



## ◆ Contents

正常な細胞分裂を  
司るタンパク質 ..2

自然界に学ぶ  
ソフトマターの材料設計 ..4

◆ 研究トピックス ..6

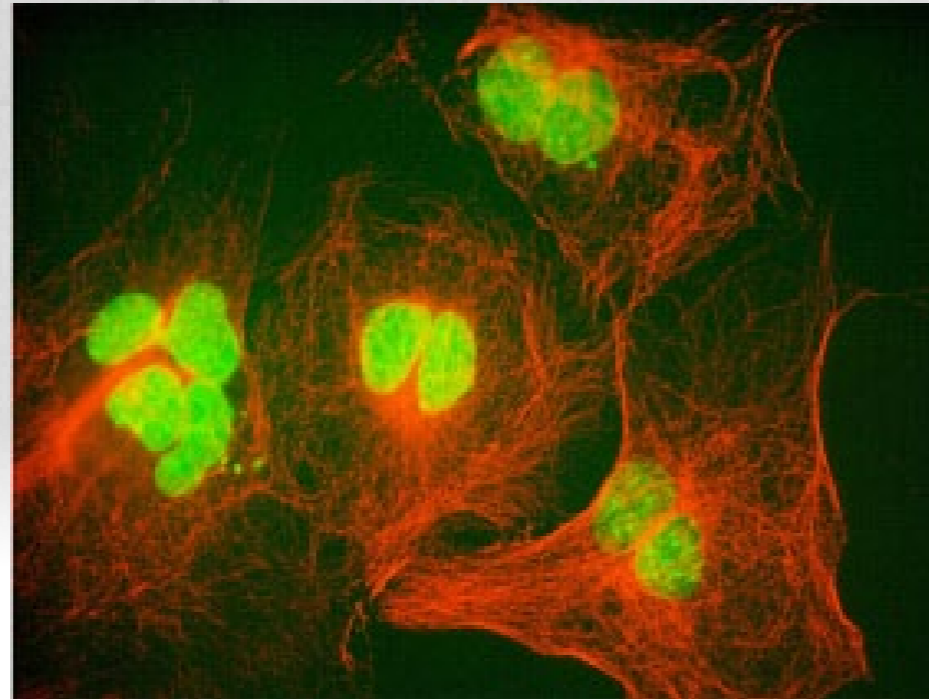
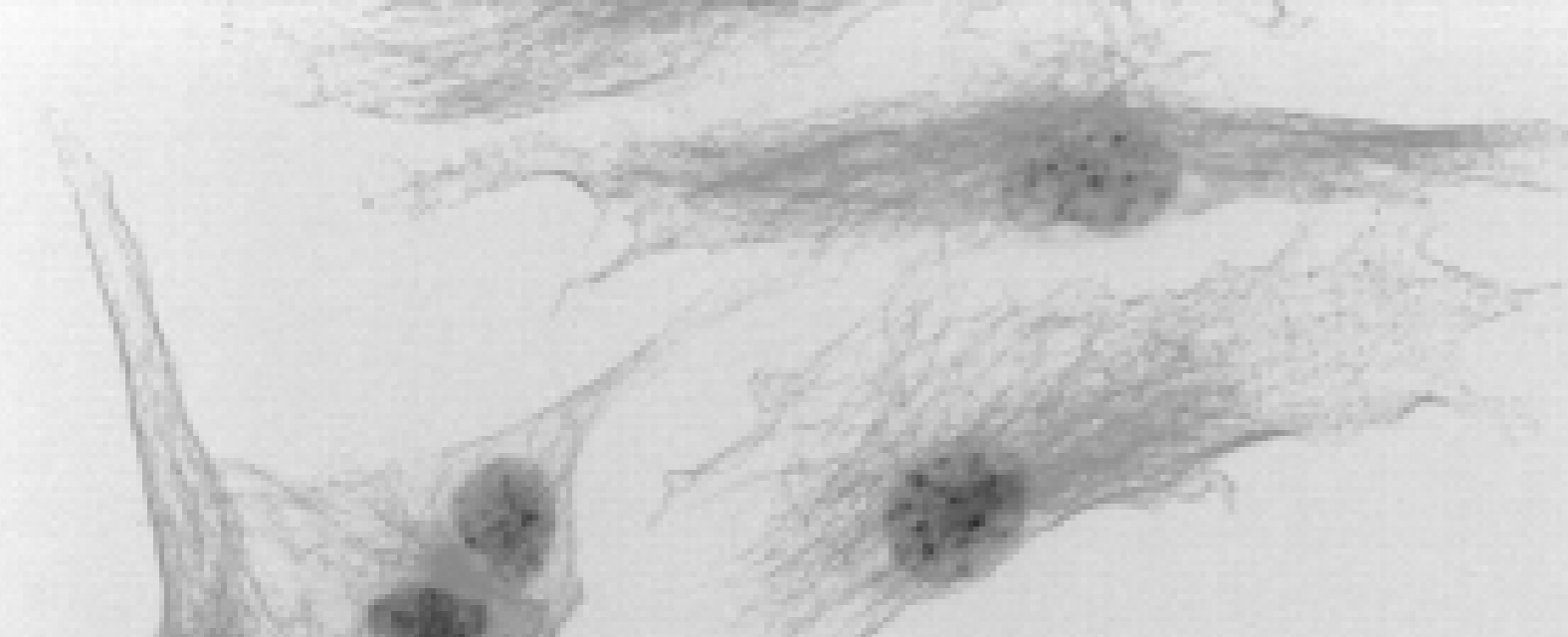
本格的なポジトロニウムビーム生成に成功  
新たな電気分極発現原理を  
有機強誘電体で実証  
100億分の1秒で光増感分子の動きを観測

◆ 施設情報 ..7 ◆ お知らせ ..8

cERL 建設状況  
SuperHRPD  
震災から復旧  
超低速ミュオン

第6回サマーチャレンジ  
KEK 一般公開  
文化財科学講演会





# 正しい細胞分裂を司るタンパク質

私たちの身体はおよそ 60 兆個の細胞から成り、その一つ一つが常に分裂、増殖を繰り返すことで、身体を構成し、生命活動を維持している。もしも細胞が分裂できなければ、細胞の寿命と共に、細胞は死滅してしまうし、逆に分裂しすぎて必要以上に細胞が増えれば、ガンなどの疾患につながる。各細胞には 2 つに分裂するための周期があり、その周期に応じて分裂を調節するしくみが備わっている。

画像：正常な細胞（上）と多核の細胞（中段）。ARF6 を欠損させた細胞では細胞質分裂が正常に行われず、1 細胞に多数の核ができる。提供 京都大学 中山和久教授。

"Structural basis for Arf6-MKLP1 complex formation on the Flemming body responsible for cytokinesis." EMBO Journal, Vol. 31, No. 11 (May 30, 2012).

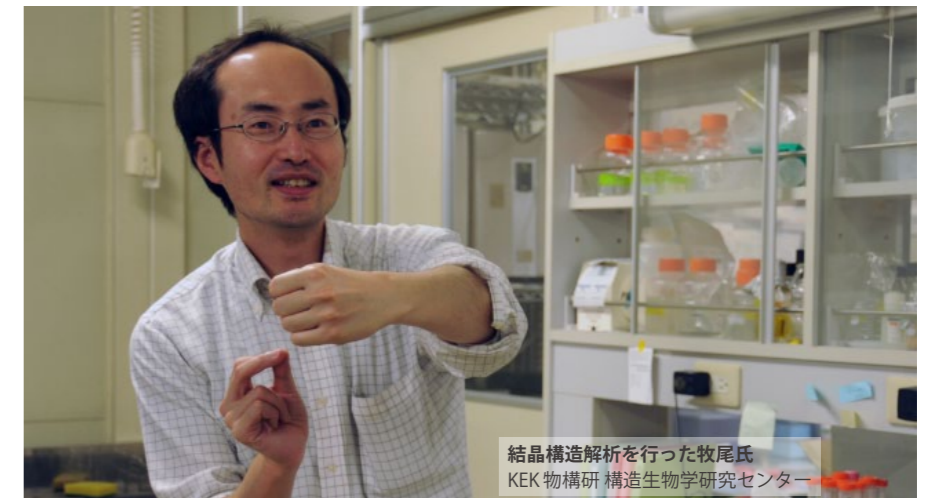
この記事は KEK ハイライトでもご覧いただけます。  
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Highlights/>

細胞分裂は、細胞核内に存在する染色体 DNA の複製から始まる。DNA が複製され、できあがった二組の染色体は半分ずつに分離していく。次いで細胞質の分裂が始まる。分裂途中の細胞は、ひょうたんのような形をしており、中央のくびれ部分が「ぷつん」と切れ両者が細胞膜で閉じると細胞分裂が完了する。その間、分かれつつある二つの細胞の間には、微小管の束が橋をかけるように現れる（下図）。

## 細胞質分裂を行う役者たち

京都大学の中山和久教授、および KEK 物構研の若槻壮市教授の研究チームが着目したのは、細胞の「くびれ」から最後の「ぷつん」と分かれるまでの過程。このとき現れる微小管は、細胞内で物質を輸送する「線路」のような役割を果たす。線路の上を走るの「モータータンパク質」と呼ばれる動くタンパク質で、細胞の特定の場所が必要になる物質を、小胞と呼ばれる小包状の膜に包み込んで運ぶ。まるで、貨物列車が線路を走るように、微小管に沿って動いていく。

中山教授らのグループは、くびれている部分の微小管の束に ARF6 というタンパク質が集まっていることに気がついた。そして、このタンパク質の機能を欠損させると、細胞は細胞質分裂がうまくいかず、1 つの細胞内に複数の核をもつ細胞の割合が多くなることを確かめた（左頁写真）。同時に、モータータンパク質の一種 MKLP1 (Mitotic Kinesin - Like Protein 1、モータータンパク質の一種である「キネシン」に似たタンパク質) もくびれ部分に集まっていた。これらのことから、この 2 つのタンパク質は細胞質分裂、つまり「くびれ」から「ぷつん」の間に重要な役



結晶構造解析を行った牧尾氏  
 KEK 物構研 構造生物学研究センター

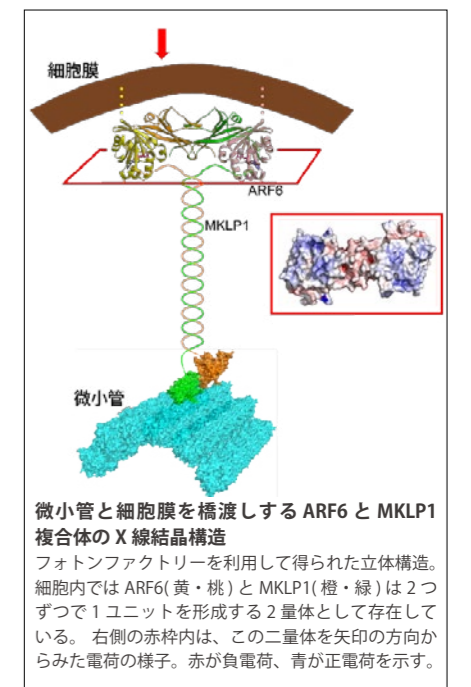
割を担っていることが予想された。これを立証するため、ARF6 と MKLP1 が結合することを示し、その詳しい構造を調べた。

## 「細胞膜」と「微小管」をつなぐ構造

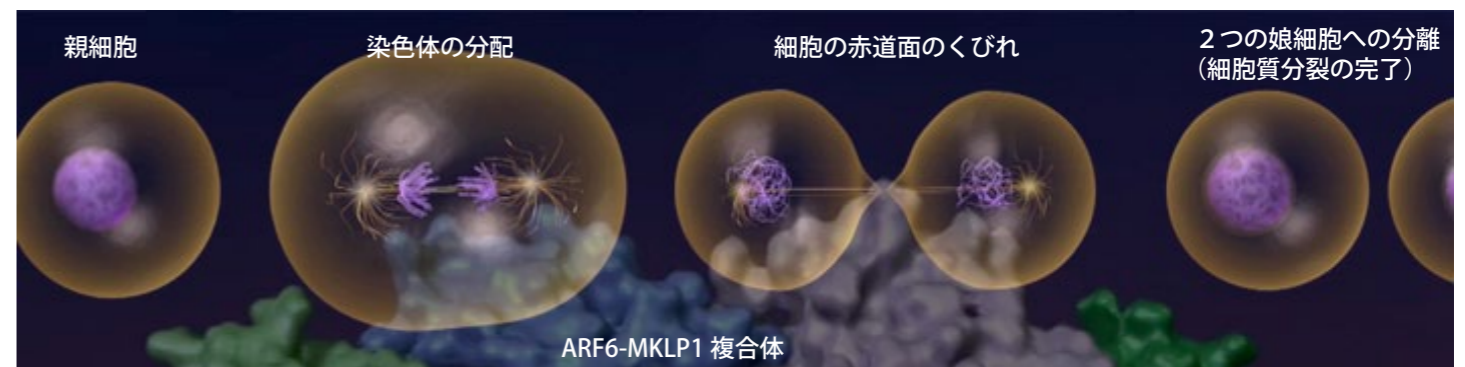
KEK 物構研 構造生物学研究センターの牧尾尚能（まきお ひさよし）さんらは、ARF6 と MKLP1 の複合体の結晶を作り、フォトンファクトリーのビームライン BL-5A、AR-NW12A にて、結晶構造解析を行い、2 つのタンパク質の結合部分を詳細に調べ、結合に最も重要な部分をつきとめた。その部分を別のアミノ酸に置き換えた変異体を作ると、ARF6 がくびれ部分に集まることができず、正しい細胞質分裂ができなくなった。このことは、ARF6 と MKLP1 の複合体の機能が、正しい細胞質分裂の進行にとって不可欠であることを示す。

得られた複合体の構造から、ARF6 と MKLP1 の複合体は、微小管の「線路」とくびれ部分の細胞膜の間の「橋渡し」の役目を果たしていることが予想された（右図）。この橋渡し構造は、細胞質分裂に必要なタンパク質、そしてそれを包んだ小胞が「ぷつん」と切れる

中央部分に集められるための足場になると考えられる。複合体を形成したとき、細胞膜と結合していると考えられる表面に正電荷が現れることも、負に荷電した細胞膜との結合しやすさを裏付けるものであった。



研究グループは、今後この足場を使って「ぷつん」の中央部分に集積するタンパク質をつきとめ、それらの構造や機能を明らかにしていこうとしている。そして最終的には、細胞質分裂の全貌の解明を目指している。





# 自然界に学ぶ ソフトマターの材料設計

## 「ソフトマター」って？

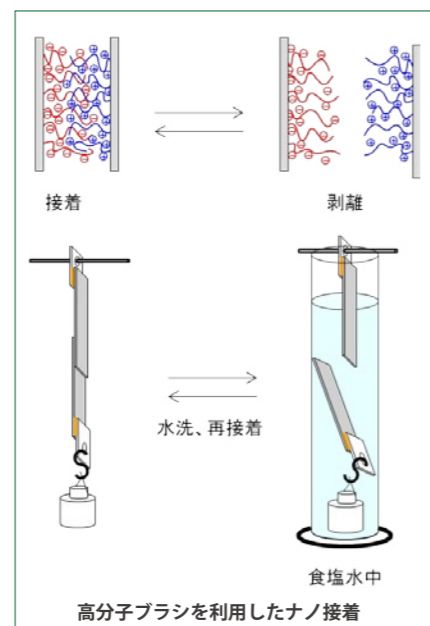
ほとんどの人が初めて耳にする言葉かも知れないが、ソフトマターは私たちの身の回りにあふれている。例えばプラスチックやゴム、これらは主に炭素と水素からなる原子の鎖でできた「高分子」と呼ばれるソフトマターの種類で、ゼリーのように柔らかいものから鉄より丈夫な特殊繊維まで、非常に幅広い性質を持っている。他にも、パソコンのディスプレイに使われる液晶や、手を洗うときに使う石けんも代表的なソフトマターだ。このように、身の回りには金属、ガラス、セラミックス、半導体以外はほとんどがソフトマターでできており、我々の生活とは切っても切り離せない存在なのである。

## 自然はアイデアの宝庫

新材料を開発するヒントは、実は自然の中にあるという。例えば撥水性の布や塗料など、物質表面で水が玉になって転がる様は、蓮の葉の上で水滴が転がる「ロータス効果（ロータスは蓮の意味）」を模倣したもの（上写真）。蓮の葉の表面に存在する細かなワックス層の凹凸が水を強力に弾いて水滴をつくり、泥などの異物を水滴と一緒に洗い流している。これとは対照的に、カタツムリの殻は水になじみやすい。この殻は水に濡れると表面の細かな溝に水膜ができ、汚れを浮かせて落とすという見事な方法で表面を常に清浄に保っている。この原理は洗面台や外壁など、陶器の防汚機能に利用されている。

このように、物の表面における性質はそれを構成する物質だけでなく、細かな表面構造、特にナノメートル（nm; 100 万分の 1 ミリメートル）スケール

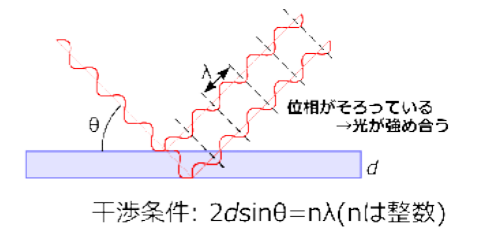
の構造によっても大きく左右される。科学技術振興機構（JST）の戦略的創造研究推進事業（ERATO）による高原ソフト界面プロジェクト（代表：九州大学先導物質化学研究所 高原淳教授）で



は、このような自然界のしくみを参考に、ソフトマターで高機能性を再現する「ソフト界面」の構築に向けて高分子の合成・構造設計を行っている。例えば、ナノスケールの高分子をブラシのように表面に生やした「ナノ接着」界面は、水に濡らして互いに貼り合わせるだけで接着し、食塩水につけると剥離でき、さらに繰り返し利用できるという優れたものだ（左図）。

## 中性子を利用した ナノ構造観察

高機能表面の性能をさらに高めるには、表面の構造と特性の関係を調べ、高機能性の原因を深く理解することが重要だ。そのためには、X線や中性子線といった量子ビームを用いた実験が有効で、KEK では高原ソフト界面プロジェクトと共同で J-PARC の物質・生命科学



シャボン玉の表面における光の干渉  
波長  $\lambda$  の光が入射角  $\theta$  で入射、厚さ  $d$  のシャボン膜で反射した場合の干渉条件。

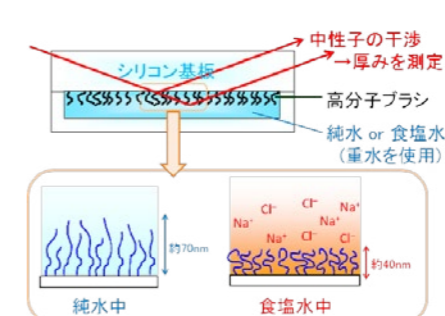
に合うと 2 つの光の山と谷がうまく一致する。先述のとおり光は波の一種なので、「干渉」と呼ばれる現象によって波の振幅が大きくなり、光は強く反射される（上図）。シャボン膜の厚みが一定だとすると、光が入射する角度で強く反射される光の波長（色）が変わるため、写真のようにシャボン玉を見る角度によって、赤や緑など様々な色が現れる。逆に言うと、強く反射された際の角度と波長が分かれば膜の厚みを測定することが可能で、この原理を利用して膜の構造を測定するのが中性子反射率法なのだ。このような手法を用いるには観察する対象と波長が近いことが条件だが、人間が見える光の波長は 400 ~ 700nm とナノ構造を観察するには長すぎる（シャボン玉の厚みは数千 nm）。一方、中性子の波長は 0.1 ~ 1nm 程度と非常に短いため、中性子反射率法で中性子の「干渉」を観察することによって表面のナノ構造を調べることができる。

また、中性子は通常の水素 ( $^1\text{H}$ ) と天然では 0.01% 程度しか存在しない「重水素 ( $^2\text{H}$ )」を識別できるため特定の部位を重水素で置き換えることで、その部分のみを区別して観測するという隠し技を持っている。他にも、電荷を持たない中性子は透過率が非常に高く、物質の奥にある界面からの反射を観測することも可能だ。

実験施設に中性子反射率計 SOFIA (Soft Interface Analyzer/ソフト界面解析装置) を建設した（下写真）。中性子反射率法とは、物質の表面に中性子を照射し、それが反射される様子を解析する実験手法。これをキラキラと虹色に見えるシャボン玉を例に説明しよう。光は波（電磁波）の一種で、波の振幅が光の強さに対応する。その光がシャボン玉に当たると、膜の外側、もしくは内側で反射が起きるが、反射する角度と膜の厚み、そして光の波長（=色）が条件



中性子反射率計 SOFIA と中性子反射率測定による実験結果の模式図



ERATO プロジェクトでは、これら中性子の特殊な性質を利用して、シリコン基板上に作成したナノ接着用の高分子ブラシを純水、もしくは食塩水に浸して、構造の変化を調べた。ただし、高分子中にも水素がたくさん含まれているので、そのままでは水と高分子の区別がつかない。そこで普通の水 ( $^1\text{H}_2\text{O}$ ) の代わりに重水素でできた「重水 ( $^2\text{H}_2\text{O}$ )」を使用する。そして、重水を容器に密閉した状態でシリコン基板側から中性子を照射し、基板表面での反射と、高分子ブラシと重水の界面で反射された中性子の干渉を観測した（下図）。その結果、高分子ブラシは純水中では伸びきってブラシ層が厚いのに対し、食塩水中ではブラシが縮んでしまい、ブラシ層が薄くなっていることが明らかになった。高分子ブラシは電荷を帯びた特殊な分子でできており、純水中では電荷同士が反発し合い高分子ブラシが伸びきって厚くなる。一方、食塩水中では多数のナトリウムイオンと塩素イオンが高分子ブラシ中の電荷を中和してしまうため、ブラシ同士の反発力が弱くなりブラシが縮んでしまうのだ。これは、ナノ接着した高分子ブラシが剥離してしまうことと、深く関係があると考えられる。

一方、ERATO プロジェクトでは、食塩濃度をどんなに高くしても構造がほとんど変わらない高分子ブラシの合成にも成功している。これは塩濃度の変化など周りの環境変化に対して耐性が高いことを示唆しているが、実は、この高分子ブラシは細胞膜を模倣したもので、非常に高い防汚性と低摩擦性を示す。自然がこういった優秀な物質を使用していることを感心せずにはられない。この高分子ブラシは、痛みの少ないカテーテルや人工関節などへの応用が期待されている。我々は自然から学ばねばならないことが他にも数多くありそうだ。



"Novel Neutron Reflectometer SOFIA at J-PARC/MLF for In-Situ Soft-Interface Characterization" Polymer Journal, accepted  
写真：蓮の葉の上を転がる水滴（ロータス効果）。蓮の葉表面の電子顕微鏡写真、ワックス層でできた細かな凹凸が水をはじく。

この記事は KEK ハイライトでもご覧いただけます。  
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Highlights/>



# 研究トピックス

物構研、および PF、MLF の共同研究・共同利用による研究成果

■ もっと詳しく  
KEK ニュースルーム  
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/>

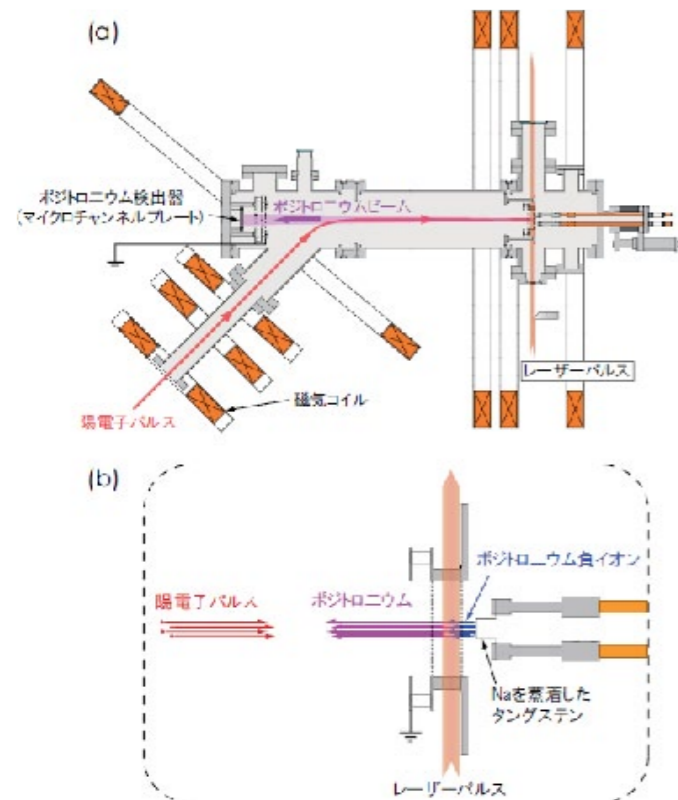
## 技術

### 本格的なポジトロニウムビーム生成に成功

東京理科大学と KEK の研究グループ (代表、東京理科大学長嶋 泰之教授) は、電子 1 個と陽電子 1 個が束縛合っているポジトロニウムを、エネルギーの揃ったビームとして超高真空中で生成することに成功した。通常、電荷をもたないポジトロニウムは電場による加速ができないが、今回、KEK 物質構造科学研究所の Pulsed Positronium Beam (PPB) を用いて生成したビームでは、1keV を超えるエネルギーにまで自由に加速することが可能になった。実験で生成されたのは 1.9keV までのポジトロニウムであるが、原理的にはもっと高いエネルギーまで加速することが可能。

今回実証されたポジトロニウムビームは、未だ誰も手にしたことのないエネルギー領域をカバーし、しかも物質表面の分析に不可欠な条件である超高真空中で実現した。これを利用して絶縁体など物質表面の分析や、回折実験への利用など、研究手法としての展開が期待される。さらに、未だ謎の多い、ポジトロニウム自身の性質の解明にも用いられる。

Appl. Phys. Lett. 100, 254102 (Jun 20, 2012)



ポジトロニウム負イオンの光脱離を利用したポジトロニウムビーム生成装置。(a)は装置全体、(b)はレーザー照射部分の詳細図。

## 材料

### 新たな電気分極発現原理を有機強誘電体で実証

KEK 物質構造科学研究所の研究グループ (構造物性研究センター・小林賢介 研究員、熊井玲児 教授、村上洋一 センター長) は、産業技術総合研究所の堀内佐智雄 フレキシブル有機半導体チーム長、東京大学の賀川史敬 特任講師、東京大学・理化学研究所の十倉好紀 教授と共同で、有機強誘電体の電気分極の大きさと方向が分子間の動的な電子移動によって決定される新たな分極発現機構を、電気分極測定と放射光 X 線回折実験を通じて明らかにした。この「電子型強誘電性」と呼ばれる現象は、結晶中のイオンの変位に伴い静電荷が偏り自発分極が生じるという古典的な描像 (イオン変位モデル) に比べ、20 倍以上もの大きな電場応答を実現したことから、今後の強誘電体の高性能化にも同原理を活かした展開が期待される。

Phys. Rev. Lett. 108, 237601 (Jun 4, 2012)

## 材料・ダイナミクス

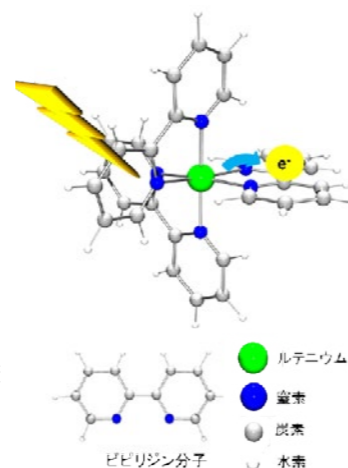
### 100 億分の 1 秒で光増感分子の動きを観測

KEK 物質構造科学研究所の佐藤篤志研究員、野澤俊介准教授、足立伸一教授、分子科学研究所の藤井浩准教授、東京工業大学大学院の腰原伸也教授の研究グループは、100 億分の 1 秒の時間分解能で、太陽電池や光触媒の基礎反応である電子移動のメカニズムを明らかにした。光エネルギーを化学エネルギーに変換する素過程の解明は、今後の材料開発に有益な情報となる。

本研究で用いたポンププローブ法による時間分解 X 線吸収分光測定は、光照射によって起こる化学反応過程での電子移動や、それに伴う分子構造の変化を観測できる。この手法により、色素増感太陽電池、光触媒、有機 EL などのデバイスが実際に動作している様子を観測することが可能となったため、高効率化などへの進展が期待できる。

J. Phys. Chem. C. 116, No. 25 (Jun 28, 2012)

電子移動によるルテニウム (II) トリスピリジン錯体の構造変化の概念図



## 施設情報

### ミュオンUライン 超低速ミュオン

2010 年度から J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) で建設が進められている大強度超低速ミュオン専用ビームライン。7月5日、加速器トンネル内にあるミュオンターゲットから実験ホールへミュオンを導く超伝導湾曲ソレノイド電磁石が搬入、設置された (右写真)。

特徴的な S 字状のカーブは、加速器トンネルの中でつくられたミュオンを、トンネル上流に対して左右それぞれ 45 度、120 度の 4 方向に集められ、ビームラインに導くためのもの。このビームラインは、45 度曲がった方向に取り出し、続く直線状のソレノイドによってトンネル外まで運搬する。またミュオン生成標的付近は放射線量が高くなるため、取り出し口側で再び 45 度曲げることによって、実験ホールへの放射線の影響を低減させる設計となっている。

今後、このソレノイドの下流側に「超伝導収束ソレノイド電磁石」を設置。取り出した低速ミュオンから超低速ミュオンを発生させる装置群を設置し、今年度中に超低速ミュオンを取り出すことを目指している。

### 放射光 cERL 建設状況

2012 年度のビーム運転開始を目指し、建設が進められている ERL (エネルギー回収型ライナック) の実証器、コンパクト ERL (cERL)。



入射器用クライオモジュール設置作業の様子

ERL 開発棟では 2 セル超伝導空洞 3 台が断熱真空槽内に収納され、入射器用クライオモジュールの組立てが完成した。

6月26日には、コンクリートシールド内にクライオモジュールの設置が完了し (上写真)、現在、冷凍機との冷却配管の接続作業が進められている。今後、8月の完成検査を経て、9月には初めての冷却試験が行われる予定。



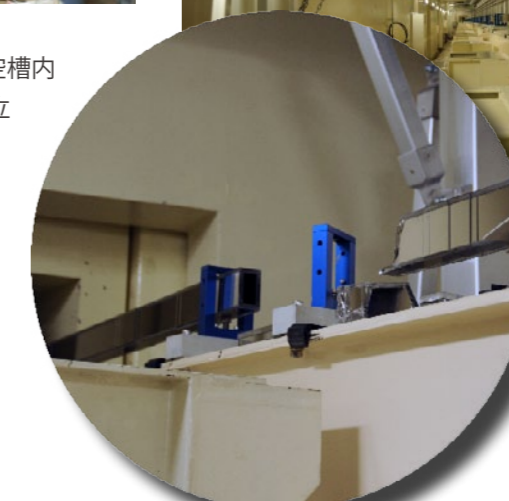
右側 S 字状の円筒形のものが超伝導湾曲ソレノイド電磁石

### 中性子ビームライン BL08 SuperHRPD 震災から復旧

東日本大震災の影響により、実験装置の一部が破損し、利用を中断していた J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) のビームライン BL08 SuperHRPD が復旧し、4月8日から実験を再開した。

SuperHRPD は中性子源から約 100m にわたり、長く伸びたビームラインが特徴的な装置。そのため、MLF 建屋には収まりきらず、増設する形でビームラインが設置されている。震災時には震度 6 弱の揺れにより、MLF 建屋と増設した建物の間には最大 10cm ものずれが生じ、中性子を装置まで輸送するガイド管が破損した (写真)。新しいものに交換、地震によってずれ動いてしまったガイド管全てを並べ直し、実験再開を迎えることができた。

このビームラインの復旧を以って、MLF 中性子の全ての実験装置が利用可能となった。



ビームライン下流から上流を臨む (上) と破損箇所 (左) 中性子を反射しながら輸送するミラーは、ガラス基板にニッケルとチタンを何層にも重ねて作られる。このミラーの筒が、中性子を輸送するガイド管。



## ◆お知らせ - イベント予定 -

8/20 (月) ~ 28 (日)

### 第6回 サマーチャレンジ 「この夏、豹変する」

研究最前線で活躍する研究者と共に実験や解析、最終日には全員が研究成果を発表する、研究を9日間にわたって体験するプログラム。申込受付終了 (5/18)。

>> <http://ksc.kek.jp/>



9/2 (日)

### KEK 一般公開

KEK 一般公開では、普段は見ることのできない施設や施設を見学、著名な研究者の講演、おもしろ物理教室など様々な企画を通じて先端的な研究をご紹介します。

自然あふれるつくばキャンパスで、加速器科学の不思議にふれてみませんか？

>> <http://openhouse.kek.jp/>



9/28 (金)

### 文化財科学講演会

#### 一放射光・中性子で文化財を探る一

考古学的・歴史的に貴重な史料を非破壊で評価、分析する、放射光と中性子による研究成果の一部を紹介する講演会。