトレットの比誘電率、 S を電極の面積、 R を抵抗、 $x(t)$ を振動による電極2の変位とすると、静電誘導により次式(1)が成り立ちます。

$$\frac{\partial Q_2(t)}{\partial t} = \frac{d}{\epsilon_e \epsilon_0 S R} Q - \left(\frac{d}{\epsilon_e \epsilon_0 S} + \frac{g+x(t)}{\epsilon_0 S} \right) \frac{Q_2(t)}{R} \quad (1)$$

式(1)を解くことにより、電流 I を求めることができます。

本研究で用いたマイクロ静電誘導デバイスの構造を Fig. 6 に示します。エレクトレット材料として、CYTOP (CTL-809M、旭硝子製) を用いました。CYTOP は、MEMS 技術との整合性が良く、高電圧に耐え得る絶縁破壊強度を有しており、エレクトレット材料として高い性能を有しています。エレクトレットを固定電極として Si ウェハをマイクロマシンングにより錘つき両持ちはりを可動電極として作製しました。

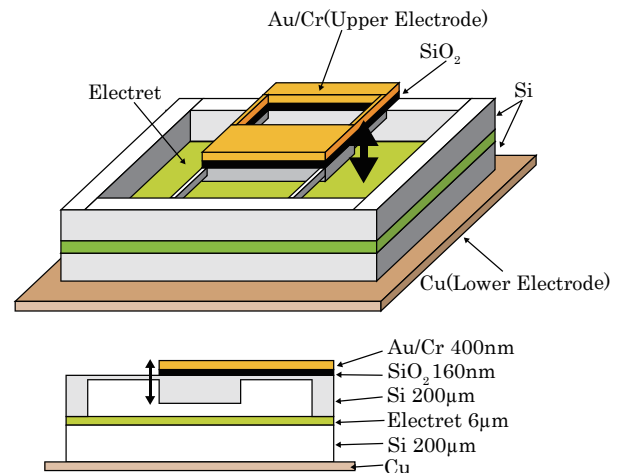


Fig. 6 : エレクトレットマイクロ静電誘導発電デバイス構成

固定電極として厚さ $200\mu\text{m}$ の Si ウェハ表面に CYTOP をスピコートにより形成し厚さ $6\mu\text{m}$ のエレクトレット膜としました。次に、コロナ放電を用いて、CYTOP 膜に電荷を注入し、エレクトレット薄膜を作製しました。本研究では、放電電圧 4.18 kV 、放電電流 0.1 mA 、帯電電圧 300 V 、帯電時間 10 分で、コロナ放電を行い、平均表面電位 252 V のエレクトレット薄膜としています。

次に、Fig. 7 に示すように可動電極として Si 両持ちはりを作製しました。厚さ $200\mu\text{m}$ のシリコンウェハを酸化し絶縁膜としてその後、Au/Cr 薄膜の電極をフォトリソグラフィで両持ちはり形状に形成します。最後に ICP-RIE (Inductive Coupled Plasma-Reactive Ion Etching) 装置で、裏側からエッチングして薄い両持ちはりとしします。

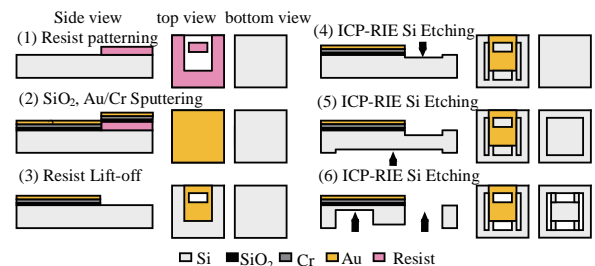


Fig. 7 : 両持ちはり可動電極の作製プロセス

マイクロ発電デバイスの評価として、加振機によりマイクロ発電デバイス全体を振動させ、オシロスコープにより発電量を計測しました。エレクトレット薄膜と振動電極間隔 $250\mu\text{m}$ 、エレクトレット平均表面電位 250 V です。マイクロ発電デバイスの周波数特性を Fig. 8 に示します。この結果から 1.1 kHz のとき最大出力が得られることが確認されました。また、 1.1 kHz 時の負荷抵抗特性を Fig. 9 に示します。この結果から $47\text{ k}\Omega$ 付近で最大出力を得ることが確認されました。

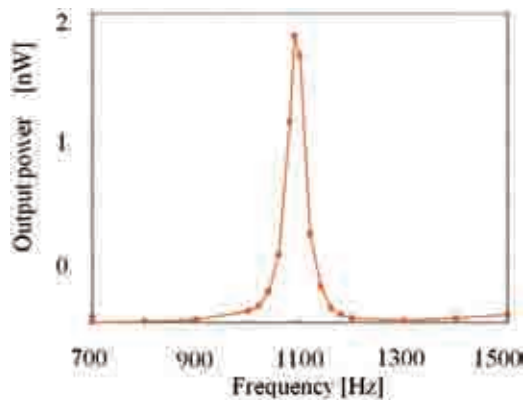


Fig. 8 : エレクトレットマイクロ静電誘導発電デバイスの発電出力周波数特性

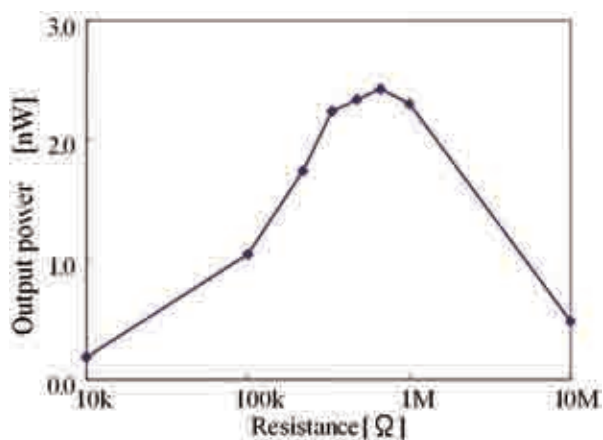


Fig. 9 : マイクロ発電デバイスの負荷抵抗特性

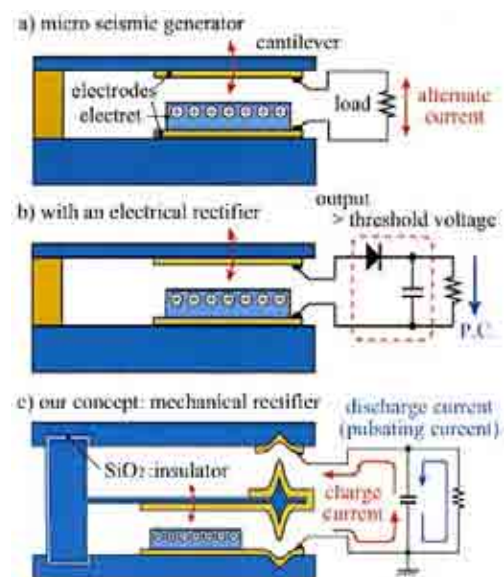


Fig. 10 : 機械式マイクロ整流装置の構成図

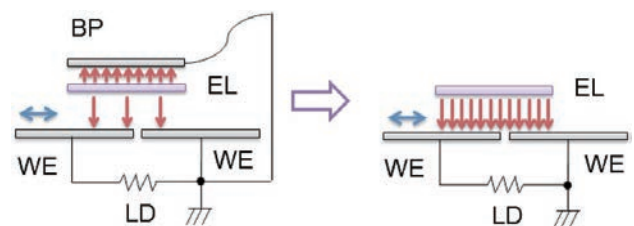


Fig. 11 : マイクロ静電誘導発電における発電効率の向上。
(a) 従来のマイクロ静電誘導発電デバイス。
(b) 考案した新しい静電誘導発電デバイス

3-3 マイクロ発電高出力化の検討

Fig.10はマイクロ静電誘導発電において(b)のような半導体ダイオードを用いた通常の整流ではなく、半導体ダイオードにおける抵抗損を避けるため(c)のようなマイクロ機械的スイッチによる整流を行おうという試みでプロトタイプにてその有効性が確認されています⁸⁾。

- a) 整流機構を用いない交流発電デバイス
- b) 半導体ダイオード整流回路を用いたマイクロ発電デバイス
- c) 機械的整流機構を用いたマイクロ発電デバイス

マイクロ発電デバイスの高出力化が検討されています。Fig. 11(a)は、マイクロ静電誘導発電においてエレクトレット薄膜の支持体に誘起される電荷が発電効率を著しく低下させていることを示したものです。さらに(b)で示すように考案したエレクトレット自立膜作製技術により支持体を不要として発電効率を7倍程度向上させました。

4. おわりに

マイクロ発電が注目されており、年々研究開発が盛んになってきています。本稿では、マイクロ発電の中でも周囲の振動を利用して発電する環境発電デバイスについて著者の研究室の研究を中心にして紹介しました。この他にマイクロ燃料発電、マイクロバイオ発電、マイクロ熱電発電、マイクロピエゾ発電などの研究も行われています。今後、研究開発が進み、新しい商品やサービスが出現するものと期待されます。

【参考文献】

- 1) A. H. Epstein, et al.: Micro Heat Engines, Gas Turbines, and Rocket Engines - The MIT Microengine Project -, 28th AIAA Fluid Dynamics Conference, 4th AIAA Shear Flow Control Conference, AIAA 97-1773 (1997)
- 2) 田中秀治、他: 炭化珪素微細加工とマイクロガスタービンに関する研究、日本機械学会IIP2000 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集(2000) pp. 92-97
- 3) C. B. Williams, and R. B. Yates: Analysis of a Micro-electric Generator for Microsystems, Sensors and Actuators, A, Vol. 52, , pp. 8-11(1996).
- 4) S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey: A Study of Low Level Vibration as a Power Source for Wireless Sensor Nodes, Computer Communication, Vol. 26, pp. 1131-1144(2003).
- 5) 柴田和誠、長澤純人、桑野博: 喜圧電薄膜によるマイクロ発電デバイス、日本機械学会IIP2008 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集(2008)pp2108-2109
- 6) Katsuhiro Tanaka, Hiroki Kuwano, Sumito Nagasawa: A NOVEL SCANNING THERMAL MICROSCOPY SYSTEM, Proc. 21st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2007), (2007)
- 7) 森一紘、鈴木隆史、長澤純人、岡本洋、桑野博喜: 両持ち梁を用いたエレクトレットマイクロ発電の研究、Technical Meeting on Sensors and Micromachines 2008, Mss08-18(2008)
M.Miyashita et al.; MEMS ' 08 in Tucson.
- 8) Sumito Nagasawa, Takashi Suzuki, Yusuke Takayama, Kuni Tsuji, Hiroki Kuwano, Mechanical Rectifier For Micro Electric Generators, Proc. 21st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2008), pp992-995(2008)
- 9) Hiroshi Okamoto, Tepei Onuki, and Hiroki Kuwano, Improving an electret transducer by fully utilizing the implanted charge, APPLIED PHYSICS LETTERS, 93 122901(2008)

【著者略歴】

くわ の ひろ き
桑 野 博 喜

昭和26年8月9日生 新潟県新発田市出身
 昭和50年3月 東北大学工学部機械工学第二学科卒業
 昭和52年3月 東北大学大学院工学研究科
 機械工学第二専攻修士課程修了
 昭和52年4月 日本電信電話公社
 (現日本電信電話株式会社)
 武蔵野電気通信研究所入所
 昭和62年
 ～63年 米国コーネル大学材料科学科客員研究員
 平成10年
 ～11年 東北大学未来科学技術共同研究センター
 客員教授
 平成15年3月 日本電信電話株式会社 退社
 平成15年4月 東北大学大学院工学研究科 教授
 現在に至る
 工学博士 (東北大学)



「エネルギーシステムから未来社会を設計する」

東北大学大学院工学研究科
技術社会システム専攻 教授
中田 俊彦

1. 未来社会を描くには

機械工学のエンジニアが、未来の社会を思い描く。人々が緑に囲まれてエネルギーを賢く使い快適に暮らす社会をデザインするのが、私の研究です。エネルギーシステムの構成機器として、ボイラーやガスタービンといった大型機械から、燃料電池や太陽光発電に至る小型機械までを対象とします。各種エネルギー機器の技術特性の理解に基づいて、それらを複数連結して社会の多様なニーズに応えるネットワークを設計するのが目的です（図1）。そもそもエネルギーシステム設計では、おもに複数機器を組み合わせた動特性の把握に主眼が置かれてきました。制御工学がその主役として、機械工学、電力工学、化学工学、原子力工学など、多様な工学基礎を習熟した専門家が活躍してきました。電力ネットワークは、まさに火力発電機器、原子力発電機器、水力発電機器、風力発電機器、太陽電池などを組み合わせ、生活に必須の電力エネルギーを社会に安定供給するという点で、エネルギーシステムの成功事例でしょう。



図1：熱工学からエネルギー社会システムへ

1980年代からは、地球環境問題への関心の高まりも影響して、エネルギーシステム設計に対して、性格の異なる社会ニーズが増えてきました。従来は、エネルギー安定供給やエネルギー効率の上昇など、技術ニーズが主体であったのに対して、環境汚染物質やCO₂削減といった環境面、コスト等の経済性の追求も加わっています。さらに、技術倫理や企業の社会的責任といった社会・公正面、特許などの知的財産に代表されるビジネス面なども加わり、技術開発のめざすべき目的が複数にまたがるのが特徴です。

このような複合領域は、大学の教育・研究対象というよりは、むしろ社会に入って自然に身につけるモノだと思われかもしれません。しかし、工学の基礎に立ち返ってみると、多目的ニーズに対して最適な解を見いだす点で、システム工学における最適化の応用問題と考えることができます。

コストを固定費と変動費に分けて捉えて、費用の時間的な割引を加味する点では、経済工学（Engineering Economics）の基本問題ともいえます。巨額の設備投資の意志決定問題等は、金融工学（Financial Engineering）が得意とする分野です。環境汚染の防御費用や汚染物質の損害費用を取り扱うのは、環境経済学（Environmental Economics）です。定量化しやすい技術性能、環境基準、財政指標等と、定性化がわかりやすい、豊かさや安心指標等、さまざまな指標を統合してわかりやすい解を提案するのが、21世紀のエネルギーシステム設計の課題です。

このように多分野の学問領域にまたがる境界領域の俗称として、学際融合分野（Inter disciplinary field）や学際横断分野（Trans disciplinary）が用いられます。エネルギーシステム分野だけでなく、地球環境分野、リスクに関わる安全・安心分野、福祉分野等も、この境界領域の代表例です。いずれの分野も、医学、理学、経済学などのいずれかの基本に熟練しつつ、未知の分野への応用に勇敢にチャレンジすることが求められます。そして、最近これらの境界領域では、基本理念と問題解決のための手法を構築する試みが少しずつ進んでいます。

大切なのは、技術に習熟したエンジニアが、これら社会科学の分野にも手を差し伸ばして、得られた知見を本来の技術開発の達成目標に反映させることです。社会科学の専門家は、技術面への理解が必ずしも容易ではなく、ともすると現実からかけ離れた結果を導いてしまう懸念もあります。技術の高度化、分化、深化が進むにつれて、エンジニアでさえも他技術分野の理解が困難な状況だからこそ、技術の理解に根ざして、錯綜する社会ニーズに的確に答えて、かつその解決につながる設計指針を見出せるエンジニアの役割が、ますます高まってきたといえるでしょう。

2. エンジニアとしての原点

私の学生時代を振り返ると、このような新しい時代の兆候を予感することもなく、機械工学分野の基本の一つである熱工学に長らく携わってきました。学生時代の卒業研究では、機械工学科の武山斌郎教授⁽¹⁾の指導の下で、沸騰伝熱面に微細孔を多数開けた場合の熱伝達率の向上効果について実験を通して学びました。凹凸による伝熱面の拡大効果、および核気泡離脱の促進効果が相乗して、通常の平坦伝熱面に比べて50パーセント以上の熱伝達率の向上を実現

できました。研究者として駆け出しのこの時期に、実験を通じた現象の観察とデータ取りまとめの基礎を習得できたことは、その後の歩みにおいて役に立ったと思います。続く大学院修士課程では、沸騰と対照的な相変化現象である凝縮をテーマとして、伝熱面を回転させることによって遠心力による凝縮液滴の離脱が伝熱促進に及ぼす影響を実験を通して観察しました。

学生時代に、冷凍機の組み立てを体験したことも有意義でした。凝縮実験に必要な冷却伝熱面を実現するために低温の冷却液を流す冷凍システムが必要となり、すでに購入していた圧縮機に新たに熱交換機と配管系を新設しました。圧縮機の駆動電源のための電気配線、ドラム缶を熱交換機に見立てて、なまし銅管をらせん状に加工してロウ付けし、冷却液としてエチレングリコールを通します。最後に冷媒のフロンを圧縮機に注入し、実際に氷点下の冷温が実現できたときは感激でした。まさに伝熱の実験を肌身で感じただけでなく、慣れぬ仕事を繰り返すうちに不器用だった手先も少しは器用になり、今でも日曜大工に役立っています。肝心の研究面では、敵状凝縮を伝熱面に安定して持続することが困難で芳しい成果は得られませんでした。その後この冷凍システムが実験室の冷房空調にも活用されたことはささやかな誇りです。

3. 燃焼機器の開発研究

その後社会人として8年間勤務した(財)電力中央研究所では、火力発電用燃焼機器の開発研究に取り組みました。最初の2年間は、石炭焚きボイラーの低NO_xバーナの燃焼特性評価を、続く6年間は、新規プロジェクト研究である石炭ガス用ガスタービン燃焼器開発を担当しました。この研究成果によって電力中央研究所所長表彰と日本燃焼学会技術賞を受賞したのは、たいへん幸運でした。ガスタービン燃焼器の高温化と低NO_x化という相反する目的を同時に実現するために、低カロリー燃料のリッチ・リーン燃焼技術を基礎研究に基づいて新たに提案し、実証器試験により証明したことが評価されました。その後のガスタービン燃焼器の研究開発に少しながら寄与できたかと思います。その後、研究グループメンバーと一緒に米国機械学会ガスタービン部門(ASME-IGTI)から最優秀論文賞を受賞したこともうれしい思い出です。

仕事を通して、共同研究や受託研究を、電力会社や企業と進める機会も多く、国際会議にて成果発表する機会を得ました。たまたま世界一周の出張も二回経験しました。発電用ガスタービン燃焼器の世界シェアの半数を占める米国GE社の研究開発センターは、燃焼器実験スタンドが十系列あり、相当に力を入れて開発に取り組んでいる姿勢が伝わってきました。欧州ABB社では、日本で見かける多缶型ではなく、ドラム缶のような単筒型ガスタービン燃焼器を見て、独特の設計思想に圧倒されました。電力会社の依頼試験として訪れた北陸電力福井火力発電所では、煙道の煤塵測定が目的で、高い煙道の上で日中一週間ほど過ごしたことも

ありました。

4. 米国留学

大学に転職後は、企業では取り組むことが困難な新しい研究分野を模索する日々が続きました。GE ウェルチ会長の著書を読んで、総合電機メーカーから航空用エンジンと発電機器、医療機器、金融サービスの三重点分野に焦点を絞り、集中と選択を実現する経営姿勢に強く惹かれました。これまで公益事業である電力業界に身を置いてきたのに対して、大学研究者としての競争社会と知の自由度の解釈に戸惑いました。恩師の「大学教員は、教育面はどの授業科目でも教えねばならないが、研究面は何を取り組んでも良い」というアドバイスに、目が覚める思いでした。

私が学んだ当時の機械設計では、高効率と低コストが重要な要素で、環境を考慮した設計指標はまだ明確ではありませんでした。いっぽうで、環境配慮を唱える新製品が続々と市場を賑わして、従来の設計思想と環境配慮設計との折り合いを模索しているのが現実でした。したがって、まず大学教育の観点からは、環境調和という新たなニーズを機械設計に反映させる具体的な設計指標の策定を目標とし、研究面では環境と技術の相互作用についての広義的な洞察が重要との結論に至りました。

米国エール大学グレーデル教授とAT&T社環境部門のアレンビー博士が提唱したインダストリアル・エコロジー(Industrial Ecology)は、持続可能な経済成長と環境配慮を両立させるという点で、まさに私の抱いた研究構想と一致しました。そこで、アレンビー博士が出向中の米国ローレンス・リバモア国立研究所(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)に滞在するために、さまざまな奨学金制度に応募して、結局フルブライトスカラーとして留学する機会を得ました。この国立研究所が、単に数理モデルを用いるシミュレーション技術に秀でているだけでなく、米国を代表する軍事研究所の一つで、核兵器関連の研究を進めていることを知ったのは、渡米後しばらく経ってからです。

予定を切り上げてAT&T社に戻ったアレンビー博士の代わりに、留学先ではラumont博士の指導の下で、エネルギー・経済モデルの基本を習得しました。新技術が市場経済で普及するための要求性能について理論的裏づけを学び、CO₂排出量をモデル化し、排出量に制約上限値を設定した場合のエネルギー・バランスへの影響についてモデル解析を進めました。あわせて、環境にやさしい技術(ESTs, Environmentally Sound Technologies, ESTs)の定義、従来の環境対策技術(End of Pipe, EP)から汚染低減技術(Cleaner Production, CP)への変遷も学びました。

ラumont博士は、スタンフォード大学工学部経営工学科(Department of Management Science and Engineering, MS&E)にて博士号を取得し、シンクタンク勤務を経てローレンス・リバモア国立研究所に転職した経済工学の研究者です。退職後の現在も研究所専属のコンサルタントとして

活躍しています。私は、学際分野の専門家であるラモント博士が、どのような大学教育を経て誕生したのかにも興味が湧いてきました。1960年代に、スタンフォード大学工学部内に経済工学科 (Department of Engineering-Economic Systems, EES) とオペレーションズ・リサーチ学科 (Department of Operations Research, OR) が相次いで新設されたこと、この二学科が生産経営工学科 (Department of Industrial Engineering and Engineering Management, IEEM) と1999年に合併して、経営工学科 (MS&E) が誕生したことがわかりました。ラモント博士は、旧経済工学科 (EES) の出身で、私がこれまで聞いたことのない科目分野 (Decision Analysis and Risk Analysis, Economics and Finance, Information Science and Technology, Optimization and Tools of System Analysis, Organizations, Technology and Entrepreneurship, Probability and Stochastic Systems, Production and Operations Management, Strategy and Policy) を熱っぽく語ってくれました。技術の理解だけでなく、現実の社会を科学する手法が多くあることを知る一方で、その一部は戦争を通して生まれた分野であることも次第にわかってきて、まさに実践を伴う学問であると感じました。熱工学を基盤として、このような経済工学分野を取り入れた私なりのコンセプトを図2に作成しました。少なくとも、従来の工学教育では左半分の技術分野に偏っていたことと、右半分の経営面の理解と相まって、より実用性が増すことがわかります。

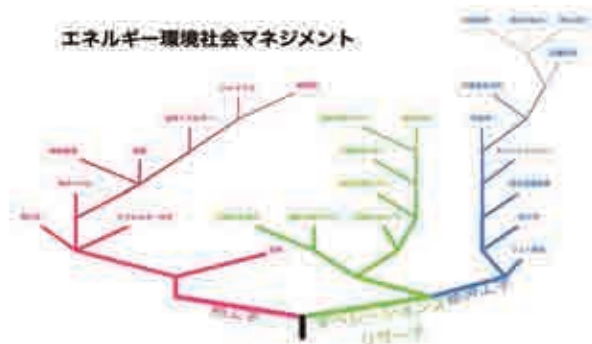


図2：熱工学と経済工学の融合

5. 帰国後の研究展開、技術革新にも環境の視点を

地球環境と経済成長、エネルギー需給が共存できる条件とは何か？ 新技術開発や環境税が市場経済に与える影響は？ 原子力や再生可能エネルギーは問題解決の切り札となり得るか？

地球環境問題では、CO₂濃度増加の物理的な影響解明も重要であるが、優れた技術と有効な施策をいかに組合せて物理的影響を低減するかもきわめて切実な課題です。1970年代中頃から、化石燃料の枯渇を想定したエネルギー需給モデルの開発が進められてきました。従来のエネルギーモデルは、おもにエネルギーのフローに着目しましたが、今日

の環境問題は各種エネルギーの転換技術や環境汚染物質の排出特性が新たな要因として加わって、一層複雑な系を呈しています。したがって、環境、経済、エネルギーを包括する新たなモデルの開発と解法が重要です。これらの視点から、未来のエネルギーシステムを設計する関わる研究を進めています。

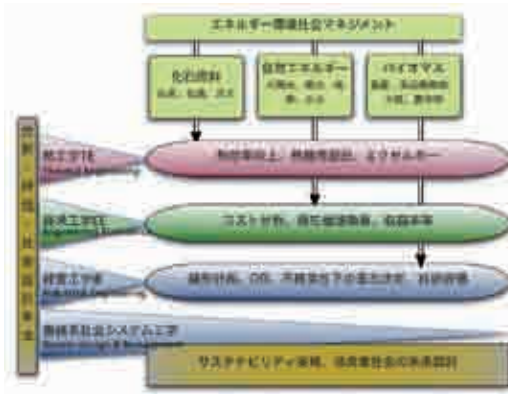


図3：化石燃料からバイオマスに至る学際アプローチの有用性の変遷

とくに学際的な研究アプローチを有用に感じるのは、帰国後に取り組み始めたバイオマス利活用のためのエネルギーシステム設計です。従来の熱工学だけの理解では、最適なシステム設計ができないことに気づきました。この理由を図3にまとめました。つまり、熱工学のアプローチは、化石燃料のエネルギーシステム設計には有用ですが、エネルギー源として風力や太陽光等の再生可能エネルギーが加わる場合には、新規ビジネスとして成立性を評価するために、経済工学が必要になります。さらに、バイオマスをエネルギー源として活用する場合には、技術難易度の高い高温ガス化技術や廃棄物資源の効率的な収集など、考慮すべき要因が増大して、複雑なシステムを設計することになります。こうなると、単にエネルギー収支が優れているだけではなく、対象とする地域社会で円滑に運用できるようなシステム作りという、別の視点も必要になってきます。エンジニアといえども社会設計への関与が要求されるのです。

6. これからのエンジニア教育への思惑

6-1 アフリカで進んでいること

最近、本学アフリカプログラムの一環として、四度ほど南アフリカ共和国を訪れて、先方ケープタウン大学電気工学科のGaunt教授と共同研究を進めています。その縁でしょうか、南アの国立研究財団 (National Research Foundation, NRF) から公募研究の審査を依頼されました。それは、南アの大学教授とモザンビークの大学教授との共同研究提案で、南アのエネルギーシステム設計の知見をモザンビークに技術移転して、産業連関分析によってその効果を検証するものです。モザンビークというと内戦のイメージしかない私にとって、かなり専門性の高い共同研究が現地では始まるこ

と、さらにモザンビーク側の教授が私と同じ熱工学分野出身で燃焼機器の開発経験があることにも、感嘆しました。私が自分の異色経歴を振り返っている間にも、世界中でエネルギーシステム分野における学際的な研究アプローチが始まっていることは、うれしい限りです。

6-2 米国の政府系エンジニア採用要件の一例

12月の米国出張中に、米国政府エネルギー省エネルギー情報局 (U.S. Department of Energy, Energy Information Administration) の学卒者の求人広告が目にとまりました。職種 General Engineers の採用要件として、下記の3項目が列挙されています。

1. Design modeling systems to represent energy markets and physical properties of energy industries.
2. Conduct planning and evaluation projects and studies of continuing and future energy distribution requirements and production capabilities.
3. Evaluate energy conversion processes and related transmission and distribution systems reflective of new and emerging technologies.

さらに、高度なプログラミング能力として、C、C++、FORTRAN のうちの少なくともひとつが必須とのこと。この他にも、オペレーションズ・リサーチの専門職の求人もあり、ますます米国政府のエネルギー情報の分析能力が高まるはずだと感心しました。

6-3 社会から押し寄せる技術情報のなかで

以下の商品名のいくつをご存じでしょうか？ Eco Cute (CO₂冷媒ヒートポンプ給湯機)、Ene Farm (燃料電池システム)、Eco Jozu (ガス焚き潜熱回収型給湯器)、Eco Will (ガスエンジン発電・給湯システム) 等々、いずれも家庭での使用を想定して開発中のエネルギー機器のことです。これらに、iMiEV (プラグイン電気自動車) が加わって、家庭がエネルギーの需要家だけでなく、小出力のコジェネ (熱電併給) 機能を持つことも現実になってきました。既設の大規模なエネルギーインフラと、これらのマイクロ機器がどのように協調していくかが重要な課題であるように、科学技術と社会とは、すでに大きな相互作用の流れに入ってきました (図4)。要素機器の製品開発を得意とするエンジニアが、

社会の動向を理解し、開発途上国の生活様式を感じ取ることを通して、地域社会開発に大きく足を踏み出すといっても、過言ではないでしょう。「独眼竜の青葉山に立てこもり世界を相手に飛翔しさえすれば良かった教授陣⁽¹⁾」が、モザンビークで羽ばたくには、もう少し時間がかかるようです。

以上、私の研究プロフィールを、研究の経緯を含めてご紹介しました。ここに至るまでに、多くの方々にお世話になりました。あらためて御礼申し上げます

【参考文献】

(1) 武山斌郎、翠織の境 — 青葉工学振興会とその周辺 —、日本機械学会誌、91(830)、81-82 (1988)。

【著者略歴】

なか たくし ひこ
中 田 俊 彦
昭和35年10月12日生
昭和58年 3月 東北大学工学部機械工学科卒業
昭和60年 3月 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程前期2年の課程修了
昭和60年 4月 財団法人電力中央研究所 研究員
平成 5年 9月 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻助教
平成 9年 フルブライトスカラー (米国ローレンス・リバモア国立研究所) 研究員
平成10年 }
平成14年 4月 東北大学大学院工学研究科技術社会システム専攻助教
平成18年 4月 東北大学大学院工学研究科技術社会システム専攻教授

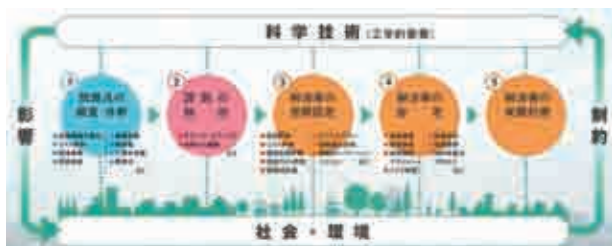


図4：科学技術と社会の相互作用



ユビキタス半導体チップ -いつでもどこでもだれでも必要な情報を入手-

東北大学大学院工学研究科
電子工学専攻 教授
伊藤 隆 司

1. はじめに

安全・快適で豊かな社会の実現に向けて益々多くの半導体チップが必要になっています。パソコン、携帯電話、自動車、家電製品やゲーム機器などに組み込まれる半導体チップを合算すると数千億個になると考えられます。ICカードも個人認証、電子乗車券、電子決済などに広く普及してきています。さらに、無線通信機能を有する半導体チップであるRFID(Radio Frequency IDentification)は、電子タグ、無線タグ、ICタグなどとも呼ばれ、非接触・軽量・小型である特徴を活かし、バーコードに代わる個品管理タグとして実用が進んでいます。バーコードにない特徴としては、無線による遠隔からの情報授受、大量の個品情報の一括読み出し、情報の書き換え、センサー情報の自動認識などが上げられます。内蔵電池が不要なパッシブ型RFIDは、食の安全に関するトレーサビリティの強力なツールとしても期待されています。図1に示すように、RFIDはいつでもどこでもだれでも必要な情報を入手できるユビキタスネットワーク社会のコアとしてあらゆるものに装着され幅広い応用が考えられます。その数は現在使われている半導体チップの数桁以上になるかもしれません。そのような普及の課題は、種々の環境下で安定して使用できる耐環境性の向上に加え、セキュリティ情報を保護することも含めた記憶容量の増大などの高性能化、インターフェースを充実させた多機能化、製造の低コスト化です。



図1：RFIDの装着により必要な情報をすぐに入手する。

高性能なRFIDの製造コストを大幅に下げることを目指し、安価なガラス基板上の薄膜トランジスタ(Thin Film Transistor; TFT)の活用を研究しています。TFTを用いたRFIDは従来の単結晶シリコンICチップに比べ、遥かに低

コストで製造できる特徴があります。また、現状のRFIDは小さなシリコンチップとアンテナを結合させる実装費用が製造コストのかなりの部分を占めています。安価なガラス基板上にアンテナとRFID回路と一体製造できれば飛躍的にコスト削減が可能になると考えられます。

TFTは液晶ディスプレイの画素選択素子や周辺回路素子として実用されていますが、LSIに用いられている単結晶シリコントランジスタに比べて性能は遥かに劣っています。これは結晶粒の小さいポリシリコン膜を使うためです。

最近、ガラス基板上のTFTではレーザアニール等の大結晶粒化技術により単結晶シリコン基板を用いるバルクデバイスとほぼ同等の性能が得られるようになってきました。高性能なTFTは基板間の寄生容量が抑えられるため、半導体チップの低価格化と同時に高性能化と低電力化が実現できます。これらの高性能なTFTの利点を活かしたRFIDを「ユビキタス半導体チップ：Uチップ」と呼んでいます。TFTを高機能なRFIDに適用するためには、TFT電流駆動力のさらなる増大、特性ばらつきの低減、ばらつきを許容する設計余裕度の大きい回路、オンチップ不揮発性メモリおよび高効率アンテナの設計などの研究が必要です。ここでは、応用分野の拡大が期待されるUHF帯(周波数：900MHz～2.45GHz)のパッシブ型RFIDの飛躍的な低コスト化・高機能化を目指して展開しているUチップの研究について紹介します。

2. Uチップのシステム構成

ガラス基板上に作成するUチップの基本回路構成を図2に示します。外部リーダ・ライタから放射される電波を受信するアンテナ、受信したRF信号から回路動作に必要な直流電力を生成する電源回路、RF信号に重畳するベースバンド信号を抽出する受信回路、受信信号から回路の動作に必要なクロック信号を再生し、受信した命令をデコードし適切な処理を実行するための制御を行う制御回路、各種情報を格納するメモリ回路、処理した結果を外部リーダ・ライタに対して返信する送信回路から成っています。メモリ回路には情報を随時書き換えられ、電力を消費しないで記憶保持できる不揮発性メモリを使います。UHF帯の電波を用いると、数mの距離の通信制御が可能になります。

期待されるUチップの特徴を図3に示します。従来の高価な単結晶シリコン基板に代わり安価なガラス基板を用い

高性能なTFTを製造すれば、低温プロセスによる熱負荷の低減によりプロセスコストが低減できるだけでなく、絶縁体基板を用いることにより導電性のシリコン基板に比べ電力損失を低減することが可能になります。また、高効率のオンチップアンテナができれば、実装コストの大幅な削減になります。チップ価格はUチップに搭載する機能によりますが、従来RFIDの数分の一になる試算もあります。

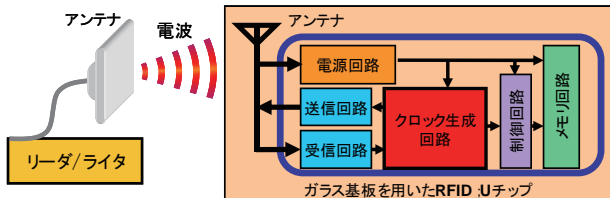


図2：Uチップを用い無線通信制御で情報の送受を行う。

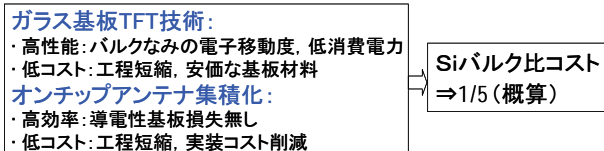


図3：低コストガラス基板RFID;Uチップの特徴

3. Uチップのプロセス技術

Uチップの断面構造とプロセス要素技術を図4に示します。高性能TFT技術と不揮発性メモリ技術がコアです。ガラス基板を用いるため全体のプロセス温度を500℃以下にする必要があることに加え、これらのデバイスをできるだけ安価に製造することを念頭に置き、新規技術を開発しています。

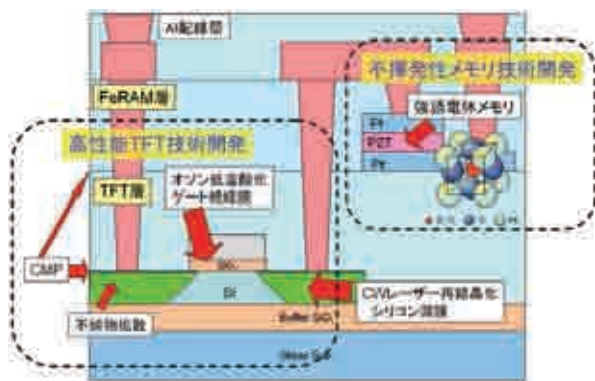


図4：Uチップの断面構造と要素プロセス技術

はじめに、ガラス基板の上にバッファシリコン酸化膜を、続いてアモルファスシリコン膜を堆積させます。この膜に連続発振グリーンレーザーを照射し、溶融再結晶化により結晶粒を20 μm程度に巨大化させます。高品質ゲート絶縁膜

形成にはポリシリコン薄膜のオゾン酸化スパッタ法を新規開発しました。450℃でゲート絶縁膜形成を行い、界面準位の少ない高品質シリコン酸化膜の形成に成功しました。ソースとドレイン領域の不純物拡散にはアモルファスシリコン薄膜の結晶化と同時に燐をドーピングする新しい方法を確立しました。レーザー結晶化シリコン薄膜は、複数の結晶面方位を持ち、結晶粒起因の表面凹凸が存在します。エタノール添加CMP(Cheical Mechanical Planarization)技術を開発し、凹凸のあるポリシリコン膜の平坦化に初めて成功しました。

図5に、CWグリーンレーザーによるアモルファスシリコンの結晶化の様子を示します。ガラス基板上でレーザービームをラスタースキャンしてシリコン膜を溶融結晶化することにより長さ20 μm、幅2 μmのサイズの1次元状結晶が成長できます。この結晶化シリコン薄膜を用いてTFTを試作したところ、図6に示すように、電流オンオフ比が6桁あり電流駆動力の大きいTFTが実現できました。性能指数のひとつである電子の実効移動度を求めると、単結晶シリコンを用いた時に匹敵する約300cm²/Vsの高い値となっています。高周波特性の評価によると、ゲート長が1.8 μmと比較的長く、ゲートオーバーラップ容量が大きいにも拘らず、f_{max}は1.4GHz、f_Tは400MHzとなり、数100MHzの周波数帯で動作することが確認できました。このように、一般に用いられているTFT特性を大幅に凌駕する高性能が実現されています。

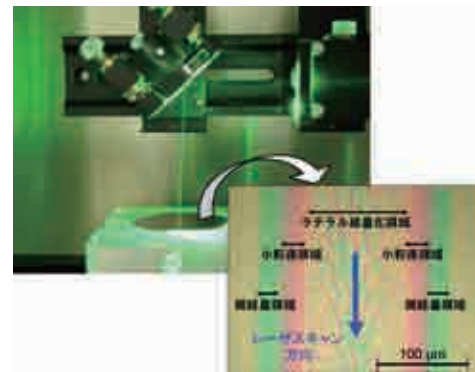


図5：CWレーザーをラスタースキャンすることによりシリコン膜を溶解し、1次元状の結晶粒を成長させる。

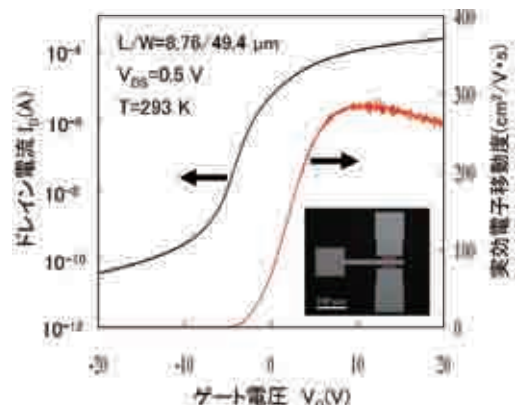


図6：試作したTFTの電流電圧特性と実効電子移動度

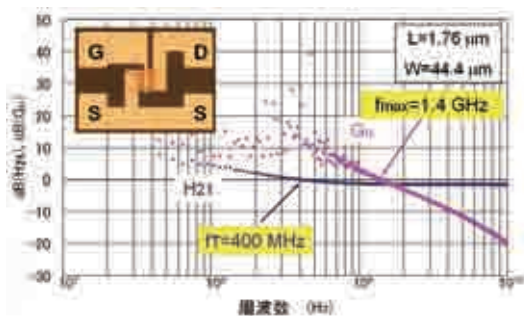


図7：試作したTFTの高周波特性測定結果

不揮発性メモリには強誘電体であるPZT（チタン酸ジルコン酸鉛）を用いています。絶縁層上で白金を電極としてPZT膜をはさみキャパシタ構造とします。PZT膜に強誘電性をもたせるためにはペロブスカイト相にする必要があります。ここにもCWグリーンレーザスキャンを適用しています。従来700℃以上の高温アニールが必要であったペロブスカイト相への優先的配向が実質的に500℃以下の基板温度で実現できるようになりました。図8に示すように不揮発性メモリとして十分な残留分極値である16 μC/cm²が得られています。

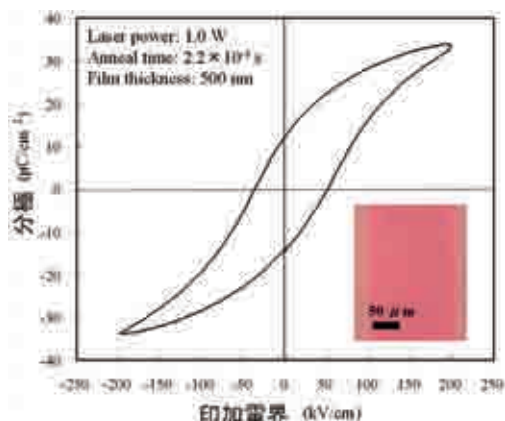


図8：ガラス基板上で実現したPZT膜の強誘電分極特性

4. 高効率アンテナ設計

パッシブ型RFIDでは、アンテナで受信した信号から電力を取り出し各回路に供給します。わが国のUHF帯RFIDの規格は、リーダ・ライタ送信電力：4W（36dBm）EIRPとなっていますので、数mの通信距離を想定すると受信可能な電力は数10 μW程度となります。従来の多くのRFIDは半導体チップ寸法に対して100倍以上大きいアンテナを外付けしていることから、高効率なアンテナをシリコン基板にオンチップ集積することは現実的ではありません。ガラス基板TFT技術を用いればコスト面からのチップ面積制限が緩和されるため、高効率オンチップアンテナ集積が可能になります。Uチップに搭載する高効率オンチップアンテナに向けて、図9に示すように、全長50mm以下のメアンダダイポールアンテナにショートスタブと伝送線路を組み合わせた設計により、UHF帯の広い帯域において90%以上

のインピーダンスマッチング効率を実現しました。

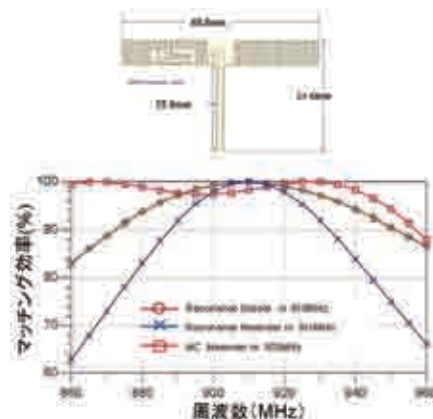


図9：マッチング回路一体化した高効率アンテナ

5. 要素回路設計

一般に、RFIDが受信する電力は数10 μWですので、電源回路の効率はできるだけ高いことが求められます。また、RFID回路が動作するためには1V以上の直流電圧が必要であり、電圧増回路が必要になります。図10示すDicksonチャージポンプ回路が代表的な電源回路です。

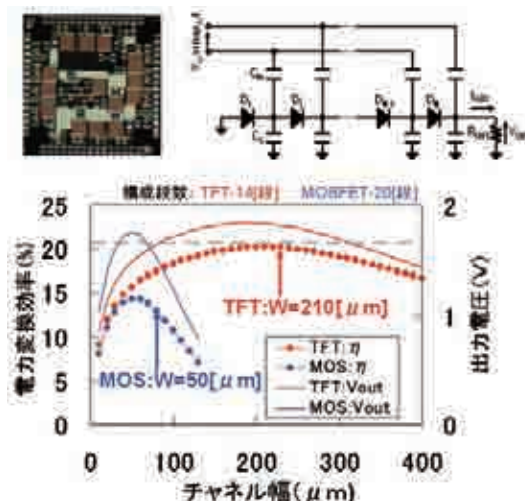


図10：チャージポンプ回路の電力変換効率比較

ダイオードによる整流回路を直流的に縦積みし、整流回路1段で発生できる直流電圧を段数分増倍して出力します。TFT回路と一般のMOSトランジスタ回路で電力変換効率比較すると、TFTの場合は基板容量が無視できるため約20%の効率と1V以上の出力電圧が得られることが分かります。

一般に、TFTのしきい値はMOSトランジスタに比べて高くなります。TFTのしきい値を、整流回路自身の出力電圧で補正し、低入力電力領域で極めて高い電力変換効率を実現する自己しきい値補正型整流回路を考案しました。図11は、考案した自己しきい値キャンセル・自己レギュレーション機構搭載高効率電源回路の回路図を示します。バルクCMOS回路の検証では、-9.9dBmという低い入力電力に

において29%というこれまでの報告にない高い効率を実現しました。

RFIDでは、基地局から一定期間送られる基準信号（プリアンブル）を受信し、その信号に同期するクロック信号を内部で生成します。クロック信号の周波数誤差は、規格により15%程度許されていますが、特性ばらつきが比較的大きいTFTを用いて回路を構成する場合、ばらつき耐性を有する回路形式が必要です。そこで、デジタル制御方式を取り入れたクロック生成回路を考案しました。図12に示した内部発振回路はプリアンブル周波数に対して64倍の周波数で発振し、10%の特性ばらつきがあっても広範囲の内部クロック周波数生成を実現しています。

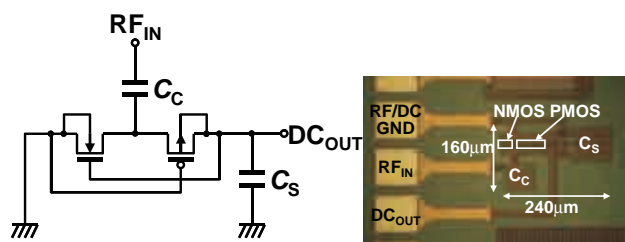


図11：自己しきい値キャンセル機能搭載電源回路

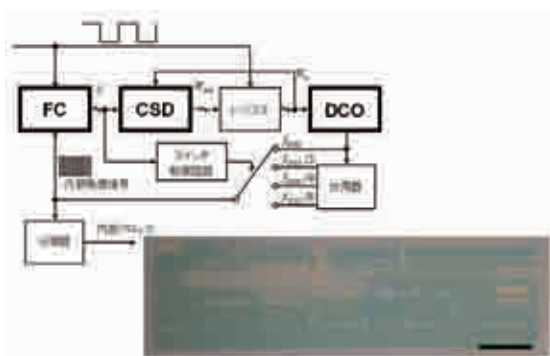


図12：TFTの特性ばらつきを許容するデジタル制御方式のクロック生成回路

PZTメモリの記憶読み出しはプレート線駆動に伴う分極反転電荷をビット線容量によって電圧に変換することにより行います。ガラス基板のTFTでは寄生容量が極めて小さく、ビット線容量は極めて小さいため通常の読み出し方式では十分に電圧変換が出来ずメモリ読み出しが難しくなります。ビット線電位をフィードバックにより一定値に保持し、電荷積分回路により低ビット線容量下でも安定して読み出し可能な回路を考案しました。また、特性ばらつきが大きいという問題に対しては、チョップタイプのしきい値補正反転増幅回路を用いることにより克服しています。

現在、以上のような要素技術・各種回路をインテグレーションすることによってUチップの試作に取り組んでいます。図13は、試作したUチップのプロトタイプです。



図13：試作したプロトタイプTFT-RFID:Uチップ

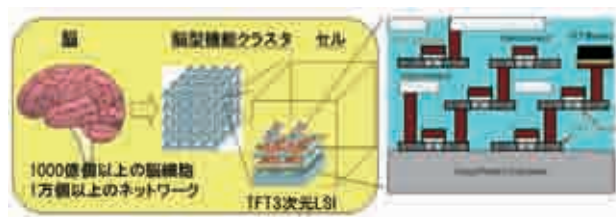


図14：高性能TFT技術による将来の3次元LSI

6. おわりに

ユビキタスネットワーク社会のコアになることが期待される高性能TFTを用いた低コスト高機能RFIDの実現に向けて、デバイス・製造プロセスおよび回路設計にわたって研究を展開しています。図14に示すように、これらは脳機能に漸近するシステムチップ実現を目指す将来のLSIに必須の三次元化技術につながるものと考えています。

【著者略歴】

いとう たかし
伊藤 隆 司

昭和21年 4月26日生

昭和44年 3月 東京工業大学理工学部電子工学科卒業

昭和49年 3月 東京工業大学大学院工学研究科
電子工学専攻博士課程修了（工学博士）

昭和49年 4月 富士通株式会社入社

昭和63年12月 株式会社富士通研究所半導体研究部長

平成13年 4月 株式会社富士通研究所
シリコンテクノロジー研究所長

平成15年 4月 富士通株式会社LSI事業本部技師長兼、
あきる野テクノロジーセンタ長兼、
産業技術総合研究所先端SOC研究体長

平成16年 8月 東北大学大学院工学研究科 教授



材料製造プロセスにおける流動・伝熱・物質移動現象 - 材料の構造形成との関わりを明らかにすることを目指して -

東北大学大学院工学研究科
化学工学専攻 教授
塚田 隆夫

1. はじめに

金属、半導体、高分子、セラミックスなどの材料の物性や機能は、材料を構成する物質固有の特性に加えて、材料の高次構造と密接に関係しています。従いまして、機能性材料を創製するためには、新たな物質の探索だけではなく、メソスケールでの構造をいかに制御するかがとても重要になります。一方、工業レベルで“ものづくり”をするには、常に装置の大型化と高速化が求められ、結果として実験室のように均一で理想的な製造プロセスを実現することは難しく、装置内には速度、温度、濃度分布が形成され、これらの分布が材料の構造形成過程に影響し、さらに材料の物性や機能の不均一性を引き起こすことになります。そこで、工業的視点での機能性材料製造プロセスにおける、私のバックグラウンドである化学工学の重要な役割の一つは、“目的とする構造の材料を創製するために必要な（最適な）マクロな場（流動場、温度場、濃度場）の設計基準の確立とその具現手法（装置設計と操作条件の最適化及び制御法）の提供”にあると考えます。そのためには、まず材料製造装置あるいはプロセスにおけるマクロな熱流動場、反応拡散場、そしてこれらマクロな場での材料構造形成メカニズムを理解し、さらに得られた知見を基にマクロな場とメソスケールでの材料の構造との相関を明らかにすることが必要になります。

私たちの研究室では、1) 半導体や酸化物単結晶成長プロセス、2) 金属や半導体材料の電磁浮遊プロセス、3) 高分子薄膜製造プロセス、4) 微粒子製造プロセスなどを対象とし、“まずプロセスにおけるマクロな場を、そして材料構造形成、物性・機能との相関を明らかにする”ことを共通の目標として、個々のプロセスにおける現象の精緻な数値モデリング手法を基盤技術として開発し、数値シミュレーションと現象のその場観察実験とを有機的に組み合わせつつ、研究を進めています。本稿では、その研究の一端を紹介させていただきます。

2. 酸化物単結晶成長プロセスにおける熱流動場の解明

$Y_3Al_5O_{12}$ (YAG)、 $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG)、 $LiNbO_3$ (LN)・・・(挙げると切がありません)といった酸化物単結晶は、電子デバイス材料、固体レーザー材料、光学素子など広く産業界で使用され、その多くは図1に示すチョクラスキー(CZ)法により製造されています。この方法では、金属製ルツボを

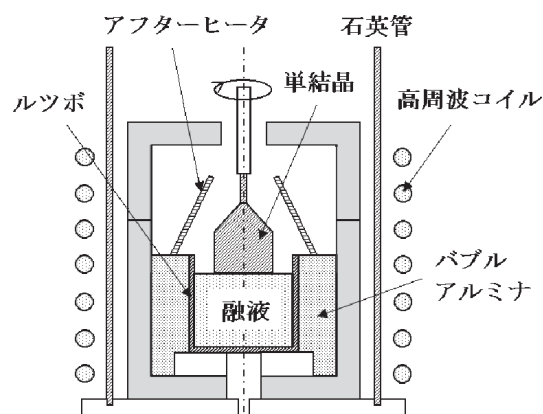


図1：単結晶成長用CZ炉の概略図

その周囲に設置した高周波コイルに高周波電流を流すことにより誘導加熱し、ルツボ内の原料を溶融します。その後、原料の融液表面に種結晶を接触し、これをゆっくりと回転しながら引上げるにより任意のサイズの円筒形の結晶を成長する方法です。ところが、成長条件によっては、結晶成長過程において、結晶内部にコアと呼ばれる屈折率が異なる領域が発生したり、結晶中に気泡が混入したり、クラックが発生したり、さらには結晶が急激に曲がったりねじれたりして結晶を安定に成長できなくなるなどの問題が生じます。また、結晶内の組成の不均一分布や欠陥分布などに基づくミクロスケールでの機能・物性の不均一性も発生します。これら結晶成長時に発生する問題点の多くは、実は成長時の炉内の輸送現象、例えば融液内の熱対流や結晶を通しての熱移動、そして固液界面の形状と密接に関係しています。そこで、単結晶の高品質化を達成するためには、単結晶成長炉内の流れや熱・物質移動現象を定量的に把握し、かつこれらの現象と上に述べた様々な結晶成長時の問題点との相関を明らかにすることが必要不可欠となります。

このような背景から、私たちの研究室では、酸化物単結晶成長用の高周波加熱CZ炉内の諸現象を把握する手段として総合熱解析手法を開発し、操作条件と炉内の熱流動場との相関、そしてこれらの結果に基づく最適な操作条件の探索を行ってきました。なお、単結晶成長プロセスは高温プロセスであることから、流れや温度場の計測が難しく、近年シリコン単結晶成長プロセスをはじめ、現象を把握する手段として数値シミュレーションの有用性が広く認めら

れています。

総合熱解析では、CZ炉を構成する全ての要素を考慮し、炉の幾何学形状、操作条件及び各熱物性値を入力データとして、炉内電磁場、融液内速度場、炉内温度場、固液・気液界面形状及び結晶引き上げ速度もしくは高周波コイルの電流量、さらに必要に応じて結晶内温度分布に基づき結晶内熱応力場を求めることができます。なお、酸化物単結晶はシリコンなどの半導体単結晶と異なり、結晶（場合によっては融液も）が可視及び赤外光に対して透明あるいは半透過性の場合が多いため、結晶内の熱移動に対し伝導伝熱に加えて輻射伝熱が寄与し、これを熱伝解析に考慮しなければならないことが一つの特徴となります。

図2は、高周波加熱CZ炉を使用したLN単結晶成長プロセスの解析例を示したものです。図中にはCZ炉全体の温度分布、融液内の速度及び温度分布を示しました。結晶の回転数の増加に伴い、図のように融液内の対流は3次元非定常性を示し、ある周期で3次元の温度パターンが融液表面近傍をゆっくりと回転するようになります。また、このときの固液界面形状は結晶に対して凸形状となっています。融液内には、温度分布に起因して発生する自然対流と結晶の回転による強制対流が共存しますが、それぞれの対流の寄与の程度に依存して、固液界面形状は融液に対して凸もしくは凹形状に変化します（固液界面の反転現象）。図2は結晶回転速度が比較的大きい場合であり、少なくとも固液界面直下では強制対流支配となるため、図のように固液界面は結晶に対して凸形状となります。酸化物単結晶の品質を左右するコアの発生、気泡の混入やクラックの発生は固液界面形状に依存しますので、図2のような解析を通し、安定で高品質の結晶を成長するための条件の探索を行っています。

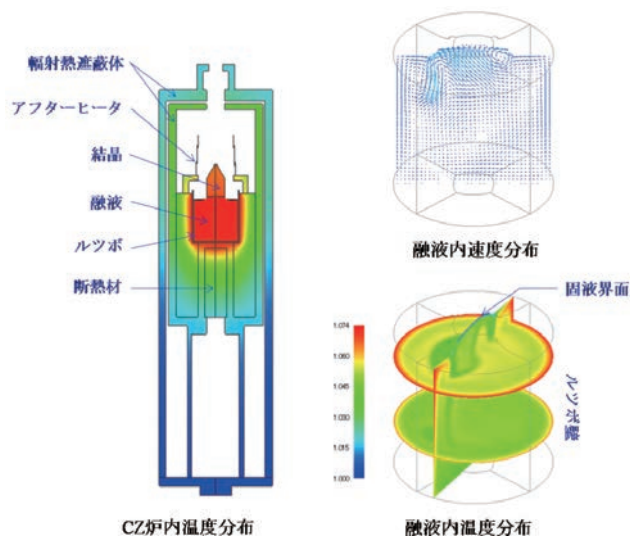


図2：CZ炉内の熱流動場の数値シミュレーション結果

3. 高温融液の熱伝導率の高精度測定法の開発

2.で述べた酸化物単結晶成長プロセスに限らず、シリコンなどの半導体単結晶成長プロセス、さらには航空機エンジンに利用されるタービブレードの一方向凝固プロセスなど、近年高温プロセスにおける現象を理解するための手段として数値シミュレーションが広く行われています。数値シミュレーションにより正確な結果を得るためには、前述したような精緻な数理モデルの開発を行うことはもちろん重要ですが、数値シミュレーションの入力データである熱物性値、特に高温融液の高精度な熱物性値を獲得することも必要不可欠です。しかし、対象が高温であることに加え、シリコン融液などは反応性が極めて高いことなどの理由から、適切な熱物性値の測定法が無く、これまで信頼性の高い熱物性値はあまり提供されていませんでした。中でも、高温融液の熱伝導率の測定は極めて難しく、例えば半導体のシリコンを例に挙げますと、融点近傍の限られた温度領域あるいは電気伝導度の測定値から間接的に求められたデータが存在しているに過ぎません。その主たる原因は、高温融液の熱伝導率を測定する際に融液内部に発生する対流の影響を除去することができず、結果として対流の影響を含めた（有効）熱伝導率を測定することになるからです。

このような背景の中、最近東北大学多元物質科学研究所の福山教授の研究グループとの協同で、図3に示すような静磁場を重畳した電磁浮遊装置を使用することにより、高温融液の熱伝導率を測定するための装置を開発しました。本装置では、導電性試料の周囲に設置した高周波コイルによる電磁力により試料を浮遊させるとともに、誘導加熱により試料を加熱溶融することができます。結果として、容器を使用すること無しに熱伝導率の測定が可能となり、反応性の高い試料に対しても容器からの汚染を回避することができ、また容器壁での不均一核形成を避けることができるため融点以下の過冷却領域を含む広範な温度条件における測定が可能となります。さらに、試料に静磁場を印加することにより、融液内の対流を抑制することができ、熱伝導率測定における最大の問題点であった測定値に及ぼす対流の影響を除くことができました。

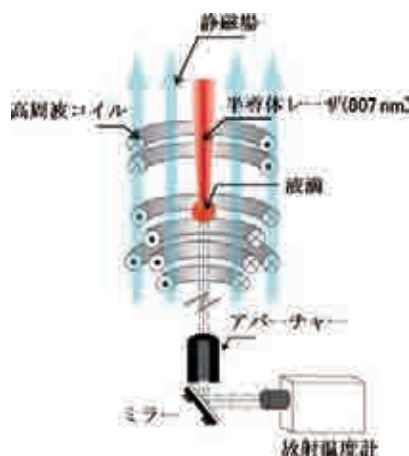


図3：静磁場重畳電磁浮遊装置の概略図

このように、内部の対流が抑制された浮遊試料に対してレーザー周期加熱法を適用することにより、シリコン融液の熱伝導率を、過冷却領域を含む広い温度範囲で、世界に先駆けて測定することに成功しました。レーザー周期加熱法では、図3に示すように浮遊した液滴の上部を半導体レーザーにより周期的に加熱し、このときの液滴下部の温度応答を放射温度計により測定します。下部の温度応答は、液滴のサイズと熱伝導率の値に依存し、レーザー出力の周期的変化に対してある位相差を生じますので、レーザーの周波数と位相差との関係を実験的に測定し、この結果に対して適切な伝熱モデルを適用することにより熱伝導率を求めることができます（ここで開発した方法では、放射率も同時に求めることができます）。なお、測定に当たり、本当に対流は抑制されているのか、熱伝導率の測定値に影響を与えない静磁場強度はどのくらいかという実験では解決できない疑問が生じますが、開発した測定プロセスに対応する厳密な数値シミュレーションを行うことにより、いずれの疑問に対しても答えを出しております。

静磁場を重畳した電磁浮遊技術を利用しますと、熱伝導率や放射率だけでなく、高温融液の比熱、密度、表面張力の安定な測定を行うことができます。現在、前出の東北大学多元物質科学研究所の福山教授を中心に、JSTの支援のもと東北大学、慶応大学、首都大学東京、学習院大学、大阪府立大学の研究者からなるプロジェクトチームが編成され、高温融液の熱物性値を高精度で測定するための世界に類を見ない装置開発を進めているところです。

4. 不均一場における相分離現象の解明

一相状態にある多成分混合系が温度などの変化に伴い二相に分離する、いわゆる相分離現象は、“スピノーダル分解”もしくは“核生成・成長”をメカニズムとして発現する相転移現象であり、ポリマーブレンドや合金など多成分系材料のメソスケールの高次構造を決定する重要な現象です。しかし、密度の異なる成分からなる流体（液/液）混合系の相分離の場合、相の粗大化の過程で固化をしない限りは、粗大化の後期過程において、重力の効果により高密度の相が下方に沈み、最終的に上下二相に分離するという極めて単純な相分離構造を形成します。ただし、これは低温で相分離する系全体を、一相状態から一様に臨界温度以下に冷却した場合の相分離過程・構造です。これに対して、系内に予め温度分布や濃度分布、さらにはこれら分布に起因して発現する対流（密度差に起因して発生する浮力対流や表面張力差に起因して発生するマランゴニ対流）が存在する不均一場、すなわち非平衡環境下においては、重力だけでなく、それぞれの効果が相分離現象と重畳するため、その寄与の程度によって相分離過程が異なり、相分離構造も変化することが予想されます。従って、不均一場における相分離現象を理解することは、実プロセスにおける相分離現象の理解において重要なだけでなく、マクロな場の制御による新しい相分離構造制御法へと展開していくこととなります。

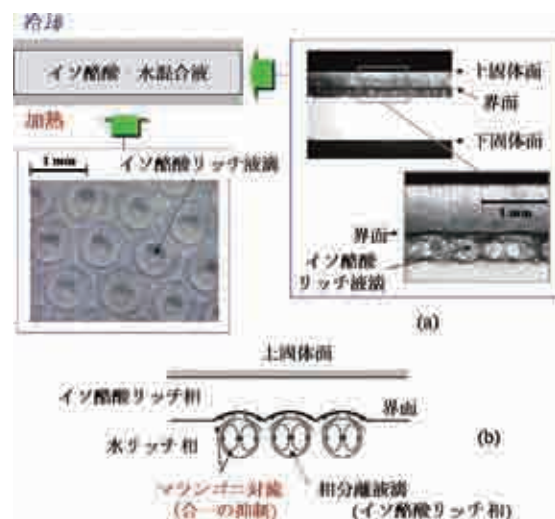


図4：温度勾配下での相分離現象

このような背景の中、私たちの研究室では、温度勾配下の二成分混合液膜層内に発現する特異な相分離構造の形成メカニズムを解明すべく、実験による詳細な検討を行っています。図4(a)は温度勾配下での液膜層（イソ酪酸-水混合液膜層）内の相分離構造を下方及び側面から観察した結果であり、また(b)はこれらの観察結果をもとに提案した構造形成メカニズムです。液膜層上面を冷却することにより、層上部から相分離が開始します。液膜層上部では合一・粗大化が進み、ある程度時間が経過すると重力の効果により密度安定層（イソ酪酸リッチ相）が形成されます。このとき液膜下部で遅れて相分離し上昇してきた液滴は、上部の水平相に合一するのではなく界面下に留まります。この合一の抑制は、液滴表面に沿った温度分布に起因するマランゴニ対流によるものであり、(b)のようにマランゴニ対流が液滴と界面の間に常に液体を供給するために起こるものと考えました。また、マランゴニ対流は液滴同士の合一も抑制し、結果として図4(a)のように規則的な相分離構造が下方から観察されると推察しました。図4の平面的な構造形成は、重力、温度勾配、及びこれに起因して発現したマクロスケールの対流（マランゴニ対流）と相分離との相乗効果の結果です。私たちは、初期濃度勾配を変えることにより、図4のパターンのサイズが変化することを見出しており、温度勾配、濃度勾配の制御により相分離構造及びそのサイズの制御が可能であろうと考えています。

以上は低分子系の相分離現象ですが、高分子系（ポリマーブレンドの溶媒蒸発誘起相分離現象）においても、ガラス基板上に形成された微小な電極形状を工夫することにより、その上に展開されたポリマーブレンド溶液層内に発現する電気流体力学的（EHD）対流の規則構造を制御し、ポリマーブレンド膜の相分離構造を制御することも試みています。なお、EHD対流は誘電液体内に存在する電荷と電場との相互作用（クーロン力）によって発生する対流です。

加えて、流体力学的効果を考慮したCahn-Hilliard方程式に基づく相分離現象の数値シミュレーションを試み、実

験では捉えることが出来ない時空間スケールでの相分離過程の可視化を行うことにより、相分離構造に及ぼす温度勾配や濃度勾配の影響を理論的に検討しています。

5. 液相中の微粒子ダイナミクスの解明

せん断流中での微粒子の凝集挙動、さらには凝集体自体の力学的特性を理解することは、微粒子製造プロセスや研磨スラリーを用いた研磨プロセスなどにおける最終製品の特性の把握・制御において極めて重要です。例えば、半導体デバイス製造プロセスのキーテクノロジーである化学的機械研磨(CMP)プロセスにおいては、被研磨面のスクラッチといった欠陥の発生が問題視されていますが、その発生要因の一つとしてスラリー中の微粒子凝集体の存在が考えられています。従いまして、研磨粒子のせん断場での凝集状態や圧縮、ずり応力に対する凝集体の変形・分裂挙動といった微粒子凝集体の力学的特性を明らかにすることは、CMPプロセスの高効率化において極めて重要と考えられます。

私たちの研究室では、特に2枚の固体壁面間の狭い空間内に形成されたせん断流中の微粒子凝集体の凝集・分散挙動を明らかにするために、走査型共焦点レーザー顕微鏡を備えたその場観察装置を開発し、微粒子凝集体のサイズや構造に及ぼす壁面間隔やせん断速度の影響を検討してきました。その結果、壁面間隔の減少に伴う空間的拘束により、微粒子凝集体の成長が著しく抑制されること、しかし凝集体の構造は壁面間隔やせん断速度に影響されないことを明らかにしました。また、最近ではせん断流中で形成された凝集体自体の力学的特性を明らかにすることを目的とし、図5に示すような共焦点走査型レーザー顕微鏡とマイクロマンピュレーターから構成されるマイクロ圧縮試験装置を製作し、微粒子凝集体1個の圧縮変形特性の測定を試みています。さらに、実験と並行して、東京大学工学研究科の山口教授の研究グループと協同で液相3次元粒子運動シミュレーションを行い、凝集体の圧縮変形メカニズムに関する理論的検討も進めています。

6. おわりに

本稿では、材料製造プロセスに関連する私たちの研究の一端を紹介させていただきました。対象プロセスが多岐に渡っていますが、冒頭に述べましたことを共通目標とし、数値シミュレーションと実験の両輪で研究を進めております。いずれも“材料構造形成、物性・機能との相関”に至るまでは、まだ道遠ですが、一步でも目標に到達できるように努力しております。なお、目標を達成するためには、化学工学だけではなく、材料工学をはじめとする他分野の研究者の方々との協同研究の結果としてはじめて成し遂げられるものと考えております。

【著者略歴】

塚 田 隆 夫

昭和31年10月12日生

昭和54年 3月 東北大学工学部化学工学科卒業

昭和56年 3月 東北大学大学院工学研究科化学工学専攻博士課程前期修了

昭和59年 3月 東北大学大学院工学研究科化学工学専攻博士課程後期修了

昭和59年 4月 東北大学非水溶液化学研究所 助手

昭和62年 7月 米国ラトガース大学博士研究員

平成 2年 2月 東北大学非水溶液化学研究所 講師

平成 3年 9月 東北大学反応化学研究所 助教授

平成 5年10月 東北大学工学部 助教授

平成 6年 8月 東北大学反応化学研究所 助教授

平成13年 4月 東北大学多元物質科学研究所 助教授

平成17年 4月 大阪府立大学大学院工学研究科 教授

平成20年10月 東北大学大学院工学研究科 教授

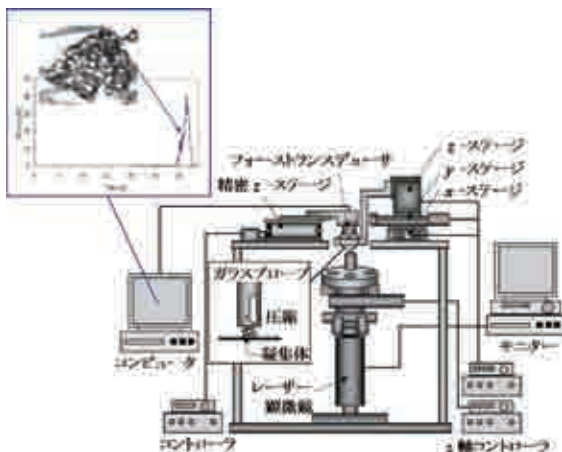


図5：マイクロ圧縮試験装置概略図



永久磁石の高性能化を目指して

東北大学大学院工学研究科
知能デバイス材料学専攻 教授
杉本 諭

1. はじめに

人類が永久磁石を手にしたのは紀元前であり、磁鉄鉱を利用するのが最初であるといわれています。また、古代ギリシャ、マグネシア地方で磁鉄鉱が産出されたことから、永久磁石材料の「マグネット（マグネ）」は、マグネシア地方のマグネに由来しているといわれています。しかしながら人類が永久磁石材料を人工的に作り出したのは、20世紀に入ってからであり、その端は、1917年に本学の本多光太郎先生がKS鋼を開発されたことにあります。

図1に示した永久磁石材料の強さ、すなわち単位体積当たりが発生する最大のエネルギーである最大エネルギー積((BH)max)の変遷を示しました。最近のネオジム-鉄-ボロン(Nd-Fe-B)系磁石では、KS鋼の約60倍の強さをもつまでに至っており、約90年間でその強さは急成長していることが伺えます。この歴史の中で、日本人研究者が大きな活躍をしています。本多先生の発明の後、1932年、東京大学の三島徳七先生が現在のアルニコ系磁石の基礎となるMK鋼、1930年東京工業大学の加藤與五郎先生と武井武先生が現在のフェライト磁石の基礎となるOP磁石を発明しています。本学でも本多光太郎先生以外にも多くの研究者が永久磁石の発展に大きく貢献してきました。1933年本多先生は金属材料研究所の増本量先生と新KS鋼、1971年工学研究科金属材料工学科の金子秀夫先生と本間基文先生が鉄-クロム-コバルト(Fe-Cr-Co)系磁石、1974年本学理学部をご卒業された俵好夫氏が2相分離型サマリウム-コバルト(Sm-Co)系磁石を発明されています。俵氏は「サラダ記念日」の作者である俵万智さんのお父様であることをご存じの方も多いのではないのでしょうか？その著書の中に「ひところは「世界で一番強かった」父の磁石がうずくまる棚」という句があります。この句でわかるように、俵氏の開発したSm-Co系磁石の特性を大きく上回る磁石が、1983年に発明されたNd-Fe-B系磁石であり、この発明者の佐川真人氏も本学金属材料研究所で博士課程を修了されています。

図1に示した永久磁石の開発の歴史をみると、発明された磁石の種類は十数種にのぼることがわかります。この間、永久磁石も他の材料と同じように、新たな高性能材料の出現によって古い材料が消えていく悲哀を示してきました。換言すれば永久磁石の歴史は新しい磁石材料の発明の歴史であったといえます。現在の永久磁石材料を大別すると、金属系磁石と酸化物系磁石に分けられます。金属系磁石は

Nd-Fe-B系磁石やSm-Co系磁石に代表される強力な希土類磁石と、アルニコ系磁石に代表され温度特性が良好な合金系磁石に分かれます。一方、酸化物系磁石とは、鉄の酸化物を使用し非常に安価で、私たちの生活の中で最もなじみ深い磁石であるフェライト磁石に他なりません。

永久磁石の開発の中で、私たちの生活や技術に大きなインパクトを与えたものを挙げるとすると、現在の使用量から考えてフェライト磁石とNd-Fe-B系磁石の2つであるといえます。フェライト磁石は、最大エネルギー積(BH)maxが低いものの価格当たりの性能が高く、現在生産量では最も多い磁石となっています。一方、Nd-Fe-B系磁石は、その強さから様々な用途で使用されるようになり、永久磁石の王様として君臨しています。

私達の研究室では、これらの永久磁石の高性能化と新材料の探索に関する研究を行っていますが、本稿では、Nd-Fe-B系磁石を中心とした研究についてご紹介します。

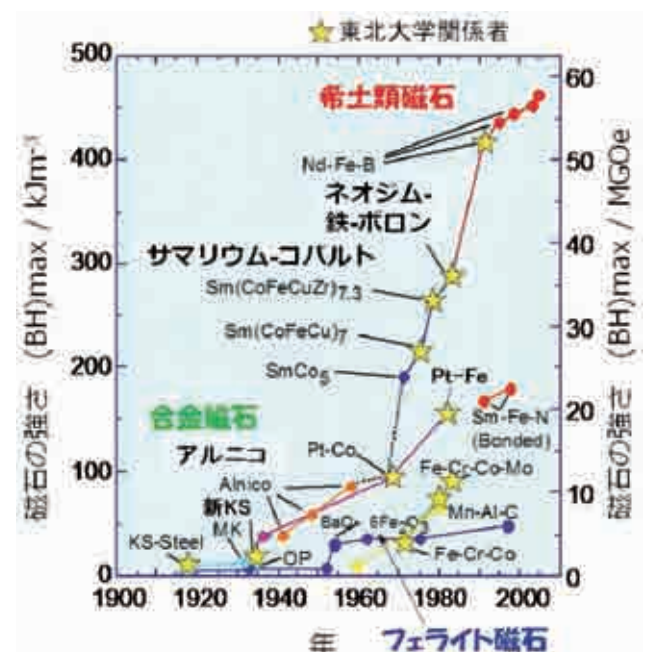


図1：永久磁石の歴史

2. Nd-Fe-B系磁石の用途

図2¹⁾にNd-Fe-B系磁石の主たる用途¹⁾を示しました。Nd-Fe-B系磁石は強力であるため狭い空間で大きな磁力を発生することができ、小型電気電子通信機器の分野で発展してきました。すなわちパーソナルコンピュータのハードディスクにあり、ディスクを回転させるスピンドルモータやヘッドの駆動に用いるボイスコイルモータ(VCM)、光ディスクからの情報を読み出しに使うためのレンズの光ピックアップ、携帯電話の振動モータやスピーカなどです。1990年代はパソコンの大きな普及によってNd-Fe-B系磁石もその用途を拡大してきました。しかしながら最近その用途が変化してきています。



図2：Nd-Fe-B系磁石の用途¹⁾

図3²⁾にNd-Fe-B系焼結磁石の1999年と2003年の用途を示しました。これを見ると1998年では約50%がVCMに用いられているのに対し、2003年では35%程度に減少しています。これに対してモータや発電機への用途が20%程度であったものが34%程度まで増加しています。

図4²⁾にNd-Fe-B系焼結磁石の生産量とモータ用途との関係を示しました。モータへの用途は年率10%の勢いで伸びており、これに伴ってNd-Fe-B系磁石の生産量も増加しています。この傾向には京都議定書の批准のため、環境問題が叫ばれるようになり、CO₂排出量低下のため電力消費の低減、省エネが求められるようになったことが関係しています。少し古いデータですが、日本における年間の電力

消費量は約9000億kWhとされています。その内訳をみるとモータで消費される電力が全体の約50%に達し、効率を1%向上させれば原子力発電所1基分の電力が節約できると試算されています。このような背景からモータの高効率化が求められるようになりました。通常の誘導モータでは効率が60%程度ですが、永久磁石を利用したマグネットモータでは、効率が80～90%まで到達します。このため最近の白物家電にはマグネットモータが用いられるようになり、各社電気代がかからないことを宣伝するようになりました。またコンパクトな設計もできるようになり、発熱も少なくなったことから壁につけて設置可能なことなども宣伝されています。例えば冷蔵庫を見てみましょう。2004年に出版された資源エネルギー庁からのエネルギー白書³⁾では、1981年では大きさが236ℓ、1ℓ当たりの消費電力量が2.76kWhであるのに対して2001年では、それぞれ442ℓ、0.75kWhとなっています。この意味で、磁石の高性能化は新たな代替エネルギーの開発よりも、省エネや環境問題に直結し、その効果も高いといえます。

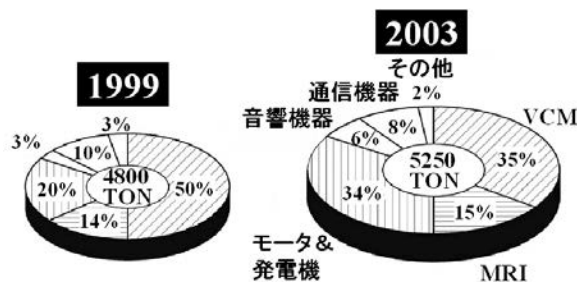


図3：Nd-Fe-B系焼結磁石の用途²⁾

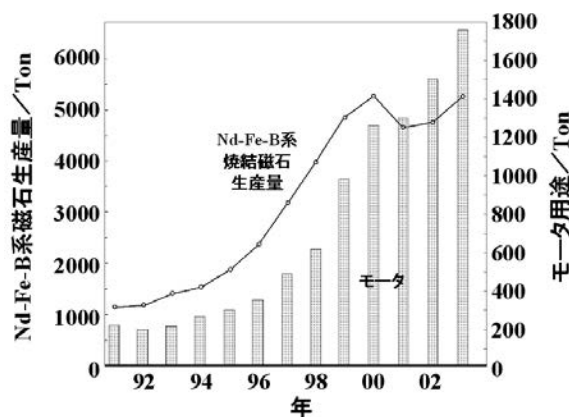


図4：Nd-Fe-B系焼結磁石の生産量とモータ用途の関係²⁾

環境問題から考えるとNd-Fe-B系磁石がなければ実現できなかったもののひとつにハイブリッド自動車(HEV)が挙げられます。図5⁴⁾にHEVの駆動用モータの構造を示しました。HEVのモータはクランクシャフトに直結しエンジンをアシストしています。このシステムにおいてスタート時や加速時など大きな動力を必要とするときには、モータはパッ

テリーの電力により回転してエンジンをアシストします。

一方、恒速走行時には自動車はエンジンのみで走行しますが、減速時にはモータが発電機となり、電力をバッテリーに充電して、多くの燃料を節約します。この駆動モータならびに発電機に用いられているのがNd-Fe-B系焼結磁石であり、200℃以上の温度でも機能できるよう、高保磁力を有するものが採用されています。

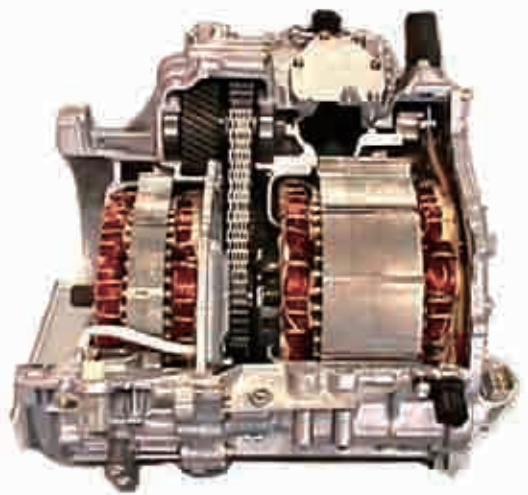


図5：HEV用駆動モータ⁴⁾

Nd-Fe-B系焼結磁石では、その主相のNd₂Fe₁₄B化合物のキュリー温度が312℃と低いため、この減少が甚だしく、そのためこの減少分を考慮してモータなどが設計され、室温でかなり高い保磁力を有したNd-Fe-B系磁石が要求されています。

現在市場に出荷されているNd-Fe-B焼結磁石では、保磁力上昇のために重希土類元素ディスプロシウムDyを添加されています。およそそのDyの添加量は各用途のもので図6に示した通りです。しかしながら、添加されたDyはNd₂Fe₁₄B化合物の結晶構造においてNdサイトに入りますが、Dyの磁気モーメントはFeと反平行に結合する性質があるため、その添加によって磁化が減少し、(BH)_{max}も小さくなってしまいます。このため図6のラインナップでは、保磁力または耐熱温度とともに最大エネルギー積が減少する右下がりの直線となります。

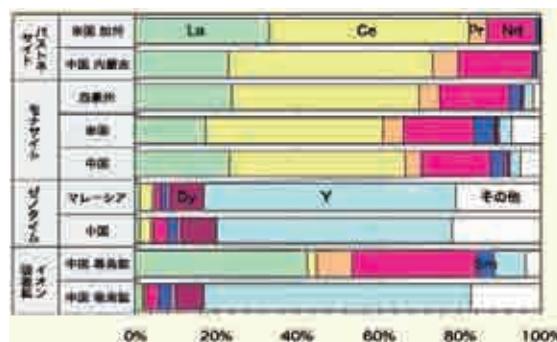


図7：希土類磁石の組成例⁵⁾

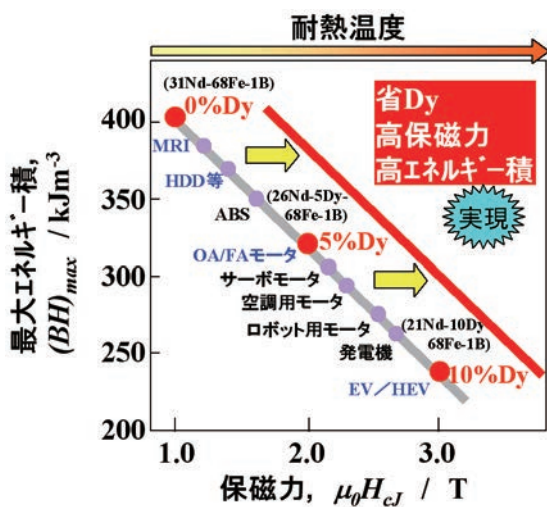


図6：Nd-Fe-B系磁石の用途と磁気特性

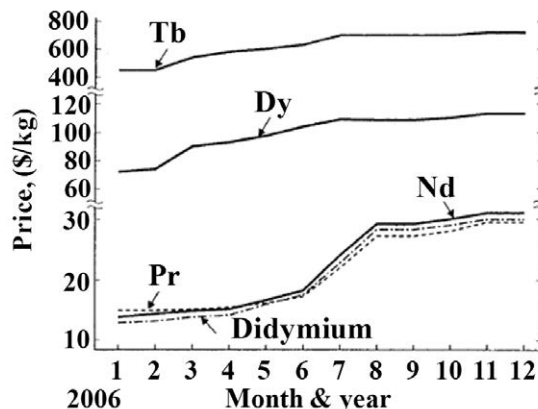


図8：希土類価格の推移⁶⁾

3. 省Dyの必要性

Nd-Fe-B系磁石の用途を磁気特性、耐熱温度ともに図6に示しました。これより本系磁石は耐熱温度や(BH)_{max}の値によって様々な用途で用いられているのが分かります。しかしながらHEVで用いるモータでは、先に述べたように動作環境が200℃以上になることが想定されるため、保磁力の温度変化を考慮すると、室温で3 T以上の高保磁力を持つことが必要とされます。温度上昇とともに保磁力が減少するのはどのような磁石材料でも起こりますが、特に

さらに図7⁵⁾にみるようにDyは希土類磁石中の含有量が少なく、原産地が中国にほぼ限定されているため、HEVへのNd-Fe-B磁石の大量供給を行うと近い将来にDyの市場価格が高騰し、HEVの生産が実際的に不可能になる恐れがあります。図8⁶⁾に最近の希土類元素の価格を示しました。これよりDyの価格はNdの4から10倍であること、Dyの価格が最近では50%以上高騰していること、DyだけでなくNdの価格も上がっていること、などがわかります。このよ

うな背景からDyを極力少なくした、換言すれば図6において赤線のようにラインナップを右側にずらすことができる、高保磁力なNd-Fe-B系磁石が望まれるようになってきています。すなわち省Dyでかつ高保磁力のNd-Fe-B系磁石の開発が切望されているわけです。

4. 研究内容

Nd-Fe-B系磁石の優れた磁気特性は主相であるNd₂Fe₁₄B相の優れた磁気特性によるものですが、その組織には主相以外にNd-rich相とB-rich相が存在しています。このうちNd-rich相は保磁力発現に重要な役割を果たしています。Nd-Fe-B系磁石の磁化反転は、Nd₂Fe₁₄B相の表面に存在する欠陥から逆磁区が発生し、磁壁の移動によって生じてしまうこととされていることから、その保磁力は逆磁区の発生によって左右される核発生型であると考えられています。Nd-rich相は高温で液相となるため、焼結時において充填化に寄与するだけでなく、Nd₂Fe₁₄B相の表面にある欠陥を修復し、逆磁区の発生を抑制する役割を果たしているといわれています。

以上のように考えると、保磁力を増加させるには逆磁区の発生確率を減らすことが重要であることがわかります。これに関係する技術は、Nd-Fe-B系焼結磁石の作製プロセスを考えれば、インゴット作製、粉末作製、圧粉および焼結、熱処理といった物理冶金学、界面反応学、組織制御学を中心とした金属学、材料学に基づいた技術であることに他なりません。我々は現在、この観点から保磁力を向上させる研究をしています。Nd-Fe-B系磁石において逆磁区の発生確率を減らし保磁力を上昇させるには、図9で示したように（1）磁石粒子のサイズを小さくし単磁区粒子にすること、および（2）磁石粒子表面、すなわち主相Nd₂Fe₁₄Bと粒界相との界面の状態を良好にする（整合性を上げる）こと、が考えられます。前者では、粒径を小さくすることによって相対的に欠陥のサイズを小さくするだけでなく、ひとつの磁区（単磁区）からなる結晶粒を増やすことに基づいているもので、インゴット作製方法であるストリップキャストの結晶粒層間隔を減少させること、粉末作製時に用いるジェットミルの高速化により微粉末を得ること、焼結段階での粒成長を抑えるため低温焼結することなどを行っています。これらの結晶粒微細化の過程では粒子の表面積が増えることから酸化の問題と表面に析出するNd-rich相の均一性を上げることも同時に行わなければなりません。後者では、薄膜技術を用いてモデル界面を作製し、保磁力増加にどのような界面が重要であるか見極め、プロセス改良への指針を得ることなどを行っています。現在までに、粒界に析出するNd-rich相（液相）に溶け込む酸素量によって界面状態が変化すること、界面にアモルファス相の存在などが明らかになってきています。また、共同研究を行っているグループでは、強磁場を印加しながら熱処理すると整合性が向上することなどが判明してきています。

今後、研究を進めることにより作製技術にも反映させ、

さらに高性能化を目指していきたいと考えています。

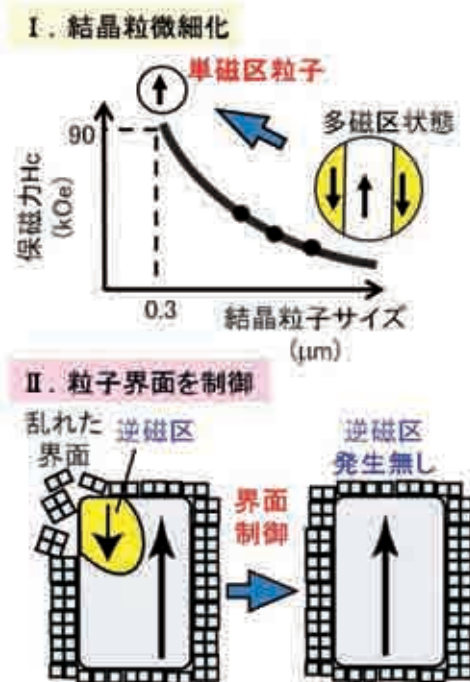


図9：保磁力増加の方法

【参考文献】

- 1) 信越化学工業（株）ホームページ.
- 2) Y. Kaneko: Proc. 18th Int'l Workshop on High Performance Magnets and their Applications, vol. 1, Anncey, France, (2004), p. 40.
- 3) 資源エネルギー庁 エネルギー白書(2004).
- 4) 近田 滋：私信
- 5) <http://homepage3.nifty.com/bs3/Magnet/>
- 6) レアメタルニュース：平成19年2月1日

【著者略歴】

すぎもと さとし
杉本 諭
昭和33年12月 9日生
昭和57年 3月 東北大学工学部金属材料工学科卒
昭和59年 3月 東北大学大学院工学研究科金属材料工学専攻博士課程前期2年の課程修了
昭和59年 4月 東北大学工学部金属材料工学科 助手
平成 4年 3月 東北大学工学部材料物性学科 助教授
平成 9年 4月 東北大学大学院工学研究科材料物性学専攻助教授
平成16年 4月 東北大学大学院工学研究科知能デバイス材料学専攻 助教授
平成18年 4月 東北大学大学院工学研究科知能デバイス材料学専攻教授、現在に至る。



建築計画研究と実践

東北大学大学院工学研究科
都市・建築学専攻 教授
小野田 泰明

1. はじめに

都市・建築学は、人間が望ましい生活を送るために求められる建築や都市について研究・実践する学問です。その中でも私が担当している建築計画という領域は、施設型ごとの要求性能を研究する縦系の部分と人と空間との基本的な関係性を明らかにしようとする横系の部分からみあって形成されている、いわば複合型の学問領域といえます。

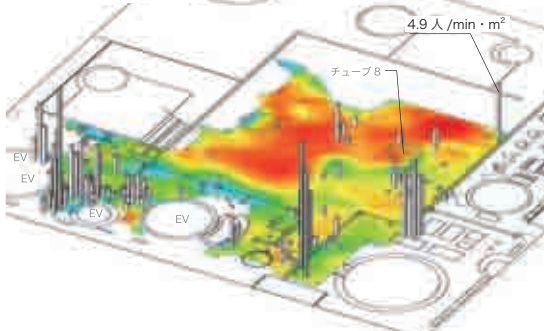
こうした多様なルーツを持っていることもあって、学問領域の全体像が掴みにくいと言われることもあるのですが、実際には現代社会と密接に関わっているホットな分野で、最新の建築デザイン動向と関連した成果が見い出されたり、居住・福祉・教育などに関して有意義な社会実践も行われています。

2. 新しいタイプの連続空間と建築計画

せんだいメディアテークを設計した伊東豊雄は、今や世界を代表する建築家のひとりとなっていますが、伊東や同時代の何人かを中心とする建築家たちが生み出した新しい作風によって、現代建築は新しい段階に突入しています。それらをひとことと言いつくすことはなかなか難しいのですが、特徴の一つとして「微差を内包しながら一体的に連続する平面形（メディアテークの壁の少ない内部をご想像下さい）」を挙げることが出来るかもしれません。事実、彼らが描く美しい内観図には、連続的に広がる空間の中で、思い思いに行為を楽しむ人々が生き生きと描き出されています。

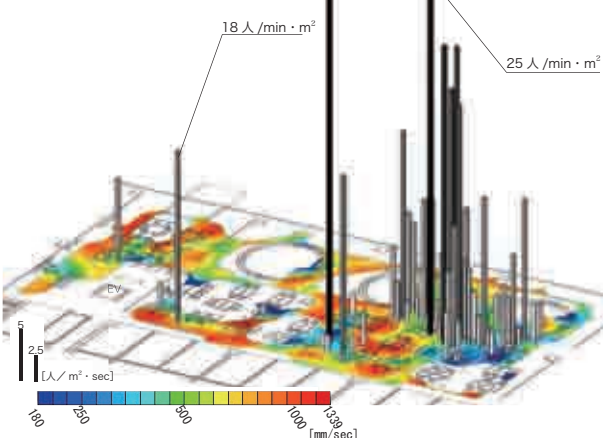
こうした動向は、これまでの建築計画の方法に再考を迫

①せんだいメディアテーク



天井に設置したカメラで撮影した人の動きデータを画像処理ソフトを用いてベクトルデータ化し、平面上に設定した1000mmグリッドごとに集計する。グリッド内のベクトルスカラーの総和を人数（滞留を除く）で割ったものを平均速度とする。これらを時間ごとに足し合わせた後でスムージングと対数変換を行ったデータを平面図上においたのが、平均流動分布図である。図は、5分ごとに滞留している人間を積算したヒストグラムを加え、滞留の度合いも可視化したもの。

②はこだて未来大学



③T大学K研究科S棟

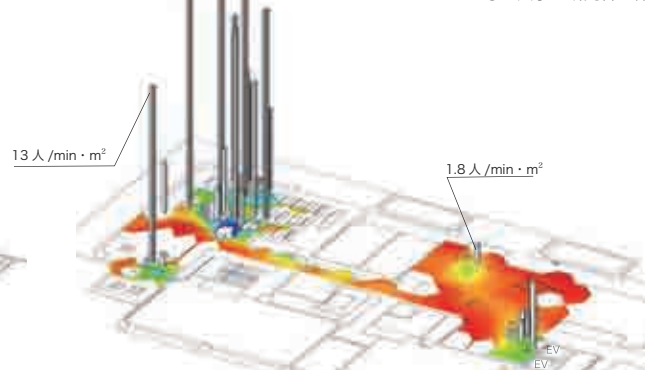


図1：3つの施設における平均流動分布図 [1]

ることになりました。彼らの新しい空間の上では、部屋割を基本とするこれまでの方法論は、なかなか通用しないわけですから。けれどその一方で、人間は建築家の期待通りの振る舞いを簡単にするわけではありません。部屋という形で、環境を拘束していない状況下であればなおさらのことです。必然的にそこには、人間と空間に関する知恵が必要となってきますが、それこそこれまで建築計画が努力を傾注して来た領域に他なりません。

3. 人間天気図プロジェクト

人間の行為に空間が与える影響については、過去様々な試みが行われて来ました。中でも知られているのが東大にいた原広司（宮城県図書館や京都駅の設計で有名です）らによる場所の力の可視化です。原らは、世界中の集落を旅して蓄積した多くの事例に記号論や数論の知見を加味して、その場所が持っている力を上手く表現しましたが、それが人の動きにどのような影響があるかは謎でした。

一方、建築計画の研究者も業績を上げています。早稲田大学の渡辺仁史らをはじめとする研究者によって駅や交差点における集団の挙動が一部解明されています。このように意義のある成果が一部得られてはいますが、冒頭に述べた新しい建築のトレンドとこれらとの間に交点を見いだすのは、ちょっと難しいようです。そこで筆者らは、地図の上に天気図を描くように、平面図の上に人の流動の性質を表す「平均流動分布図」を描くことで、連続空間の特性を指し示せないかと考えました。

図1は、壁を極力取り払った空間として良く知られる伊東豊雄によるせんだいメディアテーク（①）、同じく連続空間からなる山本理顕の公立はこだて未来大学（②）、そしてこれらの対照として選んだ部屋と廊下の組み合わせから成る従来型空間（T大学K研究科S棟：③）における平均流動分布図です。

従来型の空間（③）では、全体的に早い流動が支配し、当然のことですが、「部屋=滞留」と「廊下・ホール=移動」と行為が空間ごとに明確に分かれています。それに比べて、連続空間では、相対的に全体の流動は遅く、滞留と移動が混じり合っているのがわかるでしょうか。家具が全体に配置されているはこだて（②）では、家具とそこで作業する人の性質によって、空間の性質が細かく変わるモザイク的な状況を示していますし、チューブを介して空間が緩やかに分節されているメディアテーク（①）では、微細な低速・滞留の蓄積によって、平均流動の分布はゴルフコースの起伏のようになだらかに推移しています。

これらの違いは、③→②→①の順に高くなる機能設定の冗長度が、そこを使う人々の活動分布に反映した結果であるとも言えることが出来ます。冗長度が低いことは、効率的運用がなされているということでもありますが、人の行為は単調です。一方、機能的な冗長度が高く、視覚的に緩やかな分節を持つ一体的な連続空間では、想像以上に多様な空間が創出されているようです。

もちろん、こうした差を生み出すメカニズムについては、まだまだ研究の余地は残されているのですが、空間の性格の面白い一面が分かってきたように思っています。

4. 機能の変容を考える

こうして連続空間における行為分布の特性が少し見えてきたとしても、建物全体をどう計画すべきかについては、まだまだなんともいえません。そこで、流動的な連続空間が施設の中核を成す最新の学校（総合学科高校）を対象に生徒の空間利用調査をしました。

図2は、ほぼ同じ面積を持つ最新の二つの総合学科高校の平面図に、生徒の昼食時の居場所をプロットしたものです。機能ごとに分節された部屋群と動線空間から成る④は、建築計画的には練られているのですが、空間構成としては従来型に近い形式を持っています。スクールストリートと呼ばれる吹き抜け廊下が、ホームベイやラウンジからなる生活空間（ハウス）と学習空間である教科クラスター群をつないでいます。⑤は、各所に用意された多様な居場所を連続空間が統合する構成となっていて、フレキシブルラーニングエリアを軸として専門教室が組み合わされた回遊性の高いプランが特徴的です。

昼食の場所を仔細に見て行くと、④では、男子がホームベイ、女子がラウンジやクラスと、機能とは関係なく異なる集団がそれぞれ居ついていることがわかります。特に、ホームベイを拠点とする男子の何人かは授業以外の活動をほとんどそこで展開していて、各教科への興味を引き出すように設えられている専門教室群には、あまり出てきません。また、生徒の多くは、授業カリキュラムに従ってそれなりに空間を使い分けていますが、空間間の移動を強いる授業カリキュラムを面倒に感じる生徒も数人存在し、彼らの学校評価は低い傾向にありました。

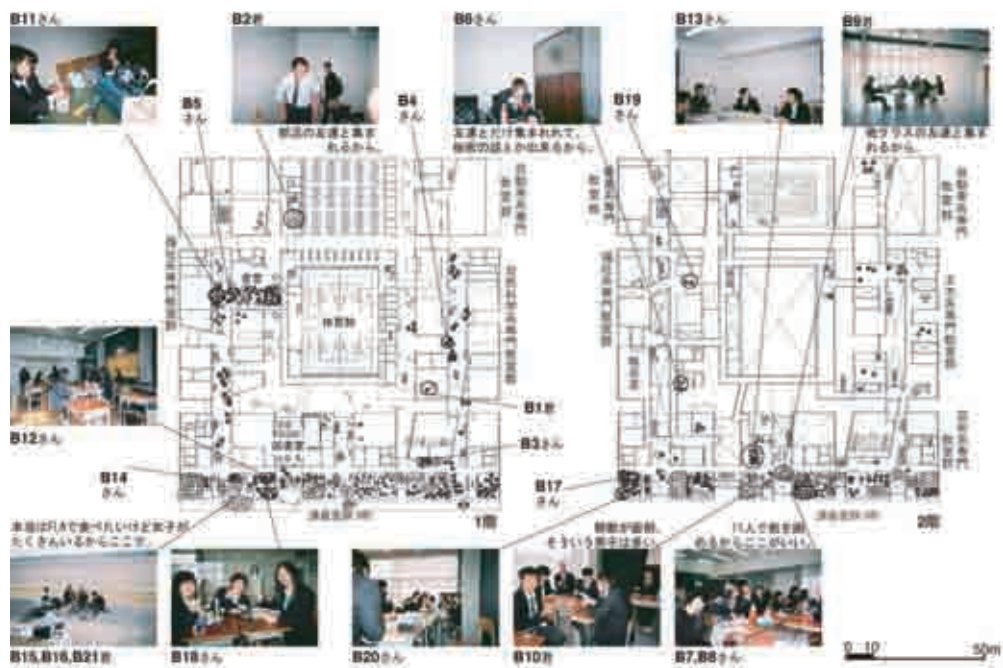
共用空間が各機能空間をゆるやかに連結する⑤では、多くの生徒は教室をねじろとしていましたが、ラーニングエリアや専門教室群にまで活動を展開する生徒も少なくありません。また、この学校の生徒の人間関係を見ると、一年生の時の友人関係を二年生以降も維持する傾向が顕著でしたが、これらにはクラス前のオープンスペースなど他クラスの友人と昼食などを取りやすい平面が関係しているようです。一方、学校に低い評価を与えているグループも少数ながらいましたが、理由として「友達が少ない」という声が多く聞かれました。つまり、学校に否定的評価を下す生徒は、④ではプログラムに、⑤では人間関係に不満を感じるという違いが見られるわけです。

校内の活動拠点数を見ると、④⑤では個人の空間活用能力や人間関係に対する指向などが関連している一方で、学年とは関係が見られませんでした。これは、比較群として調査した従来型校舎の総合学科高校では、学年が進むに従って活動拠点数が増える傾向を示した（上級生になるほど、威張って、なわばりが広がる！）のと対照的な結果でした。

つまり、建築の機能は、そこを良く使用するグループに



④ Y 高等学校



⑤ H 高等学校

凡例：一年生（○男子、●女子）、二年生（△男子、▲女子）、三年生（□男子、■女子）

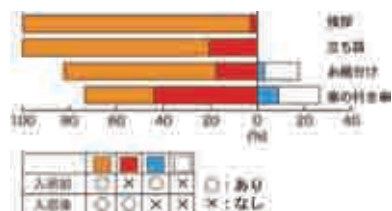
図2：2つの総合学科高校における昼食時の生徒の居場所 [2]

※⑤に比べて④が生徒のプロット数が少ないのは、A校は当時一年生、二年生のみで、かつ半数のクラスの抽出調査であるためである。

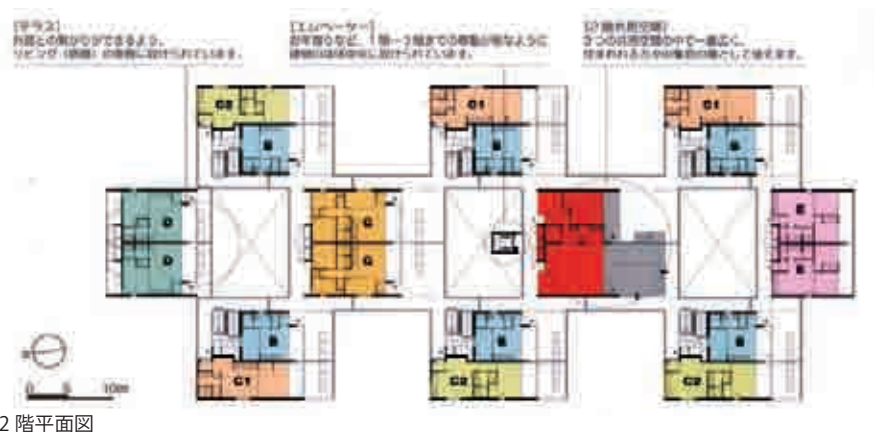
よって事後にたやすく変成するし、活用する人間の性質によって、その捉え方も変化することが分かってきました。特に、オープンな空間は、それを使う人間の志向や能力に、その活用の可能性が強く依存する意外と難しい場であるということが言えるようです。

5. 環境に開かれた集合住宅計画

建築計画研究の領域は、こうした新しい傾向の建築に対して目を向けているだけではありません。従来から行われてきた社会へのフィードバックも地道に行われています。それらのもととなる研究の蓄積ですが、やはり「住」の分野



入居前後の近所づきあいの変化



2階平面図

図3：仙台市営荒井住宅 [3]

は、良く知られる故西山卯三（京大名誉教授）や鈴木成文（東大名誉教授）らの他にも優れたものが多く、充実しています。例えば、鈴木のもとで小林秀樹がまとめた研究では、生活の外側へのしみ出しから共有領域が探り当てられていますし、その他、住戸内外にわたる空間の領域化に関する興味深い成果が得られています。

筆者らは、こうした研究成果を参照しながら、優れた建築家（阿部仁史：現UCLA 建築都市デザイン学科学科長）と組んで、個々の住まい方が全体の共有意識に繋がるような形式を案出しました。それが、居間に玄関が面するリビングアクセス形式を活用して構成された、仙台市営荒井住宅です（図3）。この50戸からなる三階建ての団地では、多くの住戸が壁の少ない自由な平面と広い間口を持っていて、1・2階の住戸は中庭や共有テラスなどの広いコモンスペースに南面しています。また、南北に並列して並ぶ各住棟の階段室を各階で結合する井桁構造とすることによって、全体の6割の住戸がこの貫通通路からリビングに直接アクセスすることが可能となっています。

この住宅の入居前後の居住者の近所づきあいの変化をその内容別に見たのが図3右上のグラフです。入居後、近所づきあい行為が格段に増えているのが読み取れると思いますが、特に、家の行き来をしている入居者が入居後に増加しています。入居直後の状況だけではありますが、新しい空間の効果が如実に表れているようです。また、2・3階では、前後の住戸の居住者との行き来が多いためか、特に上階で挨拶が増加していました。

こういった事後の調査から、リビングアクセスや共用室と

いった空間上の特徴が、交流にそれなりに寄与している状況が明らかになってきました。もちろん、住民が相互交流すればいいというものでもありませんし、子供とその母親、又は高齢の役員の方々が、中心となって形成されている現在の良好な交流関係も、今後、子供の成長や役員の方々の高齢化で、性格が変化する可能性を持っています。コミュニティの将来像については予測がつかない部分が多く、住環境の研究は、本当に終わりが無いことを実感します。

6. 東北大学百周年記念会館

紺屋の白袴ではありませんが、全国を研究と実践で飛び歩いていると、以外と自分が日頃お世話になっている大学のことは人任せになってしまいがちです。それでは、よくないなあと思っていたところに、東北大学100周年記念事業の中核事業である、旧川内記念講堂を改修して「百周年記念会館」とするプロジェクトのプロジェクトマネージャーを拝命してしまいました。卒業生や関係者から頂いた浄財を有効に使うための責任のある仕事ですし、大先輩方と一緒にするので緊張しましたが、皆さんのサポートのお陰でなんとか無事、よい建物が出来ました。折角ですので、最後に少しでもご紹介させて頂きたいと思います。

この計画は、国立大学法人東北大学が、そのステータスを内外に広く発信するとともに、学生・同窓生・教職員の精神的支柱として、また地域とともに発展する拠点として、老朽化により使用頻度が著しく減じていた50年前の建物を一体的にリニューアルしようとするものでした。

当初、大学博物館として活用が検討されていましたが、



図4：東北大学百周年記念会館・川内萩ホール

我々が入って、大学としての発信性、類似施設の状況、既存躯体とのマッチング、様々な法規的制約、運用に関わるコストと運用益の可能性などを精査した結果、コンサートホールの要素を加味した国際会議場の方向性が望ましいとの結論に達し、その方向で検討が進められました。

特記すべき第一の点は、基本構想並びに設計監修を、本学の卒業生で世界的に活躍する建築家の阿部仁史氏（前述）に委託した点です。大学の施設設計を一流の建築家をお願いすると言ったことはなかなか無かったのですが、関係者のご理解の基、上手く引き受けてもらうことが出来ました。これによって、合理的な投資規模を保ちながら優れたデザインを導入することが出来、結果、大きな発信効果が得られたと思っています。第二には、用途が限定される「大学講堂」から、独法化後の大学に相応しいダイナミックな運営が可能となる興行場法該当施設と法的用途変更を行った点です。さらに第三として、企画段階から運営を組み込んで綿密に企画を練り上げたことも重要なポイントでした。

建物の外観は創立50周年で建造された東北大学記念講堂本来のデザインを可能な限り保存・修復してその歴史に敬意を示す一方、内部はコストを厳しく吟味した上で必要な機能に応じて改変しています。

- ・意匠設計：建築音響上、最も響きが美しいとされるシューボックス型の形式を大胆に取り入れると共に、大学のシンボルカラーをモチーフにした独創的で落ち着いた内装としています。ホワイエまわりは、豊かな緑にあふれる外部空間とホールをスムーズに繋ぐために主張を抑えた暗めの色調とする一方で、幾つかの異なる素材を組みあわせることで風格を表象しています。
- ・構造設計：既存躯体を活用しかつ、外部に耐震補強が見えないような位置での壁体補強を行いました。50年前の躯体が許容するぎりぎりの設計荷重の中で高い遮音性能の実現するため、様々な工夫を凝らしています。
- ・音響設計：本学電気通信研究所の鈴木陽一研究室によるハイブリッド可聴化システムを応用した音響設計により、最適な建築音響の実現を目指しました。

・プロジェクトマネジメント：こうした様々な困難が克服されて実現に至った背景には、建設JVや設計事務所の努力と、実際の発注を司った東北大学研究教育財団が取った高度なリーダーシップと堅牢なシステムによるところが大きいといえます。

このように様々な知恵を尽くして計画した建物で、川内萩ホールという愛称もついて親しまれつつあるようです。皆様も機会があればぜひご活用下さい（<http://www.bureau.tohoku.ac.jp/hagihall/>）。

7. さいごに

ここで一部紹介させて頂いたように研究と実践の橋渡しは、重要ではあっても周辺の整理ができていない部分も多く、実際にやるのは骨が折れます。また、優れた才能とのコラボレーション、特に優秀な設計者との共同は欠かせませんが、日本ではまだまだ、設計者（建築家）の社会的地位は低く、制度的な問題も多々残されています。さらには、昨今の景気状況の悪化で事業リスクが急激に高まるなど、創作の現場は、様々な危うさを含んでいます。しかし、それでも現場にいれば、研究がこの先明らかになっていくべき領域がまだまだ多いことに気づかされます。両者をつなぐ厳しい旅は当然続きそうです。

【参考文献】

- 1-小野田泰明、西田浩二、小野寺望、氏原茂将、動き分布図を用いた空間特性の把握に関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.619、2007.09
- 2-小野田泰明、谷口太郎、金成瑞穂、菅野實、総合学科高校における空間構成と生徒の選択行動、日本建築学会計画系論文集、No.625、2008.03
- 3-すまいろん 2008年冬号：特集＝21世紀型の公営住宅デザイン、(財)住宅総合研究財団

【著者略歴】

おの だ やす あき
小 野 田 泰 明

昭和38年3月20日生

昭和61年3月 東北大学工学部建築学科卒業

昭和61年4月 東北大学工学部建築学科助手

平成5年2月 博士(工学)取得(東北大学)

平成9年3月 東北大学工学部建築学科助教授

平成10-11年 カリフォルニア大学ロス・アンゼルス
校客員研究員(文部省在外研究員)

平成19年1月 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻



共同研究センターからイノベーション拠点へ - 共同研究センターの現状と課題 -

東北大学未来科学技術共同研究センター
副センター長 教授
小澤純夫

1. はじめに

東北大学未来科学技術共同研究センター（NICHe: New Industry Creation Hatchery Center）は、社会の要請に応える新しい技術と新しい産業分野の創出を社会へ提案することを目指し、産業界等との共同研究の推進を図り、先端的かつ独創的な開発研究を行うことを目的としています。外部との共同研究を推進する学内共同利用施設として平成10年4月に設立され、平成20年4月に設立十周年を迎えています。

この間、日本の大学においては、「大学等による技術に関する研究成果の民間事業者への移転の促進に関する法律（大学技術移転促進法）」の施行、国立大学の法人化等が進展し、大学の役割として、教育、研究に加えて、「研究開発の成果をイノベーションを通じて社会・国民に還元する」といった社会貢献が大きな柱となっています。一方、わが国産業界では、アジア企業台頭等による国際競争激化から、研究開発の投資が短期間で成果の出る分野へ重点化され、先行研究への投資が減少し、持続的な成長を懸念する民間企業が多くなってきています。また、国際市場で競争優位を獲得している多くの日本企業では、コア技術への選択と集中の結果として、自社にない技術を外部に求めるオープンイノ

ベーション型の技術戦略に転換し、内外のあらゆる技術シーズ情報の取得に注力し、大学・民間企業含め必要な新技術の獲得のための対話・連携を強化してきています。

私が担当している分野は、未来科学技術共同研究センターの研究企画・コーディネート機能（開発企画部）で、大学のポテンシャルを基にした産業・社会の課題解決のためのプロジェクト研究のシーズ・ニーズ調査、プロジェクトの企画・推進・調整等を行っています。研究開発の成果が社会に適用されるためには、科学技術の探索だけではなく、イノベーションの加速に向け、社会に出て行くことを視野に入れた新たな産学連携の姿を模索することが必要となっています。

本稿では、未来科学技術共同研究センターの現状を紹介し、産学共同研究プロジェクトの将来展望について述べさせていただきます。

2. 未来科学技術共同研究センター

未来科学技術共同研究センターでは、現在、表1に示す16の研究プロジェクトが進行中です。未来科学技術共同研究センターの研究プロジェクトは次のような特徴を持っています。

分野	プロジェクト名	リーダー
ライフサイエンス分野	音楽・音響を用いた新しい医療技術の開発	市江雅芳 教授
	生体分子間電子移動に基づく新医療技術	河野雅弘 教授
	微生物ゲノム科学を用いた創農業および生分解性プラスチックリサイクル技術の開発	阿部敬悦 准教授
環境分野	実践的マルチコンビ計算化学	宮本 明 教授
ナノテク・材料分野	安心と安全のための先進超音波計測	山中一司 教授
	超臨界プロセス創製	阿尻雅文 教授
	希土類磁石向けディスプレイ用低減技術開発	杉本 論 教授
	透明電極向けインジウム使用量低減技術開発	中村 崇 教授
	金属ガラス微粉末合金の実用化研究プロジェクト	井上明久 教授
IT/情報技術分野	高機能バイオフォトンクスの研究	横山弘之 教授
	スピンナノ構造体の創製	高橋 研 教授
	21世紀型顧客ニーズ瞬時製品化対応新生産方式の創出	大見忠弘 教授
	薄型大画面ディスプレイの開発	内田龍男 教授
	ダイナミックロボティクス研究プロジェクト	田所 論 教授
	ミリ波パッシブ撮像装置の開発	佐藤弘康 助教
	組織マネジメントに関する研究プロジェクト	北村正晴 教授

表1：未来科学技術共同研究センターの研究プロジェクト

- ・産学連携（現実の課題の解決、実用化）
- ・先端的かつ独創的な開発研究
- ・期間を明確にしたプロジェクト型研究（3～5年）
- ・大規模な開発研究
- ・主として外部資金による研究の推進

このような特徴を支えるために、研究マネジメントにもいくつかの工夫をしています。

一つ目に、秘密保持のできる研究スペースの提供が挙げられます。東北大学においては、受託研究、共同研究の場合、内容により、ランク（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）付けを行いそれに応じた秘密保持体制を整備しています。

Ⅰ：知識の普及・共有化等、秘密保持を伴わないもの

Ⅱ：秘密保持契約を伴うもの

秘密文書・情報に接する教職員・研究員を限定し、守秘義務を徹底する（学生〔学部学生には担当させず、院生に限定〕が担当する場合には卒業時に誓約書を出してもらう）

Ⅲ：秘密保持契約に加え、営業秘密としての管理を伴うもの

建物・区域を指定して入退出管理も行い、研究・営業等の秘密を保護する

未来科学技術共同研究センターは、ランクⅢの秘密管理区域となっており、ICカードを導入して職員等の入退出を管理するとともに、センター内及び屋外の防犯カメラ設置、警備会社との契約により24時間体制での防犯体制をとっています。

二つ目は、プランニング機能の提供です。表2に示すメンバーから構成される開発企画部が、産学連携プロジェクト立案に必要な情報収集、産学連携のモデル作り、産学連携研究プロジェクトの企画立案等の調査・企画業務、産学連携を円滑に進めることができる環境づくり、プロジェクト等の産業化・起業化支援等のプロジェクト推進・調整業務を行っています。産業化・起業化支援に関しては、平成14年には学内インキュベーション施設であるハッチェリー・スクエアを開館し、平成19年には未来科学技術共同研究センター駐車場跡地に中小企業基盤整備機構の東北大学連携型起業家育成施設（T-Biz）を誘致しました。ハッチェリー・スクエアは、未来科学技術共同研究センターを含む本学で創出された研究成果をもとに、起業化に特化した研究プロジェクトの育成施設で、入居対象者は共同研究員、受託研究員を含む学内有籍者となっています。T-Bizは、東北大学等大学の研究シーズと連携した新ビジネス創成を目的とする施設で、入居対象者は学外（大学の研究成果と連携して起業・新事業を展開するベンチャー企業・中小企業、大学と共同研究を行うベンチャー企業等）を主としており東北大学構内でビジネスが可能となっています。

三つ目は、研究プロジェクトに携わる研究者に対する研究に専念できる環境の提供です。期間を限定したプロジェクトにおける目標達成のために、国・独立行政法人・民間企業等の資金提供者との調整・諸事務を開発企画部が支援

開発企画部（メンバー）		
センター長	中島一郎教授	(兼) 産学連携本部長 (兼) 大学院工学研究科教授
副センター長(兼)	西澤昭夫教授	大学院経済学研究科教授 (兼) 総長特別補佐
副センター長	竹田健児教授	(兼) 産学連携本部国際連携部長 (兼) 総長室経営企画スタッフ
副センター長	小澤純夫 教授	
助教	熊田 憲	
助手	平塚洋一	
コーディネーター	前田桂史	
(事務室)		
事務室長	佐々木喜章	
総務係長	松村 淳	
会計係長	水戸部幸憲	

表2：未来科学技術共同研究センター開発企画部メンバー

するとともに、未来科学技術共同研究センターの専任教授は、教育・管理運営業務から一時的に（センター在籍中のみ）開放され研究活動に専念できる仕組みを持っています。

3. 非連続的イノベーション（飛躍知の発明・発見）

未来科学技術共同研究センターが実施している大規模な産学連携研究プロジェクトは、今後、どのような方向を目指して企画立案して行くべきでしょうか。

企業者の行う不断のイノベーションが経済を変動させるという理論を構築したシュンペーターは、「沢山の馬車をいくらつなぎあわせても鉄道を作り出すことはできない。」「世界はなんとわずかな叡智によって支配されていることか。」と述べました。

第3期科学技術基本計画においては、「飛躍知の発明・発見」、「非連続的なイノベーション」について、知的・文化的価値の創出等の観点から、政策目標として、戦略重点化を図っています。また、欧米での近年のイノベーション政策論では、ラジカルなイノベーションを創出するためには国はいかに支援するかという議論が中心となってきています。

わが国民間企業からも、ナショナルプロジェクトでは企業のコア技術の延長でない非連続・破壊的な研究に取り組むべきとの要請が聞こえてきます。特に、情報家電製品等の技術進歩の速さによって製品サイクルが短期化するとともに莫大な開発投資でコスト競争に曝されているコモディティ分野の企業では、事業部門の製品開発に研究開発投資が優先的に配分され、中央研究所等のコーポレート研究への投資が不十分となってきており持続的な成長を懸念している傾向があります。

非連続的イノベーションを狙うハイリスク研究に関しては、技術成熟度の若い初期段階でより多くのアイデアに一

件当たり比較的小額の研究開発を行い、成果が出てきたものを段階的に絞り込み研究開発額を引き上げていく「多産多死」方式が適当と思われます。したがって、未来科学技術共同研究センターが実施する大規模な産学連携研究プロジェクトとしてこのような研究を行う際には、段階的評価を生き残った評価の高い技術シーズを選択するとともに、投資の不確実性の高さを認識し、節目で加速・修正・撤退等の研究開発計画変更の柔軟性が高い研究マネジメントを行うことで、研究開発投資に対する期待価値を最大化することができることとなります。

4. マスエフェクト

非連続的イノベーションを技術シーズの優劣に注目したシーズプッシュ型研究開発と位置付けると、産業・社会の課題解決との視点に立ったデマンドプル型研究開発についてどう考えていくべきでしょうか。

第3期科学技術基本計画においては、国民に対してもたらされる成果に着目した目標設定と評価の仕組みを確立し、投資効果を検証することにより、研究開発の質の向上を図ることとなっています。

この観点から、私は、図1のように、ある分野における研究開発成果を要因分解することを検討しました。

マスエフェクトの式(仮称)

$$O_n = (O_n/V_n) \times (V_n/E) \times E$$

O_n : 分野nにおける社会・国民に対する研究開発の成果

V_n : 分野nにおける社会的・経済的価値

E : 経済活動量

(例) 構造材という分野において、

① 強度を10倍にする革新的研究開発 & 構造材のシェア1%

$$O_n/V_n = 1 - 1/10 = 0.9, \quad V_n/E = 0.01 \rightarrow O_n = 0.9 \times 0.01 \times E$$

② 強度を1.1倍にするインクリメンタルな研究開発 & 構造材のシェア10%

$$O_n/V_n = 1 - 1/1.1 \approx 0.09, \quad V_n/E = 0.1 \rightarrow O_n = 0.09 \times 0.1 \times E$$

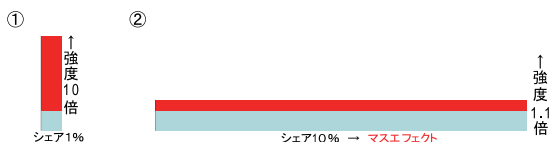


図1: マスエフェクトの式

例えば、 O_n を構造材nの二酸化炭素削減効果をもたらす研究開発成果、 V_n を構造材nの二酸化炭素排出量、 E を世界全体の二酸化炭素排出量とします。強度を10倍にするような革新的な価値の向上をもたらすプロダクトイノベーション（あるいは二酸化炭素排出原単位を1/10とするような革新的プロセスイノベーション）が行われた場合、研究開発原単位（ O_n/V_n ）を当該研究における二酸化炭素削減強度とすれば、従来の1/10の二酸化炭素排出量で構造材として従来と同じ効果を実現できることから、 $O_n/V_n = 1 - 1/10 = 0.9$ となります（研究開発前に比べ90%削減）。この時、社会的・経済的価値原単位（ V_n/E ）を二酸化炭素排出量全分野合計に対するシェアとし、構造材nの当該シェアを1%と置けば、 $O_n = 0.9 \times 0.01 \times E = 0.009E$ となります。

一方で、構造材mにおいて強度を1.1倍とするような漸進的な研究開発が行われ、その二酸化炭素排出量前分野合計に対するシェアが10%のマスエフェクト（取扱量が多く、経済・社会的に大きな影響）を有する場合には、 $O_m = (1 - 1/1.1) \times 0.1 \times E \approx 0.009E$ となりほぼ同じ効果をもたらします。

特に、地球環境問題、資源・エネルギー制約及び高騰といった国民生活に影響をもたらしている環境変化については、このマスエフェクトの視点が重要だと考えます。エネルギー、構造材といったマスエフェクトを有する分野での研究開発は、たとえ「飛躍知の発明・発見」との観点から地味に見えたとしても、「研究開発の成果をイノベーションを通じて社会・国民に還元する」との観点から重要だと思います。

5. イノベーション拠点に向けて

(未来科学技術共同研究センターにおける産学連携プロジェクトの新しい方向性)

大学の研究面の強みの一つは、同じ研究を長期間にわたり継続することにあると思います。そのような中で、未来科学技術共同研究センターで研究を行う大学研究者は、研究規模相応の秘密保持のできる研究スペース、プランニング機能の支援、研究に専念できる環境等のメリットを享受できる一方で、その期限が比較的短期間に限定されています。

NASA定義の技術成熟度レベル(TRL)

- TRL1 基本原理の観察・報告。基礎研究の完了。
- TRL2 技術概念の形成。小規模の応用研究。
- TRL3 科学的に可能かどうか実験と理論モデルで実証。
- TRL4 現実的な条件で実験室レベルでの要素実証(スケールモデル)。
- TRL5 境界を模擬して要素の実証試験(フルモデル)。
- TRL6 地上試験で工学的に可能かどうか実証。
- TRL7~8 飛行試験及び認証取得。
- TRL9 運航による実証。

TRL1 から5 までは要素リグ試験*で実施。

TRLの各レベルは試験を実施したかどうかではなく、結果が指定のレベルを満足した場合に達成となる。

*リグ試験: 実機を模擬した装置(リグ)に組み込み、機能、性能、耐久性等を確認する試験。

図2: NASA定義の技術成熟度レベル(定義)

NASA定義の技術成熟度レベル(TRL)

- TRL1~2 大学がメーカーと相談して、主に国の費用で実施。研究所で主に国の費用で実施。
- TRL3~4 メーカーが国の補助を受けて実施。
- TRL4~6 メーカーが実施。場合によっては国の投資。
- TRL7~8

2020年の供用開始のためには、現在既に研究推進しているべき。

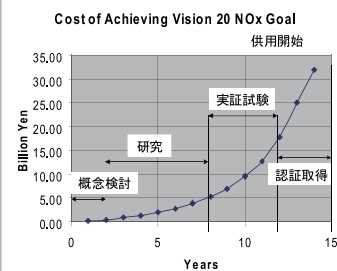


図3: NASA定義の技術成熟度レベル(各段階の状況)

未来科学技術共同研究センターは、「大学のポテンシャルを基に産業・社会の課題解決のためのプロジェクト研究を外部と連携して行う場」です。このような「場」で行う産学連携プロジェクトはどのようなものが適当でしょうか。

まず、技術成熟度の観点から述べたいと思います。米国のNASA（アメリカ航空宇宙局）は、航空・宇宙分野の研究開発について、図2、3に示すTRL（Technology Readiness Level：技術成熟度）という指標を用いています。この指標は必ずしも航空・宇宙分野以外に用いることが適当でない場合もありますが、大規模な研究開発を検討する際には参考となります。産学連携という手段が効果的であるのはTRL4～6という段階で、特にTRL4「現実的な条件で実験室レベルでの要素実証」は大学という「場」が拠点となることが効果を有する段階と考えます。基本原理、技術概念、科学的実験、理論モデル等のTRL1～3の段階については、長期間にわたり継続的な研究を行っている大学各研究室で育み、技術成熟度が現実的な条件下での実証が可能な段階にまで達成した時点で、現実的な条件を熟知している民間企業と技術シーズを有する大学との融合の「場」を未来科学技術共同研究センターが提供するということが適当だと思います。このような「場」は、従来であれば、民間企業や国研であった訳ですが、民間企業においてコーポレート研究への投資が不十分となる等研究開発のスコープが短期化する一方で研究内容の先端化が進展してきており、広範な分野にわたる基礎的研究能力を有する大学が「場」として適当であるケースが現れてきています。その際、民間企業のノウハウや営業秘密が含まれる現実的な条件の共有において秘密保持体制の整備が重要となります。また、TRL4は、研究開発の評価軸が学術的価値から実用化価値に重点を移し、学術研究とイノベーションの間のいわゆる「死の谷」の段階を迎えるためそれを克服するためのマネジメントの工夫が必要となります。

次にデマンドプルの観点から述べたいと思います。産業・社会の課題の優先度をマスイフェクトの視点から見た場合に、一つの革新的技術シーズのみで解決できる課題よりも、いくつかの漸進的技術シーズの開発と一緒に始めて解決できる課題の方が多くと思います。

米国のURC（University Research Center）は、複数企業や業界の利益を駆動力とするデマンドプル型研究開発を実施している大学の産学共同研究センターです。URCの特徴としては、「多領域横断（Multi-Disciplinary）」と「マネジメント」が挙げられます。「多領域横断」に関して、産業界や社会のニーズは一つの学問分野で解決できない場合が多いとの認識に立ち、従来の大学の組織の枠組みを超えた学部横断的組織、最低3名の教授から構成される研究チーム、産業界アドバイザーボードを有しています。「マネジメント」に関しては、センター長、理事長（Administrative Director）が内部組織の運営、研究マネジメント、外部（産業界、スポンサー）に責任を明確に有するとともに、組織的支援により強化されたプロジェクトリーダー機能を発揮し、

わが国における技術研究組的役割も果たしています。

未来科学技術共同研究センターが実施する大規模な産学連携研究プロジェクトにおいては、産学の研究者が産業・社会の課題について共通の認識・価値観をシェアし各研究の役割を認識した上で、研究者同士が時間と空間を共有する「場」を形成し課題解決に向けてシグマベストではなくトータルベストを目指してチームワークで取り組むデマンドプル型の研究開発も重要となります。

未来科学技術共同研究センターでは、新たな形態として、部局横断型の研究シーズをベースとした分野拠点型のプロジェクトを企画立案し推進中です。具体的には、工学研究科、金属材料研究所、多元物質科学研究所、環境科学研究科と共同で「レアメタル研究拠点」を企画立案し、現在、レアメタルの大型ナショナルプロジェクトを学内の複数部局、他大学、公的研究機関、材料企業、部材企業、ユーザー企業の参画を得て実施中です。

6. おわりに

産学共同研究プロジェクトの研究開発成果が実際の社会の変革をもたらすような新たな姿の検討について不断の努力を行う必要があります。未来科学技術共同研究センターの「場」において、大学研究者、大企業の研究者・技術者、地域中小企業及びグローバルニッチを目指す国内中小企業の技術者・技能者等が機密が保たれた施設で時間と場所を共有して大学の基礎研究と関連付けた実用化共同研究を行うことにより、大企業の新産業創出能力の育成、中小企業の技術・事業の高度化が図られるよう努力して参ります。今後とも、ご指導、ご支援のほど、よろしくお願い致します。

【著者略歴】

小澤純夫

昭和36年 6月1日生

昭和59年 3月 東京大学工学部卒業

昭和61年 3月 同大学大学院工学系研究科修士課程修了
平成 5年 7月から1年 米国留学

米国タフツ大学フレッチャースクール法律外交
大学院M.A.（国際関係論修士課程修了）

平成 8年 5月 外務省欧州連合日本政府代表部一等書記官
（ベルギー国ブラッセル市）

平成11年 7月 国際機関国際エネルギー憲章事務局シニアエキスパート（ブラッセル市）

平成15年 6月 経済産業省製造産業局製鉄企画室長（併）
ナノテクノロジー・材料戦略室企画官

平成18年 7月 （独）新エネルギー・産業技術総合開発機構
機械システム技術開発部長（併）
情報システム部長

平成20年 7月 東北大学未来科学技術共同研究センター
教授（併）副センター長



ユビキタスネットワークへの挑戦 ～次世代ネットワークのための高機能通信プロトコル～

東北大学大学院情報科学研究科
応用情報科学専攻 教授
加藤 寧

1. はじめに

インターネットが登場してから間もなく20年が経とうとしている今日、ネットワークはその姿を大きく変貌させようとしている。FTTH (Fiber To The Home) やADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) 等による有線ブロードバンドネットワークの普及に加え、無線LAN (Local Area Network) や第3世代携帯電話 (3G: 3rd Generation) 網などにより無線ネットワークのブロードバンド化も急激に進んでいる。更に今後は、第4世代携帯電話 (4G) 網やWiMAX (World Interoperability for Microwave Access)、超高速衛星ネットワークなどにより、いつでもどこからでもインターネットへ高速に接続可能なブロードバンドユビキタスネットワークの構築が進むことが期待される。

ブロードバンドユビキタスネットワークを実現するためには、個々のネットワークのブロードバンド化もさることながら、これまで独自の進化を遂げてきた様々なネットワークを、いかにして融合するかが大きな課題となる。ここで威力を発揮するのがIP (Internet Protocol) である。IPは現在のインターネットの根幹を成すプロトコルであるが、近年その有用性から、インターネット以外のネットワークにおけるIPの利用が加速している。最近国内において、IPを利用して電話・データ通信・ストリーミング放送などのマルチメディアサービスを提供する次世代電話網NGN (Next Generation Network) が商用化されたが、これもその一例として位置づけることができる。将来的には図1に示すように、様々な異種ネットワークがIPによって統合された次世代IPネットワークが登場し、ユビキタスネット社会を支えるインフラとして重要な役割を担うものと考えられる。

ネットワークの統合はユビキタスネット社会の実現へ向けた大きな一歩であり、これによりネットワークを介して様々なサービスを、そして質の高いサービスを楽しむようになる。しかしながら、快適なネットワーク環境構築のために解決しなければならない技術的課題は山積している。とりわけ、異種ネットワークの融合により増大したネットワークの不均一性は、IP ネットワーク上で高信頼性通信を実現するための通信プロトコル (TCP: Transmission Control Protocol) の力不足を露呈させる結果を招いている。一方、ネットワークのブロードバンド化とともに音声・画像・動画などの大容量データの流通拡大が進む現在、このTCPが通信性能に与える影響は無視できなくなっている。この

ような背景を受け、TCPに代わる新たな通信プロトコルの創出が急務となっている。本稿では、我々の研究グループが行っている次世代ネットワークのための高機能通信プロトコルに関する研究について紹介する。



図1：次世代IPネットワークの姿

2. TCP/IPの仕組み

現在のインターネットの根幹を成すTCP/IPが登場したのは1983年のことである。米国で1969年から運用されていたARPAnet (Advanced Research Projects Agency Network) において正式なプロトコルとして採用されたのが始まりである。ARPAnetは1990年に運用停止となるが、その役割を引き継いだのが現在のインターネットである。ARPAnetの運用停止と時を同じくして商用利用が開始されたインターネットは、その後爆発的な成長を遂げ、今や地球規模のネットワークになっている。インターネットが重要な社会インフラとしての地位を確立したと同時に、TCP/IPもまた事実上の標準プロトコルとしての確固たる地位を築いた。

IPの主な役割は、アドレッシングとルーティングである。IPネットワークでは、ネットワークに接続された個々のコンピュータを識別するために、各コンピュータにIPアドレスというIDが割り振られる。例えば、我々の研究グループが管理するサーバのIPアドレスは「130.34.189.4」であり、世界中どこを探しても同じIPアドレスを持つコンピュータは存在しない。一般の人にとっては見慣れないものであるが、「www.it.ecei.tohoku.ac.jp」と書くと身近に感じてもらえることだろう。URL (Uniform Resource Locator) やメール

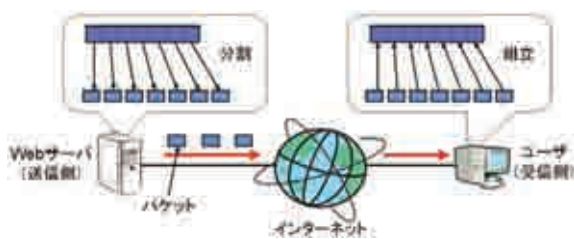


図2：IPネットワークにおけるパケット通信

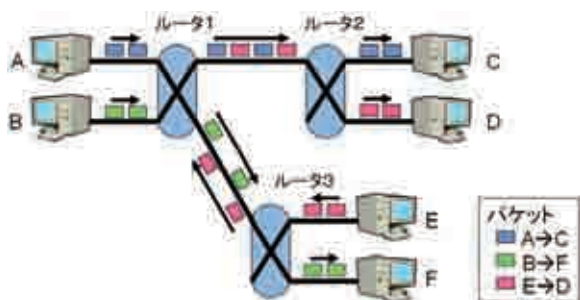


図3：IPアドレスによるルーティング

アドレスに見られるこの種の表記は、実は全てIPアドレスに対応づけられており、ネットワーク上での住所（アドレス）を示している。このアドレスの管理をするのがIPの役目である。

IPのもう1つの大きな役割は、ルーティングである。図2に示すように、IPネットワークではデータは全てパケットと呼ばれる単位に分割されて転送される。このパケットには宛先に関する情報（宛先コンピュータのIPアドレス）などが含まれており、パケットを中継するネットワークノード（ルータなど）は、この制御情報に基づいてパケットの転送を行う（図3）。このように、制御情報に基づいてパケットを転送するルートを制御するのもIPの役割である。

一方、IPはデータの到達性を保証するものではない。そのため、ネットワーク機器の故障や断線、ネットワークの輻輳（混雑）によってデータが途中で失われた場合、その失われたデータを再送する必要がある。この役割を担うのがTCPであり、メールやウェブ、ファイル転送など様々な通信に利用されている。TCPは図4に示すように、データパケットの到着に対して、その到達を確認する確認応答（ACK: Acknowledgement）パケットを送り返す。データパケットには、そのパケットが運ぶデータが全体のどこに位置するかを示す通し番号（シーケンス番号）が付加されており、受信側は次に何番のデータが欲しいかをACKパケットにより送信側に通知する仕組みになっている。これにより、TCPはデータの喪失を検知し、失われたデータを再送することで通信の信頼性を保証している。

TCPのもう1つの重要な役割は、輻輳制御である。ネットワークに空きがある場合は、速やかに送信レートを増加させて高速通信を行うとともに、ネットワークの利用効率を高めることが望ましい。しかし逆に、ネットワークが混

雑して輻輳状態にある場合は、速やかに送信レートを減少させて輻輳を回避しなければならない。このように、ネットワークの状態に合わせて送信レートを制御することがTCPの役目であるが、TCPではウィンドウという概念を用いてこれを実現する。このウィンドウの大きさは、ACKの到着を待たずに送信できるデータ量を表し、値が大きいほど送信レートが大きくなる。図5はウィンドウサイズが4パケットの場合を示しているが、ウィンドウサイズが1パケットである図4に比べて効率よくデータを送信できており、単位時間当たりのデータの送信量（つまり送信レート）が大きいことは明らかである。TCPでは、このウィンドウサイズをネットワークの状態に合わせて制御することにより、ネットワークにおける輻輳の回避を試みている。

3. TCPが抱える課題

現在もデファクトスタンダードとして広く利用されているTCPであるが、次世代IPネットワークでもその地位が約束されているかという点、そうではない。TCPが抱える問題点については古くから指摘があったが、中でも特に問題となるのが、ネットワークの不均一性の増大に順応できないことである。

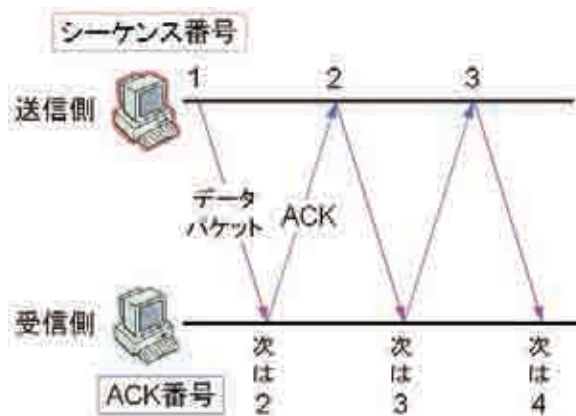


図4：ACKによる到達確認

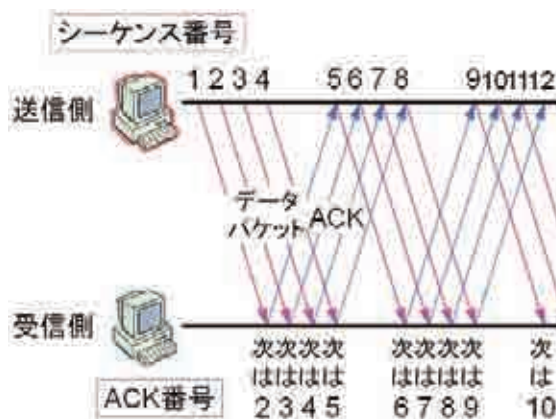


図5：ウィンドウの例（サイズ=4）

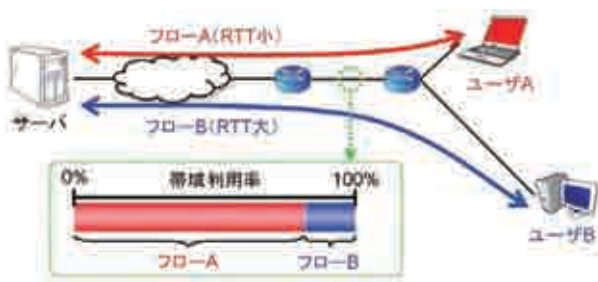


図6：利用帯域の不公平性問題

ネットワークの不均一性とは、回線の帯域、遅延、エラー率、ルータに搭載されたバッファサイズなど、ネットワークの性質におけるバラツキを指す。様々なネットワークがIPにより融合した次世代IPネットワークでは、この不均一性が非常に大きくなる。例えば、地上ネットワークと衛星ネットワークでは遅延に大きな差がある。無線ネットワークでは電波環境によって伝送エラーの割合が大きく変化する。他方、帯域に至ってはアクセス方式によって千差万別である。このような不均一性の増大は、残念ながらTCPにとっては致命的である。均一なネットワークを想定して設計されたTCPは、不均一性の高い環境において、その力を発揮できないのである。不均一性の高い次世代IPネットワークにTCPを適用した際に起こり得る問題はいくつかあるが、ここでは利用帯域の格差と通信レートの低下について述べることにする。

最初に、利用帯域の格差について述べる。TCPのようにACKによりデータの到達を確認しながら通信を行うプロトコルの場合、送受信者間の往復伝搬遅延時間 (RTT: Round Trip Time) が通信品質に大きな影響を与える。例えば、REF_Ref214190538 \h * MERGEFORMAT 図6に示すようにRTTが異なる複数のTCPフローが帯域を奪い合った場合、RTTの小さい (ネットワーク的に近い) フローがより多くの帯域を消費するという現象が起き、ユーザー間で利用帯域に格差が生じる。これは、ファイル転送を例に挙げると、RTTの大きいユーザーはRTTの小さいユーザーに比べ、より長いダウンロード時間を要することを意味し、大変不公平である。この問題は一般に、RTTに起因する不公平性問題と呼ばれている。

次に、通信レートの低下について述べる。TCPはパケットの喪失を検出した際、送信レートを低下させるように設計されている。これは、TCPの開発当時は有線ネットワークだけを想定していたため、パケットの喪失は全てネットワークの輻輳が原因であるという前提が成り立っていたからである。しかしながら、現在では当たり前のように無線ネットワークが利用され、無線リンクにおける伝送エラーが原因でパケットが喪失されてしまうことは珍しくない。一方、TCPはパケットが喪失した原因を特定するような機能は持ち合わせておらず、仮に伝送エラーが原因であっても輻輳が原因であると誤った判断をしてしまう (REF_Ref214191029 \h * MERGEFORMAT 図7)。そのため、

無線ネットワークでTCPを利用した場合、輻輳が発生していないにもかかわらず送信レートを極端に下げってしまうケースが多発し、通信レートが極端に低下するばかりか、ネットワークの利用効率も低下してしまうという問題が発生する。分かりやすく言えば、より高速な通信が可能な状況であるにもかかわらず、通信レートが上がらないといった状態に陥るとのことである。

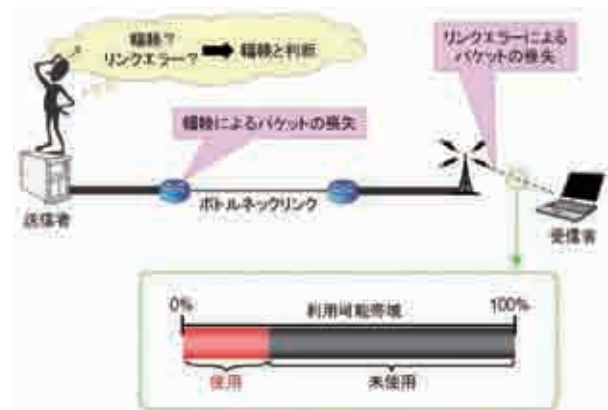


図7：エラーによる通信レートの低下

IPによるネットワークの融合が加速する中、IPネットワーク上で高信頼性通信を実現するTCPの役割は確実に増している。しかしながら、前述の通り、不均一性が強い次世代IPネットワークにおいてはTCPでは力不足であり、TCPに代わる新たな高機能プロトコルの創出が急務となっている。

5. 高機能通信プロトコルの研究開発

TCPの性能を改善すべく、これまでに国内外問わず様々な研究が行われてきたが、その多くはTCPがそうであるようにEnd-to-Endを大原則とするものである。End-to-Endモデルでは、ルータなどのネットワークノードがTCPの輻輳制御に直接関与することは許されておらず、エンドノード (送信ノードまたは受信ノード) が輻輳制御を行う。そのため、TCPの性能改善は、エンドノードにおいて如何にネットワークの輻輳状態を正しく推測するかという点に重点が置かれている。エンドノードにおいて測定可能であり、かつネットワークの輻輳状態と因果関係がある指標としては、瞬間的通信レートやパケット転送遅延があり、実際にこれらを利用した通信プロトコルが多数提案されている。Microsoft Windows Vistaの標準TCPとして採用されたCompound TCPも、その制御にパケット転送遅延の時間変動を利用している。

しかしながら、輻輳制御に有用かつエンドノードで入手可能である情報は限られており、それ故に性能の大幅な改善はなかなか難しい。これを打破するために、近年End-to-Endから脱皮を図り、新たなアプローチを模索する動きが出てきている。その中でも有力であり、我々の研究グルー

でも取り組んでいるのが、ネットワーク支援モデルによる輻輳制御技術である。ネットワーク支援モデルの最大の特徴は、ルータなどのネットワークノードが各フローの輻輳制御に直接関与できる点である。トラフィックの変動を実際に計測できるネットワークノードでは、輻輳制御に有用な情報を多数得ることができる（流れるデータ量、フローの数、キューイング遅延など）。このため、End-to-Endモデルに比べ、よりネットワークの状態に適した送信レート制御が可能になると期待されている。

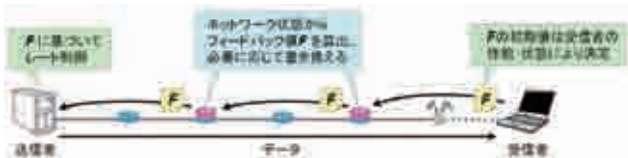


図8：ネットワーク支援型の通信プロトコルの概略

図8は我々の研究グループで開発したネットワーク支援型の高機能通信プロトコル (T-REFWA+) の概略を示している。まず、受信者は自身の通信状態や性能から適切な送信レート F を算出し、ACKパケットを介して送信者へ伝達しようとする。この値 F をフィードバック値と呼ぶ。一方、ネットワークノードでは、ネットワークの輻輳状態などから適切なフィードバック値 F を算出し、必要に応じて受信者が設定した値を書き換える。送信者は、受け取ったフィードバック値 F に基づいたレート制御を行うため、 F の算出アルゴリズムを工夫することにより、利用帯域の不公平性の問題や無線環境におけるスループット低下といった問題を解消することができる。

図9はシミュレーションによる性能評価実験の結果を示している。図6のように複数のユーザが競合するようなケースを想定し、ネットワークの利用効率と競合するユーザ間の公平性を評価したものが、それぞれ図9(a)と図9(b)である。Fairness Indexは値が1に近いほど公平性が高いことを意味しており、提案手法がネットワークを効率よく、かつユーザ間で公平に利用できていることが分かる。一方、図9(c)は図7のような環境において無線部分のエラー率を変化させた時の通信レートを示しており、エラー率が高い条件下での通信レートが大幅に改善されていることが確認できる。

現在実装展開されているネットワークノードによるレート制御法の多くは、各ユーザの通信レートをモニタリングし、基準値を上回った時に制限をかける方法である。しかし、送信レートを調節するTCPとの連携を考慮していないこの方法では、ユーザ間の不公平性や無線環境でのスループット低下といった問題を解決できないばかりか、場合によってはネットワークの利用効率の低下を招いてしまう。通信の効率性、公平性といった高機能性を実現するためには、ネットワークノードと送信ノードの連携による新たな制御

モデルの設計と、プロトコルの開発が必要である。

5. おわりに

来たるべきユビキタスネットワーク社会の実現に向け、次世代IPネットワークの構築が加速している。しかしながら、異種ネットワークの融合により不均一性が増加した巨大ネットワークにおいて、効率性はもとより、公平性などの通信品質 (QoS: Quality of Service) の制御が可能な高機能通信プロトコルは未だに研究開発途上である。従来のEnd-to-Endの原則に縛られない新たなアプローチが登場するなど、近年動きが活性化される本研究分野において、先駆的な役割を果たすべく、これからも日々研究に力を入れていく所存である。

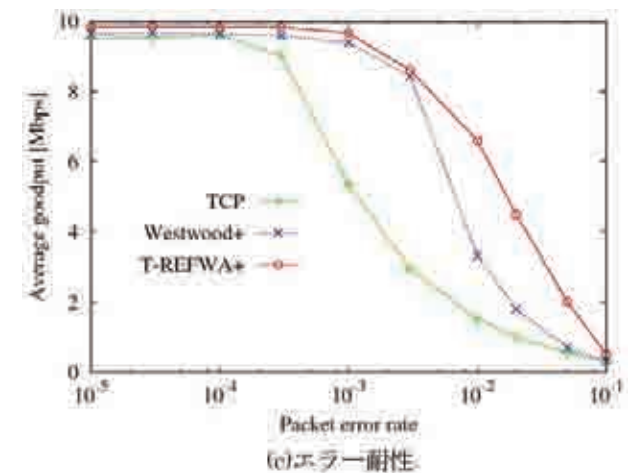
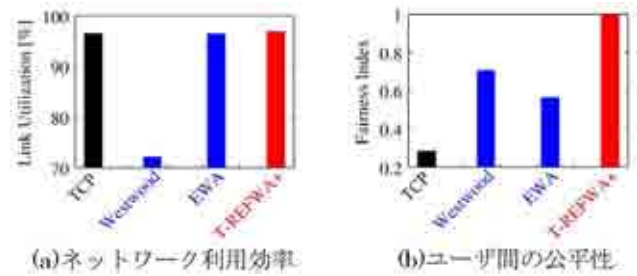


図9：プロトコルの機能性の評価

【著者略歴】

加藤 寧

昭和37年 5月 9日生

昭和61年 3月 職業訓練大学校電子科卒業

昭和63年 3月 東北大学大学院工学研究科情報工学専攻 修士課程修了

平成 3年 3月 東北大学大学院工学研究科情報工学専攻 博士課程修了

平成 3年 4月 東北大学大型計算機センター 助手

平成 7年 8月 東北大学大学院情報科学研究科 助手

平成 8年 5月 東北大学大学院情報科学研究科 助教授

平成15年 4月 東北大学大学院情報科学研究科 教授



マテリアルフロー・アカウンティングと 産業エコロジー

東北大学大学院環境科学研究科
環境科学専攻 教授
長坂 徹也

1. はじめに

「持続可能社会」を実現するためには「物質循環」を効果的に果たすことが重要であると認識されています。ジオロジックな時間スパンで考えると、本来地球上において物質は循環しているものですが、過去100年ほどの極めて短い期間に、人類は大量の自然資源を採取し、物質の形態を変化させ続けてきました。この自然のバランスを越えた形態変化とそのスピードが様々な環境問題を引き起こしているものであり、中には従来自然環境中では全く存在しなかった合成化学物質などの「やっかいもの」を自然界に放出している場合もあります。従って、我々の目指す「物質循環社会」においては、役目を終えた物質・製品を、自然界に適合する形態で環境（シンク）に戻す、あるいは、環境にとって有害なものは、できる限り人間社会の管理下に置いて使い続けることがひとつの方向性と考えられます。すなわち、「持続可能社会」を実現するには、このような形で材料、またそれらの元となる資源を含めた物質循環を果たす必要があります。

地球環境が安定に存在しているということは、物質循環が安定に行われているということであり、すべての経済活動を安定な物質循環の中に収めなくてはなりません。では循環させるべき物質は、どのような形態で、どれくらいの量が社会を動いているのでしょうか。このような疑問に答えるために、国、地域、産業部門などを単位として、物質収支を定量化し、環境負荷や資源消費の流れを体系的に把握することで環境・資源効率を改善しようという研究手法、「マテリアルフロー・アカウンティング（Material Flow Accounting：MFA）」が盛んに行われるようになってきました。

2. マテリアルフロー・アカウンティングの意義

図1は、2000年度における白書等の環境省公表データを基にして、筆者らが修正加筆した我が国におけるマクロマテリアルフロー図です。まず入口側のインプットから見てみると、我が国には国内外から18.4億トンの資源が自然から採取されて社会へ投入されていることがわかります。これに輸入工業製品0.7億トン、再生利用物質2.3億トンを加えると、我が国の経済活動への総物質投入量は、年間21.3億トンに上ります。一方、出口側のアウトプットに目を移すと、最大のものは建築物や耐久消費財として人間活動圏

にストックとしてとどまる社会蓄積量11.5億トンと、食料やエネルギーとしての消費量5.5億トンの計17億トンになります。総廃棄物発生量は5.2億トンであり、この内2.4億トンが産業廃棄物（産廃）、0.5億トンが一般廃棄物（一廃）になります。



図1：我が国のマクロマテリアルフローチャート

「物質循環」のひとつの理想的な姿は、図1中の物質の流れが閉鎖ループになることですが、現状では再生利用物質として入口側へ戻る量が2.3億トン程度あるだけで、理想の姿とは未だ大きな乖離があります。従って、現実的な対策としては、図1において、現在の生活水準をほぼ維持しながら入口側の資源投入量を絞り（資源生産性の向上）、再生利用ループを可能な限り大きくして最終処分量の極小化を図ることと思われます。

一方、社会蓄積物質はやがて使命を終えて廃棄される運命にあり、自然災害等でインフラが破壊されると、短期間で大量の廃棄物が発生することになります。すなわち、社会蓄積物質は「潜在的廃棄物」ともみなすことができ、材料・物質を社会に送り出す時点でこれらが将来的に有害廃棄物化しないための策を講じておく必要があります。また、化石燃料はエネルギーへと利用（燃焼）されると同時に大部分が炭酸ガスに転換されます。エネルギー消費量5.5億トンは約12.4億トンの炭酸ガスを生成することになります。この量は、産廃と一廃の最終処分量と比較すると1桁以上大き

な値であり、炭酸ガスは人間活動における最大の廃棄物と言えます。

図1の左端に示されているヒドゥンフローとは、例えば輸入元での資源採取時における掘削表土や岩石、坑内水、あるいは中間処理での投入副原料など、マテリアルフローには計上されない隠れたフローを意味します。例えば、銅について考えてみましょう。一般的な銅鉱石の品位は0.8%程度であり、国内で銅1トンを生産しようとすると生鉱石なら125トン必要ですが、通常は産出国で40%程度まで銅品位を上げた精鉱が輸出されているので、必要輸入量は2.5トンで済みます。品位を高めた精鉱を得ることによって、その後の国内における製錬工程での資源・エネルギー投入量も格段に低減できているので、計算上は資源生産性が50倍以上も向上していることとなります。しかしながら、その向上分は資源産出国での負荷分と等価であり、当然鉱石価格に反映されているとはいうものの、輸入国側もヒドゥンフローの大きさと、それが資源産出国の環境負荷に与える影響を正しく認識することが重要になります。最近ではヒドゥンフローは環境負荷を計るひとつの指標とも捉えられています。

マテリアルフロー・アカウンティング (MFA) は、90年代後半から欧州を中心に盛んに行われるようになってきた新規な学問領域であり、未だ歴史は浅く、後述するように、国の資源戦略と相まって、世界的に高度化が競われている状況です。MFAは、評価範囲を日本一国に限定する必要はなく、目的に応じてアジア、欧州等の地域、全世界、あるいは国内地方、自治体範囲としても構いません。また、対象とする「マテリアル」に対する分解能を向上させ、製品あるいは物質の種類別フローを解析することも極めて意義深いものです。もちろん、範囲、対象物質の設定によっては、フローデータ収集の難易度と精度に著しい違いが生じますが、経済部門別や物質の種類別への分解能の向上が、最近におけるMFA研究の課題のひとつになっています。

MFA研究の最も直接的なアウトカムズは、資源の消費と需要の構造、および国際的な物質バランスが定量化されることであり、来るべき資源制約型社会に向けた戦略上、必要不可欠な情報のひとつになると考えられます。またフローデータの分解能の向上により、隠れた二次資源の発掘や、産業間の物質の配分と循環の構造を明らかにすることもでき、循環型社会への転換の可能性と課題を明確にすることも可能です。

MFAの研究成果そのものは現状の数量データや、ある仮定に基づいた予測数値が主なものであり、実行力を伴いませんので、工学研究者や技術屋には未だ馴染まない研究領域かもしれません。しかしながら、全体観を見失ったスポット的な研究（しばしば「タコ壺」と揶揄されることがありますが）に陥らないように、MFAと技術開発を組み合わせた新たな研究領域が生まれつつあります。MFA研究は化学工学や計量経済の領域で発達してきましたが、従来の学問領域の枠を超えた「産業エコロジー (Industrial Ecology)」と

いう領域がそれです。

ところで、物質の種類別マテリアルフローにおいては、物質主体や製品バルクとしての流れと、それらに含まれる共存物質としての流れのふたつがあります。後者は、例えば金属素材中の合金元素、ガソリンの添加剤、プラスチック中の難燃助剤としての重金属類などが挙げられ、微量であっても環境に対する影響が大きいものも少なくないことから、これらをサブスタンスフロー (Substance Flow) として別個に議論される場合があります。サブスタンスフローは、特殊鋼中のレアメタルなど、溶媒であるバルク材（この場合は鉄）のフローに随伴することが多いのですが、使用済み製品中の「サブスタンス」は回収対象にされることはほとんどなく、「拡散性」が強いことから、リサイクル製品中のフローは把握が困難となります。しかしながら、サブスタンスフローのデータは、物質の拡散と蓄積の構造を知る上で重要であり、特に環境汚染物質の適正管理という点からも意義がある知見です。我が国が輸入しているレアメタル元素は、その約90%が特殊鋼用合金元素として希薄な濃度で鋼中に添加されているため、ほとんど回収不可能であり、散逸に任せている状態です。筆者らは鉄鋼を介したレアメタルや未利用資源のサブスタンスフローについて研究を進めています。紙面の関係で全てを紹介することはできませんが、以下に代表例を幾つか示します。

3. 鉄鋼業を介した元素フロー1 (リンフロー)

鉄鋼は、多種多様な工業製品素材、社会基盤インフラの構成素材などとして、人類史上最も広く用いられている材料であり、その生産量、流通量、社会蓄積量は、アルミ、銅などの他の金属素材の追従を許しません。また、使用済鉄鋼材は、磁気選別が可能なこと、溶解・精製が比較的容易なこと等から、鉄源としての価値が高く、循環型社会構築の模範材料と位置付けられています。一方、鉄鋼材料はレアメタル等の希少資源の拡散媒体になっているという側面もあり、特に社会ストック形態とスクラップフローの把握は環境の観点からも重要です。我が国は年間粗鋼生産1億トン強を誇る鉄鋼大国ですが、鉄鋼製造プロセスを介した希少元素フローについて例を挙げてみましょう。

リンは、農作物の成長にとって必須の栄養元素ですが、リン酸肥料は土壌環境中に散布されることで初めてその効果を発揮するため、「拡散性」の宿命を負った物質です。リンの主たる原料であるリン鉱石は、枯渇が懸念されている戦略資源であり、リン鉱石を全量輸入に依存している我が国では、将来的なリン資源の確保は、特に農業政策にとって重要課題であるとされています。実際にリン鉱石の価格はこの1年間で7倍以上に高騰しており、価格のみならず購入したくても手に入れるのが困難な状態です。これは世界的な食料確保とバイオエタノールフィーバーが主な原因です。

著者らが分析したリンの国内マテリアルフローを図2に示します。リンは元素単体ではほとんど存在せず、濃度が比

較的薄い状態で社会を流通するため、供給ルートは極めて複雑多岐であり、拡散性も強い元素です。その供給ルートを大別すると、リン鉱石・肥料ルート、食飼料ルート、鉄鋼ルートの3つが挙げられます。肥料や家畜糞尿から土壌に蓄積されるリンは約50万トンに上ると推計されます。下水道から排出されるリンの大部分は下水汚泥として存在し、新たなリン資源として注目されていることが量的にも裏付けられます。一方、リンは鋼にとって最大の不純物元素のひとつであることから、製鋼工程で徹底的な脱リン処理がなされています。これに伴って、年間約1000万トン以上発生する製鋼スラグには、鉄鉱石中のリンがほぼ全量移行し、その全リン量は輸入リン鉱石中のリンとオーダー的に等しい量に上っていることが明らかになりました。すなわち、製鋼過程は鉄鉱石中のリンの濃縮工程とみなすことができますが、リン資源の高騰と需給逼迫が続いているにもかかわらず、製鋼スラグ中のリンは資源としてはほとんど利用されていないのが現状です。著者らは、スラグ中のリンはリン酸カルシウム単体として存在する可能性が高いことを明らかにし、製鋼スラグからのリンの回収方法について検討しています。

は亜鉛の濃縮プロセスともみなすことができ、製鋼ダストは唯一の亜鉛リサイクルルートの担い手です。

現状における電気炉ダストからの亜鉛回収は、ダスト中の亜鉛の主成分であるジンクフェライト ($ZnFe_2O_4$) を大量の石炭で熱還元することで行われています。これに対して著者らは、ダストを石灰と反応させると ZnO が生成することを見出し、石炭を用いない亜鉛の回収法を提案しています。本プロセスの概念図を図4に示します。

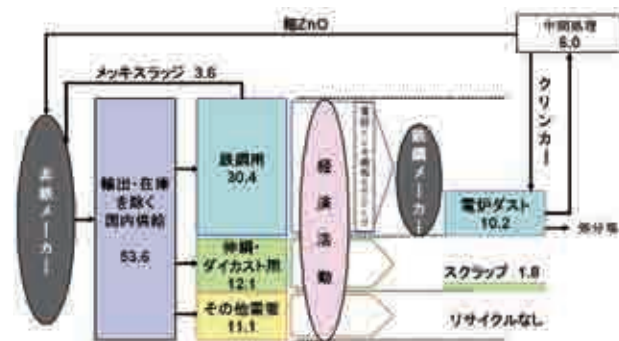


図3：我が国における亜鉛の国内マテリアルフロー（単位：亜鉛万トン）



図2：我が国におけるリンの国内マテリアルフロー（2002年）

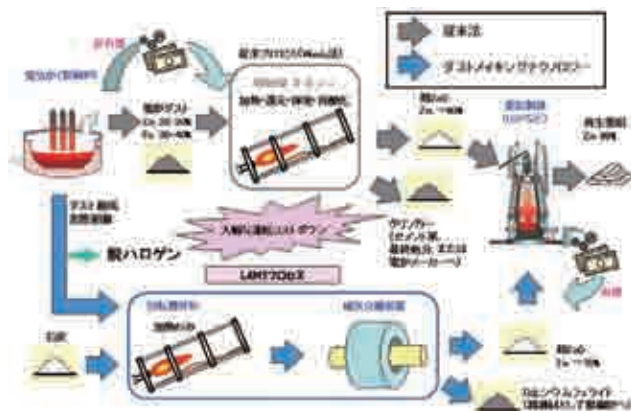


図4：著者らが提案するダストメイキングテクノロジー（DMTech）のプロセス概略図

4. 鉄鋼業を介した元素フロー-2（亜鉛フロー）

図3は、著者らが推計した亜鉛の国内マテリアルフローの概略図です。我が国の亜鉛の国内直接投入量は約54万トンであり、最大の需要先は鉄鋼用のメッキ材です。亜鉛は単体で使われることは稀なため、リサイクルが困難な元素です。図3より明らかなように、現状での唯一と言えるリサイクルルートは鉄スクラップを介した回収ルートです。我が国の粗鋼生産量の約1/4（約3000万トン）は鉄スクラップからの再生鉄鋼製品である電気炉鋼です。電気炉製鋼では、生産量の1.5~2%がダストとして排出されるので、電気炉に限定しても、製鋼ダストの発生量は年間約50~60万トンにも達すると推計されます。電気炉でスクラップを溶解すると、蒸発しやすい亜鉛はダスト中に20%前後の濃度で濃縮します。ダストに捕集される亜鉛の総量は、年間10万トン以上になり、国内亜鉛需要量の約15%に上ります。すなわち、亜鉛サイクルの観点から見れば、製鋼プロセス

5. おわりに

海外資源依存度が強い我が国では、古くからレアメタル等を対象に、国内の資源利用状態や蓄積資源量の把握のために資源取引フローの調査が随時行われてきました。その知見は、資源確保戦略のための一助として有効に利用されてきましたが、その時々の問題意識や技術動向に依存しており、共通の手法論や時系列での一貫性等の点で、科学的な議論の土台にするには必ずしも充分であるとは言えない状態でした。しかしながらMFAの研究手法は、2000年前後から急激な進展を遂げており、緊急課題となっている地球環境問題と資源戦略への取り組みにおいて、新規の学際分野として重要な役割を果たそうとしています。MFAデータは、基本的には各種統計データを精密に積み上げることによって構築することができますが、その作業と分解能の向上には大変な労力を要し、物質収支等の科学的根拠を担保することも容

易ではありません。著者らは計量経済モデルを用いたトップダウン型アプローチによって元素流通量の把握と環境負荷因子発生量の定量化のための手法開発とデータベース化を進めています。ご興味があれば下記の文献を御参照ください。

- ・ 横山一代、長坂徹也、中村慎一郎：廃棄物産業連関モデルに基づくハイブリッドLCA、ふえらむ、Vol.10 (2005), No.11, 862-867.
- ・ S. Nakamura, K. Nakajima, Y. Kondo and T. Nagasaka: Waste Input-Output Approach to Material Flow Analysis: Concepts and Application to Base Metals, Journal of Industrial Ecology, Vol.11 (2007), No.4, pp.50-63.
- ・ K. Nakajima, K. Yokoyama and T. Nagasaka: Substance Flow Analysis of Manganese Associated with Iron and Steel Flow in Japan, ISIJ International, Vol.48 (2008), No.4, pp.554-558.
- ・ H. Kubo, K. Yokoyama, K. Nakajima, S. Hashimoto and T. Nagasaka: The Application of Material Stock and Flow Accounting to Phosphorus in Japan, Journal of Environmental Engineering and Management, Vol.18 (2008), No.1, pp.47-53.
- ・ S. Nakamura, S. Murakami, K. Nakajima and T. Nagasaka: A Hybrid Input-Output Approach to Metal Production and Its Application to the Introduction of Lead-free Solders, Environmental Science and Technology, Vol.42 (2008), No.10, pp.3843-3848.
- ・ 松八重 (横山) 一代、中島謙一、小野恭平、中村慎一郎、長坂 徹也：WIO-MFAおよびSFAによる我が国の鉄資源循環とマンガフロー分析、鑄造工学, Vol.80 (2008), No.6, pp.330-336.
- ・ S. Itoh, A. Tsubone, K. Matsubae-Yokoyama, K. Nakajima and T. Nagasaka: New EAF Dust Treatment Process with the Aid of Strong Magnetic Field, ISIJ International, Vol.48 (2008), No.10, pp.1339-1344.

【著者略歴】

なが さか てつ や
長 坂 徹 也

昭和32年10月9日生

昭和55年3月 東北大学工学部金属工学科卒業

昭和60年3月 東北大学大学院工学研究科金属工学専攻博士課程後期3年の課程修了

昭和60年4月 東北大学工学部金属工学科 助手

平成 4年4月

}

平成 5年4月 米国カーネギー・メロン大学Research Associate

平成 6年2月 東北大学工学部金属工学科 助教授

平成13年3月 東北大学大学院工学研究科金属工学専攻 教授

平成15年4月 東北大学大学院環境科学研究科 教授



常識を越えた非接触エネルギー伝送 - 世界を広げ実用の域に -

東北大学大学院医工学研究科
医工学専攻 教授
松木 英敏

1. はじめに

平成20年4月、医工学研究科が、本邦発の大学院研究科として東北大学に設置されました。医工学発祥の地である東北大学なればこそですが、工学研究科と医学系研究科との緊密な連携体制が必須であることはいうまでもありません。私は、医工学研究科の発足と同時に、本籍を電気・通信工学専攻から医工学専攻に移し、医工学研究科の運営に微力ながら携わっておりますが、研究教育については、工学研究科と医工学研究科の「二足のわらじ」で進めて参ります。本稿においては、医工学にかかわるテーマを中心に当研究室の研究の一端をご紹介します。

2. 非接触電力伝送

近年、「ユビキタス社会の実現にむけて」という言葉が人口に膾炙していますが、電力の分野に目を向けると、明治維新以来、先人の努力により「人の住むところコンセント有り」を実現した送配電網はまさに有線によるエネルギー分野のユビキタス化であったといえます。そして現代、「無線」によるエネルギーのユビキタス化が研究の俎上に載せられているのです。当研究室は、非接触エネルギー伝送技術が拓く新しい世界を夢見て研究を続けております。

私たちが取り組む非接触エネルギー伝送方式は、対向させたコイル対と磁束収束用の磁性材を用いた電磁誘導の原理に基づくものです。したがって、伝送の鍵となるのは電気エネルギーの伝送ですので、以下では「非接触電力伝送」と呼ぶことにします。電磁界の空間分布からすると、私たちの方式は、遠方界に分類される電波を利用しているわけではなく、近傍界の交流磁界を利用する方式です。周波数帯は10kHzから1MHz帯、伝送距離は数ミリメートルから数十センチメートルを想定しています。

非接触で電力を送ることができると、対移動機器、対密閉空間内機器への電力伝送が可能となります。いずれも電池を用いた充電システムとのコラボを必要とします。具体的な対象としては、体内埋め込み機器をはじめとして、日常の電気機器、携帯電話、ロボット、自動車、深海探査船などがあげられます。

図1は当研究室で開発している対象機器を伝送電力と伝送距離に分類して示したものです。企業と共同で最も早く実用化にこぎつけたものは10mW程度の電力と信号を伝送する腕時計でした。また、試作段階のものでは10mW級か

ら30kW級までをすでに実現し、現在150kW伝送に取り組んでおります。

以下、これらの中から代表的なものについて紹介します。

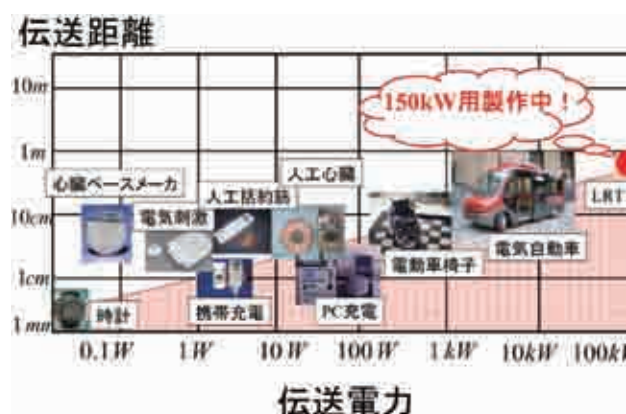


図1：松木研における非接触電力伝送の実績例

3. 医療用機器

体内埋め込みを想定した医療機器に対し、皮膚を介して有線でエネルギーを送ることは、感染防止などの日常のケアの大変さなどからも何としても避けたいところです。非接触でエネルギーを送ることができれば大きな福音となります。このとき、受電電力の利用の仕方によって

- (1)電力として出力（ペースメーカー、電気刺激）
- (2)機械エネルギーとして出力（人工心臓、人工括約筋、人工食道）
- (3)熱エネルギーとして出力（ハイパーサーミア）

などにわけることができます。以下、それぞれの項目について例を挙げていきます。

3.1 充電式心臓ペースメーカー

現状では充電できない一次電池を電源とするペースメーカーが使われていますが、図2は、充電使用を前提とした次世代ペースメーカーにおいて、半年に一度の検診時充電を想定したシステムの例です。金属ケースで覆われたペースメーカー内部の電池に充電するため、外部からの印加磁界とケース形状に工夫を凝らす必要があります。図中①②③④は1C充電期間を表し、また、それぞれの間は3Cの加速放電期間です。本システムではケースの温度上昇を数度以内に抑えた充電に成功しています。

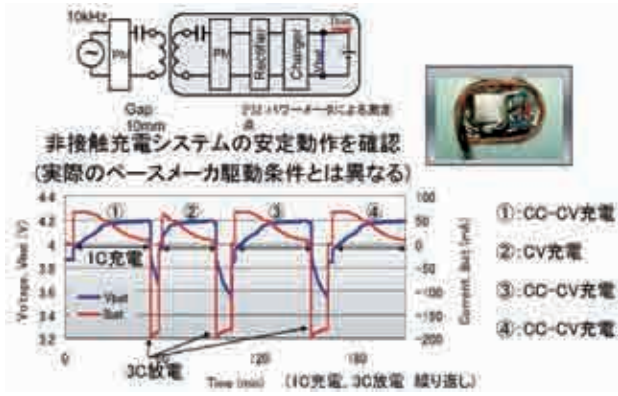


図2：充電式ペースメカへの応用

3.2 運動再建電気刺激装置

図3は機能的電気刺激（FES）用の多チャンネル埋め込み装置に適用した例です。写真は伝送電力700mW、13チャンネルのものでヒトへの適用を前提に設計されています。

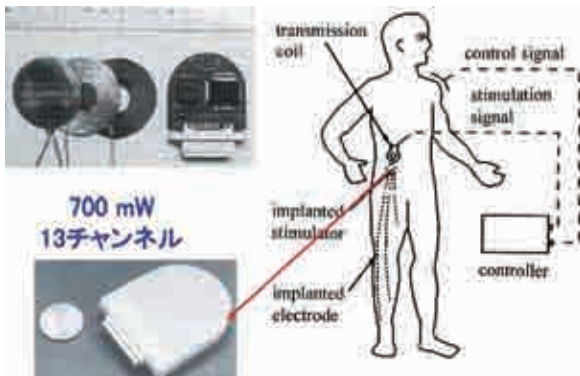


図3：埋め込みFESへの適用

図3は体内に埋め込んだ制御装置から13本の電極線を刺激部位までのばす方式でしたが、最近では、電極を制御回路内蔵の針状とし、針自身に当該チャンネルを認識させ、刺激信号と電力の受電を行う方式を開発しています。この方式によれば、多チャンネルになっても体内に電極線を多数引き回す必要がなくなると考えています。図4にそのための基礎実験の一例を示します。家兎を用いた実験で、体外から電力と制御信号を送り、電極部で電気刺激波形を再生したのち、実際に筋刺激が行えることを示しています。

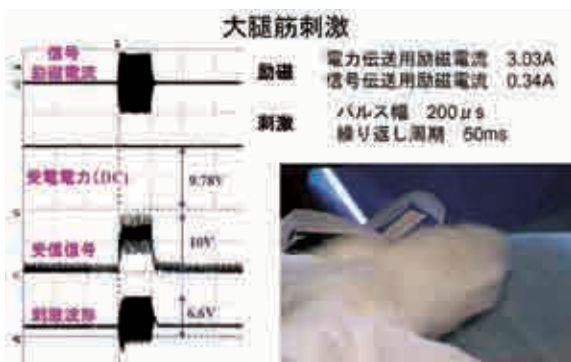


図4：非接触伝送による電気刺激例

3.3 人工心臓

次に、機械エネルギーに変換して使用する例として、図5のような埋め込み式人工心臓システムを紹介します。これは東北大を含めた3大学共同のプロジェクトで、当研究室が電力伝送を担当しました。

完全埋め込み人工心臓用ポンプでは最大で40W近い電力を必要とするため、埋め込み電池のみによる長時間駆動が難しい機器です。そのため、埋め込み電池を緊急用に位置づけ、常時、体外からの電力供給で人工心臓を駆動するシステムにせざるを得ず、また、極めて高い伝送効率が必要とされるシステムとなります。

図6は当研究室で開発したシステムの総合効率の実測例です。図から、このシステムの最大効率値は93%に達することがわかりますが、これは世界的に見てもトップデータです。この例では、40W近い電力を伝送しながら、埋め込まれたコイルの温度上昇を1度以内に抑えることができます。

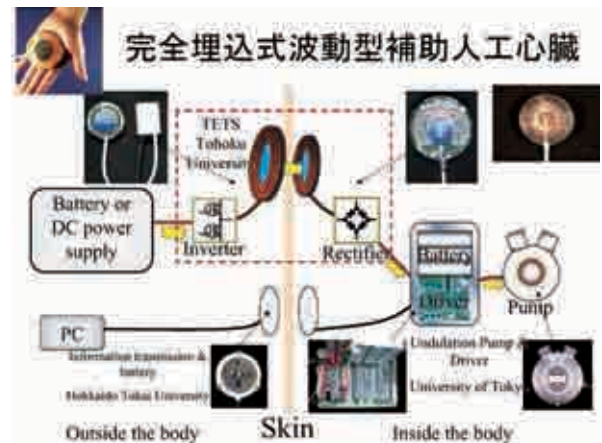


図5：人工心臓用非接触電力伝送システム

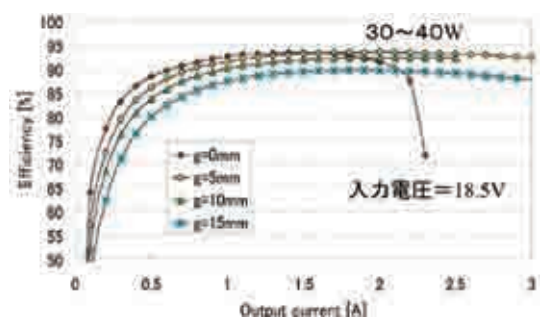


図6：人工心臓用システムの効率特性

3.4 加温素子

続いて、熱エネルギーとして利用する場合ですが、腫瘍の焼灼療法、がんに対するハイパーサーミアなどがあげられます。この場合、受電用の二次コイルに流れる電流による発熱を熱源として利用します。私たちの研究室では長年キュリー温度の低い磁性材料を用いた温度制御機能について研究を続けてきており、非接触電力伝送と組み合わせる

ことで、温度計測を不要とする安全な加熱素子ができることを示してきました。

3.4.1 スtent

図7は狭窄血管などの拡張に使用されるstentを感温磁性金属材料で構成し、拡張後にやがて周囲から浸潤する腫瘍の焼灼を行える加温stentを試作した例です。図8に示すように、周波数や磁界強度など、励磁条件を変動させてもstentの温度は一定に保たれることを実証しました。これは感温磁性材の性質によるものであり、温度計測による外部からの制御は一切行っておりません。

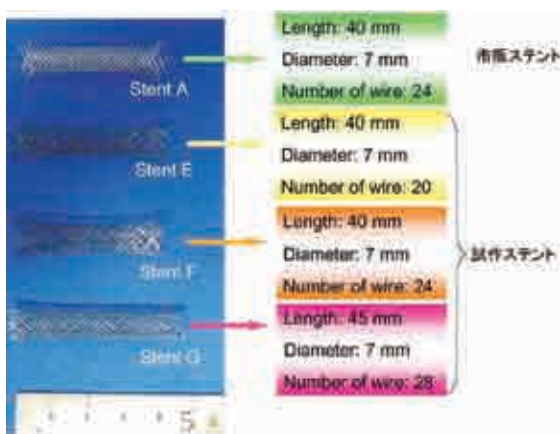


図7：stentと温熱療法の併用

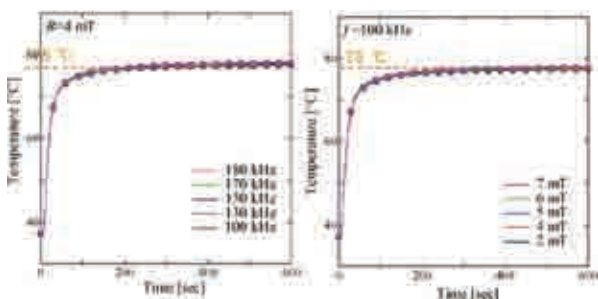


図8：感温stentの発熱特性

3.4.2 ハイパーサーミア

ソフトヒーティング素子が示すこのように優れた発熱特性をがんに対するハイパーサーミアに応用すれば、治療のたびに温度センサを何本も刺入して温度制御を行う従来の方法に比べて、加温素子の埋め込みは必要ですが、簡便に且つ確実に患部を加温することができます。ハイパーサーミアによるがん治療は、確実に腫瘍のみの加温さえできれば、がんの種類を問わずに有効であるといわれています。

私たちはこの方法をソフトヒーティング法と名付け研究を続けています。図9に、従来の方式とソフトヒーティング法の励磁条件などを、比較して示しています。比較的低い周波数領域を使用しています。

図10(a)は私たちが開発した高発熱能を有するソフトヒーティング針であり、表面を金でコーティングし、高発熱特

性と生体適合性を両立させています。図10(b)は皮膚がん(メラノーマ)に適用した結果です。図の左は治療後7日後の腫瘍、図の右は、比較のために治療を行わなかった腫瘍の様子を示しています。この図に示すように、一度だけのハイパーサーミアのみでもがんを消失させることが可能です。一日も早くヒトに適用できるよう、励磁装置の開発を進めています。

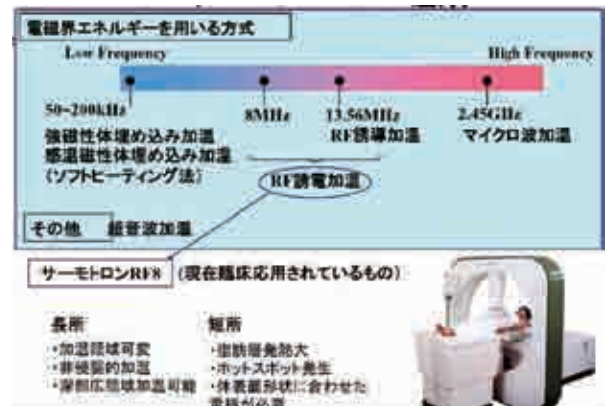


図9：がんに対するハイパーサーミアの種類

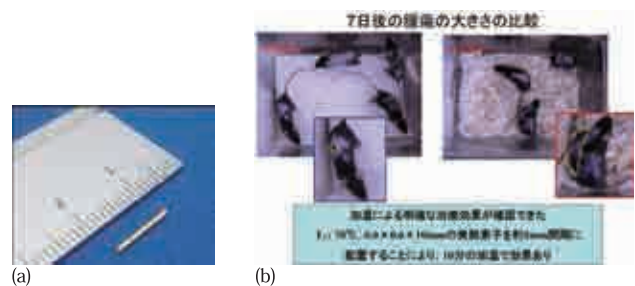


図10：(a)がんに対するハイパーサーミア用感温加熱針 (b)皮膚がん(メラノーマ)に対する治療効果

4. 家電および電動車両への応用

体内への伝送に比べていわゆる民生用への展開は伝送距離や温度上昇の点で自由度が高く、図1に示したように様々な応用が考えられますが、ここでは、高出力機器への応用として、電動車両への非接触給電を紹介します。

図11は企業及び早稲田大学と共同でNEDOの委託を受けて開発したマイクロバス向け20kW級の給電システム(IPS)です。地上に一次コイルを埋め込み、車両床面に二次コイルを配置します。図に示すように、海外の市販製品に比べてすべての点で性能を凌駕するシステムを実現することができました。現在はさらに大容量化し、LRTなどへの応用を視野に開発を進めているところです。

このような大容量の電動車両システムにおいては、車載電池の重量が問題となるケースが多く、小容量電池と非接触伝送を組み合わせたシステムの方がエネルギーの有効利用、すなわち省エネルギーになる、という試算もされているのです。



図 11：電気自動車に対する給電と特性比較

一方、携帯家電機器への非接触電力伝送を考える場合には、個々の機器の消費電力は小容量であることから、送電部、受電部を対にするよりも、図12にイメージで示すように、複数の携帯家電機器に同時伝送できる「送電パット」、「送電ステーション」が有用であると考えられます

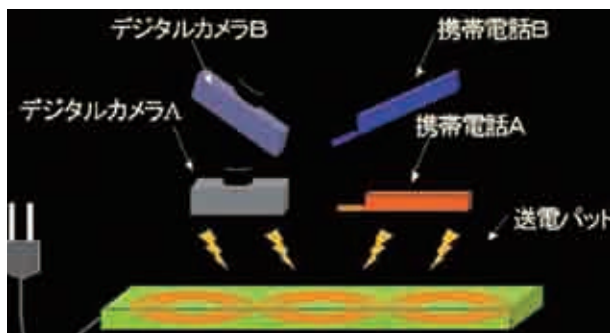


図 12：複数の家電機器への給電イメージ

図13は実際に3つの機器を想定し、機器をひとつずつ順次おいていった場合の伝送特性を示しています。図から、高い伝送効率を維持したまま、複数の機器に電力伝送を行えることがわかります。

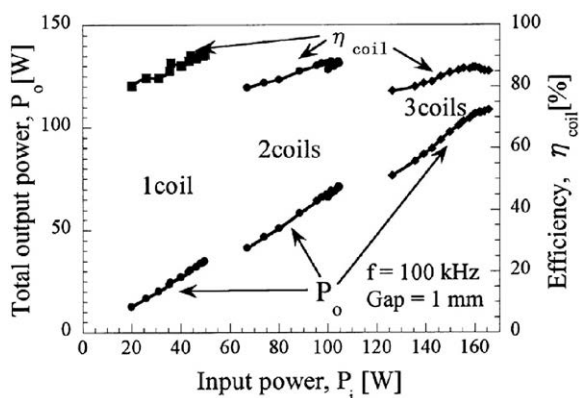


図 13 3種類の負荷に対する同時給電実施例

5. おわりに

以上、医療応用を中心に非接触電力伝送について当研究室における研究の一端を紹介してきました。すべての適用例に共通なこととして、コイル同士の軸合わせがありますが、コイルの形状、寸法を工夫することによりおおよそコイル半径の1/2程度のずれに対しては8割程度の伝送電力を確保することができます。さらに私たちは、コイル同士の位置合わせを不要とする伝送方式にも取り組んでおり、小容量のシステムにおいてはすでに実証段階にあります。

昨年、MITの研究者が磁気共鳴法を発表し、2 mの距離を隔てて60Wの電力を40%の効率で伝送したと報告したことで、非接触電力伝送がにわかに注目を集めるようになったようです。「非接触は効率が悪い」という風評を払拭するべく奮闘してきた身としては心強い援軍が現れた思いです。これからも多くの方々に非接触伝送に興味を持っていただき、応用の世界の広がることを夢見ながら、学生共々、研究にとりくんでいるところです。

研究内容にご興味がおありでしたら、是非ご連絡をいただければ幸いです。

【著者略歴】

まつ き ひで とし
松 木 英 敏

昭和25年11月30日生

昭和48年 3月 東北大学理学部物理学科卒業

昭和52年 3月 同大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士課程前期2年の課程修了

昭和55年 3月 同大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士課程後期3年の課程修了 (工学博士)

昭和55年 4月 東北大学工学部助手

昭和60年 7月 東北大学工学部助教授

平成10年 2月 東北大学大学院工学研究科教授

平成20年 4月 東北大学大学院医工学研究科教授

平成19年度 「青葉工学振興会賞」 受賞報告

「研究奨励賞」

本財団では、宮城県に設立されている大学等の工学系学部・研究科に所属する研究者等で、学術に優れた研究成果をあげた者を顕賞し、もって当該分野の教育・研究の推進・発展と地域の振興に寄与する者に対して贈呈している。

本年度より、「青葉工学振興会賞」の新設、従来の「研

究奨励賞」の賞金の改定をし、「第1回青葉工学振興会賞」1名、「第13回研究奨励賞」5名を選出した。

授賞式は平成20年2月5日（火）仙台ホテルにて役員・推薦教授及び審査委員臨席のもとに執り行われました。

授賞された研究者及び研究業績を掲載します。



「第1回青葉工学振興会賞」



ボトムアップ的手法を利用した高分子と金属ナノ粒子の精密集積からなる光機能性ナノデバイスの創製

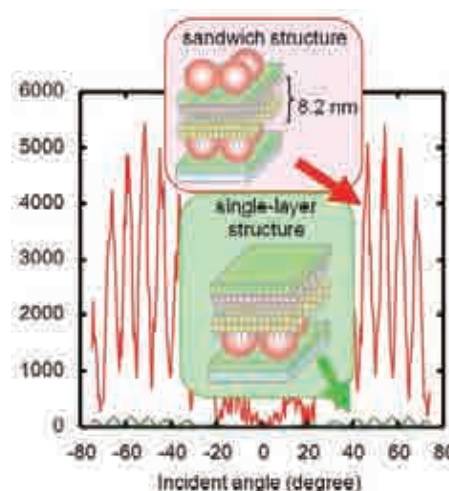
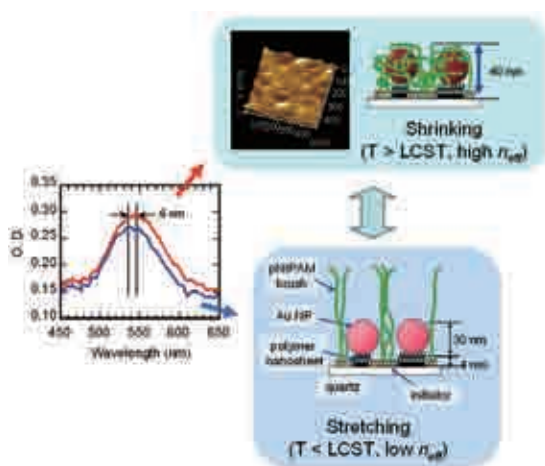
東北大学多元物質科学研究所
多元ナノ材料研究センター
ハイブリッドナノ組織体研究部 准教授
三ツ石方也

自己組織化単分子膜作製法、交互吸着法およびLangmuir-Blodgett(LB)法などのボトムアップ的アプローチは、従来有機分子を合目的に集積する技術として発展してきた。受賞者は、LB法により作製される高分子LB膜(高分子ナノシートと呼んでいる)を基盤材料とし、金属ナノ粒子やシリカナノ粒子などの無機ナノ粒子を新たな電子機能、光機能、センサー機能を有するハイブリッド高分子ナノ集積体の構築を目指した興味深い研究を報告している。以下

にその概要を要約する。

ボトムアップ的アプローチを利用した高分子ナノ集積体の構築

4-ビニルピリジンや末端にアミノ基を有するモノマーとN-ドデシルアクリルアミドの共重合体からなる高分子超薄膜を用いて、直径数十ナノメートルの金属ナノ粒子を高分子超薄膜上に均一に分散し、単粒子層状態で固定化でき



ることに成功している。このようなナノ構造体を利用することで、支持基板を必要としない厚さ30nmの高分子ナノ薄膜の作製に成功している。さらに長さの揃った刺激応答性高分子 (poly(*N*-isopropylacrylamide)) のブラシと金ナノ粒子配列を組み合わせることで、ナノメートルサイズで伸縮する高分子ブラシとし、その動きにより、光吸収特性が可逆的に変化するナノアクチュエーターを提案した。この手法は、金属ナノ粒子と高分子超薄膜からなるハイブリッドナノ集積体を二次元、三次元的に自在に構築可能であり、新規なナノデバイスへの応用展開を可能にするものと期待されている。

ハイブリッドナノ集積体の光機能化に関する研究

近年注目されている金属ナノ粒子は、可視光領域において局在プラズモンを発生する。局在プラズモンは金属ナノ

粒子表面数十ナノメートルの限られた空間でのみ発生する局所場である。ルテニウム錯体やポルフィリン金属錯体を有する高分子ナノシートと銀ナノ粒子単粒子層をナノスケールの精度で積層することで、色素からの発光を十倍近く増強できることを見出した。さらに、非線形光学活性なディスプレイ1を含有する高分子ナノ集積体を作製し、金ナノ粒子層と組みあわせることで8倍もの光第二高調波の増幅が得られ、サンドイッチ構造とすることでSH光強度の約300倍の増強に成功した。これは、光機能性ナノデバイスの基盤技術として重要な研究成果であり、今後の研究の進展が期待されている。このような研究はナノフォトニクスに対し、基礎的知見を提供するだけでなく、センサーや光学素子など幅広い分野への展開が期待できるため、国内外から高い評価を得ている。以上によりその業績は青葉工学振興会賞に値するものと認められた。

「第13回研究奨励賞①」



高感度広ダイナミックレンジイメージセンサに関する研究

東北大学大学院工学研究科
技術社会システム専攻
須川研究室 博士後期課程3年
赤羽 奈々

イメージセンサ技術は、最近のデジタルカメラや携帯電話等の普及拡大とともに、飛躍的にその性能向上が図られてきた。一方、高画質撮像、監視、医療、車載、科学計測などの分野では、肉眼や銀鉛フィルム以上の高い感度と広いダイナミックレンジ (Wide Dynamic Range, WDR) を持ったイメージセンサの実現が強く望まれている。本研究は、こうした要望に応える新規な高感度WDRイメージセンサ技術を構築するものであり、以下のような技術を実現している。

動画撮像性能に優れた高感度WDRイメージセンサ技術

多重露光を行わず一回の露光動作でWDR化が図れる、横型オーバーフロー蓄積型イメージセンサ技術を世界で初めて創出し、その動作を実証した。また、本センサが暗電流と熱ノイズに対して高い許容度を有することを実証した。

光電変換の線形性と感度を改善した高感度WDRイメージセンサ技術

画素構成と動作方法を根本的に改良し、高い感度とS/N比を維持した上で100dBを超える光量範囲に渡って正確な光電変換線形性を有する、新規な横型オーバーフロー蓄積型イメージセンサ技術を創出した。さらに、高耐熱高気密パッケージ技術を提案し、動作温度範囲の拡張を実現した。

超WDRイメージセンサ技術

横型オーバーフロー蓄積に加え、光電流読み出し動作を時系列的に組合せた、200dBを超える世界最高のWDR性能を有するイメージセンサを実現した。また、全動作範囲で40dB以上の高S/N性能を確保し、このWDR性能を実現

できることを実証した。さらに、画素数を100倍以上に増し、電流読み出し動作の光電変換特性を改善した、全光量範囲で完全線形応答のWDRイメージセンサに発展させた。

感度と飽和信号量のトレードオフを解消するイメージセンサ技術

横型オーバーフロー蓄積の思想をさらに発展させ、光電変換感度を従来の約3倍以上の $200 \mu\text{V}/\text{電子}$ に向上し、飽和信号電荷量を100万電子確保して、ノイズ電子数約2個という、高感度低ノイズWDRイメージセンサ技術を創出した。

本高感度WDRイメージセンサ技術は、様々なアプリケーションに応用可能であり、今後一層の展開が期待される。



動画撮像性能に優れた高感度WDRイメージセンサ技術

光電変換の線形性と感度を改善した高感度WDRイメージセンサ技術

超WDRイメージセンサ技術

感度と飽和電荷量のトレードオフを解消するイメージセンサ技術

「第13回研究奨励賞②」



動脈硬化症発生メカニズム解明を目的とした細胞共培養血管モデルの開発

東北大学大学院工学研究科
バイオリボティクス専攻 助教
坂元尚哉

動脈硬化症の発生には、血流により血管壁に作用する力学刺激（血流力学刺激）が深く関わっている。血流力学環境下における血管の機能変化を詳細に調べるため、血管壁に存在する内皮細胞と平滑筋細胞をそれぞれ単離・培養し、血流力学刺激を負荷する研究がこれまでに行われてきた。

近年、さらに両細胞間の相互作用も動脈硬化発生に対して重要な役割を持つことが指摘されている。しかしこれまでに細胞間相互作用を考慮した状態で血流力学刺激に対する細胞機能変化を詳細に調べる方法はなかった。著者は内皮細胞と平滑筋細胞を共培養し、力学刺激を負荷できる新たな血管モデルの開発を行った（図1）。平滑筋細胞の上に

コラーゲンゲル、多孔質膜を介して内皮細胞を培養することでモデルを構築した。コラーゲンは主要な血管構成タンパク質であり、このモデル中での細胞挙動および機能変化は生体内の状態に極めて近いと考えられる。

このモデルに対してせん断応力を負荷し、内皮細胞および平滑筋細胞の機能変化を調べた。内皮細胞に作用するせん断応力の大きさに応じて血管モデル中の平滑筋細胞の遊走性が減少し、この平滑筋細胞遊走性に対する細胞間相互作用として一酸化窒素と細胞外基質分解酵素の働きを解明した。またせん断応力負荷により、内皮細胞の障壁機能の向上、平滑筋細胞の分化の促進、白血球の内皮細胞への接

着性が抑制も明らかにしている。これらの結果から生理的な血流力学刺激には動脈硬化病変形成を抑制する働きがあることを突き止めた。

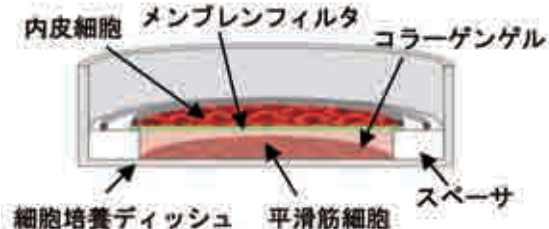
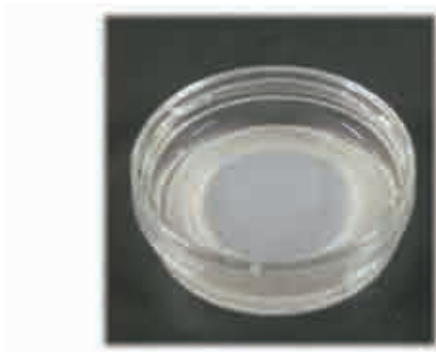


図1：細胞培養ディッシュ内に作製した共培養モデルの写真（左）およびモデル断面模式図（右）

「第13回研究奨励賞③」



社交ダンスパートナーロボットに関する研究

東北大学大学院工学研究科
バイオリボティクス専攻
小管研究室 博士後期課程3年
竹田 貴博

近年、少子高齢化による労働力の減少が大きな社会問題となっており、その解決策の一つとして、ロボット技術を生活分野へ応用することが期待されている。ロボットを生活分野へ投入する際、人間との共存・協調を考慮したロボットシステムを設計することは必要不可欠である。これまで人間・ロボット間の協調作業問題を扱った研究がなされてきたが、その多くでは、例えばインピーダンス制御のような、人間の操作力に対して、見かけ上、ロボットが受動的な運

動を生成するような制御系が用いられてきた。このようなシステムは人間にとって直感的に分かりやすいというメリットがあるが、もし、ロボットが人間の意図を推定し、力に対して受動的に運動するだけでなく、その意図に従った行動を能動的に行うことができれば、人間の意図に基づいた、より高度な協調運動システムを実現することが可能であると考えられる。本研究では、協調運動の一例として社交ダンスを取り上げ、上記のような人間・ロボット間の協調



Fig.1：社交ダンスパートナーロボット

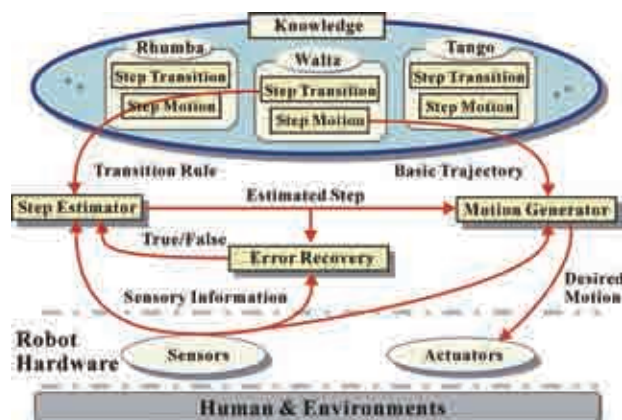


Fig.2：制御アーキテクチャ

運動システムについて研究している、社交ダンスでは男女がペアとなり、男性が女性をリードする。そして、女性はそのリードに基づいて男性の意図するダンスステップを推定し、運動をそのダンスステップへ切り替えることで社交ダンス協調運動が実現される。女性型の社交ダンスパートナーロボットを制御するにあたり、4つのモジュールから構成される制御アーキテクチャを提案してきた。すなわち、社交ダンスについての知識情報を格納する”Knowledge”、男性から加えられるリードに基づいてダンスステップを推

定する”Step Estimator”、ステップの誤推定を検出し、正しいステップへロボットの運動を修正する”Error Recovery”、男性との協調したステップ運動を生成する”Motion Generator”の4つのモジュールから構成されるアーキテクチャである。このようにロボットが相手の意図を推定し、協調して作業を遂行する技術は、社交ダンスロボットだけでなく、高齢者向けの福祉機器や、私達の身の回りで働くパートナーロボットの開発のための基盤技術であり、将来、私達の生活をより豊かなものにするだろう。

「第13回研究奨励賞④」



自己組織化による次世代集積回路形成プロセスの創製

東北大学大学院工学研究科
バイオロボティクス専攻 助教
福島 誉史

半導体集積回路(IC)チップは、素子や配線の微細化により急速に高性能化されてきたが、この比例縮小則も限界に近づいている。この問題を解決するため、チップの母材であるSi基板を貫通する縦方向配線TSV(Through-Silicon Via)を介してチップを多層化する「三次元集積化技術」が最も有力な候補として挙げられ、近年、極めて高い注目を集めている。この技術は、東北大学バイオロボティクス専攻の小柳光正教授らが20年近く前から精力的に研究を推進している成果である。

本研究では、分子間相互作用を利用して自発的にマクロな秩序構造を形成する「自己組織化」による新しい半導体集積化手法を用いて、ICチップや光学素子、MEMSチップを混載した三次元積層型ICチップの作製技術について研究してきた。従来のロボットによるPick-and-Place方式を用い

たチップ位置合わせ技術(図1a)では、数多くのチップを個々に積層するためスループットが著しく低下し、位置合わせ精度も±10 μmと低い。一方、自己組織化によるチップ位置合わせ技術(図1b)では、液体の表面張力を駆動源としており、多数のチップを一括して0.1秒以内の瞬時に、0.5 μm以内の非常に高い精度で位置合わせを行い、チップを積層することが可能となる。自己組織化によるチップ位置合わせを「セルフアセンブリ」とも呼ぶが、これを三次元ICの作製に最初に应用したのが本研究である。数ミリ角の多数のチップを自己組織的に位置合わせした結果を図2に示す。この技術を用いて三次元ICを試作した結果については、半導体のオリンピックとも言われるIEDM(国際電子デバイス会議)で2005、2007、2008年に発表し、非常に高い評価を得ている。

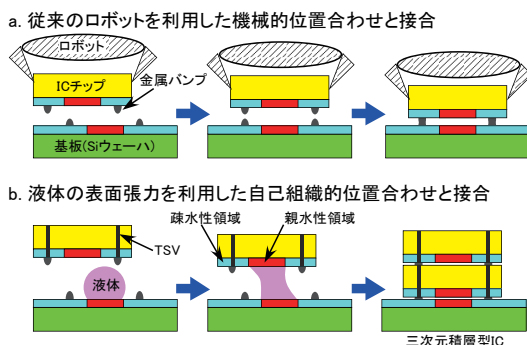


図1：従来技術と自己組織化チップ位置合わせ技術の比較

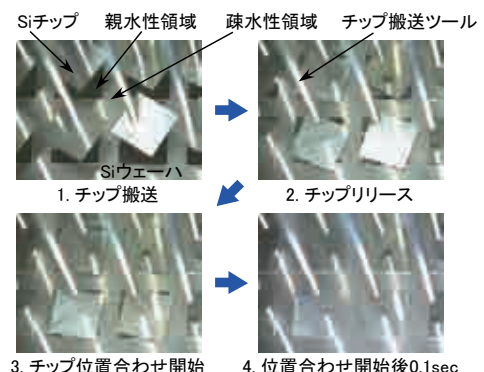


図2：自己組織化チップ位置合わせ工程の上面写真

「第13回研究奨励賞⑤」



2進数系と非2進数系を融合したハードウェアアルゴリズムの高水準設計技術に関する研究

東北大学大学院情報科学研究科
情報基礎科学専攻 助教
本間 尚文

近年、VLSI（超大規模集積回路）の急激な集積度向上に対して設計技術が追いつかない「設計の危機」が顕在化している。本受賞者は、複雑化する高性能算術演算回路の設計問題を解決するため、算術演算回路のハードウェアアルゴリズム（算術アルゴリズム）の高水準な記述・検証・合成技術を開拓してきた。その中心となる着想が、2進数に限らず任意の重み数系を使用を可能とする算術アルゴリズムの表現手法である。提案する手法は、①算術アルゴリズムを整数方程式により形式的に記述可能、②アルゴリズムの正当性を数式処理により検証可能、③正当性の証明されたアルゴリズム記述を従来の論理式に等価変換可能などの特長を有する。これまで、上記表現手法に基づく算術アルゴリズム記述言語を提案するとともに、これに基づく算術演算回路の合成システムを開発した。同システムは、提案する言語処理系により機能が完全に保証された回路のみを合成できる。現在、従来の論理合成では不可能であった1000種類以上の算術演算回路の合成を実現しており、インターネット上から広く利用可能である。2004年に公開以降、全世界から10万件を越えるアクセスがあり、世界各国の学会等で利用例が報告されている。2005年には、その独創性や実用性が評価され、優れたLSI IP（設計資産）としてLSI IPデザイン・アワード完成表彰部門IP賞を受賞した。また、その受賞により、同年にフランスで開催された国際会議にて招待講演を行った。近年では、インターネット上におけ



インターネット上で公開中の算術演算回路の合成システム
(<http://www.aoki.ecei.tohoku.ac.jp/arith/mg/index.html>)

る百科事典として知られるWikipedia（英語版）からも算術アルゴリズムに関する項目で同システムが参照されている。その他、本研究に関連して、2002年から2006年まで科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業の「情報基盤と利用環境」領域研究者に採択され、第19回安藤博記念学術奨励賞などを受賞している。

平成19年度 事業報告

宮城県における工業技術に関する研究振興を図り、もって地域社会の科学技術・産業の向上発展に寄与するため、次に掲げる事業を行った。

1. 科学技術に関する試験研究

研究者を委嘱（非常勤研究員）し、各研究科と包括的協力協定により、施設、設備等の相互利用し、委託研究「三次元計測応用技術に関する研究」他122件の試験研究を行った。

2. 学術研究・教育への助成

(1) 学術研究を行うための指定研究助成金の交付

指定研究助成金審査委員会の審査に基づき、指定研究助成金「電子線分光・回析法の基礎と応用に関する研究」他58件の指定研究助成金を交付した。

(2) 若手研究者助成のための各種研究奨励賞の交付

- 第1回「青葉工学振興会賞」を授与した。
被推薦者6名、受賞者1名
- 第13回「研究奨励賞」を授与した。
被推薦者39名、受賞者5名
- 第11回「及川研究奨励賞」を授与した。
被推薦者6名、受賞者3名

(3) 研究会開催への助成

「環境経営研究会」他10件に助成した。

(4) 国際学術等開催への助成

「6大学ワークショップ交流会」に助成した。

(5) 学術研究・教育のための国際交流に対する助成

「韓国学生との交流」他2件に助成した。

3. 研究成果および工学情報の提供

東北大学工学研究科・工学部における研究成果や工学情報を県内企業に提供し、地域工業技術の高度化と産学協同の促進を図るため、

「翠巒」第22号…20年1月、1,300部を発行した。

4. 地域コンソーシアム研究開発事業への参画

補完コンソーシアム継続 1件

5. 産学官交流大会の開催

産業界、大学等の学術研究機関および、国、県等の産学官の相互連携・交流促進を図るための交流大会に主催団体として参画した。

1. 第42回産学官交流大会

日時 平成19年6月12日（火）開催
場所 仙台国際センター

2. 第43回産学官新春交流大会

日時 平成19年1月17日（木）
場所 仙台国際センター

6. みやぎいいモノテクノフェア2007の実施

宮城県内の産業界を中心に、学術研究機関、地方自治体及び関係各団体の協力を得ながら、工業製品並びに工業技術を幅広く紹介するとともに、技術情報の交換と技術交流を行うことにより、地域産業の一層の活性化を図るため、「みやぎいいモノテクノフェア2007」に主催団体として参画した。

開催期間 平成19年10月2日（月）～3日（火）
場所 みやぎ産業交流センター（夢メッセみやぎ）

7. 東北大学工学研究科、情報科学研究科及び環境科学研究科の公開（オープンキャンパス）への助成

中・高校生及び一般市民に対し、世界の最先端の設備と研究・教育の活動状況を公開するオープンキャンパスに助成をした。

開催期間 平成19年7月30日（月）～31日（火）
会場 青葉山キャンパス

翠 巒

仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-04
東北大学大学院工学研究科内
電話 022-795-7991
<http://www.aoba-found.or.jp/>
財団法人青葉工学振興会