



### 「ラムダ計算」

角谷 良彦（情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻 助教）

ラムダ計算は、計算を抽象化した体系であり、さまざまなプログラミング言語の基礎として利用されている。

ラムダ計算の特徴として、関数を形式的に扱うことができるという点が挙げられる。一般に、数学の議論に登場する数式は厳密な記法であると信じられがちだが、実際は必ずしもそうではない。とくに、数式における関数の表現は曖昧であることが多い。たとえば、よく目にする「 $f(x)$ 」という表現がある。これは、 $x$ の部分に後で何かを受け取る関数を意味しているのか、すでにあるそのような関数に値  $x$  を渡した計算結果を意味しているのか、定かではない。どちらを意味するのかは、通常、文脈によって決定される。このことは、専門家同士が議論をする上ではあまり問題にならないが、分野の違う人々が議論する場合に大きな

妨げとなることがある。ラムダ計算では、関数そのものと関数が返す値とは表記上厳密に区別されるので、ラムダ計算の記法を使えば、そのような問題は起こらない。

また、ラムダ計算において関数を定義することと、プログラムを書くことはよく似ている。実際、関数型プログラミング言語とよばれるラムダ計算を基礎として実装されたプログラミング言語では、プログラムを書くことは、関数を定義することとほぼ同義である。

もともと、ラムダ計算に型は存在しなかったが、プログラミング言語としての側面が強くなるに連れて、型が考慮されるようになる。関数型プログラミング言語に限らず、型は高度なプログラミングに有効な概念である。たとえば、Java や ML といったプログラミング言語では、

型の整合性がないプログラムはコンパイルできず、コンパイルできたプログラムは実行時にある種のエラーが起こらないことが保証されている。ラムダ計算と型についての研究は、現在でも活発に行われている。

ところで、ラムダ計算のラムダとは、勿論ギリシャ文字の「 $\lambda$ 」のことである。計算機科学の分野では、このようにギリシャ文字の名前がついた計算体系が数多く提案されており、中でも、ラムダ計算に次いでよく利用されているのがパイ計算である。パイ計算は、おもに通信や平行計算のモデルとして利用されている。情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻の萩谷研究室では、ラムダ計算やパイ計算の理念にあるように、計算というものの本質を抽象化し形式的に扱うことを研究の大きなテーマとしている。



### 「ボース・アインシュタイン凝縮」

上田 正仁（物理学専攻 教授）

ボース・アインシュタイン凝縮（Bose-Einstein condensation, 以下 BEC と略す）は系を構成する多数の粒子が完全に同期して運動する結果、ミクロな量子力学的性質がマクロに増幅される効果である。今日では、BEC は超伝導、超流動、レーザーなどを引き起こすもっとも基本的なメカニズムであると認識されている。BEC は、（質量のない）光子の統計性がボース統計に従うことを明らかにしたボースのアイデアを、質量をもつ粒子に適用したアインシュタインにより 1924 年に予言された。しかし、あまりに特異な効果であったために、その実現可能性についてはアインシュタイン自身ですら懐疑的であったといわれている。

その後、BEC はヘリウム ( $^4\text{He}$ ) の超流動現象の本質であることが次第に認識されるようになった。超流動とは液体が粘性を持たずに流れ続ける現象であり、電気抵抗が消滅する超伝導も本質的には超流動と同じ現象である。1995 年には原子の気体が BEC を起こすことが実験で示され、液体だけではなく気体もまた超流動になることが明らかになり、これが契機となり、BEC 研究は世界中で爆発的な勢いで広がりつつある。実際、1997 年、2001 年、2005 年のノーベル物理学賞が BEC に関連する分野の研究者に与えられたという事実からも、この研究分野に対する世界の研究者の関心の高さが想像できる。

冷却原子気体の BEC は、1 ナノケルビン

( $10^{-9}\text{K}$ ) という宇宙でもっとも低い温度まで原子を冷却することができ、かつ、原子間の相互作用を自在に制御できるなど、物質を特徴づけるほとんどすべてのパラメーターを自在にあやつれる人工量子物質である。これを使うことにより、BEC を使った超新星爆発に類似の現象の実現など、これまでは純粋な思考実験でしかなかったさまざまなアイデアを実験で検証することができるようになった。また、光の定在波で作られる光格子とよばれる人工的な完全結晶に冷却原子を閉じ込めることにより、固体中の電子の性質を冷却原子を用いて研究されている。それを用いて高温超伝導のメカニズムを解明しようという研究が世界中で進められている。



## 「減数分裂」

山下 朗 (生物化学専攻 助教)

細胞の分裂様式は、大きく体細胞分裂と減数分裂の二つに分けられる。減数分裂は、その名が示す通り、細胞あたりの染色体数を半減させる特殊な分裂様式である。還元分裂、成熟分裂とよばれることもある。減数分裂は、有性生殖に不可欠なプロセスであり、ヒトを含めた高等真核生物では精子や卵子などの生殖細胞を生み出すさいに行われる。世代を超えて遺伝情報を伝えていく上で欠かせないものであり、生命の連続性を保証する機構の中核とみなすこともできよう。

生物学的観点からも、減数分裂はひじょうに興味深い点の多い過程である。DNA合成と核分裂を繰り返す体細胞分裂とは異なって、減数分裂過程では、一回のDNA合成後二回の連続した核

分裂が行われ、その結果、細胞あたりの染色体数が体細胞と比べて半分に減少する。二回の分裂のうち一回目の分裂では、二回目の分裂や体細胞分裂とは違った特殊な染色体分配が行われる。また減数分裂過程では、体細胞分裂期に比べてひじょうに高い頻度で遺伝子の組み換えが起き、両親由来の遺伝情報を混合する受精と相まって、生物に遺伝子レベルでの多様性をもたらす源となっている。

では、細胞はどのような機構で体細胞分裂から減数分裂へと分裂様式を切り替えているのであろうか。また、いかなる分子の働きで体細胞分裂とは異なる特別な分裂サイクルを実行しているのであろうか。前者に関しては、減数分裂が行われる条件が生物種によって様々であ

るため、生物ごとに個別に情報が集められており、それらを総合的に検討していく必要がある。後者の減数分裂を制御する分子機構についても、生物種を超えた普遍的な機構が存在するのかという点を含めて、活発に研究がなされている。

減数分裂の研究を進めていく上で問題となるのは、実験材料の選択である。減数分裂を自由に誘導できる高等真核生物のモデル系が利用できない現在、カエルの卵などとならんで、酵母がこの分野の発展の一翼を担っている。われわれ生物化学専攻山本正幸教授の研究室では、分裂酵母を用いて、減数分裂を制御する機構に関して幅広く研究を進めている。三崎臨海実験所では吉田学講師によるカタユウレイボヤを用いた研究も行われている。



## 「正規化行列式」

吉川 謙一 (数理科学研究科 准教授)

無限個の数を掛け合わせるとその値はしばしば発散する。たとえば、すべての自然数の積  $1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots$  は普通に考えると無限大である。しかし、このような発散量から何らかの有限値を取り出したい事がある。正規化行列式とはそのための手段のひとつである。正則行列  $M$  の行列式の対数  $\log(\det(M))$  は、複素変数  $s$  の関数  $F(s) = -[\text{Tr}(M^{-s})]$  の原点における微分  $F'(0)$  に等しい。  $M$  が無限次元であってもこの関係式が成り立つように正規化行列式を定義する。つまり、行列  $M$  のサイズが無限大であっても、解析接続の結果  $F(0)$  が存在する場合には  $M$  の正規化行列式を  $\exp(F(0))$  で定義する。たとえば、  $M$  として  $\{1, 2, 3, \dots\}$  を成分とする対角行列を考えれば、正規化行列式  $1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots$

は  $2\pi$  の平方根に等しい。正規化行列式は通常の行列式が充たす多くの性質を充たす。

正規化行列式の正確な起源を筆者はよく知らないが、現在の幾何学的な研究に大きな影響を与えたのは1970年代のレイ (D. B. Ray) とシンガー (I. M. Singer) による解析的振率の導入である。彼等は位相幾何学におけるライデマイスター振率の解析的類似を考え、その過程で上に述べた正規化行列式を考えた。解析的振率とは、ラプラシアンとよばれる線形微分作用素の正規化行列式を適当な重み付きで掛け合わせて得られる数のことである。解析的振率の理論は1980年代の後半以降に急速な発展を遂げ、現在では数理物理学やアラケロフ幾何学において用いられるなど、

重要な概念となっている。

正規化行列式が明示的に計算できることは一般にきわめて稀であるが、可能な場合もある。複素平面上の二重周期関数全体の成すベクトル空間には、ラプラシアン  $-(\partial_{xx} + \partial_{yy})$  が線形変換として作用する。この時、ラプラシアンの非零固有値全体の正規化行列式は、デデキントのエータ関数とよばれる美しい関数と周期を用いて記述される。弦理論におけるミラー対称性の研究から、この事実を拡張する驚くべき予想が1990年代初期に大栗博教授 (カリフォルニア工科大、東大数物連携宇宙研究機構) を含む4人の物理学者により提出され、数学において正規化行列式や解析的振率が研究される重要な動機のひとつとなっている。



## 「恒星風・太陽風」

田中 培生 (天文学教育研究センター 准教授)

恒星風とは、星から吹く風、つまりガスの流れであり、星の質量を減少させ、その一生に大きく影響するとともに、周囲の宇宙空間にも大きな影響を及ぼす、とても興味深い現象である。この現象は、われわれにもっとも身近な恒星である太陽で最初に観測された。100万度の高温太陽コロナからのプラズマ流は、地球の極地域で見られるオーロラ、地磁気嵐などの現象や、彗星の尾の形成などに大きな影響を及ぼす。1950年代、E. パーカー (Eugene N. Parker; 2003年京都賞受賞) が超音速プラズマ流加速のモデルを提唱し、“太陽風”を理論的に予知した。最近では、“宇宙天気予報”など、太陽風の影響による地球環境の研究も盛んで、日本の太陽観測衛星“ひのとり”、“ようこう”、“ひので”の活躍が記憶に新しい。

この太陽風によるガスの流出が、現在の質量放出率( $10^{-14}$  × 太陽質量/年)で、太陽の寿命、100億年にわたって続いたとしても、太陽の質量は0.01%しか減少しない。いっぽう、太陽の10～100倍の質量をもつ大質量星は、恒星風によってその質量の大半を放出し、最後に超新星爆発で一生を終える。この大きな質量放出率は太陽風のモデルでは説明できない。1970年代、星からの強い紫外線の、C, N, Oや鉄族原子での吸収による輻射圧でガスを加速する恒星風モデルが提唱された。ただし、紫外線を吸収する何万本もの線スペクトルを正確に計算することは容易ではない。

とくに、大質量星終末期の星で、恒星風によって水素の外層を吹き飛ばされ、高温の内部が露出した状態のウォルフ・ラ

イエ星では、2～3千km/sの高速(なんと、光速の1%！に近い)で、 $10^{-5}$  × 太陽質量/年以上もの大きな質量放出率が観測されているが、質量放出率の観測値にはまだ不確定さを残しているのが現状である。

超新星の母天体であるウォルフ・ライエ星の進化は、野本憲一教授(数物連携宇宙研究機構、天文学専攻)のグループが世界の研究をリードしている、超新星やガンマ線バーストの物理とも密接に関連している。筆者らは、われわれの銀河系(天の川)に大半がいまだ発見されずに埋もれていると予想されているウォルフ・ライエ星の発見を目指して、本研究科附属天文学教育研究センターが南米チリ・アタカマ高地(標高5600m)に建設したminiTAO望遠鏡での赤外線観測を計画している。



## 「活断層」

池田 安隆 (地球惑星科学専攻 准教授)

地殻の中には一般に多数の断層があるが、そのなかには「活着している」断層もあれば「死んでいる」断層もある。活着しているものが活断層である。こう説明してもおおかたの人は納得しないので、最初に断層とは何かを、つぎに断層はどのような挙動をするかを、研究史を交えて説明しよう。

プレート運動などに起因して生じる地殻内の応力が地殻を構成する岩石の強度を超えると破壊が生じて、応力は解放される。この時できる破壊面が断層である。一旦破壊面ができると、そこでくりかえし破壊(すべり)が生じ、それにもない破壊面の拡大や破壊面どうしの連結が起こって断層は成長していく。地殻内部には数センチから数百キロメートルまで、さまざまなスケールの

断層が存在するが、一般に大きな断層ほど活動の歴史が古いのはこのためである。断層は地殻内の応力をもっとも効率的に解放する方向に発達するので、プレート運動の変化などによって地殻内の応力場が変わると、それまで動いていた断層は「死んで」しまい、新たな方向の断層が生まれる。地殻の変形が極度に進むと断層面そのものが変形し、その結果、死んでしまう断層もある。

地質学者は古くから数十～数百キロメートルの長大な断層が存在することを知っていたが、それらが実際に動くことを知ったのは、1891年の濃尾地震、1896年の陸羽地震や1906年のサンフランシスコ大地震に伴う地変が世界に紹介されてからであった。活断層(active fault)という言葉が初めて現れたのは、

ベイリー・ウィリス (Bailey Willis) が1923年に出版したカリフォルニアの断層図である。この図は将来起こる地震発生場所を予測する目的でつくられ、死んだ断層と活断層とが区別して図示されている。ただし、当時いまだこの区別は曖昧であった。断層が活着しているか否かは、それが最近(地質学的「最近」とは過去数万年から数百万年間)くりかえし動いているか否かで判定するが、その方法が確立したのは1980年代になってからである。

活断層は地震の発生源であるため、その活動履歴を精密に復元する試みが最近盛んに行われている。また、その生成・消滅・再活動の歴史の解明は変動帯の進化の解明に重要である。本研究科では筆者の研究室がこれに携わってきた。