

# 連載 理学のキーワード 第10回



## 「サンゴ礁」

茅根 創 (地球惑星科学専攻 准教授)

サンゴ礁を作るサンゴは、宝石珊瑚とは異なるグループの動物で、石灰質骨格をつくり、体内に藻類を共生させるという特徴をもつ。石灰質骨格は積み重なって、サンゴ礁という地形を作る。共生藻の光合成産物は、サンゴを経由してサンゴ礁の生物たちにもたらされ、生物たちはサンゴ礁の複雑な地形を住処としている。その結果、サンゴ礁は海でもっとも生物種の多様性が高い生態系をつくっている。

現在、世界のサンゴ礁の3分の1は破壊され、3分の1は破壊の危機にある。破壊の原因は、おもに海岸開発などローカルな環境ストレスであるとされていた。しかし1998年に世界中のサンゴ礁で白化が起こり、地球温暖化もサンゴ礁の破壊の原因であることが明らかになった。

白化とは、ストレスを受けたサンゴが共生藻を体外に放出し、サンゴの体を通して石灰質骨格の白い色が透けてみえてしまう現象である。白化したサンゴは、やがて死んでしまう。1998年の白化は、高水温によって光合成回路が損傷した共生藻を、サンゴが体外に放出したことによって起こった。これまでに例のない規模の白化が起こった原因は、地球温暖化によって水温が底上げされたためである。

サンゴ礁はこのほかにも、海面上昇による水没、二酸化炭素濃度上昇・海洋酸性化による石灰化抑制など、地球温暖化のシナリオのそれぞれと関わっている。私たちの研究室では、石垣島やパラオ諸島などのフィールドをベースに、サンゴ礁と地球環境変動に関する研究を進めている。

水中で見るサンゴ礁は、本当に美しい。しかし、それが翌年にはすっかり死滅してしまっていることもある。石垣島では今年も大規模な白化が起こった。研究が、美しいサンゴ礁を将来の世代に残すことにもつながることを願っている。



白化したユビエダハマサンゴ(2007年8月、石垣島白保)



## 「花の進化」

平野 博之 (生物科学専攻 教授)

花は私たちの生活に潤いをもたらせてくれるものであるが、植物にとっては子孫を残すための生殖器官である。「花」というと花びらを連想する方も多いと思うが、一般的な植物では、ガク片、花弁(花びら)、雄しべ、雌しべからなる構造を指す。雄しべや雌しべの中で減数分裂が起き、配偶子が形成される。動物の精子と卵に対応するのは、花粉に形成される精核と胚珠内の胚のうに形成される卵細胞である。シダやコケ植物なども、次代に遺伝情報を伝えるために配偶子を形成する。しかし、花という生殖

器官を発達させたのは、裸子植物と被子植物に限られている。これらの植物では、配偶子同士が効率よく安全に出会い、確実に受精を行うために、花という特別な構造を進化させた。裸子植物では花弁がない地味な花であったが、被子植物の花は、花粉を媒介する昆虫とともに、まさに華々しく多様に進化してきている。

ところで、花は進化の過程で、新たに突然現れた器官ではない。実は、花の各器官は葉が変形したものである。専門外の方が意外に思うかもしれないこの考え方を最初に提唱したのは、「意外にも」、詩人であり文学者でもあるゲーテである。自然科学にも造詣の深かったゲーテは、1790年「植物変態論」という書を著し、この考えを展開している。その後、植物学として花の形態進化の研究が進んできたが、その根底にはゲーテの思想が流れている。

1990年代に入り、植物の分野でも、遺伝子の働きから形づくりを解明する分

子発生遺伝学が発展してきた。その中で、花の発生を説明するモデル(ABCモデル)が遺伝学的に提案され、引き続く分子生物学的研究により確証されてきた。このモデルは、A,B,Cの3つのクラスに分類される遺伝子の組み合わせにより、ガク片、花弁、雄しべ、雌しべ(正確には心皮)が決定されるというものであり、簡潔で美しいモデルとして、植物発生学の中でも際だっている。さて、このABCの3つの遺伝子を同時に機能喪失させると、すべての花器官がほぼ葉のような器官に変化した。これら3種の遺伝子がなければ、花は葉へと先祖返りしてしまうのである。ゲーテからほぼ200年後、彼の提唱した考え方が、現代生物科学の言葉によって証明されたことになる。

本研究科では、生物科学専攻の邑田研究室(植物園)や筆者の研究室などで、形態や遺伝子機能など多様な観点から、花の進化の研究が行われている。



私たちが研究対象としているイネの花。りんび(矢尻)は、花弁が変形した器官。



## 「人名反応」

山野井 慶徳（化学専攻 助教）

ここ数年「ネーミングライツ」がビジネスとして流行しており、ヤフードーム、スカイマークスタジアム、C.C.Lemon ホールなど既存の球場や施設が次々に企業名などを冠した名称に名を変えている。科学の世界でも新しい元素・生物・天体などに対して発見者が命名する権利を得る習慣があり、この場合は人名にちなんだ命名をすることが多い。

ここで説明する人名反応とは、「グリニヤール反応」「ウィテヒ反応」などのように発見者の名前がつけられた有機合成反応を指し、広義には「アルドール反応」などのように反応物あるいは生成物を示唆する化合物群の名称を使って呼び表される古くから知られている反応も

含める。名前がつけられているほどの反応であるから合成反応として重要なものが多く、合成に携わる者はしっかりと学習しておくことが必要とされている。

現在では、化学系の大学院生が使用する教科書に 100～200 程度の反応が代表的なものとして紹介されている。有機化合物の数は 2000 万以上あると言われており、これらの合成法もまた無数に存在する。したがって新しい合成反応は最先端の国際誌に数多く報告されているが、これらが新しく人名反応として取り上げられるかどうかのポイントとして、①反応の信頼性の高さ、②応用性の広さ、③多くの合成化学者に利用されるなどが挙げられる。このような反応はそれまでになかった革新的な概念を

創出しており、合成法ばかりでなく反応メカニズムや遷移状態の構造という観点から多くの研究者に注目される。そして最初に報告した人に対する敬意を表し、次第に人名反応として定着していく。その中には「鈴木-宮浦反応」「光延反応」など多くの日本人の名前が見受けられ、この分野における日本人の貢献度の高さが窺われる。

理学系研究科化学専攻の無機化学研究室では、特殊な遷移金属触媒を設計・開発し、さまざまな分子変換反応の開発研究を行っている。そのなかには従来の手法ではほとんど生成しないとされてきた化合物が高収率で合成できるなど有用な反応も見い出されており、新しい機能材料や医薬品合成への利用を試みている。



## 「4次元を超える世界」

向山 信治（附属ビッグバン宇宙国際研究センター 助教）

私たちの宇宙は、縦・横・高さを表す 3次元空間に時間を合わせた、4次元世界であるとされる。しかし、これは不可侵な原理ではない。単に、私たちの感覚やさまざまな観測・実験のおよぶ範囲では、4次元と仮定してもまったく矛盾がないといっているに過ぎない。アインシュタインの相対性理論は時間と空間の概念を 4次元時空として融合するが、“どうして私たちは 4次元世界に住んでいるのか？”という疑問には答えてくれない。相対性理論は、4次元でも 5次元でも、あるいはそれ以上の次元でも、理論としてはまったく問題なく機能するからだ。しかし、だからといって 4次元を超える世界、すなわち空間と時間の次元が合わせて 5以上の世界に私たちが住むことは可能なのだろうか？

そもそも、5番目や6番目、あるいはさらなる次元があったとしたら、それはどこにあるのか？驚くかもしれないが、答えは“どこにでも存在する”である。これを、簡単な例を使って説明しよう。

電線の表面は 2次元である。つまり、長さの方向と、断面の周の方向がある。十分近くから見ればそれがわかるのだが、遠くから眺めたらどうだろう。周の方向は認識できなくなり、長さの方向だけが残って 1次元の線として見えるはずだ。これと同じことが、私たちの世界にも起こっているかもしれない。つまり、5番目以降の次元があっても、小さく巻き上げられていけば低エネルギーでは感知できないのである。この場合、電線の断面の周の方向が表面上のどこにでも存在するように、5番目以降の次元も、私たちの世界のどこにでも存在することになる。どこにでもあるのに小さくて見えない余分な次元、これは 80年以上も前にカルツァ (T.Kaluza) とクライン (O.Klein) によって考案され、そして現在では超弦理論 (理学部ニュース 2007年7月号 P.13「理学のキーワード」記事参照) に継承されている。

7月下旬のリサ・ランドール博士 (Lisa Randall) による講演 (理学部ニュース

2007年9月号 P.3「トピックス」記事参照) で知った読者も少なくないと思われるが、最近では、上述の考えのほかにブレンワールドとよばれる考えが活発に研究されている。まるで窓ガラスについた水滴やホワイトボードについたマグネットのように、私たちがブレンとよばれる膜のようなものにはりついて離れられないとする考えである。ブレンの外が 4次元を超える世界であっても、ブレンが空間的に 3つの方向にしか広がっていないのなら、ブレン上にはりついた私たちには 4次元世界しか分からない。もしもこの考えが本当なら、近い将来、巨大加速器実験によって 4次元を超える世界が検証される可能性があるといわれており、理論と実験の両方の進展が気になる分野である。

4次元を超える高次元理論の研究や、それにもとづく宇宙論の研究は、物理学専攻の宇宙理論研究室・素粒子論研究室、ビッグバン宇宙国際研究センターなどで活発に行われている。

## 「ペタコンピューティング」

平木 敬 (情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻 教授)

コンピュータは、その最初期の段階から理学研究と深く関係して開発が行われてきた。1960年代に開発された最初のスーパーコンピュータは、1 Mflopsの演算速度をもち、以後今日まで、指数関数的な性能向上を実現してきた(図1)。現在、最速のスーパーコンピュータは長年の夢である1ペタフロップス(1秒間に1000兆回の計算)に達しつつあり、数年後に10ペタフロップス(1秒間に1京回の計算)を実現するプロジェクトが、日本や米国で実施中である。したがって、計算速度は過去45年で10億倍に高速化している。

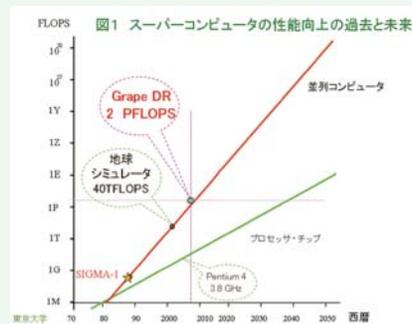
それでは、ペタフロップスを実現することの理学研究への意義は何であろうか? 計算が高速になることで、従来から用いられてきたさまざまなシミュレーションの対象規模が拡大し、精度は向上する。問題の種類にもよるが、計算速度が1000倍速くなることにより、5倍から10倍の規模の問題がシミュレーション可能となる。しかしながら、ペタフロップスレベルの性能の実現は、理学研究により多くのインパクトをもたらす。ゲノム情報に代表

される生物情報の処理、科学文献情報の抽出など離散的問題、離散系と連続系が複合している問題は、問題サイズの拡大に対して、さらに高次の計算力を要求し、ペタフロップスレベル(実際にはペタ命令/秒)の性能で初めて現実的な問題に取り組むことができると言って過言ではない。

また、ペタフロップスを1システムで実現する技術は、さまざまな副次的効果があり、多くの貧乏な理学研究者にも大きな福音となる。すなわち、実現可能な規模、消費電力、コストでペタフロップスレベルのシステムができることは、個人や研究室で持てる情報システムが著しく拡大することを意味する。2011年には10ペタフロップスのスーパーコンピュータが200億円、10MWでできる予定であるが、換算すると、1 Tflopsが200万円、1000Wである。問題の性質が計算量的に高次であるならば、このようなシステムで、かなりの研究目的を達成することが可能である。

私たちは、国立天文台の牧野淳一郎氏(プロジェクト発足時は理学系研究科天文学

専攻所属)、情報理工学系研究科の稲葉真理氏らとともに、極超高速・低消費電力・低コストのスーパーコンピュータ、GRAPE-DRシステムを構築中である。GRAPE-DRは、512個の要素プロセッサを1個のチップに集積した512ギガフロップス(1秒間に5120億回演算)のチップを開発し、全体で1ペタフロップスを超えるシステムの構築を目指している。GRAPE-DRチップを汎用のサーバとともに用いることにより、1 Tflopsあたり100万円、1000Wのシステムが実現すると予測している。これらのシステムを使って、新しい科学をつくりだすことが、今後の課題である。



スーパーコンピュータの性能向上の過去と未来

## 「ベクトル束」

古田 幹雄 (数理科学研究科 教授)

線形代数とは、非線形な諸現象をまず一次近似したとき、その近似の振る舞いを解析するツールである。しかし、私たちが本当に知りたいのは、非線形の諸現象である。その非摂動的な、トポロジカルな、大域的な性質を調べる数学的ツールとして「ベクトル束」がある。

ベクトル束とは、線形性と非線形性の狭間に位置する幾何学的対象である。大域的な振れを担えるほどの非線形性を持ち、しかも線形性に由来して、具体的な計算から把握可能な扱いやすさをもつ。定義はやさしい。ベクトル束の例として「接束」と「法束」は基本的である。曲面上に描かれた曲線を考えよう。曲線の各点には「接線」と「法線」とが付随しており、各々一次元のベクトル空間である。

曲線上の点を動かすと、それらは連続的に動く。しかしその動き方は、もはや線形ではない。接線を束ねて、全体をひとつのものと見るとき、これを「接束」とよぶ。同様に法線を束ねたものが「法束」である。一般に、ベクトル空間を束ねた全体が、ベクトル束に他ならない。クラインの壺の中に曲線を描く。ある描き方をすると、曲線の法束は「メビウスの帯」の形状になる。メビウスの帯の振れは、クラインの壺の中に描かれた曲線の振れを反映している。曲線の振れ方を直接とらえるのは難しいが、まず、法束という線形代数を使える対象の振れ方を考えるのである。

ベクトル束に対して積分と似た操作が定義され「指数」とよばれる。積分が関数から数を得る操作であるのに対して、

ここで使われるのはベクトル束からベクトル空間を得る操作である。そのベクトル空間は「ベクトル束に付随した線形偏微分方程式の解空間」を用いて定義される。たとえば素粒子物理において、右手系と左手系の非対称性が知られているが、これはある種のベクトル束の指数の非自明性と関連する。筆者は、無限次元の空間の上で、ベクトル束の指数を考察すると、普通の積分だけでは届かない深い情報が得られる例を見出した。とくに、思いがけないことに、ある種の4次元空間が、数学的に存在しえないことがわかった。その空間上でディラック方程式を考察すると、解の次元が大きすぎて、別の知見と矛盾するのである。最近では、この方法の射程がいかほどであるかを探っている。