

研究会・学会スケジュール

ムーンシャインと K3 曲面
Moonshine and K3 surfaces

開催日：2016年11月7日(月)～11日(金)
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール
主催：日本学術振興会科学研究費補助金 基盤(S) 15H05738(金銅誠之)
問い合わせ：金銅誠之 多元数理科学研究科 教授
kondo@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2815
http://www.math.nagoya-u.ac.jp/ja/research/conference/2016/moonshine-k3.html

第23回日本時間生物学会学術大会
Japanese Society for Chronobiology International Symposium (JSC国際シンポジウム)

開催日：2016年11月11日(金)～13日(日)
開催場所：名古屋大学豊田講堂、シンポジオン
主催：日本時間生物学会
問い合わせ：吉村 崇 トランスフォーマティブ生命分子研究所 教授
takashiy@agr.nagoya-u.ac.jp / 052-789-4056

第22回 国際動物学会
シンポジウム「性決定分化」
The 22nd International Congress of Zoology
Symposium "Sex Determination and Differentiation"

開催日：2016年11月16日(水)
開催場所：沖縄科学技術大学院大学
主催：日本動物学会
問い合わせ：田中 実 理学研究科 教授
mtanaka@bio.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2979

第4回 ITbM国際シンポジウム、
第12回 平田アワードおよび第2回 岡崎治令・恒子賞
4th International Symposium on Transformative Bio-Molecules (ISTbM-4),
12th Hirata Award, 2nd Tsuneko & Reiji Okazaki Award

開催日：2016年12月12日(月)・13日(火)
開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館
主催：トランスフォーマティブ生命分子研究所
問い合わせ：佐藤綾人 トランスフォーマティブ生命分子研究所 特任准教授
office@itbm.nagoya-u.ac.jp / 052-747-6856

第22回名古屋メダルセミナー
The 22nd Nagoya Medal of Organic Chemistry

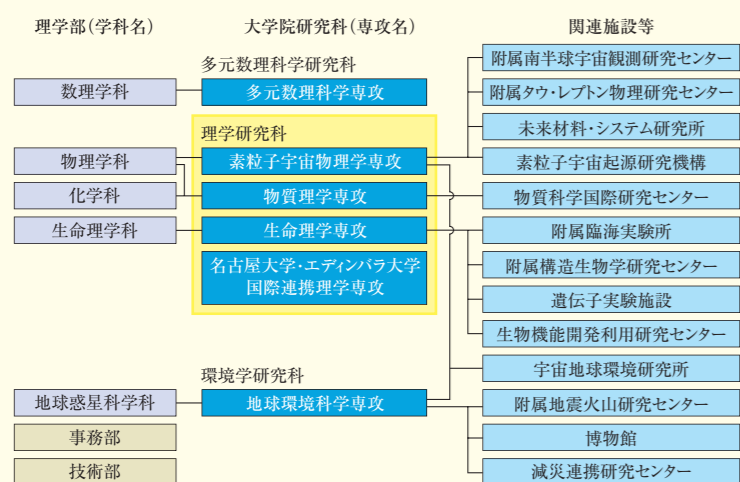
開催日：2017年1月27日(金)
開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館
主催：名古屋メダルセミナー組織委員会
問い合わせ：伊丹健一郎 トランスフォーマティブ生命分子研究所 教授
nagoya-medal@itbm.nagoya-u.ac.jp / 052-788-6098

リモートセンシングに関する国際シンポジウム
International Symposium on Remote Sensing (ISRS 2017)

開催日：2017年5月17日(水)～19日(金)
開催場所：名古屋大学シンポジオン、野依記念学術交流館
主催：ISRS 2017実行委員会
問い合わせ：山口 靖 環境学研究所 教授
yasushi@nagoya-u.jp / 052-789-3017

組織図

理学部・理学研究科・多元数理科学研究科・環境学研究所(地球環境科学専攻)



編集日より

「お父さん、あの光ってる丸いのほしい」。花火大会の会場に並ぶ夜店の前で、5歳になる息子が“買って買って攻撃”を繰り返してきた。もちろん却下ではあるが、近所の百円均一ショップであらかじめ買っておいたプラスチックチューブをリュックの中からおもむろに取り出し、不満そうに私の顔を見ている息子に渡した。「折り曲げてごらん」。息子がバキバキとチューブを折り曲げると、蛍光色がチューブ全体にゆっくりと広がっていく。淡い光をうれしそうに見つめる息子の顔は、蛍光色の光でほんやりと照らされ、化学に携わる親にとっては格別の情景になる。光には子供から大人まで多くの人をひきつける魅力がある。息子が高校生ぐらいの年齢であったなら、今回の特集の「分子設計に基づく発光物質の開発」と「極短パルスレーザーを用いる物質の本質に迫る研究」に魅了されたに違いない。今回の特集の編集を通じて、酵素や蛋白の機能改変に取り組む私は、多くの人をひきつける魅力ある研究とは何なのかを改めて考える機会をいただいたと思う。(荘司長三)

表紙説明

光は、素粒子や宇宙といった自然科学だけでなく哲学や文学においても考察の対象である。表紙はフェムト秒レーザーパルスのイメージと蛍光分子。化学者にとっても光は魅力的な研究テーマとなる。



理 *philosophia* — No.31
autumn - winter 2016
2016年10月30日発行

広報委員 松本邦弘(研究科長)
杉山 直(副研究科長・評議員)
阿波賀邦夫(副研究科長)
中島 誠(数理学科)
福井康雄(物理学科)※委員長
戸本 誠(物理学科)
山川洋一(物理学科)
荘司長三(化学科)
杉山 伸(生命理学科)
平子善章(生命理学科)
林 誠司(地球惑星科学科)
齋藤勝行(事務長)

編集発行 名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会
〒464-8602 名古屋市千種区不老町

ご意見、ご感想をお待ちしています。
本誌の原稿執筆や取材などにご協力いただける方を求めています。
広報委員会までご連絡ください。
なお、ご投稿などの採否については当委員会にお任せください。
次号は2017年4月頃発行の予定です。

制作 株式会社電通
編集協力 株式会社コミニケ
デザイン 株式会社ティ・エム・シー

・本誌記事、写真等の無断複写、転載を禁じます。 ISSN 1884-8486

TEL 052-789-2394 FAX 052-789-2800 E-mail kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp URL http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/

理

名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報誌
[理フィロソフィア]
autumn - winter 2016

31

philosophia

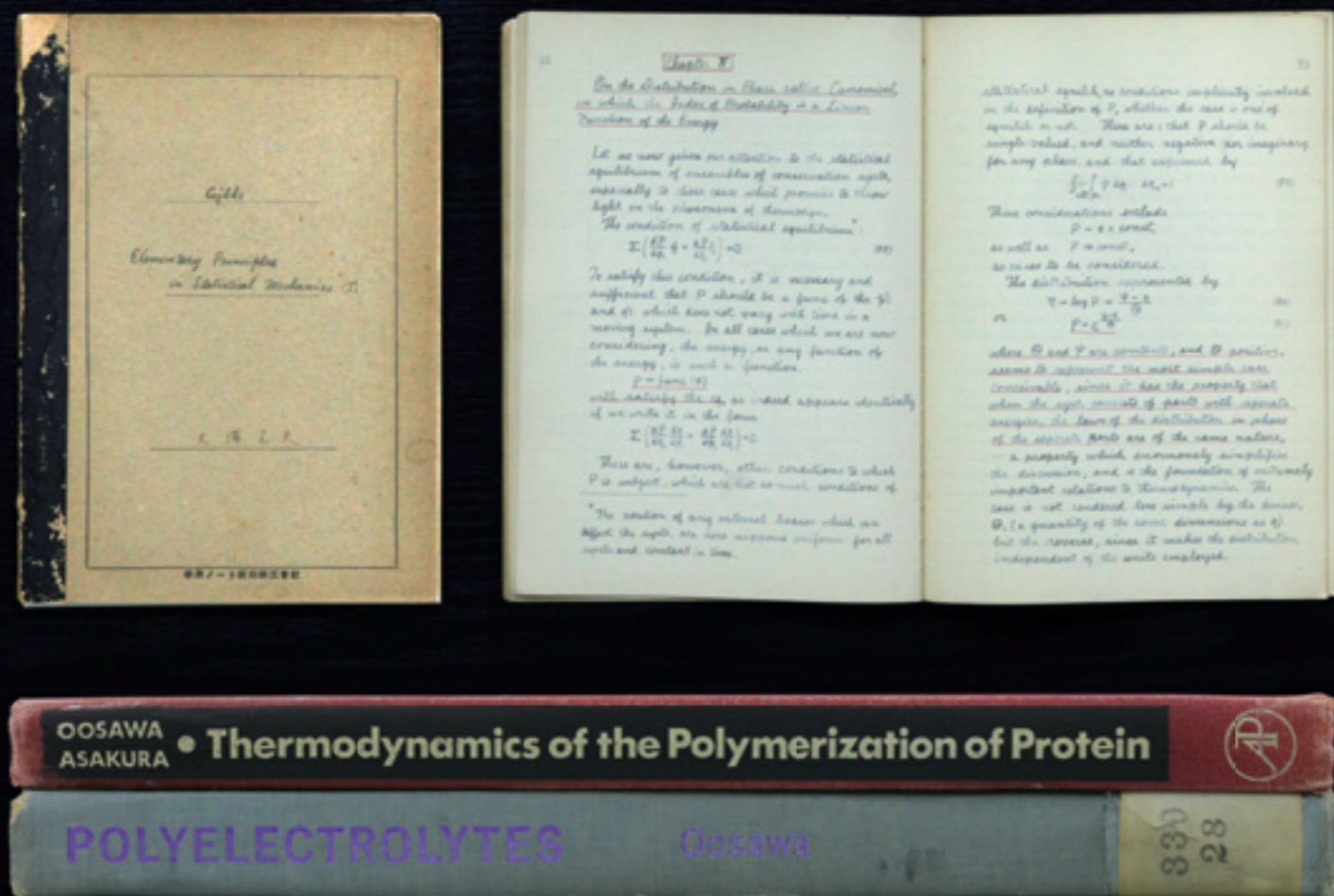
特集
「光をあやつる化学」

- 04 分子の光が拓く未来 ◇山口茂弘
- 08 分子を照らすフェムト秒の光 ◇菱川明栄
- 02 時を語るもの〈大沢文夫博士〉 ◇前田雄一郎
- 03 理のエッセイ ◇大路樹生
- 12 理の先端をいく ◇田中 実 / 阿部文雄 / 山川洋一
- 18 理学部交差点

大沢文夫博士 — 生物物理学の礎を築く

大沢さんは学生のころ統計力学の理論体系をつくったギブズ*1の原書と格闘してその不思議な魅力にひかれた。統計力学を適用してまず高分子溶液中に置いた2つの粒子間に働く引力の理論的理解に成功した (*J.Chem.Phys.*, 1954)。これは細胞内の蛋白質に働く基本的な力の発見であり、1980年代に再評価され Depletion force*2との名称を得る。次にアクチンやDNAなど電荷を多くもつ繊維状の高分子電解質が対イオンを表面に凝集する現象の理論化に成功した。さらにアクチンなどの蛋白質の重合現象を統計力学の導入により凝集現象として再発見し蛋白質相互作用に新しい視点を確立した。

大沢さんは理論物理学者として出発し、コロイド、高分子、蛋白質研究と異なる分野に統計力学の考え方を新たにもち込みその有効性を示し国際的に大きな影響を与えた。蛋白質研究では実験科学としての生物学の面白さにとりつかれていったに違いない。学生には種々の蛋白質の各論的研究に正面から取り組むように励ました。生物学はまず各論的であり、化学的である。生物の論理を正確につかんでこそ、各論の先にある統一的な論理、物理的なものを深く把握できると鼓舞した。(前田雄一郎 元名古屋大学教授)



大沢文夫 (1922-)
名古屋大学名誉教授(1986-)
第16回中日文化賞受賞(1963)
紫綬褒章受章(1985)
日本学士院会員(1995-)

*1 J.W. ギブズ (1839-1903)
アメリカの数学者・物理学者・物理化学者。
統計力学の体系をつくった。

*2 Depletion force
高分子溶液中に置かれた粒子が凝集する力。
朝倉・大沢理論は、その力が、粒子の間隙から高分子が排除されること (depletion) によるとした。

◇写真の説明
写真は、大沢さんの直筆ノート。大学時代にギブズの著作「Elementary Principles in Statistical Mechanics」の全文を写したもので、美しい筆写に統計力学の基本的概念を理解しようとした若き学徒の情熱を見る。左は、大沢さんの代表的著書である、「高分子電解質の理論」(Marcel Dekker, 1971) と「蛋白質重合の熱力学」(朝倉昌との共著, Academic Press, 1975)。後者は国際的にも蛋白質相互作用研究をめざす博士課程大学院生の必読文献となっている。

◎理のエッセイ

自分の専門を振り返る

大路樹生 博物館長



Illustration: Junichi Kishi

私は古生物学、深海の海洋動物学を専門としている。私のまわりを見ると、長く同じ専門分野を研究している人が多い。たとえば大学院時代以来、ずっと海洋動物の貝形虫や浮遊生有孔虫を研究していたり、また哺乳動物の研究を続けている、というスタイルである。私も大学院以来、長くウミユリ類の研究を行っていた。

あるとき、物理を専門とする私の同級生に10年振りくらいに会って、「今何をやっているの」と聞かれたので、「ウミユリの研究をしているよ」と答えたところ、ややびっくりした表情で、「へえ、まだ同じことやっているんだ」と感心された。このとき、私はかなり衝撃を受けた。今自分がやっていることは確かに自分では面白いと思っていたのだが、本当に古生物学、海洋動物学で最も重要で関心を持たれる研究なのだろうか、このまま同じことを続けていて良いのだろうか、という疑問である。このように他分野の方からの素直な意見はとても大事だ。

そこで、生命進化の大事件である、大量絶滅とその後の回復現象、そしてカンブリア紀の動物の進化、多様化という、今までとは異なる大きなテーマにチャレンジすることにした。私と共同研究者たちは後発組なので、多くの困難があったし、また今までに明らかにされていない、新たなニッチを開拓しなければならないという重荷も感じていた。我々はフィールド調査にもとづく実証的な古生物学を目指しているのだから、カナダやアメリカ、中国などで調査を続け、少しずつ新たな発見が生まれるようになった。さらに幸運なことに、約6年前の名古屋大学へ転任後、モンゴルのフィールド調査が始まり、カンブリア紀直前(約5.5億年前)の生命進化の証拠も集まり始めた。

1つのことをずっと突き詰めていくことも大事だし、またそれに値する課題も多いのは事実である。しかしときには自らが歩んできた道を振り返り、またちよつと異なる方向に目を向けて、新たな研究を進展させるきっかけを探すことも研究者にとって重要なのではないだろうか。

Tatsuo Oji

1956年生まれ。1983年東京大学理学部助手。1987年理学博士(東京大学)取得。同大学理学系研究科准教授等を経て、2014年より現職。専門は古生物学、海洋動物学。

分子レベルのものづくりに挑戦する化学者は、自身のつくる新たな化合物によって光の吸収と発光を制御し、極限まで短くした光をあやつることで、分子の電子レベルでの素性を明らかにする。最先端の光と物質の相互作用の世界を2人の研究者が案内する。(2016年6月4日、第26回名古屋大学理学懇話会より)

分子の光が拓く未来

山口茂弘 トランスフォーマティブ生命分子研究所教授



Shigehiro Yamaguchi

1969年生まれ。1993年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年京都大学化学研究所助手。1997年工学博士。2003年名古屋大学助教授。2005年名古屋大学教授。2012年より現職。専門は有機化学。特に典型元素化合物の機能開拓をテーマに研究を展開。

π共役分子

分子の中には光を吸収し、また光を発し、あるいは電子の受け渡しをする分子があります。これらの分子の共通点は多重結合(π結合)がつながった構造をもつことで、π共役分子といえます。π共役分子は、自然界にもたくさん存在し、たとえば人が色を認識できるのも、植物が光合成するのも、ホタルが光るのもすべてπ共役分子の働きによるものです。これらは、その分子がないとその生体が機能しないという観点で、かけがえのない分子の例ともいえます。我々は、かけがえのない分子を自らの手でデザインし、つくり出すことにより、未来のサイ

エンスや社会の発展に貢献したいと考えています。

我々の分子デザインの鍵は、どのようにπ結合がつけられるかにあります。骨格を伸ばしてより広がったものをつくと吸収や発光の色も変わってきます。また単に広げるだけではなく、特徴的な元素を組み込むことによって性質を変えることができます。この分野の面白いところは、秀逸な分子をつくと、即、応用につながるどころです。そして、その応用の方向性も、ディスプレイや照明など有機エレクトロニクスから、生物学研究で細胞をみるバイオイメーキングまで多岐にわたります。実際に我々の研究室

では、基本的な分子をつくる合成研究をしながら、有機エレクトロニクスに展開する、あるいは生物学研究に展開するという両方の方向性もちながら研究を行っています。ここでは、特に後者の展開について述べたいと思います。

蛍光分子のデザイン

バイオイメーキングへの応用において重要なのが、蛍光分子のデザインです。そもそも蛍光はどのように生じるのでしょうか。分子には普段の安定な状態である基底状態が存在します。それが光というエネルギーを吸収すると、励起された状態、つまり、

ハイな状態になります(図1)。たとえばネクタイをしたサラリーマンがビールを飲むと、ネクタイをした姿は変わりませんが、ハイな状態になります。そして、中身がハイになったサラリーマンはネクタイを緩めようとします。分子もそれと同じです。分子の構造はそのまま変わらず、ハイな状態になると、ハイな状態の中で楽な構造に変わろうとします。この構造変化により生じる安定構造から、エネルギーを放出し、基底状態に戻ります。その際に、光としてエネルギーが放出されれば、これが蛍光です。蛍光分子のデザインの鍵は、励起状態での構造変化を考えることにあります。励起状態で分子の構造がどれだけ変わるかで発光の色が決まり、変化した構造の性質によって発光の強さが決まります。この変化はナノ秒の世界であり、ここに私は分子づくりのロマンを感じます。蛍光分子のデザインには、合成化学だけでなく、理論化学とのインタープレイがきわめて重要であり、このアプローチからつくり出した分子の例を次に紹介します。

RGBに光る分子をつくる

特徴的な発光を示す分子として我々は、ポリマーに分散させる、溶液にする、結晶にするとといった環境の違いで、発光色が青、緑、赤と大きく変わる分子をつくり上げました(図2)。ポイントは、2つのアントラセン骨格が折れ曲がった8員環骨格を介して連結された分子構造にあります。アントラセンはそもそも青色の発光を示す骨格です。折れ曲がった構造では、2つのアントラセン骨格同士はあまり相互作用せず、あたかも孤立したアントラセンのように青色に光ります。一方、この分子は溶液の中では鳥が

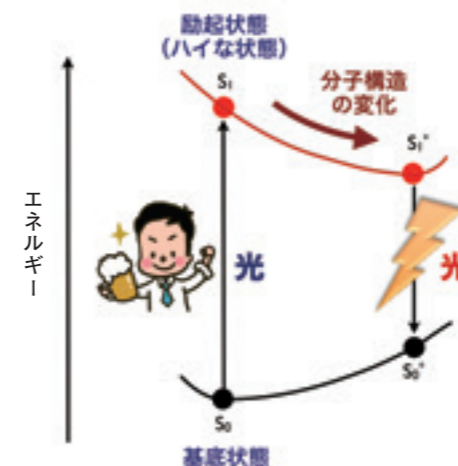


図1 分子の光励起と蛍光発光
分子は光を吸収すると、基底状態の構造のまま励起状態になり、そこからの構造緩和により、励起状態において安定な構造へと変化する。その構造から光としてエネルギーが放出されるのが蛍光である。

はばたくように構造変化しています。そして、光を吸収して生じる励起状態でも同様の变化をします。すなわち、光を吸収して折れ曲がった構造のまま励起状態に上がり、そこから平面構造へと構造変化します。平面になるとπ共役が分子全体に広がり、よりエネルギーの低い、青色の発光を示すようになります。

ただ、この分子が置かれる状態を、たとえばポリマーの中で分子が動けない状態にすると、構造は折れ曲がった構造のまま保持されるので、あたかもアントラセンのように青色に光ります。

一方で、V字型の構造は結晶中で積み上がった構造をとりやすく、積み上がった構造の中では分子間で相互作用が生じ(エキシマー生成)、それにより赤色の発光を示すようになります。

この分子の面白さは、V字型の構造の

ままなのか、伸びて平面になるのかという励起状態での構造の違いによって、青色の発光を示すか、緑色の発光を示すかが決まってくる、すなわち、分子の構造の変化が発光の変化につながる点にあります。これを応用すると、たとえば、分子に力をかけて引っ張って平らにすることで、発光色を変えることも可能になります。機械的にも蛍光の色をコントロールできるというわけです。

蛍光イメージングの鍵

このような分子をつくる研究を行いながら、いま我々がめざしているのが、バイオイメーキングへの応用です。蛍光分子を用いたバイオイメーキングへの応用において、最も重要な物質といえば、2008年にノーベル賞を受賞した下村脩先生が発見された緑色発光タンパク質GFP (green fluorescent

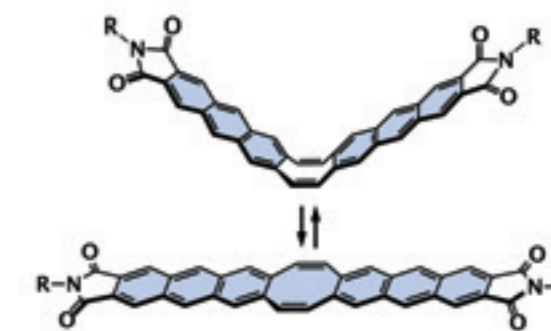
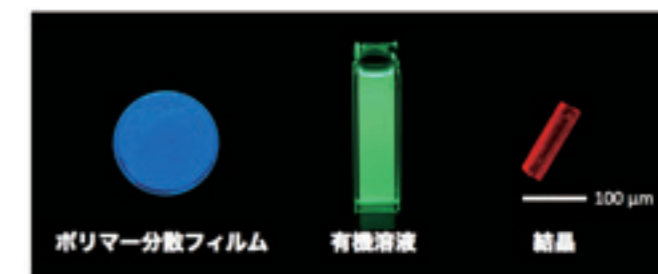


図2 アントラセンジメド二量体の分子構造と蛍光特性
ポリマー(ポリメタクリル酸メチル)分散フィルム中では青色発光を、溶液中(塩化メチレン)では緑色発光を、結晶中では赤色発光を示す。基底状態ではV字型構造をとるが、励起状態で平面構造へと構造緩和し、π共役が拡張される。



protein) が挙げられるでしょう。蛍光イメージング技術は、ちょうど人の細胞から、それより小さいものをみるのに適したイメージングです。最近、より分解能が高い超解像蛍光イメージングの技術ができあがってきており、その技術を使うと20~200ナノメートル (nm) の領域もカバーできます。そのあたりの領域になると、電子顕微鏡、TEM (transmission electron microscope) など使われますが、TEMと違って、蛍光イメージングはリアルタイムで追いかけることができますことが特長です。

蛍光イメージングには、GFPのようなタンパク質のほかにも蛍光小分子も用いられます。これまでいろいろな分子が開発されていますが、まだまだ改善していかなければいけない点が多いのが現状です。一つ一つ課

題を解決しながら分子をつくることで、蛍光イメージングの世界を別次元に昇華させていこうというのが我々の研究の目的です。

蛍光イメージングに求められる基本的な物性の中でも、一番の鍵は化合物の安定性、耐光性であると考えています。通常、有機分子に光をあてると、有機分子は徐々に分解していきます。この蛍光分子の光褪色により、長時間にわたって観測するタイムラプスイメージングが困難になります。耐光性がより重要になるものに、2014年ノーベル化学賞の対象にもなった超解像顕微鏡、たとえばSTED (stimulated emission depletion) 顕微鏡への応用があります。この技術を使うと、40 nmぐらいまで分解能を高めることができますが、同時に励起光とSTED光という2種類の強いレーザー

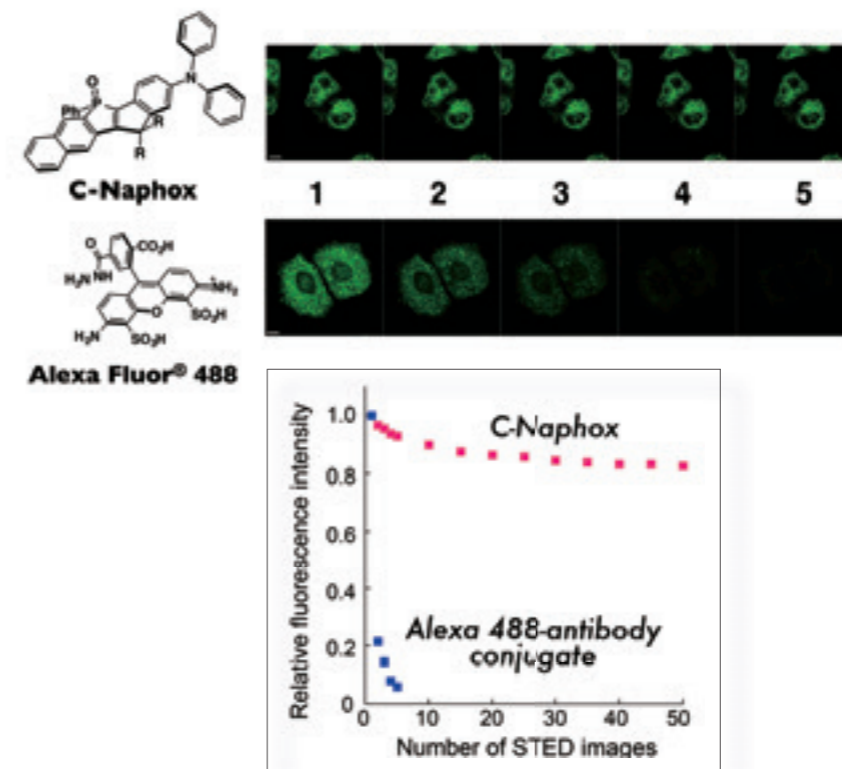
を照射する必要があります。このような観察条件ではほとんどの有機分子はすぐに分解してしまいます。折角の優れた技術でありながら、実践的な活用が制限されている現状を打破するために必要なのが、耐光性の高い分子をつくる、しかも、単なる耐光性ではなく、超耐光性とよべる特性をもつ分子の開発なのです。

超耐光性蛍光分子

この問題を克服するためにさまざまな分子骨格のスクリーニングを行い、我々は最近、鍵となる分子をつくりました。C-Naphoxという分子で、リンを鍵元素に使い、強固なπ共役骨格をもたせることにより、光に対して抜群に強い分子をつくることができました。

C-Naphoxの安定性の高さを示すために、耐光性に優れたATTO 488とAlexa Fluor® 488の2つの分子と比較してみます(図3)。ATTO 488やAlexa Fluor® 488がすぐに分解していくほどの強い光照射条件下においても、C-Naphoxはまったく分解しません。実際に、C-Naphoxを使うことにより、STEDイメージングを繰り返して行うことが可能なこともわかりました(図4)。Alexa Fluor® 488という代表的な色素を用いた場合には数回スキャンするだけで、ほとんど光褪色してしまうのに対し、C-Naphoxを用いた場合には、同じ場所を5回スキャンしても、最初と同様の明るい蛍光像が得られ、実際には50回くり返しても、初期蛍光強度の83%を保持するという驚異的な値を示しました。

この結果は、これまでの生物化学、イメージングの分野の発展の歴史を考えると、大きなインパクトを与える結果です。蛍光イメー



Leica TCS STED CW microscope
DMEM(+) medium, pH 7.4, adjusted with 10 mM HEPES (1% DMSO), 1 μM sample

図4 C-Naphoxとanti-KDEL抗体修飾Alexa Fluor® 488を用いた固定HeLa細胞の繰り返しSTED顕微鏡観察
上図: 繰り返しSTED顕微鏡イメージ。観察条件: 白色光励起レーザー (488 nm, 80 MHz, 出力70%, AOTF 80%) および CW-STEDレーザー (592 nm CWレーザー、出力95%, AOTF 100%)。下図: 相対的細胞内蛍光強度の繰り返し回数に対するプロット。

ジング技術の進歩には、顕微鏡技術と蛍光色の両方の進歩が必要ですが、前者の方は、2005年に超解像顕微鏡が登場し大きく進歩してきました。一方で、蛍光色素は、1999年にAlexa Fluor® 488が登場し、格段に耐光性が上がり、当該分野にブレイクスルーをもたらしましたが、その後これまでの間は、いくつか進歩はありましたが、決定的なものはないという状況でした。この中で、優れた色素として知られるAlexa Fluor® 488やATTO 488を寄せつけない耐光性をもつC-Naphoxを生み出すことに成功したといえます。

どんな未来を拓くか

重要なのは、このC-Naphoxを世に送り出すことによって、どんな未来を拓くかです。我々がめざす究極のイメージングは、超解像という高い分解能での4Dイメージングです。「複数の目的分子を(マルチ)」「空間的位置を考慮し(3D)」「分子サイズに近い空間分解能で(超解像)」「速い時間分解能で(高速)」「長期間、捉え続ける(タイムラプス)」ことができれば、生命科学の重要な現象を見逃さないイメージングが可能に

なるはず。この技術は、将来的には、基礎的観点からの新しい生命現象の解明だけでなく、応用的観点における創薬研究の必須ツールや、さらには、超早期病理診断技術などにも使えるのではないかと期待できます。たとえば、現在、がん細胞の画像診断が可能となるのは、その大きさが数ミリのサイズになってからですが、実際には、がん細胞はそれ以前から長い時間をかけて増殖しています。今よりも早い段階で検出するための技術として超解像4Dイメージングが使えるのではないかと考えています。

我々がやっている研究は、基本的には合成化学の研究であり、新しい分子をつくる研究ですが、生物学の研究の基本となる超解像4Dイメージングの革新に貢献することで、quality of lifeを向上させるための研究につなげていくこととなります。

我々が所属するITbMは、Institute of Transformative bio-Moleculesの略で、「transformative (世界を変容させる)な生命に関わる分子をつくり出したい」という思いを乗せたネーミングです。しかし、単に一つの分子を生み出しただけでは世界は変わりません。真に transformative

にするためには、我々が基礎研究として生み出したものを、すぐに使えるかたちにキット化し、全世界の研究者が手にすることができるようになる必要があります。そして使い方の事例を示すことも必要です。それを実現するために、我々は現在、ITbMの力を結集して研究を進めています。

我々は蛍光分子が好きで、蛍光分子に魅せられ、蛍光を究めたいという単純な思いで研究を続けています。この研究の展開や方向性を見きわめ、最大限の価値を分子に付与することにより、化学の域を超えて社会やサイエンスの進歩に貢献できる科学へと発展させられます。2014年にノーベル物理学賞を受賞した無機の青色LEDは確実に世界を変えました。有機分子の発光においても、耐光性に焦点を当てることで大きく世界を変えることができます。我々はそこに挑戦しようとしています。

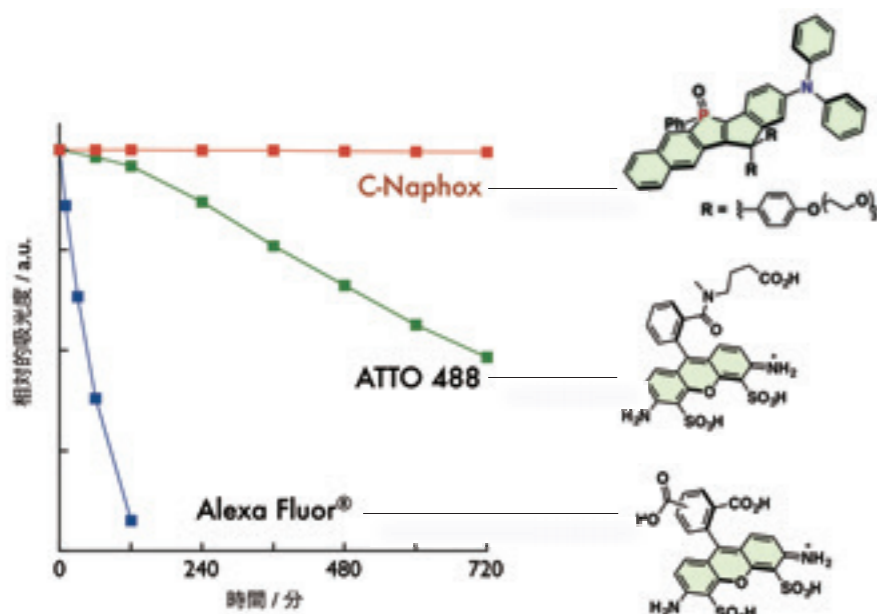
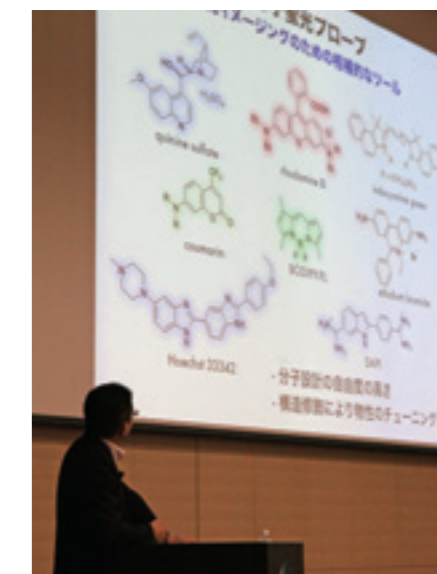


図3 ホスホールオキシド誘導体C-Naphoxと代表的な蛍光色素との光安定性の比較
DMSO/HEPES 緩衝液 (pH=7.3, v/v=7/3) 中で Xe ランプ (300 W) バンドパスフィルター (460/11 nm) を用いて照射した際の相対的吸光度変化。

分子を照らすフェムト秒の光

菱川明栄 物質科学国際研究センター教授



Akiyoshi Hishikawa

1966年生まれ。1994年京都大学大学院工学研究科博士課程修了。東京大学大学院総合文化研究科助手、同理学系研究科助手、講師、助教授、自然科学研究機構分子科学研究所准教授を経て、2010年名古屋大学理学研究科教授。2015年より現職。研究テーマは強いレーザー場におかれた原子や分子のふるまいの理解と、超高速分光、分子制御への応用。

化学反応を見る

現在、周期表には100を超える種類の元素がありますが、我々の身のまわりにある分子の多くは、そのうち10種類くらいからできています。言い換えれば、限られた種類の原子をどのように組み合わせるかで、きわめて多彩な性質をもつ物質がつけられていることとなります。

どのような順番でどの原子をつなげるのかを決めているのが化学反応です。分子レベルで考えると、化学反応は分子同士の衝突によって始まります。たとえば分子ABが原子Cに衝突し、最終的にAとCがつながった分子ACとして出てきた場合を考えてみます。この場合、この途中のどこかでAとBの結合を切り、AとCをつなげる結合の「組み替え」が起きていると考えるのが自然ですが、実際にどんなふうになら起きているかを「見る」ことは可能でしょうか。

反応マイクロスコープ

反応する分子をとらえるに当たって重要

なポイントは2つあります(図1)。1つは対象となる空間のスケールです。分子のサイズはおおよそ 10^{-9} m、つまり1ナノメートル(nm)程度です。つまりナノメートルスケールで起きている現象を可視化する手段が必要となります。もう1つは時間スケールです。反応の途中で分子が姿を変えていく変化にかかる時間は、おおよそ100フェムト秒(fs)からピコ秒程度だといわれています。

1フェムト秒は 10^{-15} 秒で、0が15個並び、1000兆分の1秒となります。ピコ秒はこの1000倍の時間です。

速い運動をとらえる手段の1つはカメラです。通常のカメラのシャッタースピードは1000分の1秒くらいですので、これを使えば1ミリ秒(=10⁻³秒)くらいの速さの運動をつかまえることができます。さらに科学計測用カメラを使えば、10⁻⁹秒程度の現象

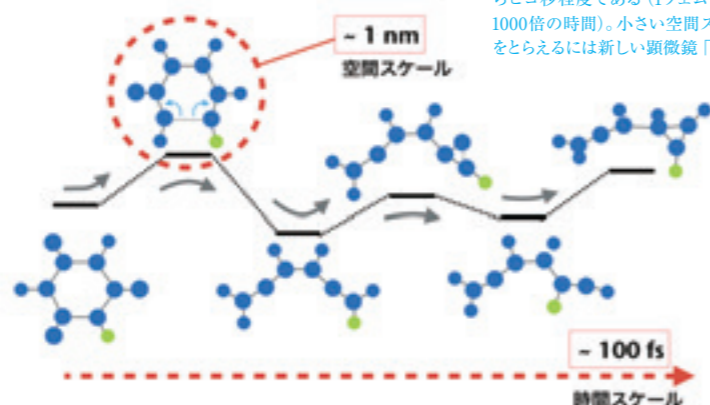


図1 分子反応ダイナミクスの時間スケールと空間スケール
分子の大きさはナノ(10⁹)メートル、反応の途中で分子が姿を変えていく変化にかかる時間は、おおよそ100フェムト秒からピコ秒程度である(1フェムト秒は10⁻¹⁵秒で、ピコ秒はこの1000倍の時間)。小さい空間スケールで高速に変化する分子をとらえるには新しい顕微鏡「反応マイクロスコープ」が必要。

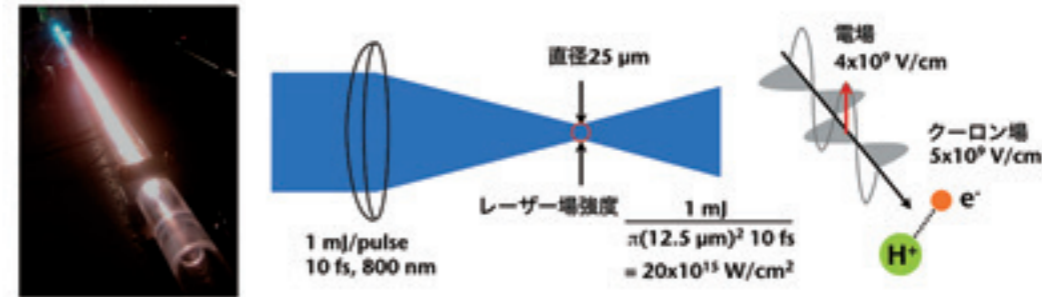


図2 フェムト秒レーザーパルスによる強レーザー場の発生
中空ファイバーを用いたサブ10フェムト秒強レーザーパルスの発生の様子。パルス当たりのエネルギーが1mJ程度のレーザー光が得られる(左)。このパルスを集光すると集光点で $20 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ もの強いレーザー場ができる。電場に換算すると $4 \times 10^9 \text{ V/cm}$ で、これは水素原子内の電子が原子核から感じるクーロン場に匹敵する(右)。

をとらえることができますが、それでも10⁻¹⁵秒の世界には届きません。これはカメラにはシャッターが必要なためです。シャッターの機械的、電気的な応答にかかる時間が見える世界の限界を決めています。

速い運動をとらえるための別の手法にストロボ撮影があります。先ほどはカメラのシャッターの開閉が問題になりましたが、今度はシャッターを開けたままにしてその代わりに被写体を真っ暗なところに置いておきます。そして、見たいタイミングで被写体を短い光のパルスで照らすと、そこから反射して出た光がカメラに届きます。この光パルスが十分に短ければ、光が当たった瞬間の被写体の様子をとらえることができます。100フェムト秒程度の時間スケールで動く分子の動きをつかまえるためには、フェムト秒領域のきわめて短い光のパルスで照らせば良さそうです。

もう1つのポイントは空間スケールでした。どのようにしてナノメートル領域での運動を調べればよいでしょうか。おおよそ1ミクロンくらいのものであれば、普通の光学顕微鏡を使えば見ることができます。それよりもさらに小さいものを見たい場合には電子顕微鏡や走査型プローブ顕微鏡が使われます。これだとナノメートルサイズのものを調べることができます。これはきわめて強力な手法ですが、像を得るのに長い時間がかかってしまい、フェムト秒の現象は見ることはできません。反応している分子を見るための新しい顕微鏡＝「反応マイクロスコープ」をつくるには、何か別の新しいアイデアが必要です。現在、世界中の研究者によってさまざまなアプローチが試されています。ここでは私たちのグループで取り

組んでいる、強いレーザーパルスを使った方法を紹介します。

強いレーザー場中の分子

レーザーは1960年に誕生し、現在単位時間当たりの最大出力は10¹⁵Wを超えています。レーザー誕生時の強度は10³W程度でしたので、人が作り出す光の強さはわずか50年間程度で10¹²倍も強くなったこととなります。こうしたレーザー技術の発展のおかげで、大きなレーザー施設だけでなく研究室でも非常に強いレーザー光が使えるようになりました(図2)。

レーザーを集光して得られるきわめて強いレーザー「場」における物質の応答は1980年代頃から積極的に調べられるようになり、たとえば原子やクラスターからのアト秒(10⁻¹⁸秒)パルスの発生、核融合による中性子の生成などが報告されています。また、気体分子は普通、さまざまな方向に回転していますが、強レーザーパルスによって分子軸の向きを揃えることもできます。この他にも、弱い光を使った場合には見ら

れない新しい現象がこれまでにたくさん見出されています。

分子のかたちを追う

反応している分子の姿を見るために、私たちのグループでは強いレーザー場で起こるクーロン爆発という現象に着目しました。分子はプラスの電荷をもつ原子核、マイナスの電荷をもつ電子からなり、両者のバランスで分子の姿が保たれています。これに対してレーザーパルスを照射すると、軽い電子がゆさぶられて、外に飛び出していきます。この光が十分に強いと1個だけでなく複数の電子が剥ぎ取られるという現象が起きます。これは多重イオン化とよばれる現象です。

電子が飛び出して原子イオンだけが残ると、イオンの正電荷の間で働くクーロン力により分子はバラバラに壊れます。これを「クーロン爆発」とよんでいます(図3)。分子解離過程の1つですが、クーロン反発によって素早く、高いエネルギーをもって壊れるので、少し大きざですが「爆発」と

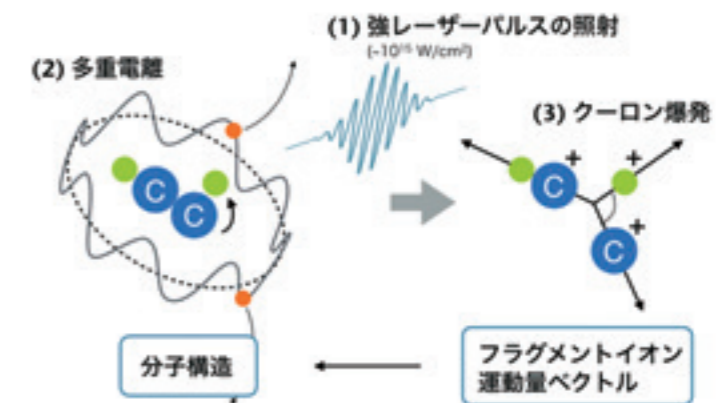


図3 クーロン爆発による分子イメージング
クーロン爆発によって生成したフラグメントイオンの運動量を計測することで、レーザーパルスを照射した瞬間の分子のかたちがわかる。

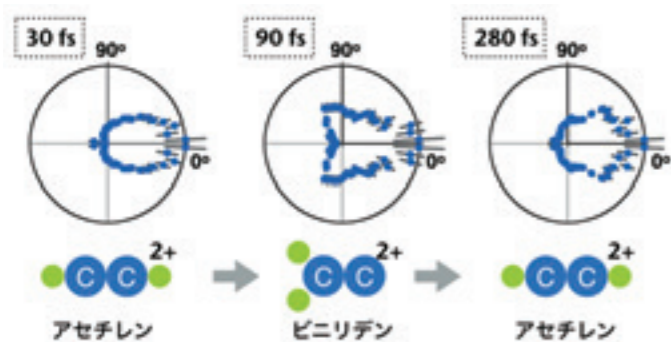


図4 クーロン爆発イメージングによる水素移動反応の追跡
重水素化アセチレン2価イオンにおけるアセチレン-ビニリデン異性化反応。反応開始直後には0度にピークが見られ、アセチレンはまだ直線構造を保ったままである。一方、90フェムト秒後には120度のところにピークが現れており、水素が他方の炭素に移動してビニリデンができたことがわかる。さらに200フェムト秒程度の時間が経つとアセチレンに戻り、水素が分子の中を「回遊」している様子が見て取れる。

よばれています。分子が爆発してできた粉々の破片=「フラグメントイオン」がもっている運動量は、レーザーを照射した瞬間の分子のかたちで決まります。逆に、この運動量を計測することで、レーザーが当たった瞬間の分子のかたちを調べることができます。これがクーロン爆発イメージングの原理です。

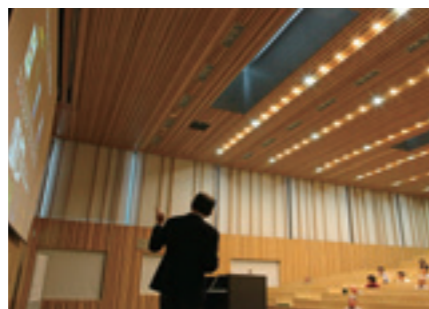
これは夜空に輝く花火にたとえることができます。夜空に輝く花火のかたちは尺玉の中に星(火薬玉)がどのように配置されていたかによって決まります。裏を返せば、花火のかたちを見れば尺玉がどのようにつくられていたか、がわかるということです。花火のかたちを見て尺玉の構造を知るように、「分子の花火」=クーロン爆発で生じたフラグメントイオンの運動量を測って爆発する前の分子のかたちを調べることができるという仕掛けです。もう1つ、大事なポイントは大きさです。夜空に輝く花火は、大きさが200mとも300mともいわれ、一瞬で消えてしまうとはいえきわめて巨大な展示物ですが、その元になっているのは1m程度の尺玉です。つまり花火は尺玉の構造を拡大して見せていることになります。同じように、ナノメートルサイズの分子でも、爆発させれば我々のカメラでもとらえられる大きさになります。

アセチレンとビニリデン

水素移動反応は分子内で水素が動きまわることで分子のかたちが変わる、いわゆる異性化反応の1つです。水素原子は非常に軽くて動きやすいため、その移動反応は分子の反応を決める大事な過程です。一方、水素は非常に小さいためX線や電子線では見づらく、またきわめて速く動くために、

実際に水素の動きを分子のかたちの変化としてとらえることはできていませんでした。そこで私たちは、先ほどのクーロン爆発イメージングによってこれをとらえようと考えました。

ここではアセチレン分子に着目して研究を行いました(図4)。アセチレンは炭素原子を2つもち、その両側に1個ずつ水素がついた直線構造をしています。アセチレンが水素移動反応を起こすと、片側に水素が2個集まったビニリデンになります。レーザーを当てた瞬間、アセチレンが直線構造のままならば、水素イオン(プロトン)と炭素イオンがクーロン爆発で飛んでいく方向の



間の角度は0度に近いはずですが、ビニリデンに強いレーザーパルス照射すると、プロトンと炭素イオンの間の角度は120度くらいになることが簡単な計算からわかります。

実際に実験をしてみると反応を開始して90フェムト秒程度のきわめて短い時間スケールで、片方の水素原子が他方の炭素原子に移動することがわかりました。面白いことに、そのままもう少し待っていると分子はまた元の直線構造に戻ることもわかりました。つまり、水素原子はこの分子の中をいったりきたり回遊するような動きをして

いることになります。これは分子内の水素原子の複雑な運動を初めてとらえた研究成果です。

電子の動きをとらえる

電子が原子の間で共有されることで化学結合ができることからわかるように、実は化学反応を決定付けているのは電子の動きです。分子内を動きまわる電子の「動画」を撮影し、その詳細を実時間でとらえることは、化学反応の深い理解を目指す上で重要なステップの1つです。強いレーザー場で起こる現象のうち、ここでは「レーザートンネルイオン化」という過程を利用して、分子内で変化する電子の様子をとらえる試みを行いました(図5)。

レーザートンネルイオン化を理解するために、まず原子について考えます。電子は原子核による束縛ポテンシャルによって閉じ込められて原子をつくっています。この様子はガラスの中の水にたとえることができます。水が電子だとすると、ガラスが束縛ポテンシャルというわけです。

強いレーザーを照射すると、電場の方向に束縛ポテンシャルが変形し電子が外に飛び出します。これがイオン化です。これはガラスが傾くと中に入っている水がふちからこぼれる様子に似ています。実際のイオン化がこの単純なたとえと違うところは、電子は束縛ポテンシャルが変形してきた山(障壁)を通り抜けるようにして外に飛び出すことができることです。これはトンネル過程とよばれる現象で、量子効果の1つです。

原子だとこれだけですが、分子では少し様子が異なります。分子内の電子分布が

方向によって変化するからです。分子からみて遠くまで電子が分布している方向にレーザー電場をかけると、簡単にイオン化が起こります。これは少しグラスを傾ければ水がこぼれるのと似ています。一方、あまり電子が見出されない方向に束縛ポテンシャルを歪ませても効率よくイオン化が起こりやすさがレーザー電場をかける方向によってどのように変化するかを調べれば、分子内で電子がどのように分布しているかがわかることになります。

実際に一酸化窒素分子を対象として、光吸収の前後でどのように電子分布が変化

するかを調べてみました。その結果、電子分布は、光照射前はクローバー型、照射後は楕円型であることがわかりました(図6)。これは光を吸収する前の状態(基底状態)と吸収後の状態(励起状態)の分子軌道に基づく理論計算からの予想と良い一致を示し、光吸収による電子分布形状の変化が可視化できたことを示しています。レーザートンネルイオン化イメージングが化学反応過程における電子の動画を撮影する手法として有力であることを示す成果です。

新しい「反応マイクロスコプ」の実現に向けて今回紹介した2つのアプローチは、反応を開始させる光の波長や強度を変え

ることさまざまな分子の反応過程への応用が可能です。近い将来、反応途中の分子において分子がどのようにかたちを変えるか、また電子がどのように動いているかをリアルタイムで撮影できるようになり、これを通じて化学反応の理解とその高精度なコントロールに向けた新たな指針が得られるものと期待しています。また、こうした研究は光と分子の相互作用についての深い理解の上に成り立っています。これからも純粋に「見たい」「知りたい」気持ちを大事にして研究を進めていきたいと思えます。本日はご清聴いただきまして、ありがとうございました。

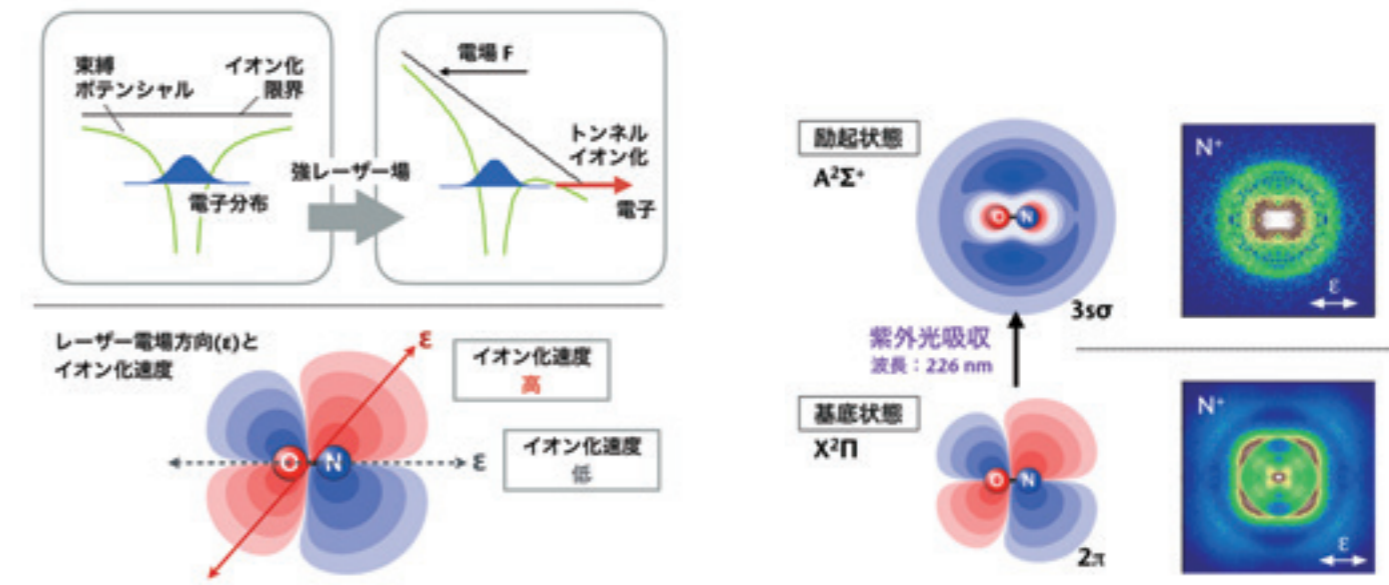


図5 レーザートンネルイオン化を用いた電子分布可視化
トンネルイオン化の概念図(上)と分子内の電子分布とイオン化の起こりやすさの関係(下)。強いレーザーを照射すると、電場の方向に束縛ポテンシャルが変形しポテンシャル障壁ができる。これを電子がトンネル透過することでイオン化が起こる。レーザー電場の方向によってトンネルイオン化の起こりやすさがどのように変化するかを調べれば、分子内の電子分布がわかる。

図6 光吸収による一酸化窒素分子の電子分布形状の変化とレーザートンネルイオン化を用いた可視化
右に示した実験結果は光を吸収する前の状態(基底状態)と吸収後の状態(励起状態)についての理論予想とよく一致しており、トンネルイオン化を用いて光吸収による変化を可視化できていることがわかる。



Minoru Tanaka

1984年名古屋大学理学部卒業、同大学大学院理学研究科（遺伝子実験施設：葉緑体ゲノム解析と転写研究）で学位取得後、基礎生物学研究所助手（魚類内分泌研究）、米国ノースウェスタン大学客員研究員（マウス概日リズム研究）、北海道大学理学研究科助教授（性決定分化研究）、基礎生物学研究所准教授を経て2016年より現職。

雌雄はどのようにして決まるのか

田中 実 生命理学専攻教授

ゆらぎ続ける性決定

多くの人々は幼少期に、自分は女性である、あるいは男性であるということに気づく。そして幸か不幸か、その後身体の性が変わることはない。そのためか性は一度決まったらそれで終わりと考える研究者も多い。人の場合、Y染色体上にある性決定遺伝子SRYの有無によって胎児期に性が決まる。Y染色体をもつ胎児はSRYの存在によって男性化し、Y染色体のない胎児はSRYがないために女性化する。

性決定は子孫をつなぐために重要であるにもかかわらず、このSRYという性決定遺伝子は人を含めた哺乳類にしかない。ニワトリではDMRT1という遺伝子が性の

スイッチの役割を果たしている。もっといえば、性はスイッチ遺伝子で決まる必要もないというのが、生き物の本音のようだ。一部の爬虫類や魚では環境に合わせて自在に性が決まる。性が決まり、子孫づくりに励んだ後でも、もともとの性とは反対の性に転換してしまう動物すらいる。

性をつくり出すコアメカニズム

日本人になじみのあるメダカはY染色体上にあるDMYという性決定遺伝子で雄化が引き起こされる。性決定遺伝子は一般に、卵巣あるいは精巣になることが決まっていな胎児や胚の「生殖腺」という器官で働き、精巣になるか卵巣になるかを定める。

全身の性はこの生殖腺の性の影響を受けて決まる。生殖腺には多くの異なる種類の細胞が存在しており、これら細胞ひとつひとつの性が決まって全体の性が決まるはずである。我々はこれらの細胞でどのようにして性が決まるのかを調べてきた。

その結果、性のコアメカニズムともよぶべきものが明らかになった。性とは、性決定遺伝子から順番にその違いが積み上がるものではなく、雌雄どちらかにはなれるように細胞や組織の中にあらかじめ「保障」されているらしい。それは「雌にならなければ雄になる、雄にならなければ雌になる」シーソーみたいなもので、性決定遺伝子は仕組まれたシーソーのバランスを一方に

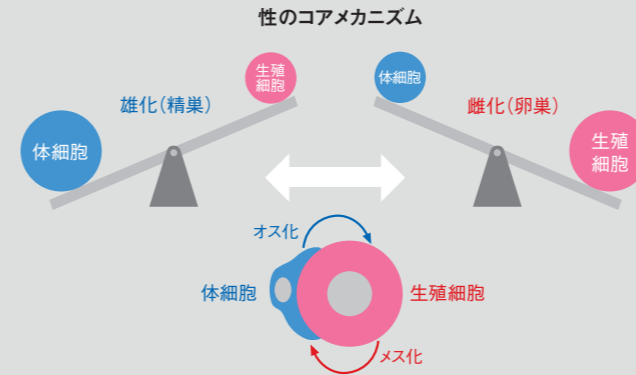


図1 性の決まり方

雄の場合はDMYが働くことで体細胞が雄化して生殖細胞の数が抑えられる。一方卵巣を形成しているときの生殖細胞の数は多い。おそらく体細胞由来の何らかの因子が生殖細胞の数を調節することで性のシーソーがどちらかに傾き、性が決まってくるのであろう。メダカではこの生殖細胞と体細胞との関係がくずれると性転換してしまう。

持っていき。このような保障された仕組み「コアメカニズム」が性をつくり出す根底であることがメダカを用いた研究で明らかになってきた(図1)。

このシーソーの片方に作用するのが将来卵や精子になる生殖細胞であり、もう片方はそのまわりに存在する生殖腺の体細胞(たいさいぼう)である。すなわち、胚の時期に生殖細胞を過剰にすると、DMY遺伝子があってもメダカは完全なる雌となり卵をつくる。一方、生殖細胞が少ない状態だと、DMY遺伝子が存在しなくても完全なる雄がつくれる(図2)。以上のことは、雌になるには生殖細胞の作用が必須であり、同時に、体細胞は性決定遺伝子が存在しなくても、雄になるように仕組まれていることになる。ここでは「生殖細胞=雌化、

体細胞=雄化」という図式が成り立ち、性の根底には性決定遺伝子が関与しなくても生殖細胞と体細胞のバランスでどちらかの性に決まる仕組みがあることになる。

明らかになった性決定機構

生殖細胞はまわりの体細胞を雌にする能力があると書いた。しかし生殖細胞は精巣内では精子になる。能力と自分自身の性(卵になるか、精子になるか)とはどうも別らしい。それでは生殖細胞自身の性はどうか。我々は精子で満たされている成熟精巣のみならず、成熟卵巣にも性の決まっていない生殖細胞の幹細胞を見出した。そしてその生殖幹細胞で働く性決定遺伝子foxl3を発見した。この遺伝子を破壊するとDMY遺伝子がない通常の雌(XX)

メダカは卵巣を発達させるが、その中の生殖細胞のみは雄となり、完全なる精子をつくり続ける(図3)。脊椎動物で生殖細胞の性決定機構が初めて明らかになった。と同時に、体細胞と生殖細胞の性が食い違ってしまうのかも明らかになった。精子は卵巣の中でもできるのである。

性とは、身体の性が決まってしまうとそれで役割は終わりと思われてきたが、その後も性を維持するコアメカニズムが存在し、生まれてからも働き続けることが明らかになってきた。この現象からは、なぜ性決定にはいろいろあるのか、思春期と精子形成開始がどのように連動するかなど、今まで不明であった問題解決の糸口も見え始めつつある。そこには未知の曠野があり、まだまだ見知らぬ問題がころがっている。

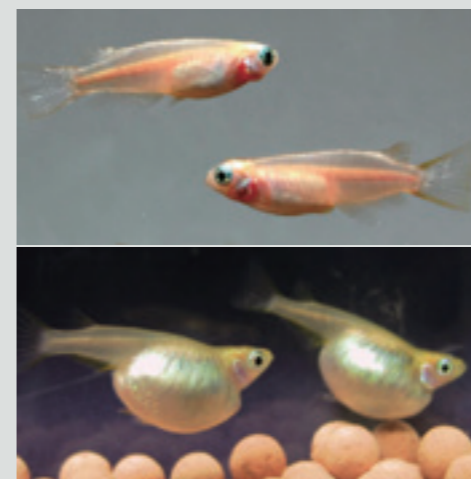


図2 メダカで性転換が生じる仕組み

性が決まる時期に生殖腺にあるべき生殖細胞の数を遺伝学的手法で少なくすると、XXのメダカ(Y染色体がなく本来雌になる)が完全なる雄になる(上:ヒレなどの外見は普通の雄)。一方、Y染色体をもっていて本来は雄であるはずのメダカも、胚の時期に生殖細胞数が多いと巨大な卵巣をもつ雌となる(下:お腹が大きいのは生殖細胞で満ちあふれた生殖腺をもつため)。

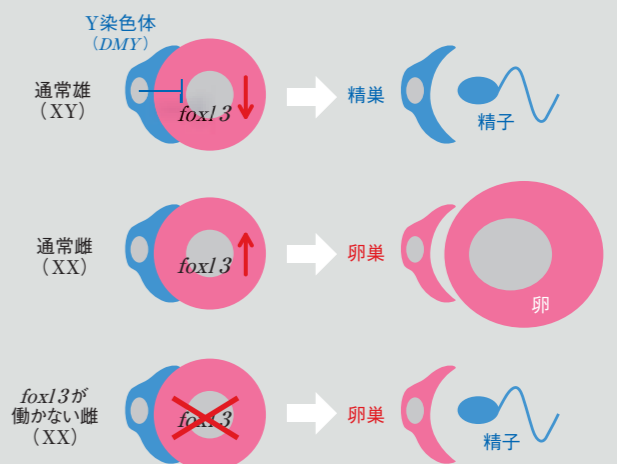


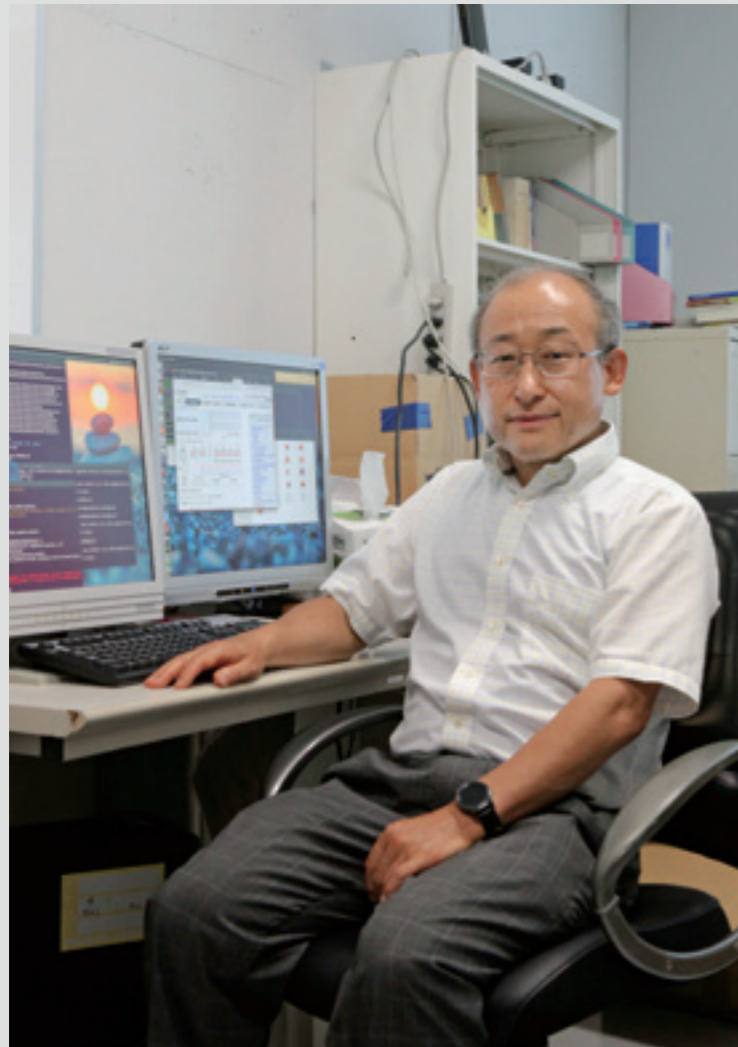
図3 卵と精子をつくり分ける仕組み

通常の雌では体細胞(青色)で働く性決定遺伝子(DMY)の作用を受けて生殖腺は精巣へと分化し、その中にある生殖細胞(赤色)で働くfoxl3の働きが抑えられて生殖細胞は精子となる。雌ではDMYが働かず、foxl3が発現し続けて卵ができる。foxl3を働かないようにした雌では生殖細胞が精子になるが、体細胞ではDMYが働かないために卵巣に分化する。この結果、卵巣中で精子がつけられてしまう。

形態統御学講座生殖生物学グループウェブページ <http://www.bio.nagoya-u.ac.jp/laboratory/rb.html>

重力波源の探索

阿部文雄 宇宙地球環境研究所准教授



Fumio Abe

1954年生まれ。1983年筑波大学理学研究科修了。理学博士。筑波大学準研究員、高エネルギー物理学研究所助手を経て、1995年名古屋大学助教授。2015年、改組により現職。

重力波の直接検出

2015年9月、LIGOグループによって初めて重力波がとらえられ、アインシュタインの予言が実証された。この重力波を発生したのは地球から13億光年のかたで起きた、ブラックホール連星の合体だとされている。合体の直後、もしこの天体が明るく輝いていれば、望遠鏡で観測して状況をより詳しく知ることができる。そのために、我々は光学的に対応天体を探した。

重力波とその追観測

今世紀に入って、重力波直接検出をめざして各国が競って大型レーザー干渉計による重力波検出器を建設した。アメリカ合衆国のLIGO、ヨーロッパのVIRGO、日本のKAGRAの建設が始まった。LIGOグループは最も進んでいて、2015年9月から2016年1月に予定されていた観測期間（O1とよばれる）では、だいたい2億6000万光年以内の距離で起きる中性子星連星の合体による重力波が検出可能とされ、1つくらいは本物が見つかるかもしれないという期待が高まった。重力波が観測された場合、リアルタイム解析から方向が求められる。しかし、方向の決定精度は悪く、光学的対応天体を見つけるには広大な領域を探索する必要がある。この領域が、スカイマップとして関係者限定で公開される。

日本では複数の大学等が連携してJ-GEMという組織をつくり、LIGOグループと学術協定を結んだ。ニュージーランド南島のマウントジョン天文台で、重力マイクロレンズ観測を行っている我々MOA共同研究は、J-GEMのメンバーとして重力波の追観測も行うことになった。使用するの



図1 観測に使用した望遠鏡
ニュージーランド・マウントジョン天文台の1.8m望遠鏡(左、MOA共同研究)と61cm望遠鏡(右)。通常は、重力マイクロレンズ効果を利用した太陽系外惑星の探索などに利用されている。

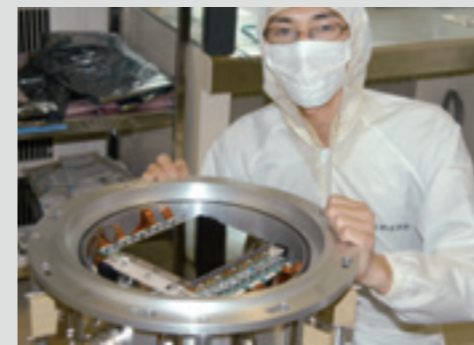
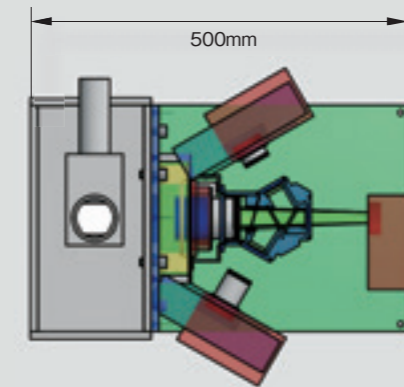


図2 観測に使用したカメラ
1.8m望遠鏡の大型主焦点カメラ(左)と61cm望遠鏡のTRIPOL5カメラ(右)。いずれも、名古屋大学のもつくり研究開発の成果。主焦点カメラは、12cm×15cmで満月10個分程度の広視野が得られる。TRIPOL5カメラは3色(緑、黄、赤)同時に観測できる。



名古屋大学が設置した1.8m望遠鏡と、同天文台の61cm望遠鏡である(図1)。1.8m望遠鏡は、2.2平方度という広視野で、位置決定精度の悪い重力波源の特定が期待される。61cm望遠鏡の方は、2014年に新しいカメラ TRIPOL 5を取りつけた(図2)。このカメラは、佐藤修二名古屋大学名誉教授が開発したもので、望遠鏡からの光を波長ごとに3分割し、緑、黄、赤の3波長を同時に観測できる。

最初の重力波検出 GW150914

2015年9月16日、O1開始を待つ我々に、驚くべき知らせが入った。重力波らしい信号を、14日に検出したというものだった。「話が違う」と我々は思った。O1開始は18日の予定だった。誤報の割合(False Alarm Rate, FAR)は、1月に1回くらいとされており、信頼性は低いと思われた。スカイマップを見ると、北側は太陽に近すぎて観測が困難だった。我々MOAグループ

は、条件の良い南側を観測できる好位置にいた。このアラートには半信半疑だったが、練習のため、61cm望遠鏡による追観測を実施した(図3)。

61cm望遠鏡の視野は、狭すぎてスカイマップ全体をカバーすることはできない。そこで、近傍の銀河で起きた中性子星連星の合体を仮定し、3億3000万光年以下の距離の銀河18個を選び出して観測を行った。既知の星と比較した結果、残念ながら候補天体なしという結論になった。世界各国の望遠鏡でも同様の追観測が行われた。しかし、これまでのところ、候補天体を発見したという報告はない。

ブラックホール連星の合体

その後のLIGOによる解析でFARは大幅に小さくなり、最終的に20万3000年に1回となって最初の重力波直接検出が確定した。LIGOの解析結果は、2016年2月に公表された。その内容は、重力波を放出し

たのは、約30太陽質量のブラックホール連星の合体で、距離は13億光年という衝撃的なものだった。これでは、近傍の銀河を観測した我々が見つけれなかったわけである。しかも、ブラックホール連星の場合、光やガンマ線などの電磁波はほとんど放出されないはずである。

LIGOによる感度を上げた観測は、今秋再開される。今回は10個くらいの事象が検出される予定である。中性子星連星の合体も1つくらいはあるかもしれない。さらに、今後VIRGOやKAGRAが動き始めれば、数平方度程度まで位置が絞り込まれ、次々と対応天体が見つかるようになる。大きな誤差がついている距離なども正確な値が得られるようになるはずだ。金などの重元素は中性子星連星合体で生成したとされているが、それも明らかになるだろう。

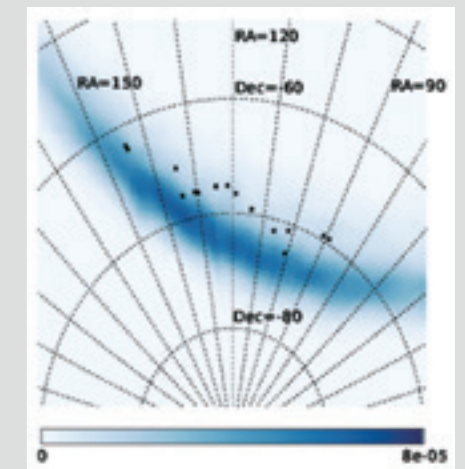
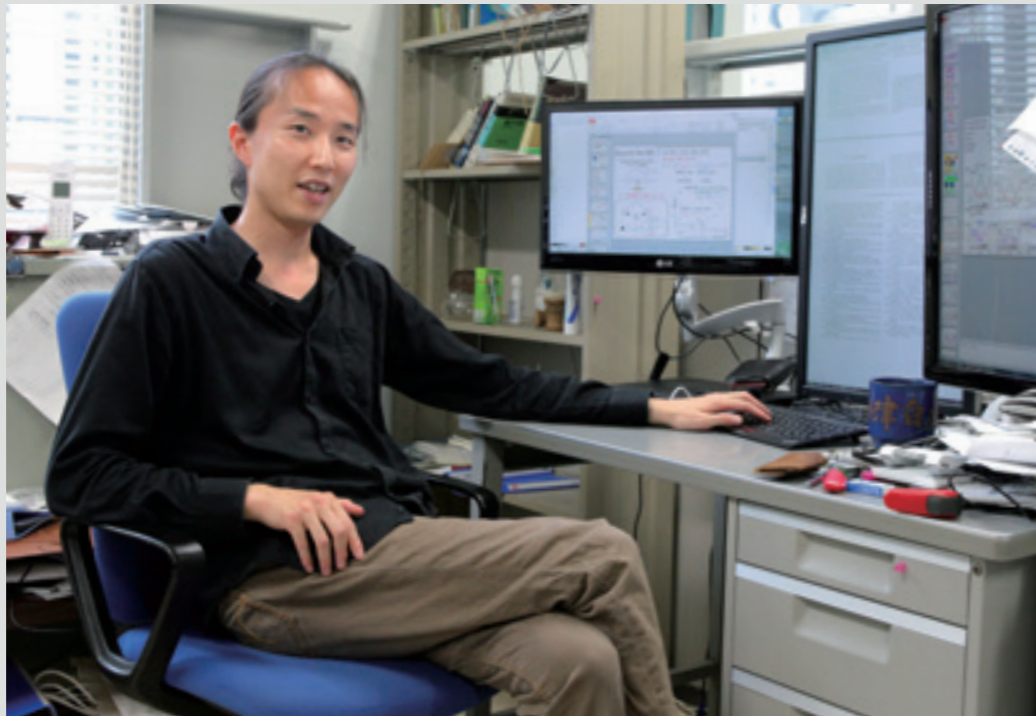


図3 MOAによる61cm望遠鏡を使った追観測点は観測した銀河で、ブルーの領域がLIGOグループによる最終的なスカイマップ。位置がずれているのは、LIGOグループがスカイマップを修正したため。RAとDecは赤道座標系における赤経と赤緯を表す(単位は度)。

宇宙地球環境研究所宇宙線研究室ウェブページ <http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/CR/>

高温超伝導体で起きる電子の液晶状態

山川 洋一 物質理学専攻助教



Yoichi Yamakawa

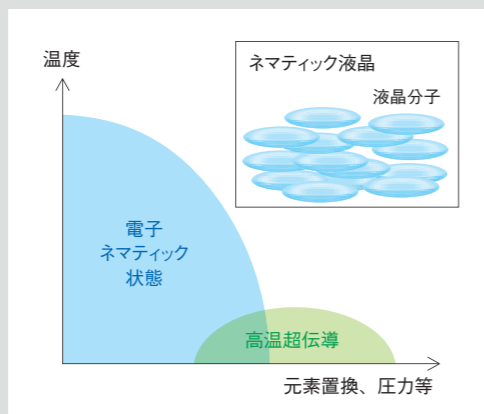
1981年生まれ。2010年新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。同年日本学術振興会特別研究員。2011年名古屋大学大学院理学研究科研究員、特任助教を経て、2016年より現職。専門は物性理論。強相関電子系における多様な相転移や超伝導などを理論面から研究している。

電子の液晶状態とは

10^{23} 個にも及ぶ多数の電子を有する固体中では、超伝導や強磁性をはじめとして少数電子系では起きえないさまざまな現象が実現する。1972年、アンダーソン*1はこの多粒子系の多様性を More is different. (多は異なり)と表現した。

近年、固体電子論において注目を集めている現象が「電子ネマティック状態」である。ネマティックとは本来液晶に使われる言葉で、図1の挿入図に示すように液晶分子の方向が揃った状態を指す。一方、電子自身は点状の素粒子であり、液晶のような方向性をもたない。ところが最近、鉄系超伝導体等において、伝導電子が自発的に回転対称性を破って異方性を獲得するという不思議な現象が報告され、液晶との類推から電子ネマティック状態（電子の液晶

状態）とよばれている。図1は、鉄系超伝導体の模式的な相図である。電子ネマティック相は元素置換や圧力等により抑制され、その近傍で高温超伝導相が現れる。電子ネマティック状態は高温超伝導状態と密接な関係が期待され、その起源に対しさまざまな理論的可能性が提唱された。



電子の液晶状態の正体

ここで多くの理論家たちは重大な困難に直面した。回転対称性が破れた電子ネマティック状態は、簡単な平均場近似レベルの計算（第一原理計算を含む）では、まったく説明できないのである。高温超伝導体では電子が互いに避け合う相関効果が重

図1 鉄系超伝導体の模式的相図
鉄系超伝導体の母物質（左端）では、温度を下げると電子系の回転対称性が破れた電子ネマティック状態に相転移する。元素置換や圧力を加える事でこの相は抑制され、その近傍で高温超伝導状態が実現する。右上の挿入図は、ネマティック液晶の模式図。個々の液晶分子は異方性をもつが、それらが1方向を向いている状態の液晶をネマティック液晶とよぶ。

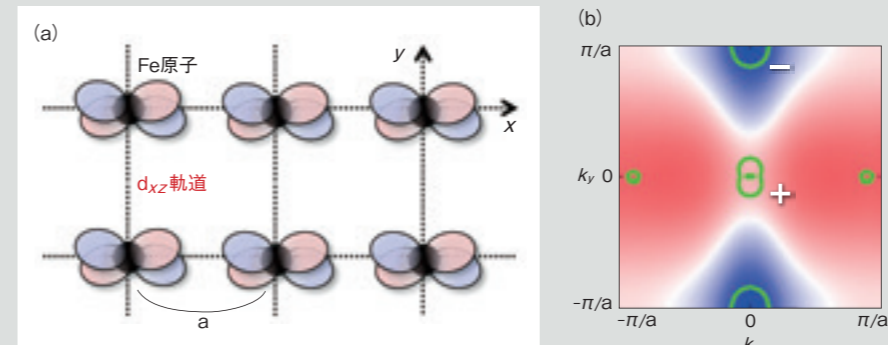


図2 鉄系超伝導体における軌道秩序
(a) 我々が提案する、鉄系超伝導体における軌道秩序起源の電子ネマティック状態の模式図。鉄の d_{xz} 軌道の電子数が増加し、 d_{xy} 軌道の電子数が減少することで、 x 方向と y 方向が非等価になる。(b) 軌道秩序状態下での d_{xz} 軌道の分極の波数 k 依存性。緑の実線は軌道分極により変形したフェルミ面。軌道分極が途中で符号を変える、非自明な軌道秩序が生じている（平均場近似では秩序パラメータに波数依存性はない）。この符号反転する軌道分極とフェルミ面の変形は、東大のARPESグループと我々の共同研究により、実験的にも観測されている。

要であり、相関効果を見捨てる平均場近似はしばしば破綻する。そこで我々は、平均場近似を超えて多数の電子間の相関を考慮した自己無撞着パーテックス補正 (SC-VC) 理論を開発し、この困難に挑戦した。

真空中の電子は電荷 $-e$ とスピン $1/2$ を有する点状素粒子に過ぎないが、物質中では新たに軌道という自由度を獲得した新種の素粒子へと生まれ変わる。我々は鉄系超伝導体において、伝導を担う鉄の d_{xz} 軌道と d_{xy} 軌道が非等価となる、軌道秩序が生じることを見出した(図2 (a))。この回転対称性の自発的破れにより、金属電子の運動を決めるフェルミ面が k_x 方向と k_y 方向で非等価になり(図2 (b))、電子ネマティック状態が実現する。

我々が見出した「軌道秩序による電子ネマティック状態」の起源は、多体相関に起因した軌道・スピン間のモード結合である。図3に、そのファインマン図形を示す。これは、1つの軌道波が2つのスピン波に分かれ、再び軌道波に戻るという仮想過程を

表す。もともと独自の自由度だった電荷・スピン・軌道は、多体相関により結合し、新しい量子状態を生み出している。

さまざまな物質での電子の液晶状態

電子ネマティック状態は、鉄系超伝導体に限らない。近年、銅酸化物高温超伝導体でも電荷秩序を伴った電子ネマティック状態が発見され、長年の謎である擬ギャップ現象*2解明の鍵として注目を集めている。我々は、開発したSC-VC理論や汎関数くりこみ群といった多体電子理論を駆使し、電子ネマティック状態の正体が酸素間で電荷が移動する p_x - p_y 軌道秩序であることを明らかにした(図4)。ほかにも重い電子系において隠れた秩序とよばれる正体不明の相転移の本性が、一種の電子ネマティック状態ではないかと期待されている。このように、軌道とスピンの結合による電子ネマティック状態が、実は金属における普遍的現象の1つであることが明らかになりつつある。

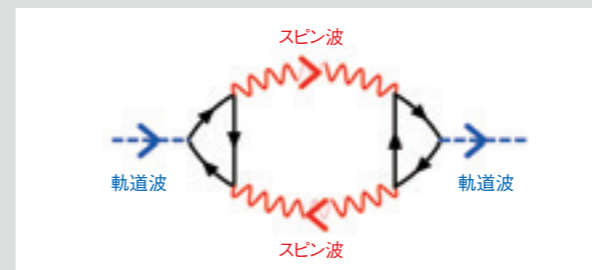


図3 Aslamazov-Larkin 型パーテックス補正のファインマン図形
1つの軌道波が2つのスピン波に分かれ、再び軌道波に戻るという仮想過程を通して、軌道波が大きく増強される。矢印つき実線は電子の運動を表す。このプロセスの重要性は、高次のファインマン図形の系統的計算が可能汎関数くりこみ群理論により実証されている。このファインマン図形が表す軌道・スピン間のモード結合は、さまざまな多軌道系において重要な役割を果たしていると考えられる。

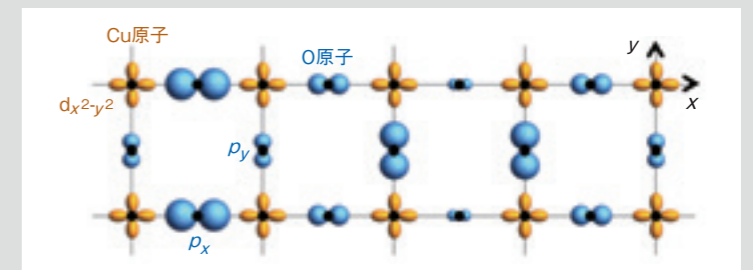


図4 銅酸化物高温超伝導体における電子ネマティック状態
 p_x - p_y 軌道秩序の模式図。 x 方向と y 方向が非等価になっている。この電子ネマティック状態の主な起源もまた、図3のファインマン図形に表す軌道・スピン間のモード結合である。

*1 P.W. アンダーソン (1823-) アメリカの物理学者。ノーベル物理学賞 (1977年) 受賞。
*2 擬ギャップ現象
超伝導転移温度より高温にも関わらず、超伝導のようなエネルギーギャップが開く現象。

同窓生から

名古屋から地球の裏側へ

国立天文台チリ観測所准教授

浅山信一郎 (Shin'ichiro Asayama)

A研の修士1年の学生として初めて南米チリを訪れてから、早いもので20年近くが経とうとしている。私は現在国立天文台准教授としてチリに赴任し、国際共同プロジェクトであるアルマ電波望遠鏡の運用と性能向上のための新規研究開発に携わっている。高校生当時の私は、まさか自分が日本と地球の反対側で研究活動を行っているとはまったく想像すらできなかった。

私は子供のころから理学に興味があり、漠然と理系の研究者になりたいと思っていた。しかし地元では私のまわりには理学が面白いという人は皆無で、理学部進学希望の私は変わり者であった(今でもそうだが)。大学受験時の高校3年生のセンター試験後に当時の希望大学への出願書類作成のため資料を探す際、たまたま本棚にあった名古屋大学理学部紹介パンフレットが目にとまった。何気なく目を通したその内容を読んだ際に私はここに進学したいという衝動に駆られ、それまで一度も検討していなかった名古屋大学受験を決めたのであった。当然、両親、高校の担任および友人たちには猛反対されたが自分を貫き通した。当然のごとく周囲の予想通り私は不合格になったが、1年後に



晴れて入学することができた。今思えば、単に新しい環境に身を置きたかっただけなのかもしれない。とはいえ名古屋大学理学部では、理学を面白いと思う友人や先輩、また素晴らしい先生方に出会い有意義な時間を過ごすことができた。大学院はA研に進み、南米チリに設置された電波望遠鏡「なんてん」を用いて天体物理学の研究を始めた。

私は元気と積極性だけが取り柄で、ゼミ等でもついつい大きな声を出して、「君にはボリュームはついてないのかい」と、福井康雄先生にユーモアを交えながらご指導いただいたことは今でも思い出される。A研では装置の開発および望遠鏡の運用に大学院生が積極的に関わっており、研究室の皆で協力し合い研究開発を進めて行くという経験ができたのは非常に貴重な経験だった。

こうして私が理学の世界で研究を続けていられるのも、名古屋大学で理学の面白さに改めて気づかせてくれた友人や先輩たちのおかげである。また大学院の研究室の仲間で行った、昼夜を問わない実験や議論、また実際に「なんてん」を使った観測経験など多くのことが私の財産になっている。



南米チリの標高5000m地点で運用中のアルマ電波望遠鏡と

書籍紹介

『南海トラフ地震』

多元数理科学専攻准教授

中島 誠 (Makoto Nakashima)

南海トラフ地震の危険性が叫ばれ始めてから久しい。その間に東北地方太平洋沖地震や熊本地震など日本各地で大きな地震が起き、世間の南海トラフ地震に対する関心が一層増しているように感じる。その中でも世間の関心は「いつ起きるのか」、「どのような被害が起こるのか」といったものだろう。

本書では、内閣府南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性に関する調査部会の座長も務めた地震予測の専門家が、南海トラフ地震の発生のメカニズム、発生したときにどのような災害が起こると考えられるのか、予測可能性の現状をわかりやすく解説している。

巨大地震予測の研究の難しさが統計に必要な過去の地震のサンプルの少なさにあることは容易に想像がつく。研究者らによる過去の地震に関する文献からの解析、GNSSによる地殻変動の観測といった最新技術による分析等、予測可能性を高める努力と進歩が語られた一方で直前予測の社会的影響の深刻さについても語られており研究者らの苦悩が読み取れる。また国が行った被害想定をその原因内訳から地域の特性を読み解くことで地域にあった防災準備を行うことの重要性が説かれている。東日本大震災以上の被災者が出るという想定から、援助が十分に行き届かない可能性が述べられ「自助」という防災対策の重要性を改めて教えてくれる一冊である。



『南海トラフ地震』
山岡耕春 (Koshun Yamaoka) 著
岩波書店/2016年1月発行
780円(税別)

キャンパス通信

技術部の新たな挑戦

全学技術センター(理学)技術専門員

鳥居龍晴 (Tatsuharu Torii)

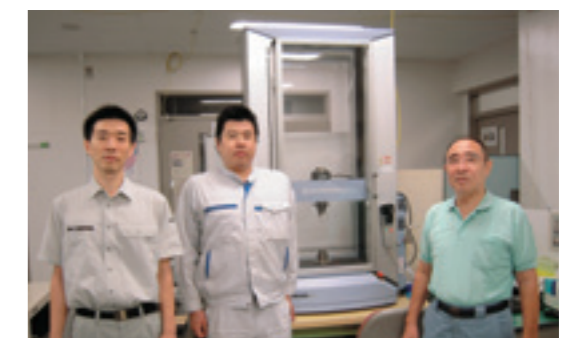
理学部の装置開発室は、全国の大学のなかでも飛び抜けた開発力をもつ組織として知られる。ここ数年、定年に伴って定員12人の半数にあたる新人6人が加わった。ほとんどが大学院の機械・物理の修了者である。新たな工作機械も導入され、次の時代を見据えた課題に挑戦している。

理学部装置開発室の特長は、研究現場でしかつくれない独創的な機器の開発である。当然、市販品もない。各研究室の研究開発と技術相談に応じるために、広範囲な基礎技術を結集した複合技術が不可欠である。

新しい「軸」の1つは、有限要素法 (FEM) の導入である。製品をいくつかの要素に分けて、機械的なふるまいをコンピューターで解析する。一方、製作された実機を万能試験機によって引張・圧縮試験した実測結果と比較し、信頼性の向上を図る。この課題は工学部装置開発系の職員と協同で行われている。

「3Dプリンター」によるモデルの試作もさかんに利用されており、デザインの検討や機能検証など、「ものづくり教育のツール」として生きている。また、新鋭の「5軸加工機」による複雑で高精度な加工の取り組みも始まっており、重量制限の厳しい衛星搭載機器や高精度のミラーの製作に利用されている。

全学技術センターの組織改革も進みつつあるが、理学部の装置開発室の伝統を発展させて「この組織がなくなると困る」といわれる存在でありつづけたい。



右が筆者、後ろに見えるのは万能試験機