



特集

「生き物の語る地球史」

- 04—彼らはいつ日本に来たのだろうか◇小澤智生
- 08—うなぎと地球科学◇渡邊誠一郎
- 02—時を語るもの◇飛田武幸
- 03—理のエッセイ◇渡辺芳人
- 12—理の先端をいく◇原田正康／梅村 浩
- 16—講義探検◇地球惑星物理学実験II／統計物理学I
- 18—理学部交差点

小野勝次博士— 数学と工学を結び計算機の時代を開く

小野勝次先生は到底一言では表しきれない破格にスケールの大きい存在であった。先生が興味をおもちの分野は、数学、物理をはじめとする理学一般、工学、OR*1、そしてスポーツと留まるところを知らない。そして驚くことにどれについても一家言があった。数学では、基礎論と応用数学という一見両極端とも見える分野に造詣が深く、先生の中で自然にそれが融合していた。ORについても大変熱心で、初代のOR学会会長を務められた。

学士院賞のご栄誉は計算機に関するものであったが、工学的な鋭い直感をもっておられ、流体の理論とも関連させておられた。学士院賞について小野先生らしい感想を聞くことがあった。中山

正先生との同時受賞にふれて、「同じ数学教室の2人が同時に学士院賞受賞という記録は当分破れまい」という、スポーツマンらしいお言葉であった。スポーツといえば、スポーツの解析に長々と数式を入れた解説がある。これも他に例をみないものであろう。

最後に、どうしても欠かせないエピソードがある。小野先生は自慢をする方ではなかったが、戦後、茅誠司*2先生、嵯峨根遼吉*3先生たちと協力して、GHQ（占領軍総司令部）の科学顧問を務めたH.ケリー博士に対して、日本の科学を立て直すために折衝された功績は大きいと思う。折にふれて、ちらりともらえることがあった。追記したいことである。（名古屋大学名誉教授 飛田武幸）





おの かつじ
小野勝次 (1910-2001)
元名古屋大学理学部教授。日本学士院賞 (1954)

◆写真の説明

学生時代、小野勝次博士は円盤投げと競歩の選手で、特に競歩では日本選手権と極東オリンピックで2位という成績を残している。写真左上の円盤には、五輪メダリストの大島鎌吉*4氏をはじめ交流のあった陸上競技関係者のサインが見られる。写真左のノートは1952年頃の日記の本人による転記、写真中央は与えられた関数の導関数と定積分のグラフを描く歯車式演算器の特許発明明細書、写真右は以下で述べる電機式計算機の説明である。



上の写真は博士の発想をもとに作製されたリレー*5式統計計算機である。1947年に大蔵省別館の(社)中央統計社に導入され、物価や世論調査などで活躍した。当時の計算機の一般的な入力方法であるパンチカードは、非常に高価でかつ1枚1枚検孔作業が必要なため、国勢調査などの大量でかつ一度きりのデータ入力には不向きであった。博士たちの計算機はカードを使用せずにすべてを電氣化した画期的なものである。多数のオペレータがデータをキーボードに入力すると、即座に正副2名の入力を比べてエラーチェックが行われるとともに、一挙に幾種類もの統計表が表示される。この研究開発により山下英男(当時・東京大学工学部教授)、佐藤亮策(当時・東京大学工学部助手)とともに学士院賞を受賞している。

*1 OR オペレーションズリサーチ, Operations research. 複雑なシステムにおける最適戦略を導く数学的方法。
*2 茅誠司 (1899-1988) 元東京大学理学部教授。
*3 藤嶋根達吉 (1905-1969) 元東京大学理学部教授。
*4 大島鎌吉 (1908-1985) JOC名誉委員、元大阪体育大学副学長、ロサンゼルス五輪三段跳び銅メダリスト。
*5 リレー(継電器) 電磁石を用いてオン・オフを制御するスイッチ(増幅器)。真空管に比べ動作は遅いが、安価でかつ信頼性が高い。



理のエッセイ◎渡辺芳人 物質理学専攻教授

評価を考える

昨今、大学は評価の嵐にさらされている。名古屋大学も例外ではいられない。論文リストに加えて科学研究費などの競争資金の獲得状況も重要な判断基準となっている。COE*1の成果に関する評価では、論文を掲載した雑誌とその論文を引用した雑誌のインパクトファクター*2 (IF) まで求められている。ここで、こうしたデータの利用について考えてみたい。

発表論文数 = すばらしい研究者の指標ではないことは、明らかである。外部資金が潤沢 = すばらしい研究者の指標とはいき切れない。IFが高い論文誌に掲載される論文 = すばらしい論文とは限らない。こうした点は、共通認識であるにもかかわらず、なぜ、相変わらず論文数や IF、外部資金の獲得状況を評価データとして求められるのであろうか。それは、我々の研究が非常に高いレベルで行われていることを社会に納得してもらうための「物差し」の1つとして、こうした数値が利用できると考えられるからである。

上記の文章で、「言い切れない」、「限らない」という表現をしたが、当てはまる場合もあれば、そうでないこともある。したがって、個々の大学教員の研究を評価するには、こうした数値の誤差が大きすぎるので、個人評価に使うべきではない。しかし、組織全体の活性・研究力の高さを推し量るという意味では、こうした数字は役に立つと私は考える。すばらしい論文の引用が少ないこともあれば、「そこそこ」の論文の引用が多いこともあり、そうした点でお互いが相殺されるため、母集団の数が多くなれば数字は現実的な意味を帯びてくる。高等研究院のメンバーによる発表論文誌の平均 IF や被引用数は、名古屋大学の専攻単位の数値に比して非常に高い。名古屋大学理学部は、非常に高い研究業績を上げており、総体として上記の数値は高い。

研究成果の出方には波があり、論文数が少ないときや、科研費が当たらないときもある。そんなことはどうでもいい。単年度ごとの数値に一喜一憂することなく、研究と教育を進めようではありませんか。上記の数値が低いとお叱りを受けたときには、甘んじて批判を受けましょう。それが理学部というものでしょう。

*1 COE center of excellenceの略。本文中のCOEは、日本学術振興会の「21世紀COEプログラム」という、競争的資金によって大学の研究教育を支援するプログラムを指している。

*2 インパクトファクター 学術雑誌の影響力や重要度を測るための数値。トムソンサイエンティフィック社が「Journal Citation Reports」として発表する。その雑誌の論文が他の論文にどれだけ引用されるかの目安となる。たとえば科学誌「ネイチャー」の2004年のインパクトファクターは32.182であるが、これは2002年と2003年に「ネイチャー」に出版された論文が、2004年に1報あたり平均32.182回引用されたことを示している。

Yoshihito Watanabe

物質理学専攻教授。1953年岩手県生まれ。1982年筑波大学化学系博士課程修了。ミシガン大、プリンストン大、慶応大、京大工、分子研を経て2002年より現職。専門は生物無機化学。蛋白質内部空間に金属触媒を挿入して、金属酵素を作り上げるのが現在のメインテーマ。

生き物の語る地球史

地球という惑星に生きている以上、すべての生物は地球の歴史とともに進化と絶滅を繰り返してきた。

しかし今を生きる人間はそれを忘れてしまいがちだ。

生物から見た地球の歴史を2人の研究者の視点から語っていただいた。

(2006年1月12日、第10回理学懇話会より)

彼らはいつ 日本に来たのだろうか

小澤智生 地球環境科学専攻教授

絶滅に向かう動物たち

2005年、国際的な鳥類保護団体であるバードライフ・インターナショナル*1から、「世界の鳥類の20%に絶滅の危機が迫る」という報告書が発表されました。現在地球上に生息する9775種、約1万種の鳥類のうちの1212種が絶滅の寸前にあり、さらに788種は極めて絶滅の危険性が高いというものでした。哺乳類で最も絶滅の危機にあるのがインドネシアのスマトラサイとジャワサイです。角が2本あるスマトラサイはスマトラ島に30~50頭しかいません。角が1本のジャワサイも同様です。ジャワ島の西部の自然林に50~60頭、あるいは、もっと少なくなっているという報告もあります。

日本列島も動物たちにとって決して安住の地ではありません。特に今、ツキノワグマは大変に厳しい状況にあります。ツキノワグマは日本列島で本州・四国・九州に生息していましたが、九州では昭和初期にすでに絶滅しています。四国には20頭に満たない1つの集団しか残っていません。西日本には四国以外に中国地方の集団が残っ



Tomowo Ozawa

1943年生まれ。九州大学大学院理学研究科修士課程修了。理学博士。九州大学理学部助手、東京大学理学部助手、名古屋大学理学部助教授、大学院理学研究科教授を経て2000年より大学院環境学研究科教授。専門は古生物学、系統進化。

ています。かつては最大300頭ぐらいの集団が知られていました。近年の激しい気候変動により森林の実りが少ない年の秋口に、クマは餌を求めて人里に出没し、多くの個体が害獣として駆除されています。その結果、西中国山地のツキノワグマは、この4年間で200頭も駆逐されたと報告されており、いちばん最近の調査記録では240頭ほどとなっています。この記録に従えば、最大でも50頭ほどしか残っていないことになります。唯

一安定しているのが奥羽山地から中部地方の白山に至る森林帯に分布する集団です。しかしこの集団も、DNAの塩基配列を調べてみると、遺伝的多様性が乏しい集団であり、絶滅の危機をはらんでいます。

野生生物の多様性は、人類にとっても自然資源として極めて価値の高いものです。身のまわりの生態系を守り持続させることは、我々の生存に直接関わる問題になります。

くつがえった定説

私は2つの方法を用いて研究してきました。1つは、分子系統解析です。分子系統解析というのは、DNAの塩基配列データに基づいて、お互いの生物の個体、集団、種の間関係と、それらの系統と分岐時期を明らかにする方法です。もう1つが、化石の記録です。化石の記録というのは「いつの時代に、どこに、どういう生物がいたのか」という実際の記録です。このような2つの異なる意味合いの情報を統合して、日本の動物相の起源や現在の生物相がどのように成り立ってきたのかということについて研究してきました。

これまで一般的には、日本に渡来した祖先的な生物種が日本列島に分布を拡大していく過程で大きな山地、大地質構造線、それから内海、海峡というものが地理的障壁となり地域集団(亜種)が形成され、時間が経つに伴って、別の種になったと考えられてきました。

今回、私は日本列島に生息するカワニナのような淡水の貝類から魚類、両生類、爬虫類、哺乳類と、いろいろな動物を対象に分子系統解析を展開し、並行して化石調査を行いました。その結果、すでに大陸で分化していた動物種が異なった時期に、異なった移住ルートで、複数回渡来してきたこと、その集団から日本の種または亜種とされているものが成り立っていったことが明らかになってきました。

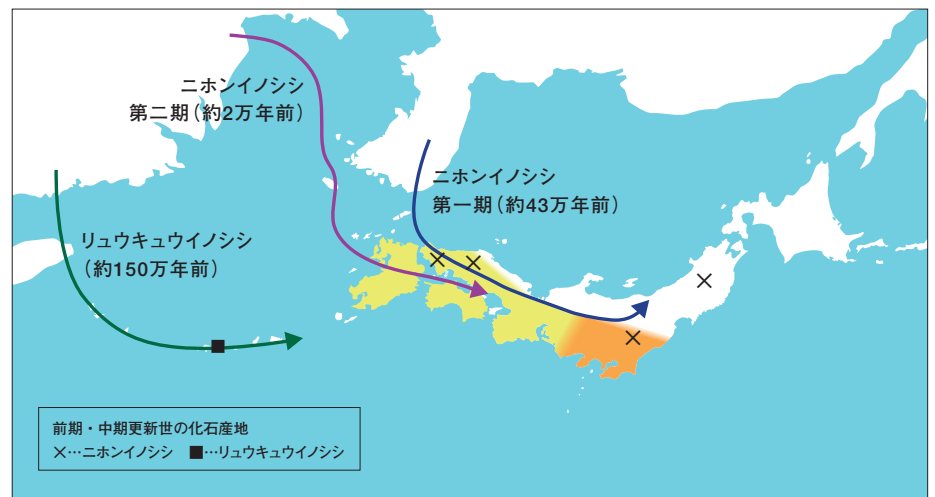
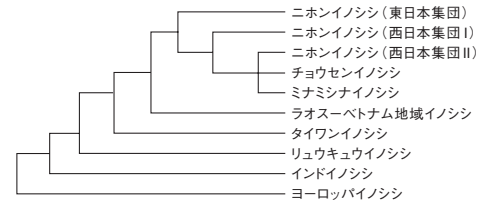
3つの集団からなるニホンイノシシ

いくつかの事例について紹介します。まずイノシシについてです。ユーラシア大陸にはユーラシアイノシシが広く分布しており、地域により形態と遺伝的な個性の違う6つの亜種^{*2}が知られています。

日本列島の本州、四国、九州にはニホンイノシシが、南西諸島にはリュウキュウイノシシが分布

図1 イノシシの渡来ルート

ミトコンドリアDNAの塩基配列から作成したニホンイノシシのユーラシアイノシシにおける分子系統学的位置と日本への渡来時期と渡来ルート。図では、東アジアのユーラシアイノシシグループの中でニホンイノシシ(東日本集団)がはじめに分岐し、その後ニホンイノシシの西日本集団が、チョウセンイノシシ、ミナミシナイノシシなどと分化した。東日本集団は約43万年前に渡来し、日本各地に化石記録(×印)を残している。西日本集団は、最終氷河期の約2万年前の低海水準期に渡来し、先住者の東日本集団を東方に押し上げながら分布を拡大し、現在天竜川以西に広い分布を有している。リュウキュウイノシシは、更新世初期に南西諸島に渡来した。



しています。ニホンイノシシとリュウキュウイノシシは、ユーラシアイノシシという種に含まれる別の亜種です。リュウキュウイノシシは中型から少し大型の犬程度の、ニホンイノシシと比較すると小型のイノシシです。このイノシシは密生した森林のなかを自由にはいまわることに対応して小型化したものです。

ユーラシアイノシシの分子系統解析から、亜種群のなかでヨーロッパイノシシのグループが最初に分化し、その後、インドイノシシのグループが分化し、次にリュウキュウイノシシ、台湾イノシシ、ラオスのイノシシの順に分化します。最後に、ニホンイノシシや東アジアのミナミシナイノシシを含むグループが分化してきます。つまり、リュウキュウイノシシはユーラシアイノシシのなかでも比較的早期に分化した系統で、化石の調査から約150万年以前に南西諸島に渡来してきたことがわかってきました(図1)。最後に分化をとげた東アジアのグループのなかでもはじめに分化したのがニホンイノシシの東日本集団であることがわかりました。東日本集団は現在、天竜川以東の関東山地などに生息しているイノシシです。一方、西日本に分布するイノシシの集団は、先に分化した西日本集団Iと、それに引き続き分化した西日本

集団IIから構成されます。中国のミナミシナイノシシ、韓国のチョウセンイノシシは西日本集団IIといっしょに分化した。

最初に東日本集団が日本列島へ渡来したのは43万年前と考えています。この集団は渡来後、日本各地の石灰洞窟のなかに化石を残しており、形態学的に東日本集団であることが認定されます。第2期の西日本集団IおよびIIの渡来ははるかに遅れて、最終氷河期の約2万年前とされています。現在の分布は天竜川以西の西南日本です。これらのイノシシは化石記録をまったく残しておらず、地域間の遺伝的な分化が非常に乏しいこともあり、最近渡来したことを暗示しています。

ニホンイノシシは、異なる時期に日本列島に渡来してきた形態学的にも遺伝学的にも異なる3つの集団から構成されていることが明らかになりました。東日本集団は、西日本集団とは異なる別亜種として認定できるのではないかと考えます。

*1 バードライフ・インターナショナル

国際的な鳥類保護団体(本部・英国ケンブリッジ)。5年ごとに世界の鳥類に関する調査報告を行っており、レッドデータブックを発行している。

*2 亜種

異なった地域に分布し、形態学的ならびに遺伝学的にも異なる同種内の集団をいう。

3つの種と見なすべきニホンジカ

次はニホンジカの事例を紹介します。ニホンジカもやはりミトコンドリアのいくつかの遺伝子領域の配列から分子系統図を作成しました。その結果ニホンジカは遺伝的にも大きく離れて、種のレベルに分化した3つのグループから構成されていることがわかってきました。1つは北海道・本州のニホンジカが含まれる東日本集団です。2つめのグループは中国地方の広島県以西から四国、九州に生息するニホンジカが含まれる西日本集団です。それから、アジア大陸の沿海州からベトナムまでの大陸の沿海部に分布するいくつかの亜種の集団が第3のグループ、大陸亜種集団をつくっています。西日本集団と東日本集団は、遺伝的な距離はかなり離れており、すでに種のレベルまで分化しているものと考えています。

個体から得られた相同の遺伝子の塩基配列を比較したとき、異なった配列（ハプロタイプという）が認められますが、このハプロタイプの違いを最

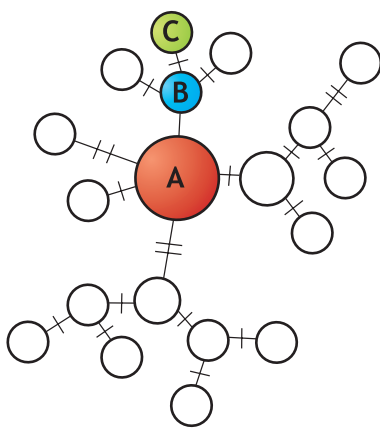
少の突然変異の数で説明できるように結んだ図を最少スパンニングネットワーク図（minimum spanning network）といいます（図2）。この図によって、個体間、集団、種の遺伝的関係を距離として読みとることができます。

この最少スパンニングネットワーク図を使って、個体と集団の間の遺伝的距離を測ると、北海道と本州のニホンジカは距離の小さな1つのまとまりを形成しています。同様に西南日本のニホンジカも1つのまとまりをもっています。ところが、岡山県を境に東と西の集団の間には、最短距離でも39の突然変異が介在します。この距離はウシヤイノシシなど偶蹄類での異種間で認められる距離に相当し、日本列島のニホンジカの2つの集団は、異種のレベルに分化していることを意味しています。日本列島の2集団と大陸の集団との距離も35の最小突然変異数で隔たり、日本の2集団間と同様に別種のレベルにあるといえます。東日本

集団と西日本集団は生息域が接していますが、両集団間の個体の中で生殖子どもができていないというはっきりとした証拠はつかめていません。生殖的にも隔離していると考えられるため、ニホンジカという同じ種ではなく互いの集団を別種として識別する必要があると考えます。

シカの渡来の様子を見てみましょう（図3）。化石記録を踏まえると、43万年前、ナウマンゾウ、ニホンザル、ツキノワグマ、ニホンイノシシの東日本集団などが渡来した時期に、現在の西日本集団が移住してきたと考えられます。西日本集団は中国地方の各地、関東地方に化石を残しています。かつては、渡来して、本州、四国、九州に広く分布していたと思います。

東日本集団は、約2万年前に、沿海州、サハリン、北海道を経て北方から渡来したと解釈しています。東日本集団は北海道から中国地方以北の本州にいたる広域な分布をもっているにも関わらず、



- 個体1 AGGCTAACTT ← ハプロタイプ A
- 個体2 AGGCTAACTT ← ハプロタイプ A
- 個体3 AGGCTATCCTT ← ハプロタイプ B
- 個体4 AGGCTATCAT ← ハプロタイプ C

図2 最少スパンニングネットワーク図

ハプロタイプとは、4種類の塩基（上図:AGCT）の配列の型のこと。1塩基でも異なれば、違うハプロタイプとして扱われる。お互いのハプロタイプの配列の違いを最小の突然変異で説明できるように、すべてのハプロタイプを結んだものを最少スパンニングネットワーク図（minimum spanning network）という。この図では、同じハプロタイプをもつ個体の数を円の面積で表し、突然変異数をハプロタイプ間の枝の長さで表現する。

個体1~4を分析したところ、個体1,2はハプロタイプA、個体3はハプロタイプB、個体4はハプロタイプCに分けられ、Aから1つの突然変異（距離1）でBが、Bから1つの突然変異（距離1）でCが生じる。図ではAが祖先的な配列を示し、BはAより生じ、CはBより生じた派生的な配列であることがわかる。

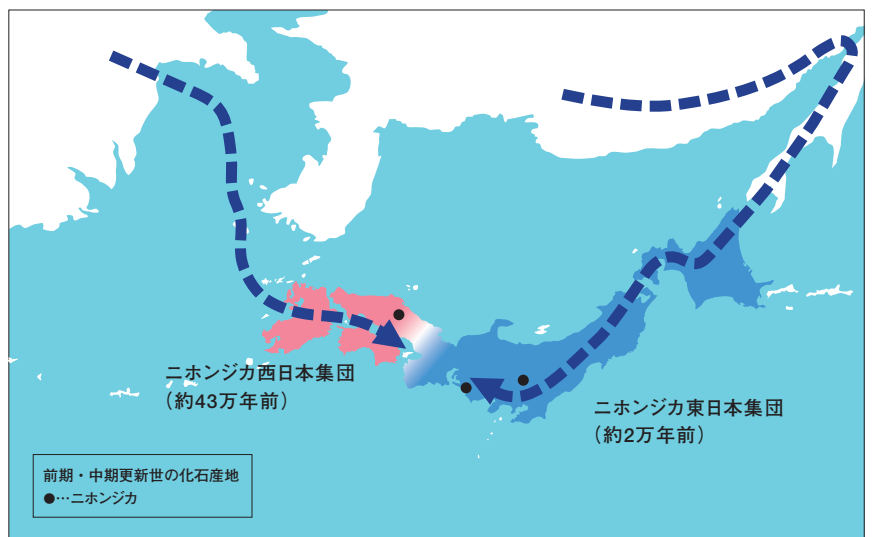
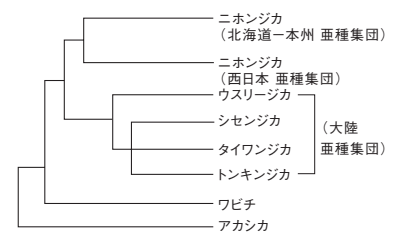


図3 ニホンジカの渡来ルート

ミトコンドリアDNAの塩基配列から作成したニホンジカの3集団（東日本、西日本、および大陸亜種集団）の系統的關係と渡来時期と渡来ルート。分子系統解析から、3集団の分岐する時期は更新世前期以前と見積もられ、大陸で分化した東日本および西日本集団の祖先集団が異なった渡来時期と異なった渡来ルートで移入してきた。黒丸は西日本集団の化石記録を示す。



化石記録をまったく残しておりません。大型でツノの分岐数の多い北海道のエゾシカは別種とされており、奈良公園のシカとはかなり違うように思いますが、両者間には遺伝的にはほとんど差がありません。そのようなことから、ごく最近に渡来して、遺伝的に地域集団がまだ未分化な状態だと考えられます。



ニホンツキノワグマは独立した種である

ツキノワグマについても簡単に解析の結果を紹介しましょう。ツキノワグマは西はイラン高原からカシミール、インドシナ、チベット、中国南部、台湾、中国東北部から沿海州、そして日本列島にいたる8つの地域集団(分類学的に8亜種)から構成されます。日本列島には唯一、ニホンツキノワグマが分布しています。日本のツキノワグマと大陸にいるツキノワグマは、動物園では後者をヒマラヤグマとして区別しています。たてがみの様子や頭蓋の形状も異なることから両者は別種ではないかという研究者もいます。

私は、今回、ツキノワグマの集団の遺伝的な解析をはじめに行いました。その結果、ツキノワグマは約200万年前に共通の祖先から分かれた2群があり、1つは大陸に残っている大陸亜種集団、もう1つは日本にいるニホンツキノワグマです。ニホンツキノワグマは東日本集団と遺伝的に個性の異なる西日本集団に2分化されています。これは恐らく異なる時期に渡ってきたものです。現在では形態的な違いも踏まえて、ニホンツキノワグマを亜種ではなく独立した種にすべきだと私は考えています。

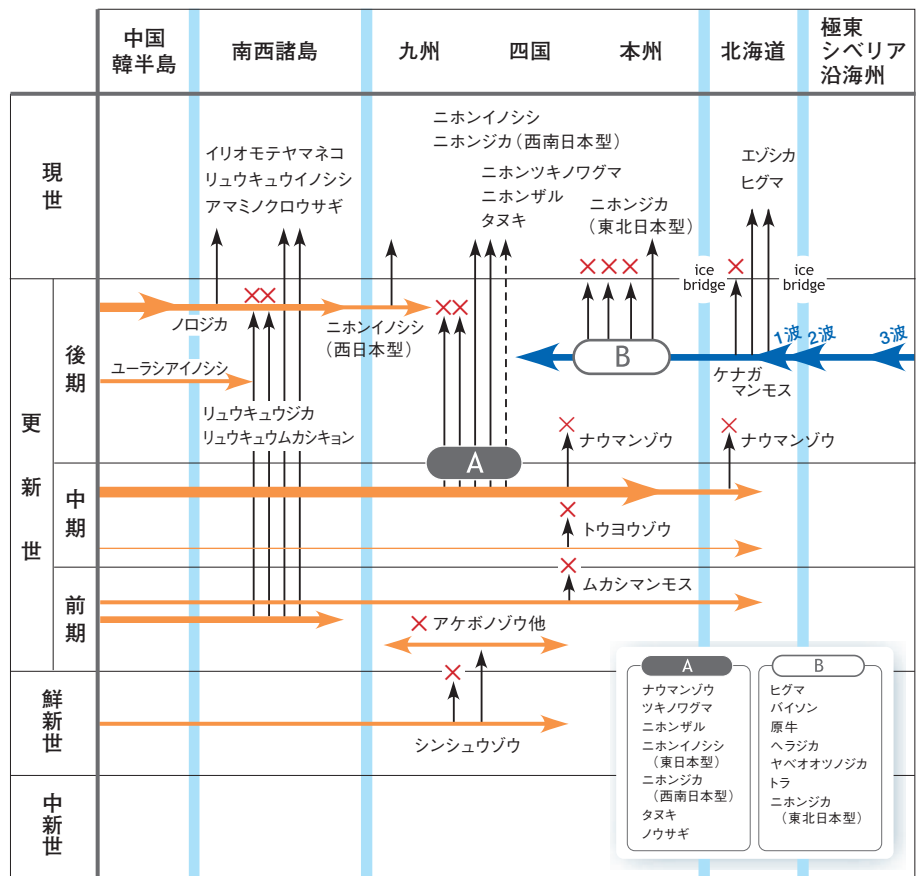


図4 日本の現生哺乳類相の成立モデル

日本列島への哺乳類の渡来は、極域に大陸水河が大規模に発達し、海水準が低下し大陸と陸橋で繋がった氷期に行われた。ゾウ類を代表とする化石記録から、5期の渡来が知られている。現在の日本列島の哺乳類相は、約43万年前の氷期と約2万年前の最終氷期の渡来者が主要な構成メンバーとなっている。南西諸島の現在の哺乳動物相は、更新世前期(約150万年前)以前に渡来した生物群の遺存種から主として構成されている。

渡来の先頭にはゾウがいた

現在、日本にいる動物は、いつごろ渡ってきて、どういうルートを経て来たのかを示す図を見てみましょう(図4)。ゾウは5回渡ってきました。シンシュウゾウは約300万年前に渡ってきて、日本列島に広く分布しましたが絶滅します。更新世の前期、150~160万年前にムカシマンモスが渡来して絶滅しました。次に、トウヨウゾウという東南アジアに起源をもつ種が日本に侵入し、一時的に分布を拡大しましたが絶滅しました。43万年前にたくさんの動物を引き連れてやってきたのがナウマンゾウです。このときにツキノワグマ、ニホンザル、ニホンイノシシの東日本集団、ニホンツキノワグマの西南日本集団、タヌキ、ノウサギなどがやってきて、現在、日本の本州、四国、九州に生息しています。一方、

数万年前にケナガマンモスとともに北方からバイソン、原牛、ノロジカ、ジャコウジカ、ヤベオオツノジカ、シベリアトラ、アムールヒョウ、ヒグマなどが渡来しました。多くのものは絶滅しましたが生き残っているのが北海道のヒグマです。当時、ヒグマは本州にもたくさんいました。東日本型のシカが来たのもこの時です。

日本の野生生物は大陸から渡来し、日本に住み着きながら進化を遂げて、絶滅あるいは再度の渡来を繰り返しながら生きのびてきました。今、そういう動物すらツキノワグマのように危機的な状況にあります。日本列島に暮らすパートナーとして野生動物、野生植物と共生・共存の道を探ることが今、我々に求められています。

うなぎと地球科学

渡邊 誠一郎

地球環境科学専攻助教授



Sei-ichiro Watanabe

地球環境科学専攻助教授。1964年静岡県生まれ。東京大学大学院理学系研究科地球物理学専攻中退。理学博士。現在の専門分野は惑星科学、気候物理学。研究テーマは惑星系の形成・進化過程の理論的研究など。

ウナギの謎に魅せられた人々

私はウナギ屋ではなく、惑星科学が専攻です。文理連携の教養授業を考える、うなぎ屋での会合の枕に、「ウナギと地球科学には密接な…」と口をすべらした与太話が、理学懇話会になってしまい、困惑しています。

さて、ウナギは謎だらけの魚ということで、著名な学者がその解明に挑みました。紀元前4世紀にアリストテレスが『動物誌』の中で、「ウナギは海で生まれて川を遡上する回遊魚」と正しい認識を示す一方で、「生殖器官がなく、泥に生ずるミズが幼生」とも書いています。これは、まったく荒唐無稽ともいえず、ウナギは陸に上げて皮膚呼吸で長時間生き、少し離れた池まで陸伝いに移動するという芸当さえできますし、生殖器官は、その後2000年間、誰にも見つけられませんでした。

この難題に挑戦した一人が、ジークムント・フロイトで、医学生時代、数百匹のウナギを解剖して、その精巣を徹底的に探し、その存在を証明しようとした。緻密な観察力は、その後の精神分析の研究でも発揮された彼の一流の才能だったのでしょ。

ウナギの稚魚（幼生）は、レプトケファルスとよばれ、ウナギとは似ても似つかぬかたちです。1896年になって、それがウナギの幼生と判明しま



図1 レプトケファルス幼生

ウナギの稚魚（幼生）。大きさは数センチメートル。グアム沖の海からはるばる日本近海まで旅をする。写真提供・静岡県水産試験場浜名湖分場 (<http://www11.ocn.ne.jp/~hamanako/unagi/arekore.htm>)。

したが、実は、その40年も前に別種の魚として学名がつけられていたのです。この小さなレプトケファルスをたどることにより、ヨーロッパのウナギがはるか大西洋の真ん中にあるサルガッソー海で産卵することを、“ウナギ研究の父”ヨハネス・シュミットが、1924年になって明らかにしました。

ウナギの不思議な生態

レプトケファルスは、透明な柳の葉のかたちをしており、大きさは数センチメートルです（図1）。身体のなかはほとんど海水で、海流に乗りやすいかたちといえます。このタイプの幼生は、ウミヘビやアナゴといったウナギと近縁の細長い魚だけでなく、普通の魚のかたちをしたカライワシやイセゴイにも見られます。

この幼生が海流に乗って移動してきて、生後百数十日で、細長く透明な、グラスイールに変態します。これがさらに色素が増えて不透明になると初めて川を上ります。皆さんが蒲焼で食べるのはイエローイールとよばれる若いウナギで、身体の側面が浅黄色をしています。ウナギの古語「むなぎ」の語源は胸黄という俗説もあるくらいです。通常のウナギは5年から10年かけて川で成長します。ウナギが成熟すると、目が巨大化し、頭の形も変わり、体も銀白色になります。体内でも、消化管が衰えて、生殖器官が発達します。そして故郷の海へと下ります。

ウナギは1つの属 *Anguilla* に属し、世界に15種がいます（図2）。熱帯には多くの種類が棲み、いくつかの種が高緯度まで分布していることが

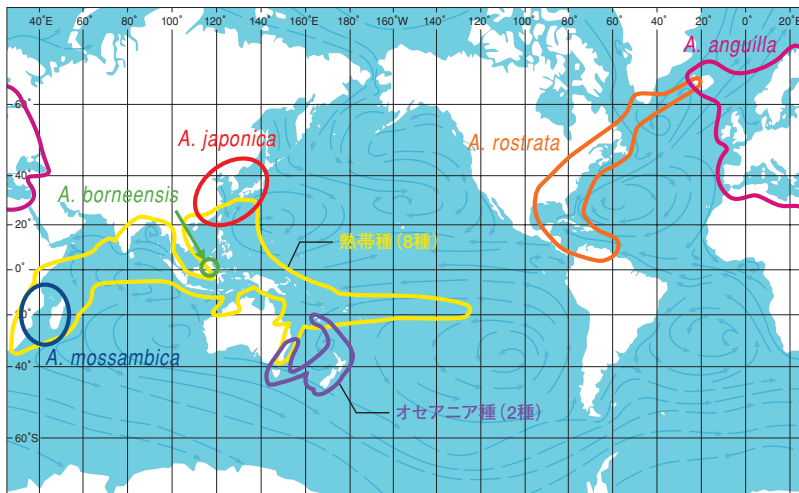
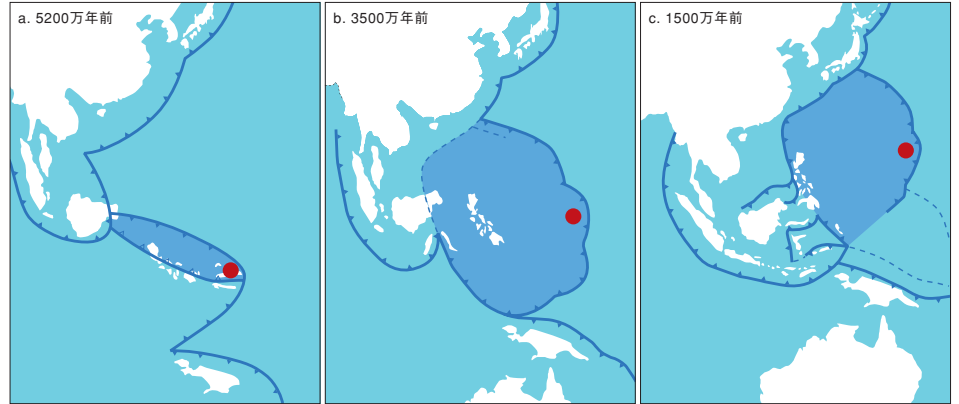


図2 ウナギの分布

ウナギ (*Anguilla* 属) 15種の地理的分布。それぞれの種が成長する場所を色分けして表した。種の学名は主なもののみ記した。矢印は海流を示している。熱帯種が多いが、温帯まで分布域を広げているものもある。ニホンウナギ: *A. japonica*, ヨーロッパウナギ: *A. anguilla*, アメリカウナギ: *A. rostrata*, ボルネオウナギ: *A. borneensis*。



←図3 ウナギの故郷

フィリピン海プレートの海底図上にウナギの産卵地を赤丸で示す。白い破線で囲んだフィリピン海プレートは、九州・パラオ海嶺と西マリアナ海嶺によって3つに分けられ、三段階で拡大をした。産卵地は西マリアナ海嶺上にある。

↑図4 フィリピン海プレートの拡大

フィリピン海プレートの拡大の様子 (E. Honza & K. Fujioka 2004, *Tectonophysics* 384, 23-53; に基づき一部修正を加えた)。a. 5200万年前、b. 3500万年前、c. 1500万年前。青い三角つきの線は海溝を表す。赤道付近で誕生したフィリピン海プレートが広がったことがわかる。赤丸は現在のウナギの産卵地が過去どこに位置していたかを示している。

わかります。ニホンウナギは、日本、韓半島、中国大陸に棲息します。大西洋には2種、ヨーロッパ全域にヨーロッパウナギが、北米大陸東半にはアメリカウナギがいます。

温帯域のウナギの特徴は長距離の産卵回遊をするということです。ヨーロッパウナギ(それにアメリカウナギ)が大西洋の真ん中で産卵することがわかった後も、ニホンウナギの産卵地は長い間謎でした。より小さな幼生を求めてだんだん南へ調査が進み、1991年、東大海洋研究所の白鳳丸がマリアナ諸島の西方海上で非常に小さいレプトケファルスを捕獲しました。これによりニホンウナギは、グアム島の近海から、北太平洋海流と黒潮を乗り継いでではる日本までやってくるということがわかりました*1。なお、熱帯ウナギは、比較的近海に卵を産むと考えられています。

生産性を海と川で比べると、熱帯では川のほうが高く、高緯度では逆に、海のほうが高くなります。熱帯では川で成長する降河回遊魚*2が多く、高緯度地域に海で成長する遡河回遊魚*3が多い理由を、この緯度による生産性の違いで説明する考えがあります。

しかし、温帯ウナギの長距離回遊は説明が困難です。川で成長するなら、わざわざ遠海に行かずに沿岸に産卵すればいいはずですし、熱帯の海で生まれて、相対的に生産性の低い高緯度の川に上るのはなぜでしょう。

広がる海の話

ニホンウナギの故郷であるマリアナ西方には、西マリアナ海嶺という、周囲の海底からの比高が3000mくらいの海底火山の山脈が南北に連なっ

ています。このあたりはフィリピン海プレート*4に属します(図3)。このプレートの歴史がウナギの謎と関係があると思うので、少し地球科学のお話をさせていただきます。

プレートというと太平洋プレートのように中央海嶺で湧き上がり、海溝で沈み込む運動を思う浮かべる方が多いでしょう。しかし、大西洋ではプレートは沈み込まず、拡大し続けています。西太平洋にはかつて拡大した、あるいは今なお拡大する小さなプレートが多数存在します。

太平洋の西には、大陸と弧状列島に囲まれた縁海が点在しています。サンゴ海、南シナ海、東シナ海、日本海などです。東太平洋や大西洋には縁海は、ほとんどありません。伊豆・小笠原諸島、マリアナ諸島、ヤップ島、パラオ諸島に囲まれたフィリピン海は巨大な縁海とみなせます。これら縁海は、かつて拡大したプレート上の海なのです。

われわれに一番なじみ深い縁海は日本海です。日本は、いまから3000万年前まではアジア大陸の一部で沿海州に張りついていました。その後、太平洋プレートによって引き裂かれるように大陸から引き離され、西日本と東日本は、ちょうど観音開きの扉を開けるように回転しながら広がり、くの字型の日本列島ができ、背後にマグマが上昇して日本海の海洋底をつくりました。

ほかの縁海も基本的には日本海のようにできました。フィリピン海プレートは、海底地形から三段階で拡大したようです。九州・パラオ海嶺*5より西側の部分はいまから5800~3300万年前に形成され、真ん中の部分は2900~1300万年前に、西マリアナ海嶺より東の部分、つまりウナギの故郷とグアム島の間の海底がつくられたのが700

万年前で、ここは現在も拡大を続けています(図3)。このような拡大史は、海底に残された地磁気反転の縞模様によって復元できます。

地球科学的知見を総合して、フィリピン海の成長を追ってみましょう(図4)。フィリピン諸島は北緯15度付近にありますが、5200万年前には、赤道より南にありました。その昔のフィリピン付近の小さな海が、拡大をして、大きなプレートへと広がっていきました。この間にインドネシアやフィリピンの新しい島々が生まれて、複雑な多島海がつくられました。注目していただきたいのは、現在のウナギの故郷だった場所が、かつては、ずっと南西の方にあったことです。

*1 ニホンウナギの産卵地

本講演の終了後、東京大学海洋研究所の塚本勝巳教授の研究チームが、体長5mm程度で生後数日のニホンウナギの幼生を多数捕獲し、産卵地を西マリアナ海嶺のスルガ海山周辺(北緯14度、東経143度)と特定したことが発表された(K. Tsukamoto 2006, *Nature* 439, 929)。

*2 降河回遊魚

海で生まれた稚魚が川を遡って成長し、成熟すると海に下って産卵する魚。ウナギの他、ボラの一部の種、カジカ、アユカケなど。

*3 遡河回遊魚

川で生まれた稚魚が海に下って成長し、成熟すると川を遡って産卵する魚。サケ類に多い。

*4 フィリピン海プレート

日本の南、相模トラフ、南海トラフ、琉球海溝、台湾、フィリピン海溝、パラオ海溝、マリアナ海溝、伊豆・小笠原海溝に囲まれた海洋プレート。日本の下に沈み込んで、東南海地震や南海地震といった巨大地震を繰り返し引き起こしている(図3参照)。

*5 九州・パラオ海嶺

九州南東沖から東経135度付近を南下し、日本最南端の沖ノ島島を経てパラオ諸島に至る海底山脈(図3参照)。

プレートの上のウナギ

回遊のような生態は生物学的に説明でき、地球科学はその環境要因を与えるに過ぎないというのが普通の考えです。たとえば、なぜ海底海山に産卵するかというと、そこに強い磁気異常があり、それを親ウナギがキャッチして、自分の故郷を探して産卵するとか、海流の還流中心にたまたまあったからとか。

でも、私の主張は、長距離回遊自体がプレートの拡大によって生じたのではないかということです。もともと、熱帯の海にいたウナギの祖先が近くの島の川を成長の場にしていただけで、その後、プレートが拡大して産卵地は陸から遠くなった。海流系も変化して、レプトケファルスが漂着する場所が変化してしまう。こうして長距離回遊を強いられたのがニホンウナギだと考えるのです。産卵地を変えればよいと思うのですが、産卵地が2つに分かれてしまうと、そこで生殖分離によって種分化が準備されます。近海に産卵地を移した集団は、種分化して熱帯種となり、元の産卵地に固執した集団はしだいに遠距離回遊となり、

成長の場が温帯に移り、両者は自然と棲み分けたのではないのでしょうか。

ウナギのルーツを求めて

それでは、プレート拡大の年代と種分化の年代は合うのでしょうか。近年、ウナギの全種のミトコンドリアDNAの遺伝子配列の比較から、種間の系統樹がつけられました(図5)。

最初に分かれた最も祖先的な種は東アフリカ・マダガスカル島付近に棲息しています。比較的早い段階に分化したものはボルネオウナギ、大西洋とオセアニアのウナギですが、地理的にかけ離れています。その後、インド洋・太平洋群が多様に分化していて、その最も祖先的な種がニホンウナギです。大規模回遊する温帯種は祖先的である傾向があります。

ウナギが分化したのは、分子時計*6で測ると、いまから2000万年ぐらいです。ただし、これは塩基の置換速度を硬骨魚類の平均値と同じと仮定しているため、種によって置換速度は異なる

ことを考慮すれば、2倍程度の誤差はあります。一方で、ウナギ属の最古の化石は5500万年前に発見されているので、その起源は少なくともそれ以前です。両者の差が大きいということは、分子時計の分化年代が短めに出ていて、実際には2倍ぐらい遡るとすることも十分考えられます。そうするとフィリピン海プレートの拡大の時期とも合致してきます。

条鰭類*7の系統樹をながめてみると、初期に分化した現生の古代魚は基本的に淡水性です。大きな分類群として初めて現れる海水魚がレプトケファルス幼生を持ったカライワシ・ウナギの仲間です。ですから、彼らは淡水から海に進出した可能性が高い。このなかで現生ではウナギ属だけが、成長の場として川に戻ってくることを選択しています。

ウナギの惑星の年代記

レプトケファルス幼生をもつ魚類が登場したのは、分子時計によれば、いまから約2億5000万年前と推定されています。その頃、各大陸がパンゲア大陸という1つの超大陸に集まっていた。このとき、ちょうど古生代と中生代の境界をなす史上最大級の大絶滅があり、90%以上の海の生物種が失われました。この「穴」を埋めるように、淡水魚の一部が海に進出し、その過程で海流に乗りやすいかたちの幼生を大量にばらまくという拡散戦略を開発したのでしょう。

パンゲア大陸はやがて分裂を開始し、その過程でウナギの仲間が多様化しました。レバノン、ヨーロッパ、アメリカなどで化石が見つかっています。そのうちのウナギ属だけが淡水に戻りました。そ

ウナギの分子系統樹

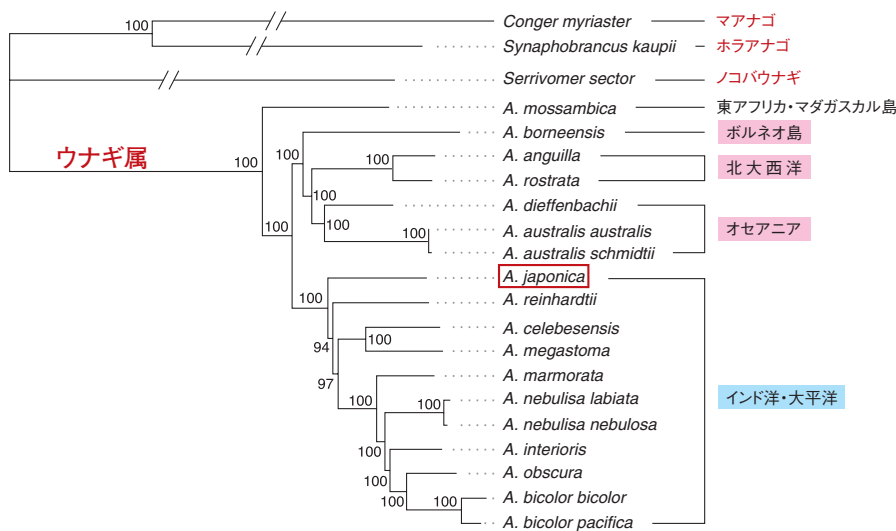


図5 ウナギの分子系統樹
ウナギ(Anguilla属)の亜種も含めた18種がいかに系統分化したかを示す(Y. Minegishi et al. 2005, Molecular Phylogenetics and Evolution, 34, 134-146)。外群として近縁のアナゴとノコバウナギを取った。分岐に付加された数字は信頼度を表すパーセンテージ(ブイズ事後確率値)。分岐線の横方向の長さは塩基の置換数に比例させて描いてある。赤で囲んだ学名がニホンウナギ。最も祖先的な A. mossambica を除くと、祖先的なグループ(ピンク)と派生的なグループ(ライトブルー)に分けられる。



うなぎの謎はさらに続く

れはいまから5500万年前頃で、インドはアジア大陸に接近し、西太平洋では、島弧とか縁海で始めていた頃です。当初、回遊距離は短く、比較的沿岸域で産卵し、生産性の高い川に遡っていたと想像できます。

3000万年前までにアフリカ大陸の北上でインド洋と大西洋の海路が閉ざされ、大西洋の種とインド洋・太平洋の種が分化しました。太平洋種はフィリピン海プレート^{＊6}の拡大によって、大西洋種は大西洋の拡大で遠距離回遊を強いられ、分布を高緯度まで広げたのでしょう。その後、インドネシアなどで多島海^{＊7}がつくられ、産卵地の変更を通じて熱帯ウナギの種分化が進行したのではないのでしょうか。

以上は、多分に空想に満ちた推定ですが、今後、地球科学と生物学の両面から研究が進展することを期待しています。地球のダイナミクスに対する理解はどんどん進んでいますので、もっと積極的に生物の進化学に地球科学をリンクさせて考えることが重要だと思います。プレート運動というのは大陸配置だけではなく、島弧とか縁海、海溝など海底地形も大きく変え、それによって海流系や気候も変わります。そういったことが、陸や淡水ばかりでなく、海の生物の生態や進化を方向づけたのだと思います。皆さんも、今度蒲焼を待つ間、ウナギの惑星の歴史をちょっと空想してみてくださいはいかがですか。

本講演内容は、ウナギとプレート運動に関する以下の論文に基づいて、それらを組み合わせた仮説である。ウナギの分布・生態については、

K. Aida, K. Tsukamoto, and K. Yamauchi (Eds.) 2003, *Eel Biology*, Springerに所収の諸論文を参考にした。

ニホンウナギの産卵地等については、

K. Tukamoto 1992, *Nature* **356**, 789-791, および

K. Tukamoto et al. 2003, *Environment Biology of Fishes* **66**, 221-229 を参考とした。

ウナギおよびその近縁種の分子系統関係については、

Y. Minegishi et al. 2005, *Molecular Phylogenetics and Evolution* **34**, 134-146, および

J.G. Inoue et al. 2004, *Molecular Phylogenetics and Evolution* **32**, 274-286を参照した。

フィリピン海プレートの拡大史については、

E. Honza and K. Fujioka 2004, *Tectonophysics* **384**, 23-53 を参考にした。

*6 分子時計

化石記録との比較によってあらかじめ算出した遺伝子の塩基の平均変異速度に基づき、塩基の変異数から分化年代を計る手法。

*7 条鰭類

すじと膜からなる鰭をもつ硬骨魚類。現生ではハイギョとシラカンズ以外のすべての硬骨魚類が属する。そのうちの古代魚とは、ポリプテリス、チョウザメ、ガーパイク、アミア、アロワナを指す。



Shigeru Kondo

生命理学専攻教授。1959年生まれ。1988年に京都大学大学院医学研究科修了。医学博士。専門は免疫学(だった)。現在は数理的な解析法と分子生物学的な実験を駆使して、二刀流で動物の形態形成の原理を探っている。(本誌第7号P.4参照)

うなぎの生態は謎に包まれている。最近の調査で孵化するのはマリアナ海の辺りの海山であることはわかったが、その先がさっぱりわからない。幼魚期にはレプトケファルスという特殊な幼生形態をとる。その体は柳葉幼生と呼ばれるように、体は透き通った柳の葉のような形態であり、消化器の発達も非常に悪く、採集してみても腸のなかにはほとんど何も入っていない。そもそもこのレプトケファルスはほとんど見つからない。何日間も船でプランクトンネットを引っ張り続けて、やっと数匹取れるかどうかというくらいである。

ところが、毎年秋になると台湾沖あたりに莫大な数のシラスウナギ(レプトケファルスが変態した小うなぎ)が出現する。そんなに莫大な数のレプトケファルスは、いったいどこに隠れているのだろう。これもうなぎの謎である。

さて、皆さんこの謎を解いてみませんか。うなぎの謎は、400年以上も解決していない海洋学上の最大の謎であるとともに、その秘密を手にした人は、間違いなく大富豪になれるという第一級の謎でもあります。シャーロック・ホームズになった気分で考えて見ましょう。

いくつか、手がかりがあります。

まず、マリアナ海から台湾沖まで、なぜか見つからない。どこに隠れているのか。次に、見つかったものも、胃の中に何も入っていない。さらに、レプトケファルスの体形自体がなにか関係している可能性があります。平たい体は、表面積が大きくなりますから、皮膚から栄養をとっているのかも知れません。

これらのことを考え合わせると、幼生は何か寄生しているのではないかという疑惑が湧き起こってきます。そう思ってよく見れば、レプトケファルスの歯は、外にむか^{そしゃく}って生えているのこぎりのような形で、かじりつくのには適していても、咀嚼にはまったく向きません。

もしかすると、この推理は正しいかも知れません。そうするといったい何に寄生しているのでしょうか。私の推理はここには書きませんので、皆さんご自分で考えてみてください。

質量の起源を求めて

原田正康 素粒子宇宙物理学専攻教授



Masayasu Harada

1964年愛知県生まれ。名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了。米国シラキュース大学研究助手、名古屋大学助教授などを経て、2005年より現職。専門はハドロン物理学。主として有効理論を用いてハドロン現象の解明を進めている。

我々の質量はどこから来たのか

私の体重は大体60kgある。この質量の大きさはどこから来るのであろうか。体をつくっているそれぞれの原子の質量を足し合わせれば、ほぼ元の体重に等しくなっている。もっと細かく見ると、原子は原子核のまわりを電子が取り巻いているという構造をしているが、原子の質量は原子核の質量とほぼ同じであり、我々の質量の大部分は原子核を構成している核子（陽子・中性子）で与えられると考えてよいことになる。

現在では、核子はクォーク3個からできていることがわかっている。このクォークを単独で取り出して見たものはいないのでその正確なところはわかっていないが、さまざまな理論的解析からばらばらになったときのクォークの質量はせいぜい $20 \times 10^{-30} \text{kg}^*$ と見積もられている。クォーク3個を集めてもせいぜい $60 \times 10^{-30} \text{kg}$ であって、陽子の質量 $1700 \times 10^{-30} \text{kg}$ に遠く及ばない。我々の質量の95%程度は一体どこから来たのであろうか。

核子の中でクォークを結びつける力

核子の成り立ちをもう一度考えてみよう。核子の中のクォークを結びつけている力はカラー力とよばれ、クォーク間の距離が離れても弱くならないという性質をもっている。

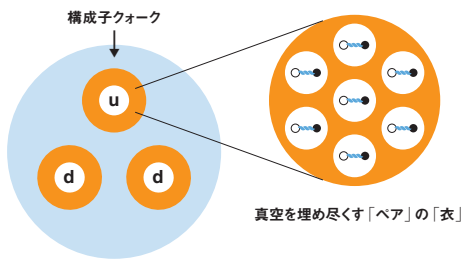


図1 核子(中性子)の構造の模式図

もともとの「裸」のクォークが真空を埋めつくしているクォーク・反クォークペアの「衣」をまとふことにより質量を獲得し「構成子クォーク」となる。その構成子クォークが3個集まり核子をつくる。

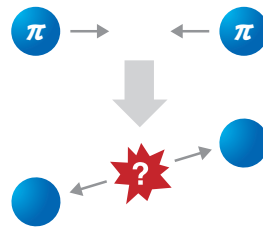


図2 パイ(π)中間子2体散乱の模式図(左図)と

その中間状態として「シグマ中間子」が生成されたことを示す理論的解析(右図)

左図:2個のパイ中間子が衝突し(上側)、さまざまな中間状態(「?」で示された部分)を経た後、2個のパイ中間子が放出される(下側)。右図:左図の「?」の部分でシグマ中間子が生成されたことを示す理論的解析。

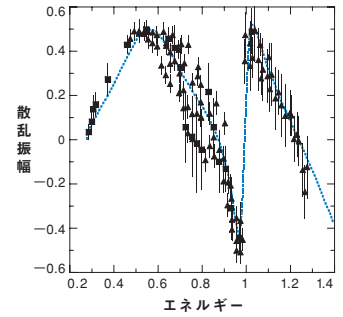
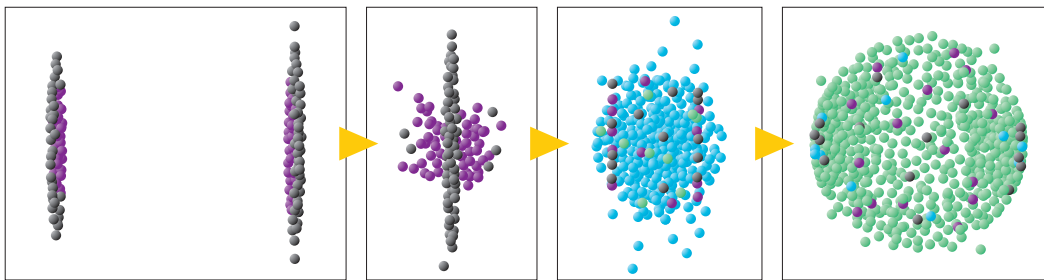


図3 RHCの実験模式図

光速の約99.95%まで加速され相対論効果により扁平となった金イオン同士が衝突し、高温の媒質がつくられる様子を模式的に表す。高温の媒質中で、真空を埋めつくしていた「ペア」が溶解している可能性が高い。

RHCホームページ

<http://www.bnl.gov/rhic/>



カラー力は、クォーク同士だけでなくクォークとその反粒子である反クォーク^{*2}の間にも引力となって働く。このカラー力が非常に強いので、何もないと考えられる真空が、実はカラー力によって「ペア」となったクォークと反クォークによって埋めつくされているのである。クォークがこの「ペア」で埋めつくされた真空中を伝播すると、「ペア」からの「抵抗」を受け、動きが鈍ることになる。この動きにくくなったことは、まさにクォークが質量を獲得したということにほかならない。この質量の大きさは大体 $500 \times 10^{-30} \text{kg}$ 程度と考えられている。この大きさはまさに核子の質量の大体3分の1程度なので、核子の質量を説明しうるものになっている。それでは、どのようにこれを検証すればいいのだろうか。

クォーク・反クォークペアからのシグナル

真空を構成するクォーク・反クォークペアの存在が確認されれば、その質量生成機構の検証となると考えられる。この「ペア」そのものを確認することは非常に困難であるが、この「ペア」が発する何らかのシグナルがあれば、それを調べることによって「ペア」そのものの性質がわかってくると期待できる。

1960年代には、クォークと反クォークからできている「シグナル粒子」に「シグマ中間子」という名前がつけられた。さまざまな実験による探索の結果1980年代には存在しないと考えられたが、1990年代半ばの新たな実験とともに我々の研究等により理論的解析手法が発展したため、シグマ中間子の候補と考えられるものが見つかった。

しかし、研究が進むに連れてさまざまな疑問が生じている。そこで次のような方法で「ペア」のシグナルを見出そうとしている。

クォーク・反クォークペアを切り離す

それは真空を埋めつくしているクォーク・反クォークペアを切り離そうというものである。この「ペア」をつくっているカラー力は非常に強いが、宇宙がビッグバンで始まった直後、大体10万分の1秒後から1万分の1秒後に実現していた超高温状態では、クォークと反クォークは「ペア」をつくっておらず、「裸」のクォークや反クォークが自由に飛びまわっていたと考えられている^{*3}。このような超高温状態をつくり出して、クォーク・反クォークペアに対する何らかのシグナルが得られることが期待される。

現在、アメリカ・ニューヨーク州にあるブルックヘブン国立研究所のRHIC^{*4}では、重金属原子のイオン同士を超高速で衝突させることにより超高温状態をつくり「裸」のクォークを取り出すべく実験が行われている。また、スイス・ジュネーブにあるヨーロッパ共同研究所やドイツにある重イオン研究所(GSI)でも同様の実験が計画されている。最近の我々の理論的解析によれば、クォーク・反クォークペア溶解のシグナルとして、クォークと反クォークからできているロー中間子が「シグナル粒子」となり、その質量が高温になるにつれて徐々に減少するという予言が得られている。近い将来、質量生成機構の解明に新たな光が当てられるであろう。

*1 $20 \times 10^{-30} \text{kg}$
20kgの1000兆分の1のさらに1000兆分の1。

*2 反クォーク
クォークと同じ質量をもつが、電荷などの性質が反対の粒子。電子の反粒子は正の電荷をもつ陽電子である。

*3 自由に飛びまわる
この状態は、カラー力を媒介する粒子であるグルーオンも同時に存在し、「クォーク・グルーオン・プラズマ」とよばれる。時間がたち宇宙が冷えてくるにつれてクォーク・反クォークペアがつくれ、真空を埋めつくしていったと考えられている。

*4 RHIC
Relativistic Heavy Ion Collider(相対論的重イオン衝突器)の略。

眠りから覚めた微分ガロア理論

梅村 浩 多元数理科学専攻教授

ガロア理論が果たした役割

専門の職人はヒヨコの雌雄を瞬時に判定するという。雌雄を区別するのにヒヨコの顔を観察していてもダメである。専門家はヒヨコのお尻のある部分のみで一瞬に正確に判定する。数学においても、カナメとなる部分を見抜くと、それまで立ちはだかっていた難問がきわめてわかりやす

いかたちで解けてしまうことがある。

中学、高校で学ぶように x を未知数とする2次方程式 $ax^2 + bx + c = 0$, ($a \neq 0$) の解は

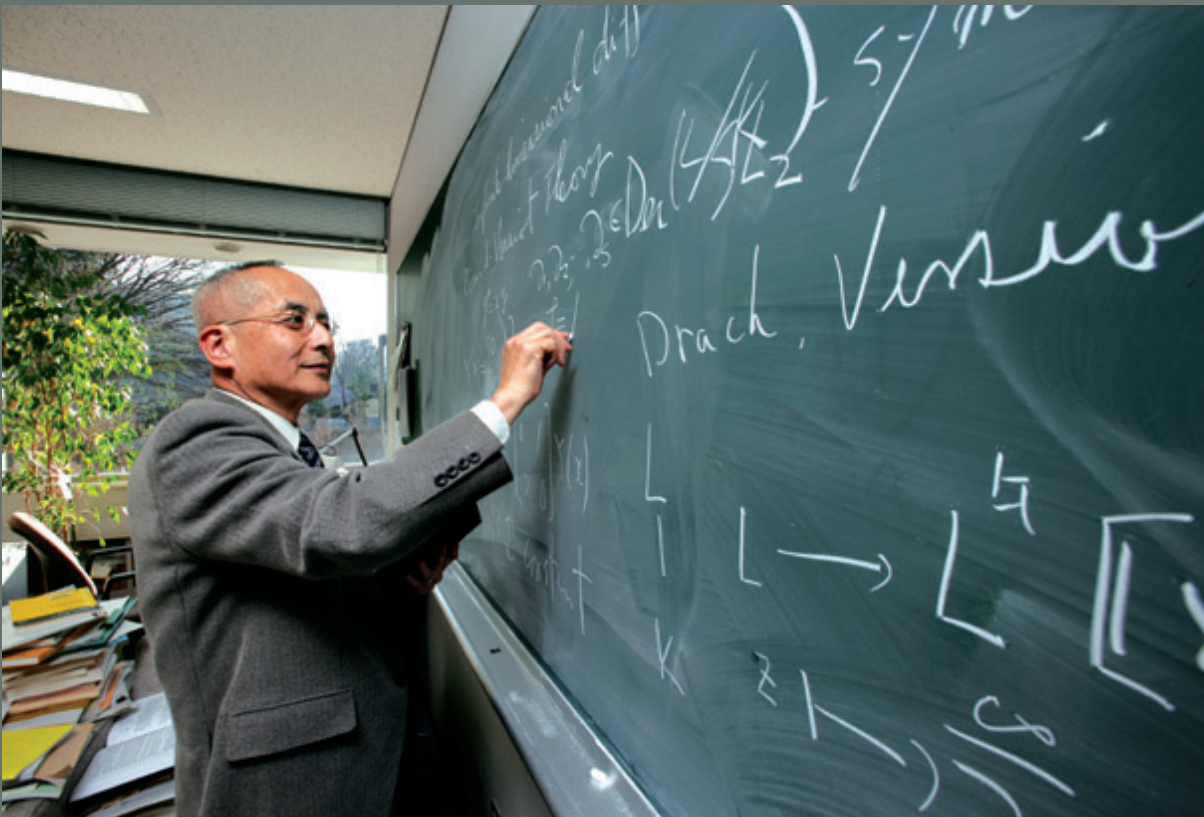
$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (1)$$

で与えられる。この公式は2000年以上前から

知られていた。公式(1)を拡張して、3次以上の代数方程式

$$a_0x^n + a_1x^{n-1} + \dots + a_n = 0, \quad a_0 \neq 0, \quad n \geq 3 \quad (2)$$

の解を表示する公式を求めようとだれしも考えるであろう。16世紀、ルネッサンスのイタリアで3次、



Hiroshi Umemura

1944年名古屋に生まれる。名古屋大学理学部数学科卒業。名古屋大学理学部、三重大学教育学部、熊本大学理学部他を経て多元数理科学研究科設立の1995年より現職。専門は代数幾何学。

19世紀、20世紀の初頭になされた古典のなかに研究のテーマを求め、現代的な手法で明確にとらえるのを研究のスタイルとする。

4次方程式について同様の公式が発見された。5次以上の方程式については研究成果がなかなか得られず、歴史的な難問といわれていた。この難局を打開したのが若くして亡くなった2人の数学者ガロア*1とアーベル*2である。彼らは一般の5次以上の方程式にはこのような解の公式が存在しないことを証明した。より正確に述べると次のようになる。

定理 [ガロア、アーベル] $n \geq 5$ ならば、上の方程式(2)の解を根号 $\sqrt[m]{\quad}$ と加減乗除によって係数 a_0, a_1, \dots, a_n で表示することはできない。

この定理を証明するために彼らはガロア理論を発見した。ガロア理論を次のように説明することができる。

- (1) 代数方程式は隠れた対称性をもっている。この対称性はガロア群*3で記述される。
- (2) ガロア群を観察すれば、公式(1)を一般化する公式がつかれないことが証明できる。

方程式の場合、目のつけどころであるカナメの部分にガロア群がある。ヒヨコのお尻と違って、方程式の対称性であるガロア群は隠れているので、発見するのが難しいのである。ガロア理論は上に述べた歴史的難問の解決に役立っただけではない。19世紀以降の数論、代数幾何学の発展はガロア理論なくして考えられない。たとえば300年を越える眠りから覚めたフェルマの最終定理の証明もそうである。

忘れ去られたアイデア

代数方程式とならんで大切なのが微分方程式である*4。科学の多くの問題が微分方程式で記述できることからその重用性が推察できよう。

代数学方程式においてガロア理論が重要な役割をはたすのを見て、リー*5はガロア理論を微分方程式に対してもつくりたいという着想をもった。微分方程式のガロア理論は微分ガロア理論とよばれている。つまり、リーは微分ガロア理論をつくりたいと考えた。

ところがこれは難しい問題である。その理由は2つあって、1つは理論が本質的に無限次元*6

であることであり、もう1つは微分方程式の隠れた対称性を取り出すのが困難なことである。有限次元の理論さえなかった当時、リーは有限次元の理論からつくり始めなければならなかった。リーのアイデアの実現は20世紀の初めまで盛んに試みられたが、問題が難しいこともあって放棄され、ついには忘れ去られてしまった。

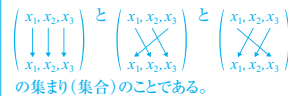
私は1996年に、20世紀初頭に活躍したフランスの数学者ヴェッシオ*7の晩年の1つのアイデアを現代代数幾何学*8と結びつけることにより、新しい無限次元微分ガロア理論を提案した。数年後海外で話題となった。現在はこの分野の研究に注目する数学者が増えてきた。無限次元微分ガロア理論は数十年の眠りから覚めて復活したのである。1980年代からひそかにこの分野の重要性に注目して、研究をしていた私にとって、復活のための一翼を担うことができたのは、うれしいことである。数論においてガロア理論が果たしたような役割のごく一部でもよいから微分ガロア理論が微分方程式論において果たしてほしいものである。

*1 ガロア
E. Galois (1811-32)

*2 アーベル
N. Abel (1802-29)



*3 ガロア群
たとえば、3次方程式
 $f(x) = x^3 + 6x^2 - 8 = 0$ のガロア群とは、その3つの解
 $x_1 = -5.76 \dots, x_2 = -1.31 \dots, x_3 = -1.06 \dots$
のある性質を保った入れ換え



*4 微分方程式

例えば関数 $y = e^x$ は等式

$$y' = y \quad (3)$$

をみたす。逆に等式(3)をみたす関数は $y = ce^x$ である(c は定数)。つまり、微分をふくんだ等式(=方程式)(3)の解は $y = ce^x$ である。等式(3)のように未知関数 y の微分をふくんだ等式を微分方程式という。

*5 リー
S. Lie (1842-99)

*6 無限次元

x, y 平面上の点は x 座標と y 座標で決まるので、平面は2次元である。同様に我々の住んでいる空間は3次元である。4次元以上の高次元の空間を考えることもできる。一般の空間において点を表すのに必要な座標の個数を次元という。無限次元の空間においては点を表すのに無限個の座標がいる。

*7 ヴェッシオ
E. Vessiot (1865-1952)

*8 現代代数幾何学

$y - x^2 = 0$ は放物線を表す。このように、いくつかの多項式 $= 0$ (放物線の場合は1つの多項式 $= 0$) で定義される図形を代数多様体という。代数多様体を研究するのが代数幾何学である。

微分ガロア理論発展の歴史

(1) 代数方程式のガロア理論 (ガロア、アーベル)	19世紀初頭
(2) 微分方程式のガロア理論のアイデア (無限次元、リー)	19世紀半ば
(3) 線形常微分方程式のガロア理論 (有限次元、ピカル)	1895
(4) 常微分方程式のガロア理論 (無限次元、ドラック)	1898
(5) 常微分方程式のガロア理論。ドラック理論(4)の見直し (無限次元、ヴェッシオ)	1900~
(6) 代数幾何学の確立 (グロタンディエ)	1950、60年代
(7) 常微分方程式のガロア理論。(5) + (6) (無限次元、梅村浩)	1996
(8) 葉層のガロア理論。(5) + カルタンの幾何学 (無限次元、マルグランジュ)	2001

注意

梅村の理論(7)とマルグランジュの理論(8)は同値であると考えられる。

その他にも微分ガロア理論が提唱されているが、(7)、(8)に含まれると思われる。

数式と現象を経験する場

【地球惑星物理学実験Ⅱ／2年生後期】—— 城野信一 地球環境科学専攻助手



クレーター形成実験

地球惑星物理学実験Ⅱでは、3つのテーマが用意されており、城野先生が担当されている実験はそのうちの1つである。前半は惑星ができる過程を学ぶため、コンピュータを用いた惑星形成の初期段階の数値実験。後半は、逆に惑星が壊れる過程を学ぶため、惑星の衝突に伴うクレーター形成の理解を深める実験を行っている。今回参加させていただいた実験では2つの実験があり、城野先生ともう一人の先生で、4人から6人のグループを2つに分けて指導されていた。そのため、2、3人の学生に先生が1人という、とても恵まれた環境であった。

全体の説明の時に、先生がグループ全員の学生の名前を覚えていらっしゃることに感心した。質問する時など名前呼びかけていて、学生と先生の距離が近いという印象を受けた。実際、学生に話を聞いてみても、「一番質問がしやすい授業」との声が聞けた。授業の印象は、学生の興味をうまく引き出していると感じた。実験の説明のとき、学生は聞くだけになってしまいがちだが、先生は、ところどころに質問をはさんで、一方的に説明するだけにしない。また、実験中も、こうしてみたらどうなるか、というような問いかけ

をして、学生に考えさせるようにうまく指導されていた。学生からも「話の流れがわかりやすくおもしろい」と好評である。

実験を通して学生に学んでほしいことは、という問いに、「数式を計算しているだけでは、実際に現象とふれ合ったという感じがしない。実験をすることで、現実感が出てきて、それを記述している式や計算について親近感が湧いてくる。その親近感を実際にものにふれることで、もってほしい」と語ってくださった。確かに、数式を追っているだけでは、それに何の意味があるのかわからず、つまらないと感じることが多い。しかし、式とそれが表している現象が実際の経験と結びつくと、全く違った意味のある式に見えてくる。先生曰く、「味わい方が違ってくる」という。

最後に大学とは何をやる場所か、という問いに「大学は、自分が何をやりたいのかを見つける場所。与えられた問題を解くよりも解ける問題を立てることの方が大変だが、大学は、その問題を立てるところである」と語ってくださったのが印象的だった。 (取材・西尾佑子 物理学科4年)



Sin-iti Sirono

1971年生まれ。北海道大学大学院理学研究科修士、2000年より現職。専門は惑星科学、原始惑星系円盤における塵の成長過程に興味をもっている。

熱力学の法則に反する講義

【統計物理学Ⅰ／2年生後期】——— 平島 大 物質理学専攻教授

身近な自然現象はなぜ起こるのか。本講義では、その答えを導くための考え方として、さまざまな熱現象を体系化した熱力学と、それらを微視的な立場から理解するための統計力学の初歩を学ぶ。

熱力学は熱現象に関する経験的な法則であり、どのような対象に対しても一般的に成立する。たとえば、熱いものと冷たいものがふれ合えば、熱は必ず熱いものから冷たいものへ伝わり、その温度差がなくなる。これは対象が固体、気体と別のものであっても変わらない。しかし、熱力学ではその対象のもつ微視的な情報がわかったとしても、その巨視的な性質を計算することはできない。水の化学式が H_2O で示され、分子間に水素結合が働くということがわかっている、水が $0^\circ C$ で氷になるといったことを計算して導くことは熱力学の枠組みではできない。これを計算するための枠組みが統計力学である。このようにいってしまうと、統計力学は熱力学よりもすぐれたものであるかのように聞こえるかもしれないが、そうではない。統計力学で計算されたものは、絶対に熱力学の法則に反するものにはなりえないからだ。もちろん熱力学のほうがすぐれていると

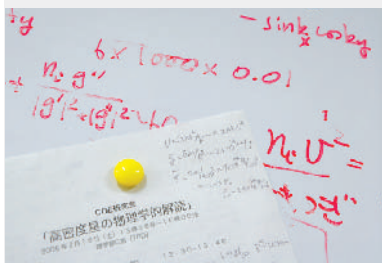
もいえない。

熱力学、統計力学は非常に強力であるため、物理だけではなく、理学全般へ寄与することも多い。化学反応や生命現象の理解に熱力学は必須である。また理論化学においては分子や原子のふるまいを統計力学に基づいて取り扱っている。しかし、生命現象をより深く理解するためには、熱力学や統計力学も、もっともっと進化する必要があるようだ。

この講義を通じて、「物理とはなにか、物理の力でなにを明らかにすることができるのか」を学生に見つけてほしいと、本講義を担当する平島先生は語ってくださった。その熱意は講義中ひしひしと伝わってきた。学生よりも早く講義室に向かい、講義が始まれば難しい数式を大胆にわかりやすく説明する。講義が終わっても質問がある学生のためにしばらく講義室に残り、そして次の講義ではその質問の回答を全体に向けて解説するのだ。

この熱意はどんな方法でも決して冷やされることはないのではないかと。熱力学の講義で、熱力学に反する事例を見つけてしまった。

(取材・櫻井勇希 物質理学専攻博士前期課程1年)



Dai Hirashima

1960年生まれ。1988年理学博士（東京大学大学院理学系研究科）。専攻は物性理論（超伝導や磁性など固体電子基礎論）。

同窓生から

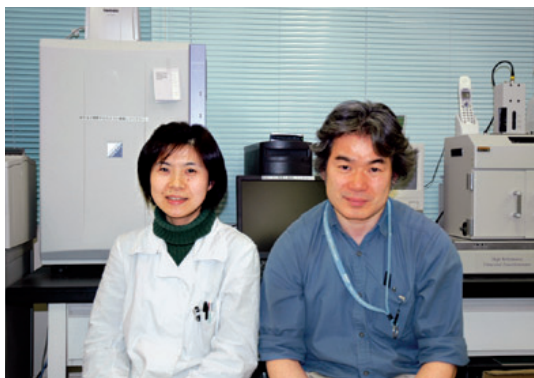
大学の中の町工場

神奈川歯科大学特任講師
野崎直仁 (Naohito Nozaki)

一昨年春、私は大学内に会社を立ち上げた。いわゆる大学発ベンチャーである。理事会は私が代表取締役を兼任することも、大学内で会社を運営することも許可してくれた。幸いにも名古屋大学時代の恩師の岡崎恒子先生や大先輩の清水信義先生に取締役に就任していただくことができた。ワイフを最初の従業員として、大学内家内工業「株式会社モノクローナル抗体研究所」のスタートである。モノクローナル抗体の製造、受託をメインにする会社で、大学や公的研究機関からの依頼を受けている。モノクローナル抗体の品質はつくる者によって大きく左右される。私のモノクローナル抗体づくりの腕前はかなりのものらしい。以前から他ではできなかったモノが私のところに回って来てはほしいと思えていた。我が社は大学の中にありながら、職人の経験とカンがものという昔ながらの町工場といったところであろうか。ヒトには我が社はバイオベンチャーではなくバイオ町工場だと話している。

会社は予想以上に多くの方々から多数のご依頼をいただいているが、その多くは名古屋大学時代からの知人やその紹介者である。名古屋大学を出て十数年が過ぎたが、何かをするにつけ名古屋大学時代の人脈がもたれていることに驚く。良き師、先輩、後輩、友人に巡り会えた、非常にすばらしい環境で十年余りを過ごさせていただいたことを本当に感謝している。名古屋大学理学部および理学研究科での経験と人脈が、今となっては私の何よりの財産であると思っている。

(化学科1985年卒業)



同窓会だより

同窓会の存在意義を考える

物質理学専攻教授
上村大輔 (Daisuke Uemura)

最近どの大学でも同窓会の充実に力を入れている。主な原因は国立大学の独立行政法人化後のことを考え、私立大学での状況を参考にしてのことであり、寄付活動を中心とした、見え透いた理由も含んでいたと思う。

しかし、最近になって状況が変わってきた。それは大学の評価に関係してきたからである。従来の入学試験の競争率やスコアにかわって、出身者のその大学を出たことに対する満足度や卒業生の社会での活躍の状況が、大学を評価する指標となってきたのである。その結果、同窓会は卒業生へのサービスや、大学から受験生およびその親を含んだ社会に発信される情報の窓口としての役割を期待されるようになってきた。加えて、高齢化が進む中、旧友との交流の要という本来の役目にもつながっていく。

現在、名古屋大学の理学関係部局では2002年4月に理学同窓会が設立され、理学系同窓生の名簿作成から始まって、同窓会報の発刊、ホームページの立ち上げ、さらには同窓会サロンの設置(理学部B館2階)と、活動は活発化しつつある。理学部同窓会発足から半年後に全学の同窓会が立ち上がり、名古屋大学全体としての足並みがそろったことは周知の通りである。

同窓会の存在意義については、先に述べた通りであるが、理学関係の諸先輩が世界中の大学で活躍しているとか、その分野の代表としてノーベル賞の候補者になっているとかの情報は、間違いなく後輩を奮い立たせるし、元気の出る話ではなからうか。いずれにしても、同窓生諸氏の積極的な参加があつての同窓会であることはいうまでもない。



書籍紹介

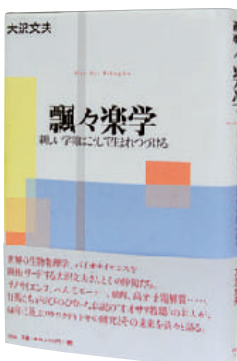
ひょう ひょう らく がく 「飄々楽学」

名古屋大学名誉教授
大沢文夫 (Fumio Osawa) 著

生物学の一分野であり、物理学の一分野でもある、生物物理学。その発展に多大な貢献をなした大沢文夫・名古屋大学名誉教授が綴る、研究生生活を中心とした自伝風読み物である。

ちょっとしたアイデアが研究の急展開につながるエピソードが、ふんだんに盛り込まれている。たとえば、中学校の理科で単細胞生物の代表選手として出てくるゾウリムシ。教科書にある拡大スケッチでは、ほんとうに草履(そうり)のかたちをして、まわりに小さな毛がたくさん生えている。ゾウリムシはこの毛を動かして水中を泳ぎ、自分が快適と思う温度に集まる。その温度とは、自分が育ったときの温度。たとえば25℃で育ったゾウリムシは、容器の中の25℃のところを集まる。ところが、これを30℃で3時間ほど培養すると、こんどは30℃に集まるようになる。大沢教授は、記憶物質ができていと考え、それを追求する実験を学生とともにすすめた。まず、30℃で育ったゾウリムシをすりつぶして、25℃で育ったゾウリムシの水に加えた。すると20分後には30℃に集まるようになった。これから、記憶物質ではなく記憶促進物質ができていると推測した。続いて、ゾウリムシをすりつぶさず、フィルターで濾過して取り除き、その液を与えてみた。すると同じ結果が出て、記憶促進物質は細胞外に分泌されていることがわかった。

こんなふう「アイデア→実証→次のアイデア→」のサイクルが続いて研究がいきいきと、そして飄々と進展するようすが、読みやすい話し口調で描かれている。大沢教授の系譜から輩出した膨大な人材についても、記述が詳しい。(こ)



「飄々楽学」
大沢文夫著／白日社／
2005年7月発行／2,400円

キャンパス通信

35年ぶりに大学に戻って

地球環境科学専攻博士後期課程1年
開出尚文 (Naofumi Kaide)

私は昭和43年、本学博士課程を1年で中退し、以来33年間建設コンサルタントに従事した。「学校で勉強したことは、社会へ出て何の役にも立たなかった」とよくいわれるが、私の場合は、地史学講座に在籍し、野外調査を行っていて、その地表踏査の知識が大変役に立った。

しかし、私は当時「飯も食えずに何の研究か」という考えにとらわれ、研究生生活を放棄したことが悔やまれた。少なくとも、自分は地質学が好きであったのだと、思い知らされた。そこで停年退職して35年ぶりに大学に戻り、もう一度研究生生活に打ち込みたいと考え、大学院を受験して合格させていただいた。

いざ、入ってみて驚いたことは、ノートをとらなくてはならない授業がほとんどないこと、英語を理解できないと講義内容を理解できないことが多いという点だった。また、地質学そのものも、特に岩石学では、同位体化学が基本とあって良く、それに加えて進歩した分析化学の応用もルーチンワークとして、取り入れられていて、少なくともこの技術を身につけることが、研究活動の第一歩であるといえる点だ。

また、大学院生の方が学部生より多いことや、他大学からの進学者や留学生の多さにも驚かされた。

このような新しい雰囲気の中で、私は今自分の子どもたちより若い人に混じって何とか、好きな地質学の中で、自分の目指すものに少しでも近づければと思い、日々努力、努力の毎日である。しかし、いずれにせよ、かつて私が在学していたころとは違い、何かにつけて、お金がかかることもよくわかった。苦しみもいろいろである。



研究会・学会スケジュール

第209回アメリカ電気化学会

「フラーレン・カーボンナノチューブに関するシンポジウム」

開催日：2006年5月7日(日)～12日(金)
 開催場所：デンバー(アメリカ)
 主催：アメリカ電気化学会
 問い合わせ：篠原久典 名古屋大学大学院理学研究科 教授
 noris@cc.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2482

第11回名古屋大学理学懇話会

「宇宙開闢から現在へ：z=0-1-1000…」

開催日：2006年5月20日(土)
 開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館カンファレンスホール
 主催・問い合わせ：名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会
 kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2394 (理学部庶務掛)
 http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/

第12回レチナルタンパク質国際会議

サテライトミーティング「ロドプシンの構造・機能と進化」

開催日：2006年6月12日(月)
 開催場所：名古屋大学野依記念物質科学研究館
 主催：名古屋大学大学院理学研究科(物質理学専攻)
 問い合わせ：神山 勉 名古屋大学大学院理学研究科 教授
 kouyama@bio.phys.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-5108

第6回名古屋国際数学コンファレンス

Representation Theory of Algebraic Groups and Quantum Groups 06

開催日：2006年6月12日(月)～17日(土)
 開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館カンファレンスホール
 主催：名古屋大学大学院多元数理科学研究科
 第6回名古屋国際数学コンファレンス組織委員会
 問い合わせ：庄司俊明 名古屋大学大学院多元数理科学研究科 教授
 shoji@math.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-5605
 http://www.math.nagoya-u.ac.jp/shoji/raq2/conf.html

第25回天然物化学国際会議・第5回生物多様性国際会議

ICOB-5 & ISCNP-25 IUPAC
 International Conference on Biodiversity and Natural Products

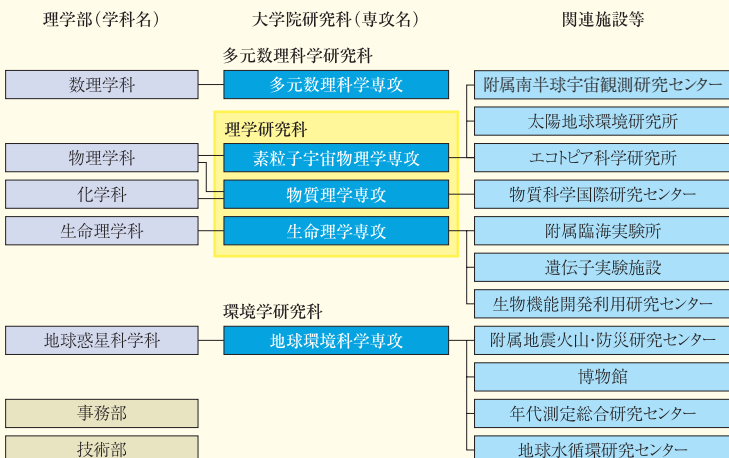
開催日：2006年7月23日(日)～28日(金)
 開催場所：国立京都国際会館(京都府)
 主催：日本学術会議、日本化学会、日本薬学会、日本農芸化学会
 問い合わせ：上村大輔 名古屋大学大学院理学研究科 教授
 uemura@chem3.chem.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-3654
 http://www.tennenyuuki.ne.jp/iupac/

第8回国際植物分子生物学会

開催日：2006年8月20日(日)～25日(金)
 開催場所：アデレード(オーストラリア)
 主催：国際植物分子生物学会
 問い合わせ：町田泰則 名古屋大学大学院理学研究科 教授
 yas@bio.nagoya-u.ac.jp / TEL:052-789-2502
 http://www.sallyjayconferences.com.au/ispm2006/

組織図

理学部・理学研究科・多元数理科学研究科・環境学研究科(地球環境科学専攻)



編集だより

「時を語るもの」で紹介した小野勝次先生は、科学的見地に基づくスポーツ技術指導も行い、当時の陸上競技の技術向上に大きく貢献したようである。現にハンマー投げ指導者として著名な釜本文男氏は小野先生の理論に基づいた指導を行い日本新記録を次々に生み出していった。小野先生の多才さに驚くばかりである。掲載はできなかったが、リレー式統計計算機の写真をお送りいただいた(株)富士通、円盤のサインに関する情報をいただいた「月刊陸上球技」編集長の広瀬豊氏、ならびにご協力いただいたご家族の方々に感謝いたします。(栗田)

地球上には、イノシシ、シカ、ウナギ…と実に多くの生き物が生息している。特集では、これらの生き物が、地球の長い歴史を通してみると、それぞれ地球の地殻変動・環境変動に大きく左右されて生息し、移動していることを語っていただいた。遺伝子情報を読み取り整理し、化石との対比を通して、まるで見てきたかのごとく動物の移動を説明できるとは、ダーウィンもビックリだろうなあ?と思いつつ話を聞かせていただいた。一方、タイムリーにも、レプトケファルスがマリアナ西方で多数採集されたことが科学誌ネイチャーに掲載された。しかし、懇話会を聞きながら、「うなぎはやっぱ食べるもの」なんて不純なことを考えていたのは私だけだろうか。おいしいうなぎをこれからも食べられるように、地球環境にやさしい生活を我々は模索して行かなければいけないですね。(山本)

人間の重さはどこからくるのか、そこから真空中のクォーク・反クォークペアへ展開するあたりはなんとも小気味いい読後感である。受け取り手を意識して「伝える」ことは大切であり、日々そこに一番悩まされる。本誌編集に携わるにつれて、伝えることの大切さ、言葉を選ぶことの大切さ、説明することの責任が身にしみていくのがわかる。これは私の大きな糧である。(小林)

表紙説明

地殻や気候など変化し続ける地球の歴史に、生き物の歴史を重ねてみると、そこには見たことのない風景が広がっていた。表紙のニホンイノシシとウナギの図版は、シーボルトが日本で収集した標本をもとに、オランダ帰国後に刊行した「FAUNA JAPONICA」(日本動物誌)より、福岡県立図書館所蔵。



理 philosophia

No.10 April 2006
 2006年4月15日発行

- 広報委員 近藤孝男(研究科長)
 関 一彦(副研究科長)
 佐藤正俊(評議員)
 栗田英資(数理学科)
 福井康雄(物理学科)※委員長
 菊川芳夫(物理学科)
 小林義明(物理学科)
 西川周一(化学科)
 森 郁恵(生命理学科)
 古賀章彦(生命理学科)
 山本鋼志(地球惑星学科)
 森本正廣(事務長)

編集発行 名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会
 〒464-8602 名古屋市中千種区不老町
 ご意見、ご感想をお待ちしています。
 本誌の原稿執筆や取材などにご協力いただける方を求めています。
 広報委員会までご連絡ください。
 なお、ご投稿などの採否については当委員会にお任せください。
 次号は2006年10月頃発行の予定です。

制作 株式会社電通

・本誌記事、写真等の無断複写、転載を禁じます。
 ・本誌は再生紙および大豆油インクを使用しています。
 (大豆油インクとは、石油系溶剤にかわり大豆油を使用したもの。揮発性有機化合物が大気中へ排出されるのを減少させ、また廃棄物の生分解がはやく、再生紙化も容易で環境にやさしいインクです)

