

# 連載 理学のキーワード 第11回



## 「楕円曲線」

桂 利行 (数理科学研究科 教授)

なめらかな平面3次曲線を楕円曲線という。複素数を係数とする場合には、 $x, y$ を変数とするとき、 $\Delta = a^3 - 27b^2 \neq 0$ を満たす複素数  $a, b$  を用いて、

$$y^2 = 4x^3 - ax - b$$

という式で表される。これをワイエルシュトラス (Weierstrass) の標準形という。 $\Delta \neq 0$  は右辺 = 0 が重根を持たないための条件である。この曲線に無限遠点を付け加えてコンパクト化すれば、連続的に変形することによってトーラス (ドーナツの表面) になる。

楕円曲線の理論は、歴史的には複素関数論における楕円積分の研究に端を発する。ガウス (Gauss) は、分子が1で分母が4次の多項式の平方根であるような関数の積分を考察し、この楕円積分の逆関数が2重周期をもつトーラス上の関数に

なることを見いだした。一般に複素平面上の2重周期関数を楕円関数という。ガウス自身はこの結果を公表しなかったが、19世紀前半にはアーベル (Abel) がこの事実を初めて発表し、引き続いてヤコビ (Jacobi) は楕円関数をテータ関数の比として表示する事に成功した。また、ワイエルシュトラスはペー関数というもっとも簡単な楕円関数を導入した。ペー関数とその微分の満たす関係式が上記の形の3次式になり、トーラスの代数曲線としての表示を与えている。楕円曲線は群構造をもっていること、つまり演算ができるということが大きな特徴であり、代数幾何学、数論を始め、数学のさまざまな分野に現れる。有限体上の楕円曲線は、この群構造を用いて、暗号 (楕円曲線暗号) や素因数分解に利用されている。有名な

フェルマー (Fermat) 予想はフライ (Frey) のアイデアによって楕円曲線の問題に還元され、1994年にワイルズ (Wiles) によって解決された。

楕円曲線を高次元化したものはアーベル多様体とよばれ、深くて美しい理論が構築されている。アーベル多様体がどのくらい存在するかについては、モジュライ空間の理論があり、保形関数等とも結びついて大きな理論になっている。代数系において1を素数  $p$  回足すと0になるとき標数  $p$  というが、この世界ではモジュライ空間に興味深い特殊なストラティフィケーションが存在し、筆者もその構造を研究している。ちなみに、高校で習う楕円は2次曲線であり、代数幾何学における楕円曲線とは異なるものである。



## 「エアロゾル」

小池 真 (地球惑星科学専攻 准教授)

大気中にはエアロゾルという総称でよばれる、液体、固体、あるいはその混合物からなる直径1 nmから100  $\mu\text{m}$  程度の微粒子が  $10^2 \sim 10^5$  個  $\text{cm}^{-3}$  程度、浮遊している。高濃度のエアロゾルを吸い込むと呼吸器官などに障害を引き起こすため、大気中のエアロゾルは半世紀以上の研究の歴史があるが、近年では地球の気候へ与えるさまざまな影響の観点から注目されている。

大気中のエアロゾルは地球に入射してくる太陽放射を散乱して地球が受け取る放射エネルギーを減らすため、地球を寒冷化する放射効果 (放射強制力) がある。産業革命以降、エアロゾルは人為的な発生源の増加により増え続けているが、その結果は、この間に増大した二酸化炭素によるグローバルな地球温暖化の放射効果の3分の1を打ち消す程度の影響をもつと見積もられている。今後、排出

規制により大気中の硫酸塩エアロゾルなどが減少すると、地球の温暖化が加速する可能性も指摘されている。一方において、燃焼過程により大気中に放出される“すす” (ブラックカーボン) のように、太陽放射を吸収するエアロゾルも存在する。この光吸収は地球が受け取る放射エネルギーを増加させるが、そのエネルギーは大気の加熱に費やされ地表面が直接受け取る放射エネルギーは減少する。このため、大気の鉛直対流への影響などを通じて、大気の循環や降水の時空間分布が変化することが数値モデル計算により予測されている。さらには大気中の雲粒はエアロゾルを核として生成するため、エアロゾルの増大は雲粒数の増大を引き起こし、太陽放射に対する雲の反射率を増加させたり、雨を降りにくくさせたりする効果があると考えられている。最近では、北極などで雪氷上

に落下した光吸収性のエアロゾルが雪氷の融解を促進していることも指摘されている。

今年に発表された、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第四次評価報告書においても、これらのエアロゾルの重要性が指摘されている。エアロゾルは温室効果気体と比べてその発生源、大気中での生成過程、存在形態、除去過程などの理解に大きな不確実性があるため、現時点では放射強制力を推定するさい最大の不確定要因となっていることや、温室効果気体と比較して、はるかに大きな放射効果の地域差が存在することが示されている。

本研究科では小池研究室において、また本学の先端科学技術研究センター、気候システム研究センター、海洋研究所の諸研究室において、エアロゾルの多角的な研究が推進されている。



## 「エコデボ」

寺島 一郎 (生物科学専攻 教授)

妙な響きの言葉である。本欄 2 回目 (2006 年 7 月号) で塚谷裕一さんが解説した「エコデボ」の流行に刺激された生態学者が、二匹目の泥鰌を狙って使い始めた言葉である、と思う。Evo-Devo (エコデボ) が Evolutionary developmental biology (進化的発生生物学) であるのに対して、Eco-Devo (エコデボ) は、Ecological developmental biology (生態学的発生生物学) である。Ecology は、「個体発生は系統発生をくり返す」で有名な発生学者 E. ヘッケル (Ernest Haeckel) の造語である。これを最初に訳して「生計学」としたのが理学部動物学教室の五島清太郎。「生態学」は植物学教室の三好学が Biologie の訳語として使ったものに由来する。なお、南方熊楠は「棲態学」と書いた。Eco の語源がギリシア語 oikos で、「家、棲みか」

を意味することを表現する優れた訳語だ  
と思うが、文科省用語は生態学。

生物は良くできた器械だが、はじめから良くできていたのではない。生物とは、さまざまな環境における自然選択によって、その環境でもっとも子を残しやすい形態、機能、発生プログラムをもつように変化してきたし、現在も自然選択されつつある存在である。したがって、生物が「良くできている度合い」は、生物をその「棲みか」において調べることによって明らかになる。生物の発生プログラムや環境に応じた発生の可塑性を自然環境条件下で捉え、それらのもつ意味を、残す子の数 (適応度) への効果として評価する総合的な学問がエコデボといえよう。過去の環境を考慮するとエコデボとも融合する。適応や進化のメカニズムの大筋

が明らかになってからは、生物学者は、生物の形態や機能を「よくできた器械が見せてくれる面白いこと」としてだけではなく、エコデボ・エコデボの精神で研究して来たはずである。しかし、生物情報の蓄積にともない、生物の類縁関係、発生の基本プログラムなどが凄まじい勢いで明らかになりつつある今、「環境」あるいは「棲みか」に注目した総合的研究が必須であることも強調すべきであろう。そのお題目がエコデボ。なんだかボコボコと沈みそうな・・・。

日光植物園、生物科学専攻の植物生態研で、植物の光合成系や呼吸系に注目したエコデボ研究をやっている。神経系のない植物が、植物体のいろいろな部分の環境情報を統合してその状況で最適な葉を作り出す仕組みが明らかになってきている。



## 「核力」

初田 哲男 (物理学専攻 教授)

核力とは陽子や中性子 (総称して核子) の間に働く力の総称で、核子を約  $10^{-12}$  cm という小さい領域に原子核として強く結合させる働きをもつ。1935 年、核力の起源を説明するため、湯川秀樹博士は核子間にキャッチボールされる湯川中間子を導入した。これは、現代の原子核・素粒子物理学を拓く大きな一里塚となった。

その後、原子核構造の研究や加速器を用いた核子衝突の実験で、核子が離れている時は湯川中間子の交換による引力という描像は正しいが、核子間距離が  $10^{-13}$  cm 以下では強い反発力 (斥力芯) が存在すると推測されるようになった。湯川中間子の交換は原子核が結合する要因に、いっぽう斥力芯は、原子核や中性子星の安定性、II 型超新星爆発の起爆原因とも密接に関係する。核力は、2 核子のもつスピンや軌道角運

動量に依存して力の大きさが変わる豊富な構造をもつこともわかってきた。

いっぽう、素粒子物理学の発展により、核子や中間子はクォークとよばれる素粒子とそれを結び付けているグルーオン (糊粒子) からなる複合系であることが明らかになった。したがって、これまで現象論的にしか理解されていなかった核力 (とくに斥力芯) を、よりミクロなクォーク・グルーオンから出発して理論的に理解できないかという機運が盛り上がった。しかしながら、クォーク・グルーオンの基礎理論である量子色力学 (南部陽一郎博士により初めて導入された) は、その高い非線形性と強い量子性のため解析がきわめて困難であった。

幸いにして、近年の計算機パワーの飛躍的進展により、10 テラフロップス級の汎用計算機や専用計算機を用いて、

量子色力学を数値シミュレーションの方法で解く手法が発展した。とくに、核子や中間子の質量などを定量的に数値計算することが可能になってきた。さらに 2006 年には、核力の短距離から長距離に至る性質を数値シミュレーションで導く最初の計算が、筆者を含む研究グループにより報告された。

核力という古くて新しい問題は、ここ数年ますます活発に理論・実験研究がすすめられている。理論面では、量子色力学からみた核力の起源の研究が初田研究室 (物理) で、核力が中性子を多数含むエキゾチック原子核にもたらす新しい構造の研究が大塚研究室 (物理) で行われている。また、ハイペロン (核子の仲間) に働く未解明の力の実験的研究が、茨城県東海村で建設中の高強度陽子加速器施設 J-PARC で行われる予定である。



## 「第一世代星」

梅田 秀之 (天文学専攻 准教授)

ビッグバン直後の宇宙には水素、ヘリウム、リチウムしか存在せず、炭素より重い元素は、ほぼすべて星の中での核融合や超新星爆発時につくられた。第一世代星とはビッグバン直後の化学組成のガスを原料として、宇宙で最初につくられた星々のことである。星には面白い特徴があり、重い星は寿命が短く、太陽より十倍以上重い星は百万から一千万年で寿命が尽き、超新星爆発を起こし周囲に重元素をばらまく。これらの重元素で汚染されたガスから作られた星は第二世代以降の星となる。いっぽう、軽い星はひじょうに長寿命であり、たとえば太陽の0.8倍以下の質量の星の寿命は宇宙の年齢(137億年)より長い。したがって、もし軽い第一世代星があるならば現在でも輝いている姿を見つめることができるはずである。

第一世代星に興味を持たれる理由はいくつかある。宇宙で最初につくられた星はどのような星であったのかという素朴な興味もあろうが、それらの星が初期宇宙の進化や銀河形成に及ぼす影響や、理論天体物理学の検証に応用できるという側面も注目されている。星生成理論の標準的な予測では最初にできる星々は太陽質量の100~200倍以上とひじょうに重い。また、最初の星の周辺では星からの強い放射の影響で、太陽質量の数十倍の少し軽い星が生まれるという予測もある(このような星も第一世代とよぶのかについては定義がはっきりしていない)。これらの星は宇宙を再電離し、進化の最後にブラックホールを残し、多くの銀河の中心にある巨大ブラックホールの種になったと予想されている。

近年、観測により軽い第一世代の星を探す試みが行なわれており、これまでに重元素のまったくない星は見つかっていないが、鉄のひじょうに少ない星がいくつか見つかっている。それらは第一世代星の軽い星が誕生後に周囲から汚染されたものであるのか、あるいはごく初期につくられた第二世代の星なのか、論争がなされている。

本研究科では天文学専攻の野本憲一教授と筆者の研究室、また附属ビッグバン宇宙国際研究センターの茂山俊和准教授の研究室において、金属のひじょうに少ない星の組成を超新星などの元素合成モデルと比較することにより、その星の重元素の源、ひいては第一世代星の質量や、その超新星爆発の性質を明らかにする研究を行っている。



## 「情報爆発と情報大航海」

辻井 潤一 (情報理工学系研究科 教授)

この2つのキーワード、明確な定義はないが、伝えたいことは感覚的に理解していただければよい。いずれもプロジェクトの呼称であり、国民やマスコミの支持を必要とする大規模な国プロ(国家プロジェクトの略)が、キャッチーな呼称を選ぶ風潮を体現している。計算機分野は、演算性能10ペタフロップス(毎秒1京回の浮動小数点数演算を行う)のスーパーコンピュータを開発する京速計算機プロジェクトなど、キャッチフレーズづくりがうまい。

情報世界を探索・探索する者というExplorerが、M社のインターネット・ブラウザの名前に使われたり、navigation(航海)から、「XXナビ」でXXに関する情報を探す手助けサイトが数多くあったりと、情報を探し出す過程を探索・航海に喩えることは多い。

この比喩をさらに拡大して、15世紀中葉からのヨーロッパ世界のグローバル化の時代、大航海時代と結びつけたところに、「情報大航海」という命名の妙がある。ルネサンス期の希望と躍動感がある。経済産業省が2007年から始めた3年間の国プロ。背景には、この分野の中核技術がG社に独占されている危機感がある、という。この危機感、他の国家にも共有され、同時期にフランスやドイツのプロジェクトも始まっている。

革新的技術の出現に期待が集まる反面、「G社の桁違いの資金に対抗できるのか」とか、逆に、「スタンフォード大の2人の学生からG社が始まったように、この分野の革新技術は、創造力と想像力に富む少数者により生み出される。護送船団的な発想の国プロで

大丈夫か」など、不安視する向きもある。小ぶりのグループで、成果重視の研究を推進するなど、従来の国プロとは一味違った機動性を持たせている。さて、国家主導のプロジェクトが民間の機動性に勝てるか?

いっぽう、「情報爆発」は文科省のプロジェクト。プロジェクト概要には、人類が生産する情報が2000年以降爆発的に増大しており、これに対処する技術の開発を目的とするとある。「情報大航海」よりも幅が広く、狭い検索技術にとどまらず、ハードウェア・ソフトウェアの基礎技術、人間との対話技術から技術受容の社会学的側面まで、250人超の大学研究者が参加する。2005年から開始され、喜連川優教授(本学・生産技術研究所)がリーダーとなって推進している。