

翠 巒





「小人の通り道」スナップ大賞
大堀 優(情報知能システム総合学科3年)
青葉工業会・工明会共催「平成25年度 第32回写真コンテスト」

もくじ

第30号記念号

巻頭言

新しい潮流を生む駆動力 東北大学大学院工学研究科長・工学部長 滝澤 博胤	1
一般財団法人青葉工学振興会30周年にあたって 理事長 根元 義章・常務理事 猪股 宏	2
平成27年度「青葉工学振興会賞」「青葉工学研究奨励賞」授賞報告	4
第9回青葉工学振興会賞	
複雑な生体流れ問題に対する計算バイオメカニクスの開発 東北大学大学院工学研究科 特任准教授 今井 陽介	5
第21回青葉工学研究奨励賞	
強磁性金属における磁化の電氣的制御に関する研究 東北大学電気通信研究所 助教 金井 駿	6
酸化セリウム触媒の酸化・還元及び酸・塩基特性を活かした有機合成反応 東北大学大学院工学研究科 助教 田村 正純	7
金属材料の超音波接合における接合機構の解明 東北大学大学院工学研究科 助教 藤井 啓道	8
研究プロフィール	
熱音響現象を利用した熱機関の研究 ~ 音波エンジンFAQ ~ 東北大学大学院工学研究科 教授 琵琶 哲志	9
航空宇宙工学への「実験空気力学」からのアプローチ 東北大学大学院工学研究科 教授 浅井 圭介	14
バクテリアべん毛の機能解析計測を通して 見えてくる単細胞生物の高性能マシン 東北大学大学院工学研究科 教授 工藤 成史	18
タンパク質の異分野利用へ向けた挑戦 東北大学大学院工学研究科 教授 梅津 光央	23
新しいエネルギー変換技術を創製するモリブデン基超高温材料 東北大学大学院工学研究科 教授 吉見 享祐	27
自然災害に対して安全・安心な研究・教育環境の創生技術の開発 東北大学災害科学国際研究所 教授 佐藤 健	31



巻頭言

「新しい潮流を生む駆動力」

東北大学 大学院工学研究科長
工学部長 滝澤博胤

私は高度成長期に生まれ、黄金期とも呼ばれる一九八〇年代に学生時代を過ごしたため、ものづくり大国や科学技術立国という言葉で日本の姿が語られるのは、ごく自然に感じます。実際、二〇世紀末の世界市場は日本製品が席卷し、学術研究の世界でも数々の優れた研究成果が生み出されてきました。今世紀に入ってから我が国の自然科学分野におけるノーベル賞受賞ラッシュも、当時の力量ある学術研究活動が結実したものと考えます。ところが、二一世紀を迎えた頃から、風向きが変わってきたようです。科学技術立国・電子立国を支えた半導体、電子機器産業の後退をはじめ、多くの分野で日本製品や日本の産業技術のかつての勢いが失われてきています。米国と並んで質、量ともに世界を牽引していた工学分野の学術研究においても、その地位低下が危機感をもって認識されるようになってきました。

産業や学術研究分野におけるこのような状況は、地球規模での大きなうねりとも同調しているのかもしれませんが。現在、アジアやアフリカを中心に地球人口は膨張を続け、総人口は今世紀半ばで九〇億人、来世紀初頭には一五〇億人に達するともいわれます。一方、我が国では数年前をピークに人口減少社会へと転じ、今世紀半ばには総人口九千万人、来世紀初頭には四千六百万人まで減ずるとも推測されています。少子高齢化を迎え国民医療費などの社会保険支出が膨らむ一方、生産人口が年々と減少していく

中で、日本人も元気を失っているように思えます。世界のGDPが激増に向かう中、資源やエネルギー、食糧までも輸入に依存する我が国において、縮小する社会をどう克服して繁栄を維持できるのでしょうか。もちろん、世界もひたすらに成長を続けることは難しく、人口増大とGDP増加によって富裕層割合が急増し、エネルギー、食料、水資源などの需給問題が顕在化するとともに、持続可能性をも揺るがす環境問題等、多くの課題に直面することになります。

工学は人々の安全・安心、健康・福祉、そして持続可能な社会・環境を構築する学問です。学術のどの分野においても、研究の動機は研究者一人一人の知的渴望・好奇心にあります。個々の研究者の才能溢れる独創的基盤研究を力強く推進することが、国民・社会に幸福をもたらすことに繋がることが間違いありません。さらに一歩踏み込んで、未来社会を想像し、社会が抱える課題解決や持続可能な未来像に向けて、何をしなければならぬのかを自ら考え、人類社会に新しい潮流を生み出すことが、私たちに期待されていることだと思います。未来への挑戦こそが工学研究の駆動力であり、キャンパスで繰り広げられる数多くの挑戦から、新しい世界の潮流が生まれることを期待しています。

今後とも皆様のご理解とご支援をよろしくお願い申し上げます。

一般財団法人青葉工学振興会30周年にあたって

理事長 根元 義章、常務理事 猪股 宏

1. はじめに

本財団は、昭和60年（1985年）に設立されましたので、平成27年（2015年）はちょうど30周年となりました。機関誌の「翠巒」も本号で30号になります。設立以来、定款記載の『工学に関する研究開発及び研究・教育助成並びに工学に関する普及・啓発などに関する事業を行い、もって、学術研究及び科学技術の振興並びに地域産業の振興に寄与する』ために努力してまいりました。この間、平成20年12月の「新公益法人制度」施行により、本財団も公益財団か一般財団かの議論、種々の規程などの整備を行ない、平成24年に一般財団法人として監督官庁に申請し、平成25年4月より「一般財団法人青葉工学振興会」となり、公益性も含めた活動を展開しております。本稿では、良い機会ですので、設立から30周年を迎えるまでの履歴や事業規模の変遷などをまとめ、ご紹介させていただきます。

2. 設立経緯

本財団は、基本的には青葉工業会の活動に基づいて設立されたものであります。青葉工業会は工学部同窓会ですが、昭和31年に工学部同窓会であった工明会と東北帝国大学に先立って開校された仙台高等工業学校（SKK）の同窓会が合併して誕生したものであります。SKK創立75周年と東北大学工学部創立60周年にあたる昭和51年に、青葉工業会創立20周年記念式典が行われました。その20周年記念式典の後の懇親会の席にて、当時の前田会長から『母校の研究・教育の発展に寄与する記念事業を工学部として計画してみようとする機運があり、青葉工業会としても重大な関心をもち、その事業計画に協力してまいりたい。ただ現状は経済的にも困難な時代であるから、実際に実行に移すかどうかは更に十分に検討する必要がある、今回はやるとするならば、どのような事業があるかを計画立案するという範囲で考えたい。』との提案があり、出席者の賛同を得て、その後工学部で検討された結果、工学部主任教授会の下部組織として「記念事業計画立案委員会」が設置されました。本委員会では「SKK75周年・工学部60周年の記念事業として、10年後（青葉工業会創立30周年）を目標に同窓会等の活動の新しい計画」の立案がなされました。この委員会には、青葉工業会からも委員を出し、翌52年の青葉工業会総会では、計画立案の調査費も予算化されました。1年余にわたる作業委員会での検討の結果、委員会答申として、以下のような提案がなされました。

- ・ 経済的に不況の時期で募金は困難と予想されるが記念事業は実施すべきである。
- ・ 募金目標 10億円
対象：SKK・工学部卒業生、産業界、その他
- ・ 記念事業 青葉記念会館（仮称）の建設
青葉記念基金
記念式典の実施
記念誌の発行

この時に、現：青葉記念会館の建設の方向性が示され、さらにその運営法として、建設後は建物を国に寄与し、それを借り受けて利用するという提案もなされています。運営方法にも言及しており、募金総額から上記の記念事業のための経費を減じた残額を「財団」に付託し、青葉工業会とともにあたってもらうのが妥当であろうと記載されております。これが、青葉工学振興会の設立（昭和60年）に結びついたわけです。その翌年昭和61年に青葉記念会館が完成し、青葉工業会+青葉工学振興会が本会館を拠点としてそれぞれの活動を行っているのは、皆様もご周知のとおりです。

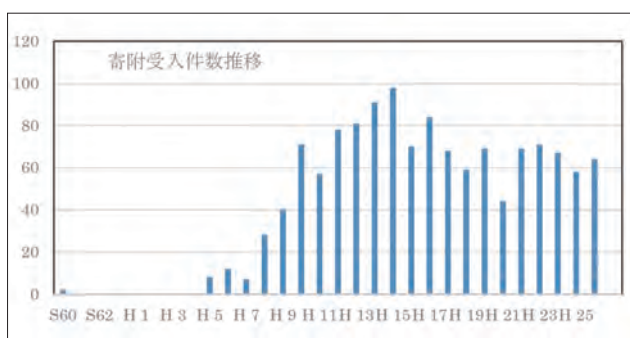
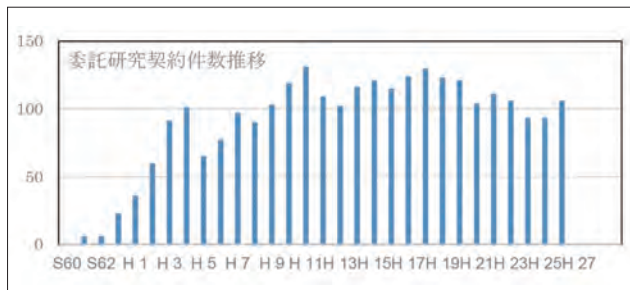
3. 一般財団法人化

平成20年12月1日に、「公益法人制度改革関連3法案」が施行されました。この制度の趣旨は種々ありますが、それまでの財団法人などは「特定民法法人」となり、法律施行日から5年以内には新制度に移行することが義務付けられたわけです。この移行についてですが、本財団の場合、公益財団法人あるいは一般財団法人のどちらかに移行するか、解散するかになります。むろん、解散はあり得ませんので、公益法人／一般法人の選択を当時の理事会を中心に検討いたしました。5年以内に移行の申請を行わない場合には自動的に解散、資産没収となる制度でした。なお、移行申請についても、これまでの事業の損益・公益性の整理、定款や規程の整備、組織改編など多くの作業が必要となりましたが、当時の関係者の皆様の努力により申請準備が進められました。その間に、公益法人／一般法人の選択についても並行して議論され、本財団の事業内容・運用形態からは一般法人が適していると判断し、関係各所に相談しながら申請書類を整備し、平成24年に監督官庁である県に申請、宮城県に設置された公益認定等委員会での答申を経て、一般財団法人への移行認定（平成25年4月～）が決定されました。この認定の基準は、「定款の内容が法人法に適合

するものであること」「法人の移行時の純資産額を基礎に計算した公益目的財産額がある法人は、作成した公益目的支出計画が適正であり、確実に実施すると見込まれるものであること」の2点です。これに基づいて、本財団では、一般財団法人への移行後は、公益目的支出計画に従って実施事業等を行い、毎年その詳細内容を監督官庁（県）に報告をいたしております。

4. 事業内容

財団法人青葉工学会は、常に工学部との連携を密として、研究・教育の発展に資する活動を行ってまいりました。委託研究・寄附金の受入れ、学術研究集会開催支援、学生への奨学金、表彰などですが、その内容については時代の流れに対応して変更してきました。財団の大きな事業である委託研究等の推移を整理してみたのが、以下の図になります。



ご覧いただければ、当初は順調に委託研究の申込み数が伸び、平成10年以降はほぼ横ばいに推移していることがわかります。その金額をみれば、最近はやや減少傾向にありますが、年間4～5億円の委託研究が毎年進行している状況であることがわかります。寄付については、平成15年頃をピークにして減少傾向にありますが、これは最近の企業側の寄付に対する意識の変化が大きな要因であると推察されます。

しかしながら、全体としては、多くの諸先輩・現役教員の皆様のご協力のお蔭にて、30年前の財団設立当初の目標であった工学研究・教育に寄与する程度までに拡大できてきたものと考えております。

5. おわりに

今回は、30周年という節目の年、号数になったことから、関係各位に本財団の目的や活動内容を理解して頂くため、設立経緯や事業内容を整理し、紹介させて頂きました。多くの皆様のご協力の賜で目下、財団運営としては軌道に乗っていると考えておりますが、データに示すように委託研究や寄付という財団運営の基盤数値が、さらに減少しつづけると、公益目的事業などの十分な活動ができなくなることも予想されますので、関係各位の一層のご支援ご協力をお願い申し上げます。

平成27年度「青葉工学振興会賞」授賞報告

「青葉工学研究奨励賞」

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27年度は、宮城県内各大学から「第9回青葉工学振興会賞」に9件、「第21回青葉工学研究奨励賞」には19件の応募があり、審査委員会による第1次及び第2次の慎重なる審査により、第9回青葉工学振興会賞の受賞候補者1

名、第21回青葉工学研究奨励賞の受賞候補者3名を選出致しました。そして、11月19日(木)開催の青葉工学振興会評議員会において、審査委員会の原案の通り受賞者を決定致しました。

授賞式は、平成27年12月4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。

平成27年度「青葉工学振興会賞」等受賞者

第9回 青葉工学振興会賞（応募件数：9件）

受賞者名	所 属	研究業績名
今井 陽介	東北大学 工学研究科 特任准教授	複雑な生体流れ問題に対する計算バイオメカニクスの開発

第21回 青葉工学研究奨励賞（応募件数：19件）

受賞者名	所 属	研究業績名
金井 駿	東北大学 電気通信研究所 助教	強磁性金属における磁化の電氣的制御に関する研究
田村 正純	東北大学 工学研究科 応用化学専攻 助教	酸化セリウム触媒の酸化・還元及び酸・塩基特性を活かした有機合成反応
藤井 啓道	東北大学 工学研究科 材料システム工学専攻 助教	金属材料の超音波接合における接合機構の解明



第9回青葉工学会賞



複雑な生体流れ問題に対する 計算バイオメカニクスの開発

東北大学大学院工学研究科

特任准教授 今井陽介

計算バイオメカニクスとは、大規模な計算力学シミュレーションによって生命現象の背景にある力学原理を解明しようとする研究分野であり、力学に基づき、各種疾患の新しい予測・診断・治療方法を創出することを目標とするものである。しかしながら生体流れは一般に、流体力学、固体力学、生化学などの連成問題であり複雑である。我々は最先端の計算力学技術を応用することで、細胞から臓器まで幅広く生体流れの計算バイオメカニクスを開発してきた。

一つ目の例は、血液疾患の計算バイオメカニクスである。血液の主要な成分である赤血球は柔軟な細胞であり、微小血管を大変形しながら循環している。一方、マラリア原虫が寄生した赤血球は細胞骨格の変化により変形能が低下する。さらに接着タンパクを発現し、周囲の正常な赤血球や血管内皮細胞上のタンパクとのリガンド-レセプタ結合によってこれらの細胞と接着するようになる。このような分子レベルの力学的・生化学的变化が最終的に臓器レベルの循環障害を引き起こすと考えられている。我々は赤血球膜の固体力学、細胞質・血漿の流体力学、リガンド-レセプタ相互作用を連立する計算力学モデルを開発し、血管内皮細胞上のタンパクの違いによるマラリア感染赤血球挙動の変化や、微小血管における正常な赤血球とのクラスタ形成（ロゼット形成）などを計算機上に再現することに成功した。さらにマラリアだけでなく、血小板血栓や循環腫瘍細胞の流動など幅広く血液疾患の問題へ応用している（図1）。

ここで、この問題に含まれるパラメータを考えてみる。血管径や流量など微小血管の特性、細胞膜のせん断弾性係数など細胞の力学特性、リガンド-レセプタ結合に関わる生化学特性と多岐にわたり、この問題を解明しようとする必然的に広いパラメータ空間をカバーする大規模な計算が必要となる。我々はグラフィックスカード（GPU）を数値計算に応用する高速計算技術を世界に先駆けて医工学分野に導入し、生体流れの大規模パラメトリック解析を実現する基盤技術としてGPU計算を確立した。肺内気流の患者個別モデルを開発し、吸入型薬剤の気管支壁への沈着量に対する息止めの効果を明らかにした（図2左）。これを赤血球流動の問題に発展的に応用し、数百個程度の赤血球流動を1GPUで計算できるようになった。一般的なカプセル懸濁液のレオロジー解析など、より流体力学的な問題へも研究を展開している。

ところで、生体流れの計算バイオメカニクスは動脈硬化

症や脳動脈瘤など循環器系の研究とともに発展してきた。一方で、消化器系のバイオメカニクスはほとんど未開拓の分野であり、多くの生理現象が推測の域を脱していない。例えば「機能性ディスぺプシア」という疾患は、潰瘍や癌がないにも関わらず胃痛や胸やけを訴えるもので、胃の消化管運動障害が原因と考えられている。しかしながら、胃壁の運動とそれに伴う食物流動を可視化する方法がないため、そもそも健康な状態であっても食物の貯留・攪拌・排出過程でどのように食物が流動しているのか十分明らかでなかった。我々は医用画像に基づく食物流動の計算力学モデルを開発し、実形状の胃内部における食物攪拌を初めて解析した（図2右）。これにより、幽門前庭部において時間平均的な再循環流れが生じており、この再循環領域で食物の攪拌が進行することが明らかになった。臨床医学や電気生理学を専門とする研究者との共同研究を開始しており、機能性ディスぺプシアの病態メカニズムの解明を目指して研究を進めている。

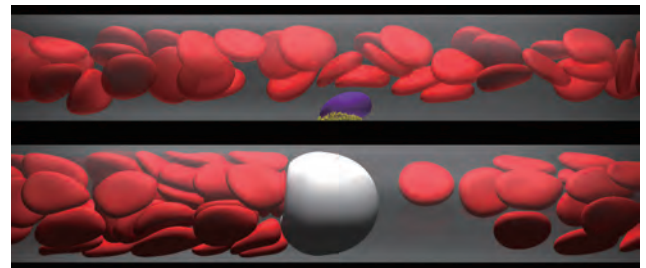


図1. 血液疾患の計算バイオメカニクス。細胞膜の固体力学、血漿・細胞質の流体力学、リガンド-レセプタ相互作用を連立する計算力学モデルを開発し、マラリア（上）や循環腫瘍細胞の流動（下）の解析に応用している。

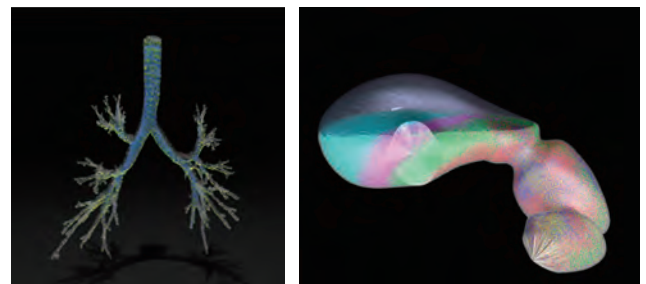
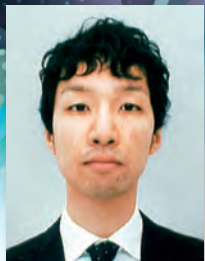


図2. (左) 肺内気流と吸入型薬剤輸送の患者個別モデル。黄色の粒子は気管支に沈着した粒子である。(右) 実形状胃内部の食物攪拌の計算力学モデル。幽門前庭部を中心とした再循環流れによって食物は攪拌される。

第21回青葉工学研究奨励賞



強磁性金属における磁化の電気的制御に関する研究

東北大学
電気通信研究所
助教 金井 駿

スマートフォンやパーソナルコンピュータのメインメモリとして用いられる半導体メモリは、言うまでもなく我々の生活に必要不可欠である。その高性能化による待機時の消費電力（＝情報保持電力）の抑制が近年の課題であり、情報保持電力が不要な不揮発性メモリデバイス、特に書き替え回数が事実上無限回である磁気メモリに注目が集まっている。磁気メモリのビット情報は磁化方向により定義される。近年盛んに研究されている、2枚の磁性層で絶縁体を挟んだ磁気トンネル接合（MTJ）デバイスは、磁化方向により素子抵抗が変わる性質（トンネル磁気抵抗効果）を有しており、情報のランダム読み出しが可能である。更に、MTJを貫くトンネル電流を流すことにより、角運動量の授受を介した磁化方向制御「スピン注入磁化反転」が可能である。このビット操作方式は素子の数十ナノメートルへの微細化と数十ピコジュール程度の動作電力が可能であるため、高集積性と低消費電力を両立する可能性を持つ不揮発性メモリとして注目されてきた。ナノサイズMTJにおいては、磁化の向きやすい方向（磁化容易方向）、即ちビットの記録方向が膜面垂直方向の場合には記録方向が膜面平行の場合に比較して磁化反転電流を低減可能である。我々は、研究開始当時標準的であった、膜面平行方向にビットを記録するMTJに用いられていたCoFeB/MgO接合において、CoFeB膜厚を2ナノメートル以下に減少させることにより、磁化容易軸方向が膜面垂直となることを世界に先駆けて発見した [1]。また、主に界面のFe原子に起因する垂直磁気異方性が垂直磁化容易をもたらしていることを実験及び理論計算により明らかにした [2]。この発見に基づいて我々が報告した微細（直径40ナノメートル）かつ低消費電力な垂直MTJは、現在の高集積超低消費電力次世代不揮発性MTJメモリにおける標準構造となった。

2000年、磁性半導体を用いて作製された電界効果トランジスタにおいて、電界による磁性制御が初めて実験的に実証され、注目を集めた。スピン注入磁化反転においては、MTJデバイス中の消費電力は電流印加に起因するジュール損により決定される。一方で電界による磁性制御にはジュール熱が不要であり、消費電力をスピン注入磁化反転と比較しても更に2-3桁低減することが可能である。従って、代表的な半導体メモリであるCMOSなどと同程度の動作電力を持ち、不揮発性を有するメモリの実現が期待される。我々は、上述のCoFeB/MgO接合を金属電極/絶縁体として含むキャパシタ構造素子（図1(a))に作製することで電圧印加により接合界面の電子密度を変化させ、その磁性を制御可能であること [1, 3]、及び磁化容易方向の電

圧印加による制御に成功した（図1(b)）。

サブナノ秒の高周波電圧パルスを印加することで磁化容易方向を瞬間的に切り替えると、磁化の歳差運動が誘起される（図1(a)）。我々はCoFeB/MgO接合を用いた直径70ナノメートルのMTJを用いて、電圧印加により誘起した磁化歳差運動を介した磁化反転、「電界誘起磁化反転」を実現した [4]。

現在、電界誘起磁化反転の実証から一歩進み、その応用に向けた研究を行っている。外部定常磁界により反転速度（＝ビット書き替え速度）の制御と1ナノ秒以下のビット書き替えを達成した [5]。また、スピン注入磁化反転と電界誘起磁化反転を融合した新規ビット制御手法により、ビットごとの反転速度のばらつきに起因する、制御不安定性の抑制を実現した [6]。現在トンネル電流の抑制による消費電力の低減に取り組んでいる。これら一連の研究結果はメモリの低消費電力化と高集積化を実現する不揮発性スピントロニクスメモリ素子開発の推進に必要な不可欠な基盤技術であり、一層の研究の進展を通し工学へ寄与すべく、日々研究を邁進している。

[1] M. Endo, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **96**, 212503 (2010).
 [2] S. Kanai, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 222409 (2014).
 [3] S. Kanai, *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **266**, 012092 (2011).
 [4] S. Kanai, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **101**, 122403 (2012).
 [5] S. Kanai, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 072408 (2013).
 [6] S. Kanai, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 212406 (2014).

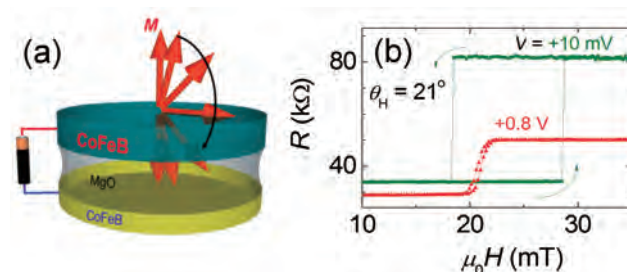


図1：(a) 素子構造と磁化反転の模式図。CoFeBは金属磁性体、MgOは非磁性絶縁体であり、上側CoFeBの磁化方向（矢印）の上/下でビット情報の'0'/'1'を記憶するキャパシタ素子である。矢印で示すように電圧印加時に磁化が歳差運動し、180度歳差運動した際に電圧印加を終了して磁化反転する。印加電圧パルス幅はナノ秒程度であり、高速なビット操作が可能である。(b) 実際の素子で測定した電圧印加時のCoFeB（膜厚1.8ナノメートル）の磁気特性の変化。ヒステリシスの消失は磁化容易方向が膜面垂直から膜面平行方向へ切り替わることを意味する。

第21回青葉工学研究奨励賞



酸化セリウム触媒の酸化・還元及び酸・塩基特性を活かした有機合成反応

東北大学大学院工学研究科
応用化学専攻
助教 田村 正純

持続可能な社会の実現には、自然と共存できる持続可能な循環型社会を目指す必要がある。そのような取り組みとしてグリーンサステナブルケミストリーがあり、低環境負荷であるグリーンな化学プロセス、量論反応の触媒反応化、有害物質の資源転換や再資源化等を実現する新規高機能触媒の開発が必要不可欠である。均一系触媒は高活性かつ高選択的であるが、触媒の回収、再利用、ハンドリング等の問題を抱え、より環境負荷の少ない環境調和型の触媒として、固体触媒が期待され、その高機能化は欠かせない。固体触媒として、貴金属担持触媒が精力的に研究され、固体触媒特有の優れた触媒機能を示すことも報告されているが、貴金属は資源量も少なく、高価であること、また、触媒耐久性の低さもしばしば課題となる。従って、豊富に存在しかつ耐久性の高い金属酸化物は固体触媒として有望と考えられる。金属酸化物は酸・塩基、酸化・還元特性を有し、触媒などの幅広い分野で用いられるが、その機能発現には一般的に200℃以上の高温が必要と考えられており、200℃以下の低温条件下での触媒機能開発は限られていた。

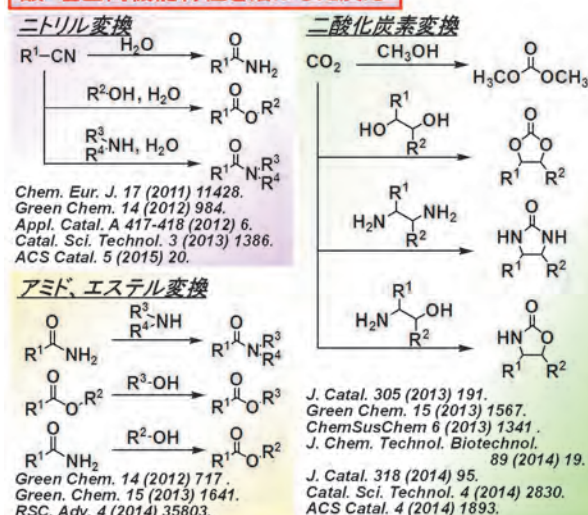
筆者らは金属酸化物表面の酸・塩基特性評価から酸化セリウムが他の金属酸化物とは異なり、弱いLewis酸性と強い塩基性が共存する特異な酸・塩基特性を有することを明らかにした。そこで本研究では、酸化セリウムを用いた低温 (<200℃)・液相有機合成反応の開発を行った。水中下でのニトリルの水和によるアミド合成反応に酸化セリウムを用いたところ、30℃という低温条件下でも高活性を示し、世界に先駆けて酸化セリウムが低温条件下での液相有機合成に有効であることを示した [1]。他の金属酸化物ではほとんど進行しないことから、酸化セリウム特有の触媒機能であると言える。反応機構解析から、酸化セリウムの酸・塩基両機能特性が低温条件下での液相有機合成に有効であることも明らかにした [2]。また、酸化セリウムの特異な酸・塩基特性は、ニトリル変換反応、アミド、エステル交換反応にも有効であり、二酸化炭素の直接変換によるカーボネート、カーバメート、ウレア誘導体合成にも有効であることを明らかにし、広い適用性を有することを示した (図1)。さらに、酸化セリウムは、30℃という低温条件かつ空気下でのアルコールとアミンからのワンポットイミン合成にも高活性、高選択性を示すことを見出し、酸化セリウ

ムの酸化・還元特性が低温条件下で触媒機能を発現することを世界に先駆けて証明した。(図1) [3]。これらの酸化セリウムの低温・液相条件下での触媒機能は錯体などの均一系触媒と同等もしくはそれ以上であり、金属酸化物が錯体触媒を凌ぐ可能性が十分あることを示した結果と言える。

最近では、酸化セリウムの特異な酸・塩基性を生かした触媒設計として、酸化セリウム表面を有機化合物で修飾することで酸化セリウム表面に均一・不均一ハイブリッド強塩基サイトを構築できることを見出し、塩基触媒反応を劇的に向上させることを報告した [4]。今後、更なる触媒改良を行い、金属酸化物の触媒特性をコントロールすることで高機能金属酸化物触媒系の構築を目指し、さらに、工業化に向け取り組んでいきたい。

- [1] M. Tamura, et al., *Chem. Eur. J.*, 17 (2011) 11428.
- [2] M. Tamura, et al., *Catal. Sci. Technol.*, 3 (2013) 1386.
- [3] M. Tamura, et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, 54 (2015) 864.
- [4] M. Tamura, et al., *Nat. Commun.*, 6 (2015) 8580.

酸・塩基両機能特性を活かした反応



酸化・還元特性を活かした反応

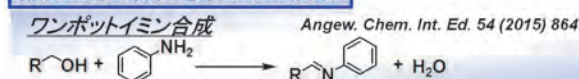


図1. 酸化セリウムの酸・塩基及び酸化・還元特性を活かした低温 (<200℃)・液相有機合成反応

第21回青葉工学研究奨励賞



金属材料の超音波接合における 接合機構の解明

東北大学大学院工学研究科
材料システム工学専攻
助教 藤井啓道

超音波接合は、被接合体に垂直荷重を加えながら超音波振動を与えることにより、サブミリサイズの金属薄板やワイヤを接合できる技術である。最近では、様々な組合せの異種金属材料間でも超音波接合が可能であることが報告されており、工業製品の小型化・軽量化を実現する強力なツールとなることが期待されている。一般的には、周波数20～100 kHz程度の超音波振動を接合面に対して平行に印加し、加圧することによって接合が行われる。接合時には、超音波振動による摩擦によって金属表面の酸化皮膜等が破壊・分断され、新生面同士が接触することにより接合が達成されると考えられている。他の接合方法と比較すると、「エネルギー消費が小さい」、「接合時間が短い」、「薄膜等の接合が可能」等の利点があることが知られている。そのため、超音波接合によって軽金属材料と異種金属のマルチマテリアル化が実現すれば、自動車産業や電気産業等の多くの工業分野において技術革新がもたらされると期待されている。

本研究では、異種金属間の超音波接合における接合機構を明らかにするため、Al-Fe、Al-Cu、Al-Ti等の様々な組合せの超音波接合を実施した。得られた試料は、引張せん断試験による強度試験、電子顕微鏡法による微細組織解析、インプロセス温度測定と粒子法による伝熱解析等の実験や計算に用いて、接合部形成に関わる基礎物理・化学現象を明らかにした。図1は、6061アルミニウム合金と304ステンレス鋼の接合界面近傍における結晶方位マップとマップ中の各領域より得られた{111}極点図である。アルミニウム合金の接合界面近傍においては、結晶粒が1 μm以下に微細化され、ひずみの多く残る強加工組織となっている様子が観察された。また、接合界面近傍の極点図を見ると、明らかに局中心部で強度が高くなっていた。この分布は、fcc金属のせん断帯において観察される分布であり、すべり面である結晶粒の{111}面が接合面に対して平行になっていることを示唆している。つまり、超音波接合部形成には、超音波振動による微視的なせん断変形が重要な役割を果たしていると考えられる。さらに、透過型電子顕微鏡により接合界面近傍の微細組織を観察すると、アルミニウム合金表面に存在した酸化皮膜は破壊・分断され、AlとFeの新生面同士が接触することにより、厚さ数十nm程度の金属間化合物相が形成されていることが明らかになった。以上の得られた知見に基づき、図2に示す金属材料の超音波接合部形成メカニズムの物理モデルを提案した。

現在は、超音波接合の幅広い工業展開を目指して、「金属材料の3Dプリンタの開発」や「ナノ構造界面の創製による新機能の発現」のテーマにより、技術ニーズに基づいた応用研究も進めている。今後は、「超音波接合の大量積化」や「超音波シーム接合による革新的クラッド材開発」等の研究を実施し、構造材料にも展開していきたいと考えている。本研究の進展により、低エネルギーかつ低環境負荷で多種多様な材料のマルチマテリアル化が実現できれば、レアメタルに頼らない省資源型材料による安価な製品開発が可能となる。現代社会においては、エネルギー問題や資源の枯渇等の環境問題が山積しているため、「持続可能なものづくり技術」の開発が不可欠である。それを支えるキーテクノロジーとして、超音波接合のポテンシャルを最大限引き出せる研究を推進していきたいと考えている。

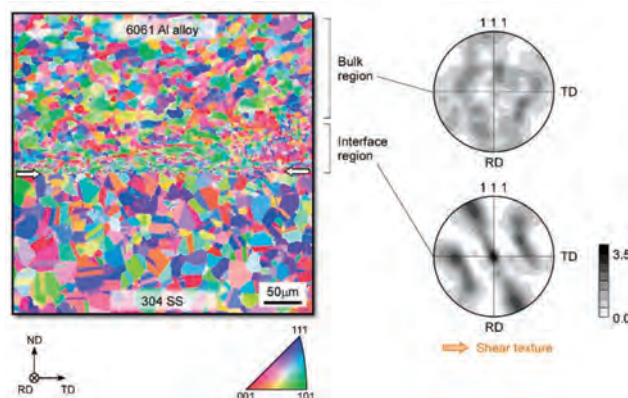


図1 6061アルミニウム合金と304ステンレス鋼の超音波接合部における結晶組織と結晶方位分布

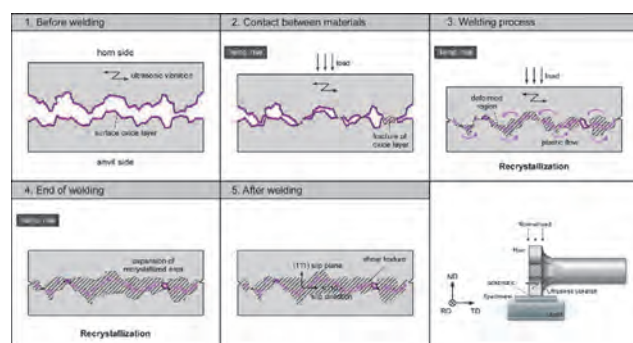


図2 金属材料の超音波接合部形成メカニズム

研究プロフィール



熱音響現象を利用した熱機関の研究 ～音波エンジンFAQ～

東北大学大学院工学研究科
機械システムデザイン工学専攻
教授 毘 琶 哲 志

1. はじめに

熱と音波の関わりは古くニュートンの時代にまでさかのぼることができます。ニュートンは著書「プリンキピア」の中で、気体を伝わる音波の音速を理論的に求めました。その理論の中では、その当時知られていたボイルの法則が用いられました。これは音波伝搬において気体の温度が一定不変であると仮定したのと同様です。そのため彼の求めた音速は、等温音速と呼ぶことができます。しかし、ニュートンの予測は実測値とはやや異なっていました。この問題を解決したのはラプラスです。彼はその頃の熱力学で明らかにされた断熱過程における気体の関係式を用いて音速を求めました。彼の音速は断熱音速と呼ばれ、現在よく知られているように、断熱音速は自由空間中を伝播する音波の音速を再現することができます。

管内音波の場合、自由空間とは異なり多様な熱的現象が起こります。ラプラスの理論の成功以来、比較的広い空間を伝わる音波に対しては「断熱音波」が第一近似として広く用いられるようになりました。なにしろ断熱ですから音響現象と熱現象は一切関わりがないと思込んでしまっても仕方がない面もあります。しかし、細い管の中を伝搬する気柱音波では、振動する流体と管壁の間の熱的相互作用が本質的に重要な役割を果たします。図1は管内音波の伝播定数が気柱管の太さ、細さを表す無次元量 $\omega\tau$ により、どのような影響を受けるかを示す実験結果 [1] です。[ω は音波の角振動数、 τ は管断面内における気体の熱緩和時間であり、円管の場合には流路半径 r と気体の温度拡散係数 α を用いて $\tau = r^2 / (2\alpha)$ で与えられる。] 流体の温度境界層と同程度の太さの管内を伝搬する音波は、粘性によるロスは多少あるものの管壁と積極的な熱的相互作用をします。その結果、例えば、温度勾配をもつ気柱管の中の気体が不安定になってひとりでに振動を開始する熱音響自励振動や温度勾配による音響パワーの増幅効果、音波による低温生成の効果や熱伝導の促進効果などの多様な熱音響現象を引き起こします。

21世紀の現在、音波の熱力学が再び注目を集めるように

なってきました。その応用である、熱音響自励振動を利用した音波エンジンは、可動部品を持たない熱機関として関心を集めています。このエンジンでは粗密波である音波中の気体要素が経験する周期的な熱力学的過程（圧縮や膨張など）を通じてエネルギー変換を実行します。また、このタイプのエンジンは固体ピストンを往復運動させて機械的動力を取り出すのではなく、気柱音波の音響パワーの形で動力を取り出すという特徴を持ちます。私たちはこの音波エンジンの基礎と応用に関する研究を行っています。本稿では、これまで音波エンジンに寄せられることが多かった疑問点（Frequently Asked Questions, FAQ）について答えながら私たちの研究内容を紹介したいと思います。

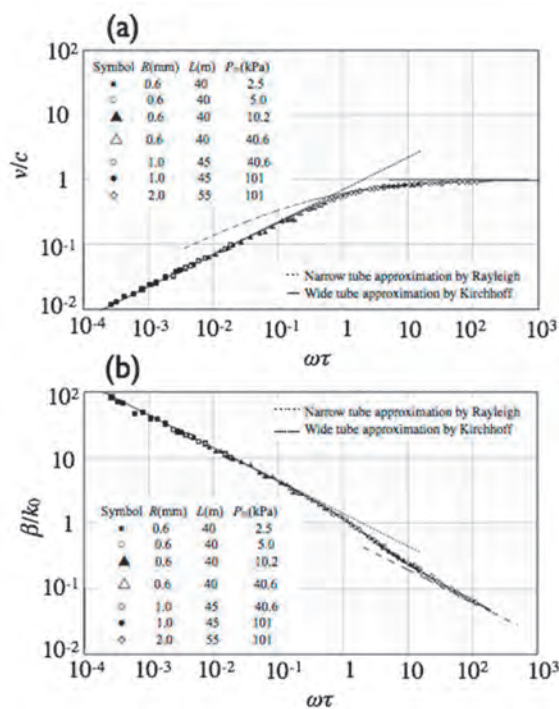


図1 管内音波の伝播定数 [1]。(a)は断熱音速 c で無次元化した音速 v 、(b)は断熱音波の波数 $k_0 = \omega/c$ で無次元化した減衰定数 β 。

2. 熱音響自励振動とはどんな現象ですか。またそれを応用した音波エンジンの具体的な構造は？

熱音響自励振動を起こす簡単な例を図2 (a) に示します。一端を閉じた気柱共鳴管の中に蓄熱器 (もしくはスタック) と呼ばれる多孔質体が挿入されただけの構造です。この蓄熱器の両端には熱交換器が挿入されていて蓄熱器の閉端に近い側の熱交換器で加熱し、また反対側の熱交換器で室温に保つことで、蓄熱器内の細い流路に軸方向に温度差を与えます。この温度差がある一定値以上になると内部の気柱は不安定になって自励振動を始めます。その周波数は気柱共鳴管の固有モードと一致します。大学内のwebサイトで振動が開始する様子をムービーで見る (聞く?) ことができます。(https://www.facebook.com/dr.noise.eng.tohoku) 私たちは蓄熱器が音源となって振動を開始することや、その振幅が温度差とともに増加するメカニズムを系の発展方程式を実験的に求めることで明らかにしています [2]。

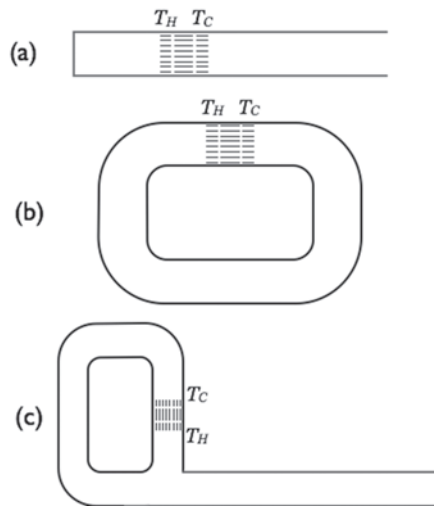


図2 音波エンジン：(a) 共鳴管型、(b) ループ管型、(c) 枝管共鳴管つきループ管型。それぞれ2つの熱交換器 (温度 T_H , T_C) に挟まれた蓄熱気を備える

音波エンジンも基本的に蓄熱器と高温、低温の一对の熱交換器、そして気柱管で構成されます。装置の作動流体には、加圧したヘリウムガスやヘリウムガスとアルゴンガスの混合気体がしばしば用いられます。気柱管のデザインには、両端がある共鳴管のタイプだけでなく、図2 (b)、(c) に示すように、ループ状のタイプ、ループと枝管共鳴管を組み合わせたタイプがあります。また同軸二重管 [3] を採用した例もあります。音響インピーダンスに注意を払えば、枝管共鳴管を固体振動部品で置き換えることもできます [4]。最近私たちの研究室では、ループ状の音波エンジンと発電機を接続した装置を開発しました (図3)。この装置には蓄熱器と熱交換器が3つ挿入されています。それぞれに230度の温度差を与えたときの音響パワー出力はおよそ8ワットです [5]。作動気体である0.5 MPaの窒素ガスを0.5 MPaのヘリウムガスに置き換えると18ワット程度までパワーは向上することを確認していますが、音響電気変換効率の向上や全体の効率向上には現在も取り組

んでいるところです。条件また枝管を介して二つのループを接続した装置では、一方の音波エンジンで発生させた音響パワーを入力仕事として他方のループでは逆のエネルギー変換が実行されマイナス30度程度の低温環境を生成できます。

3. 音波エンジンの特徴や用途は何ですか。

音波エンジンは可動部品を持たない外燃機関と見ることができます。太陽光エネルギーやバイオマスエネルギー、産業排熱と言った多様な熱源をエネルギー源として動作可能です。固体ピストンや可動バルブを持たないため、安価に作成できることや長期信頼性が高いことが特徴です。しかも気柱管や蓄熱器を構成するのに特殊な材料を必要としません。また作動ガスは無害なヘリウムガスやアルゴンガスといった希ガスです。上述のように発電機と組み合わせたり、音波クーラーと組み合わせたりすることで熱駆動型の発電機やクーラーに発展させることができます。

欧米では、天然ガス採掘場に熱駆動型クーラーを設置して天然ガスを液化する試みや、化学工場の排熱を駆動源にしてヒートポンプを駆動し、比較的低い温度環境の排熱を昇温することで、排熱のアップグレードをする試みがなされています。いずれもまだ実用化されてはいませんが、米国、オランダ、フランス、中国、そして日本で、エネルギー問題や環境問題の解決に貢献可能なエネルギー変換技術として研究が進められています。私たちが開発中の音波エンジン発電機 (図3) もその動作温度差を230度程度と比較的低く設定し、産業排熱や各種内燃機関の排熱を有効利用することを目標としています。

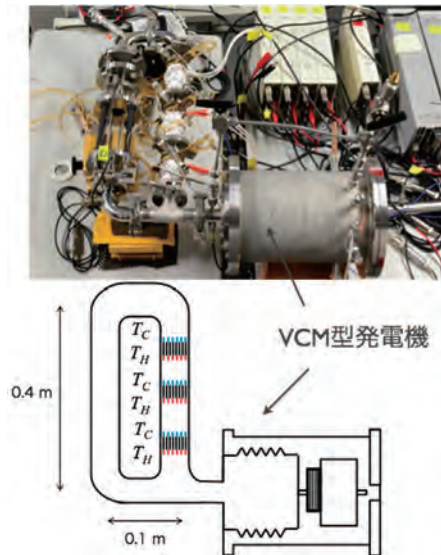


図3 研究室で開発した音波エンジン発電機 [5]。

4. エネルギー変換のメカニズムやその効率について教えてください。

音波エンジンのエネルギー変換メカニズムは、スターリングエンジンと高い類似性を持ちます。図4 (a) に示すようにスターリングエンジンは2つの対向ピストンを90度程

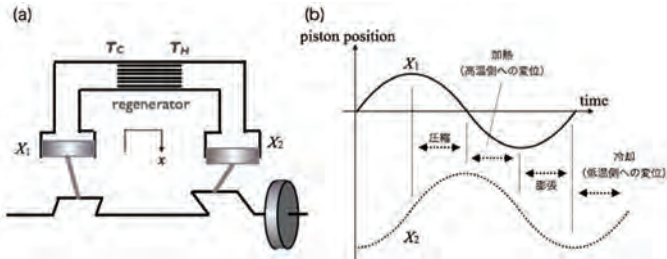


図4 スターリングエンジンの模式図 (a) と対向する2つのピストンの変位 X_1, X_2 の時間発展 (b)。2つのピストンが互いに近づく行程では気体は「圧縮」され、また互いに遠ざかる行程では「膨張」する。このような圧力変動と、平均変位 $(X_1 + X_2)/2$ は90度だけ位相がずれていて、進行波音波の流体の圧力と変位の位相関係と等しい。

度の位相差をもって同じ周波数で往復動させることで、作動気体が周期的熱力学的過程（—圧縮—加熱—冷却—膨張—）を経験して、サイクルを実行します。スターリングサイクルは可逆サイクルですから原理的にはカルノー効率を実現可能な優れたエンジンです。

スターリングエンジン中の作動気体の圧力変動と変位変動の位相関係に注目すると、実は進行波音波における位相関係と同じです。そのため、温度差のある蓄熱器を進行波音波が伝搬すると蓄熱器の中で変位変動する気体はスターリングサイクルを実行します。その結果、私たちが実験で示したように、進行波音波が低温側から高温側へと蓄熱器を通過すると、音響パワーの増幅が起こります [6, 7]。図2 (b) に示すようにループ状の気柱管を用いて音響パワーをフィードバックすることで自励発振が可能になります。逆に、高温側から低温側へと伝搬するときには音響パワーが強く減衰します。このような非対称的な作用を用いて現在は音波の一方伝搬を可能にする音響ダイオードの開発に取り組んでいます [8]。

米国のグループとオランダのグループは、ループと枝管共鳴管からなるエンジンにおいて、カルノー効率の42%と48%に相当する熱—音響パワー変換効率を実験的に報告しました。この効率は既存の熱機関にも匹敵する高い効率です [9,10]。

5. 音波エンジンの出力の大きさはどの程度ですか。

音響パワー I は管断面積 A 、圧力変動の振幅 p 、断面平均流速変動の振幅 u と圧力と断面平均流速の位相差 θ を用いて

$$I = \frac{A}{2} p u \cos \theta$$

と書くことができます。音波エンジンにおいて発生する圧力変動の振幅 p は、作動気体の充填圧力 p_m のおよそ数パーセント程度です。これ以上大きくなると、正弦波はひずみ始め、やがて不連続波面を持つような衝撃波音波に移行することが明らかになっています [11,12]。図5に示したのは両端を閉じた共鳴管内に発生する熱音響自励振動衝撃波の時空間発展です。作動気体の音速 c と断面平均流速の振

幅 u の比は p/p_m 程度になりますからやはり数パーセント程度です。そして位相差は進行波音波では同位相になりますから、 $\cos \theta \sim 1$ です。ために1 MPaのヘリウムガス（音速1000 m/s）を作動気体として仮定し、 $p/p_m = 5\%$ の振幅の進行波音波が直径0.2 mの管内に発生したとすると、音響パワーはおおよそ40 kWになります。日常生活で関与する音響パワーに比べてはるかに大きな音響パワーが可能です。

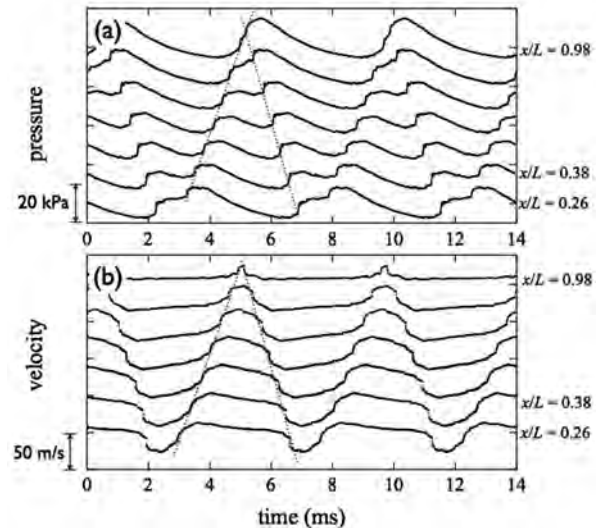


図5 共鳴管型音波エンジン（全長 L ）における熱音響自励振動衝撃波の時空間発展。(a) は圧力、(b) は流速を表す。実験データのオフセットは測定場所の軸座標 x に比例するように決めた。

6. 音波エンジンのサイズは？

音波エンジンのサイズは作動周波数 f と強い関係があります。両端を閉じた気柱管では音波の基本モードの波長 λ は管全長の2倍です。またループ管では λ はループ周長と等しくなります。波長 λ と周波数 f は音速 c と $c = f\lambda$ の関係にありますから、全長が長い音波エンジンでは低い周波数、短い音波エンジンでは高い周波数が実現することになります。スターリングサイクルを効率的に実行するためには、流体は蓄熱器の内部で固体壁と十分な熱交換をしなければならず、その一方で粘性によるロスも無視できません。理論的な解析では、一般的には低い周波数の方が高い効率が期待されます。そのため、全長が数メートルから十数メートルのサイズの音波エンジンが多く試作されています。ただし手のひらサイズの装置も試作されていますから、効率よりもサイズが重要な場合には十分な小型化も可能です。また図3の装置のループの全長は1メートルです。これを系の代表長さとして動作周波数は340 Hzとなりますが、機械振動系（VCM型発電機）と組み合わせるために、50 Hzと格段に小さくすることもできました。

7. 音波エンジンの動作に必要な温度差はどの程度ですか。

音波エンジンが必要とする温度差は、蓄熱器で起こるエネルギー変換の出力仕事の大きさとそのほかの部分でのエネルギー損失のバランスで決まります。蓄熱器で起こるエ

エネルギー変換の大きさは温度差が高ければ高いほど大きくなります。逆に言えば、利用可能な熱源の温度差が低ければ、音波エンジンを動作させるのは容易ではありません。私たちは進行波音波が蓄熱器を通過するときの音響パワーの増幅効果に注目し、同じ温度差の蓄熱器を直列に並べた多段構成を提案しました [13] (図6 a)。これにより温度差60℃での自励発振に成功しています。複数蓄熱器の直列配列は、低温度差排熱の利用を目指す音波エンジンでは必須のデザインと考えています。またこの研究の過程で、振動のQ値の温度依存性から振動開始温度を予測可能なことを示しました (図6 b)。振動開始するために、エネルギー変換をより活発化すべきか、それよりもむしろエネルギー損失を小さくすべきかを判断する上でQ値は重要です。

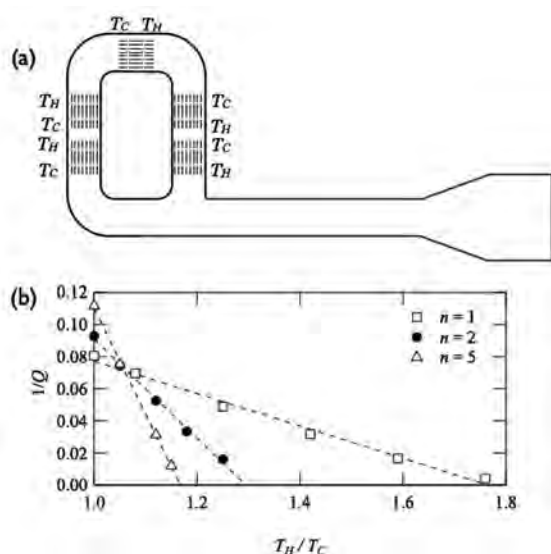


図6 5つの蓄熱器をもつ枝管付きループ管型エンジン(a)と蓄熱器個数 n と振動のQ値の逆数の温度比依存性の関係(b) [13]。温度比が1のときのQは系の損失の程度を表し、Qの温度比に対する変化率(直線の傾き)はエネルギー変換の程度を表す。蓄熱器数 n が多いと損失が増える一方でエネルギー変換による利得があることが分かる。

8. 自励振動は音波エンジンとして役に立つ一方で、迷惑な現象でもありませんか。

ガスタービンエンジンの燃焼器で生じる燃焼振動や液体ヘリウムのデュワーで生じるタコニス振動は、それぞれ大変に迷惑な現象として知られています。燃焼振動は最悪のケースではガスタービンエンジンの破壊につながりますし、タコニス振動は液体ヘリウムの蒸発量の著しい増加を引き起こします。これらの熱的不安定振動を抑制する手法の開発は工学の急務です。最近私たちは二つの熱音響振動子を結合することを提案しました [14]。この方法ではバルブとチューブで管同士を接続するだけで図7に示すような広いパラメータ範囲で「振動の死 (oscillation death)」を引き起こすことができます。この手法を発展させて、振動をなるべく起こさない方法についても研究を深めていきたいと考えています。

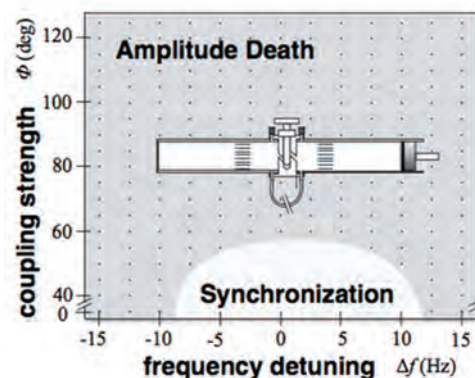


図7 結合熱音響自励振動系の分岐図 [14]。縦軸は結合強さ(バルブ開度)、横軸は2つの熱音響自励振動子の周波数差。実験では一方の周波数は250 Hzで固定し、他方の周波数を気柱管の長さを変えて調整した。薄いグレーの領域では同期振動が観測されるが、濃いグレーの領域では振動は停止する。

9. さいごに

熱音響自励振動はある種の熱機関として見なせる一方で、非平衡系に特有の散逸構造でもあります。カオス振動や同期現象 [15,16] などの非線形振動現象も観測しています。理論や数値計算で予測される多様な非平衡非線形現象を今後実験で検証してみたいと考えています。もちろん、可動部品のない熱機関である音波エンジンの研究もようやく基礎固めが終わったところで、その工学的有用性をよりシビアに検討していかなければなりません。物理学と機械工学の境界領域に新しい研究分野を立ち上げたいと考えています。

【参考文献】

1. T. Yazaki, Y. Tashiro, T. Biwa, "Measurements of sound propagation in narrow ducts," Proceedings of the Royal Society A, **463**, 2855-2862 (2007).
2. T. Biwa, F. Shima, T. Yazaki, "Experimental Determination of the Evolution Equation for Thermally Induced Acoustic Oscillations," J. Phys. Soc. Jpn., **82** 043401 (2013).
3. J. Morii, T. Biwa, T. Yazaki, "Measurements of acoustic particle velocity in a coaxial duct and its application to a traveling-wave thermoacoustic heat engine," Rev. Sci. Inst. **85** 094902 (2014).
4. H. Hatori, T. Biwa, T. Yazaki, "How to build a loaded thermoacoustic engine," Journal of Applied Physics. **111** 074905 (2012).
5. 大竹翔太, 兵頭弘晃, 琵琶哲志, 音波エンジン発電機の試作, 冷凍, in press
6. T. Biwa, Y. Tashiro, M. Kozuka, T. Yazaki, U. Mizutani, "Experimental demonstration of thermoacoustic energy conversion in a resonator," Physical Review E, **69**, 066304 (2004).
7. T. Biwa, R. Komatsu, T. Yazaki, "Acoustical power amplification and damping by temperature gradients,"

- Journal of Acoustical Society of America, **129**, 132-137 (2011).
8. 中村啓樹, 琵琶哲志, 兵頭弘晃, 温度勾配を利用した音響ダイオード, H27/9/16-H27/9/18, 日本音響学会 2015年秋季研究発表会 (会津大学).
 9. S. Backhaus and G. W. Swift, "A thermoacoustic Stirling heat engine," *Nature*, **399**, 335-338 (1999).
 10. M. E. H. Tijani, S. Spoelstra, "A high performance thermoacoustic engine", *J. Appl. Phys.*, **110** 093519 (2011).
 11. T. Biwa, T. Takahashi, T. Yazaki, "Observation of traveling wave thermoacoustic shock waves," *Journal of Acoustical Society of America*, **130** 3558-3561 (2011).
 12. T. Biwa, K. Sobata, S. Otake, T. Yazaki, "Observation of thermoacoustic shock waves in a resonance tube (L)," *J. Acoust. Soc. Am.*, **136** 965-968 (2014).
 13. T. Biwa, D. Hasegawa, T. Yazaki, "Low temperature differential thermoacoustic Stirling engine," *Applied Physics Letters*, **97**, 034102 (2010).
 14. T. Biwa, S. Tozuka, T. Yazaki, "Amplitude death in coupled thermoacoustic oscillators," *Physical Review Applied*, **3** 034006 (2015).
 15. G. Penelet, T. Biwa, "Synchronization of a thermoacoustic oscillator by an external sound source," *Am. J. Phys.*, **81** 290-297 (2013).
 16. T. Yoshida, T. Yazaki, Y. Ueda, T. Biwa, "Forced Synchronization of Periodic Oscillations in a Gas Column: Where is the Power Source?," *J. Phys. Soc. Jpn.*, **82** 103001 (2013).

【著者略歴】

びわ 哲志

1971年2月生まれ

1989年 名古屋大学工学部入学

1993年 名古屋大学工学部 卒業

1999年 名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了
同助手

2006年 東北大学大学院工学研究科 助教授

2013年 東北大学大学院工学研究科 教授



航空宇宙工学への 「実験空気力学」からのアプローチ

東北大学大学院工学研究科
航空宇宙工学専攻
教授 浅井 圭 介

1. はじめに

昨年11月11日「MRJ」（三菱リージョナルジェット）が初飛行に成功しました。MRJは日本初の国産ジェット旅客機で、内外のエアラインから400機を越える注文を受けています。実は今MRJだけでなく、ホンダエアクラフトの自家用ジェット機「HONDAJET」、川崎重工業の「P-1 哨戒機」と「C-2 輸送機」と新型機が次々に開発されていて、日本の航空機産業はこれまでにない活況を呈しています。

私の専門は空気力学（aerodynamics）、さらに細かく言うと「実験」を主体とした研究を行っています。航空宇宙工学は理屈や概念を論じるだけでなく、飛ばすことに意義を見出す学問です。実験を通じて航空機開発のリアリティを知る人材を育成することが使命だと考えています。本稿では、私たちの研究室で進めている最新の研究と航空関連教育プログラム的一端を紹介します。

2. 感圧塗料～流れ場の革新的な可視化技術

航空機が重力に逆らって浮揚できるのは、空気から受ける力によるものです。航空機を設計するには、この空気力の正確な予測が不可欠です。近年の数値シミュレーション

技術の進歩には著しいものがありますが、その精度を保証するには実験による検証が必要とされます。また、流れの剥離や乱流遷移のようなモデル化が難しい現象ではまだまだ実験の方が信頼性に優れていると言えます。

実験では、航空機の精密な縮尺模型を「風洞」と呼ばれる飛行速度に相当する様な風を作り出す装置に入れて試験します。風洞実験で空気力を予測するには、模型に働く風圧分布の測定が必要になりますが、模型に取り付けられるセンサーの数には限りがあります。そこで考え出されたのが、「感圧塗料」（Pressure Sensitive Paint [PSP]）と呼ばれる機能性塗料です（図1）¹⁻³⁾。

PSPには酸素分子によって蛍光やりん光の発光が弱まる特殊な色素が使われています。この性質は「酸素消光」と呼ばれ、図2はそのような性質をもつ色素の代表である白金ポルフィリンとルテニウム錯体です。空気の成分の21%は酸素なので、風圧の変化は酸素濃度の変化となってこれらの色素の発光強度の変化に現れます。そのときの発光分布をデジタルカメラで撮影し画像処理すれば、物体表面の圧力分布が求められるのです。

図3にPSPで計測した旅客機模型の主翼上面の圧力分布の一例を示します。この実験は宇宙航空研究開発機構（JAXA）が所有する2m x 2m遷音速風洞で行われました。衝撃波の発生によって圧力が変化する様子が見事に可視化されています⁴⁾。我々が開発したPSPはJAXAが実施したMRJの風洞実験にも使用されました。

このように便利な技術ですから、感圧塗料の応用は様々な分野に広がっています。私たちの研究室でも、自動車や高速鉄道を開発する企業との共同研究を行いました。さらには、スポーツ工学研究の第一人者である山形大学の瀬尾和哉教授と共同で、ラグビーボールやサッカーボールの風洞実験にもPSPを適用しました⁵⁾。

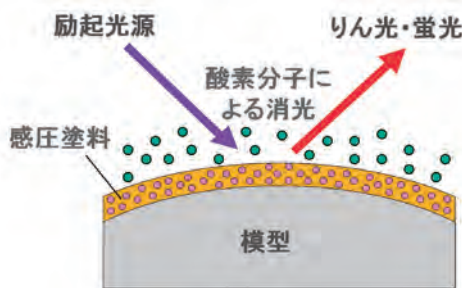


図1 感圧塗料（PSP）の概念

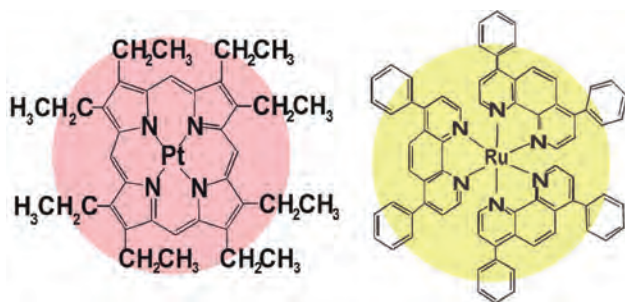


図2 圧力センサーとなる機能性分子の一例

3. 風洞 ～空気力学の研究に欠かせないツール

今から百十二年前に米国のライト兄弟が人類史上初めて動力付飛行機による有人飛行に成功しました。ライト兄弟がさまざまなライバルを押しつけて初飛行の栄冠を勝ち取ったのには理由があります。グライダーの設計から始めた彼らも最初は失敗続きでした。状況を大きく変えたのは小麦粉の箱を使って風洞を自作したことです。

ライト兄弟は風洞を航空機的设计に使った先駆者であ

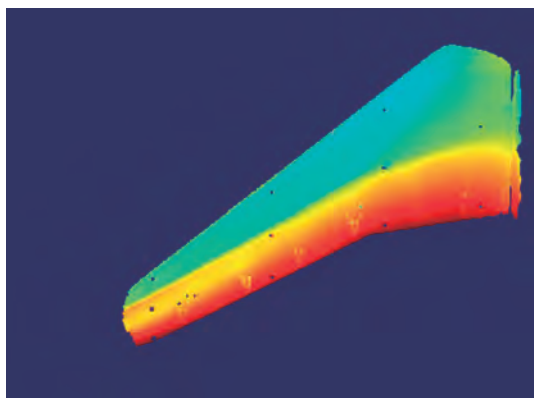
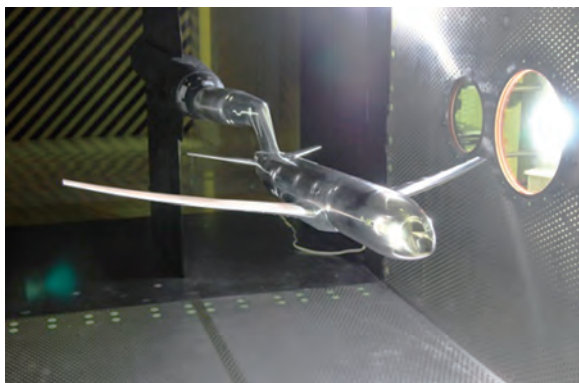


図3 感圧塗料で測定した旅客機模型の主翼圧力分布 (JAXA航空技術本部との共同研究の成果)⁴⁾

り、この装置を使って二百種類以上の翼の試験を行いました。私たちの研究室も複数の風洞を所有しています。基礎空力研究用低速風洞では最高で時速200km以上、遷音速風洞では音速の1.5倍の風速の風をつくることができます。

空気は目に見えないものの代表ですが、感圧塗料などのイメージング技術を駆使すれば、流れを画像として可視化することができます。医療現場ではMRIやPETなどの最新の画像診断技術によって人体の内部が細かく調べられるようになりました。航空機設計の世界でも、流れの診断技術が不可欠のものとなっています。

世界に目を向けると、飛行機と同じくらいに風洞技術の進歩にも目覚ましいものがあります。現在世界で最も先端的な風洞はドイツのケルン市にある「欧州遷音速風洞 (ETW)」でしょう。この風洞では内部気体として高圧の低温窒素ガスが使われていて、エアバス機などの大型旅客機の流れを正確に（実機レイノルズ数を）再現することができます。MRJも開発の初期段階でこの風洞を使用しました。

ずいぶん以前のことですが、私はこの風洞を使って実験する機会を得ました。図4上図はETWの測定部で撮影した記念写真です。旅客機形状をした模型の主翼に塗装されているのは、私たちが開発した特殊な塗料（感温塗料）です。感圧塗料が圧力を測る塗料だったのに対して、この塗料を用いると物体上で境界層が層流の領域と乱流の領域が見分けられます（図4下図）。この塗料はドイツ航空宇宙研究センター（DLR）にライセンスされ、様々な航空機の開発試験に適用されています。

4. 動的風洞実験～安全飛行のための鍵を求めて

航空機の設計と運用において「安全」は最も重要な要素です。航空機がより安全に飛行できるよう私たちには不断の努力が求められます。民間航空の国際的な組織（ICAO）がまとめた統計データによると、航空機の死亡事故の原因のトップは「LOC-I」（Loss of Control In-flight）と言われる事象です。LOC-Iとは晴天乱気流やウィンドシア、山岳波などの気象不安定、それに着水や大型機の後方乱気流などが原因で、航空機が通常では考えられない異常な姿勢に陥る事象の総称です。LOC-Iは大変危険であるが故に飛行試験による確認やパイロットの訓練が行えません。LOC-Iに陥ったときに航空機がどのような運動をするのか、どうすれば脱出できるかが事前にはわからないのです。

私たちは、飛行試験では行えないこのような危険な状況を風洞実験で再現しようと考えています。このような実験を「動的風洞試験」（Dynamic Wind Tunnel Test [DWT]）と呼んでいます。DWT実験を支えている最新の技術がロボットマニピュレータです。

図5は、ロボティクスがご専門の内山勝名誉教授の研究室と共同で開発した6自由度超高速パラレルロボット「HEXA-X2」です。このロボットは独立した6つのモータとリンク機構からなり、上下・左右の加振や高速の回転運動を行う能力をもっています。これを用いて航空機の模型を風洞気流中で「模擬飛行」させることが可能です⁶⁾。

さらに、最近、私たちは「磁力支持天秤装置」（Magnetic

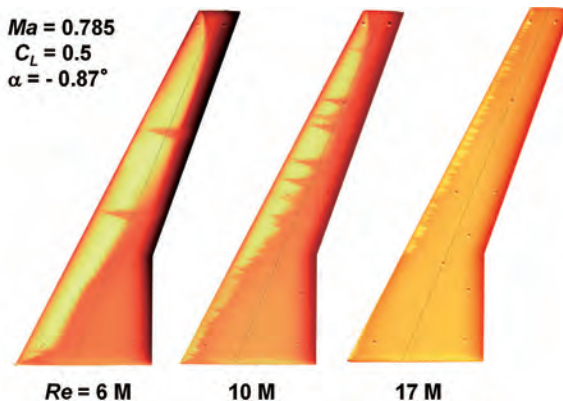


図4 ETW測定部（上）と感温塗料によって計測された境界層遷移の可視化画像（下）

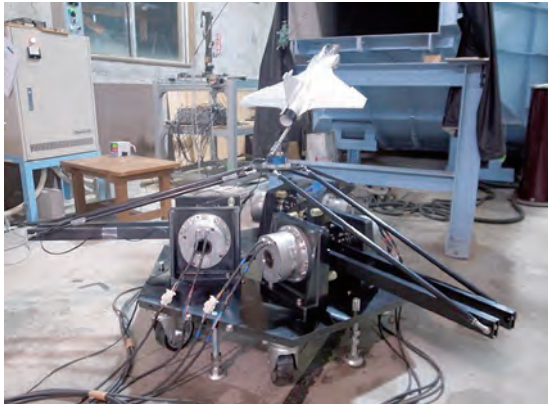


図5 6自由度超高速パラレルロボット「HEXA-X 2」

Suspension and Balance System [MSBS]) という装置の研究開発をはじめました⁷⁾。MSBSは電磁石が発生する磁気力で模型を空中支持する装置です(図6)。流体科学研究所の低乱熱伝達風洞に設置されている1m MSBSは世界最大の規模を誇っています。我々の研究室のMSBSはこれよりずっと小型ですが、動的空気力の測定や流れ場の可視化、流れを制御するさまざまな空力デバイスの研究に利用されています。現在、乱気流を発生する装置を製作中で、これができると風洞で突風を受けたときの航空機の応答が調べられます。将来的にはMSBSを使ってLOC-Iの風洞実験を行いたいと考えています。

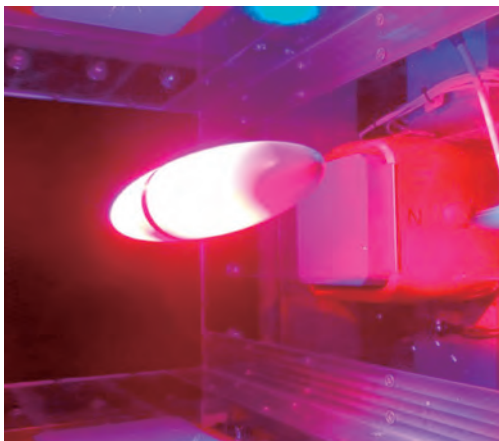
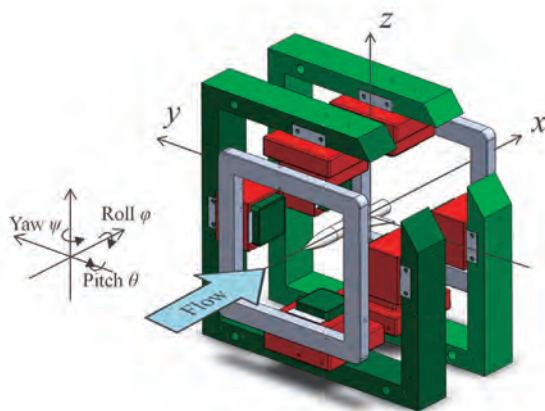


図6 0.3-m磁力支持天秤装置のコイル系と気流中で磁力支持された6:1回転楕円体模型

5. 火星に飛行機を飛ばす～世界で唯一の火星大気風洞

宇宙には大気をもつ天体が地球のほかにもあります。たとえば金星には二酸化炭素が主成分の大気があり、気圧92bar、気温470℃の灼熱の世界です。逆に土星の衛星タイタンには窒素を主成分とする大気があり、その内部はマイナス180℃の極寒の世界です。

私たちにとって身近な惑星である火星も大気をもつ天体の一つです。火星の大きさは地球の約半分、質量が小さいので引力は地球の3分の1です。火星は地球より太陽から離れた位置にあり、火星の平均気温はマイナス70℃です。大気の主成分は金星と同じ二酸化炭素ですが、火星の大気圧は7hPaしかありません。火星大気は地球大気の100分の1にも満たない希薄な大気なのです。

このように希薄な大気でも火星の重力は小さいので、超軽量で効率の高い飛行機であれば大気飛行が可能です。図7は私たちの研究室で検討した火星飛行機の概念図の一例です⁸⁾。畳一枚くらいの面積の翼をもち、全体の重量が3.5kg以下であれば、計算上は希薄な火星大気でも浮揚でき、プロペラ駆動で50m/s(時速180km)のスピードがでます。飛行時間は1時間足らずですが、時速30m程度でしか動けないローバー(地上を走る探査車)では出来ない、広範囲の探査が可能です。

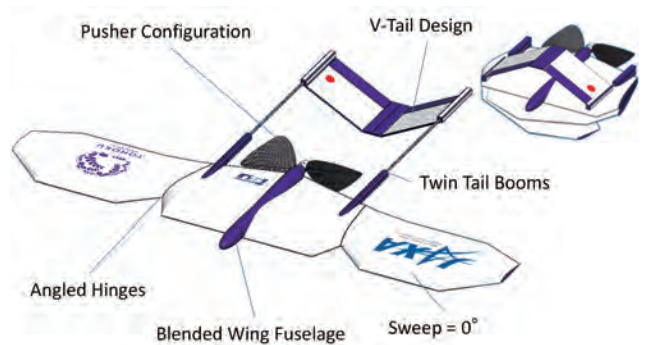


図7 東北大学の火星飛行機の概念図の一例⁸⁾

原理上は可能でも、火星の大気環境は地球とは大きく違っているので、地球で性能の良い飛行機が火星でも性能を発揮する保証はありません。これまで蓄積してきた知識や経験が火星飛行機の設計にはまったく役に立たないかもしれません。

この問題を解決するため私たちは「火星大気風洞」(Mars Wind Tunnel [MWT])とよばれる特殊な風洞を開発しました。完成した風洞の写真を図8に示します。この風洞は火星での大気飛行を地上で再現できる世界で唯一の風洞です⁹⁾。内部の圧力を百分の1気圧にまで下げることができ、二酸化炭素を使った実験が行えます。最大で音速の84%近い速度の風が作り出せます。この風洞を利用して様々な翼模型のデータを取得し、JAXAが計画する火星飛行機の主翼やプロペラの設計に適用しました¹⁰⁾。

現在、火星飛行機の研究開発は宇宙科学研究所の大山聖准教授(東北大学出身)と当研究室の永井大樹准教授を中

心するワーキンググループによって進められています。当面の目標は火星飛行機のプロトタイプの高々度における飛行実証試験です（図9）。高度33,500mに達すると、気圧が7hPa、気温がマイナス55℃という火星大気に近い環境が得られます。実験が行われるのは来年初夏の予定。実験の成果が待たれます。



図8 世界で唯一の火星大気風洞 (MWT)



図9 火星飛行機の高々度飛行試験プロジェクトのパッチ

6. おわりに

東北大学では、現在、リーディング大学院プログラム（代表：湯上浩雄教授）の一環として「航空安全フロンティア」という教育研修が実施されています。図10は、昨年2月に航空安全フロンティアの受講生を連れてドイツに海外遠征したときの写真です。場所はドイツ航空宇宙研究センター（DLR）の飛行実験施設で、背後に見えるのはエアバスA320を改造した実験機「ATRA」です。DLRでは、ATRAを使った実験にブランシュバイク工科大学やベルリン工科大学の大学院生が参加しているそうです。冒頭でお話したように、今、日本の航空はかつてないほど熱い状態にあります。我が国で開発される航空機のフライトテストに東北大学の学生が参加できる環境を是非実現したいと願っています。



図10 航空安全フロンティア研修の受講生と訪問したドイツ航空宇宙研究センターの飛行実験施設（2015.2）

【参考文献】

1. 浅井圭介, 可視化情報, Vol.18, No.69, pp. 97-103, 1998.
2. 浅井圭介, 日本機械学会流体工学部門ニュースレター「流れ」No.40-1, 2002.
3. 染谷聡他, 可視化情報, Vol. 34, No. 132, pp. 3-8, 2014.
4. Sugioka, Y., et al, The 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting (AIAA 2015-0025), 2015.
5. Seo, K., et al, J. Visualization, Vol. 13, Issue 2, pp 97-105, 2010.
6. Asai, K., et al, The 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS2012-3.23 - 28, 2012.
7. 野口大樹他, 第45期年会講演会講演集, 日本航空宇宙学会, 2014.
8. Fujita, K., Luong, R., et al. Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol. 10, No. ists28, pp. Te_5-Te_10, 2012
9. Anyoji, M., et al, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, Vol.9, pp.21-27, 2011.
10. Anyoji, M. et al, AIAA Journal, Vol. 53, No. 6, pp. 1640 -1654, 2015.

【著者略歴】

あさい けいすけ
浅井 圭介

1956年4月生まれ

1985年 京都大学工学部航空工学科卒業

1985～2003年 航空宇宙技術研究所（現JAXA）勤務

1988～89年 NASAラングレー研究センター客員研究員

1995年 工学博士（東京大学工学系研究科）

2003年 東北大学大学院工学研究科教授



バクテリアべん毛の機能解析 計測を通して見えてくる単細胞生物の高性能マシン

東北大学大学院工学研究科
応用物理学専攻
教授 工藤 成史

1. はしがき

ざっくり言うと、「理学は知ること」、「工学は作ること」というふうに区別できるかと思えます。自然界の本質を“知る”ための手段となる計測技術とその開発は、両者の真ん中あたりから工学の間に位置づけることができるでしょう。ここでは、生物を対象とする計測のお話をさせていただきます。私たちのもうひとつの目標である生体のような分子ロボットを“作る”お話については、またの機会にと思っております。

最初から話が少し飛びます。生物研究に関する話題として、マスコミの取り上げ方の大きさもあって、2014年に起きたSTAP細胞を巡る騒動が記憶に新しいところです。何故あのような論文が発表されてしまったのかについては、これからさらに検証されるべき問題が残っているようです。ただ、背景のひとつとして、生物研究における再現性の低さが指摘されています [1]。例えば、臨床研究で薬の効き目を検証する場合、同じ実験を繰り返すことはまず無理です。同じ被験者を対象にしたとしても、それぞれの人の身体には様々な変化が生じているはずで、同じ体質・体調の人を同じ数だけ集めるのも、現実問題として不可能です。同じ実験を繰り返せないとすると、データの解釈などのプロセスで主観的ファクターが入り込んだとき、それを除去するチャンスが無くなってしまいます。そのような分野に身を置いている研究者は、再現性の確認に対する認識が甘くなりがちなのではないか、というような見方です。

実験の再現性は、自然科学の根底にある信念とも規範とも言えるものです。同じ結果が繰り返し得られることで、実験結果の正しさが確認されます。理論の正しさが確認されるためにも、実験による検証が必要で、その際にも再現性が重視されます。生物の研究においては、DNAを設計図としてタンパク質が作られる所までは、再現性の高い実験が可能です。作られたタンパク質の機能を調べる段になると、タンパク質の置かれた環境によって異なる実験結果が得られる可能性が出始めます。細胞のレベルになると、その構造と機能はかなり複雑になってきて、細胞毎の差異が目立ってきます。人体は約60兆個の細胞から構成されているので、1人のヒトの体内であっても、各細胞の状態が時々刻々変化することが実験結果に影響を与えるかもしれません。別のヒトの体内であれば、さらに差異が大きくな

ります。そのため、上述のように再現性の低さが問題になることが多くなります。このような状況の中で、実験の再現性に気配りしながら、生命現象の本質を理解し、医療などに役立つ情報まで得ようというところに、生物を研究する醍醐味があるとも言えます。

生物を計測という手段を用いて調べていくとき、当然のこととして、実験の再現性をいかに高めるかが大事になります。その際、計測装置の性能に加えて、生物の何を見るかがポイントになることが少なくありません。ばらつきのある大きな実験結果の中から、再現性の高いデータを見つけ出せるかどうかにか成否が掛かっていると言って良いかもしれません。以下では、私が研究対象としているバクテリアの運動器官であるべん毛（モーター）を対象とした計測の話を紹介させていただきます。

2. バクテリアとべん毛モーター

私たちの身の回りには、肉眼では見えない微小な生物が無数に生息しています。単細胞生物のバクテリアは、その中でも最も小型の部類に属しています。図1左に示したビブリオ菌の大きさは数 μm しかありませんが、立派に生きていて、水中を活発に泳ぎ回ります。尻尾のように見えるのがべん毛で、実際には図1右のようならせん形をしています。べん毛はスクリューであり、根元にあるべん毛モーターにより、回転して推進力を生みだしています [2]。

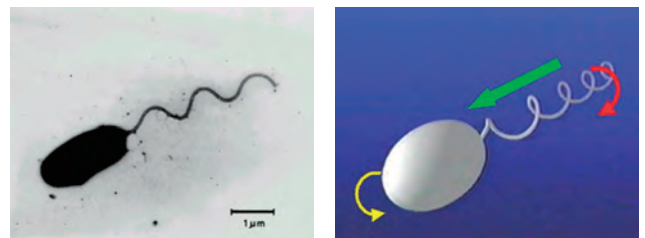


図1 ビブリオ菌の電子顕微鏡像（杉山滋さん提供）と模式図

バクテリアの運動システムを模式的に描くと、図2のようになっています（各部品はタンパク質製の機械）。イオンポンプにより H^+ や Na^+ が汲み出され細胞内外に濃度差が形成されます。陽イオンが汲み出されるので、細胞内は電氣的に外部より電位が低くなります。この濃度差と電位差（膜電位）によって、イオンがべん毛モーターを通して細胞

内に戻ります。このとき得られるエネルギーが、モータ回転に使われます。イオンの流れは電流として記述できますから、べん毛モータは電流を使って回転するとも言えます。また、バクテリアの運動システムには、センサを介した制御系も含まれています。図2に感覚受容体と記したのがセンサで、外界の刺激物質を検知し、信号をべん毛モータに送り、モータの回転方向を切り換える頻度を調節します。詳しくは、後述します。

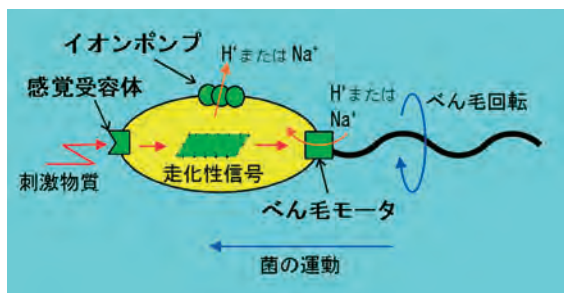


図2 バクテリアの運動システム

3. べん毛モータの回転計測

べん毛が回転していることは、図3に示したテザードセル (tethered cell) の観測により明らかになりました [3]。べん毛がスライドガラスに付着するようにしたところ、菌体の方が回転していたのです。このテザードセルにより、べん毛モータ1個の回転が観測できるので、モータの特性を調べるために、今でも研究に使われています。ただ、菌体を回しているため、負荷が大きな条件での計測に限られるという制約があります。



図3 テザードセルの模式図

負荷が小さい条件でのべん毛回転計測を最初に可能にしたのは、レーザー暗視野顕微測光法です [4]。図4のように、らせん形のべん毛をレーザービームで一方から照明すると、垂直に近い方向から照らされた部分のみが輝点として観測されます。べん毛が回転すると輝点がらせん軸方向に移動するので、その像を光学スリット上に結像して通り抜けた光の強度を測ると、べん毛回転に対応した情報が得られます。実際の測定系を図5に、得られたデータの例を図6に示します。図6のピーク間隔がべん毛の回転周期になるので、逆数をとって回転数が求まります。サルモネラ菌で観測された回転数は約130 Hzでした。また、べん毛が1ミリ秒という極めて短い時間のうちに逆転できることが分かりました。なお、図4は、複数のべん毛を持つサルモネラ菌がスライドガラスに付着している場合を示しています。付着した菌を用いることで、個々のべん毛の回転を長時間計測することができました。

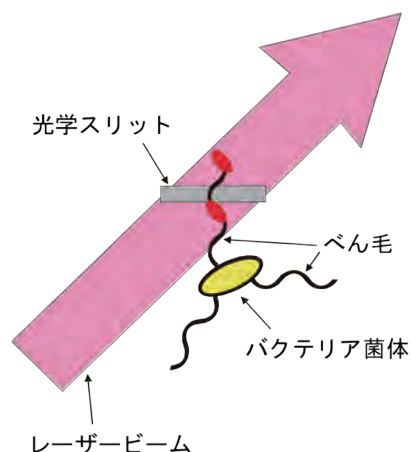


図4 レーザー暗視野顕微測光法によるべん毛回転計測の原理

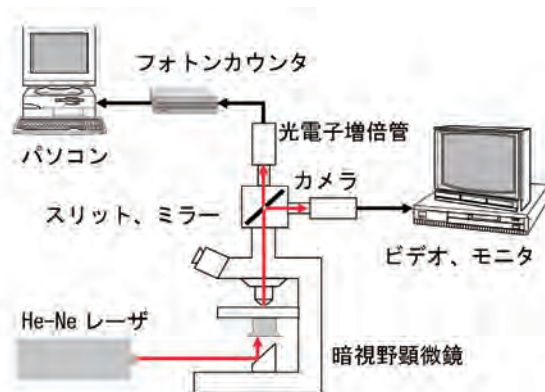


図5 レーザー暗視野顕微測光システムの模式図

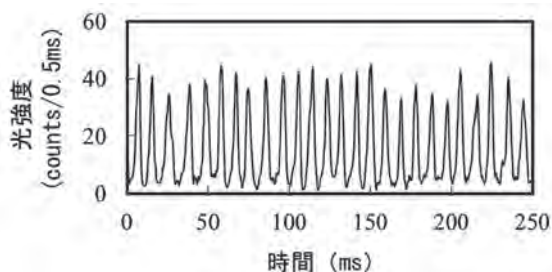


図6 サルモネラ菌べん毛回転を計測したデータの例

レーザー暗視野顕微測光法を遊泳するビブリオ菌 (べん毛1本) に適用することで、図7に示したべん毛回転数と遊泳速度の関係を得ることができました [5, 6]。両者は比例することが理論的に予測されます。測定結果は、概ね比例関係と言えそうですが、かなりのばらつきがあります。菌の大きさとべん毛の長さのばらつきも計測したところ、図7のばらつきに対応することが分かりました。いわば、菌の個性がデータのばらつきの原因でした。なお、図7のデータ中の最高回転数は約1,700 Hz、毎分10万回転になります。この値が、これまでに報告されているべん毛回転数の最高値になっています (ギネスには申請していません)。

ビデオカメラの高速化と高感度化により、最近では図8のピーズアッセイが、べん毛回転計測の主流になっていま

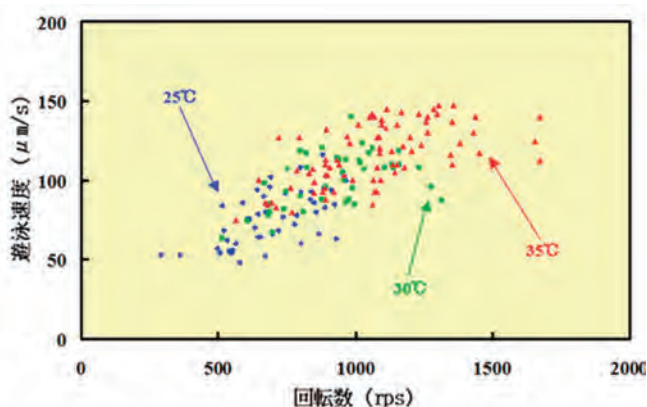


図7 ビブリオ菌のべん毛回転数と遊泳速度の計測結果

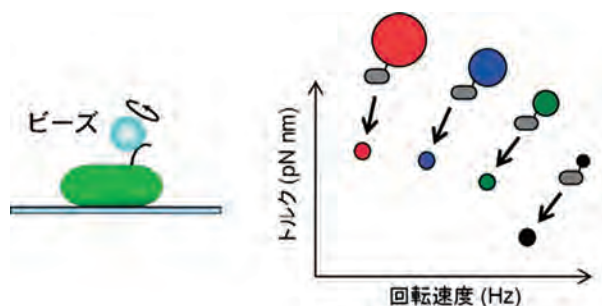


図8 ビーズアッセイの模式図とモータ特性の測定原理

す [7, 8]。ラテックスビーズや金コロイド粒子など、様々な大きさのビーズをべん毛に付着させ、その回転をビデオ記録し、画像解析により回転数を求めます。ビーズの大きさによりモータへの負荷の大きさが変わり、回転数も変わるので、図8右のようにモータの回転数-トルク特性を求めることができます。この特性は、モータのトルク発生機構を特定していく際に参照すべき基本的情報となります。さらに最近、ビーズアッセイでモータのステップ的動作が観測できるようになり、モータの動作機構の理解が一気に進む可能性を感じられる段階に入ってきました [9,10]。

4. 物理的手段によるべん毛モータの回転操作

べん毛モータの仕組みを調べるとき、外部から人為的にその回転を操作してみたいくなります。図9はそのような手段のひとつ、高周波回転電場によるテザードセル強制回転法の原理を示したものです [11]。スライドガラスに蒸着した4つの電極に位相を $2\pi/4$ ずつずらした高周波電圧を印加すると、電場の向きが同じ周波数で回転します。図9上のように、上側の電極に正、下側に負の電圧が加わっているとき、中心にある菌体は、上側が負、下側が正に分極します。図9下は、右側の電極が正、左側が負になるところまで電場が回転した状態を表しています。電場の回転が速いため、菌の最初の分極がまだ残っています(誘電余効)。この分極電荷は左右の電極から引力を受けるので、結果として菌体にはトルクが加わることになります。電場の回転周波数はMHz程度、菌体の回転周波数は数Hzから数十Hzですので、両者は全く同期せず、印加電圧の2乗に比例し

たトルクが加わります。

図10は、 Na^+ を駆動イオンとする好アルカリ菌のべん毛モータを強制回転した結果です [12]。横軸にはトルクに比例する量として印加電圧の2乗がとってあり、縦軸がモータ回転数です。駆動イオンの Na^+ が存在するときに比べて、存在しないときのグラフの傾きが小さくなっています。これは、駆動イオンが存在しないと、モータの抵抗力が大きくなることを示しています。タンパク質でできた機械として身近な筋肉の場合、エネルギー源のATP (アデノシン三リン酸) が存在しないと、rigorといわれる硬直状態になります。抵抗力が大きくなるという点では、べん毛モータも筋肉も似ていますが、べん毛モータは小さなトルクでも回転してしまうところは異なっています。タンパク質でできた機械ということでは一緒であっても、べん毛モータが回転する仕組みは筋肉とは違うものであるらしい

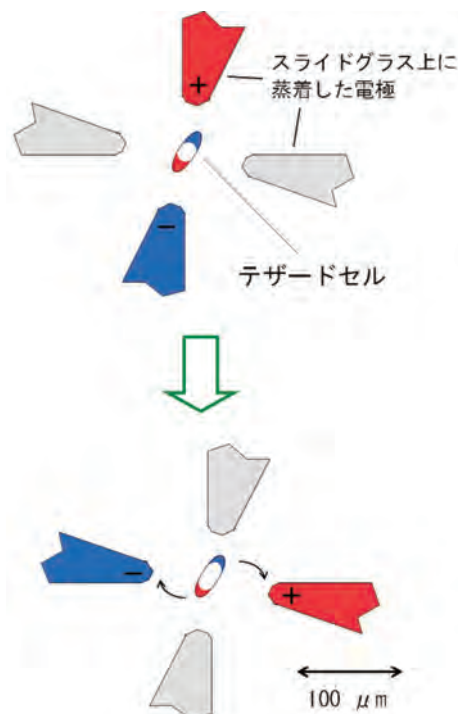


図9 高周波回転電場を用いたテザードセルの強制回転

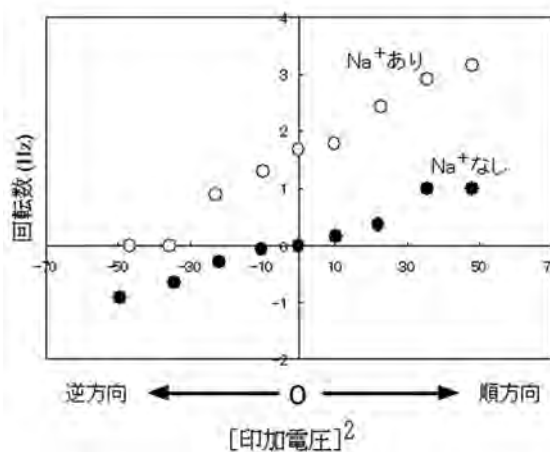


図10 Na^+ 駆動型べん毛モータの強制回転実験の結果

ことを示唆するデータです。なお、高周波回転電場による強制回転の手法は、ATP合成酵素の γ ユニットと呼ばれる部品を強制回転する実験にも使われており、興味ある結果が報告されています [13,14]。

べん毛モータの回転を人為的に操作した例としては、この他に、エネルギー源である膜電位を変化させた実験があります [15,16]。ガラス製の毛細管の先端に菌を捕捉し、電流を流すことで、べん毛モータに加わる膜電位を変化させたところ、膜電位の変化に比例したべん毛回転数変化が観測されました。

5. バクテリアの走化性とその観測方法

バクテリアは泳ぐことでより好ましい環境を探索しています。そのような行動を走化性といい、特に化学物質に対するものを走化性といいます。図11は、走化性を示す菌の様子を模式的に示したものです。菌は真っ直ぐ泳いでいたとすると、急に遊泳方向を変えます。方向を変える時には、べん毛を一時的に逆転させています。図2の走化性信号として、好ましくない環境に近付いているという情報がモータに伝えられると、逆転の頻度が上がり、方向転換を頻繁に行います。反対に、好ましい環境に近付いているときには、逆転の頻度が下がり、真っ直ぐ泳ぐ時間が長くなります。このようにして、菌は試行錯誤を繰り返しながら、少しずつ好ましい環境（図11の場合は右上）に近付いていきます [2]。

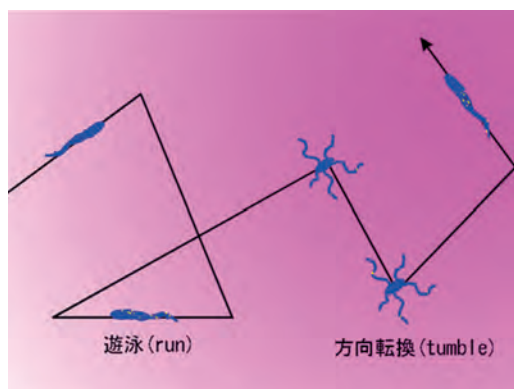


図11 バクテリアの走化性行動の模式図（周毛性の菌の場合）

バクテリアの走化性を調べる伝統的方法として、図12に示したキャピラリーアッセイがあります [17]。毛細管の中に調べたい物質を入れ、菌液中に差しこみます。毛細管の先端から拡散した物質を菌が好ましいと感じれば寄ってきて、好ましくないと感じれば離れていきます。元々のキャピラリーアッセイでは、毛細管の中に入ってきた菌の数を数えることで（毛細管内の菌を培養して計数、詳細は省略）、菌の応答を評価していました。最近では、毛細管内に寒天を加えて固めることで菌が侵入できないようにし、代わりに顕微鏡で菌の集合状態を計測するという改良法も使われるようになっています [18]。

図13は、菌体の中にべん毛があるスピロヘータの仲間で

あるレプトスピラという菌の走化性を観測するために導入されたアガードロップアッセイの模式図です [19]。アガー (agar) とは寒天のことで、調べたい物質を溶かした寒天溶液を一滴だけスライドガラス上に滴下し、固まってから菌液を導入します。その後の菌の動きを顕微鏡映像として記録・解析し、菌がアガードロップに近付いてくるか遠ざかっていくかで、その物質が誘引物質か忌避物質かを調べます。この方法により、レプトスピラが好む糖と好まない糖があることや、感受受容体に関する情報が得られています。レプトスピラを始めとするスピロヘータの運動システムに関しては未知のことが多く、図13のようなシンプルな計測系が役に立つ場面が少なくありません。

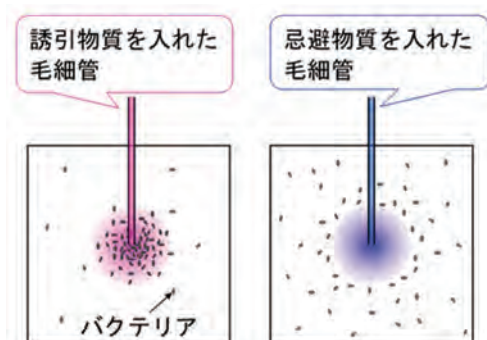


図12 キャピラリーアッセイによる走化性観測の模式図

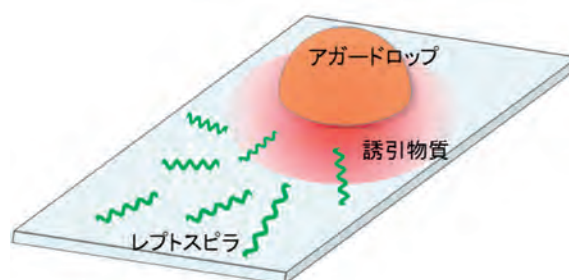


図13 アガードロップアッセイによる走化性観測の模式図

7. あとがき

計測というキーワードを縦糸にしてバクテリアの運動システムに関する研究を紹介してきました。横糸として再現性の問題を提起しておきながら、そちらについては殆ど言及してきませんでした。結果だけを示すと、すんなり実験が済んだような印象を与えてしまっていますが、バクテリアは単細胞とはいえ、そんなに単純ではありません。固体物理出身の私が、生物物理に足場を移したとき、名古屋大学の今栄康雄さん（故人）が話してくださったことが、そこら辺の事情をよく表しているように思います。「あのね、あなたは同じ実験をしたら同じ結果が出るって思ってるでしょ。でもね、生き物を相手にするとそうはいかないんだよ。昨日は元気に泳いでいたバクテリアさんが、今日は動かないなんてことが、よく起こるんだよね。そういうときは、今日はバクテリアさんは機嫌が悪いんだって諦めて、遊びに行くんだよ。」確かに、自分でバクテリアを相手に

し始めて直ぐ、バクテリアさんの機嫌が悪い事態に遭遇しました。今栄さんの話が意味するところは、生物のような極めて複雑なものを対象にして実験をする際には、実験者がコントロール仕切れないファクターがあるということだと、今は理解しています。そして、その得体のしれないファクターに拘泥することなく、より再現性の高い現象に目を向けるのが研究の進め方としては賢明だということだと思います。さらには、研究者は自然に対して謙虚であれというメッセージも込められているように感じています。分かっていることしか分からないというのが、科学の本質なのでから。

【文献】

- 1) 西川伸一, “研究不正の構造分析”, 研究倫理に関するシンポジウム「これからの研究公正のあり方について考える」, 京都大学CAPE主催 (2015).
- 2) 今栄康雄: “バクテリアの運動と行動”, 香川編「岩波講座——分子生物科学7: エネルギーの生産と運動」, pp. 93-119, 岩波書店 (1990).
- 3) Silverman M. & Simon M., *Nature*, **249**, 73-74 (1974).
- 4) Kudo S., et al., *Nature*, **346**, 677-680 (1990).
- 5) Magariyama Y., et al., *Nature*, **371**, 752-752 (1994).
- 6) Magariyama Y., et al., *Biophys. J.*, **69**, 2154-2162 (1995).
- 7) Ryu W. S., et al., *Nature* **403**, 444-447 (2000).
- 8) Nakamura S., et al., *J. Mol. Biol.*, **386**, 332-338 (2009).
- 9) Sowa, Y., et al., *Nature* **437**, 916-919 (2005).
- 10) Nakamura S., et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, **107**, 17616-17620 (2010).
- 11) Washizu M., et al, *IEEE Trans. Industry Applicat.* **29**, 286-294 (1993).
- 12) Sugiyama S., et al., *Biochimica et Biophysica Acta*, **1656**, 32-36 (2004).
- 13) Toyabe S., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **108**, 17951-17956 (2011).
- 14) Hayashi R., et al., *Phys. Rev. Lett.*, 248101 (2015).
- 15) Kami-ike N., et al., *Biophys. J.* **60**, 1350-1355 (1991).
- 16) Fung D. C. & Berg H. C., *Nature*, **375**, 809-812 (1995).
- 17) Adler J., *J. Gen. Microbiol.*, **74**, 77-91 (1973).
- 18) Nikata T., et al., *Appl. Environ. Microbiol.*, **58**, 2250-2254 (1992).
- 19) Islam Md. S., et al., *FEMS Microbiol. Lett.*, **356**, 39-44 (2014).

【著者略歴】

くどう せいし
工藤 成史

1951年4月生まれ

1981年 東北大学大学院工学研究科
応用物理学専攻博士後期課程修了

1982年 (株)豊田中央研究所入社

1987年 ~ 1991年

新技術事業団

宝谷超分子柔構造プロジェクト (出向)

1991年 (株)豊田中央研究所退職

1992年 (株)安川電機入社

1992年 ~ 1995年

新技術事業団さきがけ研究21 (兼務)

1997年 (株)安川電機退職

1997年 桐蔭横浜大学工学部 助教授 (2000年教授)

2010年 東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻 教授



タンパク質の異分野利用へ向けた挑戦

東北大学大学院工学研究科
バイオ工学専攻
教授 梅津 光 央

1. はじめに

タンパク質はアミノ酸が脱水縮合したバイオポリマーであり、その配列情報に従って折りたたまれて立体構造をもつことによって様々な機能が生み出されます。現在では、年間1万件程度のペースで構造と機能のデータが蓄積され続けて、さらに、生命の進化を試験管内で模倣して好きな機能と構造を持つタンパク質を設計する操作も開発されています。その結果、タンパク質は機能の多様性と特異性の面では他素材を凌駕する分子群をもち、触媒・分子認識・物質移動の面では最も簡便にかつ高機能な素子を設計できる分子であります。我々は、このタンパク質というフォーマットを用いて、医薬、材料、環境の分野で活躍できる分子を創出することを目指しております。

2. 分子標的薬の機能を材料工学へ利用する

抗体は、特定の分子のみに結合し作用する機能をもつことができるタンパク質であり、副作用がない分子標的医薬分子として研究されています。我々は、この分子認識機能は、分子のみではなく、無機材料の表面も対象としてみると考えてきました。この発想は、生体内では、我々の歯・骨の形成や貝類、サンゴ、珪藻などでみられるカルシウムやケイ素の鉱物化にタンパク質が重要な役割を果たしていることが多いことにも後押しされています。そして、我々は、生物が進化する工程を試験管で模倣した進化工学的操作を用いて、セラミックス、金属、有機結晶に結合する小さいタンパク質（ペプチド）や抗体の取得に成功してきました。

3. 無機結合性ペプチドを用いた無機ナノ粒子のパターニング

無機材料結合性ペプチドの大きな魅力は、混合操作のみで特定無機材料の表面に結合できることです。この機能は、無機ナノ材を積木細工的に連結させることによって新規な機能を発現できる素子をボトムアップに作製するプロセスに利用できます。その中で我々は、酸化亜鉛のみに結合する機能をもつZnOBPペプチドというバイオ分子を作製することに成功し、シリコン基板にマイクロパターニングされた酸化亜鉛膜上へカドニウムセレンの量子ドット粒子を積層化させております [1, 2]。ZnOBPペプチドを表面に結合させた量子ドットを水溶液中に懸濁させて、そこへ酸化亜鉛がパターニングされたシリコンウェハーを浸すと、マ

イクロ～ナノレベルでのパターニングにそってナノ粒子が配置され（図1）、材料結合性ペプチドを用いれば特定無機材料のパターニングにそってサブマイクロメータ領域で無機ナノ粒子を簡便に固定化できるようになります。

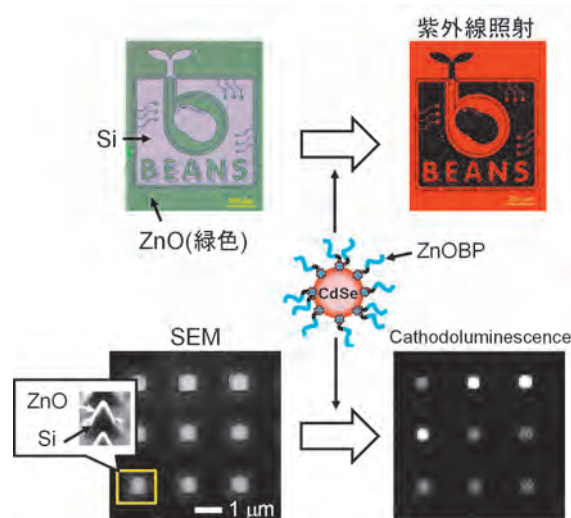


図1. ZnOBPペプチドを利用したCdSeナノ粒子のパターニング

4. 無機材料に強く結合する抗体：ナノ粒子間を自発的・選択的に連結する

無機材料結合性ペプチドは、あたかも分子を識別するように無機材料表面を自発的に見つけて結合することができます。ナノ素材間を繋ぐインターフェイス分子として期待されていますが、無機ナノ粒子間を接合することはできません。その理由は、無機ナノ粒子間の静電的反発やブラウン運動を克服できるほどには無機材料表面へのペプチドの結合力は強くないためです。その中で我々は、生体でペプチドよりも数十～数千倍結合力が強い抗体タンパク質に着目し、無機材料表面に強く結合する抗体分子の取得を世界で初めて成功してきました。

抗体分子は、Y字型の構造を持つ分子量が約15万の巨大分子ですが、分子認識機能を持つのは、その先端部分の断片であり、さらに、その断片中の相補性決定領域（CDR）と呼ばれる複数のループ構造領域が分子を識別し結合します。そのため、ペプチドとは異なり、複数のループの「指」で対象物をつまむように結合するためにペプチドと比較し結合力が格段に強くなります。我々は、この「指」を特定の無機材料表面に選択的に結合できる設計法を開発し、現

在までに、金、酸化亜鉛、酸化コバルト、酸化アルミナへ選択的に強く結合する抗体断片を取得してきました(図2) [3, 4]。

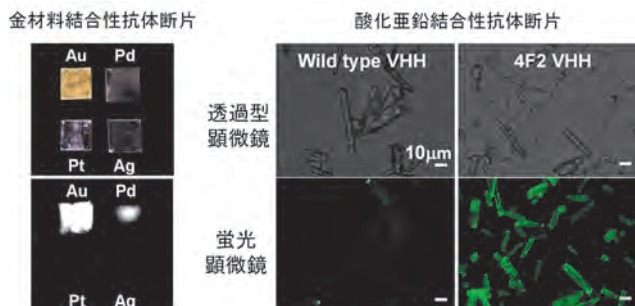


図2. 金結合性抗体断片と酸化亜鉛結合性抗体の無機表面への結合特性

我々が開発した無機材料に強く結合する抗体は、解離平衡定数がnMオーダーであり、ペプチドと比較すると数十～数百倍程度結合力が向上しています。その結果、この抗体断片を用いることによって、無機ナノ粒子を水溶液中で安定的に分散させることができます。ナノ粒子は、単位重量当たりの表面積が大きいので、溶液中では粒子同士が凝集する相平衡が不可逆的に偏りやすい特性をもちます。粒子径20nmの金ナノ粒子は、ほとんどイオンを含まない水溶液中では単分散していますが、そこへ塩化ナトリウム等の塩を加えると、わずか10mM程度でナノ粒子は凝集し、金ナノ粒子のプラズモン吸収は赤から紫へ変化してしまいます(図3i)。しかし、金ナノ粒子表面を覆る程度に金表面に結合できる抗体を微量加えると、抗体は速やかにナノ粒子表面に吸着し、塩を2M以上加えても金ナノ粒子は凝集することなく水溶液に分散し続けます(図3iii) [5]。

我々は、さらに、この結合力の向上した抗体の一部をユニットとして二重特異性抗体を蛋白質工学的に設計するこ

とによって、異種ナノ粒子間を架橋するインターフェイス分子を作製し、異種ナノ材料をハイブリッドさせる研究を行っています。超音波処理した粒子径100nmの球状酸化亜鉛微粒子に金ナノ粒子を添加したところ、金ナノ粒子は凝集せずに溶液中を分散しています(図4)。しかし、我々は酸化亜鉛に結合できる抗体と金に結合できる抗体を連結させた二重特異性抗体を作製し、この抗体を金ナノ粒子と共に添加すると、金ナノ粒子は添加直後から凝集し始め沈殿し、金ナノ粒子のプラズモン特性が失われることなくナノ粒子間が連結したハイブリッド材料が作製されます。これは、材料表面に高親和な抗体を用いて接合分子を設計すれば、異種なナノ材料間も容易に架橋できることを示します [5]。

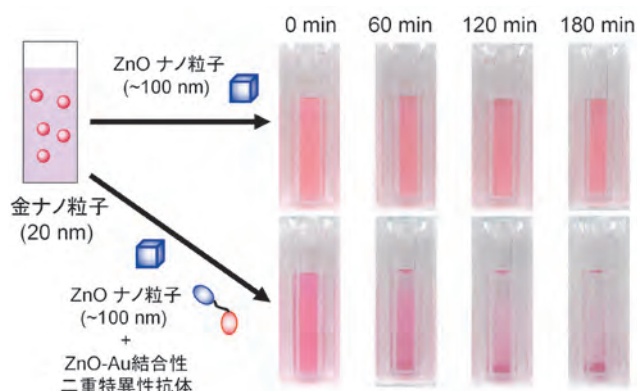


図4. 二重特異性抗体を介した金ナノ粒子と酸化亜鉛ナノ粒子の異種材料接合による自発的凝集化

5. タンパク質の利点を活かした新しい設計法

以上のように、タンパク質の機能には、上記の分子機能に代表されるように他の材料ではまねのできない高機能性を持たせることができます。しかし、タンパク質を利用する時に非常に問題となる課題に、構造安定性や生産コストがあります。タンパク質の構造安定性は水素結合数個分であり、またその生産には微生物などの細胞を用いる必要があるためコスト高な面があります。その中で我々は、タンパク質構造のサイズが数nmであることに着目し、タンパク質構造の中で足場として利用されている領域を有機や無機の素材で代用することによって、構造安定化と低コスト化を考慮したハイブリッドタンパク質の設計も行っています。

その例の研究として、ここではセルラーゼの研究を紹介します。セルラーゼは、自然界に豊富に存在する非食物系バイオマスのセルロースをグルコースへ分解する酵素であり、この糖化反応を発酵技術と連結させることで、環境の負荷を小さくしてバイオエタノールを生産する研究がなされています。しかし、この糖化反応はセルロースが水に不溶なため効率が悪く、酵素の飛躍的な高機能化が求められています。

セルラーゼの構造をみると、一部で水に不溶なセルロー

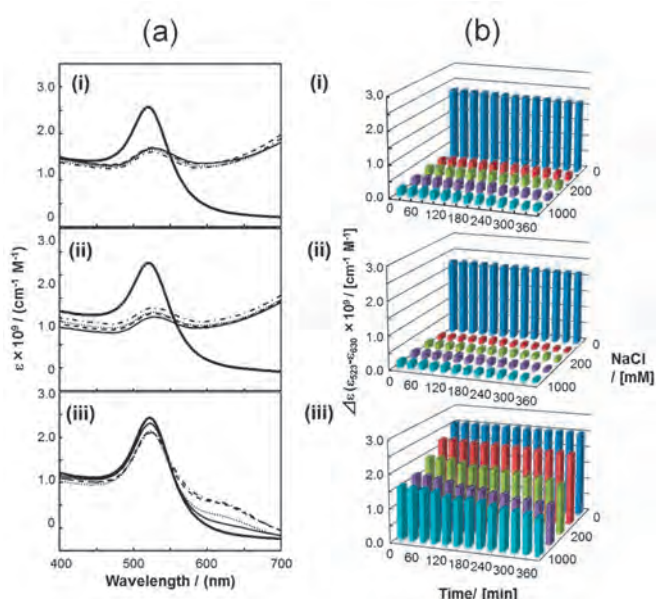


図3. 様々な塩濃度下での金ナノ粒子のプラズモン吸収スペクトル(a)と経時変化(b)
(i)蛋白質無、(ii)40nM牛血清アルブミン、(iii)40nM金結合性抗体

スを高効率に分解する構造的工夫がなされています。例えば、モジュール型構造をもつ酵素は、セルロース中の β -1,4グルコシド結合を加水分解する触媒ドメインのほかセルロース表面に吸着できる結合ドメインが連結しており、触媒ドメイン周辺の基質濃度を増加させることによって、効率的にセルロース分解を行っています(図5a)。また、結合ドメインを持つ100nm程度の巨大な骨格タンパク質に機能の異なった複数の触媒ドメインが集積してセルロソームと呼ばれる巨大複合体を形成することにより、セルロース表面に触媒ドメインを効率的に局在化させ共役的な分解反応を引き起こしています(図5b)。このように自然界では、モジュール型やセルロソーム型の構造的設計を行うことによって、水に不溶なセルロースを効率良く分解する工夫がなされています。我々は、このセルロソームの足場は無機ナノ粒子を利用することによって、天然よりも安定でかつ高機能はセルラーゼであるハイブリッドナノセルロソームを設計することを行ってきました。

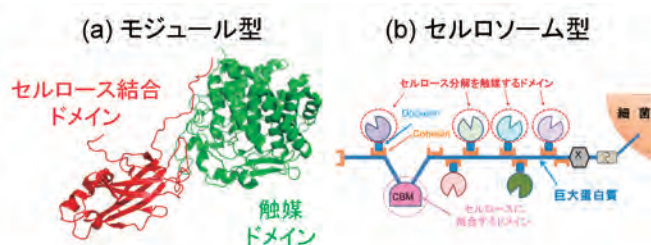


図5. セルラーゼの構造

6. ハイブリッドナノセルロソーム

Aspergillus niger 由来エンドグルカナーゼA (EglA) はセルロース結合ドメインを持たないセルラーゼです。我々は、このEglAと*Cellulomonas fimi*由来エンドグルカナーゼのセルロース結合ドメインをナノ粒子の表面に集積してナノセルロソームを形成させています[6]。このナノセルロソームは、可溶性セルロースであるCMCに対してはほとんど糖化活性に変化を示しませんが、水に不溶なリン酸膨潤セルロース(PSC)に対しては、クラスター中のセルロース結合ドメインの存在比が増加するにつれて酵素活性が向上し、クラスター中の結合ドメイン数が最大の時、遊離EglAと比較しEglA 1分子換算で還元糖生産量が9.6倍に向上します(図6)。この結果は、分子間相互作用を介してセルラーゼをクラスター化させた場合、触媒ドメインだけでなく結合ドメインもクラスター化させることによって、固相基質に対して飛躍的な活性向上を達成できることを示しています。

このドメインの集積化による活性向上には、3次元的な設計が寄与しています。*Clostridium thermocellum*由来のエンドグルカナーゼD (CelD) は、ドックリンを持つ触媒ドメインであり、ドックリンのコヘンへの結合親和性によって、コヘンを複数持つ巨大蛋白質へ集積しセルロソームを形成します。我々は、セルロース結合ドメインに

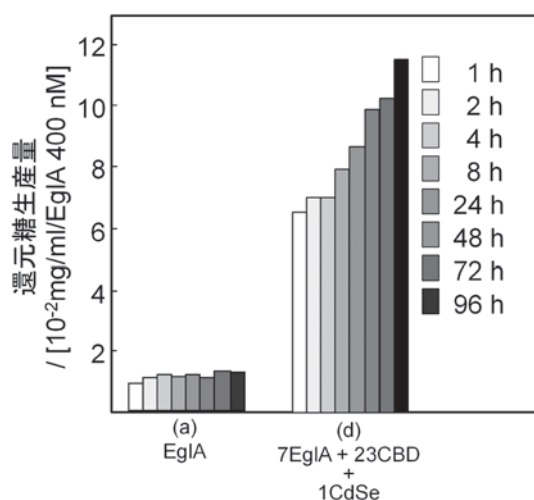


図6. ハイブリッドナノセルロソームのPSCに対する還元糖生産量

コヘン融合した組換え体とCelDを相互作用させることによって直列連結型の触媒ドメイン-結合ドメイン複合体を作製し、我々のナノセルロソームと活性の比較を行いました。その結果、直列連結型の複合体ではPSCに対する酵素活性は2倍程度の増加にとどまり、触媒ドメインと結合ドメインの等量混合で作製したナノセルロソーム型を超えることはありませんでした[7]。これより、触媒ドメインと結合ドメインの3次元的な集積化は直列連結型よりも活性向上を引き起こす構造フォーマットであると我々は考えています。

さらに、我々は、ナノセルロソームの構造フォーマットを利用して複数種の触媒ドメインを集積化することによって、触媒ドメインの共役効果を発現させることにも成功しています[8]。超好熱古細菌*Pyrococcus horikoshii*由来のエンドグルカナーゼEGPhはエンド型でありながらプロセシブ機能を持つ酵素であり、触媒ドメインを持ちません。我々は、CelDの触媒ドメインとEGPhの触媒ドメインを別々なナノ粒子へクラスター化した後にナノ粒子を混合した場合と、同じナノ粒子上へ二つの触媒ドメインを同時にクラスター化した場合でPSCに対する酵素活性を評価しています(図7)。興味深いことに、両系とも触媒ドメインの共役効果を示すが、その効果の発現にはセルロース結合ドメインの存在比で大きく変化します。各々触媒ドメインを独立にクラスター化した系では、セルロース結合ドメインがない場合、EGPhの触媒ドメインをクラスター化した粒子の混合率の増加と共に還元糖生産量が直線的に増加しますが、各クラスター中のセルロース結合性ドメインの存在比が増加していくと、全体として糖生産量が増加していくだけでなく、EGPhの触媒ドメインをクラスター化した粒子の混合率が50%程度の条件で糖化が最も進んでいき、触媒ドメイン間の共役効果が発現してきます(図7中の青丸)。一方、同じ粒子上でCelDの触媒ドメインとEGPhの触媒ドメインをクラスター化した系では、セルロース結合ドメインがない条件でも、EGPhの触媒ドメイ

ンの混合比率が50%程度で糖化が進む共役効果が発現されており、その効果はセルロース結合ドメインとの混合比にほぼ依存しません (図7中の赤丸)。このように、我々のクラスター構造フォーマットは、各触媒ドメインに対して別途ナノセルロースームを作製しても、同じ粒子上に異なった触媒ドメイン種を共存させても共役効果を発現しますが、セルロース結合ドメインの存在は共役効果の発現を確実なものとしします。

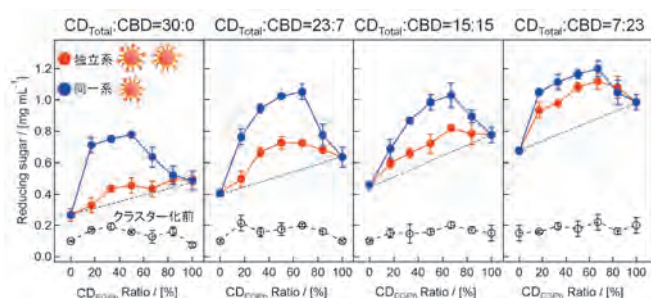


図7. ハイブリッドナノセルロースームを用いた触媒ドメインの共役効果評価
CD: 触媒ドメイン、CBD: セルロース結合ドメイン

7. おわりに

量子力学の父であるエルヴィン・シュレーディンガーが1944年に「生命とは何か」を執筆してから70年以上経た現在では、自分の好きなアミノ酸配列を持つタンパク質を合成することも可能になりました。また、生物が進化する過程を試験管でも模倣できるようになり、他の素材では出せないような分子認識や触媒機能を設計できるようになりました。しかし、その一方、タンパク質の産業利用が進むにつれて、生体外で利用する素材としては、高価で構造安定性が劣ることがしばしば問題となり、思ったよりも普及が進んでいない面もあります。我々は、タンパク質を必要最小限に利用し、かつ、タンパク質でしか達成できない機能をもつ素材を様々な分野へ提案していきたいと考えています。

【発表論文】

- 1) M. Umetsu, M. Mizuta, K. Tsumoto, S. Ohara, S. Takami, H. Watanabe, I. Kumagai and T. Adschiri, *Adv. Mater.*, 17 (2005) 2571.
- 2) Y. Shimada, M. Suzuki, M. Sugiyama, I. Kumagai and M. Umetsu, *Nanotechnology*, 22 (2011) 275302.

- 3) T. Hattori, M. Umetsu, T. Nakanishi, K. Tsumoto, S. Ohara, H. Abe, M. Naito, R. Asano, T. Adschiri and I. Kumagai, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 365, (2008).
- 4) T. Hattori, M. Umetsu, T. Nakanishi, T. Togashi, N. Yokoo, H. Abe, S. Ohara, T. Adschiri and I. Kumagai, *J. Biol. Chem.*, 285 (2010) 7784.
- 5) T. Hattori, M. Umetsu, T. Nakanishi, S. Sawai, S. Kikuchi, R. Asano and I. Kumagai, *Bioconjugate Chem.*, 23 (2012) 1934.
- 6) D.-M. Kim, M. Umetsu, K. Takai, T. Matsuyama, N. Ishida, H. Takahashi, R. Asano and I. Kumagai, *Small*, 7, (2011) 656.
- 7) D.-M. Kim, H. Nakazawa, M. Umetsu, T. Matsuyama, N. Ishida, A. Ikeuchi, H. Takahashi, R. Asano and I. Kumagai, *Catal. Sci. Technol.*, 2, (2012) 499.
- 8) H. Nakazawa, D.-M. Kim, T. Matsuyama, N. Ishida, A. Ikeuchi, Y. Ishigaki, I. Kumagai and M. Umetsu, *ACS Catalysis*, 3 (2013) 1342.

【著者経歴】

うめつ みつお
梅津 光央

昭和46年8月生まれ

- 1995年 東北大学工学部生物化学工学科 卒業
- 1997年 東北大学大学院工学研究科生物工学専攻博士課程前期 修了
- 2000年 東北大学大学院工学研究科生物工学専攻博士課程後期 修了
- 2000年 日本学術振興会海外特別研究員 (ライデン大学、オランダ)
- 2001年 東北大学大学院工学研究科生物工学専攻 助手
- 2002年 東北大学多元物質科学研究所 助手
- 2006年 東北大学大学院工学研究科 バイオ工学専攻 助教授 (准教授)
- 2014年 東北大学 大学院工学研究科 バイオ工学専攻 教授



新しいエネルギー変換技術を創製する モリブデン基超高温材料

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 吉見 享 祐

1. はじめに

現在、航空機エンジンや火力発電タービンに広く使用されているニッケル基超合金は、1940年代初頭にINCO社によって開発されたINCONEL alloy 718がその始まりと言われています。それから70余年、依然INCONEL 718は世界中で現役として使用されている現実には驚かされます。最近の航空機エンジンや火力発電タービンの高圧タービン動翼には、さらに耐熱性が改善された単結晶ニッケル基超合金が主力となっており、ニッケル基超合金は現代社会の私達の生活にとってなくてはならない重要な金属材料の一つとなっています。石油の枯渇が懸念される昨今、これら熱機関のエネルギー変換効率の改善は急務の課題であり、その核心的材料技術の一つであるニッケル基超合金の耐熱性の向上は、私達材料科学者に課せられた重要な任務となっています。しかしながら、最新鋭の航空機エンジンや火力発電タービンの稼働温度は1700℃に達しつつあり、これはニッケル基超合金の融点を約300℃も上回るという極めて厳しい使用環境となっています。この問題を解決するため、単結晶ニッケル基超合金のタービン翼表面に遮熱コーティングを施したり、翼内部に空気や水蒸気で冷却する冷却構造を施したりする工夫がなされているところですが、近年、この冷却構造がニッケル基超合金の見かけの耐熱性を著しく劣化させており、結果的に十分なエネルギー変換ができていないことが指摘されるようになりました。いよいよもって、ニッケル基超合金の限界が見えてきたと言わざるを得ません。

そこで私は現在、ニッケル基超合金の融点を大幅に上回る融点と優れた耐熱性を有する新たな耐熱材料、いわゆる「超高温材料」の開発に乗り出しております。この間、2011年2月から2014年3月まで内閣府による最先端次世代研究開発支援プログラム(NEXT)、また2013年10月からは科学技術振興機構(JST)による先端的低炭素化技術開発(ALCA)の支援をいただきながら、モリブデンにケイ素、ホウ素、炭化チタン等を添加して耐熱性を高めたモシブチック(MoSiBTiC)合金の開発を進めてまいりました。そこで本稿では、このモリブデン基超高温材料の最近の研究成果の一部をご紹介しますことにいたします。

2. Mo-Si-B三元系合金の平衡状態図の確立

平衡状態図、あるいは相図は、合金設計の地図とも呼ば

れ、材料開発にはなくてはならないものです。Mo-Si-B三元系合金が超高温材料として世界で注目され始めたのは、1996年にIowa State UniversityのAmes研究所のMeyerとAkincが、 Mo_5Si_3 という金属間化合物にBを添加することで、その耐酸化性が劇的に改善されることを発表したのが契機となっています¹⁾。その当時、Mo-Si-B三元系平衡状態図は、1600℃の等温断面図がわずか1種類²⁾報告されているのみでした。その後、Mo-Si-B合金が注目されるようになって、新たに1600℃の等温断面図が2種類、1850℃の等温断面図が1種類、各々異なる研究グループによって報告されました。しかし、いずれの平衡状態図も似て異なるものといった状況で、私達の実験結果とも多少の齟齬をきたしておりました。その原因として考えられたのが、すでに当時、一部の専門家から指摘されていましたが、Mo合金中のBの分析精度の悪さです。平衡状態図を検討する際、ある温度で平衡状態となった材料中の構成相の組成を電子線マイクロアナライザー(EPMA)で定量分析することが一般的ですが、Mo合金中のBは特性X線のピーク波長がMoの高次のピーク波長と重なっているため分光が非常に難しく、これによって定量分析の精度が著しく低下いたします。そこで私達のグループでは、各構成相中の各分析対象元素に合わせて複数の標準試料をテラーメイドで作製し、化学分析結果と比較しながらこの定量分析精度の悪さを克服し、2012年に図1に示すような1800℃におけるMo-Si-B三元平衡状態図(等温断面図)を完成させました³⁾。この平衡状態図は、その後の様々な研究局面において実験結果を非常に良く説明してくれており、これによってMo-Si-B基合金の相平衡や相安定性に関する理解が大いに前進いたしました。また、新たな合金設計のアイデアにもつながりました。

ここで一つ、触れておかなければならないことがあります。最近も時々問い合わせをいただきますが、標準試料のテラーメイドに対する煩雑さもさることながら、Mo-Si-B合金の化学分析法とその精度についてです。化学分析精度に問題があるようならば、上記手法は何を計測しているのかわかりません。Mo-Si-B合金の高精度な化学分析法は、私がMo-Si-B合金の研究に着手した2000年当時に、東北大学金属材料研究所の分析室にご在籍の檀崎祐悦技官が確立され、我妻和明教授のご指導の下、2001年にFresenius Journal of Analytical Chemistry誌に論文として掲載され

ました⁴⁾。檀崎氏は、分光分析に適したMo-Si-B合金用の溶液探査などたいへんご苦労されたと伺っております。この分析手法は若干の改良を加えながら、現在も金属材料研究所の材料分析研究コアに受け継がれており、私達の一連のMo-Si-B合金研究にとってかけがえのない、無形の財産になっております。

さらに私達は、液相面投影図の作成にも着手いたしました。液相面投影図は、凝固過程で液体から固体が晶出する反応過程を2次元の紙面上に描写したもので、鑄造凝固プロセスによって材料を作製する際に、凝固組織を検討、あるいは制御する上で重要な情報を与えてくれます。しかしこの液相面投影図に関しましても、Mo-Si-B三元系では報告例が3件ほどしかありませんでした。ここで、超高温材料として注目されたMo-Si-B合金とは、広く一般的に、図1の平衡状態図中に見られるMo固溶体とMo₃Si金属間化合物、それにT₂相と呼ばれるMo₅SiB₂化合物からなる三相合金のことを指します。この3つの相は、凝固過程において、ある特定の合金組成で包共晶反応することが金属組織学的にすでに知られていたのですが、この包共晶反応組成に関して、私達が実験的に得たものと既報の3つの液相面投影図に示されたものが大きく食い違っていました。この違いに疑問を抱いた私達は、「それならば自分達で作

直してみよう！」ということになり、研究に取り組みました。その結果が図2です。図中にEで示された点が三相共晶点であり、既報の組成に比べて2.5%ほどMo過剰な組成となっていました。さらにU₂で示されたMo₃SiとT₂の包共晶点も2.5%ほどSi過剰な組成となっており、結果として初晶Mo₃Si晶出組成領域が既報に比べて大きく広がった液相面投影図となっていたことがわかりました。2015年2月のことです。この液相面投影図の完成により、凝固反応過程の理解が大幅に前進しただけでなく、鑄造凝固プロセスによる材料組織制御のアイデアが大きく膨らみました。

上記の研究成果は図1と図2の2枚にまとめられますが、この2枚を作成するために担当した学生諸君らは膨大な実験をし、大量の実験データを試行錯誤しながらジグソーパズルを完成させるかのように組み立てていくという、気の遠くなるような作業を行ってくれましたこと、ここに特筆いたします。

3. MoSiBTiC合金の開発研究

Mo-Si-B三元系合金は、単結晶ニッケル基超合金の耐温度である1150℃を超える高温域においても優れた強度を発揮することが知られており⁵⁾、次世代の超高温材料として有望ではありますが、改良すべき点として1)密度、2)破壊靱性、3)耐酸化性が挙げられます。また、高温クリープ特性に関しても十分に調査されている段階になく、変形機構についてはほとんど理解が得られていないのが実状です。疲労に関してはその先の課題です。そこでまず上記の課題1)を解決しつつ、組成やマイクロ組織の適正化を図ることによって課題2)の解決策を検討し、さらに優れた高温クリープ特性を発揮させる方法を提案する目的で、Mo-Si-B合金にTiCを添加することを考えました。酸化特性の設計は材料強度のそれとは全く異なりますので、本研究ではひとまず考慮しないことにしました。ここでなぜTiCを選んだのか？ということですが、Mo-Si-B合金の研究に着手した2000年よりも少し前から、MoとTiCによる共晶合金の研究を、当時一人の博士課程の学生の方と行っておりました。そのため、MoとTiCは約2175℃で共晶反応するという知識があり、この反応によってMo-Si-B三元系合金の凝固過程で見られるいくつかの包共晶反応に変化がもたらせることを期待いたしました。狙いは見事に的中し、Mo固溶体とMo₃Si、Mo₅SiB₂、そしてTiCからなる均質で微細なマイクロ組織を有する合金の発見に至りました。2010年9月のことでした。その後さらに合金組成を調整し、現在の第一世代MoSiBTiC(モシブチック)合金と称する65Mo-5Si-10B-10TiC(at.%)の開発につながりました。この合金は、開発当初から溶解鑄造法によって作製されました。そこでこの合金の鑄造マイクロ組織と、鑄造材を1800℃、24時間均質化熱処理した後のマイクロ組織を図3⁶⁾に示します。この合金は、TiCを初晶とし、Mo固溶体とMo₅SiB₂、TiC相に加え、Mo₂C相による複数の包共

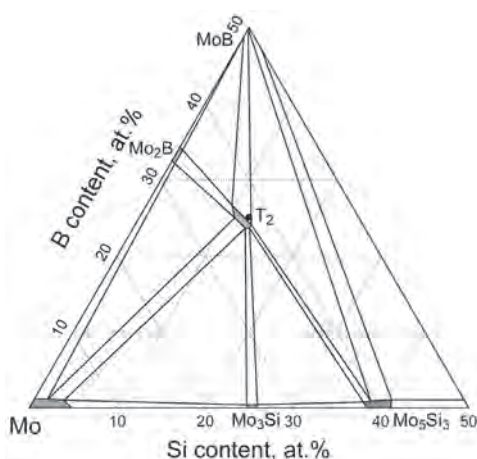


図1 1800℃におけるMo-Si-B三元系平衡状態図

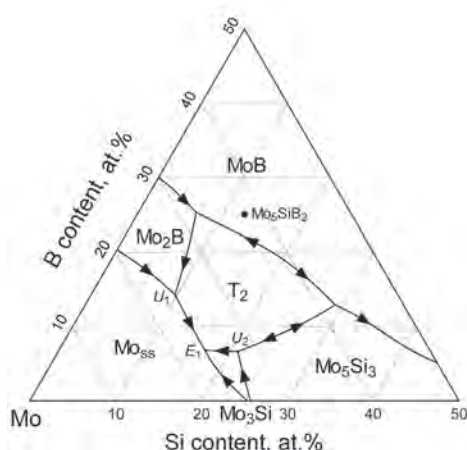


図2 Mo-Si-B三元系合金の液相面投影図

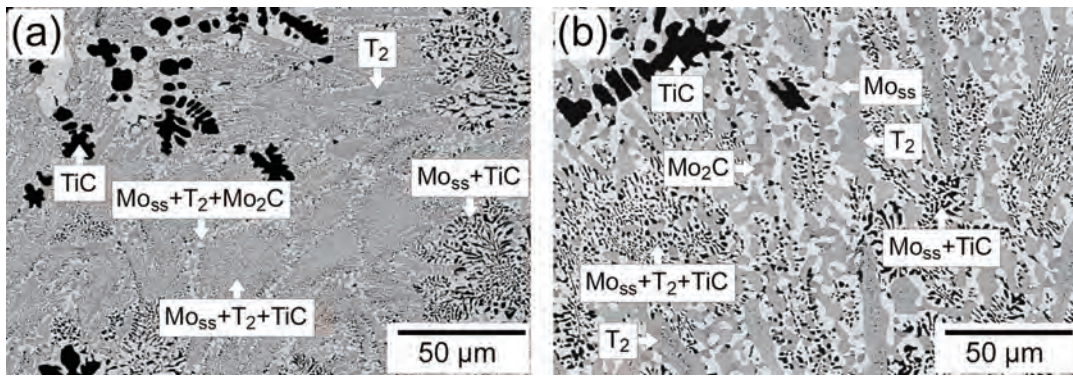


図3 第一世代モシブチック合金のマイクロ組織 (a) 铸造マイクロ組織 (b) 铸造材を1800℃で24時間熱処理した後のマイクロ組織

晶反応によって非常に微細で均質な铸造マイクロ組織を有していることがわかります。1800℃という超高温域での熱処理によって、この包共晶マイクロ組織領域は粗大化いたしますが、それでも数マイクロンレベルの微細さを保っています。種々の熱分析の結果、初晶の晶出から包共晶反応のすべてが1900℃周辺に集中しており、2000℃以上であったMo-Si-B合金の凝固過程は、TiCの添加によっておよそ100℃も凝固反応温度が低下していることがわかりました。これは、溶解铸造法という材料プロセスの観点からは、たいへん大きなメリットとなります。この合金の密度は約8.78g/cm³であり、図4⁷⁾に示しますように純モリブデンや耐熱モリブデン合金であるTZMやMHCよりも圧倒的に軽量を図ることに成功いたしました。さらに、この第一世代モシブチック合金を含むTiC添加Mo-Si-B合金の高温圧縮強度を系統的に調査したところ、図5⁸⁾に示しますように、第一世代モシブチック合金は良好な塑性変形能と共に極めて高い強度を有することがわかりました。

こちら辺りまでが、第一世代モシブチック合金の最初の開発者である、一人の修士課程の大学院生によって明らかにされた内容です。折しもその方が修士課程に進学する直

前、東日本大震災で当研究グループの研究環境も壊滅的なダメージを被りました。震災後、金属材料研究所のある一室を間借りして、1台の小型アーク溶解炉と放電加工機、小型電気炉、そして光学顕微鏡のみが使用できる状況の中で、青葉山キャンパスの復旧を待ちながらただひたすら合金を溶製しては表面を磨き、マイクロ組織観察に没頭した彼の偉大なる成果だと思っております。

そこで最後になりますが、その後徐々に明らかになってきたこの第一世代モシブチック合金の優れた機械的性質についてご紹介し、本稿を終えていきたいと思います。まず室温破壊靱性値ですが、試験方法や評価方法によって若干の変動はありますが、概ねちょうど15MPa(m)^{1/2}という値になりました。この値は、これまで報告されてきたMo-Si-B三元系合金の室温破壊靱性値⁹⁾と比較して最も高くなっています。Mo-Si-B合金の頭痛の種と言われた室温破壊靱性が、ついに実用化レベルにまで達したものと評価をいただいております。ただ、なぜTiC添加によって破壊靱性値が改善されたのか、そのメカニズムは現在調査中でよくわかっておりません。次に、高温クリープ強度ですが、クリープ応力とラーソン・ミラー因子でクリープ強度を整理した図を図6⁷⁾に示します。ラーソン・ミラー因子とは、

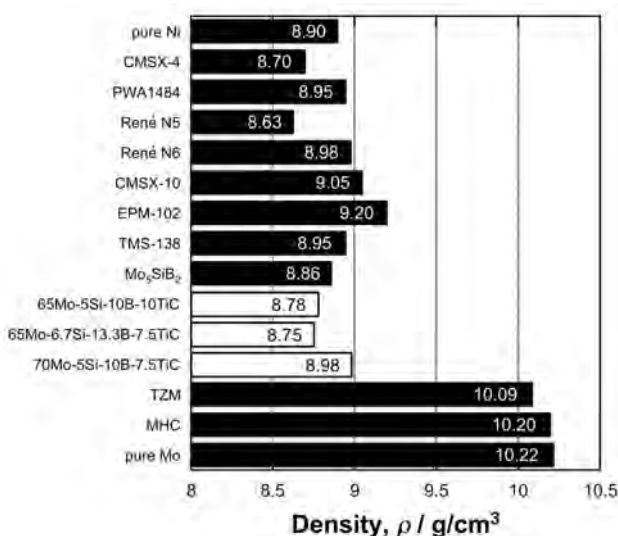


図4 第一世代モシブチック合金と他の耐熱金属材料の密度の比較

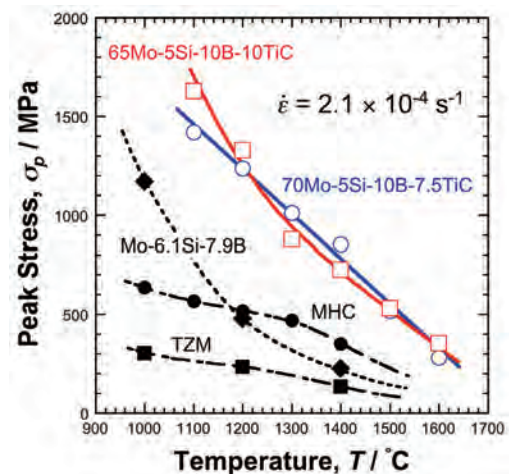


図5 第一世代モシブチック合金と他の耐熱金属材料の高温圧縮強度比較

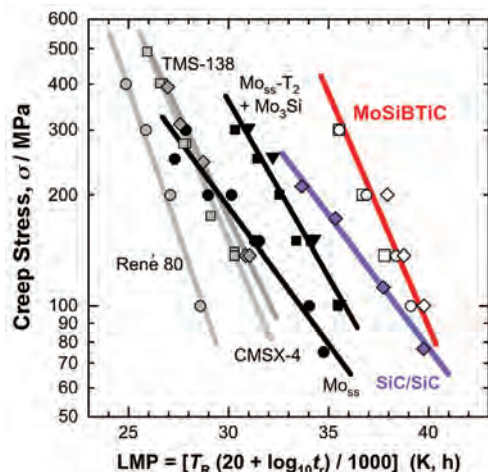


図6 ラーソン・ミラー因子 (LMP) を使った第一世代モシブチック合金と他の耐熱材料の高温クリープ強度比較

試験温度と破断寿命の2つの変数を1つの変数にまとめたもので、試験温度が低く破断寿命が短ければラーソン・ミラー因子の値は小さくなります。一般的には、クリープ応力を下げれば高温下でも高い破断寿命が得られますから、常に右肩下がりとの関係が得られます。さらに、適正な定数Cを選択すると、同じ材料において同じクリープ変形機構の範囲内であれば、クリープ応力とラーソン・ミラー因子の間には良好な直線関係が得られると言われております。図6では、この定数Cを20で設定しております。この値は、ニッケル基超合金でしばしば使用される値ですが、第一世代モシブチック合金のクリープ応力とラーソン・ミラー因子の関係も比較的良好な直線関係が得られました。特筆すべきは、第一世代モシブチック合金の直線が、近頃話題の先進超高温材料SiC/SiC複合材料 (Ceramic Matrix Composites; CMCs) の直線よりも右側に位置していることです。これはすなわち、第一世代モシブチック合金の高温クリープ強度が、SiC/SiC複合材料よりも優れていることを意味しています。とは言え、開発に着手して約4年半を経て、やっとここまでたどり着くことができた、というのが正直な気持ちです。しかし実用化には、まだまだ解決しなければならない問題が山積みです。

4. おわりに

以上のように、第一世代モシブチック合金はその優れた機械的性質によって、次世代の超高温材料として昨今にわかに注目を集めるようになりました。現在、JST-ALCAプロジェクトでは、耐酸化性を改良した次世代モシブチック合金の開発を進めているところです。新規超高温材料の開発とその実用化に向けて、道半ばどころかこれからが本格的な勝負どころと心得ております。青葉工学振興会会員の皆様のお知恵を拝借しながら、夢の実現に向けて邁進する所存です。

【参考文献】

- 1) M.K. Meyer and M. Akinc, J. Am. Ceram. Soc., 79 (1996), 938 - 944.
- 2) H. Nowotny, E. Dimakopoulou and H. Kudielka, Monatsh. Chem., 88 (1957), 180 - 192.
- 3) S.-H. Ha, K. Yoshimi, K. Maruyama, R. Tu, T. Goto, Mater. Sci. Eng. A, 552 (2012), 179 - 188.
- 4) Y. Danzaki, K. Wagatsuma, T. Shoji, K. Yoshimi, Fresenius J. Anal. Chem., 369 (2001), 184 - 186.
- 5) K. Yoshimi, S. Nakatani, N. Nomura, S. Hanada, Intermetallics, 11 (2003), 787 - 794.
- 6) S. Miyamoto, K. Yoshimi, S.-H. Ha, T. Kaneko, J. Nakamura, T. Sato, K. Maruyama, R. Tu, and T. Goto, Metall. Mater. Trans. A, 45A (2014), 1112 - 1123.
- 7) K. Yoshimi, T. Iizawa, S. Yamamoto, J. Nakamura, K. Maruyama, H. Katsui and T. Goto, Proc. Int'l Gas Turbine Con. 2015 Tokyo, (2015), 319 - 327.
- 8) 山本詩歩, 吉見享祐, 金正旭, 横山健太郎, 日本金属学会誌, 80 (2016), 51 - 59.
- 9) J.A. Lemberg and R.O. Ritchie, Adv. Mater., 24 (2012), 3445 - 3480.

【著者略歴】

よしみ きょうすけ
吉見 享祐
昭和39年8月生まれ
昭和62年3月 東北大学工学部材料物性学科卒業
平成2年3月 同 大学院工学研究科材料加工学専攻
博士課程前期2年の課程修了
平成2年6月 東北大学金属材料研究所 助手
平成15年4月 同 助教授
平成17年4月 同大学大学院環境科学研究科環境科学専攻
助教授
平成24年4月 同 工学研究科知能デバイス材料
学専攻 准教授
平成25年4月 同 教授



自然災害に対して安全・安心な 研究・教育環境の創生技術の開発

東北大学
災害科学国際研究所
教授 佐藤 健

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）とそれに伴う津波により、特に沿岸部の学校において深刻な被害が発生した。東北大学においても地震の揺れによる被害は甚大であった。この貴重な経験を通して、改めて強化すべき防災上の推進課題は、社会基盤施設等の物的なハード整備と、防災・減災のための計画や管理、教育といったソフト対策との融合であると考えている。

我が国が「災害大国」と呼ばれても、「防災大国」とは言い切れない状況を変える必要がある。そのためにも自然災害の発生メカニズムの解明に留まらず、災害科学研究の成果を社会実装することを大きなミッションとして掲げて平成24年4月に創設された災害科学国際研究所の役割は大きいと言える。

個人的には、地震工学や構造工学をバックグラウンドとしながらも学校安全や防災教育に関することで文部科学省や教育委員会の専門委員やアドバイザーとして関わる機会が3.11以後多くなっている。また、学内では災害対策推進室の副室長（総長特別補佐）として、東北大学の災害危機管理の充実と強化を推進する立場にある。

そこで、本稿では災害発生時における学校や大学の研究・教育機能の維持、あるいは早期再開といった観点から、東日本大震災の経験や教訓を概観し、残された社会的課題の解決に向けた工学の役割について述べる。

2. Disaster Risk Reduction : DRRとは

(1) Risk ReductionとPreventionとの関係

“DRR”は、2015年3月に仙台で開催された第3回国連防災世界会議において重要なキーワードになっている。会議の英語名称であるThe 3rd World Conference on Disaster Risk Reduction in Sendaiの中にも“DRR”が直接表されているように、防災に関わるステークホルダーの誰しもがDisaster Risk Reductionの略称としての“DRR”を声高に話す風潮となった。

しかし、工学分野において防災研究に携わってきた研究者にとって、“DRR”はこれまでずっと取り組んできていることである。リスクマネジメントの代表的な対処法である「低減」、「回避」、「転嫁」、「保有」のうち、工学としての腕の振るいどころは「リスクの低減」への貢献である。

従来から用いられてきたいわゆる「防災」の考え方にし

ても、一般市民が捉えがちなりスク（または被害）をゼロにすることだけが「防災」の本意ではなく、初めからリスクの低減を前提に取り組んできていると理解すれば、Risk ReductionとPreventionとは、ほぼ同義であると考えている。現に「防災」の英語表記は、1951年に設立された京都大学防災研究所でも使用されているDisaster Preventionであり、「Pre-」という接頭語が「前に (before)」を意味する通り、事前の予防対策によってリスクの低減を基本に考えている表れである。1996年に工学部に設置された附属災害制御研究センターについても、Disaster Control Research Centerを英語名称としている通り、自然のハザードは人間が制御できないが、社会の脆弱性を改善することでリスク（または被害）の規模を人間が制御することは可能となる。ただし、脆弱性改善の社会変化のスピードは決して速くはなく、対策の必要性に関する意識の変化を生んだとしても、実際の対策行動を誘引することが一般的に容易ではない。

国連などの政策的な総論（「主流化」と表現されることもある）としては、“DRR”に異論はない。一方で、定性的にはリスクの低減が実現できるだろうという曖昧な見通しに基づいた「防災」の段階を、学問としての「防災学」にするためには、何をどうすれば、どれだけリスクが低減できるのかを定量的に提示することが求められる。複雑な社会システムを入出力関係でモデル化を行い、防災性能の設計クライテリアを満足するための逆問題を解くにあたって、工学が果たす役割が大きいと考える。

(2) DRRを実現するためのリスクコミュニケーション

自然のハザード（または自然のふるまい）についても言及しておきたい。例えば、地震の揺れの激しさは、自然のハザードであり、場所による揺れの違いの高精度化は地震工学の腕の見せどころではあるが、ハザード評価を高精度化するだけでは、“DRR”に必ずしも直結しない。ハザード情報をリスクの低減に直接的に生かすことが非専門家にとって困難なためである。例えば、地震の揺れの震度6弱と6強では、相対的に6強の方が激しい揺れであることは誰でも認識できるが、その揺れの激しさの違いが、私たちの生活にどのようなリスク（または被害）の違いとなって影響を及ぼすのかが不明確なのである。

従って、入力としての自然のハザード情報と、システムとしての社会の脆弱性情報、出力としてのリスク情報に加

えて、現状（または初期）のリスクに対して脆弱性を改善した場合の対策効果、すなわちリスクの低減効果の情報もあわせて提示することが求められる。このようなプロセスが実現すれば、単なるリスクメッセージ（脅し）や一方的な説得的コミュニケーション（説き伏せ）ではなく、リスク情報の受け手と送り手の双方向型のリスクコミュニケーションが可能となる。

3. 東日本大震災における学校の経験と教訓

リスク低減の対象が建物などの“モノ”ではなく、“ヒト”や“社会システム”の場合、極めて複雑なふるまいを巧みにモデル化することは至難の業であることは、ハードとソフトが複雑に絡み合っている現実社会の東日本大震災時の被災状況からはかり知ることができる。

東日本大震災では、残念ながら学校管理下にあった児童・生徒・教職員の人的被害が発生した。学校施設が津波避難のためのシェルター機能を担った場合と、初めから期待しないで高台への避難行動をとった場合とが存在した。学校校舎や体育館などの教育施設の耐震化は建築学の守備範囲として重要であり、その役割を果たしてきたが、地震の後の津波に対する建物の耐津波設計は、建築学の範疇にはなかった。それでもリスク低減の対象が建物であれば、物的に性能を向上させることは比較的容易ではあるが、リスク低減の対象が“ヒト”や“社会システム”となると、計画や管理が極めて難しくなる。

そこで、人的被害のリスク低減のための要求が多様で高度であることを改めて認識するために、東日本大震災において小学校が経験した二つの事例を紹介する¹⁾。

(1) 大船渡市立越喜来小学校の事例

越喜来（おきらい）小学校は、図1に示す通り、越喜来湾から数百メートルの低地に位置する。地震の揺れに対しては、建物の骨組みは耐え、津波の波力による滑動や転倒はしなかったものの、津波により校舎3階まで浸水した。図中のシャドー部分が津波浸水域を示す。また、写真1-1に越喜来小学校の校舎全景を、写真1-2に越喜来小学校の校舎2階から道路に直接アクセスできる津波避難用の非常通路を示す。この避難通路の利用により、避難時間を短縮することができた。

津波に対しては必ず高台へ避難する計画として、津波避難訓練も重ねていた越喜来小学校から数多くの教訓を学ぶことができるが、ここでは二点のみを挙げる。

一点目は、児童の保護者への引き渡しは低地にある学校ではなく高台で行っている点である。これは、学校の避難計画と実際の避難行動について、保護者・地域住民との間で事前の共通理解があってはじめて実現する。危険を冒して子どもを迎えに行くために学校へ向かって被災してしまうケースを防ぐことができる。いわゆる「津波てんでんこ」は、家族間だけのことでなく、学校と家庭との間でも事前の共通理解を得ておくことの重要性を学ぶことができる。

二点目は、当時の越喜来小学校の副校長は、「例えば、非常用通路が地震の揺れで使用できなくなった場合など、マニュアル通りにいかなかった場合の対応も考えておく必要がある」とも述べており、極めて工学的なフェイルセーフの思想を安全計画に取り入れる必要性と有効性も示唆している。

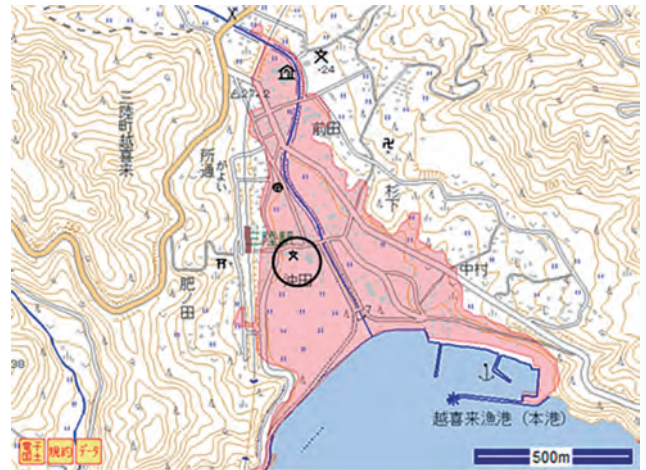


図1 越喜来小学校の地理的条件と津波浸水域



写真1-1 校舎全景
(2012.7.7撮影)



写真1-2 津波避難通路
(2011.8.10撮影)

(2) 南三陸町立戸倉小学校の事例

戸倉（とぐら）小学校は、図2に示す通り、志津川湾から数百メートルの低地に位置し、津波により校舎3階まで浸水した。写真2-1に校舎全景を、写真2-2に高台避難する場合に学校が計画していた宇津野高台へ向かう避難経路を示す。

戸倉小学校は、津波に対する避難先を校舎とするか、高台とするか、学校として最終結論を出す前に東日本大震災を迎えることになった事例となる。校長は、屋外避難途中に津波に遭遇するリスクを考え、校舎避難を提案していた。一方で、地元出身の教職員を中心に、津波の場合は高台避難が原則であるとして平成21年度、22年度と議論を重ねていた。地震発生1か月前の時点において、校舎と高台のどちらを選択するかについては、地震発生時に校長が判断して決定するとしており、3.11の実際の避難行動は高台避難が選択された。

戸倉小学校の当時の校長は、東日本大震災の貴重な経験から、次のように教訓を総括している。①校長と教職員との2年間にわたる避難マニュアルの議論が、校舎屋上への避難ではなく、高台への避難行動につながったことから、

日常的に何でも話ができる職員集団をつくることや、地元のことをよく知る教職員の意見が貴重で防災に重要な役割を持つこと、②教職員全員で、そして地域ぐるみで取り組む学校の安全計画づくりが大事であること、③地域のリーダーと学校との日頃からの深い関係を構築することで、避難の意思決定や緊急対応がスムーズに展開でき、学校は子どもたちのケアに注力することができること、などである。

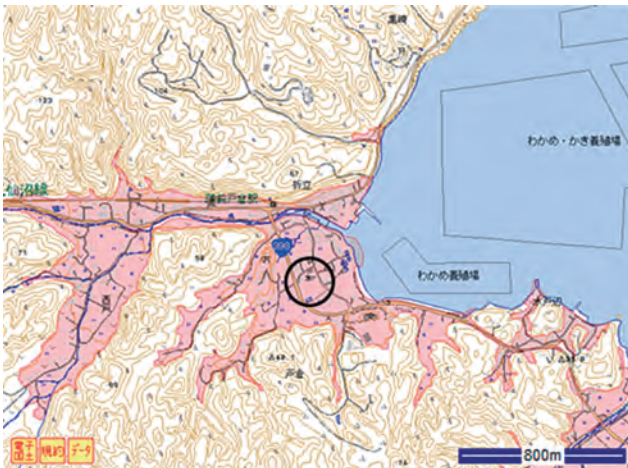


図2 戸倉小学校の地理的条件と津波浸水域



写真2-1 校舎全景

写真2-2 高台への避難経路

(3) 事例のまとめ

学校教員は定期的に異動するため地域の自然環境や過去の災害履歴などの理解が十分とは限らず、防犯や交通安全に比較して自然災害に対する危機管理に精通していない場合の方が多い。従って、学校の防災管理が学校だけで検討・計画されている場合は、必ずしも越喜来小学校や戸倉小学校のように適切な危機管理が行われるとは限らない。

このような東日本大震災の経験と教訓をふまえ、自然災害に対して安全・安心な教育環境を創生するためには、学校現場の教員や教育委員会などに任せただけではなく、地域ごとの自然条件や災害履歴などをよく理解している「地域の教育力」を学校側は活用することと、学校を支援するステークホルダーには、平常時からの支援が求められる。もはや、学校防災は学校の中だけで完結するものではなく、地域防災との連携は必要不可欠な状況となっている。

その際、図3に示すような自然災害に対する危機管理を、事前のリスクマネジメントと事後のクライシスマネジメントの両面から、それぞれのフェイズにおいて検討しておく必要がある。ここで、危険は、自然災害であれば、地震、

津波、大雨などの自然のハザードであり、一般的にはリスクマネジメントの中で、例えば建物の耐震化率を向上させるなどの社会の脆弱性を改善することによるリスク低減のための対策を実行した分だけ、被害の規模を小さくすることができる。また、被害が発生してしまった後は、例えば、避難所などでの感染症対策を行うことなどにより、二次被害の発生や被害の拡大を抑制するためのクライシスマネジメントも重要となる。

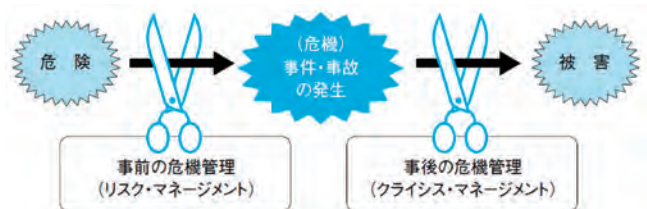


図3 事前・事後の危機管理²⁾

4. 東北大学の災害危機管理の充実と強化

これまで、学校の災害危機管理と震災対応について述べてきたが、大学における災害危機管理について目を転じる。東北大学としての震災の記録は、部局単位でも記録集を発行しているが、全学としては、災害対策推進室の編集による「東北大学東日本大震災記録集 ～ 3.11から記録と記憶をつないで、次代へ、世界へ～」(以降、記録集と略記する)が平成25年10月に発行されている。ここでは、震災の振り返りではなく、東北大学における最近の災害危機管理の充実と強化に関する取り組みの概要を紹介する。

現在、災害対策推進室では、各部局・事業場の協力を得ながら、東北大学としての業務継続計画(BCP)の策定、ならびに災害対応マニュアルの改訂作業に取り組んでいる最中である。BCPの策定は、本部事業場を先駆けとして、順次、各部局・事業場のBCPの策定を展開していく予定となっている。ここでは、BCPに基づいた円滑な災害対応を可能とするための防災訓練を実施している片平本部と工学研究科の事例を紹介する。

(1) 片平本部の災害対策本部の運営訓練

平成27年度に実施された片平本部の災害対策本部の運営訓練の様子を写真3に示す。総務班や施設班などといった各専門班に対して、震災発生時を想定した状況付与カードがある時間間隔で提示され、適切な対応を検討し、総長出席の災害対策本部模擬会議で状況と対応について報告する形式の訓練を実施した。

また、キャンパス間の災害時通信の訓練も同時に実施している。今年度は青葉山の滝澤工学研究科長から片平本部の里見総長へ衛星携帯電話を使って、青葉山キャンパス内で重傷者が発生したとの想定に基づいた対応報告などが行われた。

さらに、今年度は耐災害情報通信技術として、片平の災害対策本部と川内の災害対策本部とを映像で結ぶ長距離無

線通信システムなどの実証実験も同時並行で実施され、内線電話の戦略的活用なども含めた災害時の通信手段の多角化が進められている。



写真3 片平本部の災害対策本部の運営訓練 (H27.10.23)

(2) 工学研究科の総合防災訓練

工学研究科はさまざまな安全対策、防災対策を推進している部局の一つである。一般的な消火訓練や安否確認訓練に加えて、工学研究科としての災害対策本部の運営訓練も実施しており、多くの経験を蓄積している。工学研究科の総合防災訓練のようすを写真4に示す。左は、可搬型衛星携帯電話を用いて、工学研究科の被害状況の第一報を片平本部の総務課に連絡を入れているようすであり、右は、工学研究科の災害対策本部の模擬会議のようすである。

平成27年度も工学研究科の災害対策本部の模擬会議が開催されており、震災発生直後に青葉山キャンパスから学生・教職員を帰宅させるか留めるかについて、東日本大震災の経験を踏まえた実践的な議論もなされていることなどからも、工学研究科が全学の牽引役となることを期待したい。



写真4 工学研究科の総合防災訓練 (左: H25.10.10、右: H26.10.7)

(3) 教育研究用機器等の転倒防止対策

東北大学の物的被害は、記録集によれば、建て替え、改修等を要する建物の損害額として約300億円、研究教育機器の損害額として、約269億円の合計569億円の巨額となった。その中でも、研究教育機器の損害は単に損害額だけでなく、大学にとっての研究教育機能の維持という観点から改善すべき大きな課題を投げかける結果となった。

そのことを受けて、東日本大震災の前から防災対策を推進していた「地震対策プロジェクトチーム」の中に、「教育研究用機器転倒防止ガイドラインWG (WG長: 源栄正人教授)」が震災後に設置され、技術指針、基本ガイドライン、対策事例編、実験機器用ガイドラインを平成25年度から26年度にかけて作成した。平成26年度には全学説明会を実施し、学内施設・備品等の地震被害実態を踏まえた地震対策の全学的な強化促進が図られている。

5. おわりに

英国では、災害による影響を軽減するように準備できていること、災害の程度に応じて対応できること、学校の事業継続を維持することで災害の影響を最小限にできること、迅速かつ効率的に災害から復旧できることなどを含み、学校による災害への対応力や復旧力を高めるためのSchool Resilienceという考え方がある³⁾。

企業の事業継続計画、行政の業務継続計画が浸透してきている我が国において、研究・教育機能の維持、早期再開といった学校や大学における危機管理と業務継続管理を推進することが求められている。

その際に、「何が事業継続を妨げるか (リスク分析)」と、事業が中断するとどのような影響が生じるか (インパクト分析)」を業務継続管理に反映することになるが、特に事前のリスク低減の場面では、工学の強みであるシステム論的に捉えたリスク情報を、リスクコミュニケーションツールとしていかに有効活用し、結果として脆弱性改善の行動を誘引できるかが問われている。ハードとソフトの融合、自然科学と社会科学との融合、研究と実務の融合に当たり工学分野の強みが発揮される場面が増えることを期待したい。

【参考文献】

- 1) 日本安全教育学会：東日本大震災における学校等の被害と対応に関するヒアリング調査記録集 (増補第四版)、平成26年3月
- 2) 戸田芳雄：学校安全や危機管理の考え方と内容、学校・子どもの安全と危機管理、少年写真新聞社、pp.10、2012年4月
- 3) 渡邊正樹：学校安全におけるSchool Resilienceの視点—学校への事業継続管理 (BCM) の導入とその課題—、日本安全教育学会第12回新潟上越大会予稿集、pp.20-21、2011年9月

【著者略歴】

佐藤 健

昭和39年10月生まれ

昭和62年3月 豊橋技術科学大学工学部建設工学課程卒業

平成元年3月 東北大学大学院工学研究科建築学専攻修士課程修了

平成元年4月 (株)フジタ入社 建築設計部

平成6年4月 同 技術研究所

平成8年3月 同 退職

平成8年4月 宮城工業高等専門学校建築学科助手

平成13年4月 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター講師

平成19年4月 同 准教授

平成24年4月 東北大学災害科学国際研究所教授
現在に至る



個人ゲノム時代の生命情報科学 (バイオインフォマティクス)

東北大学情報科学研究科
応用情報科学専攻
教授 木下賢吾

1. はじめに

皆さん、アンジェリーナ・ジョリーという女優さんをご存じでしょうか？ 私は世間の流行や芸能人に関して疎いので、女優としての彼女の事はあまり知りませんが、ウィキペディアなどを見ると私でも知っている映画として、トゥームレイダーの主演を務めたり、懐かしいところでは17歳のカルテに出演していたりと、多くの映画に出演している有名な女優さんだということがわかります。一方、生命情報科学（バイオインフォマティクス）に関わる研究者の多くは、彼女の映画を見たことが無くても彼女の名前を知らない人は少数派だと思います。

彼女が我々生物研究者の間で知られる存在になったのは、2013年5月のニューヨークタイムズ紙に寄稿された文章がきっかけです。この寄稿の中で彼女は、自らの遺伝子検査の結果として、乳がんの発症と関連があるBRCA1という遺伝子に変異を持ち、その結果乳がんになる可能性が高いことを告白しました。さらに衝撃を持って受け止められたのは、その遺伝子検査の結果を受けて、乳がんが発症する前に乳房の予防的切除に踏み切ったことです。この決断は、社会全体に大きな影響を及ぼし、その後、遺伝子検査の結果を受けた予防的乳房切除の動きが加速されたと言われています。

この決断自体はパーソナルな問題であり、その是非を第三者がどうこう言う必要はないのですが、このアンジェリーナ女史の寄稿を通じて私は、ゲノム解析に関わる生命科学の問題が非常に身近な問題となったこと、及び、ゲノム解析に代表されるバイオインフォマティクスの担う責任の大きさを痛感することになりました。

2. 1997年に描かれた未来と2013年の現実

映画つながりで話を進めます。1997年にガタカ(GATTACA)と言う映画が上映されています。私は封切り時には見逃しましたが、あるとき偶然この映画を見る機会に恵まれました。この映画で描かれるのは、子供を産む際にはどういう子供になって欲しいかをデザインするのが当たり前の世界です。例えば、我が子をピアニストにしたい場合に指を6本にして独特な演奏をできるような体にデザインしたり、水泳選手としてオリンピックにでるような選手を目指して、アスリート向けの遺伝子を導入したりということが当たり前になされます。また、就職する際にも

遺伝子検査は当然行われ、面接やテストなどの回りくどい選考は行わず、遺伝子検査で適正を瞬時に判定し、合否が決まる世界です。このような世界でも、デザインせずに自然に子供を産むことを選択する親もいます。主人公はまさにそのような子供で、自然に産まれたが故の遺伝的に不利な状況からスタートしながら、大きな夢を叶えるというストーリーになっています。

1997年だと、この映画はある意味安っぽいSFとして受け止められたかと思います。しかし2013年に23AndMeという米国の遺伝子検査企業が取得した特許 (US854339) は、まさに子供のデザインにもつながる方向性を見据えた特許でした。一部では「赤ちゃんデザインは許されるのか？」という形での新聞報道にもつながっています。正確にはデザインではなく、精子バンクや卵子バンクから好みのサンプルを選ぶ基準に関する特許ですが、1997年に予測された未来が、現実味を帯びてきたことを感じさせられる出来事といえるでしょう。

3. ゲノム情報ビッグバン

現在、23AndMeに代表される遺伝子ビジネスが次々に登場していますが、このような社会的な動きがどのようにして生み出されるに至ったのか、少し歴史を遡ってみましょう。1997年から数年をおいて、2013年の現実につながる最初の一步が実現しました。2001年に発表されたヒトゲノム配列の発表です [1]。ヒトゲノム配列の解析は、13年以上の月日と400億円以上の費用がすぎ込まれたビッグプロジェクトでした。人類の科学の中でも最大級に大きなイベントの1つだったと思います。この後、ゲノム解析のスピードは、ゲノム解析の技術革新と共に加速していきます。例えば、2007年にはCraig Venter博士の個人のゲノムが解析され、続く2008年には、DNA 2重らせんの研究で有名なJames Watson博士の個人のゲノム配列も解析されました。Venter博士のゲノムは4年、Watson博士のゲノムは1年弱の期間で解析が行われました。その後もゲノム解析のスピードはとどまることを知らず、2010年には1000人の個人ゲノム解析が報告され、2015年9月にはついに10000人のゲノム解析がイギリスのグループにより報告されました [2]。

これらの驚異的な解析速度の向上には、実験機器の向上も欠かせませんが、情報科学による解析の手法が洗練され

てきたことも見逃せません。最初のヒトゲノム配列、それに続くVenter博士、Watson博士のゲノム解析までは、ゲノムDNAを短い断片にして、それぞれの断片を並列に読み解くことで読み取り速度を向上し、それら短い断片を集めることで、全体のゲノム配列を明らかにするアプローチが取られていました。その後、最初のヒトゲノムを利用した参照配列と呼ばれる標準的なゲノム配列が整備されてからは、その参照配列に短い断片を「マッピング」し、変化している部分を明らかにする手法が取り入れられ、解析速度が飛躍的に向上しました（図1）。

個人ゲノムの解析イメージ

分析された短文字配列を、元の一連の長文字配列（30億文字列）に戻す作業
一般的な参照配列を参考にする（相違点0.1%程度）

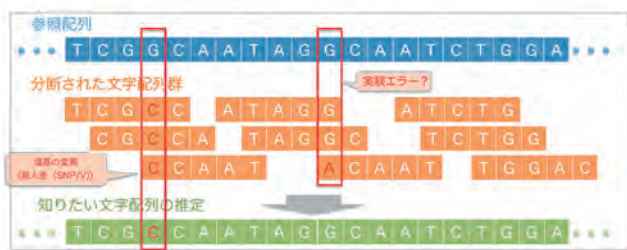


図1：個人ゲノム解析のイメージ。

マッピングとは、ヒトゲノム配列（約30億文字）と、実験で決めたサンプルの断片配列（100～200文字）とが一番よく一致する場所を探す計算を行うことですが、この計算手法はバイオインフォマティクス研究の大きなトピックスとして、一時期活発に研究がなされていました。いまま更なる速度向上を目指して研究がなされています。

以上のように、バイオインフォマティクスの発展と連動しながらゲノム解析の速度は爆発的に加速し、今やヒト一人のゲノム解析は3日もあれば可能な時代になりました。その結果、世界各地でゲノム解析が進められ、日本でも東北大学東北メディカルメガバンク機構が2014年11月に日本人1000人のゲノム解析の完了を報告しています（論文は

2015年8月 [3])。その結果、ゲノムデータビッグバンとも言える、爆発的な情報量の増加が起っています（図2）。

4. ゲノムの多様性とヒトの多様性

大規模なゲノム情報が明らかにされると共に、国際HapMap計画と呼ばれる6各国（日、米、英、中、加、ナイジェリア）による協力研究体制が発足し、標準的なゲノムからの違いのカタログ化が進められました。その過程で、さまざまなゲノムの違いが病気と関係することが認識され、ゲノム全体での変異と病気との関連解析（Genome Wide Association Study, GWAS）が一世を風靡しました。その一方で、遺伝病や癌などの一部の病気をのぞき、GWASのような統計的な解析では、ゲノムの変化と病気との関連が見いだされるものの、その生化学的なレベルでの解釈がつかず、疾患の原因変異なのかかわからない変異も多く、変異の解釈の難しさが浮き彫りになってきています。さらに、「多くの人々が共通して持っている変異」（common variant）では統計解析が有効に機能する一方、1000人規模の大規模なサンプルの解析を行っても、変異を持っている人が1人ないし2人しか見つからないような「少数の人しか持っていない変異」（rare variant / レアバリエント）も多数あること、しかもレアバリエントが疾患において重要な役割を果たしている可能性が高いことが明らかになり、GWASに変わる新しい方向性が模索されつつあります [4]。

レアバリエント解釈の難しさや新しい方法が必要になりつつある話は、現在進行中の話で少し難しくなるのでここでは深入りせずに、遺伝子に入る変異は時として病気につながる可能性があること、および、変異を持たないヒトは存在しないことのみ強調しておきたいと思います。

「個性」という言葉をよく使うとおり、ヒトは皆違います。この違いは、多かれ少なかれゲノム配列の違いに起因すると思えることができます。もちろん、ゲノム配列が同じだと考えられる一卵性双生児でも、育つ環境によって多少の見た目や性格が違うことから、ゲノムに加えて環境要因も大きな要因であることは確かですが、ざっくりとは、ゲノムの違いが個性を生み出す重要な要因です。遺伝子に入る変異は時として病気につながりますが、変異を持たない人はいません。ゲノムへの変異は基本的にランダムに入ると考えられていますので、病気になるかならないかは運次第とも言えますし、病気とまでは言えないまでも、皆さんが多かれ少なかれ遺伝子の機能を変える変異を持っていることが個性を生んでいるとも言えるかと思えます。

バイオインフォマティクスに関わらずよく使われるアルゴリズムの一つとして、遺伝的アルゴリズムがあります。このアルゴリズムは、組み合わせ最適化問題などに利用されますが、組み合わせのやり方の1つを1つの個体として扱い、個体と個体を掛け合わせることで、より良い個体（組み合わせ）を探索するアルゴリズムです。このアルゴリズムの研究から、選択圧を高くする（＝良い個体だけ優先的に選ぶ）と多様性が急速に失われ、ある程度良い個体が素

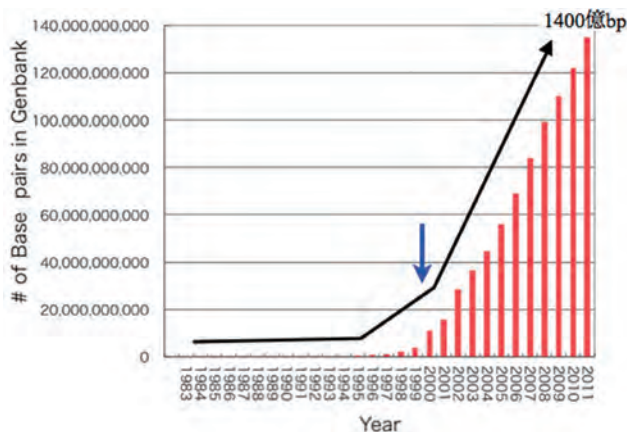


図2：ゲノム配列情報の急激な増加

早く見つかる一方で、一度見つかった良い個体以上の個体が見つかりにくい性質があることが知られています。多様性が失われることで、天才のような特に優れた個体が生まれることが阻まれますし、環境変化にも弱くなります。適度な選択圧の下で多様性を維持することは、種全体としては理にかなった選択なのかもしれません。

5. ゲノムとタンパク質

タンパク質と言うと、多くの人は栄養素としてのタンパク質を思い浮かべるかと思いますが、生命科学の世界では、タンパク質は我々の体を構成する主たる成分として、あらゆる局面で重要な働きを担っていることが知られています。その働き（機能と呼びます）を利用して、様々な工業利用もなされており、身近なところでも利用されています。例えば、スーパーなどでよく見かける「酵素入り洗剤」もタンパク質配合です。酵素というのはタンパク質の一種ですが、油などの汚れ成分を分解する機能を持った数種類のタンパク質などを配合することで、汚れの成分を細かな分子に分解し、衣服から取れやすくする働きをしています。

他にも、元々体内にある物質なので、安全性の高い食品添加物として広く利用されています。例えばコンビニ等で売っているお餅。私は草餅が好きでたまに食べるのですが、いつ買っても柔らかいので不思議に思ったことはありませんか？ お正月にお餅つきとかをすると、翌日か、翌々日には堅くなってしまいます。しかし、コンビニにある餅は、数日程度なら柔らかいままの状態です。ここにも添加物として入れられたタンパク質が良い仕事をしています。餅が堅くなったときに出来る成分を分解するタンパク質が餅に混ぜられています。

タンパク質は、アミノ酸と呼ばれる物質が数十から数百個、紐状に繋がった分子です。アミノ酸には多くの種類がありますが、タンパク質として利用されているのは20種類です。これらアミノ酸の並んでいる順番のことを1次構造と呼び、この順番はゲノム配列で決まります。アミノ酸はそれぞれ独自の性質をもっていますが、大きく分けて、水に溶けやすい性質をもっているアミノ酸と水と相性の悪いアミノ酸も存在します。皆さんの体の70%が水だというのは聞いたことがあるかと思いますが、我々に取って水は、液体の飲み物であり、日常生活で水分子をイメージすることは無いかと思いますが、一方、タンパク質は非常に小さい分子です。皆さんの体の中には10万種類以上のタンパク質が存在すると言われており、その大きさは大小様々ではありますが、目安としては数十Åです。Åというのは一番小さな原子である水素がおおよそ0.5Åなので、2個分ぐらいの大きさになります。一方、水は水素原子2個と酸素原子1個からなる分子で、おおよそ1.4Åです。仮に、大きさが50Å程度のタンパク質があったとすると、1.4Åの水分子は、おおよそ180cm、90kgの人にとってのテニスボールぐらいの大きさになります。つまり、タンパク質にとっ

す。しかも、この水分子が周りを所狭しと動き回っているのが、タンパク質が置かれている環境になります。イメージしてみてください。皆さんの周りにテニスボール程度のボールが所狭しと動いていて、皆さんにぶつかってくる状況です。そういう状態で、皆さんは作業ができますか？ このように、タンパク質は水に囲まれている都合上、水との相性が非常に重要になってきます。

そのような過酷な(?)環境下でもタンパク質は、秩序正しく機能しています。これがどのように実現しているかに関しては諸説ありますが、一つ重要なこととして、タンパク質は決まった形（立体構造と呼ばれます）をとることによって初めて秩序正しく働くことができることが知られています。

例えば、狂牛病という病気の名前を耳にしたことはありませんか？ 狂牛病という病気は牛がかかる病気で、脳・神経系がダメージを受け歩行が困難になるなどの症状を示します。この病気の大きな特徴は感染性があることです。つまり、ある牛から別の牛に遷ることがあるということです。当初、病気の原因がわかりませんでした。1980年代になって、プリオンと呼ばれるタンパク質が病気の原因だと判明しました。通常、感染性のある病気の場合はウイルスや細菌が原因ですが、タンパク質が感染性の病気の原因として明らかになった最初の例でした。しかも、プリオンには正常型と異常型があり、正常型は健康な牛や皆さんの体の中にも沢山あるタンパク質です。プリオンが感染を引き起こすメカニズムは、異常型のプリオンが何らかの原因で体内に入ると、正常型のプリオンが異常型のプリオンになっていき、最終的には病気になると考えられています。ここで、正常型と異常型という言い方をしましたが、正常型は立体構造を正しく取っている状態（図3）で、異常型はその構造が崩れてしまっている状態であることが、後の研究で明らかになっています。つまり、正しい立体構造を取っているうちは問題無いタンパク質が、間違った構造を取ることが病気に繋がることが明らかになった最初のケースで、立体構造の重要性を端的に表している例になります。プリオンの研究を進めたプルシナー博士は、その業績により1997年にノーベル生理学医学賞を受賞しました [5]。



図3：正常型プリオンの構造

既に述べたよう、タンパク質はアミノ酸の並び順（一次構造）で決まります。タンパク質の立体構造（3次構造とも呼ぶ）はそのアミノ酸の並び順に応じて決まることが知られています。アミノ酸の並び順が似ていれば、立体構造も似ていることが知られていますが、これは進化の過程で遺伝子に少し変化が生じた結果、アミノ酸が変わっても、タンパク質には大きな影響が出ないような変化が選択され、残ってきた結果だと考えられています。つまり、立体構造が変わるような変化は、タンパク質に及ぼす影響が大きいので淘汰されたのだと思われます。実際、世の中の生物は持っていませんが、人工的に作ろうと思えば、アミノ酸が3つ違うだけで立体構造が違うタンパク質を合成することが可能であることが知られています（図4）。

このような例は例外的なものですが、アミノ酸が少し変わったことがタンパク質構造を大きく変えないまでも、タンパク質の機能を変化させることが知られています。先に見たように、ゲノム配列の違いが個性を生み出しますが、正確には、ゲノム配列の違いがタンパク質に影響を及ぼし、その結果として個人毎の違いを生み出していることとなります。



図4：似た配列が異なる構造を持つ例

6. まとめ

以上、駆け足で、ゲノムの変異の話とタンパク質の立体構造の話題を中心にバイオインフォマティクスの分野の一端を解説しました。ここではバイオインフォマティクスの発展と連動する形で急激に進むゲノム解析が問いかける身近な問題を例として、縁遠いと思っていたかもしれないバイオインフォマティクスの分野が、意外と身近な問題とも関係していることを感じていただければと思います。特に、

なお、今回は割愛しましたが、バイオインフォマティクスが扱う対象はゲノムに関わらず、あらゆる生命関連情報が対象になります。その観点では、この紹介文は現在活発に研究が行われているこの分野のごくごく一部をご紹介します。これを機会に分野に興味を持っていたければ幸いです。

7. 参考文献

- [1] Initial sequencing and analysis of the human genome, Nature, 409, 860-921, 2001
- [2] The UK10K project identifies rare variants in health and disease, Nature, 526, 82-90, 2015
- [3] Rare variant discovery by deep whole-genome sequencing of 1070 Japanese individuals, Nature Comm, 6, 1-13, 2015
- [4] Finding the missing heritability of complex disease, Nature, 461, 747-753, 2009
- [5] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1997/press.html
- [6] NMR structure of two designed proteins with high sequence identity but different fold and function, Proc Natl Acad Sci USA, 2008

【著者略歴】

きのした けんご
木下 賢吾

1970年8月生まれ

1994年3月 京都大学理学部卒業

1999年3月 京都大学大学院理学研究科博士課程修了
博士（理学）

1999年4月 科学技術振興事業団・研究員

2001年4月 横浜市立大学助手

2004年10月 東京大学医科学研究所・助教授

2009年10月 東北大学大学院情報科学研究科・教授

2010年11月 東北大学加齢医学研究所・兼務

2012年4月 東北大学東北メディカルメガバンク機構・兼務



津波堆積物の地球化学的特徴と環境リスク評価 —リスク管理に基づく復興資材としての活用—

東北大学大学院環境科学研究科
先進社会環境学専攻
教授 駒井 武

1. はじめに

2011年3月11日に東日本地方を襲った巨大地震は、地震の直接的な被害のみならず、液状化や地盤沈降、さらには沿岸域における広域の大津波による甚大な被害をもたらした。特に、東日本沿岸における膨大な津波堆積物と震災瓦礫は、被災地の復興を妨げる大きな要因となっている。津波堆積物には通常と土壌と比べて、海成堆積物に特有な重金属類が含まれる可能性があり、含有する化学成分を精密に分析するとともに、その環境リスクを科学的に評価することが重要である。

そのため、震災直後から東日本沿岸における津波被災地の緊急調査を行い、様々な種類の津波堆積物を採取するとともに、その化学的、物理的な組成を分析した。多くの津波堆積物は砂状であったが、一部は細粒の泥質を含む砂泥互層を形成し、津波による物質の移動性の痕跡を残していた。また、泥質を含む津波堆積物には砒素や鉛などの重金属等を多く含有するものがあり、その管理には十分な留意が必要である。さらに、海洋底質を起源とする津波堆積物では、嫌気的な環境で生成した有機物や硫化鉱物が含まれ、長期的に酸性化する可能性も示唆された。

本報告では、東日本沿岸における津波堆積物の性状と地球化学的特性を中心に、津波堆積物に含有する重金属類や塩分の組成について表層土壌や海底堆積物と比較した結果について紹介する。また、緊急調査の結果として得られた分析データを用いて環境リスクの評価を行い、震災に伴う土壌環境のリスク管理と津波堆積物の再利用に際してのリスク回避について述べる。

2. 津波被害および堆積物の調査

2.1 現地調査と試料採取

東日本沿岸の青森県、岩手県、宮城県、福島県、茨城県および千葉県を対象にして、津波浸水域に蓄積された津波堆積物を調査するとともに、各種分析のため試料の採取を行った。初期の予察調査は津波発生後の3月から8月にかけて実施し、地形図をもとに沿岸域のおおよそ5km間隔に採取地点を設定した。調査では津波浸水の状況、津波による地盤の変化、津波堆積物の性状を詳しく調べた。今回の調査対象は、主に自然由来の津波堆積物であり、人為的な汚染物質はできるだけ排除するようにした。

東日本の沿岸地域で約200地点（おおむね、5km間隔）を選定し、地理情報システムを用いてマッピングした。宮

城県および岩手県内の調査地点を図1に示す。かなりの地域で津波被害により海岸線の地形が変化している箇所があったが、海岸線から浸水限界までのほぼ中間あるいは特徴的な堆積状態を示す地点で試料を採取した。採取した津波堆積物の試料は、人為的な混在物を除去するなどの前処理を行った後に、実験室において各種の分析を行った。



図1 津波堆積物の採取地点（宮城県、岩手県の沿岸地域）

2.2 津波堆積物の状況

東日本大震災に伴う大津波は、これまでの想定を超える巨大なものであり、数百年に1度の災害と言われている。環境省の調査によれば、東北、関東6県内の津波堆積物の総量は、1000-1500万トンと推計されている¹⁾。

宮城県内の地質調査により、実際に観察された津波堆積物は砂状が中心であるが、砂質と泥質の数枚の層状の構造を形跡することが認められた。このことは、津波が第一波から数波にわたり断続的に陸域方向に押し寄せ、その後陸域から沿岸域に引き波となったことを表している。また、詳しい調査によれば、海岸線付近では砂質、中間付近では泥質と砂質の互層、浸水限界では塩水のみが存在していることがわかった。

図2は、宮城県内の数カ所における津波の被害と津波堆積物の状況を示したものである。大津波により海岸付近の構造物が破壊され、陸域では強固な岩盤すら粉砕されて、その破壊威力の大きさを物語っている。また、巨大地震の影響で沿岸部の地盤が沈降して、一部では沿岸部の地形や標高が変化し、南三陸や石巻では水没現象が続いている地

域も多い。そのため、津波堆積物の堆積状態は元の地形に依存し、田畑のような窪地や湿地帯では厚く堆積し、市街地などでは比較的薄い堆積状況になっている。平均の堆積厚さは5～10cm程度であり、最大では40cm以上に及ぶ地点もあった。図2に示すように、堆積物の色彩は多様で、砂質ではグレー、泥質では茶褐色から黒色まで千差万別であった。また、砂質の粒度は比較的荒く、泥質は細かい粒子が大半を占めていた。



図2 宮城県域における津波堆積物の性状

3. 元素組成の詳細分析

3.1 化学組成分析

本研究では、津波堆積物からの重金属成分の環境動態や溶出挙動を正確に把握するため、既往の溶出試験法および底質試験法に加えて、本研究室で考案した手法を用いた化学分析を実施した。

まず、津波堆積物からの重金属成分の溶出傾向を見極めるためには、弱酸性の溶媒を用いた溶出試験を行うことが適切と考えられる。土壌の酸性化や酸性雨の影響、さらには微生物や土中生物等の生物作用により津波堆積物からの重金属の溶出が促進される可能性がある。そのため、1M塩酸の溶媒を用いた振とう試験が土壌汚染対策法の指定基準のうち、土壌含有量基準として規定されている。本来、この土壌含有量基準は汚染土壌の直接摂取（摂食等）の評価を目的に設定されているが、本研究ではこの試験法を準用して津波堆積物からの重金属等の最大溶出量を検定することにする。

次に、より簡便かつ科学的に津波堆積物に含まれる化学成分を定量するために、本研究では新規に地球化学的含有量という指標を採用することとした。この指標は、先述した底質含有量において検定された含有量と似ているが、地球化学の観点から鉱物組成や結晶構造等を総合的に勘案して地球化学的な観点からの全含有量を求めるものである。一般に、地球化学的含有量は底質試験法の全含有量よりも多少大きな分析値を表すとされている。具体的には、津波堆積物を微粉末にまで粉碎して分析用試料を作成し、蛍光X線分析装置（XRF）を用いて全含有量を酸化物の割合として検定する。XRFの中でも波長分散型の装置は、軽元素

を含む金属元素全体のマッピングに適している。

本研究では、津波堆積物の化学分析を目的として、上記の水溶出量、酸溶出量、全含有量および地球化学的含有量をそれぞれ測定して各種の解析作業を実施した。

3.2 ボーリングコアの分析

津波堆積物の調査・分析では、表層に堆積した試料のほかに、深さ方向に堆積したコアの調査が必要な場合もある。このようなケースでは、掘削によるボーリングコアを用いて化学分析を実施する。2011.3.11の津波堆積物に加えて、江戸時代や貞観時代の津波堆積物等の過去のイベントの履歴を観察することも可能である。これらのコアに含まれる地質試料のうち、津波堆積物であるか否かを判定するためには、堆積構造や粒径の分析に加えて、各種元素の化学組成に関する精密な分析が不可欠である。そのため、筆者らは前述のXRFを用いた地球化学的全含有量の指標を基礎として、疎性モデリングによるデータ駆動解析を実施した。その結果、提案した新規の数値統計手法は津波堆積物と通常の堆積物を100%の確率で判別できることに成功した²⁾。

4. 地球化学的特徴の解析

4.1 塩分濃度と電気伝導度

採取した津波堆積物の化学的組成を調べるため、塩分濃度やpH、重金属成分を中心に化学分析を行った。図3にそれぞれ土壌pHと電気伝導度の分布を示す。土壌pHは6.5から11の範囲にあり、平均値は8から8.5となって塩水のpH環境をよく反映している。陸域の土壌pHは比較的酸性側にあることから、今回調査した津波堆積物は通常の土壌の組成とは大きく異なっていることがわかる。また、電気伝導度の測定結果からも同様の傾向を示し、平均的な塩分濃度は0.3から0.8%と、通常の土壌よりも高い塩分濃度を示した。0.5%を超える土壌では植物の生育阻害を生じる可能性があることから、塩害対策が必要となる地域もあった。

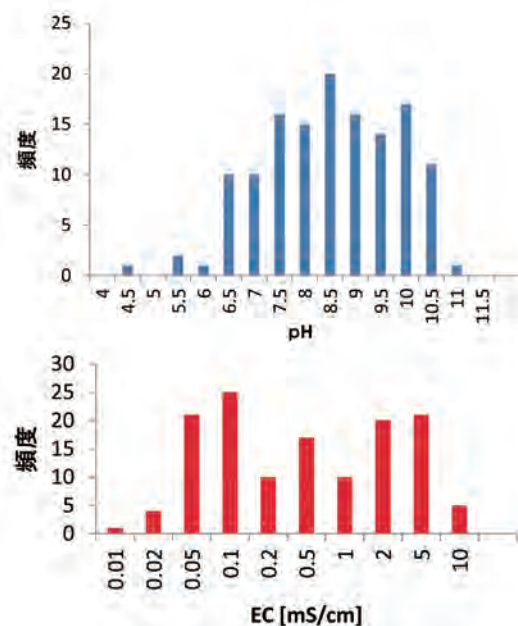


図3 津波堆積物の性状（pH、電気伝導度）

4.2 重金属成分

分析項目としては、鉛、カドミウム、セレン、砒素、クロム、水銀などの重金属、無機成分としてフッ素およびホウ素を分析した。全般的な傾向としては、公表している表層土壌環境基本図（宮城県地域）³⁾ に示した組成とほぼ同様であり、バックグラウンドレベルと大差がないことが示された。しかし、重金属類の分析結果によれば、砒素、鉛の成分において通常の土壌よりも高濃度となる地点が多いのがわかった。宮城県内および岩手県内の沿岸部では、それぞれ21%と13%の試料が土壌環境基準値（砒素）を超過していた。東日本全体では、約15%の津波堆積物が基準値を超過していた。通常の土壌でも基準値を超える場合があるが、これらの超過率は土壌の場合よりもかなり大きくなっている。特に、泥質の堆積物においてこの傾向が顕著なことから、津波堆積物の多くは海成堆積物に由来していることが示唆される。また、海洋の底質には海成堆積物を起源とするものや河川から流出した土砂が沿岸堆積物として蓄積され、土壌よりも高濃度の砒素や鉛を含有していることが報告されている⁴⁾。また、沿岸部では環境条件が急速に変化する酸化還元フロントであることから、これらの元素が汽水域に集積しやすいと言われている。さらに、海成堆積物には海洋の微生物作用により砒素が高濃度で濃縮され、津波によって海洋堆積物が巻き上げられて陸域に達したことも考えられる⁵⁾。

4.3 表層土壌と津波堆積物の差異

沿岸部の表層土壌および津波堆積物の化学組成の比較を行った⁶⁾。図4に最大溶出量試験（1M塩酸溶出試験）により得られた土壌および津波堆積物中の有害金属元素の類

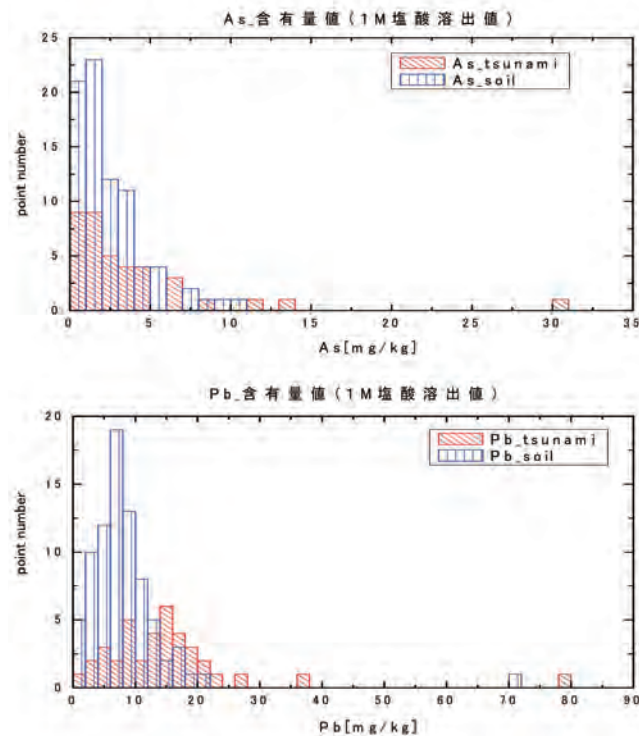


図4 土壌と津波堆積物の含有量の差異（ヒ素・鉛）

度分布（砒素、鉛）を示した。これらの項目は、宮城県内の土壌調査で局所的に高い分布が見られた元素である。沿岸域における鉛および砒素の含有量は、統計的に既存表層土壌より津波堆積物の方がやや高いことがわかる。いずれの元素に関する全含有量も環境基準値150mg/kgを超過するものではないが、津波堆積物により陸域に重金属が付加されていることが明らかである。一方、津波堆積物からの砒素溶出量は既存土壌と同程度であり、鉛溶出量は津波堆積物が既存土壌よりも低い値を示した。両元素の土壌環境基準値は10ppbであり、特に砒素に関しては沿岸部で高い溶出傾向を示した既存土壌と同様に津波堆積物からも基準値を超過する濃度が検出されている。津波堆積物は腐植物質に富み、海水影響で溶出時のpHは5.7～10.2と全体にアルカリを示すものが多いのが特徴である。総じて津波堆積物は、既存土壌に比べて砒素を現位置に留め、還元環境に移行した時に溶出しやすい特性をもつ。

4.4 津波堆積物の長期変質と微生物作用

津波堆積物が蓄積されている陸域では、2011年9月から12月にかけて表面の性状が大きく変質していることが観察された。当初は砂質の土砂と大差がなかったが、数ヶ月の経過とともに赤褐色の堆積物となり、ため池や用水路では褐色の鉄分が溶出していることが示唆された。このような地域では、堆積物中の鉄やマンガンの含有量が高く、図5に示すように長期の堆積によって鉄酸化により変質が進行していることが考えられる。鉄などのミネラルは、河川から供給されて沿岸部の海岸線付近の底質に蓄積され、津波によって大量の鉄成分が陸域に巻き上げられたものと考えられる。海洋底質では嫌気的な環境であったが、陸域で酸化作用を受けることにより徐々に酸性化して赤褐色の土砂に変質したものと推定される。



図5 津波堆積物の長期変質と生物的影響

5. リスク評価および管理

5.1 重金属等による環境リスク

採取した津波堆積物の化学成分のうち、砒素や鉛などの重金属類を対象にして環境リスク評価を行った。重金属を含む堆積物は、土壌摂取、土壌粒子の摂取、植物への移行、地下水への移行などの曝露経路を通じて作業員や居住者に

としてのリスクとなる。そこで、産総研で開発した地圏環境リスク評価システムGERASを用いて現在の堆積状況を想定したリスク評価を実施した⁷⁾。その結果、砒素については宮城県および岩手県の一部の地点において許容される曝露量をわずかに超過することが見出された。しかし、地下水の飲用などがなければ、許容されるリスク基準値(耐用1日摂取量TDI)以内であり、安全な管理条件にあることが判明した。このほか、沿岸部の特定の地域において、フッ素とホウ素の溶出量が基準値を超過する事例が見つかったが、健康リスク上問題となるレベルではなかった。表層土壌と比べて津波堆積物では、一部で相対的にリスク値が高い地域も見られるが、堆積物の安全な管理や地下水の飲用を制限することにより曝露を防止することが可能な状況であった。

一方、津波堆積物を長期的に保管・管理する環境条件では、砒素や鉛の長期溶出のリスクがあるため、遮蔽のためのシートや粘土層の設置、浸出水の処理などのリスク管理が必要となる場合があった。特に、砒素を含有する津波堆積物では、長期保管により堆積層内が嫌気的な環境になり、砒素の溶出を促進する可能性が示唆された。また、微生物作用により長期的に鉄バクテリアの活性が高まり、土壌を酸性化する可能性も指摘された。津波堆積物を農用地に適用するためには、このような長期変質のリスクを十分に考慮して上で検討することが重要である。

5.2 建設資材としてのリスク管理

津波堆積物の性状や物性、力学的特性や環境リスクなどの情報が不足しているため、現場において膨大な量の堆積物が一時保管されている。しかし、復旧・復興に向けて、津波堆積物が土木・建設資材や農業用途に利活用することが期待されている⁹⁾。砂質の津波堆積物の場合では、粒度分布や力学特性において土木・建設材料に適していると考えられる。しかし、塩分や無機成分などが多く含有する堆積物では、資材として活用するために除塩や洗浄などの処理が必要である。一方、泥質および互層の混合状態の堆積物では、砒素や鉛、有機汚染物質を含有する割合が多いため、そのままの状態での利活用することは困難である。しかも、化学的、生物学的に長期変質するリスクも伴うため、浄化やモニタリングなどの対策が必要である。膨大な量を対象とするため、微生物や植物を活用した環境共生型のオンサイト浄化技術の開発が期待される。加えて、油分やダイオキシン類などの人工化学物質を含有する堆積物では、それらの除去や分解のためのリスク低減措置の実施が必須である。

6. まとめ

東日本地方を襲った大津波による津波被災地の現場調査を行い、様々な種類の津波堆積物を採取するとともに、その化学的、物理的な組成を分析した。津波堆積物は砂状が大半であったが、一部は細粒の泥質を含む砂泥互層を形成し、津波による海底堆積物の移動性の痕跡を残していた。一方では、泥質を含む津波堆積物には砒素や鉛などの重金

属類を多く含有するものがあり、その管理には十分な留意が必要であることが分かった。さらに、海洋底質を起源とする津波堆積物では、嫌気的な環境で生成した有機物や硫化鉱物が含まれ、長期的に酸性化する可能性も示唆された。しかし、重金属等の含有が少なく、物理的に安定な津波堆積物は建設材料として復興活動に利活用できる可能性が大きいことも判明した。このような調査研究に基づいて、各自治体では安全性が確認された津波堆積物の多くは復興のための建設資材として有効に活用されている。

【参考文献】

1. 環境省：東日本大震災津波堆積物処理指針、平成23年7月13日、(2011)
2. Kuwatani, K. Nagata, M. Okada, T. Watanabe, Y. Ogawa, T. Komai, N. Tsuchiya, Machine-learning techniques for geochemical discrimination of 2011 Tohoku tsunami deposits, Scientific Reports, 4(7077), 1-6, (2014)
3. 原 淳子ほか：表層土壌評価基本図(宮城県地域)、地質調査総合センター、数値地質図E-3、(2008)
4. 土屋範芳ほか：津波堆積物中の砒素および重金属類と津波堆積物の化学判別、東北大学第6回震災フォーラム、(2012)
5. 駒井 武ほか、東日本沿岸における津波堆積物の性状に関する緊急調査-津波堆積物に起因する土壌汚染リスク-、GSJ地質ニュース、1(6)、(2012)
6. 川辺能成ほか、東日本大震災における津波堆積物中の重金属類とそのリスク、土木学会論文集G(環境)、68(3)、pp.195-202、(2012)
7. 駒井 武：土壌汚染対策の課題と環境地質学の役割、地学雑誌、116、pp.853-863、(2007)
8. 環境省：津波堆積物の性状(参考資料)、平成23年9月1日、(2012)
9. 一般社団法人廃棄物資源循環学会：津波堆積物処理指針、平成23年7月5日、(2011)

【著者略歴】

こま井 たけし
駒井 武

1957年1月生まれ

1979年 東北大学工学部資源工学科 卒業

1980年 通商産業省工業技術院公害資源研究所 入所

1991年 九州大学大学院工学研究科 博士(工学)

1992年 米国ロスアラモス国立研究所 客員研究員

1994年 工業技術院資源環境技術総合研究所 主任研究官

2001年 独立行政法人産業技術総合研究所

研究グループ長

2012年 同上 地圏資源環境研究部門長

2013年 東北大学大学院環境科学研究科 教授



光をあてるだけで血糖値がわかる — 赤外分光法を用いた非侵襲血糖値測定を試み —

東北大学大学院医工学研究科
医工学専攻
教授 松浦 祐司

1 はじめに

厚生省の最新の「国民健康・栄養調査報告」によると、糖尿病が強く疑われる20歳以上の男性の割合は16.2%であり、糖尿病はもはや国民病とも言える大きな社会問題となっている。現在でも700万人を超える患者が自身の血糖値を日常的に測定する必要があるが、現行の血糖自己測定手法は、図1に示すように指先から少量の血液を採取する侵襲的な方法であり、身体的苦痛や感染症の危険性を伴うため、その負担の軽減および精度の向上が急務である。

非侵襲に血糖値を測定する手法としては、おもに波長が800-1500nm程度の近赤外光を用いた測定法の研究が進められてきた。この波長域の光は水に吸収されにくいために、人体の深くまで浸透することから、人体に光を照射して非侵襲で体内の状態を測定するのに適しているうえ、光通信に用いられる安価な半導体レーザーや光検出器を利用したシステムの構築が可能で、血糖測定装置として製品化がなされたものも存在している。しかし、市場に普及するような決定的なものは実現されていない。この主な理由は、近赤外領域の血中糖分（グルコース）の吸収は非常に弱いため、その検出精度や再現性に問題があるためである。図2に近赤外領域で測定した皮膚の吸収スペクトルの一例を示す。水やヘモグロビンの吸収が明瞭なピークとして現れるのに対して、グルコースの吸収ピークは水のそれに隠れてしまい、全く識別できない。グルコースの分子振動に起因する吸収ピークの基本波は、波長が10 μ m程度の中赤外域に存在し、近赤外域に現れるのはその8-10倍音の振動であるために吸収は非常に微弱になってしまう。さらにこの領域には、水やヘモグロビン、たんぱく質といった生体を構成する物質の吸収ピークも多数存在しており、グルコースのみを検出することは極めて困難である。



図1 採血による血糖値測定の様子

そこで我々の研究グループでは、中赤外域に存在するグルコースの基本振動ピークを検出することにより、非侵襲で高精度に血糖値測定を行うシステムの開発を行っている。本稿ではその原理やヒトを対象とした血糖値測定結果などについて述べる。

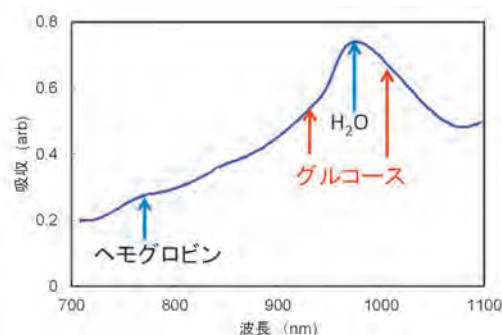


図2 近赤外領域におけるヒト皮膚の吸収スペクトルの例

2 赤外分光法の測定原理と光ファイバを用いた測定系

グルコースの高い吸収強度が得られる中赤外領域において、分光による検出を行うには、赤外減衰全反射（ATR）法が有効である。赤外ATR法は、図3に示すように、高屈折率プリズムに赤外光を入射し、プリズムと外界との境界面で全反射が生じる際に現れる界の「しみ出し」を利用したものである。プリズムに測定対象となるサンプルが触れた状態で測定を行えば、しみ出した界がサンプルによって吸収される。そこで、入射光として波長2-12 μ mと幅広い波長域を放射する赤外ランプ光を用いれば、サンプルの分子振動エネルギーに起因する波長の光のみが吸収されて、

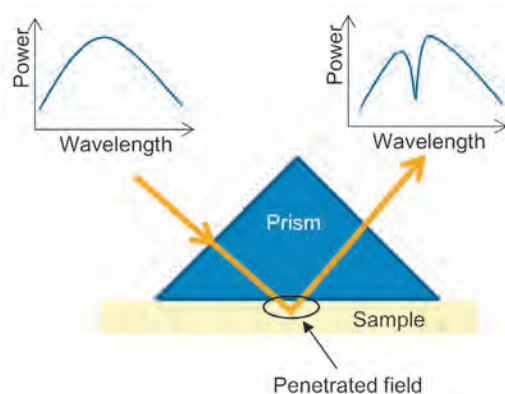


図3 ATRプリズムのはたらき

プリズムを透過した光にはその部分がディップとして現れる。この手法ではプリズムを透過した検出光のエネルギーが大きく取れるため、微弱なパワーしか発生しないランプ光を用いた赤外分光法では非常に有利となる。

赤外光を用いた場合、プリズムからサンプルへ光がしみ出す深さはわずか数ミクロン程度であり、深さ数百ミクロン程度に存在する毛細血管までは光が到達しない。しかし、皮膚や粘膜細胞中には血管中の血漿などの成分が組織液(間質液)としてにじみ出ていることが知られており、その組織液中に存在するグルコース成分を検出することにより、血糖値の測定が可能となる。ただし、その成分濃度は毛細血管に近くなるほど大きくなると考えられるため、測定の際には常に一定の圧力でプリズムを押し付ける必要がある。我々のグループでは図4に示すような台形断面をもつ多重反射ATRプリズムを新たに採用した。多重反射とすることにより、グルコースの検出感度が大幅に増大するとともに、サンプルへの接触面積を大きくとれるため、プリズムの押付圧力の変化による検出値の変動を小さく抑えることが可能である。プリズムの材料としては人体に対して毒性がなく、測定対象のグルコースの吸収帯である波長10 μ m付近で高透過特性を示すものが候補となる。今回はこれらの条件を満たす材料の中から光のしみ出しが大きく、より深部までの検出が可能な低屈折率のZnS(屈折率:2.2)プリズムを新たに用いることにした。ZnSは赤外材料として一般的に利用されているZnSeとは異なり、発がん性が無いことが示されており、無毒な染料(リトポン)として歯科材料にも利用されている[1]。

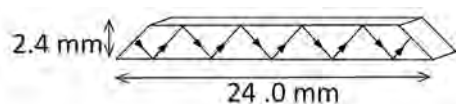


図4 台形プリズムの構造

一般的なATR測定装置においては、プリズムが比較的大きな装置に固定されているため、測定対象となる部位は指先や前腕部などの体表に限定される。しかし、これらの皮膚は厚さ20ミクロン程度の角質層で覆われているため検出されるグルコース成分濃度は小さいものになってしまう。また角質層は汗や皮脂などの状態の影響を強く受けるため測定の再現性は制限される。そこで我々のグループでは赤外光を低損失に伝送することができる中空光ファイバを用い、その先端にプリズムを取り付けたATRプローブを作製した[2, 3]。これを用いることにより、皮膚表面に比較的近いところに毛細血管が存在するうえ、汗や皮脂の影響が少ない耳たぶや、角質が存在しない口腔粘膜などを測定対象とすることが可能になった。

グルコース測定に用いる比較的波長の大きな中赤外光は、通常の石英ガラス光ファイバではガラスに光が吸収されてしまい伝送ができない。そのため、特殊な材料を用いた各種の赤外送信用光ファイバが開発されてきたが、用い

られる材料に毒性や、吸湿性・化学的耐久性などの問題があり、医療分野に利用することは難しかった。一方、我々のグループで開発した中空光ファイバはその構造を図5に示すように、ガラスやプラスチックチューブなどの内面に金属薄膜と誘電体薄膜を内装した構造を有しており、無毒な材料で構成され化学的、機械的耐久性にも優れている。そして中赤外光を吸収しない空気をコアとしているため、広い波長域の中赤外光の低損失伝送が可能である[4]。

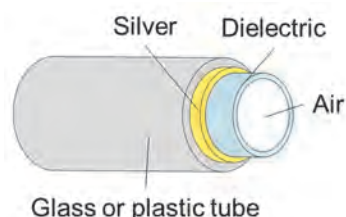


図5 中空光ファイバの構造

図6に血糖値測定用のATR測定系の構成図を示す。赤外分光器 (FT-IR) から射出された赤外光は中空光ファイバに導入され、その先端に取り付けられたATRプリズムに光が入射する。プリズムからの透過光はもう一方の中空光ファイバで伝送され、赤外光ディテクタによって検出される。中空光ファイバは内径2mmのポリカーボネートチューブを母材としたものであり、高い柔軟性を持っている。なお、1回の測定にかかる時間はおよそ1分である。

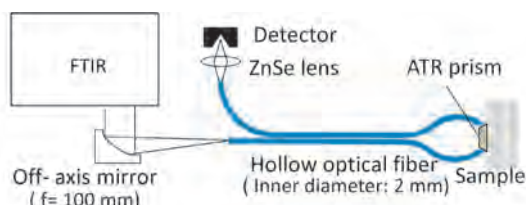


図6 赤外ATR測定系

3 グルコースゲルの測定とヒトを対象とした分析結果

まず初めにグルコースの吸収の様子を把握するためにグルコース水溶液ゲルの赤外吸収スペクトルを測定した。濃度0~1.0%のグルコースゲルをプリズムの上下底面に接触させて測定したスペクトルを図7に示す。横軸は波数(単

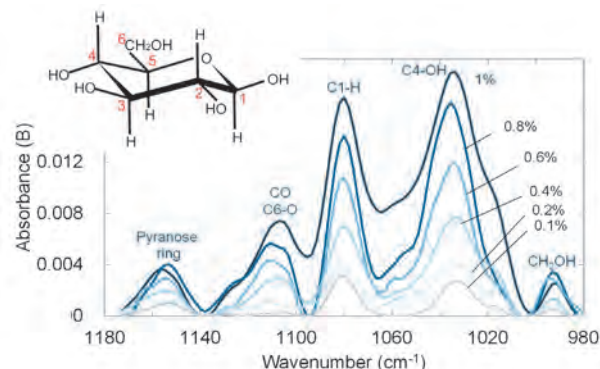


図7 グルコース水溶液の吸収スペクトル

位 cm^{-1})を示しており、これは $(10000/\text{波長}(\mu\text{m}))$ を計算することにより得られる。図にはグルコースの5つの吸収ピークが現れており、それぞれのピークには、グルコースのどの部分の分子振動に起因するものかが示されている。なおグルコース($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)は水溶液中では5つのCと一つのOからなるピラノース環と呼ばれる構造(図7参照)をとり、例えば 1035cm^{-1} 付近の大きなピークは、4番で示したCとOH基の結合によるものである。なお、 1155cm^{-1} のピークはピラノース環の構造全体に起因するものである。この濃度範囲ではどのピークも濃度が高くなるにつれ大きくなることが確認されるが、ヒトの血液中に含まれるグルコース濃度は健常者の通常時で $100\text{mg/dl}=0.1\text{wt}\%$ 程度であるため、さらに低い濃度領域を対象に、 1035cm^{-1} の吸収ピークについて、ピーク高さを濃度に対してプロットした結果を図8に示す。この低濃度領域においても、濃度とピーク値は高い相関性を示し、血中グルコース濃度測定に十分な感度を有することがわかった。

次にヒトを対象にした血糖値測定を試みた。なお実験において測定対象は口唇内面の粘膜とし、WHOの指針による経口糖負荷試験を行った。被験者は成人の健常者で、8時間以上の絶食後、 75g のブドウ糖(水溶液)を経口摂取した。摂取前および摂取後5-15分おきに、市販の測定装置を用いて指先からの採血による自己血糖測定を行い、それと同時にATRプリズムの上下面を口唇に挟んだ状態で赤外ATR測定を行った。得られたヒト口唇粘膜のグルコー

スの吸収ピーク群を図9に示す。図中の5本のスペクトルは上に行くほど血糖値の自己測定結果の高い時点の結果を示している。 1080cm^{-1} 付近の明瞭なC-H結合の吸収をはじめ、水溶液中グルコースの主骨格構造であるピラノース環由来の吸収ピーク等の検出に成功した。一方でグルコースゲルでは鮮明に観測されていた 1035cm^{-1} のC-OH吸収は他ピークとの判別が難しい結果となった。これは、ゲル中には存在しなかったタンパク質などの生体組織由来の成分との重畳によるものと思われる。

グルコース由来の各吸収ピークを明確に識別するため、スペクトルの2次微分解析を行った。この結果を図10に示す。吸収ピークは負に凸のより先鋭なピークとなって観測されるが、中心波数の揃った 1080cm^{-1} (C-H)、 1155cm^{-1} (ピラノース環)の二つの吸収に着目し、このピーク高さをその時点の血中グルコース濃度に対してプロットしたものが図11である。最も強大な 1080cm^{-1} のC-H吸収ピークでは殆ど相関のない結果となり、また空腹時このピークは明瞭に観測されることから、これは他の生体組織由来の吸収と重畳していると考えられる。一方で 1155cm^{-1} のピラノース環による吸収では、図中の R^2 で示される相関係数は 0.60 となり、グルコース特有の構造の追跡が有効であることを示した。

生体組織を構成する各成分の割合には大きな個人差があるものと思われる。そこで被験者の正常時のスペクトル形状を基準として、そこからの変化量を検出することにより

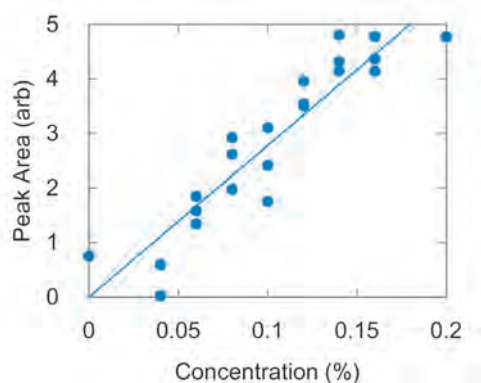


図8 濃度と吸収ピーク高さの関係

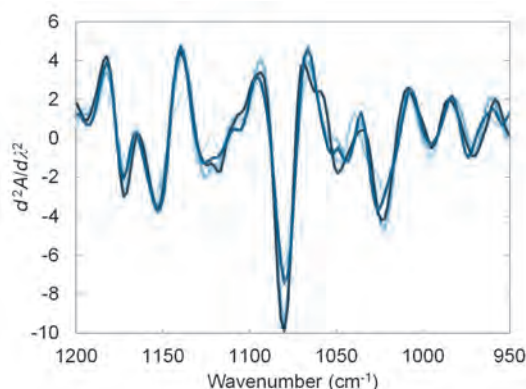


図10 口唇粘膜の吸収2次微分スペクトル

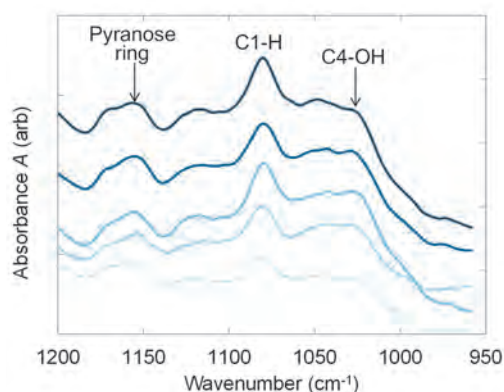


図9 口唇粘膜の吸収スペクトル

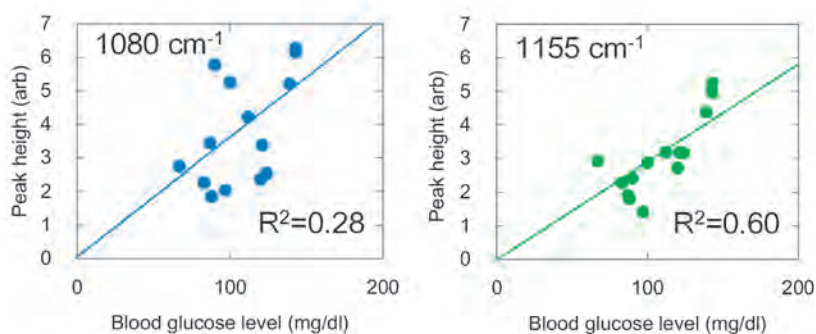


図11 2次微分による較正直線

血糖値の変化を求めることを試みた。解析においては、図12に示すように、吸収スペクトルの980-1180 cm⁻¹の領域のグルコース吸収ピーク群の総面積を計算し、空腹時の面積からの差分を取る。糖負荷試験後の経時変化を、血糖値の増分の推移と共に図13に示す。グルコース吸収ピーク群の総面積は採血法による血糖測定値によく追従しており、この評価方法が最も良い相関を示した。図14ではこの結果を、一般的に血糖値測定器の評価に用いられるクラークエラーグリッド [5] 上に示している。相関係数は0.71、測定誤差平均は9.6 mg/dL (平常時血糖は100 mg/dL) となり、「臨床的測定精度を有する」と評価される「領域A=測定誤差

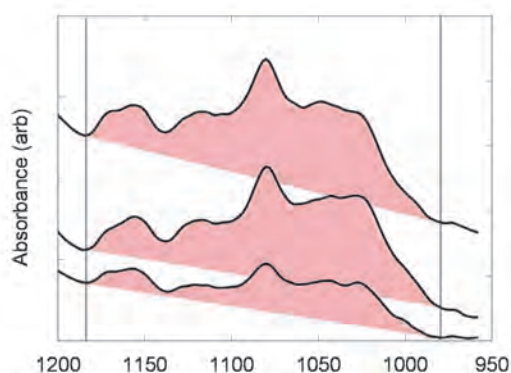


図12 グルコース吸収ピーク総面積の計算手法

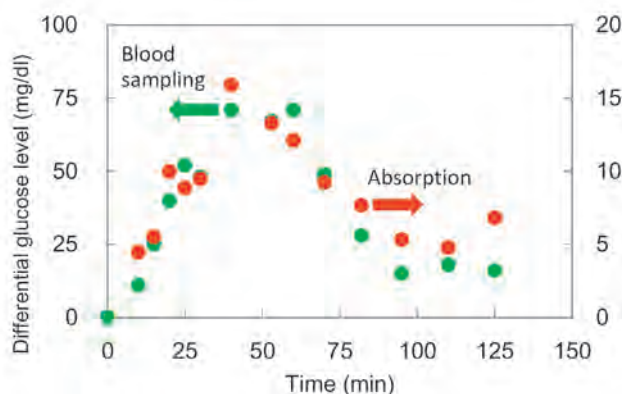


図13 経口糖負荷試験結果

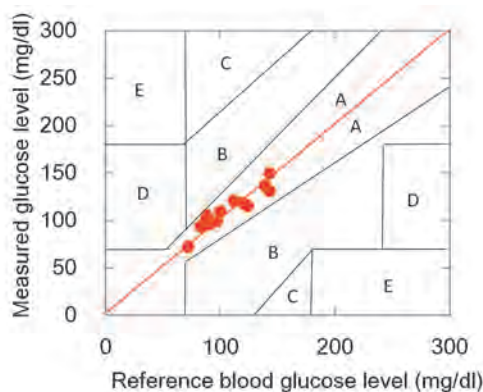


図14 血糖値較正直線 (クラークエラーグリッド)

20%以内」に全ての測定点が存在しており、本手法の有効性を示した。

4 まとめ

我々のグループで開発を行っている多重反射ATRファイバプローブを用いた非侵襲な血糖値測定法を紹介した。原理的に高精度測定が可能な赤外光を用いることで測定精度が向上するとともに、柔軟な中空光ファイバを利用することにより測定対象部位が広がり、再現性が高い測定が可能なお口唇粘膜の測定を行った。これにより測定誤差20%以内という良好な結果が得られ、本手法の実用化の可能性を示した。今後は引き続きデータの蓄積を行い、被験者の個人差に対応可能な解析手法を確立すると同時に、さらなる測定精度の向上および操作性の改良を目指し、検討を進めていく予定である。

赤外分光法をヘルスケア分野へ適用しようとする動きはこれまでもあったものの、この波長領域では低コストかつ有効な「光源」、「光ファイバ」、「検出器」が存在しないという三重苦ゆえ、実用化されたシステムはあまり存在しない。しかし、最近では量子カスケードレーザ [6] などの安価かつ強力な光源や、半導体レーザを用いた波長可変光源 [7] などが発表されるとともに、室温動作が可能で高感度な半導体光検出器の開発も進んでいる。これらと我々の中空光ファイバを組み合わせることにより、これまでは実現できなかった様々なシステムの実用化が可能となる。

【参考文献】

- [1] U.S. National Library of Medicine, Hazardous Substances Data Bank, <http://toxnet.nlm.nih.gov/index.html>
- [2] Y. Matsuura, S. Kino, and T. Katagiri, Appl. Opt. 48, 5396 (2009).
- [3] S. Kino, Y. Tanaka and Y. Matsuura, J. Biomed. Opt. 19, 0570101 (2014)
- [4] 松浦祐司, 応用物理 80, 1078 (2011).
- [5] W. L. Clarke, D. Cox, L. A. Gonder-Frederick, W. Carter, and S. L. Pohl, Diabetes Care 10, 622 (1987).
- [6] P. Q. Liu, et al., Nature Photonics 4, 95 (2010).
- [7] 佐藤具就, 満原学, 近藤康洋, 応用物理77, 1324 (2008).

【著者略歴】

まつうら ゆうじ
松浦 祐司

- 1988年 東北大学工学部通信工学科卒
- 1992年 東北大学大学院工学研究科修了、博士 (工学)
- 1993年 住友電気工業横浜研究所
- 1994年 米国ラトガース大学セラミック工学科研究員
- 1996年 東北大学大学院工学研究科助教授
- 2008年 東北大学大学院医工学研究科教授



自動走行技術に関する研究動向と 東北における取組の展望

東北大学
未来科学技術共同研究センター
教授 鈴木 高宏

1. はじめに

最近、「自動走行」が注目されています。東京オリンピック・パラリンピック開催に向け、国は2020年までの自動走行の実用化を成長戦略の一つに挙げ、SIP（戦略的イノベーション創出プログラム）の一テーマとするなど関係企業・研究機関による開発が加速化されています。

わが国では、交通事故の発生件数・事故死者数はここ数年、継続的に減少・横ばい傾向の中、高齢運転者による事故の比率だけは増加傾向にあり、特に地方の高速道などでの逆走問題への対応が求められています。一方、特に東北など地方部では、車は日常生活に必須の交通手段であり、また、リスクから免許を返納した高齢者が外出意欲を失い、逆に引きこもり、寝たきり、認知症の進行を招いてしまう問題も指摘されています。自動走行の実用化に向けては、その社会的意義について様々な考慮が必要です。

次世代移動体システム研究プロジェクトは、2015年1～2月に行われた「近未来技術実証特区」構想提案募集に対し、仙台市と共同で本学青葉山キャンパスを舞台にフィールド実証を進めていく提案を行いました。仙台市は同3月の国家戦略特区諮問会議において地方創生特区第一弾（国家戦略特区の二次指定）の3つの区域案の一つ、「ソーシャルイノベーション創生特区」として指定され、上記構想はその中での取組として、全国140余の提案の中から選ばれました。さらに国は、仙台市沿岸部の災害危険区域である荒浜地区において本年度内にレベル4完全自動走行の実証デモを行うことを発表しました。東北は、自動走行の研究開発において重要な役割を与えられたと言えます。

2. 自動走行の実現に向けた最新状況

自動走行に関しては、わが国では例えばASV（Advanced Safety Vehicle：先進安全自動車）プロジェクトとして、現在第5期に至るまで産官学の研究開発が続けられてきました。最近では、NEDOエネルギーITSプロジェクトとして、主に都市間高速道路等での大型車の自動隊列走行による省エネと運転者負荷低減を狙い、その技術開発・実証が取り進められました。こうした大型車自動隊列走行は、米国カリフォルニア州PATHや、欧州CHAUFFEUR、SARTREなどにも見られる物流面での適用のほか、愛知万博でのIMTS（Intelligent Multi-mode Transit System）のような新交通システムの提案としても考えられます。

欧州では、EC（欧州共同体）における共同研究開発の枠

組FP（Framework Program）の中で第7期（2007-2014）から自動走行プロジェクトが始められ、2014年からはHAVEit、AdaptIVe、CityMobil2など欧州での各種プロジェクトを協調連携させるHorizon 2020が進められており、さらにその下で各国での取組が行なわれています。そこでは自動走行の必要性として、ヒューマンエラー排除、エネルギー効率向上などが挙げられています。

米国では、DoT（交通省）がConnected Automated Vehicleとして自動走行車両の研究開発を主導しています。特に、安全や省エネに加え、身体障害者への対応が重視されているのが特徴です。これは退役軍人の1/3が身体障害を抱え、しかもその失業率が高いことによります。最近では、ミシガン州におけるSmart CorridorやMTC（Mobility Transformation Center：共同試験場）などの実証実験環境の整備が進められていることが特筆されます。

こうした中、わが国では2014年度からSIP-adus（Automated Driving for Universal Services）と題し、2020年までの自動走行システムの実用化を目指した取組が始められています。しかし優れた技術を持ちながら、わが国の取組は「一周遅れ」とも言われています。それは、法社会制度の壁を主たる理由に、国内での実証および社会実装の取組が不足している点が大きいと思われる。

3. 自動走行における自動化レベルと法制度との関係

自動走行に関しては、例えば米NHTSA（National Highway Traffic Safety Administration：運輸省道路交通安全局）による定義をはじめ、多少の差はあれどもある程度共通した分類がされています。表1はEUのプロジェクトであるAdaptIVe（2014-2017）で想定されている自動化レベルの分類と、各レベルに該当するシステム例です。

ここで、レベル0はLDW（Lane Departure Warning）、FCW（Forward Collision Warning）などドライバーへの

表1 欧州AdaptIVeにおける自動化レベル分類

レベル	概要	該当するシステム例
0	自動化なし	LDW、FCW（警告システム）
1	運転支援	ACC、LKA、City Cruise
2	部分自動化	Parking Assist、渋滞中走行
3	限定自動化	渋滞中自動追従、自動隊列走行
4	高度自動化	Auto Valet Parking
(5)	完全自動化	(Robot Taxi)

警告までを行い自動化制御は伴わないもの、レベル1は運転操作の一部を支援するもので、上記のACC (Adaptive Cruise Control)、LKA (Lane Keeping Assist) のほか、近年急速に普及が進むいわゆる自動ブレーキ、衝突被害軽減ブレーキシステムなどが該当します。レベル2は複数の機能の組合せによる部分的な走行場面での自動化を表し、例えば、自動で縦列駐車を行うParking Assistシステムや、ACCとLKAの併用による渋滞中走行などが該当します。レベル3は、運転者が監視しつつも自動化システムによる車両の自動走行が実現したものととなります。いわば“Hands free, Eyes on Road”という状況で、通常的环境下では自動走行可能ですが、システムが対応できない環境となった場合には人間に運転の権限を戻し、最終責任は人間が持たねばならないこととなります。運転負担は大きく軽減されますが、居眠りや飲酒時などでの利用は許され得ないと考えられます。また自動走行時に運転者が覚醒を保たねばならない課題もあります。欧州などではシステムから人間に運転権限を戻す際に何秒前に通知を行えばよいかなどの基準が議論されています。なお、SIP自動走行では、上記レベル2、3を併せて準自動走行と称しています。一方、レベル4では人間による運転を廃し、自動システムが最後まで責任を持つところとなります。表1のように特定の環境・エリアのみに区切って走行可能とする場合をレベル4、あらゆる環境に対して走行可能な場合をレベル5と分け、後者のみを「完全」と呼ぶ場合もありますが、通常はレベル4以上で完全自動走行と呼ばれます。運転免許を持たない、または運転できない状態の人も利用可能な、新たな交通システムとしての可能性が注目されるところです。

完全自動走行の実現にあたっては、技術開発だけでなく、現行法制度との関係についての検討が必要です。主に該当するのが、道路交通法（道交法）第70条ですが、同条は「車両等の運転者は、当該車両等のハンドル、ブレーキその他の装置を確実に操作し、かつ、道路、交通及び当該車両等の状況に応じ、他人に危害を及ぼさないような速度と方法で運転しなければならない。」と記され、運転者における安全運転義務を示しているに過ぎません。そのため、自動システムによっても、運転者の責任下でそれが確実に安全に車両を走行させている限り、現行法下でも上述のレベル3での自動走行は可能となります。

一方、レベル4完全自動走行の場合、実は国内法では明確にそれを禁止する法律等はありません。上述の道交法第70条における「運転者」を誰として車両の運行責任を課すべきか、こうした車両における保安基準をどう定めるべきか（道路運送車両法における保安基準）、現行法下で想定されていない事態を扱う必要が生じています。一方、国際的には、ジュネーブ条約において「一単位として運行されている車両または連結車両には、それぞれ運転者がいなければならない」（8.1条）、「運転者は、常に、車両を適正に操縦し、または動物を誘導することができなければならない」（8.5条）などと規定され、これにより公道上での無人走行が規制されています。そのため、こうした条約の改正について、新たに8.6条「車両の運転方法に影響を及ぼす

車両のシステムは、多国間協定に適合しているときは、第5項及び第10条に適合するものとみなす。（以下略）」（※第10条は日本の道交法第70条とほぼ同様）なる改正の動きが欧州を中心に生じています。こうした議論への参加のためには国連欧州経済委員会WP1（道路交通安全に関する作業部会）への正式参加（現在は協議国として参加）が必要となっている上、こうした議論で主導権を得るには、提案の背景となり得る説得力を持つ実証データが必要です。

わが国での実証取組としては、2020年東京五輪に向けてART (Advanced Rapid Transit) なる自動走行バスによる新交通システムの実現を目指す取組が進められています。この技術の地方展開として、気仙沼などで取り組まれているBRT (Bus Railway Transit) など、地方公共交通への適用が考えられます。国際的には、欧州におけるCityMobil2プロジェクトが最も注目されています。これは、6～10人乗りの小型無人低速車両の実用化プロジェクトであり、他交通との分離方式を基本としてイタリア、フランスをはじめ2014年から欧州各都市でデモや実証が重ねられています。

一方、こうした自動走行技術を含めた様々な先進技術は、人口減少の進むわが国の地方の再生にこそ活用されるべきとの考えから、2015年1月に内閣府地方創生推進室から、遠隔医療、遠隔教育、自動飛行、自動飛行等の先端技術の実証プロジェクトとその実現のための制度・規制改革を大胆に進める「近未来技術実証特区」の募集が行われ、先述のように仙台市がその特区の一つに認められました。さらに本特区に関しては、同10月に内閣府より、災害危険区域である荒浜地区においてレベル4完全自動走行実現を目指した実証デモを2016年3月までに行うと発表されました。海外で急速かつ積極的に実証が進められる中、わが国での取組としてその役割は非常に重要と考えられます。

4. 東北における自動走行実証の必要性

東北地域では、地理的・地形的に交通の便における不利が大きく、全国的にも進む過疎高齢化への対応の必要性、加えて震災復興の点からも、東北地域での取組は国内外から高く注目されると考えられます。

さらに、自動走行研究には、自動車分野とロボット分野の連携融合が不可欠です。現在の国際的な自動走行研究開発競争の発端となった、米DARPA Grand Challenge、Urban Challengeでその活躍の中心となったのは、Stanford大、CMUなど米主要大のAI分野の研究者達でした。先述のNEDOエネルギーITSプロジェクトでも、その実質中心となったのは「カー・ロボティクス」と称する自動車工学とロボティクスの双方にまたがる若手研究者らでした。本学はロボット分野における国内最有力の拠点の一つであり、特にフィールド・ロボティクスにその強みを持っていることは大きな強みです。当該分野をコアに有しつつ自動車関連分野と強い連携を有し、また幅広いシーズ基盤を有する本学の次世代移動体システム研究体制は、自動走行研究に不可欠な基盤を揃えていると言えます。

これらに加え、自動走行研究においてはさらに以下のよ

うな考慮すべきポイントがあると考えられます。

まず、自動走行システムのような先進的なシステムは、全国的な普及に相当の時間がかかると考えられます。例えば、ETC車載器は2000年の試行開始後、市場投入から導入補助や割引制度など様々な普及施策を経ながら、その利用率は2005年に50%、2009年に80%をそれぞれ越え、その後2015年現在まで88~89%と安定した数字となっています。但しこれは高速道における利用率であり、機器設置普及率としては2012年時点で自動車保有台数約8千万台に対し、セットアップ台数約4千万台と、約半数の車への設置に留まっています。また、車種別には普通車約89%、大型車約98%に対し、軽自動車では約68%と大きく差が生じています。地方部では軽自動車がより多くを占めることからETC設置普及率もより少ないと考えられます。このことから、より先進的でシステム価格も高価となる自動走行システムの普及にはより時間がかかると考えられます。よって、自動走行車が100%完全普及するには相当の時間がかかり、より少ない普及率の間、人間の運転する車両との混在状況を考慮する必要があります。今後そのような状況を想定した実証実験も必要と考えられます。その場合、都市部のような密度の高い環境より、危険性の低い交通量のより少ない状況から進めていくべきと思われる。

では、そうした混在状況を想定した検討はどのように進めればよいでしょうか。複雑性が高くリスクのより大きい状況を、実証実験のみで十分に検討するのは容易ではありません。そこで、シミュレーションの活用が考えられます。

5. 人間運転行動モデルに関する研究

ETCシステムの導入以後、それまで高速道における渋滞要因のトップを占めていた料金所渋滞はほぼ解消されました。高速道高度利用化プロジェクト(AHS: Advanced Cruise-Assist Highway Systems)ではその次の課題として、トンネル・サグなどの道路構造に起因する渋滞の解消を挙げて産官学の研究開発が進められました。

サグとは下り坂から上り坂に変化するすり鉢状の地形にある道路部を指し、ドライバーが上り坂になったことに気付かず起こす微妙な速度低下が次々と後続車両に伝搬し、しばしば渋滞を引き起こします。この渋滞発生メカニズム解明や対策検討において、ドライビングシミュレータ(DS)を活用したドライバーの運転行動モデルの解析を行った例¹⁾を以下に紹介します。

ここでは、高速道における縦方向(同一車線内)における速度調整モデルとして、以下のモデルを考えます。

$$\text{Chandlerモデル: } a(t+\Delta t) = k_1(V_f(t) - V(t)) \quad (1)$$

$$\text{Newellモデル: } a(t+\Delta t) = k_2(X_f(t) - X(t)) \quad (2)$$

ここで、 a は自車加速度、 V_f は先行車速度、 V は自車速度、 X_f は先行車位置、 X は自車位置、 k_1 、 k_2 はパラメータです。

各被験者に対し、DS上のシナリオでの走行実験を行い、その結果から(1)、(2)式における加速度の推定値と測定値の二乗誤差を最小化するパラメータ k_1 、 k_2 を求めます。ここでは、東名高速大和サグ部(東名高速道路下り線横浜町田

IC-厚木IC間の21KP-28KP区間)のシナリオを用いました。こうして得られた、(1)式のChandlerモデルと(2)式のNewellモデルの各同定パラメータ k_1 、 k_2 により計35名の被験者の結果をマッピングしたのが、図1です。

図1では、横軸にChandlerモデルにおけるパラメータ k_1 (相対速度への感度)、縦軸にNewellモデルにおけるパラメータ k_2 (相対位置(車間距離)への感度)を表します。まず、各パラメータの数値が被験者によっては10倍程度まで大きく異なっています。またここで色分けをしているように、被験者の運転行動モデルがいくつかのグループに分かれる傾向が見えます。ここでは、相対速度への感度の閾値を0.1、相対位置への感度の閾値を1.0として、双方の感度いずれも小さいグループをグループ1(+), いずれも大きいグループをグループ2(▽), 相対速度への感度は大きい相対位置への感度は小さいグループをグループ3(□), 相対速度への感度が非常に大きく、図に示す範囲外になったものをグループ4としてしています。このように分けたグループ毎に走行を通じての平均車間時間や、属性との比較を行ったところ、グループ1が車間時間が長く、女性や比較的運転歴の少なく、運転スキルに自信が無い傾向が見られた一方、運転歴の長い被験者の多くはグループ2、3に属し、車間時間が短い傾向が見られます。

しかし、実際の交通流においては、各車両は車線変更を適宜行いながら走行しています。各車両は相互に作用しながら、しかし各車両の関係性は常に変化し続けながら交通流を形成しています。交通流シミュレーションにおいては、マクロ的に流体運動を模したモデルをはじめ、様々なモデルが挙げられますが、マクロ面・ミクロ面の両面ともに整合性を考慮したものはほとんど見られません。米NGSIM²⁾のように、各車両の走行データが詳細に計測されたものがあれば精確な再現も可能と考えられますが、現実には現状このような計測データはほとんどありません。仮想的なシミュレーション環境は、その現実との整合性を示すことは非常に困難ながら重要です。

運転行動モデルについて上述の縦方向に加え、横方向として図2のような車線変更モデルを定義し、パラメータ同定を行なった例³⁾を紹介します。ここでは同区間で路側に

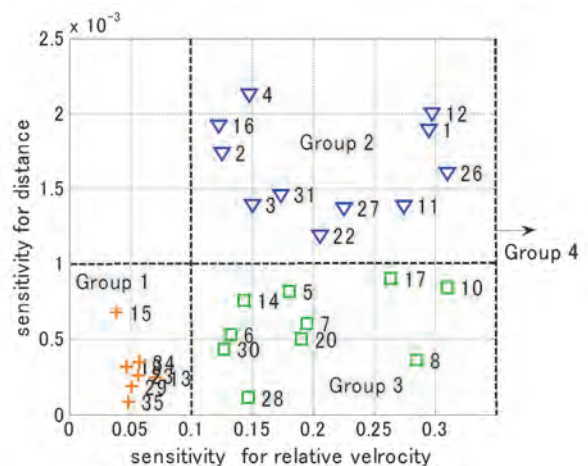


図1 各被験者の同定パラメータの分布

設置された感知器データを用いています。感知器データには、その地点を通過した車両の速度、車線と通過時間が記録されます。ここで始点（21KP）では感知器データ通りに車両を発生させ、下流の24KP地点における感知器データと比較し、表2のように車線別の平均速度や走行台数についての誤差が最小となるパラメータを求めています。

表2において同定したパラメータ k_1 、 k_2 は、追従走行状況から前方車両の速度 v_p と隣接車線の前方車両の速度 v_{rp} の差により車線変更判断を行う速度差ストレスモデル

$$s = k_1(v_{rp} - v_p) + k_2 \int (v_{rp} - v_p) dt \quad (3)$$

におけるパラメータを表しています。(3)式の s が閾値を越える($s > 1$)と車線変更要求が発生し、図2のように安全確認の後に車線変更を行うモデルとなっています。

しかし、上記の結果は全ての車両が同じパラメータとしており、マクロ的には状況が再現できていても、ミクロ的な挙動は現実とは大きく異なることが考えられます。上述のように、縦方向だけでも既にパラメータの個人差が非常に大きく異なることが示されています。加えて、図3は上述の車線変更モデルについて、100名程度の被験者の同一シナリオにおける走行結果によるパラメータ同定の結果です⁴⁾。本結果はより簡易なシミュレータ環境によるもののため、数値の精度には課題がありますが、こうしたパラメータが広く分散することは間違いないと考えられます。こうした運転行動における個人差の分布は現実の交通流を複雑にしていますが、一方でここに適切な制御を加えると、定常的な交通流よりむしろ密度や速度を向上させられる可能性もあり⁵⁾、将来、自動走行車が牧羊犬のように交通流の制御に役立てられる可能性も考えられます。

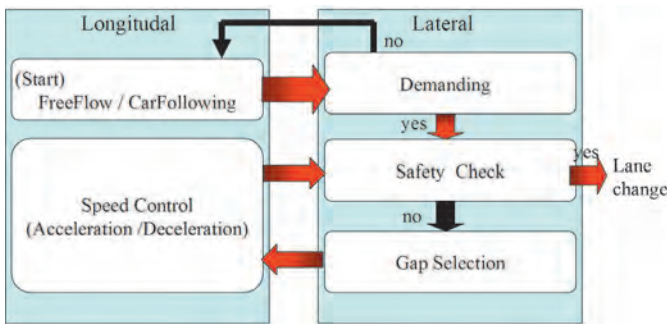


図2 車線変更モデルのフレームワーク

表2 速度差ストレスモデルによる同定結果 ($k_1=0.02, k_2=0.0007$)

		走行1	走行2	追越	全体
通過台数 [台]	KAKUMO	398	825	624	1847
	実データ	381	865	602	1848
	誤差率	+4%	-5%	+4%	0%
平均速度 [km/h]	KAKUMO	89	101	117	102
	実データ	86	102	115	101
	誤差率	+4%	-2%	+1%	+1%

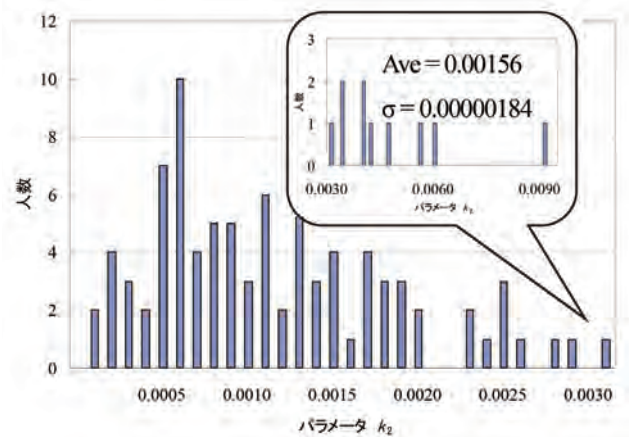


図3 車線変更モデルパラメータの分布

6. おわりに

ここでは、完全自動走行の実用化に向けた国内外の動向を、特に社会的意義や実証的な面から紹介し、その中で東北における取組が今後重要と考えられることを述べました。さらに今後の普及において、混在交通流における人間の運転行動の個人差に注目した検討の重要性に触れました。このためには、交通流シミュレーションを活用し、現実の交通流データに基づくとともに、人間の運転行動パラメータの分析が必要と考えられます。みやぎ復興パークにおける本学の多賀城拠点には、東北唯一となる動揺装置付きドライビングシミュレータがあり、今後こうした研究を進める上で大きな武器となることが期待されます。

【参考文献】

- 1) 宮本 他, サグ部における速度調整操作モデルのドライバー特性解析, 第5回ITSシンポジウム, 2006年12月.
- 2) Cambridge Systematics, Inc, NGSIM I-80 Data Analysis (4:00p.m. to 4:15p.m.), 2005.
- 3) 結城 他, ミクロ・マクロ両視点からの高速道における車線変更モデルの同定と検証, 第6回ITSシンポジウム, 2007年12月.
- 4) 森 他, 車両錯綜状況下における個人特性を考慮したパラメータ同定, 第7回ITSシンポジウム, 2008年12月.
- 5) 鈴木, 車線変更による混在交通流の動的挙動の制御, 自動車技術会2001年秋季大会学術講演会, 2001年10月.

【著者略歴】

すぎき たかひろ
鈴木 高宏

昭和45年7月生まれ

- 1998年 東京大学大学院工学系研究科博士後期課程修了
同大生産技術研究所講師
- 2000年 同助教授
- 2004年 同大情報学環助教授 (2007年准教授に改称)
- 2010～2013年 長崎県産業労働部政策監として出向
- 2013年 東京大学生産技術研究所准教授
- 2014年 東北大学未来科学技術共同研究センター教授
同副センター長兼務 現在に至る

平成26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・産業の向上発展等に寄与するため、次に掲げる事業を行った。

1. 学術及び科学技術の振興

(1) 若手研究者育成のため「青葉工学振興会賞」及び「青葉工学研究奨励賞」の授与

① 第8回「青葉工学振興会賞」の授与 「応募件数：12件」

研究者	研究業績名
東北大学工学研究科電子工学専攻 准教授 長谷川 英之	生体組織動態の高精度計測を目指した高速超音波イメージング

② 第20回「青葉工学研究奨励賞」の授与 「応募件数：20件」

研究者	研究業績名
東北大学多元物質科学研究所 助教 安達 正芳	Ga-Alフラックスを用いた単結晶窒化アルミニウム液相成長法の開発
東北大学学際科学フロンティア研究所 助教 鬼沢 直哉	非同期式信号処理に基づく高速・低電力VLSI実現の研究
東北大学国際集積エレクトロニクス研究開発センター 助教 佐藤 英夫	微細磁気トンネル接合の高性能化に関する研究

(2) 国際会議、研究会等各種学術研究集会への助成

① 国際学術会議

第22回国際アコースティック・エミッションシンポジウム 外	3件
-------------------------------	----

② 学術研究集会

資源・素材学会東北支部平成26年度春季大会 外	3件
-------------------------	----

(3) 大学院学生、学部学生等の視野を広めるための国際交流への助成

キングモンクット工科大学トンブリ校との学生間交流 外	6件
----------------------------	----

(4) 東北大学工学研究科等における優秀な外国人留学生及び博士後期課程進学者への奨学金の給付

平成26年度外国人留学生奨学金（10月入学者3名）	6名
平成26年度博士後期課程進学者奨学金（2-1）	11名
平成25年度博士後期課程進学者奨学金（2-2）	16名

(5) 東北大学工学研究科等における研究成果や工学情報を県内企業等に提供する機関誌「翠巒」を発行

「翠巒」第29号発行（27年3月）	1,200部
-------------------	--------

(6) 東北大学祭への助成

開催期間	平成26年11月1日(土)～3日(月)
場 所	川内キャンパス

2. 研究教育活動助成

(1) オープンキャンパスへの助成

① 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オープンキャンパスへの助成

開催期間	平成26年7月30日(水)～31日(木)
場 所	青葉山キャンパス

② 子供科学キャンパスへの助成

開催期間	平成26年7月30日(水)～31日(木)、10月14日(火)～15日(水)
場 所	青葉山キャンパス工学研究科創造工学センター

(2) 教育研究活動への助成

東北大学工学部・工学研究科等の教育研究活動や情報発信等の事業活動に対し助成した。

3. 工学に関する研究開発

(1) 科学技術に関する試験研究

地域における科学技術の振興を推進するために、研究員を委嘱（非常勤研究員）し、施設・設備等については、東北大学工学研究科等と包括協定を締結し、試験研究を行った。

民間企業・団体、地方公共団体等からの委託研究	106件
------------------------	------

(2) 学術研究を行なうための指定研究助成金の交付

指定研究助成金として教育・研究の奨励を目的とする奨学寄附金	64件
-------------------------------	-----

4. 産学官交流推進事業等の助成

(1) 産学官交流大会への参画

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共催団体として参画した。

区 分	開催日	場 所
第53回新春産学官交流大会	平成27年1月21日(水)	仙台国際ホテル

(2) みやぎ優れMONO発信事業への参画

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。

区 分	認定式	場 所
第7回みやぎ優れMONO事業	平成27年1月21日(水)	仙台国際ホテル

5. 附属明細書

記載事項はありません。

編 集 後 記

一般財団法人青葉工学振興会の発行する機関誌「翠巒」第三十号をお届けします。

青葉工学振興会は、昭和六十年三月二十七日に宮城県より設置が認められた財団法人としてスタートし、平成二十五年四月からは「一般財団法人」に移行して再スタートいたしました。本翠巒の号数からおわかりいただけますが、本年度が三十年という区切りの年でした。この間、設立趣旨である「この地区の工学分野の教育・研究に寄与する」ため、時代に応じた活動をしてまいりました。

さて、今回の翠巒三十号では、本年度に就任された滝澤工学研究科長から巻頭言にて将来の工学部・工学研究科の発展にむけた熱いメッセージをご説明頂きました。さらに第九回青葉工学振興会賞、第二十一回青葉工学研究奨励賞の受賞者の業績内容ならびに喜びの声をお伝えしました。これらの賞については、毎年多くの応募を頂き、約半年間の厳正なる選考で選ばれており、大変レベルの高い内容で将来の工学技術振興・実用化が期待できると高く評価頂いております。今後とも多くの若手研究者の積極的な応募をお願い致します。続いて、「研究プロフィール」にて、工学研究科、情報科学研究科、環境科学研究科、医学研究科、未来科学技術共同研究センターから投稿頂きました先導的・革新的研究を紹介させて頂いております。ご多忙の

中ご寄稿くださいました執筆者の方々には厚く御礼申し上げます。なお、研究内容にご興味がある場合には、是非とも執筆者先生方にコンタクトをおとり頂き、共同研究や委託研究の可能性の議論に発展すれば、本財団としては産学連携の推進になり大変喜ばしいことと存じます。

最後になりましたが、皆様におかれましては、本財団のより一層の発展のため、ご支援ご協力をよろしくお願い申し上げます。

(常務理事 東北大学大学院工学研究科教授 猪股宏 記)

翠巒

一般財団法人青葉工學振興會

〒980-8579 仙臺市青葉區荒卷字青葉6-6-04

東北大學大学院工學研究科內

電話 022-795-7991

<http://www.aoba-found.or.jp/>