

## 連載シリーズ「実験生物ものがたり」

武田 洋幸 (生物科学専攻)

生物の持つ多様性と共通性には、「生命とは何か？」を知る手がかりが秘められています。生物科学専攻では、よく知られているモデル生物の他に非常にユニークな生き物を用いて、分子から生態系までの視点から生命の謎解きに挑んでいます。今回の連載は、私たちが研究の対象としているユニークな生き物を紹介します。

## 実験生物ものがたり 1

## カワゴロモ

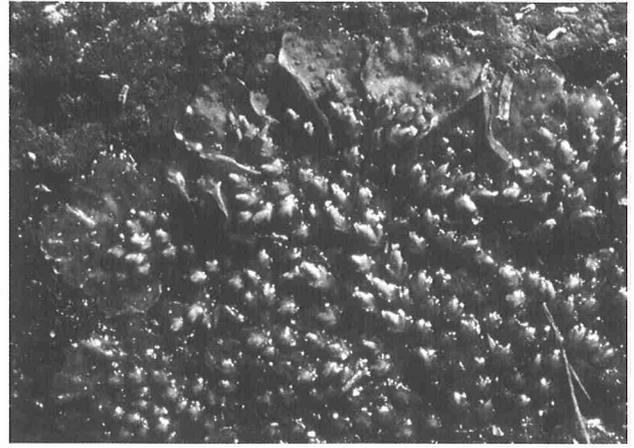
加藤 雅啓 (生物科学専攻)

E-mail:sorang@biol.s.u-tokyo.ac.jp

世界の熱帯・亜熱帯に分布するカワゴケソウ (川苔草) 科の植物は川の中の岩上に生える変わった水生植物で、特に滝や早瀬を好む。水位が高い雨期は流水中で生育するが、乾期で水位が下がると岩ごと空中に露出して花を咲かせ実を結ぶ。そのかわり、植物自身は枯死してしまう。日本にも8種が分布し、カワゴロモはその1つである。この植物は「川衣」の名が示す通り石の表面を覆う衣のようで、苔 (ゼニゴケ) とか藻 (アオサ) に良く似た、不定形、扁平で葉緑体をもつ。しかし、カワゴロモは花を咲かせるのでサクラと同じ被子 (顕花) 植物である。この緑色の衣は根が変形したものと理解されているので、根の上に花ができる。さらに、退化した葉はあるが、茎に相当する軸状の器官はない。葉も根の内部からつくられる。被子植物は根・茎・葉・花で形作られ、葉と花は茎の上に見えるというありふれた姿と比べると、カワゴロモの体つきはかけ離れている。他のカワゴケソウ科もこれほどではないにしても、奇妙な形態をしている。

なぜカワゴケソウ科が進化したのか？カワゴケソウ科が住む環境は独特で普通の植物が住める環境ではない。カワゴケソウ科は器官の配置を変えるばかりでなくそれぞれの器官を特殊化することによって、特異な環境に適応できたと思われる。分子系統解析から、カワゴケソウ科は普通の陸上植物であるオトギリソウ科から進化したと考えられている。

どのようにして独特の形がつくられるのか？実生の発生を観察すると、成植物のからだの出発点である幼芽と幼根は形成されず、胚軸から生じた不定根からカワゴロモのからだがつくられ、やがてその上に葉や花がつくられる。



葉状の根の上に花が多数できたカワゴロモの1種

## 実験生物ものがたり 2

## ミツバチ

久保 健雄 (生物科学専攻)

E-mail:stkubo@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

今回は、私たちの実験材料に用いております、セイヨウミツバチ (*Apis mellifera* L.) について紹介させていただきます。分類上の位置付けは、動物界ー節足動物門ー昆虫綱ーハチ目ミツバチ科ーミツバチ *Apis* 属 *mellifera* 種で、コロニーを作って生活する社会性昆虫です。ヨーロッパ原産ですが、養蜂のため世界中に、日本には明治初期に導入されて野生化し、最も普通に見られるミツバチです (写真は、防護服を着て巣箱を観察する大学院生と、巣箱に止まった働き蜂)。日本を含めたアジアには、この他に近縁のトウヨウミツバチ (*Apis cerana*) が棲息します。1つのコロニーは、1匹の女王蜂と数千から数万の働き蜂からなり、春から秋にかけて数百から数千の雄蜂が現れます。

注目される生物学的特徴は、次の通りです。(1) 雌の成虫が、幼虫時の生育環境によって、女王蜂と働き蜂にカースト分化し、働き蜂は自らの子孫を残さず、女王蜂が生んだ子供 (妹) の世話をします。こうした働き蜂の行動は、利他行動と呼ばれます。(2) 働き蜂は羽化後の日齢とともに、巢の掃除から育児 (頭部分泌腺から分泌されるローヤルゼリーを幼虫に与える)、門番 (巢の入口に陣取り、天敵からコロニーを防衛する)、採餌 (花蜜や花粉を集め、花蜜をハチミツに加工する) へと分業します。(3) 餌を全て花に頼り、C源を花蜜、N源を花粉に求める偏栄養の昆虫です。(4) 雌の産卵管が変形して針になっており、敵に針を刺して毒液を送り込むという、激しい攻撃行動を示します。刺されると痛いだけでなく、しばしばアナフィラキシーを起こして危険なので、嚴重な注意が必要です。(5) 花蜜を集めて帰巢した働き蜂は、フリッシュの研究で有名な8字ダンスにより、仲間花の位置を教えます。(6) ハチ目は昆虫の中でも特に、

視覚情報処理能力が発達していると考えられています。

このようにカースト分化や齢差分業、利他行動、攻撃性、記号的言語、視覚情報処理など、他のモデル生物には見られない多彩な生命現象が魅力です。私たちは、こうしたミツバチの高次行動を司る遺伝子の候補として、脳の高次中枢で領野選択的に発現する遺伝子や、行動にもなって脳で発現が変化する遺伝子の解析を進めています。来年中にはゲノム計画が完了する予定であり、ミツバチが次世代のモデル生物になる日も、そう遠くないかも知れません。



### 連載シリーズについて

理学系研究科で行われている研究は多岐にわたり細分化されており、全体像を捉えることが難しいのが現状です。研究ニュースは、このような壁を少しでも取り払い、同じ研究科に所属する研究者が行っている研究が見えるように企画されています。

今回からはさらに研究ニュースの一環として連載記事も開始します。連載の最初は、生物科学専攻の「実験生物ものがたり」です。

## 作用素環論と量子化された 関数解析

小沢 登高 (数理科学研究科)

E-mail:narutaka@ms.u-tokyo.ac.jp

私の専門とする作用素環論は量子力学に関連して発見された分野です。量子力学の発展とともにミクロの世界では、ニュートン力学およびそこから来る直感は当てにならないこと、エネルギーやモーメントといった物理量を表すのに通常の空間とその上の関数を使う替わりに行列（もっと一般的にはヒルベルト空間上の作用素）を使わなければならないことが明らかにされてきました。また数学においては、各種の空間の構造を研究するにあたって、その空間そのものよりも空間上で定義された関数全体からなる代数的対象（環）の構造を調べる方がむしろ重要であるということがしばしば起こります。そこで量子的空間という直感の利かないものを数学的に研究するのに必要な道具が作用素からなる環、すなわち作用素環となるわけです。数学界では広く、数や関数の替わりに行列や作用素を使うことをディラックにならって「量子化」と呼んで来ましたが、なんにでも「量子」と付けることがかっこいいとされる風潮のせいで一見無関係なものにも「量子」と付いています。

私がこれまで特に興味を持って研究してきたのは量子化された関数解析の作用素環論への応用です。関数解析は無次元の解析学の基礎であり、その量子化は八十年代後半に始まりここ十年の間に活発に研究されてきました。この分野はもともとの関数解析同様いろいろな「量子」解析学の基礎となることが期待されています。無限という人間の手に負えないものを本質的に使う解析学一般にありがちなことなのですが、この分野ではしばしばもっともらしい予想が間違っていたり直感に合わない現象が見つかったりします。（まるで量子力学みたいですね。）私はこうした奇妙なものたちと付き合うのが好きなこともあり、定理の証明だけでなく予想の反例や未知の現象探しもバランス良くやっています。

近年になって作用素環論（と量子化された関数解析）の量子場の理論、量子情報理論、量子確率論、量子群論などとの関わりも明らかにされつつあり、その応用範囲も広がってきています。私もこの分野同様今後さらに応用・研究範囲を広げて作用素環論のみならずより多くの分野で活躍していこうと考えています。

# 「DNA 1分子の凝縮転移を制御する」

佐野雅己・村山能宏 (物理学専攻)

E-mail:sano@phys.s.u-tokyo.ac.jp

murayama@phys.s.u-tokyo.ac.jp

生命の基本分子である DNA は、細くて長い分子である。直径はわずか 2 nm に過ぎないが、人の細胞一つ一つには長さ約 1 m もの DNA が含まれており、ウイルスの場合でも約 100 nm の筒の中に 10  $\mu$ m 以上の長さの DNA が閉じ込められている。1 分子でこれほど長い分子は通常の高分子では存在しない。DNA のもう一つの特徴として、2 重らせんであることからくる剛さ（曲げにくさ）があげられる。進化の過程で遺伝情報が長くなるに伴い生物が直面した課題は、この真っ直ぐで長い分子をどのようにして直径が 1 ~ 2  $\mu$ m しかない核や細胞の中に閉じ込めるかということではなかつたのだろうか。このことを想像するために、仮に長さのスケールを 10<sup>7</sup> 倍して DNA が直径 2 cm の固いケーブルだとして考えてみよう。するとその全長は約 1 万 km となり、これを一辺が 20 m ほどの部屋の中に畳み込むという問題になる。DNA の体積が部屋の半分以上を占めることから、どれほど困難かが想像できるだろう。また、細胞内で小さく折り畳まれた DNA は、必要に応じて引き伸ばされ情報が読み出されることから、よほど整然と畳まなければ、あとで大混乱が生じることは明らかである。この巧妙な折り畳み引き伸ばしの機構はどのようにになっているのだろうか。

コロイドが塩濃度を上げると凝集するように、DNA も溶液のイオン濃度の変化で凝縮することが知られている。我々の研究室では 1 分子の DNA をレーザートラップで操作しながら分子の凝縮や非凝縮を制御し、力に対する応答を調べることにより、分子内で起こっている凝縮と非凝縮の相転移の性質を明らかにする実験を行っている。図 1 のように DNA の両端に直径 2  $\mu$ m のビーズをつけ、ビーズをレーザーで引っ張りながら、伸びと力の関係を測ると、その応答は滑らかな曲線となり、固い高分子のモデルと良く一致する。(図 2 ●)

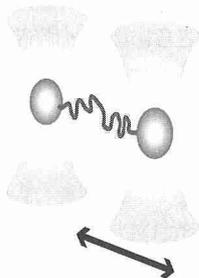


図 1

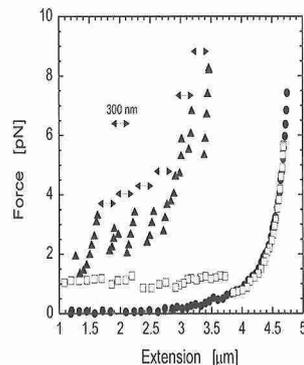


図 2

そこで水溶液を多価のポリアミンの一種であり、細胞内にも存在するスペルミジンを含むものに変えてゆくと、ある濃度のところから DNA は 3 次元空間でランダムに広がった状態から、高密度の凝縮状態へと転移する。この転移は力を圧力に、伸びを体積に読みかえると、物質が気体から液体状態へ転移する場合とよく似ている。気液転移では等温の場合、圧力一定で体積が変化する気液の共存状態が存在するが、これに対応して、凝縮した DNA を引き伸ばすと、力がほぼ一定のまま伸びるプラトーが現れる (図 2 □)。このプラトーの高さは 1 ~ 2 pN であることから、残りの大部分は凝縮状態を保ったまま、わずかの力により DNA は徐々に引きはがされて延びてゆくことが分かる。力を弱めれば DNA は自然に元の凝縮状態に戻るのである。さらに面白いことに凝縮状態の DNA は規則正しくドーナツ状に畳まれていることが分かった。生物は DNA のコンパクトな折り畳みと必要に応じた引き伸ばし機構として、凝縮転移という物理現象をうまく利用している可能性がある。実際、スペルミジンなどの多価のポリアミンは、細胞分裂や遺伝子発現の際に不可欠であることが分かってきている。また、DNA 情報の転写を行う RNA ポリメラーゼなどの酵素は、20 pN 程度の力を出すことから凝縮を引きはがすことは十分に可能である。さらに多価イオンの濃度が高くなると、図 2 (▲) のように DNA はスティック・スリップ状の複雑な応答を示すようになる。この状態は、DNA 分子の凝縮エネルギーが深くなり、緩和時間が極めて長くなるために生じる非平衡過程の応答として解釈できる。興味深いことに、より高いイオン濃度では凝縮状態は再び転移してほどこけることも明らかになった。これら一連の現象は、統計力学的なモデルにより記述され、我々の実験結果をよく再現することも示すことができた。(図 3) この凝縮機構には、棒状分子間の静電相互作用による凝縮相転移が関わっており、電荷間の相関が引力を生み出す機構については、現在多くの議論が起こっている。さて、生物情報を担う物質としての DNA に関する最も興味深い問いは、情報がいつ、どのように読み取られ、それが細胞内の動的現象とどう関わっているかではないだろうか。それを解明することが、生き生きした生命現象の本質に迫る道であると考え、私達は次のステップに向けた研究を開始している。尚、この研究に関する情報は、<http://daisy.phys.s.u-tokyo.ac.jp/research.htm> に掲載している。

## Effective Potential

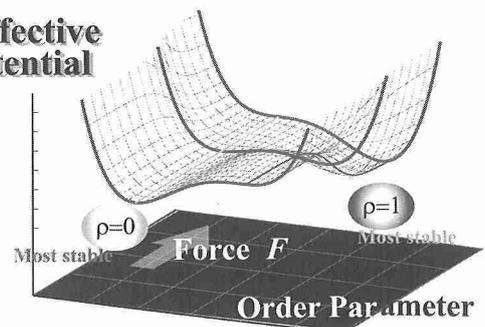


図 3

## ガンマ線で探るエキゾチック原子核の構造

下浦 享 (原子核科学研究センター)

E-mail:shimoura@cns.s.u-tokyo.ac.jp

地上にある物質の大半の質量を担っている原子核は、 $10^{-12}$ cm以下の空間の中に複数の陽子と中性子が強い相互作用で結びついたものです。原子核の性質は、陽子数と中性子数の組合せによって特徴づけられ、約7000種類の存在が予想されていますが、実験的にはその約3分の2は未発見です。これは、陽子と中性子は、弱い相互作用によってお互いに変化しあうために、地上にはエネルギーが最も低く安定で陽子数と中性子数がほぼ同数にバランスした約270核種の安定核しか存在せず、その近傍でしか実験ができなかったためです。

近年、重イオン加速器の発展とともに、重イオン衝突で生成される種々の原子核を分離し、それをビームとして用いる技術が進歩し、不安定な原子核が崩壊する前に再び核反応させる実験手法を用いて、陽子数と中性子数がアンバランスなエキゾチック原子核の性質を系統的に研究することが可能になってきました。質量数(陽子数と中性子数の和)を決めるとほぼ一意的に陽子数(中性子数)が決まる安定核の領域で研究されてきた原子核物理学の土俵を飛躍的に拡大させることが可能になってきたわけです。こうした研究により、例えば、中性子ハローや中性子スキンと呼ばれる安定核では見られない構造が発見されました。

こうした原子核の性質を実験的に調べる手法の一つとして、インビームガンマ線核分光があります。これは、核反応により原子核にエネルギーを与え、その崩壊により放出されるガンマ線(光子)のエネルギー(波長)と強度を測定することにより、原子核の形や堅さやスピンといった構造を調べるといった方法です。

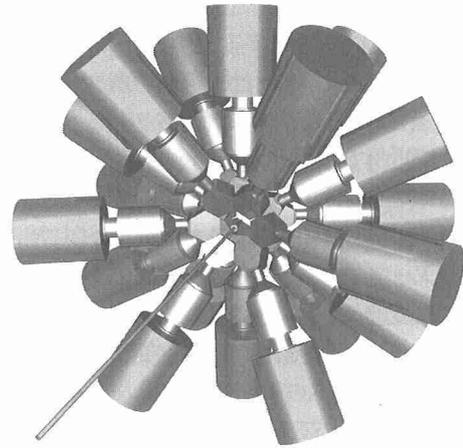
エキゾチック原子核ビームの核反応をこの手法に組み合わせて、これまで、わたしたちは、中性子が非常に多い原子核では、安定核で見られる中性子数8や20の魔法数が消滅していることを示しました。

こうした結果は、高速で運動している原子核から放出されるガンマ線のドップラー効果を補正することにより得られましたが、いままでの装置では、補正の精度に限界があり、適用できる原子核の種類に限界がありました。この限界を克服するために、わたしたちは最近、崩壊する原子核が光速の30—40%で運動している場合でもガンマ線のもとのエネルギーをこれまでの10倍の精度で測定する装置を開発しています(図)。今年度、この装置の一部を用いた実験を行い、現在、データ解析を進めています。

陽子と中性子の2種類の素粒子で構成される原子核は、それらの数の組み合わせによって多様な様相を示すと考えられます。エキゾチック原子核を用いた実験が可能になり新た

な様相を実験的に調べることにより、原子核物理学の研究の新たな展開が期待されています。

また、エキゾチック原子核の反応は、宇宙における元素合成の素過程でも起こっていると考えられますが、そうした素過程を実験で詳細に調べることも可能になってきています。



図：位置検知型 Ge 検出器アレイ

六角形の部分の中にガンマ線を検出する Ge 半導体が入っている。矢印は不安定核ビームを示す。

### 関連リンク

研究室ホームページ:

<http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/proj/rib/index-j.html>

## 太陽系に流れ込む星間空間物質

寺沢敏夫・岡光夫 (地球惑星科学専攻)

E-mail:terasawa@eps.s.u-tokyo.ac.jp

oka@space.eps.s.u-tokyo.ac.jp

現在、宇宙探査機ボイジャー(1号と2号)が太陽系の果てへ向けて飛翔している。これらは古典的なイメージの太陽系(冥王星軌道で太陽系の外縁を定義)の外には出ているが、依然太陽風プラズマの勢力範囲「太陽圏」の中にある。ボイジャー1号は今後数年~数十年以内には太陽風プラズマが超音速から亜音速に遷移する「終端衝撃波」に到達するはずであるが、その後しばらくは亜音速流の領域を飛び続け、太陽の影響を受けない真の宇宙空間~星間空間~に達するのはまだしばらく先のことである。

では星間空間はどのようなになっているのか。これまでの観測から星間物質は均一に広がっているのではなく所々に星間雲を形成していることが知られている。そして、我々の太

陽圏は局所星間雲 (LIC = Local Interstellar Cloud) の内部に位置していると考えられている (図1)。そして、このLICは我々の太陽圏に対し 25km/s ほどの速度で運動しているので、LICを構成する中性粒子成分、特にヘリウム原子はプラズマ・磁場の影響を受けずに太陽圏の奥深く、1天文単位以内まで侵入する。太陽に向かって運動する間、粒子は太陽重力の影響を受けケプラー運動に従った双曲線軌道を描く。その結果太陽の運動方向と逆の方向に重力収束コーンと呼ばれる高密度領域を形成する (図2)。この原稿をまとめている12月上旬は、ちょうど毎年地球がこの重力収束コーンの中を通過している時期にあたっている。

さて、太陽近傍ではヘリウム原子は太陽紫外線によって有限の確率で電離を受けイオンとなる。こうして生成されたイオンは太陽風の電磁場に捕まって太陽風とともに流されるので「ピックアップイオン」と名付けられている。ピックアップイオンの密度分布も上に述べた重力収束コーンの内部で最大となる。コーン付近の密度の空間分布の形状はもとの中性ヘリウムの温度を反映しているため、重力収束コーンを詳しく観測することによってLICの状態を推定することができる。我々は最近、このシナリオに従って火星探査機「のぞみ」と地球磁気圏探査衛星 GEOTAIL のイオンデータからピックアップイオンを検出し、それによりLICの状態を推し量るという研究を行っている。図3は「のぞみ」によるピックアップヘリウムイオンの観測値 (2000年3月~6月) である。破線が理論モデル (温度 9900K) によるフィットの結果で、それによれば LIC 温度は 9900K、密度は水素換算で ~0.1/cc となりこれまでの観測を裏付けた。(地球付近では上に述べたように重力収束コーンはいつも12月にしか観測されない。「のぞみ」の観測は初めての別のシーズンの観測である。)

一方、地球周回軌道にある GEOTAIL は常時太陽風中にあるわけではなく、「のぞみ」のような長期間の連続観測は難しいのだが、そのかわりイオン観測器の感度が2桁近く高いため精密観測に向いており、新しい発見が得られている。それはピックアップイオンの磁場の周りの速度分布の形状である。従来ピックアップイオンは電離後直ちにピッチ角散乱を受けて磁場の周りに等方的 (シェル状) に分布すると信じられていたのだが、GEOTAIL の観測により、シェルと同程度の頻度でトーラス状の分布をしていることが見いだされた。これはピッチ角散乱の効率が従来想定されていたほど高くないことを示し、イオンの空間分布形状が重力収束コーンの形状と全く同じとする従来のモデルの前提を覆す重要な結果である。なお、ピックアップイオンは太陽圏の内部で加速されて数百 MeV にも達し「異常宇宙線成分」として観測されていると考えられており、現在の太陽圏研究の重要な研究のターゲットとなっている。

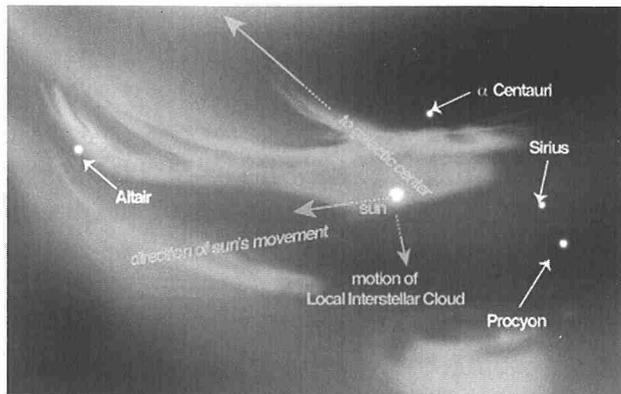


図1. 太陽圏近傍の想像図。

(Astronomy Picture of the Day, <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap000411.html>)

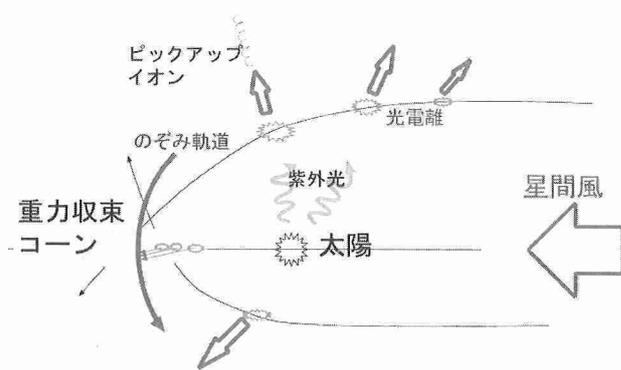


図2. 重力収束コーンの概念図 (野田, 2000)

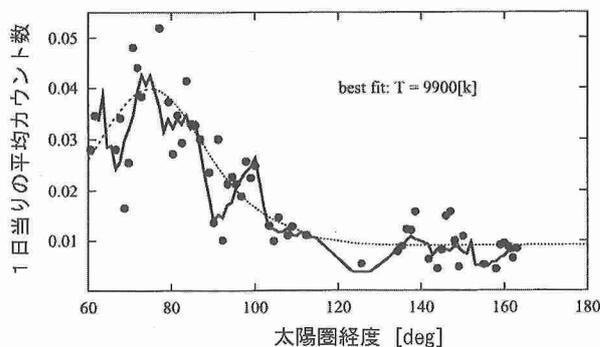


図3. 惑星間空間クルージングフェーズの間、「のぞみ」が重力収束コーンを通過した際に観測された He+ の空間分布 (Noda, Terasawa, et al, 2000)