

連載 理学のキーワード 第18回



「南極氷床コア」

横山 祐典 (海洋研究所 准教授, 地球惑星科学専攻 准教授 兼任)

ペンギンが表面を滑りながら移動している白い大地。南極大陸に存在する氷床は、地球表層における世界最大の淡水の貯留庫だ。南極氷床は中央部に存在する南極横断山地をはさみ、東南極と西南極氷床が存在する。およそ1200万平方キロメートルの面積をもち、大きなところでは厚さが4 kmにもおよび、すべてが融解すると、海水準を世界的に70 mも上昇させる。米ソ冷戦時代にグリーンランド北西部に作られた米軍の“氷床内基地”であるキャンプセンチュリーのアイスコアは、はじめて基盤まで到達したコアであり、デンマークとアメリカのグループにより水の同位体分析が行われた。それには気温変化の記録が詳細に刻まれており、その後採取されたアイスコアの記録にも同じような変化が確認された。グリーンランドで成功したアイスコアの研究は、分析技術や掘削技術の発展も手伝って、一躍、気候変動研究の主役に躍り出た。

南極の水はグリーンランドのそれと共に、過去の地球表層環境変遷をたどる上できわめて優れたアーカイブだ。表面に降り積もった雪は自らの重みで氷となり、その時点での大気情報を取り込む。いわゆる“空気の化石”ともいべきこれらの情報は、氷やガスの同位体比の分析に基づく気温の情報のほかに二酸化炭素やメタン濃度、大気中のエアロゾルや火山噴火の記録、太陽活動や地球磁場強度変動、ひいては中低緯度の気候状態も保存している。南極では、日本のドームふじアイスコアを含む複数の氷床コアが掘削されている。最長記録はロシアのボストーク氷床コアの3600 mあまり。また過去90万年間というもっとも古い氷の記録が採取されたのは、欧州チームのドームCコアである。1998年に掘削されたボストークアイスコアの分析からもたらされた、重要な発見のひとつは、過去の気温変動とほぼ同調して大気中の温室効果ガス濃度が判で押した

ように上昇と下降を一定の幅の変動を繰り返してきたことである。温暖化と温室効果ガスのモデル研究への重要な境界条件を与えている。宇宙線と地球大気との相互作用によって生成された核種を用いた分析は、加速器質量分析の発展とともに、近年活発に研究されている分野である。氷の層であるため、年代決定が難しいアイスコアの高精度年代測定や氷床融解史、また宇宙線フラックスの変動の復元から、太陽活動や地球磁場変動についての研究も行われ始めた。地球環境変動の進展のためにキーとなる南極氷床についての研究であるが、東京大学ではおもに大気物理学の視点から地球惑星科学専攻の佐藤薫教授らのグループが、また氷床変動や気候変動そして太陽活動についての研究を、われわれの研究室と宇宙線研究所の宮原ひろ子特任助教、そして工学系研究科原子力国際専攻の松崎浩之准教授らが協力しながら研究を行っている。



「ホッジ理論」

寺杣 友秀 (数理科学研究科 教授)

代数幾何学で扱われる対象は代数多様体とよばれるものである。ホッジ理論は代数多様体に対してホッジ構造を対応させる不変量のひとつで、種々のコホモロジー理論を基礎においている。

代数多様体とは座標空間内 (x_1, \dots, x_n) の図形で有限個の代数方程式 $f_1(x_1, \dots, x_n) = \dots = f_k(x_1, \dots, x_n) = 0$ で定義されるものやそれらを“貼り合わせた”ものとして定義される。この方程式を満たす“解の集合”を複素数の範囲で考えれば、それは複素代数多様体と呼ばれるものになっている。

代数多様体の性質を研究する上で、有効な手がかりを与えるのが同型類にのみ依存して、座標変換などでは変わ

らないものを見ることが大切でそれらは不変量とよばれる。種々の(コ)ホモロジー理論は不変量のなかでも代表的なもので、線形代数的に扱えるという利点がある。

コホモロジー理論の中でも一番初めに発見されたものは特異コホモロジー理論で、それは位相的な不変量となっている。次に微分構造を用いた不変量であるドラム・コホモロジーが発見されたが、これは微分構造を基礎にしているにもかかわらず、その位相的性質しか反映しない。その後、複素構造を元に定義される、ケーラー多様体とよばれるクラスに対してホッジ構造とよばれる構造を対応させるホッジ理論が現れた。ホッジ構造は代数多様体の

“周期”とよばれる重要な量と関係していて、それまでのコホモロジー理論よりもより精密で強力な不変量となっている。多様体の周期はその起源をたどれば、楕円曲線の周期にさかのぼることができる。

その後、A.グロタンディーク(Alexander Grothendieck)によりコホモロジー理論に一大革命をもたらされ、究極のコホモロジー理論としてモチーフの理論が提唱された。これは混合モチーフの理論へと拡張され発展し、新種の周期積分の研究にも応用されている。そういった周期積分として現れる代表的な特殊関数として多重対数関数がある。筆者は混合モチーフとそれらの関係について明確化することが目下の目標である。



「遺伝子と文化の共進化」

青木 健一（生物科学専攻 教授）

生物が複雑な情報を次世代に正確に伝える手段は、もともと遺伝子しかなかった。スズメなどの鳴禽を除けば、ヒト以外の生物では今なおそうである。ところが、世代間の情報伝達の別の手段として、ヒトでは社会学習の能力が高度に発達している。社会学習とは、模倣などによって他者から学ぶことを意味し、文化を支えている能力のひとつである。両方の情報伝達系の相互作用から生まれるさまざまな現象が、遺伝子と文化の共進化である。

人類学ではかねて、人類進化の原動力であるとの認識があった。たとえば、日本人などでは離乳年齢を境に乳糖を消化する能力が失われるのに対し、ヨーロッパ北部の人々やアフリカの遊牧民の多くでは成人後もこの能力が維持される。一部のヒトだけがもつこの成人乳糖分

解能力は、優性遺伝をすることが知られており、家畜の乳に依存する文化への適応であると考えられている。最近、この仮説を支持する有力な証拠がふたつ見つかった。第一に、中・新石器時代のヨーロッパ北部の人々が成人乳糖分解能力の遺伝子をもっていなかったことが、古代 DNA の分析から判明した。第二に、現在のヨーロッパとアフリカに分布するこの遺伝子は、独立起源の異なるヴァージョンのものである。つまり、強い自然淘汰が働いたために、類縁関係の遠い生物間で似通った進化をする、収斂進化が起きたと考えられる。

いっぽう、ヒトの社会行動をすべて本能と適応の視点から説明しようとする安易な社会生物学への反省から、ラムズデン (C. J. Lumsden) & ウィルソン (E.

O. Wilson), カヴァーリ・スフォルツァ (L. L. Cavalli-Sforza) & フェルドマン (M. W. Feldman), およびボイド (R. Boyd) & リッチャーソン (P. J. Richerson) が 1980 年代前半、それぞれ文化の重要性を説いた著書を出版し、これにより遺伝子と文化の共進化が定量的な研究分野として定着した。

人類科学講座の井原泰雄講師は、生存・繁殖上の犠牲を伴う地位追求行動など、必ずしも適応的でないヒトの社会行動の進化を研究している。同講座の筆者の研究室は、社会学習の能力および相補的な個体学習の（試行錯誤などにより自力で学ぶ）能力が、そもそもなぜヒトで進化的に強化されたかについて、環境の変動や異質性との関係で研究している。



「球状星団」

茂山 俊和（ビッグバン宇宙国際研究センター 准教授）

球状星団は 10 万から 100 万くらいの恒星（星）が数光年から 10 光年の狭い範囲に球状に集まった天体である。銀河は暗黒物質の重力に支配されているが、球状星団は星の自己重力によってその形を維持していて、自己重力多体系進化の実験場でもある。天の川銀河に球状星団は 146 個見つかっていて、銀河中心を中心にほぼ球状に分布している。天の川銀河の球状星団の星はどれも 100 億歳以上と年老いた星ばかりだ。

球状星団の形成機構は未解明だが、分子雲同士が高速で衝突した後に圧縮されたガスでの急激な星形成によりできたという説がある。分子雲はおもに水素分子からなる低温・高密度のガスの塊で星形成の現場である。分子雲に付随していた星と暗黒物質は衝突後にはすり抜け

るので、より古い星と暗黒物質を排除し同時期に生まれた星のみの集団を残す。触角銀河とよばれる二つの銀河が衝突している銀河に多くの若い球状星団があることもその傍証である。

ひとつの球状星団に属する星は皆、鉄と水素の組成比がほぼ同じであり、星がほぼ同年齢であることを意味する。1000 万年も年齢に差があると、その間に起こった超新星爆発によって大量の鉄が星間ガスに供給される。そのガスから生まれたより若い星の鉄の組成は大きくなる。同距離にあり同年齢の星の集団なので星の進化や元素合成の理論を試験する場でもある。

2003 年頃から、ハッブル宇宙望遠鏡のひじょうに鮮明な画像から色々な球状星団の星の色 - 等級図が作成された。

ここで、色とは異なる 2 つの波長域の明るさの比である。球状星団が同時期にできた星の集団だとすると、太陽のように中心で水素核融合を起こしている星はその質量の違いによって主系列とよばれる 1 本の滑らかな曲線上に並ぶと期待されていた。驚いたことに ω Centauri という球状星団では主系列が 2 本に分かれていることが発見され、他の球状星団 NGC 2808 では主系列が 3 本に分かれていた。これらの違いは星に含まれるヘリウムの組成が違えば説明できる。しかし、ヘリウムを増減させる機構がわかっていない。素性が同じ星の集団であると今まで考えられていた球状星団の中には実は質量以外にも性質の違う種族の星が集まった星団もあることがわかってきた。



「自己組織化」

米澤 徹 (化学専攻 准教授)

科学でいう自己組織化とは、複数の分子や物質が時間とともに自発的に秩序化していくことを指している。その本質は、安定性であって、自己組織的に形成された秩序構造は容易に元に戻ったりしない。

われわれは毎日自己組織化の恩恵を受けて生活している。たとえば、石鹼や洗剤は、油に溶けやすい部分と水に溶けやすい部分がひとつの分子の中にある。汚れは直接水には溶けないが、石鹼や洗剤が汚れの周りで分子が自己組織的にミセルとよばれる構造をつくり、水に溶けやすい成分を表面にして配列するため、水に溶けるのである。

われわれの体も自己組織化でできている。細胞の表面では、上のミセルをつくる石鹼分子と似た構造の分子が油に溶ける

部分同士を向かい合わせて2分子が並んだ膜を形成し、水に溶ける部分を外にだしている。そして、その2分子膜中に、タンパク質などを保持している。自然界でたくみに作られている構造は、機能を出すためにそれぞれの分子が自己組織的に配列したものが多く、それらの分子は目的に沿って作られているのである。自己組織化はわれわれの世界の根本概念のひとつともいえよう。

また、DNAが2重らせんを形成していることはよく知られている。このらせんをつくる高分子同士は共有結合ではつながっておらず、各塩基が、弱い結合である水素結合によって対を形成し、それが自己組織化して結果として2重らせんとなる。必要なときにはその

2重らせんがほどけ、情報を提供し、また、元に戻る。タンパク質は多種類のアミノ酸が重合した高分子であるが、これが生体内でさまざまな機能を発現するのも、特定のアミノ酸の配列が自己組織化によって特別な構造をつくるからである。こうした生体内で使われる自己組織化のための力は常温で働くものである。たとえば、タンパク質などは高温にすると変性し、機能を発現しなくなるが、これは自己組織化によって形成された構造が失われるからである。

最近是这样した分子の自己組織能を人工的に利用した研究がひじょうに盛んである。化学専攻でも多くの研究室で、水素結合や金属配位結合を利用して狙った形に分子を組織化する研究が行われている。



「プラズマ閉じ込め」 高瀬 雄一 (新領域創成科学研究科 教授, 物理学専攻 教授 兼任)

最近、家電製品など身近なところでも「プラズマ」という言葉をよく耳にする。プラズマとは原子に束縛されていた電子が自由に動けるようになった状態である。電子も残された原子核(イオン)も電荷をもつので、電磁力により多数の粒子と相互作用しあいながら運動する複雑系の典型例である。本稿では核融合研究の中心課題であるプラズマ閉じ込めについて解説する。

太陽のような恒星では、軽い原子核から重い原子核を生成する核融合反応で莫大なエネルギーを生み出している。これはアインシュタインの $E = mc^2$ の自然界での実証である。核融合反応を起こすには、原子核は電気的反発力に打ち勝てる運動エネルギーを持たなければならない。しかし高エネルギーの原子核ビーム同

士を衝突させても十分な反応は得られず、原子核を十分長い時間閉じ込め、何度も衝突をくりかえすチャンスを与えなければならない。星では巨大な重力でプラズマを閉じ込め、永い年月をかけて核融合反応を実現している。地上では重力は弱すぎるので、電場や磁場を利用する。とくに磁力線で織り成したトーラス状の籠をつくるのがプラズマ閉じ込めに有効である。太陽表面でもプラズマが自発的にループ構造をつくるのが知られている。これはトーラスが部分的に太陽表面下にめり込んだ状態と等価で、この構造内には高温プラズマが存在する。トカマクというトーラス型配位では、すでに外部から供給する加熱入力パワーに等しい核融合出力を出せる性能を達成している。次のステップとして、核融合

出力が加熱入力の10倍という燃焼プラズマ状態を研究するため、国際熱核融合実験炉イーター(ITER)が国際プロジェクトとして進行中である。運転開始は2018年の予定で、その後20年間で自己点火、長時間燃焼、および核融合炉工学技術の実証を行う。

本学の物理学教室では1950年頃、宮本梧楼研究室でプラズマ閉じ込めの研究が開始され、核融合研究の指導者を多く輩出してきた。現在は筆者・江尻晶准教授(新領域創成科学研究科)が柏キャンパスにて「球状トカマク」という新たな配位を用い、トカマクプラズマの性能改善を目指した実験研究を行っている。宇宙プラズマの分野では、物理学専攻(X線天文学)の牧島一夫教授、地球惑星科学専攻の星野真弘教授らが活躍されている。