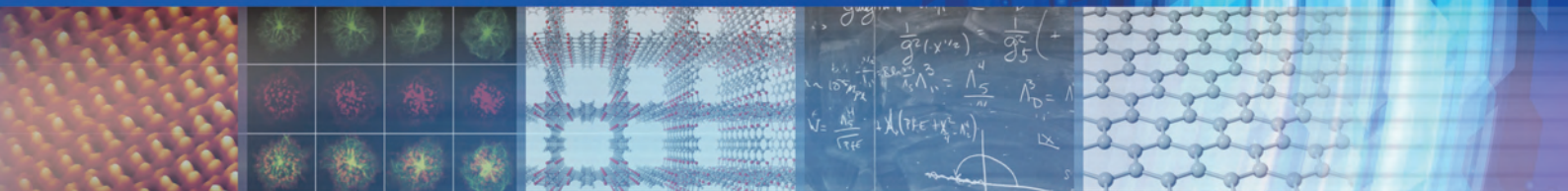


# WPI 10年のあゆみ

World Premier International Research Center Initiative  
世界トップレベル研究拠点プログラム



*Circulating World's Best Brains*



# WPI

World Premier International Research Center Initiative  
世界トップレベル研究拠点プログラム

10年のあゆみ

平成 28(2016)年 12月

# Circulating World's Best Brains

2007



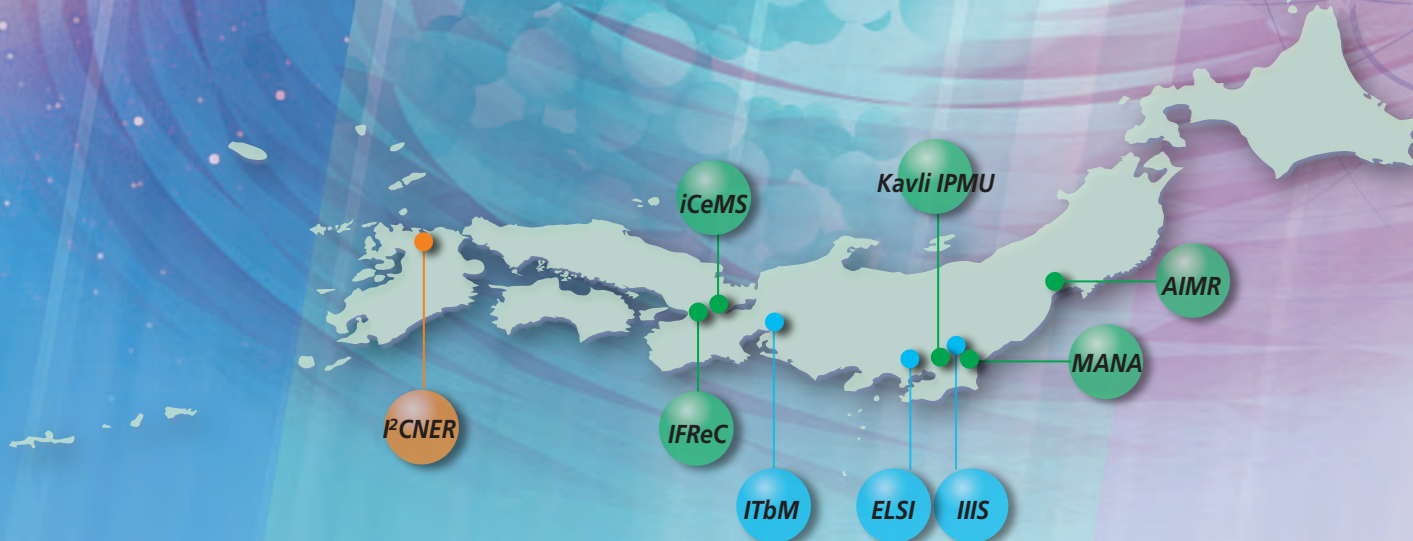
2010



2012

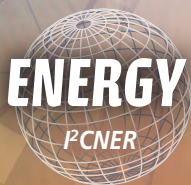
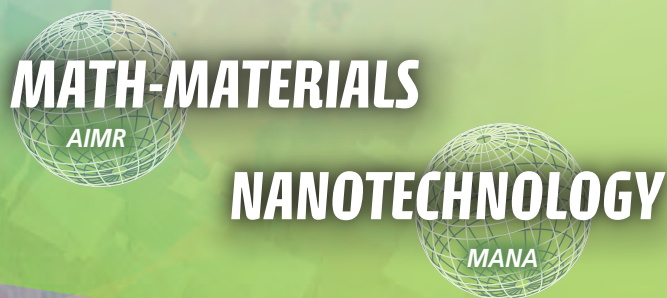
ORIGINS OF UNIVERSE/  
EARTH / LIFE

LIFE SCIENCE



# WPI

World Premier International  
Research Center Initiative  
世界トップレベル研究拠点プログラム  
10年のあゆみ



MATERIALS / ENERGY

## Message

井村 裕夫	4
WPIの10周年を迎えて	
小松 弥生	6
WPIと我が国の研究振興について	
安西 祐一郎	7
優れた知の創造プログラムとしてのWPIプログラム	
生川 浩史	8
世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI) 立案の経緯等について	

## WPIプログラムの目的、制度、歩み

黒木 登志夫、宇川 彰	10
世界トップレベルの研究拠点を作る -WPIプログラムの野心と成功-	

## WPI拠点の取り組みと成果

AIMR	30
東北大学 原子分子材料科学高等研究機構	
Kavli IPMU	38
東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構	
iCeMS	46
京都大学 物質-細胞統合システム拠点	
IFReC	54
大阪大学 免疫学フロンティア研究センター	
MANA	62
物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点	
I2CNER	70
九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所	
IIIS	76
筑波大学 国際統合睡眠医科学研究機構	
ELSI	82
東京工業大学 地球生命研究所	
ITbM	88
名古屋大学 トランスフォーマティブ生命分子研究所	

\* 論文情報は2007年採択拠点に限って掲載しています。  
各拠点の基本情報内の「研究支援員」と「スタッフ」の  
職種範囲は各拠点からの報告に基づいています。

## Message

野依 良治	94
WPIプログラムのさらなる発展に向けて	

刻々と変化を遂げる世界の中でトップレベルを目指す研究拠点の様を、常に雲一つない空色を身にまといながら、革新的なイノベーションの種を運ぶ鳥の姿に見立てたものです。また、アルファベットの「i」の一部ともなっているこの種には、これから進むべき方向を照らす光の道案内の意味合いが込められています。



# WPIの10周年を迎えて



## 井村 裕夫


世界トップレベル研究拠点  
プログラム委員会初代委員長  
(2007年度～2015年度)

「歴史上一国が栄えたとき、そこには世界の先端を行く優れた大学があった」。これは有名なカリフォルニア大学の元総長、クラーク・カーの言葉である。大学は学問を継承、発展させ、未来を担う人材を育成するところである。そこには、有能な研究者の集団、組織、研究施設などがなければならない。それが、Center of Excellence (COE) とよばれるもので、優れた大学には国際的に名を知られた複数のCOEが存在する。COEは、もちろん大学だけでなく、独立の研究機関や民間にも存在しうるものである。

20世紀の後半、先進諸国では科学技術政策が、重要な政策課題の一つとなった。それはグローバル化が進み、産業構造が大きく変わってきたこととも関係している。政府に対する科学技術政策の助言機関が設けられ、研究の振興がはかられてきた。その一つとして、COEを積極的に育成しようとする動きが、特に今世紀に入って世界的に活発となった。いわゆる excellence initiative と呼ばれるものである。

我が国でも1990年代から、幾つかのCOEプログラムが始まったが、それらは必ずしも成功したとは言えなかった。それは助成期間が一般に短かったこと、助成を研究費と受け取られたこと、大学を挙げでの支援がなかったことなど、幾つかの理由が考えられる。そこで総合科学技術会議で議論され、いわば究極のCOEプログラムとして文部科学省が実施することになったのが、世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)である。平成19年(2007年)に発足し、私はその初代の委員長を命じられた。

事前に日本の委員が集まって、基本的な方針を決定した。第一に、このプログラムの目標は、世界的にその名が知られ、国際的な頭脳交流の拠点となる組織をつくることであった。当然、そこでは多数の外国人研究者が活動することが求められるし、世界に注目されるような成果を上げねばならない。またプログラム委員も、約半数は外国人学者を入れることとした。第二に、政府資金は研究費ではなく、人件費などの拠点形成に使用すること、途中の評価に合格すれば、原則10年支援することとした。第三に、この拠点は従来の日本の組織と異なり、よりフラットで柔軟なものとし、事務機構も改めて、

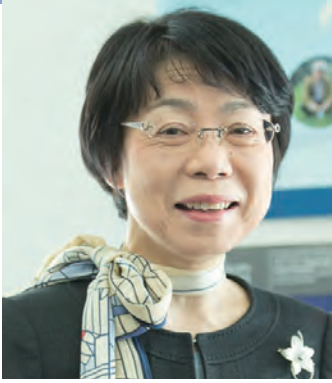


大学改革のモデルとすることを旨とする。第四に、大学長又は研究所長は WPI の運営を支援し、政府支援が終了した後もこの拠点が続けられるよう責任を負うことを求めた。第五に、今後研究が活発となると予想される境界領域、融合領域を、積極的に開拓しようとする提案を重視することとした。これについては後に少し修正され、必ずしも分野融合ではなくても、思い切った先端的研究も支援することとなった。第六にこの WPI プログラムには全体を統括するプログラム・ディレクター (PD) を任命し、選ばれた各拠点にはプログラム・オフィサー (PO) を置いて、毎年拠点を訪問することとした。

最初にこれらの方針を決定しておいたことは、大変良かったと考えている。今までの日本の COE プログラムと異なり、国際的な評価を重視するようになったこと、PD、PO とも熱心に拠点形成を支援し、時には厳しい指摘もしてきたこと、大学などの機関の支援も厚くなり、研究施設の整備も進んだこと、各拠点とも多数の外国人研究者が研究に従事するようになり、その国際的な雰囲気が大学全体に少しずつではあるが影響するようになったことなどが、多くの人々によって評価されるようになった。もちろん COE としては研究業績が最も重要であるが、論文等による客観的な指標も、また外国人委員による評価も非常に高い。その意味で、WPI の最初の 10 年は成功であったとする評価が多いことは、大変嬉しいことである。

しかし、重要なことはこのプログラムの将来である。第一に、10 年の歴史と反省に立って、今後の WPI プログラムの将来構想について議論し、その在り方を決めねばならない。また、新しく募集する WPI センターに何を求めるかも重要な課題となる。更に終了したセンターに対して、今後どのような助言、支援をするのかも決めねばならない。WPI をはじめとする COE の在り方は、今後の我が国の学問のみでなく、冒頭のカーの言葉の裏返しになるが、国家の盛衰にすら関わると言っても言い過ぎではないかもしれない。ここに WPI の 10 年の歩みをまとめた意義もそこにあるのであって、一人でも多くの方に我が国の学問の在り方、COE の役割について考えていただきたいと願っている。

最後にこのプログラムの成功のために尽力されたプログラム委員、PD、PO の各位、大学長、拠点長を始め拠点の方々、文部科学省、日本学術振興会の皆様にお礼を申し上げたい。



## WPI と我が国の研究振興について

小松 弥生

文部科学省 研究振興局長

10年のときを経て、WPIプログラムの各拠点は、国際的にも極めて高い評価を受ける機関へと成長しました。これは、ひとえに、プログラム委員会の井村前委員長、野依現委員長をはじめとする委員の皆さまの大変熱心な御協議と御助言、PDやPOの先生方の献身的なサポート、各拠点長の卓越した研究力とリーダーシップ、ホスト機関の長の継続的な御支援の賜物と、心から感謝申し上げます。

国の支援予定期間である10年目を迎えた今年、今後に向けて、関係者間で活発な議論が行われました。各拠点のすばらしい蓄積を維持し、発展させていくために、ホスト機関に過大な負担がかかるのではないかと、これまでの間に得られた成果をホスト機関内、さらには他の大学や研究開発機関法人に展開していかないと、新たな拠点の設置についてどう考えるのか、そして、最終的には日本にWPI拠点は幾つ必要なのか、等々です。

国の支援が終了する拠点については、幸いそれぞれのホスト機関が、きちんと位置づけて保持していく決意を示してくださいました。国としてもできる限りサポートいたしますが、大学や法人内全体にこの貴重な成果を普及していく御努力にも期待しているところです。国におきましては、各拠点が蓄積してきた経験を日本全体の共通の財産として、他の機関も活用できる環境を整える取組を始める予定です。

同じ10年の間に、日本の大学全体の国際的な地位、科学技術・学術研究の環境は、相対的に低下したと指摘されています。このことは、間違いなく我が国の将来に対する危機です。是非ともWPIの成果を発展させ、この状況を克服しなければなりません。

新たな拠点については、2拠点ではありますが、予算要求に盛り込むことができました。最終的に目指す拠点数に関しては、プログラム委員会などにおいて更に御議論いただく必要がありますが、次のステージに向けて一歩踏み出すことができつつあると思います。

WPIプログラムは、自然科学分野の基礎研究を対象とするものです。人工知能の例を見てもわかるように、科学技術そのものが社会の仕組みと複雑に絡み合う時代になってきています。もちろん、これまでも意識されてきたことは存じますが、基礎研究も現代社会の発展とどのように関係するかという視点を大切にいただければありがたいです。

文部科学省は、WPIプログラムの更なる発展を通じて、日本の学術・科学技術研究の水準や大学、研究機関の国際的な地位の向上を目指してまいります。これまで本プログラムを支え、育ててくださった関係の方々に改めて感謝申し上げるとともに、今後も本プログラムの発展と展開にお力添えいただきますようお願い申し上げます。



## 優れた知の創造プログラムとしての WPI プログラム

安西 祐一郎

独立行政法人日本学術振興会 理事長

優れた知は、人文学、社会科学から自然科学までのすべての研究者の絶え間のない独創的かつ先端的な研究活動から創造され、人類社会の発展に貢献してきました。この優れた知を生み出す研究者の研究活動は、真理の探究はもちろんのこと、我が国を取り巻く複雑かつ多様な課題に人類が立ち向かうための解決や足がかりを社会に与えるなど、日々その重要性を増しております。

日本学術振興会は、第3期中期計画の基盤となる4本の柱の一つとして、「世界レベルの多様な知の創造」という項目を掲げ、学術研究を支援する我が国唯一の資金配分機関として、世界レベルの学術システムの中で多様な知を創造する研究を推進しております。WPI プログラムはこの柱の一部であり、本会は、WPI 事業発足当時から文部科学省と二人三脚で本事業における各拠点の審査及び評価を担ってまいりました。

通常の事業では、比較的規模が大きく長期に実施する研究の場合、開始から数年後に中間評価、終了年度に最終年度評価などを実施するものです。しかし、WPI 事業の審査及び評価は、世界トップレベルの研究拠点形成を目指す観点から、中間評価や最終年度評価のみならず、毎年度のプログラム・ディレクター（PD）、各拠点に配置したプログラム・オフィサー（PO）及びワーキンググループメンバーによる現地視察及びプログラム委員会による科学的見地のみならず融合性、国際性、研究組織改革の見地からの評価による改善が行われ、PDCA サイクルをより丁寧に実施してきたことに特徴があります。

毎年の評価やアドバイスのために貴重な時間を割いてくださってきたプログラム委員会委員、PD、PO、ワーキンググループの各メンバーの多大なご協力、そして何よりも各 WPI 拠点の拠点長及びその所属機関長をはじめとする研究者、研究支援者及び事務担当者等の関係各位の根気強い努力と日々変わる世界の科学情勢への柔軟な対応やアウトリーチの取組により、WPI 拠点はそれぞれが目標を達成し、その研究活動等の波及効果も数々得られていることは称賛に値すべき大きな成果です。

10年一昔と言いますが、WPI プログラム開始から10年たった今、WPIは「昔のもの」どころか、むしろ、学術研究の現代的要請である「挑戦性、総合性、融合性、国際性」に挑み成果を上げている優れた研究組織の事例と言えるのではないのでしょうか。日本学術振興会としても、各 WPI 拠点が更に輝きを増すよう、またこの事例による効果を全国に波及させることができるよう、取り組み続ける所存です。今後もこのような優れた知の創造を支える学術研究活動に御理解と御支援を賜りますよう、お願い申し上げます。





## 世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI) 立案の経緯等について

生川 浩史

内閣府官房審議官（科学技術・イノベーション担当）  
（文部科学省科学技術・学術政策局計画官（WPI立案当時））

世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）を構想することとなったそもそもの発端は、第3期科学技術基本計画（平成18年（2006年）4月～平成23年（2011年）3月）において、「世界トップクラスの研究拠点を国内に30程度形成」という目標が盛り込まれたことであったと理解している。その後、第3期科学技術基本計画の実施の検討の過程で、総合科学技術会議（現 総合科学技術・イノベーション会議）から文部科学省にその具体化の検討が要請された。

文部科学省の中では、在米日本大使館の科学技術担当参事官から帰任し、科学技術・学術政策局の計画官に着任したばかりだった私が、本件プログラムの構想具体化を担当するよう、当時の科学技術・学術政策局長より指示を受けた。

その際、私が最初に行ったのは、総合科学技術会議の常勤議員を中心とした関係者の方々のお考えをお聞きすることであった。日本の科学技術を一段高いところに引き上げていくためには、世界に冠たる研究拠点を国内に作る必要があるとの強い政策意図は共有されていたが、具体的な方策やイメージについては様々な考え方があったと記憶している。

一方、文部科学省においては、当時、既に「21世紀COE」「スーパーCOE」「先端融合領域イノベーション創出拠点形成プログラム」等の様々な拠点プログラムを実施していたこともあり、率直に言って、少なくとも当初段階においては、新たな拠点プログラムを立ち上げることにあまり積極的ではない雰囲気があった。その後議論が進むにつれて、何らかの拠点プログラムを立ち上げるのであれば、今までとは内容の大きく異なる、思い切った、インパクトの強いプログラムとするべき、との議論が形成されてきたように記憶している。

このような状況も踏まえつつ、総合科学技術会議議員を含む数多くの有識者の方々と、仮に拠点プロ

グラムを始める場合、どのようなものを目指すべきか、更に突っ込んだ意見交換をさせていただいた。その中には、元京都大学総長で、総合科学技術会議の議員も務められた井村裕夫先生、理化学研究所の理事長をされていた野依良治先生、元高エネルギー加速器研究機構長の故戸塚洋二先生等が含まれていた。非常に熱心に議論に応じていただいたことに心より感謝申し上げたい。

これら有識者の方々と意見交換する過程で、「世界から目に見える拠点（globally visible research center）」「国際頭脳循環（international brain circulation）のハブとなる拠点」の形成を目指すべきこと、そのためには、世界の優秀な研究者たちが、是非そこで研究したいと思うような、「高い研究水準」と「優れた国際スタンダードの研究環境」を整備する必要がある、特に「高い研究水準」に関しては、世界のその分野のトップレベルの研究者たちが、あの人と一緒に研究してみたいと思うような優れた研究者の「クリティカル・マス」を形成することが必須であること、等のプログラムの骨格が形成されていった。また、対象領域をどのように設定するかについては、様々な議論があったが、卓越した成果や新たなサイエンスの創出を目指すのであれば分野融合を促進していくべきではないかといった意見や、思い切ったシステム改革を断行するためには既存の分野の枠組みにとらわれない分野設定とした方が実現しやすいのではないかとの観点等から、「融合領域」を基本とする方向で検討を進めていった。

これらの議論の背景にあったのは、例えば米国を見たときに、その科学技術水準が極めて高いのは誰の目から見ても明らかであるが、これは単に米国人が優れているからということだけではなく、世界中の優れた研究者・学生が是非米国で研究・勉強をしたいということで集まってきていることが大きな要因となっているとの認識の下、日本もこのような国



と伍して国際競争を勝ち抜いていくためには、世界から優秀な研究者が日本に集まってくるような環境を作らなければならない、という強い思い、危機感であったと理解している。

このような背景で検討が進められていった本プログラムは、したがって、研究費を助成するためのプログラムとはなっていない。むしろ、研究費自体はその拠点に集まってくる優秀な研究者が競争的資金等によって別途獲得してくることを前提に、「高い研究水準（優れた研究者のクリティカル・マス）」と「優れた国際スタンダードの研究環境」を実現するために補助金を使ってもらう構造となっている。

WPIの下での拠点形成の基本的な考え方は、大学、国立研究開発法人等のホスト機関の中で、まずはそれぞれが得意とする分野のコアとなる研究者を集結させ、それに国外を含むホスト機関外から優秀な研究者を招へいすることにより、クリティカル・マスと言い得るレベルと規模を備えた研究者グループを形成、加えて、拠点内での公用語を英語とするなどの国際水準の研究環境の整備を図ることにより、世界トップレベルの研究拠点を作ろうとするものであった。

また、外国の優れた研究者を日本に来てもらうようにするためには、学齢期の子供の教育問題や配偶者の就職問題、住居や病院等様々な社会システムに関わる課題にも丁寧に対応することが必要であり、そのための様々な手当や拠点事務局スタッフによる支援等、幅広い費目に補助金を使用することができるよう、このプログラムの予算化に当たって財務省等との調整を行った。

このプログラムでは、各拠点及びホスト機関に、従来の慣習とは大きく異なる、かなり大胆なシステム改革を求めることになる。このため、通常とは異なる強力なトップダウン型のプログラムの運営方式を導入することとしたのも、本プログラムの大きな特徴の1つである。

そのひとつとして、強力なプログラム委員会を組織し、拠点の選定や事後評価のみならず、毎年のフォローアップを行うことによって通常では実現困難であったであろうシステム改革の着実な実施を各拠点やホスト機関に促すこととした。委員長には、剛腕で知られた井村先生に就任いただき、他の委員にも錚々たるメンバーにお引き受けいただいた。全部で15名のプログラム委員の4割程度は外国人とし、

元米国 NSF 長官、CERN 所長、欧州科学財団 (ESF) 総裁、シンガポール科学技術研究庁 (ASTAR) 長官等に個別に依頼し参画を頂いた。

また、当時はまだそれほど浸透していなかった、プログラム・ディレクター (PD)、プログラム・オフィサー (PO) 方式を導入することとし、PD・PO と拠点・ホスト機関が一定の緊張関係を保ちながらも、協力して WPI が目指す拠点作りに努力するシステムを構築した。PD には、当時岐阜大学長を退任された直後の黒木登志夫先生にお願いし、就任を頂いた。PD・PO の皆さんとは、このプログラムをどう進めていくかについて侃々諤々の議論を行いながら、一緒に WPI を育てていただいた。

さらに、このような思い切ったシステム改革を実現するためには、一定の期間が必要であろうという認識から、省内でもかなりの異論があったが、当時他のプログラムで一般的だった5年の支援期間を大幅に延長し、10～15年の支援期間を設定した。補助金の規模も1拠点当たり13.5億円という極めて大きな規模のものとした（予算要求は15億で行ったものの、1割の査定を受けて13.5億となったもの）。規模の検討に当たっては、海外の名立たる研究拠点を徹底的に調査し、その予算や人員規模等を参考に、本プログラムで目指すべき規模感の設定を行った。

このプログラムの構想から、今年で10年を迎える。WPIが国内外から高い評価を得るところまで成長することができたのは、一重に、井村裕夫前委員長、野依良治現委員長をはじめとするプログラム委員の先生方、黒木登志夫先生をはじめとする、プログラム・ディレクター、プログラム・オフィサーの方々の献身的な御尽力のお蔭である。

第1期の10年では、10年前には日本になかった、世界から見ても目に見える国際頭脳循環のハブを国内に形成することに成功した。これから始まる第2期の10年では、そのシステムをより広く国内に浸透させることを目指していくこととなる。

科学技術の世界において一層のグローバル化が進む中で、我が国が国際競争に勝ち抜き、科学技術立国として更に発展していくためには、今まで以上に WPI のようなシステムを国内により広く普及させていくことが求められている。WPI が、今後とも日本の科学技術力の一層の強化に大きく貢献していくことを期待したい。

# 世界トップレベルの研究拠点を作る － WPI プログラムの野心と成功－

プログラム・ディレクター 黒木 登志夫、宇川 彰

我が国の自然科学は、21 世紀に入ってからノーベル賞受賞者が世界 2 位に達するなど、一見順調に進展しているように見える。しかし、現実には、多くのボーダーとバリアが存在しているのも確かである。

WPI プログラムは、学問領域のボーダー、国のボーダー、大学と科学システムのバリアを乗り越え、我が国に「国際的に開かれた、世界から見える (internationally opened, globally visible)」研究拠点を作ることをミッションとして、2007 年度にスタートした。

プログラム開始から 10 年を迎えた今、9 つの WPI 拠点はそれぞれの研究分野において、世界をリードする研究拠点となった。WPI 各拠点の仕事ぶりを紹介する前に、WPI プログラムの目的、制度、歩み、そして将来への展望を概観することにしよう。

## CONTENTS

1. ボーダーとバリアを越えて-----	10
2. WPI プログラムの目的-----	11
3. WPI プログラムの制度-----	11
1) 野心的な WPI プログラム	
2) WPI のミッション	
3) WPI の制度設計	
4) WPI のフォローアップ体制	
4. WPI 拠点-----	17
5. WPI 拠点の評価システム-----	19
1) 厳しい評価	
2) 評価項目と基準	
3) 中間評価	
4) 延長審査	
5) 最終評価	
6. WPI の成果(1)サイエンス-----	20
7. WPI の成果(2)融合研究-----	22
8. WPI の成果(3)国際化-----	23
9. WPI の成果(4)システム改革-----	25
10. WPI 拠点の実績(5)教育-----	26
11. WPI 拠点の実績(6)アウトリーチ活動-----	26
12. WPI の成果(7)社会への貢献-----	27
13. プログラムの将来計画-----	27
14. REI をめぐる世界の動向-----	28
15. 科学技術政策の要としての WPI － まとめて代えて-----	29

### WPI 略語表

COE : Center of Excellence  
JST : 科学技術振興機構(国立研究開発法人)  
PD : Program Director  
PI : Principal Investigator  
PO : Program Officer  
REI : Research Excellence Initiative  
WG : Working Group  
WoS : Web of Science

## 1 ボーダーとバリアを越えて

2015 年の大学世界ランキングに、我々はショックを受けた。大学ランキングの中でも、最も定評のあるタイムズ社のランキングが、我が国の大学の順位を大きく下げたのである。2014 年には、23 位であった東京大学(東大)が 2016 年には 43 位になり、52 位であった京都大学(京大)は 88 位となった。さらにアジアのランキングでも、ベストテンに入っているのは、東大のみ、それも 7 位であった(京大は 11 位)。上位は、シンガポール、中国、香港の大学が占めた。

2015 年、タイムズ・ランキングは、日本の大学が、長期的凋落傾向にある理由として、次のように解説した。

Research depends on the free movement of both ideas and people, and countries that adopt a more closed stance pay the price in the end.

This is a prime cause of the substantial long-term declines in the global position of research in both Japan and Russia.

(研究は、アイデアと人々が自由に動けることに依存している。そのことに積極的でない国は、最後にその代償を払うことになるであろう。日本とロシアが長期的に世界における地位を失っている最大の理由は、この点にある)。

正直、我々は、ここまで世界から厳しい目で見られているとは思っていなかった。21 世紀に入ってから自然科学系ノーベル賞受賞者は、アメリカに次いで 2 位である。それなのに、世界におけるランキングは



落ち続けているのだ。なぜであろうか。

その理由の一つは、タイムズ・ランキングが指摘しているように、我が国の大学が、様々なボーダー、バリアを乗り越えられないでいることにあるのではなかろうか。タイムズ社は、図らずも、日本の大学の弱点を鋭く突いてきたのだ。

WPI プログラムが克服しようとしたのは、まさにこの点である。融合研究、国際化、システム改革をミッションに掲げ、学問のボーダー、国のボーダー、システムのバリアを越えた研究拠点を立ち上げることである。国際的に高く評価されるような研究組織を作るには、研究費をつぎ込むだけでは不十分なのだ。

ボーダーとバリアを乗り越えることにより、我が国の科学は、将来に向かって力強く走り続けることができるであろう。WPI の 10 年の経験は、それが可能であることを示している。

## 2 WPI プログラムの目的

WPI プログラムは、ボーダーとバリアを越えて我が国の研究を発展させることを目的にしている。発足時(2007 年度)の公募要領には、WPI プログラムの目的について、次のように力強く記載されている。

「我が国の科学技術水準を向上させ、将来の発展の原動力であるイノベーションを連続的に起こしていくためには、その出発点である我が国の基礎研究機能を格段に高め、国際競争力を強化していく必要がある。そのためには、世界トップレベルの研究拠点を、従来の発想にとらわれることなく構築し、世界の頭脳が集い、優れた研究成果を生み出すとともに、優秀な人材を育む『場』を我が国に作っていく必要がある。」

「このような観点から、高いレベルの研究者を中核とした世界トップレベルの拠点形成を目指す構想に対し集中的な支援を行い、システム改革の導入等の自主的な取組を促すことにより、研究水準の一層の向上を図るとともに、第一線の研究者が是非そこで研究したいとして世界から多数集まってくるような優れた研究環境と極めて高い研究水準を誇る『目に見える拠点』の形成を目指す。」

実際、この野心的な目的に沿って、WPI プログラムは進められてきた。それから 10 年、WPI 拠点は期待に応える成果をあげることができた。

## 3 WPI プログラムの制度

### 1) 野心的な WPI プログラム

WPI プログラムは、これまでの文部科学省(文科省)の事業の中では最も野心的なものの一つであるといってもよいであろう。その英語名 World Premier International Research Center Initiative が示すように、日本に世界トップレベルの研究拠点をすることを目的にしている。WPI プログラムを立ち上げるに当たっての政府内、関係者間の熱気ある討論の様子は、井村裕夫前プログラム委員会委員長、生川浩史科学技術・学術政策局計画官(当時、現内閣府官房審議官)が本書に寄稿されている。

大学は、非常に民主的な組織である。研究者の考えは尊重され、少数意見が大事にされる。それは、学問が発展していくためには必要なことであるが、時にはそれが改革の障害になり、大学が社会から取り残されてしまいかねない。システムを変えていくためには、それまでの教授会指導型、コンセンサス重視型の運営から、志をもった強力なリーダーシップに任せなければならないときがある。

しかし、このような研究環境を作るのは決して容易ではない。まず、日本の閉鎖的な大学のシステムを変えなければならない。研究者だけではなく、事務に携わる人たちの考え方も変えなければならない。英語を使って研究をし、外国人研究者を支援するようなシステムを立ち上げなければならない。

そのような「改革」のためには、大学内に「特区」のような区域を作るのも一つの方法である。「特区」の経験を生かし、それを全学に広げていこうという考えだ。WPI プログラムは、単に世界のトップとして誇れるような研究を行うだけではなく、それによって、我が国の研究システムと大学の在り方を変えようという目的も秘めていた。その意味で、WPI プログラムは、野心的なプログラムであったといえるであろう。

### 2) WPI のミッション

WPI の「野心」(=ミッション)は、次の 4 つにまとめることができる(図 1)。

1. 世界トップレベルの研究
2. 融合研究
3. 国際化
4. システム改革

この4項目のミッションは、いわば、WPIプログラムの旗印といってもよい。WPIを人々に説明するとき、拠点を評価するときなど、あらゆる場面で強調されてきた。実際、毎年サイトビジット、そして中間評価、延長審査、最終評価は、4項目のミッション一つ一つについて行われている。WPIが目的通りの成果をあげることができたのは、ミッションを明らかにし、その実行を拠点側に求め、フォローアップの際の評価指標としたことにあると自負している。これらの項目のそれぞれについては、セッション6-9(20-26ページ)に詳述する。

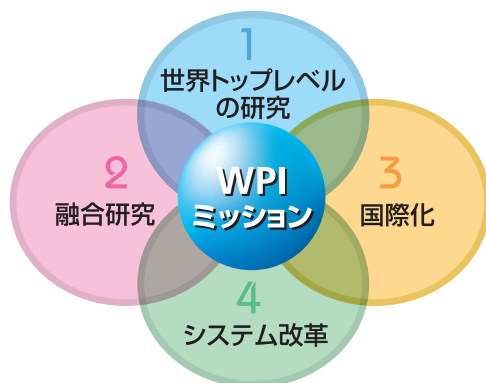


図1 WPIの4つのミッション

### 3) WPIの制度設計

前述の明確な理念を実現するため、WPIの制度は、これまでの政策と異なり、野心的かつ挑戦的な制度となった。

**WPI 予算：**世界的な研究拠点にするためには、それに見合うだけの大型予算が必要である。2007年度及び2010年度に採択された6拠点を補助額は1拠点あたり、年間13-14億円。これまでにない大型の予算である。2012年度に採択された3拠点は、WPI Focusというコンセプトの下、先行する拠点形成事業を引き継ぐと同時に、研究領域の焦点をしぼることにより拠点あたりの補助額は、従来の拠点半分(あるいはそれ以下)となった。

WPIプログラム全体の総予算は、2016年度は94.4億円である。

**施設建設予算：**WPI研究拠点には、補正予算によって各拠点に20億円の施設建設補助費が採択後に交付された。これにより、各拠点は、斬新な考えで建物を建設し、一つ屋根の下 (under one roof) で研究するこ

とが可能になった。それぞれの建物の写真は、拠点説明ページに掲載されている。

**研究費：**WPI補助金は基本的に研究拠点を上げるための予算である。このため、WPI補助金は研究費に使用することができない。実際、WPI補助金の約60%は、研究者、ポスドク、研究支援者雇用などの人件費に充てられている。例外的に認められている研究費は、新しい研究者を雇用した際のスタートアップ費用、WPIのミッションである融合研究を推進するための予算などである。このため、WPI拠点の研究者は、それぞれ外部資金の獲得によって研究を進めている。実際、WPI拠点の外部資金の獲得実績は大きい。

WPI拠点は、公的研究資金以外の外部資金の獲得という点でも注目されている。

- ・ IPMU (東大) は、主として数物系の基礎研究を支援するKavli財団(アメリカ)から基金を受け、2012年以降、Kavli IPMUとなった。Kavliの冠名がつくことにより、IPMUの国際認知度はさらに上がった。
- ・ ELSI (東京工業大学(東工大)) は、John Templeton財団(アメリカ)から研究費を受け、国際的な共同研究に活用している(2015年)。
- ・ IReC (大阪大学) は、WPI補助金と同様に運用できる外部資金として、2017年度から中外製薬株式会社と年10億円、10年間の包括連携の契約を結んだ。

これらの事例は、WPIが世界の研究コミュニティ及び企業から高く評価されていることを示すものである。日本の大学の中では例外的な存在である。

**支援期間：**世界トップレベルの研究拠点にするためには、長期間にわたって安定して支援する必要がある。このため、WPIは基本的に10年間を支援期間としている。10年の長期支援が保証されていたからこそ、従来は不可能であったようなチャレンジングな研究が可能になったといえる。

特に優れた研究拠点には、更に5年間の延長も可能であるとした。世界のリサーチ・エクセレンス・イニシアティブ (Research Excellence Initiative: REI。後述、セッション14) の中でも、10年+5年という取組は、他に例を見ない長期間の支援である。5年延長のための審査については、20ページに記載した。



**研究対象**：発足時の公募要領には、次のように記載されている。

「世界トップレベルの研究者グループが存在する基礎研究分野（基礎から応用への展開を目指す分野を含む）で、原則として複数の分野にまたがる融合領域を対象とする。」

応用よりも基礎研究に重点を置き、分野の融合を目指すという点でも、WPI プログラムはユニークな REI である。なお、2010 年度の公募において、グリーン・イノベーションが研究領域として指定され、応用研究の観点から選考が行われた（18 ページ）。

WPI は、原則として、応用研究、イノベーションを直接の研究対象とはしていないが、結果として応用に道を拓き、産業界に貢献するような研究が生まれれば、それを誇りに思い、歓迎している。実際、そのような研究成果も輩出しており、セッションを改めて紹介する（セッション 12、27 ページ）。

**拠点長**：WPI は、特に拠点長の人選を重要視している。拠点を世界にアピールし、優秀な研究者を招へいするためには、拠点長は国際的に「顔」の見える、実績ある研究者でなければならない。

さらに、拠点長には研究と拠点運営について強力なリーダーシップが求められている。このため、拠点長の途中交代は、重要な事項としてプログラム委員会で討論される。これまで AIMR と iCeMS の 2 拠点で、拠点長が途中交代している（18 ページ）。

**数値目標**：国際的な世界トップレベルの研究拠点であるためには、層の厚い研究者構成が必須である（critical mass）。WPI 拠点は、次のような数値目標が公募要領に示されている。

- ・ 20 名以上の世界トップレベルの主任研究者（Principal Investigator : PI）
- ・ PI、若手研究者、ポスドクを含め、総計100名以上の研究者
- ・ 研究者、事務及び研究支援者を含め総勢200名以上

ただし、2012 年採択の WPI Focus では、これらの数値の約 1/2 を目標値とした。

国際的な研究拠点であるためには、一定数以上の外国籍（あるいは外国研究機関所属）の研究者の存在が必須である。目標としては、次の数値を挙げている。

- ・ PI の 20%以上が外国籍
- ・ 総研究者の 30%以上が外国籍
- ・ ポスドクは国際公募する

後述するように（23 ページ）、これらの数値目標は、ほとんどの拠点で達成している。

**英語による運営**：国際的な研究拠点であることの一つの条件は、英語を拠点内の公用語とすることである。プログラム委員会、サイトビジットなどの重要な会議と、会議に提出される資料、報告書はすべて英語である。拠点内の会議だけでなく、日常的な会話でも、もし一人でも日本語が得意でない人がいたら、英語に切り替えられる。大事なのは、国籍を問わず、拠点内のすべての人に対して、言語によるバリアを越えた透明性のある運営を行うことである。

このためには、研究者だけではなく、事務担当者を含めたすべてのスタッフが英語に通じていなくてはならない。実際、WPI の 9 拠点は、英語で問題なく運用されている。これは、これまでの日本の大学にはなかった取組である。英語の訓練を受けた事務職員の一部は学内外へ転出し、その経験を広めている。

**ホスト機関による持続維持**：WPI でもっとも特徴的なことの一つは、ホスト機関が自らの努力により、政府による支援終了後も WPI 拠点を持続維持する責任を明確にしたことである。公募要領には、次のように書かれている。

「ホスト機関は、当該拠点をホスト機関の中長期的な計画上に明確に位置づけた上で機関を挙げて全面的な支援を行う。」・・・「[拠点構想] は、当該補助金による取組だけでなく、拠点、ホスト機関及び連携機関の独自の取組や実施期間終了後の取組を含めた、総合的かつ長期的な構想として策定することとする。」

これは、それまでの拠点形成型の研究推進事業が、終了後、形の上ではほとんど何も残らなかったという反省による。

ホスト機関による支援と持続維持については、毎年度のプログラム委員会において、ホスト機関長にくり返し確認した。事実、2016 年度で WPI プログラムによる予算的支援が終了する 4 拠点のホスト機関は、いずれも数億円規模の自己資金により、施設維持費、スタッフ人件費などを保証し、拠点を維持することを約束している。

#### 4) WPIのフォローアップ体制

WPIは、これまでにないような強力なフォローアップ体制をとっている。フォローアップ体制がしっかりしていたからこそ、WPI 拠点は、世界的な科学的成果をあげ、そのミッションを遂行することができたといってもよいであろう。

フォローアップは、次の4層の委員による2段階の審査会議によって行われている。

#### 4層の委員：

- ・ プログラム委員 (右欄参照)
- ・ プログラム・ディレクター  
(Program Director : PD) (16 ページ参照)
- ・ プログラム・オフィサー  
(Program Officer : PO。正式には「拠点作業部会主査」) (16 ページ参照)
- ・ ワーキンググループ委員  
(Working Group : WG。正式には「拠点作業部会」)  
(16 ページ参照)

#### 2段階の審査会議：

- ・ プログラム委員会
- ・ サイトビジット (site visit。拠点訪問調査)

**プログラム委員：**プログラム委員会は、WPI 制度を検討し、拠点を選考し、評価する。発足時のプログラム委員会は、科学技術政策に優れた見識を有する 15 名の委員で構成され、アメリカ、イギリス、フランス、シンガポールから 6 名が外国人委員として参加した。初代委員長には井村裕夫博士 (元京大総長) が就任した。

2016 年度からは、野依良治博士 (現国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST)・研究開発戦略センター長) が委員長に就任している。2016 年度からは、一部の委員が交代し、19 名 (うち外国人委員は 7 名) となった。

プログラム委員会は、年に 1 回開催され、拠点の評価を行う。ホスト機関長及び拠点長の発表の後、拠点担当の PO がサイトビジット (次項) の報告を行う。新規拠点を公募する年度には、その選考を行う。開催期間は通常 2 日間である。さらに、年に 1-2 回、国内委員によるプログラム委員会を開催し、問題点を議論している (図 2)。

**サイトビジット：**各拠点は、年 1 回のサイトビジット

#### プログラム委員一覧・歴代プログラム委員

### 世界のリーダーを集めた WPI国際プログラム委員会

#### ■ 2016年度に就任いただいている委員



野依 良治 (委員長)  
Dr. Ryoji NOYORI  
国立研究開発法人科学技術振興機構  
研究開発戦略センター長  
元独立行政法人理化学研究所理事長  
ノーベル化学賞受賞 (2001)  
専門分野：有機化学  
2007年度 -



リタ・コーウェル  
Dr. Rita COLWELL  
(米国)  
メリーランド大学名誉教授  
元米国国立科学財団 (NSF) 長官  
専門分野：微生物学  
2007年度 -



リチャード・ダッシャー  
Dr. Richard B. DASHER  
(米国)  
スタンフォード大学特任教授  
専門分野：言語学  
2007年度 -



ビクター・ヨセフ・ザウ  
Dr. Victor Joseph DZAU  
(米国)  
米国医学研究所所長  
専門分野：分子医科学  
2016年度 -



濱口 道成  
Dr. Michinari HAMAGUCHI  
国立研究開発法人科学技術振興機構  
理事長  
元名古屋大学総長  
専門分野：腫瘍生物学・生化学、  
細胞生物学  
2016年度 -

#### ■ 2007年度～2015年度の間に就任いただいた委員



井村 裕夫 (前委員長)  
Dr. Hiroo IMURA  
京都大学名誉教授・元総長  
元総合科学技術会議議員  
専門分野：ライフサイエンス分野 (内分泌学)  
2007年度 - 2015年度



ロバート・アイマー  
Dr. Robert AYMAR  
(フランス)  
原子力庁 (CEA) 上級顧問  
元欧州合同原子核研究所 (CERN) 所長  
専門分野：プラズマ物理学  
2007年度 - 2015年度



イアン・ハリデイ  
Prof. Ian G. HALLIDAY  
(英国)  
エディンバラ大学名誉教授  
元欧州科学財団 (ESF) 総裁  
専門分野：理論素粒子物理学  
2007年度 - 2015年度

※ 2007年度～2015年度の間に就任いただいた委員の役職名は当時の役職です



毎年委員会を開催し、WPIプログラムの方針と実施、新規拠点の選考、進行拠点の評価を行う。  
2017年度からはWPIアカデミーの評価も担当する。



**生駒 俊明**  
Dr. Toshiaki IKOMA  
キヤノン株式会社特別顧問  
産業界出身者  
専門分野：半導体エレクトロニクス  
2007年度 -



**チュアン・ポー・リム**  
Dr. Chuan Poh LIM  
(シンガポール)  
シンガポール科学技術研究庁長官  
専門分野：数学  
2007年度 -



**鈴木 典比古**  
Dr. Norihiko SUZUKI  
公立大学法人国際教養大学  
理事長・学長  
専門分野：国際経営論  
2016年度 -



**石田 寛人**  
Prof. Hiroto ISHIDA  
金沢学院大学名誉学長  
元科学技術事務次官  
元駐チエコ大使  
科学技術庁出身者  
2007年度 -



**松本 紘**  
Dr. Hiroshi MATSUMOTO  
国立研究開発法人理化学研究所  
理事長  
元京都大学総長  
専門分野：宇宙科学、宇宙電波工学  
2016年度 -



**クラウス・フォン・クリッツィング**  
Dr. Klaus von KLITZING  
(ドイツ)  
マックス・プランク研究所部局長  
ノーベル物理学賞受賞(1985)  
専門分野：半導体物理学  
2016年度 -



**川合 真紀**  
Dr. Maki KAWAI  
大学共同利用機関法人自然科学  
研究機構分子科学研究所長  
元独立行政法人理化学研究所理事  
専門分野：表面科学、物理化学  
2016年度 -



**永井 良三**  
Dr. Ryozao NAGAI  
自治医科大学学長  
元東京大学医学部附属病院病院長  
専門分野：内科学  
2014年度 -



**ハリエット・ウォールバーク**  
Dr. Harriet WALLBERG  
(スウェーデン)  
元カロリンスカ大学学長  
専門分野：生理学  
2016年度 -



**小林 誠**  
Dr. Makoto KOBAYASHI  
大学共同利用機関法人高エネルギー  
加速器研究機構特別栄誉教授  
ノーベル物理学賞受賞(2008)  
専門分野：素粒子理論  
2008年度 -



**中村 道治**  
Dr. Michiharu NAKAMURA  
国立研究開発法人科学技術振興機構  
顧問 特別主監  
元独立行政法人科学技術振興機構理事長  
元日立製作所株式会社副社長  
産業界出身者  
専門分野：材料分野  
2012年度 -



**ジャン・ジン・ジュスタン**  
Dr. Jean ZINN-JUSTIN  
(フランス)  
フランス宇宙基礎科学研究所  
学術顧問  
専門分野：理論物理学  
2016年度 -



**黒川 清**  
Dr. Kiyoshi KUROKAWA  
政策研究大学院大学客員教授  
元日本学術会議会長  
元内閣特別顧問  
専門分野：内科学  
2007年度 -



**大垣 眞一郎**  
Dr. Shinichiro OHGAKI  
公益財団法人水道技術研究センター理事長  
元独立行政法人国立環境研究所理事長  
元東京大学工学系研究科長・工学部長  
専門分野：環境エネルギー分野(環境工学)  
2012年度 -



**原山 優子**  
Dr. Yuko HARAYAMA  
経済協力開発機構(OECD)  
科学技術産業局次長  
専門分野：科学技術  
イノベーション政策分析  
2012年度



**小林 陽太郎**  
Mr. Yotaro KOBAYASHI  
富士ゼロックス株式会社  
元代表取締役会長  
同社相談役最高顧問  
元経済同友会代表幹事  
産業界出身者  
2007年度-2011年度



**末松 安晴**  
Dr. Yasuharu SUEMATSU  
東京工業大学栄誉教授・元学長  
元大学共同利用機関法人情報・シス  
テム研究機構国立情報学研究所長  
専門分野：情報分野(光通信工学)  
2007年度-2011年度



**飯吉 厚夫**  
Dr. Atsuo IIOYOSHI  
学校法人中部大学理事長・総長  
元核融合科学研究所長  
専門分野：プラズマ理工学、  
核融合科学  
2007年度-2011年度



**マシュー・メイソン**  
Dr. Matthew T. MASON  
(米国)  
カーネギーメロン大学  
ロボティクス研究所教授  
専門分野：ロボット工学  
2007年度-2014年度



**竹市 雅俊**  
Dr. Masatoshi TAKEICHI  
独立行政法人理化学研究所  
発生・再生科学総合研究センター  
センター長  
専門分野：ライフサイエンス分野  
(発生生物学、細胞生物学)  
2012年度-2014年度



**木村 孟**  
Dr. Tsutomu KIMURA  
独立行政法人大学評価・学位授与  
機構顧問  
東京都教育委員会委員長  
元東京工業大学学長  
専門分野：地盤工学、土質工学  
2008年度-2015年度



**宮原 秀夫**  
Dr. Hideo MIYAHARA  
元独立行政法人情報通信研究機構  
理事長  
大阪大学名誉教授・元総長  
専門分野：情報分野  
2012年度



**戸塚 洋二**  
Dr. Yoji TOTSUKA  
独立行政法人日本学術振興会  
学術システム研究センター所長  
元高エネルギー加速器研究機構長  
専門分野：高エネルギー物理学  
2007年度-2008年度



を受ける（設立6年目、9年目を除く）（図3）。サイトビジット・チームは、PD、PO、WG、文科省、日本学術振興会（学振）の関係者によって構成される。プログラム委員もオブザーバーとして参加できる。

サイトビジットは、2日間にわたる。1日目には、ホスト機関長と拠点長の報告につづいて、PIの報告、若手研究者のポスター発表などが行われる。2日目には、施設見学、将来計画及び全体討論が行われる。使用言語は、プログラム委員会、サイトビジットともに、すべて英語である。

評価の視点は、後述するように（セッション5）、4つのWPI拠点ミッションの実行である。なかでも、科学の水準が最重要項目である。PD、PO、WG委員

のコメント（1日目夜に作成）を基にPOがサイトビジット・レポート（英文3ページ）をまとめ、プログラム委員会に提出する。

**PD**：WPIの一つの特徴は、PD、PO制度を導入し、実際に運営の中心として機能したことであろう。

PDには、2008年から黒木登志夫博士（当時岐阜大学学長、現日本学術振興会学術システム研究センター顧問）が就任した。2013年には、宇川彰博士（当時筑波大学（筑波大）副学長・理事、現理化学研究所計算科学研究機構副機構長）が、PD代理として着任した。

PDは、文科省及びプログラム委員会と拠点間のイ

プログラム・ディレクター (PD)  
プログラム・オフィサー (PO)  
ワーキンググループ (WG)



**PD**  
**黒木 登志夫** (2007年度-)  
日本学術振興会  
学術システム研究センター顧問  
元岐阜大学学長  
東京大学名誉教授  
専門分野：細胞生物学



**PD代理**  
**宇川 彰** (2013年度-)  
理化学研究所  
計算科学研究機構副機構長  
元筑波大学副学長・理事  
(企画評価・情報担当)  
専門分野：素粒子物理学

プログラム・ディレクター(PD) 1名とプログラム・オフィサー(PO) (各拠点に対し1名=計9名)が置かれている。2013年度からはPD代理(1名)が追加された。各拠点を担当するPOを主査として、当該拠点が対象とする分野の専門家5～6名程度で構成されるワーキンググループ(WG)をプログラム委員会の下に設置している。WG委員のうち、原則として半数程度は外国人が選ばれている。

※歴代POの役職名は当時の役職です



**PO長田 義仁**  
(2007年度-)  
理化学研究所客員主管研究員  
元北海道大学理事・副学長  
専門分野：高分子化学、  
生体関連化学、高分子材料

**WG 現委員**

城田 靖彦 Samuel M. Allen  
細野 秀雄 Sir, Colin Humphreys  
山口 智彦 Samuel I. Stupp  
吉田 豊信

**歴代委員**

北川 宏  
Suresh Subra



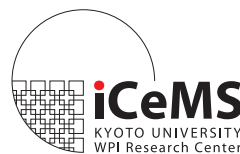
**PO三田 一郎**  
(2007年度-)  
神奈川県立産業技術総合研究所  
名古屋大学名誉教授  
専門分野：素粒子物理学、  
宇宙物理、光学赤外線天文学、  
相対論・重力、可積分系

**WG 現委員**

中島 啓 Matthias Staudacher  
細谷 裕 Ian Shipsey  
三輪 哲二 Anthony Tyson

**歴代委員**

広中 平祐  
川合 光  
John Peacock  
Tuneyoshi Kamae



**PO仲野 徹**  
(2012年度-)  
大阪大学大学院生命機能  
研究科・医学系研究科教授  
専門分野：幹細胞学

**WG 現委員**

片岡 一則 須田 年生  
相賀 裕美子 Alexander V.Kabanov  
片山 佳樹 Paavo Kinnunen

**歴代委員**

高橋 淑子 仲野 徹  
田中 求 Sheng Ding  
美宅 成樹 Leonard H. Rome  
大和 雅之 George Daley



**歴代PO 須田 年生**  
(2007年度-2011年度)  
慶應義塾大学医学部教授  
専門分野：発生・分化生物学



ンターフェイスとして、研究者の立場から、両者に助言する役割を担う。

**PO:** 各拠点の専門分野の研究者を PO として配置した。PO は、各拠点の科学上の問題に助言するとともに、年に 1 回行われるサイトビジットを主導し、サイトビジット・レポートをまとめ、プログラム委員会に報告する。また、プログラム委員会後に、PD とともに、拠点を訪問し、プログラム委員会の議論内容を伝える。拠点毎の PO を下欄に示した。

**WG:** 各拠点の研究成果は、ノーベル賞受賞者を含む当該分野の第一線の研究者によるピア・レビュー(peer

review) によって評価される。このための WG は、原則として 6 名で構成され、うち 3 名は海外の研究者である。WG 委員は、サイトビジットに参加し、拠点の研究成果とその方向について助言する。その意見は、PO により、サイトビジット・レポートとしてまとめられる。WG 委員を拠点毎に下欄に示した。

## 4 WPI 拠点

2016 年度現在、WPI プログラムには、次に記す 9 拠点がある。それぞれについては、30 ページ以降に詳細に記されているが、ここではそれらの概略を紹介する。

**WPI Osaka University**  
**iFReC**



**PO 菅月 健彦**  
(2007 年度 -)  
九州大学高等研究院特別主幹教授  
元国立国際医療センター総長  
専門分野: 免疫遺伝学

**WG 現委員**

清野 宏	Günter J. Hämmerling	小安 重夫	湊 長博
山本 一彦	Hisataka Kobayashi	松島 綱治	Diane Mathis
	Philippe Kourilsky	河西 春郎	

**歴代委員**

**IIIS**  
INTERNATIONAL INSTITUTE FOR INTEGRATIVE SLEEP MEDICINE



**PO 貝淵 弘三**  
(2012 年度 -)  
名古屋大学医学系研究科教授  
専門分野: 細胞生物学

**WG 現委員**

内匠 透	大隅 典子	Thomas Kilduff
尾崎 紀夫	Richard Neubig	Emmanuel Mignot

**MANA**  
Nano Revolution for the Future



**PO 齋藤 軍治**  
(2007 年度 -)  
名城大学農学部教授  
専門分野: 機能性有機分子物質の開発

**WG 現委員**

青柳 克信	松永 是	David L. Allara
石黒 武彦	吉田 博	Klaus von Klitzing

**ERBSIO**  
EARTH-LIFE SCIENCE INSTITUTE  
TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY




**PO 観山 正見**  
(2012 年度 -)  
広島大学学長室特任教授  
元国立天文台台長  
専門分野: 理論天文学

**WG 現委員**

山本 智	長谷部 光泰	Antonio Lazcano
川上 紳一	Edwin Turner	George D. Cody

**I<sup>2</sup>CNER**




**PO 堂免 一成**  
(2014 年 11 月 -)  
東京大学大学院工学系研究科教授  
専門分野: 触媒化学、エネルギー変換型光触媒

**WG 現委員**

江口 浩一	Ellen Ivers-Tiffée
平井 秀一郎	Dimos Poulikakos
鹿園 直毅	David L. Greene

**歴代委員**

堂免 一成	歴代 PO 笠木 伸英
Scott Samuelsen	(2010 年度 - 2014 年 10 月)
	科学技術振興機構研究開発戦略センター上席フェロー
	専門分野: エネルギーシステム工学



**ITbM**  
Nagoya University



**PO 吉田 稔**  
(2015 年 7 月 -)  
理化学研究所主任研究員  
専門分野: 化学遺伝学

**WG 現委員**

青山 安宏	Wilhelm Grisssem
西村 いくこ	Jonathan L. Sessler
菅 裕明	Ben Shen

**歴代委員**

吉田 稔	歴代 PO 福田 裕穂
	(2012 年度 - 2015 年 6 月)
	東京大学大学院理学系研究科教授
	専門分野: 植物生理学・植物細胞生物学





図2 プログラム委員会

### 2007年発足拠点

最初の公募には22研究機関から33件の応募があった。書類審査とヒアリング審査の結果、次の5拠点が採択された。

#### AIMR (30 ページ)

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構

拠点長：小谷 元子 (2011年度まで山本 嘉則)

目標：数学の導入により新しい材料科学研究を目指す。

#### Kavli IPMU (38 ページ)

東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構

拠点長：村山 斉

目標：数学と物理学の連携により宇宙の起源と進化の解明を目指す。

#### iCeMS (46 ページ)

京都大学 物質-細胞統合システム拠点

拠点長：北川 進 (2012年末まで中辻 憲夫)

目標：細胞科学と物質科学を統合した学問分野をメゾ領域で創出する。

#### IFReC (54 ページ)

大阪大学 免疫学フロンティア研究センター

拠点長：<sup>あきら</sup>審良 静男

目標：免疫の動的ネットワークをイメージングとインフォマティクスと協働により解明する。

#### MANA (62 ページ)

物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点

拠点長：青野 正和

目標：ナノアーキテクトニクスという新しい概念の基にナノ材料の開発を行う。



図3 サイトビジット (2016年ITbM サイトビジット)

### 2010年発足拠点

2010年度は、グリーン・イノベーションをテーマに公募が行われた。9研究機関から9件の応募があり、書類審査とヒアリングの結果、次の拠点が採択された。

#### PCNER (70 ページ)

九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所

拠点長：ペトロス・ソフロニス

目標：非化石燃料によるエネルギーシステムにより、持続可能な社会の実現に貢献する。

### 2012年発足拠点

2012年度は、研究テーマをしばったWPI Focus 拠点の公募が行われた。13研究機関から15件の応募があり、書類審査とヒアリング審査の結果、次の3拠点が採択された。

#### IIIS (76 ページ)

筑波大学 国際統合睡眠医科学研究機構

拠点長：柳沢 正史

目標：睡眠・覚醒のメカニズムを解明し、睡眠障害及び関連する疾患の改善に貢献する。

#### ELSI (82 ページ)

東京工業大学 地球生命研究所

拠点長：廣瀬 敬

目標：「生命の起源は初期地球環境と不可分である」という考えのもとに、生命と地球の起源を探る。

#### ITbM (88 ページ)

名古屋大学 トランスフォーマティブ生命分子研究所

拠点長：伊丹 健一郎

目標：化学と動植物学の共同研究によって、社会的波及効果の大きい生命分子を創出する。



拠点の構築に際しては、3つの方法がとられた。

- ・ 新たに拠点を立ち上げた (Kavli IPMU、IIS)
- ・ 既存の組織 (附置研究所、学部など) を母体として、拠点を形成した (AIMR、iCeMS、IFReC、PCNER)
- ・ ホスト機関内の関連研究者が中心となって、拠点を形成した (MANA、ELSI、ITbM)

**WPI 拠点の研究分野**：以上の9拠点の研究分野は、大きく「宇宙、地球、生命の起源」「生命科学」「材料/エネルギー工学」の3分野に分類することができる(図4)。

宇宙、地球、生命の起源を研究対象にしているのは、Kavli IPMU と ELSI である。この分野は、広い範囲の人々の知的好奇心を促すことにより、我が国の研究基盤を支えることが期待できる。

生命科学分野では、免疫学 (IFReC)、細胞生物学と材料科学 (iCeMS)、睡眠研究 (IIS)、化学と動物学・植物学 (ITbM) が取り上げられている。それぞれの分野の基礎研究を掘り下げることにより、応用研究への発展を目指す。

材料/エネルギー工学はもともと我が国の得意とする研究分野である。その流れをくむ AIMR と MANA が、新しい戦略で有用な材料創出のための基礎研究を進めている。PCNER は、現代社会の喫緊の課題であるエネルギー問題に取り組み、大気中の二酸化炭素濃度の均衡した社会を目指す。iCeMS と ITbM は、材料科学と生命科学の両領域にまたがる研究テーマを設定している。

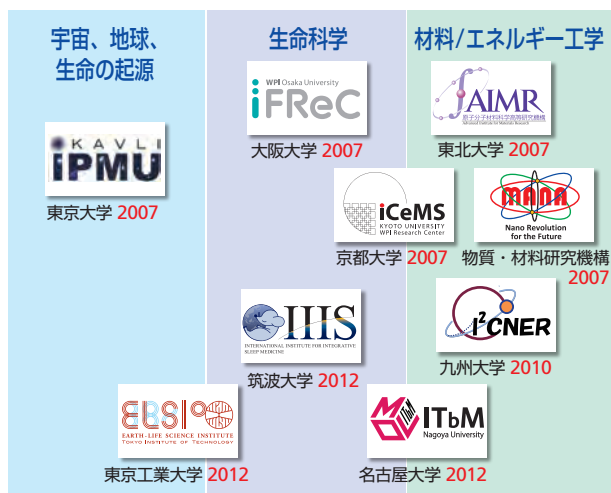


図4 WPI 9 拠点の研究分野。それらは、「宇宙、地球、生命の起源」、「生命科学」、「材料/エネルギー工学」の3分野に大きく分けることができる。ELSI、iCeMS、ITbMの3拠点は複数領域にまたがる研究テーマを設定している。

## 5 WPI 拠点の評価システム

### 1) 厳しい評価

WPI 拠点は、強力なフォローアップ体制(14 ページ)によって、厳しい評価を受ける。評価は、サイトビジットとプログラム委員会の2段階で行われる。最終的な評価は、サイトビジット・レポート、PD、PO のコメント、プログラム委員会における拠点長及びホスト機関長の発表に基づいて、プログラム委員会が行う。評価結果は、WPI プログラムのウェブサイト(学振及び文科省)において公表される。

毎年のサイトビジット及びプログラム委員会による評価に加えて、5年目には「中間評価」が、また10年後の延長を申請する場合は8年目に「延長審査」が、最終年度には「最終評価」が行われる。

### 2) 評価項目と基準

評価の対象は、WPI のミッションの達成度である。すなわち、世界トップレベルの研究、融合研究、国際化、システム改革が確実に遂行されているかを評価する。

サイエンスの評価の基本はピア・レビューである。論文掲載誌のインパクト・ファクターや論文被引用数などの研究指標に安易に頼ることなく、サイエンスとしての質を重視し、そのチャレンジ精神、将来のサイエンスへの貢献の可能性などを、専門家(ピア)として厳しく評価する。

トムソン・ロイター社のデータベース(Web of Science: WoS)を用いた引用調査(図5)は、参考資料にとどめている(評価に際しては、そのデータによって左右されないよう、評価が決定した後に評価者側に開示する)。

サイエンスと並んで重要な評価項目は、WPI のミッションの実行である。融合研究は、その性格上、結果を予想しにくく、かつ、必ずしも成果が出るとは限らないので、融合研究の成果を拙速に要求するようなことはない。むしろ、融合研究を進める戦略などが評価の対象となる。国際化は、外国籍研究者の数値目標が一応の目安となる。システム改革に関しては、特にホスト機関の取組に注目している。

中間評価、最終評価の際は、ベンチマーク機関として、世界の同規模トップレベル研究機関を5機関選び、発表論文を比較する。しかし、この指標も参考資料にとどめている。

評価の基本方針は、拠点毎の絶対評価である。拠点を比較評価する相対評価は行わない。

### 3) 中間評価

公募要領には、「助成開始 5 年後に中間評価を実施し、計画の変更、中止等の見直しを行う」と、明記されている。この記述にしたがい、拠点は、発足 5 年目には中間評価を受けることになる。これまでに、現行 9 拠点はすべて中間評価を受けた。

- ・ 2007 年度採択 5 拠点：中間評価 2011 年度
- ・ 2010 年度採択 1 拠点：中間評価 2014 年度
- ・ 2012 年度採択 3 拠点：中間評価 2016 年度

中間評価は S、A<sup>+</sup>、A、A<sup>-</sup>、B の間に広く分布している。A、B 評価を受けた拠点は、それぞれ、指摘された問題点を克服するべく努力を重ね、延長審査、最終評価では問題点を克服した（しつつある）。中間評価結果は、次の URL に示している（2012 年度採択の 3 拠点は 2016 年度のフォローアップレポートに報告予定）。

[https://www.jsps.go.jp/j-toplevel/08\\_followup.html](https://www.jsps.go.jp/j-toplevel/08_followup.html)

### 4) 延長審査

公募要領には、次のように明記されている。

「実施期間 10 年間。ただし、特に優れた (Outstanding) 成果をあげているものについては、更に 5 年間の延長を認める。」

この規程にしたがって、2007 年度設立の 5 拠点が、5 年延長を申請した。2014 年度、プログラム委員会は、5 拠点に対して「延長審査」を行った。最初に、延長についての基本認識について、討論が行われた。

- ・ WPI プログラムの支援期間は、原則 10 年間である。
- ・ 規程の定める「Outstanding」は、非常に高い WPI 基準を更に超えた、真に例外的な場合 (truly

exceptional case) にのみ適用されるべきである。

この基本認識を共有した後、プログラム委員会は真剣な議論を行い、次の結論に到達した。

- ・ 5 拠点全てが、サイエンスレベルと WPI プログラムのミッションの遂行において満足すべき実績を上げており、WPI プログラムのゴールである “World Premier Status” を達成したと結論した。
- ・ その中でも、すべての面で、真に例外的に優れている Kavli IPMU に対して、5 年間の延長を承認した。

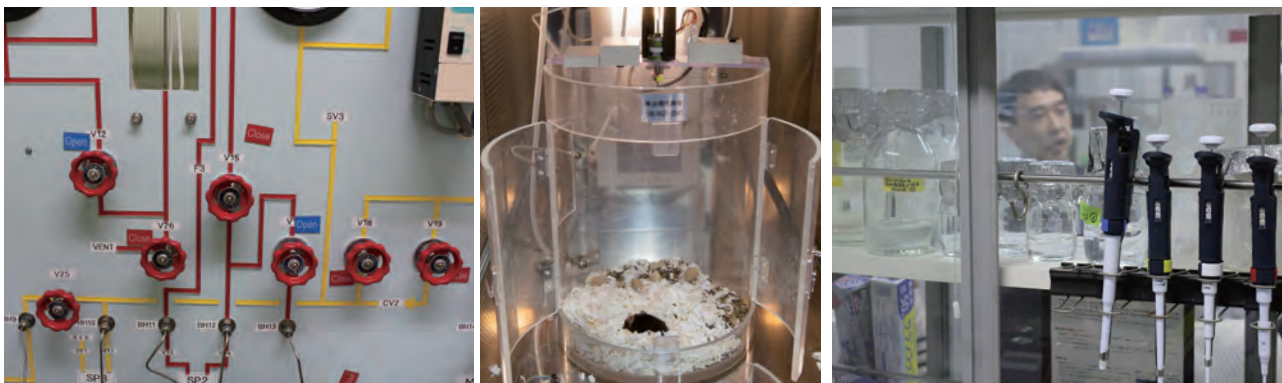
### 5) 最終評価

2016 年度末に WPI プログラムによる予算的支援が終了する AIMR、iCeMS、IFReC、MANA の 4 拠点について、2016 年度に最終評価が行われた。Kavli IPMU に対しては、10 年次評価を行った。いずれも、延長審査時点から引き続き “World Premier Status” にあると、プログラム委員から高く評価された（詳細は 2016 年度フォローアップレポートに報告予定）。

## 6 WPI の成果 (1) サイエンス

WPI 拠点は、そのサイエンスにおいて、世界のトップレベルでなければならない。事実、先行 5 拠点は、世界に冠たる業績をあげている。各拠点の優れた業績に関しては、本書の 30 ページ以降に、それぞれの拠点毎に 5-8 項目をあげて解説している。さらに、毎年度のフォローアップレポートにも記載されている。

引用などの定量的な数値は、毎年調査をするものの、評価に当たっては、参考資料にとどめていることは先に述べた。しかし、世界の研究機関全体における WPI の位置を見るときには、重要な資料となるのは確かである。以下、トムソン・ロイター社の WoS による調査結果を図 5 に示す。



実験室風景 I<sup>2</sup>CNER (左)、IIS (中)、ITbM (右)

## 発表論文

先行 5 拠点の発表論文数、論文被引用数トップ 1% 論文及びトップ 10%論文、国際共著論文は、拠点報告の冒頭見開きページに記載されている。

2007-2015 年の先行 5 拠点の発表論文は、総計 10,932 報であった。論文数は分野によって異なり、概して材料系が多く、生物系は少ない傾向がある。

## トップ 1%論文

影響力のある優れた研究論文は、後続する論文によって数多く引用される。引用数がトップ 1%に入るような論文は、間違いなく影響力のある論文といえよう。

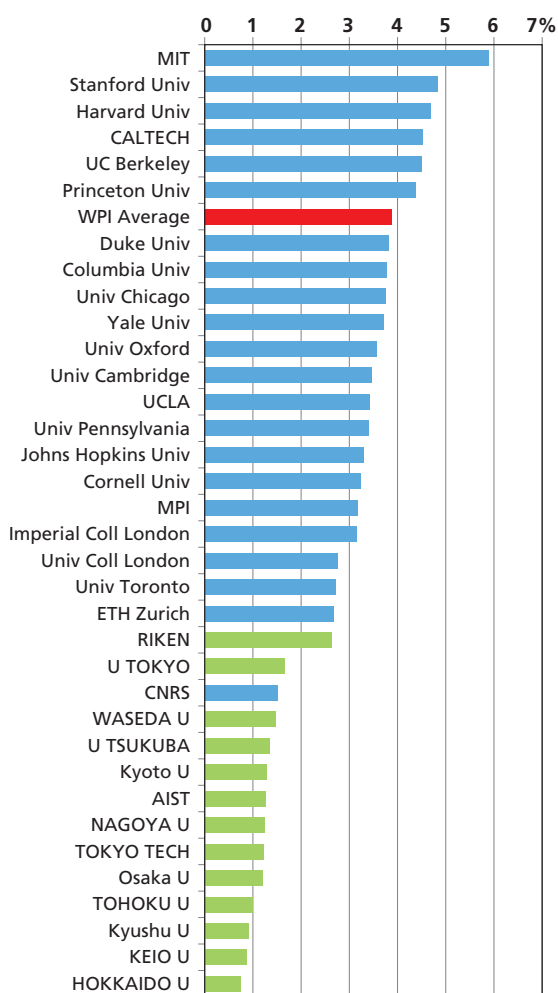


図 5 世界及び日本を代表する 36 研究機関のトップ 1%論文の割合 (%) (2007-2015)。2007 年設立の WPI 5 拠点は、これらの世界トップ研究機関の中でも、7 位につけている。タイムズ・ランキング世界トップ 20 大学、マックス・プランク (Max-Planck) 研究所 (MPI、ドイツ)、フランス国立科学研究センター (CNRS、フランス)、及び我が国の国私立 11 研究大学 (RU11 大学) と特定国立研究開発法人理化学研究所 (RIKEN) 及び産業技術総合研究所 (AIST) と比較した (トムソン・ロイター社による)。

## 国際共同研究論文

国際間の共同研究は、国際化の一つの指標として取り上げられることが多い。我が国は、29.1%と世界平均の 24%よりは高いが、欧米の研究先進国 (イギリス、ドイツ、フランスは 50%以上) と比較するとかなり低い (2013 年)。しかも、その伸び率はアジアの国々に追い抜かれつつある。

このような中であって、先行 WPI 5 拠点の国際共著論文は、平均 46.5% (5,087/10,932) である。WPI 拠点が、国際的な研究ネットワークの中に位置づけられていることが分かる。

資料 : <http://www.nistep.go.jp/wp/wp-content/uploads/NISTEP-RM239-FullJ.pdf>

## 受賞

WPI 拠点の研究者たちのレベルが高いことは、その受賞歴からも明らかである。ノーベル賞を始め、多くの国際的、国内的に著名な学術賞を受賞している。以下主な受賞を示す。

**ノーベル賞** : WPI 拠点の 2 名の PI がノーベル賞を受賞した。2012 年に iPS 細胞の樹立によりノーベル生理学・医学賞を受賞した iCeMS の山中伸弥博士と、2015 年にニュートリノ振動の発見によりノーベル物理学賞を受賞した Kavli IPMU の梶田隆章博士である (図 6)。

WPI の研究者たちは、ガードナー国際賞、ラスカー賞、ロバート・コッホ賞、ヘルマン・ワイル賞、アメリカ数学会アイゼンバッド賞などの著名な国際賞、さらに文化勲章、文化功労者、紫綬褒章、日本学士院賞、日本学術振興会賞などの国内の最高レベルの賞を授与されている。受賞者のリストは、次の URL に示している。

<https://www.jsps.go.jp/j-toplevel/data/10thcommemoration-awardlist.pdf>



図 6 梶田 隆章 (左、画像提供 : 東京大学宇宙線研究所) 山中伸弥 (右)

## 7 WPI の成果 (2) 融合研究

WPI 拠点には優れた研究者が結集している。それゆえに優れた研究成果が発表されるのは当然であるという声がある。それは間違いのない事実である。しかし、優れた研究者を集めただけで真に革新的な研究や新たな研究分野が生み出されるとは限らない。4つのミッションに掲げるように、WPI プログラムは、研究者を取りまく様々なボーダーとバリアを越えることを求めた。そのことが、いかに研究を発展させたかは、各拠点の報告の最後に記載されている。

WPI プログラムの求めた変革の一つが、WPI の2番目のミッションとなっている「融合研究による新たな学問創出への挑戦」である。

しかし、融合研究は容易でない。分野が異なれば、研究を行う上での技術、考え方、学術用語も異なる。融合研究では、科学的な対話を成立させることから始めなければならない。融合研究を成功させるためには、融合戦略と融合の場が必要である。前者をトップダウン型融合研究、後者をボトムアップ型融合研究と呼んでもよいであろう。

### トップダウンによる戦略的融合研究

公募要領に明確に融合研究が示されていたことから、それぞれの WPI 研究拠点は、分野のボーダーを乗り越えた研究を進めるべく、研究所としてトップダウン的に戦略を立てている。

- ・ AIMR は、数学の導入により、新しい材料科学の創出を目指している。
- ・ Kavli IPMU は、物理学と数学の高度なレベルでの融合を創設時から目標に掲げている。
- ・ iCeMS は、細胞生物学と材料科学の融合を目指している。
- ・ IFRc は、伝統的な免疫研究者が分子イメージング研究所である QBiC (理化学研究所 生命システム研究センター)、CiNet (脳情報通信融合研究センター) と共同して多くの成果をあげている。
- ・ MANA は、ナノ科学とバイオの融合を進めている。
- ・ I<sup>2</sup>CNER は、低炭素社会の実現に向けての総合科学の色彩が強い。

一方、2012 年度発足の WPI Focus の公募に当たっては、組織と予算規模を考慮し、融合研究はあまり強

調されなかった。しかし、ELSI と ITbM の2拠点は、それぞれ、地球・惑星科学と生命科学、動植物学と合成化学の融合を掲げ、大きな成果をあげつつある(後述)。睡眠・覚醒をテーマとする IIS は、基礎生物学・実験医学・創薬科学の横断的研究を行っている。

### ボトムアップによる融合研究のための「場」の設定

トップダウン的に融合研究の方針を立てたとしても、実際に融合研究を行うのは、個々の研究者である。研究者たちの率直な討論により、お互いを刺激し合い、インスピレーションを与え合う中から、新たな研究が生まれるであろう。しかし、いつアイデアが生まれるか、どのような成果が得られるかは予測できない。その意味で、融合研究は、言うは易く行<sup>やす</sup>うは難しいと言わざるを得ない。

ボトムアップ型の融合研究において重要なのは、自由に討論し、共同研究ができるようなシステムと場の設定である。その目的に向かって、WPI 拠点は様々な工夫を凝らしている。研究者を分野によってまとめない「フラット」な組織構成、融合研究を推進するための研究費支援、研究者同士が自由に討論できる場の提供などである。その幾つかを取り上げてみよう。

- ・ AIMR では、若手数学者/理論研究者から構成される「インターフェイス・ユニット」をつくり、材料科学への数学の導入を進めた(図7)。
- ・ Kavli IPMU は、毎日午後3時の「ティータイム」への出席を研究者の義務としている(45ページ)。
- ・ iCeMS は、融合研究ファンドを設定した。
- ・ IFRc は、融合研究ユニットおよび融合研究ファンドを設置し、ダブルメンター制の下で融合領域研究の推進と若手の育成を行っている。



図7 AIMRにおける研究発表会。若手の数学者と材料科学者が討論を重ねる中で、新たなアイデアによる融合研究が生まれる。



- ・ MANA は、理論研究者のユニットを作った。
- ・ ITbM は、化学と生物の研究者が同じ部屋で実験し、研究する Mix-Lab や Mix-Office を実現した。

### 融合研究の成果

融合研究は成果を推測できず、時間がかかるのが常である。しかし、このような地道な努力により、10年期限の後半からは、融合研究の成果が少しずつ生まれてきている。

- ・ AIMR : 50 年以上にわたり謎であったガラス構造を数学を用いて解明した (32 ページ)。
- ・ Kavli IPMU : ティータイムの物理学者、天文学者と数学者の討論が、ウルトラ超新星現象の重力レンズによる解明につながった (42 ページ)。
- ・ ITbM : Mix-Lab における植物学と合成化学の大学院生の討論から、アフリカで大きな被害をもたらしている寄生植物ストライガの撲滅につながる化合物を開発した (90 ページ)。
- ・ iCeMS、IFReC では、融合研究の論文が拠点全体の大きな割合を占めるようになった。

WPI の融合研究は、世界の注目を集めていると言ってもよい。

- ・ AIMR は、数学と材料科学のモノグラフ『材料の数学』シリーズを Springer 社から刊行し、この分野の先導的役割を果たしている。
- ・ ELSI は、地球と生命の起源について共同研究ができる研究所として世界に知られるようになり、5 人の研究者がアメリカの常勤雇用職 (テニユアポジション) を捨てて、東工大に移籍してきた。

WPI プログラム発足時には、成功が危ぶまれた融合研究であったが、今や、WPI の大きな魅力として成長しつつある。

## 8 WPI の成果 (3) 国際化

科学は分野の壁や国の境を越えて大変な速さで進展している。文化的背景や考え方の異なる様々な人々が交流しあい、切磋琢磨<sup>せつさくたくま</sup>しあうところに前進の源泉があるからだろう。

ところが、我が国は国際化という点で世界ランキングの中でも相当に低い位置にある。例えば、国際教員、国際学生 (留学生)、国際論文の 3 項目で評価するタイムズ世界大学ランキングでは、日本の大学はすべて

500 位以下である。このような状況の中で、WPI プログラムは、国際化の突破口となっている。

### 外国籍研究者の比率

WPI プログラムでは、外国籍 PI の比率 20% 以上、研究者全体では 30% 以上を目標としている。2016 年度現在、ほとんどすべての拠点がこの目標を達成している。9 拠点平均では、外国籍 PI の比率は 33.6%、研究者全体での比率は 41.2% である。この数字の高さは、国立大学法人 86 大学の外国籍教員の比率が 4.6% (平成 27 年度学校基本調査) にすぎないことと比べるとよくわかるであろう。

フルタイムで WPI 拠点に滞在する外国籍 PI は 20 人を数える。この中には、上述の ELSI のように、WPI でこそ自らの望む研究ができるという理由を挙げる人々が少なくない。WPI 拠点の質の高さや新たな研究領域開拓への意欲が国際的にも注目を集めていることの証左であろう。

### 国際的な頭脳循環のハブとして

若い研究者たちは、ポスドクや任期付き研究員のポジションで研さんを積みながら成長していく。WPI では、全ての拠点が国際的に門戸を開いた公募を行っている。どの拠点にも世界中からの応募があり、外国からの応募が 90% に達する拠点もある。中には毎年数百人の応募の中から十数名のポスドクを採択する拠点もある。

この 10 年間で世界の多くの若者が WPI 拠点で研究して成果を上げ、そして世界の大学・研究機関へとキャリアアップしていった。例えば、Kavli IPMU 創立以来のポスドク 139 名中 44 名が、世界の最先端研究所にポジションを得て巣立っていった。いまや WPI は世界の若手研究者にとって“輝かしいキャリアパス”の一つとなっている。

他方、我が国の若い研究者が外国に出ないことが近年問題になっている。WPI 拠点は、若い研究者に「武者修行」の機会を与えることにも力を入れている。

WPI 各拠点では毎年国際会議を開催している。数百人が参加する会議に加えて、分野融合や先端的なテーマに絞ったワークショップも数多く開かれている。例えば、IFReC がシンガポール免疫学ネットワークと共同で行う "Winter School" からは多くの最先端免疫学者が育っている。また、著名な研究者や新進気鋭の



若手研究者の短期・長期の招へいも積極的に行われており、年間訪問者の数は各拠点とも数百人以上になる。

WPI 拠点は、世界中から研究者が集まり、最新の成果を議論し、また散っていくダイナミックな場所となった(図8)。WPI 拠点は、当初に目的とした「国際的な頭脳循環(global brain circulation)」のハブとしての機能を果たしているといえよう。



図8 IFRcのマラリア感染免疫研究グループ。Coban PI(中央)の指導の下に、数か国からなる研究員が研究に従事している。

### 国際的な研究・生活環境の整備

欧米は、歴史的、地理的、文化的に交流が盛んである。また世界の共通言語となっている英語への親和性も高い。しかし、日本はどの面を取っても大きく後れをとっている。日本は、言語的、地理的、文化的バリアが高く、それを越えるのに不利な状況にあるのは確かだ。

このようなバリアを越えるために、WPIの各拠点は多くの工夫を凝らしている。拠点の公用語を英語とすることに伴い、会議や文書の英語化、研究費の申請、バイリンガルな事務職員の配置、研究支援や契約と雇用に関する様々な問題を解決するための英語サポートなどをすすめた。また、これらに加えて、海外からの研

究者とその家族が安定して生活できるよう、住宅、医療、教育等の支援にも多くの努力がなされている。

WPI 拠点には国際的な研究・生活環境を提供するための多くのノウハウとそれを持つ人材が育っている。これも国際化のミッションの成果であり、我が国の大学に広めていくべき大事な財産である。

### 世界から見える研究所(アンケート調査)

WPIの目的の一つは、世界から見える研究拠点を作ることである。WPI 拠点は、世界の研究者に広く認識されているのであろうか。そこに行って研究がしたいような研究所と考えられているのであろうか。そのことを確認するため、2009年と2011年に、世界の研究者を対象にアンケート調査を行った。

調査対象は、5拠点の研究分野の専門誌に論文を発表した研究者1,000人と、その分野のリーダー30人である(それぞれ拠点あたり)。発足後2年、4年という短期間にかかわらず、いずれの調査結果も、WPIが国際的に認知されていることを示す結果が得られた。以下に、2011年の調査結果を示す。

- ・ 半数又はそれ以上の研究者が、自分の分野のWPI拠点を認識していた。
- ・ 約半数(48.3%)の研究者が、WPI 拠点のサイエンスの水準を「非常に優れている」と評価していた。
- ・ 研究者の大半(79.1%)が、WPI 拠点の研究に参加することに興味を示した(併任としての参画を含む)。

WPI 拠点は、拠点間で多少の差はあるものの、発足後4年という短期間に、世界から見える研究所となっていることが確認された。

詳細は、2010年度及び2011年度フォローアップレポートに記載されている。



外国人研究者たち IFRc(左)、ICNER(中)、IFReC(右)



## 9 WPI の成果 (4) システム改革

日本の科学研究を更に発展させるためには、研究費を絶え間なく投資するだけで十分であろうか。もちろん、研究費がなければ研究ができない。しかし、それだけで、我が国の研究が飛躍的に発展するわけでもない。同時に、研究を取りまく環境を変えていかなければならない。大学自身も変わっていかなければならない。

公募要領に記載されているように、「システム改革の導入等の自主的な取組を促す」ことにより、大学を自ら変えていくことも、WPIの重要なミッションの一つである。

例えば、日本の大学では教授をトップとするヒエラルキーのため若い研究者の自由な発想が妨げられることがある。教授会が主導権を握り改革に抵抗することは、大学内ではしばしば見られる。大学間、学部間の垣根が高く、人事の交流が進まない。保守的な教職員によりシステムの改革は妨げられる。英語が定着しない。

このような状況に対して、科学技術政策を考える人たちの間には、大学改革が進まないことへのいらだちがあるのも事実である。

こうした背景の下、WPIを一つの「核」として大学改革を進めようとする考えが、WPIプログラムの発足の経緯としてあった。そして、WPI拠点はその期待に応えている。

### 拠点長のリーダーシップ

これまでの大学が、教授会によるコンセンサスに基づいて運営されていたことに対し、WPIは拠点長のリーダーシップにより運営することを求めている。実際、すべての拠点はその方針の下に運営されている。それだけに、拠点長の責任は大きい。

拠点長のリーダーシップは、至る所に現れている。

- ・ AIMR は、数学者である小谷元子拠点長のリーダーシップにより、数学による新たな材料科学を目指している。
- ・ Kavli IPMU は、村山斉拠点長のアイデアにより、毎日午後3時には全研究員が、集会室の「ティータイム」に参加し、黒板の前で数式を書いて討論する。その部屋には、ガリレオの言葉「宇宙は数学の言葉で書かれている」が掲示されている（44ページ写真）。

- ・ ITbM では、伊丹健一郎拠点長の「Mix-Lab」の考えを具体化し、化学と生物学の研究者が同じ実験室で実験できるようにした。

これらの試みはいずれも目に見える成果をあげている。

### クロス・アポイントメント

WPIプログラム発足の改革の中で、インパクトがあり、大学改革の看板にもなりつつあるのは、クロス・アポイントメント（ジョイント・アポイントメント、ダブル・アポイントメントともいう）制度である。

その最初の例となったのは、Kavli IPMUの村山斉拠点長であった。村山拠点長は、当初、カリフォルニア大バークレイ校の休職扱いで東大に来た。その後、村山拠点長はバークレイ校と東大の双方の職を持つことになったため、それぞれの給与は村山拠点長のエフォートに応じて調整することとなった（クロス・アポイントメント）。続いて、I<sup>2</sup>CNERのソフロニス拠点長が、イリノイ大学と九州大学の間でクロス・アポイントメントの契約を結んだ。

クロス・アポイントメントは、教員の流動性を高めるという意味でも、画期的な制度改革である。実際、2013年に文科省が発表した「国立大学改革プラン」の中でも、クロス・アポイントメントは、大学改革の一つの柱として位置づけられた。

### 事務支援部門

WPIプログラムは、研究者が十分に研究できるような環境を整備することを拠点に求めている。

- ・ 研究者が研究に集中できるようなサポート体制。
- ・ 外国人研究者の研究と生活のサポート体制。
- ・ 職務は英語を公用語とするため、英語で仕事ができるサポートスタッフ。
- ・ 世界トップレベルの研究所にふさわしい国際研究集会を開催するためのスタッフ。

特に、拠点長をサイエンスと管理運営の両面からサポートするためには、事務部門長の人選が重要である。このため、すべての拠点が、大学あるいは民間機関の研究者を事務部門長として採用している。

これまで、大学の事務系は国際化などの意識が低く、英語での十分な対応ができていなかった。WPIはそのような事務系に風穴を開けた。

## 研究支援部門

WPI 拠点の多くは、研究支援部門の充実にも力を入れている。

- ・ MANA では、研究資料の製作をサポートする MANA ファウンドリを整備し、研究を助けている。
- ・ ITbM は、分子構造、化合物ライブラリー、ライブイメージング、ペプチドプロテインの4つの支援センターをそろえ、それぞれに博士号を有する研究員を配している。実際、これらのセンターは、化学と生物学の融合の場で活躍し、既に幾つもの有効な化合物を発見している。

我が国でも、このような研究センターが整備されているが、人員の削減等により支援体制を維持していくことが厳しい状況に置かれている大学もある。それが、我が国の科学の力を弱めている一つの原因となっている。WPIの研究は、このような支援センターによって支えられ、優れた研究を生む基盤となっている。

## 10 WPI 拠点の実績 (5) 教育

次世代の研究者を育てるための人材育成は、WPI のような先端的な研究拠点にとっても、非常に大事な任務である。融合研究により新しい領域の創出に寄与する若手研究者の育成のためにダブルメンター制を採用している拠点も少なくない。

残された課題の一つは、大学院との密な連携である。WPI 拠点は従来の大学院組織を母体とすることなく形成されたため、学位を授与することが出来ない。このため大学院生は、既存の大学院から派遣してもらう他になく、それに抵抗をもつ大学院も一部存在するのが現状である。しかし、WPI の実績が認められた今、両者の間には協力関係が構築されつつある。

例外は、筑波大である。教員組織と教育組織を明確に分けた開学当初からの制度設計により、IIS は大学

院教育に関わることができる。筑波大のシステムは、他の大学にも広がりつつある。

## 11 WPI 拠点の実績 (6) アウトリーチ活動

2010 年に行われた「事業仕分け」により、WPI を含め多くの科学研究は大幅の予算削減の危機に直面した。科学者たちは、自分たちの仕事が、政治家や社会から十分に理解されていないという現実と直面した。我々は、研究を進めるだけでなく、その意義と内容を社会に発信するアウトリーチ活動の重要性に改めて気がついた。

以来、WPI プログラムでは、各拠点にアウトリーチ担当者を置き、積極的に活動を行うことにしている。

さらに、各拠点間のアウトリーチ担当者会議を年に3回程度開催し、WPI としてのまとまったアウトリーチ活動を進めている。その活動としては、次のようなものがある。

### AAAS(アメリカ科学振興協会) 総会

アメリカを中心に世界の科学関係者が集まる AAAS 年次総会に、WPI としては 2012 年から参加し、各拠点がブースでその研究活動を展示している。2014 年、シカゴで行われた AAAS 総会では、I2CNER のソフコニス拠点長が、WPI プログラムについて講演を行った。

### 高校生を対象としたワークショップ

WPI は次世代を担う高校生を対象に、科学のすばらしさを伝えるワークショップを毎年共同で開催している。特に、文科省のスーパーサイエンスハイスクール (SSH) に選ばれた学校に参加を促している。これまでのワークショップを以下に示す。

- ・ 2015 年、京都 (iCeMS 主催) : テーマ「実感する



高校生を対象としたワークショップ 2011 年福岡 (左・中)、2013 年仙台 (右)



サイエンス」

- ・ 2014年、東京（Kavli IPMU 主催）：テーマ「サイエンスがなくなぐキミのミライ」
- ・ 2013年、仙台（AIMR 主催）：テーマ「Science Talk Live 2013」
- ・ 2012年、筑波（MANA 主催）：テーマ「世界トップレベルの科学を愉<sup>たの</sup>しむ」
- ・ 2011年、福岡（I<sup>2</sup>CNER 主催）：テーマ「最先端の科学と君たちの未来」

これらのワークショップには、毎回多数の高校生が熱心に参加し、拠点のブースは更に詳しく知りたいという高校生であふれた。東京と仙台的ワークショップでは、高校生たちが自らの研究を発表した。仙台では、特にアメリカのメリーランド州のエレノア・ルーズベルト高校の生徒も参加し、発表を行った。

### 科学技術フェスタ、サイエンスアゴラ

政府が主催する「科学技術フェスタ」（2012年度まで）及び JST の主催する「サイエンスアゴラ」（2013年度）に、WPI の各拠点はブースを設け参加した。

### 拠点独自のアウトリーチ活動

それぞれの拠点は、それぞれにアウトリーチ活動を展開している。例えば、一般向けの講演会の開催、サイエンスカフェ、解説書の発行などである。

また、海外からのポストドクなどによるブログは、日本における生活を現場感をもって伝えることにより、国際化に貢献している。地域に根ざしたこれらの活動により、WPI は、研究者コミュニティだけでなく、地域社会からも受け入れられつつある。

## 12 WPI の成果 (7) 社会への貢献

WPI プログラムは、応用研究を直接の研究対象としていない。もちろん、それを否定するものでなく、基礎研究の結果が応用に結びつき、産業化され、人々の生活に役に立つことになれば、我々としては、この上のない喜びである。実際、WPI の研究成果は、応用研究に生かされている。その一部を紹介しよう。

- ・ AIMR の研究成果は、産業界から広く認知され、実用化に向けて多くの企業が参加するコンソーシアムが形成されている。その成果は、東芝、日立、NEC などにより産業化されつつある。

- ・ iCeMS は、iPS 細胞の分化を認識するプローブを開発し、企業から発売した。
- ・ IFReC は、基礎研究の優れた成果と創薬成功の実績を背景として中外製薬と今後 10 年間のセンター運営支援のための包括連携契約を締結した（12 ページ参照）。また、幾つかのバイオベンチャーを立ち上げた。
- ・ MANA も、AIMR と同様、応用への貢献が大きい。特に、青野拠点長の原子スイッチは、NEC によって実用化された。
- ・ I<sup>2</sup>CNER は、太陽光による水素製造の実現に向けた装置を開発している。
- ・ IIS は、製薬会社と共同で、睡眠に関する創薬を進めている。
- ・ ITbM は、触媒、プローブなどの応用研究で成果をあげている。特に、アフリカの農業に深刻な影響を与えている寄生植物ストライガの撲滅につながる化合物であるヨシムラクトンを開発し、市販化した（90 ページ）。

各拠点の応用研究、産業化等についての詳細は、次の URL に示している。

<https://www.jsps.go.jp/j-toplevel/17koken.html>

## 13 プログラムの将来計画

2015 年のプログラム委員会は、WPI の将来として、次の 2 つの方針を文科省に要請した。

### 1. WPI プログラムの継続

- ・ WPI プログラムは、継続するべきである。
- ・ WPI プログラムの発展には、拠点の「新陳代謝」が必須である。新たな WPI 拠点の公募を実施するべきである。

### 2. 補助金期間終了拠点の支援

- ・ WPI 拠点が達成した卓越性に鑑み、補助金期間終了拠点に対し何らかの支援スキームを整備すべきである。
- ・ WPI の活性とブランドを維持するため、“WPI アカデミー”システムの樹立を推薦する。

プログラム委員会の推薦は、2015 年度フォローアップレポートに記載されている。

これを受けて、文科省は 2016 年 10 月のプログラム委員会において、次のような将来構想の報告を行った。

## 1. 新規拠点の公募

- ・ 2017 年度に新規拠点を 2 拠点公募する。2018 年度以降も更なる拡大を目指す。
- ・ 将来的には、最大 20 拠点までの設立を目指す。
- ・ 新規拠点は、拠点あたり最大年 10 億円、支援期間は 10 年間とする（延長制度は設けない）。
- ・ 現在の 4 つのミッションを基本的に維持する。
- ・ 対象研究分野は、自然科学の基礎的研究とする。2017 年度には、数理・情報科学の活用を考慮する。
- ・ プログラム遂行のために必要であれば、人文、社会科学の観点も取り入れる。
- ・ 現在 10 年間の支援期間中の拠点を有するホスト機関は応募できない。

また、2007 年度発足拠点を有するホスト機関は、終了拠点に対する確実な支援の維持が、応募の前提条件となる。

## 2. WPI アカデミーの設立

- ・ WPI ブランドを確立し、維持発展させるために、新たな枠組みとして WPI アカデミーを発足させる。
- ・ 特に、グローバル頭脳循環を支援する。
- ・ WPI アカデミーは、WPI 全体に「横串」を刺し、ネットワーク化する。
- ・ WPI で蓄積された経験、成果を集約し、横展開を図る。

以上の将来構想は、2016 年 10 月プログラム委員会時点での平成 29 年度（2017 年度）概算要求に基づいている。このため予算編成の状況により変更の可能性はある。詳細は、更に国内プログラム委員会の討論を経て決められる。

## 14 REI をめぐる世界の動向

WPI のような研究強化策は、日本だけの特別な取組ではなく、多くの国が、同じような考えの下に、同様のシステムを発足させている。その背景には、次のような事実がある。



拠点の演奏会 フルード演奏をする IIS 柳沢拠点長（左）



コントラバスを演奏する Kavli IPMU 村山拠点長（右）

- ・ 現代社会は、知識の基盤の上に成立している「知的基盤社会 (knowledge-based society)」。
- ・ 新たな研究成果（＝知的基盤）の創出と優れた人材の確保をめぐり、世界レベルで競争が激化している。
- ・ 基礎・応用科学の振興への更に効率的な支援の形を各国政府は模索している。

このような背景の下、OECD 加盟国の 2/3 を超える国々は、REI により、卓越した研究拠点の形成を進めている。

REI に共通しているのは、次のような点である。

- ・ 野心的な研究計画を実施できるよう、長期間にわたり安定して資金を提供する。
- ・ 突出した研究拠点の形成を目指す。
- ・ 研究システムと運営に関して、より柔軟な対応を可能にする。
- ・ 研究コミュニティへ波及効果を及ぼす。
- ・ 次世代の優秀な科学者を育成する。

まさに、WPI の目指すところと重なっている。

### 世界の REI

世界の国々は、上述の考えに基づき、REI を推進している。

日 本：WPI

ド イ ツ：Excellence Initiative

フ ラ ン ス：Investments for the Future

デンマーク：Investment Capital for University Research

イスラエル：Israeli Centers of Research Excellence

ス ペ イ ン：International Campus of Excellence

ロ シ ア：Project 5-100

カ ナ ダ：Canada First Research Excellence Fund

ア メ リ カ：Science and Technology Centers

オーストリア：Competence Centers for Excellent Technologies

チ リ：Millennium Science Initiative

中 国：2011 Collaborative Innovative Center



韓国 : World Class University

これらの研究組織は、上述した REI としての共通の問題意識を共有している。それと同時に、それぞれの国の事情が背景にある。

- ・ 日本の WPI は、国際化と大学改革を一つの使命としている。
- ・ フランス は、多様な高等教育機関をまとめることを一つの目的としている。
- ・ ドイツは、これまで州政府が支援していた高等教育機関に、国家予算をつぎ込み、強化しようとしている。
- ・ イスラエルは、外国に出ている優秀な研究者を自国に呼び戻すための手段として考えている。

### WPI は REI のロールモデル

WPI は、世界の REI の中でも、ドイツ (2006 年) に続いて 2007 年に発足した。それだけに、世界から注目され、REI の一つのロールモデルとして、引用されることが多い。

2014 年、OECD は REI の現状をまとめたモノグラフ「Promoting Research Excellence」を出版した。ネイチャー、サイエンス誌も、くり返し、WPI を含め REI を取り上げている。REI に関する国際ワークショップは、2010 年 (ドイツ、ボン)、2013 年 (イスラエル、エルサレム)、2015 年 (東京)、2016 年 (ロシア、サンクトペテルブルク) とこれまで 4 回開催されている。特に、2015 年は、WPI のプログラム委員会と併せて東京で開催され、7 か国の REI から発表があった。

WPI は、世界から注目されているプログラムである。我々は、世界をリードする科学を育むためにも、WPI プログラムを更に発展させねばならない。



図 9 OECD は、各国の REI を通覧するモノグラフを 2014 年に刊行した。

## 15 科学技術政策の要としての WPI - まとめて代えて

WPI プログラムはその先進的な試みと世界に誇る成果により、我が国の科学技術政策の要として位置づけられている。例えば、2016 年度には、次に示す政府の方針 (いずれも閣議決定) において、WPI について直接的あるいは間接的に言及している。

- ・ 第 5 期科学技術基本計画
- ・ 科学技術イノベーション総合戦略 2016
- ・ 日本再興戦略 2016

以上の政府の方針において、WPI と WPI のコンセプトに関する記述は次のとおりである。

### 第 5 期科学技術基本計画

「科学技術イノベーション活動は国境を越えて展開されており、……我が国の国際競争力に大きな影響を与えている。」(第 1 章)

「我が国が世界の中で……国内外から第一線の研究者を引き付ける世界トップレベルの研究拠点を形成する。」(第 4 章)

### 科学技術イノベーション総合戦略 2016

「国内外から第一線の研究者を引き付ける拠点を形成する世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI) について、……国際的な頭脳循環の中核となる研究拠点の着実な形成に取り組む。」(第 3 章)

### 日本再興戦略 2016

「世界から優秀な人材が集う研究拠点を構築する世界トップレベル研究拠点プログラム (WPI) を引き続き推進するとともに、当該プログラムが、融合領域等新領域の創出、人事給与改革、海外からの優れた研究者や寄付金の呼び込み等優れた実績を生み出していることを踏まえ、本年度中に当該取組の経験・ノウハウを学内外に横展開する仕組みを検討し来年度から導入する。」(第 2 III)

政府の方針においてくり返し述べられているように、WPI は、今後の我が国の科学技術政策の中核としての期待が大きい。我々 WPI 関係者は、その期待に応えるよう、引き続き、最大限の努力を重ねたい。



拠点長

**小谷 元子**

Motoko Kotani

## 数学と材料科学の融合を組織全体で 推進する「世界初の」研究拠点

AIMR は、東北大学が世界的優位を誇る材料科学、物理、化学、工学の研究者を集結し、革新的材料を産み出して社会に貢献するために設立された。2007 年の設立時から一貫して原子分子制御に基づいた異分野間の融合研究成果を世に送り出し、2011 年には、さらなるダイナミックな融合研究を期すために「材料科学全般に数学を導入する」という方針を決定。以後、数学者と、材料科学者、物理学者、化学者、工学者との協働を推進し、「材料科学と数学の融合研究を研究所全体で推進する世界初の研究拠点」として現在に至っている。

### ■ 基本情報 (2015 年度)

拠点長：小谷 元子 (2011 年度まで 山本 嘉則)

主任研究者 (PI)：28 名 (内 外国人研究者数 13 名、女性研究者数 2 名)

その他研究者：140 名 (内 外国人研究者数 74 名、女性研究者数 13 名)

研究支援員：75 名

事務部門：部門長 塚田 捷

スタッフ 30 名 (内 英語対応者割合 90%)

サテライト機関・連携機関：ケンブリッジ大学 (英国)、カリフォルニア大学サンタバーバラ校 (アメリカ)、シカゴ大学 (アメリカ)、中国科学院化学研究所 (中国)、ユニバーシティ・カレッジ・ロンドン (英国)、清華大学 (中国) など

URL：http://www.wpi-aimr.tohoku.ac.jp



## 主な研究成果

- 1 **数学によって導く材料科学**  
半世紀にわたる謎であった金属ガラスの構造を解明。数学者（幾何学者）と材料科学者による画期的な融合研究であり、AIMRの先進性を象徴する成果である。
- 2 **多孔質材料を進化させる研究**  
ナノサイズの穴が多数あいたナノ多孔質金属の高効率触媒への応用。ナノ多孔質金属を鋳型として、2次元の電子移動度を保持した3次元ナノ多孔質グラフェンの作製技術を構築。AIMRはナノ多孔質材料の材料科学をめざましく進化させている。
- 3 **磁性・スピンに関する新たな原理の解明**  
磁気の波（スピン波）を用いて熱エネルギーを望みの方向に移動させられる原理を考案。さらには世界最高分解能のスピン・角度分解光電子分光装置（spin-ARPES）を開発して物性の発現メカニズムを解明。磁性・スピン分野の最前線を進む。
- 4 **多機能ハイブリッド材料や錯体水素化物等の応用**  
超臨界水を反応溶媒に用いて危険な化学物質を使用することなく多機能ハイブリッド材料を創製。また、錯体水素化物（ $\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}$ ）の優れたイオン伝導性を発見し、二次電池の固体電解質に展開。新しい材料を作り、その使い道を示す。
- 5 **MEMS やバイオセンシングデバイス等の構築**  
顕微鏡でなければ見えないMEMS（微小電気機械システム）の分野において金属ガラスを使ったマイクロミラーを開発。また、VSM-SECMによる非侵襲的高解像度イメージング法を開発し、生きている細胞のモニタリングに展開。
- 6 **ありふれた物質に革新的機能を与える  
酸化物エレクトロニクス**  
基本的に絶縁体で電気を通さない酸化物に電界効果ドーピングを施し、超伝導を発現。さらに、酸化物材料では世界で初めて分数量子ホール効果を観測。また、AIMRの成果からは透明な超伝導体も誕生した。

## 論文情報

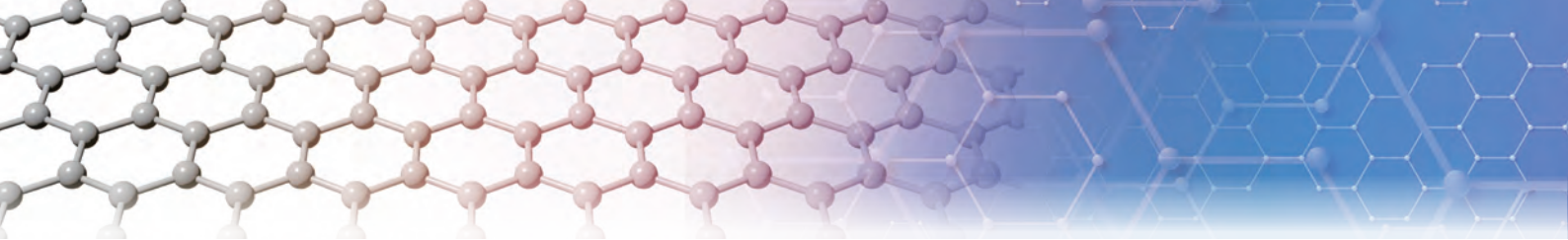
総論文数	2609 報
トップ 10% 論文	17.6%
トップ 1% 論文	2.4%
国際共同研究論文	43.3%
(データベース：WoS 2007-2015 年)	



〒 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1  
Phone: 022-217-5922  
Email: office\_member@wpi-aimr.tohoku.ac.jp

背景はグラフェン。  
蜂の巣状に炭素原子が並び二次元シート。





## 材料科学の最前線を拓く<sup>ひら</sup>

あらゆる「物質」は人類によって使われ始めた瞬間から「材料」という呼び名に変わる。その材料を研究する科学を「材料科学」と呼ぶ。物質を人の役に立てるための科学「材料科学」は、物理学、化学、工学、生命科学など実に広範な自然科学の領域にまたがっている。2007年、AIMRは、この広範な領域の研究者を集結して融合研究を進め、材料科学の最前線を開拓するために設立された。

設立後10年の歴史において、前半は化学者である山本嘉則 拠点長のもと、材料科学者、物理学者、化学者、工学者、生命科学者による融合研究を展開し、後半は数学者である小谷元子 拠点長（現）のもと、「数学を材料科学全般に導入する」との方針にのっとり材料科学分野の融合研究を進めてきた。

特に現在は「材料科学の様々な現象や原理を数学で記述することによって共通原理を導き出し、そこから未知の材料の構造等を数学的に予想すること、そして、実際にその未知の材料を現出させること」を目指すという革新的な方向に進み始めている。

そこで、ここからは、幅広い材料科学の各分野においてAIMRが創り出してきた幾つかの研究成果を紹介する。まずは、数学を導入することにより実現した画期的成果から挙げてみたい。

### 1 数学によって導く材料科学

陳 明偉 (PI)、小谷 元子 (PI)、平田 秋彦 (准教授)

材料科学に数学を導入して成功した例として「金属ガラス構造の解明」がある。

そもそも、物質には固体、液体、気体の三つの状態がある。それらの中身をナノスケールで見ると、固体は原子が規則的に並ぶ結晶となって固まっている。液体は原子が近距離に集まってはいるが無秩序に動いている。気体は原子の位置も距離も自由に变化できる状態になっている。

では、すべての固体中で原子が規則正しく配列しているかといえば、そうではない。窓やコップなどの材料として使われている「ガラス」は、見た目は固体なのだが、原子が規則配列した結晶にはなっ

ていない。液体のように無秩序なのだ。

私たちは日頃、ガラスとは材料の「種類」だと思っている。窓やコップのあの透明な材料がガラスであると思っている。ところが、科学の世界では、ガラスという用語はむしろ物質の「状態」に着目して使用される。私たちがガラスと呼んでいる透明な材料はケイ素、酸素を主成分とする原料を高温で熔融させて冷却する過程で原子の規則配列が間に合わず、無秩序な「ガラス状態」になったものである。

では、金属はどうかというと、金属は高温で熔融し冷却すると急速に原子が規則正しく配列して結晶になる傾向がある。しかし、ある条件がそろえば原子配列が無秩序のまま固体になる。このような物質を「透明」ではないが、ガラス状態であるので「金属ガラス」と呼ぶ。金属ガラスは結晶からなる金属の数倍の強度を示す新しい材料だ。破壊の原因となる粒界（結晶粒と結晶粒のつなぎ目）がなく高強度となるが、原子配列が無秩序であるが故に構造を特徴づけることが難しく、謎の多い材料でもあった。

2013年、AIMRの数学者と実験科学者（材料科学者）の融合研究チームはこの金属ガラスの構造を明らかにすることに成功した。まず、実験科学者が電子線回折という方法によって金属ガラスの原子配列に見られる幾つかの特徴的な形（原子クラスター）を抽出・整理し、さらに数学者が「計算ホモロジー」という幾何学的手法を用いて原子配列構造の特徴を解析した（原子クラスターの存在は過去にも指摘されていたが、その明確な構造を明らかにしたのは世界初である）。その結果、「金属ガラスの中の原子配列は『同じ様にゆがんだ20面体』が連続してつながった構造になっている」ということを見いだした（図1）。

「なぜ、通常は結晶になりやすい金属が無秩序な原子配列のガラス状態になれるのか」という問題は、「一見無秩序に思われる原子配列の中に『ゆがんだ20面体の構造』が隠れており、かつ一様に大量にある。一方、正20面体で空間を隙間なく詰めることは『数学的に禁止』されており、結晶を形作ることはけっしてありえない。つまり、結晶の原子配列とは異なるために結晶化が進まずガラス状態となる」という結論に達した。

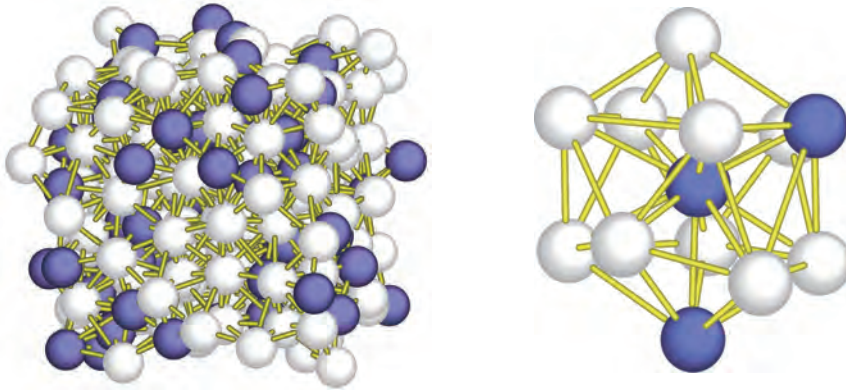


図1 金属ガラスの原子配列の模式図。従来、金属ガラスの無秩序な原子配列【左図】の中に20面体が形成されることは予想されていたが、本研究により、「ゆがんだ20面体」【右図】が連続してつながり、結晶化を妨げていることが判明した。図の紫の球は、白金(Pt)を、白い球はジルコニウム(Zr)を表している。

実のところ、「20面体」に関しては半世紀以上前に提唱された理論予測があり、多くの研究者が試みるも、直接確認することができなかった。AIMRでは、最高の実験技術と最先端の数学を組み合わせることでこの仮説を裏付け、半世紀にわたり展開された議論に決着をつけたのである。光ファイバーなどガラス構造を持つ物質は実用材料として既に幅広く利用されている。今回の金属ガラスの構造解明によって得られた知見は、ガラス材料の改良や新ガラス材料の開発にもつながっていくであろう。

A. Hirata, et al., *Science* 341, 376 (2013).

## 2 多孔質材料を進化させる研究

陳明偉(PI)、山本嘉則(PI)、浅尾直樹(教授)、藤田武志(准教授)、伊藤良一(准教授)

ナノサイズの穴が多数あいた材料をナノ多孔質材料と呼ぶ。AIMRではナノ多孔質の金属(図2)を作製する技術の開発と応用を進め、またナノ多孔質金属を鋳型とし、更に新しい材料の開発にも成功した。

ナノ多孔質金属の作製には「脱合金」という技術を用いた。例えば、ナノ多孔質の金を作製する場合、最初に金と銀の合金を作り、酸等によって銀を溶解し、金のみを残す。合金状態では金と銀がナノレベルで混合しているため、銀を溶かした後の金は微細な穴をもったナノ多孔質になる。AIMRの研究チームはこのようにして作製したナノ多孔質の金に化学反応を促進する触媒の効果があることを発見した。

金は腐食されにくい不活性な物質であり、昔は触媒として機能しないと思われていた。しかし、30年ほど前、ナノ粒子の金に触媒活性があることが発見され、それから爆発的に金ナノ粒子触媒の研究が広がった。金ナノ粒子触媒には「粒子の凝集による触媒活性の低下」という問題があり、その解決が大きな研究テーマとなっている。ここで、AIMRの研究チームは、皆が注目する金ナノ粒子から視点を変え、ナノ多孔質金に着目した。そして、水による有機シラン化合物の酸化反応において優れた触媒として機能することを見いだした。また、ナノ多孔質金では、粒子のような凝集も起こらず、高い触媒活性を維持したまま、何回も再利用可能であることが分かった。触媒は化学工業において不可欠なものであり、ナノ多孔質金は高効率の触媒として、将来社会に大きく貢献するであろう。

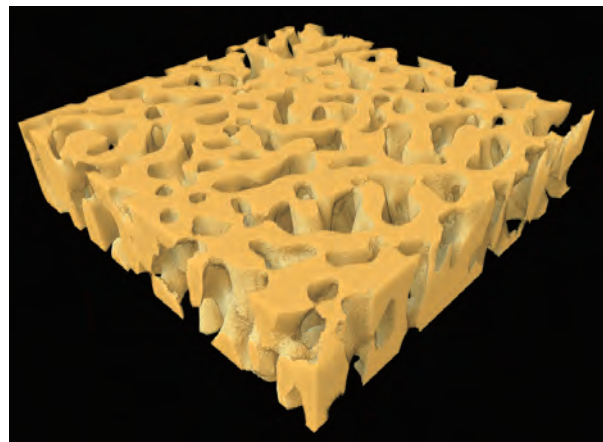
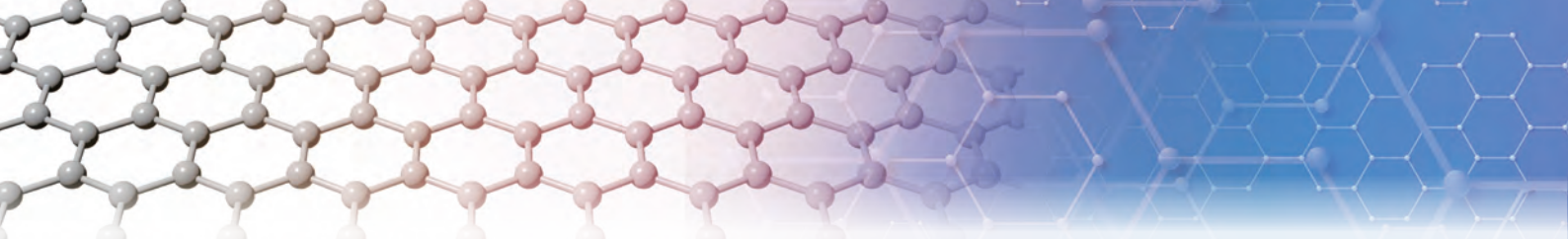


図2 透過電子顕微鏡のトモグラフィー技術によって得られた3次元ナノ多孔質金属の立体像

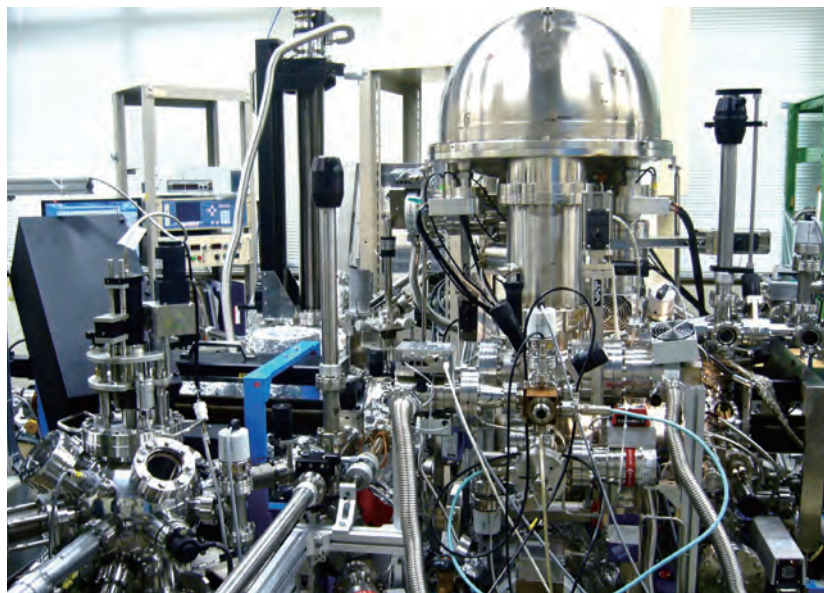


AIMRでは、このようなナノ多孔質の金属を利用し、全く新しい材料の創製にも成功している。炭素原子が蜂の巣のような六角形の格子構造をとった原子1層のシート状の物質をグラフェンと呼ぶ。2010年のノーベル物理学賞で話題となった物質でもある。このグラフェンは、電気伝導性が極めて高く、現在電子デバイスに利用されている半導体（シリコン）や金属に代わる未来の導電材料として期待されている。このグラフェンの2次元のシートに見られる電気伝導性を保ったまま3次元構造体を作る試みがなされてきたが、過去に成功した例はなかった。AIMRの研究者は、上述のような多孔質金属を鑄型として、「高い電子移動度の3次元ナノ多孔質グラフェン構造体」を作る方法を開発した。脱合金の方法で作製したナノ多孔質ニッケルの表面に化学気相成長法によってグラフェンを成長させ、最後にニッケルを溶解してグラフェンのみが残るようにした。この3次元ナノ多孔質グラフェンは2次元グラフェンの性質を維持しているため電子デバイスへの応用も期待されるが、水素燃料電池における化学反応の触媒としても使用できることがわかり、にわかに注目を集めている。燃料電池車用の水素ステーションや水素社会の実現に3次元ナノ多孔質グラフェンが貢献できるよう、さらなる研究を進めている。

N. Asao et al., *Angewandte Chemie International Edition* 49, 10093 (2010).

Y. Ito et al., *Angewandte Chemie International Edition* 53, 4822 (2014).

図3 物質中の電子が持つ3種類の物理量（エネルギー、運動量、スピン）をすべて測定できる「スピン・角度分解光電子分解装置」



### 3 磁性・スピンに関する新たな原理の解明

齊藤 英治 (PI)、高橋 隆 (PI)、相馬 清吾 (准教授)

東北大学の得意分野である磁性・スピン関連の研究においても AIMR は目覚ましい成果を産み出している。その一つがスピンと熱との相互作用を操る「スピнкаロリトロニクス」である。一般的に、熱は温度の高いところから低いところへと流れる性質があり、その流れを制御することは困難であった。そこで、AIMRの研究者とその共同研究チームは、磁気の波（スピン波）を使うことで熱エネルギーを望みの方向に移動させる基本原理を考案した。この原理を使えば熱エネルギーを熱源から離れた場所に運ぶ、熱流制御デバイスが可能になるため、次世代省エネルギーデバイスへの応用が期待されている。

もうひとつが、世界最高分解能のスピン・角度分解光電子分解装置（図3）の開発とそれを使った様々な電子状態の解明である。物質が示す電子的な性質の発現メカニズムを知るためには、その根源である電子状態を調べる必要がある。そのための強力な手法が「光電子分光」だ。物質には「光を当てると電子が外に飛び出す」という性質（アインシュタインが原理を解明した光電効果）がある。光を当てて飛び出してきた電子のエネルギーを測定し、当てた光のエネルギーと比べれば、物質の中の電子の束縛エネルギーを算出できる。この方法によって、物質中

の電子が持つ3種類の物理量（エネルギー、運動量、スピン）のうち、エネルギーと運動量を測定することができる。AIMRの研究者らは、3つ目の物理量であるスピンを検出するために、モット検出器を搭載した「世界最高分解能のスピン・角度分解光電子分光装置（spin-ARPES）」を開発。以後、このspin-ARPESを使って、超伝導体やトポロジカル絶縁体など、新奇物性を発現する様々な材料の電子状態を測定し、物性発現メカニズムを解明してきた。

パソコン等の電子機器において、スピンを使った技術が実用化すれば、実に8割の省電力になると言われている。上記の研究や、これもまたAIMR研究者がパイオニアであるトンネル磁気抵抗効果、磁性半導体などのスピンに関わる研究は、夢の省電力電子機器を実現するための大きな一歩なのである。

T. An et al., *Nature Materials* 12, 549 (2013).

Y. Tanaka et al., *Nature Physics* 8, 800 (2012).

#### 4 多機能ハイブリッド材料や錯体水素化物等の応用

阿尻 雅文 (PI)、折茂 慎一 (PI)

AIMRの研究者たちは材料科学を駆使して実用につながる革新的な材料を創り出している。

例えば、AIMRの研究チームは超臨界状態の水を反応触媒に利用して、危険な化学物質を使用することなく多機能ハイブリッド材料を創り出している。臨界点以上の温度・圧力におかれた物質は気体とも液体とも区別がつかない超臨界状態となる。研究チームは超臨界状態となった水を使って10ナノメートル以下のCeO<sub>2</sub>ナノキューブ（酸化セリウムのサイコロ型結晶）を創り出した（図4）。このCeO<sub>2</sub>ナノキューブは一般的な触媒では見られない低温での触媒活性を示し、環境浄化、廃棄物分解などの触媒への使用が期待されている。

もうひとつ、錯体水素化物を次世代蓄電池の固体電解質に使用するという道筋もAIMRが産み出した成果である。蓄電池（二次電池）は液体電解質を使用するのが一般的だが、液体では高温での安全性などに問題があり、電解質の固体化が社会から望まれている。AIMRの研究チームはナトリウムとホウ素

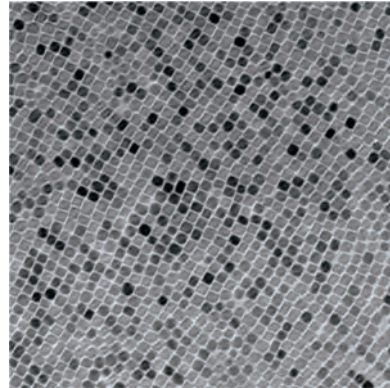


図4 超臨界水熱合成によって作製されたナノキューブの集合体

を含有する「錯体水素化物（水素を含む『塩』のような安定な物質。Na<sub>2</sub>B<sub>10</sub>H<sub>10</sub>など）のナトリウムイオン伝導率が100℃付近の温度になると、室温時の10万倍に上昇することを発見した。この高いイオン伝導率を室温で実現出来るような全固体ナトリウム二次電池を実装するため研究を続けている。

J. Zhang et al., *Nano Letters* 11, 361 (2011).

T.J. Udovic et al., *Advanced Materials* 26, 7622 (2014).

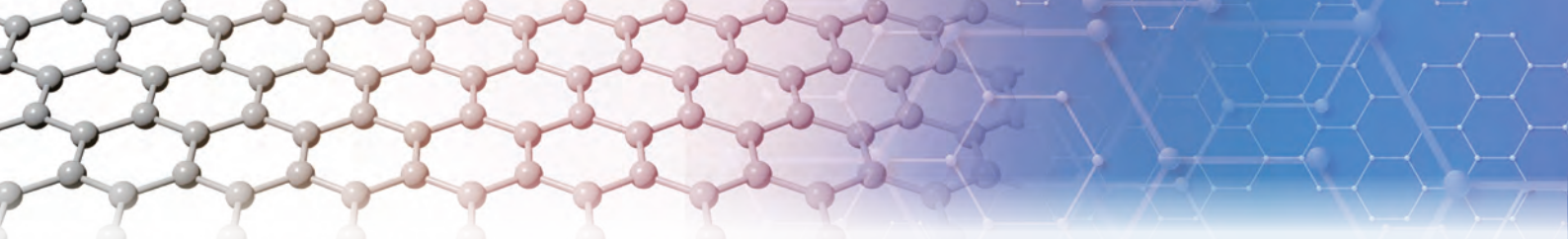
#### 5 MEMS やバイオセンシングデバイス等の構築

江刺 正喜 (PI)、T. ゲスナー (PI)、末永 智一 (PI)、林 育菁 (准教授)

AIMRはその材料科学の知見によって画期的なデバイスを創り出してきた。ここではMEMSとバイオセンシングデバイスを例として挙げたい。

MEMS（微小電気機械システム）は、顕微鏡でなければ見えないほど小さな機械システムのこと。この分野は東北大学で最も強い応用研究分野である。AIMRの融合研究チームはシリコンを用いたマイクロミラーを支える梁に、大きく変形させても壊れない金属ガラスを使った（図5）。マイクロミラーは内視鏡などにも搭載でき、光を走査して組織の断層像を撮ることができる。材料科学者とデバイス工学者の出会いが、従来では考えられなかった材料によるMEMSの開発という斬新な成果を産み出したのだ。

バイオセンシングデバイスの例としては、AIMRの研究者らが開発した電圧切替モード走査型電気化学顕微鏡（VSM-SECM）という特別な顕微鏡がある。



細胞が放出・消費する神経伝達物質や活性酸素系分子を細胞表面から検出することはとても難しいことなのだが、AIMR の研究者らはこの特別な顕微鏡を使って、非侵襲的に（細胞に触れることなく）、高解像度の形状像と電気化学像を同時に得ることに成功した。彼らの次の目標は神経伝達物質の放出に伴うニューロンの形状変化のモニタリングである。医療への幅広い応用が期待されている。

Y.-C. Lin, Y.-C. Tsai et al., *Advanced Functional Materials* 25, 5677 (2015).

Y. Takahashi et al., *PNAS USA* 109, 11540 (2012).

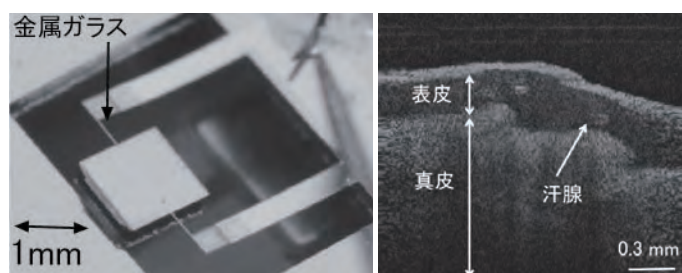


図5 金属ガラス応用マイクロミラーと撮られた皮膚断層像

## 6 ありふれた物質に革新的機能を与える酸化物エレクトロニクス

川崎 雅司 (PI)、一杉 太郎 (Junior PI)

AIMR 設立後、早期に急成長した分野が「酸化物エレクトロニクス」だ。特に、酸化物の電界効果ドーピングによる超伝導の発現と分数量子ホール効果の観測は、世界中の研究者から注目される重要な発見となった。

特定の物質を非常に低い温度まで冷却したときに電気抵抗が急激にゼロとなる現象を「超伝導」という。超伝導物質を使って電線を作れば、エネルギーロスがほとんどない送電システムが実現するため、世界のエネルギー問題の解決に大きく貢献できる。これまでに見つかっている超伝導体は超伝導状態にするために冷却する必要があり、常温でも超伝導状態になる物質の探索が続いているが、その突破口を見いだすため、新物質の探索とともに、新しい超伝導の発現手法も探究されている。そのような状況で、AIMR の研究チームは「酸化物の電界効果ドーピン

グによる超伝導の発現」という全く新しい超伝導発現手法の確立に成功したのである。

彼らは通常、絶縁体であり、電気を通さないチタン酸ストロンチウム ( $\text{SrTiO}_3$ ) の表面に、電界効果ドーピングという方法で多量の電子を注入し、超伝導状態を実現した。従来は不純物のドーピングにより電子を注入していたのだが、不純物をドーピングできる酸化物は種類が限られているため研究の広がりにも限界があった。この新手法の発見は超伝導材料探索の幅を一気に広げ、世界の材料科学者に大きなインパクトをもたらした。

また、AIMR の研究者たちは、酸化亜鉛を用いて酸化物材料では世界で初めて電気抵抗が量子力学の基本定数を用いた値の分数倍になる分数量子ホール効果を確認したほか、高輝度発光ダイオード (図6) の作製にも成功している。この2つの成功は、技術的に困難と言われた酸化物薄膜の原子レベルでの制御が鍵になっており、研究者のたゆまぬ努力によって生まれたものである。スピネル型チタン酸リチウム薄膜の原子数比を精密に制御することで、可視光透過率 70% の透明な超伝導体を創り上げたこともそのさらなる一例である。どこにでもありふれた酸化物が高性能エレクトロニクス材料として飛翔できることを証明した研究成果である。

K. Ueno et al., *Nature Materials* 7, 855 (2008).

A. Tsukazaki et al., *Nature Materials* 9, 889 (2010).

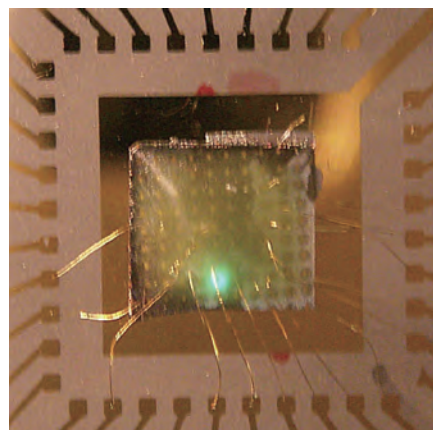


図6 酸化亜鉛材料を用いた発光ダイオードの発光

## 新たな領域創出への道

AIMR は、ここに紹介した成果を含む多様にして目覚ましい研究成果を次々に産み出してきた。

それを可能にした第一の理由は「世界レベルで優秀な研究者を多数集結できたこと」にある。ホスト機関の東北大学は世界の材料科学界を長年にわたって先導してきた歴史があり、その歴史への信頼を背景に続々と優秀な研究者が集まった。

第二の理由としては「融合研究を進めやすい環境を作り、様々な工夫を凝らした施策を展開したこと」を挙げたい。世界トップレベルの研究のための施設や装置を整備し、海外から着任した研究者のために研究・生活両面での手厚い支援体制を実施した。そして、組織内外において様々な研究イベントを実施した。年に一回、世界 15 か国以上から研究者が集う AIMR 国際シンポジウムを実施し、海外連携機関とのジョイントワークショップも多数開催して、幅広い材料科学界の中の異分野交流を促進していった。

第三の理由としては「材料科学全般に数学を導入する」という「明確な方針と野心的な戦略を定め、それを推進していったこと」が挙げられる。研究者にとって極めて魅力的かつ野心的なターゲットプロジェクトを定めて、数学と材料科学の融合研究を推進していった。現在も AIMR では「数学的力学系に基づく非平衡材料の研究」、「トポロジカル機能性材料の研究」、「離散幾何解析に基づくマルチスケール階層性材料の研究」、「ナノエネルギー材料創製のための基盤技術構築」という4つのターゲットプロジェクトが進行中である。

以上の第一から第三の理由に関わる施策は、いずれも WPI 拠点であったからこそ、為し得た施策だったといえる。そして、これらの施策に加え、AIMR は一貫して「次世代を担う若手研究者への支援と育成」に力を注ぎ続けてきたのである。

## AIMR — 未来への展望

AIMR は 10 年の歴史を通じて、異分野融合研究に挑戦する若手研究者を奨励し、支援し続けてきた。実際、通常の大学や研究機関であれば知り合う

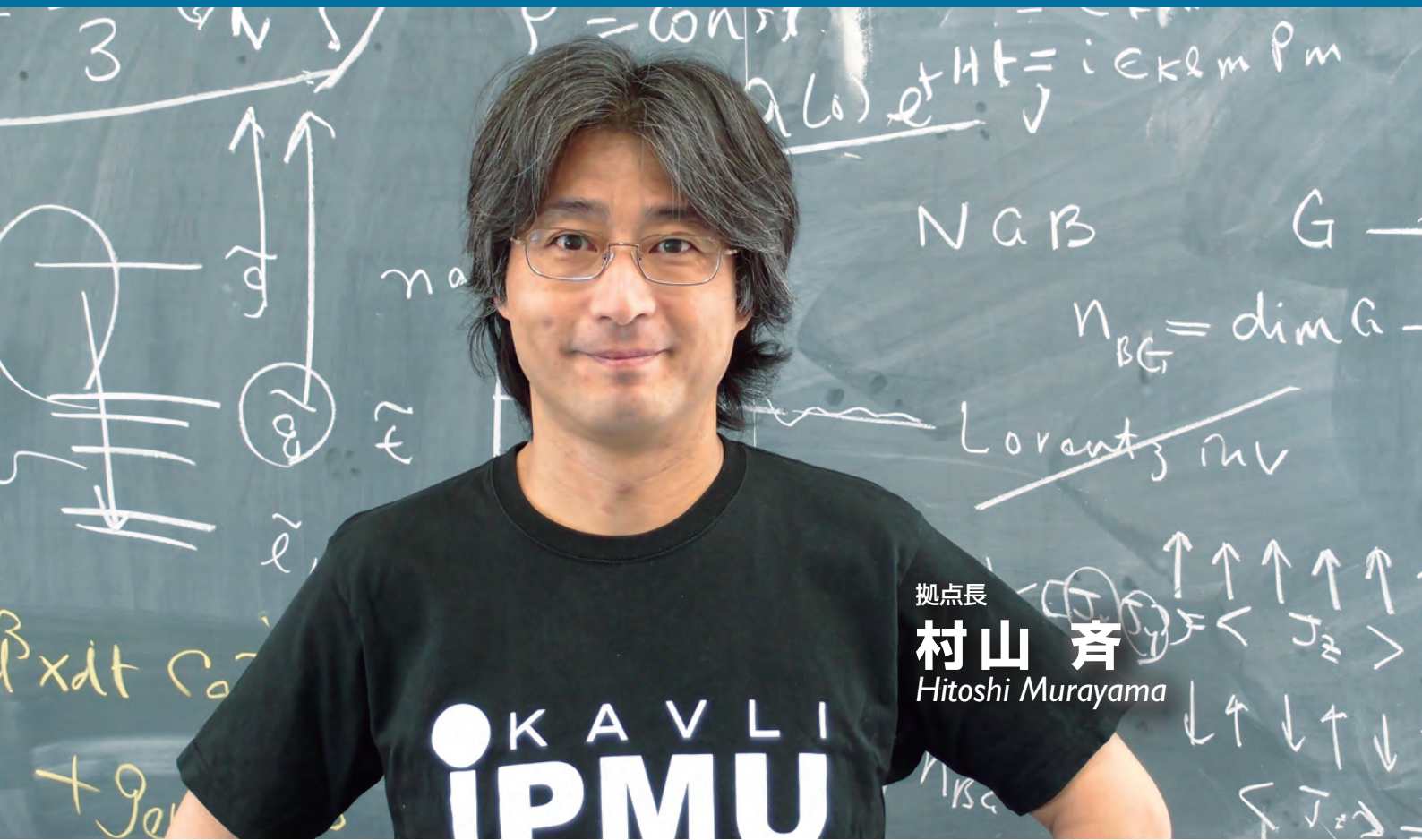


図7 AIMRの若手研究者たちと小谷拠点長。国籍、性別、分野の「壁」を乗り越えて成果が産み出されていく。

ことすら少ない、異分野の若手たちがティータイムで語り合い、ワークショップで議論をし、「分野の壁」を越えていく姿が随所で見られた。そこから産まれた研究成果を更に発展させて、将来、彼らが新しい科学を創造していくであろうことは想像に難くない。この「意欲的な若手研究者が分野の壁を越えて育ち、世界に羽ばたいていった」という事実こそが、研究拠点、AIMRの最大の成果であり、組織の「核」なのだと言えよう(図7)。

現在のAIMRの組織的目標は「数学-材料科学連携に基づいた、新機能の予見を可能とする新しい材料科学」の創生・樹立である。全く新しい学術領域、全く新しい科学を打ち立てるために、AIMRは今後も着実に研究成果を産み出しながら、未来を創り出す研究者を育てていく。

(文責：清水 修)



拠点長

**村山 斉**

Hitoshi Murayama

## 最先端の数学と物理学、天文学が 連携して宇宙の謎に挑む

2007年に世界トップレベル研究拠点(WPI)に採択され、東京大学数物連携宇宙研究機構(IPMU)として発足。その後、2012年4月米国カブリ財団による寄附を受け、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構(Kavli IPMU)となる。2015年4月現在、85名の常勤研究者が在籍しており、その半数が外国人研究者というとてもグローバルな研究環境である。他機関に所属する連携研究者や大学院学生を含め、国内外約250名の数学、物理学及び天文学の研究者が連携して宇宙の謎の解明に関わる研究を行っている。

### ■ 基本情報 (2015年度)

拠点長：村山 斉

主任研究者(PI)：19名(内 外国人研究者数5名、女性研究者数1名)

その他研究者：240名(内 外国人研究者数86名、女性研究者数10名)

研究支援員：31名

事務部門：部門長 春山 富義

スタッフ10名(内 英語対応者割合30%)

サテライト機関・連携機関：カリフォルニア大学バークレー校(アメリカ)、

ステクロフ数学研究所(ロシア)、トライアンプ研究所(カナダ)、

プリンストン大学(アメリカ)、マルセイユ天文物理研究所(フランス)、

台湾中央研究院天文及び天文物理研究所(台湾)など

URL：<http://www.ipmu.jp/ja>



## 主な研究成果

- 1 ティコ・ブラーエが16世紀に観ていた超新星の謎を、すばるで解読  
「ティコの超新星残骸」周辺のちりを観測し、当時の光の「こだま」を捉えるとともに、この超新星が Ia 型の超新星爆発だったことを示した。
- 2 銀河団の観測からつかんだ「冷たい暗黒物質」の証拠  
すばる望遠鏡の Suprime-Cam による観測から、銀河団の暗黒物質の分布が冷たい暗黒物質モデルの予言する特徴と一致するという新たな証拠を発見した。
- 3 曲面の数え上げ理論と導来圏<sup>どうらいけん</sup>  
6次元空間上の曲面の数え上げに規則性が存在するという予想を、抽象的な対象の数え上げ理論（導来圏）を導入することで解決した。
- 4 ゲージ理論における不連続パラメータの発見とその影響  
ゲージ理論におけるこれまで見逃されていた不連続なパラメータを発見した。これによりゲージ理論の相構造や双対性をより詳細に調べることができる。
- 5 明るすぎる超新星、手前に虫めがねがあった！  
～重力レンズを生み出す銀河をついに発見～  
通常の超新星より 30 倍明るく輝く超新星の増光が、手前にある銀河の重力による重力レンズ現象のため引き起こされていたことを明らかにした。
- 6 T2K実験、電子型ニュートリノ出現現象の存在を明らかに！  
今まで見つかっていなかったミュー型ニュートリノが、ある距離を飛行すると電子型ニュートリノへと変化する「電子型ニュートリノ出現現象」を発見した。
- 7 新理論が示す、ダークマターは湯川粒子に瓜二つ<sup>うり</sup>  
SIMP (Strongly Interacting Massive Particle) という粒子をダークマターの候補とする新理論を提唱。SIMP が湯川粒子とも呼ばれるパイ中間子と大変似た性質であることを示した。
- 8 第二次多胞体と赤外代数  
1990年代 Kapranov らが導入した第二次多胞体の数学理論によって 2014年に物理の理論の低エネルギー極限が説明できることを発見した。

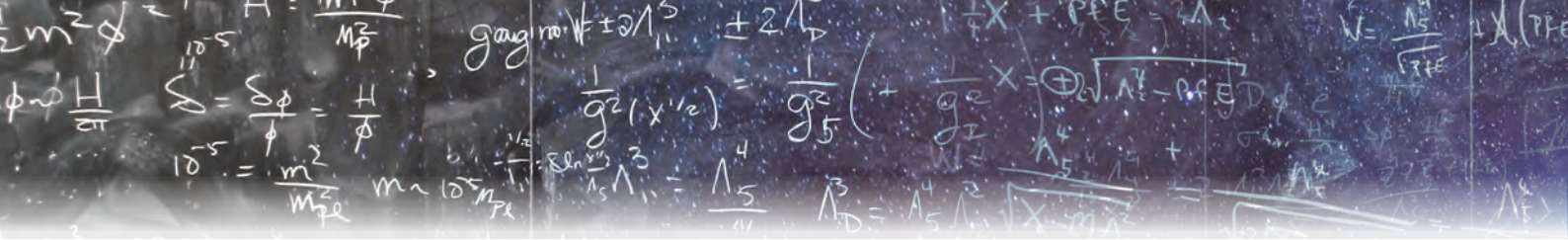
### 論文情報

総論文数	2440 報
トップ 10% 論文	27.0%
トップ 1% 論文	3.8%
国際共同研究論文	66.5%
(データベース : WoS 2007-2015 年)	



〒 277-8583 千葉県柏市柏の葉 5-1-5  
 Phone: 04-7136-4940  
 Email: inquiry@ipmu.jp





## 研究の目的

宇宙は何でできているのか？ 宇宙はどのように始まったのか？ 宇宙はどんな運命を迎えるのか？ 宇宙を支配する法則は何なのか？ 私たちはなぜこの宇宙に存在するのか？ このような疑問は人類共通の疑問である。Kavli IPMU は、数学と物理学、天文学の連携で、これら宇宙の謎の解明に挑んでいる（図 1）。

## 1 ティコ・ブラーエが 16 世紀に観ていた超新星の謎を、すばるで解読

野本 憲一 (PI)

マックス・プランク天文学研究所、Kavli IPMU、国立天文台らの研究グループは、すばる望遠鏡を用いてティコの超新星残骸の周囲で発見された可視光の「こだま」を分光観測することにより、この光が 1572 年にデンマークの天文学者ティコ・ブラーエによって肉眼で観測された超新星の爆発当時の光そのものであり、この超新星爆発が標準的な Ia 型であったことを証明した。

1572 年にケプラーの恩師、ティコが詳細に観測した新しい星は、超新星爆発であったと考えられており、「ティコの超新星残骸」と呼ばれる爆発の残骸が残っていることが知られている。しかし、この爆発がどのような爆発であったかは謎に包まれていた。

本研究では、すばる望遠鏡を用いてティコの超新星残骸から約 3 度離れた「ダストの雲」を観測した。爆発時の光は地球の方向だけではなく、あらゆる方向に向かって放たれた。まっすぐに地球に飛んできた光は今から 436 年前にティコが観測したものの、別の方向に飛んだ光はダストの雲によって反射され遅れて届くと考えられた。研究グループが今回観測した雲はまさにそのような光の「こだま」に当たる。

さらに、その光を波長ごとに分解することにも成功。その結果、ティコが当時観測した光は、Ia 型超新星が我々の銀河の中で爆発したときに放ったものであることが明らかとなった。

O. Krause et al.: *Nature*, 456, 617, 2008



図 1 Kavli IPMU 9 周年記念行事に集まった研究者の集合写真 (Kavli IPMU)

## 2 銀河団の観測からつかんだ「冷たい暗黒物質」の証拠

高田 昌広 (教授)

台湾中央研究院、バーミンガム大学、Kavli IPMU、東北大学からなる国際研究チームは、すばる望遠鏡の主焦点カメラ Suprime-Cam (シュプリーム・カム) で撮影した 50 個の銀河団の観測データを用い、銀河団領域の暗黒物質の分布 (質量密度分布) を測定した。そして、重力レンズ効果を通して暗黒物質の密度分布を求め、その分布が「冷たい暗黒物質」(Cold Dark Matter, CDM) モデルの予言する特徴と一致するという新たな証拠を発見した。

冷たい暗黒物質モデルとは、暗黒物質はニュートリノのような素粒子とは異なり、熱運動の速度が非常に小さく (“冷たく”)、また暗黒物質間あるいは通常の物質との間には重力だけが働く、というモデルである。

暗黒物質の質量分布は 2 つの指標で特徴付けることができる。一つは銀河団が含む暗黒物質の総質量。もう一つは中心付近から外縁部に移るにつれて暗黒物質の密度が減少する度合い「質量集中度」である。同じ総質量の銀河団でも、中心に質量が集中している銀河団では質量集中度が大きくなる。

冷たい暗黒物質モデルは、最も有力な暗黒物質のモデルとされている。しかし、これまでの観測では、冷たい暗黒物質モデルと一致しない、大きな質量集中度が報告がされていた。

今回の研究結果では、暗黒物質の平均的な分布が顕著な質量ピークを中心に持ち、中心から見て対称な分布を持つことが分かった。このことから、観測された銀河団の質量分布は、冷たい暗黒物質モデルの予言に非常に近いことが明らかとなった。

*N. Okabe et al.: ApJL, 769 no.2, 35, 2013*

## 3 曲面の数え上げ理論と導来圏

戸田 幸伸 (准教授)

超弦理論 (図 2) では、我々の宇宙は通常の 4 次元時空と微小な 6 次元空間から成り立つと考えられている。この 6 次元空間上に 2 次元の曲面がどのくらい存在するかを考える。このような曲面は無数に存



図 2 超弦理論は、マクロの世界を記述するアインシュタインが唱えた一般相対性理論と、ミクロの世界を記述する量子力学の統一を果たすと期待される。(絵:春山富義)

在するが、ある条件を満たす曲面の形に限って数えると有限個しかないとみなすことができる。そこで形と大きさごとに曲面の数を数えていくと、ある種の規則性が存在すると予想されていた。この問題は数学と物理双方にとって重要で面白い問題である。

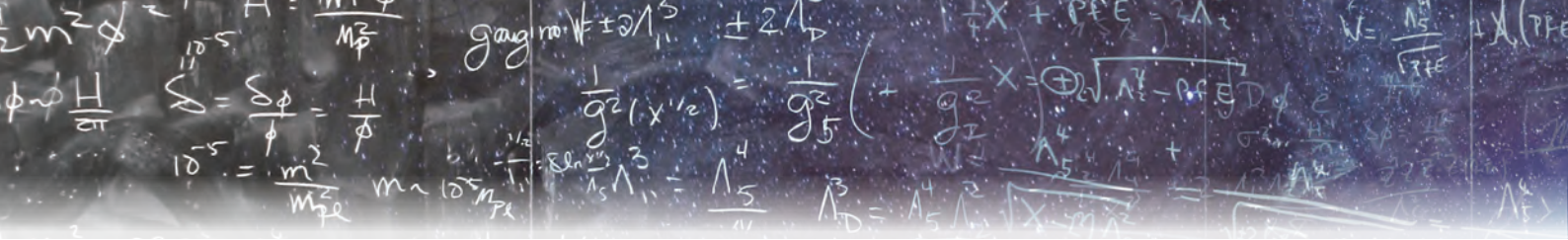
Kavli IPMU の戸田幸伸は、この曲面の数え上げに関する規則性予想を、導来圏という抽象的な数学の概念を用いて解決した。

ある空間上の導来圏とは、その空間の各点に平らな空間が載っているようなより大きな空間を考え、それらのある種の列たちを対象とする一つのコミュニティのことを指す。導来圏は元々は純粋数学における技術的動機により導入されたものであるが、現在では超弦理論における D- ブレインと呼ばれる概念を数学的に与えると考えられ、また空間それ自身の幾何的性質を反映するものとして研究が進められている。

導来圏を用いると、6 次元空間上の (目には見えにくい) ある種の不思議な対象を考えることができる。戸田はそれら不思議な対象を数えることが可能であること、さらにそれらの数え上げには規則性が存在することを証明した。一方でこの 6 次元空間上の不思議な対象を 2 次元の曲面とうまく関連付けることも可能とした。このようなアイデアを組み合わせ、上記の規則性予想を証明するに至った。

戸田はこの成果により、2014 年に韓国で開催された国際数学会議での講演に招待された。国際数学会議は、数学会最大の会合とされ 4 年に 1 回開催されている。

*Y. Toda: JAMS, 23 no.4, 1119, 2010*



#### 4 ゲージ理論における不連続パラメータの発見とその影響

立川 裕二 (教授)

自然界の基本的な力には電気と磁気の力「電磁力」、クォークから陽子や中性子を形成する力「強い力」、放射能を放出する原子核反応を起こす力「弱い力」、太陽の周りを惑星が公転するのに必要な力「重力」の4種類があるが、重力以外の3つの力はゲージ理論とよばれるもので記述される。3つの力の違いはゲージ理論のパラメータが異なることにあるが、パラメータには強さを決める「結合定数」や、ゲージ場のトポロジーに関する「 $\theta$ 角」があることが1970年代から知られている。

2013年、Kavli IPMUの立川裕二はプリンストン高等研究所のNathan Seiberg及びイスラエルのワイツマン研究所のOfer Aharonyとともに、ゲージ理論ではこれまで見逃されていた不連続なパラメータがあることを発見し、そのパラメータの影響を調べた。本研究は、近年物性物理学で盛んに研究されている「トポロジカル相」の概念を素粒子理論に持ち込んだものとも言える。物性物理学で1970年頃に開発されていたものの、半世紀近く素粒子論では使われていなかった数学の分野が活躍するのが興味深いところといえる。

O. Aharony et al.: *JHEP*, 1308, 115, 2013

#### 5 明るすぎる超新星、手前に虫めがねがあった！

～重力レンズを生み出す銀河をついに発見～  
Robert Quimby (客員科学的研究員)

Kavli IPMUのRobert Quimbyらの研究チームは、重い星が一生を終えるときに爆発して明るく輝く「超新星」が、通常の30倍の明るさで輝いた現象の仕組みを解明した。

本研究チームの観測により超新星「PS1-10afx」と地球との間にある銀河を発見。この銀河の重力によって虫めがねのように超新星の光を集める「重力レンズ現象」が起き、PS1-10afxが通常よりも非常に明るく輝いて見えていたことが明らかとなった(図3)。

PS1-10afxは、ピーク時の明るさがよく揃っていて、宇宙の距離測定にも用いられるIa型超新星であり、2010年の発見当初から、飛び抜けた明るさのために、(I)新種の超高輝度超新星なのか、(II)あるいは通常のIa型超新星が重力レンズで明るく見えたのか、論争となっていた。(II)の可能性は本研究チームによって2013年に提案された。今回の発見は(II)を裏付けるものとなった。さらに、強い重力レンズ効果を受けたIa型超新星の初めての発見ともなった。

この発見は、後述するように、ティータイム時の議論の中で生まれた。

R. M. Quimby et al.: *Science*, 344(6182), 396, 2014

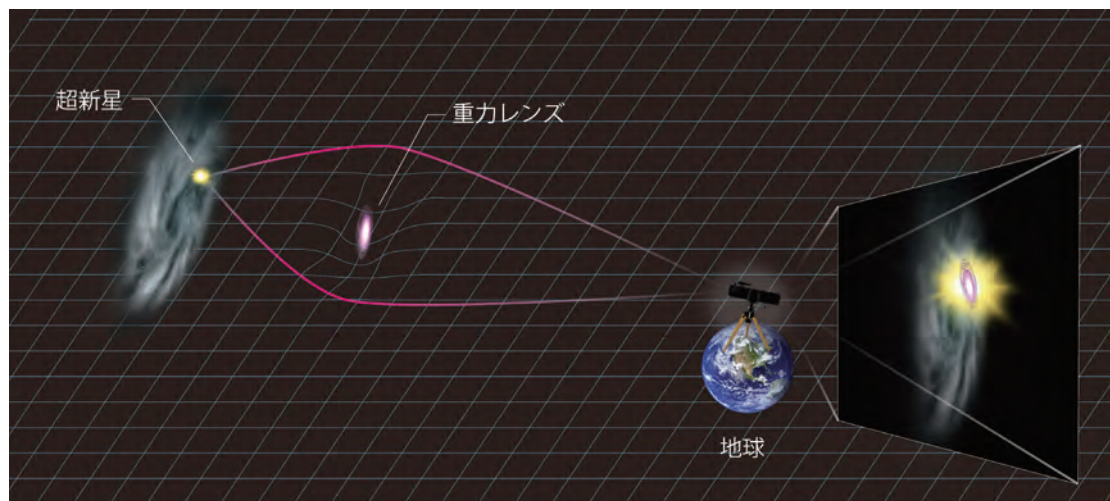


図3 超新星と地球との間にある銀河による重力が、巨大なレンズのように光を集めたと考えられる。

## 6 T2K実験、電子型ニュートリノ出現現象の存在を明らかに！

Mark Hartz (特任助教)  
Mark Vagins (教授)

T2K 実験 (東海 - 神岡間長基線ニュートリノ振動実験) 国際共同研究グループは、今まで見つかっていなかったミュー型ニュートリノが飛行中に電子型ニュートリノへ変化する「電子型ニュートリノ出現現象」を発見した。これはつまり、ニュートリノ振動で変化後のニュートリノの証拠を捉えた世界で初めての成果である。

T2K 実験 (図 4) は、大強度陽子加速器施設 J-PARC で人工的に発生させたミュー型ニュートリノのビームを、295km 離れた岐阜県飛騨市神岡町の東京大学宇宙線研究所の巨大検出器スーパーカミオカンデ (図 5) に向けて打ち出し、測定する実験である。発表された測定結果は、2010 年 1 月の本格的な実験の開始から 2013 年 4 月 12 日までの間に得られたデータを解析したもので、J-PARC からビームを打ち出した時間と同期したニュートリノ事象総計 532 個のうち 28 個で電子の生成が確認された。つまり 532 個のミュー型ニュートリノの内 28 個が、東海村から 295km 離れた神岡町までの飛行中に、電子型ニュートリノに変化 (振動) したことが証明された。

Kavli IPMU は、2013 年 5 月より T2K 実験の共同研究機関となっており、Mark Vagins や Mark Hartz などの研究者が参加している。特に、Mark Hartz は、本結果を導いたニュートリノ振動のデータ解析などに大きな貢献をしている。

T2K Collaboration: PRL, 112, 061802, 2014

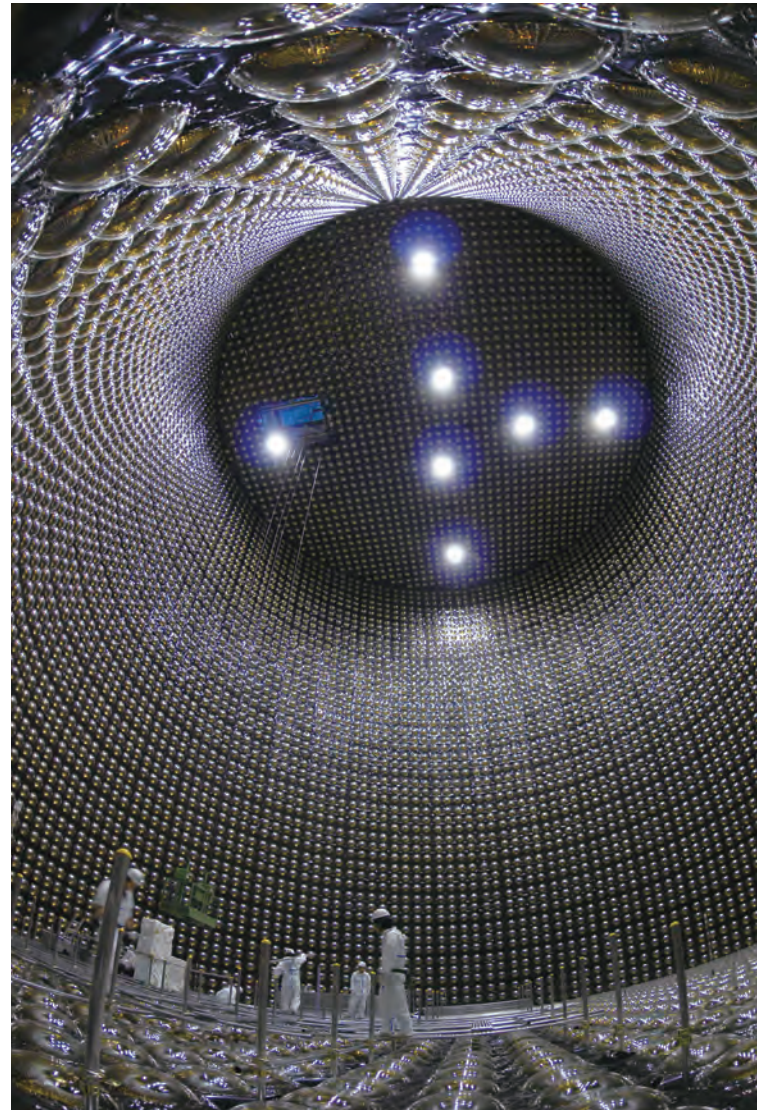


図 5 スーパーカミオカンデ検出器の内部  
2005 年 8 月 -2006 年 7 月の再建作業時の様子  
(画像提供: 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設)

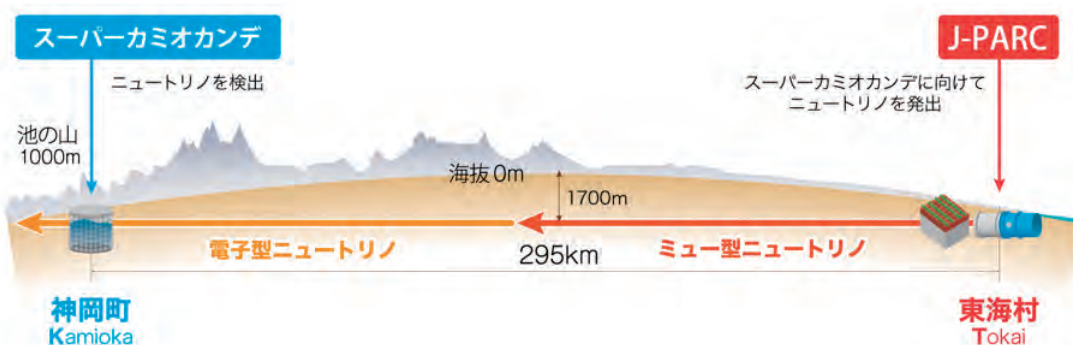
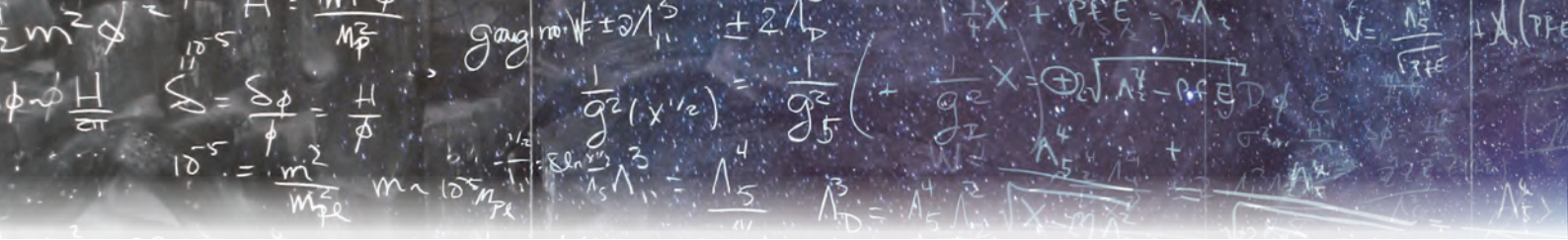


図 4 T2K 実験の概要 (画像提供: T2K コラボレーション / KEK)



## 7 新理論が示す、ダークマターは湯川粒子に瓜二つ

村山 斉 (PI)

村山斉機構長とカリフォルニア大学バークレー校の Yonit Hochberg らの研究グループは、宇宙の物質の 80% 以上を占めるとされる謎の物質ダークマターが、湯川粒子（1949 年ノーベル物理学賞受賞者の湯川秀樹博士が 1935 年に提唱したパイ中間子）とよく似た性質を持つという新しい理論を発表した。

ダークマターについては、多種多様な理論予想がされている。例えば、超対称性粒子がダークマター候補ではないかという理論や、超弦理論から説明される 4 次元を越える余剰次元を運動する粒子が、ダークマターなのではないかという理論などである。このように、多くの理論において、ダークマターは通常物質とは大きく異なる性質を持つ粒子だと考えられている。

しかしながら、本研究グループの唱えた新説は、SIMP (Strongly Interacting Massive Particle) という粒子をダークマターの候補として提唱。この SIMP (図 6) は、パイ中間子と大変似た性質であることを示した。

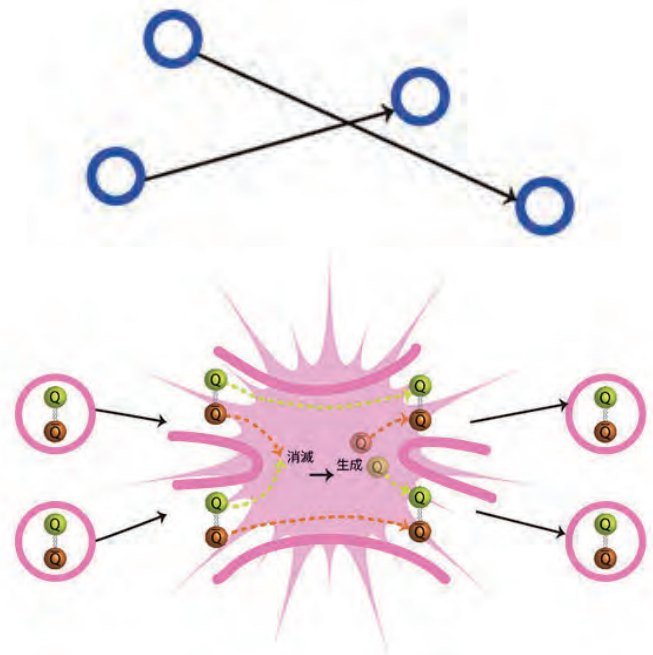


図 6 これまでの理論が予想するダークマター (上) と SIMP 粒子 (下) の違い  
 上の今までのダークマターの理論では、ダークマター同士は互いをすり抜け反応しないと考えられていた。  
 下の SIMP 粒子は、パイ中間子が相互作用するのと同種の強い相互作用をする。



図 7 ティータイムにおける研究者間の議論

パイ中間子の性質は 2008 年ノーベル物理学賞受賞者の南部陽一郎博士が 1960 年に提唱した「自発的対称性の破れ」という考え方で正確に記述される。このことから、この新理論は南部理論に基づく湯川粒子の性質が、ダークマターとしてふさわしいことを指摘したものである。数学のトポロジーの理論と深く関わっている。

Y. Hochberg et al.: *PRL*, 115, 021301, 2015

## 8 第二次多胞体と赤外代数 Mikhail Kapranov (教授)

円周は  $x^2+y^2=1$  と言う方程式で描けるように、多項式の方程式で描ける図形の研究は代数幾何学と呼ばれている。一方それより単純な図形である多角形や多面体等の三角形の分割の理論は組合せ論的幾何と呼ばれている。

トピカルと呼ばれる方法で多項式方程式を読み直すことにより、代数幾何学の問題から組合せ論的な情報を読み取ることができる。

このような関係は 1990 年代 Kapranov 等による高次元の超幾何微分方程式に対する第二次多胞体の研究の過程で発見された。それが 2014 年になって Kapranov 等は更にその第二次多胞体が物理の量子場の理論における赤外線極限に対応する研究（例えばリー環構造の記述）に有効である事を発見した。

M. Kapranov et al.: *arXiv:1408.2673*, 2016

## 融合研究と国際化

Kavli IPMU ではティータイムを設けている。ティータイムは毎日平日午後 3 時から行われている（図 7）。異なる分野の研究者がリラックスしたムードで議論する機会であり、その場で新たなアイデアがひらめく可能性を持っている。Robert Quimby らの 30 倍明るい超新星の増光の謎を解明した研究は、このティータイムで天文学者と物理学者、数学者が議論したことをきっかけに進められた研究であり、ティータイムが融合研究の推進に役立っているという良い実例である。

ティータイムの特徴に加え、Kavli IPMU は非常に国際的な研究環境であることも特徴である。2016 年 3 月末現在、常勤の研究者、スタッフ、大学院生、

約 150 名と 100 名を超える連携研究者を抱える機構に成長した。ファカルティ、ポスドク研究員のうち多くが外国人研究者である。Kavli IPMU で各研究分野の国際研究集会を毎年十数回開催しており、セミナーや研究打合せで年平均約 800 名のビジターが来訪、その半数以上が外国人研究者である。

さらに、ポスドクの採用は欧米の公募タイミングに合わせた国際標準方式により行っているほか、給料体系も年俸制にするなどして、国際基準に合わせている。このようなことが可能になったのは、Kavli IPMU が WPI 拠点であったからこそである。

## 村山 斉機構長が国連本部でスピーチ 「現在から未来に続く平和と発展のための科学」

村山斉機構長は、2014 年 10 月 20 日にニューヨークの国連本部経済社会理事会会議場で開催された「平和と発展のための科学」というイベントでスピーチを行った（図 8）。このイベントは、欧州原子核研究機構（CERN）の設立 60 周年を記念する特別行事であり、国際連合経済社会理事会の理事長が主催、フランスとスイスの政府常駐代表を共同スポンサーとして実施されたものである。

村山機構長はノーベル賞受賞者の Carlo Rubbia、前国連事務総長 Kofi Annan に続いてスピーチし、科学という共通の目標に向けて人々が一致団結する場を作る必要性を訴えた。さらに、その場所の一つになるように数物連携宇宙研究機構という名前をつけたという Kavli IPMU の建設精神に触れ、世界中に Kavli IPMU を紹介した。

スピーチ内容の日本語訳

<http://www.ipmu.jp/ja/node/2052>



図 8 村山機構長の国連スピーチでの様子  
（画像提供：UN Photo / Evan Schneider）

（文責：小森 真里奈）



拠点長

**北川 進**

Susumu Kitagawa

## 細胞科学と物質科学の融合により 新たな知の創造を目指す研究拠点

iCeMS の使命は、新しい化学物質を創り出し、それらによって細胞の機能の解明や操作を行うことである。さらに、細胞機能にアイデアを得た優れた機能を持つ材料を創り出し、これらを活用して病気の診断・治療や環境汚染物質の浄化などに貢献することを目標としている。

iCeMS での研究は単一の既存の研究領域ではないため、生物学・化学・物理学・工学・数学といった複数の異なる分野からの視点を掛け合わせ（学際融合研究）、研究者がお互い刺激しあってアイデアを出し、協力して取り組むことで研究を進めている。

### ■ 基本情報（2015 年度）

拠 点 長：北川 進（2012 年まで中辻 憲夫）

主任研究者（PI）：25 名（内 外国人研究者数 6 名、女性研究者数 3 名）

その他研究者：149 名（内 外国人研究者数 44 名、女性研究者数 34 名）

研究支援員：124 名

事 務 部 門：部門長 富田 眞治

スタッフ 27 名（内 英語対応者割合 50%）

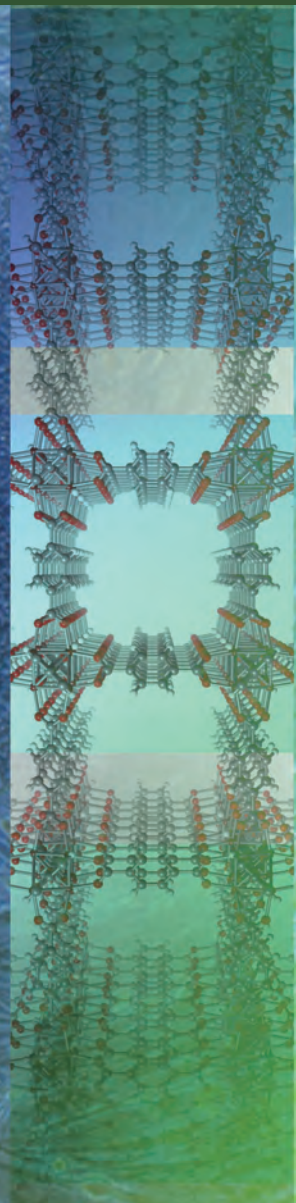
サテライト機関・連携機関：岐阜大学、National Centre for Biological Sciences (NCBS) (India)、Institute for Stem Cell Biology and Regenerative Medicine (inStem) (India)、UCLA California NanoSystems Institute (CNSI) (USA)、Heidelberg University (Germany)、Vidyasirimedhi Institute of Science and Technology (VISTEC) (Thailand) など

URL：http://www.icems.kyoto-u.ac.jp



主な研究成果

- 1 光操作による神経幹細胞の運命の制御に成功**  
 転写因子 Mash1 の発現が振動すると神経幹細胞は維持されて増殖するが、一定量で持続するとニューロンに分化する。このような Mash1 の発現動態を光操作することで神経幹細胞の増殖や分化の制御が可能になった。
- 2 遺伝情報の提示法(エピジェネティクス)の異常による発がん機構の解明**  
 がん細胞ではエピジェネティクスと呼ばれる遺伝子の使い方に異常が見られる。しかし、この異常の意義は不明な点が多い。iPS 細胞技術を応用して、遺伝子の使い方の異常ががん化の原因となることを示した。
- 3 細胞膜機能を持つ多孔性材料の開発**  
 多孔性金属錯体という、ナノメートルの孔が無数に存在する物質を巧みに設計することで、あたかも細胞膜中の膜タンパク質のように、ガス分子やイオンを「選択」的にとりこみ、「濃縮」することが可能となった。
- 4 健康維持の一助となる ABC 蛋白質の仕組みの解明**  
 ABC 蛋白質は、細胞内に蓄積した有害な脂溶性物質の排除や善玉コレステロール形成により健康を維持している。ABC 蛋白質の働く仕組みを 3 次元構造解析や 1 分子イメージング解析によって明らかにした。
- 5 多能性幹細胞から機能的な卵子の作製に成功**  
 本研究では、ES 細胞や iPS 細胞から試験管内で始原生殖細胞様細胞を誘導し、それらを胎児卵巣体細胞と凝集培養しマウスに移植することで、健康な赤ちゃんの誕生に貢献する卵子を作成することに成功した。
- 6 幹細胞のプログラミングのための化学ツールの開発**  
 再生医療を実現するには、幹細胞などの細胞を自由自在に分化させ、欲しい性質も持たせる技術が必要である。iCeMS では化学と細胞生物学を融合して、細胞を操る物質を多数開発した。



論文情報

総論文数	1477 報
トップ 10% 論文	25.4%
トップ 1% 論文	4.3%
国際共同研究論文	22.2%
(データベース : WoS 2007-2015 年)	



〒 606-8501 京都府京都市左京区吉田牛ノ宮町  
 Phone: 075-753-9753  
 Email: info@icems.kyoto-u.ac.jp

背景はヒトの iPS 細胞とジャングルジムのような構造を有する多孔性金属錯体



## 研究の背景

生命現象は、突き詰めれば化学反応として説明できる。そして、化学で本当に説明できるならば、細胞の機能を化学物質で模倣・再現することができるはずである。

細胞の機能を化学で説明しようとする試み自体は、決して新しいことではない。歴史ある学問分野である「生化学」ではタンパク質を出発点として細胞の機能を分子レベルで理解しようとし、「分子生物学」では DNA から細胞の機能を理解しようとしてきた。

さらに、「細胞生物学」では、細胞自身を出発点として生物を理解することを目指して発展し、胚性幹 (ES) 細胞や人工多能性幹 (iPS) 細胞の研究へと花開いた。タンパク質や DNA から細胞の営みを理解する試み、細胞を起点として生物を理解する試みは、共に医薬品産業やバイオテクノロジー産業に貢献してきている。

このような歴史の中で、iCeMS が新しく着目しているのは、「細胞生物学」で細胞全体を見る大きな (マクロスケールの) 視点と、「生化学」や「分子生物学」でタンパク質や DNA を見る小さな (ミクロスケール) の視点のどちらでもなく、その中間に位置する「メゾスケール」の視点である。この数十~数百ナノメートル (1 ナノメートルは 10 億分の 1 メートル) 程度の領域は生命と物質を分ける境目である。この境界領域を探究すれば、細胞の生命活動を物質の化学反応として理解することができ、最終的に物質で生命活動を再現して、病気の治療・健康増進などに貢献できるのではないかと考えている。

## 研究の目的

iCeMS の目的は、この生命と物質を分ける手付かずの境界領域を研究し、新たな知を創造することである。具体的には新しい化学物質を創り出し、それらによって細胞の機能の解明や操作を行うことである。さらに将来的には、細胞機能にアイデアを得た優れた機能を持つ材料を創り出し、これらを活用して病気の診断・治療や環境汚染物質の浄化などに貢献することを目標としている。

この課題に取り組むため、iCeMS では生物学・化学・物理学・工学・数学等の様々な学問分野の英知を融合するアプローチを用いた。細胞は、数多くの化学物質を作り出し、これらを巧みに相互作用させることで生命活動を行っている。それらの化学物質の挙動は時間的にも空間的にも常に変化している。このため、様々な可視化技術やモデル化技術、そして複雑な細胞の営みを解析する物理や化学の手法を開発し、それを基に細胞機能を制御する化学物質を創製することが求められる。本拠点が取り組む代表的な研究領域は、A. 細胞核インフォメーション、B. 膜コンパートメント、C. 細胞コミュニケーションに大きく分類することができる (図 1、2)。

## 研究成果の紹介

### A. 核インフォメーション

細胞核は、細胞の情報の記憶とその利用を司る。iCeMS では、細胞の分化・初期化・再構成に伴う細胞核内構造の動的変化と遺伝情報を読み出すメカニズムを明らかにし、光応答性分子や高機能性分子を用いて核内の情報変換を可視化・操作する技術を開発している。



図 1 物質と生命の境界領域であるメゾスケール領域 (長さの尺度で  $10^9\text{m} \sim 10^6\text{m}$ )

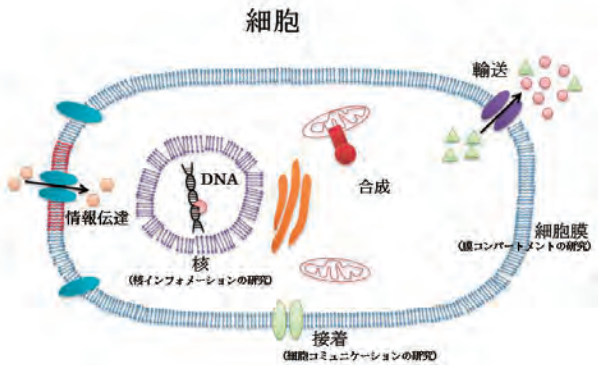


図2 細胞のモデル、機能と iCeMS での研究領域

## 1 光操作による神経幹細胞の運命の制御に成功

影山 龍一郎 (PI)

神経幹細胞は、増殖しつつ多様なニューロンに分化する能力を持つ。しかし、この能力を自在に制御する技術はいまだ確立していない。遺伝子発現を単一細胞レベルでイメージング解析したところ、転写因子の一つである Mash1 は神経幹細胞では発現が振動するのに対して、分化しつつあるニューロンでは一定量で持続することが分かった。さらに光を用いて Mash1 の発現を人為的に操作したところ、振動によって神経幹細胞が増殖し、一定量で持続させるとニューロン分化が誘導されることが分かった。この光操作技術によって神経幹細胞の運命を自在に制御することが可能になり、今まで困難であった内在性の神経幹細胞の制御に向けて道が開かれた。成体脳にも神経幹細胞は内在するが、大部分は静止状態である。今後、この光操作技術を使って内在性の神経

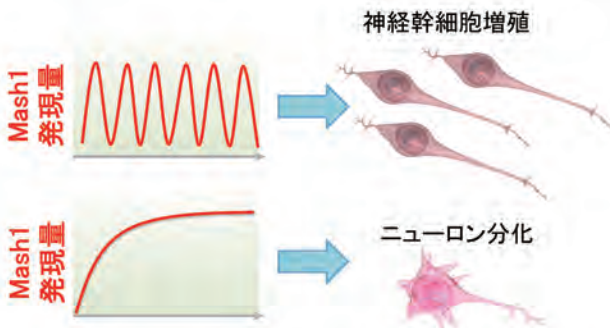


図3 光反応性タンパク質 GAVPO を利用して、青色光照射で Mash1 の反応をオンに、暗条件でオフにすることが可能になった。この光操作法によって Mash1 の発現を振動させると神経幹細胞は増殖し、持続的に発現させるとニューロンに分化した。

幹細胞の増殖やニューロン分化を活性化させることで、各種神経疾患の治療への応用が期待される(図3)。  
Kageyama, R et al., Science 342, 1203 (2013)

## 2 遺伝情報の提示法(エピジェネティクス)の異常による発がん機構の解明

山田 泰広 (教授)

がん細胞は遺伝子の傷が蓄積して生じることが知られている。一方で、がん細胞には遺伝子の傷のみならず、エピジェネティクスと呼ばれる遺伝子の使い方の異常が観察される。iPS 細胞技術の開発により、細胞初期化遺伝子(山中因子)を一時的に強制発現させることで、エピジェネティクスを積極的に変化させることが可能となった。私たちは、マウス個体レベルで iPS 細胞を誘導できるシステムを開発した。このマウス生体システムを利用して、iPS 細胞化に関わるエピジェネティクス変化を一時的に誘導したところ、ヒト小児がんに類似した腎がんが発生した。さらに、このがん細胞を完全に iPS 細胞化することで、がんの性質が失われることを見いだした。エピジェネティクスの異常によりがんが生じうることを示すとともに、エピジェネティクスを標的としたがん治療戦略開発が有用であることが示唆された(図4)。

Yamada, Y et al., Cell 156, 663 (2014)

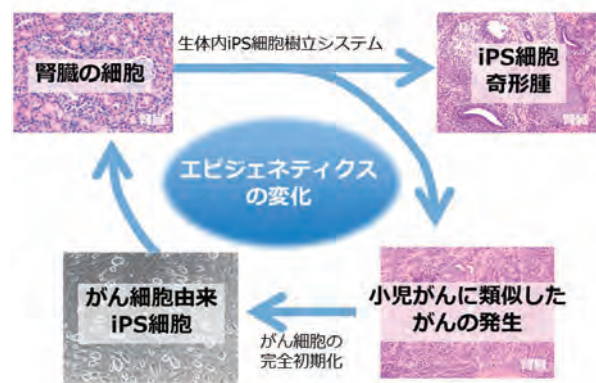


図4 エピジェネティクスの変化によるがんの発生と消失

## B. 膜コンパートメント

細胞膜領域は情報や物質の選択と濃縮、つまり細胞の内から外、外から内へのシグナル変換、エネルギー変換、物質交換を司る。iCeMS では、それらの反応が膜領域で制御されるメカニズムを明らかにし、環境応答性を有する分子・分子集合体を用いて、

光・磁場・熱などにより自在に変換反応を引き起こす技術を開発している。

### 3 細胞膜機能を持つ多孔性材料の開発

北川 進(PI)、古川 修平(准教授)

細胞膜中の膜タンパク質は、分子やイオンの「選択的」な輸送により、細胞内の物質バランスを制御している。この分子選択性を化学的に理解し、人工材料に応用することで、これまでは不可能だった数々の機能の実現に成功した。私たちは、多孔性金属錯体(ジャングルジムのような構造体)というナノサイズの無数の孔をもつ材料をデザインし、創り出した。この構造体に対し分子レベルでの修飾を化学的に施すことで、あたかも膜タンパク質のように、構造を変える物質を合成することに成功した。つまり、必要な分子が来たときのみその構造を変え、選択的に孔の中に取り込むことができる。産業応用として重要になるであろう一例として、この仕組みを使って、実際に一酸化炭素だけを取り込む物質の開発に成功した。

また、多孔性金属錯体はマイクロメートルサイズの結晶であり、微粉末として得られることが一般的であるが、メゾ領域での合成制御を行うことで、微粉末以外の様々な形に成形することが可能になった。例えば、中空構造をもつ箱型に成形することで、まるで細胞膜のように分子選択性によって中空構造内の物質バランスを制御することに成功し、有機分子の分離効率向上を達成した(図5)。

Furukawa, S et al., *Science* 339, 193 (2013)

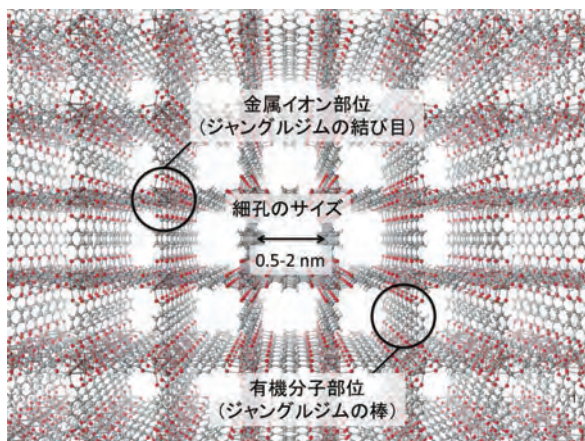


図5 ジャングルジムのような構造を有する多孔性金属錯体

### 4 健康維持の一助となる ABC 蛋白質の仕組みの解明

植田 和光(PI)

私たちの身体をつくる 60 兆個の細胞は、脂質でできた細胞膜で囲まれている。ABC 蛋白質と呼ばれる膜蛋白質ファミリーは細胞膜上で働いており、細胞にとって不要な物質を排出している。iCeMS 内の複数のグループの共同研究によって、ABC 蛋白質の作用の仕組みを明らかにした。

ABC 蛋白質のひとつ MDR1 は、様々な脂溶性の有害物を細胞外へ排出しヒトの健康維持の一助となっている。しかし、排出ポンプ MDR1 がどのような仕組みで働いているのか、長い間わからなかった。iCeMS は、蛋白質の 3 次元構造を明らかにすることによって、排出ポンプ MDR1 の作用の仕組みを解明することに成功した。また、同じく ABC 蛋白質のひとつ ABCA1 は、善玉コレステロール(HDL)形成の鍵を握っており、細胞内に過剰に蓄積したコレステロールを細胞外へ排出しヒトの健康維持の一助となっている。細胞膜上の ABCA1 の動きを特殊な顕微鏡を用いて可視化することによって、ABCA1 の作用の仕組みを解明した。

ヒトでは 48 種類の ABC 蛋白質が働いており、それぞれの異常は、動脈硬化、糖尿病、痛風、アルツハイマー病など様々な病気と関係している。

ABC 蛋白質の構造と作用機構を明らかにすることは、これらの病気の予防や治療に役立つと期待される(図6)。

Ueda, K et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111, 4049 (2014)

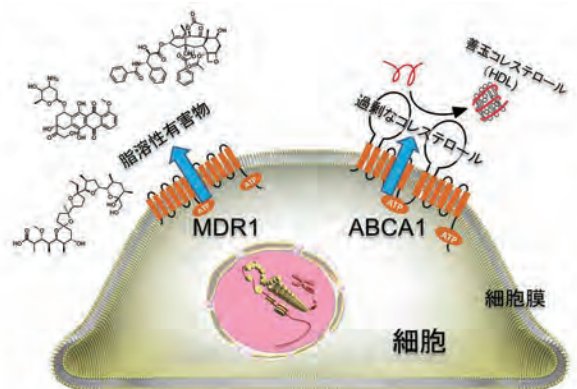


図6 ABC 蛋白質は、脂溶性有害物や過剰なコレステロールを細胞外へ排出し、ヒトの健康維持の一助となっている。

## C. 細胞コミュニケーション

多細胞生物の幹細胞から組織分化に至る過程は、細胞と細胞、細胞と物質との相互作用によって制御されている。iCeMSでは、それらのメカニズムを明らかにし、その足場となる材料を分子レベルでデザインし、脳・心筋・生殖器などの機能構造を自在に再構築する技術を開発している。

### 5 多能性幹細胞から機能的な卵子の作製に成功

斎藤 通紀 (PI)

生殖細胞は、精子及び卵子に分化し、新しい個体をつくり、新しい世代に遺伝情報を伝える細胞系譜である。生殖細胞の発生過程の解明は、生殖工医学・幹細胞生物学・再生医学の発展に貢献すると期待される。

iCeMSではこれまでマウスをモデル動物として生殖細胞の形成機構を研究してきた。その成果に基づき、培養ディッシュ上で、多能性幹細胞であるES細胞やiPS細胞から、精子や卵子の起源となる始原生殖細胞に酷似した細胞（始原生殖細胞様細胞）を誘導することに成功した。誘導された始原生殖細胞様細胞は、生殖細胞を欠損するマウス新生仔の精巢に移植すると、精子に分化し、それら精子は健康なマウスの産出に寄

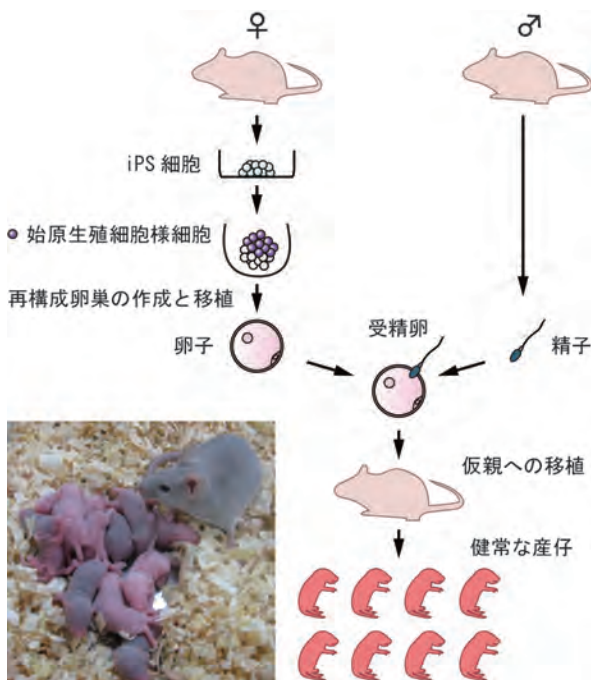


図7 多能性幹細胞を用いて作製した卵子から健康な仔マウスが誕生

与した。さらに、メスES/iPS細胞由来の始原生殖細胞様細胞と胎児卵巣体細胞の凝集培養塊（再構成卵巣）をマウスに移植すると、始原生殖細胞様細胞は成熟卵子に分化し、それらを受精させ仮親に移植すると健康なマウスが産出された。これらの成果は培養ディッシュ上で生殖細胞の発生過程を再現できることを示した初の成果である（図7）。

Saitou, M et al., *Science* 338, 971 (2012)

### 6 幹細胞のプログラミングのための化学ツールの開発

上杉 志成 (PI)

再生医療を実現するには、幹細胞などの細胞を自由自在に操る技術が必要である。iCeMSでは化学と細胞生物学を融合して、細胞を操る物質を開発した。

iPS細胞を使った再生医療では、iPS細胞を大量に準備しなければならない。iCeMSはiPS細胞を大量に増やすための物質を開発し、現在は企業と自動培養技術にも着手している。次の段階は、増殖させたiPS細胞を有用な細胞に効率よく分化させることである。iCeMSは7万個の化合物のコレクション（化合物ライブラリー）を保有しており、その中からiPS細胞を心筋細胞や膵β細胞に分化させる化合物を発見した。これらの化合物は世界の研究者に利用されている。

再生医療の問題のひとつは、分化細胞の移植効率の低さである。iCeMSは、移植細胞が死滅する「アノキス（細胞剥離による細胞死）」という現象に着目し、それを抑制する化合物を開発した。この化合物は企業に提供され、移植効率を改善する化合物として実用化が期待されている。また、再生医療において、iPS細胞が残ったまま移植すると、腫瘍ができる可能性があるが、iCeMSの化学者と生物学者が協力し、残存iPS細胞を除去する化合物を開発することに成功した。

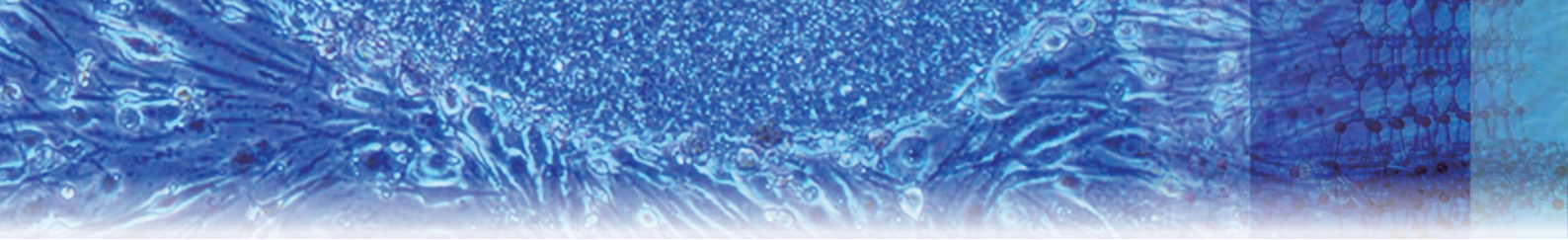
iCeMSの融合研究が生み出したこれらの化合物は、再生医療や細胞学研究の化学ツールとなるだろう。

Uesugi, M et al., *Cell Reports* 2, 1448 (2012)

## WPI だからできたこと

### (1) 学際融合研究環境の実現

現代社会が抱える、地球温暖化、環境汚染、病気、老化などの複雑な課題は、一つの学問分野からのア



プローチでは十分ではない。複数の異なる分野からの視点を掛け合わせ、学際融合的な新しいアプローチを試みることで、今までにない革新的な解決法が生まれてくる(図8、9)。

iCeMSでは設立当初から細胞科学と物質科学の融合を目指して研究組織や施設を構築してきた。京大内の従来の部局では、研究者は同じ研究室以外の研究者とは顔を合わせる機会、気軽に研究の話をする機会は少なかった。そこで、研究施設自体のデザインを学際的な設計とした。居室はオープンオフィスで個室はなく、周りには異分野の研究者がいつも一緒にいる。実験設備もオープンラボとして共有している。このような環境を整えた結果、所属している研究室・専門分野に関わらず、構成員みんなが顔見知りになり、自分には難しいけれど、その専門の研究者なら簡単に解決できるようなつまずきを気軽に相談したり、測定を依頼したりできるような雰囲気が醸成された。また、挨拶ついでのちょっとした雑談から、違った視点での物の見方に気付かされ、研究のヒントを得ることもある。

このような環境整備に加えて、年一度構成員がほぼ全員集まって行く、一泊二日の研究合宿(リトリート)での更なる融合を促進している。そこでは、共通の課題に対して、それぞれの専門の立場から解決策のアイデアを議論したり、若手研究者のための学際融合プロジェクトを公募したりすることで、研究者同士がお互いの分野の違いを理解し、認めあい、知的に刺激しあい、新しいヒラメキを生み出すことができる。

この結果、iCeMSではこれまで1,477件の論文を発表してきたが、537件は複数の研究室の学際融合研究によるものである。また、2,000種以上の合成化合物を作製して様々な分野に供し、学際融合研究に貢献している。



図8 実験を行う研究員

## (2) 真の国際環境の実現

国際化にとって重要なことは日常的に接する外国人の数(全体に占める比率)が一定以上でないといふことである(これは電話やインターネットの場合と同じで利用者が全体の15%くらい(クリティカルマス)を超えないと爆発的な普及には至らないといわれている)。京大全体の留学生の比率が7~8%であるのに対し、iCeMSでは外国人は現在44名(全体の30%)であり、会議もセミナーも全て英語、通常文書も多くは日英併記となっている。事務職員の半数はバイリンガルであり、各研究室にはバイリンガルの秘書を配置している。学生を含めた所属研究者は日常的に外国人と接するためコミュニケーション能力が向上し、更に深い議論と理解を可能とするプラスの相乗効果を生んでいる。また、外国人が快適に日本で住めるためのアシスタントとして外国人研究者支援室を設置した。以上の結果として、言葉や文化による隔たりをなくし、国籍にかかわらず自由に研究できる環境(真の国際化)を作り上げた。

## (3) 研究者の研究への専念環境の構築

既存の大学院や研究所では研究以外に配分できる資金が少ないため、研究とは直接関係のないことまで教員(特に若手)が行っているのが実情である。iCeMSではWPIならではの予算を活用し、以下のような環境を整備してきた。

- ・ 共通設備管理室の設置：iCeMSには多数の実験装置があるが、手間のかかるこれらの保守管理を専門の技術員が担当している。

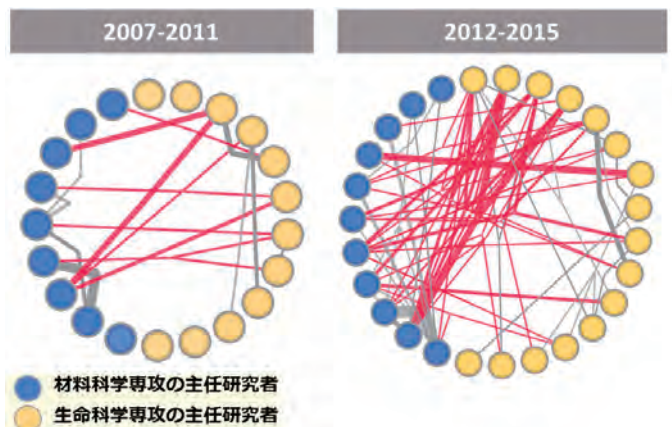


図9 主任研究者(PI)間の学際融合研究の推移

・研究支援者の配置：数億円規模の大型予算を獲得するには、相応の経験を積んだ支援者が必要である。iCeMSでは細胞科学系と材料科学系を専門とする支援員を特任教授として採用し予算申請書作成支援を行い、大型競争的資金の獲得に貢献している。

#### (4) 社会へ向けたアウトリーチ活動の展開

iCeMSでは科学コミュニケーショングループ(SCG)という研究グループを設立当初から設置し、科学者が一方的に教えるだけでなく、一般市民との対話を通じて「社会の中の科学」という視点を持つことを重視している。実際にサイエンスカフェ、「幹細胞研究やってみよう!」という高校生・高校教諭のための講義・実験クラス(2014年度文部科学大臣表彰科学技術賞受賞)や、分野の異なる若手研究者グループによる「学びのカラクリ」という高校生のためのアクティブラーニング講義(iCeMS Caravan: 長崎県立五島高等学校での模様がNHKで放映)を通じて、最先端研究の内容や考え方を社会に伝えるプログラムを開発した。また、iCeMSで開発した合成化合物の構造や細胞の顕微鏡写真を、服飾デザインに応用した展示会を開催(iCeMS Art Exhibition: 京都新聞等で紹介)し、一般市民に科学を身近なものに感じてもらうための企画を行っている(図10)。

#### (5) 「世界から目にみえる」研究組織への取り組み

iCeMSは研究成果を広く世界に伝えるため、国際企画・広報掛という事務組織を設置している。ここでは優れた研究成果を発信するためのプレスリリース原稿作成サポート、EurekAlert!などの国際プレスリリース配信サービスを用いた効果的な国際広報活動を行っている。また、大規模公開オンライン講座のひとつであるedX(MIT及びハーバード大学を始め20以上の世界のトップクラスの大学が参加するコンソーシアム)に日本で最初に参加し、上杉志成副拠点長が英語無料講義「The Chemistry of Life」を世界配信した(受講登録者:約26,000名)。iCeMSの学際融合研究の成果や考え方を、世界にむけて発信することで、世界中の研究者が働きたいと思えるような研究拠点形成に貢献している。



図10 2015年12月のWPI合同シンポジウムで講演する山極壽一総長

#### 将来への展望

iCeMSのこれまでの研究は「細胞機能を化学で理解し、制御する物質を創製することは可能か」であった。今後はこの研究を継続しつつ、「細胞機構を物質で再現することは可能か」という研究を進める。

ノーベル物理学賞学者であるRichard P. Feynman教授の有名な言葉がある。「What I cannot create, I do not understand. (本当に理解したものは作れるはずだ。作れないならば、本当に理解していない。)」つまり、真の理解は創造することによって検証できるということであり、本当に細胞機能が理解できているなら、物質によって細胞機能を再現することが可能なはずである。理解と創造を同時に進行させることによって、理解度を確認しながら研究を推進し、将来的には以下のような物質・技術の創製を目指す。

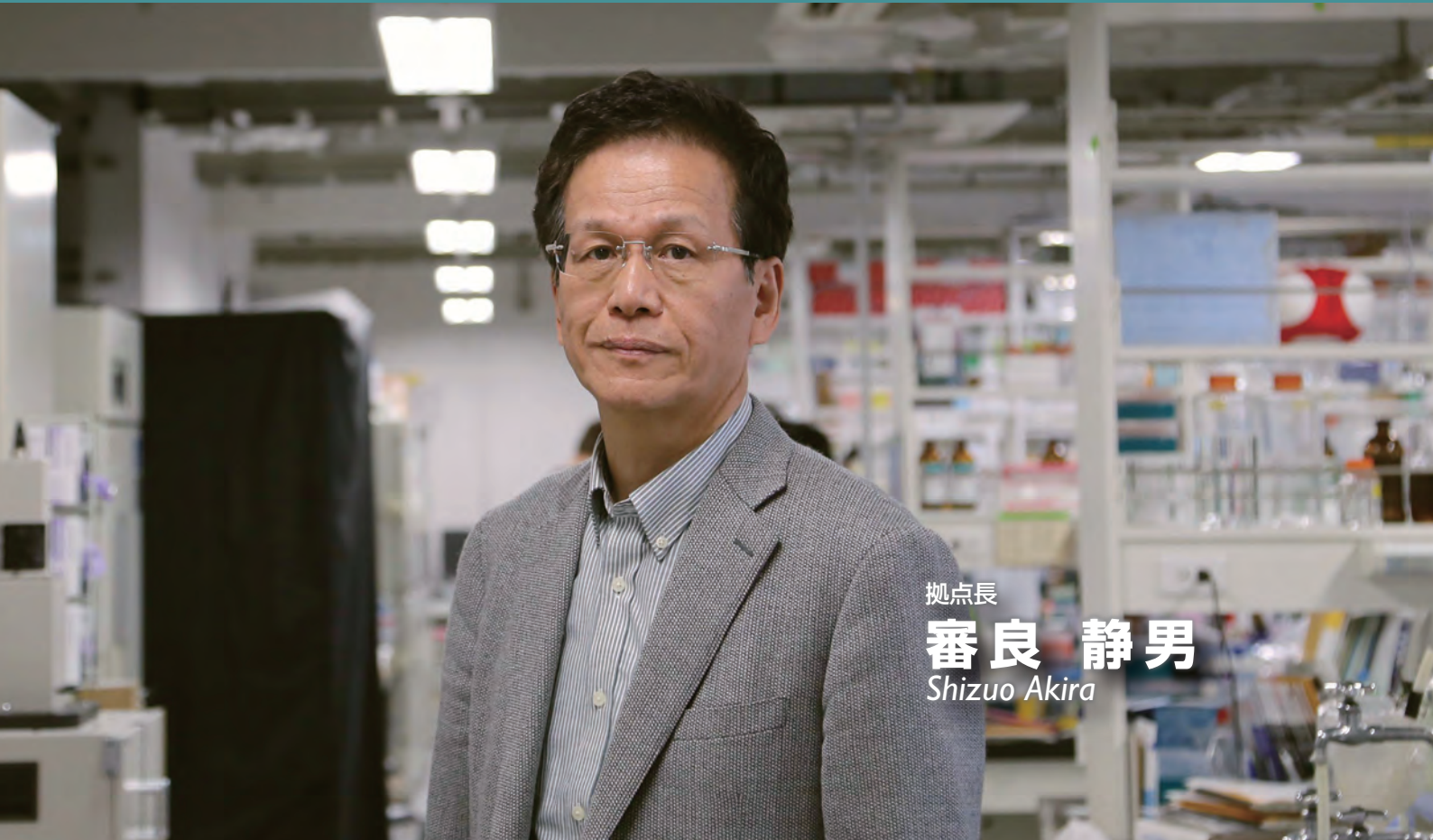
・細胞膜機能に着想を得た物質：細胞膜上で行われている複雑かつ効率の良い物質変換や産生メカニズムを模倣した触媒物質を開発する。

・ガスバイオロジー：一酸化炭素や一酸化窒素など、生物にとって毒だと思われていた気体分子が、実は少量なら細胞内で有用な働きをし、様々な病気と関係することがわかってきた。これらの気体分子を貯蔵し、必要なときだけ取り出す「ガスの薬」を、材料を用いて創製する。

・人工光合成：植物は大気中のCO<sub>2</sub>を取り込み、光によってそれを炭水化物に変換するが、この化学反応プロセスを多孔性材料などで制御することによって効率よく実現する方式を研究する。

・細胞におけるエネルギー貯蔵：生物のエネルギー蓄積方法を模倣し、イオンや分子を選別・蓄積する物質や、二酸化炭素や一酸化炭素、メタンなどのガスをエネルギー蓄積材料に変換する物質を開発する。

(文責：富田 眞治)



拠点長

**審良 静男**

Shizuo Akira

## 免疫学の基礎研究を究め、 免疫疾患の解明を目指す研究拠点

免疫学は、微生物感染から我々の体を守る生体防御のメカニズムを研究する学問である。免疫システムは病原体を排除する上で必要不可欠であり、免疫システムの異常は、自己免疫疾患、アレルギー反応といった様々な疾患の原因となる。大阪大学は免疫学に強い伝統を持っているが、IFReCは、国内外から優れた研究者を採用し、かつイメージングサイエンス(画像科学)、バイオインフォマティクス(生体情報学)の最先端の研究者との共同研究を積極的に取り入れ、免疫システムの全容を明らかにして、免疫に関連する病気の克服を目的としている。

### ■ 基本情報(2015年度)

拠点長：審良 静男

主任研究者(PI)：27名(内 外国人研究者数 5名、女性研究者数 1名)

その他研究者：100名(内 外国人研究者数 35名、女性研究者数 15名)

研究支援員：66名

事務部門：部門長 阪口 薫雄

スタッフ 39名(内 英語対応者割合 54%)

サテライト機関・連携機関：京都大学再生医科学研究所、理化学研究所統合生命医科学研究センター、医薬基盤・健康・栄養研究所、

Pohang University of Science and Technology(Korea)、

Seoul St. Mary's Hospital, Catholic Medical Center(Korea)、

Indian Institutes of Science Education and Research(India)、

Maurice Wilkins Centre, The University of Auckland (New Zealand)

URL：<http://www.ifrec.osaka-u.ac.jp>

## 主な研究成果

- 1 新たな免疫調節機構の発見**  
 身体を守る免疫反応の代表である炎症の微調整をする仕組みが、二つの異なるアプローチから発見された。
- 2 免疫をコントロールする制御性 T 細胞の重要性**  
 制御性 T 細胞 (Treg) の発見によって“免疫制御”の新たなコンセプトが生まれた。Treg を利用して、<sup>がん</sup>癌や自己免疫疾患治療への応用が広がる。
- 3 寄生虫との戦いは続く**  
 その多くが熱帯・亜熱帯に特有の疾病でありながら、地球温暖化と人間活動の国際化さらに輸送システムの発達で世界に感染の脅威が広がっている寄生虫病の発症メカニズムを探る。
- 4 新たなワクチン開発を目指して**  
 ワクチン（予防接種）といえば古くから行われてきた医療行為である。その原理が、ようやく分かってきた。
- 5 腸は重要な免疫器官である**  
 腸の中は外界と接したもう一つの体内といえるかもしれない。腸内において感染から身体を守る独特の仕組みを解き明かす。
- 6 MRI で免疫反応を見る**  
 MRI は、今や免疫学でも重要なツールである。IFReC では、世界最先端の MRI テクノロジーを用いて、免疫システムを単一細胞のレベルで追跡する。
- 7 生体イメージングで<sup>こつそしょうしょう</sup>骨粗鬆症を見る**  
 骨粗鬆症において重要な働きをするのが“骨を食べる免疫細胞”破骨細胞。最新イメージングで破骨細胞を観察し治療につなげる。
- 8 神経の変調は身体に影響する**  
 “病は気から”といわれて何となく納得してきた私たちが、神経が免疫に及ぼす影響が科学として解明された。

## 論文情報

総論文数	1090 報
トップ 10% 論文	27.3%
トップ 1% 論文	5.3%
国際共同研究論文	46.4%
(データベース : WoS 2007-2015 年)	



背景はリンパ球成熟の場であるマウス脾臓の<sup>ひそう</sup>顕微鏡像と抗原提示を受けた T リンパ球に形成される免疫シナプス

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘3番1号 大阪大学 IFReC 研究棟2階  
 Phone: 06-6879-4275(総務) 06-6879-4917(会計) 06-6879-4777(企画室)  
 Email: ifrec-office@ifrec.osaka-u.ac.jp



## はじめに

免疫学は19世紀から本格的に発展した。種痘(天然痘の予防接種)を開発したジェンナー、狂犬病や様々な感染症治療への道を拓いたパスツールなどは度々教科書にも登場する存在だ。その後も、各時代の先端的な科学や分析法を取り入れながら、現代の免疫学へとつながっている。例えば、培養法の発達により様々な病原菌(コレラ、チフス、赤痢など)が分離され、光学顕微鏡により病原性微生物が同定された。そして、電子顕微鏡の発明はウイルスの存在を明らかにした。その後、分子生物学、遺伝学、コンピュータサイエンスなどの手法を取り入れながら免疫学は今日の隆盛を迎えたのである。

大阪大学における感染症、免疫学研究は江戸末期に適塾を開いた緒方洪庵が大阪で広めた種痘を起源としている。その後1960年代における医学部教授、山村雄一の流れをくむ研究者たちは、大阪大学における免疫学研究の中心をなしてきた。その研究のピークの一つとして、岸本忠三らによるサイトカイン、インターロイキン6(IL-6)の発見があげられる。岸本らのグループは、IL-6が多くの免疫炎症反応の原因物質であることを解明した。一方1990年代以降、審良静男らは、樹状細胞など自然免疫を担う細胞がトル様受容体(TLR)と呼ばれるタンパク質群によって病原体を感知することを突き止め、感染から炎症に至る仕組みを解明した。

しかし、これまでの免疫学研究の多くが、主に体内より取り出した細胞を用いて行われた。そのため、実際に生きている動物の体内において複雑なシステムがどのように機能しているかという免疫の全体像を描くには至っていなかった。

IFReCは、2007年のWPI研究拠点設立時から、病原体感染や自己免疫疾患、さらにはがん細胞に対する免疫反応とその制御を目標に研究を推進してきた。すなわち、個々の免疫細胞の動きを明らかにしつつ、免疫という全身で起こる生体反応を深く理解することである。いわば、生体内における「免疫の統合的な理解」を目標としてきたのだ。

そのためには、生体反応における無数ともいえる

免疫細胞の動態をダイナミックに可視化(イメージング)し、その動きを追跡していくことが必要となる。更に同時かつ多彩な免疫反応を解析するための技術が必要とされる。IFReCでは、これらの新しい課題に取り組むために、免疫学、バイオイメージング、バイオインフォマティクス各分野の優れた研究者が集積し、融合研究を進めることとした。

以下に紹介する研究は、この10年間にIFReCの研究者が発表しためざましい研究成果の一部である。

## 1 新たな免疫調節機構の発見

審良 静男(PI)、岸本 忠三(PI)

我々の身体は様々なタンパク質の働きで営まれている。免疫反応において重要な役割を担うサイトカイン(細胞間情報伝達物質)もタンパク質であり、そのDNAによって定まったゲノム情報に基づいて細胞内で産生される。すなわち、核内のDNAからメッセンジャーとしてmRNAが読み取られ(転写)、細胞質内でタンパク質産生が進められ(翻訳)、細胞外に分泌されていくのだ。

IL-6のような炎症性サイトカインのmRNAが安定化すれば、炎症が続き、また不安定化すれば炎症は沈静化すると考えられる。こうした炎症反応を

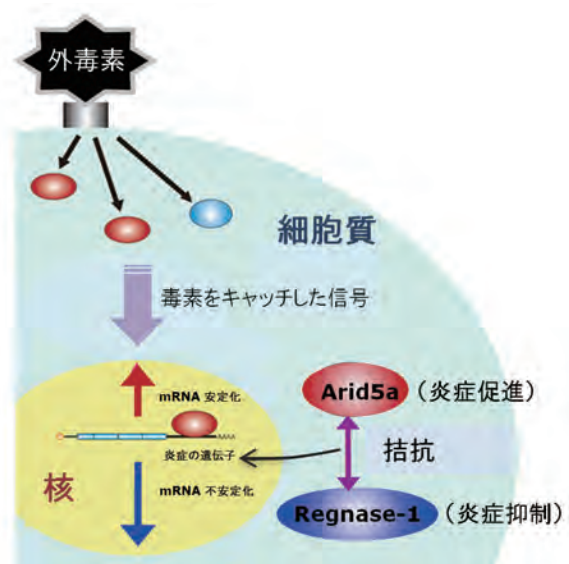


図1 炎症をめぐる細胞内で起きる競合反応  
感染などにより免疫反応が活性化した細胞の核の中では、炎症反応を起こそうとするArid5aと抑えようとするRegnase-1がしのぎを削っている。

mRNA のレベルで微調整する仕組みが、二つの異なるアプローチから世界で初めて発見された (図 1)。

審良が発見した Regnase-1 (レグネース 1) は、炎症反応を引き起こすタンパク質を転写後に切断する酵素である。つまり、Regnase-1 が強く働けば炎症遺伝子の mRNA を負に制御して炎症反応を抑えることができる。いわば、炎症の「抑制因子」なのだ。一方、岸本が発見した Arid5a (アリド 5a) は、炎症を引き起こすタンパク質の mRNA に結合し安定化させる正の制御を行う。こちらは炎症の「促進因子」ということになる。

Matsushita et al. *Nature* 458, 1185 (2009).

Masuda et al. *PNAS* 110, 9409 (2013).

## 2 免疫をコントロールする 制御性 T 細胞の重要性

坂口 志文 (PI)

病原体を見分け、その病原性を記憶するのが獲得免疫の中心であるリンパ球と呼ばれる細胞群で、その中でも T 細胞 (T リンパ球) は、免疫の指令塔とも呼ばれ、免疫応答を支配する重要な細胞だ。T 細胞は、分化の過程で、DNA の組み換えによって無限のレパートリーを持つ T 細胞受容体というタンパク質を作る。このおかげで免疫系は数多い病原体を認識できるわけだが、これら受容体には自分自身に反応するものも含まれる。胸腺においてこの自己反応性受容体の多くは除かれるが、一部は残ってしまう。「自分を傷つける T 細胞がどのように抑えられているのか？」は、長らく免疫学の重要な問いであった。

坂口は、リンパ球の一種であるヘルパー T 細胞の一部にその機能があることを発見し、これを制御性 T 細胞 (Treg) と呼んだ。この発見は世界中に反響を巻き起こし、この分野の研究に関心が高まった。

更に坂口らによって、この制御性 T 細胞がヒトの身体の中で自己免疫反応 (自己免疫疾患) を回避するために働いていることが分かった。健常では、自己に攻撃的なキラー T 細胞を免疫不応答状態 (アネルギー) にすることで自己の損傷を防いでいる。つまり、制御性 T 細胞が「免疫寛容」に重要であることを明らかにしたのである (図 2)。



図 2 健常時における制御性 T 細胞の働き  
制御性 T 細胞は、自分の組織に反応するキラー T 細胞を抑え込むことで自己免疫疾患の発症を抑制している。

坂口らは、制御性 T 細胞は通常のヘルパー T 細胞と同じ細胞から派生していて、様々な遺伝子の発現パターンは後天的要因 (エピジェネティック情報) でコントロールされていることを見いだした。生まれつきの遺伝条件だけでなく、この後天的な条件の下で初めて制御性 T 細胞が生まれるのである。このことを利用して制御性 T 細胞の働きを強化すれば、その免疫抑制機能により自己免疫疾患を安全に抑えることが可能だ。逆に、制御性 T 細胞を弱体化することでがん細胞に対して特異的な免疫機能を高めることも可能である。このような免疫制御機能を様々な疾患の治療に活用することが現実的になった。

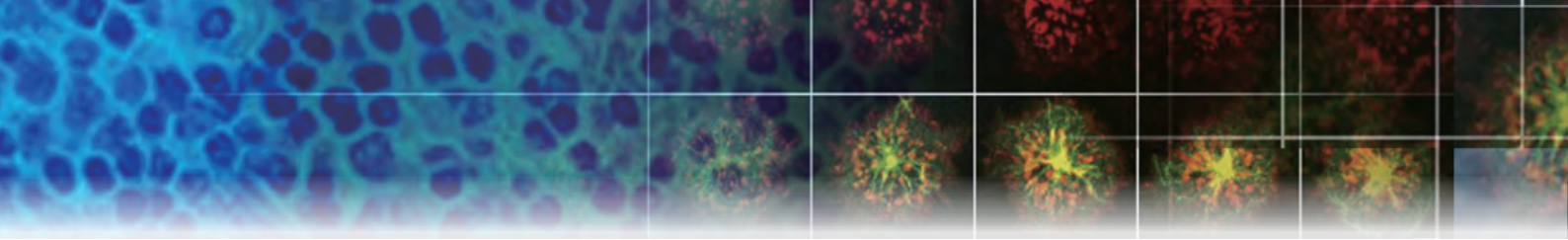
Maeda et al. *Science* 346, 1536 (2014).

Ohkura et al. *Immunity* 37, 785 (2012).

## 3 寄生虫との戦いは続く

山本 雅裕 (PI)、ジョヴァニア・チョバン (PI)

「清潔な先進国」である日本では、余り問題にならないが、世界全体を見れば、寄生虫感染は重大な課題である。例えばマラリアは、年間 2 億人以上の罹患患者と 200 万人の死亡者が数えられている (WHO 2013)。寄生虫の多くはウイルス、バクテリアなどと異なる多細胞生物であり、サイズが大きく、単純な生体反応では排除することができない。寄生虫がいったん体内に入ると、我々のエネルギーや栄養分を吸い取って生き延びる。そして宿主であるヒトをできるだけ生かして寄生生活をおくるのが常であ



る。我が国ではペットの飼育や海外に出かけて不用意に川で泳いだり、生ものを食べたりして感染する機会が多い。

その中でも、トキソプラズマは身体の弱った患者に致死性の脳症や心筋炎を引き起こす。十分加熱されていない肉をたべたり、猫の糞を触ったりして感染することが確認されている。特に妊婦が感染すると、流産・新生児の水頭症等の原因になる大変怖い寄生虫である。

山本らはトキソプラズマが直接に宿主（感染マウス）の細胞を活性化して感染局所に好中球（白血球）を呼び寄せせることを見いだした。トキソプラズマは、呼び寄せた好中球を利用して局所から全身に感染が拡大する。生体の免疫応答を逆に利用して“トロイの木馬”のように捕獲された上で、局所から全身に感染が拡大させるのを手伝わせているのである（図3）。

このような寄生虫の病態はこれまで余り研究されてこなかった。山本らの研究は寄生虫感染の特異な現象の解明につながるものとして期待される。

マラリアはアジア、アフリカ等の熱帯、亜熱帯で猛威を振るう世界最大の感染症である。特に脳マラリアは昏睡、高熱、ひきつけなどを引き起こす深刻な感染症である。

チョバンらは、脳マラリアの新たな診断と治療の手掛かりとして脳の中で「におい」を感じ取る部位、

嗅球に着目した。マラリア原虫が嗅球の毛細血管にひっかかると、局所で過激な免疫反応が起き、微小血管で出血がみられる。この脳深部での変化はMRIで容易に診断できることから、脳マラリアのごく初期の段階、まだ高熱を発していない状態での診断が可能となる。嗅球に集まる免疫細胞を制御することで脳マラリアによる死亡率を下げるができることを示すデータも示された。

Ma et al. *J Exp Med* 211, 2013 (2014).  
Zhao et al. *Cell Host & Microbe* 15, 551 (2014).

#### 4 新たなワクチン開発を目指して

黒崎 知博(PI)、石井 健(PI)

「一度かかった感染症に二度目はかかりにくい」という感染症の法則は、紀元前の古代ギリシャ時代から記録に残っている。その後の研究において、多くの病気は微生物の感染によること、微生物に一回感染するとその後は抵抗力を生じることが分かった。さらに微生物を弱毒化したものを投与されると、感染したのと同様、身体に抵抗力がつくことが確かめられ、現在の予防接種（ワクチン）につながるのである。

予防接種の本質は、免疫システムに病気の記憶を残し、二度目の感染にはすばやく対抗できるということである。こうした免疫の記憶がどのように行われるか、またどのようなときにワクチンが強く働くかには謎が多い。

黒崎らは、免疫記憶を司っている主要な免疫細胞であるメモリーB細胞が再度の感染に素早く反応して抗体を放出するのは、Bach2というタンパク質の発現量低下が要因であることをマウスを使って明らかにした。Bach2は一回抗原（細菌・ウイルス）に接触したB細胞の抗体産生細胞への分化を一旦抑える。そしてBach2が少なくなった状態でメモリーB細胞が再度抗原に接すると抗体産生細胞へ迅速に大量に分化する。一方でメモリーB細胞のBach2の量が抑制され過ぎると、抗体が過剰に産生されアレルギーや自己免疫疾患の要因となる可能性を示している。こうしたメモリーB細胞の働きを理解することは、インフルエンザなどに対する効果的なワクチンを開発する上でも重要だ。



図3 トキソプラズマの“トロイの木馬戦略”  
マウスの足から体内に侵入したトキソプラズマは、傷口に好中球を呼び寄せ感染する。その後、好中球という“馬”に乗って全身に広がっていく。

石井健らは、ワクチンの効果を高めるアジュバントという添加剤の効果を研究している。アジュバントとして最も使われてきたのは、アラムと呼ばれるアルミニウム化合物である。アラムのアジュバントは、免疫細胞に取り込まれた後、その細胞死を誘導する。その宿主細胞から二重らせん構造がほどけたDNAが周囲に放出されることで自然免疫を活性化させる効果がワクチンに必要であることが明らかになった。更にアジュバントの副作用であるアレルギー反応(IgE抗体)にはDNAが活性化するIRF3(インターフェロン調節因子)というタンパク質が必要である反面、ワクチンの主作用である抗体反応(IgG)には必ずしも必要でなかった。こうした研究は、DNAの過度な放出を抑える新たなアジュバントと副作用の少ないワクチンの開発につながるだろう。

Kometani et al. *Immunity* 39,136 (2013).  
Marichal et al. *Nat Med* 17, 996 (2011).

## 5 腸は重要な免疫器官である

竹田 潔 (PI)

私たちの腸内には、微生物である腸内細菌が大量に住みついている。その数は我々の全身を構成するヒトの細胞数を軽く超えている。そうした腸内細菌の集合体はmicroflora(ミクロの花畑)とも呼ばれる。一方で、腸内は外界から取り入れた様々な食料や微生物が通過する、壮大な「免疫反応の花畑」としても注目を集めている。

竹田らのグループは、大腸上皮細胞に多く存在するLypd8というタンパク質を欠損したマウスでは、内粘液層に腸内細菌が多数侵入し、野生型マウスと比較して重い腸炎を発症することを見いだした。Lypd8は特に鞭毛を持つ腸内細菌に結合し、運動性を抑えることで細菌の侵入を防止していることが明らかになった(図4)。

また、同グループは、私たちの身体で不必要な組織と考えられていた虫垂に存在するリンパ組織が、粘膜免疫で重要な役割を果たすIgAという抗体タンパク質の産生に重要な場であり、腸内細菌の制御に関与していることを突き止めた。つまり、虫垂は腸内細菌のバランス異常によって発症する炎症性腸

疾患の制御にも関わる重要な組織であると考えられる。「盲腸は不要な組織」という俗説は免疫学の立場からは崩れたのである。

Okumura et al. *Nature* 532, 117-121 (2016).  
Masahata et al. *Nat Commun* 5, 3704 (2014).

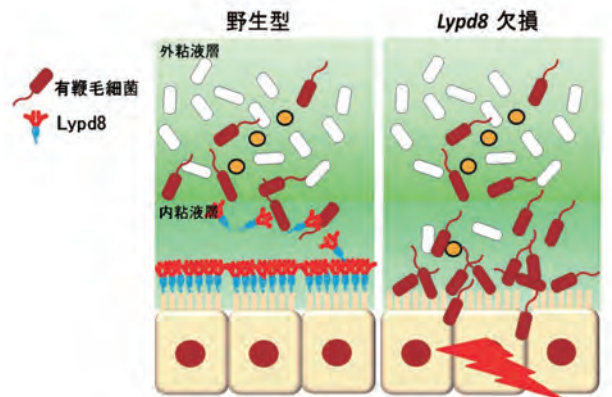


図4 Lypd8は、細菌の粘膜層への侵入を阻止する大腸上皮細胞においてLypd8を欠損したマウスでは、野生型と比較して内粘液層に腸内細菌が多く侵入し重篤な腸炎を発症する。

## 6 MRIで免疫反応を見る

吉岡 芳親 (PI)

MRI(核磁気共鳴画像法)は、人体の内部を撮影・立体表示できる分析法である。X線CTとは、全く異なる原理による。MRIは、電磁コイルや周辺機器の改良によって、その性能は飛躍的な向上を遂げた。今や免疫細胞の一つ一つまでが観察可能なレベルに達している。

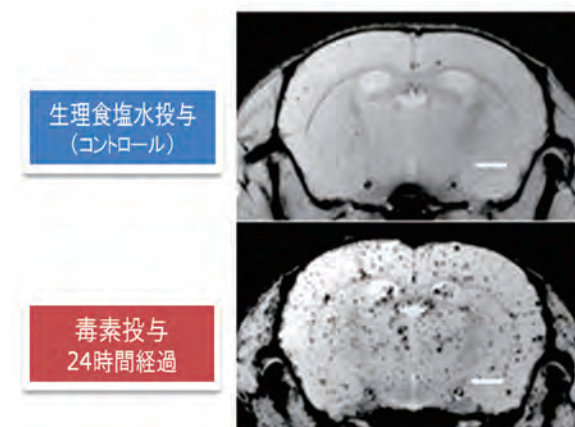
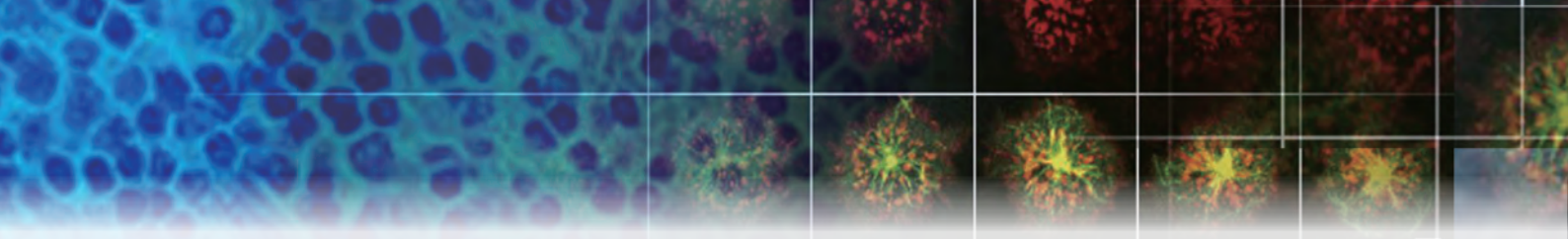


図5 脳内に出現するマクロファージ  
LPSを注射されたマウスの脳内には、マクロファージ(黒いドット)が多数出現し、その数は24-48時間後にピークを迎える。その後は減少し平時に戻る。



吉岡らは、IFReC に設置された世界最高レベルのMRI を用いてマウス脳内のマクロファージ（食細胞）を継続的に観察することに成功した（図5）。

炎症を引き起こすLPS（リポ多糖）を腹腔に注射されたマウスでは、その脳内に時間経過とともにマクロファージが増えていき、数日後その密度は頂点に達する。しかし、1週間後には何事もなかったように元に戻る。直接毒素が脳内に侵入していない状態で、脳内にこれほどの免疫細胞が存在しているのは驚きであった。その後も、MRI 画像の3次元化や時間分解能力のさらなる向上で、今まで見えなかった免疫の世界が生きた動物の体内で明らかにされようとしている。

Mori et al. *Sci Rep* 4, 6997 (2014).

## 7 生体イメージングで骨粗鬆症を見る

石井 優(PI)、菊地 和也(PI)

我々の身体を構成する成分は日々、代謝によって置き換わっている。骨も例外ではなく、骨芽細胞によって骨が誕生する一方で、破骨細胞によって骨は削られ食べられていく。免疫細胞の一種である破骨細胞が骨を過剰に壊してこのバランスが壊れるとき、骨粗鬆症となる。

石井優は菊地らと協力し、独自に開発した破骨細胞の生体イメージングにより、その機能を追っ

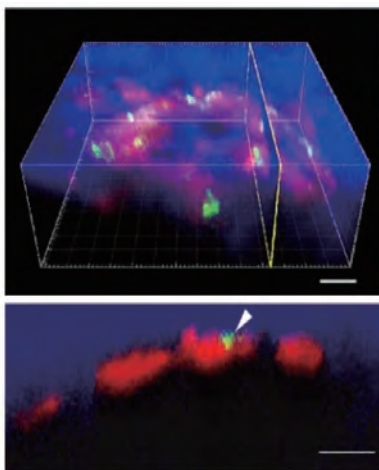


図6 破骨細胞が骨を食べている瞬間  
新たに開発された蛍光色素により、破骨細胞（赤）を連続観察し、骨を食べている場所（緑）を特定できるようになった。

る。当初の多光子顕微鏡イメージングでは、“光る粒”にすぎなかった破骨細胞だが、やがて個々の形や動きが分かるようになった。さらに、新たに開発された機能性蛍光分子と4Dイメージング（立体3次元+時間）を駆使して、個々の破骨細胞が活動している状態、すなわち「どれほど活動的に骨を食べているか、あるいは休息しているか？」も描けるようになった（図6）。

これらは、免疫学と顕微鏡システム、さらに蛍光色素の開発という複数のイメージング技術が組み合わせられたIFReCならではの成果といえる。こうしたデータをもとに破骨細胞の活動バランスを調節することができれば、骨粗鬆症やがん転移による骨破壊の治療へ新たな戦略となり得るだろう。

Maeda et al. *Nat Chem Biol* 12, 579 (2016).

## 8 神経の変調は身体に影響する

鈴木 一博(PI)

それまで続いていた様々な緊張が失せた途端、風邪をひいて寝込んだ経験はないだろうか？神経系と免疫にどのような関連があるかは興味深いが、学問としてそれを証明するのは一見難しく思える。

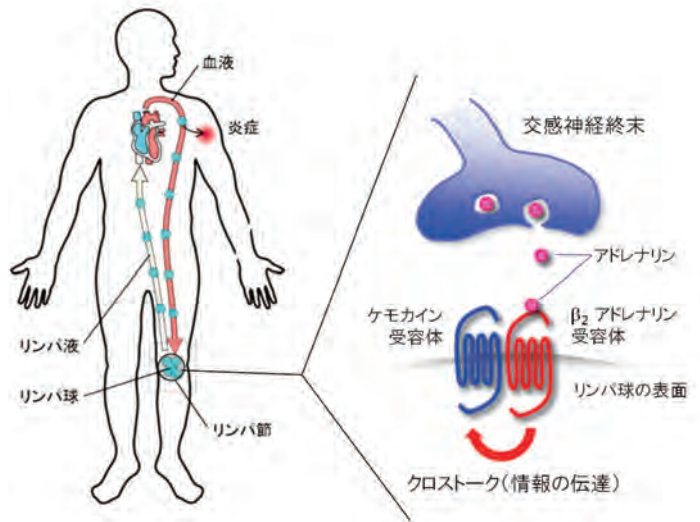


図7 神経系からの信号が免疫に影響する  
神経の興奮がリンパ球にあるアドレナリンのレセプターを介してリンパ球に伝わる。その情報はケモカインレセプターにも伝えられ、リンパ球をリンパ節にとどめる。つまり、神経の興奮が免疫に作用している。

鈴木一博らは、自律神経である交感神経の刺激によって分泌されるノルアドレナリンがリンパ節からのリンパ球の脱出を抑える（リンパ節に保持する）ことを見いだした。自律神経は緊張したときに冷や汗をかいたり、息苦しくなったりする身体のバランスを保つ上で重要な機能である。この研究では神経系からの情報が免疫系の働きに影響を与えたことを実証することができた（図7）。

さらに、神経系の自己免疫疾患である多発性硬化症のマウスモデルにおいて、神経系の信号がリンパ球の炎症部位への到達を妨げることがわかった。つまり、神経が緊張状態にあるときはある程度、炎症（免疫反応）が抑えられたのである。

*Nakai et al. J Exp Med 211, 2583 (2014).*

## IFReCのこれから

IFReC は設立以来の10年間で着実な成果をあげ、国際的にも高い評価を得ることができた。2014年にトムソン・ロイター社が発表した「10年間の研究機関ランキング（免疫学分野）」で大阪大学は世界第1位（論文一本当たりの引用数）に輝いた。このランキングにはIFReCの研究者が多大な貢献をしている。また、IFReCの論文引用データを欧米の複数のトップ研究所と比較しても遜色なく、まさに世界第一級の免疫学の研究機関となったのである。

創設以来の栄誉として主なものに、慶応医学賞（審良・坂口）、文化功労者（審良）、朝日賞（坂口）、ガードナー国際賞（審良・坂口）、クラフォード賞（岸本・平野）、日本国際賞（岸本・平野）などがある。2016年現在、審良、坂口、長田、そして岸本という4人のアメリカ科学アカデミー外国人会員を擁する研究機関は世界でも稀だ。

IFReCにおけるこれまでの融合研究の推進は免疫学基礎研究の飛躍的な発展の基盤となり、多くの優れた成果を生んできた。特に多光子励起顕微鏡とMRIイメージング分野では、上記に示したような成果が得られた。この期間に技術革新が進んだこともあり、当初の予想以上の成果であった。

これに加えて、多くの研究者がバイオインフォマティクスを取り入れた研究を展開しており、既にCell, Nature やそれら姉妹紙への複数掲載を含めIFReCでの大きな流れになっている。IFReCにおいて、もはや免疫学とイメージングやインフォマティクスとの融合研究は目指すものというより、日常の研究手法の一部になったのだ。

そうした研究体制をもたらしたのは、WPIプログラムが推進した「一つ屋根のもとに異分野の研究者が集う環境」であることは間違いない。まさに、WPIなくしてはあり得ないIFReCの研究環境、そしてその成果であった。2017年度以降、IFReCには民間会社を始め、様々な資金・人的資源が流入し、研究内容は多様性を増していく。その場合も、基礎研究を重視したIFReCの研究者の努力は続いていくだろう。

さらに、IFReCはWPIとして今後も優れた研究成果を世界に発信し続けるために新たな試みを進めていく。

バイオインフォマティクスとの融合は、研究データを網羅的に解析することを可能にした。これまで人的な作業に依存していたデータ解析を一段と信頼のおけるものとすることができ、また画像の超高解像度解析などに応用が可能だろう。人工頭脳としてのAI技術の飛躍的な発達も見込まれる。世界の科学研究の潮流は、これらの技術革新とともに発展するため、今後のIFReCでは若手の人材の活躍が必要であろう。

そこで、IFReCは広く共同研究の場を提供できるセンターとして開放したいと考えている。国際的に、そして様々な異分野の領域の研究者、産学を問わない英知の結集を目指して「オープンイノベーションラボラトリー構想」を進めていく。そこは若者の力が結集された世界の頭脳循環の場となるだろう。現在提唱されている大阪大学のオープンキャンパス構想に沿って、IFReCはWPIセンターとしての活動を継承していく。

（文責：坂野上 淳）



拠点長

青野 正和

Masakazu Aono

## 新概念「ナノアーキテクトニクス」で 世界の新材料開発を先導

MANAは、新概念「ナノアーキテクトニクス」を提唱・発展させてナノテクノロジーに新たなパラダイムを拓くことを目指している。ナノアーキテクトニクスとは、ナノサイズのユニットの配列や相互作用を制御して、自在に新しい材料機能を創り出すための材料建築技術体系である。環境・エネルギー、情報・通信、医療など様々な領域での次世代技術を支える新材料を目指して、MANAはナノマテリアル、ナノシステム、ナノパワー、ナノライフ、ナノセオリーの5分野において世界トップレベルの研究を推進し、世界的に注目されている。

### ■ 基本情報 (2015年度)

拠点長：青野 正和

主任研究者(PI)：18名 (内 外国人研究者数 8名、女性研究者数 2名)

その他研究者：179名 (内 外国人研究者数 96名、女性研究者数 36名)

研究支援員：10名

事務部門：部門長 中山 知信

スタッフ 18名 (内 英語対応者割合 100%)

サテライト機関・連携機関：カリフォルニア大学ロサンゼルス校 (アメリカ)、ジョージア工科大学 (アメリカ)、筑波大学、フランス国立科学研究センター (フランス)、モントリオール大学 (カナダ)、ユニバーシティ・カレッジ・ロンドン (英国) など

URL： <http://www.nims.go.jp/mana/jp/>



Nano Revolution  
for the Future

## 主な研究成果

- 1 **超高性能電子デバイスに適用可能な酸化物ナノシート**  
酸化チタンなどの機能性酸化物をナノシート化し、厚さ1~2nmでも機能する誘電体ナノシートを発見した。さらにこのナノシートを積み木細工のように重ねることで世界最小・最高性能の薄膜コンデンサの開発に成功した。
- 2 **記憶・忘却のシナプス動作をする原子スイッチ**  
電圧をかけたときに金属原子（イオン）が移動して伝導経路を形成することで作動する「原子スイッチ」を用いて、脳の神経活動の特徴である記憶・忘却を自律的に再現する“シナプス素子”の開発に世界で初めて成功した。
- 3 **ナノ物質の機能を‘その場’測定する電子顕微鏡の開発**  
透過電子顕微鏡のもつ優れた高分解能観察機能に、個々のナノ物質を正確に操作する技術を組み合わせた「その場物性測定装置」を開発し、ナノマテリアルの微細構造と物性の関係を解明することに成功した。
- 4 **モバイル嗅覚を実現する  
超高感度・超小型ナノメカニカルセンサー**  
多種多様な分子を超高感度で検出可能な極小素子「膜型表面応力センサー（MSS）」の開発に成功し、産学官共同研究体制「MSS アライアンス」を発足させて、嗅覚IoTセンサーシステムの実用化・業界標準化を目指している。
- 5 **熱電材料の高性能化メカニズムの開拓**  
磁性半導体のCuFeS<sub>2</sub>系において、磁性が熱電性能を向上するメカニズムとして電荷キャリアとマグノンの相互作用が重要であることを発見した。また、熱電材料のナノシート合成による高性能化も実現した。

## 論文情報

総論文数	3316 報
トップ 10% 論文	37.1%
トップ 1% 論文	7.8%
国際共同研究論文	46.2%

(データベース：SCOPUS data base, Elsevier B.V.)



〒305-0044 茨城県つくば市並木 1-1  
Phone: 029-860-4709  
Email: mana@nims.go.jp

背景は世界最薄超伝導体：シリコン上に  
整然と並んだ金属原子



人類が持続可能な発展を続けていくためには、食糧・資源・エネルギーの生産、情報の処理・通信、医学的な診断・治療、社会のインフラや環境の整備・保全を革新する先進的な技術の不断の開拓が必要である。このような技術の多くは、適切な新しい材料がなければ実現しない。過去の30年余に目覚ましい発展を遂げたナノテクノロジーは、ナノレベルでの物質の観察や操作を可能にし、新材料開発に大きく貢献してきたが、近年はさらなる進化が要請されている。観察・操作から更に進み、ナノレベルの物質を集めたり組み立てたりすることによって所望の機能をもった材料を自由自在につくりあげるための技術が求められる時代となった。

しかしナノレベルの世界では、物質は日常生活空間では想像もつかないような性質を示すため、このような技術の実現は決して簡単ではない。そのためMANAでは、ナノサイズのユニットの配列や相互作用を制御して、自在に新しい材料機能を創り出すための技術体系を「ナノアーキテククス」と名づけ、その技術体系の確立のための研究を推進している。さらに、多岐にわたる領域で「ナノアーキテククス」に基づく革新的な新材料の開発を進め、21世紀のナノテクノロジーに大きな飛躍をもたらすことを目指している。

## 1 超高性能電子デバイスに適用可能な酸化ナノシート

佐々木 高義 (PI)、長田 実 (PI)

### 次世代電子デバイスに貢献する「ナノシート」

近年の電子機器の小型化・高機能化を目指す流れの中で、次世代のナノ電子デバイスに適用可能な、新しいナノ材料の開発が求められている。特に、炭素の単原子層であるグラフェンが発見されて以降、分子レベルの薄さの2次元ナノ物質である「ナノシート」をベースとした電子デバイスの開発や、グラフェンを凌駕する機能を持つ材料の開拓研究が大きな注目を集めている。

MANAでは、伝導性・超伝導性・半導性・絶縁性・強誘電性・強磁性など、「電子機能の宝庫」である酸化物に注目し、新しいナノシートの開発とその応

用研究を進めている。その成果の一つが、酸化チタンなどのごくありふれた酸化物をナノシート化することによって、厚さ1~2nmの究極の厚みで、世界最高の誘電率(200以上)をもつ高誘電体ナノシートを発見したことである。

### 「ナノの積み木細工」でつくる世界最小・最高性能のコンデンサ

さらにMANAでは、発見した高誘電率の酸化物ナノシートを積み木細工のように様々な順番で積み重ねるボトムアップ方式の技術を開発して(図1)、世界最小で最高性能のコンデンサ素子の作製にも成功した。

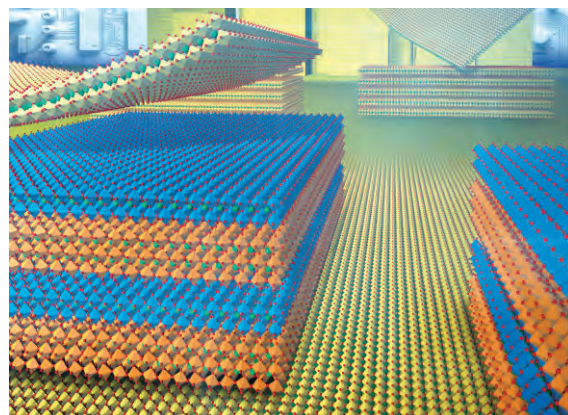


図1 ボトムアップ方式での素子作製のイメージ図  
様々な機能をもつナノシートを積み重ねて優れた性能を持つ素子が作製できる。

コンデンサは一時的に電荷を蓄える電子部品で、スマートフォン、パソコンなど電子機器には欠かせない。例えば、スマートフォン1台あたりのコンデンサ搭載個数は約500個であるが、モバイル機器の高機能化のためにはより多数の搭載が求められており、より小型で高性能のコンデンサの開発が重要である。しかし、現在の積層セラミクスコンデンサ(MLCC)の小型化・高機能化は技術的限界に到達している。

そこで、MANAは、誘電体層と電極層にそれぞれペロブスカイト型酸化ニオブ( $\text{Ca}_2\text{Nb}_3\text{O}_{10}$ )ナノシートと酸化ルテニウムシート( $\text{RuO}_2$ )を、室温下での溶液プロセスで積み木細工のように積層して、電極/誘電体/電極のサンドイッチ型構造からなるコンデンサ素子を作製した。

この素子は、全体の厚みが現行の従来型 MLCC の 50 分の 1 に当たる 30nm の世界最小レベルであるにも関わらず、容量密度は 1000 倍に当たる得  $\sim 30 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  にも達する。この成果は、ナノシートをベースに画期的な性能を発揮する電子デバイスの開発に成功した世界初の例である。また、ナノシート作製及びボトムアップ方式のナノシート積層が、簡便・安価・低環境負荷な水溶液プロセスで実現できることは、素子作製上の大きなメリットである。実際、ガラス・金属・プラスチックなど様々な素材の基板に、膜厚・構造を精密に制御した電子素子の製造が可能であることを実証しており、工業的製造の観点からも注目されている。現在 MANA では、より優れた誘電特性を有するナノシートの開発とともに、様々な電気特性を有するナノシートとの融合により、高性能の電子デバイスの開発を目指した研究を進めている。

M. Osada et al., *Advanced Materials*, 24, 210, 2012.  
C. Wang et al., *ACS Nano*, 8, 5449, 2014.

## 2 記憶・忘却のシナプス動作をする原子スイッチ

長谷川 剛 (PI)、寺部 一弥 (PI)、青野 正和 (PI)

### 世界最小の機械スイッチ「原子スイッチ」

「原子スイッチ」とは、電圧をかけたときに生じる金属原子・イオンの移動や酸化還元プロセスによって作動する、スイッチング素子である。

MANA の青野正和拠点長らによって発明された世界初の原子スイッチ (図 2) は、電極となる硫化銀の針先と白金の表面に 1nm ほどの隙間を挟んだ

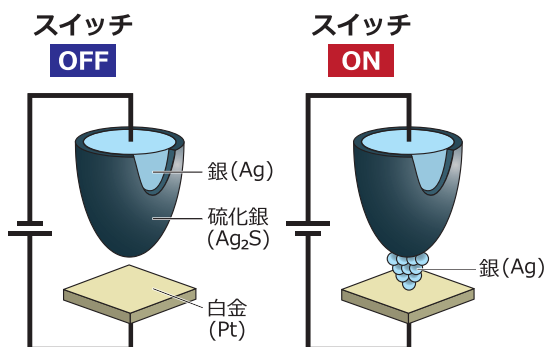


図 2 銀原子が硫化銀の針から出てくるとスイッチがオンになる原子スイッチの模式図

構造をもつ。硫化銀針にかかる電圧を制御することで、還元された銀原子が隙間に析出して電極間が接続されたり (スイッチオン)、酸化された銀イオンが硫化銀針に戻って電極間にまた隙間が現れたり (スイッチオフ) する。ごく微量の消費電力で起動でき、原子数個が隙間にあるかないかでオンオフを実現する極小のスイッチ素子となっている。

### 原子スイッチでシナプス素子を実現

MANA では、この原子スイッチが、脳の神経活動の特徴である「必要な情報の記憶」と「不要な情報の忘却」を自律的に再現する“シナプス素子”として動作することを発見し、世界に先駆けて実証実験を進めてきた。

シナプスとは、生体で神経回路を構成する神経細胞 (ニューロン) 間に形成される接合部位である。ニューロンの活動電位がシナプスに到達すると神経伝達物質が放出され、シナプス電位が発生し、次のニューロンの活動電位として伝搬する。このような刺激が頻繁に行われたシナプス結合は強化され、記憶が強化される。つまり、脳の特徴である「必要な情報の記憶」と「不要な情報の忘却」は、シナプスの結合強度の変化に対応すると考えられている。

MANA が開発した原子スイッチは、脳内におけるシナプスの結合強度の変化とよく一致した挙動を示す。電気信号を頻繁に入力すると銀原子が効率的に析出して電極間に安定な伝導経路 (ブリッジ) が作られるのに対し、低い入力頻度では伝導経路が時間とともに消滅する。信号の入力頻度が高ければ高いほど、より太くて安定なブリッジが完成する (図 3)。

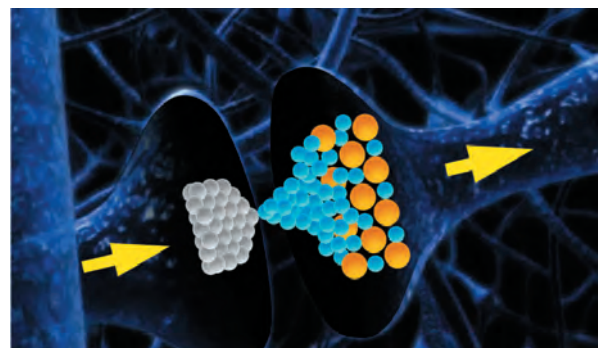


図 3 シナプス動作をする原子スイッチの模式図  
電気信号の入力があると、右側の電極から銀原子が析出して電極間にブリッジを形成する。

## 人工脳実現への道

現在のコンピュータは、今後求められる高性能化と多様化に対応しきれないとの指摘があり、脳型回路・脳型コンピュータの開発に注目が集まっている。もちろん、脳神経回路におけるシナプス機能の人工的な再現が本質的に重要であり、これまでも複雑な回路やソフトウェアによってシナプス機能は再現されてきたが、それらは予め設計された駆動プログラムを必要とする。これに対して、MANAの開発したシナプス素子を組み込んだ回路は事前の動作設計無しに計算機能を創発しうることが示されている。今後、経験によって賢くなる（学習し成長する）人工知能材料の実現に向けた研究の発展が期待される。

T. Hasegawa et al., *Advanced Materials*, 22, 1831, 2010.  
T. Ohno et al., *Nature Materials*, 10, 591, 2011.

## 3 ナノ物質の機能を‘その場’測定する電子顕微鏡の開発

板東 義雄 (PI)、Dmitri Golberg (PI)

### ナノ物質測定の難しさ

ナノ物質はこの数十年にわたり材料科学の中でも最も注目を集めている材料である。ナノサイズの物質は、機械・電気・熱電・電気化学・磁気・圧電・光電・光起電力など様々な物性においてバルク（物質がある程度まとまった分量で存在している状態）とは異なる物性を示す。そのため、ナノ材料を様々な技術と組み合わせることによっていろいろな機能が得られると期待されているが、実際の応用に際してはナノ物質の性質を正確に把握しておくことが大変重要になってくる。

ところが、これまで行われてきたナノ物質の物性測定では、走査電子顕微鏡（SEM）や走査トンネル顕微鏡（STM）、原子間力顕微鏡（AFM）など、表面形状を調べることはできるものの、材料内部の構造を詳しく知ることができなかった。そのため、計測される物性データが、ナノ物質の形状・結晶構造・組成分布・欠陥構造といったナノレベルの条件から

どのような影響を受けているのかが不明であった。実際、文献ごとに、大きく異なる物性データが報告されており、ナノマテリアルの実用化や工業利用上、大きな障害となっていた。

### 新しい‘その場’物性測定装置

MANA では、測定手法に起因する障害を乗り越えるため、高分解能透過電子顕微鏡（HRTEM）を用いた観察を行いながら個々のナノ物質を操作する装置を開発した。これによって、ナノレベルの構造変化と物性の変化を同時に捉える‘その場’（in situ）物性測定が可能となった。この装置では、ナノ物質の200万倍までの拡大像が得られ、その結晶構造の奥深くまでを観察できる。さらに、電圧印可・抵抗加熱・帯電・曲げ・引っ張り・剥離・光の照射ができる上、ナノメートルの精度でサンプルを操作しながらその機械的・電氣的・熱的及び光学的特性を測定することも可能である。この新しい装置は、従来のHRTEM 試料ホルダに、STM 探針（電気特性測定用）やAFM カンチレバー（機械特性測定用）、光ファイバー（光電/光起電力測定用）を組み合わせ、ナノチューブ・ナノワイヤ・ナノシート・グラフェン・ナノ粒子など50以上の様々なナノ物質について、多様な物性測定を可能としている。

### 構造と物性の因果関係の解明へ

‘その場’物性測定装置による分析は、HRTEMでしか得られない非常に高い空間分解能・時間分解能・エネルギー分解能を用いて、ナノレベルの構造の一つ一つについてその物性を調べられるという点が革新的である。しかも、ナノ物質が構造変化する際のあらゆる段階で、リアルタイムの‘その場’測定ができることも大きな魅力である。

既にMANAではこの手法によって、例えば、曲げや引っ張りを加えた際の、ナノ物質の塑性・弾性特性の解析や電子輸送特性測定などを実現した（図4）。今後‘その場’物性測定装置を一層活用するこ

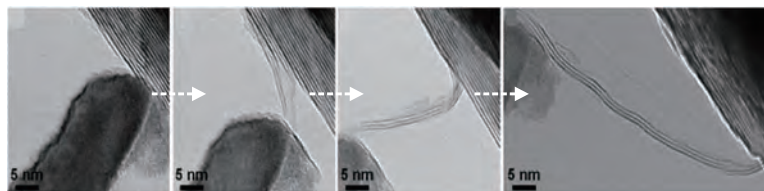


図4 原子層の剥離を行うスコッチテープ法の動力学を示すHRTEM像：‘その場’物性測定装置内で金属探針を精巧に操作して、層状のMoS<sub>2</sub>単結晶から3原子層を剥離

とによって、ナノ材料の微細構造と物性との関係を明らかにし、ナノ材料の応用展開に新しい道を拓くことができる。

D. Golberg et al., *Advanced Materials*, 24, 177, 2012.  
D. M. Tang et al., *Nature Communication*, 5, 3631, 2014.

## 4 モバイル嗅覚を実現する超高感度・超小型ナノメカニカルセンサー

吉川 元起(グループリーダー)

### 新たなセンサー素子「MSS」の開発

生体分子やガス分子など、様々な分子を検出・識別する「分子センサー」は、食品・医療・ヘルスケア・環境・セキュリティなど様々な分野で、その実用化が切望されている。こういった分子センサーの一種である「メカニカルセンサー」は、センサー表面に塗った感応膜が目的の分子を吸着する際に変形し応力が生じる現象を利用する。この感応膜を適切に選ぶことで有機・無機・生体系など様々な分子を検出できるため、極めて汎用性の高いセンサーとして注目されてきた。しかし、従来型のメカニカルセンサーは、高感度化と小型化の両立が難しく、これが実用化に向けての20年来の課題であった。そこで我々は、構造力学・材料科学・結晶学・電気回路という四つの基礎科学を融合して、超高感度と超小型を両立した全く新しい超高性能ナノメカニカルセンサー素子「膜型表面応力センサー (Membrane-type Surface stress Sensor, MSS)」を開発した。MSSの感度は従来型メカニカルセンサーの100倍以上に達し、かつ1 cm<sup>2</sup>あたり100個以上の素子を集積可

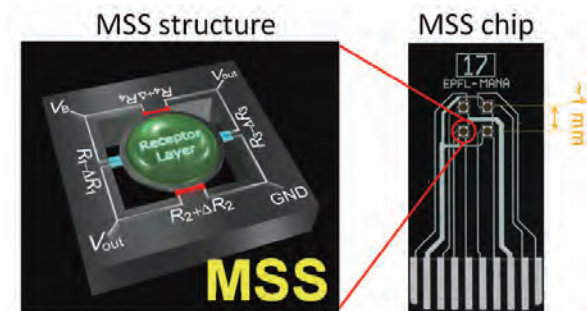


図5 (左) MSSの模式図。中央の感応膜に検体分子が吸着する際に生じる表面応力を、周囲の4個のブリッジに埋め込まれたピエゾ抵抗によって効率よく電気的に検出する。  
(右) MSSチップの拡大写真

能な小型化を実現した(図5)。

さらにMSSは、低コスト(将来的に100円/チップ)で大量生産可能、従来の半導体デバイスに集積可能、低消費電力(1素子あたり1mW以下)、リアルタイム性(数秒程度の応答時間)、熱的・電氣的・機械的安定性など多くの優れた特徴を備えており、次世代モバイル/ IoTセンサーへの活用が可能である。例えば、食品などの鮮度/品質管理、健康管理、環境監視や安全対策など、安全で安心な暮らしの実現に貢献すると期待されている。

### モバイル嗅覚センサーの可能性

一例として、MSSの人工嗅覚センサーとしての応用を紹介したい。我々は既に、ニオイによる食肉、調味料、香水、飲料品など、様々な試料の識別に成功している。特に、MANAとスイス連邦工科大学ローザンヌ校及びバーゼル大学との共同研究では、呼気によるガン患者の識別にも成功している。現在、信頼性が高く患者への負担が少ないガン診断技術、日常の健康管理に活用されるパーソナル診断技術、モバイル嗅覚センサー機器(図6)など、様々なアプリケーションを開拓する研究を推進している。

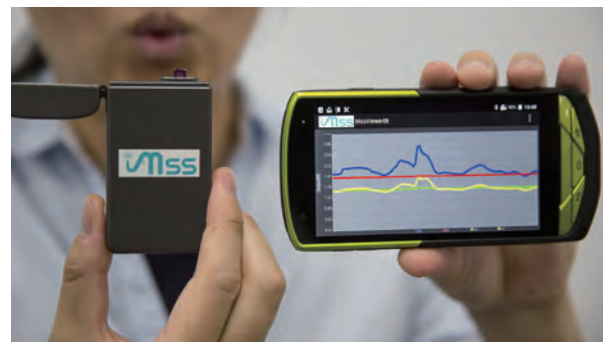


図6 呼気を吹きかけるだけでその成分を識別し健康状態をモニタリングしたり、周囲のニオイを検知し安全確保に役立てたりするモバイル嗅覚センサー機器として応用する。

### 実用化・普及に向けた動き

MSSの「センサーシステム」としての社会実装を目指して2015年9月、MANAの母体であるNIMSと京セラ、大阪大学、NEC、住友精化、NanoWorldの6機関は、MSSを用いたニオイ分析センサーシステムの実用化と普及のために産学官共同研究体制「MSSアライアンス」を発足させた。現在、このMSSアライアンスを中心として、信頼性の高いニオ

イ分析システムの確立と業界標準化を目指している。

G. Yoshikawa et al., *Nano Letters*, 11, 1044, 2011.

F. Loizeau et al., *Proceedings IEEE MEMS*, 26, 621, 2013.

## 5 熱電材料の高性能化メカニズムの開拓

森 孝雄 (PI)

### 熱電材料開発の重要性と課題

人類が使用する石油・石炭・ガスなどの1次エネルギーは約3分の1しか有効使用されず、残りの大部分が廃熱となる。そのため、温度差が電圧に変換される現象「ゼーベック効果」を利用して、廃熱を有用な電気に直接変換する熱電材料固体素子に大きな期待が寄せられている。

しかし、現状では熱電材料の性能は十分ではなく、広く実用化するには至っていない。そもそも熱電材料による発電では、材料内部に温度差を作り出し、なおかつ電流を取り出す必要がある。しかし、電気を流しても熱は流さない（温度差を維持する）性質は一般的に成立しにくいいため、熱電材料の高性能化は決して容易ではない。また、従来の高性能熱電材料は、Bi (ビスマス)・Te (テルル)・Pb (鉛)・Ag (銀)・Hf (ハフニウム) など、稀少<sup>きせう</sup>で高価又は毒性のある元素を主成分とすることも問題であった。

そのため、MANA では、熱電材料の広範囲実用化に資する、より天然に豊富な元素からなる化合物を高機能化するメカニズムを開拓している。

### 熱電材料のナノアーキテククス

熱電高性能化手法として最近世界的に流行してい

る方法に、フォノンと電荷キャリアの平均自由行程の違いに着目して、フォノンをより選択的に散乱させて熱伝導を抑制し、熱電性能を高めようとするものがある。このために、適切なナノ構造を設計することが有効であり、MANA は熱電材料のナノシートを合成・利用するナノアーキテククスを確立し、熱電性能を高めた。

この方法はエネルギーを余り使わない容易な手段であり、今後この手法をより広い種類の熱電材料に応用させるとともに、各種ナノシートをナノアーキテククスによって設計した高次構造に積み上げれば、更に飛躍的な性能向上が期待できる (図7)。

### 新しい原理の探求

このように材料のナノ構造化は熱電高性能化のための強力な方法であるが、一方で、熱電材料の性能を表す性能指数を向上する新しい原理を見いだすことも非常に重要である。MANA では、CuFeS<sub>2</sub> 系材料が室温付近でも高い熱電性能を示すことを見いだした。この材料に含まれるCu (銅)、Fe (鉄)、S (硫黄) は毒性に問題がなく、黄銅鉱 (カルコパライト) という形で天然に豊富に存在する資源である。また、鉄の濃度を制御することで磁性を調整できる材料であり、電荷キャリアとマグノン (磁性体中の電子が持つ磁気モーメントの振動に関する準粒子) のカップリングを適切に調整すれば、熱電性能を向上できることを明らかにした (図8)。

C. Nethravathi, et al., *Journal of Materials Chemistry A*, 2, 985, 2014.

R. Ang et al., *Angewandte Chemie*, 54, 12909, 2015.

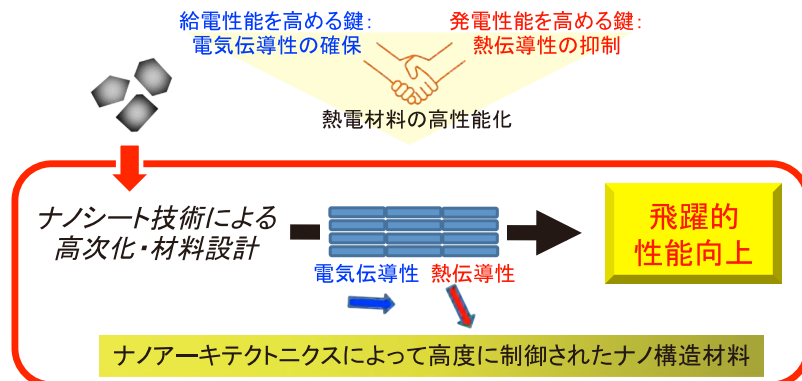


図7 ナノ構造利用による熱電高性能化。電気伝導性の確保と熱伝導性の抑制の両立は、ナノシート技術を駆使するナノアーキテククスを通じて実現し、飛躍的な熱電性能向上を達成する。

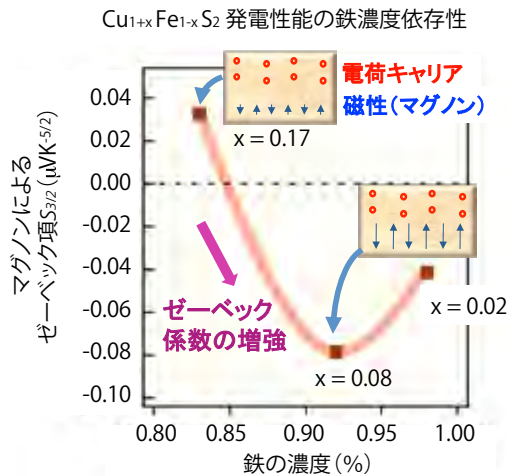


図8 磁性半導体  $\text{Cu}_{1+x}\text{Fe}_{1-x}\text{S}_2$  の鉄濃度を制御して電荷キャリアとマグノンのカップリング寄与を調整したときの、発電性能の変化（ゼーベック項  $S_{3/2}$  の変化）。図では  $x=0.08$  に対応する鉄濃度で、最適なカップリングが実現し、発電性能の向上が認められる。

## MANA のこれまでと将来への展望

MANA は、WPI プログラムの支援を受けて、ナノテクノロジー分野における世界トップレベルの研究拠点へと成長した。これは、WPI のミッションが実在的を射たものであったことを証明したとも言える。WPI のミッションの一つに、「融合」がある。基礎研究は個人研究に始まる。多くの場合、個人研究が発展していく過程で、研究の方向性や参画する研究者集団が形成されて高いレベルの研究へと進展する。MANA では、既に高いレベルにある研究を、更に「融合」させることで、世界トップレベルの成果を生み出す「研究のダイナミズム」を生み出した。また、WPI のミッションには、「国際化」も掲げられている。これも、異なる文化・考え方を我が国の研究現場に持ち込み、新たな研究環境を作り出し、研究レベルを高めるといった一種の融合効果をもたらした。既に紹介した5つの成果は、これらの融合効果によってもたらされたものであるが、MANA ではその他にも多くの芽が育っている。

融合や国際化は、異なる分野の研究者や様々な国の研究者を単純に混在させるだけでは、なかなか進まないことを MANA は、当初より認識していた。物質・材料研究機構 (NIMS) は、WPI プログラムに先立って文部科学省の支援を受けて、若手国際研

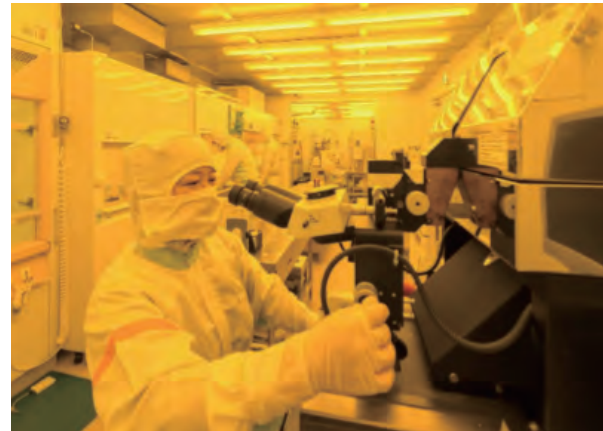


図9 世界中から集った若手研究者が MANA ファウンドリのクリーンルーム内で協力して実験を行っている様子

究拠点 (International Center for Young Scientist: ICYS) を運営していた。ICYS では、世界中から優秀な若手研究者を受け入れる仕組みを確立し、国際化に伴う「文化の衝突」に対処する経験も積んでいた。このベースの上に、WPI の傘下で国際化・融合化を促す MANA 独自の各種プログラムを運用して、MANA は我が国で最も国際化の進んだ国際研究拠点となり、成果レベルの点でもハーバード大学や MIT といった海外のトップレベル研究機関とも肩を並べるまでに成長した。現在、MANA に勤務する研究者の半数を外国人が占め、日本、アジア、欧米、オセアニアから集まった若手研究者が協力しながら、最先端の研究を推進している (図9)。

海外機関との連携は非常に活発であり、MANA で経験を積んだ250名を超える若手研究者が世界中に羽ばたき活躍しているなど、MANA を中心としたナノテクノロジー研究の国際ネットワークは確実に成長している。

MANA はこの成功体験を胸に深く刻みこんだ。世界トップレベルの研究拠点として研究成果の独自性とレベルの高さを達成するには、融合や国際化を主軸としたダイナミックな研究拠点運営が必要不可欠だということを学んだのである。この MANA のエッセンスを NIMS 全体へ、さらには我が国全体へと波及しつつ、MANA は今後も WPI が育て上げた拠点として、世界中の頭脳が集うナノテク研究の触媒的ハブとして活動していきたい。

(文責：中山 知信)



拠点長

ペトロス・ソフロニス

Petros Sofronis

## カーボンニュートラル・エネルギー社会 実現への道筋

I<sup>2</sup>CNER は、低炭素排出、経済効果の高いエネルギーシステムの構築やエネルギー効率の向上などに寄与する基礎研究に取り組んでいる。I<sup>2</sup>CNER が目指す研究の中には、燃料電池や新規触媒の開発、水素を燃料として安全に生産・貯蔵・利用するための技術があり、CO<sub>2</sub> の回収や貯留技術、エネルギーの有効利用についても研究している。さらに、研究者の連携や学際的研究（異分野融合）を通じて革新的な研究を促進するような国際的かつ学術的環境を整えることも、I<sup>2</sup>CNER の重要なミッションである。

### ■ 基本情報（2015 年度）

拠点長：ペトロス・ソフロニス

主任研究者(PI)：26 名（内 外国人研究者数 10 名、女性研究者数 1 名）

その他研究者：140 名（内 外国人研究者数 70 名、女性研究者数 17 名）

研究支援員：53 名

事務部門：部門長 増田 俊一

スタッフ 21 名（内 英語対応者割合 81%）

サテライト機関・連携機関：イリノイ大学アーバナシャンペーン校（アメリカ）など

URL：<http://i2cner.kyushu-u.ac.jp/ja/>



## 主な研究成果

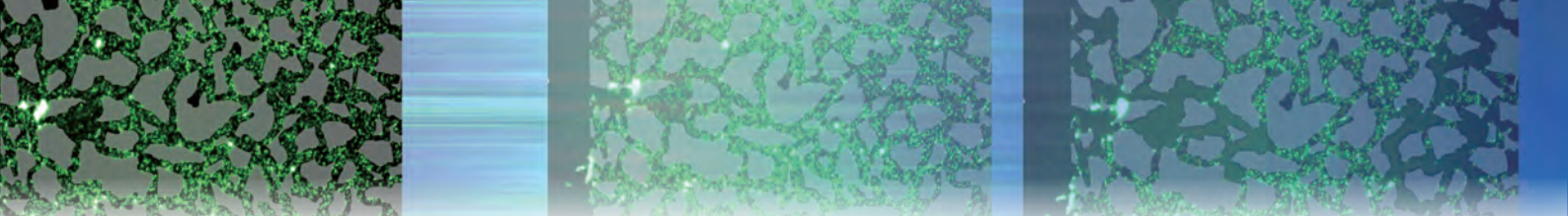
- 1 **高耐久性の有機無機ペロブスカイト太陽電池の開発**  
有機無機ペロブスカイト太陽電池において、水や酸素により結晶構造が分解し、膜中に鉛が蓄積して耐久性が低下することを解明し、この劣化を抑制する独自手法を提案して、耐久性を17倍も向上させることに成功した。
- 2 **強靱な燃料電池用ポリマー被覆カーボンナノチューブの開発**  
カーボンナノチューブをポリマーで2重被覆した高分子電解質形燃料電池カソード触媒を開発し、従来の触媒に比べて100倍以上の耐久性を実証するとともに、吸着させる白金の粒径微小化と削減を可能とした。
- 3 **低エネルギーイオン散乱法による原子単位の表面解析**  
優れた酸素分子の解離触媒能を有し、燃料電池の空気極として活用されるペロブスカイトに関して、新しい表面分析手法を駆使して表面組成を原子レベルで解析することにより、劣化原因を解決し耐久性を向上させた。
- 4 **小分子の活性化 (Small Molecule Activation)**  
自然界のヒドロゲナーゼという酵素をモデルにして、「水素分子 (H<sub>2</sub>) からヒドリドイオン (H<sup>-</sup>) を経由して電子を取り出す人工的な分子触媒」を開発した。さらにその触媒を用いて、分子燃料電池の作製に成功した。
- 5 **CO<sub>2</sub>の挙動とモニタリング: 効率的で安全なCO<sub>2</sub>貯留へ**  
デジタル岩石物理と呼ぶ手法を用いて岩石内部のCO<sub>2</sub>挙動を調べることで、効果的にCO<sub>2</sub>を貯留できる条件を明らかにすること、さらにモニタリングの結果からCO<sub>2</sub>飽和度を定量的に推定することが可能となった。



〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744  
Phone: 092-802-6932  
Email: wpi-office@i2cner.kyushu-u.ac.jp

背景はレーザー照射による発熱と青いプラズマ発光と岩石間隙モデルにCO<sub>2</sub>を圧入した際の挙動の観察





九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 (I<sup>2</sup>CNER、アिसナー) は、低炭素排出、高効率かつ経済効果の高いエネルギー系の構築を目指す先端研究を推進し、ひいては環境調和型で持続可能な社会の実現に貢献することを目指している。

未来のクリーンエネルギー社会の実現が直面する困難な課題を解決し、将来の針路となる画期的成果の創出を目標とする。

## 1 高耐久性の有機無機ペロブスカイト太陽電池の開発

安達 千波矢 (PI)

深刻化するエネルギー資源問題の有力な解決策として、太陽光発電が大きく期待されている。しかしながら、発電時に CO<sub>2</sub> を排出しない利点はあるが、他方では太陽電池の製造に多量のエネルギー消費と CO<sub>2</sub> 発生を伴う問題がある。

近年、ペロブスカイトと称する特有な結晶構造をもつ化合物で構成する有機無機ペロブスカイト太陽電池が、製造時 CO<sub>2</sub> 発生を抑えつつ、高い変換効率を達成できる可能性から、注目が集まっている。

ペロブスカイト太陽電池の光エネルギー変換効率は既に実用レベルの 20% を超えているが、耐久性は未だ不十分で、双方を両立させる必要があった。I<sup>2</sup>CNER はペロブスカイト太陽電池の劣化メカニズムを解明することにより、変換効率を上げつつ、耐久性も向上させることを目指した。

耐久性を低下させる最大の原因として、大気中の水や酸素が考えられる。そこで、ペロブスカイト太陽電池を窒素中及び大気中、それぞれの環境で試作し、耐久性に与える影響を検証した。試作品に実

験室で擬似太陽光を当て、変換効率が初期性能の 80% に減少するまでの時間 (LT<sub>80</sub>) を測定すると、大気中で作製した太陽電池は LT<sub>80</sub> = 230 時間止まりであったが、窒素中で作製したそれは LT<sub>80</sub> = 570 時間まで向上した。さらに、熱刺激電流測定による解析を行った結果、大気中で作製した太陽電池には、耐久性劣化を引き起こす多量のホールトラップ (解放されない正孔) の形成が確認された。

つまり、大気中の水や酸素により、ペロブスカイト構造 CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> の一部が CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>I、PbI<sub>2</sub>、Pb に分解され、特に Pb がホールトラップ形成による耐久性劣化の原因と考えられた。

この知見より、分解により生じた Pb<sup>2+</sup> が還元されて Pb が生成すると考え、その還元を抑制するために、ベンゾキノンと呼ぶ化合物を酸化剤としてペロブスカイト膜に微量だけ添加する方法を考案した。

最適なベンゾキノン添加濃度を選定することによりホールトラップの原因となる Pb 生成を自在に抑制可能となり、性能劣化時間 LT<sub>80</sub> を約 2000 時間まで延長させ、さらには 4000 時間程度まで向上させる目途をつけることに成功した (図 1)。

この素子は、従来の素子より約 17 倍も耐久性に優れ、報告されたペロブスカイト太陽電池において最も良好な耐久特性を示した。また、大きなペロブスカイト結晶を作製できるようになり、太陽電池の変換効率を約 1.5 倍 (約 30%) にまで向上させた。本研究によりペロブスカイト太陽電池の高い変換効率と耐久性を両立することができ、実用化への大きな一歩となることが期待されている。

C. Qin et al: Adv. Mat., 28, 446, 2016

## 2 強靱な燃料電池用ポリマー被覆カーボンナノチューブの開発

中嶋 直敏 (PI)

家庭用燃料電池「エネファーム」や燃料電池自動車に用いられている燃料電池は、触媒により酸素 (空気) と水素を反応させ水と電気を作り出す極めてクリーンな発電システムである。特に固体高分子形燃料電池 (水素イオンを通す高分子膜を電解質として用いる燃料電池) は、小型かつ軽量であるため、現在最も期待されている燃料電池である。

しかし、その触媒には高価な白金が大量に必要と

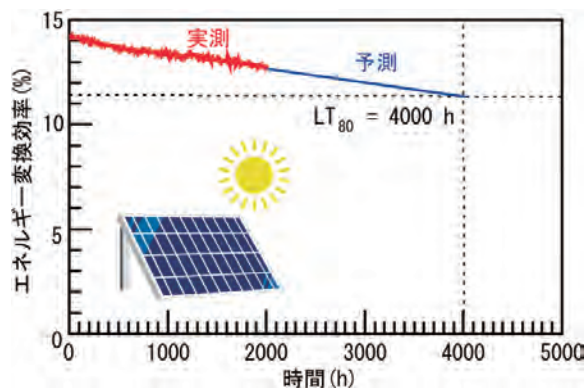


図 1 ベンゾキノンをペロブスカイト膜に添加したときのペロブスカイト太陽電池の耐久性

されることから、白金使用量の大幅な削減と、その耐久性の向上が重要な課題となっている。

触媒には微粒子化した白金を吸着（担持と呼ぶ）させるためカーボンブラックと呼ばれる導電性炭素材料を用いるが、カーボンブラックは白金粒子を良く担持する反面、多くの化学的欠陥部位を有し、機能劣化をもたらすジレンマが存在した。

そこでI<sup>2</sup>CNERは、カーボンブラックに替えて化学的欠陥部位を持たないカーボンナノチューブ（CNT）を利用することに挑戦した。従来、CNTは化学的欠陥部位を持たない反面、白金粒子の担持が困難であることから、代替が困難とされてきた材料であった。

この難題に対し、ポリベンズイミダゾール（PBI）と呼ばれる高分子材料をCNT表面に薄く被覆することにより、白金粒子を担持させることに成功した（図2にスキームを示した）。PBIはCNT表面にも強く吸着し、白金粒子も良く吸着することから、CNT上に白金粒子を吸着させる「両面テープ」の役割を果たしたのである。

図2は従来のカーボンブラックに白金粒子を担持した触媒からなる燃料電池（黒いプロット）とPBI被覆したCNTに白金粒子を担持した触媒からなる燃料電池（赤いプロット）の耐久性を比較したグラフである。高電位を与えて炭素材料を酸化させる厳しい実験を繰り返した際の電池起電力を測定している。従来型では極端な起電力の低下が見られるのに対し、PBI被覆したCNTを用いた場合にはほとんど低下がなく、飛躍的に耐久性が向上した（文献1）。

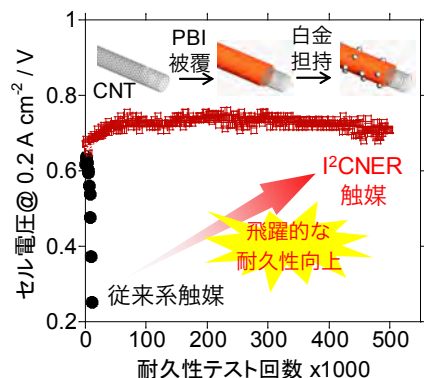


図2 PBI被覆CNTに白金粒子を担持するスキーム（グラフの上部）と燃料電池耐久性を示すグラフ。黒プロットはカーボンブラックを用いた触媒からなる燃料電池、赤プロットはPBI被覆CNTを用いた触媒からなる燃料電池の耐久性。

さらに、この新しい担持技術では、白金粒子のサイズを極小化することも可能であり、低白金化にもつながら（文献2）。いわば燃料電池低コスト化の切り札とされる技術である。

これら一連の研究成果は、次世代の燃料電池として大きな可能性を有しており、今後の燃料電池の普及に大きく貢献することが期待できる。

1) M. R. Berber et al: *Scientific Reports*, 5, article number 16711, 2015

2) I. H. Hafez et al: *Scientific Reports*, 4, article number 6295, 2014

### 3 低エネルギーイオン散乱法による原子単位の表面解析

石原 達己 (PI)

普及が期待される燃料電池の中でも、電解質に水を必要としない無機系の固体電解質を用いた固体酸化物電解質燃料電池はSOFC(Silicon Oxide Fuel Cell)と呼ばれている。高温で作動し、電極に白金などの高価な貴金属を必要とせず、エネルギー変換効率を高くできることから、広範囲の実用化が期待されている。

一般にSOFCでは酸化物イオン伝導体を電解質に使用し、電極にはペロブスカイトと呼ぶ特有の結晶構造をもつ酸化物を空気極（プラス電極）に、ニッケル系の金属を燃料極（マイナス電極）に用いる。

SOFC開発における最大の課題は空気極の酸素解離触媒として使用されているランタン・ストロンチウム・コバルト・フェライト(LSCF)が、空気中の硫黄などと反応しやすく、酸素解離活性が使用時間とともに低下することであった。

そこでI<sup>2</sup>CNERは、ペロブスカイト型酸化物LSCFの表面近傍における組成の時間的変化と空間的組成分布を、最新の分析手法である低エネルギーイオン散乱法(LEIS)で解析を行い、最表面の組成と空気極触媒の安定性の関係を解明する研究を進めた。

まず、LSCFは高温になるとともに、添加物であるストロンチウムが表面で濃縮を生じやすく、2時間程度の比較的短時間で酸化ストロンチウムの濃縮が行われることが解析できた。また、ペロブスカイト型酸化物は形式的に $ABO_3$ (A, B; 異なる陽イオン)の化学式で表される化合物であるが(LSCFの場合、Aはランタンとストロンチウム、Bはコバルトとフェ

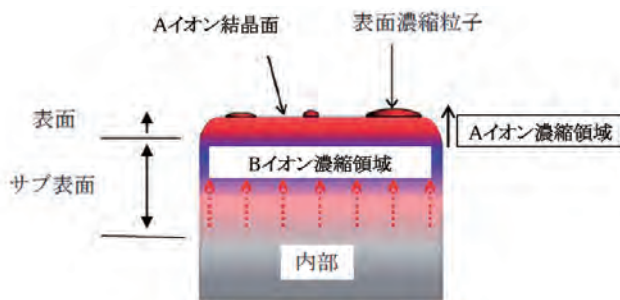
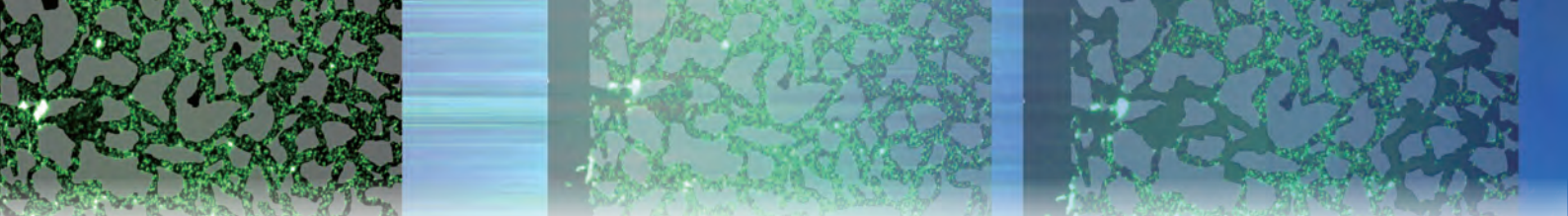


図3 今回、明らかにしたペロブスカイト酸化物の表面の構造。最表面にはペロブスカイト組成のうち A イオンが濃縮し、一部は、島状に析出する。その下には B イオンに富んだ領域が存在する。いずれも 3 から 5 原子相程度の厚さで、その下に  $ABO_3$  の組成からなる内部がある。

ライトに相当)、従来その表面は A, B, O イオンが等しく均一に存在すると考えられてきた。そこで次に、LEIS を用いて触媒 LSCF 表面近傍の組成を詳細に分析した結果、旧来の常識とは全く異なり、最表面 1 原子層には図 3 のように A イオンが濃縮されていることが明らかになると同時に、とりわけ添加物のストロンチウムが最表面に析出していることも解明された (図 3)。

今回の研究成果により、空気極触媒が微量の不純物と反応して活性を失う理由として、表面の組成の変動が密接に関係することが明らかになった。活性低下の原因となるストロンチウムの濃縮を抑制することにより、電極の活性と耐久性の向上に目途をつけた。長期にわたり安定に作動可能な空気極触媒を開発可能とし、ひいては優れた SOFC の実用化に向けて発展させることが期待される。

1) J. Druce et al: *Energy & Environmental Science*, 7, 3593, 2014

2) A. Staykov et al: *Chem. Mater.*, 27, 8273, 2015

## 4 小分子の活性化 (Small Molecule Activation)

小江 誠司 (PI)

$H_2$  (水素分子)、 $O_2$  (酸素分子)、 $H_2O$  (水分子)、 $N_2$  (窒素分子)、 $CO_2$  (二酸化炭素分子)、などの小分子は酸化還元を伴う活性化により、エネルギー源として、また有用物質の原材料として有効利用可能である。「小分子の活性化 (Small Molecule Activation)」と呼ばれ、近年著しい発展を遂げている研究分野である。ここでは、水素分子と酸素分子の活性化に焦点を絞り、 $\text{FCNER}$  の研究成果を説明する。

自然界は金属酵素であるヒドロゲナーゼに水素分子の活性化を託し、地球上の物質変換システムの一

部を担わせてきた。ヒドロゲナーゼは、Fe (鉄) や Ni (ニッケル) を用いて温和な条件で、水素の酸化反応  $[H_2 \rightleftharpoons H^+ + H^- \rightleftharpoons 2H^+ + 2e^-]$  を可逆的に行う。しかし、これまでこの反応を自在に制御できる人工触媒は開発されていなかった。 $\text{FCNER}$  は、ヒドロゲナーゼを模範とし、ヒドロゲナーゼと同様に「水素分子 ( $H_2$ ) からヒドリドイオン ( $H^-$ ) を經由して電子 ( $e^-$ ) を取り出す分子触媒」の開発に世界で初めて成功した (図 4、文献 1)。

さらに、この水素分子を活性化した分子触媒の設計を少し変えるだけで、酸素分子を活性化し、酸化数 4 価の鉄に酸素分子が結合したペルオキシ種 (広義の過酸化物) の合成も初めて実証した (文献 2)。

この分子触媒を設計する鍵となるのは、鉄中心を取り巻く配位子を、「鉄中心から電子を奪うように設計 (図 4)」することであり、これが水素分子を活性化できる分子触媒となる。またこれとは逆に「鉄中心に電子を与えるように設計」すると酸素分子を活性化できる分子触媒となることも明らかにした。

これらを発展させ、前述の水素分子を活性化する錯体分子 (金属イオンに分子やイオンが結合したもの) をアノード触媒、酸素分子を活性化する錯体分子をカソード触媒に用いることで、世界初の「分子燃料電池」の作製にも成功した。このような分子触媒は、燃料電池の電極触媒として使用されている白金触媒と比べても安く作製でき、触媒設計の自由度も大きいという利点があり、貴金属フリー分子燃料

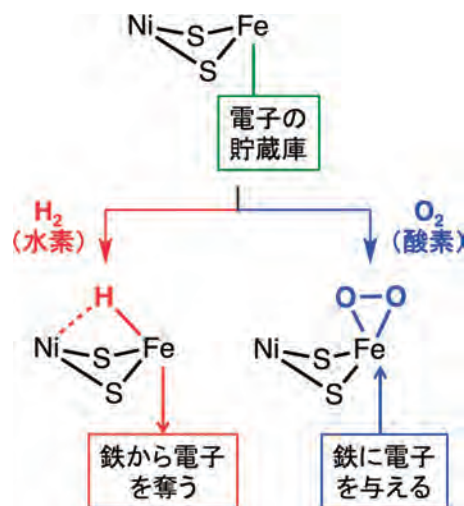


図 4 水素 ( $H_2$ ) と酸素 ( $O_2$ ) の活性化を自在に制御する仕組み。Fe: 鉄, Ni: ニッケル, S: イオウ

電池の開発を加速させることが期待される。

- 1) Ogo, S., et. al: *Science* 339, 682, 2013
- 2) Kishima, T., et. al: *Angew. Chem. Int. Ed.* 55, 724, 2016

## 5 CO<sub>2</sub> の挙動とモニタリング： 効率的で安全な CO<sub>2</sub> 貯留へ 辻 健 (PI)

Carbon Capture and Storage (CCS) は、石炭火力発電所といった CO<sub>2</sub> の大規模排出源において CO<sub>2</sub> を分離・回収し地中深部に貯留する技術で、近未来的に CO<sub>2</sub> を削減できる点で注目されている。地中に CO<sub>2</sub> を貯留するといっても、地下に巨大空間を建設する必要はなく、岩石の間隙（岩石を構成している粒子の隙間）に CO<sub>2</sub> を貯留する。この間隙が発達している地層を、貯留層と呼ぶ。良質な貯留層では、全体の 20~30% くらいが間隙である。そのため CO<sub>2</sub> 地中貯留では、細い井戸を使うだけで CO<sub>2</sub> を圧入・貯留することができる。しかし日本周辺には、CO<sub>2</sub> を地中貯留できる貯留層が広域的に分布している場所が限られているため、効率的に CO<sub>2</sub> を貯留する必要がある。I<sup>2</sup>CNER は、この課題を解決するため、デジタル岩石物理という新しいアプローチを用いて、限られた貯留層に効率的に CO<sub>2</sub> を貯留する手法を開発した。

まず特殊な CT 装置を用いて、岩石内部の微細な間隙形状を、μm スケールの解像度で抽出することにより、極めて精細な岩石間隙のデジタル（数値）モデルを作成した。そのモデルに対して、格子ボルツマン法という流体シミュレーションを適用し、岩石に内在する多数の間隙ネットワークを流れる CO<sub>2</sub> の挙動を正確に計算し、可視化した（図 5）。

開発した流体シミュレーション法を用いて、様々な貯留層の条件で CO<sub>2</sub> の挙動を計算し、岩石間隙の中に貯留できる CO<sub>2</sub> の量（飽和度）を調べた。その結果、CO<sub>2</sub> の飽和度は、水と CO<sub>2</sub> の粘性比とキャピラリー数の 2 つのパラメータから推定できることが明らかになった。キャピラリー数とは、表面張力や粘性力で表される値である。キャピラリー数と粘性比は、貯留層の状態や CO<sub>2</sub> の圧入方法によって決まる。つまり本研究で開発した手法を使えば、CO<sub>2</sub> を効率的に貯留できる条件を明らかにすることが可能となる。さらに、貯留層内の CO<sub>2</sub> の挙動や、貯留

量をコントロールできる可能性がある。CCS 技術の普及に貢献することが期待される。

- 1) T. Tsuji et al: *Advances in Water Resources*, 2016
- 2) F. Jiang et al: *Water Resources Research*, 51, 1710, 2015

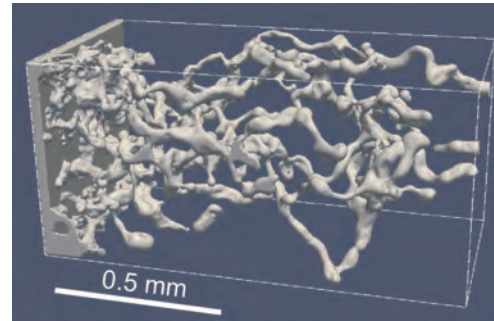


図 5 岩石の間隙の中を流れる CO<sub>2</sub> の挙動。この図では圧入 CO<sub>2</sub> だけを白色で表示し、地層水と岩石部は透明にしている。この CO<sub>2</sub> 挙動計算を様々な条件で実施すれば、効率的に CO<sub>2</sub> を貯留できる条件を明らかにできる。

## イリノイ大学から拠点長を迎えて

I<sup>2</sup>CNER は 2010 年の設立に際し、イリノイ大学のソフロンニス (Sofronis) 教授を研究所長として迎えた。以来、英語を公用語とする研究環境の中で、国際基準に沿った運営を高く標榜している。

世界トップレベルの研究者が活躍できる環境の整備、米国式の厳格な人事任用制度の実施、グローバル人材の育成、トップダウン方式の迅速な意志決定、著名研究者を招請しての国際シンポジウム開催、分野融合研究などを実現した。これら活動成果は学内にも波及させ、九州大学の世界的評価の飛躍に貢献することが期待される。

さらには、所長の絶え間ない努力により、米国エネルギー省 (DOE) やカリフォルニア州大気資源局 (CARB)、ヘルムホルツ研究所ユーリッヒ研究センター等を筆頭に、世界の研究機関や大学とのユニークな研究ネットワークが構築された。

I<sup>2</sup>CNER は世界を牽引するエネルギー研究所として、エネルギーにまつわる基礎科学にとどまらず、数学や社会学、計算科学との融合や分野横断研究を積極的に促進することにより、また頭脳循環のハブとして機能することを目指しながら、カーボンニュートラル・エネルギー社会の構築に寄与する研究を加速させている。

(文責：増田 俊一)



拠点長

柳沢 正史

Masashi Yanagisawa

## 世界中の人々に健やかな眠りを 睡眠・覚醒の謎に挑む

私たちが人生の約 1/3 を費やす睡眠。この身近な現象は、そのメカニズムや役割の大部分が未だに謎に包まれている。覚醒を維持する神経ペプチド・オレキシンを我々が発見したことで睡眠学が発展し、睡眠・覚醒に関わる神経回路や伝達物質が徐々に解明されつつあるが、睡眠・覚醒調節の根本原理や「眠気」の実体、またなぜ睡眠が必要なのかも、謎のまま残されている。

この睡眠の本質に迫り、睡眠障害及び関連する代謝疾患や精神疾患の診断・治療の新しい戦略を開発するため、睡眠の基礎研究に特化した世界随一の研究機関、IIIS が発足した。

### ■ 基本情報 (2015 年度)

拠点長：柳沢 正史

主任研究者 (PI)：22 名 (内 外国人研究者数 8 名、女性研究者数 2 名)

その他研究者：29 名 (内 外国人研究者数 10 名、女性研究者数 13 名)

研究支援員：11 名

事務部門：部門長 小久保利雄

スタッフ 17 名 (内 英語対応者割合 71%)

サテライト機関・連携機関：テキサス大学サウスウェスタン医学センター (アメリカ)、秋田大学、理化学研究所脳科学研究センター、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、京都大学、カリフォルニア大学バークレー校 (アメリカ) など

URL : <http://wpi-iiis.tsukuba.ac.jp/japanese>

## 主な研究成果

## 1 睡眠・覚醒制御ネットワーク解明への第一歩

睡眠・覚醒を制御する遺伝子変異を発見し、複数の責任遺伝子を世界で初めて特定した。睡眠・覚醒ネットワークの全容解明に向けた大きな一歩であるとともに、睡眠障害や関連疾患等の社会問題の解決にもつながる。

## 2 目覚めを制御する低分子医薬の発見

低分子オレキシン受容体作動薬を世界に先駆けて創出した。開発した薬物は覚醒時間の延長に効果があり、ナルコレプシーの病態モデルマウスでも症状の改善を確認した。睡眠疾患の治療に大きな希望が持てる。

## 3 レム睡眠の意義に迫る

レム睡眠とノンレム睡眠の切替えを司る脳部位を特定し、レム睡眠を人為的に操作できるマウスを開発した。レム睡眠は、記憶形成や脳機能の回復に重要なデルタ波をノンレム睡眠中に誘発する役割があることを発見した

## 4 体内時計のペースメーカー

体内時計の中核とされる脳の視交叉上核において、体内時計のペースメーカーとしてはたらく神経細胞群を初めて特定した。細胞間の物質伝達が体内時計の同調において重要であることを示す新たな知見が得られた。

## 5 覚醒と記憶制御をつなぐ新たな神経ネットワークの発見

記憶保持の過程には青斑核由来のドーパミン作動性ニューロンによって海馬に送られるシグナルが重要であることを明らかにした。青斑核は覚醒を司る中枢であり、かつ記憶の制御においても重要な役割を果たしている。



〒305-8575 茨城県つくば市天王台 1-1-1 睡眠医科学研究棟  
Phone: 029-853-5857  
Email: wpi-iiis-alliance@ml.cc.tsukuba.ac.jp



私たちが生涯のおよそ三分の一を費やす睡眠は、誰もが毎日行う身近な行動でありながら、じつは未だにきちんとメカニズムや役割を説明できない現象である。様々な要因でこの睡眠が攪乱される睡眠障害は甚大な経済損失をもたらす、現代社会において大きな問題となっている。かつて柳沢正史らにより神経ペプチド・オレキシンが発見され、この物質が睡眠・覚醒制御において極めて重要な役割を果たすことが明らかになったことで睡眠学の扉が開き、新たな研究領域が創成されてきた。しかし、睡眠・覚醒がどのように調節されるのか、高等脊椎動物ではなぜふたつの睡眠ステージ — 急速眼球運動（Rapid Eye Movement、REM）を伴うレム睡眠と、深い眠りであるノンレム睡眠 — が存在するのか、そもそも「眠気」の神経科学的な実体はいったい何なのか、そして我々はなぜ眠らなければならないのかなど、未だに多くの根源的な謎に包まれている。

IIIS は、この睡眠という現代科学最大のブラックボックスに挑み、睡眠・覚醒制御機構を解明するとともに、睡眠障害及び関連の深い代謝・精神疾患の診断・治療に役立つ新しい戦略を開発することを目指して、2012年に発足した。

## 1 睡眠・覚醒を制御するネットワーク解明への道を拓く新規遺伝子の発見

柳沢 正史 (PI) 船戸 弘正 (PI)

睡眠・覚醒の根本原理は未だ謎に包まれており、例えば誰もが日常的に体験する「眠気」の脳内での実体や、日々の睡眠量をほぼ一定に保つメカニズムは全く明らかになっていない。柳沢と船戸は、興味の対象となる性質や表現型をもつ個体から遺伝子型を調べていく「フォワード・ジェネティクス」という手法を用いて、この大きな謎に挑んできた。

柳沢・船戸らは、化学物質を使ってランダムな突然変異を起こさせた 8,000 匹以上のマウスそれぞれについて脳波と筋電図を調べ、睡眠・覚醒に異常のある個体を探索した。そして得られた個体から変異家系を樹立し、表現型に影響を与える染色体領域を絞り込みゲノムを調べることで、どの遺伝子に変

異が起きると睡眠・覚醒に影響が出るのかを追跡した。その結果、覚醒時間が大幅に減少するスリーピー（Sleepy）変異家系と、レム睡眠が著しく減少するドリームレス（Dreamless）変異家系を樹立することに成功し、スリーピーに *Sik3* 遺伝子変異を、ドリームレスに *Nalcn* 遺伝子変異を見いだした。

SIK3 タンパク質はリン酸化酵素で、中央部にプロテインキナーゼ A 認識部位をもつが、*Sik3* 遺伝子変異ではこの部位が機能しなくなっている。ショウジョウバエや線虫でもこの部位は保存されており、SIK3 は睡眠様（睡眠のような）行動を制御していることが明らかとなった。脊椎動物以外の幅広い動物種における睡眠様行動も、哺乳類と同じく *Sik3* 遺伝子を介した分子機構で制御されていることは、非常に興味深い。

また、断眠させて「眠気」が強くなったマウスでは、SIK3 のリン酸化酵素活性を制御するアミノ酸が強くリン酸化されていた。このことは、SIK3 が「眠気」の細胞内シグナル伝達経路を構成していることを示唆する。

NALCN タンパク質はイオンチャンネルであり、遺伝子変異によって膜貫通部位のアミノ酸がひとつ変化する。ドリームレス変異マウスの脳幹部を詳しく調べたところ、深部中脳核にあるニューロンの活動パターンが変化していた。この脳領域にはレム睡眠の終止に関わるニューロンが含まれることから、ドリームレス変異マウスにおけるレム睡眠の減少に説明がつく。

以上のように、*Sik3* と *Nalcn* が睡眠・覚醒制御に関わる重要なプレイヤーであることが世界で初めて



図 1 今回発見されたふたつの遺伝子が調節に関わる睡眠の各ステージ。SIK3 はノンレム睡眠の必要量を決定づけ、一方 NALCN はレム睡眠の終止に関わっていると考えられる。

示された。これらの遺伝子は睡眠との関連性が全く知られておらず、これからの睡眠学に大きな影響を与えるだろう。今後、SIK3 や NALCN を手掛かりとして、睡眠と覚醒の切替えやノンレム睡眠とレム睡眠の切替えに関わる細胞内シグナル伝達系、睡眠・覚醒ネットワークの全容解明を進め、将来的には睡眠障害や関連疾患等の社会問題の解決にも繋<sup>つな</sup>がっていく。

Funato et al: Nature 539, 378, 2016

## 2 目覚めを制御する低分子医薬の発見 オレキシン受容体作動薬の開発

長瀬 博 (PI)、柳沢 正史 (PI)

櫻井武と柳沢は、オレキシンとその受容体が覚醒の促進と睡眠・覚醒の安定化に重要な役割を果たすことを発見し、脳内のオレキシンが欠乏すると、時や場所を選ばず強い眠気に襲われる難病・ナルコレプシーの病因となりうることを明らかにした。この成果を元に、オレキシン受容体を阻害することで睡眠薬として作用する薬（拮抗薬）の研究が進展し、新しいタイプの不眠症治療薬が最近になって承認・発売された。一方、オレキシン受容体に結合してオレキシンと同様の作用をする薬（作動薬）は、覚醒を促進するためナルコレプシーの病状改善に有効であると考えられてきたが、技術的な問題から開発が遅れていた。そこで、オレキシンの代わりとなり、<sup>ふくくう</sup>腹腔内（全身）投与でも治療効果が期待できる低分子のオレキシン受容体作動薬の創出が待たれていた。

創薬化学の専門家である長瀬は、低分子オレキシン受容体作動薬の設計・合成に、柳沢とともに挑んできた。オレキシンには 1 型及び 2 型オレキシン受容体が存在するが、睡眠・覚醒の制御に重要なのは、このうち 2 型受容体である。長瀬と柳沢の研究チームは、25 万種類を超える化合物を網羅的に調べ、2 型オレキシン受容体に対して活性を示すヒット化合物を複数見いだした。これらのうち、特にスルホンアミド構造を持つ化合物に注目し、そこから誘導体を 2,000 種類以上設計・合成して活性と薬理作用を比較することにより、鍵となる構造要素を見いだした。これを足がかりに最適化を繰り返した結果、高い作用でオレキシン 2 型受容体を選択的に作動させ、

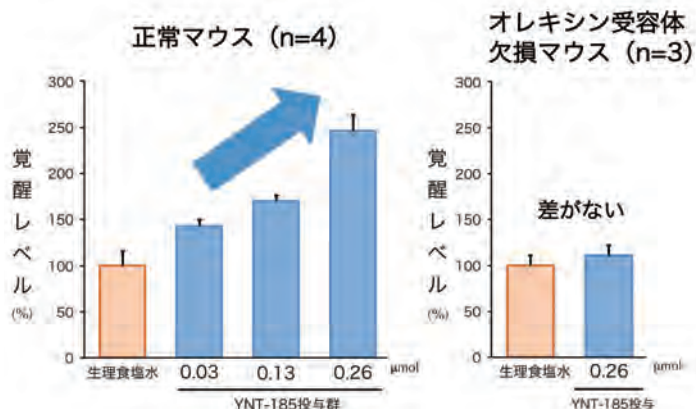


図 2 YNT-185 の覚醒に対する影響。YNT-185 を脳室内投与すると両依存的に覚醒が増加したが、オレキシンの受容体を欠損したマウスでは覚醒効果は得られなかった。

動物への投与が可能な低分子化合物 YNT-185 を得ることに成功した。この化合物をマウスの脳室内に投与したところ、覚醒が顕著に誘導された。YNT-185 は、脳室内投与のみならず腹腔内（全身）投与でも覚醒誘導効果を示し、さらにはナルコレプシーの病態モデルマウスでも治療効果が見られた。最近では更に高活性な化合物も得られ、研究は一段と加速しつつある。今後、更に薬物動態などを調査・改善することで本格的な動物実験や臨床研究へと発展でき、ナルコレプシーを根本治療できる「夢の新薬」の誕生へと着実に歩を進めることができるであろう。

Nagahara T et al.: J. Med. Chem. 58(20): 7931, 2015.

## 3 なぜ夢を見るのか？レム睡眠の意義に迫る

林 悠 (PI)

なぜ夢を見るのか — 夢を生み出すレム睡眠の発見から 60 年以上経った今なお、レム睡眠の役割は脳科学における最大の謎の一つである。レム睡眠とノンレム睡眠が交互に繰り返すのは複雑な脳を持つ哺乳類と鳥類のみであることから、これら二つの睡眠は脳の高等な機能に関わると考えられてきた。レム睡眠は新生児期や学習直後に多いことが知られていたものの、レム睡眠を有効に阻害する方法がなかったため、具体的な役割を調べるのが困難であった。また、レム睡眠とノンレム睡眠の切替えのメカニズムに関して、脳のどの細胞がスイッチの役を担っているのかは、正確には分かっていなかった。



林らは、マウスの遺伝子操作技術を駆使し、レム睡眠からノンレム睡眠へと切替えるスイッチの役割を担う神経細胞を発見した。更に最新の神経科学的手法を用いてこれらの神経細胞の活動を自在に操ることに世界で初めて成功し、レム睡眠を増加させたり減少させたりしてその効果を解析した。

レム睡眠を操作した影響は、デルタ波と呼ばれる脳波に現れた。デルタ波はレム睡眠と同様に哺乳類と鳥類に固有の現象であり、神経細胞同士の連絡であるシナプスを強め、学習や記憶形成を促す作用が知られている。デルタ波はノンレム睡眠中に最も生じやすいが、レム睡眠をなくすと、次第にノンレム睡眠中のデルタ波が弱まり、逆にレム睡眠を増やすと、デルタ波が強まった。つまり、レム睡眠にはデルタ波を強める作用があり、この作用を介して学習や記憶形成に貢献している可能性がある。

また林らは、スイッチとしてはたらく細胞がどの細胞に由来するのかを調べ、親となる細胞（神経前駆細胞）も同定することに成功した。すると興味深いことに、この神経前駆細胞からは、レム睡眠とノンレム睡眠の切替を担う細胞だけでなく、睡眠から覚醒への切替を担う細胞も生み出されることがわかった。脳の状態を司る多様なスイッチ細胞を生み出す神経前駆細胞の存在が、初めて明らかとなっ



図3 ほ乳類、鳥類に固有の記憶学習・脳発達には、レム睡眠によるデルタ波の誘導が関与している。

たのである。この発見は、睡眠と覚醒だけの単純な脳の状態しか持たない生物から、レム睡眠やノンレム睡眠といったより複雑な脳の状態もつ生物が進化した歴史を裏付ける、最初の証拠であると考えられる。

Hayashi Y et al.: *Science* 350(6263): 957, 2015.

#### 4 体内時計の「ペースメーカー」細胞を発見

柳沢 正史 (PI)、ジョゼフ S. タカハシ (PI)

睡眠を制御する体内時計は脳の視床下部にある視交叉上核とよばれる部位によって支配されている。視交叉上核は、生化学的、生理学的及び行動学的プロセスにおいて約 24 時間の概日リズムを制御しており、複数の遺伝子が関与するフィードバック機構によって調節が行われている。視交叉上核は、100 種類以上の神経伝達物質、神経ペプチド、サイトカイン、成長因子などを分泌する約 20,000 個ものニューロン群を含んでおり、これらの分子の一部は視交叉上核のニューロン間で周期の長さと同調させるプロセス（細胞間カップリング）に関与していると考えられている。しかし、視交叉上核のどのタイプの細胞が体内時計の同調現象に関与しているのかは未知であった。

柳沢とタカハシらのグループは、視交叉上核において集中的に発現する神経ペプチド、ニューロメジン S に注目した。マウスを用いた最新の遺伝学的手法を組み合わせることにより、ニューロメジン S を産生する神経細胞群の体内時計を任意のタイミングで可逆的に操作し、行動リズムをリモートコントロールでオン/オフできる世界初のシステムを構築した。そしてこの系を用いることで、(1) 体内時計分子である *Clock*<sup>Δ19</sup> の過剰発現によりニューロメジン S を産生する細胞群のリズム周期を遅くすると、視交叉上核全体、及び行動のリズムも遅くなること、(2) ニューロメジン S 細胞群の体内時計分子機構 (*Bmal1*, *Per2*) を壊すと視交叉上核全体、及び行動のリズムもなくなること、(3) ニューロメジン S 細胞群からの神経伝達を阻害すると視交叉上核全体及び行動のリズムがなくなること、を明らかに

した。これらの結果は、視交叉上核にある神経細胞の約40%を占めるニューロメジンS産生細胞群が、マスタークロックとして機能していることを明確に示している。さらにこの神経細胞群をターゲットとして、概日リズム障害等の疾患の診断・治療が可能になると期待される。

Lee IT et al.: *Neuron* 85: 1086, 2015.

## 5 覚醒と記憶制御をつなぐ新たな神経ネットワークの発見

ロバート W. グリーン (PI)

ヒトでも動物でも、取り込まれた情報が記憶として保持されるまでの「<sup>おぼ</sup>憶える」過程（記憶の記録）において、その直前・直後に新奇な出来事や強い感情を伴うとエピソード的記憶の保持が強化される。新奇性効果と呼ばれるこのプロセスには、<sup>ぶくそくひがい</sup>腹側被蓋野由来のドーパミン作動性ニューロンによって<sup>かいば</sup>海馬に送られるシグナルが重要であると考えられてきた。

ドーパミン及びノルアドレナリンはモノアミン神経伝達物質で、どちらも同じアミノ酸・チロシンから一連の酵素反応を経て合成される。ドーパミンはノルアドレナリンの<sup>ぜんくたい</sup>前駆体であり、ノルアドレナリンの合成にはドーパミンが必須である。<sup>せいばんかく</sup>青斑核にあるチロシンヒドロキシラーゼ陽性神経細胞は主にノルアドレナリンを放出すると考えられており、特に、青斑核から脳内の数々の部位に広く投射することで、覚醒などの様々な高次機能を制御するとされてきた。しかし今回、この神経細胞はノルアドレナリン作動性ニューロンとしてだけでなくドーパミン作動性ニューロンとしての側面も持ち、海馬への投射を介して、記憶の制御も行っていることが明らかとなった。

グリーンらは、マウスを用いた日常記憶タスクをはじめとする行動実験や、特定のニューロンを光で制御する技術（光遺伝学）を用いた一連の研究により、(1) 新奇な環境では青斑核のノルアドレナリン作動性ニューロンの発火が起り、ドーパミンが放出されること、(2) 記憶を司る海馬へは、青斑核のノルアドレナリン作動性ニューロンから放出されるドーパミンの方が腹側被蓋野のニューロンからよりも多く送られること、(3) 青斑核のノルアドレナリン作

動性ニューロンを光遺伝学的に活性化すると新奇性効果に類似した状態になること、(4) 腹側被蓋野を不活性化しても、新奇性に関連した記憶の強化に影響がないこと、を明らかにした。

これらの結果は、腹側被蓋野由来ではなく青斑核からのびるノルアドレナリン作動性ニューロンから放出されたドーパミンが、記録後の記憶の強化を仲介することを示している。これまで青斑核はノルアドレナリン作動性ニューロンを含む核であると長く理解されてきたが、本研究によりドーパミン作動性ニューロンとして海馬に働きかけていることが新たに明らかとなった。これはまさに「教科書の記述を書き換える発見」である。また、覚醒を司る中枢であると考えられていた青斑核が、ドーパミンを介して記憶の制御においても重要な役割を果たしていることは極めて興味深い。

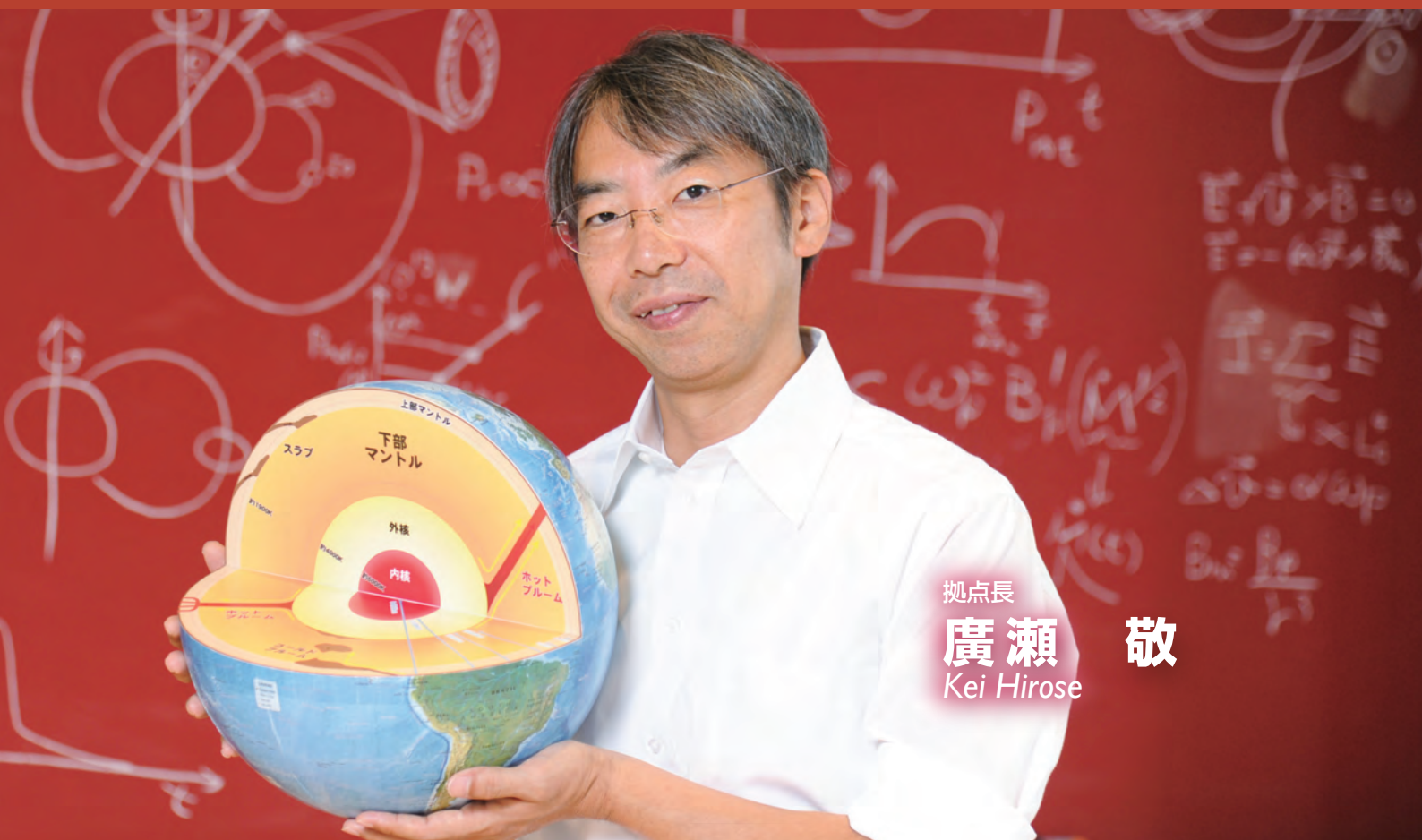
Takeuchi T et al.: *Nature* 537 (7620): 357, 2016.

## WPI について

IISの大きな特徴は、米国大学のよい点を導入した組織運営を行っていることである。米国トップレベルのテキサス大学サウスウェスタン医学センターで20年以上にわたって教授・主任研究者として活躍した柳沢の経験を生かし、米国式の「デパートメント（学部）」の長所を取り入れた研究組織を構築・運営することで、世界一の研究拠点を作り上げていくことがIISの究極的なゴールだ。優秀な研究者には年齢・キャリアを問わず主任研究者としての機会を与えることや、研究室や実験室スペース、高額な機械などは一部の者が独占せず機構内で柔軟かつ流動的に共有しあうなど、IISには従来の日本の研究組織にはない、自由闊達な<sup>じゆうかつたつ</sup>雰囲気がある。

この構想のもと、IISでは基礎生物学、実験医学、創薬科学の三つの研究領域を融合し、睡眠を多角的に理解する「睡眠科学」という新しい分野の確立を目指している。ここでも、医師であるとともに薬理学の研究バックグラウンドをもち、睡眠医科学のパイオニアとして活躍してきた柳沢のリーダーシップが大きな駆動力となっている。

(文責：雀部 正毅)



拠点長  
**廣瀬 敬**  
Kei Hirose

## 地球の起源と生命の起源の 解明を目指す

地球科学分野、生命科学分野、惑星科学分野をはじめとするトップレベルの研究者が国内外から集い、学際的な統合アプローチによって「地球と生命の起源」を探る、極めてユニークな研究機関である。地球が太陽系の中でどのようにして生まれたのか、どのようにして地球に生命が誕生し、また地球と生命はどのようにして今のような形に至ったのか、を研究する。さらに地球と生命の起源を理解することを通して、太陽系以外の惑星系における生命についても考察する。

### ■ 基本情報 (2015 年度)

拠点長：廣瀬 敬

主任研究者 (PI)：17 名 (内 外国人研究者数 7 名、女性研究者数 1 名)

その他研究者：59 名 (内 外国人研究者数 20 名、女性研究者数 17 名)

研究支援員：30 名

事務部門：部門長 星元紀 (2016 年度より櫻井 隆)

スタッフ 23 名 (内 英語対応者割合 91%)

サテライト機関・連携機関：愛媛大学、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、  
海洋研究開発機構 (JAMSTEC)、プリンストン大学 (アメリカ)、  
ハーバード大学 (アメリカ) など

URL：<http://www.elsi.jp/ja/>

## 主な研究成果

## 1 月の誕生を説明するジャイアント・インパクト説の精密化

月は、地球に衝突した原始惑星によって誕生したといわれている。しかし、衝突説が正しいとするとなぜ月の元素組成が地球とほぼ同じなのか。数値シミュレーションを高度化すると、この矛盾が解ける。

## 2 地球誕生時に海水の 80 倍の水が存在

マントル物質の高圧実験により、地球コアに大量の水素が存在するはずであることがわかった。地球は形成時に大量の水（現在の海水の 80 倍）を獲得したが、その大部分がコアに取り込まれたため、生命発現時点においても表面の陸地は水没しなかったのではなかろうか。

## 3 生命誕生前の初期地球における炭化水素の合成過程を推定

長野県白馬地域の温泉水が無機的に合成されたメタンガスを含むことを発見した。このような化学反応が初期の地球で有機物を作り、それが生命の誕生につながった可能性を示した。

## 4 生命を作るのに最適な材料を計算化学で探る

地球上のほとんど全ての生命体は 20 種類のアミノ酸だけを使っている。この 20 種類はなぜ選ばれたのか、計算化学が読み解く。

## 5 人工細胞を創り出すことから、生命の起源を探る

細胞膜を模した人工膜中に合成蛋白質<sup>たんぱくしつ</sup>を組み込む手法を開発研究した。この研究は、現実の細胞が機能する仕組みについての理解を深めるだけでなく、医薬分野や工業分野への活用を促すであろう。



〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1-IE-1

Phone: 03-5734-3414

Email: info@elsi.jp

## 研究の背景と目的

約 46 億年前に初期太陽を中心とするガス・ダストの円盤から地球が生まれた。地球と小天体との衝突（ジャイアント・インパクト）により、月ができると同時に地球の表面は高温のマグマで覆われたが（マグマオーシャン）、その後次第に冷えていったと考えられている。

地球と生命は、相互に影響し合いながら進化を続けている。46 億年の歴史の中では、コアの形成による地磁気の生成と変化、光合成を行う生物の登場による酸素の供給、マントル対流による大陸の形成と移動、地球全体が氷におおわれる時期（スノーボールアース）もあったことが分かっている。こうした地球環境の変化は、生命の進化に大きな影響を与えてきた。

最近の天文学観測により、宇宙には地球と同じような生命を育む条件を備えた惑星が多数、存在することが分かってきた。地球と生命の起源を探ることは、宇宙における生命の存在の可能性を探ることにつながる。

地球上の生命は、初期地球のどこかで誕生したと考えられる。誕生のプロセスはまだ明らかになっていないが、基本的には無機物から有機物が合成され、それらが高分子化することでペプチド、原始 RNA、原始細胞膜が構成され、これらをもとに原始生命が誕生したと考えられている。

地球生命研究所（ELSI；エルシー）は、人類が長年追い求めてきた 4 つの疑問（図 1 の ABCD）に挑む研究機関である。

- A. 地球の起源：地球は太陽系の中でどのようにして生まれたのか、なぜ地球には水があるのか、最初の大気はどのようなものだったのかを探る。小惑星、火星探査からも重要な情報が得られる。
- B. 地球 - 生命システムの起源：生命はいつ、どこで、

どのようにして誕生したのか、初期生命のゲノムはどのようなものだったのか、を探る。

- C. 地球 - 生命システムの進化：固体地球の変動は地球生態系をどう変えたのか、宇宙の変動は地球環境にどのような影響を与えたのか、地球大気にはなぜ酸素が存在するのか、を研究する。
- D. 宇宙における生命：地球と生命の起源を理解することを通して、宇宙の中で地球はどれほどユニークな存在なのか、地球外生命体を探す手立てとしてどのようなものがあるのか、を考察する。

ELSI では、多くの研究者がそれぞれの専門分野を深めながら、これら 4 つの疑問を統合的に理解するため密接に協力して研究を進めている。その主な成果を次にまとめる。

## 1 月の誕生を説明するジャイアント・インパクト説の精密化

井田 茂 (PI)

月は、火星くらいの質量の原始惑星が地球と衝突して放出された物質からできたとする、巨大衝突説（ジャイアント・インパクト説）が支持を得ている。この説に基づくこれまでの数値シミュレーションによると、月はほとんど衝突した天体の物質からできているはずである。にもかかわらず、地球と月の元素同位体比は似通っており、地球と衝突天体とは組成が異なるはずなのになぜか、という謎があった。ELSI の研究者たちはシミュレーションの手法を見直し、地球のコアとマントル、表面と宇宙空間のような不連続面がある場合には、従来の手法には問題があることに気づき、改良を試みた。

コアとマントルのような不連続面も正しく扱える新しい数値計算手法によるジャイアント・インパクトのシミュレーションによると、地球に衝突した天

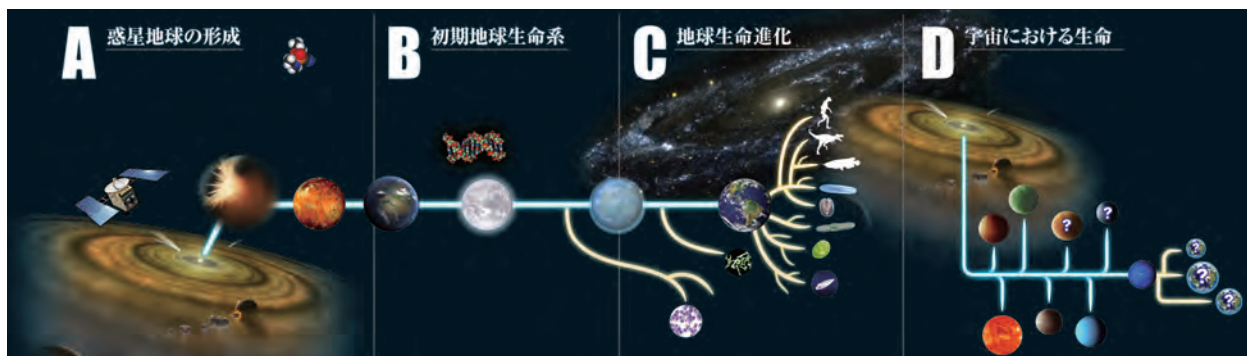


図 1 地球生命研究所の主要研究課題



図2 ジャイアント・インパクトのシミュレーション新旧比較

体は従来のモデルより小さくてよく、さらに、放出されて月を作った物質には地球からの物質も多く含まれることがわかった(図2)。これで、地球と月の元素同位体比が似ていることが説明できる。

今回開発された計算手法でもまだ、天体と宇宙空間との境界面の扱いが完全ではないが、このような研究を更に進めることにより、月の起源のみならず、生命が誕生した頃の初期地球の表面環境についての手掛かりも得られると期待される。

N. Hosono et al., *Icarus* 271, 131, 2016

## 2 地球誕生時にコアには海水の80倍の水が存在

廣瀬 敬(PI)

地球は深さ2900 kmを境に、岩石で構成されるマントルと、鉄合金で構成される液体コア(外核)に分けられる。下部マントルは固体であることから、下部マントルの温度はマントル物質の融解温度以下でなければならない。マントル直下に位置する外核の温度もそれ以下である必要があるが、一方で外核の鉄合金は液体であり、その温度はコア物質の融解温度より高い必要がある。鉄合金の融解温度は、その不純物組成に大きく依存するので、外核の温度はその化学組成に制約を与える。

ELSIの研究者たちは、マントル物質を地球深部に相当する百万気圧を超える高圧高温環境下に置いた後(図3)、融解の痕跡の有無を大型放射光施設SPring-8において確認し、コア直上のマントルの融解温度が従来の見積りより少なくとも400度低い、



図3 超高压状態を再現するダイヤモンドアンビルセル装置

約3300°Cであることを突き止めた。また、純鉄の融解温度はコア最上部でおよそ3900°Cであり、液体コア(外核)は不純物によってその融解温度が600度以上下がっている。このことから、コアには水素が重量にして0.6%程度含まれている必要があると結論づけられる。これは水に換算すると地球全質量の1.6%(現在の海水の約80倍)に当たり、地球はその形成時に大量の水を獲得したことを意味し、最近の太陽系形成理論の予想とも一致する。理論予想では、大量の水が陸地を水没させ生命の発生に不利ではないかと危惧されていたが、水は表層ではなくコアに蓄えられていたわけで、この点でも矛盾がない。

なお、この研究を含む一連の業績により、廣瀬拠点長は2016年度の藤原賞を受賞している。

R. Nomura et al., *Science* 343, 522, 2014

## 3 生命誕生前の初期地球における炭化水素の合成過程を推定

黒川 顕(PI)

生命誕生の場として有力な候補の一つに、蛇紋岩と呼ばれる岩石を含む温泉環境がある。蛇紋岩は現在の地表にはわずかししか露出していないが、地球誕生直後の海底では最もありふれた岩石だったと考えられている。この岩石が水と反応することで高濃度の水素ガスが生成され、生命誕生に必要なエネルギーと有機物の合成を促した可能性がある。ELSIの研究者たちは、このような特殊な環境の温泉が長野県白馬地域に点在していることを突き止め、2010年から調査を行ってきた。

この温泉ガスは約50°Cで水素ガスとメタンなどの炭化水素を含む。メタン(CH<sub>4</sub>)が温泉水と同じ程度の重水素を含むことから、温泉の炭化水素が水を水素源として合成されていることがわかった(図4)。

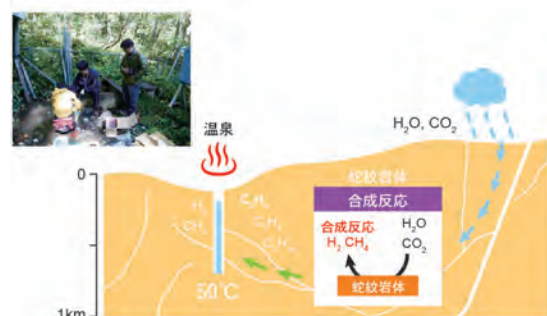



図4 白馬温泉でのサンプル採取風景と、蛇紋岩の表面における炭化水素の合成模式図



この温泉で、今まで知られていなかった無機的な化学反応によって、生命のもととなる炭化水素が合成されていることが分かったことから、同様の化学反応が初期地球で有機物を作り、それが生命誕生につながった可能性が示されたといえる。これは ELSI の主任研究者・黒川顕を代表者として 2014 年度より開始された科学研究費補助金・新学術領域研究「冥王代生命学の創成」の成果の一つである。

K. Suda et al., *Earth and Planetary Science Letters* 386, 112, 2014

#### 4 生命を作るのに最適な材料を計算化学で探る

H. James Cleaves (特任准教授)

アミノ酸には極めて多くの種類があるのに、地球上のほとんど全ての生命体は 20 種類のアミノ酸だけを使っている。この 20 種類はなぜ選ばれたのか？

この問いに答えるため、ELSI の研究者たちは、アミノ酸を構成する 5 種類の元素（炭素、水素、酸素、窒素、硫黄）から作られる数十兆種類のアミノ酸構造を計算してデータベースにし、地球上の環境で安定に存在する候補を約 2000 に絞り込んだ。この中からランダムに 20 種類を取り出すやりかたは 1 億通りもあるが、その中で、どれだけ多様なタンパク質を作りうるかを比較すると、生命体が使っている 20 種類のアミノ酸より優れた組は 6 セットしかないことを見いだした。しかもこの 6 セットについても、生成するためのエネルギーは生命体が使っている 20 種類よりも大きい。生命体がこれらの 20 種類のアミノ酸からできているのは、エネルギー的にも優位であるからで、したがって自然淘汰の結果と考えられる。

Ilardo et al., *Nature Scientific Reports* 5, 9414, 2015

#### 5 人工細胞を創り出すことから、生命の起源を探る

車 兪澈 (特任准教授)

自己複製を行う人工細胞の生成に向けて世界中の研究者がしのぎを削っている。その中で一つの鍵となるのが、人工的な細胞膜の生成である。細胞膜は細胞内部を外界と隔てる脂質の膜で、膜タンパク質と呼ばれる様々なタンパク質分子が埋め込まれ、膜を通る物質の出入りをコントロールしている。

ELSI の研究者とその協力者たちは、細胞からひとつひとつ単離した 36 種類の酵素と、精製されたりボソーム（アミノ酸からタンパク質を合成する）などからなるタンパク質合成系（PURE システムと名付けられている）を開発し、様々な応用研究を進展させてきた。例えば、タンパク質を細胞の中から外へ通す重要な膜チャネルを合成し、人工膜中に組み込むことに成功している。これらの成果は、現実の細胞が機能する仕組みについての理解を深めるだけでなく、医薬分野や工業分野に活用できるシステムの構築にもつながると期待されている。

H. Marubayashi et al., *Angewandte Chemie* 53, 7535, 2014  
Y. Kuruma & T. Ueda, *Nature Protocol* 10, 1328, 2015

#### 6 サテライトの活動

愛媛大学地球深部ダイナミクス研究センター（Geodynamics Research Center; GRC）では、センター長の入船徹男教授を始め約 10 人がサテライトのメンバーとして研究を進めている。GRC で行われる地球深部の研究は、東工大 ELSI での数百万気圧の超高压実験とは相補的に、百万気圧以下で大きなサンプルを扱い精度の高いデータを得ること、量子力学の基本原則から出発する「第一原理計算」によって、実験ではまだ実現できない高温高压での物性を明らかにすること、が特徴である。地球のマントルには、地表付近に大量に存在する水の一部が、プレートの沈み込みにより含水鉱物として運ばれていく。その限界はそれまでは深さ 1000 km 程度と考えられていたが、GRC の研究者たちは、下部マントルにおいて、H 相と名付けられた新たな含水鉱物へと相転移してもっと深くまで水が輸送され得ることを示した。2015 年度からは、GRC の土屋卓久教授（ELSI の協力研究者）を代表とする科学研究費補助金・新学術領域研究「核-マントルの相互作用と共進化～統合的地球深部科学の創成～」により一層の研究発展が期待される。

ハーバード大学生命起源イニシアチブに置かれたサテライトでは、合成生物学の権威で 2009 年のノーベル生理学・医学賞受賞者である Jack Szostak 教授が ELSI の主任研究者を勤め、ELSI の Albert Fahrenbach 研究員らとともに研究を進めている。細胞が出現する前の地球には「RNA ワールド」が

存在していたとする仮説を検証するため、酵素が存在しない状態でもRNAが効率よく複製される条件（DNAの複製には酵素が必要）の探査などが精力的に勤められている。

プリンストン大学のサテライトはプリンストン高等研究所に置かれ、宇宙物理学の権威である Piet Hut 教授が ELSI の主任研究者を務めている。宇宙物理学のほか、計算機科学、認知科学など広い研究領域での活動をリードしている。

## 拠点の特徴（融合と国際化）

地球の起源と生命の起源という大きな研究課題に、惑星科学、地球科学、生命科学の研究者が協力して取り組む研究所は世界的にも極めて珍しい。このような大問題の解決には自由な発想が必要と考え、ELSI では縦割りの研究室は作らず、所長以下の全員が平等の研究者として活動している。分野融合（図5）には研究者間のコミュニケーションが重要であり、施設面では、ラウンジ、アゴラというオープンスペースを設けている（図6）。

ELSI の研究者 70 名のうち約 4 割が外国人で、外国人主任研究者も 7 名いる。そのうち地球物理学者の John Hernlund は副所長を務め、海外からの優

秀な研究者の呼び寄せ、国際研究集会での研究所紹介などに力を注いでいる。その結果、海外でも ELSI の存在は広く知られ、研究員などの公募では 9 割が海外からの応募になっている。また宇宙物理学者の Piet Hut はプリンストン高等研究所学際研究プログラムの責任者でもあり、その経験を生かした活動により、米国のジョン・テンプレート財団から、2015年7月から2018年3月の期間に対して総額550万ドル（約6億7千万円）の研究資金を獲得した。この資金をもとに、ELSI がハブとなり生命の起源に関わる世界中の研究者をつなぐネットワークの強化と拡大を目的とする「EON (ELSI Origins Network; イーオン) プロジェクト」を開始した。EON の予算は、設備物品の購入ではなく、若手研究者の雇用と交流、国際ワークショップの開催に使用される。

外国人研究者の研究環境、生活環境をできるだけ快適なものとするため、研究者の分野ごとに担当秘書を配置し、事務手続はワンストップサービスの形で対応している（日本人研究者についても同じ）。事務室には専任のライフアドバイザーを配置し、入国や地域の諸手続の支援を行っている。外国人向け日本語教室も毎週開催している。このような環境が広く海外にも知られ、更に優秀な研究者を引きつけて、国際的な魅力ある研究所としていきたい。

（文責：櫻井 隆）

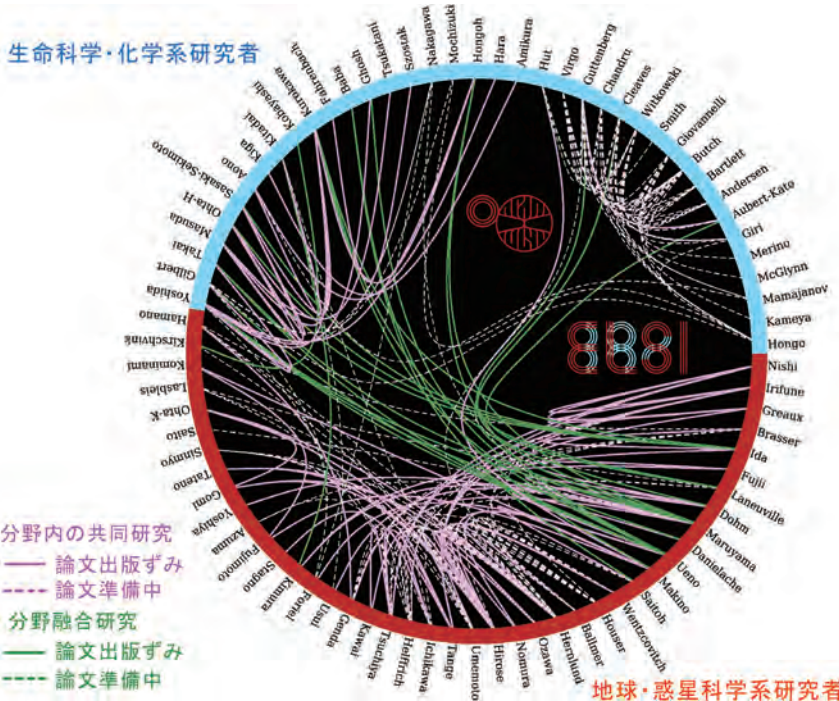


図5 地球科学と生命科学の融合研究の状況



図6 アゴラのチョークボードの前で議論





拠点長

**伊丹 健一郎**  
Kenichiro Itami

## 動植物科学と合成化学の革新的融合研究： 世界を分子で変える

名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所 (ITbM) は、世界最先端の分子合成化学と動植物科学の連携によって新たな学問領域を切り<sup>ひら</sup>き、様々な生命現象を「知る」「見る」「動かす」分子の発見を通じて社会が直面する環境問題、食料問題、医療技術の発展といった課題に取り組む国際研究拠点である。我々の生活を大きく変える生命機能分子「トランスフォーマティブ生命分子」を世に送り出すべく、一丸となって研究に取り組む。

### ■ 基本情報 (2015 年度)

拠点長：伊丹 健一郎

主任研究者 (PI)：11 名 (内 外国人研究者数 4 名、女性研究者数 2 名)

その他研究者：54 名 (内 外国人研究者数 18 名、女性研究者数 15 名)

研究支援員：34 名

事務部門：部門長 松本 剛

スタッフ 12 名 (内 英語対応者割合 50%)

サテライト機関・連携機関：チューリッヒ工科大学 (スイス)、クイーンズ大学 (カナダ)、ワシントン大学 (アメリカ)、南カリフォルニア大学 (アメリカ)、NSF Center for Selective C-H Functionalization (USA)、理化学研究所環境資源科学研究センターなど

URL： <http://www.itbm.nagoya-u.ac.jp/>



## 主な研究成果

## 1 植物の生長を促す分子

植物の生長が気孔の開閉によって制御されることを明らかにした。気孔の数や開閉を自在に制御する分子の開発に取り組み、植物の生長により環境問題や食料問題に貢献する。

## 2 寄生植物ストライガを退治する分子

アフリカの農業に甚大な被害を与えている寄生植物ストライガの寄生メカニズムを解明するツールとして、蛍光分子「ヨシムラグトン」を開発・市販化した。ストライガの自殺発芽を誘発する分子の開発も進めている。

## 3 植物の生殖を制御する分子

長年にわたり未解明であった植物の生殖に関わる数々の生体内分子「ルアー」「アモール」の同定を世界に先駆けて達成し、その機能を明らかにした。植物の生殖メカニズム全容解明に大きく貢献する成果である。

## 4 動植物の体内時計を調節する分子

動物及び植物の体内時計の調節は、動植物の生産性の向上や、ヒトの様々な疾患の治療につながると考えられ、体内時計を制御する分子の開発に取り組み、構造活性相関によって高い活性を示す分子を見いだした。

## 5 生体内を視る分子

様々な生命現象のメカニズムを解明する生体イメージング技術に必要な不可欠な色素分子として、極めて高い耐光性や環境応答性を備えた蛍光色素分子の開発を進め、その幾つかの色素分子を市販化した。



〒464-8601 愛知県名古屋市中種区不老町  
Phone: 052-789-3239  
Email: office@itbm.nagoya-u.ac.jp

背景は植物の葉：表面には多数の微小な孔「<sup>あな</sup>気孔」が存在する

## ITbM が目指すもの

ITbM は最先端の分子合成化学と動植物科学の連携によって新しい学際領域研究を創出するとともに、我々の生活を大きく変える生命機能分子「トランスフォーマティブ生命分子」を世に送り出すことを目指している。これまで人類は様々なトランスフォーマティブ生命分子を生み出してきた。例えば創薬の分野では抗生物質や抗インフルエンザ薬などがその代表例である。ITbM では化学者と植物・動物学者が研究分野や研究室の壁を超えて真にコラボレーションし、社会が直面する環境問題、食料問題、医療技術の発展といった様々な課題に「分子」の力で貢献する。

### 1 植物の生長を促す分子

木下 俊則 (PI)、鳥居 啓子 (PI)、伊丹 健一郎 (PI)

植物には、光合成や呼吸に必要な気体の出入りを担う開閉可能な小さい孔「気孔」が存在する。日中、植物は気孔を開き (図 1a)、大気中の二酸化炭素を取り込んで光合成を行い、生長に必要な養分を作る。また、気孔は植物の水分調節に重要な役割を担い、葉内の水分が減ると気孔を閉じ (図 1b)、水分の蒸散を抑えて身を守ろうとする。気孔は地球規模の水循環にも関与しており、大気中に存在するすべての水は半年に 1 回、必ず気孔を通過するといわれている。

このように植物の生育に重要な気孔について、その数や開閉を自在に制御できれば、植物体に乾燥耐性を付与したり、植物を増産したり、大気中の温暖化ガスを削減することが実現可能となり、現在の社会が抱える食料問題、環境問題の解決に大きく貢献すると考えられる。

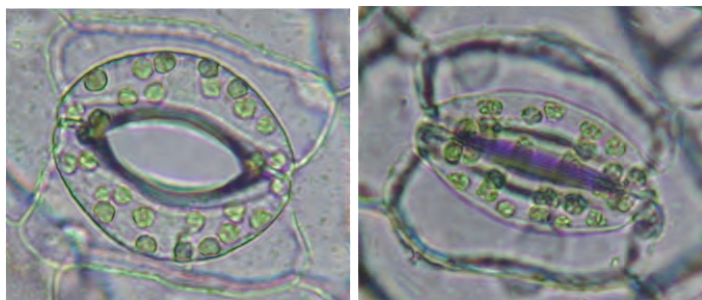


図 1 植物の気孔：(a) 開いた状態、(b) 閉じた状態

気孔は、光受容体であるフォトトロピンが太陽光を受け、気孔の孔辺細胞膜に存在するプロトンポンプ ( $H^+$ -ATPase) が作動して開口する。ITbM ではモデル植物のシロイヌナズナを用い、プロトンポンプを気孔部分のみに選択的に増加させ、変化を調べたところ、この植物では気孔の開口が通常より 25% 増え、植物の二酸化炭素吸収量 (光合成量) が約 15% 向上した。それに伴い、植物の重量が 1.4 ~ 1.6 倍となり、植物生産量が大きく増大した。この結果は、植物の生長に気孔の制御が重要であることを実証したものである。

ITbM では本成果を更に発展させ、農作物、バイオ燃料用植物の生産量増加や、植物を利用した温暖化ガス削減などの環境問題解決に貢献すべく研究を推進する。

Y. Wang, et al: Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 111, 533, 2014.

### 2 寄生植物ストライガを退治する分子

木下 俊則 (PI)、伊丹 健一郎 (PI)、大井 貴史 (PI)

ストライガは、アフリカ、アジア、オーストラリアの農業に深刻なダメージを与えている寄生植物で、赤紫色の美しい花をつけることから「魔女の雑草」とも呼ばれる (図 2)。ストライガは主にトウモロコシ、コメ、サトウキビなどの穀物に寄生し、生育不良等を引き起こして収穫量を大きく低減させ、ときに周辺の広大な田畑すべてを全滅させてしまう。ストライガによるアフリカの年間経済損失は 1 兆円を超すという試算もあり、世界の食料の安全保障上、有効な対策が緊急の課題となっている。

ストライガは他の植物が自身の成長のために放出する植物ホルモン「ストリゴラクトン」を感知して発芽し、寄生することがわかっていたが、その詳細な機構は解明されていなかった。ITbM では、ストライガにストリゴラクトンを感知する受容体タンパクが存在するという仮説のもと、ストリゴラクトン受容体に結合すると緑色に光る分子「ヨシムラクトン (YLG)」を世界に先駆けて開発した (図 3)。このヨシムラクトンを用い、ストライガの発芽時にストリゴラクトンと受容体が相互作用する様子をライ



図2 ストライガの寄生が発生した畑  
(写真提供：スーダン大学 Babiker 教授)

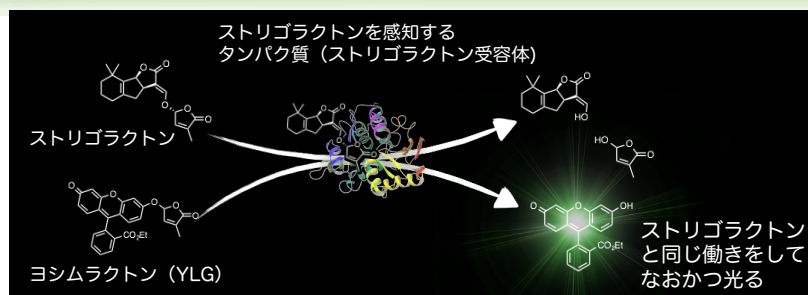


図3 ヨシムラク톤 (YLG): ストリゴラク톤と同様の活性を有し、ストリゴラク톤受容体と結合して切断され、発光する。

ブイメーキングによって直接観察することに成功した。なお、ヨシムラク톤は3名のITbM若手研究者(図4)の自発的分野融合研究の賜物であり、化合物を着想した大学院生の吉村氏にちなみ命名した。

本研究成果は、ストライガが宿主植物を感知して発芽する仕組みの一端を明らかにした極めて重要な成果である。ヨシムラク톤(YLG)は国内メーカーから市販され、全世界の研究者が使用できるようになった。これによってストライガの研究が世界中で加速されると期待される。

Y. Tsuchiya, et al: *Science*, 349, 864, 2015.

### 3 植物の生殖を制御する分子

東山 哲也 (PI)、伊丹 健一郎 (PI)、Jeffrey Bode (PI)

アブラナ科の植物であるナタネは、菜種油の原料としてよく知られ、今や我々の生活になくはならない植物である。ナタネは自然界で偶発的に異種交配して誕生した植物であり、異種交配植物には思いもよらない力があることを示す好例である。しかし、生物は種の自己保存のために生殖隔離障壁を備えており、異種間での受精は容易にはおこらない。異種交配を実現するには、この生殖隔離障壁の解明が鍵となる。140年にわたり多くの科学者がその解明に挑む中、ITbMでは花粉管を誘導するために雌しべ内で分泌される誘引物質「ルアー (LURE)」を2012年に発見した。花粉は雌しべに受粉すると、花粉管を伸長して胚珠に達する。胚珠内の卵細胞に隣接する助細胞はルアーを分泌し、花粉管を誘導する(図5)。助細胞に到達した花粉管は精細胞を放出し、卵細胞と結合して受精が達成されることとなる。ルアーの構造は種によって異なり、種を保存する重要な役割を担っていることもわかった。



図4 ヨシムラク톤 (YLG)を開発した3名のチーム  
左から  
萩原 伸也博士、  
吉村 柁彦氏、  
土屋 雄一郎博士

また受精においては、花粉管を受精可能な状態にする物質が雌しべから放出されることも見いだした。この物質は、雄をその気にさせる媚薬のようなものであることから「アモール (AMOR)」と命名した。アモールは植物種に特有な糖鎖を持つ巨大な糖タンパクである。糖鎖の末端に存在する2糖部分を化学合成したところ、花粉管が誘引され受精が達成されたことから、この2糖部分が鍵部分構造であることを突き止めた。この2糖化合物は市販予定である。

これらの成果は、受精効率を高め種子生産の効率を大幅に改善するものであり、将来的には植物どうしの異種交配を可能にすると期待される。

H. Takeuchi et al: *Nature*, 531, 245, 2016.

A. G. Mizukami et al: *Curr. Biol*, 26, 1091, 2016.

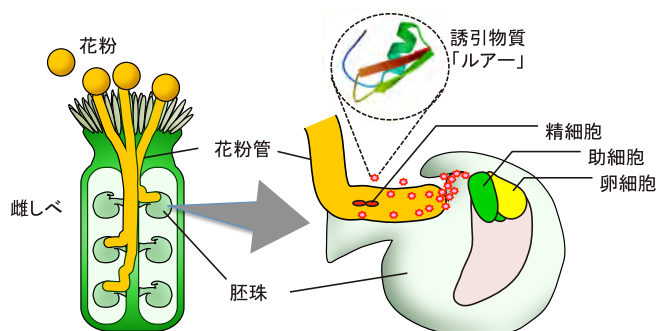


図5 シロイヌナズナにおける誘引物質「ルアー」による花粉管の誘導

## 4 動植物の体内時計を調節する分子

吉村 崇(PI)、Steve Kay(PI)、伊丹 健一郎(PI)、  
Stephan Irle(PI)、Florence Tama(PI)

私たちの身体の中には、1日のリズムを刻む体内時計が備わっている。体内時計は睡眠・覚醒リズムの他、ホルモンの分泌や代謝活動の制御にも重要な役割を果たしている。体内時計が狂うと、睡眠障害、肥満をはじめとした生活習慣病が引き起こされるだけでなく、精神疾患の原因になるとの報告もある。したがって体内時計を自在に制御する分子が開発できれば、これらの疾患克服に貢献できると期待される。

ITbMでは、以前に見いだされた体内時計に影響する分子KL001の分子構造をもとに、ITbMの得意とする化学合成力と計算科学の力を駆使し、構造が少しずつ異なる様々な分子を合成し、その構造と活性の相関を踏まえて新たな分子を設計することにより、体内時計のリズムを長くする作用を強く示す新たな分子を見いだすに至った。これらの分子は体内時計の調節を司るタンパク質(クリプトクロム)に作用し活性を示すと考えられる。

本成果は近い将来、体内時計によって制御される様々な疾患の理解と治療に大きく貢献することが期待される。また、体内時計は家畜の季節性繁殖の鍵であることも報告されており、動物の繁殖の自在制御による食料増産への応用も期待される。

T. Oshima, et al: *Angew. Chem. Int. Ed.* 54, 7193, 2015.  
J. W. Lee, et al: *ChemMedChem*, 10, 1489, 2015.

## 5 生体内を視る分子

山口 茂弘(PI)、東山 哲也(PI)、  
Cathleen Crudden(PI)

生体内の分子の動きを視るバイオイメーjingは、現在の生物学研究に欠かせない研究手法の一つである。バイオイメーjing技術の発展に大きく影響を及ぼしたのは、多能性蛍光色素の開発と超解像顕微鏡工学の発展である。とりわけ2014年のノーベル化学賞に選ばれたSTED顕微鏡は、従来の蛍光顕微鏡の限界を大きく上回る空間分解能を有し、これまで識別が難しかった細胞内小器官の構造や細胞内におけるタンパクの挙動の観察を可能にした。しかし、

STED顕微鏡によるバイオイメーjingは強いレーザー光の照射を必要とするため、タンパクなどに結合した蛍光色素が褪色してしまうという致命的な問題を抱えている。生きた細胞・組織・動物を直接観察するライブイメーjingなどの実践的な応用のため、より強靱な蛍光色素の開発が切望されている。

ITbMではこの課題に挑戦し、新たな蛍光色素分子「C-Naphox」の開発に成功した(図6a)。この色素分子は従来の蛍光色素をはるかに上回る耐光性を有する。従来の蛍光色素は数回程度のレーザー照射で分解し、観測不能になってしまうが、C-Naphoxは50回以上のレーザー照射でもほとんど分解せず、課題であったSTED顕微鏡による繰り返し測定が実際に可能であることもわかった。

C-Naphoxと似た分子構造を持ち、生体内の周囲の極性を感知して発光色に変化する新たな蛍光色素分子を開発することにも成功した。開発した色素分子は様々な有機溶媒中で極性に依りて赤～緑色の発光を示す(図6b)。細胞へ投与すると脂肪滴に選択的に取り込まれ、緑色に発光する特徴も有する。

本成果はSTED顕微鏡を実用レベルに押し上げるための基盤技術を提供するものである。開発した蛍光色素分子の幾つかはLipiDyeの商標名で販売されており、今後バイオイメーjingで広く利用され、生物学研究が加速されると期待される。

C. Wang et al: *Angew. Chem. Int. Ed.* 54, 15213, 2015.  
E. Yamaguchi et al: *Angew. Chem. Int. Ed.* 54, 4539, 2015.

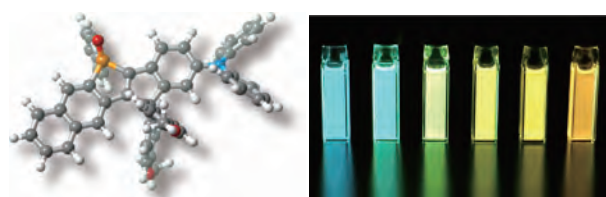


図6 (a) 超耐光性蛍光色素 C-Naphox の分子構造  
(b) 極性の違いで色が変わる蛍光色素

## WPI だからこそできたこと

ITbMの発足から実質わずか4年足らずの間に上記のような世界を先導する研究成果が生み出されたのは、各研究者が高い研究能力を持つことに加え、

PIをはじめとする合成化学と動植物学の研究者達が、Win-Winのコラボレーションを眞に構築しているためであろう(図7)。ITbMのPIは皆、拠点長の「一緒にやりたい人この指とまれ」の呼びかけで集まった化学・生物学のライジングスターで、拠点長も含めいずれも40代前半(発足時)の新進気鋭の研究者である。柔軟な発想を持ち、異分野との協働の必要性を感じていたPI達は、待ち望んでいたITbMという場で自由に連携し、新しい発見に日々わくわくしながら研究を進めてきた結果、ITbMはロケットスタートを切ることができた。このPIの想いは各グループの研究者や学生にも伝染し、今やその連帯感はITbM全体に広がっている。

ITbM全研究者の協働関係を構築する上で、もうひとつ重要な役割を担っているのが「ミックスラボ」と「ミックスオフィス」である。研究室間の壁を取り払い、分野の異なる研究者が同じ空間を共有して研究に取り組む環境を提供するもので、ITbMの研究棟全体がこの「ミックス」コンセプトに基づいて設計されている。「ミックス」の効果は期待以上の成果をもたらし、教員、博士研究員、大学院生いずれもが自らの着想で自発的に研究チームを組み、ボトムアップ的に日々新しい研究を生み出している。

ITbMは、最先端研究を推進するために必要な4つのセンター(分子構造センター、化合物ライブラリーセンター、ライブイメージングセンター、ペプチドプロテインセンター)を設置している。各センターには専任教員を配置し、単に依頼測定を受注するのではなく、センター自らが研究に積極的に参画し、分野融合研究を推進する役割を担っている。

ITbMには多くの外国人研究者が加わっている。海外の連携機関と大学院生を中心とする研究者の派遣も活発で、アメリカ・カナダ・スイス・ドイツの大学との間で多くの国際共同研究が進行中である。また国際会議を定期的開催するほか、有機化学や生物学の国際賞(名古屋メダル、平田アワード、岡崎令治・恒子賞)を運営し、これらを契機とする海外機関とのネットワーク構築も順調に進んでいる。

分野融合研究や国際連携を推進する上で、もうひとつの鍵となっているのがITbM事務部門である。



図7 化学実験を行うドラフトチャンバー。ガラス扉面には、研究のアイデアや議論の過程が所狭しと綴られる。

英語対応の体制を整え、外国人研究者が日本で生活する上で必要な様々な支援も行う。従来の大学事務組織と大きく異なる点は、リサーチプロモーションディビジョンと戦略企画ディビジョンの存在である。関連分野(化学・生物学)で学位を持つ人材を擁し、研究の初期段階から特許申請・論文発表・広報/アウトリーチ、さらに社会実装への取り組みに至るまでシームレスな研究支援を行い、拠点運営を強力に支えている。

ITbMの女性研究者の活躍も特筆すべき点である。教員のみならず、女性の大学院生も数々の賞を受賞するなど、その活躍はめざましい。名古屋大学は従来より女性リーダー育成や女性研究者が研究を継続するための支援を行っており、保育所や学童保育を学内に整備するなど、女性研究者が活躍できる環境作りを先導してきた。その活動は高く評価され、国連ウィメンのHeForSheキャンペーンパイロット事業「IMPACT10x10x10」に世界の10大学として日本から唯一選出されている。この環境をITbMも存分に活用し、女性研究者を強力に支援している。

このような革新的な取り組みによりITbMが著しい成果をあげているのは、WPIプログラムと名古屋大学の強力な支援があるからこそである。これらの支援のもと、拠点長の力強いリーダーシップによって構成員が一丸となり、未踏の分野融合研究に取り組んでいる。ITbMはこれからも挑戦し続ける。

(文責：松本 剛)

# WPI プログラムの さらなる発展に向けて



野 依 良 治

世界トップレベル研究拠点  
プログラム委員会委員長

我が国の科学界は、近年のノーベル科学3賞受賞状況からも明らかかなように、個々には評価の高い研究成果をあげてきたが、今後強力に世界を牽引し続けるには、これだけでは不十分である。WPIプログラムが過去10年間に目指したところは、世界標準に合致する「最高の研究拠点の形成」であった。存在感ある組織こそが世界の知性を惹きつけ、その切磋琢磨が新たな科学の地平を拓き、更に次世代が触発され成長するからである。幸いにして、各拠点長の卓越した指導力、設置機関長の全面的支持、国内外の見識者からなるプログラム委員会の適切な評価と助言とともに、何よりも文部科学省の制度改革に向かう不退転の意思が成功をもたらした。

2007年度採択のAIMR、IPMU、iCeMS、IFReC、MANAの5拠点は、「世界最高水準の研究」「融合領域の創出」「国際的な研究環境の実現」「研究組織の改革」の本プログラムが目指す研究拠点が満たすべき要件を全て満たし、国際的ブランド性も獲得した。2010年度採択のI<sup>2</sup>CNERはグリーンイノベーションを目指し、更に2012年度採択のやや小規模のIIS、ELSI、ITbMの3拠点も、焦点を明確に定めて成功裡に運営され、さらなる発展が期待される。従来、我が国の大学においてはその歴史的経緯から、分野融合が困難な状況にあったが、WPI拠点では、既成の組織を超えて開放的な環境が形成され、本来あるべき姿が実現したことは幸いである。良質の人材が集い、世界に飛び立ち、人的ネットワークづくりに貢献したことも成果である。このプログラムを通して蓄積された知恵と経験を全国の大学や研究機関に横断的に展開して、全体的な水準向上に資することが最も重要である。

しかし決して、この成功に安住してはならない。大学は時代とともにあり、社会は速やかに移り変わる。本プログラムは基礎科学研究の振興を中核に据えるとはいえ、最高の知性が集う拠点として、時代が求める知を先導しなければならない。



世界は多様性に満ちており、現代社会は国の内外で様々な人が行き交い、目的集団をつくり活動することによって成り立つ。目指すところは、人々の豊かな生活であり、安全な国づくり、そして文明社会の持続である。新たな社会的価値をつくるために、多岐にわたる知識と知恵の統合が求められ、人材の多様性の確保が欠かせない。我が国社会の安定的存続を考えれば、国際競争力とともに国際協調力を培わねばならず、世界的な頭脳循環に積極的に参画すべきである。さらに、2015年9月に国連総会で採択された「持続可能な開発のための2030アジェンダ（SDGs）」にいかに対応するのか。地球温暖化、環境劣化、自然災害リスクの増加、生態系サービスの減少、更にエネルギー資源の枯渇、感染症などの人類の存続を脅かす深刻な問題、加えて国内における巨大な公的債務、少子高齢化問題を軽減、解決するには、広範な知の統合、合意形成とともに、具体的政策の策定と実現に向けた国際共同作業が不可欠である。このような多岐にわたる課題に我が国の科学界はいかに貢献するのか。

今後、WPIプログラムは第二ステージに入る。WPI各拠点においてはこの<sup>あらが</sup>抗い難い世界情勢の変化を直視した上で、我が国が誇る最高の研究拠点としての運営をすることが求められる。関係する方々には、様々な視点からの御指摘御助言を賜るとともに、発展を見守っていただくことをお願いしたい。





## 世界トップレベル研究拠点プログラム 10年のあゆみ

---

発行：平成28(2016)年12月 初版  
平成30(2018)年1月 初版 第2刷  
編集者：黒木 登志夫  
協力：WPI 各拠点プログラム・オフィサー  
編集：世界トップレベル研究拠点プログラム事務局



文部科学省  
研究振興局基礎研究振興課  
〒100-8959 東京都千代田区霞が関3-2-2  
Phone : 03-5253-4111  
Fax : 03-6734-4074  
Email : [toplevel@mext.go.jp](mailto:toplevel@mext.go.jp)  
URL : [www.mext.go.jp/a\\_menu/kagaku/toplevel](http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/toplevel)



独立行政法人日本学術振興会  
世界トップレベル拠点形成推進センター  
〒102-0083 東京都千代田区麹町5-3-1  
Phone : 03-3263-0967  
Fax : 03-5214-7812  
Email : [jspstoplevel@jsps.go.jp](mailto:jspstoplevel@jsps.go.jp)  
URL : [www.jsps.go.jp/wpi](http://www.jsps.go.jp/wpi)

