

PROUD BLUE

03

2016/02

特集

ライフサイエンスが描く、 生命の輪郭

巻頭インタビュー

菅原 正 教授

理学部 化学科
物理有機化学

インタビュー

山口 幸 特別助手

工学部 情報システム創成学科
数理生物学

木原伸浩 教授

理学部 化学科
有機化学、生物有機化学

泉 進 教授

理学部 生物科学科
分子生物学、昆虫生理・生化学

特別エッセイ

森 和亮 名誉教授

理学部 化学科
磁気化学、機能性材料化学、錯体化学

p.03-11

FEATURE

特集

ライフサイエンスが描く、 生命の輪郭

p.03-05

生命誕生の謎に迫る、
もうひとつの仮説。
「人工細胞」が明らかにした、
“膜”の豊かな振る舞い。

菅原 正教授

理学部 化学科
物理有機化学

p.06-07

ダーウィンを惑わせた
海洋生物の不思議な「性」。
その解明に、数理モデルで挑む——

山口 幸 特別助手

工学部 情報システム創成学科
数理生物学

p.08-09

生物の営みを、分子の化学で再現する

木原伸浩教授

理学部 化学科
有機化学、生物有機化学

p.10-11

分子生物学で覗く
カイコに秘められた、生命のカラクリ

泉 進教授

理学部 生物科学科
分子生物学、昆虫生理・生化学

p.12

LABS

研究所紹介 国際経営研究所

p.13

A NEW HOPE

～注目の若手研究者～

土屋 翔

博士後期課程3年
経営学研究科 国際経営専攻

p.14-15

ESSAY:SCIENCE INSIGHTS

世界を夢中にさせるような
化学をしよう

森 和亮 名誉教授

理学部 化学科
磁気化学、機能性材料化学、錯体化学

PROUD BLUE THIRD ISSUE:

ライフサイエンスが描く、 生命の輪郭

生命とは何であるか——。
その問いは、長く人類を惹きつけてきたことだろう。

近代科学の発展に伴い、20世紀半ばごろから、
生命現象は生体内の分子の働きとして説明されるようになってきた。
「分子生物学」の幕開けである。
従来は単に「生物学」と呼ばれていた分野に、
物理学や化学、数学や情報科学の知見や技術が持ち込まれ、
「生物学」は総合科学の様相を帯び始めた。
そしていつしか、「生命科学(ライフサイエンス)」と呼ばれるようになった。

それでもまだ人類は、「生命とは何か」という深遠なる問いに、
明確に答えることはできていない。

だが——いや、だからこそ——
今も多くの研究者が、
その問いに挑み続ける。

今号では、神奈川大学の
生命科学の試みを紹介する。
キーワードは、「人工細胞」、
「形態形成」、「性・繁殖」、
「生体内の化学反応」。

こうした研究の積み重ねによって、
“生命の輪郭”が、おぼろげながら
顕わになりつつある——。



FEATURE

生命誕生の謎に迫る、 もうひとつの仮説。 「人工細胞」が明らかにした、 “膜”の豊かな振る舞い。

生命の起源は、いまだ謎に包まれている。いま推測されているのは、37~40億年ほど前に、原始の生命が誕生したであろうということだけだ。生物学者は、生命の起源に関して「RNAが先だ」(RNAワールド仮説)、「タンパク質が先だ」(プロテインワールド仮説)と論争している。この生命誕生の謎に、化学者・菅原正が挑む。手がかりは、生命個体を外界と隔てる薄い“膜”だ。

細胞を人の手で作る試み

生命の起源は、いまだ謎に包まれている。近年、生命の謎を解くには、デカルト以来の還元的アプローチだけでは不十分であり、むしろ要素間の相互作用に注目しつつ、システムを組み上げることで理解する構成的アプローチが有効だ、という考え方が主流になりつつある。

その中であって、2001年に、米国の遺伝学の大家であるショスタック、バーテル、化学進化のパイオニアであるルイーダの3人の博士が、細胞を人工的に作り出し、生命の起源に迫るという大胆な試みを提案した。

この時ショスタック博士らは、「細胞」に欠かせない要素を3つ挙げたと菅原は言う。

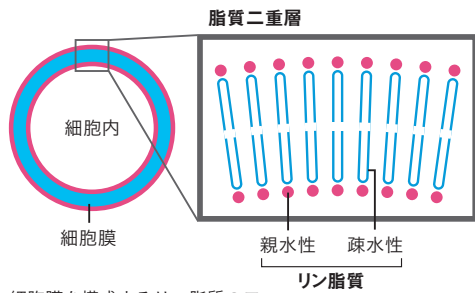
「1つが内部と外部を隔てる“境界”で、要するに細胞膜のこと、2つ目は、細胞の個性を特徴づける“情報”、すなわち遺伝子です。3つ目は、自らの生命活動と増殖をおこなうための代謝反応に必要な“触媒”です。これらの要素を備えた物質を人工的に作りだし、“情報”の複製と“境界”の生産、つまり細胞分裂のようなダイナミクスが生まれれば、それは生命と呼んでいいのではないか。それが、ショスタック博士らの主張です。そのころ私もほぼ同じ考えで人工細胞をつくる研究を始めたところでしたので、我が意を得た気がしました」

始まりは“膜”だった。

ルイーダ博士はすでに、細胞の内と外を分ける“境界”である細胞膜の自己生産に興味をもって、先駆的な研究を始めていた。

細胞膜は、リン脂質が二重に並んだ構造をしている(次ページ図参照)。リン脂質は、水にも油にも溶ける「両親媒性」の物質だ。それを水中に分散させると、疎水部は水から離れ、親水部は水の側に引き寄せられる。そ

菅原 正 教授
理学部 化学科
物理有機化学



細胞膜を構成するリン脂質の二重膜。水に溶ける親水部が膜の外側に、水に溶けない疎水部が膜の内側に並ぶ。



人工細胞を生み出しているのは、生物学のラボではなく、有機化学のラボだ。室内には、生物学のラボではあまり見かけない実験機材が多くあった。



人工細胞が分裂する様子を捉えた光学顕微鏡。モニターでベシクルの様子を確認しながら動画を撮影することができる。人工細胞創製の証拠となる数々の映像を収めてきた。

して、疎水部は疎水部同士、親水部は親水部同士集合し球状の膜が作られる。この時、膜は内と外を隔てる“境界”となり、内部は水で満たされる。膜によってつくられる袋を、化学の言葉で「ベシクル」と呼ぶ。

「ルイーゼ博士は、オレイン酸でできたベシクルが、細胞のように分裂する現象を報告していましたが、私は仲間と一緒に人工的な膜分子をつくって、ベシクルの再生産系をつくるという実験に挑みました。ベシクル内部に膜分子の疎水部の原料を入れ、外からは親水部の原料を加える。すると、ベシクル内で疎水部と親水部が結合して膜分子ができ、ベシクルが自己生産されるという反応系をつくりました。そして、細胞分裂のように、袋から袋がポコポコできる様子を顕微鏡で観察しました」

この時の手法には課題もあった。ベシクルの生産を何度か繰り返し、ベシクル内部の原料がなくなると、ベシクルの分裂が停止することだ。だが菅原は細かな改良を加え、分裂を繰り返し起こせる方法を開発した。それが2004年のことだった。

世界を沸かせた「人工細胞」の誕生

これは、生物の原始的な姿ではないか——と菅原は感動した。ところで、この動画を見た生物学者たちは、「とても面白い。内部に情報分子があると、もっと細胞らしくなるんだが…」とのコメントを寄せてくれた。

その言葉を参考に菅原は、研究の仲間と相談して、その後の研究方針を決定した。

5年の時を経て、菅原らはベシクル内部でDNAを複製・増幅させる方法を確立する。熱を加えてDNAを複製・増幅させる「PCR法」を応用した手法だった。「PCR法」そのものは、生物学の実験手法として確立されていたが、光学顕微鏡で見えるサイズのベシクル内部で、DNAを増やした初めての例となった。

細かな条件を幾度も調整し、方法が洗練されてくると、興味深い事実が明らかになった。「DNAの増幅とベシクルの分裂をどのように連動させるか。それが最大の課題でしたが、増幅したDNAがベシクルの膜の内側に潜り込み、分裂を促す酵素のような役割を果たしていることが明らかになりました」

生物の細胞内では、DNAの情報から合成されるタンパク質が様々な役割を果たし、DNAの増幅と細胞分裂を同期させている。だが、「そのような複雑な反応系を、原始の生命が持っていたとは考えにくい」と菅原は言う。

「タンパク質を介した複雑なシステムがなくとも、DNAの複製が膜分子生産反応と膜の形態変化と連携して起こり、DNAが均等に分配されてベシクルが分裂する。それを実証できたことは、原始の生命の姿を探る手掛かりになるはずです」

この成果は2011年9月『Nature Chemistry』に投稿され、世界で大きな注目を集めた。

母から娘、娘から孫へと受け継がれるもの

この時の「人工細胞」にも、まだ課題はあった。分裂後のベシクル内部ではDNAの原料が枯渇し、二度目の分裂を起こせなかった。

そこで菅原たちは、生物細胞内の物質輸送

SIDE STORIES



人工細胞の研究成果

(右) 膜 (ベシクル) の自己生産について研究成果を発表した『生命システムをどう理解するか』(共立出版、浅島誠編集、2007年5月刊)。(左) 生体機能を分子レベルで構成的に理解する学問の流れを概観した『合成生物学 (現代生物科学入門第9巻)』(岩波書店、2010年5月刊)。なお、前者の編集を務めた浅島誠は、菅原とほぼ同年代の生物学者。動物の発生についての研究は高く評価されている。

私は分子の世界の戯作者なり。



4歳の頃から、祖父母に連れられ観ていたという歌舞伎。研究と歌舞伎をつなげたいと長く思っていたところ、最近になってつながった。分子の配役を考えてシナリオをつくり、舞台を用意する。すると、予想もしていなかった脇役が重要な役割を演じ始める。菅原が描く戯作には、いずれ「人工生命」が登場するのだろうか。

の仕組みをヒントに、ベシクルの外から内へ、DNA原料を補給する仕組みを導入した。すると、親から分裂した娘の人工細胞から、孫の人工細胞を分裂させることに成功した。しかも、この原始的人工細胞には、分裂に際して4つのステージからなる周期があった。生物が細胞分裂する際の細胞周期と驚くほどよく似ている(右図参照)。

2015年9月、今度は成果を『Nature Communications』で発表すると、またしても大きな反響を呼んだ。

だが、ひとつの疑問が残る。

DNAは生体内で、タンパク質をつくる“情報”の役割を果たしている。だが、菅原らが作り出した人工細胞で、遺伝子のモデルとして加えたDNAは、情報分子としての働きをしているのだろうか。

それについて、菅原は次のように答える。「その後の詳しい実験で、この人工細胞の中で、DNAがある種の“情報”として機能していることを突き止めました。その“情報”とはDNAの長さであり、それが、ベシクルが分裂する際の形状や振る舞いに影響を与えているのです」

菅原たちは、DNAよりもはるかに単純な物質で、人工細胞に“情報”を持たせる研究も視野に入れる。太古の地球にも存在しうる単純な物質だけで、人工細胞をつくり出すこと。すなわち、擬似的に生命の誕生を再現することを、菅原は目指している。

RNAでもタンパク質でもなく

生物学には、生命の起源に関して2つの主要な仮説がある。「RNAワールド仮説」と「プロテイン(タンパク質)ワールド仮説」だ。

RNAとは、DNAの情報からタンパク質を合成する際に両者の橋渡しをする物質のこと。「RNAワールド仮説」では、RNAは自己複製ができるとともに、酵素の役割を果たすことがこの仮説の重要な根拠となっている。

一方の「プロテインワールド仮説」は、様々な機能を持ったタンパク質が擬似的な複製を繰り返すうち、情報伝達に特化したRNAやDNAが出現したと考える。

第3の説として、「リピッド(脂質)ワール

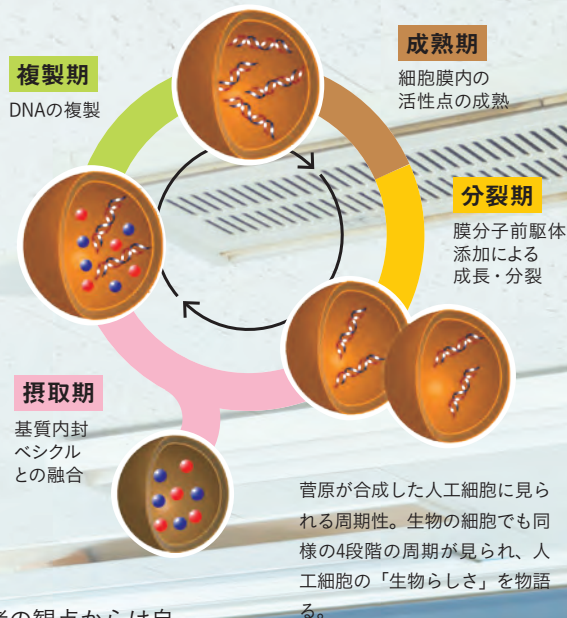
ド仮説」がある。菅原は、人工細胞の合成に挑んだ化学者として、この説を力強く支持する。

「RNAもタンパク質も、分子としては複雑すぎて、原始の生命がそこから始まったとは考えにくい。「膜」を構成する脂質のような単純な物質が太古の海を漂いながら、分裂を促す酵素や情報物質を膜の袋の中に取り込んでいったと考えるのが、化学者の観点からは自然です」

菅原は、さらに付け加える。

「最近になって、タンパク質の機能に頼らず、細胞膜を生産する酵素の働きのみで、細胞分裂が進行するバクテリアの存在が明らかにされました。それが最古の細胞分裂の姿だという議論があり、その姿は、私たちが実現したベシクルの分裂と極めてよく似ています」

人工細胞の研究は、“膜”から始まった。実は生命そのものも、自己と外界を隔てる“膜”から始まったのかもしれない。



Tadashi Sugawara

1946年東京都生まれ。東京大学大学院理学系研究科修士(理学博士)。ミネソタ大学、メリーランド大学での博士研究員、岡崎国立共同研究機構分子科学研究所助手、東京大学教養学部基礎科学科教授、同大学大学院総合文化研究科教授などを経て現在、神奈川大学理学部教授。東京大学名誉教授。



フジツボの不思議な「性」のあり方

生物が存在する「目的」は、自らの子孫を残すことと言えるだろう。単細胞生物は細胞分裂によって個体を増やし、「性」を持つ生物は、雄と雌の交尾や受粉によって繁殖をおこなう。

ヒトの「性」は、個体ごとに雄と雌とが分かれているが、生物の世界を広く見渡すと、「性」のあり方はもっと多様だと山口は言う。

「植物では、ひとつの個体中に雄（雄しべ）と雌（雌しべ）の両方がある“雌雄同体”が広く知られています。動物でも“雌雄同体”の他、個体の生存中に雄から雌へ、あるいは雌から雄へ“性転換”するものがあります」

山口の研究対象は、海洋生物の「フジツボ」だ。エビやカニの仲間であらゆる甲殻類に分類される。動物だが、海中を漂う幼生期を過ぎると岩場やカニの殻などに固着し、生息場所を一度決

めるとそこから動けない。エビやカニと同じく脚を持つが、用途は歩行のためではない。海洋中のプランクトンを食べるため、いわば濾過器として蔓状の脚を使う。

フジツボにも、いくつかの種類がある。富士山型の形を持つものがよく知られるが、山口が向き合うのは、ソフトクリームのような形をした「有柄^{ゆうへい}フジツボ」と呼ばれるものだ。それは、かのダーウィンを惹きつけた不思議な「性」のあり方を見せる。

「有柄フジツボには複数の性表現があります。まず、幼生期は性が未分化で、成長して固着する時に性を選択すると考えられています。いちばん多く見られるのが雌雄同体で、浅い海に生息しています。2つ目は雌雄同体に小さな雄（^{わいゆう}矮雄）がくっついたもので、これも比較的浅い海で見つかります。3つ目は、海の深いところに生息する、雌に矮雄がくっついたものです。雌雄同体と雌は大きさが数cm、

Sachi Yamaguchi

1982年奈良県生まれ。2005年奈良女子大学理学部物理科学科卒業、2009年同大学大学院人間文化研究科にて博士（理学）を取得。海洋研究開発機構や九州大学での博士研究員を経て現在、神奈川大学工学部特別助手。2014年7月に日本数理生物学会研究奨励賞を受賞。

山口 幸 特別助手
工学部
情報システム創成学科
数理生物学

FEATURE

ダーウィンを惑わせた海洋生物の不思議な「性」。その解明に、数理モデルで挑む——

『種の起源』で“進化”の概念を提唱したチャールズ・ダーウィン(1809-1882)は、ある海洋生物の不思議な「性」のあり方に関心を持った。その謎は、150年以上ものあいだ解けぬままだったが、若き研究者・山口幸が解明に挑む。手にする武器は、数理モデルだ。

矮雄は体長0.1mmにも満たず、肉眼で見つけるのも難しいほどです」

雌雄同体の個体でも、自分の精子を自分の卵と受精させるようなことはしない。体の数倍も伸びる雄の生殖器（ペニス）で別の個体の卵に精子を届け、卵は別の個体のペニスを受け入れる。

このように、雌雄同体の個体が周囲に密集していれば、フジツボは自らの子孫を残せる可能性が高い。だが時に、矮雄が雌雄同体にくっつき、あるいは単体の雌にもくっつくことがある。矮雄は必ず卵のすぐそばに付着し、短命ながらもペニスを伸ばして生殖する。

フジツボの矮雄を発見したのは、“進化”の概念を提唱したダーウィンだ。なぜ、こんな小さな雄が存在するのか——。その謎はダーウィンの関心を惹きつけたが、それから150年以上、解かれることはなかった。

小さな雄の、大きな謎

山口は、その謎に数理モデルで挑む。

「フジツボは、生存中につくれる自身の子の数を最大化しようとして、環境中で最適な性を選ぶ。そういう仮説に基づいて、数理モデルを考えました。もちろん、個々の個体がそう考えて行動しているわけではなく、進化の過程でそういう生き方を獲得したと考えています」

動物は、生きていくために餌を食べる必要がある。餌が豊富なところでは大きく成長することができ、生存や繁殖に有利だ。

「プランクトンが豊富な浅い海では、大きな体の雌雄同体になるのが自身の子を増やす最適な戦略です。体が大きければ、その分遠くの個体とも生殖ができます。海が深くなると、それにつれて餌が減り、大きな体を持つこと

ができる個体の数は少なくなります。そういう環境でも生き延び、子を残すために、一部の個体が矮雄になると考えられます。さらに海が深くなると、一定範囲で生息可能な個体数が限られてきます。

雌雄両方の機能を持ったところで、生殖相手がいなければその分の繁殖投資が無駄になり、そのため、雌だけの機能を持った個体と矮雄の組み合わせが見られるようになると推察しています」

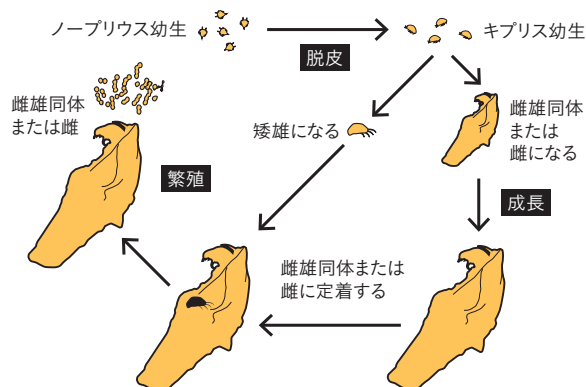
フジツボの多様な性の背景にあるのは、周囲の環境から得られる餌資源を、生存・成長と繁殖にどう分配するかとのトレードオフの問題だ。環境中の個体数が多ければ、餌の確保や繁殖をめぐる競争も起こる。

ある特定の条件下で、どのような生き方を選択し、成長・生殖にどう資源を分配すると、生涯で残せる子の数を最大化できるか——。それを数式で導き出すだけでなく、その結果が現実のフジツボの生態とどこまで適合するかを確かめるのが山口の研究だ。

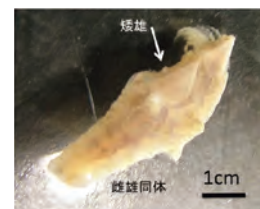
大学院からフジツボの性の本格的な研究を始めて10年が経つ。矮雄がなぜこれほど小さくなければならないか。その謎の答えにまだ決着はついていないが、山口はある思いを抱く。

「矮雄は、フジツボに限らず、様々な海洋生物で見られる現象です。近い将来、矮雄の謎を数理モデルで解き明かし、“矮雄学”を築き上げたい」

若き研究者は、ダーウィンを惑わせた謎の向こうに、大きな野望を見据えていた。



有柄フジツボの一生。ノープリウス幼生は海中を漂い、キプリス幼生に姿を変えたと固着する場所を探す。その場所が岩や他の生物の体表だと大型化して雌雄同体か雌になり、大型個体にくっつく矮雄になると考えられる。



雌雄同体に矮雄（小さな雄）がくっついた有柄フジツボの個体。矢印の先にいるのが矮雄である。大阪市立自然史博物館の所蔵標本を撮影。



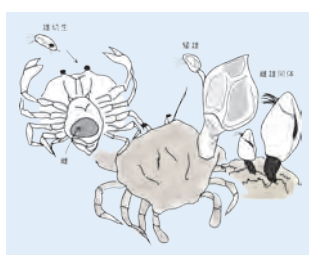
フジツボはカニの甲羅の上に住み着く。黒い点が、雌雄同体のフジツボが住み着いていた場所。体長は数cmほどだが、その数倍は伸びる雄の生殖器（ペニス）で、近くの雌雄同体の卵に精子を供給して受精させる。

SIDE STORIES

心はいつも海洋生物とともに



山口にとって、海洋生物は単なる研究対象にとどまらない。休日は水族館に足を運び、ミュージアムショップでぬいぐるみを買うのが楽しみだという。



海の生きものを描く

研究を始めてから、絵も描き始めた。ここでも題材はやはり海洋生物。取材中も、フジツボの生態を説明するために、さらさらと絵を描く。



FEATURE

生物の営みを、 分子の化学で再現する

誕生する時も、毎日の食事の時も、私たちの生命は、体内の多種多様な分子の相互作用によって維持されている。オーケストラが様々な楽器の演奏によってひとつの音楽を生み出すように、それら分子は、それぞれの持ち場で小さな働きをすることで、ひとつの身体をつくりあげる。そんな分子の振る舞いを、化学で再現しようとするのが、木原伸浩の挑戦だ。

木原 伸浩教授

理学部 化学科

有機化学、
生物有機化学

Nobuhiro Kihara

1963年宮城県生まれ。東京大学大学院工学系研究科博士課程中退、東京工業大学資源科学研究所助手、同工学部助手、大阪府立大学工学部講師、助教授を経て現在、神奈川大学理学部教授。

生物が持つ、驚異の「化学システム」

時計職人の手によって複雑に組み上げられた腕時計を素人が分解すれば、まず元には戻せない。もし、それらの部品をフラスコに入れて一振りし、元通りになったとしたら、誰もが「これは魔法か？」と驚くにちがいない。

しかし私たちの身体を「化学システム」として見てみると、そこは部品が勝手に製品となるような驚きのしぐみにあふれている。

「ヒトの誕生は受精卵からの“発生”に始まります。胎内で身体が形成される時、細胞内では、細胞核の情報を元に様々なタンパク質がつくられます。タンパク質は『リボソーム』と呼ばれるタンパク質工場から放出されると、自らあるべき場所へと移動し、自動的に働いて、身体を組み上げていきます。タンパク質はヒトの身体を構成する部品であると同時に、ヒトを形づくるための頭脳でもあるのです」

まさに私たちは、フラスコの中で自動的に組み上がった時計のように誕生しているのだ。化学の目を通して見た胎内は、分子が自らを正確に配置し、誕生において起こるべき反応が自律的に進行する「反応場」なのだ。

分子は語る、消化から細胞分裂まで

「生物の中では普通に起こっていることなのだから、人間の手でつくりだすこともできるはずだ」。木原伸浩教授の研究テーマは生物が「反応制御」する分子の機能である「認識」と「応答」を人工的に実現することだ。

たとえば木原の視点から私たちの食事を観察してみよう。食べ物を食べると、消化器官はそれらを消化し、必要な栄養素を採り入れる。この時、私たちの体内では加熱したり光をあてたりすることなく、おだやかな条件下で食べ物が分解されている。

「体内では様々な消化酵素が働いています。たとえばタンパク質の消化では、消化酵素が“分子間相互作用”によってタンパク質のアミノ酸が繋がっている部分を認識し、分解します。タンパク質という分子が認識され、消

化という応答が起こっているのです。こうした反応場が正しく機能しているからこそ、食べ物だけが消化されるのです」

さらには細胞分裂も、分子の動きに着目することで、捉え方が変わってくる。細胞分裂の際は、細胞の核にある遺伝子が2倍になり、それぞれが新しい細胞へと均一に受け継がれて2つに分裂する。この際、化学反応で遺伝子を1組ずつ一方へ引っ張る分子「分子モーター」が働くという。そして木原は人工分子で初めてこの機能を再現することに成功している。

「私たち人類の祖先が45億年前に海の底で生まれた時は、試行錯誤だけで乏しい“道具”をやりくりして、生命を実現していました。しかし今、私たち人類には、頭脳と、限りない道具としての科学があります。生物のシステムから特定の機能を抜き出し、人工の化合物でその機能を再現すれば、生物では不可能な分子制御を設計し、実現することも可能でしょう。それが、私の研究なのです」

世界の見方を変える化学をつくる。

生物の機能を人工的に再現するためには卓越した有機合成の力が欠かせない。木原は、ミクロの輪がつながった鎖状の物質「ポリカテナン」など、希少性の高い物質を次々と生み出してきた。

そんな木原はある日、偶然にも「酸化分解性ポリマー」という画期的な物質に出会った。

酸化分解性ポリマーは、市販の塩素系漂白剤をかけると溶けてなくなるという性質を持った新素材だ。「望むタイミングで分解できる材料として、応用が期待されています」と木原は話す。好きな時に接着・脱着ができる接着剤や、何度も塗り直しができる塗料が誕生

するという。

この画期的機能を持った新素材は、炭酸ガスからポリマーをつくらうとした際の失敗から偶然生まれたものだ。

「炭酸ガスのポリマーができれば面白いなと思ったんです。爆薬になってしまう可能性もありましたが」

体積が音速を超えて膨張することを爆発という。炭酸ガスからできた固体のポリマーは、気体の炭酸ガスに分解され得る。その際、急激に体積が変化するため、爆発する可能性があるのだ。しかし、これは同時に高エネルギー化合物ということでもある。

「しかし実際につくってみると、できた途端に分解し、消えてなくなってしまいました。そこでヒドラジンという無機化合物の性質を利用して同じようなものをつくってみたところ、爆発物どころか、まったく別の可能性を持った酸化分解性ポリマーが誕生したのです」

現在は塩素系漂白剤の代わりに、特殊な気体を吹きかけて分解させる研究もおこなっている。

木原が分子の認識と応答の研究を構想したきっかけは、自身が大学院でおこなっていた分子認識の研究だった。木原は、「体内では分子の認識が次の認識への応答を引き起こすわけだから、認識の次は応答の研究だな」と思っていたという。研究の難易度の高さから、世の中の誰もが分子への応答を研究していなかったことも後押しした。

「『認識に応答し、反応する分子』という概念を実現することが、化学にとって大切だと思って研究しています。新しい概念は、世界の考え方・捉え方を変えますから」

生物の分子システムは、化学から世界を変えてしまう可能性すら持っているのだ。



酸化分解性ポリマー。塗料に応用すれば、好きな時に塗って、消せるペンキの誕生だ。環境に配慮した分解性の高分子は数多く生み出されているが、酸化分解性ポリマーは分解するタイミングを操作できること、さらに分解後にどんな物質に変化するかが明確なことが特徴。便利な新素材であり、環境にもやさしい。



実験室には様々な有機合成をおこなうための装置や試薬が並び、実験装置の中には、「最適なものがなければつくれない」と、木原が自作したものもある。

SIDE STORIES



オーケストラは、音楽の反応場

学生時代に始めた趣味のコントラバス演奏。日本化学会の春年会で開かれる「スプリングコンサート」では、仲間が集まって演奏するという。好きな音楽家は、ショスタコービッチ、ワーグナー、マーラーなど。



タマムシの光を、液晶で再現

タマムシの表面には等間隔の非常に微細な溝があり、その溝の幅に相当する波長の光だけを反射するため、独特の色彩を放つ。この原理を液晶で再現し、自作のキーホルダーにした研究室グッズ。

泉 進教授 理学部 生物科学科

分子生物学、昆虫生理・生化学

Susumu Izumi

1952年富山県生まれ。1989年東京立大学大学院理学研究科生物学専攻博士課程修了、同年東京立大学理学部助手。1993年東京立大学理学研究科助教授。2005年首都大学東京都市教養学部理工学系助教授を経て現在、神奈川大学理学部教授。



FEATURE

分子生物学で覗く カイコに秘められた、 生命のカラクリ

幼虫から成虫へ、カイコは繭の中で神秘的な生命の営みを繰り返す。この小さな生命の不思議を、分子生物学の目で解明する。そこには生命の営みを巧みに計画する遺伝子発現や、私たち人間と同じ神経伝達物質の存在など、生命を形づくる様々なカラクリがあった。

植物の知恵を持った昆虫

絹の糸で自らの“ゆりかご”となる「繭」を編む昆虫、カイコ。多彩に姿を変えるその成長過程は、まさに“劇的”だ。

卵から孵化したばかりの幼虫は「1齢幼虫」と呼ばれる。脱皮を繰り返し、2齢、3齢、4齢幼虫を経て、体長十センチメートルの5齢幼虫になる。すると餌となる桑の葉をより多く食べ、絹糸を吐き、繭をつくる。繭の中でも脱皮して硬い蛹となり、羽化を待つ。

泉は、カイコをモデル生物として昆虫の「変態」を分子生物学の視点から解き明かすことを研究の目的としている。

「自然というものは本当に面白いものです。たとえばカイコは繭の中で蛹になる時、外皮を硬くして、外部からの物理的な刺激から身を守ります。実は、その際に働いている酵素『ラッカーゼ』は、漆塗りに使われる天然塗料“漆”が固まる時に働く酵素と同じ働きをしています。昆虫は動物なのに、どうしたわけか植物の知恵を持っているのです」

泉は研究者人生の長い時間をかけ、カイコの外皮を研究してきた。カイコが変態する過程では、外皮にも劇的な変化が生じる。幼虫では弾力性を持ち、蛹になれば物理刺激から身を守るために硬化する。さらに成虫になれば再び弾力性を持つようになる。まるで衣替えでもするように、自らの様態に適した外皮を身にまとう。しかしこれらの外皮は全て同じ「クチクラタンパク質」を器用に変化させることで作りだされているという。

「こうした変化の全てを司るのが、生命の設計図である遺伝子の『発現調節』なのです」

遺伝子発現から見る、 カイコの「計画」

遺伝子における「発現」とは、体内において遺伝子の情報からタンパク質が合成されることを言う。泉はカイコの血液中のタンパク質が、その様態とどんな相関性を持っているかを調べる研究をおこなった。そこから見てきたものは、カイコの一生を形づくる、遺伝子発現の巧みな計画性だった。

「たとえば5齢幼虫の3日目以降に、それま

ではほとんどつくられていない『30K』というタンパク質が血液中に現れます。このタンパク質が現れ始めると、カイコは絹糸を吐き始め、蛹になることができます」

カイコの体内にはこうした、変態に合わせて出現するタンパク質がいくつも観察されるという。計画的に遺伝子が発現していくことで、成長プランが実行に移されるのだ。

様々な要因が遺伝子発現のスイッチの役割を果たすが、タンパク質30Kでは体内ホルモンが関係しているという。カイコの幼虫の体内では、5齢幼虫になるまでは、幼虫の状態を維持するための「幼若ホルモン」が分泌されている。しかし5齢幼虫になると、このホルモンの分泌が抑制される。するとタンパク質30Kが合成され、繭をつくり、成虫へと歩みを進めていくのだ。

「不思議に満ちた昆虫の変態を、遺伝子発現のレベルで研究し、解き明かしていきたい。そんな思いをずっと抱いています」

昆虫の外皮を形づくるクチクラは「キチンナノ繊維」に、脱皮や変態の過程において発現した様々なクチクラタンパク質が結合することで、柔らかくなったり、硬くなったりする。カイコの一生は、遺伝子の発現調節によって巧みにコントロールされているのだ。

カイコが語る、神経伝達の共通言語

さらに泉は、カイコを用いて昆虫の中枢神経を解明する研究も行っている。カイコの「コリン作動性神経」に関連する主要神経伝達物質「アセチルコリン」の研究だ。様々な働きをするが、ヒトを含む脊椎動物にも存在し、主に運動神経で筋肉の収縮に関わっている。「昆虫の神経伝達物質の研究は、ショウジョ

ウバエでの研究が先行し、昆虫の中枢神経系はアセチルコリンを神経伝達物質として用いるコリン作動性であると言われてきました。^{りんしもく}鱗翅目昆虫のカイコの中枢神経系も同様にコリン作動性なのかを検証してみたのです」

その結果、幼虫のカイコ中枢神経系でもアセチルコリンが神経伝達物質として使われていることを明らかにしたという。

「成虫になるとさらにアセチルコリンの発現量は増加します。今後も継続して研究を進め、変態の過程の中でどのようにして神経の再編成がおこなわれ、神経伝達物質の利用が変わるのかを分子レベルで調べたいと思います」

ヒトもアセチルコリンを神経伝達に使用している。分泌されることで、ヒトの筋肉は収縮する。その収縮にアセチルコリン分解酵素である「アセチルコリンエステラーゼ」が働きかけることで弛緩し、私たちは身体の筋肉を正常にコントロールしている。

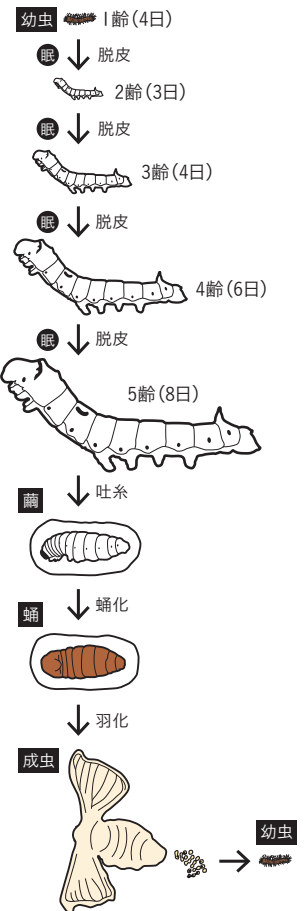
もしもアセチルコリンエステラーゼが阻害されると、筋肉は収縮したままとなり、呼吸困難や痙攣などの症状が出る。ちなみにオウム真理教によるテロ事件に使われた神経ガス「サリン」はアセチルコリンエステラーゼの強力な阻害剤である。

神経伝達物質は、昆虫からヒトまで、機能する分子自体に大きな変化はない、いわば“共通言語”だ。カイコにおける発見は、今後様々な研究へ展開していく可能性がある。

「自然科学者は、観察が全て。どんなことにも疑問を持って見つめると、いろんな面白いことが見えてくる。僕の研究者人生は、最初から今まで、ずっとそうです」

カイコの不思議は今日も、泉を次の探求の旅へと駆り立てている。

カイコのライフサイクル



カイコは家畜化された昆虫であり、飼育がしやすいため、実験対象として優れている。手のひらに載せてもとても大人しく、逃げることはない。

SIDE STORIES

そよ風も高級に。研究室名物「シルクのうちわ」



カイコの習性を利用した、あおげば清涼感と高級感が同時に感じられる「シルクのうちわ」。うちわの「骨」の上に、絹糸を吐くようになった5齢幼虫のカイコを数匹放ち、水平にしておくと、カイコたちは繭をつくらず、うちわ全体を絹糸で覆うように糸を吐いていくという。

自然の観察眼 名機・オリンパス ペン



中学生の頃にプレゼントされたフィルムカメラ「オリンパス ペン D3」(左)。当時は押し入れを暗室代わりにし、現像も自分でおこなった。カメラ好きは父親の影響で、今も大切な趣味のひとつ。湘南ひらつかキャンパス付近の自然が被写体だ。写真は「オリンパス ペン F」。

LABS

研究所紹介 国際経営研究所

国際経営とは、文字通り国境を越え、グローバルに展開する経営活動。神奈川大学国際経営研究所は、学内外で実践の伴った研究を推進しながら、現代のビジネスにとって必要な国際経営を探求する研究所だ。



国際経営は「グローバル&ローカル」

神奈川大学国際経営研究所の特色はグローバルな研究を推進しながら、ローカルコミュニティとの交流を意識した取り組みにある。「真のグローバルは、ローカルに足がついてこそ、より豊かに志向される」。所長である行川一郎教授はそう話す。ローカルへの取り組みとして、後援する「平塚市産業活性化セミナー」がある。2015年11月現在、計9回開催され、その内容は生活支援ロボットの実用化・普及を促進する「さがみロボット産業特区」から、生産・加工・販売を一手におこなう第一次産業の新しい形「6次産業化」の志向に至るまで、地域経済活性化の知を提供する。

グローバルには韓国・東西大学校との研究交流会も開催。また、現在は学生も将来の就職先などに東アジア諸国を挙げることから「今後はより一層アジアを見据えた展開を広めていきたい」と行川は話す。

「東アジア諸国に進出するという事はグローバルな問題を抱えるイスラム社会と直接関わるということ。学生の未来へ、研究所としても、支援をしたい。そしてローカルでは、地域社会の活性化が未来の課題。このふたつの問題に力を注いでいくことが、これからの国際経営には必要だと感じています」

ローカルからグローバルまでの時代の要請に、経営学から応えていく。それが国際経営研究所の役割なのだ。

1		4
2	3	5

1. 所長の行川一郎教授
2. 年に一度発行される研究論集『国際経営フォーラム』。「グローバル」「国際物流の新動向と課題」など、時代を反映したタイトルが目立つ。
3. 多彩な共同研究プロジェクトが実施されており、それらの成果は、『プロジェクトペーパー』にて公開される。
4. 国際色豊かなオブジェが、研究室の雰囲気演出する。
5. 書架には様々な経済誌の集積がおさめられている。

注目の若手研究者 土屋 翔

博士後期課程3年
経営学研究科
国際経営専攻
田中則仁研究室

農村の原風景を、 経営学で守り継ぐ

都市への人口集中・流出が続き、多くの農村は衰退を迎えつつある。それを防ぐ手立てはないのか——。経営学の視点から、その問いに挑むのは、農村を身近に感じて育った若き研究者だ。

「たくさん採れたから持って行きな」 農村に今も息づく、その言葉の意味

母方の祖父の家が、江戸時代から11代続く農家です。実家から近く、小さい頃は休みの日になると田んぼに遊びに行っていました。

祖父の家があるのは、静岡県藤枝市葉梨西方という山間の小さな集落です。江戸時代から代々続く20世帯ぐらいの農家が、農繁期にはお互い助け合い、自分の土地でなくとも農地の管理について意見を言い合い、村全体が運命共同体として農業を営んでいる雰囲気がありました。私が遊びに行くと、祖父や近隣の農家の方々は、「たくさん採れたから持って行きな」と収穫物を私にタダでくれました。

私が慣れ親しんできたその光景は、大学進学で都会に出てきて、農村特有のものであることに気づきました。経済価値が重視される都会では、換金可能なものをタダで渡すようなことはしません。工場で、「たくさんつくり過ぎたからあげるよ」なんてことは起こりえ

ません。農村では、経済価値よりも人と人との関係性、すなわち“つながり”や“あいだ”という社会価値が重視されていたのです。

同時に、私にとっての原風景である農村が、衰退しつつあることにも心を痛めていました。

農村では、個人という“部分”だけでなく、農村“全体”のことも考えて農業を営んでいます。その価値観や行動規範が社会に広がることを願い、研究をまとめました。私が考える「農業経営システム」では、各主体が有機的につながり、「協働」「統合」をします。個人という“部分最適”では困難な問題も、「農業経営システム」という“全体”として対処すれば、諸問題を解決できるのです。

将来は大学で農業経営の研究を続けたいと思っています。自分が大切だと思えるものを守っていきたくて、農村の価値観が広まれば、環境問題や食糧問題にとっても解決の一助になるのではないかと考えています。



研究を始める原点となった、祖父の農村集落。山裾がそのまま延びるように田畑が広がるのが、中山間地の農業の特徴だ。農地と里山がつながって見える。

Sho Tsuchiya

1988年静岡県生まれ。2011年神奈川県立大学経営学部国際経営学科卒業。

2-3号特別連載

世界を夢中に させるような 化学をしよう

森和亮教授によって発見された、水素の貯蔵、分離、さらには光触媒として用いることで製造まで可能になる金属錯体。今、この金属錯体を使った、未来の水素社会を支える新技術開発に、世界中の研究者が夢中になっている。連載の後半では、世界を夢中にさせる研究の魅力を、研究の最前線と併せて語っていただいた。

森 和亮 名誉教授

理学部 化学科
磁気化学、
機能性材料化学、
錯体化学

森教授は金属錯体「テレフタル酸銅(II)」が水素などの気体を収蔵できる性質を持っていることを発見した。1972年には学会発表をおこなうが、世界はまだ、その新しさに気づくことができなかった。それから数十年が経ち、世界が水素社会を志向し始めた頃、その発見は大きく注目されることになる――。

大阪大学教養学部へ赴任した1968年の春、私は木下達彦先生のもと、自作の測定器「磁気天秤」で様々な金属錯体の原子間・分子間の磁性の相互作用を測定していました。しかし、ある化合物の測定時に事故が起こります。天秤は目盛りを振り切り、測定不能に陥りました。この事故が、気体を収蔵し、蓄えることのできる金属錯体「テレフタル酸銅(II)」の特異な性質との出会いでした。

紆余曲折を経て、今では世界中で研究されているこの化合物は、これから訪れるであろう「水素社会」を実現する上で重要な役割を担うことが分かってきました。気体を収蔵できる特性から水素の大規模貯蔵と分離、そして触媒になることで水素の製造までを担う基礎技術として注目されており、計り知ること

のできない可能性を持っていたのです。

世界中の研究者が夢中に

1993年から、私は天然ガスを貯蔵するための応用研究を大阪ガスと共同で進めました。この時の研究では、貯蔵量を増やし、天然ガスでの実用化を目指すことでした。

テレフタル酸銅(II)を貯蔵容器(ガスボンベ)に入れ、そこに天然ガスを圧力をかけて貯蔵します。テレフタル酸銅(II)には無数の穴「ナノ細孔」が空いた格子状になっており、そこに気体の分子が入り込んで収蔵されます。貯蔵量を増やすために、その穴を広げる研究をおこないました。テレフタル酸よりも長い「カルボン酸」を用い、「架橋配位子」に「ピラジン」を入れ、強度を保ちながら穴を広げる方法などが確認されました。

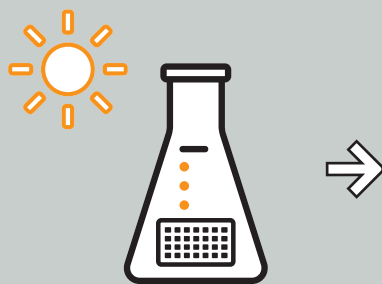
続く2000年には、NEDO(国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)のプロジェクトとして採択され、本学や大阪ガスなど複数の企業および大学とも連携して研究開発をおこないました。

ここで達成されたのが、天然ガスの低圧下(20~30気圧)における保存でした。低圧で

Wasuke Mori

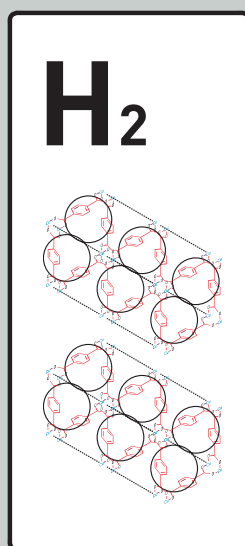
1941年愛知県生まれ。1968年名古屋大学理学研究科化学専攻博士課程中退、大阪大学教養学部助手、講師、助教授を経て、1996年神奈川大学理学部教授。同大学副学長、学校法人神奈川大学常務理事を歴任。現在、同大学名誉教授。

金属錯体が可能にする 水素社会



水素発生

金属錯体を光媒体として利用し、
太陽光と水から水素を合成



金属錯体を活用し、水素を貯蔵する



燃料電池



ガスタービン発電

各家庭をはじめとした社会における電力供給に



水素自動車

移動のインフラを支えるエネルギー源に

あれば、それだけ容器にかかる力も小さいため、容器の自由度も高まります。従来の高圧用（200気圧）の、頑丈な円筒形のものではなく、肉薄で平らな直方体型を採用できました。貯蔵量は大きくしながら、コンパクト化にも成功したのです。

この技術によって、天然ガス自動車の屋根部分や車体下部などに効率的に燃料ポンペを搭載できるようになり、省スペース化を実現。貯蔵量も増えたため、走行距離も従来のガソリン車と変わらない500～600キロメートルを実現しました。

水素貯蔵のための研究も、大手自動車メーカーなども参入し、進められました。もちろん、テレフタル酸銅（II）は原理的には水素も大量に貯蔵することができます。しかし課題は貯蔵時の温度なのです。水素は非常に軽く、沸点が低いため、非常に温度が低い状態でなければ、おとなしくしてくれないのです。90ケルビン（約-183℃）という、常温からは程遠い温度でなければ、今の技術では安定性に課題が残ります。

ただ確実なのは、一般的には900気圧程度の高圧状態で貯蔵する水素ですが、テレフタル酸銅（II）などの細孔をもつ金属錯体を使えばはるかに低圧で貯蔵ができるということです。この技術は、未来の水素社会の貯蔵方法を大きく前進させる可能性を秘めています。

世界中の研究者が水素を常温で貯蔵する技術の確立に挑み、それは今も続いています。

金属錯体で実現する水素合成

また、テレフタル酸銅（II）のような金属錯体を「光触媒」として使うことで、水素の製造を行うことも可能になりつつあります。

現段階ではルテニウムやロジウムなどの希少金属でつくられた金属錯体を光触媒に用いた実験で、大変良い結果が出ているようです。ゆくゆくは鉄などの一般的な金属でこれを実現し、光合成のような、CO₂と掛けあわせた反応にも挑戦されればと思います。

この素晴らしい成果に、私は光合成に憧れた子どもの頃を思い出します。太陽光を浴びるだけで水と二酸化炭素からでんぷんを合成する。植物の営みに、私は心奪われたのです。

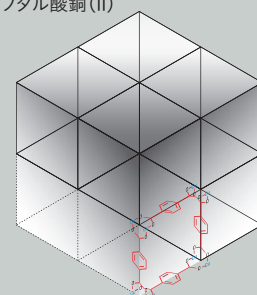
かつて、太陽光を使って水から水素を分解するのは、夢の技術だと言われていました。しかしそれはもう、手に届く未来になりつつある。環境負荷がかからない方法で水素が製造・分離でき、うまくコントロールされながら貯蔵ができる社会はきっと、目前です。

この技術が確立されれば、それによって地球規模の様々な食糧問題やエネルギー問題が解決できるでしょう。

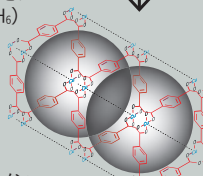
そのために必要なのは、若い研究者の力です。科学といえども、新しいアイデアが溢れてくるのは30代までではないでしょうか。若い研究者は、結果や現実だけではなく、計り知れない自分の可能性や、未来を見つめてほしいと願っています。

「ナノ細孔」構造で、 金属錯体に気体が 収蔵される仕組み

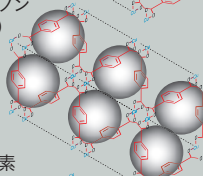
テレフタル酸銅（II）



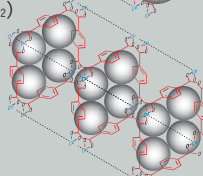
ベンゼン
(C₆H₆)



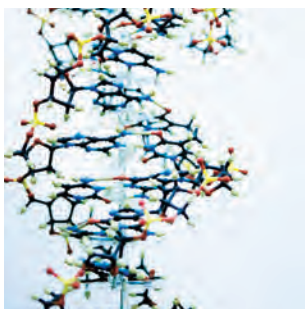
キセノン
(Xe)



窒素
(N₂)



金属錯体テレフタル酸銅（II）には、1ナノメートル程度の微細な穴「ナノ細孔」が無数に空いており、その穴にベンゼン（C₆H₆）分子であれば銅原子1に対して0.5、キセノン（Xe）分子であれば銅原子1に対して1、窒素（N₂）分子は銅原子1に対して2が収蔵される。その収蔵量は、テレフタル酸銅（II）100グラムに対し、窒素であれば30リットルにも及ぶ。



表紙について

今号でご紹介した泉 進教授の研究対象は「カイコ」。カイコは成長段階の中で絹糸を吐き、繭をつくり、中で蛹となり、成虫へと大きく姿を変えて外へ出てきます。繭はまるで、小さくても力強いカイコの大変身を包み込む生命の“ゆりかご”です。生命の神秘性や不思議を印象づける存在として、今号では、繭を表紙に選びました。

最も身近な奇跡。それは、生命。人間の身体を構成する37兆個の細胞群が環境と相互作用しながら奏でる壮大なオーケストレーションの奇跡。この奇跡を総体として深く理解する究極の科学的アプローチを、残念ながら人類は未だ手にしていない。しかし、科学者は、それぞれが今手にしている科学的アプローチで、生命の神秘に挑み続ける。本号では、神奈川大学に在籍し、生命の神秘と日々格闘する科学者の想いと活動にスポットを当て、神秘に挑む科学の醍醐味をお伝えします。

PROUD BLUE

編集発行/
神奈川大学研究支援部、広報部、学長室

CD / 為房春香 (図書印刷)
AD / 細山田光宣 (細山田デザイン)
D / 川口匠 (細山田デザイン)
TEXT / 森旭彦、萱原正嗣
PH / 岡村隆広
PD / 山宮伸之、長濱紀子 (図書印刷)

問い合わせ先
045-481-5661 (代)
proud-blue@kanagawa-u.ac.jp