



研究最前線「電子の流れから探る生命進化」より

研究最前線 ②

## 電子の流れから探る生命進化

研究最前線 ⑥

## 1000兆分の1秒の光パルスで 見えなかったものがみえてきた

記念史料室から ⑩

理化学研究所 創立百周年に向けて

## 理研における加速器の歴史

TOPICS ⑭

- ・「平成28年度一般公開」開催のお知らせ
- ・島尻内閣府特命担当大臣（科学技術政策）が和光地区を視察
- ・「第2回 Brainサイエンスカフェ」参加レポート

原酒 ⑯

有機化学とお酒と算数

環境資源科学研究センター生体機能触媒研究チームの中村龍平チームリーダー（TL）は、これまで知られている光エネルギーでも化学物質のエネルギーでもなく、電気エネルギーを使って有機物をつくり増殖する微生物がいることを突き止めた。中村TLは、「深海の熱水噴出孔周辺では、地球内部の化学エネルギーと熱エネルギーが、電気エネルギーに変換されます。

その電気エネルギーに支えられた第三の生態系である“電気合成生態系”が存在する可能性もあります」と言う。

また、植物の光合成の仕組みに学び、雨水や海水から次世代のクリーンエネルギーとして注目されている水素をつくることのできる人工マンガン触媒の研究にも取り組んでいる。一見無関係のように思える二つの研究を結び付けるキーワードは、電子の流れと生命進化だ。物理化学を基礎とした材料科学、生物学、地球科学、工学にわたる幅広い知見と、高度な計測技術に支えられた革新的な研究を紹介しよう。

# 電子の流れから探る生命進化

## ■ 熱水噴出孔は燃料電池

中村TLは2009年ごろのある日、論文雑誌を読んでいて1枚の写真に目をとめた。「深海底にある熱水噴出孔の写真でした。その構造を見たとき、地球をエネルギー源とした巨大な燃料電池ではないか、と思ったのです」と振り返る。

熱水噴出孔とは、海底の断層などが

ら染み込んだ海水が地球内部で熱せられ、数百度の熱水となって海底から噴き出している場所をいう。熱水は地球内部の岩石と反応し、銅や鉄、硫黄、水素などさまざまな成分が溶け込んでいる。噴出した熱水は海水で急激に冷やされ、析出した金属成分が柱状に堆積する。巨大なものは高さ50m以上にも達する。

一方、燃料電池とは、負極に電子を渡す燃料（負極剤）と正極から電子を受け取る燃料（正極剤）を供給することで、継続的に電力を取り出せる装置をいう。現在の燃料電池の多くは、負極剤に水素、正極剤に酸素が使われている。

「熱水噴出孔の内壁面は熱水で満たされ、熱水には電子を放出しやすい硫化



図1 生命進化と電子の流れ

**中村龍平** (なかむら・りゅうへい)

環境資源科学研究センター  
生体機能触媒研究チーム  
チームリーダー

1976年、北海道生まれ。博士（理学）。大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。米国ローレンス・バークレー国立研究所博士研究員、東京大学大学院工学系研究科助教などを経て、2013年より現職。



水素や酸素がたくさん含まれています。外壁面は海水に接し、海水には電子を受け取りやすい酸素や硝酸イオンが含まれています。そして、熱水と海水の間にある堆積物は電気を通す物質に富んでいます。堆積物に、硫化水素から電子を受け取り酸素に電子を渡す触媒の機能もあれば、熱水側から海水側へ電子が移動し、電気が流れます。これは、まさに天然の燃料電池です」(図1)

中村TLは、すぐに海洋研究開発機構(JAMSTEC)の山本正浩 研究員に連絡を取った。山本研究員は、深海の熱水による物質・エネルギー循環や熱水噴出孔周辺の生態系について研究している。「熱水噴出孔の堆積物は電気を流し、かつ触媒としての機能を持っているに違いない。この仮説を確かめるために、深海から採取してきた鉱物を解析させてほしいとお願いしました」

山本研究員はその仮説に興味を持ち、共同研究がスタート。JAMSTECが以前採取し保管していた熱水噴出孔の鉱物を入手できた(図1、表紙)。「電気化学的な解析をすると、予想以上に鉱物は電気を通しました。しかも、電子を受け渡す触媒の機能もあることが分かりました。熱水噴出孔における新たなエネルギー輸送メカニズムだと、山本さんと共に興奮しました」。その後、鉱物は、温度差によって電位差が生じて電気が流れる熱電変換の性質もあることが分かった。熱水噴出孔周辺では、地球内部の化学エネルギーと熱エネルギーが、電気エネルギーに変換されているのだ。

**■ 熱水—海水燃料電池の発電に成功**

熱水噴出孔は天然の燃料電池であるという発見は、思わぬ展開を見せた。「熱水噴出孔の堆積物を介さなくても、熱水側と海水側に電極を置いて電線で結べば、原理的には発電が可能はずです。そこで2012年、沖縄トラフの人工熱水噴出孔で発電実験を行いました。山本さんがプロジェクトリーダーとなり、その共同研究者として私も研究船に乗って実験に参加しました」

負極として熱水側にイリジウムを塗布したチタン網を、正極として海水側に白金を塗布したチタン網を配置し、電線でつないで間にLEDライトを入れて発電実験を行った(図2)。「水深1,000mでの実験のため、電極の設置や配線のトラブルが続きました。そして実験に使える時間が尽きる寸前に、赤色のライトが深海底にともったのです。無人探査機から送られてくる映像を見つめていた人たちから大きな拍手が起きました」

このシステムを、熱水と海水を燃料とすることから“熱水—海水燃料電池”と

呼んでいる。使用したLEDライトの消費電力は21mWと微小だが、電極の素材や大きさなどを工夫することで、この人工熱水噴出孔では2.6kW、一般家庭5~6軒分の電力を取り出せると試算されている。海底地震計など深海における長期の定点観測は重要だが、電源の確保が難しかった。熱水—海水燃料電池ならば、燃料は無尽蔵にある。負極に硫化鉍物が付着しても、それが燃料となり、また電極としても機能するため、長期間電力供給が可能だ。熱水—海水燃料電池は深海での研究や開発の進展に大きく貢献すると期待されている。

**■ 電気合成生態系が存在？**

「熱水—海水燃料電池は注目を集めています。しかし、私の興味は実は別なところにありました。熱水噴出孔で電気がつくられているのならば、その電気エネルギーを利用して生きる生物がいるのではないかと考えていたのです」

地球上の生物はすべて、太陽の光エネルギーを利用して有機物をつくる植物

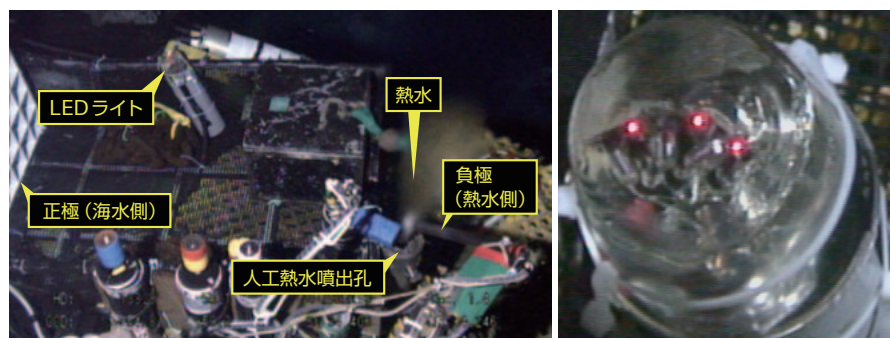


図2 人工熱水噴出孔における熱水—海水燃料電池の発電実験

左は熱水—海水燃料電池の全体写真。熱水側と海水側に電極を設置して電線でつなぎ、その間にLEDライトを入れてある。右は3個の赤色のLEDが点灯した様子。人工熱水噴出孔とは、海底下の熱水だまりから海底面までパイプを通し、パイプの先端から熱水が噴き出すようにしたもの。(提供：海洋研究開発機構)

を一次生産者とする光合成生態系に属していると、考えられていた。ところが1977年、地球内部から湧き出す海水に含まれる硫化水素などの化学物質のエネルギーを利用して有機物をつくる微生物が深海で発見され、研究者たちを驚かせた。その微生物を一次生産者とするのが化学合成生態系である。もし、電気エネルギーを利用して有機物をつくる微生物を一次生産者とする第三の生態系「電気合成生態系」が見つければ、生物学の常識を覆す発見となる。

中村TLらはまず、熱水噴出孔周辺から採取した微生物の中から電気エネルギーを利用している微生物を発見しようとした。しかし、深海の微生物のほとんどは地上で培養することができず、その性質を調べることは困難だ。そこで、考え方を変えた。「生物共通祖先は熱水噴出孔の周辺で生まれたという説が有力です。であれば、身近な微生物の中にも、電気エネルギーを利用しているものがあるかもしれません。そこで、*Acidithiobacillus ferrooxidans*という微生物

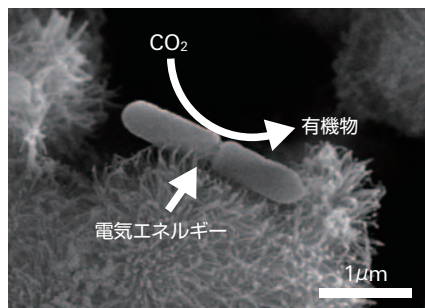


図3 *Acidithiobacillus ferrooxidans*の電子顕微鏡写真

鉄イオンをエネルギー源としている化学合成生物の一種。鉄イオンがなくても電気エネルギーを利用して二酸化炭素から有機物をつくり出し、増殖もする。

物に注目しました」(図3)

それは、鉄イオンを酸化したときに発生する化学エネルギーを利用して有機物をつくり出す化学合成生物の一種である。「銅鉱石の精製過程で使われるなど工業的にも有用な微生物で、ゲノムが解読されています。培養も比較的簡単で、性質を調べやすいと考えたのです。電気エネルギーを利用するには、細胞の外で電子を受け取り、それを細胞の中に運び込まなければならず、細胞膜の外側に電子の伝達を担うタンパク質が不可欠です。ゲノムと生化学研究から電子伝達タンパク質を持つことが分かっていたことも、この微生物を選んだ理由です」

化学エネルギー源となる鉄イオンが存在せず、電気が流れる環境で実験を行った。微生物を電極に付着させると、微弱な電流が流れた。時間が経過すると電流は増大した。「電流が流れるのは、微生物が電極から電子を取り込んでいる証拠です」と中村TL。電極から電子を取り込んだ微生物は、その電子を利用して二酸化炭素から有機物をつくり出していた。さらに、微生物は増殖することも確かめられた。電気エネルギーで生きる微生物を特定したのだ。

中村TLらの研究グループは、代謝経路も明らかにした。微生物はわずか0.3Vの小さな電位差を、外膜から内膜の間で1V以上にまで高めていることも分かった。熱水噴出孔でつくられる電気は微弱だが、この昇圧の機能があれば、その電気を利用して生きていくことができるだろう。「私たちは、小さな電流の変化を長期間にわたって計測することが

関連情報

- 2015年9月25日プレスリリース  
電気で生きる微生物を初めて特定
- 2014年6月30日プレスリリース  
中性の水から電子を取り出す「人工マンガン触媒」を開発

できます。ほかのグループにはない、非常に高度な技術を持っていることで、初めて得られた成果です」

■ 深海に電気で生きる微生物を探す

「次は熱水噴出孔に電気で生きる微生物がいるかどうかを調べたい」と中村TLは意気込む。2015年1月、JAMSTECの山本研究員らと共同で、熱水噴出孔から堆積物を通してどこまで電気が伝わっているかを調べた。3週間にわたる研究航海だった。「熱水噴出孔から数m以上離れた場所でも電気が伝わっていたことから、電気エネルギーを利用する微生物は広範囲に生息している可能性があります。人工熱水噴出孔で微生物の培養実験も始まっています。電気を流した場所と流さない場所で微生物の種類や数に違いがあれば、電気で生きる微生物の存在証明になるでしょう」

生命の起源をめぐる謎を解き明かそうと、多くの研究者が取り組んできたが、その答えははまだ得られていない。「地球最初の生命は水素のエネルギーを利用する化学合成生物だ」という説が有力です。私は、地球最初の生命は電気合成生物だった可能性もあると考えています。少なくとも、電気エネルギーを使って生命に必要な物質が合成されたりして、電気が生命誕生に大きく関わったのは間違いのないでしょう」

■ 植物に学ぶ人工マンガン触媒

地球上に生命が出現したのは約38億年前といわれている。「生命進化における大きなイベントの一つが、約27億年

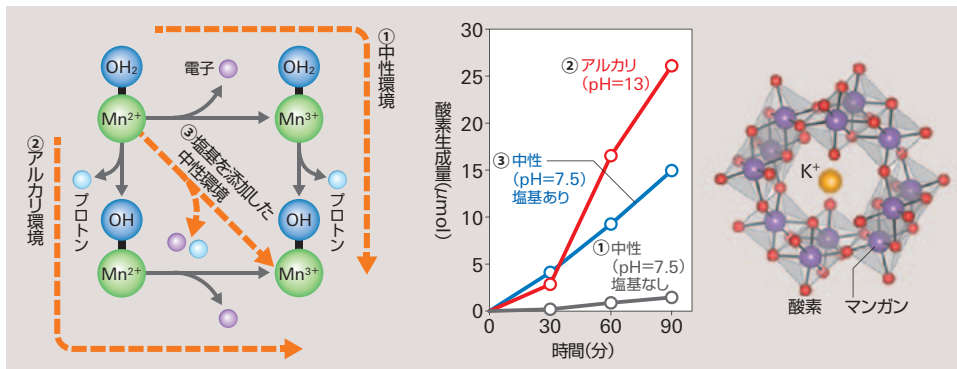


図4 人工マンガン触媒の水分解反応における電子とプロトンの輸送と酸素生産量

水分解過程において、生体マンガン酵素では電子とプロトンが同時に移動する。人工マンガン触媒の場合、中性環境では電子が先に移動し(①)、アルカリ環境ではプロトンが先に移動する(②)。プロトン受容力の大きな塩基を添加すると、中性環境でも電子とプロトンが同時に移動できるようになる(③)。プロトン受容力が高いγ-コリジンを添加すると、中性環境でも水分解により生成される酸素の量が増加したことから、水分解活性が増大したことが分かる。右は、人工マンガン触媒に用いている酸化マンガンの構造。

前の酸素を発生させる光合成生物の誕生です。私は、この酸素発生型光合成生物にも興味があります。熱水噴出孔に生きる生物とはまったく異なる方法で環境から電子を獲得し、生命活動を営んでいるからです」

植物など酸素発生型光合成生物は、光エネルギーを使って水を分解して電子を獲得し、その電子を用いて二酸化炭素から炭水化物をつくっているのだ(図1)。この光合成反応は近年、生物学だけでなく工学の研究者からも非常に注目されている。「水分解反応では、電子と一緒に酸素と水素イオン(プロトン)ができます。水素は燃料電池の燃料にもなるなど次世代のクリーンなエネルギー源として注目されています。そこで、この水分解反応を人工的に効率よく行って水素を製造しようという人工光合成の研究が盛んに進められているのです」

植物の水分解反応は、マンガンを含む酵素によって進む。そこで、生体マンガン酵素と構造が似ている酸化マンガンを使った人工マンガン触媒が開発されてきた(図4右)。しかし、「まだ植物のように水分解反応ができる段階にはない」と中村TL。植物は雨水など中性の水を分解できる。それに対して人工マンガン触媒は、強酸性や強アルカリ性の水では反応が進むが、中性の水では活性が大きく低下してしまうのだ。「中性の水でも効率的に反応させたい。そうすれば、雨水や海水からでも水素をつくれるようになります。そのためには、触媒の構造だけでなく、植物の水分解反応の仕組みをもっと学ぶ必要があります」

## 電子とプロトンの移動のタイミングが鍵

中村TLは、なぜ人工マンガン触媒が中性環境では活性が低くなるのかを探った。その結果、問題は電子とプロトンの移動のタイミングであることが分かった。生体マンガン酵素では、水が分解される時、電子とプロトンが同時に移動する。一方、人工マンガン触媒の場合、中性環境では電子が先に移動し、プロトンが遅れて移動する(図4左)。「電子はマイナス、プロトンはプラスの電荷を帯びています。別々に移動することで電気的なバランスが崩れてしまい、反応が進まないのです」と中村TLは解説する。「電子とプロトンの移動のタイミングを整えることができれば、中性環境でも反応がスムーズに進むはずだ」

生体マンガン酵素を詳しく調べてみると、その周りにアミノ酸がたくさんあり、それらがプロトンを受け取ることで電子とプロトンの同時移動を可能にしていることが分かった。ということは、プロトンを受け取る力が大きい塩基を添加すれば、人工マンガン触媒でも電子とプロトンが同時に移動するのではないか。中村TLは、そうひらめいた。

そこでプロトン受容力が大きい塩基を5種類選び、それぞれを中性の水に添加して人工マンガン触媒の活性を測定した。すると予測どおり、プロトン受容力が大きい塩基の方が、活性が高くなった。最もプロトン受容力が大きいγ-コリジンという塩基を添加すると、活性は15倍になり、水が分解されて発生する酸素の量は増加し、強アルカリ環境での

発生量の60%に達した(図4中)。「強アルカリ環境にするなど力づくで活性を上げていく方法では、いずれ限界に達します。自然の摂理に反しているからです。生物に学び活性を上げる新しい戦略を示したという点で、この成果は多くの人に注目していただいています」

しかし中村TLは、「まだまだ植物にはかなわない」と言う。植物は持続的に水分解反応を行うことができるが、人工マンガン触媒は次第に活性が落ちてしまう。「持続性や安定性の実現が今後の課題です。植物は作り出したエネルギーの一部を自分の修復に使っています。私は、その修復に注目しています」。中村TLは、光合成の始まりにも興味がある。「光合成は酸素をつくり出す強力な酸化作用なので、生物にとっては非常に危険な反応です。生物は自分がダメージを受けるというリスクを取ることで、無尽蔵な水の利用を可能にしたのです。その仕組みを生物がどのように作り上げてきたかを知りたいのです」

中村TLは、「生物に学び、その仕組みを人の支えになることに使いたい」と言う。「生物の光合成と電気合成の仕組みとその進化の過程を理解することは、現代社会にとって重要な技術である太陽電池や燃料電池などの開発にもつながると考えています。光の当たる生態系と光の当たらない生態系の両方を、しかも電子の流れという視点で研究している研究者は、ほとんどいません。その特性を活かして革新的な研究をしていきたいですね」

(取材・執筆：鈴木志乃/フォトンクリエイト)

100兆分の1~1000兆分の1秒というごく短時間の光パルスを駆使して、

化学反応の過程における分子の変化をみることができるといえる研究室は、

世界でも数少ない。その一つが、理研の田原分子分光研究室だ。

化学反応が起きるとき、分子中の原子がどのような順番で動き、分子が変化していくのかよく分かっていない。

その変化は極めて短い時間に起きるため、その過程をみることが難しいからだ。

田原分子分光研究室では、約7フェムト秒（1フェムト秒=1000兆分の1秒）の光パルスを駆使した分子分光により、

化学反応における分子の変化の過程をみることによって、化学反応が起きる仕組みを解明する実験を進めてきた（図1）。

さらにフェムト秒の光パルスを使って、化学反応の過程だけでなく液体界面の分子や生体分子の構造揺らぎなど、

これまでみることができなかったものを見る新しい手法を開発して、

分子が機能する原理を探究している。

## 1000兆分の1秒の光パルスで 見えなかったものがみえてきた

### ■ 液体界面の分子をみる

分子に光を当てると、ある特定の色（周波数）の光を吸収したり、散乱したり、蛍光を発したりする。その光を計測することで、分子の性質や状態を“みる”ことができる。それが分子分光という手法だ。

「フェムト秒の光パルスは、光の強度が強いため、物質に当たったときに奇妙な現象が起きます。それを利用して、私たちは液体界面の分子をみる新しい手法を開発しました」と田原太平 主任

研究員。

気体や固体と接する液体の界面では、さまざまな現象が起きる。しかし、液体界面の分子だけをみることは難しい。普通の方法では液体全体がみえてしまうからだ。

液体界面の1点に、異なる周波数 $f_1$ と $f_2$ のレーザー光を同時に照射する。すると $(f_1+f_2)$ の周波数を持つ“和周波光”が発生する。この和周波光は液体内部の分子では発生せず、界面の分子でのみ発生する。和周波光は微弱であるが、

周波数が界面分子の振動数と一致すると、共鳴して強度が増す。1980年代、この和周波光の強度を測定して界面分子の振動スペクトルを求め、それから分子の構造を調べる振動和周波発生分光法という手法が開発された。

「私たちは独自のアイデアでその手法を発展させました。和周波光の強度（振幅の2乗）ではなく、振幅と位相を測定する『ヘテロダイン検出振動和周波発生分光法』を開発して溶液中の分子のスペクトルと同等の界面分子の振動スペクトル

図1 田原分子分光研究室のフェムト秒レーザー装置

この装置により、フェムト秒で進行する化学反応中の分子の変化をみる実験を進めてきた。



撮影：STUDIO CAC

## 田原太平 (たはら・たへい)

田原分子分光研究室  
主任研究員

1961年、東京都生まれ。理学博士。東京大学大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了。東京大学理学部化学科 助手、神奈川科学技術アカデミー 研究員、分子科学研究所 助教授などを経て、2001年より現職。2013年より理研光量子工学研究領域 超高速分子計測研究チーム チームリーダーを兼務。



ルを測定できるようにしました。またこれによって界面の分子の向きをみる事が可能になりました」

光は波としての性質があり、山から谷へ、そして山へと周期的に振動している。山の高さあるいは谷の深さが振幅で、周期運動のどの位置にあるかを示すのが位相だ。

「界面で上向きになっている水分子から出てくる和周波光と、下向きの水分子から出てくる和周波光では、山と谷が逆になります。和周波光の位相まで検出することで、界面の分子の向きをみる事ができるのです」(図2)

### ■ 生体適合性ポリマーに 設計指針を与える

「私たちは、ヘテロダイン検出振動和周波発生分光法により、液体界面、特に一番重要な界面の水分子をみる実験を進めてきました。これまで見えなかったものがみえたことで、その実験結果は基礎科学の分野で論争を巻き起こしています。私が予想外だったのは、医療用の生体適合性ポリマーを開発している研究者たちからも注目されたことです」

人工血管や人工心臓などの材料には、表面に赤血球が付着して目詰まりを起こすことがないことが求められる。

「血液の成分の約90%は水です。赤血球の付着のしやすさは、材料表面の水分子の向きや結合状態などと関係していると考えられているそうです。しかし、今までそれをみることはできませんでした。ヘテロダイン検出振動和周波発生分光法を用いれば、材料の組成によって、

水分子の向きや材料との結合状態がどのように変わり、赤血球の付着のしやすさにどれくらい違いが出るかを調べることができるようになります。さまざまな材料で試行錯誤するのではなく、赤血球が付着する原理を理解した上で、材料の設計ができるかと期待されているのです」

田原分子分光研究室が開発したヘテロダイン検出振動和周波発生分光法を発表したのは2009年だが、最近では世界中でその手法を取り入れた実験が始められている。

### ■ 光でスタートしない 生体分子の構造揺らぎをみる

田原分子分光研究室は2013年、これまで見えなかったものをみる、もう一つの手法「二次元蛍光寿命相関分光法(2D-FLCS)」を発表した。

タンパク質やDNA、RNAなどの生体分子では、それぞれが自発的に絶え

ず構造を変える“構造揺らぎ”が起きている。

生体分子がほかの分子と相互作用して機能を発揮する原理を理解するには、構造揺らぎをみる事が重要だと考えられている。しかし、マイクロ(100万分の1)秒レベルで起きる構造揺らぎをみることは、これまで不可能だった。

目の網膜において光を受け取ってその信号を神経に伝えるロドプシンのようなタンパク質ならば、たくさんのロドプシンを含む試料に可視光(ポンプ光)を当てて反応を一斉にスタートさせ、その後構造がどう変化するかを、フェムト秒の光パルス(プローブ光)を当てることで、フェムト秒の時間分解能でみる事ができる。そのような手法をポンプ-プローブ分光法という。

「光で構造変化がスタートするロドプシンなどと異なり、構造揺らぎは光でスタートするわけではないので、ポンプ-

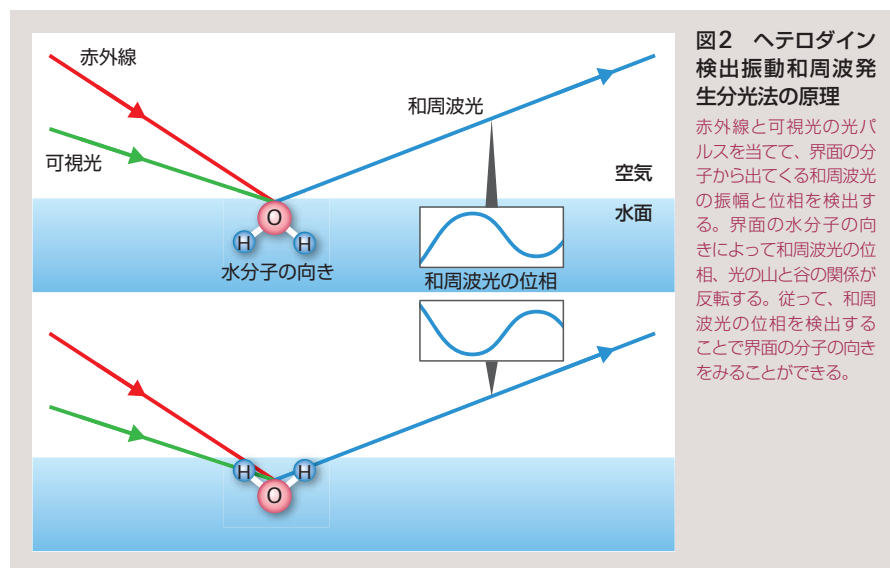


図2 ヘテロダイン検出振動和周波発生分光法の原理  
赤外線と可視光の光パルスを当てて、界面の分子から出てくる和周波光の振幅と位相を検出する。界面の水分子の向きによって和周波光の位相、光の山と谷の関係が反転する。従って、和周波光の位相を検出することで界面の分子の向きをみる事ができる。

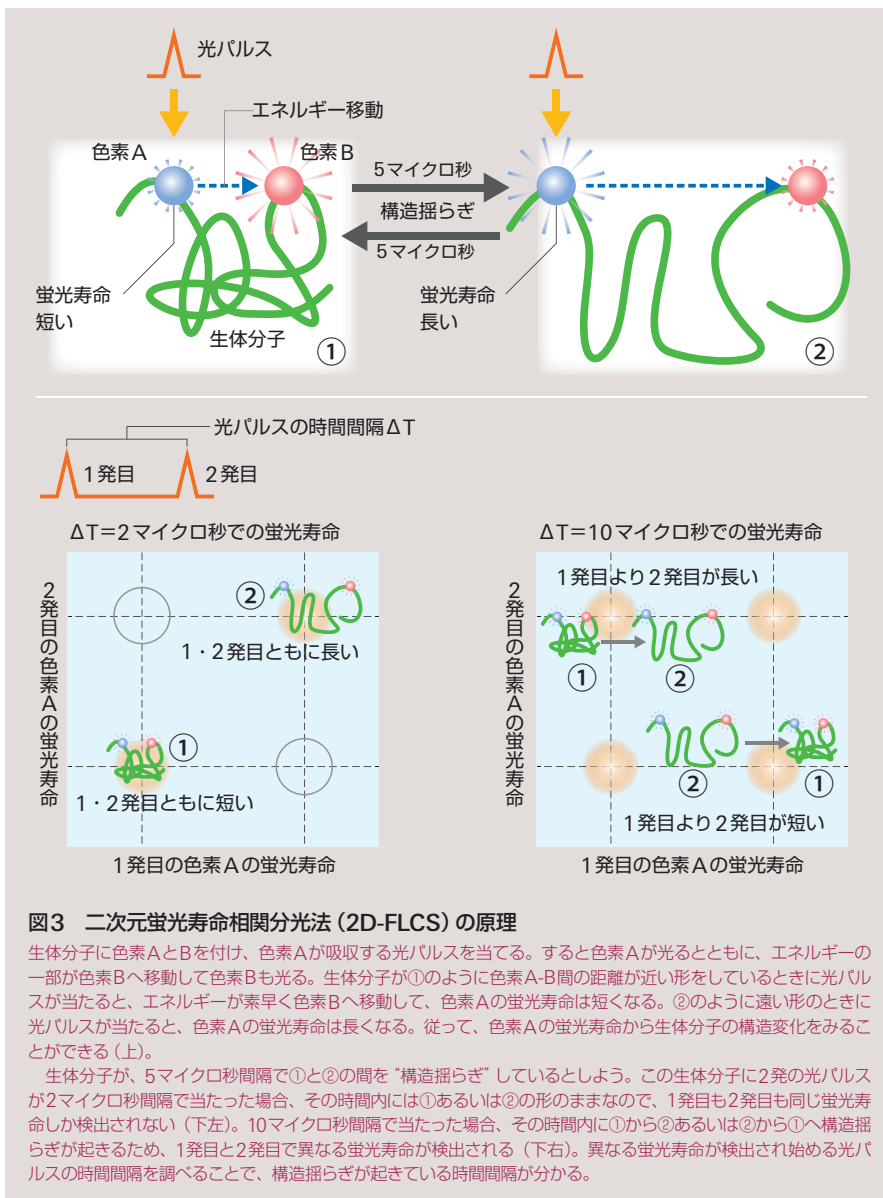


図3 二次元蛍光寿命相関分光法 (2D-FLCS) の原理

生体分子に色素AとBを付け、色素Aが吸収する光パルスを与える。すると色素Aが光るとともに、エネルギーの一部が色素Bへ移動して色素Bも光る。生体分子が①のように色素A-B間の距離が近い形をしているときに光パルスが当たると、エネルギーが素早く色素Bへ移動して、色素Aの蛍光寿命は短くなる。②のように遠い形のとときに光パルスが当たると、色素Aの蛍光寿命は長くなる。従って、色素Aの蛍光寿命から生体分子の構造変化をみることができる(上)。

生体分子が、5マイクロ秒間隔で①と②の間を“構造揺らぎ”しているとしよう。この生体分子に2発の光パルスが2マイクロ秒間隔で当たった場合、その時間内には①あるいは②のままなので、1発目も2発目も同じ蛍光寿命しか検出されない(下左)。10マイクロ秒間隔で当たった場合、その時間内に①から②あるいは②から①へ構造揺らぎが起きるため、1発目と2発目で異なる蛍光寿命が検出される(下右)。異なる蛍光寿命が検出される光パルスの時間間隔を調べることで、構造揺らぎが起きている時間間隔が分かる。

プローブ分光法で調べることはできません。構造揺らぎをみるには、1個の分子だけを調べる単一分子分光を行う必要があります」

分子の特定の2ヶ所に色素を付けて、その距離の変化をみるFRET(蛍光共鳴エネルギー移動)という手法がある(図3上)。光を当てると、色素A(ドナー)が光るとともに、エネルギーの一部がもう一方の色素B(アクセプター)に移動して光る。色素A-B間の距離が近いほどエネルギーがたくさん移動して色素Bが明るく光る。色素AとBの光の強度の比からA-B間の距離の変化を導き出して、タンパク質の構造変化を知ることができる。

1990年代から、そのFRETを用いた

単一分子分光の実験が行われるようになった。例えば、1個の分子だけを見るためにとても薄い溶液をつくり、溶液の1ヶ所に光を当てると、分子中の色素AとBが光る。その光を検出することで単一分子の構造変化をみることができる。

ただし、光を当てた領域に1個の分子が漂ってくるのを待つ必要があるため実験効率は低く、色素からの光が弱いので、ミリ(1,000分の1)秒を切るくらいの時間分解能しかなかった。

「私たちは、たくさんの分子の光から1個の分子の情報だけを導き出す相関分光という手法と、色素Aが蛍光を発している時間(蛍光寿命)を測定する手法を

組み合わせた2D-FLCSを開発しました。2D-FLCSであれば、溶液を約1,000倍に濃くすることができ実験効率は格段に向上します。これによって数マイクロ秒以下の時間分解能で分子の構造変化を調べることができるようになりました」

色素A-B間の距離が近いほど、AからBへ素早くエネルギー移動が起きるため、色素Aが光る時間、蛍光寿命は短くなる。従って、色素Aの蛍光寿命を計測することでも、色素A-B間の距離を導き出して、分子の構造変化を知ることができる(図3上)。

「生体分子にある時間間隔で2発の光パルスを当て、それぞれについて色素Aの蛍光寿命を計測します。この計測を繰り返し、蛍光寿命の変化をマッピングします(図3下)。光パルスの時間間隔が異なるマップを比較することで、生体分子の構造変化が、どれくらいの間隔で起きているのかを知ることができます」

例えば、ある生体分子が5マイクロ秒の間隔で構造が変化するとしよう。そこに2マイクロ秒の間隔で2発の光パルスが当たった場合のデータでは、構造変化は起きていないので同じ蛍光寿命しか検出されない(図3下左)。しかし、10マイクロ秒間隔で光パルスが当たったデータには、1発目と2発目で異なる蛍光寿命が検出される(図3下右)。異なる蛍光寿命が検出され始める光パルスの時間間隔を調べることで、構造揺らぎが起きている時間間隔が分かる。「実際に私たちは、2D-FLCSにより、約5マイクロ秒の間隔で起きるタンパク質の構造揺らぎをみることに成功しました」



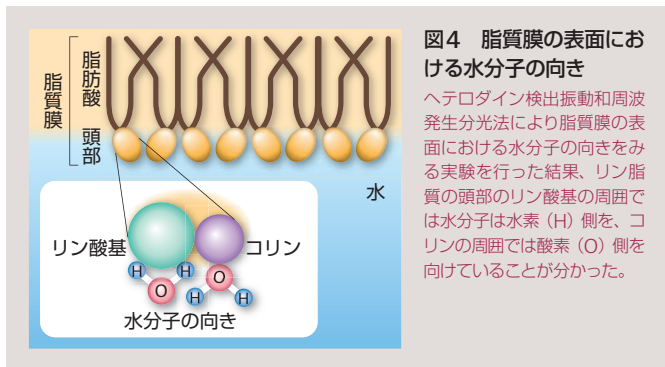


図4 脂質膜の表面における水分子の向き

ヘテロダイナミクス検出振動和周波発生分光法により脂質膜の表面における水分子の向きをみる実験を行った結果、リン脂質の頭部のリン酸基の周囲では水分子は水素 (H) 側を、コリンの周囲では酸素 (O) 側を向けていることが分かった。

## ■ 実験とシミュレーションをつなぐ

分子をつくる原子同士に働く力を計算する分子動力学という手法により、生体分子の構造揺らぎを、コンピュータシミュレーションで再現する研究が進められてきた。ただし、タンパク質などの生体分子はたくさんの原子から成り、その間に働く力をすべて計算して構造揺らぎを再現するには膨大な計算量が必要となる。このため現在、このようなシミュレーションではほとんどの場合、マイクロ秒の間で起こる構造揺らぎが計算されている。

「これまで、FRETにより単一分子の構造変化をみる実験の時間分解能はミリ秒を切るくらいだったので、実験とシミュレーションの間には、大きな隔たりがあったのです。2D-FLCSにより、その隔たりが埋まり、実験とシミュレーションの結果を直接比較して、生体分子の構造揺らぎを理解できるようになりました」

タンパク質は、アミノ酸の鎖が折り畳まれて特定の立体構造となる。しかし、アミノ酸の鎖がどのように折り畳まれて正しい立体構造になるのか、よく分かっていない。折り畳みの最も速い構造変化は数マイクロ秒で起きると考えられている。数マイクロ秒の時間分解能を持つ2D-FLCSは、タンパク質が正しく折り畳まれる謎を解明する強力な手段となるだろう。

折り畳まれたタンパク質は構造が揺らぎながら、ほかの生体分子と結合して、機能を発揮する。病気の原因となるタンパク質に結合して機能を阻害する分子が薬となる。構造揺らぎをみる

ことができる2D-FLCSは、創薬にも貢献できるはずだ。

## ■ 「分子システム研究」と「脂質の統合的理解」

理研では、2012～16年度の5年間のプロジェクトとして新領域開拓課題「分子システム研究」が進められており、田原主任研究員が代表を務めている。

「生体分子など、原子・分子がたくさん集まった複雑な分子は、個々の原子・分子では実現不可能な高い機能を発揮します。そのような複雑系の機能原理を解明することを目指しています。そのために、実験やシミュレーション、物質合成の技術を持つ研究者が集まり、学際的な研究を進めています。生体分子の構造揺らぎをみることができる2D-FLCSの開発も、このプロジェクトの成果の一つです。また、生体分子のシミュレーションをスーパーコンピュータ『京』などを駆使して行っている理研の杉田理論分子科学研究室との共同研究も、このプロジェクトの中で進めています」

さらに理研では、新領域開拓課題「脂質の統合的理解」（代表：小林俊秀 主任研究員）という新しい学際プロジェクトが、2014年度から進められており、田原主任研究員たちも参加している。

脂質は細胞膜などの生体膜（脂質二重膜）の主成分であり、心臓病や糖尿病、アルツハイマー病、統合失調症や自閉症などの発症に、脂質が関係していると考えられている。「脂質の統合的理解」では、脂質の機能をさまざまな手法により理解することにより、脂質に関わる病

## 関連情報

- 2015年7月7日プレスリリース  
タンパク質の非常に速い構造変化を計測する新手法を開発
- 2014年4月17日プレスリリース  
19世紀以来の謎、ホフマイスター効果の新しいメカニズムを提案
- 分子システム研究  
<http://www.riken.jp/lab-www/spectroscopy/MolecularSystem/>
- 脂質の統合的理解  
<http://lipidology.riken.jp>

気予防や治療法の開発に貢献しようとしている。

田原主任研究員たちは、ヘテロダイナミクス検出振動和周波発生分光法により、脂質膜の表面における水分子の向きをみることに成功した（図4）。そのような実験により、物質や情報をやりとりする生体膜の機能原理の理解が進むと期待されている。

## ■ 複雑な分子の遷移状態をみたい

「新手法を開発する際、何がみえていないか、何が分かっていないかを考えることが大事です」。そう語る田原主任研究員は、これからどのような新手法を開発しようとしているのか。

「たくさんの原子から成る分子が構造を変えながら機能を発揮するとき、その変化の最中をみることはできません。変化の途中で一休みしているような中間状態はみえるようになってきましたが、変化の最中、遷移状態をぜひみたいと思います。これは比較的単純な分子からタンパク質のような大きい分子までの反応を理解するために重要な共通の挑戦的問題なのです」

中間状態から別の中間状態に遷移するとき、分子の変化の多様性、自由度は大きい。「いったん不安定な状態に“寄り道”するケースもありそうです。そのような複数の経路を持つ遷移状態を理解するには、新しい概念が必要です。研究室の中で今、新しい概念と手法をつくるための議論を進めているところです」

（取材・執筆：立山 晃／フotonクリエイト）

## 理研における加速器の歴史

原子核や素粒子の研究にとって、加速器はなくてはならない必需品です。理研の森田浩介らは2004年、RILACという加速器を使って113番元素を発見し、2015年、日本初の新元素命名権を獲得しました。2012年のヒッグス粒子の発見でも、欧州合同原子核研究機関（CERN）のLHCという加速器が使われています。これらはほんの一例です。理研は加速器が米国で発明されて間もない時期から今日に至るまで、一貫して加速器を使った研究を推進しており、現在、仁科加速器研究センターで7基、放射光科学総合研究センターで3基が稼働しています。理研における加速器の歴史をひもとき、加速器がどういうものでどんな目的で使われてきたのかについて紹介します。

### 加速器とは？

私たちの身の回りの物質は何でできているのでしょうか？ 19世紀末まで、究極の小さいものとは原子でした。1911年、ラザフォードは、キュリー夫妻が精製した放射性ポロニウムが発する $\alpha$ 粒子（ヘリウム原子核）を金箔に照射することで、原子の中心に原子核を発見しました。さらに1919年に、この $\alpha$ 粒子を窒素原子核に衝突させると、原子核が破壊されることも発見します。電子や陽子、原子からいくつかの電子を奪った陽イオンなど、電気を持った粒子のことを荷電粒子といいます。ラザフォードは、原子核の構造や性質を詳しく調べるためには、この荷電

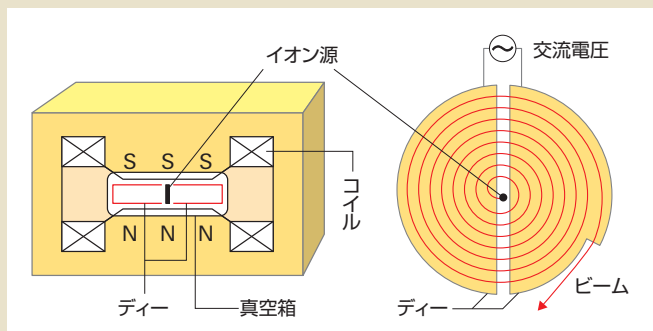


図1 サイクロトロンの基本的仕組み

大きな電磁石で面に垂直に一律な磁場をかけ、半円形の電極（データー）を二つ、隙間（ギャップ）を開けて並べる。中央のイオン源からイオンを放出すると、ローレンツ力が働き円運動をする。イオンがギャップに達したら電圧をかけ加速する。するとイオンの軌道半径は大きくなり、半周して再びギャップに到達する。このとき逆向きの電圧をかけてさらに加速する。このように交流電圧でギャップを通るたびに加速すると、イオンはらせん軌道を描く。このときイオンの回転周期はその運動エネルギーによらず一定になるため（等時性）、その回転周期に同期した交流電圧をかければ、連続したイオンビームが得られる。

ただし、イオンは互いに反発し合うのでビームは広がる性質がある。初期のサイクロトロンでは、磁石の外側にいくほど磁力線を若干湾曲させることで、広がったイオンを中心に押し戻し、ビームの集束性を維持していた。しかし、イオンを光速近く加速すると相対論的効果によって質量が増加し、等時性が成り立たなくなる。そこで、AVF型サイクロトロン（磁石面形状をらせん状の凹凸にしたもの）やリングサイクロトロン（複数の磁石をリング状に並べたもの）など、集束性の強いタイプが開発され、理研でも使われている。

粒子を人工的に加速し、別の原子核に衝突させる装置、「加速器」が必要だと主張しました。

加速器にはいろいろなタイプがあります。新たな素粒子を発見したい場合は、二つの粒子が衝突したときに発生するエネルギーの大きさが重要になるため、光速近くまで加速した粒子同士を正面衝突させる「衝突型加速器（コライダー）」がよく使われます。一方、原子核の構造や性質を詳細に調べたい場合には、粒子同士の衝突頻度が重要になります。そのため、荷電粒子の流れ（ビーム）の強度・安定性・連続性に優れる「サイクロトロン」というタイプがよく使われます（図1）。サイクロトロンは、1932年にローレンスによって発明された加速器です。

### 日本における加速器研究の始まり

日本の加速器研究は、仁科芳雄から始まります。欧州に留学しラザフォードとボーアの下でX線分光学と量子力学を学んだ仁科は、帰国後、湯川秀樹や朝永振一郎らに大きな影響を与え、1931年から理研で原子核の研究を進めます。

ローレンスのサイクロトロンが主流になると考えた仁科は、1937年に「小サイクロトロン」を駒込に建設しました（写真1）。あだ名は「お嬢さん」。なかなか制御が難しかったようですが、世界最高強度の重陽子（陽子1個と中性子1個から成る原子核）ビームの加速に成功し、トレーサー<sup>\*1</sup>や放射線生物学の研究を始めます。1939年には、中性子でウランが二つに割れる対称核分裂という現象も発見しています。

続けて、直径をおよそ2倍にした「大サイクロトロン」を1938年に建設しますが（写真2）、高周波電圧と真空の技術に問題がありビームが出ません。太平洋戦争（1941～45年）の開戦前年でしたが、仁科は3人の研究者を米国のローレンスの下に派遣して教えを請い、彼らが持ち帰った情報をもとに改良を加えます。ビームの取り出しに成功したのは、敗戦前年の1944年でした。

しかし戦後、これら二つのサイクロトロンは原爆製造に関係する装置と見なされ、GHQによって破壊され東京湾に投棄されてしまいます（写真3）。一説では、事情をあまり知らないワシントンの人物がGHQに廃棄命令を出したとされています。GHQの物理学者がたまたま留守だったという不運も重なったようです。新聞報道を見た米国の科学者たちは暴挙だと軍を批判し、後に軍は「陸軍省の軽率な行動を遺憾とする」と声明を出します。しかし、時すでに遅し。手足をもがれた日本の加速器科学は、文字どおり壊滅状態に陥ったのです。

### 再出発

1951年（仁科が亡くなった4ヶ月後）、再びローレンスが登場

写真1 小サイクロトロン

奥の電磁石の間に、手前のディーを入れて加速する。電磁石の直径は約67.5cm。

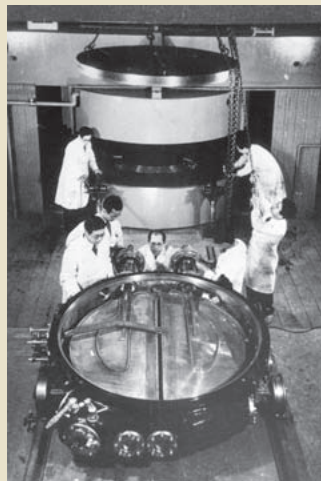
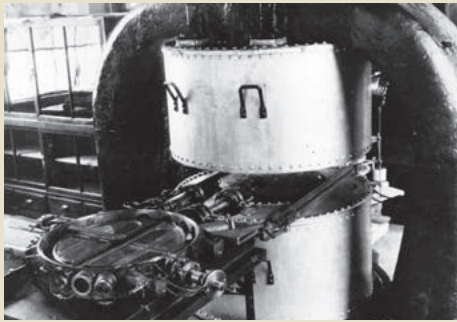


写真2 大サイクロトロン  
電磁石の直径は約150cm。  
中央が仁科芳雄。



写真3 東京湾に廃棄されるサイクロトロン



写真4 160cmサイクロトロン  
中央背広姿が熊谷寛夫。

新しい素粒子を探求する研究が主流でしたが、熊谷は重イオン（原子番号2のヘリウムより重い元素のイオン）に着目しました。重イオンはたくさんの核子（陽子と中性子）の集合体です。重イオンがクーロン反発力に打ち勝って標的原子核と衝突し重なると、核子同士の相互作用が働き、さまざまな核反応が起こります。核子が受け渡されたり、融合して別の原子核が生まれたりするのです。

熊谷は、炭素・窒素・酸素などさまざまな重イオンを加速できる工夫を160cmサイクロトロンに施し、重イオン科学を目指しました。また、利用者を理研内部に限定せず、物性・化学・生物・医療など原子核物理以外の分野にも開放する方針を取りました。これは「加速器は常に広く学際的に利用すべし」という仁科以来の基本姿勢でした。

1971年の大型コンピュータの導入も相まって、重イオン科学は1970年代後半に一気に開花し、世界的に大きな評価を得ます。多種多様な重イオンを扱える160cmサイクロトロンは、国内のどの加速器よりもよく稼働し、1990年に停止するまで理研再興のシンボルとなりました。

ただし、どんな加速器も能力に限界があります。160cmサイクロトロンは、原子番号10のネオンまでしか加速できませんでした。1969年ごろから松田一久が次期加速器建設計画を検討しますが、不慮の事故で松田が急死したため、上坪宏道が引き継ぐことになります。

します。ローレンスは仁科研究室を訪問し「サイクロトロンを再建せよ」と迫ります。埃をかぶっていた電磁石を見つけ、「これを使え」と。資金の見通しもなくGHQの意向も気になる仁科研の面々は半信半疑でしたが、ローレンスは日本滞在中にGHQなど各方面の了解を取り付けていったそうです。

1952年、小サイクロトロンの復刻版である「3号サイクロトロン」が建設されました。性能が劣るため最先端の原子核研究には不向きでしたが、医療用のRI（放射性同位元素）の製造などに使われました。昨今、多くの病院で小型サイクロトロンが導入されPET<sup>※2</sup>診断が行われています。3号サイクロトロンは核医学の先駆けとなったのです。

### 160cmサイクロトロンで重イオン科学を目指す

理研本部が和光に移転されるのを機に、1961年ごろから熊谷寛夫らが新サイクロトロンの検討を始めました。AVF型という最新タイプも候補に挙がりますが、当時の理研には加速器開発の経験者が少なく、コンピュータ性能も低かったため、確実に建設できる大サイクロトロンの復刻版を選択します。そして1966年、「160cmサイクロトロン」を完成させました（写真4）。

当時、電子や陽子のような小さな荷電粒子のビームを使って

※1 トレーサー：体内の調べたい分子の位置や動きを追跡（トレース）するために、その分子に微量の放射線を出すRIを付けた薬剤。PET診断では陽電子を放出するRI（<sup>11</sup>C、<sup>13</sup>N、<sup>15</sup>O、<sup>18</sup>Fなど）が使われ、サイクロトロンで製造する。

※2 PET：陽電子放射断層撮影法。投与したトレーサーから放出される陽電子は、周囲の電子と結合して消滅する際に、透過力の強いガンマ線を放出する。それを捉えて断層画像を作成し、体内の調べたい分子の位置や動きを追跡する診断法。がん診断や脳機能の検査に使われる。

## ウランまでの重イオン加速が可能に

上坪は1972年、2段階加速方式の次期加速器建設計画を提案します。前段は、原子番号20のカルシウムあたりまでの軽い元素のイオン加速に適した「AVFサイクロトロン」と、それより重い元素のイオン加速に適した線形加速器「RILAC」(写真5左)の二つ。これらで加速したイオンを炭素薄膜に通し、原子核の周りの電子を剥ぎ取り電荷を高めた後、後段の「リングサイクロトロン (RRC)」(写真5右)で約4倍(軽い元素であれば光速の50%くらいまで)加速するというものでした。2段階式にした理由は、大きな加速器1基で加速するより全体のコストパフォーマンスが良くなるからです。

1981年にRILAC、1986年にRRC、1989年にAVFが完成。これにより、陽子(原子番号1の水素の原子核)から原子番号92のウランまでのさまざまなイオンの加速が可能となりました。強く安定した重イオンビームが連続して得られるだけでなく、実験目的に応じてビームエネルギーも調整できる、世界的にも稀有な加速器でした。

## 安定核から不安定核へ

各国の加速器でデータが蓄積されていくとともに、原子核の理論モデルが提唱されていきます。特定の陽子数または中性子数で原子核が安定する「魔法数」、原子核の中で核子が特定の軌道上で運動しているという「殻模型」、核子が強く相互作用して液体の粒のように振る舞うという「液滴模型」や「集団模型」などです。一時は、原子核の基本的構造はほぼ明らかになったと思われましたが、1980年代後半、その考えが揺らぎ始めます。



写真5 重イオン線形加速器RILACとリングサイクロトロンRRC

RILAC(左)は、高周波電場を用いて、イオンを直線的に加速するタイプの加速器。たくさんのチューブ形の電極が直線状に並べられており、イオンが電極間を通過するたびにイオンを加速する。さまざまなイオンに対応するため電場の周波数を変えることができ、重イオンも含め強いビームを連続運転できる。原子番号113番(質量数278)の新元素は、このRILACを使って2004年に合成された。

RRC(右)は、ビームの集束性を強くするため四つの扇形の磁石を配置して、イオンを磁場のある領域とない領域を交互に4回通過させるようにしたリングサイクロトロン。軌道は円形ではなく、角の丸まった四角形になる。

原子核は、陽子と中性子の数の組み合わせで理論的には約1万種存在すると考えられています。そのうちの約270種は“安定核”と呼ばれ、陽子と中性子がほぼ同数で、寿命が長く天然に存在します。一方、安定核以外の原子核は中性子と陽子のどちらかが多い“不安定核”(RI:放射性同位元素)で、寿命が短く電子(陽電子)を出してすぐに質量数が同じで原子番号が一つ大きい(小さい)原子核に変わってしまいます。

天然に存在しないRIを多量に生成することは難しく、生成できても寿命が短いため測定も難しい。そのため、RIの性質はほとんど分かっていませんでした。しかし1979年、入射核破砕反応が発見されます。高エネルギーの重イオンビーム(入射核)を標的核に当てると、入射核が破壊されてさまざまなRIがビームになるほど大量に生成され、それらが入射核と同じ方向にほぼ同じ速度で飛び出てくるという現象です。強度が大きいので、RIの性質を測定しやすくなります。1984年、谷畑勇夫らは、破砕片の中のRIを分離しビームとして利用する「RIビーム法」を開発しました。石原正泰らは1989年、RRCの後段に「入射核破砕片分離収集装置 (RIPS)」というRIビーム発生装置を設

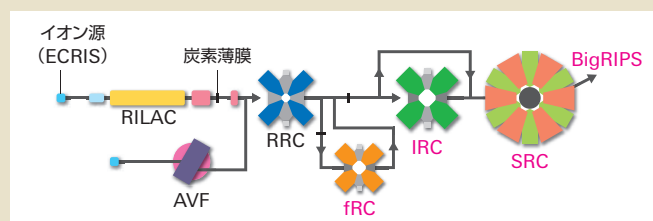


図2 和光地区のRIBFの加速器構成

すでに稼働しているRRCの後段に、fRC、IRC、SRCの3基のリングサイクロトロンを新設した。2006年、イオン源(ECRIS)でアルミニウムの6価のイオンを生成、RILACで加速した後、炭素薄膜を通過させて10価のイオンに変換。それをRRC、IRC、SRCで順次加速してビームとすることに成功した(アルミニウムが比較的軽いいためfRCは未使用)。翌年、SRCの後段にBigRIPSを設置し、約4,000種のRIビームの生成が可能になった。

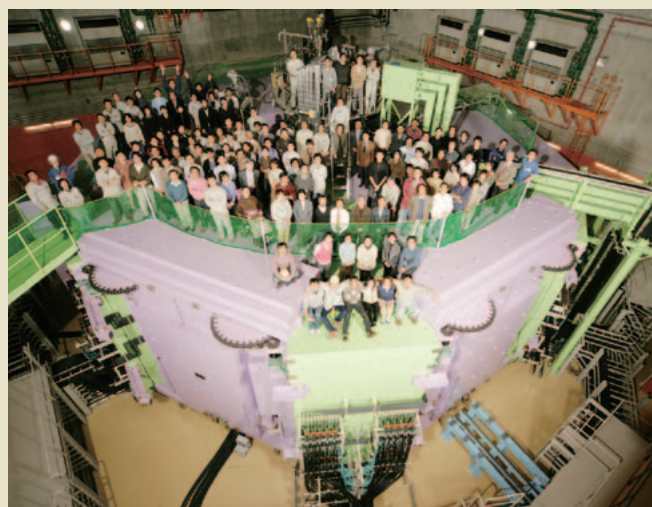


写真6 超伝導リングサイクロトロンSRC

RIBFの最終加速を担うSRC。六つの扇形の超伝導磁石で構成される超伝導リングサイクロトロンで、史上最強のビーム強度を誇る。

置し、世界に先駆けRIの性質解明に取り組みます。

これをきっかけに、安定核で築いた理論モデルでは説明できない現象（中性子スキン<sup>※3</sup>、中性子ハロー<sup>※3</sup>、魔法数の消失や出現など）が次々に発見されていったのです。

### 不安定核を大量生産する

入射核破碎反応で重イオンからRIビームを生成するためには、重イオンを光速の数十%まで加速し、ビーム強度も極めて高くしなければなりません。しかし、RRCで光速の40%くらいまで加速できる重イオンは原子番号26の鉄くらいまでで、それより重い、例えば原子番号92のウランだと15%くらいまでしか加速できませんでした。

そこで矢野安重らは光速の70%まで加速することを目指し、RRCの後段に「周波数固定型リングサイクロトロン (fRC)」、 「中間段リングサイクロトロン (IRC)」、 「超伝導リングサイクロトロン (SRC)」(写真6)を増設するRIビームファクトリー(RIBF)を計画しました(図2)。ウランまでの全元素にわたって十分なエネルギーと強度を持つ重イオンを五つの加速器で段階的に加速し、最後にRIビームを生成するのです。1995年から建設が始まり、2006年までに三つの加速器が、翌2007年にはRIPSの改良版である「超伝導RIビーム分離生成装置 (BigRIPS)」が完成しました。

RIBFでは現在、理研だけでなく国内外の研究者が最先端の観測機器を持ち込み、形、大きさ、質量、寿命といった不安定核の性質を詳しく調べる研究が精力的に行われています。これら測定データをもとにいずれは、安定核だけでなく不安定核も説明できる原子核モデルが構築されることでしょう。

また、天文学ではウランがどのように誕生したかが謎とされています。超新星爆発や中性子星合体などの天体現象によって、原子核が中性子を次々に吸収してさまざまな不安定核が瞬時に生成され、それらが崩壊して鉄より重い安定核に変わり最後にウランができたという説(rプロセス)が有力視されており、その検証がRIBFで進んでいます。

### 放射光で新たな歴史を生む

1990年代に入ると、上述した基礎研究だけでなく、さまざまな分野で重イオンやRIを利用する応用研究が加速します。生体や物質中のさまざまな種類の元素の動きをRIを用いて同時追跡するマルチトレーサー法、重イオンビームを照射してがん細胞を狙い撃ちするがん治療法<sup>※4</sup>、重イオンビームで突然変異を誘発し植物の品種改良をする技術などです。さらには放射光を利用する新たな研究も始まりました。

今回紹介した加速器は主に和光地区に関連するものでした



写真7 播磨地区の大型放射光施設SPring-8とX線自由電子レーザー施設SACLA

SPring-8では、円形加速器を用いて電子を光速近くで周回させ、軌道の接線方向に放射光という高輝度のX線を発生させている。X線の波長はおよそ0.1nm (1nm=10億分の1m)で、原子の直径とほぼ同じサイズ。このX線を試料に当てて、試料から出た散乱光・回折光を解析すると分子・原子レベルの構造が分かる。結晶化したタンパク質の立体構造解析や新材料開発など幅広い分野で利用されている。

SACLAでは、線形加速器から得られた電子ビームを、アンジュレーターという装置に通すことでX線自由電子レーザー (XFEL) を発生させている。SACLAが出すX線は、輝度がSPring-8の10億倍で、位相がそろい、発光時間が10フェムト秒 (1フェムト秒=1000兆分の1秒) 以下と極めて短いパルスである。強度が非常に大きいため1パルスを当てただけで試料は破壊されるが、1パルスで破壊前の構造が分かる。そのため、結晶化が難しい膜タンパク質の構造解析や、分子・原子の瞬間的動きの観察などが期待されている。

が、播磨地区にも大型放射光施設「SPring-8」とX線自由電子レーザー施設「SACLA」があります(写真7)。光速近くまで加速した荷電粒子(イオンや電子)が磁場によって軌道を曲げられると、進行方向に指向性が強く明るい光、“放射光”を発生します。サイクロトロンでは放射光の発生は荷電粒子を減速させるマイナス要因となりますが、分子・原子レベルの構造や機能を調べる際には放射光は強力なツールとなります。1970年代中ごろに上坪らによって大型放射光施設計画が立案され、1986年に開発研究がスタート、1997年からSPring-8、2012年からSACLAの供用が開始されています。播磨でも日々、新たな加速器の歴史がつくられているのです。

謝辞 専門家の立場からご校閲いただいた仁科加速器研究センターの矢野安重 特別顧問にお礼申し上げます。

(執筆: 大石善雄 / 広報室)

※3 中性子スキンと中性子ハロー: 安定核では、陽子と中性子が原子核の内部でおおむね同一空間に分布している。しかし不安定核になると、陽子が中心部分に偏って分布し、中性子は外側の方に広がって分布している。中性子スキンでは、中性子が外側に薄い皮膜状に分布し、中性子ハローでは、中性子スキンより広い範囲にわたって霧のように拡散して分布する。

※4 重イオンビームを用いたがん治療法: 生体に照射した重イオンビームは、一定の深さで線量が高くなる性質があり、がん病巣だけを狙い撃ちできる。放射線医学総合研究所は、理研との基礎研究で得られた知見をもとに1994年、医療用の専用加速器を持つ世界初の重粒子線がん治療装置「HIMAC (ハイマック)」を開発、先進医療として運用されている。

## 「平成28年度一般公開」開催のお知らせ

文部科学省が定める科学技術週間「2016年4月18日(月)～24日(日)“きみの目は 未来をのぞく むしめがね”」の行事として、下記のとおり一般公開を開催します。

日本における唯一の自然科学の総合研究所として1917年に設立された理化学研究所は、2017年3月には創立百周年を迎えます。設立以来、物理学、化学、生物学、工学、医科学などの幅

広い分野で、基礎から応用に至るさまざまな研究を実施しています。

一般公開ではこれらの研究成果や、最先端の科学・技術に親しんでいただくため、研究室・施設の公開をはじめ、講演会、各種イベントを行います。

皆さまのご来場をお待ちしております。(入場無料)

### 和光地区

場所	〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1
日時	4月23日(土) 9:30～16:30 (入場は16:00まで)
問合せ	和光地区一般公開事務局 TEL: 048-467-9443



### 筑波地区

場所	〒305-0074 茨城県つくば市高野台3-1-1
日時	4月22日(金) 13:00～16:00 4月23日(土) 10:00～16:00
問合せ	筑波事業所 研究支援部 総務課 TEL: 029-836-9111 (代表)



### 播磨地区

場所	〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1
日時	5月1日(日) 9:30～16:30 (入場は15:30まで)
問合せ	理化学研究所 放射光科学総合研究センター Mail: opensite@spring8.or.jp



## 島尻内閣府特命担当大臣（科学技術政策）が和光地区を視察

2016年1月29日(金)、島尻安伊子 内閣府特命担当大臣（科学技術政策）が理研和光地区を視察しました。

まず、理研の概要と研究不正の防止に向けた多層的な取り組みについて説明しました。

脳科学総合研究センターでは、糸原重美チームリーダー（行動遺伝学技術開発チーム）らが研究現場での取り組みについて、ラボノートや解析データなどを用いて説明するとともに、岡本仁 副センター長から学際性・国際性に富んだ研究体制や、人材育成の取り組み、神経回路機能の解明研究について説明しました。

続いて、創発物性科学研究センターの十倉好紀センター長らが、同センターにおける超低エネルギー消費エレクトロニクスや環境調和型高効率エネルギーの研究、若手人材育成の体制について説明しました。

最後に、仁科加速器研究センターにおいて、延興秀人センター長らが、先日、森田浩介グループディレクターらが命名権を獲得した113番元素をはじめとした超重元素合成とその先の

安定原子核の島の探索について説明した後、世界一の強度を誇る加速器と周辺装置群をご覧いただき、基礎研究からイノベーションに向けた研究の展望を説明しました(写真)。



## 「第2回 Brainサイエンスカフェ」参加レポート

Brainサイエンスカフェとは、参加者と研究者が気軽におしゃべりをしながら脳の不思議について共に考えるイベントです。定員は30名とこぢんまりしていますが、その分、研究者との距離はぐっと近くなります。文字どおり、膝を突き合わせての会話が楽しめます。

第1回目（2015年11月）のカフェでは、「脳の中には地図がある？」と題して、海馬における記憶のメカニズムと空間を把握しナビゲーションする脳内の仕組みがテーマでした。2回目となる今回のお題は、「言葉の学び方と年齢」。話題提供者は脳科学総合研究センター 言語発達研究チームの馬塚れい子チームリーダー（TL）と秋元頼孝 研究員。言語発達研究チームでは、「赤ちゃん研究員」に行動実験に参加してもらいながら、乳幼児が大人の話している言葉にどのように興味を持ち、言語を獲得していくかを研究しています。

グローバル化が進む中、外国語、とりわけ英語の習得は日本人にとって大きな課題となっています。「赤ちゃんのうちに外国語に触れさせた方が身に付きやすい」とよく言われますが、科学的な根拠はあるのでしょうか。効果的に言葉を学ぶにはどうすればよいのでしょうか。そんな身近で切実なテーマだけに、カフェは学生さんから年輩の方まで、幅広い年齢層の方でいっぱいでした。

コーヒーを片手にリラックスした雰囲気でお話は進みます。イベント中ごろからは次々と参加者から質問や意見が出て、馬塚TLがアツク応えているうちに、時間はあっという間に過ぎてしま

いました。気になる外国語習得に適した時期とは？ 母国語運用能力を維持しつつ外国語を習得するという場合は、学ぶ時期が早い方が有利なわけではなく、「学ぶ意欲を持って努力することができる年齢」が効果的なのだそうです。「使える英語」に必要なのは語彙、文法、表現力。発音はきれいでも子ども同士で話すような表現しか使えないレベルでの「Nativeの英語」と、「実際に仕事で使える英語」とはイコールではないということですね。

### 次回「Brainサイエンスカフェ」の予定

2016年4月23日（土）理研和光地区一般公開において開催

場所：脳科学中央研究棟1F 伊藤正男ラウンジ

各回40分、定員30名程度

参加費無料（飲み物、スナックは会場横のコーヒーショップで購入して持ち込めます）

① 10：00 「脳の中の情報、私とあなた」（日本語・英語）

② 11：40 「感情とこころを科学する」（日本語・英語）

③ 13：00 「ハエでヒトの脳がわかる？」（日本語・英語）

④ 14：30 「ヒトはどうやってヒトの顔を区別する？」（日本語のみ）

※プログラムは変更になる場合があります。また、当日はBrainサイエンスカフェのほかにも「脳科学 本気講座」と題した50分のセミナーも3本開催されます。最新情報は、理研Webサイト（<http://openday.riken.jp/>（3月20日ごろopen予定））をご参照ください。



理研脳科学総合研究センター（BSI）創立20周年記念イベント

第2回 Brainサイエンスカフェ「言葉を学ぶのに良い年齢ってあるの？ ～言葉の学び方と年齢～」

2016年2月3日18：00～19：30 和光市内のカフェにて開催

## 有機化学とお酒と算数

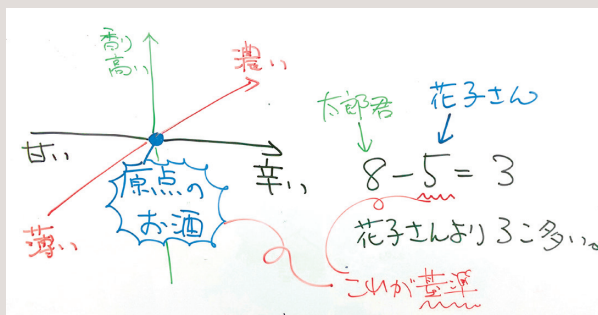
山田陽一 やまだ・よういち

環境資源科学研究センター グリーンナノ触媒研究チーム  
副チームリーダー

理研で開発された酵母でつくられる日本酒「仁科誉」<sup>にしなほまれ</sup>。これは埼玉県の酒蔵3ヶ所で醸し出されている。「埼玉の酒、おいしいの?」と言われることがあるが、全国で初めて純米酒しかつくりえない方向性を示した「神亀」<sup>しんかめ</sup>、今や入手困難になってきた我が愛する「花陽浴」<sup>はなあび</sup>など素晴らしい日本酒が数多くある。純米吟醸「仁科誉」をつくっているのも、銘酒「鏡山」<sup>かがみやま</sup>の小江戸鏡山酒造(川越)である。ここは、一度廃業した鏡山酒造を若い蔵人衆が引き継ぎ再興した心熱い酒蔵である。「彩の原石」<sup>さいのげんせき</sup>、「豊明」<sup>ほうめい</sup>などを擁する石井酒造の杜氏はまだ20代のはずで面白い酒を醸す。どれも日本酒好きなマニアならご存じの銘柄だろう。

僕は有機化学研究者だ。僕の研究テーマは「高活性・高再利用性の固定化触媒の開発と有機変換反応への応用」である。一般の方々には通じない。先日、飲み屋のマスターに、どんな研究をしているか尋ねられ途方に暮れた。でも相手はお酒という有機化合物のマスターである。そこで、「酵母ってありますよね。糖分からアルコールをつくるやつ。あれが触媒です。糖分からアルコールができる反応が有機変換反応です。こんな反応を効率的に行える酵母みたいな触媒を自分の手でつくりたいんです。しかも何度も再利用できるような触媒をです」と説明した。割と分かってくれた。マスターの返事。「じゃあ僕、有機化学者なんですね」。「そうです」。僕の有機化学仲間がまた1人増えた。

触媒化学研究の際に大事なことは、基準点をつくることである。基準となるべき反応条件、結果をもとに、さまざまな条件検討を行う。この条件を基準にしてこの点でどのくらい高い、低いなど実験データを判断する。何も難しいことを言っていない。このようなことは、小学1年生でもやっている。小学1年の算数で、「太郎くんはあめを8個、花子さんは5個持っていました。太郎くんは花子さんよりあめを何個多く持っているでしょう」という計算方法を学ぶ。このとき、花子さんのあめの数が基準となることを習う。



写真・筆者と埼玉の酒と算数

この基準よりどれくらい多いのかを判断する。小学1年から最先端化学の研究基本姿勢を学んでいることに気付いている人がいないだけで、しっかりと学んでいる。大事なことだ。

巷では日本酒ブームだという一方で、日本酒は難しい、という声を聞く。「辛口のお酒、ありませんか」「辛口のどんなのがお好みでしょうか」「……」という会話が飲み屋で広がる。客は何を飲んだらいいかわからない、店側は辛口といっても「いろいろなタイプ」があるから薦めようがない。お互い、先には進めない。誰も幸せにならない。

小学1年の知識を応用しよう。その店の基準となるべきお酒(なければ日本酒メニューの最初の酒)を頼もう。それを飲んでから、「このお酒より、もう少し辛いもの、甘いもの、芳醇なもの、淡麗なもの、香り高いものを下さい」とすれば、だんだんと自分のお酒の方向性を見つけることができる。僕の研究思考スタイルと一緒だ。でも、慌ててはいけない。1回で見つかるとは限らない。やみくもに検討してもいけない。自分で方向性、感覚、ひらめきを研ぎ澄ませて、「このお酒より〇〇なものを下さい」と次のお酒に進む。そしていつか、グッとくるお酒に巡り合える。おめでとう。

でもね、私たちの触媒開発研究では何十～百も条件検討をして最適条件を見つけることを言い添えておく。つらいものである。

### 創立百周年記念事業寄附金へのご支援のお願い

創立百周年(2017年)の記念事業寄附金へのご支援をお願いします。

問合せ先 ● 理研 外部資金室 寄附金担当

Tel: 048-462-4955 Email: kifu-info@riken.jp

理研 寄附金  
Support RIKEN

理化学研究所 創立百周年  
RIKEN 100th Anniversary



http://www.riken.jp/