

# 翠巒





日本水彩展（入選作品）      ぼ た ん      米谷いし子

日本水彩画会は、大正2年（1913年）石川欽一郎、丸山晚霞など当時有力な水彩画家60余名が結集して、水彩画専門の会として設立されました。爾来多くの画家を輩出しており、わが国では最も長い歴史を持つ絵画団体の一つです。昭和48年（1973年）には社団法人の認可を受けて基盤を強化し、公益的使命のもとに、水彩画の普及発展を通じて、わが国の芸術文化の向上に、寄与してきました。本会の主要な事業として、毎年東京・上野で「日本水彩展」を開催しております。

## も く じ

### 巻頭言

サイエンスパークについて .....	東北大学大学院工学研究科長・工学部長 内山 勝	1
<b>平成22年度「青葉工学振興会賞」</b> 、「 <b>青葉工学研究奨励賞</b> 」授賞報告 .....		2
<b>第4回青葉工学振興会賞</b>		
摩擦攪拌接合現象・メカニズムに関する材料学的研究 .....	東北大学大学院工学研究科 准教授 佐藤 裕	3
遺伝子操作を利用した無機ナノ結晶の室温合成が可能なバイオ分子の開発 .....	東北大学大学院工学研究科 准教授 梅津 光央	4
<b>第16回青葉工学研究奨励賞</b>		
垂直スピン注入源を用いたスピンドバイスの創製と巨大スピンホール効果の発見 .....	東北大学金属材料研究所 助教 関 剛斎	5
位相情報に基づく高精度画像マッチングとバイオメトリクス認証への応用 .....	東北大学大学院情報科学研究科 助教 伊藤 康一	6
鞭毛を介した共生 - 新奇な微生物間シグナル伝達機構の発見 - .....	東北大学大学院工学研究科 助教 下山 武文	7
<b>企業紹介</b>		
「開発で自立化を目指す」 .....	引地精工株式会社 代表取締役 引地 政明	8
<b>研究プロフィール</b>		
原子力レアメタルの選択的分離・回収 .....		
原子力バックエンドにおける核種分離法の高度化を目指して .....	東北大学大学院工学研究科 教授 三村 均	10
高温超伝導物質と高熱伝導スピ系物質を求めて .....	東北大学大学院工学研究科 教授 小池 洋二	14
二酸化炭素の活性化と化学反応剤としての利用 .....	東北大学大学院工学研究科 教授 服部 徹太郎	19
生体用金属材料における軽元素メタラジー .....		
～ 安心して暮らせる社会の構築に寄与する ～ .....	東北大学大学院工学研究科 教授 成島 尚之	22
建築・都市デザインの理論研究 .....	東北大学大学院工学研究科 教授 五十嵐 太郎	26
レスキューロボット - 緊急災害救助への挑戦 - .....	東北大学大学院情報科学研究科 教授 田所 諭	29

イノベーションを通してライフスタイルを変えることができるのか .....	東北大学大学院環境科学研究科 准教授 古川 柳蔵	33
選択的超音波治療 .....	東北大学大学院医工学研究科 教授 梅村 晋一郎	37
日本の戦略的パートナーとしてのインド .....	東北大学教授 未来科学技術共同研究センター 副センター長 関根 仁博	41
<b>平成21年度 財団法人青葉工学振興会 事業報告</b> .....		46
<b>編集後記</b> .....	常任理事 東北大学大学院工学研究科教授 米本 年邦	

**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

# サイエンスパークについて

東北大学 大学院工学研究科長 内山 勝  
工学部長

サイエンスパークという言葉を初めて耳にしたのは、もう、かれこれ二十五年前になるが、カリフォルニア大学サンタバーバラ校のCRSM (Center for Robotic Systems in Microelectronics) に滞在していたときであった。CRSMの敷地に隣接して、新しい敷地が整備されていて、それがカリフォルニア大学のサイエンスパークであると聞かされた。そのときの第一印象は、インダストリアルパークなら聞いたことがあるが、サイエンスパークとはいかなるパークか、という程度のものであったと思う。

それから長い年月が光陰矢の如く、過ぎ去り、気が付くと、青葉山ゴルフ場跡地の南西部分に展開する青葉山新キャンパスに、サイエンスパークの敷地が用意されている。現在、電気、ガス、水道などのインフラを整備中とのことで、直ちに使える状態ではないが、ゆくゆくは、建物が立ち並び、サイエンスパークが出来上がる。サイエンスパークには、企業の研究、開発部門が誘致され、最先端の科学技術の研究、開発が行われる。概略のイメージは以上であるが、サイエンスパークを具体的に建設するためには、企業、大学、地域の密接な連携が必要である。そのイメージについて、以下、考えてみよう。

サイエンスパークに入居する企業には、二種類あることが予想される。一つは大手企業の研究、開発部門の一部、もうひとつは、ベンチャー企業である。ただ、資金力からいうと、サイエンスパークの入居者は、大手企業の研究、開発部門が大半を占めるであろう。サイエンスパークにこうした企業が建物を建設し、そこに関東、中部、関西などから研究、開発部門の一部が移る。研究者、技術者にとっては、家族ともどもで、仙台引越しということになる。仙台市にとっては、これは大歓迎であろう。一方、ベンチャー企業は、資金力が弱く、サイエンスパークに、いきなり建物の建設は難しく、ハッチェリーから始めることになるだろう。いずれにしても、サイエンスパークに企業の研究、開発部門が集約されれば、企業と大学の交流は夢のように容易になり、極めて密になる。

サイエンスパークの北東には、東北大学工学部、大学院工学研究科、情報科学研究科、環境科学研究科、医工学研究科があり、優秀な学生が学んでいる。学生は、大学の研究室から離れることなく、共同研究や、長期インターンシップ、あるいはアルバイトに従事できる。こうして、学生は、研究室での研究だけでなく、サイエンスパークでの経験に基づき、論文をまとめることができるようになり、論文の多様性も増し、大学院での教育、研究がより充実したものとなる。また、サイエンスパークで働く研究者、技術者の講義、講演を頻繁に聞けるようになり、学生を最先端の情報に曝すことが可能になる。こうして、学生は、卒業後の職場環境に近い形で、大学院教育を受けることができるようになり、教育の質が向上する。

一方、企業の側から見たサイエンスパークのメリットは何であろうか。大学に蓄積された最先端技術シーズに、身近に接することができる、大学との共同研究を容易に行える、などが考えられるが、一つの大きなメリットは、人材の供給源のすぐ近くに研究、開発拠点を置くことができるという点であろう。サイエンスパークに研究、開発拠点を置くことができるという大学の卒業生をより身近に見ることができるようになり、より確実に優れた人材を採用できるようになる。従来、東北大学の学生は、卒業後、職を求めて仙台を離れ、関東、中部、関西などの工業地域に移り住んでいた。つまり、卒業生の地元定着率が極端に低いという問題があったが、サイエンスパークが卒業生の地元定着率の向上に資することは疑いない。これは地域にとって大きな魅力であろう。

以上、サイエンスパークの姿について、大学、企業、それぞれの立場より、眺めてきたが、このようなサイエンスパークの理想の姿を現実のものとするためには、地域との協力は欠かせない。宮城県、仙台市、東北経済産業局等との相互連携を図り、その実現に努力する必要がある。関係各位のご指導、ご鞭撻を大いに期待する。

## 平成22年度 「青葉工学振興会賞」 「青葉工学研究奨励賞」 授賞報告

本財団では、その設立目的である工学の振興に必要な研究教育助成を通じて、地域社会及び産業の向上発展に寄与するため、宮城県内の工学系を有する大学等に所属する研究者等で、工学又は工業技術の分野において優れた研究業績をあげた者を顕彰しています。

平成22年度では、宮城県の各大学から、「第4回青葉工学振興会賞」に12件、「第16回青葉工学研究奨励賞」には26件の応募があり、審査委員会は第1次審査及び第2次審査において、慎重なる審査の結果、第4回青

葉工学振興会賞の受賞候補者2名、第16回青葉工学研究奨励賞の受賞候補者3名を選出した後、青葉工学振興会の理事会において、原案の通り受賞者を決定しました。

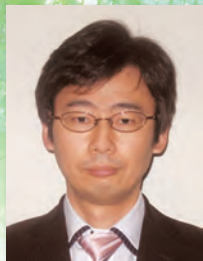
授賞式は、平成22年12月10日(金)ホテルモントレ仙台において、受賞者のほか役員、審査委員、推薦教授の臨席のもとに執り行われました。

なお、受賞者の研究業績は次に掲載しました。





## 第4回青葉工学振興会賞



### 遺伝子操作を利用した無機ナノ結晶の室温合成が可能なバイオ分子の開発

東北大学大学院工学研究科  
バイオ工学専攻 准教授  
梅津光央

遺伝子・蛋白質工学の急激な発展により、バイオテクノロジーが有機・無機を問わず様々な領域へ侵食しはじめている。無機材料分野への展開は意外と思われるかもしれないが、生体に目をやると、貝類やサンゴなどが二酸化炭素を取り込んで自身の骨格となる炭酸カルシウムを合成するバイオミネラリゼーション現象があり、また、珪藻の外殻表面に形成される精巧で緻密なシリカ膜や、磁性細菌が均一形状を持つ磁性微粒子を一次配列させる現象を見ると、バイオテクノロジーを利用した無機材料合成と構造制御の可能性がわかる。

ナノテクノロジーは、物質をナノサイズにまで微細化し、バルク状態とは異なる特有の物性発現を期待するところから始まったが、現在では、ナノクラスターが示す電場・光応答性などを直接活用するアセンブリを達成して、マクロスコピックな物性を組み合わせただけでは得られない特性を追求する時代になっている。生物はまさしく、ナノレベルでのナノクラスターアセンブリを行っており、また、室温・中性水溶液という非常に穏やかな条件で反応が起きるため、熱や極限条件に弱い有機材料とのハイブリッドアセンブリの面でも、バイオミネラリゼーションは魅力的である。受賞者は、このバイオミネラリゼーション技術を用いて、室温・中性溶液という非常に穏やかな条件で無機ナノクラスターを基板上へパターンニングすることや、他の手法では達成できない複雑なナノアセンブリ構造体を作成することに成功した。

受賞者は、バイオミネラリゼーション機能の発現の「鍵」が、バイオ分子と無機材料との選択的相互作用にあることに着目し、バイオミネラリゼーション機能を持つペプチドを、遺伝子操作を通して開発する手法を示した。そのためにまず、ファージ提示法と呼ばれる分子進化工学を利用することによって、アミノ酸配列が異なるペプチドを $10^9$ 種類作りだし、その分子集団から酸化亜鉛にのみ選択的に吸着するペプチドを選び出すことに成功した(図1 a)。この酸化亜鉛と強く相互作用するペプチドは、自身を基板上へ固定化させることによって、室温・中性水溶液中で酸化亜鉛粒子のみを固定化することができる(図1 b)。また、このペプチドの末端へ亜鉛に求核性を持つチオール基を修飾させることによって、硝酸亜鉛水溶液中でペプチドが触媒として機能し、室温・中性水溶液中にもかかわらず、粒子径20 nmの酸化亜鉛ナノ粒子を合成でき、さらに、そのナノ粒子が、ペプチド間の相互作用によって、数 $\mu\text{m}$ のサイズにまで自己組織化し、これまで報告例がない、花のような多階層複合構造体を形成させることに成功した(図1 c)。

現在、受賞者は、このバイオミネラリゼーション機能を持つペプチドを、自己組織化機能を持つタンパク質と融合することによって、より複雑に設計された無機ナノ結晶アセンブリ構造を作り出す研究開発を進めている。

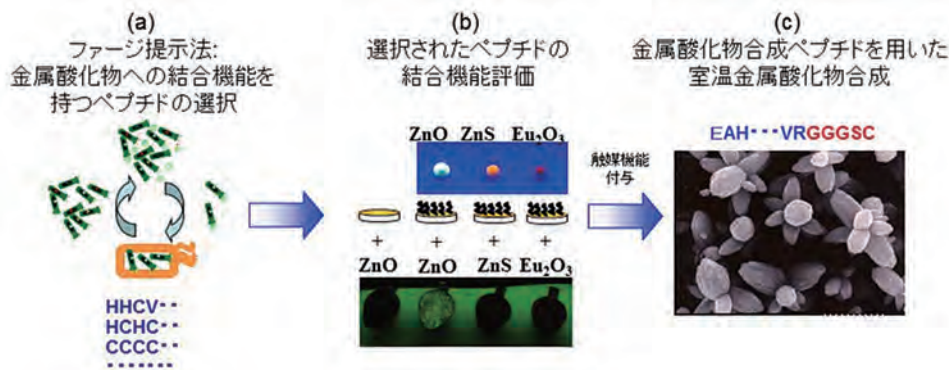


図1. 研究概要

## 第16回青葉工学研究奨励賞



## 垂直スピン注入源を用いたスピndeバイスの創製と 巨大スピンホール効果の発見

東北大学金属材料研究所  
磁性材料学研究部門 助教  
関 剛 斎

電子は「電荷」と「スピン」という二つの性質を有しており、電荷の流れは電流として我々の生活に不可欠なものとして利用されている。一方、近年になりスピン角運動量の流れである「スピン流」という概念が注目を集めるようになった。このスピン流を積極的に利用した工学分野は「スピントロニクス」と呼ばれ、従来の半導体エレクトロニクスでは実現困難な不揮発性や低消費電力化・多機能化を実現できる可能性がある。

スピントロニクスの代表的なデバイスに、磁性体の磁化の向きで情報を記憶する不揮発性の磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) がある。MRAMの記憶素子は2層の強磁性体で非磁性体あるいは絶縁層を挟んだ積層膜からなり、強磁性体の磁化配置により抵抗が変化するトンネル (あるいは巨大) 磁気抵抗効果を利用して情報の読み出しを行う。一方、書込み時には素子に電流を通電させ、スピン偏極した電流 (スピン流) と磁化の量子力学的な相互作用により磁化方向を制御するスピン注入磁化反転が利用される。従来の研究ではこの記憶素子に面内に磁化した強磁性体を用いてきたが、高密度化のために素子サイズを縮小するにつれて磁化が熱的に不安定になってしまう問題があった。一方、膜面垂直方向に磁化が向いた強磁性体を用いると、微小サイズにおいても磁化の熱安定性を確保できる利点がある。そこで本研究では、垂直磁化層の材料として $L1_0$ 型FePt規則合金に着目した。垂直磁化FePt層を有する巨大磁気抵抗 (GMR) 素子を作製し、電流印加による抵抗変化を調べたところ、電流により磁化平行状態および反平行状態を制御できることが確認された。本研究により垂直磁化素子におけるスピン注入磁化反転が実証され、高い磁化の熱安定性を有する記憶素子を実現するための知見が得られた。

上述のように、強磁性体に電流を通電させることにより電流がスピン偏極され、スピン流が生成される。ところが、自発磁化を持たない非磁性体においても、電流を流すだけでスピン流を生成できる。図1に示すように、非磁性体に電流を流すと、スピン軌道相互作用により上向き電子スピンと下向き電子スピンは逆方向に散乱される。このため、電流に対して横方向にスピン流が生じる。これがスピンホール効果であり、非磁性体内部でスピン流-電流の変換が可能となる。逆にスピン流から電流への変換も可能であ

り、逆スピンホール効果と呼ばれている。本研究では、上述したFePt垂直スピン注入源を利用した面内構造素子 (図2の挿入図) を作製し非磁性Auにおけるスピンホール効果の電氣的検出を行った。図2に逆スピンホール効果の測定結果を示す。垂直スピン注入源からAu中にスピン流を生成し、Auの逆スピンホール効果によりスピン流から電流への変換を行った。このスピンホール効果の大きさを解析したところ、流れる電子のおよそ10%を上向きスピン電子と下向きスピン電子に分別できていることが明らかになった。これまでは0.1%程度であったことを考慮すると、巨大なスピンホール効果が発現している。この結果は、スピンホール効果が新しいスピン流の生成および検出手法として有用であることを示唆している。

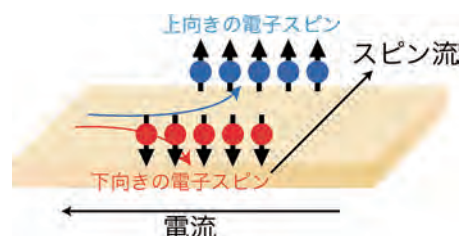


図1 スピンホール効果の模式図。非磁性体のスピン軌道相互作用により上向き電子スピンと下向き電子スピンは反対方向に散乱され、電流の横方向にスピン流が生じる。

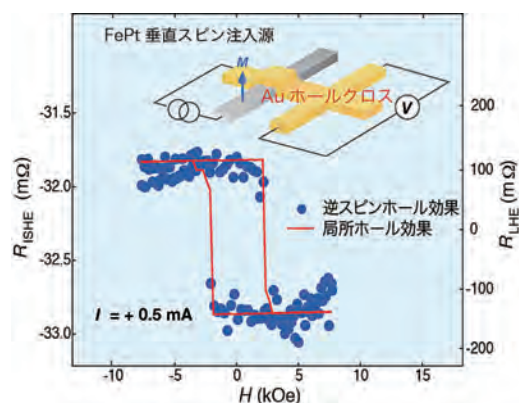


図2 Auの逆スピンホール効果の測定結果 (青点)。FePt電極の磁化反転を意味する局所ホール効果 (赤線) と同じ変化が得られており、FePtからスピン注入されたスピン流が電流に変換されていることがわかる。

## 第16回青葉工学研究奨励賞



## 位相情報に基づく高精度画像マッチングと バイオメトリクス認証への応用

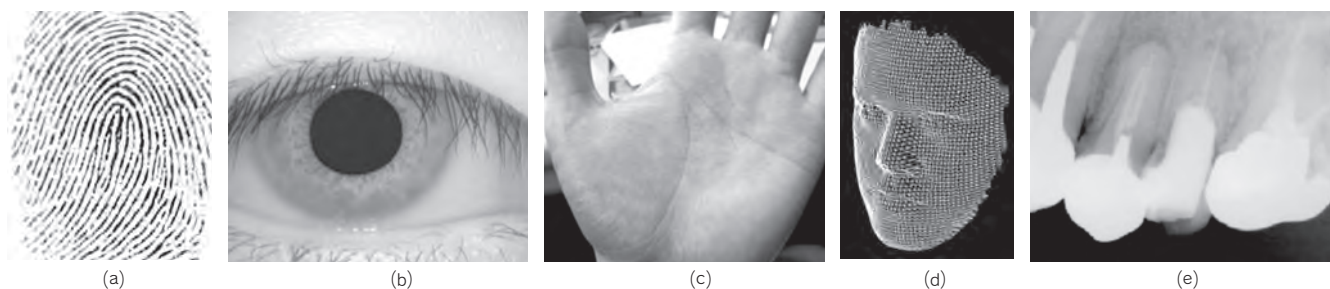
東北大学大学院情報科学研究科  
情報基礎科学専攻 助教  
伊藤 康一

位相情報に基づく画像マッチングは、画像の位置合わせの観点から進められてきた。古くは、1975年のKuglinらによる位相相関に関する先駆的な研究がある。その後、回転・拡大縮小の計測や映像の動き推定などに応用されている。一方で、本研究者らのグループでは、1990年代から、高精度なバイオメトリクス認証のための画像マッチング技術として位相情報に基づく画像マッチングの研究開発に着手し、これに基づく指紋照合装置を実用化している。これと平行して、各種画像モデルへの拡張を行い、1999年ごろより工業市場向け画像認識システムを実用化している。これまでに、用途に応じた高精度化手法を体系化し、大幅な高性能化を達成している。一連の高精度画像マッチング技術を総称して「位相限定相関法 (Phase-Only Correlation : POC)」と呼んでいる。本研究者は、画像照合の性能を向上させるために帯域制限位相限定相関法 (Band-Limited Phase-Only Correlation : BLPOC) を提案するとともに、バイオメトリクス認証へ応用している。

BLPOCは、特に、「画像照合」を目的とする応用において有効な手法である。信頼性の低い高周波成分の影響を排除しつつ、画像の識別性能を向上させている。具体的には、POC関数の計算に用いる位相情報を画像テクスチャの有効帯域に制限することによって、相関ピークのエネルギーを一点に集中させ、画像の識別性能を向上させる。

バイオメトリクス認証は、個人の身体的・行動的特徴（下図）をそのまま認証情報として利用する信頼性が高く、利便性に優れた認証技術である。認証において利用される身体的・行動的特徴には、指紋・虹彩・顔・掌紋・筆跡など

がある。バイオメトリクス認証では、指紋認証におけるマニューシャマッチングのように、生体特徴から抽出した特徴をマッチングに利用する場合が多い。画像の局所的な特徴を利用することで、(i) 複雑な画像変形に対応できる、(ii) 高速なマッチングが可能になる、(iii) 登録データの容量を抑えることができる特長がある。一方で、明るさの変化やノイズなどが原因で画質が低下すると、正確に特徴を抽出することができないため、認証性能が低下する。これに対して、BLPOCを用いたバイオメトリクス認証は、(i) テクスチャ情報を利用するため局所的な特徴を利用したマッチングよりも高性能に認証できる、(ii) 位相情報が明るさの変化やノイズにロバストであるため画像の劣化に対してロバストに認証できる特長がある。一方で、ひずみのような局所的な変形が原因で認証性能が低下すること、フーリエ変換に起因する計算量が大きいうことが問題である。本研究者は、これらの問題を解決し、現在までに、指紋認証、虹彩認証、掌紋認証、顔認証、歯科X線画像認証などに適用してBLPOCの有効性を実証している。特に、BLPOCを用いた虹彩認証アルゴリズムは、標準虹彩画像データベースであるCASIA虹彩画像データベースとNIST Iris Challenge Evaluation (ICE) 2005データベースを用いた性能評価実験を通して、従来の認証アルゴリズムと比べ、きわめて高性能であることを実証している。また、BLPOCを用いた歯科X線画像認証アルゴリズムは、虹彩認証と同様に有効性が国際的に認められ、米国CNNにおいて歯科X線画像を用いた身元確認のための新技術として紹介されている。



図：バイオメトリクス認証で用いられるさまざまな生体特徴：(a) 指紋、(b) 虹彩（瞳孔と白目の間のパターン）、(c) 掌紋（手のひらのテクスチャパターン）、(d) 顔（2次元顔画像のテクスチャや顔の3次元構造）、(e) 歯科X線画像（これら以外に、筆跡、音声、歩容、キーストロークなども生体特徴として使用することができる）

## 第16回青葉工学研究奨励賞



### 鞭毛を介した共生 — 新奇な微生物間シグナル伝達機構の発見 —

東北大学大学院工学研究科  
バイオ工学専攻 助教  
下山 武文

食品加工場廃水や下水など、高濃度の有機成分を含む廃水を処理することは環境問題を考える上で非常に重要である。例として、食品や酒造メーカーから多く排出される有機性廃液には嫌氣的発酵処理、特にメタン発酵が行われている所もある。メタン発酵は、有機分を処理しつつメタンガスを回収できるため、エネルギー生産システムとしても重要である。メタン発酵は大型プラントとして実用化がすでになされている大変有用な廃棄物処理プロセスである(図1.)。しかし、メタンを生成する微生物群を安定に維持するには専門的な知識を必要とすることに加え、しばしば起こる難分解性物質(おもにプロピオン酸などの有機酸)の蓄積はシステムの効率を大きく下げるなど、運転上困難な点もあることも事実である。そのためメタン発酵を安定に維持するために、メタンを生成する微生物群の性質を理解することは非常に重要である。ここではメタン発酵槽内で生育する微生物について得られた新しい知見について紹介する。

図2に有機物からメタンが生成されるまでの微生物の役割を示した。微生物がメタンを作ることは一見単純に思えるが、決してそうではない。ここには見事なまでの微生物同士の協力関係が築かれている。というのも、一種類の微生物が高分子の有機物を食べてメタンを生成するという“完全無欠”な微生物は現在まで発見されていない。必ず複数の微生物の役割分担によって秩序化された経路によってメタンは生成する。ここで、水素を生産する共生細菌とこの水素を消費しメタンを生成するメタン菌に着目する。共生細菌はプロピオン酸などの難分解性物質を消費し、水素を発生する。この水素をメタン菌に受け渡し、メタン菌はメタンを生成するという共生関係が構築されている。水素は液体中を拡散して移動するため、お互いの距離が近いほうがメタン菌は高濃度の水素を手に入れることができ、また共生細菌は自分の排出物であり毒とも言える水素を多く奪ってもらえることができる。つまりお互いに共生相手を見つけ、距離を近づけることはこれらの両微生物にとって非常に重要なのだ。

私の研究では、これらの共生微生物は能動的に相手を捕まえ、距離を近づけていることを発見した。共生細菌は鞭毛を使ってメタン菌をまるで投げ縄のように捕まえ、相手

を引き寄せていることがわかった。しかもメタン菌はただ捕まるだけではない。共生細菌が近くに来てくれたことを察知し、メタンを作る準備を細胞内で始めていることが明らかとなった(図3)。



図1. メタン発酵施設  
岩手県葛巻町にあるメタン発酵施設

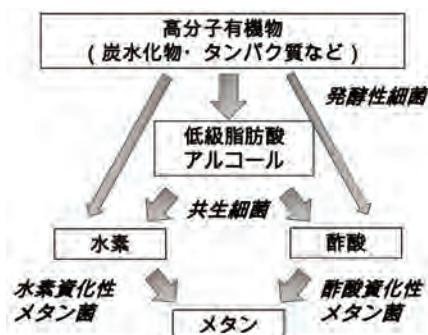


図2. 有機物からメタンが生成するスキーム

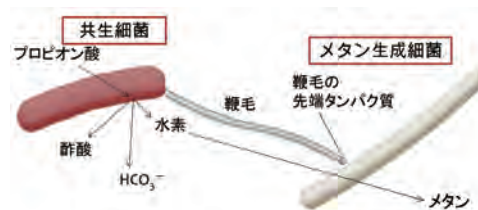


図3. 異なる微生物間で発見された、鞭毛を使ったコミュニケーション

この一連の現象は、微生物同士が鞭毛を使ってコミュニケーションしていたという、生物間の全く新しい情報伝達であったことがわかった。この新奇な微生物同士の情報伝達手段のさらなる研究により、未だ完全には解明されていない細胞間のシグナル伝達機構解明の一端を担うことが期待される。

# 企業紹介



## 開発で自立化を目指す

引地精工株式会社  
代表取締役  
引地 政明

### ①チャレンジ精神で独立・起業

当社は、昭和54年5月当時迫りコーの社長であった鈴木社長にお世話になり、100人弱の事業所を預かり工場長として約7年程お世話になっておりましたが、挑戦したいことがあり独立を決意し引地精工を立ち上げることとしました。

### ②仕事内容

主な業務は世界にこれ1台と言う機械を作りたい。そんな思いを実現するべく、業務内容を産業用省力化機械を構想設計から詳細設計部品製作ソフト・ハード設計 機械組立 I/Oチェック 現地据付 デバック 調整 生産開始・引渡しと一貫生産出来る体制作りを行っております。

### ③産学連携による開発

当社が独自に開発した多関節ロボットを使った画像処理装置を平成21年10月東京ビックサイトで国際ロボット展に当社画像処理装置を出展、4日間に3,000名有余の来訪者があり大好評を得ました。出展に当たり事前に特許を出願しております。

その後いろんな形で東北大学大学院情報科学研究科 青木孝文教授の知る所となり、特許案件の更なる進化向上をめざし開発を実施する運びとなりまして、平成22年11月1日より青葉山キャンパスの東北大学連携ビジネスインキュベータ〔T-Biz〕3階1号室をお借りしスタートした所です。

## カスタム 外観検査ロボット



DENSO 外観検査ロボット認定店としてのベースマシン

- 【既存検査機能】
- ・ 異品検査
  - ・ 特徴検査
  - ・ コード読取 (QR、バーコード)
  - ・ 文字認識
  - ・ 品番選択
  - ・ カスタム検査
  - ・ PAC実行
  - ・ ダミー動作



○ 資料提供：株式会社デンソーウェーブ様

### 引地精工(株)オリジナル光学系と

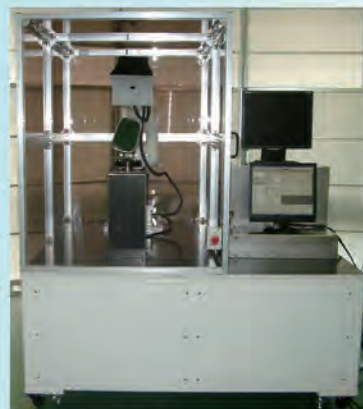
カスタム機能を用いた画像検査ソフトの追加



“進化”

#### 1. 曲面で且つ鏡面ワークの外観検査を実現

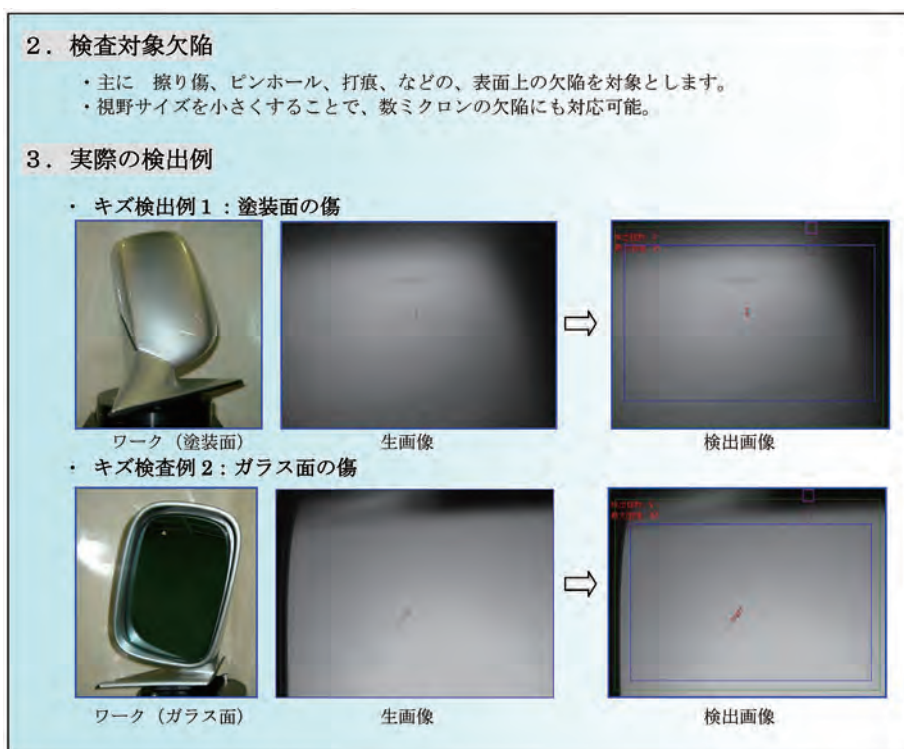
“多関節ロボットが、ワーク曲面に合わせてカメラヘッドを最適ポジションに配置し、鏡面用に構成された光学系が微細な欠陥を捉え、傷検査ソフトが欠陥を抽出します。”



装置構成例  
ワーク搬送系は、ワークに合わせてのカスタム設計



検査イメージ  
引地精工(株)オリジナル光学系ヘッド搭載



### ニーズの一步先の技術開発

当社のモットーは、更なる技術革新自社の生産力向上は当然の事として、製品のポテンシャル省力化プラス生産時間の短縮・生産量の増加コスト低減の向上を最優先とし開発して行く、それには構想から納入先での完全仕上げまで、全工程での開発が必要又新技術の持つ宿命的なリスクを軽減する為アフターケアは不可欠と考えている。

### 自己完結型企業として

開発提案型企業として、日進月歩する技術の先取りをし研究開発に一層の努力の継続が必要としており、厳しい時代を生き抜くため当面の日課として平成元年から掲げている。

以下のスローガンをクリアする事に傾注する事としています。

1. 不可能を可能にする  
常に新しい技術に目を向け今日は不可能でも明日は可能にする
1. 超スピードで対応する。
1. 技術革新日々実施する。
1. コスト低減尚一層努力する。  
コストを安く押えても利益を出せる方法を開発する
1. 柔軟性を持って対処する。  
組織的な情報収集力と柔軟な対応が必要
1. 約束事断じて死守する。

### 【会社概要】

称 号	引地精工株式会社 (HIKICHISEIKO.CO.LTD)
所 在 地	(第一事業所) 宮城県岩沼市吹上 1 丁目14-37 (第二事業所) 宮城県岩沼市吹上 2 丁目 8-28 (大和事業所) 宮城県黒川郡大和町吉岡東 2 丁目 2-16
設 立	昭和54年 5 月 3 日
資 本 金	3,000 万円
事業内容	産業用省力化機械・治工具等の設計、製作 (機械設計・制御設計・機械加工・組立調整)

### 【著者略歴】

代表取締役

ひきち まさあき  
引地 政明

昭和40年	仙台経理専門学校卒
昭和40年	東北特殊鋼
昭和47年	迫りコー (寿製作所) 工場長として
昭和54年	岩沼市寺島字川向においてプレス二次加工を主とし創業開始
昭和57年	法人化する
昭和59年	産業用省力化機械・治工具加工に転換
平成元年	岩沼市吹上 1-14-37 に移転(第一事業所)
平成13年	岩沼市吹上 2-8-28 に工場増設

# 研究プロフィール



## 原子力レアメタルの選択的分離・回収 —原子力バックエンドにおける核種分離法の高度化を目指して—

東北大学大学院工学研究科  
量子エネルギー工学専攻 教授  
三村 均

### 1. はじめに

原子力、核融合などの大規模なエネルギーの利用は人類にとって重要な技術であるが、放射性物質の生成を伴うため環境の保全を考える必要がある。特に、原子力分野で大きな課題である放射性廃棄物の処理では、環境に負荷をかけない新しい技術が求められている。近年、放射性廃棄物の処理・処分の高度化と合理化を目指して、資源の有効利用や環境負荷低減化に貢献できる様々な高機能性材料の開発が課題となっており、特に、高レベル放射性廃棄物から希少金属（原子力レアメタル、Cs、Pd、Mo等）を選択的に分離・回収できる機能性吸着剤として、“ハイブリッドマイクロカプセル”が開発され大きな注目が集まっている。

マイクロカプセルの製法としては、コンブの主成分で安価に入手可能なアルギン酸ナトリウムをゲル化溶液に射出滴下して、瞬時に生成するミクロな球状の高分子（バイオポリマー）内に、種々の金属吸着剤を包み込む包括固定を採用する。いわば“人工いくら”を思い浮かべるとわかり易い。マイクロカプセルは、ミクロンオーダーの粒子中に、ナノスケールでの分離が可能な微小吸着剤が均一に内包されており、反応表面積や吸着速度の大きいことが特徴である。平衡到達には数時間で十分で、殻の高分子ポリマーはポーラスな卵型構造で、金属イオンの移動にはほとんど影響しない。

これまで、さまざまなマイクロカプセルを調製し、高濃度の硝酸溶液からの原子力レアメタルの分離・回収に関する基礎研究がなされている。基礎研究から、Csにはヘテロポリ酸塩内包マイクロカプセル、Pdには不溶性フェロシアン化物内包マイクロカプセル、Moには有機抽出剤(LIX63)内包マイクロカプセルが有効であり、日本原子力研究開発機構(JAEA)大洗施設において、実高レベル廃液から、これら希少金属イオンの選択的分離を達成している。これらの成果は、将来の先進再処理・廃棄物処理システムでの核種分離の有効な要素技術として期待でき、さらには、回収した希少金属の有効利用にも展開できるものと考えられる。さらに、カプセルの形状（膜状、柱状および繊維状）や成分調整が自在であり、廃液の種類に応じた効率的なマイクロカプセル化が可能、コストが安価など、

将来の実用化に向けて大きな可能性を持っている。また、マイクロカプセルは、原子力のみならず、環境科学、材料工学、生体工学など広範な分野での高機能性材料としても使用でき、今後の展開が大いに期待されている<sup>1)</sup>。

### 2. 原子力レアメタルとは

使用済燃料の中にはウラン(U)の中性子捕獲反応で生成するプルトニウム(Pu)等アクチノイドの他に、発熱元素(Cs、Sr)、白金族元素(Pd、Ru、Rh)、オキソ酸イオン(Mo、Tc等)およびレアアースなどの30種以上の核分裂生成物(FP)が生成される。図1は、使用済燃料中の主な核分裂生成物(FP)およびマイナーアクチノイド(MA)の含有量を示す<sup>2)</sup>。これらの値は使用済燃料を原子炉から取り出して5年後に再処理する際の元素量である。MOX燃料における1トンあたりの生成元素量は、Ru 3.46 kg、Pd 3.34 kg、Sr 0.56 kg、Mo 3.99 kg、Zr 3.33 kg、Te 1.00 kg、Cs 3.92 kg、Tc 1.00 kgが見込まれ、希少元素(原子力レアメタル)を多く含有している。さらに表1は、天然鉱石中と使用済燃料中の代表的な希少元素の含有率の比較を示す<sup>2)</sup>。天然鉱石におけるこれら希少元素の含有率は極めて低く、使用済燃料中の白金族元素含有量は天然鉱石に比べて1,000倍以上であることがわかる。Tcは天然には存在しない希少元素であり、使用済燃料が唯一の鉱山と見られることもできる。これら希少元素は、触媒、レーザーなどの広い分野で使用されており、工業的利用価値の高い元素で、Csは熱源・線源、Pdは触媒、Tcは耐食性鋼材・触

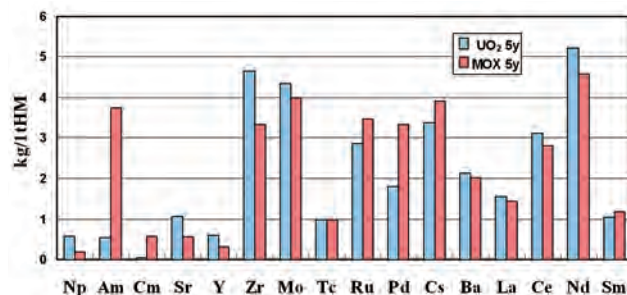


図1 使用済燃料1tHM(燃焼度43 GWd/t)を冷却した後の、主なFPとMA元素の含有量(kg)

媒などの利用が可能である。

これら資源として有効利用できる原子力レアメタルは、新たな希少元素の“国内鉱脈”としての価値は極めて大きいといえる。日本では、特殊鋼の添加材、電子材料や環境対応素材として先端技術産業分野で幅広く利用されているレアメタルは、ほとんどが海外からの輸入に依存している。また、希薄であるうえに特定地域に偏在し、経済的に高純度化が難しいものも含まれるため安定供給が望まれている。使用済燃料中の有用希少金属元素の分離が実現できれば、放射性廃棄物の低減および改質、さらに再処理、ガラス固化、分離変換などバックエンド工程の高度化・合理化に資するのみならず、<sup>235</sup>Uの核分裂反応とその核燃料リサイクルに「有用元素生産システム」としての新たな価値を与えることができる。

表1 鉱石と使用済燃料中の希少元素含有率の比較

元素名	鉱石中の含有率(ppm)	軽水炉使用済燃料中		FBR使用済燃料中		備考*
		含有率(ppm)	比 <sup>1)</sup>	含有率(ppm)	比 <sup>1)</sup>	
Sc	(12~92)	50~98	1.4	140	7.1	鉱石中の含有率は、ロシアUKMK社の2004年鋼生産実績と平均的な品位位1~8%より算定
Mo	140	4,021~6,059	36	8,966	84	モンゴルのコルデネット鉱山実績
Rh	(0.4~0.6)	578~949	1,527	2,543	6,652	主な鉱山では100M生産量の1割程度をロシアが占めるため、100M品位の110と仮定
Rf	2.4~7.4	1,900~4,150	617	6,988	1426	カナダのノース・アメリカン・パラジウム社実績
Ag	46~201	102~251	1.4	715	5.8	アイルランドGalmeo、鉱山、コンゴDikululu鉱山の実績
Te	(3.6~29)	634~842	45	1,840	113	鉱石中の含有率は、ロシアUGMK社の2004年鋼生産実績と平均的な品位位1~8%より算定

\* 1：鉱石中の含有率に対する使用済燃料の含有率の比を、それぞれの中間値にて算出。\* 2：鉱石中の含有率、備考欄の想定などは、石油天然ガス・金属鉱物資源機構の「世界の鉱業の趨勢 2005」（平成17年8月）に基づく。

### 3. マイクロカプセルとは

選択的分離剤（無機イオン交換体、有機抽出剤）をバイオポリマーであるアルギネートポリマーで包括固定化する利点は以下の点にある。

1. 調製が容易で、ゲル化速度が大きく、様々な形状（粒状、繊維状、膜状）が可能である。
2. ほとんどの無機吸着剤／有機抽出剤をマイクロカプセル化することが可能である。
3. 設計の自由度が高く、高含有率で高吸着容量を有する。
4. カラム操作が容易で、コンパクトで一貫した精密核種分離システムの構築が可能である。

一例として、無機イオン交換体（AMP、Cs選択性微結晶体（ $(\text{NH}_4)_3\text{PMo}_{12}\text{O}_{40} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ）の包括固定によるマイクロカプセルは、以下の手順で調製できる。アルギン酸ナトリウム1.5wt%水溶液に、市販のAMPを所定の混合比率で加え、混練後、0.5 M  $\text{CaCl}_2$ 液に滴下する。AMPは廃棄物のMoからも製造できる。瞬時にアルギン酸カルシウムゲル（CaALG）が生成し（図2）、AMPが球状ゲル粒子に包括固定される（図2）。マイクロカプセルは、25℃で1日熟成後、水洗・乾燥（加熱乾燥（40℃）または凍結乾燥）

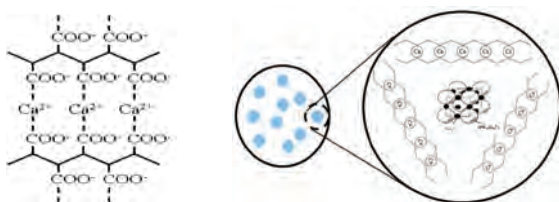


図2 CaALGのゲル構造とAMPの包括固定化の模式図



図3 原子力レアメタル分離用ハイブリッドマイクロカプセル

する。加熱乾燥に比べ凍結乾燥したものはよりポーラスなものが得られる。AMPの混合比率を増加した場合には、乾燥時の収縮率が低下し、より大きな粒子が得られるが、強度が低下し、包括固定しきれないAMP微結晶が剥離する可能性がある。混合比率が10wt%までは安定なゲル粒子が得られる。本稿で紹介する成果は、主に無機イオン交換体および抽出剤を混合比率10wt%に設定して調製した試料を用いている（図3）。

### 4. 発熱元素の選択的分離・固定化および利用

<sup>137</sup>Csおよび<sup>90</sup>Srは、高放射性で発熱量が大きいというえに、高レベル廃液中に比較的多く存在するため、従来より、線源や熱源としての利用法（長寿命熱源、熱電発電システムおよび非化学殺菌システム等）が考案されているが、一方では高レベル廃液の処理・処分上有害な元素にもなっている。このため、これらの元素を再処理工程のある段階で選択的に分離・回収し、利用技術を積極的に開発していくことは、廃液の資源化を図ると同時に、廃棄物の発熱量を大

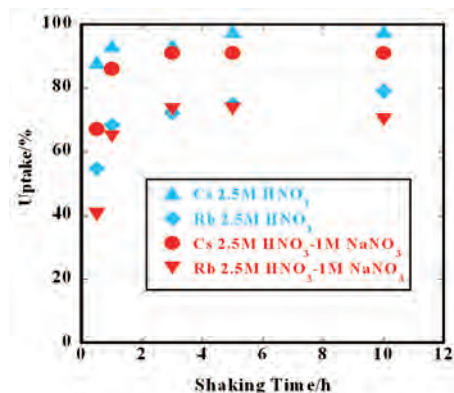


図4 AMPマイクロカプセルによるCs吸着

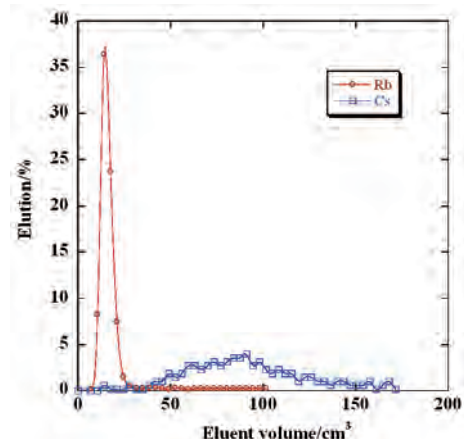


図5 AMPマイクロカプセルカラムによるCsとRbのクロマトグラフィ分離

幅に低減化でき、処分に至るまでの貯蔵期間の短縮化、廃棄物発生量の低減化等、高度な廃液処理・処分法の開発に結びつく<sup>3)</sup>。

Cs選択性AMP内包マイクロカプセルの高濃度HNO<sub>3</sub>/NaNO<sub>3</sub>共存下でのCs吸着速度を図4に示す。5時間で90%以上のCsが吸着できRbとの分離係数も大きい。このため0.6 M NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-1 M HNO<sub>3</sub>溶離剤によりCs/Rbのクロマトグラフィ分離も可能である(図5)。

さらに、Cs溶離フラクションの加熱によりCs塩が得られ、ゼオライト(モルデナイト)に再吸着させ1,200℃で焼成すれば、熱源、放射線源として利用可能な安定なセラミックス固化体が製造できる(図6)。

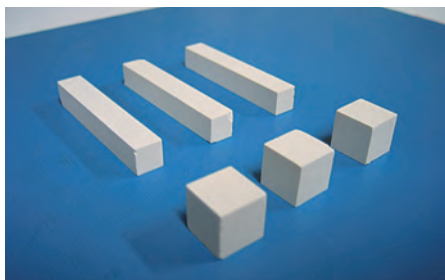


図6 高温焼成により製造したCsセラミックス固化体(一辺1cm角)

### 5. 白金族元素の選択的分離・回収

白金族元素(Pd, Ru, Rh)は化学触媒作用、優れた耐食性、高融点および高電気伝導度といった特徴を有し、その利用範囲は広いが、資源量が限られている上に産出国も限定されており、我が国はほとんどを輸入に頼っている。ウランにPuを加えた混合酸化物燃料MOXを現行軽水炉で使用するプルサーマル計画が我が国でも進められている。6.3wt%のPu含有燃料をPWRで45GWD/t(U+Pu)の燃焼度で使用した場合、使用済MOX燃料中の白金族元素の生成量はRu:4,080g、Rh:916gおよびPd:3,252gに増加すると見積もられる。

白金族元素の選択的分離剤として、不溶性フェロシアン化物マイクロカプセル(KCuFC-MC)は、高レベル廃液からのPdの選択的分離に有効である。図7は各種無機イオン交換体のPd吸着率を示す。不溶性フェロシアン化物(KNiFC)が3 M HNO<sub>3</sub>/1 M NaNO<sub>3</sub>共存下でも99%以上のPd吸着率を示す。5 M HNO<sub>3</sub>共存までPd<sup>2+</sup>の吸着性はほとんど変化せず、マイクロカプセルは安定であり、高レベル

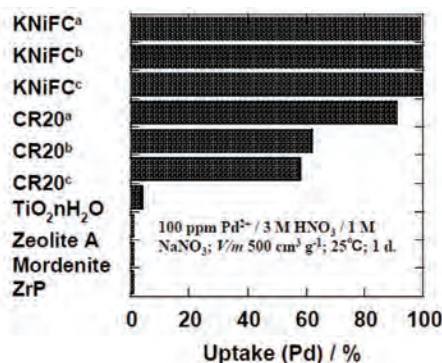


図7 各種無機イオン交換体へのPd吸着率の比較

廃液からのPdの選択的分離に効果的である。Pd<sup>2+</sup>を吸着した不溶性フェロシアン化物(KCuFC)のXPS分析により、Pd<sup>2+</sup>はPd<sup>0</sup>に還元されており、格子のFe<sup>2+</sup>はFe<sup>3+</sup>に酸化されている。このためPdの吸着にはイオン交換と酸化還元反応が関与していると推定される。なお、Pdの回収は、熱分解-湿式法によりPdOとして回収可能である。白金族元素のRuは、アルギネート担体にのみ吸着し、Rhはほとんど吸着しないことから、白金族元素(Pd, Ru, Rh)の相互分離の可能性もある。

Pdに選択性の高い有機抽出剤(Cyanex302, MIDOA)をアルギネートゲルに内包したマイクロカプセルも調製可能である。一例として、Cyanex302内包マイクロカプセルの充填カラムを用いれば、白金族元素相互の逐次クロマトグラフィ分離が達成できる(図8)。

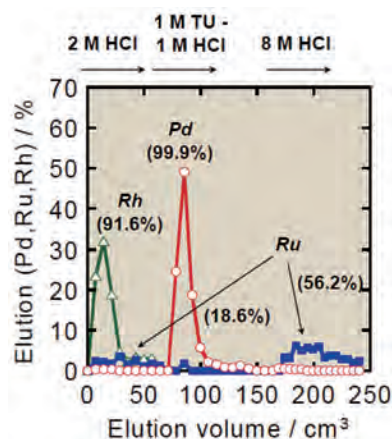


図8 Cyanex302内包マイクロカプセル充填カラムによる白金族元素のクロマトグラフィ分離

### 6. オキソ酸イオンの選択的分離・回収

使用済燃料を“レアメタルの新鉱脈”と捉えた場合、第5周期のRu、Rh、PdおよびTe、第4周期のSeは地殻中の元素濃度に比べて非常に高品質である。また、Tcは天然には存在しない元素であり、使用済燃料が唯一の鉱山ともみなせる。人工元素であるTcは研究例が少なく大きな利用の可能性を秘めている。高レベル廃液(HLLW)に含まれる金属元素のうち、Moはガラス固化体への含有量が制限されている元素である。非放射性であるMoを選択的に分離・

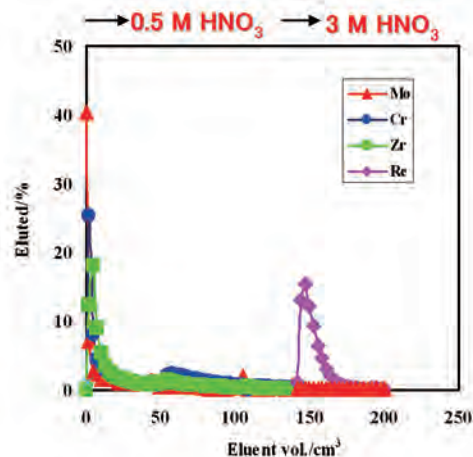


図9 TOA内包マイクロカプセル充填カラムによるオキソ酸イオンの逐次クロマトグラフィ分離

回収できれば、高速増殖炉用サーメット燃料や吸着剤への転換など利用価値は高いと考えられる<sup>4)</sup>。

第3級アミンのTOAを内包したマイクロカプセルの充填カラムによるオキソ酸イオン (Re) の逐次クロマトグラフィ分離を図9に示す。さらに、マイクロカプセルは原子力バックエンド分野以外でも、レアメタルの選択的分離に利用できる可能性がある。TOA内包マイクロカプセルは、Au>Pt>Pdの吸着性序列を示し、6 M HCl溶液からでも $10^6$  cm<sup>3</sup>/g以上の高いAuの分配係数値を示す。図10は、Auを選択的に吸着したTOA内包マイクロカプセルの顕微鏡写真を示す。

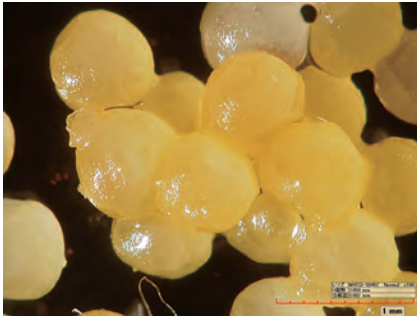


図10 TOA内包マイクロカプセルへのAuの吸着

### 7. 超ウラン元素/ランタノイドの相互分離

高レベル廃液 (HLLW) 中には $\alpha$ 線を放出する半減期の長い超ウラン元素 (Am, Np, Cm) が含まれており、これらのマイナーアクチノイド核種を分離・回収することが強く望まれている。HLLW中にはランタノイドが高濃度で含有されており、化学的特性の類似したAn (III) とLn (III) の分離には強い関心が持たれている。近年、An (III) に対する選択性からソフトドナーの働きが注目されており、ソフトな配位原子である硫黄原子を2個有する酸性硫黄有機リン化合物であるCyanex301 (R<sub>2</sub>PS<sub>2</sub>H) がAm/Euに高い分離係数を有することが報告されている。Cyanex301内包マイクロカプセルを充填したカラムに、予めAmとEuを吸着させておき、次いで酸性度を低下させてグラジエント溶離を行った結果を図11に示す。pH 2でEuが98.8%溶離し、

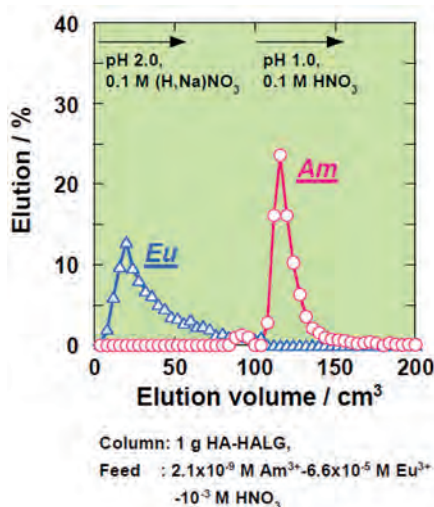


図11 Cyanex301内包マイクロカプセル充填カラムによるAmとEuのクロマトグラフィ分離

pH 1でAmが91.3%溶離し、両核種のクロマトグラフィ分離が可能である。今年度からは、多量に含有される原子力レアアースの選択的分離・回収技術の開発に着手している。

### 8. おわりに

マイクロカプセルを用いた精密分離システムは、従来提案されてきた、イオン交換法、溶媒抽出法、電気化学的分離および分別沈殿分離等を組み合わせた複雑な分離システムとは異なり、マイクロカプセルのみで、コンパクトで高効率な核種分離システムの構築が期待できる (図12)。さらに、本システムにより核種の有効利用または核変換、単離技術の開発にも展開が可能であり、放射性廃棄物処理の高度化と合理化に結びつくと期待される。今後、工学的成立性の評価および社会的に受容され易い有効利用システムの検討を進めてゆく必要がある。マイクロカプセル分離手法は、原子力分野以外にも展開でき、レアメタル分離技術の高度化、環境負荷低減化に大きく寄与するものと考えられる。

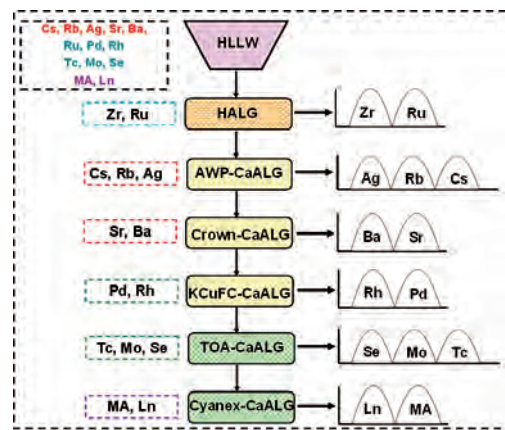


図12 マイクロカプセルを用いた核種分離システムの概念図

### 【参考文献】

- 1) 三村 均：イオン交換学会誌, 19, No.1, pp.12-28(2008).
- 2) 三村 均：イオン交換学会誌, 19, No.2, pp.127-140(2008).
- 3) 三村 均：イオン交換学会誌, 19, No.3, pp.179-195(2008).
- 4) 三村 均：イオン交換学会誌, 20, No.1, pp.23-36(2009).
- 5) 三村 均：イオン交換学会誌, 20, No.2, pp.86-97(2009).

### 【著者略歴】

みむら ひとし  
三村 均

昭和25年 1月24日生

昭和50年 東北大学大学院工学研究科原子核工学専攻  
修士課程修了

昭和50年 東北大学選鉱製錬研究所助手

昭和58年 工学博士 (東北大学)

平成4年 東北大学素材工学研究所講師

平成7年 フィンランドヘルシンキ大学文部省在外研究員

平成14年 東北大学多元物質科学研究所助教授

平成15年 東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学  
専攻教授、現在に至る。



## 高温超伝導物質と高熱伝導スピン系物質を求めて

東北大学大学院工学研究科  
 応用物理学専攻 教授  
 小池 洋二

### 1. はじめに

2011年は、低温で最も劇的な物理現象であるとも言える「超伝導」が発見されて100年目となる記念すべき年です。超伝導は、低温で電気抵抗がゼロになる現象ですので、超伝導の電線にはジュール熱を発生することなく、すなわち、エネルギーを消費することなく大電流を流すことができます。それゆえ、コイル状に巻いた超伝導線に大電流を流すことによって、強力な磁場を発生することができます。このような超伝導線を使った強力な磁石は超伝導磁石と呼ばれ、身近なところでは、人間の体の内部を撮影して画像化するMRIやリニアモーターカーなどに利用されています。また、発電所からの送電線に超伝導線を使えば、エネルギーを損失することなく電力を輸送できますので、エネルギーの節約になります。実際、停電の多いニューヨークでは、数百メートルに亘って超伝導の送電線がテスト運用されて

います。また、超伝導の特性を利用した高感度の磁場測定素子SQUIDは、実験室では試料の微小な磁化の測定に、病院では心筋の運動に伴う電流を測る心磁計に、食品工場では食品中の異物検査装置など、様々なところで活用されています。しかし、これら超伝導を利用した計測器や装置は、超伝導が発現する低温に冷却する必要があります。そのために、液体ヘリウムを用いなくてはなりません。液体ヘリウムを作るためのヘリウム液化機の運転には電力が必要ですので、せっかくエネルギー損失ゼロの超伝導を使っても、その御利益は半減してしまいます。そこで、室温で超伝導を示す物質の出現が望まれるわけです。超伝導に転移する温度 $T_c$ の最高値は、図1のように、1911年に発見された水銀の4.2Kから年とともにゆっくり上昇し、1986年のBednorzとMüllerによる銅酸化物高温超伝導体の発見によって急激に上昇し、現在は、 $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$  における134K（高圧下では164K）となっています。縦軸を対数でプロットした図1を見れば、 $T_c$ が300Kを超えるのは時間の問題であるとも思えます。室温で超伝導を示す物質が見つければ、かなりのものが超伝導物質に置き換わる第3次産業革命が起こり、21世紀の課題であるエネルギー問題や環境問題の解決に大いに役立つでしょう。そして、室温超伝導物質の発見者は、間違いなくノーベル賞を獲得するでしょう。

我々、低温・超伝導物理学分野の研究室では、1986年の銅酸化物高温超伝導体の発見以来、新しい高温超伝導（high- $T_c$ ）物質の探索的研究を行ってきました。当時high- $T_c$ の研究にこぞって参入した企業も、今ではほとんどが撤退してしまっただけで、high- $T_c$ 物質の探索は大学の研究者がやるべき重要な研究であると思って、頑張っています。また、結晶構造の中に銅と酸素からなる2次元面（ $\text{CuO}_2$ 面）を含む銅酸化物高温超伝導体のなかでも、 $T_c$ は物質によって異なります。上で述べた $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ の $T_c$ は134Kですが、比較的単純な結晶構造を持つ $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の $T_c$ は30K程度です。このような $T_c$ の違いの原因はあまりよく理解されていませんが、それを理解することが、より高い $T_c$ を持つ超伝導物質を探索するためにも重要であると考えています。そのために、我々の研究室では、様々なhigh- $T_c$ 物質、および、その関連物質を作製し、電気抵抗、ホール効果、熱電能、熱伝導、磁化率、ミュオンスピン緩和、比熱などの基礎物性を調べるという地道な研究も行っています。

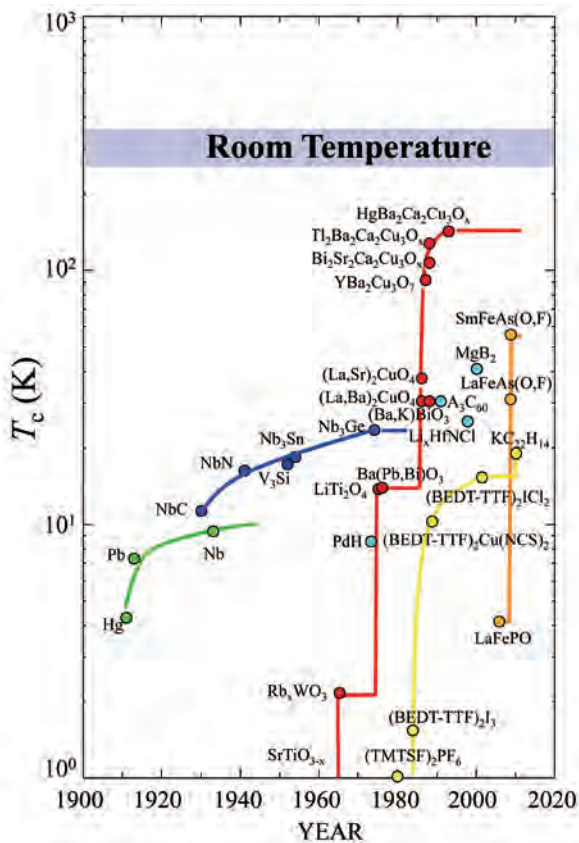


図1. 超伝導転移温度 $T_c$ の時代変遷

high- $T_c$ 物質の探索には夢があります。新しく創り出した物質が超伝導になれば万々歳です。しかし、超伝導にならないとがっかりです。特に、学生さんがhigh- $T_c$ 物質の探索を研究テーマにしてうまくいかないと、学位論文としてまとめるときに苦労します。そこで、超伝導にならなくても何とか論文にまとめられないかと考え、いろいろな物性を測定しているうちに発見したのが、 $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$ における異常に大きな熱伝導です。 $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$ は、銅と酸素からなる2次元面 ( $CuO_2$ 面とは少し異なる2次元面) を含む銅酸化物ですが、絶縁体です。これに伝導電子を注入して超伝導化しようと試みていたのですが成功せず、たまたま熱伝導度を測定すると、異常に大きいことが分かったのです。固体物理学の教科書によれば、熱を運ぶキャリアとしては伝導電子とフォノン (結晶を組む原子やイオンの振動の粒子的描像) があり、伝導電子の多い銅のような金属の熱伝導度が高いと記されています。しかし、 $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$ は金属ではありません。実は、この物質中の $Cu^{2+}$ イオンがもつスピン (電子の自転によって発生する小さな磁石) が熱伝導に大きく寄与していることが分かりました。その後、 $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$ のような、スピン量子数 $S=1/2$ のスピン (スピンの向きが上向きか下向きの2つの自由度しかないスピン) を持ち、スピン間の相互作用が結晶中の特定の方向にのみ強い「低次元量子スピン系」と呼ばれる物質群のなかに、スピンの大量の熱を運んでいるものが多いことが分かりました。これらの物質は電気的には絶縁体ですので、電気的絶縁性の高熱伝導材料としての応用も期待できます。そこで、現在、高熱伝導スピン系物質の探索とその熱伝導メカニズムの解明が、我々の研究室における研究テーマの柱の一つとなっています。

本稿では、まず、我々の研究室で行っている高温超伝導物質の探索的研究について紹介し、次に、高熱伝導スピン系物質の開発を目指した研究について紹介します。

## 2. high- $T_c$ 物質の探索

25年前の銅酸化物高温超伝導体が発見された頃は、酸化銅と適当な金属酸化物や金属炭酸化物を適当な割合で混ぜて固めて焼くという陶芸的手法 (固相反応法) でhigh- $T_c$ 物質を探索していました。超伝導の専門家でなくても容易に試料作りができましたので、企業や大学の多くの研究者が探索に参入してきたわけです。実際、このような手法で、多くのhigh- $T_c$ 物質が発見されました。しかし、そのような単純な探索方法には限界があり、1993年の $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ の発見を最後に、 $T_c$ は伸び悩んでいます。そこで、最近、我々の研究室では、電気化学法や水酸化物溶融塩を用いた低温合成法などの化学屋さんの手法を用いて、通常の方法では作製できない物質を合成し、high- $T_c$ 物質を探索しています。また、対象物質も必ずしも銅を含む酸化物に拘らず、全く新規なhigh- $T_c$ 物質の発見も目指しています。ここでは、探索の具体例を3つほど紹介します。

### 2-1 $Li_xSr_2CuO_2Br_2$ の超伝導発見

$Sr_2CuO_2Br_2$ は、図2のように、上で述べた銅酸化物高温超伝導体 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ と同じ層状構造 ( $K_2NiF_4$ 型構造) をとる物質ですが、絶縁体です。 $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ では、 $CuO_2$ 面に注入されたホール (電子がぎっしり詰まっているところに空いた孔) が電気伝導を担い、超伝導が発現しているのですが、我々は、 $Sr_2CuO_2Br_2$ の $CuO_2$ 面に電子キャリアを注入することを試み、超伝導化を目指しました。実際には、 $Sr_2CuO_2Br_2$ を固相反応法で作製し、それに電気化学法でリチウムをインターカレートする (結合の弱い層間に異種の原子やイオンを挿入する) ことによって、 $CuO_2$ 面に電子キャリアを注入しました。その結果、 $T_c=8K$ の超伝導体を得ることに成功しました。なぜ $Sr_2CuO_2Br_2$ にホールキャリアではなく電子キャリアの注入を試みたかという点、 $Sr_2CuO_2Br_2$ は負に帯電したBr-Br二重層を有するので、その層間に正に帯電した $Li^+$ イオンが挿入されやすいだろうと考え、さらに、この物質では負に帯電した酸素イオンがCuから比較的離れているので、Cuの場所に電子キャリアを受け入れやすいだろうと考えたからです。この超伝導体の $T_c$ はそれほど高くはありませんが、電子キャリア型の銅酸化物超伝導体の種類は極めて少ないので、銅酸化物高温超伝導体における超伝導発現機構の研究に寄与できるものと期待しています。

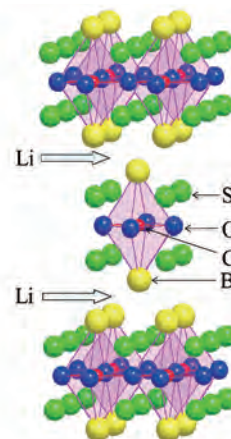


図2.  $Sr_2CuO_2Br_2$ の結晶構造。LiはBr-Br二重層間に入っていると思われる。

### 2-2 $Mg_xZrNCl$ の超伝導発見

リチウムのインターカレーションによって電子キャリアを注入し、超伝導を発現させた例は、上の例の他にもいくつかありますが、マグネシウムのインターカレーションによって超伝導を発現させた例はありません。マグネシウムは物質中では2価の正イオンになりやすいので、1価の正イオンになるリチウムに比べて2倍の電子キャリアを母物質に供給することができます。そこで、我々は、手始めとして、代表的なリチウム・インターカレーション超伝導体 $Li_xZrNCl$ の母物質である $ZrNCl$  (図3) に対して、電気化学法を用いて、マグネシウムのインターカレーションを試みました。その結果、 $T_c=15K$ を持つマグネシウム・イ

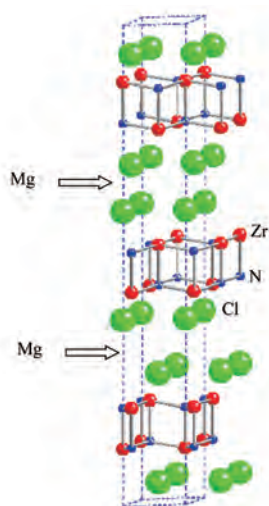


図3. ZrNClの結晶構造。MgはCl-Cl二重層間に入っていると思われる。

インターカレーション超伝導体 $Mg_xZrNCl$ を得ることに成功しました。実は、この $T_c$ は $Li_xZrNCl$ の $T_c$ とほぼ同じですが、マグネシウムのインターカレーションによって電子キャリアをドーピングして超伝導化した世界初の例であり、high- $T_c$ 物質の探索にマグネシウムのインターカレーションが有用であることを示した結果であると言えますので、今後の研究に活かされることを期待しています。

### 2-3 水素化合物におけるhigh- $T_c$ 物質の探索

「金属水素が室温で超伝導を示す可能性がある。」と約40年前にAshcroftらによって提唱され、その直後に、PdHが比較的高い $T_c=9K$ の超伝導を示すことが報告されたため、水素化合物の超伝導が注目されてきました。Ashcroftらが提唱した理由は単純です。超伝導を示すためには、2つの伝導電子がクーロン斥力に打ち勝ってペアを組む必要があるのですが、そのペアリングを媒介する粒子(ここではフォノン)のエネルギーが高いほどペアは強く結ばれ、 $T_c$ は高くなると考えられます。フォノンのエネルギーは、物質を構成している原子の質量が軽いほど高くなりますので、最も軽い元素である水素を含む化合物には高いエネルギーのフォノンが存在し、それを介した電子間のペアリングは強く、高い $T_c$ が期待できるというわけです。実際、最近発見されている超伝導体は、表1のように、いずれも、酸素( $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ ,  $SmFeAsO_{1-x}F_x$ )、窒素( $Li_xHfNCl$ )、炭素( $RbCs_2C_{60}$ ,  $Cs_3C_{60}$ )、ホウ素( $MgB_2$ ,  $YPd_2B_2C$ )などの軽元素を含んでいますので、あながち嘘とは言えません。しかしながら、水素の取り扱いの難しさのためか、水素化合物におけるhigh- $T_c$ 物質の探索はあまり進んでいませんでした。ところが、最近、水素吸蔵や電池、触媒などに利用するために、水素化合物の研究が盛んになってきました。そこで、我々の研究室では、水素化合物の研究をhigh- $T_c$ 物質の探索に利用することを考えはじめました。

最初に注目した物質は、銅酸化物高温超伝導体の基本構造であるペロプスカイト型構造を有する $CaPdH_{3-\delta}$  (図4)

表1. 軽元素を含む超伝導物質の $T_c$ 。

軽元素	超伝導物質	$T_c$ (K)
O	$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$	134
	$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ (高圧下)	164
	$SmFeAsO_{1-x}F_x$	55
N	$Li_xHfNCl$	26
C	$RbCs_2C_{60}$	33
	$Cs_3C_{60}$ (高圧下)	38
B	$MgB_2$	39
	$YPd_2B_2C$	23

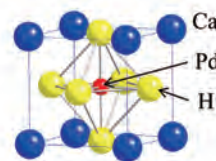


図4.  $CaPdH_{3-\delta}$ の結晶構造。

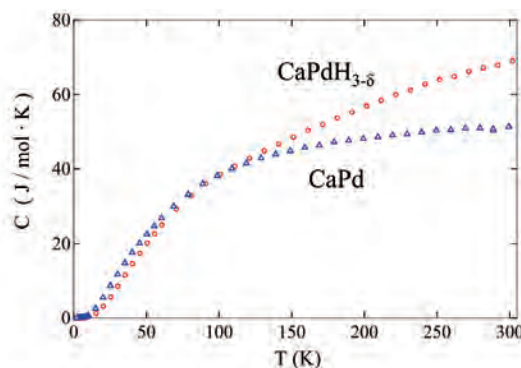


図5.  $CaPd$ と $CaPdH_{3-\delta}$ の比熱の温度依存性。

です。この物質の合成には苦労しました。まず、原料であるCaとPdを高周波溶解して、CsCl型の $CaPd$ を得ました。その後、室温で水素圧下に保つことにより $CaPdH_{3-\delta}$ を製し、これを500℃で真空アニールすることにより脱水素化し、結晶性の優れた $CaPd$ を得ました。水素化・脱水素化によって結晶が微粉化し、均質化が進んだのです。次に、再度、室温で水素圧下に保つことにより、結晶性の優れた $CaPdH_{3-\delta}$ を得ることができました。しかし、残念ながら、2K以上では超伝導を観測することはできませんでした。そこで、 $CaPdH_{3-\delta}$ に期待されるエネルギーの高いフォノンが実際に存在するか否かを調べるために、比熱を測定しました。その結果、図5のように、 $CaPd$ の比熱は室温でほぼ飽和するのに対し、 $CaPdH_{3-\delta}$ の比熱は120Kあたりから高温で $CaPd$ のそれより大きくなり、温度の上昇とともに増加することが分かりました。これにより、水素原子に起因したエネルギーの高いフォノン(そのエネルギーは860K)の存在を確認することができました。しかしながら、低温における比熱の実験結果と電子のエネルギーバンドの

計算結果から、電子とフォノンの相互作用はそれほど強くないことがわかりました。この物質系にはエネルギーの高いフォノンが存在することは確かですので、high- $T_c$ の実現のために、電子とフォノンの相互作用を強くし、さらに、水素の欠損量も減らす努力を続けているところです。

### 3. 高熱伝導スピノ系物質の研究

「スピノが熱を伝える」ということは、図6(a)のような強磁性相関（隣同士のスピノが同じ方向を向こうとする性質）をもつ $S=1/2$ のスピノ鎖における熱励起を考えれば、容易に理解できます。まず、図6(b)のようにスピノを一つ反転したとすると、反転した部分は隣のスピノと反対方向を向くため、周りよりもエネルギーの高い状態になります。そして、図6(c)のように、反転した部分が隣と入れ替わることによって、エネルギーの高い部分が移動していきます。このようにして、エネルギー、つまり、熱が伝わっていくのです。一般に、熱伝導度は、熱を運ぶ粒子の比熱と平均速度と平均自由行程（粒子が一度何かに衝突し、次に衝突するまでに自由に走る距離の平均値）の積で表されます。スピノが熱を運ぶ場合には、比熱と平均速度はスピノの励起状態によりますが、隣のスピノとの相互作用が強いほど、平均速度は大きく、熱伝導度が大きくなります。これは、原子間の結合が強い、すなわち、硬いダイヤモンドやサファイアにおいて、フォノンによる熱伝導度が大きいことと同じです。さらに、平均速度は、強磁性相関をもつスピノ系よりも反強磁性相関（隣同士のスピノが反対方向を向こうとする性質）をもつスピノ系の方が大きくなります。また、

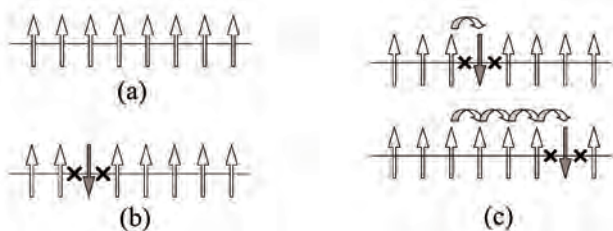


図6. 強磁性相関をもつ $S=1/2$ のスピノ鎖において、スピノが熱を伝える様子。

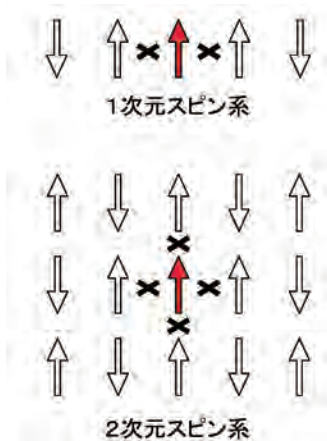


図7. 反強磁性相関をもつ $S=1/2$ の1次元スピノ系と2次元スピノ系におけるスピノの反転。

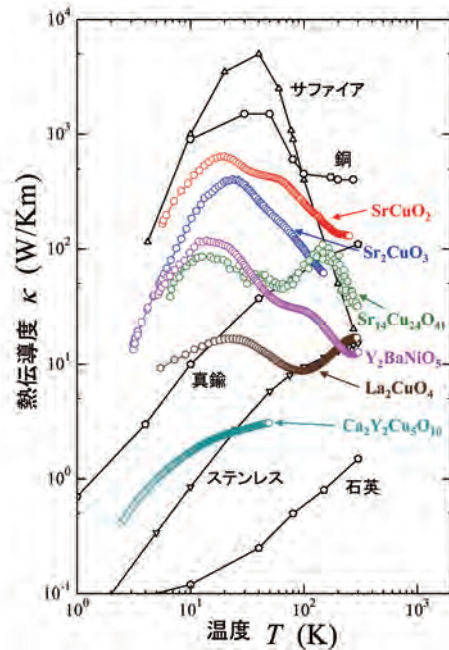


図8.  $SrCuO_2$ ( $S=1/2$ の1次元反強磁性系)、 $Sr_2CuO_3$ ( $S=1/2$ の1次元反強磁性系)、 $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$ ( $S=1/2$ の擬1次元反強磁性系)、 $Y_2BaNiO_5$ ( $S=1$ の1次元反強磁性系)、 $La_2CuO_4$ ( $S=1/2$ の2次元反強磁性系)、 $Ca_2Y_2Cu_5O_{10}$ ( $S=1/2$ の1次元強磁性系)と各種材料の熱伝導度の温度依存性。

スピノ間の相互作用が結晶中の特定の方向にのみ強い1次元スピノ系の方が、相互作用がより等方的な2次元スピノ系や3次元スピノ系よりも熱をよく伝えるのですが、それも、図7のように、次元が高くなるとスピノの反転に伴うエネルギーの増加が大きくなり、反転しづらくなるためと理解できます。したがって、スピノ間の反強磁性相互作用が大きい1次元スピノ系において、スピノによる大きな熱伝導が期待されます。図8に、各種材料の熱伝導度を載せましたが、実際、 $S=1/2$ の1次元反強磁性スピノ系と見なされる $SrCuO_2$ や $Sr_2CuO_3$ において、銅に匹敵しそうな大きな熱伝導度が観測されています。

実は、 $S=1/2$ の1次元反強磁性スピノ系では、ある条件が整えば、スピノン（スピノの励起状態の粒子的描像）による熱輸送がバリスティックになるという理論があります。バリスティックということは、スピノン同士の衝突がないことを意味し、それが真実であれば、スピノ鎖が途中で切れていない限り、スピノンによる熱伝導度は無限大になります。実際、我々は、 $Sr_2CuO_3$ の単結晶試料を作製し、スピノンの平均自由行程が、スピノの欠陥間の距離の平均値と一致していることを実験的に示し、スピノンによる熱輸送がバリスティックであることを実証しました。さらに、 $S=1/2$ の1次元反強磁性スピノ鎖を二重に持つ $SrCuO_2$ も、 $Sr_2CuO_3$ と同様に、スピノンによる熱輸送がバリスティックであると予想されますので、我々は、スピノの欠陥を極力抑えた単結晶試料を作製し、熱伝導度の向上を目指しました。具体的には、単結晶試料の原料の純度を99.9% (3N) から99.99% (4N) に上げ、単結晶を育成した後に酸素中でアニールを施しました。その結果を図9に示します。一

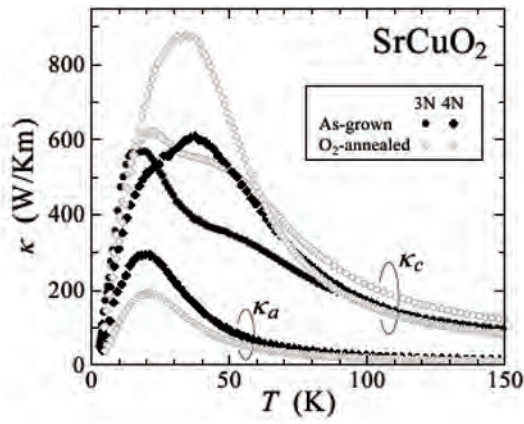


図9. SrCuO<sub>2</sub>におけるスピンの方向の熱伝導度  $\kappa_c$  とそれに垂直方向の熱伝導度  $\kappa_a$  の温度依存性。3Nと4Nは原料の純度を表す。

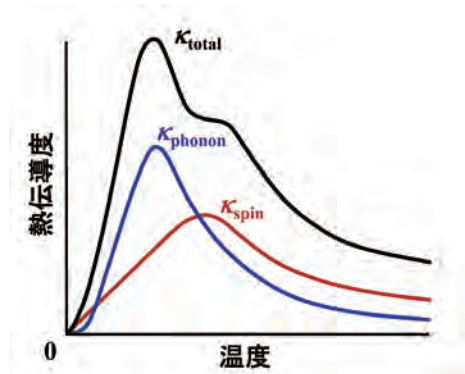


図10. スピン鎖方向の熱伝導度  $\kappa_{total}$  の温度依存性。フォノンによる熱伝導度  $\kappa_{phonon}$  とスピンによる熱伝導度  $\kappa_{spin}$  の和で表すことができる。

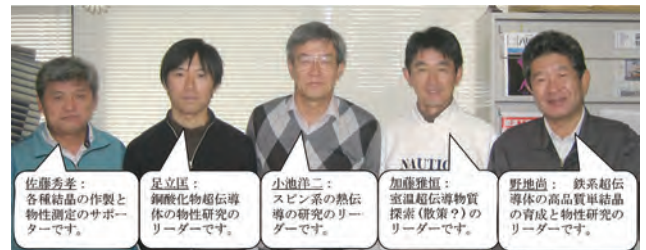
般に、絶縁体における熱伝導度の温度依存性は、図10のように、フォノンによる熱伝導度とスピンによる熱伝導度の和で表せますので、スピン鎖に平行な方向の熱伝導度の温度依存性には2つのピークが観測され、スピン鎖に垂直な方向の熱伝導度の温度依存性にはフォノンによる1つのピークのみが観測されます。そこで、図9を見れば、3Nの原料を用いて作製したas-grownの単結晶のスピンの方向の熱伝導度に現れた50K付近のブロードなピークが、スピンによる熱伝導度のピークであると判断できます。このピークは、4Nの原料を用いたり、酸素アニールを施したりすることによって増大していることが分かります。そして、4Nの原料で作製した単結晶に酸素アニールを施した試料において、800W/Kmを超える熱伝導度を記録しました。この値は、スピンによる熱伝導度としては世界一の値です。さらにスピンの欠陥を少なくすれば、熱伝導度のさらなる上昇が期待できますし、高熱伝導材料としての応用も大いに期待できる結果です。

#### 4. おわりに

high-T物質の探索は難しく、超伝導を狙って作った物質のT<sub>c</sub>はそれほど高くないのが通例です。画期的な超伝導の発見は、意外なところから起こっています。通常、電気をあまり通さないと考えられていた酸化物がhigh-T<sub>c</sub>の超

伝導になると、25年前に誰が想像していたでしょうか。最近では、東工大の細野秀雄氏らが発見した鉄を含んだ化合物のT<sub>c</sub>が、SmFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>で55Kまで上昇しています。強磁性（磁石の性質）と超伝導はお互いに競合する性質ですので、磁石になる鉄を含んだ化合物が超伝導になると、誰が想像したでしょうか。もはや、何が超伝導になっても驚きません。読者の中で、新しい物質を合成し、それが少しでも電気を通すことを確認された方がいらっしゃいましたら、是非ともお知らせください。超伝導の有無を調べさせていただければ幸いです。

一方、低次元スピン系物質における熱伝導の研究の歴史は浅く、研究しているグループもそれほど多くはありません。S=1/2のスピンをもつ物質の熱伝導については比較的よく分かってきましたが、S=1, 3/2, 2, 5/2などの大きなスピンをもつ物質の熱伝導についてはほとんど研究されていません。今後の研究課題です。また、低次元スピン系物質における熱伝導には大きな異方性がありますので、伝熱性と断熱性を兼ね備えた材料としての応用も考えられます。今後の研究の進展を大いに期待しています。



低温・超伝導物理学分野のスタッフ

#### 著者略歴

こいけ ようじ  
小池 洋二

- 昭和50年3月 東京大学理学部物理学卒業
- 昭和52年3月 東京大学大学院理学系研究科物理学専門課程修士課程修了
- 昭和55年3月 東京大学大学院理学系研究科物理学専門課程博士課程修了 (理学博士)
- 昭和55年4月 日本学術振興会奨励研究員
- 昭和55年6月 東北大学金属材料研究所助手
- 平成元年5月 東北大学工学部応用物理学科助教授
- 平成5年5月～10月 ドイツ・ダルムシュタット工科大学 客員研究員
- 平成8年4月 東北大学工学部応用物理学科教授
- 平成9年4月 東北大学大学院工学研究科 応用物理学専攻教授(大学院重点化による)



## 二酸化炭素の活性化と化学反応剤としての利用

東北大学大学院工学研究科  
バイオ工学専攻 教授  
服部 徹太郎

### 1. はじめに

CO<sub>2</sub>は、安価かつ豊富にあり、毒性がないうえ、再生可能な資源であることから、化石資源の枯渇と地球環境の変化に対する危機感が強まるなかで、化学原料としての有効な利用法の開発が期待されます。CO<sub>2</sub>は、有機物質を燃やした際に水とともに生成する燃焼の最終生成物であり、熱的には非常に安定ですが、炭素-酸素結合が炭素原子がプラスになるように分極しており、有機リチウム試薬やGrignard試薬などの強い炭素求核試薬（カルボアニオン試薬）とは容易に反応してカルボン酸を与えます（図1）。最近では、求核反応性の低い有機スズ、亜鉛、ホウ素試薬などを、遷移金属錯体を触媒として反応させる方法も開発されています<sup>1)</sup>。しかし、万能とはいえません。例えば、ベンゼンはπ電子に富む化合物であり、Friedel-Craftsアルキル化やアシル化反応にみられるように、カルボカチオン試薬とは容易に反応しますが、CO<sub>2</sub>とは反応しません（図1）。では、どうすればベンゼンはCO<sub>2</sub>と反応するようになるのでしょうか？その答えの一つは、CO<sub>2</sub>を反応系中で活性化することです。

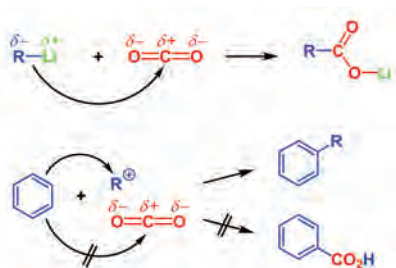


図1. 有機リチウム試薬とCO<sub>2</sub>の反応（上段）とFriedel-Craftsアルキル化反応（下段）

### 2. Friedel-Crafts型カルボキシル化反応

1878年にC. FriedelとJ. M. Craftsは、AlCl<sub>3</sub>の存在下、加熱還流したベンゼンにCO<sub>2</sub>を吹き込むと、少量の安息香酸が得られることを報告しました（図2）<sup>2)</sup>。この反応は、CO<sub>2</sub>がAlCl<sub>3</sub>（Lewis酸）により活性化され、上述のカルボカチオン試薬のようにベンゼンのπ電子と反応する、いわば“Friedel-Craftsカルボキシル化”の可能性を示唆しています。しかし当時は、反応系内でベンゼンとAlCl<sub>3</sub>から有機アルミニウムが生成し、カルボアニオン試薬としてCO<sub>2</sub>と反応していると解釈され、反応のメカニズムに関し

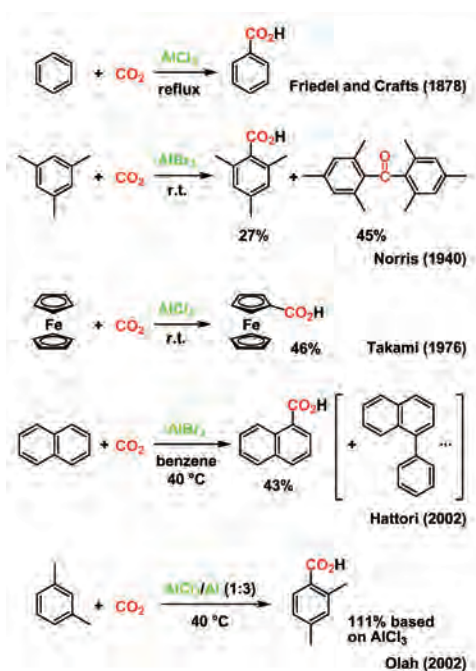


図2. Friedel-Crafts型カルボキシル化反応

て十分な検討は行われていません。また、その後、いくつかの研究グループがこの反応を検討していますが、ある程度の収率でカルボン酸が得られるのは、メシチレンとフェロセンの反応のみでした（図2）。われわれもこの反応に興味を持ち、基質の適用性を調べましたが、ベンゼンやトルエンなどメシチレンよりも反応性の劣る芳香族化合物は、ほとんど反応しませんでした。また、反応性の勝るナフタレンはα-位選択的に反応しましたが、非常に強いLewis酸であるAlBr<sub>3</sub>の作用で縮合してしまい、カルボン酸の収率を上げることはできませんでした（図2）<sup>3)</sup>。最近、G. A. Olahらは、反応系にアルミニウム粉末を加えるとカルボン酸の収率が向上することを報告しました（図2）<sup>4)</sup>。これは、アルミニウム粉末が反応系中で生成するHClと反応してカルボキシル化を促進するAlCl<sub>3</sub>を与えるためであり、CO<sub>2</sub>の反応性が向上したわけではありません。また、Olahらは、AlCl<sub>3</sub>によるCO<sub>2</sub>の活性化メカニズムを、計算化学（密度汎関数法）に基づいて提案しました。（図3）しかし、実験科学的な裏づけはなく、反応系内で有機アルミニウム種が生成し、カルボアニオン試薬としてCO<sub>2</sub>と反応する機構も完全には否定できないと述べています。一方、

P. MunshiとE. J. Beckmanは、反応に先立ってAlCl<sub>3</sub>をCO<sub>2</sub> 圧下でインキュベートするとトルエンのカルボキシル化が効率的に進行すること、また、この方法を用いると、AlCl<sub>3</sub>に比べて弱いLewis酸であるSnCl<sub>4</sub>、MoCl<sub>5</sub>、TiCl<sub>4</sub>を用いても反応が進行することを報告しました<sup>5)</sup>。これらの知見は、Olahらの機構を支持しています。

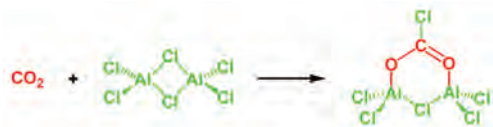


図3. AlBr<sub>3</sub>によるCO<sub>2</sub>の活性化

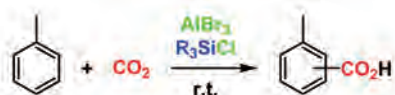
### 3. R<sub>3</sub>SiXの添加効果

われわれは、研究を進めていくうちに、R<sub>3</sub>SiXを反応系に加えるとカルボキシル化が著しく促進されることを見出しました<sup>6,7)</sup>。例えば、トルエンを基質兼溶媒として用いて、AlBr<sub>3</sub>と種々のR<sub>3</sub>SiXの存在下にカルボキシル化してみると、R<sub>3</sub>SiXを加えない場合には、カルボン酸の収率はAlBr<sub>3</sub>を基準として10%でしたが、同じ反応条件下で、(H<sub>3</sub>C)<sub>3</sub>SiClをAlBr<sub>3</sub>に対して5当量加えると80%に達しました(表1)。また、反応促進効果は、ケイ素原子上の置換基Rに依存し、[(H<sub>3</sub>C)<sub>2</sub>CH]<sub>3</sub>SiClは3当量、Ph<sub>3</sub>SiClは1当量の添加で、5当量の(H<sub>3</sub>C)<sub>3</sub>SiClと同程度かそれ以上の効果がありました。これらのことから、シリルカチオンが安定に生成するものほど、反応促進効果が高いといえます。

R<sub>3</sub>SiXの添加は、とくに、多環芳香族化合物のカルボキシル化に有効であり、Ph<sub>3</sub>SiClとAlBr<sub>3</sub>を1当量ずつ用いて、適当な溶媒中で反応させると、収率良くカルボン酸が得られました(図4)。これまでに、多環芳香族化合物にCO<sub>2</sub>を直接反応させてカルボン酸を合成する方法はなく、実験室スケールの合成法としては有用といえます。

また、N-メチルインドールも、CO<sub>2</sub>圧下にアルミニウム試剤を用いて収率良くカルボキシル化できることを見出しました(表2)。この場合には、AlBr<sub>3</sub>よりも弱いLewis酸であるMe<sub>2</sub>AlClの活性が高く、また、R<sub>3</sub>SiXの添加効果は認められません<sup>7,8)</sup>。これは、反応のメカニズムが上述の芳香族炭化水素の反応と異なるためですが、その詳細につい

表1. トルエンのカルボキシル化反応におけるR<sub>3</sub>SiClの添加効果



R <sub>3</sub> SiCl (mmol)	収率 (p-:o-)
なし	10 (33:1)
(H <sub>3</sub> C) <sub>3</sub> SiCl (1.0)	21 (3:1)
(H <sub>3</sub> C) <sub>3</sub> SiCl (3.0)	63 (4:1)
(H <sub>3</sub> C) <sub>3</sub> SiCl (5.0)	80 (5:1)
[(H <sub>3</sub> C) <sub>2</sub> CH] <sub>3</sub> SiCl (1.0)	40 (6:1)
[(H <sub>3</sub> C) <sub>2</sub> CH] <sub>3</sub> Cl (3.0)	83 (8:1)
Ph <sub>3</sub> SiCl (1.0)	94 (8:1)

反応条件: トルエン (2.0 cm<sup>3</sup>), AlBr<sub>3</sub> (1.0 mmol), R<sub>3</sub>SiCl (1.0-5.0 mmol), CO<sub>2</sub> (3.0 MPa), 室温, 3 h. 収率は AlBr<sub>3</sub> を基準に求めた。

ては、本稿では省略します。同様の反応条件下で、他のN-置換インドール類やピロール類も収率良くカルボキシル化できました(図5)。

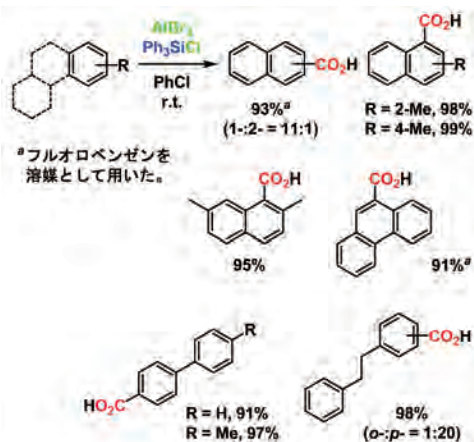


図4. 多環芳香族化合物のカルボキシル化反応

表2. N-メチルインドールのカルボキシル化反応



Lewis 酸	溶媒	温度	収率/%
AlBr <sub>3</sub>	ベンゼン	r.t.	32
AlBr <sub>3</sub> /Ph <sub>3</sub> SiCl	ベンゼン	r.t.	32
Me <sub>2</sub> AlCl	ベンゼン-ヘキサン	r.t.	62
Me <sub>2</sub> AlCl	トルエン-ヘキサン	r.t.	85
Me <sub>2</sub> AlCl	トルエン-ヘキサン	80 °C	96
MeAlCl <sub>2</sub>	トルエン-ヘキサン	r.t.	21
Me <sub>2</sub> Al	トルエン-ヘキサン	r.t.	6

反応条件: N-メチルインドール (1.0 mmol), Lewis 酸 (1.0 mmol), 溶媒 (1.0-2.2 cm<sup>3</sup>), CO<sub>2</sub> (3.0 MPa), 室温, 3 h.

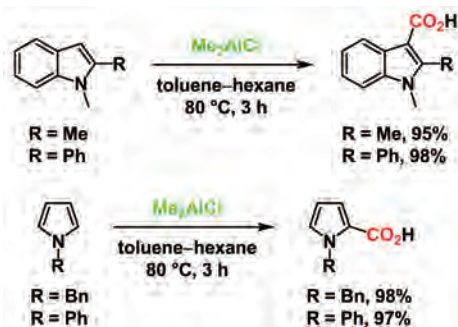


図5. 含窒素芳香族化合物のカルボキシル化反応

### 4. 反応のメカニズム

R<sub>3</sub>SiXの役割を知るために、活性種の分析を試みました。AlBr<sub>3</sub>とPh<sub>3</sub>SiClをCO<sub>2</sub>圧下、室温で反応させ、反応混合物をFT-IRで分析しました(図6)。その結果、1650cm<sup>-1</sup>付近に、Ph<sub>3</sub>SiClや、Ph<sub>3</sub>SiClとAlBr<sub>3</sub>を混合した場合には見られない吸収が観測されました。この波数は、これまでに報告されているカルボン酸の酸ハロゲン化物のアルミニウム錯体のC=O伸縮振動の値と良く一致しています。AlBr<sub>3</sub>

は2量体で存在すること、Olahらの提案した活性種の構造などを考えると、本反応の活性種も複雑な構造であると予想されますが、IRの波数からその構造を端的に表せば、クロロギ酸シリルエステルのアルミニウム錯体様の構造であるといえます。このことと、その他の実験事実から、図7に示す反応メカニズムを提案しました。すなわち、まず、CO<sub>2</sub>がAlX<sub>3</sub>とR<sub>3</sub>SiXの作用で活性化されてクロロギ酸のシリルエステル様の活性種が生じます。これが、芳香族基質に対して親電的に反応します(芳香族求電子置換反応)。これにより生じるカルボン酸のシリルエステルは、系内で副生する超強酸HAlX<sub>4</sub>により分解し、カルボン酸、AlX<sub>3</sub>、およびR<sub>3</sub>SiXを与えます。最後にカルボン酸がAlX<sub>3</sub>と反応して、カルボン酸のアルミニウム塩が生成すると考えられます。全体の反応は下式のようにになります。R<sub>3</sub>SiXは、定めた実験条件下で良い収率を得るためには化学量論量かそれ以上必要ですが、反応後には回収でき、触媒的にはたらいっています。このように、R<sub>3</sub>SiXがカルボキシル化を著しく促進するのは、R<sub>3</sub>SiXがCO<sub>2</sub>を活性化するためであることがわかりました。これは、全く新しい知見です。

活性種のシリルエステルのケイ素原子を炭素原子で置き換えた構造をもつアルキルエステルCl-(C=O)-OCR<sub>3</sub>は安定な化学物質であり、市販されています。しかし、AlX<sub>3</sub>とともに芳香族基質に作用させても、カルボキシル化は起こりません。これは、塩素イオンが脱離して生じる+O≡C-OCR<sub>3</sub>が不安定で、容易にCO<sub>2</sub>を放出してしまうからです。すなわち、R<sub>3</sub>CXではCO<sub>2</sub>を活性化することはできません。また、CO<sub>2</sub>の代わりに類似の累積二重結合をもつS=C=Sを用いて、AlX<sub>3</sub>の存在下に芳香族基質と反応させると、ジチオカルボン酸が低収率で得られますが、R<sub>3</sub>SiXを添加しても反応は促進されません。すなわち、R<sub>3</sub>SiXはCS<sub>2</sub>を活性化しません。これらのことから、R<sub>3</sub>SiXがCO<sub>2</sub>を活性化できるのは、ケイ素原子が酸素原子に対して高い親和性をもつためといえます。

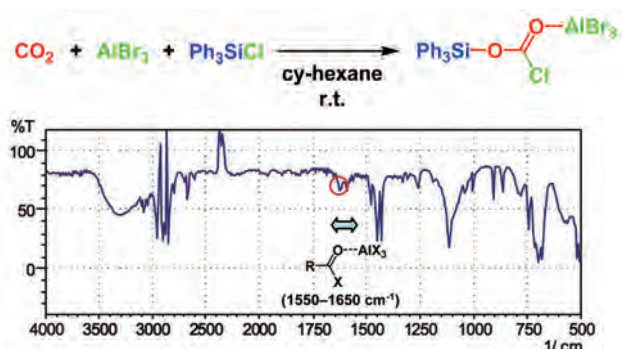


図6. IRによる反応活性種の分析

## 5. おわりに

以上、本稿では、私たちの研究の一端を紹介しました。この研究が実用に結びつくまでには、反応試剤をより安価かつ触媒量で効果があり、環境負荷の小さなものに替えていく必要があるなど、課題が山積しています。しかし、私たちは、本稿で紹介したような基礎科学的に新しい知見、

とくに、自分たちで発見した現象を大切に生かして、新しい有機合成反応や合成化学的な方法論を開発していきたいと考えています。

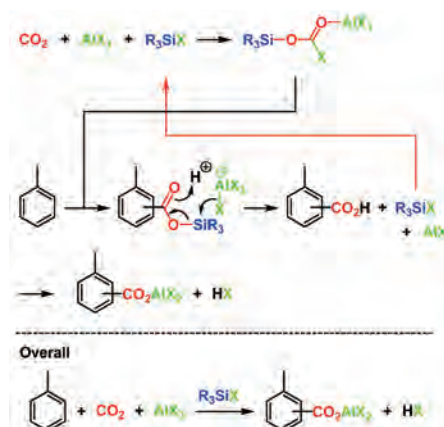


図7. 予想される反応メカニズム

## 【参考文献】

- 1) Riduan, S. N.; Zhang, Y. *Dalton Trans.* **2010**, *39*, 3347.
- 2) Friedel, C.; Crafts, J. M. *Compt. Rend.* **1878**, *86*, 1368.
- 3) Suzuki, Y.; Hattori, T.; Okuzawa, T.; Miyano, S. *Chem. Lett.* **2002**, 102.
- 4) Olah, G. A.; Török, B.; Joschek, J. P.; Bucsi, I.; Esteves, P. M.; Rasul, G.; Prakash, G. K. S. *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 11379.
- 5) Munshi, P.; Beckman, E. J. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2009**, *48*, 1059.
- 6) Nemoto, K.; Yoshida, H.; Egusa, N.; Morohashi, N.; Hattori, T. *J. Org. Chem.* **2010**, *75*, 7855.
- 7) 服部徹太郎、使える！有機合成 反応241実践ガイド、p. 50、丸岡啓二、野崎京子、石井康敬、大寺純蔵、富岡清編著、化学同人、2010.
- 8) Nemoto, K.; Onozawa, S.; Egusa, N.; Morohashi, N.; Hattori, T. *Tetrahedron Lett.* **2009**, *50*, 4512.

## 【著者略歴】

はっとりてつたろう  
服部徹太郎

昭和38年12月25日生

昭和62年3月 東北大学工学部応用化学科卒業

平成4年3月 東北大学大学院工学研究科応用化学専攻  
博士課程後期3年の課程修了

平成4年4月 東北大学工学部助手

平成8年5月 東北大学工学部講師

平成13年4月 東北大学大学院工学研究科助教

平成17年4月 東北大学大学院環境科学研究科教授

平成22年4月 東北大学大学院工学研究科教授



### 1. はじめに

高齢者人口は先進国ばかりでなく、発展途上国においても増加することが確実視されている。特にこれまで経験したことのない超高齢社会を迎える日本においては、疾病や事故によるものも含め生体機能の低下・喪失に苦しむ患者数の増加が見込まれる。高齢者がそれまでの快適な生活を維持するためには生体機能の人工的な回復、これに対応した生体機能再建術の高度化が必要となる。生体材料の高機能化・高安全化は、適用部位や使用期間などに応じた材料選択を可能とするばかりでなく再生医療の発展の観点からも医用分野への貢献は大きい。

特に金属材料はその強度、延性および靱性から多くの医療用デバイスの素材として使用されており、インプラント（医療用埋入部材）の70%以上は金属製とされている（図1）<sup>1)</sup>。データはやや古いですが、日本の整形外科分野で用いられている生体材料素材質量を図2に示す<sup>2)</sup>。整形外科分野においては生体材料に強度や靱性が要求されるため、金属系材料が主に用いられているが、その中でも中心はCo-Cr合金とチタンおよびチタン合金である。

本稿では生体用金属系材料の表面・組織制御の基礎的な研究として、軽元素に着目した生体用Co-Cr-Mo合金およびチタン系材料に関する研究を紹介したい。

### 2. 生体用Co-Cr-Mo合金中の析出物制御

生体用Co-Cr-Mo合金の歴史は1930年代に歯科用合金としてVitalliumが開発されたことに始まる。その特徴は優れた耐摩耗性にあり、人工股関節骨頭や人工膝関節などの摺動部に用いられている。近年では、その高弾性率と高密度との特徴を活かしてステント材料としても注目されている。Co, Cr, Moが純金属として生体応用されることはないが、Co-28Cr-6Mo（合金組成はmass%）を基本組成とする合金化により優れた生体材料となる。

生体用Co-28Cr-6Mo合金では、機械的特性を劣化させるσ相（Co(CrMo)）形成の抑制および加工性に優れるfcc構造を有するCo基γ相の安定化を目的に炭素や窒素が添加される。Co-Cr-Mo合金の応用は casting材と展伸材に分けることができるが、いずれの応用においても添加された炭素や窒素を介して形成される析出物（炭化物・窒化物）の相、サイズ、分布、形状などが耐摩耗性、疲労特性、耐食性、加工性と密接に関連している。このため1960年代から



図1 整形外科・歯科用インプラントの代表例

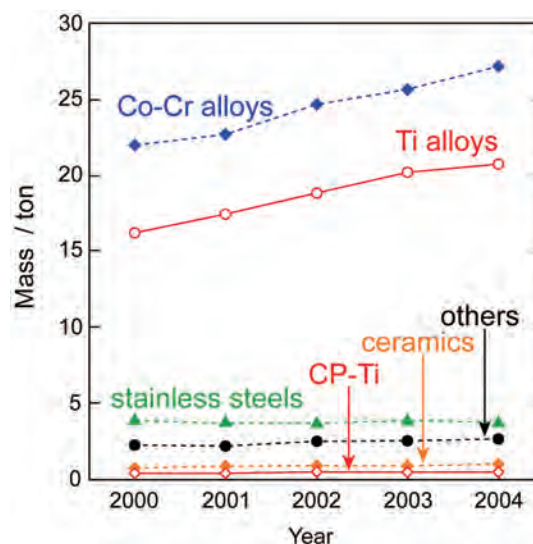


図2 日本の整形外科分野で用いられている生体材料

Co-Cr-Mo合金中の析出物に関しては多くの研究がなされ、 $M_{23}C_6$ 型炭化物、 $\eta$ 相（ $M_{12}C-M_6C$ 型炭化物）、 $\sigma$ 相の形成が報告されてきたが、必ずしも統一的な見解が得られていなかった。

これらを踏まえ、当グループでは2007年より生体用Co-Cr-Mo合金の析出物に関する研究を開始した。初期の着眼点は耐摩耗性向上に寄与することが予想される $M_7C_3$ 型炭化物の形成であったが、研究の過程で2つの新規な析

出相を見いだした<sup>3-5)</sup>。新規な析出物は理想組成 $M_2T_3X$  (M:炭素との親和力が小さい金属元素、T:炭素との親和力が強い金属元素、X:炭素)で $\beta$ -Mn型構造を有する $\pi$ 相および $\alpha$ -Mn型構造を有する $\chi$ 相である(図3)。図4にこれらの構造の模式図を示す。いずれにおいても炭素は侵入型で固溶するが、 $\pi$ 相中へは前述の理想組成付近まで炭素が固溶し、炭化物としての性格が強いのにに対し、 $\chi$ 相では炭素の侵入が構造的に困難であるため炭素固溶レベルは低く金属間化合物としての性格が強い。 $\chi$ 相への炭素固溶は構成金属元素にも依存するので詳細に関しては更なる検討が必要である。なお、当初の目的であった $M_7C_3$ 型炭化物の形成に関してもその条件を把握しつつある。

新規析出相は実用生体用Co-Cr-Mo合金であるASTM規格組成範囲内で検出されており、生体用Co-Cr-Mo合金80年の応用の歴史でこれらの析出相の報告がなかったのは意外である。鉄鋼材料中では50年以上前からその存在が知られていたが<sup>6)</sup>、Co-Cr-Mo合金においては $M_{23}C_6$ 型炭化物、 $\eta$ 相、 $\sigma$ 相、 $M_7C_3$ 型炭化物などの複雑な構造を有する析出物が存在するため、相同定が容易ではなかったことが理由であろう。実際に、これまでの生体用Co-Cr-Mo合金鑄造材の炭化物形成の論文を調査してみるとX線回折(XRD)パターン上では $\pi$ 相のピークが現れているにも関わらず同定に至っていない場合もある。

Co-Cr-Mo合金中の $\pi$ 相および $\chi$ 相が実際のCo-Cr-Mo合金特性に対してどのような影響を及ぼすかに関しては現在、研究を進めている。金属間化合物的性格の強い $\chi$ 相は $\sigma$ 相と同様、機械的特性を劣化させる可能性が高いが、 $\sigma$ 相とは異なり形成される組成範囲と熱処理条件の範囲が狭いことから、その形成抑制は十分に可能であろう。 $\pi$ 相は高温での熱処理に伴い、ASTM規格を含めた幅広いCo-Cr-Mo合金組成で形成される。これは鑄造プロセスにおいては $\pi$ 相形成域を必ず通ることを意味しており、 $\pi$ 相が鑄造まま組織と密接に関連することを意味する。加えて、熱処理や鑄造後の冷却過程における $\pi$ 相の関与した相変態を通してCo-Cr-Mo合金全体の析出物構成にも影響を及ぼすことが明らかになっている。図5に電子線マイクロアナライザー(EPMA)による $\pi$ 相の組成分析結果を示す。 $\pi$ 相析出物へのCr、Mo、Siの濃縮が確認できるが、その構成金属元素組成は $M_{23}C_6$ 型炭化物や $\eta$ 相と異なり耐食性や耐摩耗性へ及ぼす影響も興味深い。

### 3. チタン系材料と軽元素

チタンは軽量、高比強度、低アレルギー性に加えて、オッセオインテグレーションという他の金属系生体材料にはないユニークな特性を有しており優れた生体適合性を発揮する。オッセオインテグレーションはスウェーデンのBrånemarkにより提唱された概念であり、「生活を営む骨組織とインプラント体とが光学顕微鏡レベルで直接密着し、持続した結合状態を呈し、インプラント体に加わった力が骨組織に直接伝達されること」と定義され、チタンの

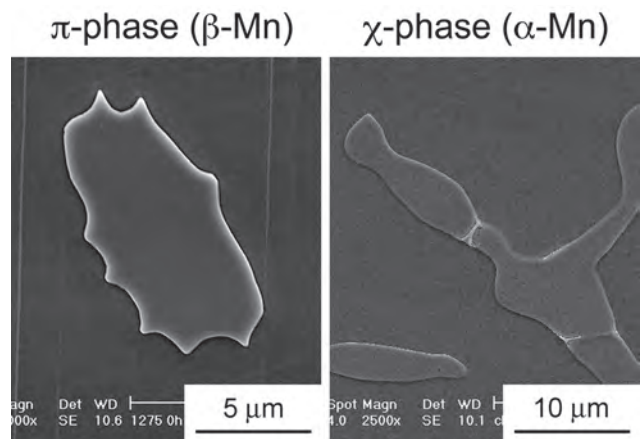


図3 Co-Cr-Mo合金中の $\pi$ 相および $\chi$ 相SEM像

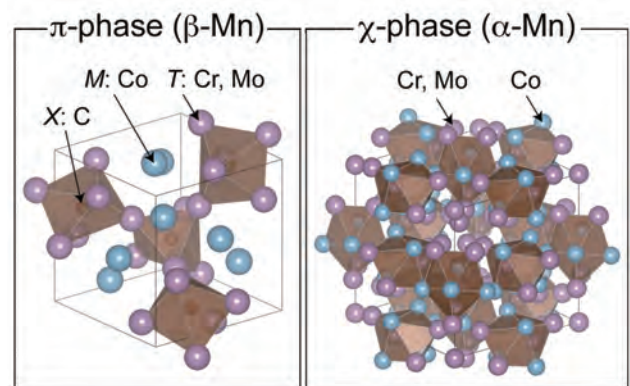


図4  $\pi$ 相および $\chi$ 相の結晶構造

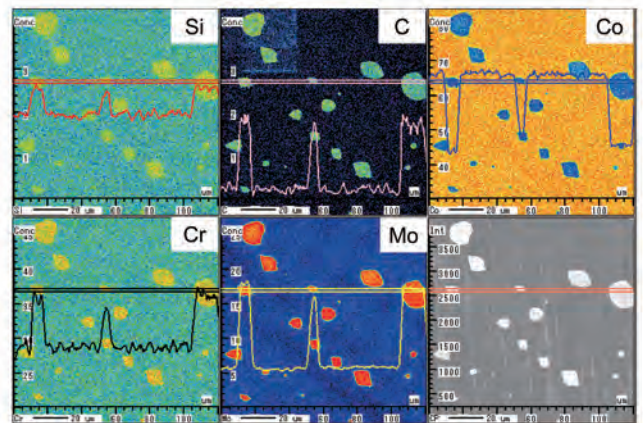


図5 EPMAによる $\pi$ 相の化学組成分析

優れた骨適合性を表す。チタンはこのような生体材料としての優れた特性を背景に、整形外科、循環器外科・内科、歯科などにおいて、主に力学的な強度および延性が要求される部位や骨との長期間の密着が想定される部位への応用がなされている。

水素、炭素、窒素、酸素といった軽元素は、(イ)チタンとの親和力が大きい、(ロ)チタン中への溶解度が大きい、(ハ)侵入型で固溶する、(ニ)比較的安価・豊富、などの特徴を有し

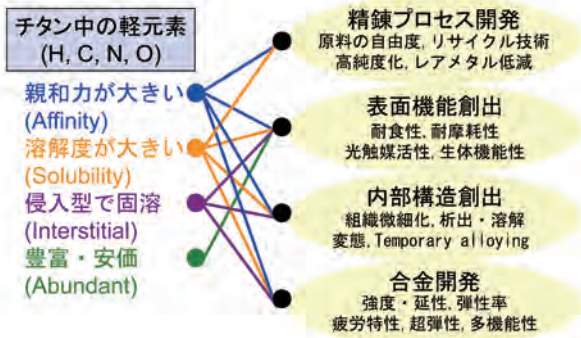
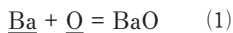


図6 チタン系材料における軽元素

ており、不純物であるとともに有効な合金元素としての面も持ち合わせている (図6)。ここでは、チタン系材料と軽元素との反応に関する最近の研究を紹介する。

(1) 金属Baを利用したNiTi融体からの酸素除去

NiTiは代表的な形状記憶・超弾性合金であり、種々の医療用デバイスに応用されている。NiTi中の酸素は強度・延性や疲労特性に加えて、マルテンサイト変態開始温度などにも関連することが知られており、NiTi部材製造時の溶解プロセスで酸素濃度の制御ができれば有効である。酸素はスポンジチタン中の主要な不純元素であり、原料段階でNiTiの酸素含有量を低減させるには限界がある。金属Baは酸素との高い親和力を有し、チタン系融体中においても(1)の反応に伴う脱酸が期待できる<sup>7)</sup>。



当グループでは、NiTi融体保持容器にCaO坩堝を採用し、金属Ba添加に伴う酸素濃度変化および析出物形成に関する検討を行った。図7に装置の模式図を示す。NiTi原料には初期酸素濃度の異なる2種類 (Low O: 305 mass ppm、High O: 615 mass ppm) を用いた。

図8に1673 Kにおいて、Low O材およびHigh O材へのBa添加後の保持時間と酸素濃度の関係を示す。Ba添加を

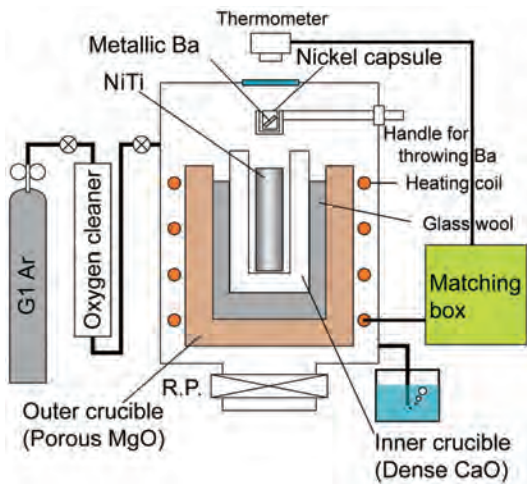


図7 NiTi融体からの脱酸実験装置模式図

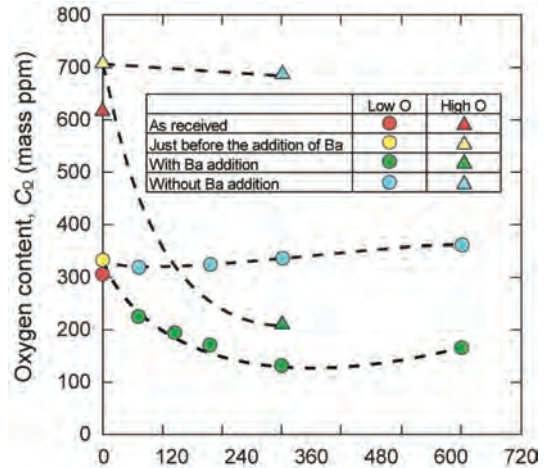


図8 金属Ba添加に伴うNiTi中の酸素濃度変化

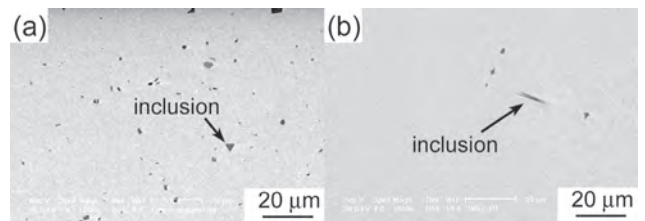


図9 NiTi(Low O)中の析出物 ((a)脱酸前, (b)脱酸後)

行わず、NiTi融体をCaO坩堝中で保持した際のデータも同時に示した。Ba添加を行わない場合には酸素濃度がわずかに増加する傾向にあるのに対し、Baを投入することで酸素濃度はLow O材で130 mass ppm、High O材で210 mass ppmまで減少した。酸素含有量の減少に伴い、図9に示す通りNiTi中の析出物量が減少し、さらに析出物相も変化することが明らかになった。

チタン系材料の溶解プロセスに精錬機能を付加することは、低廉チタン原料使用に関する自由度の増大、リサイクル性の向上などの観点から有効と考えられる。

(2) 生体応用を目的としたチタンの表面処理

チタンが骨組織に固定されるためには3ヶ月程度の比較的長期間が必要とされるため、インプラントとして埋入後直ちに応力を負荷できない。さらに、骨の状態によっては必ずしも十分な固定が得られない場合もある。そのため、骨適合性向上を目的とした種々のチタンの表面処理が報告されている。

チタンと酸素との反応により形成される酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)は耐食性、骨適合性、血液適合性の向上に有効とされる。TiO<sub>2</sub>にはルチル、アナターゼ、ブルッカイトという多形が存在するが、これらの多形と生体特性との関連は興味深い。陽極酸化やゾルゲル法を利用したチタン表面におけるTiO<sub>2</sub>形成においては、相制御がなされているものの、ドライプロセスである熱酸化法においては、マクロなレベルで熱力学的に安定なルチルの形成が報告されている。熱酸化法は簡便、形成されるTiO<sub>2</sub>膜の高い密着性、基板形状

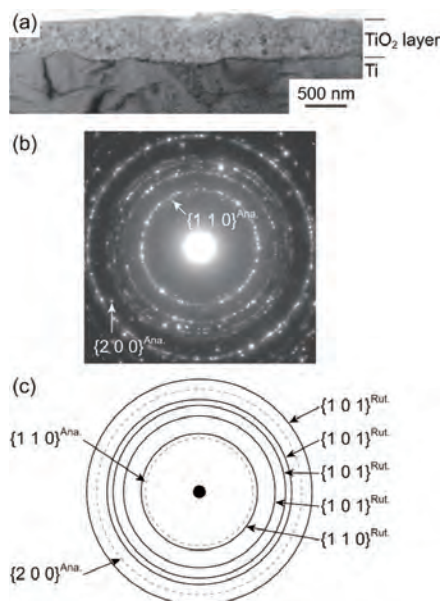


図10 二段階熱酸化法により作製した酸化層のTEM観察：  
(a)断面, (b)および(c)電子線回折パターン

の自由度が大きいなどの利点を有している。従って、優れた生体特性や光触媒活性が指摘されるアナターゼ膜を熱酸化法で作製できればチタンの用途拡大に寄与すると考えられる。当グループでは、Ar-CO中での処理と大気酸化を組み合わせた二段階熱酸化法により、チタン表面にアナターゼ優勢な酸化皮膜を作製できることを示した<sup>8)</sup>。図10に二段階熱酸化法により作製したアナターゼ優勢層の透過型電子顕微鏡観察結果を示す。この図はアナターゼ/ルチルの二相構造であるが、プロセス条件を変化させることでアナターゼ単相にすることも可能である。

今後は、生体に関連する特性に加えて光触媒活性に関してもTiO<sub>2</sub>多形との関連を調査する予定である。

#### 4. おわりに

生体材料と軽元素の相互作用に関して、軽元素の析出、軽元素の除去、軽元素が関与する表面反応に関する研究を紹介してきた。もちろん研究は道半ばであるが、予想以上の成果が得られているテーマもある。生体材料に関しては幅広い共同研究体制が必要である。骨形成能や金属アレルギー性評価のための動物実験に関しては、東北大学歯学研究科や加齢医学研究所と共同研究を行っている。また、許認可を含めた実用化を考えれば企業との連携も不可欠である。さらに、近年の再生医療技術の進展も考慮に入れる必要もあろう。今後も、物理化学的なアプローチにより生体材料と軽元素との関わりを解明することで、安全安心社会の構築と生体材料の軽元素メタラジーなる学問分野の創成に少しでも貢献したいと考えている (図11)。



図11 生体材料における軽元素研究

#### 【参考文献】

- 1) 中野貴由: 医療用材料における力学特性の重要性 (医療用金属材料概論, 日本金属学会, 2010) p. 185.
- 2) 成島尚之: 軽金属, 55 (2005) 561-565.
- 3) S. Mineta, S. Namba, T. Yoneda, K. Ueda and T. Narushima: Metall. Mater. Trans. A, 41 (2010) 2129-2138.
- 4) Alfirano, S. Mineta, S. Namba, T. Yoneda, K. Ueda and T. Narushima: Metall. Mater. Trans. A, in press.
- 5) Alfirano, S. Mineta, S. Namba, T. Yoneda, K. Ueda and T. Narushima: Metall. Mater. Trans. A, to be submitted.
- 6) H.J. Goldschmidt: Interstitial Alloys (Butterworths, London, 1967) pp.126-130.
- 7) S. Miyamoto, M. Watanabe, T. Narushima and Y. Iguchi: Mater. Trans., 49 (2008) 289-293.
- 8) T. Okazumi, K. Ueda, K. Tajima, N. Umetsu and T. Narushima: J. Mat. Sci., in press.

#### 【著者略歴】

なるしま たかゆき  
成島 尚之

昭和37年6月8日生

昭和60年3月 東北大学工学部金属工学科卒業

昭和62年3月 東北大学大学院工学研究科金属材料工学専攻修了

昭和62年4月 東北大学工学部金属工学科助手

平成6年12月 東北大学工学部金属工学科助教

平成16年6月 東北大学先進医工学研究機構教授

平成19年4月 東北大学大学院工学研究科材料システム工学専攻教授



## 建築・都市デザインの理論研究

東北大学大学院工学研究科  
都市・建築学専攻 教授  
五十嵐 太郎

### ○都市・建築理論分野とは

筆者は2005年に東北大学の都市・建築理論分野に着任し、2009年の9月1日から教授に就任した。東北大学の都市・建築学専攻は、日本の大学にはめずらしく、理論の講座がある。もっとも、それは日本の場合、一般的に建築学科が工学部に所属していることが一因であり、前提が異なる海外においては必ずしも特異なことではない。建築という分野は、耐震の構造、環境の制御、材料や構法など、工学的な側面がもちろん重要な柱となっているが、一方で施設や都市の問題は社会との関係が深く、またデザインは芸術的な性格をあわせもち、さらには工学部としては異例の歴史学まで含む。すでに古代ローマ時代の建築家ウィトルウィウスがそう論じたように、いわば理科系から文化系までの雑多な要素を統合するのが、建築学である。都市・建築理論は、構造や材料の実験を行うわけではなく、人文的な性格が強く、デザインと歴史をつなぐような位置づけといえるだろう。

筆者が学部生だった1980年代後半は、ポストモダンの思想とデザインが席卷し、教養として建築の歴史的な知識を学んでおくべきという雰囲気がまだ存在していたが、近年はそうした教養の抑圧が消え、歴史的な意識が欠如する傾向が全国的に認められる。そこで思想的または歴史的な背景を通して、建築を理解する教育を行うことで、幅広い文献を粘り強く読み、複合的にかつ批判的に思考できる学生を育てたい。これは社会的な意味をもち、しっかりとしたコンセプトのある設計教育にも役立つと考えている。

### ○歴史と批評

これまで筆者は、建築評論と建築史の研究を行ってきた。そして得られた成果を建築の分野以外、すなわち人文系の領域、あるいは一般の社会に対しても、広く積極的に伝えることを目的とし、主に著作というかたちで直接的に社会に問いかけてきた。

筆者は、大学院のときに近代の建築と言説を調査するうちに、言葉だけの抽象論に陥らず、具体的なモノとの関係を考察できることから、ケース・スタディとして新宗教をテーマに選び、博士論文「新宗教の建築、その理念と実践」（1999年）をまとめた。宗教の思想、つまり教義の言説と建築や都市計画の関連を検証できること、また建築史において未開拓の領域だったことが主な理由である。本論では、

天理教、金光教、大本教など、19世紀に誕生した教団を中心に分析した。博士論文を要約した『新宗教と巨大建築』（講談社現代新書、2001年）は、宗教学の事典などでも参考文献に挙げられている。近代神社や海外の新宗教の研究は、『近代の神々と建築』（廣済堂出版、2002年）で発表した。その後、二冊を合本にして、ちくま学芸文庫の『新編新宗教と巨大建築』（2007年）に収録した。また名古屋でしばらく教鞭をとったことをきっかけに執筆した『結婚式教会の誕生』（春秋社、2007年）は、日本において異常な発達を遂げた信者なき「教会」、ウエディング・チャペルに注目し、現代の日本人のもつ独特な宗教観を分析した。

宗教建築論の方法を展開すると、社会の関係から建築を読み解くというテーマが浮上する。『ビルディングタイプの解剖学』（王国社、2002年、共著）では、制度と施設の関係に焦点をあて、様式史でも作家中心でもない、社会史的な建築論を素描した。『戦争と建築』（晶文社、2003年）は、ルネサンスの戦争都市、第二次世界大戦の防空デザインから、9.11まで、共同体と共同体が衝突するとき起きる戦争が、いかに建築と都市を変容させるのかを論じた。これを発展させたのが、『過防備都市』（中央公論新社、2004年）である。本書では、過剰なセキュリティを要求する現代社会が、自由を失い、他者を排除する空間をもたらすことを批判的に検証した。これは見えない内戦であり、共同体の内部に無数の闘争線が引かれた状況である。もともと博士論文も、特定の信条をもつ共同体の空間研究である。つまり、筆者にとって共同体と建築は、一貫したテーマになっている。『美しい都市・醜い都市』（中央公論新社、2006年）では、現代的な景観論の可能性を提示した。これらの著作は、社会学からも注目され、引用や参照がなされている。

他分野に横断する建築論としては、『建築と音楽』（NTT出版、2008年、共著）や『映画の建築／建築的映画』（春秋社、2009年）が挙げられる。前者は修士論文から継続してきたテーマであり、比較美学的な枠組から、中世から現代まで、建築と音楽、あるいは空間と時間に共通する形式性について論じた。後者は、映画、あるいは映像と建築の関係性をさまざまな視点から読み解いた批評である。

現代建築論の成果としては、通史として書かれた『近代建築史』（市ヶ谷出版、2008年、共著）や『終わりの建築／始まりの建築』（INAX出版、2001年）が挙げられる。前者では、1960年代以降の日本と海外の現代建築の歴史につ



『戦争と建築』（晶文社、2003年）



『現代建築に関する16章』の中国語版

いて包括的に記述した。後者では、1968年を現代建築の重要な転点とみなしつつ、批判的地域主義やスーパーフラットなど、指針とすべき批評の概念を検討し、とくに日本の新しい世代の建築家の意義を論じた。『現代建築のパースペクティブ』（光文社、2005年）では、1990年代以降の日本の現代建築の見取り図を描いた。また『現代建築に関する16章 空間、時間、そして世界』（講談社、2006年）は、中国語に翻訳され、『關於現代建築的16章』（謝宗哲訳、田園城市、2010年）が刊行された。『建築はいかに社会と回路をつなぐのか』（彩流社、2010年）は、他者の視点から記述した建築史と現代建築・都市の批評を含む、一連の議論の集大成的な内容である。

### ○編集と展覧会

以上は単著に関する仕事だが、編集関係の業績としては、次のものが挙げられる。

大学院のときに建築批評の同人誌『エディフィカール』を制作して以降、雑誌『10+1』や『建築文化』の責任編集、あるいは編著者として、みすず書房、河出書房新社、彰国社などの書籍を企画した。例えば、『10+1』14号（1998年）の特集「現代建築批評の方法」、耐震偽装の問題を論じた『見えない震災』（みすず書房、2006年、編著）、増改築社会を討議した『リノベーション・スタディーズ』（INAX出版、2003年、編著）、著名建築家の出発点となる卒業設計のデザインを調査した『卒業設計で考えたこと。そしていま』（彰国社、2005年、編著／2008年に中国語訳も刊行）などである。また3万5千部刊行されている日本建築学会の機関誌『建築雑誌』については、編集委員を二期つとめた後、2008年と2009年は編集委員長として新機軸を打ちだした。

現代建築への批評活動から展開し、筆者は、ギャラリー間、KPOキリンプラザ大阪、森美術館、東京都現代美術館、愛知芸術文化センター、静岡クリエイター支援センターなどの建築・美術の展覧会において、キュレーション、企画協力、公募の審査も担当するようになった。これは言葉だけで終わらせるのではなく、実践的な批評の活動として位置づけることができ、次世代の新しい動きを起こすことに寄与している。

海外への情報発信としては、企画コンペに勝利し、ヴェネチア・ビエンナーレ国際建築展2008の日本館コミッショナーを担当したほか、リスボン建築トリエンナーレ2007の日本セクションのキュレーションや、ウィーンのハウジングモデル展における日本のパート監修などを手がけた。ロッテルダム建築博物館が開催した「Towards total scape」展（2000年）や、メルボルンの「Rapt!」展（2006年）のシンポジウムでは、日本の現代建築について講演を行った。黒川紀章、手塚建築研究所、遠藤秀平らの海外における展覧会カタログや、建築論の書籍にも寄稿した。また海外の建築雑誌では、イタリアの『domus』、韓国の『空間』、スペイン、トルコ、中国の建築雑誌などに日本の現代建築論を寄稿している。

### ○企業委託のデザイン研究

五十嵐研では、企業の委託によるデザインの調査を実施している。

窓学は、2007年、2008年、2009年、2010年と続く、東京工業大学の塚本由晴研究室、東京大学の千葉学研究室、武蔵工業大の手塚貴晴研究室のほか、小玉祐一郎、原広司との合同研究である。五十嵐研では、窓の歴史を担当した。単に意匠論を展開するのではなく、さまざまなテクノロジーの結節点として窓をとらえ、大きな技術史の枠組から窓の歴史を調査した。その成果は、『日刊建設通信新聞』における「窓から建築を考える」の連載で紹介され、総数は34回に及ぶ（現時点では全40回の予定）。2011年には彰国社から書籍としても刊行予定である。

大和ハウスの家型研究は、2006年、2007年、2008年の三年間継続した。現代における住宅のあり方を調査した後、家型というテーマに集約し、デザインの多様性と可能性を分析した。最後は、理論を実践すべく、国際展の横浜トリエンナーレ2008において、リサーチを通じて導かれた新しい家型モデルを提示する1/1住宅モデルのイエノイエ・プロジェクト（平田晃久設計）を実際に建設した。またその内部に家型の研究成果を展示し、『建築ノート』の特集にも収録された。ほかにも、NTTファシリティーズから依頼を受けた、旧銀行を展示スペースに転用する岐阜徹明ギャラリー・プロジェクト（2006年）、真如苑のプロジェクトMURAYAMAの基礎となる聖地研究（2007年）、ファイブ・ミニッツの世界の広場研究（2009年）などを行っている。

ヴェネチア・ビエンナーレ国際建築展2008の展示プロジェクトに関しては、ユニオン造形財団の温室研究（2008年）の助成を受けて、研究室の学生を現地に送り込み、国際展の現場を経験させた。リスボン建築トリエンナーレ2007、横浜トリエンナーレの設営でも、同様に学生に協力してもらった。

東北大学の都市・建築デザイン学講座の特徴である理論分野を座学に終わらせるのではなく、編集や展覧会の企画などの具体的な実践につなげて、教育にもとり入れている。編集は、企画の立案から、原稿の依頼、取材、インタビュー



ヴェネチアビエンナーレ建築展2008の日本館



横浜トリエンナーレ2008の展示



学生によるビエンナーレ設営の現場

や座談会の文字起こし、エディトリアル・デザインまで、総合的な情報の加工とプレゼンテーションの作業を含み、社会に出ても、さまざまな場面で役立つ教育的な効果が大い。学生にも積極性や自発性が生まれるだろう。

海外の建築系の大学や教育機関では、イェール大学やAAスクールなど、すぐれた建築理論誌を刊行しているところが見受けられるのに対し、日本では民間の雑誌に頼り、大学ではほとんどない。だが、現在、大きなメディアの変革期を迎え、民間の建築雑誌も廃刊や休刊が相次ぎ、厳しい状況に置かれている。それゆえ、今後はネットだけではなく、大学からの情報発信も重要になるだろう。2006年からは五十嵐研が編集を担当し、デザイン系の活動報告を行う、タブロイド形式のメディア『トンチク』も刊行している。今後は、国内外にアピールできる建築メディアをつくることを視野に入れたい。

### ○せんだいスクール・オブ・デザインの試み

現在、建築界において仙台の動向は注目されている。理論のほかに、都市デザイン学やITコミュニケーション学などを含む、都市・建築デザイン学講座の制度や、日本建築学会から高く評価された教育プログラムの海外ワークショップにより、東北大学が独自性をだしているからだ。また他大学との連携で開催しているせんだいメディアテクの卒業設計日本一決定戦やレクチャーシリーズなども、デザイン系の存在感を増やしており、知人から東北で建築の一揆でも起こそうとしているのか?、とさえ言われた。今後もこうした勢いのある状態を継続すべく、研究と教育に貢献していきたいと思う。

2010年11月からは、筆者が所属する都市・建築デザイ

ン学講座が中心となって、社会人と大学院生がともに学ぶ、せんだいスクール・オブ・デザイン (SSD) という新しい教育システムが始動した。これは独立行政法人科学技術振興機構 (JST) による「地域再生人材創出拠点の形成」として採択された教育プログラムである。東北大学の都市・建築学専攻と仙台市が連携して、社会人のクリエイターと主に建築系の大学院生がともにスタジオで学び、地域で活動していく場を創出していくものだ。共同作業を得意とし、時代の変動に耐える、多規範領域型の人材を育成することが目標である。

SSDの教育プログラムには、気鋭の若手建築家である石上純也と平田晃久を迎えて、デザインと東北大学の先端的なテクノロジーとつなぎ、21世紀の建築モデルを探るFutureラボのほか、東北大学の教員によるPBLスタジオなどを用意した。例えば、筆者が雑誌をつくるメディア軸、石田壽一教授が水辺の空間をテーマとする環境軸、小野田泰明教授が仙台のコンベンション機能を検討する社会軸、本江正茂准教授が公共交通の情報システムを構想するコミュニケーション軸を担当する。今後は、多彩な受講生たちが互いに刺激しあい、同窓のネットワークを形成し、異業種間でコラボレーションを行い、地域を活性化させることが、せんだいスクール・オブ・デザインの使命となるだろう。

### 著者略歴

いがらしたろう  
五十嵐太郎

昭和42年パリ (フランス) 生まれ

平成2年3月 東京大学工学部建築学科卒業

平成9年3月 東京大学大学院工学系建築学専攻博士課程単位取得退学

平成9年4月 横浜国立大学 非常勤講師

平成14年4月 中部大学工学部 講師

平成16年4月 中部大学工学部 助教授

平成17年4月 東北大学大学院工学研究科 准教授

平成21年4月 東北大学大学院工学研究科 教授

建築史・建築批評家

「せんだいスクール・オブ・デザイン」

教員を兼任



## レスキューロボット –緊急災害救助への挑戦–

東北大学大学院情報科学研究科  
 応用情報科学専攻 教授  
 田 所 諭

### 1. はじめに

阪神淡路大震災が起きた1995年以降、レスキューロボットの研究開発がさまざまな研究機関で行われるようになりました。最近になって、実際の災害現場へも適用されるようになり、効果を上げた事例もでて参りました。

阪神淡路大震災当時、著者は神戸大学に在職しており、隣の研究室の学生が瓦礫の下敷きになって命を失うなど、とてもひどい目に遭いました。子供の頃ロボットと言えば、鉄腕アトムや鉄人28号に代表されるスーパーヒーローであり、人間が困ったときに力を発揮して、我々を助けてくれる正義の味方です。震災後に災害救助を支援するためのロボット研究を調査したところ、世界中で全く研究がなされていないということに気づき、一口ロボット研究者として愕然としたのを記憶しています。皆無ということは、10年経とうと、100年経とうと、人命を救えるロボットはできないということを意味しています。ある先生に、神戸にいる人がやらないと誰もやらないよ、と言われたことをきっかけに、できるだけ多くの人にこの問題の求解に貢献してもらおうという努力を、微力ながら重ねて参りました。それがようやく少しずつながら実を結び始めてきたことは、大きな喜びです。

現実のレスキューロボットは決してスーパーヒーローではなく、消防隊員などが行う救助活動を支援するための高度救助資機材の一種です。現在のロボット技術で自律的なサービスを行うことができるのは、家庭やオフィスのように、移動や作業のための環境が整備された環境下に限られています。つまり、災害救助現場のような場所で鉄腕アトムのようなロボットが活躍できるまでには、ナイトライダーのような自律自動車が一般に市販されるようになるよりも、さらに長い年月が必要です。

### 2. レスキューロボットの目的

レスキューロボットは、災害対応組織や重要施設などに危機管理のために配備され、消防隊員、警察官、医師、看護師などの人命救助の専門家が使用することを想定した機材です。

災害対応の専門家によれば、このようなロボットを導入する目的は次の3つです。

1) 人間に不可能な災害対応活動を可能にする。  
 たとえば地震災害の場合、狭く人間が入れない場所での捜

索・救助や、人力では動かせない重量物の撤去などがその代表例です。

2) 人間の危険を防止し、専門家の二次災害を防ぐ。  
 化学剤(有毒ガス、粉体など)・放射性物質・生物剤(ウィルスなど)・爆発性物質などの危険がある場合(CBRNE)や、酸欠のおそれがある閉鎖空間内、あるいは、火災・洪水・暴風雨などの災害環境がその代表例です。

3) 災害対応活動の迅速化を図る。  
 産業用ロボット導入の理由は、労働者の3K(きつい、きたない、きけん)からの開放、生産の効率化、製品の品質向上、であると言われていました。レスキューロボットと目的が似ていることに気づかれると思います。

以上をまとめてみると、レスキューロボットは、現在人間が行わざるをえない、あるいはどうしてもできない困難な仕事を、人間に代わって行う役割を果たす存在である、ということがわかります。

購入者は政府や自治体などの公共機関であり、安全安心に関する政策的整備計画の下に、配備が進められるものです。2010年4月の総務省の省令改正で、全国の主要都市の消防に対して、CBRNE災害に対する検知型遠隔探査装置、すなわちロボット検知システムを備えることが推奨されることになりました。今後、この省令に従って、急速に配備が進んでいくと予想されます。米国においても、災害対応部隊(FEMAなどの)のための調達基準が、NISTによるASTM標準として策定されつつあり、今後導入が進むと予測されます。

### 3. 大都市大震災軽減化特別プロジェクトのシナリオ

2002年度から5年間にわたり、文科省のプロジェクトとして地震災害を対象としたレスキューロボットの研究開発が行われました<sup>1)</sup>。図1はその主な成果を示したものです。著者はその総責任者として、全国100名以上の教授・助教授クラスの方々とともに、研究開発にあたりました。このプロジェクトがその後のレスキューロボットに与えた影響は絶大で、全国の多くの研究者がこの分野を重要なロボットの適用分野と認識し、研究を開始するに至りました。

この成果の活用シナリオは次のようなものです。平常時からセキュリティシステムとして分散センサが人の動態を見護っています。発災時には、その情報が災害対応機関に通報されるとともに、小型自律ヘリが上空から災害の概観



Autonomy) でしかありません。

図2は遠隔操縦の情報の流れを示したものです。ロボットは移動し、環境に対して作業を行います。センシングされた環境の状況は、無線通信を介して、信号処理や意味解釈により情報が強化されて、ヒューマンインタフェース(HI)によって操縦者に提示されます。操縦者は状況を認識判断して、HIを介して行動指令を発します。操縦者の指令はその意図を解釈した上で、ロボットに行動指令として送られ、ロボットが移動や作業を遂行します。このループの中には、種々の自律知能による内部フィードバックループが構成されていて、遠隔操縦を支援しています。また、自律知能を実現するためには、環境モデルの獲得と活用が重要です。

それぞれのコンポーネント、および、そのシステムインテグレーションには、図に赤字で示したような技術課題があります<sup>3)</sup>。これらの課題は、自動車などのインテリジェント化や安全化の技術課題との共通性が非常に高く、波及効果が大きいと考えられます。

図3はNEDO戦略先端技術開発プロジェクトで開発したKenafというロボットです<sup>4, 5)</sup>。このロボットは災害被害を受け危険物質の漏洩が予測される空間や、地下鉄サリン事件のような人間が入れない状況において、要救助者や漏洩物質の情報を集めることを目的としています。このプロジェクトでは、商品などが散乱した地下街700mの不整地を無線操縦によって走破すること、収集した情報をマッピングすること、が求められています。

Kenafは高い走破性能とそれを最大限に活かすための半自律操縦支援機能を最大の特徴としています。瓦礫環境を走破できるように全身がクローラで覆われたボディは、階段の途中で難なくUターンできるほどの安定性を有しています。レーザー距離計や接触センサを使って不整地の形状をリアルタイムに計測し、車体が十分な安定余裕を持つように前後のサブクローラの上下運動を制御することによって、不整地であっても転倒せず自律的に移動することができます。遠隔操縦時には、操縦者はロボットが動くべき方向を指示するだけで不整地を走行させることができます。

また、有線と無線を併用したアドホック無線LANによって、地下街の広い範囲を動きながら運動指令や映像情報を無線通信し、収集した情報をGISに集約することができます。計測した3次元の地形情報をGIS上でつなぎ合わせることで、大きな空間の3次元地図を作ることができ、建物内のようにGPSが衛星を十分に捕捉できない場合でも、ロボットの現在位置や移動経路を精度良く推定できるようになっています。

2008年には、世界最大の災害救助訓練施設Disaster City(米国テキサス州)での試験で、40m四方のコンクリート瓦礫を走破し、パンケーキ倒壊家屋内を半自律不整地走行し、3次元マッピングできることを実証しました。

このタイプのロボットについて、NIST(米国標準技術研究所)が中心となって性能評価法の世界標準、つまり

FEMA(米連邦緊急事態管理局)のファーストレスポンドーのための調達基準を策定しつつあります。その評価項目は、運動性能、情報収集性能、物体操作性、ヒューマンインタフェース、無線通信、耐久性、セットアップ容易性、などです。ロボカップのレスキューロボットリーグの競技フィールドはNISTが設計しており、この標準評価法を策定するための事前試験として活用されています<sup>6)</sup>。Kenafは2007年のアトランタ大会、2009年のグラーツ大会で遠隔操縦による運動性能競技で2回の世界優勝を果たしており、世界有数の運動性能を持つことが実証されています。我々のチームの活躍はTBSのドキュメンタリー番組「夢の扉」で30分間にわたって紹介していただきました。



図3 Kenafと災害訓練施設の3次元地図

## 5. 瓦礫内での要救助者の探索

完全に崩壊した建物の中に取り残された要救助者を探索するには、数cmの開口部からセンサを瓦礫内部に進入させ、生体反応を検知する必要があります。現在は、サーチカム(伸縮棒で瓦礫に差し込むカメラ)やファイバースコープが使われていますが、探索できる距離が短く、障害物の先に進むことができないという問題があります。

図4の能動スコープカメラは、この問題を解決するために開発されたヘビ型ロボットです<sup>7, 8)</sup>。繊毛振動駆動という特殊なアクチュエータ原理を使い、ビデオスコープのケーブル表面全体に分布的に駆動力を発生させることによって自走機能を持たせてあり、幅3cmの開口部から深さ8mまで進入して内部映像を撮影することができます。複雑な瓦礫形状に沿って動ける柔軟構造、ケーブルのねじりにより進行方向を制御する機能、瓦礫環境での壊れにくさ、にその特徴があります。また、振動によって摩擦係数が1桁下がるために、引き抜き時に引っかかりにくいという長所も有しています。この技術によれば、瓦礫のみならず、配管内部や建築構造物の狭く深い場所に容易に挿入することができるため、従来のビデオスコープでは困難な場所を検査することも可能です。

2007年にジャクソンビル(米国)で発生した建設倒壊事故の原因調査に活用され、瓦礫の下7mの深さの柱の亀裂やコンクリート剥離面の映像を撮影し、倒壊メカニズム解明のための基礎資料を提供することができました。2009年のケルン公文書館(ドイツ)の崩壊事故の際に人命救助に出動しましたが、救助の成果を挙げるには至りませんでした。能動スコープカメラは、2008年の「今年のロボット」大賞優秀賞(公共・フロンティアロボット部門)を受賞し、

2009年5月には、オリンパス(株)から自走式ガイドチューブとして製品発表がなされています。



図4 能動スコープカメラと事故現場への適用

## 6. 未来への展望

レスキューロボットは学術的にはフィールドロボティクスの一分野です。現在日本で発表されている多くのロボットは屋内サービスを中心としていますが、レスキューロボットは屋外や野外を対象とすることが大きな違いです。屋外、特に災害地であるが故に、センシング・移動・作業・遠隔操縦・通信等の難易度が高いこと、ロボットが動作するための環境整備（環境構造化）が困難であること、がその特徴です。

そのため、屋外で使われているさまざまなインテリジェント機械（自動車や建設機械など）と共通の技術課題を有しています。将来、電気自動車が主流になるにつれ、フィールドロボットと自動車との境界はさらに曖昧になり、分野相互の技術融合が進むと同時に、サービスのためのインフラ共有も進んでいくと考えられます。

ファーストレスポンス用の資機材は市場規模が小さいため、技術高度化のための研究開発に対しては政府や自治体の公的な予算措置が必要です。一方で、自動車をはじめとするさまざまな技術の開発成果を活用することが、その技術的発展のためには重要だと考えています。その考えから、東北大学次世代移動体システム研究会の主要メンバーとしての研究も同時に進めています。

地球温暖化に伴って、自然災害が増えてきています。それにとともに、人命救助の重要性はますます高まってきていると思います。日本は平和国家であり、技術立国を標榜しています。日本に求められる姿は、持てる技術を使って、世界の平和のために貢献することではないでしょうか。米国が世界の警察なら、日本は世界の消防になるべきだと考えます。

昔、大富豪が財産をなげうって高度な機材を開発し、南海の島に国際救助隊を結成して、人命救助を行う、というテレビ人形劇「サンダーバード」が作られました。この基地を実際に作ったらどうなるか、前田建設工業にご協力いただき、見積もりを作っていただきました<sup>9)</sup>。もしかすると、遠い未来にはこれはSFではなく、現実の世界になるかもしれません。

災害が無くなることは未来永劫にわたってありえず、緊

急時の人命救助の重要性は論を待ちません。ロボティクスがそのための一助となることを願っています。

## 【参考文献】

- 1) S. Tadokoro Ed., Rescue Robotics - DDT Project on Robots and Systems for Urban Search and Rescue -, Springer, 2009.
- 2) 田所、北野監修、ロボカップレスキューー緊急大規模災害救助への挑戦一、共立出版, 2000.
- 3) 田所、レスキューロボットの技術チャレンジ、日本ロボット学会誌Vol. 28, No. 2, 2010.
- 4) NEDOBOOK、RTスピリッツ、2009.
- 5) 田所、閉鎖空間内高速走行探査群ロボット、日本ロボット学会誌、Vol. 27, No. 10, 2009.
- 6) 田所、ロボカップレスキューーロボットリーグ、日本ロボット学会誌、Vol. 27, No. 9, 2009.
- 7) M. Konyo, S. Tadokoro et al, A ciliary vibration drive mechanism for active scope cameras, J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 20, No. 3, pp. 490-499, 2008.
- 8) S. Tadokoro et al, Application of active scope camera to forensic investigation of construction accident, Proc. IEEE ARSO, 2009.
- 9) <http://www.maeda.co.jp/fantasy/project04/01.html>  
前田建設ファンタジー営業部ウェブページ

## 【著者略歴】

たどころ きよし  
田所 諭

昭和35年1月9日生

昭和59年 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻  
修士課程修了

平成5年 神戸大学工学部情報知能工学科助教授

平成11年 ロボカップレスキューー創設

平成12年 計測自動制御学会レスキューー工学部会創設

平成13年 IEEE Robotics and Automation Society, TC on  
Safety, Security and Rescue Robotics創設

平成14年 NPO法人国際レスキューーシステム研究機構設  
立、会長、現在に至る。

平成17年 東北大学大学院情報科学研究科応用情報科学  
専攻教授、現在に至る。



## イノベーションを通してライフスタイルを 変えることができるのか

東北大学大学院環境科学研究科  
環境科学専攻 准教授  
古川 柳 蔵

### 1. はじめに

地球環境問題は、世界全体の問題として認識されてきている。日本は資源、エネルギー、食料など輸入に頼っているため、地球環境問題がさらに深刻になれば、強い環境制約の影響を受けることは避けられない。

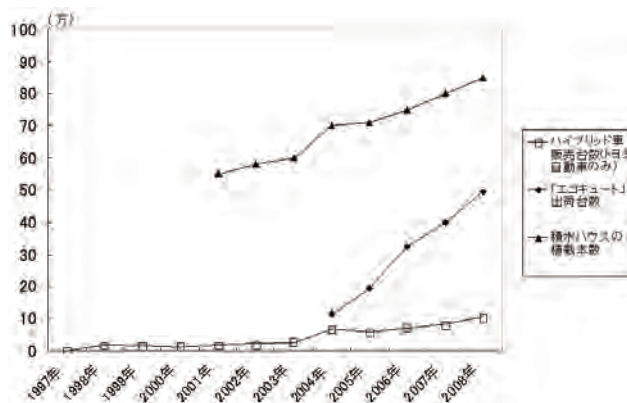
既に、環境制約の影響を受けて、人々の意識も変化してきている。環境負荷低減に貢献したいという「環境ニーズ」の出現である。環境ニーズは人々の環境問題に対する意識の偏りを持ちながらも、徐々に、イノベーションに影響を与え始めている。このイノベーションは、消費者の行動を個別に最適化するものから、街全体の取り組みや地域の取り組みといったように、ある消費者群の行動を最適化するものへと変わりつつある。例えば、エネルギー多消費機器において、機器そのもののエネルギー消費効率を上げるだけでなく機器の使用段階をも含めて、低環境負荷になるような技術が搭載されるようになった<sup>1)</sup>。しかし、このように機器使用全体の環境負荷の最適化がなされているのはほんの一部であり、多くのイノベーションは依然として、個々の商品を低環境負荷にする部分最適化のみに注力されている。ライフスタイル全体を低環境負荷にする全体最適化の方向に向かっていない。このように、生活者個人の欲を満たし、ニーズを満たし、技術者のシーズを満たすだけに注力した制約がないイノベーション・システムのままでは、人間活動の肥大化は止められない。イノベーションを全て中止するというのではなく、ライフスタイルを低環境負荷に変える全体最適化を目指したイノベーションをいかにして創出し、環境制約の中においても楽しく豊かな暮らしを実現するイノベーション・システムにいかに移行するかが重要な課題である。

### 2. 環境ニーズが力を持ち始めた

環境ニーズがいつ誕生し、いつから拡大したかということは特定できないが、日本においては、2004年か2005年あたりから、環境ニーズの高まりがデータにより裏付けられる。

その傾向をデータで見てみたい。企業による環境配慮活動の一つとして、環境配慮型製品の販売がある。環境配慮型製品の販売数の推移をみると、2004年あたりから顕著に増加していることを示すデータがある。図1に、トヨタ自動車のハイブリッド車の販売台数（「プリウス以外も含

む」）、積水ハウスの「5本の樹」と呼ばれるサービスを含めた積水ハウスによる植栽本数の推移及びエコキュートの出荷台数を示した。



出典)「エコキュート」出荷台数は、社団法人日本冷凍空調工業会資料  
ハイブリッド車販売台数は、トヨタ自動車調べ  
積水ハウス植栽本数は、積水ハウスサステナビリティレポート  
2009。この内、「5本の樹」サービスによる植栽効果は約50%

図1 環境配慮型製品（ハイブリッド自動車、5本の樹、エコキュート）の販売数の推移

トヨタ自動車のハイブリッド車の「プリウス」は、1997年に発売された。2003年には2代目「プリウス」が発売され、2004年に売上が増加し始めた。その後はミニバン、SUV、FRセダンなど同様の技術の搭載車種が拡大され、2009年には3代目「プリウス」が販売された。2009年8月には国内外のハイブリッド車の累計販売台数が200万台を超えた<sup>2)</sup>。トヨタ自動車の「Sustainability report 2009」によると、トヨタ自動車はハイブリッド車を1997年から2009年4月までに累計180万台以上販売し、1000万トン以上のCO<sub>2</sub>排出量削減に寄与（トヨタ自動車試算）したことが報告されている。

積水ハウスでは、庭づくりやまちづくりを考えると、日本の豊かな自然を育ててきた「里山」を手本に、顧客に対して、地域風土に適した日本の原種や自生種、在来種の樹木を植える「5本の樹計画」を2001年に開始した。「3本は鳥のために、2本は蝶のために。地域に合わせた日本の在来樹種を」をスローガンに自然環境を再生させようとする提案である。その後、「5本の樹計画」の寄与があり、積水ハウスの年間植栽本数は年々増加し、日本で最も植栽する企業となった。積水ハウスへの聞き取り調査によれ

ば<sup>3)</sup>、図1に示された年間植栽本数のうち、およそこの50%が「3本の樹」のサービスによる植栽本数であった。この5本の樹計画を実施した顧客は、子どもと一緒に「自然観察会」に利用している<sup>4)</sup>。この計画はプリウスなどと異なり、CO<sub>2</sub>排出量の削減効果を定量的に表すことができないが、自然と共生することへの第一歩になるものである。

「エコキュート」と呼ばれている家庭用CO<sub>2</sub>冷媒ヒートポンプ給湯器の出荷台数は、日本全体で2004年に約12万台、2008年に年間約50万台にまで増加した<sup>5)</sup>。

ここで紹介した事例は一部にすぎないが、その他、環境ニーズの拡大を裏付ける数多くのデータは存在する。

また、人々の意識については、世論調査のデータにより裏付けられる。「社会意識に関する世論調査」(内閣府、平成21年1月実施)によれば、日頃、社会の一員として、何か社会のために役立ちたいと思っているか、それともあまりそのようなことは考えていないかという質問に対して、「思っている」と回答した者の割合が69.3%であり、「思っている」と答えた者(4,080人)に、何か社会のために役立ちたいと思っているのはどのようなことかについての質問に対して「自然・環境保護に関する活動(環境美化、リサイクル活動、牛乳パックの回収など)」を挙げた者の割合が2006年以降上昇しており、2009年ではその割合は41.6%であった。

筆者の聞き取り調査によると、エネルギー多消費機器(エアコン、冷蔵庫、テレビ、照明)においては、1990年代後半、消費者の環境ニーズの声が、量販店の販売員などを通して環境配慮型製品の技術者の耳にも届くようになった。そして、企業は即座にイノベーションの方向性を変える努力を始めたのである。エアコン、冷蔵庫、テレビ、照明といったエネルギー多消費機器には、トップランナー基準という環境規制が導入されており、環境規制の影響を強く受けていたが、基準値を達成してもイノベーションの努力は終わろうとはしなかった。環境ニーズの影響を強く受けることによって、省エネ技術のイノベーションが変化することになったのである。そして、近年のエネルギー多消費機器のイノベーションは、機器そのもののエネルギー消費効率を向上する技術開発から、機器の使用段階におけるエネルギーロス削減を技術開発へ移行したのである。例えば、三菱電機のムーブアイは、センサーを搭載し、人がいるところを集中的に空調するようになった。今まで人がいないところも全て空調するように技術開発がなされていたのが、使用者に合わせて無駄を減らした空調をするようになったのである。この現象は、環境規制が直接影響を与えているのではなく、環境ニーズを満たすために実現したイノベーションであり、ついに、環境ニーズがイノベーションを促進する力を持ち始めたと言えるのである。しかし、いまだ生活者のライフスタイルを低環境負荷に変えるほどには至っていない。

### 3. イノベーションは環境負荷低減に貢献しているのか

現在生じているイノベーションは、都合よく全てが環境負荷低減に貢献するというものではない。イノベーションには、既存のものと比較して、環境負荷を増大させるものと環境負荷を低減させるものの両者が存在する。環境負荷を低減させるとは言っても、イノベーションがどの程度どの範囲で環境負荷を低減させるかは様々である。この10年間で、地球環境問題が国際会議で取り上げられ、企業は様々な解決策を考え、実行し、多くの学会が設立し、また、地球環境の劣化の科学的な根拠が示されるようになった。イノベーションを取り巻く環境は大きく変化した。生活者は「環境問題に貢献したい」という環境ニーズを持つようになった。しかし、いまだ解決への道のりは険しく遠い。日本は環境分野で競争力があるとも言われるが、環境イノベーションは日本の環境負荷を、あるいは世界の環境負荷を下げることにどの程度貢献しているのだろうか。

省エネ家電、太陽光発電、燃料電池、ハイブリッド車、電気自動車(EV)、エコキュート、エコバッグ、その他環境配慮型商品が次々と登場したにもかかわらず、また、地球温暖化を回避するためにCO<sub>2</sub>排出量を削減するという国の目標が設定されているにもかかわらず、CO<sub>2</sub>排出量は1990年比で増加している。CO<sub>2</sub>の排出量は、2007年時点で、1990年比では日本全体で14.0%増加し、家庭部門だけを見ると41.2%増加してしまった。産業部門は、最もCO<sub>2</sub>を排出している部門であり、日本全体のCO<sub>2</sub>排出量の36.1%を占めているが、1990年比でCO<sub>2</sub>排出量は2.3%減少するにとどまった<sup>6)</sup>。なぜ、国、企業や個人がCO<sub>2</sub>排出量を削減する様々な努力をしているのに、これらのデータに示されるように、CO<sub>2</sub>排出量が大きく減少していかないのだろうか。

イノベーションのプロセスで考えれば、どのプロセスにどのような問題があるのか明らかとなる。まず、第一に考えられる要因は、環境配慮型商品の普及率がいまだに低いことである。いかに省エネ・省資源の環境配慮型商品が商品化されたとしても、普及率が低ければ、イノベーションの効果が日本全体のCO<sub>2</sub>排出量に現れない。

第二に、使用されている機器の省エネ効率が改善されたとしても、CO<sub>2</sub>排出量がこれらの機器の実際の使用方法や使用量によって大きく変動してしまう要因が挙げられる。例えば、ハイブリッド車の燃費が通常のガソリン車の2倍良いと仮定する。ところが、ある人がハイブリッド車の乗り心地があまりにもよいため、通常のガソリン車で走行するよりも3倍の距離を同期間において走行してしまった。この場合、ハイブリッド車に乗り換えることにより、CO<sub>2</sub>排出量が増加してしまう。つまり、省エネ機器の使用法次第で、省エネでない商品の使用を控えて保有しているよりも環境負荷が悪化してしまう場合もあり得るのである。

第三には、個別技術の低環境負荷化の程度が少ないという要因が挙げられる。ある技術開発の結果、数% CO<sub>2</sub>排出量が削減されたという要素を積み上げて全体で数10%削

減する効果はないのである。

第四には、イノベーションによる人間活動の肥大化が自ら制限する方向にコントロールされていないことが要因として挙げられる。図2のように、現在のイノベーションが商品やサービスの部分最適化を目指しており、消費者のニーズが拡大し、技術者のシーズが拡大するにしたがい、イノベーションが拡大していく構図になっているのである。全体最適化という制約の中のイノベーションを促さなければ肥大化をコントロールできないのである。

第五には、ライフスタイルを低環境負荷に変えるイノベーションが起きていないという要因が挙げられる。これまでと同じタイプの商品やサービスを利用しながら同じライフスタイルを維持する限り、個々の商品やサービスの環境負荷低減度合いに依存してしまい、抜本的に環境負荷を低減することができないのである。「この商品はあなたの現在のライフスタイルを、楽しく豊かな低環境負荷なライフスタイルに変えてしまいます」というキャッチフレーズの商品やサービスはほとんどないことからわかるであろう。

現状では、上記の第一の要因については、普及促進問題の解決に向けて、様々な国や地方自治体による施策が導入され始めており、徐々に、第二の要因を解決する施策や技術が登場し始めている段階であろう。第三の要因については、技術者がその限界の壁にぶつかり、認識を強め始めている段階であろう。第四、第五の要因については、ほとんど着目されていないのが現状である。

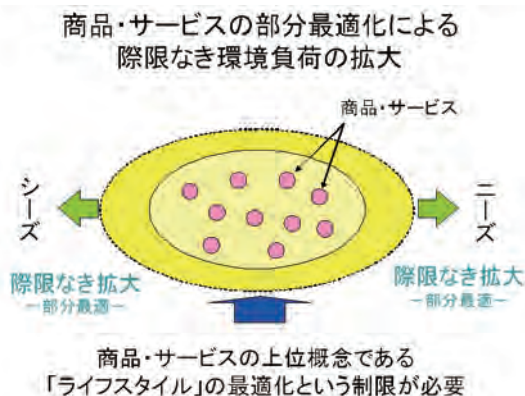


図2 イノベーションと人間活動の肥大化の関係のイメージ図

#### 4. ライフスタイルを低環境負荷に変えるイノベーションをいかにして創出させるか

筆者は、前述の第四と第五の要因をクリアするために、ライフスタイル・デザインという手法を開発した。将来の厳しい環境制約下において、豊かな暮らしのかたちをデザインする手法である。描いた暮らしのかたちに必要な商品、サービス、制度や政策を検討していくという事業戦略立案、あるいは政策立案の手法である。

本手法では、まず、将来の環境制約条件、例えば、環境制約が厳しくなる2030年の日本の人口、エネルギー、資源、

地球温暖化、水資源、食料等という大きなくくりでのトレンドを可能な限り、信頼の置ける国のデータ等を用いて定量的に把握する。

次に、この環境制約条件のもと、自分で考えられる社会状況を想像する。例えば、ガソリン代が3倍ぐらいに高騰するのであれば、自動車を使う人が減り、道路がすいてくる、あるいは、車線が余ってしまうかもしれない。例えば、電気代が高値になれば、冷蔵庫に保存することが経済的に不利になり、冷蔵庫を使わない干物を食べる人が増えるかもしれない。そうなれば、家の中は匂いが今よりも充満するかもしれない。このように、環境制約条件から類推できる社会状況を想像する。続いて、バックキャストを行う。2030年にいる自分から見て、現在のままでは大変なことになってしまうと思われる問題を見つけ、発見した問題を解決するソリューションを探索する(図3)。

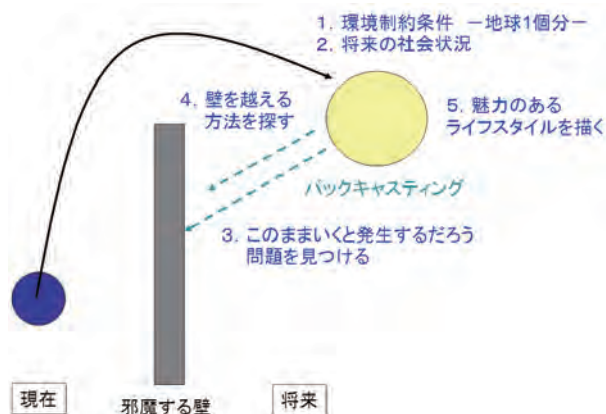


図3 バックキャストの思考プロセス

そして、最後は、取り上げた問題と、そのソリューションを含んだ新しい暮らしのかたちを描き、その暮らしに必要な商品、サービス、政策等を考える。これがライフスタイル・デザインである。ライフスタイルの構成要素は、想像した「社会状況」、このまま進めば環境制約を受けて問題になるという「問題」、それを「クリアする方法(ソリューション)」、クリアした後にある「豊かな暮らし」と「生活者が享受する新価値」がセットになる。例えば、図4は筆者がこれまで描いたライフスタイルの例である<sup>7)</sup>。

この手法により描いた50種類のライフスタイルについて、新規構築したライフスタイルの評価手法を用いて、ライフスタイルの構造と社会が受け入れやすさを示す社会的受容性の関係について分析した。その結果、ライフスタイルの中に、「自然があふれている」、「社会とつながりがある」、「自分を成長できる」、「楽しみがある」という要素が含まれていることが、社会的受容性を高めていることが明らかとなった。また、「不便」という要素が含まれていても社会的受容性を大きく下げる決定的な要因にはなっていないことも明らかとなった。これらの結果を踏まえてライフスタイル・デザインを行えば、社会的受容性のより高いライフスタイルを描けるようになると思われる。

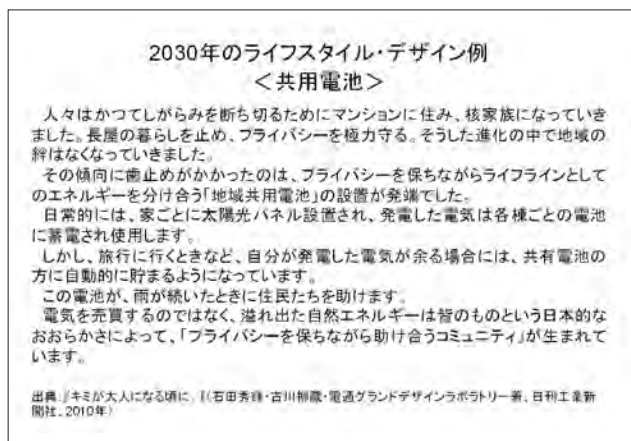


図4 2030年のライフスタイル・デザイン例

本手法を用いて複数の企業と共同研究を進めている。企業が独自のライフスタイルを描き、生活者に新しい低環境負荷なライフスタイルを提案する企業が今後増えていくであろう。

## 5. おわりに

東北大学大学院環境科学研究科のエコラボでは、この手法を用いて創出された新しいビジネスモデルとそれに必要な技術開発を実際に進めているところである。エコラボで取り組んでいる、家の中で未利用な自然エネルギーである微弱エネルギーに着目した「家の中でエネルギーをつくる」というライフスタイルや、「近所の人と自然エネルギーを共有する」というライフスタイルを目指した技術開発は、本手法の成果の一つである。

## 【参考文献】

- 1) 古川柳蔵著『環境制約下におけるイノベーション』、東北大学出版会（2010）
- 2) トヨタ自動車ニュースリリース（2008年5月15日）
- 3) 積水ハウスへの聞き取り調査を2009年9月1日に実施
- 4) CHIBIKOTO July 2008
- 5) 社団法人日本冷凍空調工業会「家庭用エアコン・業務用エアコン・家庭用ヒートポンプ給湯機の月ごとの国内出荷の推移」
- 6) 温室効果ガスインベントリオフィス、『日本の温室効果ガス排出量データ』（1990～2007）<http://www-gio.nies.go.jp/index-j.html>
- 7) 石田秀輝、古川柳蔵、電通グランドデザインラボラトリー著、『キミが大人になる頃に。環境も人も豊かにする暮らしのかたち』,日刊工業新聞社（2010）

## 【著者略歴】

ふるかわ りゅうぞう  
古川 柳蔵

- 平成8年3月 東京大学工学部材料学科卒業
- 平成10年3月 東京大学大学院工学系研究科材料学専攻修了
- 平成10年4月 株式会社三菱総合研究所入社
- 平成14年10月 東京大学大学院工学系研究科  
先端学際工学専攻博士課程入学
- 平成17年9月 東京大学大学院工学系研究科  
先端学際工学専攻博士課程修了  
博士（学術）取得
- 平成17年9月 東北大学大学院環境科学研究科  
高度環境政策・技術マネジメント人材養成  
ユニット 助教授
- 平成22年4月 東北大学大学院環境科学研究科  
環境技術イノベーション分野 准教授（現職）

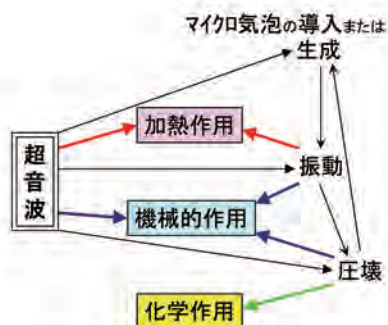


## 選択的超音波治療

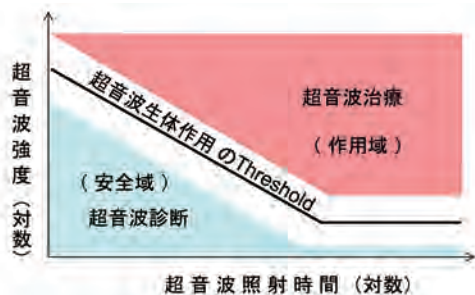
東北大学大学院医工学研究科  
医工学専攻 教授  
梅村 晋一郎

### 1. はじめに

超音波の生体作用を分類するとは図1のようになる。超音波は機械的振動であるから、生体に機械的作用を及ぼすのは当然として、超音波が生体に吸収されて熱が発生し加熱作用を及ぼす。また、図2には、超音波治療の作用域と超音波診断の安全域と、それを分ける超音波強度の閾値を超音波照射時間に対してプロットした。超音波のエネルギーは、分子レベルでは光などに比べて小さく、高強度集束超音波 (HIFU: High Intensity Focused Ultrasound) 治療に用いられるような  $1 \text{ kW/cm}^2$  レベルの高い超音波強度であっても  $10^{-4} \text{ eV}$  程度であり、生体に不可逆変化を与える水素結合の切断に必要なエネルギーの  $1/300$  から  $1/30$  にすぎない。従って、超音波が生体に不可逆変化を与えるには、そのエネルギーを時間的または空間的に蓄積するメカニズムが必要である。図2において、生体作用を及ぼすに必要な超音波強度が概ね超音波照射時間に対し単調に減少するのは、そのためである。熱としての蓄積は、エネルギーの時間的蓄積として最も一般的なものであろう。さらに、マイクロ気泡は、超音波のエネルギーを時間的および空間的に蓄積して放出する。図1に示したように、マイク



<図1 超音波の生体作用>

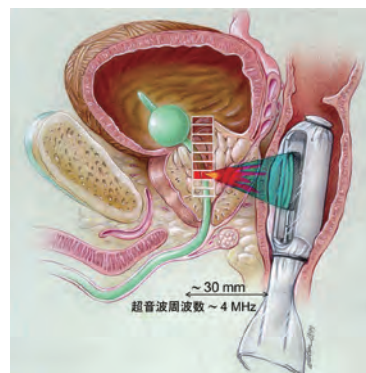


<図2 超音波治療の作用域と超音波診断の安全域>

ロ気泡が存在すると、超音波は、より大きな加熱作用や機械的作用を及ぼし、条件が揃えば化学作用さえも発生するようになる。

### 2. 集束による選択性

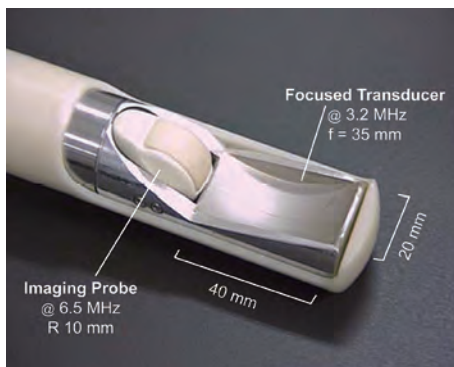
超音波は、生体中で集束効果を生じ得る人体の  $1/1000$  から  $1/100$  の波長において、適度な吸収および減衰係数をもつ。これは、放射線を除く電磁波にはない集束波治療に適した特長である。そのような超音波の加熱作用を利用する高強度集束超音波治療が、図3に示すような経直腸的前立腺癌の治療手段として臨床的に実用化されてから10年以上になる。前立腺に近い直腸内から超音波を照射する方式なので、生体中の超音波伝播距離を数 cm に抑えることができ、生体による吸収の大きな数 MHz の超音波周波数を採用可能となっている。生体の超音波吸収は周波数におよそ比例する傾向をもつので、高い超音波周波数を用いるほど加熱作用を用いる超音波治療に有利と考えがちであるが、吸収はそれによる減衰をとまうので、それは正しくなく、治療目標組織への超音波伝播距離におよそ反比例する周波数を選択する必要がある。



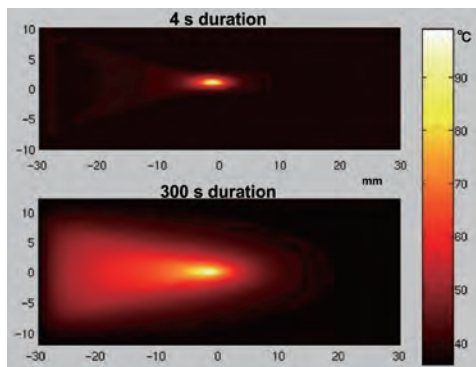
<図3 高強度集束超音波による経直腸の前立腺治療>

図4は、同様の目的のために我々が試作した集束超音波トランスデューサであり、図5は、そのような集束超音波により生体中に形成される温度分布を数値計算により求めた結果である。超音波照射時間が  $4 \text{ s}$  と短い場合と、血流量によりきまる生体の熱的時定数より長い  $300 \text{ s}$  の場合についてプロットした。超音波強度は、それぞれ照射終了時点で最高温度が  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  に達するように選んだ。Fナンバー1 程度の強い集束を行っているので、超音波のフォーカル

スポットは、ビーム幅 2 波長程度、長さ 10 波長程度の葉巻型である。ここでは、超音波波長が約 0.5 mm なので、フォーカススポットは、幅 1 mm 程度、長さ 5 mm 程度とコンパクトである。超音波照射時間 4 s の場合には、生体組織が超音波を吸収して発生した熱が、熱伝導によって周囲に拡散する時間がないため、超音波のフォーカススポットとほぼ同様の温度分布が得られている。これに対し、超音波照射時間 300 s の場合には、はるかに広い温度分布となっている。図 3 の臨床治療では、この短い照射時間 4 s のあいだにフォーカススポット中の組織を加熱凝固し、超音波の集束による幾何学的選択性を生かした治療を実現している。



<図4 経直腸的前立腺治療のための試作集束超音波トランスデューサ>

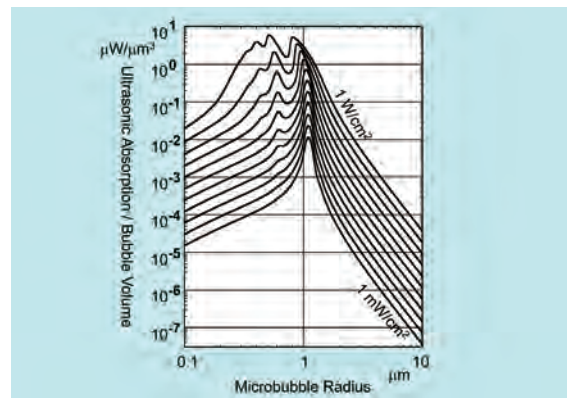


<図5 集束超音波照射による生体組織温度分布>

コンパクトなフォーカススポットは、優れた幾何学的選択性という特長をもたらす反面、1 回の集束超音波照射で加熱凝固できる体積が著しく小さいために目標組織全体を治療するに要する時間が長くなってしまいうという難点を同時にもたらす。1 回の照射時間が 4 s と短いので、治療目標組織中を次々と焦点を移動して超音波照射すれば、治療時間を節約できると考えがちであるが、それは正しくない。焦点を移動しても休みなく超音波が通ることになるので、その温度分布は、図 5 の 300 s 照射時に近いものになってしまう、結果として、優れた幾何学的選択性という特長そのものを失うことになってしまう。これを防ぐため、1 回の照射と次の照射の間に冷却時間をおくので、目標組織全体を治療するに要する時間が長くなってしまいうわけである。

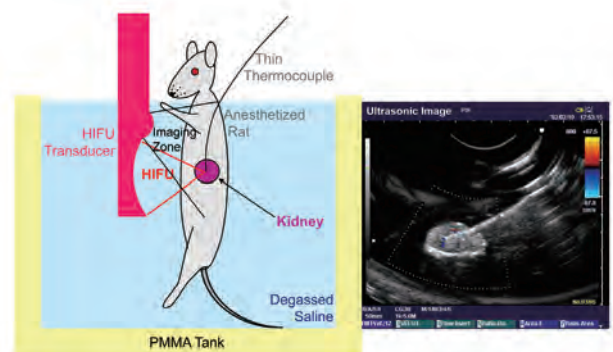
### 3. マイクロ気泡による加熱作用の増幅<sup>1)</sup>

マイクロ気泡には、図 1 に示したような超音波の生体作用を増幅する様々な効果があるので、これを利用することによって上記の難点を克服することが考えられる。このような動機にもとづき、マイクロ気泡 1 個が熱に変換する超音波エネルギーを数値計算し、図 6 に、気泡体積あたりの値を静止半径に対してプロットした。超音波強度は  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  から  $1 \text{ W}/\text{cm}^2$  まで対数的に 10 段階変化させた。計算された値から、血中に体積濃度としてわずか 1 ppm 程度のマイクロ気泡が存在すれば、生体の超音波吸収が倍増すると予想される。この濃度は、超音波診断用に開発された安定化マイクロ気泡の認可投与量を人体に与えることによって達成できる範囲に充分入っている。



<図6 マイクロ気泡の超音波吸収>

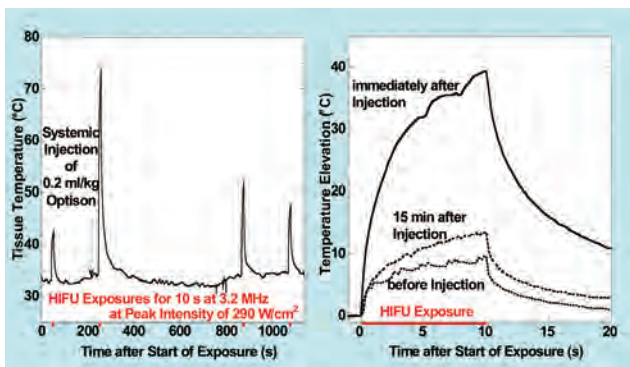
そこで、図 4 の集束超音波トランスデューサを用い、図 7 のようなセットアップにてラットを用いた動物実験を行った。麻酔したラットの腹壁を小さく切開し、その切開口を通して、脱気した  $33 \text{ }^\circ\text{C}$  の生理的食塩水中へ、腹腔より左腎臓を引き出した。超音波照射による熱電対と生体組織との摩擦に起因する発熱を防ぐため、直径 0.25 mm の非常に細かいクロメル・アルメル熱電対を用い、これを腎臓の超音波焦点位置に刺入した。集束トランスデューサに対するラットの相対的位置は、超音波の焦点位置において熱電対の感度が最大になるように決定した。まず、トランスデューサに組み込まれている周波数 6.5 MHz、曲率半径 10 mm の小型コンパックス・アレイ・超音波プローブにより得た B モード断層像を用いておおまかに位置決めをし、次に、低い強度で集束超音波照射を行って超音波照射によ



<図7 動物実験のセットアップ>

る温度上昇が最大となる位置を求めた。安定化マイクロ気泡としては、米国で超音波造影剤として認可されている Optison を用いた。実験動物は、日本学術会議提案のガイドラインに従って取り扱った。

実験結果を図8に示す。左の図には、同じ超音波強度  $290 \text{ W/cm}^2$  における同じ照射時間10sの集束超音波照射による腎組織の温度をOptison 0.2 ml/kg 投与の前1回、後3回の照射についてプロットした。Optison の投与は横軸上時刻 210 s にて行った。また、右には、このうち3回分の温度上昇曲線を、時間軸を拡大して重ねることによって比較した。Optison 投与直後の集束超音波照射では、投与直前の照射に比べて4～5倍もの温度上昇を得ることができた。また、別の実験により、Optison 投与前を基準とした温度上昇の増加分が、Optison 投与後の経過時間とともに対数的に減衰することが確かめられ、体内に残留する Optison 濃度に比例することが推定された。

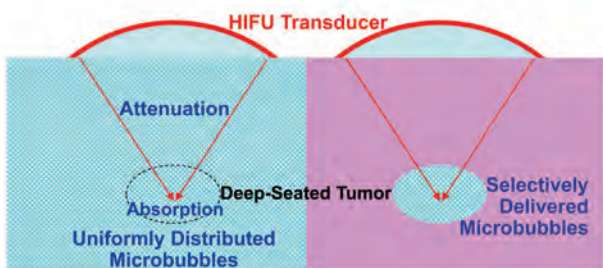


＜図8 安定化マクロバブル投与による超音波加熱の増幅＞

安全性の確かめられた臨床的に用い得る投与量範囲の安定化マイクロ気泡により、4～5倍という顕著な超音波加熱の増幅効果が得られたことは、この種のアプローチの高いポテンシャルを示している。

#### 4. マイクロ気泡の選択的分布

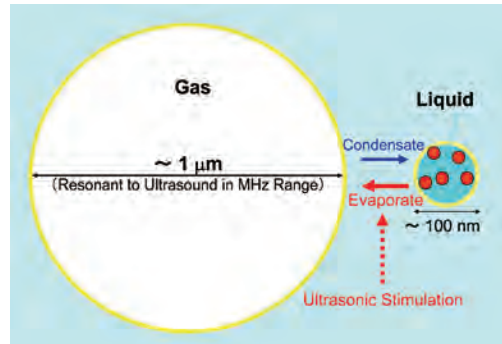
しかしながら、図9中左のように、マイクロ気泡が全身にわたって似たような濃度で分布していたのでは、超音波が焦点まで伝播する前に減衰してしまい、意図していた超音波の集束による幾何学的選択性を得ることはできない。伝播における超音波減衰を増やすことなく、焦点において増幅効果を得るには、図9中右のように、マイクロ気泡を治療目的組織において選択的に分布させる工夫が必要である。



＜図9 マイクロ気泡を選択的に分布させる必要性＞

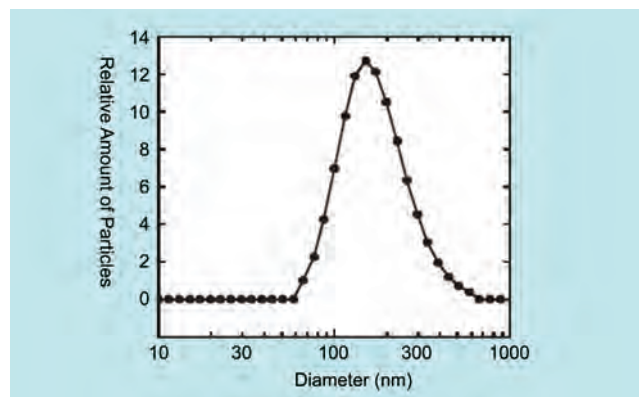
安定化マイクロ気泡の表面に組織選択性的リガンドをつけて、マイクロ気泡を特定の生体組織に分布させる方法が、新生血管などをターゲットとした超音波イメージングについて報告されている。しかしながら、マイクロ気泡自体は血管から組織へは移行しないので、癌組織などをターゲットとした治療には必ずしも適しているとはいえない。

我々は、新生血管から腫瘍組織へ染み出して集積しやすい半径 100 nm 程度のナノ液滴を投与しておき、それが腫瘍組織へ移行した段階で、図10に示すように超音波刺激により相転移させ、MHz域の超音波を効率よく熱に変換するマイクロ気泡に変化させることを考えた。<sup>2)</sup>

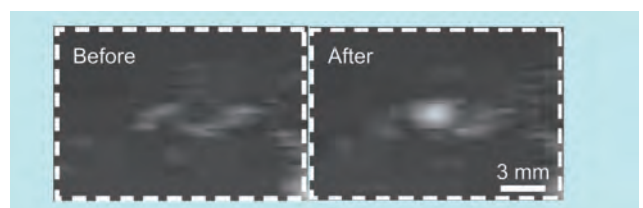


＜図10 超音波刺激によりマイクロ気泡に相変化するナノ液滴＞

このような相変化するナノ液滴は、体温より高い沸点と低い沸点をもつ2種の揮発性パーフルオロカーボンを混合して安定化することにより得られる。その直径分布を動的光散乱法で計測した例を図11に示す。このようなナノ液滴に、短い集束超音波パルス照射して相変化した様子を超音波診断装置により周波数 3.4 MHz で観察し、その結果を図12に示す。超音波焦点にあったナノ液滴は、超音波パルス照射後、その輝度が顕著に増加しており、マイクロ気泡に相変化したと考えられる。



＜図11 相変化するナノ液滴の径分布＞

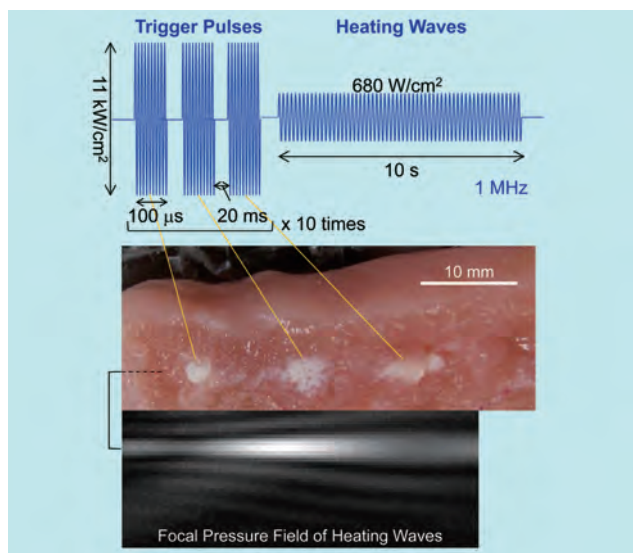


＜図12 超音波パルス照射によるナノ液滴の相変化＞

腫瘍に選択的に分布させたナノ液滴を集束超音波パルスで相変化させてマイクロ気泡とし、それにさらに集束超音波を照射して効率的に治療効果を生じさせれば、ナノ液滴の分子的选择性と集束超音波の幾何学的選択性の両方による相乗的选择性が得られるので、高い选择性をもつ低侵襲治療法として期待が大きい。

一方、相変化ナノ液滴など薬物を援用する治療方法を臨床的に実用化するには長期間を要するので、それらによらず、集束超音波照射方法の工夫によって、マイクロ気泡を治療目標組織中に選択的に生成する方法も研究中である。

図13のように、通常の高強度集束超音波治療に用いられる強度よりもさらに1桁以上高い強度のトリガー超音波パルスを照射することによって、治療目標組織にマイクロ気泡雲を生成し、超音波吸収を局所的に高める方法である。トリササミ肉を用いたこの *ex vivo* 実験<sup>3)</sup>では、高強度超音波パルスを3つの焦点に順次集束させてそれぞれを中心にマイクロ気泡雲を形成したのち、3つのマイクロ気泡雲をすべて包み込むような長い焦域をもつ集束音場による加熱用超音波照射をおこなうことにより、3つの領域を同時に加熱凝固することができた。



＜図13 トリガー超音波パルスを用いた集束超音波治療＞

この方法は、相変化ナノ液滴など薬物のもつ分子的选择性を援用することはできないが、マイクロ気泡雲を生成した箇所を超音波イメージングによって確認できるので、通常の高強度集束超音波治療よりも選択性・安全性・効率のすべてに優る超音波治療につながるものと考えられる。

## 5. むすび

選択的超音波治療の実用化には、多分野にわたる学際的科学技術を必要とする。我々は、今後も、学内外の研究者との協力関係も積極的に生かし、多くの仲間とともに、その実用化をめざして、研究を進めていく考えである。

## 【謝辞】

本学梅村研究所の職員・学生はもちろん、共同研究者である日立製作所中央研究所の川畑健一氏および東京農工大学獣医学科の佐々木一昭准教授には、多大な協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。また、本研究の一部は、NEDOプロジェクトによるものである。

## 【参考文献】

- 1) S. Umemura, K. Kawabata, K. Sasaki, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr. 52, 1690-1698, 2005.
- 2) K. Kawabata, N. Sugita, H. Yoshikawa, T. Azuma, S. Umemura, Jpn. J. Appl. Phys. 44(6B), 4448-4852, 2005.
- 3) Y. Inaba, S. Yoshizawa, S. Umemura, Jpn. J. Appl. Phys., 49, 07HF22, 2010.

## 【著者略歴】

うめむらしんいちろう  
梅村晋一郎

昭和27年6月26日生

昭和50年3月 東京大学工学部物理工学科卒業

昭和52年3月 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻  
修士課程修了

昭和55年3月 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻  
博士課程修了（工学博士）

昭和55年3月 (株)日立製作所入社 中央研究所配属

昭和61年9月～1987年12月

イリノイ大学生体音響研究所

客員准教授

平成3年2月～1997年2月

(株)日立製作所 基礎研究所

主任研究員

平成12年2月 (株)日立製作所 中央研究所 主管研究員

平成17年4月 京都大学医学部保健学科 教授

平成19年1月 東北大学工学研究科電気・通信工学専攻  
教授

平成20年4月 東北大学医工学研究科医工学専攻 教授  
(兼担)



## 日本の戦略的パートナーとしてのインド

東北大学教授  
未来科学技術共同研究センター 副センター長  
関根 仁 博

### 1. はじめに

最近、中国、韓国をはじめとしたアジア近隣諸国のトピックが新聞の一面を飾ることが多くなった。また、昨年10月にAPECの閣僚会合を我が国で開催したことは記憶に新しい。リーマンショックによってクローズアップされた世界経済の脆弱性と新興国も含めたG20の役割の増大、さらには東アジアサミットにおけるアメリカの参加など、もはや先進国だけでは世界の安定性を確保できず、特に成長センターとしてのアジアに世界的な注目・期待が集まりつつある。

このような中、天然資源に乏しく、また人口減少・少子高齢化という課題を抱える我が国は、アジアとともに成長していく戦略が不可欠である。筆者は本年7月に現職に着任したが、前職では経済産業省においてアジアにおける通商政策を担当しており、今回は成長ポテンシャルが高く、我が国のアジア外交において極めて重要なインドとの関係に焦点を当てて紹介してみたい。

### 2. 成長ポテンシャルを有するインド

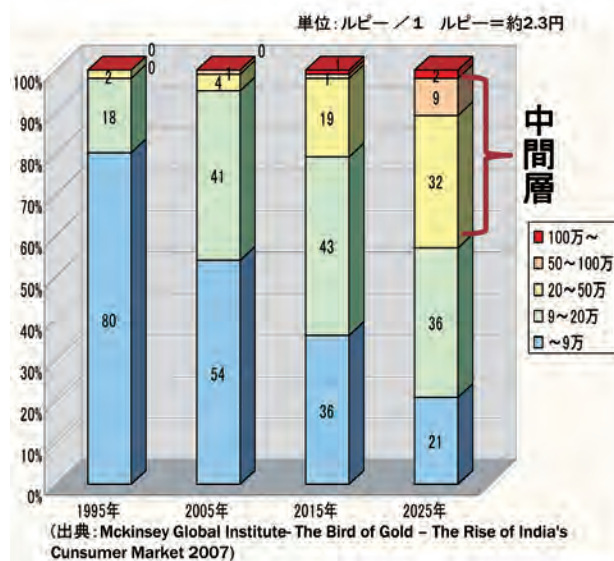
皆さんはインドについてどのようなイメージをお持ちでしょうか。カレーや、ターバンをまいたインド人などが一般的なイメージではないでしょうか。ここでインドの国情について触れてみたい。

インドは、アジアにおいては日本、中国に続く経済規模を誇り、また11億人を超えるといわれる巨大な人口を抱える大国である。日本との関係は、6世紀の仏教伝来にさかのぼるといわれ、752年には東大寺大仏開眼の導師を務めた南インド出身のバラモン僧菩提提憍那がインド人として初めて来日している。明治時代に日本の近代化を支えた綿織物業の発展には、インドからの綿花の輸入が大きく貢献し、また、1950年度半ばよりはじまる日本経済の高度経済成長を支えた鉄鋼業の発展に対しても、インドからの安価かつ安定供給された鉄鉱石は大きな役割を果たした。一方、インドにとっても日本は重要な国で、例えば日露戦争での日本の勝利はインドに大きな影響を与え、それ以後多くのインド人青年が留学生として、あるいはインド国内でのイギリスからの弾圧を逃れて日本に入学したし（新宿・中村屋にカレー・ライスを紹介したといわれるビハリ・ボースもその一人）、湾岸戦争により深刻な外貨危機に陥ったインドは日本からの円借款を契機としてこの危機を脱した。ま

た、デリーで市民の足として利用されている「デリー・メトロ」は、日本の円借款により建設され、最も成功した経済協力案件のひとつとされている。外務省が09年2月にインドにおいて実施した対日世論調査によると、日本との関係について、76%が現在の日印関係を「非常に良好」または「良好」と回答し、日本に対して肯定的なイメージが定着していることが示されている。

次に、インドの成長ポテンシャルについてみてみたい。まず、インドは中国と同様、多くの人口を有する国であるが、一人っ子政策を行ってきた中国との大きな違いは、インドにおいては総人口の60パーセントが30歳以下であり、豊富な労働力を有することである（中国は45%程度）。これは旺盛な内需にも繋がっている。また、インドの成長ポテンシャルの高さを示す例として、急速な中間購買層の拡大が挙げられる。マッキンゼーの調査によると、年収20万ルピー（1ルピー：約2.3円）から100万ルピーの世帯数は、05年にはわずか5%だったのに対し、25年には40%を超えるまでになると予測しているし（図1）、インド国立応用経済研究所の調査は、中間購買層のうち、25～30%が自動車を保有し、66%がテレビや冷蔵庫などの家電製品を保有しているとしている。この中間購買層の拡大により、例えば、インドの乗用車の年間販売台数は、06年度の約

図1. インドの年収別世帯数の推移



138万台に対し、09年度には約195万台と3年で約1.4倍の伸びを記録し、携帯電話累計加入数については、06年度の約1億5,000万台に対し、09年度には約5億6,000万台と3年間で約3.7倍の驚異的な伸びを示している(図2、3)。

図2. 乗用車等年間販売台数推移(単位:万台)

	2006	2007	2008	2009
自動車	137.9	154.9	155.1	194.9
オートバイ	787.2	724.9	743.7	937.1

(出所: Society of India Automobile Manufacturers (SIAM))

図3. 携帯電話累計加入数推移(単位:百万台)

	2006	2007	2008	2009
加入数	149.6	233.6	346.9	562.2
前年比	—	56.1%増	48.5%増	62.1%増

(出所: Telecom Regulatory Authority of India(TRAID))

インドの経済成長率を見てみると、03年度以降8~9%台の高い経済成長率を維持してきた。08年度は、世界的な金融危機により、6.7%に低下したものの、09年はV字回復とも言える7.4%の経済成長率を記録するまでに回復した。これは、旺盛な内需や政府による積極的な景気刺激策に加えて、09年5月の総選挙による安定政権の樹立による心理的・経済的な安心感の醸成や、世界の投資マネーが再びインドに向き始めたことも影響していると考えられる。

一方、インドへの関心の高さを反映して、進出する日系企業も増加の一途をたどっている。10年10月時点の集計では、インドへの進出企業は725社、拠点数では1,000を超えるまでに成り、これは5年前の2.7倍となっている(在インド日本大使館調べ)。日系企業の業種も、自動車を中心と

した製造業から、食品、家電、日用品など多様化し、また製造業以外の業種、例えば金融を中心としたサービス業の進出も盛んになっている。

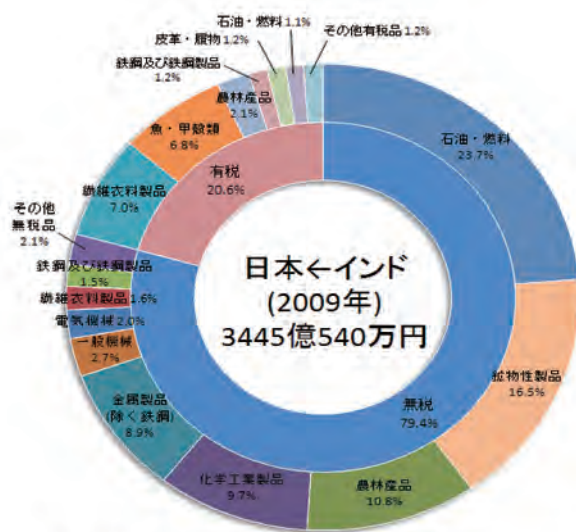
このように、大きなポテンシャルを秘めた国として、日本のみならず世界中から熱い注目を集めつつあるインドであるが、もう一つのアジアの大国、中国と比較すると、例えば進出日系企業数の比較では、急速に増加しているとはいえ約30分の1程度であり、また、日印間の貿易総額は日中間と比較して約20分の1に達しない水準となっている。では、日印間の経済関係を強化していく上で、何が課題なのか。

### 3. 経済連携協定

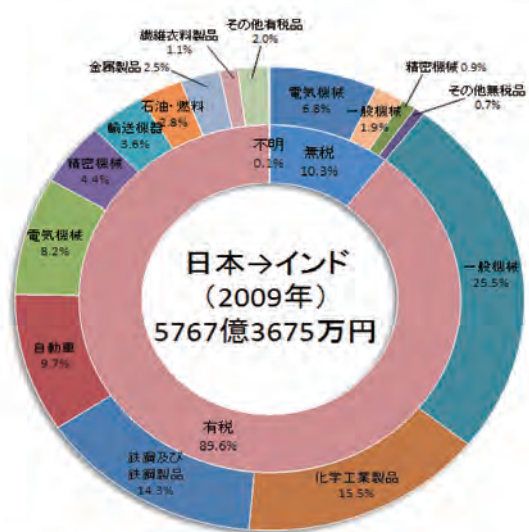


(写真) 日印首脳会談(シン首相と菅首相) 10年10月

本年10月下旬に、シン首相が来日した(写真)。APECや北朝鮮問題などの影響で報道こそ少なかったが、緊密かつ良好な日印関係を背景に、日本とインドとの間で毎年首脳が往来している。この首脳会談で、日印経済関係において極めて重要な協定交渉完了が確認された。日本・インド経済連携協定と呼ばれるこの協定は、両国間の物品の関税



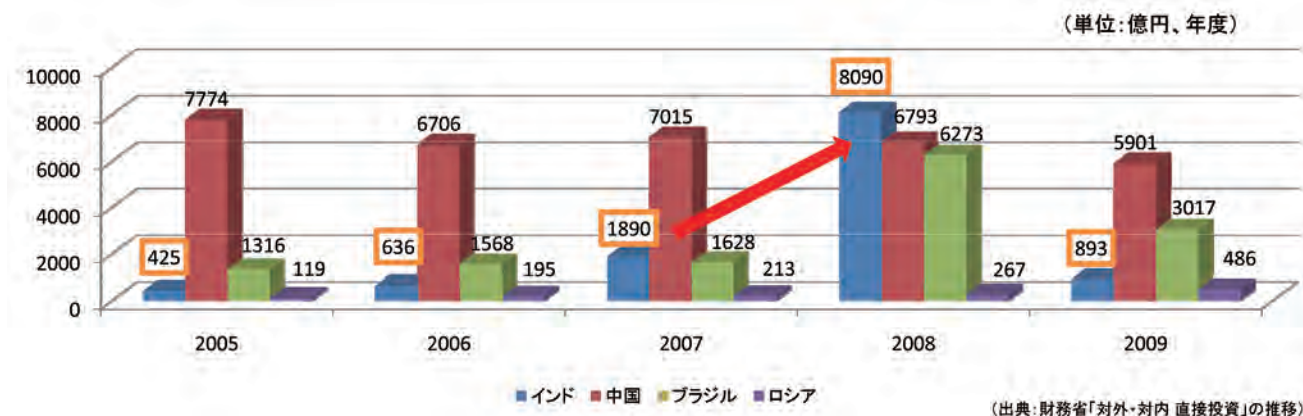
貿易データ:財務省貿易統計(2009年)  
関税データ:実行関税率表(GSP税率)  
(特殊品目を除く)(関税割当等の内枠を有税とする)  
日本のインドからの輸入データを使用



貿易データ:WTA(HS8桁ベース)(2009年)  
関税データ:WTO-IDB(2008年)  
(特殊品目を除く)(枝番TLS00ベース)(HS8桁で税率不明のものはHS6桁ベース)  
インドの日本からの輸入データを使用

図4. 日印間の貿易構造

図5. 我が国の対印直接投資額（フロー）



やサービス貿易の障害を削減・撤廃することに加えて、人的交流の拡大、投資規制の撤廃、知的財産制度の調和など、ヒト、モノ、カネの自由化・円滑化を図ることにより、幅広い経済関係強化をめざすものである。

我が国とインドとの貿易構造は図4のとおりで、日本からは一般機械、化学製品、鉄鋼製品、自動車等を輸出し、インドから石油、鉱物性製品、農林産品、化学製品などを輸入している。このうち、日本からの輸出品の約90%、インドからの輸入品の約21%に関税がかけられている。経済連携協定により、これらの関税を日印双方で撤廃・削減することで、双方の貿易の活性化が期待される。また、日本からインドへの直接投資額は、近年大幅な増加傾向にあり、08年には約8,100億円を計上したが、リーマンショックの影響を受け、09年には約890億円にまで落ち込んだ。これは中国に対する投資の6分の1以下である（図5）。投資促進の観点では、インドの投資に関連する規制などの透明性、安定性を確保することが重要で、今回の経済連携協定締結により高いレベルの投資自由化・投資保護が図られている。

日本・インド経済連携協定の主な概要は図6のとおり。

図6. 日・インド経済連携協定の概要

物品の貿易	協定発効後の10年以内に、インドからの輸入総額の約97%、インドへの輸出総額の約90%が無税化。
サービス貿易	コンピュータ関連、レンタル、建設サービス等について日本資本を100%認める。
人の移動	日本は、現行の入管制度の範囲内で、ヨガ、インド料理、インド伝統舞踊・音楽等の指導員の入国・就労を認める。インドは、短期の商用訪問者や企業内転勤者に加え、投資家の入国及び一時的な滞在を約束。また、商用訪問者の滞在期間を90日から180日以内に延長。
投資	内国民待遇、投資設立後の最恵国待遇、パフォーマンス要求の禁止、国対投資家の紛争解決をはじめとする投資自由化・保護規定につき、高い規律を確保。
強制規格、任意規格及び適合性評価手続き並びに衛生植物検疫措置	国内法令の要求を満たす限りにおいて、相手国の申請者に内国民待遇を与え、合理的な期間内に手続きを完了させることを約束。
ビジネス環境整備	民間部門等の参加を得つつ、自国の区域内において事業活動を遂行する他方の締約国の企業のためのビジネス環境を一層整備。
協力	環境、貿易投資促進、インフラ、IT、科学技術、エネルギー等12分野において協力

両国間の貿易促進のためには、関税を撤廃・削減し、自由化を促進させることが効果的であるが、関税は自国の産業を保護する側面を有していることから、その撤廃・削減の交渉は困難な場合が多く、インドとの協定交渉も、14回の正式交渉を4年近くの期間をかけて行われた。この困難を乗り越え合意に至ったことは、日印双方がお互いを重要な経済パートナーとして認め合い、ともに成長する姿勢を示したこととなり、その意義は対中国、対韓国へのメッセージとしても極めて大きなものである。我が国は、これまでシンガポール、メキシコ、タイなど10カ国と1地域との間で経済連携協定を締結しているが、アジア第3位の経済規模を有し、近年著しい経済成長を続けるインドは、我が国最大の経済連携パートナーであり、経済関係のみならず、日印関係全体の緊密化が期待される。

#### 4. 貨物専用鉄道の建設とデリー・ムンバイ間産業大動脈構想（DMIC）

図7に、国際協力銀行（JBIC）が実施した、ビジネスリスクに関する日系企業に対するアンケート調査がある。これを見ると、インドは05年以降中国に次ぐ有望事業展開先と見られている一方、具体的な事業計画に必ずしも結びついていないとの結果となっている。その最大の理由が、インフラの未整備であり、インドの投資先としての魅力を更に高めるためには、インフラをいかに整備していくかが鍵となっている。

国土が広大で、道路の整備も発展途上にあるインドにとって、鉄道は物流の根幹を成すものである。特に、内陸部に位置する首都デリーとインド西海岸に位置するムンバイの間は産業集積も進んでおり、この地域の物流整備はインドにとって喫緊の課題となっている。現在、日本の資金と技術を活用して、デリーとムンバイ間約1,500キロに電気機関車で2段積み貨物コンテナを大量高速輸送する貨物専用鉄道の建設事業が進められている。このうち約950キロを優先区間として整備が進められているが、この優先区間だけでも4,500億円を超える大事業である。一方、この鉄道建設事業と平行して、この貨物専用鉄道の沿線地域に

図7 中期的な有望事業展開先国・地域

○インドは、中期的(今後3年程度)な有望事業展開先として中国に次いで第2位。

	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年
第1位	中国	中国	中国	中国	中国	中国	中国
第2位	タイ	インド	インド	インド	インド	インド	インド
第3位	インド	タイ	ベトナム	ベトナム	ベトナム	ベトナム	ベトナム
第4位	ベトナム	ベトナム	タイ	タイ	ロシア	タイ	タイ
第5位	米国	米国	米国	ロシア	タイ	ロシア	ブラジル
第6位	ロシア	ロシア	ロシア	米国	ブラジル	ブラジル	インドネシア

**インドを有望と見る理由**

①市場の成長性	89%
②安価な労働力	44%
③組立メーカーへの供給拠点	22%

**インドの主な課題**

①インフラが未整備	48%
②他社との激しい競争	32%
③法制の運用が不透明	27%

**(参考)中国を有望と見る理由**

①市場の成長性	88%
②市場の現状規模	38%
③安価な労働力	35%

**(参考)中国の主な課題**

①労働コストの上昇	64%
②法制の運用が不透明	58%
③他社との激しい競争	57%

(すべてJBIC「我が国製造業企業の海外事業展開に関する調査報告 2010年度版」より作成)

港湾、道路、工業団地、物流施設、発電所等を整備し、一大産業地域を形成するプロジェクトが進行している。これは、デリー・ムンバイ間産業大動脈構想 (DMIC) といわれるもので、日印協力の基幹プロジェクトとして両国の緊密な連携のもと推進されている。このデリーとムンバイを結ぶ貨物専用鉄道沿線地域は、約2億人の人口、インド全体の農業生産の50%、輸出額の60%、直接投資額の52%を占めるとともに、日系企業の約8割がこの地域に進出するなど、インドのみならず日本にとっても極めて重要な地域となっている。

DMIC構想の背骨となる貨物専用鉄道は、日本の円借款により整備を進めるが、港湾、発電所などのインフラプロジェクトは、民間投資主体で整備することとしており、総事業費は約900億ドルともいわれている。構想実現の鍵となるのは、民間投資が可能となるよう収益が見込める案件形成を進めることで、インド政府はその中核機関として、08年1月に半官半民のDMIC開発公社 (DMICDC) を設立した。これを受け、案件形成のためのフィージビリティ・スタディ (FS) 等を実施するための財源として、日印共同で150百万ドル規模のファンドをDMICDCに設置した。FS実施を経て収益の見込めるプロジェクトが形成された際には、DMICDCがプロジェクト実施主体となる特別目的会社を設立し、同会社がプロジェクトの実施に必要な許認可の取得等を行うなどプロジェクトのパッケージ化を行った上で、最終的には同会社を入札により事業実施者に売却することで、プロジェクトを実現させていくことを想定している。

昨年12月、日本貿易振興機構 (JETRO) とDMICDCはスマートコミュニティの実現に向けた協力覚書を締結し

た。これは、日本の強みであるスマートグリッド、水管理、リサイクルシステム、都市交通等の環境システム技術を活かした環境配慮型の地域開発モデルプロジェクトを日印で推進するもので、水や電力が圧倒的に不足しているインドにとって、我が国の環境・システム技術に対する期待は極めて大きい。本年2月、経済産業省の公募により4つのプロジェクトが選定され、現在開発計画策定に向けた事業化調査が実施されている (図8)。本年4月には、訪印した直嶋経済産業大臣 (当時) とシャルマ・インド商工大臣立ち会いの下、関係州政府と日本企業コンソーシアムが協力覚書を締結し、スマートコミュニティ・プロジェクトが本



図8 スマートコミュニティ・プロジェクト

格的に始動した。今後、事業化調査の結果を踏まえ、必要があれば実証事業を行い、インド企業とも連携しつつ、事業化していくこととなる。

これらの地球環境に配慮したモデルプロジェクトは、日本の優れた環境・エネルギー技術をインドで普及させるショウケースとして期待されるとともに、今後インド以外の国・地域にもスマートコミュニティを横展開していく上でも重要である。

では、このように着実に進展するDMICの「効用」は何か。

我が国は、円借款などを活用して、これまでもデリー・メトロの建設をはじめ、道路・港湾、上下水道、灌漑施設、発電所などのインフラ整備を支援してきた。インドは我が国にとって最大の円借款供与相手国であり、近年は年間2,000億円以上の支援を行っているが、インドの広大な国土とインフラの整備の現状を考えると、円借款による直接的なアプローチだけでは不十分なのは言うまでもない。そこで、DMICでは、民間活力を最大限に活用することにより、デリー・ムンバイ間のインフラ整備を「面」的に推進することをめざしている。また、日印共同プロジェクトの枠組みのもと、日本側のニーズや要望をプロジェクトに反映させるとともに、日本企業にとってインフラを「利用する」のみならず、インフラ整備に「参加」する機会も提供されることが期待される。

このDMICの枠組みの中では、日系企業により民間ベースで既に取り組みされているプロジェクトについても積極的に取り上げることににより、インド側関係機関の関与や協力を得やすくなるといった効果も出ている。DMICのもと、新たな開発プロジェクトのみならず、既存の民間プロジェクトの加速化や日系企業に対する支援要請なども行っており、DMICは日印間の大きな経済協力枠組みとしての機能を果たしている。

このDMICは、円借款による鉄道敷設を軸として周辺地域を一体的に開発・整備すること、収益の見込めるプロジェクトを民間活力（資金）を活用しながら組成・実現していくこと、インド自国の広域国土開発を外国（日本）をパートナーとして進めていくものであることなど、極めてユニークな特徴を有している。日本は、DMICを日本企業の進出や投資環境の整備に最大限利用してだけでなく、真にインドの経済発展や持続可能な開発に繋がるものにしていくことが求められている。

## 5. 日印関係の行方

これまで述べてきたように、大きな成長ポテンシャルを有するインドに世界的な注目・期待が高まる中、我が国は友好的な両国関係を背景として、積極的な外交を展開してきた。日本の隣国である韓国・中国などとの関係が不安定の度合いを増す中、アジアにおける日本のプレゼンスの観点からもインドとの関係は極めて重要である。現在、日印間では、原子力協定の締結交渉が行われている。インドは深刻かつ慢性的な電力不足の状態の中、積極的に原子力発電の導入を進めており、民生用原子力の分野において世界トップレベルの実績と能力を有する日本がこの分野で協力を行うことは、インドのみならず、我が国にとっても経済的観点、民生原子力分野の能力維持・向上等の観点からも極めて重要である。一方、インドは核兵器不拡散条約（NPT）は不平等条約であるとして同条約に加盟しておらず、このような国に対して原子力分野の協力を行うべきではないとの意見もあるが、唯一の被爆国として原子力の平和利用に確固たる信念を持って推進してきた日本が、むしろ民生原子力分野で積極的な関係を構築することにより、インドの核実験モラトリアムの維持や核軍縮への取り組みを促していくことが不可欠である。

また、大国として台頭しつつあるインドは、気候変動、世界経済等グローバルな課題への取り組みの観点でも鍵となる国である。単に二国間の関係のみならず、世界に大きなプレゼンスを有する両国が世界全体の安定と持続的な発展に果たす役割の観点からも両国関係の深化・高度化を期待したい。

## 【著者略歴】

せきね よしひろ  
関根 仁博

昭和43年5月10日生

平成4年3月 北海道大学工学部原子工学専攻中退

平成4年4月 科学技術庁（現文部科学省）（科学技術政策局、研究開発局、原子力局、原子力安全局）

平成13年1月 文部科学省（大臣官房、科学技術・学術政策局、研究振興局、研究開発局、生涯学習政策局）

平成20年7月 経済産業省（通商政策局）

平成22年7月 東北大学教授

# 平成21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、設備等の相互利用を図り、委託研究「軟磁性膜用ターゲット材の評価に関する研究」他103件の試験研究を行った。

また、経済産業省の21年度補正予算戦略的基盤技術高度化支援事業3件を受託した。

## 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「高分子超薄膜に関する研究」他43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

1. 第3回「青葉工学振興会賞」の授与について  
応募者14名、受賞者1名
2. 第15回「青葉工学研究奨励賞」の授与について  
被推薦者33名、受賞者5名
3. 第14回「及川研究奨励賞」の授与について  
被推薦者10名、受賞者3名

### (3) 研究会開催への助成

「資源素材学会」他6件に助成した。

### (4) 国際学術会議等開催への助成

「第14回狭ギャップ半導体とシステムに関する国際会議」他2件に助成した。

### (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3件に助成した。

### (6) 外国人留学生への奨学金

8名に支給した。

## 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24号…22年3月、1,300部を発行した。

## 4. 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46回産学官交流大会

日時 平成21年6月17日(水)

場所 仙台国際センター

### 2. 第47回産学官新春交流大会

日時 平成22年1月27日(火)

場所 仙台国際センター

## 5. みやぎ優れMONO発信事業

宮城県内の良いモノを「みやぎ優れMONO」として認定し、県内外に発信するための認定制度と、認定企業並びに認定を目指す企業への技術、経営、販売等について様々な支援を構築し、宮城から数多くのものづくりヒット商品を生み出すことを目的とした支援事業に共催団体として参画した。

開催期間 平成21年11月11日(水)

場所 夢メッセみやぎ

## 6. 東北大学工学研究科、情報科学研究科、環境科学研究科及び医工学研究科の公開（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21年7月30日(木)～31日(金)

会場 青葉山キャンパス

## 編集後記

財団法人青葉工学振興会の発行する機関誌「翠巒」第二十五号をお届けします。(財)青葉工学振興会は、宮城県および仙台市からの出損金ならびに東北大学工学部工明厚生会および仙台高等工業学校創立七十五周年・東北大学工学部創立六十周年記念事業後援会からの寄附金をもって一九八五年に宮城県によって設立認可された公益法人であり、本年三月で二十六周年を迎えます。本財団は、宮城県を中心とする地域における科学・技術振興の活性化に寄与すべく産学の連携・協力活動を積極的に支援することを設立趣旨の一つにしております。

財団の機関誌「翠巒」は、東北大学が所有する基礎的・先導的な研究成果を民間等に情報発信すると共に、研究協力の橋渡しをすることを主たる目的として刊行されております。本号には、東北大学大学院工学研究科長内山教授の巻頭言に続き、平成二十二年年度財団表彰であります「青葉工学振興会賞」ならびに「青葉工学研究奨励賞」の受賞報告(各二件および三件)、そして企業紹介一件、研究プロフィール十件が掲載されております。多忙な中、原稿をお寄せ下さいました執筆者の方々には厚くお礼申し上げます。さらに、本誌に掲載された各玉稿が、新たな産学連携・協力の展開に資されることを期待しております。

(常任理事 東北大学大学院工学研究科教授 米本年邦 記)



翠 巒

財団法人青葉工学振興会

〒980-8579 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/>