

# サイエンス & テクノロジー

京都産業大学

理系学部からの  
メッセージ

VOL.11

## 01 決定されているのに 予測できない未来

世界観を覆した数学理論  
細野 雄三 教授

## 02 天文学の新たな目 イマージョン・グレーティング

分光器の小型化が実現する「第2の地球」探し  
池田 優二 准教授

## 03 素粒子実験の アイデアで医療機器の常識を変える

低価格でかつ高解像度のPETを開発  
竹内 富士雄 教授

## 04 電波を知れば 携帯電話の未来が見える

携帯電話は無線通信技術の粋  
竹内 勉 教授

## 05 人間の意志を 直接機械に伝えられたら

ブレインマシンインターフェイス(BMI)で  
究極の福祉機器を  
赤崎 孝文 准教授

## 06 生き物のエネルギー 通貨を生み出すナノモーター

ATP合成酵素の回転運動を世界で初めて観察  
吉田 賢右 教授

## 07 コンピュータによる 遺伝子解析でDNAの謎にせまる

ダイズと根粒菌の「共生」の仕組みを明らかにする  
金子 貴一 准教授

## 08 インフルエンザの 始まりはすべて鳥だった

さまざまなインフルエンザの脅威に備える  
大槻 公一 教授

### 決定されているのに 予測できない未来

世界観を覆した数学理論



理学部  
数理科学科

**細野 雄三**

教授

理学博士  
応用解析学

0011

ニュートンの登場により近代科学は、法則さえ分かれば未来の予測ができるという決定論的な宇宙観を持っていました。この宇宙観は強力であり、長らく科学を支配していました。

ところが、カオス理論の登場によって状況は一変します。法則が完全に分かっている物理現象であっても、誤差のようなわずかな初期値の差が未来に大きな差を生み出すことが示されたのです。このことは「ブラジルで一匹の蝶が羽ばたくと、テキサスで竜巻が起きる」(「バタフライ効果」)なども表現されます。

カオス理論の歴史や、カオスが現れるもっともシンプルな式など、この理論の概要を紹介します。

### 天文学の新たな目 イメージング・ グレーティング

分光器の小型化が実現する  
「第2の地球」探し



理学部  
物理科学科

**池田 優二**

准教授

博士(理学)  
実験宇宙物理学

0022

天体観測に欠かせない装置のひとつに光を波長によって分ける分光器があります。光を様々な波長に分けて、目に見える光だけではなく、目に見えない光をも宇宙を知る手掛かりとして用いています。

現在、さらなる超大型地上望遠鏡や宇宙望遠鏡の開発計画が進んでいますが、そうした次世代の望遠鏡に搭載するための高性能でかつ小型の分光器の開発が急務となっています。

その鍵を握るのがイメージング・グレーティングと呼ばれる分光素子です。最先端の技術によって、宇宙にある地球型惑星や生命の痕跡を捉えることが期待されています。

### 素粒子実験の アイデアで医療機器 の常識を変える

低価格でかつ高解像度の  
PETを開発



コンピュータ理工学部  
コンピュータサイエンス学科

**竹内 富士雄**

教授

理学博士  
原子核物理学

0033

先端医療や脳科学研究に欠かせないPET装置は、実は原子核物理学の実験装置そのものといってもいい仕組みをしています。このPET装置は、生きたまま体内の機能を調べることができるという長所を持ちながら、CTやMRIと比べて、医療現場への普及が遅れています。最大の原因は一台数億円にもなる価格で、多数組み込まれている光電子増倍管が価格を押し上げています。

欧州の国際的な実験施設CERNで使うために開発した実験装置から着想を得て、低価格かつ高解像度のPETを実現する技術を開発しました。

### 電波を知れば 携帯電話の 未来が見える

携帯電話は  
無線通信技術の粋



コンピュータ理工学部  
ネットワークメディア学科

**竹内 勉**

教授

工学博士  
移动通信 電波伝搬

0044

私たちが普段何げなく使っている携帯電話ですが、多数のユーザが使う電波を混信させることなく、複雑に電波が入り乱れるビルの谷間で一定の通話品質が維持される背景には、無線通信技術の大きな発展がありました。

近年話題となった、第3世代携帯電話はCDMA方式と呼ばれるユーザ間の電波共有技術において、第2世代(TDMA方式)と大きく異なっています。CDMA方式は電波共有だけではなく、ビルなどで反射したため遅れて届く電波(遅延波)を活用し通話品質を高めているのです。

### 人間の意志を 直接機械に 伝えられたら

ブレインマシンインターフェイス(BMI)で  
究極の福祉機器を



コンピュータ理工学部  
インテリジェントシステム学科

**赤崎 孝文**

准教授

博士(医学)  
メカトロニクス 知的制御

0055

脳の活動で直接機械を動かす、あるいは感覚器官を通さずに視覚などの感覚情報を直接脳に入力しようというBMI。情報通信や工学、脳科学の発展と相互の連携が進むことで、SFの世界から現実の世界のものになりつつあります。

とくに福祉の分野では、感覚器官に障がいを持つ人にも感覚を与えられるのではないかなど、究極の福祉機器としての期待が高まっています。

機械と人間との関係を改めるのにも極めて有効な技術であると同時に、人間の認識とは何か、ひいては人間とは何かについて、私たちに大きな問いを投げかけてくれるものでもあります。

### 生き物のエネルギー 通貨を生み出す ナノモーター

ATP合成酵素の回転運動を  
世界で初めて観察



総合生命科学部  
生命システム学科

**吉田 賢右**

教授

理学博士  
機能生物化学 生物物理学  
分子生物学

0066

「ノーベル賞が頭の上を飛び超えていった!」とよく冗談で言っていますが、あらゆる生き物のエネルギー源であるATP(アデノシン三リン酸)を合成する酵素が実際に回転運動をしている様子を観察したことは、世界初の快挙でした。

現在は、分子シャペロンの研究をすすめています。タンパク質は1本の長いポリペプチドのヒモが複雑に折りたたまれて立体構造を作りますが、分子シャペロンがそれを助けるのです。

すぐ何かの役に立つ研究だけではなく、長い目で人類に貢献する研究を続けていきたいと思っています。

### コンピュータによる 遺伝子解析で DNAの謎にせまる

ダイズと根粒菌の「共生」の  
仕組みを明らかにする



総合生命科学部  
生命資源環境学科

**金子 貴一**

准教授

博士(理学)  
ゲノム構造学

0077

コンピュータによる遺伝子解析でダイズと根粒菌の「共生」の仕組みを研究しています。バクテリアゲノムの解析は、細かくカットしたDNAの塩基配列を読み取るところから始まり、ばらばらになったものを1本につなげた後、いくつかの法則性に従って遺伝子の場所をつきとめます。最後に、対象とする遺伝子をデータベース検索して他の遺伝子と比較し、その遺伝子の働きを予測します。天然のエコ肥料を生み出す根粒菌の共生の仕組みがわかれば、さまざまな応用研究につながるのではないかと期待しています。

### インフルエンザの 始まりは すべて鳥だった

さまざまなインフルエンザの  
脅威に備える



総合生命科学部  
動物生命医科学科

**大槻 公一**

教授

獣医学博士  
獣医微生物学

0088

本来、カモやアヒルなど足に水かきのある水鳥に感染するウイルスだったインフルエンザウイルス。それがニワトリやブタなどを經由して、ヒトに感染しやすいウイルスへと変異したのがヒトインフルエンザウイルスです。

アジアの開発途上国では、多くの畜産農家がアヒルをはじめ複数の種類の動物を飼育していて、極めて新型インフルエンザウイルスを生みやすい状況です。ベトナムでは新型インフルエンザを発生させないために何ができるのか、また発生したときにどう対応できるのかなどの研究を進めています。

# 決定されているのに 予測できない未来

## 世界観を覆した数学理論

20世紀に生まれたカオス論は、科学の世界に大きなショックを与えました。

「決定論的でも、予測不可能なものがある」

カオスの持つこの特徴は、私たちの身近にも大きな影響を与えています。

100%当たる天気予報はない。蝶の羽ばたきが竜巻を起こす。

従来では考えられなかった世界像を提示した、カオスの世界。

細野雄三先生に、この新しい学問を分かりやすく解説していただきました。

## カオスが切り拓く世界観

カオス論は、近代以降の決定論的世界観を揺るがす理論でした。

ニュートンの運動方程式以来、最初の状態と状態の時間発展を記述する法則さえ得られれば、未来永劫あらゆる状態が予測できる、という考え方が自然科学を支配していました。この世界観の下では、複雑な事象の未来が予測できないのは、その事象を記述する式が複雑すぎて今の物理学では解き明かせないだけであり、将来その式さえ解明されれば必ず予測可能になる、と考えられていました。ところが、そのような見通しを否定したのがカオス論です。

カオスの最も大きな特徴は、初期値に対する鋭敏性、すなわち「最初の状態がほんの少し違うだけで、将来非常に大きな違いを生む」というものです。わずかな誤差がやがて想像もつかないような大きな差になってしまい、混沌とした状態が生まれる。ここから「カオス」という名前がつけました。有効数字の最後の桁で切り捨ててしまうような小さな差が最終的に全く異なる結果を生んでしまうため、未来の状態を式から予測するのは事実上不可能です。カオス論は決定論的な世界観に則りながら、それでも予測できない未来があるという新しい見方を示しているのです。

「カオス」という言葉は「混沌」と訳され、複雑なものを複雑に扱っているという印象を与えますが、非常に簡単な方程式からもカオス現象は現れます。複雑なものを見たときに、本当に複雑な要因のせいなのか、それとも単純な法則から生じたものなのか、改めて問い直さなければならぬ。そのような提言をしたという点で、カオス論は大きな意味を持つのです。

## カオスの歴史

カオスは今でこそ様々な分野で扱われていますが、その起源は数学にあります。

元々は、19世紀のポアンカレ (Jules-Henri Poincaré, 1854-1912) の「三体問題」に遡ります。これは、天体など相互作用する三つの物体の運動を扱う問題です。この解法を求めた中で、ポアンカレは複雑な軌道が見られることに気づきました。当時、カオスという言葉はありませんでしたが、カオス現象の可能性はこの時期には発見されていたのです。

そして、ポアンカレのこの研究は、バーコフ (George David Birkhoff, 1884-1944) やスマール (Stephen Smale, 1930-) 達に引き継がれ、力学系の理論として発展し、その後のカオスの数学的研究の基礎を作ります。しかしながら、それは数学の世界の中だけで閉じていました。

科学としての「カオス論」発展の契機を与えたのが、ロバート・メイ (Robert McCredie May, 1936-) やエドワード・ローレンツ (Edward Norton Lorenz, 1917-2008) といった人々でした。

$x_{n+1} = F(x_n)$  ( $n=0, 1, 2, \dots$ ) という式を考えてみましょう。高校数学でも学ぶように、初期

### PROFILE

理学博士。高校時代は数学を得意としていた。京都大学大学院工学研究科博士課程を中退し、埼玉大学理工学部数学科助手となる。オックスフォード大学数理生物学研究所で数理生物学の研究に従事。専攻分野は応用解析学。現在は、自然界に現れる様々なパターンがどのようにして形成されるのか、その数学的メカニズムに関心がある。京都市立紫野高校OB。

値  $x_0$  と式  $F$  が決まれば、 $x_n$  の値が  $x_1, x_2, x_3, \dots$  とずっと先まで次々と決まっていきます。すなわち、式  $F$  が  $x_n$  から  $x_{n+1}$  を決める「法則」を与えています。この、ある数に対して別の数ある数に対応させる法則  $F$  を写像と呼びます。

1970年代初頭、数理生態学者のロバート・メイは、生物の個体数の変動を調べるため、この  $F$  に  $F(x) = ax(1-x)$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) という法則を与えた式を計算機で解いていました。する

と、ある  $a$  の値で式が非常にでたらめな挙動をするという現象に出くわしたのです。これが、まさにカオスでした。このときの  $F$  はロジスティック写像と呼ばれています。見て頂ければわかるように、とても単純な法則です。

実際にロジスティック写像の振る舞いを見てみましょう。(左図)

$0 \leq a \leq 1$  のとき、 $x_n$  は 0 に収束します。

$0 \leq a \leq 3$  のときも、一定の値 ( $1 - \frac{1}{a}$ ) に収束します。

この方程式が収束する一点は不動点と呼ばれるもので、 $x_{n+1} = x_n$  を解けば、簡単に上の収束値を求めることができます。

ところが、 $a$  が 3 を少し超えると、一点には収束せず 2 周期を行ったりきたりします。さらに  $a$  を大きくしていくと 4 周期、8 周期……と、 $2^n$  周期で振動していきま

す。重要なのはここからです。 $a$  が 3.570... というある値を超えると、この数列は全く不規則の、予測不可能なカオス領域に入ります。このとき、初期値  $x_0$  がほんの僅かに変わるだけで、数列は全く別なものになってしまうのです。左図を見てください。 $a = 0.8, 2.0, 3.55$  のときは異なると、 $a = 3.9$  のときには初期値がわずか 0.0001 異なっただけで  $n = 14$  以降では全く違った振る舞いをしていくことがわかります。

これと同じことが、天気予報にも言えます。天気予報の式も難解な微分方程式で成り立っていますが、気象学者のローレンツはこれをよりシンプルな本質的な形に直して、1960年代前半に計算機を用いて数値計算を行いました。するとこの式も、初期値の僅かな違いで将来が全く予想できなくなってしまうという特徴を持っていたのです。ローレンツはこのことを「ブラジルで一匹の蝶が羽ばたくと、テキサスで竜巻が起きる」と表現しました(「バタフライ効果」)。

二人のカオス現象の発見には、計算機が不可欠な役割を果たしました。そして、彼らには得られた計算結果からカオス現象を読み取る能力があったのです。その後のカオスの研究を含めて数学の分野でも、今や身近で容易に手

### ADVICE

高校時代は何でも好きなことをやって欲しいと思います。問題は好きなことが見つけれられるかどうかです。私自身は、数学も好きだったのですが、小説を読むのも好きで大学受験の際には文学部に行こうか理学部に行こうか迷っていたくらいです。高校時代には、どんなジャンルでも構いませんが、好奇心を持ってたくさん本を読んでほしいと思います。本を読むことにより自分の世界が広がり、自分のやりたいことや好きなことが何かを発見する手がかりが得られます。また、先生や友達といる話することも手助けになるでしょう。好奇心のアンテナを張って、いろんなことに挑戦してください。

に入る計算機は新たな発見と解析の道具として活躍していることを付け加えておきます。

## 身近に見られるカオス

実際にカオスがどのような場所に見られるのか、いくつかの例を見てみましょう。

感染症の伝播などを扱う反応拡散系というシステムがありますが、このシステムにおいて感染症が伝わっていく速さの波の先端(フロント波)の動きが、特別な感染メカニズムを仮定するとカオス的な振る舞いをします。反応拡散系は感染症だけでなく、生態学や化学反応の分野でもほとんど同じ式を用いますので、それらの分野にもカオスは見られます。

もっと身近な例を挙げましょう。水道の蛇口を絞ると、水滴がぼつぼつと垂れる状態になります。このとき、水滴が落下するリズムは非常に不規則です。これもカオスです。

もう一つ別の例で、パイこね変換というものを紹介します。これも写像の一つですが、そのイメージは経験的に理解しやすいと思います。パイ生地の一部においたバターを全体に均一に伸ばしたいときは、パイを二倍に引き伸ばしてから折りたたむという操作を繰り返すと、最初一カ所にあったバターが生地全体に行き渡っていきます。これもカオスの原理によるものです。

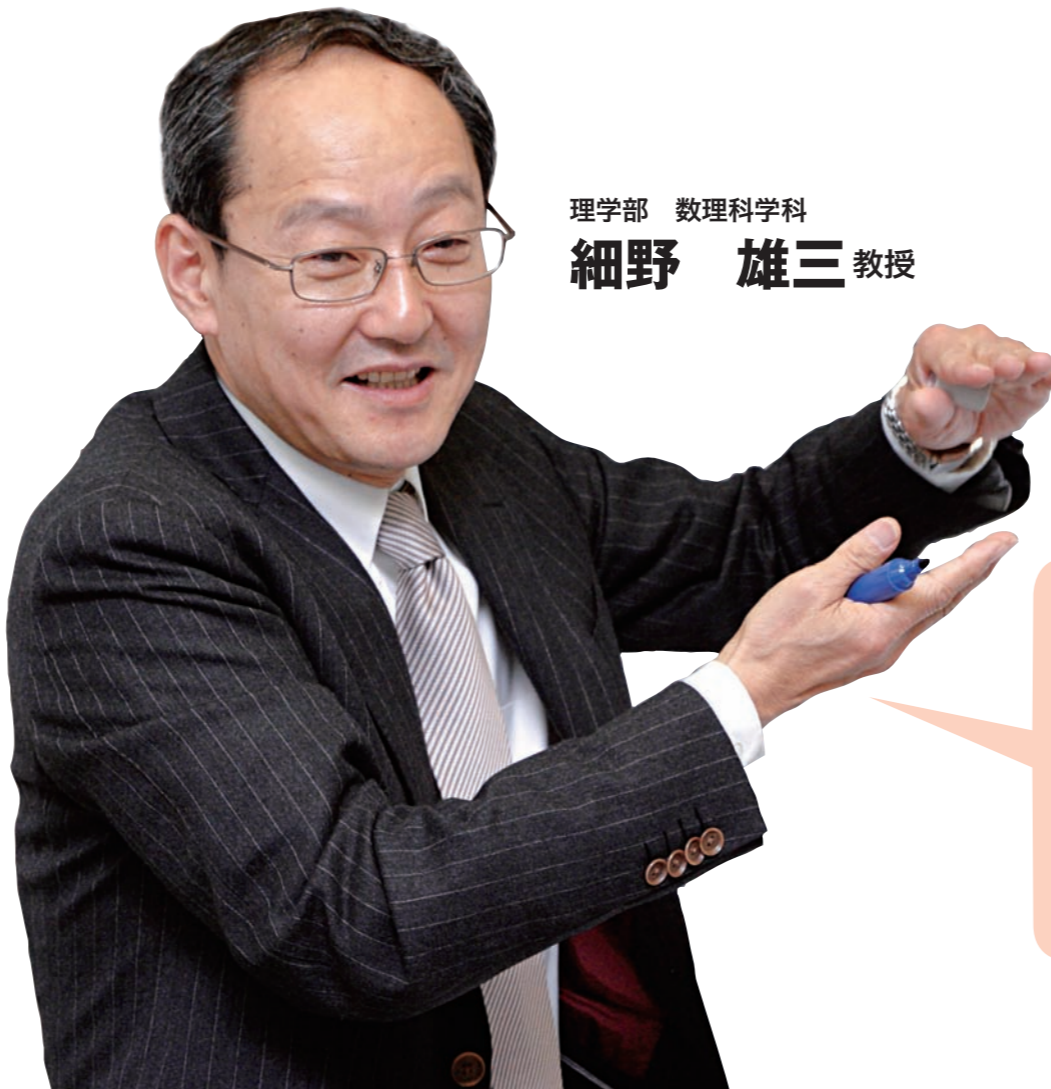
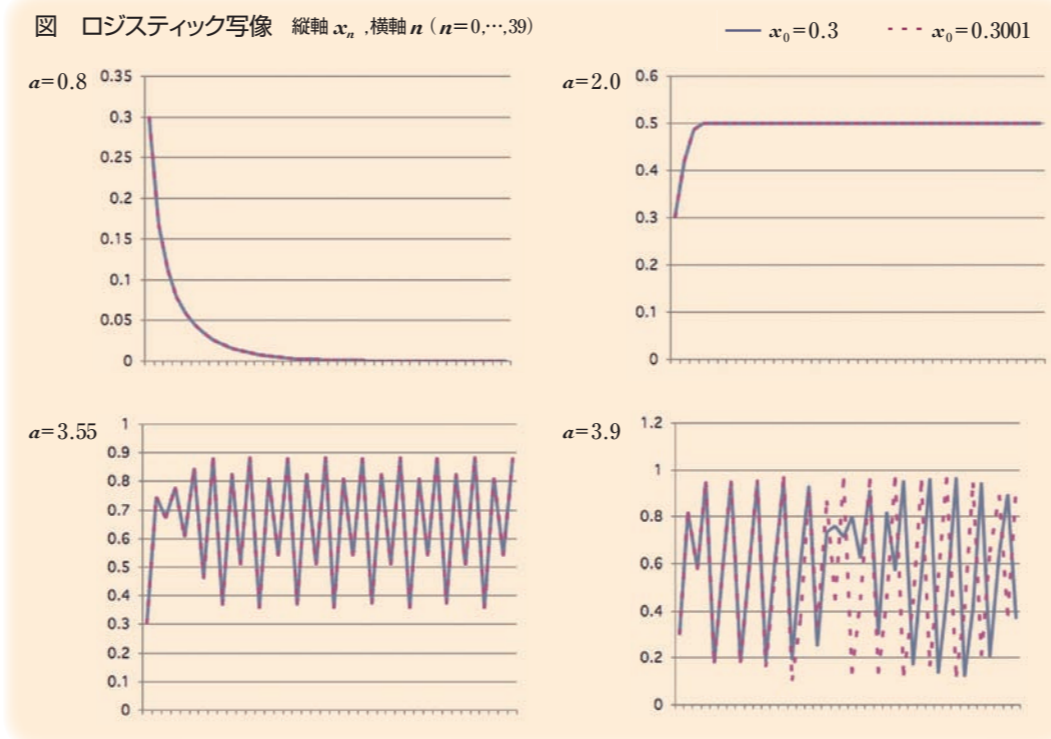
このように身近なところに見られるカオスですが、実はその数学的定義は人によって異なり、誰もが納得するような定義はまだ存在しません。ここまで述べてきたのは、あくまでカオスの特徴です。

新しい学問でありながら、世界観を一変させたカオス。今後、その更なる発展が期待されます。

## 決定論的世界と確率論的世界の橋架け

カオスはランダムとは異なりますが、そこにはある種の繋がりがあります。

コインを投げて表がでたらA、裏がでたらBとして、試行していくと、ランダムなAとBの文字列ができます。これは確率論的な世界の話で、一見カオスとは関係ないように見えます。ところが、このような確率論で定めた配列をカオスで再現することができるのです。ロジスティック写像のようにカオス的な振る舞いをする方程式には、 $x_n$  が  $0 \leq x_n \leq \frac{1}{2}$  を満たすときは  $A$ 、 $\frac{1}{2} < x_n \leq 1$  を満たすときは  $B$  と書くという規則を定めたとき、あるランダムな文字列を再現するような初期値が必ず存在する。つまり、正しい初期値さえ分かれば、1回目から未来永劫、表か裏かがコイン投げにより決定された配列と同じ配列が方程式により得られることになります。ただし、その具体的な値は誰にもわかりません。



理学部 数理科学科  
細野 雄三 教授

## あらゆる光を手がかりに

みなさんは「天体観測」というどのようなイメージを持っていますか? 「望遠鏡を覗いて遠くの宇宙を見る」というのが一般的なイメージではないでしょうか。このイメージは広い意味では当たっていますが、私たちが「見る」のは目に見える光ばかりではありません。目では見ることができない光も宇宙の姿を教えてくれる貴重な観測対象なのです。

光は、正確には「電磁波」と呼ばれ、波長によって性質が異なります。波長の短い方から順に大雑把には「γ線」「X線」「紫外線」「可視光線」「赤外線」「電波」とに分けられます。このように、目で見える光(可視光線)は電磁波のほんの一部にしか過ぎません。

## 光を分ける仕組み——分光器

望遠鏡に入ってきた電磁波を波長ごとに分ける装置が「分光器」です。現代の天文学にとっては、観測成果を大きく左右する重要な装置です。

電磁波を波長ごとに分ける仕組みは、高校物理で習う回折格子と同じです。回折格子は基板上に平行な溝がマイクロオーダーで周期的に刻まれている光学素子です。各溝を反射した(透過した)電磁波は、微小な波の集まりと見ることができますが、それらはお互い重なりあって干渉を起こします。この時、光路差が波長の整数倍に一致する条件を満たす方向の電磁波は互いに強めあうことができるので、電磁波はその方向

## 分光器の小型化が実現する「第2の地球」探し

観測装置の高性能化により天文学は飛躍的な進化を遂げています。X線や電波、赤外線など全波長域に渡る観測手法の確立や宇宙望遠鏡の登場などにより、太陽系外惑星の発見やダークエネルギーの存在の示唆、γ線バーストの正体の解明など、新たな発見が次々となされました。今や天文学にとって観測装置は、研究の成果をも左右する重要な要素です。ところが最先端の観測装置はどこかで売っているわけではなく、開発自体も天文学者が実施しなければならず、それ故研究分野の一つとして位置付けられています。イマージョン・グレーティングを使った分光器の開発に取り組んでいる池田優二先生に新しい装置の必要性と期待される新発見についてお話いただきました。

# 天文学の新たな目 イマージョン・グレーティング

のみに伝播することができます。伝播方向は波長によって異なるので、結果的に光を色毎に分ける(=分光する)ことができるというのが回折格子の原理です。なお、光路差は最短でも1倍の波長よりも長くなければならないので、赤外線などの長い波長を分光するためには、それに応じたより長い間隔の溝が必要になるということも分かります。(図1)

次世代の天体望遠鏡の口径は30m級で、現在主流の口径(8m~10m)から飛躍的に大型化します。大型化した分、そこで集めた電磁波を逃さずに分光するためには、分光器も相応に大きくする必要があります。これまで開発上の

ハードルとなっていました。

また、よりクリアに天体を見ることができ望遠鏡として、宇宙望遠鏡が開発されてきました。可視光以外の電磁波の多くは大気で吸収され、地上からの観測は困難です。地上から見た天体は、本来点源である星が☆というマークで表されるように、大気の影響でまたたいて見えています。ハッブル宇宙望遠鏡を始めとする宇宙望遠鏡は、大気という曇りガラスから解放された望遠鏡として、次々と新しい発見を成し遂げています。そうした望遠鏡に大型の分光器を取り付けて新しい発見を目指すことは天文学者なら誰もが考えることですが、宇宙望遠鏡は、地上から

ロケットなどで運び上げる必要があり、ロケットの輸送能力との兼ね合いから、分光器の大きさも制限されてしまいます。

## イマージョン・グレーティング

分光器の性能を変えずに小型化が実現できれば、前述の問題点はすべて解決されます。その技術が「イマージョン・グレーティング」と呼ばれるものです。

これは、回折格子に高い屈折率を持つ光学材料を用いることで電磁波の波長そのものを短く変えてしまう、という技術です。基本アイデア自体は回折格子を開発したドイツの物理学者・フラウンホーファー(Joseph von Fraunhofer, 1787-1826)まで遡るともいわれていますが、高

い屈折率を持ちつつ電磁波を通す光学材料を精製する技術や、それを活かすナノ単位の細かい溝を正確に加工する技術が近年ようやく確立し、日の目を見たのです。

電磁波が高い屈折率を持った物質を通り抜けると、屈折率の分だけ波長が短くなります。波長が短くなると、回折格子に狭い範囲に溝をたくさん並べることができ、小さな分光器でも多くの電磁波を分光する能力が実現できるのです。(図2)

高い屈折率を持つ光学材料として、シリコン(屈折率3.4)やゲルマニウム(4.0)、ガリウムヒ素(3.4)などが用いられています。これらの物

## 私立大学最大の1.3m望遠鏡を持つ天文台が始動

創立50周年(2015年)に向けたグランドデザインの一環として、2009年12月に「京都産業大学神山天文台(=神山天文台)」が完成しました。本年4月より本格稼働しています。

私立大学では国内最大(2010年3月現在)となる「荒木望遠鏡」(口径1.3mの反射式望遠鏡)と様々な観測装置、各種の実験・開発機器を設置。神山天文台の施設・設備を学内外の研究者や学生による第一線の研究・教育の場として提供し、広く地域の方にも開放しています。

質はもともと半導体の材料として見出され、精製方法などの研究が重ねられてきました。

波長が屈折率の分だけ短くなると、分光器全体では、縦×横×高さがそれぞれ小さくできるため、質量にして屈折率の3乗の小型化が可能になります。たとえば、ゲルマニウムでは4.0<sup>3</sup>で64分の1もの小型化が実現されます。

私たちが開発したイマージョン・グレーティングはアメリカが中心となって進めている30m望遠鏡(TMT計画=Thirty Meter Telescope計画)や、日本の次世代宇宙望遠鏡(SPICA)への搭載が高い確度で検討されています。特にSPICAは波長の長い赤外線観測が主な目的のため、私たちの装置が活躍してくれると思っています。

## 期待される新発見

イマージョン・グレーティングによって、観測精度は大幅に高まりますが、それにより、どのような発見が期待されているのかを紹介しましょう。

まず、「第2の地球」の発見が期待されます。惑星は自分自身で光を発しない「暗い星」です。そのため、ある恒星に惑星があるかどうかは、恒星のスペクトルの時間変動によって見分けます。恒星の周囲に惑星が回っていると、その影響で恒星が少しだけ振られます。恒星が振れることで、恒星から発せられた電磁波がドップラー効果を見せ、わずかながら波長が変わるのです。振幅は、太陽と地球の場合で1秒あたり数十cm程度と微小です。従来の精度では、木星ぐらいの大きな惑星(数十m/秒ほど振動する)しか見つけられませんでした。木星のような大きな惑星はガスでできていて、生物が住むのは難し



いでしょう。地球のように小さくて岩石でできた惑星を見つければ、そのなかに第2の地球が見つかるかもしれません。

次に、地球外生命の痕跡を見つけることが期待されます。生命活動に由来する分子(バイオマーカー)の存在は、赤外線によって捉えることができます。惑星や惑星のもととなる星間塵やガスから発せられる非常に微弱な電磁波であるため、従来の口径の望遠鏡に取り付けられた観測装置では観測が困難でした。バイオマーカーが発見されれば、地球外生命の有力な手がかりを捉えたことになります。

他に解明が期待されていることとして、自然界には100近くの元素が存在し私たちの世界を形づくっていますが、それらがどういった過程を経て、形作られてきたかということです。遠くの宇宙を観測することは「過去を見る」ということになります。さまざまな距離での天体とそのスペクトルに刻まれている元素の痕跡(吸収線といいますが)を調べることによって、宇宙における元素合成の年表を作成することができます。さらには、鉄などのある特定の吸収線の波長をさまざまな時代の天体に対してより精密に調べ、その変化を追うことで、我々が知っている物理法則が宇宙誕生からずっと同じものだったのかということまで確かめることができます。少しトリビアルな話に聞こえるかもしれませんが、一部の天文学者と物理学者は真面目に議論しており、もしそうした痕跡が見つければ、これは物理学の根幹を揺るがすような大発見になるでしょう。

ここで紹介したものはほんの一部にしか過ぎず、これら以外にもイマージョン・グレーティングには多くの新発見が期待されています。次世代望遠鏡を使って初めて明かされる、今まで見えなかった宇宙の姿はいったいどのようなものかとても楽しみです。

図1 回折格子

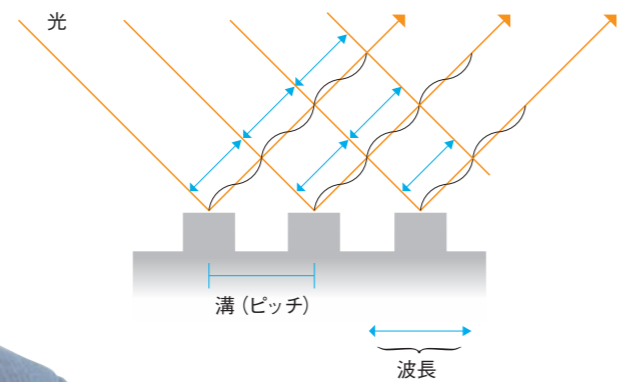
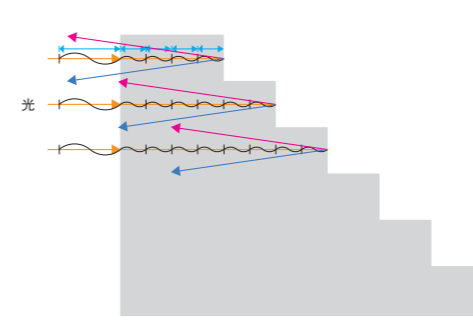


写真 イマージョン・グレーティングの試作品

図2 イマージョン・グレーティング



## アメリカの6.5m宇宙望遠鏡に立ち向かう日本の3m宇宙望遠鏡

次世代宇宙望遠鏡の分野では、世界各国が最先端技術を競い合っています。ハッブル宇宙望遠鏡で世界をリードしてきたアメリカはハッブルの後継機として「ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡」を2013年に打ち上げる予定。

対する日本は「SPICA」を2015年以降に打ち上げる予定となっています。ともに第2ラグランジュ点(地球と月の重力が均衡している点)に置かれます。望遠鏡の基本的な性能を決める口径ではジェームズ・ウェッブが6.5m、SPICAが3mと分が悪いの

ですが、SPICAにはイマージョン・グレーティングが搭載され、分解能ではジェームズ・ウェッブ望遠鏡に搭載される分光器を上回ります。また、赤外線の観測においてノイズとなる熱を取り除くため、6K(約-267°C)まで冷却する機能も備えられています。大きさを性能でカバーする——カミオカンデ※を彷彿とさせる話です。

※高い観測精度により世界に先んじて超新星からのニュートリノを観測した日本の装置。開発当初はアメリカの装置に大きさを負けていた。この業績により小柴昌俊先生がノーベル賞を受賞。

# 素粒子実験のアイデアで医療機器の常識を変える

## 低価格でかつ高解像度のPETを開発

最先端の医療機器であり、脳科学の実験に欠かせない実験装置でもあるPET。生きたままの身体の内부를リアルタイムに検査できるという優れた特徴があります。しかしながら、CTやMRIといった同種の検査機器と比べると普及が遅れています。その最大の原因は価格の高さ。しかも解像度を上げようとすればするほど高価になってしまい、より高い解像度が求められている次世代PETの開発へのハードルとなっています。原子核物理学実験の検出器から発想して、低価格化と高解像度化の両立を実現した竹内富士雄先生にPET装置の仕組みから次世代PET技術の要点まで詳しくお話をいただきました。

### PET装置は原子核物理学実験そのもの

現在、最先端の医療や脳科学の実験において、PET（陽電子放射断層X線写真法：positron emission tomography）による生体内部の検査は欠かせないものとなっています。それは、PETがCTやMRIといった他の生体内部を検査する方法とは一線を画する特徴を持っているためです。CTやMRIが生体内部の「状態」を映し出す検査方法なのに対して、PETは体内のどの部分が糖を消費しているのか、といった体内の「機能」を映し出すからです。

PETが先端医療や脳科学実験で用いられる主な理由として、糖を大量に消費するガン細胞を発見しやすいこと、生きた脳細胞の活性部分をリアルタイムに検出できることが挙げられます。そのため、先端医療や脳科学研究に欠かせないものなのです。

PETの検査方法に使われる技術は原子核物理学の実験そのものであり、物理学の研究や教育と非常に相性がよいものでもあります。

私の本来の研究テーマは高エネルギーの核物理学実験ですが、実際に実験装置があるスイス・ジュネーブには、年に2ヶ月間ほどしか行くことができませんので、日本にいる間にできる研究として、核物理学技術の医学への転用を考え、PET装置の開発に着手したのです。

### PETはどのように生体内部を検査しているのか

それでは、具体的にPETがどのようにして生体内部の機能を検査しているのか見ていきましょう。

PETによる検査を行うため、陽電子を放出する物質を体内に注射などで注入します。このとき、陽電子を放出する物質は糖などにくっつけておきます。糖はガン細胞や脳細胞の活性化している部分などで大量に消費されるため、糖が消費された部分で陽電子が放出されます。陽電子はすぐさま近くの電子と対消滅を起こし、2本の $\gamma$ 線を発します。2本の $\gamma$ 線はそれぞれ正反対の方向に飛んでいきます。この $\gamma$ 線源を特定できれば、体内のどの部分で糖が消費されたかが分かるのです。

ところが $\gamma$ 線は目で見ることができません。そこで $\gamma$ 線を検出するために、シンチレータ結晶と呼ばれる物質を用います。この結晶は $\gamma$ 線が当たることで微弱ながら可視領域の光を発生します。人体から発せられる $\gamma$ 線では、結晶は2通りの光り方をします。

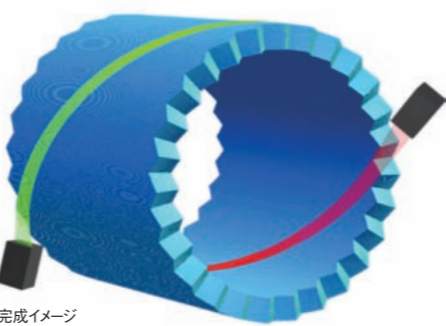
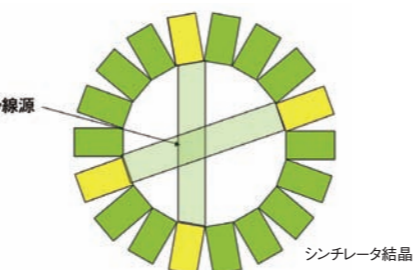
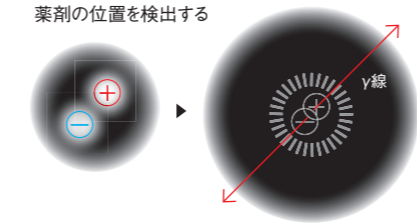
1つは、 $\gamma$ 線が当たることで結晶中の電子が光電効果（光電吸収とも言う）を起こし、深く束縛されていた電子が放出されます。このとき、放出された電子が結晶中を移動することで周りの電子がはじき飛ばされ、そのエネルギーの一部が光として放出されます。シンチレータ結晶は $\gamma$ 線を可視光線に変換するだけでなく、1個の光子（ $\gamma$ 線）を多数の光子（可視光）に増幅させる役割も担っています。

もう1つは、結晶中のほぼ自由な電子によって $\gamma$ 線がコンプトン散乱（コンプトン効果とも言う）を起こし、はね飛ばされた電子が結晶中を移動することで、結晶が光るというものです。

検査に用いたいのはおもに光電効果による光です。コンプトン散乱では電子に当たった $\gamma$ 線が散乱されて散乱の起った点から不規則に離れた結晶を光らせてしまい、 $\gamma$ 線の入射位置を正しく見分けるのに邪魔になるからです。光

#### PET $\gamma$ 線源検出方法

- 陽電子と電子の対消滅
- $\gamma$ 線が正反対方向に二本出る
- それを何度もとらえることによって薬剤の位置を検出する



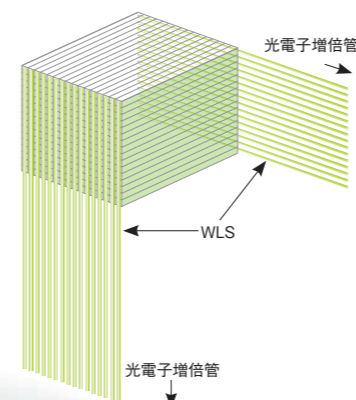
完成イメージ

電効果は結晶の原子番号の5乗に比例する一方でコンプトン散乱は結晶の原子番号に比例して起こります。このことから原子番号が大きいほど光電効果の比率が高く、シンチレータ結晶にはなるべく原子番号が大きい材質が使われています。

どのような材質を使ってシンチレータ結晶を作るのか、ということも世界中で激しい競争が繰り広げられている分野です。理想的なシンチレータ結晶は、実効原子番号が大きく、密度が高く、透明であり、へき開（特定方向への割れ易さ）がなく、潮解性（湿気を吸って解ける性質）がなく、コストが低いなどのすべての条件を満たしたものです。日本では日立化成工業が開発したGSOなどが有名ですが、世界では東欧圏、中国といった国々が開発競争をリードしています。

### 安価でかつ解像度を上げるアイデアはCERNの実験室にあった

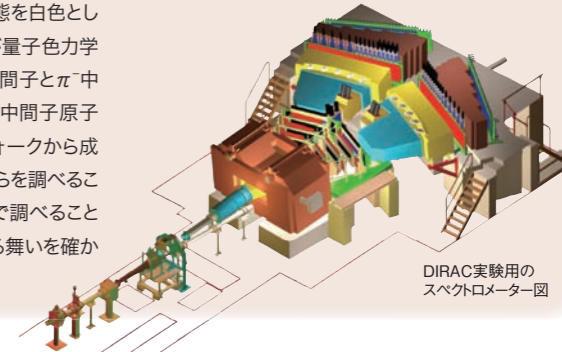
生きたまま体内の機能を映し出せるPETですが、医療現場への普及はCTやMRIと比べて遅れています。最大の理由は価格の高さで、



### CERNでの実験

私が現在CERNで行っている実験は、「DIRAC実験」と呼ばれています。これは、量子色力学検証のため、風変わりな原子のとても短い寿命を測る実験です。陽子や中性子を構成する3つのクォークは「強い相互作用」によって結びついていますが、これらのクォークの性質を、3つが合わさった状態を白色として、光の三原色に例えて説明する理論が量子色力学です。寿命を測る対象となるのは、 $\pi^+$ 中間子と $\pi^-$ 中間子や、K中間子と $\pi$ 中間子から成る二中間子原子です。 $\pi$ 中間子やK中間子は、2つのクォークから成り、非常に短い寿命を持っています。これらを調べることでクォークと「強い相互作用」の今まで調べることができなかったエネルギー領域での振る舞いを確かめているのです。

この実験における一番主要な検出器として、シンチレーティングファイバーにクリアファイバーライトガイドをつなぎ、位置検出型の光電子増倍管で読み出す仕組みを考案しました。この検出器の仕組みを応用することで次世代PETのアイデアが生まれたのです。



DIRAC実験用のスペクトロメータ図

1台数億円もします。そのため、PET装置の普及には検査性能を低下させずに低価格化を実現することが不可欠です。PETが高価になる最も大きな原因は組み込まれている多数の光電子増倍管です。そのため、光電子増倍管の数をいかにして減らすかが、低価格PET実現への鍵でした。

問題を解決するアイデアは欧州CERNの実験室にありました。※1 そのアイデアというのは、いくつかのシンチレータ結晶を1本のWLS（Wave Length Sifter※2）にまとめてつなぐことです。従来のPET装置では、1つのシンチレータ結晶に対して1つの光電子増倍管が組み合わされており、結晶の数を増やして解像度を上げようとするともつとなく高価になっていました。しかし、結晶をまとめてWLSにつなげれば光電子増倍管の数は結晶の数の平方根の2倍まで減らすことができます。よって結晶の数を増やしても、それほど光電子増倍管の数が減らないため、小さな結晶をたくさん使うことができ、解像度を上げることができるのです。

### 次世代PETの水準を実用化へ

私たちが実証実験用に作ったプロトタイプでは、1mm×1mm×20mmのシンチレータ結

晶を256個並べた物で、それを2個使っています。それにより、1mm（半値幅）の位置の差を見分けることができます。ちなみに従来のPETでは3mm～5mm（半値幅）です。そのために必要な光電子増倍管は $\sqrt{256} \times 2$ の32個で、実際には16チャンネルの光電子増倍管を1個につき2つ使っています。

私たちのプロトタイプは今のところ小さな物で、検出効率こそ医療現場が求める水準に達していないのですが、位置分解能についても時間分解能についても、放射線医学総合研究所が開発目標とする「次世代PET」の水準をクリアしています。しかも低価格化も実現することができます。

今後、結晶の数を増やし、エレクトロニクス面での改良を加え、検出効率を高めていき、実用的なものと考えていくつもりです。できれば2010年度中には実証のためのプロトタイプを実現したいと考えています。

※1 コラム参照。

※2 シンチレータ結晶が発するわずかな光を伝えるため、結晶にWLSという特別な光ファイバーをつなぐ。WLSの先は光電子増倍管に接続され、微弱な光の量をデータとして取り込めるように、電気信号に変換、増幅している。さらにアンプによっても増幅させる。

コンピュータ理工学部  
コンピュータサイエンス学科  
**竹内 富士雄** 教授

#### PROFILE

理学博士。専門は原子核物理学。東京大学大学院生の時にフランス政府給費留学生としてオルセー・ジョリオキュリー研究所へ。1974年にドイツ科学技術省の意向でCERN（ヨーロッパ合同素粒子原子核研究機構）に。国際共同研究の中で重要な検出器の開発研究者として活躍。1977年より京都産業大学教授。コンピュータ理工学部開設に伴い現職。もともと物理が他の教科より飛び抜けて好きだったこともあったが、そのシンプルな美しさに惹かれて原子核の分野へ。とにかく面白く感じた分野なので、食べる手段についてはあまり考えなかったという。趣味はクラシック音楽。東京教育大学附属高校OB。

### 研究室の大学院生が活躍

次世代PET装置の実証実験では大学院生が活躍しました。竹内富士雄研究室の青垣総一郎さんは、この研究で博士号を取得し、今春から京都産業大学の特約講師に就任しました。青垣さんは、学部ではコンピュータが専門でしたが、大学院で竹内先生の研究室に入りました。竹内先生によると「今後はCERNでの実験にも参加してもらおう」とのことです。ますますの活躍が期待されます。



## なにげなく携帯電話を使っているけれども……

主要な都市であれば、日本中どこにいても簡単に電話をかけた、メールを送受信したりすることができる携帯電話。今や累計で1億台以上が普及して、持っていない人を探すほうが難しいぐらいです。多くの人が普段なにげなく使っている携帯電話ですが、ちょっと立ち止まって考えてみてください。

携帯電話は、固定電話のように電話線をつながっているわけではないのに、空間的に広がるはずの電波が混信することなく、自分宛の電話やメールだけを着信できるというのは不思議なことではないでしょうか？

また、電波は何もない宇宙空間のようなところでは直進することができますが、ビルがたくさん立ち並ぶ都心では、壁に当たって反射します。そのため、携帯電話は、まっすぐに飛んできた電波と反射して遅れてきた電波（遅延波）との両方を受信することになります。それでも、問題なく通話やメールの送受信ができるのも不思議なことに思いませんか？

さらに、電波にはアンテナの位置によって受信しやすい場所、受信しにくい場所が出てきます。テレビなどのようにあらかじめ電波状況のいい場所を探してアンテナを固定することができます。携帯電話は、どうやって一定の通話品質を保っているのでしょうか？

私たちがなにげなく使っている携帯電話は、上記のような数々の難題をクリアして実用的な技術へと発展してきたのです。

## 電波を有効利用するために——第2世代と第3世代

電波を混信させないもっとも基本的な方法は、周波数によって分けることです。ラジオやテレビのチャンネルがこの方法によって分けられています。それぞれのチャンネルごとに別々の周波数を使うことで混信を避けているのです。携帯電話でも第1世代と呼ばれる自動車電話が主体であった時代には、周波数によって個々の通話を判別していました。

しかし、この方法には限界があります。それは、利用できる周波数には限りがあるからです。意味のある情報を送るためにはある程度の

### PROFILE

工学博士。専門は移動通信、電波伝搬。京都大学大学院を修了後、電電公社（現在のNTT）横須賀電気通信研究所で衛星通信の研究に従事し、京都大学工学部勤務を経て、1994年に京都産業大学へ着任、現在に至る。子どものころからアマチュア無線に興味があり無線装置を自作していた。まだ携帯電話がなかった時代から移動通信の研究に携わり、屋内での遅延波を高い精度で測定する研究に取り組んでいる。京都府立乙訓高校OB。

周波数の幅（周波数帯域）が必要であり、一定数以上に利用者を増やすことができないのです。一方向への通信であるテレビやラジオであれば、局を増やせなくても利用者はあまり困りませんが、双方向通信である携帯電話にとって、通話ができる人数の制限は致命的な問題となります。

そこで、第2世代ではTDMA（時分割多重接続：Time Division Multiple Access）方式という方法が新たに開発されました。TDMA方式では、圧縮した音声やデータをずらして送信し、受信側で圧縮したデータを復元するという方法を使うことで、1つの周波数を

複数の利用者で共有することを可能にしました。

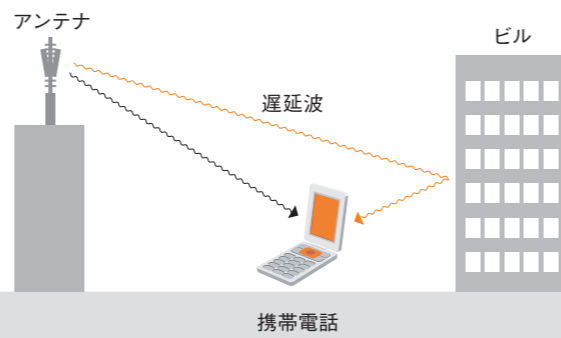
さらに、近年話題となった第3世代にはCDMA（符号分割多重接続：Code Division Multiple Access）方式が導入されました。「拡散符号」と呼ばれるコードを、元のデータに掛け合わせることで、同じ周波数で受信しても元の拡散符号と同じ符号を使わなければ意味のある情報として復号できないようになっています。利用者ごとに拡散符号を変えておけば、複数の利用者が、時間を分けることなく同時に、1つの周波数帯域を利用することができるのです。

# 電波を知れば 携帯電話の未来が見える

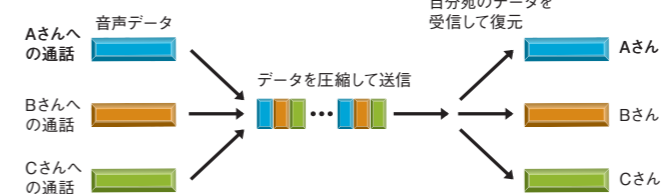
## 携帯電話は無線通信技術の粋

電波を利用した通信技術はもはや私たちの生活にとってなくてはならないものになりました。古くはラジオやテレビの放送から、現代の携帯電話、通信衛星による通信システム、無線LANなど、目には見えない電波がたくさんの情報を運んでいます。今、この瞬間にも、みなさんの周囲には情報を伝えるための電波が飛び交っています。特に携帯電話には電波を使った通信技術の中でも最先端の成果が詰め込まれています。電波の伝搬特性についての研究がご専門の竹内勉先生に、携帯電話を中心とした無線通信技術についてお話いただきました。

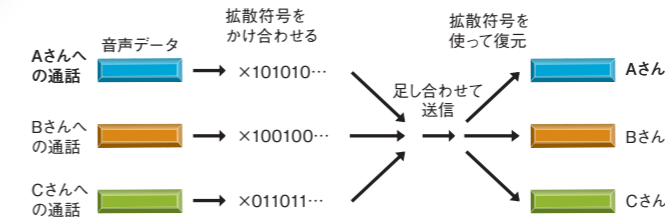
遅延波のイメージ



TDMAのイメージ



CDMAのイメージ



コンピュータ理工学部  
ネットワークメディア学科  
**竹内 勉** 教授

### ADVICE

通信や無線の分野に興味があるのなら、基本的な物理と数学の知識は欠かせません。特に、確率・統計や複素数の計算、電気分野が重要です。研究を行うための基礎になるのは、物理・数学の「感覚」——法則や数式について感覚で理解できることです。この感覚は通信や無線の分野に限らず、みなさんの将来にとっても、学んでおくべき基本的なことだと思います。入試に必要なことにかかわらず、広く正しく物理と数学を学んでおいてください。

## 第4世代携帯電話は大きな変革になる

現在、第3.5世代や第3.9世代の携帯電話が登場し、いよいよ第4世代へ向かう転換期に差し掛かっています。

しかしながら、第4世代とは何かというと、具体的にはほとんど決まっていない状態であり、世界中が納得するような決定的な革新技術は出てこないと思われます。重要な決定がなされないまま「第4世代」という言葉だけを先に打ち上げて、実態は後から作り上げていこう

アンテナの位置によって受信状況が変わる問題に対しては「ダイバーシチ」という技術が使われています。ダイバーシチとは、複数のアンテナを使うことでいずれかのアンテナが電波状態のいい場所に置かれる可能性を高め、装置全体では常に電波を強い状態に保とうとする技術のことです。第2世代の携帯電話には2つのアンテナが組み込まれています。携帯電話に使われる電波は波長30cm程度なので、1つ目のアンテナから15cm離れたところに2つ目のアンテナがあると波長の半分、7.5cm離せば波長の1/4離れていることになります。波長の数分の1離れている位置にアンテナがあると高いダイバーシチの効果が得られる可能性があります。

## 電波は誰のもの？

あらゆる無線通信に使われている電波ですが、電波はそもそも誰のものでしょうか？ みなさんの中には「電波は物理現象なのだから誰のものでもない」と考えている人もいるかもしれません。ところが「自作の無線通信機を作ったから今日から無料で携帯電話かけ放題だ」とはならないのです。

電波は携帯電話のみならず、航空通信や船舶通信、レーダーなどさまざまな目的で利用され、それぞれに使うことができる周波数が定められています。定めるのは日本では総務省です。総務省のホームページには使用状況も掲載されています。

つまり、電波は国民全体の共有資源であり、その割り振りをしているのが総務省なのです。一般の人が使える周波数もありますが、電波を使うためには電波利用料を支払わなければなりません。アメリカやヨーロッパでは周波数の使用者をオークションで決めたこともありました。

2011年のアナログテレビ放送の終了によって、それまでアナログテレビに使われていた周波数の枠が空くことになります。この枠がどう使われるか、非常に興味のあるところです。

という方式で進められています。

ただ、明らかなことが2点あり、1つは、IP（Internet Protocol）化の流れ、もう1つは次世代規格に対する中国の影響力の増大です。

携帯電話がIP化することによって、利用者にとっては、インターネットへの直接接続や無線LANとの連携といった携帯電話の利用方法が大きく広がるメリットがあり、運営側にとっても、すでに進んでいる電話網のIP化を回線の末端まで行き届かせることで、運営コストを低減できるというメリットがあります。もちろん、セキュリティ面や下げざるをえない通話料金で携帯電話会社の経営が圧迫されないのかといった問題もあります。

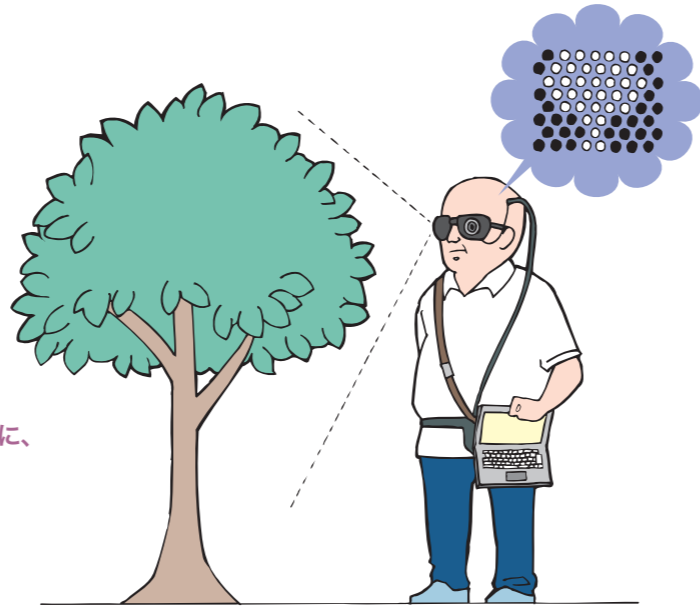
また、日本が第4世代携帯電話の規格を定めたとしても、今後、世界で最大の市場となる中国の動向によっては、その規格自体が無意味なものとなる可能性があります。私たちの考えている第4世代携帯とは無関係に、中国が定めた次世代規格が第4世代となることも大いにあり得ます。

第3世代を決めるときにも世界中で意見が割れて、混乱がありました。ヨーロッパでは第3世代すら定着していません。使えるのが当たり前という状況に慣れてしまうのではなく、電波を使った通信の将来について、一度考えてみる必要があります。

## ブレインマシンインターフェイス (BMI) で究極の福祉機器を

考えただけでレバーもなしで動くウェブ上のキャラクターや、考えたことがそのままマウスやキーボードなしで入力できる装置、またカメラやセンサーの情報を直接脳に入力して視覚などの感覚を再生するシステムなど、脳と機械を直接結び、ブレインマシンインターフェイス (Brain Machine Interface : BMI) の研究が進んでいます。

[生き物は外界と相互に影響を与え合うことでそのありようを変えていく] という考えに基づいた新しいタイプのBMI研究に取り組む赤崎孝文先生に、その可能性についてうかがいました。



# 人間の意志を直接機械に伝えられたら

### 人と機械の関係を考え直してみよう

最近、大型クレーンの倒壊事故をよく耳にします。たしかに牽引力が強くなり大型化はしていますが、昔に比べれば操作はずいぶん簡単になったはずですから不可解です。一因として、機械の性能は上がったものの、操作する人間の感覚がそれに追いついていないことが考えられます。人間は本来、自分が倒れそうになると反射的に姿勢を立て直すものですが、機械にはその状況を操縦者の体に伝えるシステムがありません。これは、高性能が売り物の自動車で起きたアクセルやブレーキの不具合問題とも、似たところがあるかもしれません。よく考えてみれば、科学技術が急速に進歩し、機械と接する環境が目まぐるしく変わる中で、人はまだ一代しか生きておらず、機械との関係に適した体には進化していないのです。

それでは、センサーや計器の種類や数を増やし、危険についての情報をもっと人に知らせるようにしたらどうでしょう。恐らくそれでも、危険をすべて回避することはできないに違いありません。というも、見たり聞いたりしたことに単純に体が反応するためには0.1秒から0.2秒程度の時間はかかってしまう※1上に、機械の表示を理解し、操作するためにはさらにコマ数秒以上の時間が必要となり、普通に体を動かすための数倍の時間がかかってしまうからです。このタイムラグは、どんなにトレーニングしても0にすることは困難です。

このような人と機械の関係、現在の多くのインターフェイスの持つ問題は、タイムラグを埋められないというだけでなく、本来は人が使うはずの機械に人が使われていることも明らかにし

ています。人が《慣れ》を強要されていて、慣れることができないことが《制御できない》ことにつながり、事故が引き起こされていると考えられるからです。とはいえ、機械との生活を全く否定することのできない今日、人と機械が積極的に情報交換し、有機的に結びつく方法を早急に確立していく必要があると思います。これまでの、ディスプレイで見せてレバーやキーボードなどで入力する方法に代わるインターフェイス、本質的に人にとって使い勝手のよい方法、仕組みの構築が急務ではないでしょうか。

※1 大脳生理学では、ディスプレイを見て脳が判断して手を動かすまでに200ミリ秒(5分の1秒)かかることとされている。他人に1000円札を落としてもらって、落ち始めたのに合わせて指でつかんでみよう。ほとんどの人は掴むことはできないはずだ。お札の落下に必要な時間は、物体の自由落下の式で計算できる。この時間がものをみてから体が動くまでの時間=反応時間である。

### BMIへ高まる期待

そこで注目されているのが、脳の神経活動を変換し、それで直接機械を動かしたり、直接脳に情報を送り込むことができるBMIと呼ばれる技術です。

私が実現したいBMI技術は、機械に合わせて入力方法や表示方法に変換するために、人が操作方法について理解してトレーニングしなくても誰でも同じように動かせるものです。脳から直接、機械に伝えることで、脳から指令が出て筋肉が動くまでの時間も短縮できます。機械の情報を脳に伝える場合でも、機械が表示しやすい方法をとらなくても、直接信号を伝えることができます。

現在BMIには、このような脳の情報直接、機械に送るもの(脳からの出力系)と、機械の情報を直接、脳に送るもの(脳への入力系)と

があり、健常者のための機械の操作だけでなく、障がいを持つ人々のための福祉機器への応用や、そのダイレクトな操作感からゲーム、アミューズメントの分野へと研究の裾野が広がっています。

私がテーマにしているのは福祉機器の分野で、目の見えない人のために外界の情報を直接脳の視覚野に入力し、それを知覚させようという試みです。出力系では、ロボットアームなどをはじめ、事故で脊髄を損傷して体が動かなくなった人のために、自分が思ったように体を動かせるような装置などの実用化を目指す研究が進んでいます。これらの研究を組み合わせることで、たとえば、運動のリハビリでは、理学療法士もしくは補助具によって、体を動かすタイミングに合わせて、体が動いたことを視覚・感覚を通して脳に伝えることが有効であることが分かかってきていて、より効果の高いリハビリの手段としてもBMIには高い期待が寄せられています。

コンピュータ理工学部  
インテリジェントシステム学科  
**赤崎 孝文** 准教授



### 脳科学とコンピュータテクノロジーが支える

BMIを支えているのは、テクノロジーとコンピュータ、それに脳科学の進展です。今から約20年前、カメラで外界の画像を撮り、コンピュータで処理した電気パターンで、直接脳の後方にある視覚野を刺激して、目の見えない人に画像を認識させようという研究が行われました(図)(c.f. William H. Dobbelle)。結果は残念ながら失敗で、現実とはまったく違う像がわずかに認識されただけでした。機械的に刺激しただけでは、脳はきちんと認識できないことがわかったのです。この研究は目的を達することなく終了しましたが、人の脳での視覚情報の処理については多くの人がその後日々研究を進めてきました。

人間は視覚に頼っている生き物で、みるという行為のうちの《知覚》を処理するだけでも、数百億あると言われている大脳皮質の神経細胞のうちの何十億個が関わっています。さらに、みたものが何なのかを《認識》する場合は、脳のほぼすべての細胞が関わっているといっても過言ではありません。ですから、それら一つ一つの細胞をすべて調べることは現在の技術をもってしても不可能に近いことですが、脳の活動をイメージとして大局的にリアルタイムに見る技術——脳の電気活動である脳波や、

脳活動に伴う代謝に関係する脳血流を皮膚の上から様々な方法を使って調べることで、膨大な新しい知見が得られるようになってきました。もちろんこの間のコンピュータ技術の飛躍的な進展も、大きく寄与していることはいうまでもありません。特にここ10年では、脳神経細胞は1個1個がまちまちに働いているのではなく、一定の場所に集まっている細胞集団が、ある程度協調して働いていることも分かってきました。

こうした成果を受けて、出力系では、今後10年ぐらいでかなりのことが実用化できる目途が立ったと私は考えています。一方、入力系では、機械的な信号が脳へ入ってきた後にどうなるかがまだよくわかっていません。外界の物理信号をどのような仕組みでどのようなフォーマットで脳に送れば、ごく自然な情報として脳は処理できるかを知ることが課題とされていて、実用化については今後数10年のスパンで考えなければいけません。

### 100km先まで手が伸びる!? ロボットアームから探るBMIの可能性

現在、学生と共同で、筋肉の動きに伴う神経活動を利用してロボットアーム(マニピュレータ)を制御する研究を行っています。筋肉を動かす神経活動を用いることは厳密には"Brain" Machine Interfaceではありませんが、脳から筋肉に送られた神経活動をコンピュータで処理し、どうすれば意のままに操作できるか、よりなめらかに動かせるかなどを研究しています。また、多くのロボットアームは、硬い障害物に当たっても力を制御できず、それを押し倒し

### PROFILE

博士(医学)。子どもの頃、医師から「網膜に異常があるので、大人になったら目が見えなくなりますよ」と宣告されて以来、一貫して自分と同じような障がいを持つ人のために目の代わりをする装置を作ることに関心を持ち続けてきた。脳の機能に異常はないものの筋肉が次第に萎縮し、体を動かすことが困難になりコミュニケーションも取れなくなっていく筋萎縮性側索硬化症の患者のために、まばたきを含む筋肉の動きや呼吸、脳波などを利用して文章を作成する意志伝達装置「目で打つワープ」を開発するなど、福祉の分野からBMIの研究を続けている。国立八代工業高等専門学校OB。

### ADVICE

脳科学は、いまや様々な分野からアプローチされている複合的で学際的な学問領域です。最近では工学や心理学はもとより、神経経済学や神経倫理学などといわれるように、人文・社会学系からのアプローチも盛んですから、自分の関心のある分野から入ってみることも十分可能です。私はもともと工学部出身で、修士課程では主に福祉工学について研究していました。しかしある時、工学的なアプローチだけではうまくいかないことがわかり(本文参照)、博士課程で医学の研究分野へ進みました。私の所属していた研究室は、工学的なバックグラウンドを持った人や、脳の仕組みのモデル化のために数学的に記述できる人を募集しており、私の持っている技術が歓迎されたわけです。ところでその研究室との出会いは、まったくの偶然によるものでした。最初に訪ねた研究室では、訪問した日が博士課程への出願の締切日だったことを知らされたのですが

たり壊したりしますから、それを防ぐのにロボットアームから体に情報が戻ってくるような感覚フィードバックシステムの研究にも挑戦しています。現在はインターネットを介して100km離れたところでもロボットアームを操作することが可能です。もし感覚フィードバックを有する遠隔ロボットアームの操作が可能になり、人が100km先のものでも、それを自由に制御でき体の一部と感ずることができると、人が自分の体をどのようにとらえるのかなど、脳科学にとってもきわめて興味深い実験ができると考えています。

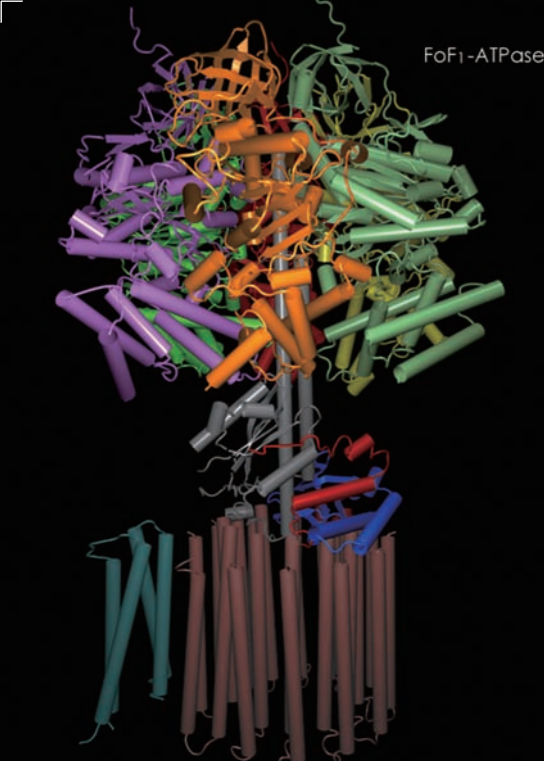
そもそも動物が道具を使っている時には、その先までが自分の手であるように脳は錯覚していると言われています。※2 また心理学でははもともと、人は道具に慣れると、自分の手がそれだけ伸びたかのように錯覚すると言われています※3から、人間の脳もおそらく同じような働きをするのではないかと考えられるのです。

このような仮説を突き詰めていくと、脳活動とコンピュータ上の画像を結びつけてそれを思いどおりに動かせたとすれば、人は体を動かしていなくてもそれらを自分の一部として認識できるということになるかもしれません。同様に入力系では、もし外界のイメージを直接脳に送りこむことのできる人工的な感覚器※4ができれば、目などに障がいのある人にとってはまさに究極の福祉機器となる一方、感覚器をつけた本人には脳が理解している外界が偽物なのか、本物なのか区別がつけられないのではないかと問題も出てくるでしょう。BMIの研究が進めば進むほど、人間とは何か、認識とは何かという永遠のテーマに、私たちは何度も何度も向き合わなければならなくなるに違いありません。

※2 パーソナルエリアと呼ばれる自分の手で扱える範囲が、道具を持つと広がるのが、空間情報を把握するのに関連する動物の神経細胞活動レベルで確かめられていて、人間にも同様の細胞があると考えられる。  
※3 たとえば片手を失った人がいつまでも失った手の痛みを感じる《幻視》という現象が知られているが、鏡に映った手を見ることにより、なくした手と勘違い(!)することで痛みが消える例が報告されている。  
※4 人間には五感—視覚、聴覚以外にも味覚、嗅覚、体性感覚(体を触られるという感覚)がある。今のところ匂いも機械では再現できないし、触られたという感覚も何かの装置を介さない限り人力できない。BMIの今後の課題といわれる。

(単なる私の調査不足)、帰る前にたまたま紹介されたこの研究室で、とりあえず研究生としての道が開けたのです。これはまさに人と人との出会いのなせる業です。最近は何でもメールで済ませるような風潮がみられますが、振り返ってみると、つくづく人と人が会って話をするのがいかに大切かを感じます。

また、電子化、情報化が進んだことで、自分で直接触れたり、動かしてみる経験はどんどん減っています。しかし、生物(いきもの)としての人間は自ら考えて動く生き物です。読む、聞くだけでなく、現実の世界で体を動かして何かを実践し、それを自分の体験、経験として蓄えてほしいと思います。また当たり前のことですが、周りを見て今、社会では何が必要とされているか、何が真実なのかを考え、それを見極める目も養ってほしいと思います。



FoF1-ATPase

ATP合成酵素の構造

### 全ての生物のエネルギー通貨

ATP（アデノシン三リン酸）とは、生物に必要な不可欠なエネルギーの供給源です。植物もバクテリアも、全ての生物はこのATPという小さな分子をADP（アデノシン二リン酸）とリン酸に加水分解することで生まれるエネルギーによって活動しています。運動はもちろん、細胞の中のいろいろな化学反応を進行させる、嗅いや味を感じる、あるいはDNA（遺伝子）の複製まで、あらゆることにATPは用いられます。いわばエネルギーと交換できるお金のようなもので、エネルギー通貨と呼ばれることもあります。

ATPが分解されて出来たADPとリン酸は、食べ物を燃焼して得られるエネルギーによって再びATPに合成されます。人間の体内にはわずか数10グラム、約3分間分のATPしか存在しませんが、常時使っては合成しているので、一日に作られるATPは体重に相当する量になります。

このATPはATP合成酵素※により作られますが、そのメカニズムについては大きな謎でした。これに対して画期的な仮説を立てたのがポール・ボイヤー（Paul Delos Boyer, 1918-）です。彼は、ATP合成酵素は回転していると提唱しました。このアイデアはあまりに常識破りであったため、長い間、学界では相手にされませんでした。しかし、ボイヤーの考えは実際には正しいものだったのです。そして彼の説を裏付けたのが、世界で初めて回転するATP合成酵素を観察することに成功した私たちのグループだったのです。

ATP合成酵素に関する研究は大変重要なものであり、1997年秋にボイヤー、ウォーカー、スコウの3名はノーベル化学賞を受賞しました。私たちもノーベル賞に迫っていたと思

いますが、ノーベル賞は3人までにしか与えられませんから、4人目の候補だったのかもしれませんが。

※酵素はタンパク質の一種。触媒の機能を持つ。

### 回転するATP合成酵素

人間の場合、ATP合成酵素はミトコンドリアの内膜にあり、水素イオンの流れによってATPを作っています（図1）。その仕組みを、水力発電を例にとつて説明しましょう。

# 生き物のエネルギー通貨を生み出すナノモーター

## ATP合成酵素の回転運動を世界で初めて観察

### エネルギー通貨を生み出すナノモーター——ATP合成酵素

私たちが普段活動するのに使っているエネルギーは、一体何がもたらしているのでしょうか。その答えは、細胞内にあるATPという分子にあります。人間を含め、あらゆる生物のエネルギー供給源となるATP、それを作り出すのが、ATP合成酵素です。そのATP合成の具体的な仕組みは謎に包まれていましたが、近年になってその詳細が判明してきました。意外なことに、ATP合成酵素は回転していたのです。人間が水車を発明するよりも、はるか昔から存在していたナノモーター。世界で初めてATP合成酵素が回転していることを観察した吉田賢右先生に、お話をうかがいました。

総合生命科学部 生命システム学科

吉田 賢右 教授

#### PROFILE

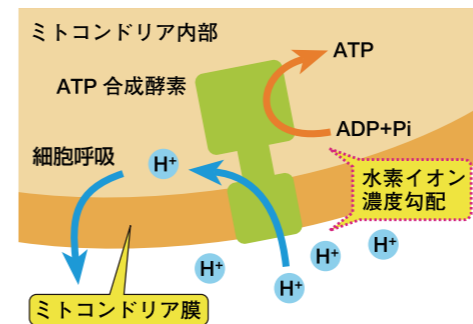
理学博士。幼いころから漠然と生命に関心を持ち、東京大学理学部生物化学科に進学する。同大学院理学系研究科生物化学専攻博士課程修了。昔から好奇心が強く、わからなかったことが理解できると嬉しかった。物事を本当に理解するとは、起承転結を知ることだと考え、「問いを3回繰り返せば研究の最前線に至る」と語る。群馬県立前橋高校OB。

水力発電は、水の位置エネルギーを電気エネルギーに変換するものです。ダムので高所に水を貯めておいて導水路の中に落とし、その勢いで発電機のタービンを回して、電気を生み出します。

ATP合成の場合、水素イオンが水で、膜がダムの堤、ATP合成酵素が導水路と発電機にあたります。水素イオンの濃度差が、ダムにおける水位の高低差です。

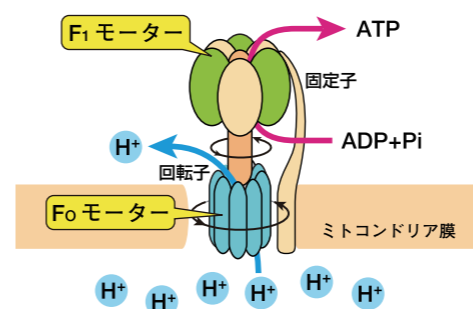
ミトコンドリアの外側にある水素イオンは、膜によって内側に入るのを塞ぎ止められています。この水素イオンは溜まってくると内側との濃度差によって膜に点在するATP合成酵素の

図1



ミトコンドリアは膜で囲まれた袋で、細胞呼吸によっていつも水素イオンを袋の外へ運び出している。水素イオンがATP合成酵素の中を通過して袋の中にもどるときにATPが合成される。

図2



ATP合成酵素の模式図。F<sub>0</sub>モーターが水素イオンの流れによって回転すると、F<sub>0</sub>モーターに連結したシャフトが、F<sub>1</sub>の中で回り、ATPが合成される。F<sub>0</sub>の固定子とF<sub>1</sub>の固定子は右横の棒状の部分で固定されている。



中に流れこみます。すると、その流れの勢いで酵素中央のシャフトが回って、発電機の代わりにATPを合成するマシンが動き、ADPとリン酸からATPを合成するのです（図2）。

もちろん、これを続けるとミトコンドリア内部の水素イオン濃度が上がっていずれ内外の濃度差がなくなってしまいそうです。しかし、ミトコンドリアには食べ物を燃焼すること（細胞呼吸）によって水素イオンを外側へ汲み出す機構がいつも働いているので、水素イオンの濃度差は維持されて、ATP合成酵素はATPを作り続けることができます（図1）。

ところで、ATP合成酵素が回転しているということは、注目に値する事実です。

私たちの身の回りには、回転運動が至るところに見られます。モーターなどは顕著な例でしょう。ロボットも、モーターの回転を並進運動に変換して動いています。しかし、生物にとって回転は特殊な動きなのです。実際、生物における回転運動は、ATP合成酵素以外ではバクテリアの鞭毛くらいしか存在しません。

回転が生物にとって例外的な動きであることは、スクリューで進む魚やプロペラで飛ぶ鳥、車輪を持った動物がいけないことからわかります。回転してしまうと付随する血管や神経、あるいは骨などの器官が千切れてしまうからでしょうか。回転するためには、情報伝達系やエネルギー伝達系を切れないよううまく組み合わせておかないといけないのです。ATP合成酵素が回転できるのは、回転軸が周囲のリング状の固定子の中で浮いていて、固定されていないからです。

### ATP合成酵素を研究するということ

ATP合成酵素が回転する理由は、現在のところわかっていません。回転せずにATPを合成する機構はいくらでもありますが、ATP合成酵素の反対の仕組みも、私たちの体内の様々な場所で見いだせます。たとえば、胃袋の内部は常に強い酸性で保たれていますが、これはATP合成の逆で、ATPを利用して水素イオンを濃度の低いところから高いところへ汲み上げているのです。ダムの例えでいえば、下流の水をポンプで上流に汲み上げているようなもので

#### ADVICE

一口にサイエンスをやってくださいとは言いません。文系に進んだり、就職したりする人もいるでしょう。しかし、どのような場合でも、一個の人間として社会のことや自然のことをできるだけ道理にそって科学的に理解する力は必要です。物事に対する基本的な知識と、それを基にした合理的な行動の指針が重要なことです。知識がないとどうにもなりません。知識だけでは不十分です。知識に加えて合理的に推論ができることが大事です。そういう意味での、学力——生きる力を身につけてほしいと思います。

### 研究の出発点

ATP合成酵素を研究するにあたっては、出発点が大事でした。ATPを作ることに限らず、人間からほうれん草まで、あらゆる生物に共通です。どの生物を研究しても、同じ結果に到達する。だからこそ、どの生物を研究材料にするかが重要だったのです。そこで、私たちが材料として選んだのは温泉に生息するバクテリア（好熱菌）でした。

ATP合成酵素は膜に存在しますが、それを研究するためには膜を石鹼で溶かさないといけない。ただし、肝心のタンパク質を壊さないようにする必要があります。このバランスが難しく、様々な石鹼や生物で試したところ、好熱菌にたどり着きました。好熱菌は高温な場所に生息しているためタンパク質が丈夫で、熱だけではなく石鹼にも強いのです。このように出発点を工夫した結果、ATP合成酵素の回転が観察できたのです。

ですから、この胃袋の酵素を逆に使えば、ATPを合成することはできるということ。その仕組みもずっと簡単ですが、実際これを用いてATP合成を行っている生物はいません。ではなぜ、あらゆる生物が簡単な機構ではなく、複雑なナノモーターを使用しているのか、それには、何か重要な理由があるはず。もし火星で生命が見つかったとして、その生命も回転によってATPを合成していたとすれば、回転には宇宙的な普遍性があるといえるでしょうが、現段階ではまだ謎のままです。

それでは、ATP合成酵素が回転していることを発見したことは一体何の役に立つのでしょうか。私にはその答えもわかりません。役に立つからではなく、知りたいから、研究するのです。新しい発見があると考え方が変わるから、研究するのです。学問とはそういうものです。

何かちょっとした発見があつてニュースになると、必ず「その発見は何の役に立つのか」と聞かれます。あるいは、研究費を申請する場合にも、何に役立つかを説明しなければならぬ風潮もある。このような状況で「私の研究は役立たない」と断言するのは難しいことですが、とってある研究が何の役に立つのかは、一概には言えないのも事実です。結果的に役に立つかどうか、全くの偶然によることもあるのです。たとえば、素数論という学問があります。これは、昔は数学者の遊びのようなものですが、今となっては通信などの暗号論に欠かすことのできない基盤となっています。マクスウェルの電磁気学もそうです。当時は、電気が何の役に立つのか誰も理解していませんでした。実は、すぐ役立つものよりも100年後に役立つもののほうが重要かもしれないのです。



## ダイズと根粒菌の「共生」の仕組みを明らかにする

ヒトゲノムの解読が最初に宣言されたのが2000年。

その後もいろいろな動物や植物でゲノムの解析が進められ、

そのため生物研究のスピードは早まりましたが、**ゲノムDNAの全塩基配列が解読されたからといって「すべての生命現象」や「すべての遺伝子の働き」がわかったわけではありません。**

コンピュータによる遺伝子解析で、

植物と微生物の共生関係に迫る金子貴一先生に、

**遺伝子解析の方法と根粒菌の共生※1**についてお話をいただきました。

※1 根粒菌と共生することは、2万種あるといわれるマメ科植物の特徴。それぞれの根粒菌は、宿主になるパートナーが決まっています。同じマメ科であってもパートナー以外の植物とは共生しない。

### 2) 遺伝子の場所をつきとめる

長いDNA全体の塩基配列が明らかになったら、遺伝子として働いている部分を探します。遺伝暗号といって、3つの塩基の並び(コドン)ごとにそれぞれ対応するアミノ酸の種類が決まっています。また、どのアミノ酸にも対応しないUAA(オーカー)、UAG(アンバー)、UGA(オパール)というコドンが存在していて、塩基の並びにこの3つのいずれかが出てくるとアミノ酸の合成が止まります。※4 これらは終止コドンと呼ばれ、遺伝子が続いているところで現れればそこで遺伝子は「終わり」です。これが頻繁に出

てくるような塩基の並びは遺伝子とは考えにくいといえます。同じように「始まり」の暗号も決まっています。95%くらいはAUGが遺伝子の翻訳を開始するコドンになっています。ただしAUGはメチオニンというアミノ酸に対応するコドンですから、アミノ酸配列の中にも存在するので、遺伝子の「始まり」の位置を正確に見つけることはコンピュータによる作業だけでは難しいと考えられています。

バクテリアの場合、こうした一定の法則性をもとに、コンピュータ上で処理をして遺伝子の存在する場所をつきとめます。また、ある生物で明

らかなった遺伝子を他の生物に当てはめて似たような働きをしている遺伝子を探す方法や、ある遺伝子によく現れる塩基の組み合わせがあらかじめわかっている場合には、そのパターンと似ている部分を探すことで、未知の遺伝子を見つけ出す方法もあります。このような方法をいくつか組み合わせるなどして、長いゲノムDNAの塩基の並びの中から遺伝子の場所を見つけ出すのです。

※4 実際にアミノ酸の配列への変換は、ゲノムDNAからメッセンジャーRNA(mRNA)にコピーされた後に行われる。mRNAではT(チミン)にかわって構造が異なるU(ウラシル)という塩基が使われる。

### 共生によってライフスタイルを変える根粒菌



根粒菌は植物と共生しない場合は、土の中で単独で生きています。ただ、代謝をかなりしぼりますし、増殖することや土の中から栄養源を得るといった生活に必要な働きをしないなど、まったくといっていいほど違う生き方をしています。ミヤコグサ根粒菌では、単独で生きている時と共生時のDNAからRNAへの転写の状況を比べると、転写される部分が大きく違っていることがわかりました。共生状態では、共生窒素固定の遺伝子がある付近での転写の量が増えています。他のほとんどの部分では転写された量が減っていて、働きがなくなっているか、やめるところが多くなっていたのです。環境が変化するとRNAへの転写をやめたり、ある遺伝子が急に働き始めたりするなど、生物にはDNAのどこをRNAに転写するかをコントロールする仕組みがあることはわかっていますが、根粒菌の場合は共生するしないかによって大掛かりなレベルで転写される場所が違っていったのです。

いる微生物も、根粒菌などに比べると効率はだいぶ悪いものですが、窒素源を作ることも、最近わかってきました。植物と微生物の「共生」関係は、働きのわからないものも含めて、そこから中に存在しているのです。

私たちの研究グループが、ダイズ根粒菌とミヤコグサ根粒菌のゲノム解読を行ったところ、いずれの根粒菌にも、ゲノムのある一部分に共生窒素固定に関わる遺伝子が集まっていることがわかりました。コンピュータでその部分の特徴を調べると、どうもその部分は別のバクテリアから取り込まれたDNAではないかと予想できました。バクテリアがDNAを取り込むことは珍しいことではありません。根粒菌の特徴を決めている遺伝子も、もともと菌が持っていたDNAから変化したのではなく、別のバクテリアから取り込まれたようなのです。つまり、根粒菌はDNAを取り込んだことで、共生窒素固定の能力を発揮しているということです。

取り込まれたDNAが根粒菌の能力に影響しているので、今後は、DNAの組み合わせについて調査を進め、どういう組み合わせが共生に都合がよく、窒素源を効率よく作れるのかなどを調べていくつもりです。天然のエコ肥料を生み出す根粒菌の共生の仕組みがわかれば、マメ科以外の植物についても、共生している微生物に同じような機能を持たせるような応用研究につながるかもしれません。

# コンピュータによる遺伝子解析でDNAの謎にせまる

### ダイズと根粒菌の共生関係をDNAレベルから研究する

ダイズは、イネやトウモロコシなど他の穀類に比べて、やせた土地でもよく育つことが知られています。大気中の窒素(N<sub>2</sub>)を還元して窒素源(NH<sup>4+</sup>:有機化合物の材料)を生産する根粒菌を根に共生させることで、養分を効率よく取り入れているからです。植物はふつう、土にふくまれているNO<sup>3-</sup>やNH<sup>4+</sup>などを根からすいあげることほとんどの窒素源を得ていますが、ダイズは窒素源の50~80%を根粒菌との共生によって得ています。この仕組みは共生窒素固定と呼ばれています。一方、ダイズからは根粒菌にエネルギー源となる炭素源を渡して、お互いに栄養源の受け渡しを行って、利益を得ています。※2

私はこうした植物と微生物の共生を主な対象に、遺伝子やゲノムの研究をしています。ゲノムに含まれる膨大な量の情報を扱うわけですから、コンピュータは欠かすことができません。はじめに、コンピュータによるバクテリアゲノムの解析の流れをご紹介します。

※2 こうした共生関係を相利共生という。

### 根粒菌の遺伝子を解析する

#### 1) DNAを読み取る

DNAの塩基配列を調べるには、まず細胞内にあるDNAを取り出します。1つの細胞に入っているDNAの長さはヒトでは合計約2メートル、その上に30億9300万の塩基が並んでいて、23000ほどの遺伝子があります。バクテリアでは最も大きいゲノムで塩基の並びは1000万程度、遺伝子の数は多くても1万ほどです。そのままのDNAを一度に解読することは困難ですから、調べやすくするために、細かくカットします。カットする長さは、調べる方法によっても変わりますが、目安として、一つのDNAの長さは数千

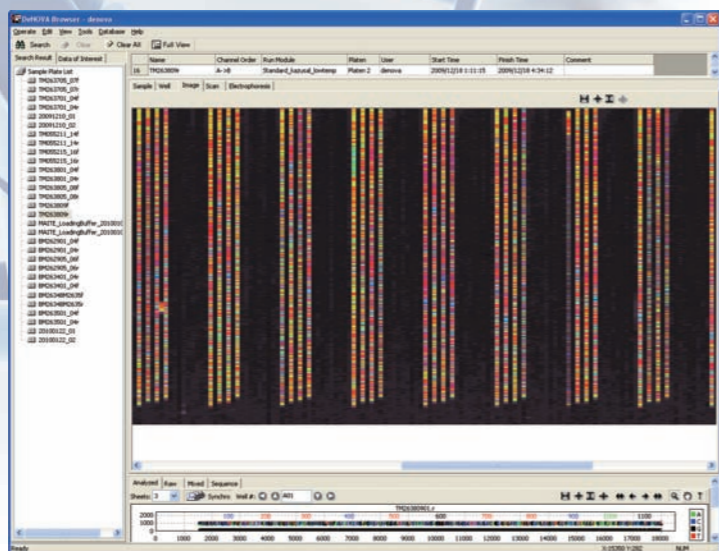


図1 DNAの塩基配列をレーザーで読み取った色情報のイメージ画像

塩基程度に設定します。

ばらばらになった断片を、酵素を使って少しずつ長さが変わるように増やします。A(アデニン)、G(グアニン)、C(シトシン)、T(チミン)の4つの塩基にそれぞれ蛍光色素で色をつけたDNAを、電気泳動という方法を使って長さの違いで選り分けた後、塩基に対応する色をレーザーで読み取ると、一つ一つの塩基配列が目に見えるようになります(図1)。この色情報をコンピュータで文字データに置き換えて、塩基の並びを読み取るのです。ただ、このままではばらばらの状態ですから、今度は元の1本のDNAに戻さなければなりません。そこで膨大な塩基配列のデータを数万、数十万レベルで解析して、コンピュータを使って重複する配列を調べていきます。そして重複する部分をつなぎあわせることで、DNA全体の塩基配列を明らかにしていきます(図2)。※3

※3 根粒菌のDNAをつなぎあわせていくと輪になる。バクテリアの多くはゲノムDNAが環状だが、真核生物の場合は線状で、輪になっているものはほとんどない。

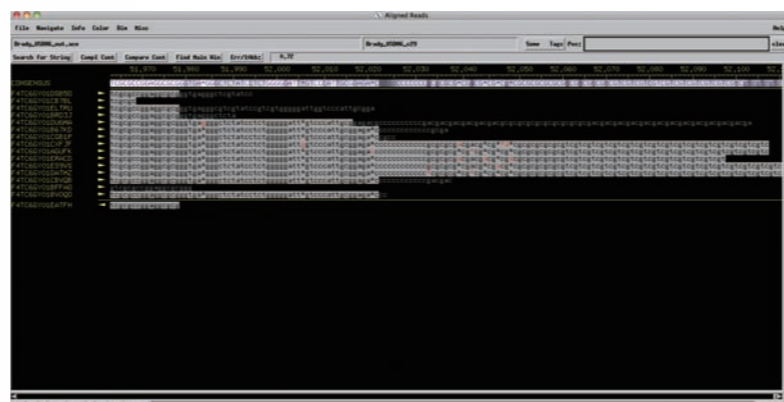


図2 一番上の白い部分はつなぎあわせて並べたDNA塩基配列。下に並んでいるグレーの部分は断片の重複をコンピュータで調べたもの。

総合生命科学部  
生命資源環境学科  
**金子 貴一** 准教授

#### PROFILE

博士(理学)。専門はゲノム構造学。大学院生の時に、当時は技術的に困難だったゲノム解析にチャレンジしたいと思ったのがきっかけ。最初にゲノム研究を始めた生物は、葉緑体の起源生物ともいわれ、「植物とよく似た酸素発生型の光合成」を特徴とするラン藻(シアノバクテリア)。10年ほど前から、共生の仕組みの複雑さに魅せられて根粒菌をターゲットにするようになった。千葉県立葉園台高校OB。



#### ADVICE

ゲノム研究は、生物が好きで人にとってはそのしくみを知ることが出来る興味深い分野です。膨大なデータを扱うので、情報を扱うのが好きな人には特に向いています。未知の部分もたくさんありますから、謎を解きたい人、好奇心が旺盛な人にも来てほしいと思います。

**もとをたどれば  
すべて鳥インフルエンザ**

インフルエンザは、もとをたどるとすべてが鳥インフルエンザに行き着きます。というのも、インフルエンザウイルスは本来、カモやアヒルなど足に水かきのある水鳥、渡り鳥に感染するウイルスだからです。ただし私たちが腸管内に大腸菌を持っていても病気になるのと同じで、水鳥がインフルエンザウイルス感染で病気になることは基本的にありません。インフルエンザウイルスが数百万年もの長い間、水鳥へ感染し続けた結果、両者に共存関係ができたのです。

しかし私が研究を始めた1970年代にはまだほとんど何もわかっていませんでした。鳥取大学に所属していた私は、渡り鳥のやってくる10月末から北帰行の始まる2月末まで、山陰地方を中心に、月に2回ほど定期的に定点を定め、インフルエンザウイルスの分離材料である渡り鳥のフンを採取し続けました。分離した多数のインフルエンザウイルスについてニワトリやマウスなどへの感染実験を行ったり、ウイルスの性質を調べる研究を学生とともに20数年間続けていました。

フンから取り出したウイルスは、水鳥とは違う種類の鳥類であるニワトリにも感染することがあり、1、2%は死に至ったのです。また、ニワトリからニワトリに感染を起こして、強毒のウイルスになるものもあり、動物の種類が違えば、感染態度も違うことがわかりました。

高病原性鳥インフルエンザの原因になるH7N7やH5N3ウイルスも分離していましたから、「近い将来日本でも鳥インフルエンザは出るに違いない。いつどこで最初に発生するのかが問題だ」と思っていた矢先、山口県で鳥インフルエンザが発生しました。それまで200回以上も野鳥たちの集まる島根、鳥取両県の定点で調査していたため、感染経路などのイメージができました。ただその後の京都での発生は想定外でした。鳥取市から関西はすぐ近くですが、中国地方しか私は見ていなかったのです。※1

※1 京都産業大学に来てからは、琵琶湖の東海岸などで渡り鳥のインフルエンザウイルスの分離を行っている。山陰地方を調査する鳥取大学とも協力しながら、日本に飛来した渡り鳥が持つウイルスが、東南アジアや周辺の国々に分布するウイルスとどう関係しているのかなど、長い目で徹底的に調べている。

**さまざまなインフルエンザの脅威に備える**

2009年、新型インフルエンザが世界中で流行しました。パンデミック (pandemic: 世界的大流行病) の発生源はアジアではなくメキシコで、鳥インフルエンザウイルス由来ではなく豚インフルエンザウイルス由来でした。いまや人類の生存を脅かす感染症は世界中から襲ってきます。グローバル社会に生きる私たちにとって、宿命的な脅威なのです。新型インフルエンザの流行に備えるために、敵の正体を見極め、いかに被害を小さく抑えるのかを研究されている大槻公一先生に、新型インフルエンザや鳥インフルエンザについてお聞きしました。

# インフルエンザの 始まりはすべて鳥だった



**今回の新型  
インフルエンザウイルス**

現在わかっている主なインフルエンザウイルスの宿主と血清型※2を上図に示しました。これまでの主な人インフルエンザウイルスは渡り鳥から直接感染してきたものではなく、ニワトリやブタ由来のものだということがわかります。現在の新型インフルエンザウイルスの型も、ブタ由来のH1N1です。しかも90年前にパンデミックを起こした当時のスペインかぜウイルスとほとんど同じ性質のH1ですから、厳密にいうと、新興感染症というよりも再興感染症です。

ウイルスは感染するためにまず動物の呼吸器表面にある糖を含む受容体にくっつきませんが、ヒトのインフルエンザウイルス受容体は鳥類のインフルエンザウイルス受容体とは異なる構造を持つため、非常にくっつきにくいのです。ところが、ブタは鳥インフルエンザウイルス受容体のみならず、人インフルエンザウイルス受容体も持っています。両方の受容体を持つブタの体内で、鳥インフルエンザウイルスと人インフルエンザウイルスが遺伝子交雑を起こすことがまれにあります。そして、新しくできた遺伝子再集合体がたまたまヒトに感染しやすい場合、新型インフルエンザウイルスが生まれたと考えられています。新型インフルエンザの発生を予測

するために、ブタがどのようなウイルスに感染しているかを把握することはとても重要なのです。今回の豚由来の新型インフルエンザで警戒すべき点は、まれに急性肺炎が起きていることです。これはヒトが鳥インフルエンザに罹患した際にみられる典型的な症状で、このウイルスが鳥インフルエンザウイルスの性格も持っていることを示しています。本来、鳥インフルエンザウイルスはヒトの気管にはくっつきませんが、気管のさらに奥、肺には鳥インフルエンザウイルスと結びつく受容体がたくさんあるので、一気に増殖してウイルス肺炎を引き起こすのです。

※2 A型インフルエンザウイルスを構成するHA (ヘマグルチニン、赤血球凝集素) NA (ノイラミニダーゼ) の性質の違いによって亜型に分けられている。HAは1~16、NAは1~9である。

**グローバル時代  
開発途上国を脅威が襲う**

野鳥やニワトリから鳥インフルエンザウイルスに感染しないかと心配される方がいますが、その可能性はまずありません。また、日本の野鳥やニワトリは鳥インフルエンザウイルスにもと

総合生命科学部  
動物生命医科学科  
**大槻 公一** 教授

**PROFILE**  
獣医学博士。大学に入学してから、構造は単純なのに複雑な働きをする微生物の正体をつきとめれば生命の根源に迫れるのではと、微生物学に興味を持った。もともと鳥の病気に興味があり、ニワトリのコロナウイルスを研究していたが、70年代後半に北海道大学の恩師からインフルエンザ研究プロジェクトに誘われた。以後、前任の鳥取大学で山陰地方に飛来する野鳥を長年限なく調査して回ったことが、今日の鳥インフルエンザ研究の基盤になっている。鳥インフルエンザ研究センター長として「本学は学部間の垣根が低く、生物系はもちろん、社会科学系、数学系など多彩な人材と共同研究できるのが強み」と胸を張る。静岡県立静岡高校OB。



もとと感染していないので、日本で世界に先駆けて新型インフルエンザが発生することもまずないでしょう。

新型インフルエンザの震源地になるのではと私たちが心配しているのは、開発途上の国々です。2005年から、文部科学省のプロジェクトでベトナムのハノイに研究拠点を作って調査を行っています。ようやく現地の状況がつかめてきました。ベトナムは鳥インフルエンザの大発生で、2003年には国全体で飼育されていた8千万羽の約半分を処分しています。かつては鳥インフルエンザウイルスで国全体が汚染され、現在でも完全にクリーンな状態とは

いえません。また、アジアの国々では畜産がさかんです。しかも、日本とは違い、ほとんどがブタやアヒル、ニワトリ、ウシなど、複数の種類の動物を一つの農家が飼育する形態をとっています。農村に一步入ると、どこにでもブタやアヒルがいて、それぞれの動物間の距離も、人間との距離も近い。これは極めて新型インフルエンザウイルスを生みやすい環境です。東南アジアの中では最も環境が整っているはずのベトナムでも、農村ではインフラ整備も医療システムも不十分で、衛生状態も決してよいとはいえません。私たちはこの5年間、こうした国で飼育されているアヒルやブタなどの動物がどういう状態なのか、野鳥はどうかというデータを集めてきました。第二期となる次の5



ベトナムの典型的な畜産農家の風景。池には野鳥などをさえずるものがない



子豚が飼育されている豚の部屋で飼育されているヒヨコ



豚や牛の飼育小屋のすぐそばにある池



アヒル、鶏と飼育されている子豚

年では、新型インフルエンザを発生させないために何ができるのか、また発生したときにどういう対応ができるのかなど、さらに研究を進めていくつもりです。

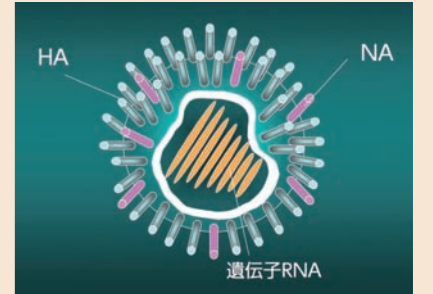
**終わりなき闘い**

人間は有史以前からインフルエンザウイルスと闘ってきています。第一次世界大戦中に発生したスペイン風邪は、世界中で2000万人以上の命を奪いました。新型インフルエンザに変異するのではと恐れられていた強毒のH5N1鳥インフルエンザウイルスは、中国南部に初めて出現してから14年が経ちました。変異しやすいインフルエンザウイルスにとって、14年というのは大きく変異するのに十分な時間だと考えられます。しかし、いまだに鳥インフルエンザウイルスのままで、ヒトのウイルスにはなっていない。ヒトのウイルスになりにくい性質を持ったウイルスなのかもしれません。別の鳥インフルエンザウイルスの可能性や、今回の新型インフルエンザウイルスと別の鳥インフルエンザウイルスとの遺伝子交雑体の出現など、様々なリスクを考え、パンデミックを防ぐ努力をしていく必要があります。

今回の新型インフルエンザウイルスについていえば、もっとも危惧されるのは、冬の間になら一人勝ちしたことです。例年の冬なら、ソ連型やホンコン型、B型がそれぞれ競り合って出現していたために、どれか一つだけが爆発的に広がるということがありませんでした。ところが、昨年の冬は、新型以外のインフルエンザウイルスがほとんど消えました。これらの季節性インフルエンザウイルスが消滅して過去のウイルスとなり、次の冬に新型インフルエンザウイルスが猛威をふるうことも心配されます。

アヒルやカモのように、人間がインフルエンザウイルスと共存関係を築くためには、少なくともさらに数万年必要でしょう。ですから今は、

**すべての生き物は  
ウイルスに感染している?!  
—謎だらけの生物、ウイルスに迫る**



インフルエンザウイルスの基本的な構造は上のようになっています。RNA (リボ核酸)が8本、表面で宿主の細胞のレセプター (受容体)にくっつく役割をするヘマグルチニン (赤血球凝集素、HA)と、逆に離れる作用をするノイラミニダーゼ (NA)という2種類のスパイクを持っています。人間とは比べようがないくらい単純な構造ですが、ウイルスの中には3、4個の遺伝子しか持っていないさらにシンプルなものもあります。

ウイルスは他の生物に入り込まないと増殖できない、すなわち自己増殖できないために生物ではないといわれることもあります。しかし、遺伝子を持っているということは自己を確立して同様のものを代々作っていきけるわけですから、私はウイルスは生物だと考えています。ウイルスの出現した時代はわかっていませんが、植物やバクテリアで増殖するウイルスもいるので、生物と同じくらいの歴史があつて、生きているものはほとんど何らかのウイルスに感染しているだろうと考えられています。シンプルな作りながら、様々な機能を持ち、その種類や生態はすべてわかっているわけではあません。わからないことの多いインフルエンザウイルスですが、それでも、ウイルスの中では一番解明が進んでいるのです。

# 先端領域に広がる理系3学部の学びのフィールド。

## 理学部

大自然の真理を  
明らかにする。

### 数理科学科

2つのコースにわかれて学び、  
数学的思考力と発想力を修得。

〈基礎数理学コース〉 〈応用数理学コース〉

代数学 自然と社会の数理学系  
幾何学 プログラムの数理学系  
数学解析学  
複素解析学

### 物理科学科

ミクロの世界から宇宙まで、  
物理的現象にアプローチ。

天体・宇宙物理  
素粒子・原子核  
地球・気象と環境科学  
物性物理/理論  
レーザー・電波物性  
結晶・表面物性

## コンピュータ 理工学部

ITのフロンティアを  
開拓する。

### コンピュータサイエンス学科

基礎から段階的に学び、  
コンピュータの先端領域を追究。

情報科学  
コンピュータシステム  
情報基盤技術

### ネットワークメディア学科

ネットワークを自由に構築し、  
利用できる実践力を養う。

インターネットの応用  
webアプリケーション

### インテリジェントシステム学科

脳科学の領域にも踏み込んで  
情報処理の世界を探究。

コピキタス  
知能情報処理  
人間科学・脳科学

## 総合生命科学部

生命科学関連の幅広い領域に  
柔軟に対応する。

### 生命システム学科

総合システムとして生命を捉え、  
最先端の研究・実験に取り組む。

細胞生物学  
生命システム概論

### 生命資源環境学科

21世紀の注目分野、  
食糧・環境問題の解決に向け、  
マクロな視点から探求する。

生命資源環境学概論  
生物統計学

### 動物生命医科学科

食の安全や福祉の分野を支える  
国内有数の実験施設と  
国際ネットワーク。

動物医科学概論  
動物遺伝学

## 大学院 高度な専門領域を探究し、研究者・エンジニアに必須の力を養成。

数学専攻  
物理学専攻

理学研究科

博士前期課程

博士後期課程

工学研究科

情報通信工学専攻  
生物工学専攻



お問い合わせ先

POWER UNIV.

京都産業大学 連携推進室

〒603-8555 京都市北区上賀茂本山 TEL075-705-2952

http://www.kyoto-su.ac.jp/

E-mail:renkei-suishin-jim@star.kyoto-su.ac.jp

■理学部事務室 TEL:075-705-1463

■コンピュータ理工学部事務室 TEL:075-705-1989

■総合生命科学部事務室 TEL:075-705-1466

■入学センター TEL:075-705-1437