

# サイエンス & テクノロジー

京都産業大学

VOL.19

01

## 複素数平面の美しい世界

想像上の数が結ぶ代数学と幾何学  
石田 久 教授

02

## 水素が実現するエコな社会

見えてきた水素エネルギー時代の幕開け  
大森 隆 教授

03

## LSI 微細化の宿命 ソフトウェアに対処する

LSI設計の新たな評価基準を目指して  
吉村 正義 准教授

04

## ネットワークは もっとスマートになれる

アプリケーションの要求に応じて  
柔軟に変化するネットワーク  
秋山 豊和 准教授

05

## 進化的アルゴリズムは 人間を超える人工知脳を生むか

ファジィニューラルネットワークを  
進化的アルゴリズムで学習させる  
岡田 英彦 教授

06

## タンパク質の 働きを解き明かし難病と戦う

生命を支え病気も起こすコラーゲンを制御  
永田 和宏 教授

07

## 葉緑体の遺伝子組換えで ストレスに強く、 環境にやさしい作物をつくる

増え続ける地球人口を救う“遺伝子銃”  
寺地 徹 教授

08

## 腸の運動調節メカニズムから 病気を考える

副交感神経による腸の運動調節メカニズム  
棚橋 靖行 准教授

## 複素数平面の美しい世界

想像上の数が結び  
代数学と幾何学



理学部  
数理科学科

**石田 久**

教授

理学博士  
関数論

0011

二乗するとマイナスになる数、虚数。実際には存在しない想像上の数ということで、数学の問題以外にどんなところで使われるのか、疑問に思う人もいるでしょう。

しかし、虚数は電気工学や物理学で重要な役割を担っています。そして、複素数平面の世界では、思いもかけない美しい姿を見せてくれるのです。

それは、誰かがあらかじめ設計したとか思えない美しい定理や、フラクタルと呼ばれる不思議な図形を描き出すところに現れます。

そんな複素数平面の美しい世界の一端を紹介しましょう。

## 水素が実現するエコな社会

見えてきた  
水素エネルギー時代の幕開け



理学部  
物理科学科

**大森 隆**

教授

博士(工学)  
環境科学、物理化学、電気化学

0022

水素燃料電池車の発売が来年に迫り、いよいよ本格的な水素エネルギー時代が到来します。

水素から電気エネルギーを取り出すのは、水の電気分解の逆を行うことです。これは、水素と酸素から電気を作り、排出されるのは水だけという理想のクリーンエネルギーになります。

課題となるのは、水素を作る技術と水素を貯蔵する技術。私は、太陽光発電によって水を電気分解して水素を作り、それを低コストで貯蔵できる水素吸蔵合金の研究・開発に取り組んでいます。目標は自給自足できるエネルギーシステムです。

## LSI 微細化の宿命 ソフトエラーに対処する

LSI 設計の新たな  
評価基準を目指して



コンピュータ理工学部  
コンピュータサイエンス学科

**吉村 正義**

准教授

博士(工学)  
計算機システム

0033

コンピュータの頭脳LSIは、微細化技術の進展でどんどん小さくなってきました。コンピュータの性能が向上し、より小さく作ることができるようになりました。

ところが、思わぬところに敵が潜んでいました。それは宇宙から絶えず降り注ぐ中性子線です。かつては無視できていたものが、微細化の進展によって、エラーを引き起こすほどの無視できない影響が出るようになったのです。

このようなエラー「ソフトエラー」に対して強い耐性を持つLSIが求められています。LSIをどう設計すればよいのか、私に取り組んでいる評価方法についてお話しします。

## ネットワークはもっとスマートになれる

アプリケーションの要求に応じて  
柔軟に変化するネットワーク



コンピュータ理工学部  
ネットワークメディア学科

**秋山 豊和**

准教授

博士(工学)  
情報工学

0044

インターネットの草創期、ネットワークの機能をプログラムとは独立させ、シンプルな設計にしたことはその普及に一役買いました。ところが、近年、ネットワークを利用するさまざまなアプリケーションプログラムの登場によりトラフィックが劇的に増大してくると、その独立性によって、プログラム側、ネットワーク側の状況が相互に反映されず、転送データのロスが発生したり、無駄なトラフィックが生じるなど、新たに問題が生じてきました。

そのため、ネットワーク自体をよりプログラムと親和性の高いものにする事で、アプリケーションプログラムの要求に応じてネットワークを柔軟に変化させる仕組みが模索されています。より柔軟なネットワークを目指した次世代のネットワークであるSDN(Software-Defined Networking)とそれを標準化したものの一つであるOpenFlowについて紹介します。

## 進化的アルゴリズムは人間を超える 人工知能を生むか

ファジィニューラルネットワークを  
進化的アルゴリズムで学習させる



コンピュータ理工学部  
インテリジェントシステム学科

**岡田 英彦**

教授

工学博士  
人工知能

0055

コンピュータにパターン認識を行わせる手法の1つとしてニューラルネットワークが研究されてきました。従来は人間に及ばなかった高度なパターン認識も行えるようになりつつあります。例えば、たくさんの猫の画像を見せて学習させたニューラルネットワークは、初めて見る猫の画像を高い精度で「猫である」と認識するのです。

ただ、現在の学習方式は数学的に複雑すぎて、産業への応用が難しいという欠点があります。そこで、私は学習に進化的アルゴリズムを使うことで産業応用を容易にし、なおかつ、あいまいさを扱えるファジィ理論によって、より人間に近い知能の実現を考えています。いったいどのようなものなのか、概要をお伝えします。

## タンパク質の働きを解き明かし 難病と戦う

生命を支え病気も起こす  
コラーゲンを制御



総合生命科学部  
生命システム学科

**永田 和宏**

教授

理学博士  
細胞生物学・分子生物学

0066

生物の体を作るタンパク質の中で、その3分の1を占めるコラーゲン。三本のポリペプチドが三重螺旋を形作るという非常に複雑な構造をしています。上皮細胞を支える基底膜や骨の主成分であり、体を作るのにはなくてはならないタンパク質です。しかし、一方で、異常な蓄積によって、肝臓などの臓器を繊維化させてしまう厄介者でもあります。

私が発見したHSP47というストレスタンパク質は、コラーゲンの組み立てに重要な役割を担っています。体を作ることや繊維化疾患に深く関わるHSP47の驚異の働きを紹介します。

## 葉緑体の遺伝子組換えで ストレスに強く、環境にやさしい作物をつくる

増え続ける地球人口を救う  
“遺伝子銃”



総合生命科学部  
生命資源環境学科

**寺地 徹**

教授

農学博士  
植物分子遺伝学

0077

地球規模で増え続ける人口を養うために、環境を守りながら、いかにして食料を確保するのか。これらの問題解決に期待されるのが、最先端の遺伝子組換え技術です。なかでも私に取り組んでいるのは、葉緑体の遺伝子組換え。葉緑体の遺伝子は母性遺伝をするため花粉には含まれず、組換えた遺伝子が環境へ拡散しにくいなどのメリットが目玉を集めています。

これまでに、遺伝子銃を使った葉緑体の遺伝子組換えによって、鉄分の多いレタスやストレスに強いタバコの作出に成功しています。現在、主要穀物であるパンコムギへの応用をめざして、実験を重ねているところです。

## 腸の運動調節メカニズムから 病気を考える

副交感神経による  
腸の運動調節メカニズム



総合生命科学部  
動物生命医科学科

**棚橋 靖行**

准教授

獣医学博士  
獣医薬理学

0088

試験前など緊張すると必ずお腹が痛くなる人はいませんか？ それは過敏性腸症候群という病気かもしれません。この病気はストレスにより腸の運動がおかしくなることで起こります。しかし、ストレスが腸の運動異常を引き起こす仕組みは、まだ分かっていません。

この点を明らかにするには、まず正常な腸の運動について知る必要があります。しかし、腸の運動は様々な神経やホルモンにより複雑に制御されているため、その全容は未だに明らかにされていません。

そこで、私は副交感神経による腸の運動調節メカニズムに着目し、研究に取り組んでいます。徐々に明らかになりつつある、その精妙なメカニズムの概要をご紹介します。

# 複素数平面の美しい世界

## 身近で役立つ複素数

皆さんは高校数学で「複素数」や「虚数」というものを習ったと思います。そのときに、「こんな数、何に使うんだろう」と疑問に思った人はいませんか。私たちの身の回りには、実数ばかりが溢れています。虚数や複素数を、数学の問題以外で見たことがないという人もいるかもしれませんが、「 $i$ は虚しい」という洒落もあるくらいです。

ところが、複素数は、私たちの生活に欠かせないものなのです。たとえば、大学の物理の教科書の電磁気学の章を見てください。電気回路などを扱うときに虚数単位が出てくるのが分かるはず。さらに、ミクロな世界の物理現象を扱う量子力学では、複素数の重要性は一層増します。量子力学の基本方程式であるシュレディンガー方程式には、堂々と $i$ が登場します。量子力学は現在の科学技術を支える重要な学問で、身の回りの電子機器を作るのにも欠かせません。複素数は、こうした科学技術を支えるとても重要な数なのです。

複素数の舞台は物理科学だけではなく、図形の問題を扱うのにも威力を発揮します。複素数を幾何的な問題に適用するには、複素数平面が便利です。複素数平面とは、複素数  $a + ib$  を座標平面の  $(a, b)$  に対応させた平面のことです。複素数の実部  $(a)$  を  $x$  軸、虚部  $(b)$  を  $y$  軸にプロットすれば複素数平面が描けます。

## 想像上の数が結ぶ代数学と幾何学

高校で習う「虚数」や「複素数」。

これらは現実には存在しない数ですが、

実は物理や幾何学の問題を解くときに大活躍するのです。

今回は、最近高校新課程に入った「複素数平面」にまつわる美しい定理や、フラクタルと呼ばれる美しい図形について、専門家である石田久先生に、お話を伺いました。

そんな複素数平面に潜む美しい世界を皆さんにご紹介したいと思います。

## 複素数平面の美しい定理

複素数平面には、さまざまな美しい定理が存在します。多くは聞き慣れないのですが、そうした定理は入試問題にも形を変えて登場しています。

たとえば、次の問題を見てください。

$x$  の関数  $f(x) = 2x^3 + 3x^2 + 2x - 2$  を考える。

(1)  $f(i-1) = 0$  ( $i$  は虚数単位) となることを用いて、3次方程式  $f(x) = 0$  の根を求めよ。

(2) 複素平面上で、2次方程式  $f'(x) = 0$  の2根は、 $f(x) = 0$  の3根を頂点とする3角形の内部にあることを示せ。ただし、 $f'(x)$  は  $f(x)$  の導関数を表す。

(注 方程式の解のことを根といいました) これは昔の京都大学の入試問題です。

(1) は、高校で似たような問題を解いた人も

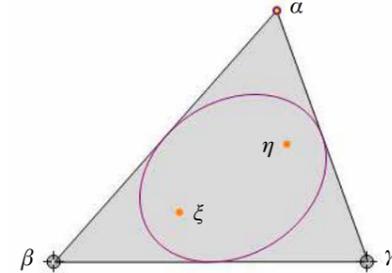
いるのではないのでしょうか。 $i-1$  の共役複素数である  $-i-1$  も  $f(x) = 0$  の解であることに気が付けば、 $f(x) = (x+1)(x^2+2x+2)$  から、 $-1, -1 \pm i$  が解であることが分かります。

(2) の複素平面は、高校3年生の皆さんが数学Ⅲで学んでいる複素数平面のことです。この問題は複素数平面が高校の課程に初めて入ったところの問題です。複素数平面のルールに則り、複素数  $a + ib$  について、 $a$  を  $x$  軸、 $b$  を  $y$  軸にプロットすれば、一目瞭然と答えがわかります。

これだけ見るとシンプルな問題ですが、実はこの背景には美しい定理が潜んでいます。(2) の問題をもう少し一般化しましょう。3次方程式  $g(z) = (z-a)(z-\beta)(z-\gamma) = 0$  の解は  $a, \beta, \gamma$  なのは明らかですね。ここで、 $a, \beta, \gamma$  は異なる複素数です。 $g'(z) = 0$  の2つの解を  $\xi, \eta$  とした時(これは  $g(z)$  の特異点ともよばれます)、この点は  $\triangle a\beta\gamma$  の内部に含まれることが示せます。これはガウス-ルークスの定理と呼ばれる定理の特別な場合です。

面白いのはここからです。 $\triangle a\beta\gamma$  に含まれる楕円の中で面積が最大になるものは、三角形

図1 マーデンの定理



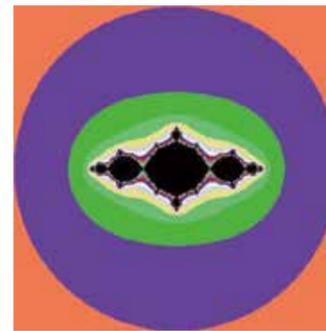
の各辺の midpoint で接するものになることが示せます。この楕円はシュタイナー内接楕円と呼ばれます。そして、 $g(z) = (z-a)(z-\beta)(z-\gamma) = 0$  のとき、 $g'(z)$  の特異点はシュタイナー内接楕円の焦点に一致するのです。

これはマーデンの定理(図1)と呼ばれるもので、複素数と幾何学が綺麗に結びついているのがわかると思います。一見難解な定理に見えますが、高校数学の参考書に証明が載っていたこともあります。複素数平面にまつわる定理の中では、特に美しいものの一つだと思います。

## 複素数平面に潜むフラクタル

次に実際に見て美しい数学の例として複素力学系を紹介します。

図2 充填ジュリア集合の一例  
黒い領域が無限大に発散しない  $Z_0$ 。他の色は発散の速さに応じて塗り分けられている。



複素力学系の基礎は、数学Ⅲにも出てくるニュートン法です。ニュートン法とは方程式の解を単純な数値計算で求めるためのアルゴリズムです。これに対して、解が複素数であっても同じような方法で求めることができないかと問いを投げかけたのがケーリーという数学者でした。この問題は虚数問題と呼ばれ、20世紀の初めにジュリアやファトゥによって解決されました。そして、この虚数問題を解決する中で、美しい「フラクタル」と呼ばれる図形が浮かび上がってきました。

ここでは、その代表的なものであるジュリア集合を皆さんに見ていただこうと思います。

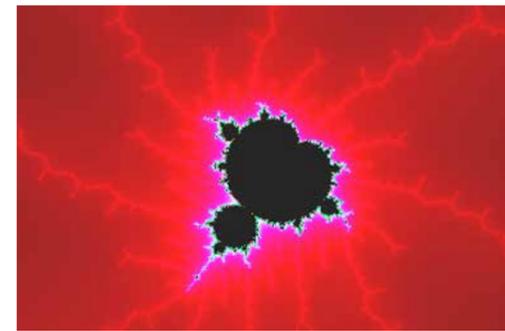
次の漸化式を見てください。

$$Z_{n+1} = Z_n^2 + c$$

$c$  は複素数のパラメータです。 $c$  を固定したときに、どのような初期値からスタートするかによって、 $Z_n$  が無限大に発散するかどうかが決まります。ここで、無限大に発散しないような初期値  $Z_0$  をすべて見つけ出し、複素数平面上に描いたものが、充填ジュリア集合です。

図2の黒い部分の値を初期値として出発すれば、数列は発散しません。いろいろな  $c$  の値

図3 マンデルブロ集合  
赤い閃光のように見えるところには細い集合の領域があり、拡大するとそこにも同じ形が現れる。



に応じて、さまざまな充填ジュリア集合の図が得られます。

充填ジュリア集合はフラクタルと呼ばれ、図形の一部を拡大すると、全体によく似た図形が出て来ます。充填ジュリア集合の境界は複雑な線を描いており、どこまで拡大しても奇妙な形が延々と続きます。

さらに、充填ジュリア集合の黒い部分が一つの図形として繋がっているような  $c$  だけを集めて先ほどと同じように複素数平面上にプロットすると、マンデルブロ集合と呼ばれるものができます(図3)。これも、ジュリア集合同様、フラクタル図形です。

近年のコンピュータの発展によって、簡単なプログラムを走らせることでこの美しい集合を描くことができるようになりました。最近ではiPhone向けのアプリでも、フラクタル図形を鑑賞することができます。「Fractal」などのキーワードで検索して見てください。

虚数や複素数には、オイラーの公式やリーマン予想など、まだまだ面白い話題があります。興味をもった方は、ぜひ複素数の奥深い世界を覗いてみてください。

## ガモフの問題

複素数平面を用いた、面白いクイズをご紹介します。

ある無人島に財宝が埋めてあり、その無人島にはカシの木と松の木と絞首台があります。

「絞首台よりカシの木に向かい歩数を数えつつ歩むべし。カシの木にいたら、右へ90度向きをかえ、さらに同歩数歩むべし。しかして大地にクイを打て。ふたたび絞首台より松の木に向かい歩数を数えつつ歩め。松の木にいたら、左へ90度向きを変え、さらに同歩数を歩むべし。しかしてふたたび大地にクイを打て。くいとくとの中間を発掘せよ。なんじ宝を見出さん。」

この財宝の在り処を記した古文書を読んで無人島に行くと、不幸にも、嵐によって絞首台が吹き飛ばされ跡形もなくなっていました。さて、あなたは無事宝を見つけることができるでしょうか。

この問題を解く鍵となるのは、複素数平面上の点  $a$  を原点の周りに反時計向きに90度回転すると、その点は  $ia$  で表されるということです。ぜひ、挑戦してみてください。



理学部 数理科学科  
石田 久 教授

## PROFILE

理学博士。専門は函数論。現在の研究テーマは、リーマン面の理想境界、極値的長さ、複素力学系。算数は好きだったが、中学に入って数学が嫌いになった。中学3年生で良い先生に巡りあって、再び数学を好きに。高校の頃はZ会などが出している難しい添削問題に取り組み、正解を導き出すことに夢中になった。大学進学後は、数学の中でも絵を描ける分野だったことから複素解析を選ぶ。「作図を丁寧にすることで、答えが見えてくることもある。高校生の皆さんには丁寧に絵を描く習慣をつけてほしい」と語る。私立高槻高校OB。



## ガモフの問題(解答)

複素数平面上で、カシの木の位置を  $-1$ 、松の木の位置を  $1$ 、絞首台の位置を  $\Gamma$  とします。

カシの木から90度向きを変えて進んだ位置を  $a$ 、松の木から進んだ位置を  $\beta$  とすれば、ヒントより、

$$\begin{aligned} a &= (\Gamma - (-1))i + (-1) \\ &= i\Gamma + i - 1 \\ \beta &= (\Gamma - 1)(-i) + 1 \\ &= -i\Gamma + i + 1 \\ \frac{a + \beta}{2} &= i \end{aligned}$$

となって、宝は複素平面上の  $i$  の位置にあることがわかります。

これは、ガモフの問題と呼ばれる有名なパズルです。最近映画化された「万能鑑定士Q」シリーズの原作にも、これと同じような問題が載っていました。

このクイズは複素数平面を使わなくても解けるのですが、複素数平面を用いることで、幾何学の問題が代数的に表現され、宝の在り処を見つけることができました。複素数平面にはこのように現実の解を求める力があるのです。複素数はまさに代数学と幾何学を結ぶ「 $i$ の絆」なのです。

## 太陽光発電を用いた水電解

皆さん、水素エネルギーという言葉聞いたことがあるでしょうか。水素と酸素が反応すると水になりますが、この化学結合の際、電気エネルギーが生み出されます。このエネルギーを利用しようというものです。

最近では、燃料電池車の登場など、ようやく水素エネルギーを「使う」面での実用化が進んできました。そこで、これから鍵になるのが水素を「作る」方法です。水素を作るためには、水に電気を流して水素と酸素に分解する、水電解という方法を用います。高校で実験をした人も多いでしょう。私の研究室で行っている水素製造も、原理は同じです。

電力源として太陽電池を使い、自己完結できる再生可能エネルギーを目指しています。太陽電池と水電解を組み合わせて、全体として最も効率的になるようにシステムを最適化するのが私の研究テーマです。

太陽は常に照っているわけではなく、太陽電池の出力は不安定です。そうした不安定な電源と水電解槽をマッチングさせるときにどうしたら最も効率が良くなるのかを考えています。例えば、変圧器を組み込めば、太陽電池の出力を一定にすることはできますが、コストがか

かります。そこでコストを下げるために用いるのがスイッチングです。乾電池を繋ぐのと同じで、およそ10cm四方の水電解槽を複数並べ、太陽電池の出力に合わせてそのつなぎ方を変えていくのです。太陽電池からの出力値が変わるたび、新しい電解槽を直列や並列で繋いだり、あるいは外したりすることで、常に無駄なく効率的に水素を発生することができます。

## より低コストな電極を目指して

先ほど、水電解の原理自体は高校で習うものと同じと言いました。しかし、使っている電極に実は特徴があるのです。

水電解には、固体高分子膜水電解と、アルカリ水電解という方式がありますが、私の研究室ではより低コストでできるアルカリ水電解を行っています。本来、電気を通しにくい水に効率よく電気を流すために、水酸化カリウムを溶かしてアルカリ水にしますが、大抵の金属が溶けてしまうため使える電極は限られます。そのため、水素発生反応を促進する触媒能があり、アルカリにも耐久性がある白金が理想的な電極となります。

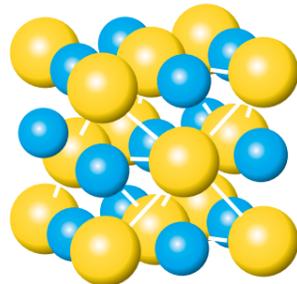
ただし、白金は高価なため、コストが高くなります。そこでよりコストが低い代替材料を探し

てきました。昔から使われているコバルトやモリブデンの電極は、触媒としての能力が高く、よく水素を発生させるのですが、アルカリの中での耐久性に若干の難がありました。毎日使うエネルギー発生源として考えれば、頻りに電極を取り替えなければいけないのは実用的ではありません。触媒能と耐久性という二つの条件をクリアする素材を探してきて、ようやく目処がついてきました。それが、ニッケルと鉄を用いた電極です。

ニッケルや鉄は、アルカリに強いので耐久性は抜群です。まだ水素触媒能はコバルトやモリブデンに及びませんが、もう一步というところまで来ています。

同じ素材を使っている、鉄とニッケルの比率や、ちょっとした作製法の違いで、全く違った特性を持ってしまう。今はより効率的な電極をつくるためにはどうしたら良いのか、材

図1 水素吸収合金のイメージ  
黄：金属原子 青：水素原子



料のバランスを調整しながら模索しています。

## 水素を金属に閉じ込める

太陽光発電を用いた水素製造には、一つ欠点があります。それは、常に一定の水素を作ることができないということです。天気が悪ければ十分な水素を製造することができません。この欠点をカバーするために、天気が良い時に作った水素を貯めておく技術があると便利です。そこで登場するのが、私の研究室のもうひとつのテーマである水素吸蔵合金です。

水素を貯蔵しておくためには、いくつかの方法があります。燃料電池車で使われているのは、高圧ガスです。水素を700気圧という高圧

にして、小さなボンベに入るよう圧縮するのです。しかし、結局はガスですから、どうしても密度は低くなってしまいます。液体にすればより凝縮することはできますが、極低温に冷やすためコストが高くなってしまいます。

そこで、水素吸蔵合金という周期的にならんだ金属の格子の隙間に水素を貯める方法を用います(図1)。熱した金属の塊に、圧力をかけた水素ガスを接触させると、水素は金属の格子の隙間にすっと入っていきます。こうして金属の中に閉じ込められた水素は、金属をさらに熱することで取り出すことができます。

合金は固体なので、ガスに比べて高密度で水素を蓄えることができます。コストも液化に比べて低く抑えることができます。もつとも、

水素吸蔵合金ならではの欠点もあります。金属を使うのでどうしても重くなることです。

私の研究室では、化学合成法と呼ばれる手法でマグネシウムとニッケルの合金を作っています。全く新しい手法のため、高温で金属を溶かして作った合金などとは異なる性質をもった合金ができるのです。

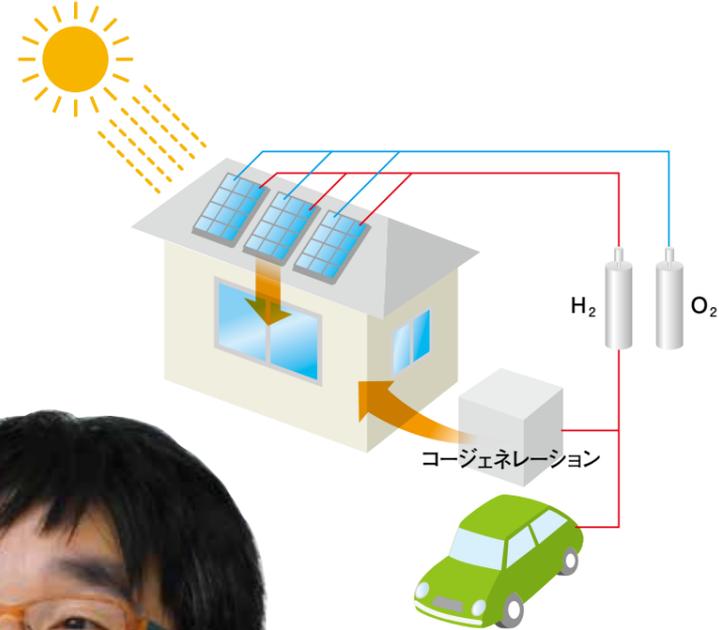
素材選びにも、ポイントがあります。マグネシウムは軽金属なので、他の金属に比べて軽く、水素の吸蔵量がある程度達成できるということが理論でも実験でも確かめられています。そこで、他の金属を混ぜて複合材にし、さらに性能を引き出せないかを模索しています。

今後は軽量化に加えて、より低い温度で水素を取り出せる合金を作ることが目標です。何百度にも熱しないと水素が取り出せないのであれば、危険も伴いますし、持ち運びも困難です。理想的には常温に近い温度で水素が取り出せるようなものを作りたいと思っています。

自然というのはよくできていて、なかなか全ての場面、用途でオールマイティに使えるような水素貯蔵の方式はありません。高圧ガスや液化、水素吸蔵合金には、それぞれメリットとデメリットがあります。今後は用途に応じて、それぞれの貯蔵法を使い分けていくことになるでしょう。水素吸蔵合金は持ち運びには重いです。据え置きなら多少重くても支障はありません。例えば、住宅用の水素の貯蔵装置には最適です。

私が研究している技術を組み合わせれば、将来的には全てのエネルギーを自給自足で賄えるゼロエネルギー住宅を作ることができます。屋根に太陽電池を設置して、晴れた日にはそこからエネルギーを使います。更に水電解槽と水素吸蔵合金を併設して、余ったエネルギーは全て水素の形で貯めておきます(図2)。そうした理想の住宅像を実現するために、これからも研究を続けていきます。

図2 エネルギーを自給自足できる理想の住宅



# 水素が実現する エコな社会

## 見えてきた 水素エネルギー時代の幕開け

昨今の温暖化や、原子力発電所の事故に伴って、必要性が年々高まってきているのが、水素エネルギーです。燃料電池車の登場など、ようやく実用化が進んできた水素燃料ですが、水素社会の実現のためには、大本となる「水素を作る」ことが欠かせません。太陽光を用いたエコな水素製造や、水素を貯めておくための新技術を開発している大森隆先生に、お話を伺いました。

### ADVICE

#### 失敗を重ねるのはたった1回の成功のため

早くから、コツコツと基礎を積み重ねる学力の足腰をしっかり鍛えて、学年が進んだ時に、大事な課題に取り組んで良い研究をして欲しいと思います。良い研究とは、机の上で考えるだけではできません。頭の中だけで考えられることはたかが知れていますので、実際に手を動かすという姿勢が大切です。

その時に大事なことは、失敗してもへこたれないことです。実験や研究は、100回やったら99回は失敗するものです。たった1回の成功のためにやり続けるのです。理詰めと考えて最初からうまくいったら良いのですが、そう一直線にはいきません。失敗を積み重ねた末の、ひらめきや直感が鍵となることもよくあります。ノーベル賞クラスの発見でも、実験条件を間違えて新しい発見に繋がるということは少なくありません。

基礎はもちろんですが、失敗しても気にせず前に進めるための忍耐力や、楽天的な考え方も大切にしたいと思っています。

理学部 物理科学科

大森 隆 教授

### PROFILE

博士(工学)。専門は環境科学、物理化学、電気化学。「同じ研究をやるならばその時代が一番大事なことをやりたい」をモットーに、学生の頃からエネルギー問題を大きな課題として取り組んできた。大学時代は電気化学を専攻し、光触媒の研究に取り組む。その後、温暖化防止のための産業技術を研究しているRITE(地球環境産業技術研究機構)で、化石燃料に代わる代替エネルギーの研究に携わる。そこでテーマとしていたのが水素製造。京都産業大学に移った後もそのテーマを継続し、水素を中心としてエネルギー問題の解決に取り組む。大阪府立天王寺高等学校OB。



## まもなくやってくる水素社会

トヨタ自動車が来年、水素燃料電池車(FCV)を出す話題になっています。こうした燃料電池車の開発の背景には、CO<sub>2</sub>による温暖化問題があります。今、自動車をはじめ世界中で化石燃料が使われていますが、2050年までに使用量を半減、2100年までに全廃しなければ、2100年には気温が2°Cも上昇し、生態系などに悪影響が出ると言われています。原子力発電に代わるクリーンエネルギーも求められています。

燃料電池車は10年前までは1億円と極めて高価でしたが、ここ10年で急速にコストが下がって、2015年に発表される車は1000万円を切ると言われていました。携帯電話でも、一台だけつろうとすると膨大な値段になりますが、大量生産することで誰もが手に取れる価格になっています。燃料電池車も、これから量産化や技術革新が進めば、さらに安くなっていくでしょう。社会はようやく、水素エネルギーを使う状況になってきたのです。

## 時代とともに変わる“良いLSI”

LSIは、一見すると一つの部品（多くは黒いチップ状）のように見えますが、実際には、数十億もの部品からできています。それだけの部品を思った通りに動くように設計することは、人の手ではほとんど不可能になっていて、設計をするためのコンピュータソフトウェアを使い設計することが主流です。実際の設計では、ハードウェア記述言語（HDL）を使ってプログラムを組むようにLSIが設計されています。

わってきました。以前は、処理速度が速いLSIや構成部品が少ないLSIが良いLSIとされていましたが、近年では、消費電力の少ないLSIやトラブルがあっても正しく動くLSIが求められるようになってきました。私は、トラブルの中でもソフトウェアに強いLSIに関して研究を行っています。

### 思わぬ攻撃者の出現

ソフトウェアとは、一度壊れてしまうと直せないハードエラーの対義語で、一時的にメモリ

図1 宇宙線由来の中性子がSi原子と核反応し多数の高エネルギー粒子を生成

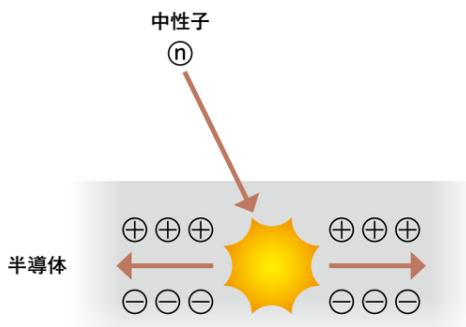
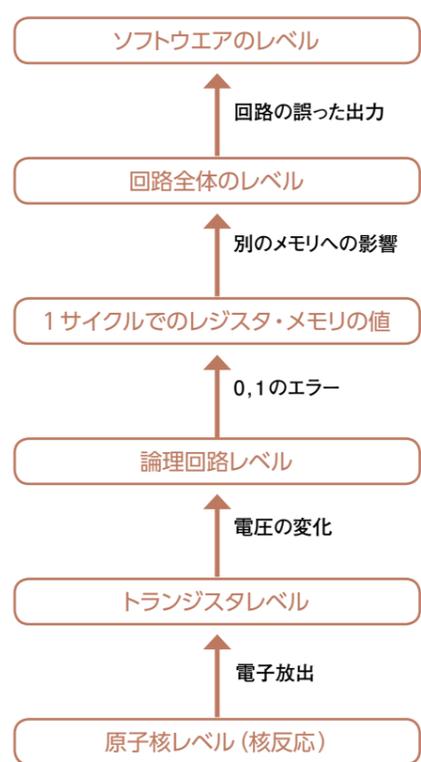


図2 ソフトエラー耐性をレベルに分けて評価する仕組み



# LSI微細化の宿命 ソフトエラーに対処する

## LSI設計の新たな評価基準を目指して

私たちの暮らしを影で支えているLSI。

Large Scale Integrationの略で、日本語では大規模集積回路と言われます。

コンピュータはもちろん、携帯電話からテレビ、家電製品など

身の回りのあらゆる場面で活躍しています。

そのLSIが、自然に壊れてしまうとしたら

あるいは、情報を盗み出せるような回路が組み込まれていたら

私たちの生活の根底が揺らいでしまいます。

これらのトラブルに対して、ある設計のLSIがどのくらい強い耐性を持つのか、

その評価の方法について研究をされている吉村正義先生にお話をいただきました。

### Another Face

#### あらかじめ作り込まれたウイルス

私は、LSI設計の信頼性評価という点で共通するところがある「ハードウェアトロイ」を見分ける方法についても研究しています。

不正にコンピュータに侵入するソフトウェアとして有名な「トロイの木馬」に対して、あらかじめLSIなどに作り込んだものをハードウェアトロイと呼びます。外部からの指令や何らかの条件に反応して起動し、コンピュータに不正な攻撃を行う、広い意味でのウイルスの一種と言えるでしょう。

LSIを製造できる国に限られていた時代には、ほとんど心配されませんでしたが、世界中のさまざまな国でLSIが製造されるようになった現在、自社の製品であっても、全ての部品を完全に安全だと言い切れるメーカーはそうないと思われれます。

近年、中国のファーウェイ社の部品が、アメリカに納入できなくなることがありました。真相は不明ですが、ハードウェアトロイの疑いがあったのかもしれませんが。

ハードウェアトロイのやっかいなところは、コンピュータの部品のような精密機械は、中を開けてしまうと使い物にならなくなってしまうことです。そのため、一つひとつ中を開けて調べるといわけにはいきません。

私が、実験的に作ったハードウェアトロイは、トランジスタ数十個、LSIの面積にしてわずか0.1%の部品によって、暗号鍵を解くために必要な情報を抜き出すことができました。

LSIにハードウェアトロイが潜んでいないか、中を開けなくても分かるような回路の設計、いわば「嘘発見回路」を実現したいと考えています。



コンピュータ理工学部  
コンピュータサイエンス学科  
**吉村 正義** 准教授

#### PROFILE

博士(工学)。専門は計算機システム。現在は主に、ソフトウェア耐性評価と耐性強化、悪意のある攻撃を考慮したLSI設計フローに関する研究に取り組む。大学では人工知能を学んだが、卒業後入社した企業で半導体を研究開発する部署に配属される。もともと対象にはこだわらず、ものを突き詰めて考えたり、問題を解くことが好きだったことから、LSIの設計に興味を持つようになり、現在の研究へと進んだ。京都府立西城陽高等学校OB。

#### ADVICE

##### とことん真剣に

高校生のみなさんには、何でもいから、とことん真剣に取り組めるものを見つけてもらいたいと思います。それによって成功するに越したことはありませんが、たとえ失敗しても、真剣な失敗からは多くの得るものがあるからです。

若い頃には、なかなか気がつかないものですが、人生の時間はとても貴重です。真剣にやっても適当にやっても、時間は同じだけ過ぎていきます。適当にやっても失敗するのがもっとも良くない。それは、時間を無駄に使っているのと同じことです。

時間の貴重さに早く気づくことが、成功への近道です。やるからにはとことん真剣になってください。

値がおかしくなるエラーのことです。

ソフトウェアは、LSIの部品が自ら発するアルファ線や宇宙から降り注ぐ中性子線によって、LSIの中のシリコン原子などが壊れることで、電子が放出されて起こります(図1)。その電子が回路やメモリ内の電気信号を書き換え、誤った値を出してしまうのです。原子や分子単位での損傷なので、ほとんどの場合、LSIがハードウェアとして壊れることはなく、電源を入れ直すと修復することから、ハードエラーと区別されています。

10年ほど前までは、ソフトウェアという言葉はあまり聞かれなかったものでした。というのも、LSIの部品の一つひとつが今よりも大きかった時代には、それほど頻繁に起こるエラーではなく、問題にならなかったからです。

ところが、LSIの微細化技術の進展により、一つひとつの部品が小さくなり、同じ面積の中にたくさんの部品が並べられるようになりました。それによってコンピュータや携帯電話の性能は向上しましたが、一方で中性子線の大きさは昔も今も変わりません。そのため、中性子線による影響が大きくなり、ソフトウェアはもはや無視できないエラーとなったのです。最先端のコンピュータは、その影響も顕著であるため、ソフトウェア対策技術の塊と言っても過言ではありません。たとえば、日本が誇るスーパーコンピュータ「京」では、もしもソフトウェア対策を何も施していなければ、おそらく1分も持つことなく、ほとんどまともな計算ができないでしょう。

### ソフトウェア耐性を評価する基準作り

ソフトウェアが起こること自体は防ぎようがありません。LSI内のアルファ線は昔に比べて軽減されましたが、宇宙から降ってくる中性子線をなくすることはできないからです。中性子線にさらされないようにするには、原子炉のような厚いコンクリート壁や大量の水で遮る方法があります

が、家庭で使うコンピュータや持ち歩く携帯電話にはこの方法が使えません。

それでは、いったいどうすればソフトウェアを回避できるでしょうか。現在行われている主な対策は、1個のトランジスタが誤動作を起こしても、それを誤動作として検知するように、あらかじめ設計しておくことです。

基本的な設計の考え方としては、回路に冗長性(余分な配線)を持たせて、複数の経路で信号を送ることなのですが、さまざまな開発者が独自の手法を編み出していて、どの方法が優れているのか、評価する基準がありませんでした。

そこで、私は、ソフトウェアへの耐性を評価する仕組みを作りました。

この仕組みは図2のようになっています。LSIを原子核からソフトウェアまでのいくつかのレベルに分けて、下のレベルで起こったエラーが上のレベルに影響を及ぼす様子をシミュレートします。

例えば、原子核が壊れると電界が生じます。するとトランジスタの電圧に影響を与え、論理回路での0,1のエラーを起こします。それは計算結果の0と1の組に影響を与えて、回路全体のエラーとなり、ソフトウェアの挙動に影響を及ぼします。

壊れる箇所によっては上のレベルまでエラーが伝搬しないことや、企業などでは下のレベルから考える時間や手間がかけられないという事情から、原子核のレベルから積み上げるソフトウェア耐性評価の手法は開発されてきませんでした。しかし、厳密に評価するには、原子核のレベルから積み上げることが必要です。現在、論理回路のレベルまではすでにできていて、今はその上のレベルに取り組んでいるところです。

ソフトウェアは、LSIの微細化技術のさらなる進展によって今後ますます重要な問題になってくでしょう。LSIのソフトウェア耐性を評価するためのベンチマークが今まさに必要なのです。

### 宇宙はソフトウェア地獄

ソフトウェアは宇宙からの中性子線によって起こります。当然、地上から高度を上げて宇宙に近づけば近づくほど、エラーが起こる確率が上がります。

飛行機の中では、地上の100倍ほど起こりやすくなり、12時間のフライト中に平均3、4回は起きていますと考えられます。

さらに宇宙に持って行くコンピュータでは、特別に設計した部品が使われています。同じ部品が3つや5つと複数組み込まれていて、どれか1つがソフトウェアを起こしても、残りが正しい計算結果を出すようになっていきます。また、このような環境ですから、長期間使えないことが悩みのタネとなっているそうです。

# ネットワークはもっとスマートになれる

## 分散させることで成功したインターネット

インターネットがここまで広く普及した一つの要因は、下位レイヤ（層）をシンプルに設計したことでした。コンピュータ間でデータを送受信する際に、ブラウザやメールソフトなどのアプリケーションが処理する部分と、ネットワークが処理する部分を、別のレイヤとして区別し、ネットワークは個別のアプリケーションや送信者・受信者の事情などを考慮しなくてもいいようになっています。ネットワークはデータの送受信に関する最小限の仕事だけ受け持ち、複雑なことはそれぞれのコンピュータに任せることにしたのです。

インターネットの草創期に、この設計思想は功を奏し、結果として世界中のコンピュータがネットワークを介してつながりました。

しかし、シンプルに作られているということも、反面、単純なことしかできないということでもあります。かつては利点であったネットワークの単純さが、近年、ネットワークの弱点と考えられるようになりました。

## 目立つようになってきたトラフィックの圧迫

ユーザー数とデータ量の増加によって、インターネットにおいて、あるいはまた、あるサービス提供者のデータセンター内で、トラフィックが圧迫されています。

最近の例では、アメリカでアカデミー賞の授賞式において、複数の人気俳優が写った写真を投稿したところ、260万ものリツイートが集中し、Twitterのサーバが落ちてしまう、ということがありました。

Twitterのような何億ものユーザーを擁する

## アプリケーションの要求に応じて柔軟に変化するネットワーク

FacebookやTwitterのユーザーは増加の一途をたどり、各社のデータセンターの負荷やインターネット上を流れるデータの転送量も増え続けています。この傾向は当面とまりそうもなく、現在27億人と言われるインターネット利用者が世界人口70億人になった時に、現在の技術のままでは十分なのかという不安があります。秋山豊和先生が研究するのは、状況に柔軟に対応できるネットワーク。ネットワークを賢くすることで、増え続けるデータ転送をうまくさばらうという技術です。その概要をお話いただきました。

サービスでは、データセンターに何台ものサーバを設置して、それらをネットワークでつなげて運用しています。また、多くの企業のシステムも、このようなデータセンター内に置かれています。

膨大なデータを扱うデータセンターでは、トラフィックの圧迫は深刻な問題です。今よりもさらに巨大なデータセンターを建設することで問題に対処しようとする企業もありますが、ピークトラフィックを均すことや、データ転送の効率を上げることで対処できれば、巨大施設のための莫大なコストもいくらか下げられるかもしれません。

## Software-Defined Networking

データ転送の効率化を実現する技術として現在注目を集めているのがSDN（Software-

### ADVICE

#### 普段から違いを見分ける心構えを

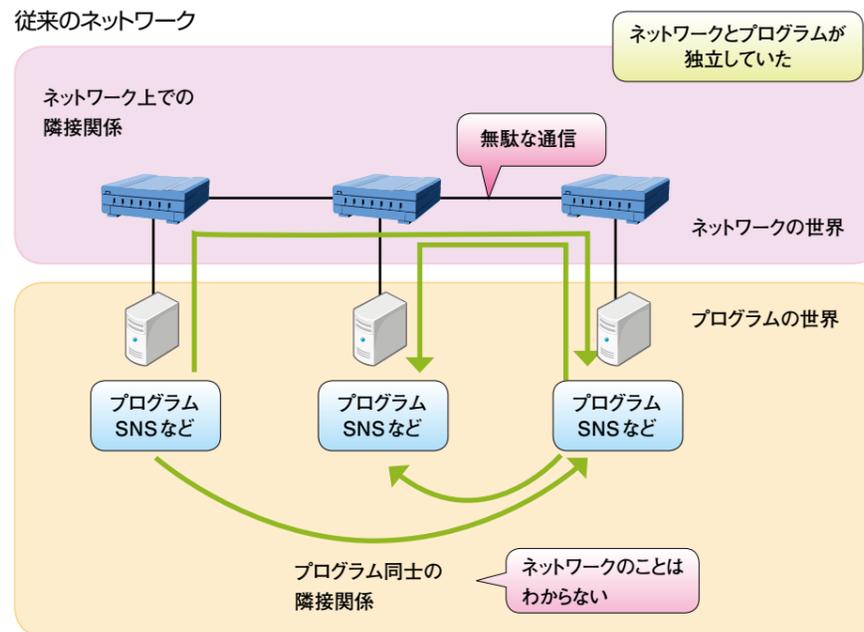
ネットワークの技術は日々進歩しています。しかし、利用者の側から見ると、ブラックボックスになっていて、送ったデータがどのように相手に届いているのか、見ることはできません。

しかし、かつての技術と今後の技術の違いがわかっていないとネットワークの運用をすることもできません。今やネットワークは社会インフラとなっており、それを支える人が常に求められています。

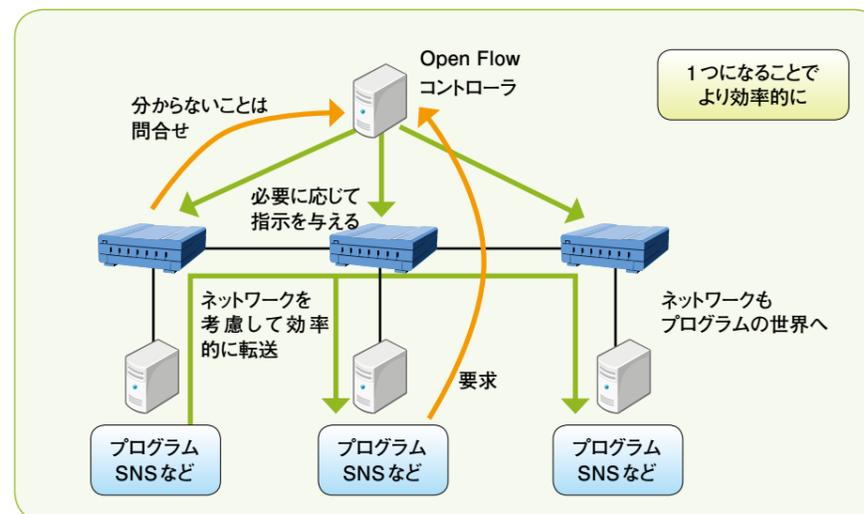
普段からツイートやLINEのメッセージ一つ送るときにも「この仕組みはどうなっているのか?」と、その裏側にも思いを馳せて、コンピュータやネットワークを学ぶきっかけとしてもらえればと思います。



従来のネットワーク



OpenFlowを活用したネットワーク



## コンピュータ理工学部 ネットワークメディア学科 秋山 豊和 准教授

### PROFILE

博士(工学)。専門は情報工学。小学生の頃、ファミコンを買ってもらえず、代わりにMSXというパソコンを買ってもらったことがきっかけでプログラミングに興味を持つ。大学に入学する時には情報系を学ぶことが視野に入っていた。分散データベースの研究と大学のネットワーク運用の経験から、アプリケーションとネットワークの両者に興味を持ち、SDNという両者をつなぐ技術の登場に「これまでの経験を活かした研究開発ができれば」と考えている。大阪府立三国ヶ丘高等学校OB。

Defined Networking) です。

SDNは、あらかじめ決めたことしかできなかったネットワーク機器（ルータやスイッチなど）を、アプリケーションが制御できるようにする技術コンセプトのことで、そのためのインタフェースを標準化したものの1つにOpenFlowがあります。OpenFlowコントローラとOpenFlowスイッチ、そしてコントローラとスイッチがコミュニケーションをとるための規格であるOpenFlowプロトコルから成ります。

たとえば、従来のネットワークでは、転送データの優先度や送り主と受け手との状況、データの種類などに関係なく、どんなデータでもっとも短いパスから優先して配信していました。

それに対して、OpenFlowではアプリケーションからのリクエストやOpenFlowスイッチからの問合せに応じて、OpenFlowコントローラがOpenFlowスイッチを制御、状況やデー

タの種類に応じたデータの転送を実現します。

それによって、たとえば最短パスを使わずに「このデータは遠回りして送っても構わない」という方針を与えてデータを転送することで、ネットワークの冗長部分を活用して、一時的に経路を太くすることが可能になります。

ただ、OpenFlowはあくまでインタフェースであり、このような制御をどのように実現するかはアプリケーション開発者側で開発する必要があります。すべてをアプリケーション開発者に委ねるのは困難なので、その開発負担を軽減し、うまくネットワークとアプリケーションをつなぐミドルウェアの研究開発が必要となっています。

## ネットワークが仮想化される

これまで、ネットワークの構成には、スイッチやルータなどハードウェアの制約がついてまわりましたが、SDNでは物理的な機器に制約されない仮想的なネットワークの提供も可能になります。

例えば、物理的にインターネットへの入り口に設置する必要があったファイアウォールも、OpenFlowスイッチによって、その機能を必要とするトラフィックはファイアウォールを経由するように誘導することができれば、設置場所の制約がなくなります。さらに、物理的にLANに隣接して設置する必要すらなくなりますから、仮にファイアウォールの機能を提供する「ファイアウォール・サービス・プロバイダ」のようなサービスが出てくれば、自前のLAN内にファイアウォールを置く必要すらなくなることも考えられます。

今日、クラウドサービスを提供する事業者では、複数の利用組織が同じデータセンターに共存するため、その組織ごとのポリシーなどに応じてサービス内で仮想的にネットワークを分離する必要があります。利用者ごとに個別にネットワークを設計し、構築しなくても、仮想化されたネットワークがアプリケーションと連携することで、物理的な構成を意識せずにネットワークを構築できるとすれば、ネットワーク構築コストが軽減され、今まで以上にサービスそのものに注力できると期待されます。SDNによるネットワークの仮想化においてもミドルウェアの開発が急がれています。

現在、私はPub/Subをターゲットに、SDNの研究に取り組んでいます。Pub/Subは情報の発信、購読の仕組みで、SNS（ソーシャル・ネットワーキング・サービス）の基盤の部分に使われています。SDNはまださまざまな種類のアプリケーションから活用できる形に成熟しているわけではないため、代表的なアプリケーションとして既存のSNSを効率化するような、新たなミドルウェアを構築することが目標です。

# 進化的アルゴリズムは人間を越える人工知能を生むか

## ファジニューラルネットワークを進化的アルゴリズムで学習させる

コンピュータが、計算能力や記憶力でしか人間に勝てなかったのは昔の話。今やコンピュータは自ら学び、判断・認識の能力までも身につけてやっています。日進月歩の技術開発の世界で、人間しか持ち得ないと思われていた能力の獲得は、どのようにして可能となったのでしょうか。進化的アルゴリズムとファジニューラルネットワークを組み合わせる試みを行っている岡田英彦先生に詳しいお話を伺いました。

### 猫を見ると「猫」だとわかる人工知能

2012年にあるニュースが、人工知能の開発に関わる研究者たちに衝撃を与えました。それは、Googleのコンピュータが、画像に映っている猫を認識する能力を、自ら学習によって身につけた、というものでした。可能にしたのは、生物の脳の情報処理を模倣するニューラルネットワークを用いたパターン認識技術でした。一昔前に脚光を浴びた研究分野なのですが、人工ニューロンの層を増やす（つまり脳を分厚くする）とうまく学習できないという壁にぶつかり近年は下火になっていました。

Googleの研究者のあるアイデアがこうした従来の問題を解決し、画像に猫が映っているかどうかを判断できるレベルにまで能力を高めたのです。このような人工知能による認識・判断能力の飛躍的な向上は近年多く見られ、例えばFacebookは、画像に映る人間の顔を、97.5%の精度で識別する人工知能を開発しました。これは人間が他人の顔を見分けるのとほぼ変わらない精度です。向き、表情、背景など複雑な要素を考慮しなければならないため、顔認識には非常に高い技術が要求されます。

これまでのコンピュータは、圧倒的な計算能力と記憶力でこそ人間の能力を上回っていましたが、認識や判断といった能力では人間に敵いませんでした。しかし、今やコンピュータが私たちに追いつき、追い越しつつあるのです。

### 生物の進化をモデルとした進化的アルゴリズム

Googleの猫認識には、誤差逆伝播法を改良したディープラーニングという学習法が用いられています。これは簡単に言えば、学習すべきデータを与えた時に、ニューラルネットワークが誤った出力を出せば、その誤りを正せるように、

人工ニューロン網を出力層から入力層へ逆方向に辿りながらチューニングする方法です。これに対して、私が研究しているのは、進化的アルゴリズムという学習法です。

進化的アルゴリズムはその名の通り、生物の進化の過程がモデルとなっています。進化論によると、ランダムに起こる突然変異のうち、最も環境に適応し、多くの子孫を残しやすい特徴が勝ち残り、伝えられていきます。進化の中で生き残る個体の適応度はだんだん高くなっていくのです。進化的アルゴリズムによる学習では、人工ニューロン間のリンクの重みを抽出し、DNAのように並べて、それらをランダムにかけ合わせて子孫を作っていきます。子孫の中でより正解に近い出力を出せたものを、環境により良く適合した優れた子孫と評価して生き残らせます。このようにして、ニューラルネットでできた人工知能を自律的に「進化」させて能力を高めていく（正しい出力をだせるように学習させていく）ことができます。

現在、判断の基準や前提は人間が与えているのですが、もしもコンピュータが自ら問題を発見する能力を身につければ、それはさらなる大きな進歩といえます。こうなってくると、コンピュータが自律的に仕事をしてくれる未来も現実味を帯びてくるかもしれません。もちろんこれは現時点ではSFの領域を出ない話ですが、そういった未来を真剣に論じている研究者も少なくあり

#### ADVICE

#### 「得意」よりも「学びたい」で選ぶ

研究室のWebページ、オープンキャンパス、あなたが今読んでいる広報冊子……今の時代、昔よりも大学の情報は入手しやすいでしょう。「なんとなく、入れそうだからこの大学を受けてみる」と漠然とした理由ではなく「将来〇〇の仕事がしたい／〇〇になりたい。そのために大学で〇〇を学びたい。だからこの大学の〇〇学部に入りたい」という風に、入学後にやりたいことをよく見定めて大学・学部・学科を選んでください。やりたいことがはっきりしていないなら、大学の情報や産業の動向を調査して、自分はどなりたいのか、何がしたいのか、よく考えてみてください。

ません。将来、人工知能がヒトの知能を超え、それ以降の技術開発はヒトではなく人工知能が主体になって進む、という仮説があります。そのターニングポイント（「シンギュラリティ」と呼ばれています）は2045年に到来する、と予測している未来学者もいます。

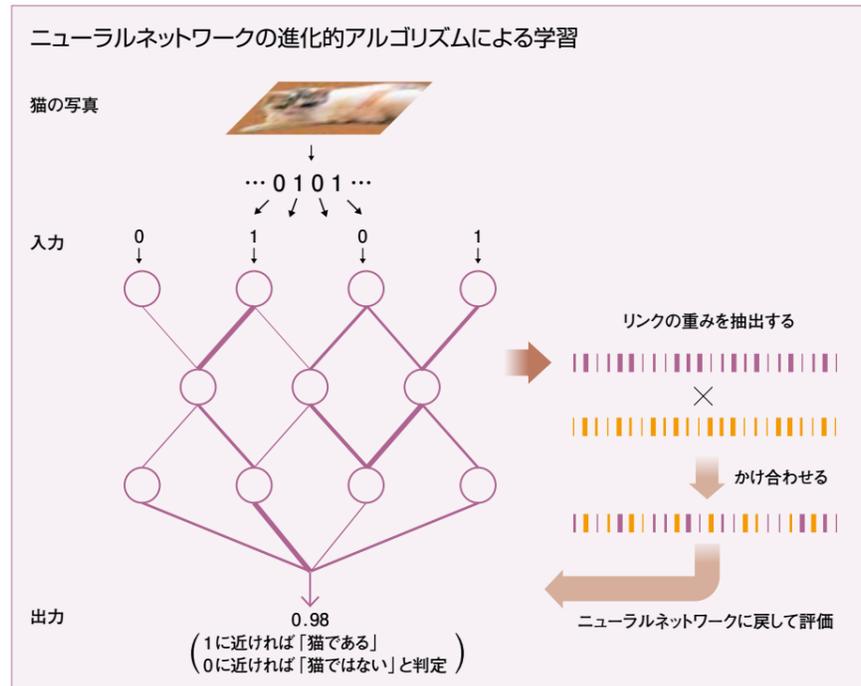
### 「だいたい」の値を扱うこと

Googleの猫認識は、「猫である」か「猫でない」か、数学的に言えば0か1か、ということしか扱いません。しかし、通常人間が何かを判断するとき、このようなはっきりした答え方をするのでしょうか？ 例えば、下宿先のマンションを探したいとして、「家賃は月70,000円までで探したい」と思っているとします。このとき、「家賃が月71,000円だけど他の条件が希望によく合致している」物件は「なかなか良い」物件で検討に値するのではないのでしょうか。このように、ヒトが日常生活で物事を判断したり認識したりする

### コンピュータ理工学部 インテリジェントシステム学科 岡田 英彦 教授

#### PROFILE

工学博士。専門は人工知能。高校生の頃、実は数学や物理はあまり得意ではなかったが、コンピュータが自ら「学習」して新しいことをできるようにするという技術の未来に面白さを感じ、人工知能の分野に進む。生物の進化がそうであるように、コンピュータが偶然作った組み合わせが人知を超えうることが進化的アルゴリズムの面白さだと話す。大阪府立高津高等学校OB。



際の条件や基準はある程度あいまいなもので、私たちはそのあいまいさを深く意識しなくても物事を判断して適切に行動しています。このような「あいまいさ」を含んだ情報をうまく処理することは、プログラムに従って厳密な条件判定のもとで動作するコンピュータには苦手なことの一つで

した。そこで登場したのが「ファジ理論」です。ファジ理論では「だいたい」「おおよそ」「もっと」といった言葉が表現するようなあいまいさを扱います。たとえば「だいたい1〜3」をコンピュータが扱えるようにしたいとき、図1のように1、3で区切ってしまわずに、図2のように区間の端をなめらかにして、1〜3から離れるほど「真である」度合いは下がっていくようにします。

こうすれば人間の特徴であるあいまいさを、ある程度数学的に扱えるようになります。20年ほど前に、ニューラルネットワークとファジを組み合わせた「ニューロファジ」の技術がさかんに研究され、洗濯機や炊飯器といった白物家電にニューロファジの機能を搭載した製品が多数販売されました。

ファジ理論を取り入れることで、あいまいな

図1 あいまいさを持たないデータ表現

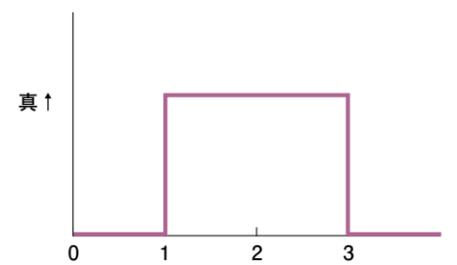
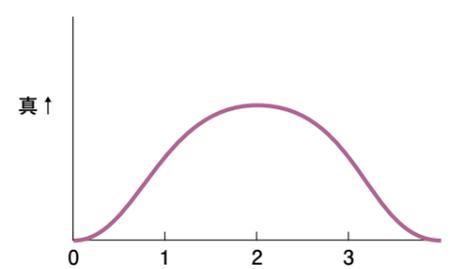


図2 あいまいさを扱えるデータ表現



情報でも学習できる「ファジニューラルネットワーク」を、進化的アルゴリズムを使って進化的に学習させることができないか、ということが私の現在の研究課題です。Googleの猫認識は確かに見事な技術ですが、実は少し不満な部分もあります。彼らの開発した学習法は、数学的に複雑で、簡単に応用できるようになっていません。進化的アルゴリズムでも同じ学習ができるのなら、その方が産業に応用しやすくなるはずですが、なぜなら、進化的アルゴリズムはそれほど複雑な数学的知識を必要としない、敷居の低い手法だからです。技術開発は競争の激しい世界であり、もしかしたら私の研究も誰かに先をこされてしまうかもしれませんが、こうした競争に後押しされた技術の進歩が、少しでも世の中を良くすることができたらと思います。

### 人間の発想を超えたデザイン

機械が自ら学ぶことの利点は、人間の発想の限界を超えることができるという点にあります。例えば、進化的アルゴリズムの代表的な1つとして知られる遺伝的アルゴリズムが新幹線「のぞみ」N700系の先頭形状の設計に用いられたことがあります。新幹線の先頭形状は空気抵抗を受けにくい形が理想ですが、それだけでなく人が乗り込めるスペースがある、といった他の要素も同時に考えなければいけません。この問題を遺伝的アルゴリズムによってコンピュータに考えさせたところ、人間には全く思いつかないようなデザインを生み出したのです。このように、製造業の分野で進化的アルゴリズムは徐々に活用されてきています。



人間が設計した700系

遺伝的アルゴリズムが出した解(N700系)

# タンパク質の働きを解き明かし難病と戦う

## 生命を支え病気も起こすコラーゲンを制御

私たちの体を作るタンパク質。

タンパク質は、ポリペプチドというアミノ酸が連なった一本のひもが絶妙に折りたたまれてできています。

コラーゲンというタンパク質では三本ものポリペプチドが三重螺旋を構成します。

この生命の絶妙で繊細な構造を支えるのが熱ショックタンパク質 (HSP)、特に分子シャペロンです。

それらが体を作ったり守ったり、時には病気の原因にもなる仕組みについて、HSP 47 をはじめ数々の発見をされた永田和宏先生に、お話しいただきました。

### 体を守ってくれるタンパク質

細胞は普通、36℃か37℃、つまり我々の体温と同じ温度で増殖します。しかし、熱を5℃上げ、41℃か42℃くらいにすると、細胞は死んでしまいます。これは、熱によって細胞の中のタンパク質の形や性質が変わってしまう(変性)からです。その時、細胞はただ無抵抗なわけではなく、熱によって変性したタンパク質を修復するため、熱ショックタンパク質 (HSP、ストレスタンパク質とも呼ばれる) を生成します。HSPの中には熱以外にもさまざまなストレスからタンパク質を守るものや、タンパク質の合成時に正しい折りたたみ(フォールディング)を助けるものもあり、これらの働きを持つものは分子シャペロンとも呼ばれます。

ストレスタンパク質は、様々な病気からも細胞を守っています。例えば、脳梗塞などで血管が詰まってしまう(虚血)と、そこから先の血管に血液がいかなくなり、神経細胞は死んでしまいます。実験では、マウスの脳に至る動脈を30分間止めて虚血すると、その後に再び血が流れるようにしても、7日後には脳の神経細胞の一部がきれいになくなります。しかし、マウスを5分だけ虚血すると、この程度では神経細胞は死にませんが、ストレスタンパク質が生成され、その後30分間虚血しても、神経細胞は元気に生きていたのです。このことは我々の実験からもきれいに証明されました。

### HSP 47 の発見と機能の解明

タンパク質の一種、コラーゲンは体の中の全タンパク質の3分の1を占めていて、体内で一番多いタンパク質です。皮膚や内臓や血管の

表面の上皮細胞を支えている基底膜や、骨の主成分でもあります。研究の歴史も古く、100年ほど前から研究されていて、そのメカニズムはほぼ解明されたと思われていました。ところが一つだけ大きな謎が残っていました。それは三重螺旋という複雑な構造が、絡まることなくうまく生成される仕組みでした。その謎を解いたのが、我々が見つけたHSP 47というタンパク質でした。

アメリカ国立衛生研究所 (NIH) にいた時に、コラーゲンに特異的に結合するタンパク質を探していてHSP 47を見つけました。熱ショックタンパク質だとわかり、おそらく分子シャペロンとして働いているだろうと推測し、日本に持って帰りましたが、10年以上その機能は不明のままでした。2000年、マウスを使った実験でHSP 47を作る遺伝子を壊す(ノックアウト)と、コラーゲンが作られなくなることがわかりました(図1)。そこから、HSP 47が、コラーゲンの産生に必須の分子シャペロンだと明らかになった

のです。コラーゲンの三重螺旋構造は、三本のポリペプチドによって自動的に組み立てられるものだというそれまでの定説を覆すことができました。

### 総合生命科学部 生命システム学科 永田 和宏 教授

#### PROFILE

理学博士。専門は細胞生物学・分子生物学。大学では、湯川秀樹に憧れて物理学を学ぶが、卒業後に就職した民間企業の研究所で「自分で手を動かす研究」の面白さを知り生物学へ。コラーゲン生成に特異的なHSP 47の発見や、また小胞体内の変性タンパク質の品質管理機構に関する研究など数々の実績を残す。歌人としても有名で、「塔」短歌会主宰、宮中歌会始詠進歌選者なども務める。京都府立嵯峨野高等学校OB。

#### ADVICE

私の研究室で大切にしているのは、質問をすることです。皆さんも何か質問しようと思いつきながら、授業を聞いてみてください。単に授業を受けるだけではなく、自分の中で知識を再構成しないと質問はできません。特に高校までの教科書には絶対に間違っていないことしか書いていません。それは、まだわかっていないことが書かれていないということ。そこで、何か質問しようと思いつきながら授業を聞くと、当然、先生の話の中で説明しきれいな部分が見えてきます。そこを先生に聞いてみると、先生もわからないことがあります。教科書に書かれていないことや先生にもわかっていないことがあると気がついたら、学問の世界の面白さを身近に感じられるのではないのでしょうか。

### コラーゲンを制御して 難病に立ち向かう

今ではHSP 47についての論文が千本以上出ています。これだけ多くの人が研究しているのは、HSP 47が重篤な病気にかかわっている

からです。肝硬変、肺繊維症、動脈硬化など、臓器の繊維化はコラーゲンの異常な蓄積によって起こります。これらは難病に指定された疾患で、根本的な治療方法はわかっていません。アルコールを飲みすぎたり、肝炎ウイルスに感

染したりすると、肝臓の細胞が死に、肝細胞に空洞ができます。すると、応急処置として、肝細胞の隣にある肝星細胞が活性化され、一斉にコラーゲンを作ってそこを埋めます。その後、コラーゲナーゼという酵素によってコラーゲンが分解され、肝再生を行えるようになるのですが、これが慢性化し、肝星細胞の制御がきかなくなると、どんどん作り続けられるコラーゲンが網の目状になり、肝臓が硬くなってしまいます(図2)。こうなると酵素も届かず、肝再生ができません。これが肝硬変です。そのため、コラーゲンの生成が慢性化することを防げば、繊維化も防ぐことができるはずなんです。

HSP 47は、コラーゲンをつくる細胞だけで生成されるという大きな特徴があり、そのため、病気になったときには、コラーゲンと共に、HSP 47もたくさん作られます。HSP 47を働かなくさせれば、コラーゲンの蓄積が防げるので、今世界中で、HSP 47をターゲットにした繊維化疾患を抑える研究が行われています。私たちが探しているのは、HSP 47とコラーゲンの相互作用を効率よく防ぐことができる分子です。それが見つかれば、難病の根本的な治療に一步近づけることができるのです。

図1 HSP 47ノックアウトマウスを使った発生実験

上段の手を加えていないマウスは9.5日後から10.5日後にかけて成長しているのに対して、下段のHSP 47の遺伝子をノックアウトしたマウスは成長が止まって、その翌日までは全て死んでしまう。

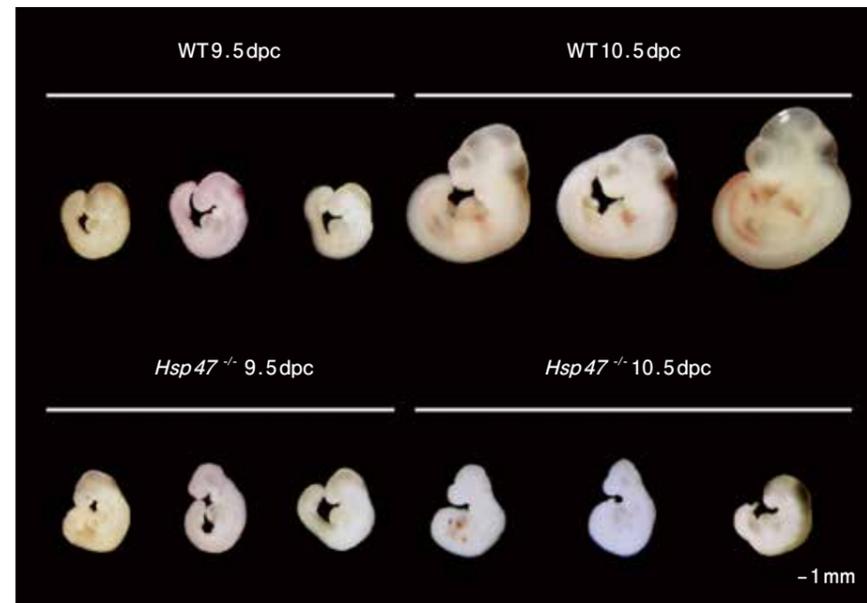
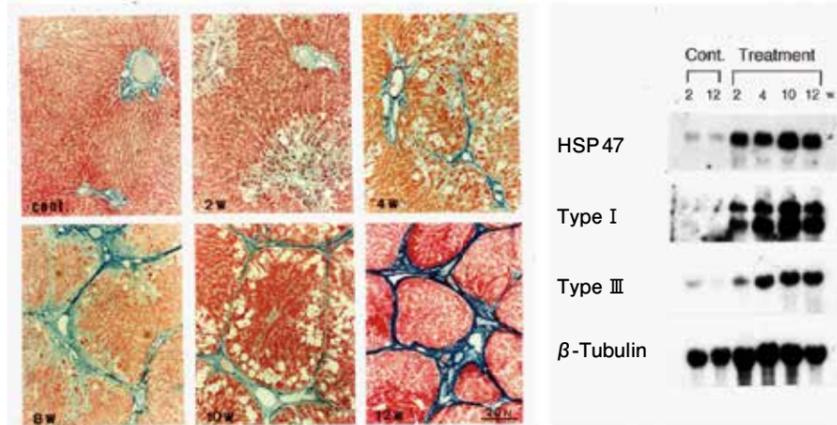


図2 繊維化疾患とHSP 47の生成(肝硬変の場合)

繊維化疾患ではコラーゲンとともにHSP 47も増えている。



Masuda et al., J Clin Invest 1994

### 「オリジナルな研究」が基本方針

私の研究室の基本方針は、自分たちが新しく見つけた遺伝子、タンパク質で仕事をする、人の後追いをしないことです。HSP 47というタンパク質は30年近く研究しているタンパク質で、タンパク質の発見から、病気への応用や治療法、その一連の流れのほとんどすべてを、私の研究室の中でやりました。これは世界的にみても珍しいケースです。機能もまったくわからない、新しく見つけたタンパク質を使うので、研究の歩みはゆっくりです。それでも、オリジナリティのある仕事だと国際的にも高く評価されています。ほかにも10種類以上の新規遺伝子を発見し、その機能解析を行ってきました。

# 葉緑体の遺伝子組換えで ストレスに強く、 環境にやさしい作物をつくる

## 増え続ける地球人口を救う“遺伝子銃”

現在、世界の人口は約70億人。2050年には95億人にまで膨らむと推定されています。はたして地球はその人口を養いきれるのでしょうか。

環境を守りながら、収量が多く、育てやすく栄養価の高い作物をつくるために期待される技術の一つが、遺伝子組換えです。

その遺伝子組換えの中でも、葉緑体の遺伝子組換えやその応用で世界的にも高い技術をもつ寺地徹先生に最新の成果をお聞きしました。

## 謎が多いミトコンドリアゲノムと葉緑体ゲノム

私は高等植物を対象に「オルガネラゲノムの遺伝子組換え」について研究しています。遺伝子組換えというと、ほとんどが核の遺伝子組換えを指しますが、私の研究室の強みは、オルガネラ（細胞内小器官）のゲノム解析とその遺伝子組換えに注力しているところです。

植物は細胞内の核の他、光合成を行う葉緑体、呼吸をつかさどるミトコンドリアにもゲノム（DNA）をもっています。これは後に植物へと進化する細胞が、はるか昔にシアノバクテリアとαプロテオバクテリアという原核生物を、細胞内共生という形で取り込んだ名残です。これらのゲノムは、核ゲノムと区別してオルガネラゲノムと呼ばれ、花粉からではなく卵細胞のみから子供へ伝わる、母性遺伝という特徴をもっています。

葉緑体をもつのは植物だけですが、ミトコンドリアはヒトや動物の細胞内でも重要な役割を果たしています。ヒトのミトコンドリアゲノムは

16.5kb、コムギは500kb以上。なぜか、もっている遺伝子の数もゲノムの大きさも植物の方が大きいのです。他にも、植物のミトコンドリアゲノムは頻りに組換えを起こし、花粉形成を阻害する新しい遺伝子をつくることがあるなど、謎が多いものこのゲノムの研究のおもしろいところです。まだ基礎的な部分で明らかになっていないことの多いオルガネラゲノムですが、応用面からは、その特性を利用して、より人々の役に立つ作物をつくらうという研究が進められています。

## 葉緑体の遺伝子組換え ——タバコからレタス、トマトへ

オルガネラの遺伝子は母性遺伝であることから、組換えた遺伝子が花粉を通じて周りの環境へ不必要に広がるのを防ぐことができます。また、細胞内に2つしかない核の染色体上の遺伝子と違って、葉緑体は100個程度ある上に、一つの葉緑体の中にゲノムが100個ありますから、組換えが成功すれば、一つの細胞内に合

計1万個もの同じ遺伝子をもつことになります※。さらに、組換える遺伝子の場所をゲノム上で指定できたり、複数の遺伝子を連ねて入れられたりするなどのメリットが注目されています。

ただ、葉緑体の遺伝子組換えを適用できる植物種が少ないのが現状です。主な成功例は、モデル植物であるタバコ、作物ではレタス、トマトとその他一部のものだけです。その理由の一つは、遺伝子導入を行った外植片（植物の一部）を再分化させる（もとの植物として育てる）ことの難しさにあります。トマトは子葉、コムギは花が咲いて2週間後の未熟胚からしか効率よく再分化しません。それでも、再分化する条件がわかっているだけ、他の作物よりずっと研究は進めやすい。もう一つは、遺伝子銃の調整の難しさです。葉緑体への遺伝子導入は遺伝子銃を使ったパーデイクルガン法で行っていて、この時、組換えたい有用遺伝子を含むDNAをまぶしたとても小さな金粒子を外植片に打ち込むのですが、音速に近いスピードですから、強すぎると細胞が壊れてしまうし、弱いと奥まで届かないのです。しかも植物によってその条件が異なるため、モデル植物のタバコで成功した実験を他の作物へ応用することが一筋縄ではいかないのです。

## 総合生命科学部 生命資源環境学科 寺地 徹 教授

**PROFILE**  
農学博士。父親が高校の生物の先生だったこともあって、小さい頃から自然や生物に興味があった。高校生の頃には生物の研究者を目指すようになり、大学では農学部へ。オルガネラゲノムとは、コムギとその近縁種の進化を葉緑体DNAで調べて以来の長い付き合い。遺伝子銃による葉緑体の遺伝子組換えの高い技術を誇る。京都産業大学先端科学技術研究所長（植物ゲノム科学研究センター長）も務める。北海道函館中部高校OB。

**遺伝子銃**  
デザインされたプラスミドDNAを大量にまぶしたとても小さな金の粒子を、ヘリウムガスの圧力によって植物の葉に打ち込む。葉緑体ゲノムは、ある程度の長さのよく似た塩基配列があると、そこで組換えを起こす性質（相同組換え※左下図参照）をもっている。



**レタス**

レタスの葉はタバコの葉より繊細で、銃口との距離や打ち込む圧力など、実験条件は大きく違った。距離を離して、圧力を弱くして、タバコの時よりもやさしく打ち込むことで遺伝子導入に成功した。



左から野生型、組換え体A系統、組換え体B系統

せ、葉緑体の中にフェリチンをたくさん作り、鉄を溜め込む仕組みを作ったのです。

植物もヒトと同じで、強い光や寒さ、乾燥などの強いストレスを受けると、細胞で活性酸素が発生します。ヒトでは老化の原因としてよく取り上げられますが、植物の場合は、活性酸素が増えると枯れたり、成長が止まったりします。これはタバコの話ですが、活性酸素が葉緑体で発生することに着目して、活性酸素を消去する作用をもったグルタチオンという物質を、フェリチンと同じように葉緑体内でたくさん作る仕組みを作ったところ、抗酸化作用の高い植物をつくることに成功しました。

その他、現在、研究室の学生が中心になって挑戦しているのが、グルタミン酸を増やしたトマトを作らうという試みです。トマトの場合は、

果実ですから、葉緑体に相当するのは色素体ですが、この色素体に対して働きかけて、うまみ（グルタミン酸）成分を増やそうとしているのです。トマトについては、筑波大学がその培養方法について詳しいため、共同研究をすることで、再分化の問題をクリアしています。

※ ミトコンドリアについてはそのサイズの小ささや、組換わったものを選抜する方法が確立していないことなどから、遺伝子組換えがとても難しく、実用化が進んでいない。そのためは、次世代シーケンサー（同時並列で高速、大量に4つの塩基配列を読み取り、ゲノムを解読する装置）を使ったゲノム構造の解読力を入れていて、これまでにコムギの近縁種やダイコンのミトコンドリアの全ゲノム構造を明らかにした。

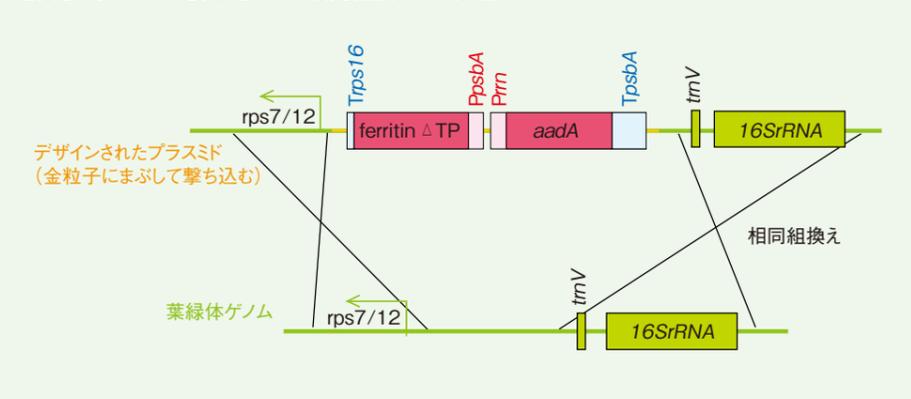
## 地球はいつまで人類を養えるのか ——主要穀物での応用をめざして

まだまだ実用化には課題の多い葉緑体の遺伝子組換えですが、地球の食料問題の解決のためにも、なくてはならない技術の一つだと考えています。“遺伝子組換え食品”というあまりよいイメージをもたれませんが、一般に理解が浸透するのは別に、研究を深めていくことはとても重要です。私たちが古来から行ってきた品種改良も、実は遺伝子が組換わるのを待って、その中から良い物を選ぶ作業にほかなりません。それが、DNAを扱う遺伝子組換えになるとなぜか不安を感じる人がいます。これは、社会のサイエンスリテラシーとも絡んでくる問題かもしれません。

今後は、まず主要穀物での葉緑体の遺伝子組換えを成功させたいと考えています。特にいま、鳥取大学と共同で、コムギの実験に力を入れています。また、花粉には遺伝子が伝わらないというメリットを最大限生かせる、遠くまで花粉が届くトウモロコシ（風が運ぶ）やナタネ（虫が運ぶ）などでの成功も待ち望まれます。

世界人口の3分の1が鉄分欠乏にあるとも言われますから、鉄分を増やした野菜や主要穀物ができれば、栄養障害を緩和できるかもしれません。また、遺伝子組換えによって有害な重金属を取り込む性質をもった植物を作れば、環境保全に役立てることも可能です。小さなオルガネラゲノムに立ち向かうことで、地球や人類という大きな問題の解決に役立ちたい。これからも大きな夢をもって、研究に取り組んでいきたいと思っています。

遺伝子銃によって引き起こす“相同組換え”の仕組み



# 腸の運動調節メカニズムから 病気を考える

## 副交感神経による腸の運動調節メカニズム

緊張するとお腹の辺りに痛みを感じる、グルグルとお腹が鳴って下痢になる。そんな経験はありませんか？ 大事な時にお腹の調子が悪くなるのは何故なのでしょう。このような症状を頻繁に繰り返す場合、過敏性腸症候群という病気かもしれません。この病気は精神的なストレスにより腸の運動がおかしくなり、腹痛、下痢、便秘などの症状を引き起こします。有効な治療法はまだ限られており、新たな治療法の確立が求められています。そのためには、未だ謎の多い、正常な腸の運動調節メカニズムをまず、明らかにしなくてはなりません。新たな治療法や新薬の開発のために、腸の運動調節メカニズムの解明に取り組んでいる棚橋靖行先生にお話を伺いました。

## 腸は第二の脳

腸は主に粘膜、神経、そして平滑筋と呼ばれる筋肉の3つの層から構成されています(図1)。腸の平滑筋層には、腸の長軸方向に収縮する縦走筋層と、腸管を輪を描くように収縮する輪走筋層の2種類があります。この2種類の筋層の間や輪走筋と粘膜の間には、神経が張り巡らされた神経叢がそれぞれ存在しています。これらの神経が平滑筋に収縮や弛緩の命令を出すことによって腸の運動が巧みに調節されているのです。このように、腸には非常に多くの神経細胞があることから「第二の脳」とも呼ばれています。そのため、腸は体から摘出されても、条件を整えてやれば、しばらくの間、自律的に動くことができます。

## 腸運動のスイッチとなる ムスカリン受容体

腸の運動調節メカニズムについてお話ししましょう。腸の運動は副交感神経により興奮性に制御されています。同神経が興奮すると神経伝達物質であるアセチルコリンが放出され、平滑筋の細胞膜にあるムスカリン受容体と結合します(図2)。ムスカリン受容体は、細胞膜上の各種イオンチャネルを開けたり閉じたりすることにより、細胞内外における各種イオンの分布を変化させます。その結果、細胞の膜電位(細胞の内外に存在する電位差のこと)が浅くなる、脱分極という現象が起こります。すると、この膜の脱分極を感知してカルシウムチャ



イオンチャネルの活性を測定しコンピュータに記録する

において、カハール細胞のムスカリン受容体が刺激されると、細胞にどのような変化が起き、そして、その情報がどのように平滑筋細胞に伝えられるのか? 等、詳しいメカニズムについては、未だに多くの謎が残されています。

## 細胞の電気的活動の計測により イオンチャネルの活性を調べる

先に述べた通り、腸の運動調節には、ムスカリン受容体によるイオンチャネルの開閉調節が重要な役割を担っています。したがって、平滑筋の収縮調節メカニズムを明らかにしていく上で、ムスカリン受容体を刺激した時にイオンチャネルの活性がどのようなメカニズムにより、どのように変化するかを調べることが必要不可欠となります。イオンチャネルの活性は、イオンがチャネルを通過した時に流れる電流を指標として計測することができます。当研究室で

## 総合生命科学部 動物生命医科学科 棚橋 靖行 准教授

**PROFILE**  
獣医学博士。専門は獣医薬理学。子どもの頃から生き物が好きで、動物のことを学びたくて獣医師を志す。大学院時代には臨床獣医師として動物病院で働きながら研究を続け、更に研究の面白さにひかれるようになった。病気について飼い主に平易に説明しようと努力した経験は、今のわかりやすく説明しようという心がける講義スタイルに生かされているとのこと。愛知県立昭和高等学校OB。

は、細胞1個単位もしくはイオンチャネル一個単位に流れるイオン電流を記録する装置を用いて、日々、研究を行っています(左下写真)。

## 腸の運動調節メカニズムの 解明から治療法の確立へ

過敏性腸症候群は、明らかな病変がないにも関わらず、精神的ストレスなどにより、腸の運動が異常をきたし、下痢、便秘、腹痛などの症状を引き起こす病気です。テストの直前など緊張すると、いつもお腹の調子がおかしくなる。このような症状を頻繁に繰り返す場合などは、この病気の可能性も考えられます。

ストレスがどのように腸の運動異常を引き起こすのか、今のところ、はっきりした仕組みは分かっていません。しかし、副交感神経や平滑筋自身の過活動が原因となっている可能性が考えられます。したがって、我々の研究により、腸の運動調節メカニズムが解明されれば、過敏性腸症候群をはじめとする機能性消化管障害の原因解明や新薬の開発を含めた治療法の確立に結び付くことが期待されます。例えば、ムスカリン受容体による平滑筋細胞の収縮運動に関与する機能分子を特定し、その分子の機能だけを特異的に抑えるような薬を開発

すれば、腸の過剰運動を効果的に抑えることができるようになるでしょう。

このような生体の基礎的なメカニズムを解明する研究は、一見、地道であり、すぐには役に立たないかもしれませんが、しかし、正常(健康)

な状態が分からなければ、異常(病気)を理解することは決してできません。このような基礎的な研究が、将来の様々な病気の病態解明や治療法を開発することへの第一歩と考えて、日々の研究に取り組んでいます。

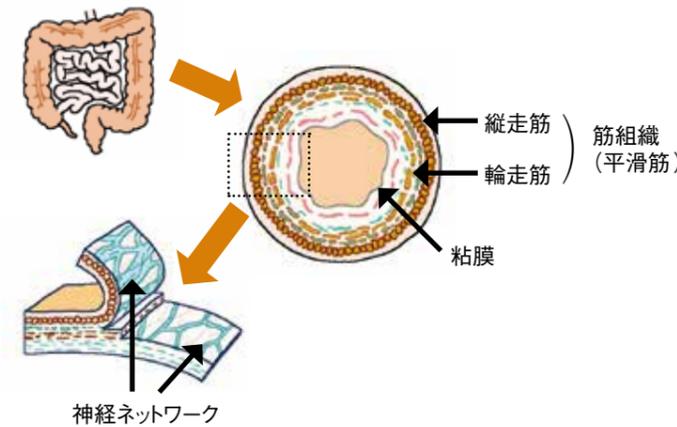


図1 腸の構造

大地陸男「生理学テキスト」第7版、365ページ、図16-2、2013、文光堂より改変

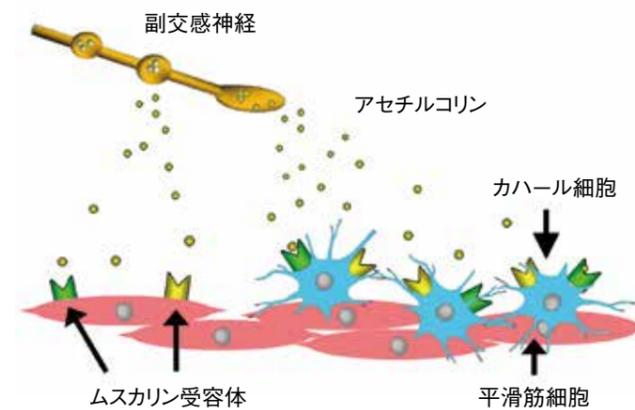


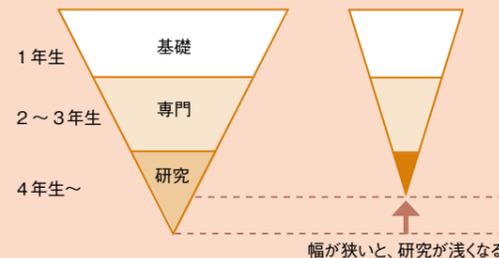
図2 アセチルコリンがムスカリン受容体を刺激し平滑筋細胞を収縮させる

## ADVICE

### 大学での学びは逆三角形

私が学生の頃に「大学での学びは逆三角形」と恩師から教わったことが、非常に印象に残っており、それ以来ずっと心にとどめています。すなわち、逆三角形のうち一番上の底辺が1年生で学ぶ基礎的な学問分野を、三角形の真ん中が2~3年生で学ぶ学部専門分野を、そして一番下の頂点が4年生以降で行う研究を表わしていると考えます。専門や研究に進めば進む

ほど、学ぶ対象となる分野は深く狭くなっていきますが、どこまで深く進めるのかは、一番上にある三角形の底辺の幅次第なのです。たとえば、生物学を学びたいのだから、自分には文系の学問分野や物理学などは関係ないと思って疎かにしていると、知識の幅が広がらず、専門や研究の段階に進んだ時に行き詰まることとなります。専門や研究に進むと他の分野を学ぶ機会が少なくなりますので、今のうちに積極的に幅広い知識を得るようにしてください。



幅が狭いと、研究が浅くなる

先端領域に広がる自然科学系 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習得。

〈基礎数理科学コース〉 〈応用数理科学コース〉

代数学 自然と社会の数理系  
幾何学 プログラムの数理系  
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・気象物理  
地球科学と環境科学  
物性物理/理論  
レーザー・電波物性  
結晶・表面物性  
素粒子・原子核

## 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。

ユビキタス  
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究する。

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。

### 理学研究科

数学専攻  
物理学専攻

博士前期課程

博士後期課程

### 工学研究科

生物工学専攻

博士後期課程

### 生命科学研究科

生命科学専攻

修士課程

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

### 先端情報学研究科

先端情報学専攻

博士前期課程

博士後期課程



Keep Innovating.  
京都産業大学  
2015年、50周年を迎えます

お問い合わせ先

連携推進室 〒603-8555 京都市北区上賀茂本山

TEL: 075-705-2952

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