

連載 理学のキーワード 第13回



「p進数」

辻 雄 (大学院数理科学研究科 准教授)

p進数は、2進数、3進数、5進数、…と素数ごとに決まる数の概念である。素数 p をひとつとると、正の整数は必ず 0 以上 $p-1$ 以下の整数からなる有限列 a_0, a_1, \dots, a_N を用いて $a_0 + a_1p + a_2p^2 + \dots + a_Np^N$ と書ける (p進法表示)。この和が無限に続いているものも考え、さらに有限個の p の負冪も許して得られる数、 $a_{-M}p^{-M} + a_{-M+1}p^{-M+1} + \dots + a_0 + a_1p + a_2p^2 + \dots + a_Np^N + \dots$ が p進数である。p進数の世界では N が大きいほど p^N は「小さい」とみなして上の無限和を正当化する。

p進数は、1変数代数関数の冪級数展開の類似として、1897年 K. ヘンゼル (K. Hensel) により導入され、有理数係数の n 次方程式やその解で定義される代数体の判別式などの研究に応用された。

その後2次形式論や類体論などに応用され、現在では数論のひじょうに多くの分野において用いられているきわめて基礎的で不可欠な概念である。

p進数では極限操作が許されるため逐次近似が可能で、有理数よりも方程式の扱いがはるかにやさしくなる。方程式の有理解の存在の問題が、p進数と実数での解の存在の問題に完全に帰着できる時、ハッセ原理が成り立つとよばれ、2次形式の零点についてはこの原理が成り立つ。しかしたとえば平面上の滑らかな3次曲線では成り立たない。この成り立たなさの様子は、楕円曲線 (理学のキーワード第11回参照) に伴うテイト・シャファレヴィッチ群とよばれる群と関係し、この群は数論における興味深い研究対象のひとつとなっている。

クレイ数学研究所による懸賞金がかけられた問題のひとつ BSD 予想にもこの群が関係する。

有理数体の絶対ガロア群 (有理数係数のすべての代数方程式を統制するような巨大な群) が作用する p進数係数の線形空間は p進ガロア表現とよばれ、数論の対象をそれに伴う p進ガロア表現を通して研究することがしばしばある。たとえばフェルマー予想の証明は、最終的に楕円曲線に伴う p進 Tate 加群とよばれる p進ガロア表現の研究に帰着された。p進ガロア表現の素数 p での分岐の様子はとくに複雑で、その構造の解明には p進数の概念だけでは不十分であり、p進数をさらに拡張した数の概念を用いて研究されている。筆者はこの構造の解明およびその応用について研究している。



「Web2.0」

萩谷 昌己 (大学院情報理工学系研究科 コンピュータ科学専攻 教授)

Web2.0とは、オライリーメディアのティム・オライリー (Tim O'Reilly) が使い始めた言葉であり、従来のウェブページを中心とする一方的な情報発信から、多くの人々によって提供された断片的な情報がネットワーク上で自発的に構造化されていく状況を総体的にとらえたものであって、厳密な定義があるわけではない。オライリー自身は、Web1.0的な技術とWeb2.0的な技術の比較を具体例を通して与えている。たとえば、個人のウェブページがWeb1.0であるのに対して、ブログは典型的なWeb2.0である。また、オンラインのブリタニカがWeb1.0であるのに対して、Wikipediaは典型的なWeb2.0である。新書「ウェブ進化論」(梅田望夫著)では、「ネット上の不特定多数の人々 (や企業) を、

受動的なサービスの享受者ではなく能動的な表現者と認めて積極的に巻き込んでいくための技術やサービス開発姿勢」と説明されている。

Web2.0のもとで大きく進んだことが、ネットワーク上の知的なコラボレーションによる集合知の形成である。集合知 (collective intelligence) とは、ネットワークでつながれた有名・無名の人たちが共同で形成した知識のことであり、Wisdom of Crowds とよばれている。集合知は、OSS (open source software) にその手本を見ることができる。OSSとは、ソースコードが公開され、ネットワーク上でボランティアにより無償で開発されるソフトウェアのことで、Linuxがその典型例である。OSSの方法により開発されている百科事典 Wikipedia は集合知の

見本であり、完璧に無制御であるにもかかわらず、出版社が提供する百科事典に匹敵する正確さを有していることが確認されている。

Web2.0の動きは科学の研究にも及んでいる。従来、科学の研究は研究室の中で閉じた形態で行われ、その成果は論文として完成された形で発表されていた。しかし、たとえば遺伝子やタンパクのデータベースが完備してきたように、論文以外の成果が発表されることが多くなった。すると、実験を含めて科学の研究のすべてのプロセスをネットワーク上に公開し、開かれた形で研究を進めようという考え方も生まれて来る。Open Science とよぶべきこの動きはまだ萌芽的であるが、今後大きく発展する可能性を秘めている。



「宇宙線」

星野 真弘 (地球惑星科学専攻 教授)

宇宙線とは、宇宙空間を飛び交う高エネルギーの放射線のことである。宇宙線研究の歴史は1912年頃、V. F. ヘス (Victor Franz Hess) の気球実験に始まる。ヘスは、当時地球内部から来ていると考えられていた放射線を気球に乗って測定したところ、驚くことに放射線強度は高度が上がるほど強くなることを発見し、この業績により1936年にノーベル賞を受賞した。宇宙線の粒子当たりのエネルギーは、最大のもは 10^{20} eV (16 ジュール) にも達し、地上の加速器で人工的につくることのできるエネルギーをはるかにしのぐ。宇宙線のエネルギースペクトルは、エネルギーが高くなるほどフラックスが下がる「べき型関数」で近似することができ、熱力学的平衡状態ではなく非熱的な分布をしている。

宇宙線の起源は、宇宙の構造や天体で起きている現象と密接に関係しており、発見された当時からどこでどのようにしてつくられるかは大きな問題であった。現在宇宙線は、さまざまな高エネルギー天体で発生する衝撃波でつくられたと考えられている。衝撃波には乱れた電磁場が存在するので、その乱流場によって粒子がくりかえし散乱を受けることで、一部の熱的な粒子が選択的にエネルギーを獲得し、非熱的な高エネルギー成分をつくったという考え方が一般的である。しかしその加速機構には未解決の点が多く今後の研究が待たれる。

エネルギーにして 10^{15} eV程度までは、われわれの銀河系内の超新星爆発衝撃波でつくられたと考えられており、それより高エネルギーの宇宙線については、銀河系外の高エネルギー天体の相対論的

プラズマ現象が関連していると思われる。最近のホットな話題としては、南米アルゼンチンにおけるオージェ観測のグループが、 10^{19} eV程度の宇宙線が活動銀河核の方向から来ている可能性を示唆している。また 10^{20} eVを超えるエネルギー領域も興味深いテーマであり、もし銀河系外で作られているとすると3Kの宇宙背景放射との衝突により宇宙線は地球には届かないとされている。しかしこの理論予想と異なり観測されたという東大宇宙線研AGASAの報告があり、その検証も各国で進められている。宇宙線の研究は、宇宙天体物理学・宇宙空間物理学・素粒子物理学を始めとしてさまざまな関連分野に広がりをもせており、宇宙線研究所を始め、物理学専攻や地球惑星科学専攻などの教員も研究に携わっている。



「アミノ酸」

宇部 仁士 (化学専攻 助教)

広義にはアミノ基とカルボキシル基を同一分子内に有する化合物の総称であるが、一般的には20種のL- α -アミノ酸を指す言葉として用いられる。

アミノ酸は分子間で脱水縮合し、ペプチド結合とよばれる強固な結合を形成する。この強固な結合をくりかえすことにより酵素や筋肉といった多様なタンパク質が構築される。DNAは生命の設計図とよばれるが、これはDNAがタンパク質の設計図であることにほかならない。DNAの3塩基をひとつのコードとしてアミノ酸の配列(タンパク質の一次構造)は決定される。

こうした生物学的重要性のため、アミノ酸は早くより化学の研究対象となっている。1806年に初めてアスパラガ

スよりアミノ酸が単離されアスパラギンと命名された。1935年にはすべてのアミノ酸の構造が確定したが、アスパラギンの例でわかるように単離した物に名前が由来するアミノ酸が少なくない。たとえばチロシン (tyros: ギリシア語でチーズの意) やバリン (valerian: 絹) などが挙げられる。1866年には小麦タンパクのグルテンよりアミノ酸が単離されグルタミン酸と名付けられている。

100年前の1908年、本学の池田菊苗は昆布の呈する味を「うま味」と称し、L-グルタミン酸がその正体であることを突き止めた。ナトリウム塩とすることでうま味が増すことを見いだした池田は翌年、鈴木製菓所(現味の素株式会社)よりグルタミン酸ナトリウムを「味の素」

として世に送り出すことになる。これら一連の池田の業績は日本の誇る発明品として、また産学連携の先駆けとして高く評価されている。

ところでグルタミン酸は不斉中心を有するが、光学異性体であるD-グルタミン酸からはうま味は感じられない。D-アミノ酸のような非天然型のアミノ酸にはユニークな生理作用を示すものが多く、その選択的合成法を可能とする不斉合成は有機合成化学において重要な課題のひとつである。2001年の野依良治先生のノーベル賞受賞が示すように不斉反応は日本が世界をリードする分野であり、本研究科化学専攻においても小林修教授(有機合成化学研究室)のグループにより優れた不斉触媒が多数報告されている。



「雌雄性の進化」

野崎 久義 (生物科学専攻 准教授)

聖書によればイブはアダムのあばら骨から生まれたことになっているが、実際はどうだったのでしょうか。生物の生殖は、異なる細胞(配偶子)が合体(接合、受精)する“有性生殖”が真核生物で誕生して以来、接合する配偶子に大きさや形の差がない同型配偶(単細胞性藻類など)から配偶子の2型化(雌雄性の進化)がおき、メスの配偶子が少し大きな異型配偶(ハネモなど)、そしてさらに大型で運動能力のない「卵」に小型で運動能力のある「精子」が受精する卵生殖(ボルボックス、高等動植物など)に進化したと古くから推測されていた。同型配偶の生物でも異なる性(交配型)の配偶子が接合するが、メスとオスの区別がつかないので、便宜的に異なる性をプラスとマイナスで表し、プラスとマイナスの性は実験的に交配させることで区別がつく。しかし、ごく最近

まで同型配偶のどちらの(交配型)がメスまたはオスに進化したのかは不明であった。

藻類では近縁な生物で同型配偶、異型配偶、卵生殖の有性生殖が認められるので雌雄性の進化の格好の材料と考えられていたが、性決定遺伝子が同定されていたのは同型配偶の単細胞性緑藻クラミドモナスだけであった。通常、クラミドモナスではプラスとマイナスの配偶子が接合するが、マイナスの突然変異体にはプラスの性の表現形(野生型のマイナスと性的反応をする)を示すものがあり、その原因が性決定遺伝子 *MID* (*minus dominance*) の欠損であった。すなわちマイナスの交配型を決めている *MID* 遺伝子が欠損すると交配型がプラスに転換するので、クラミドモナスの両交配型にプラスの性を表現する遺伝的な基盤があり、

これに *MID* が加わるとマイナスになると考えられていた。このことはプラスが性の原型であり、マイナスが性の派生型であることを意味する。

2006年12月にメスとオスの配偶子が分化したボルボックスの仲間(プレオドリナ)で、オスのゲノムに特異的な遺伝子(*OTOKOGI*)が発見され、その起源がクラミドモナスの *MID* 遺伝子と同じであることが明らかとなった。このことは、オスが性の派生型でありメスがプラスに相当する性の原型であることを示し、聖書とは逆でイブからアダムが生まれたことになる。*OTOKOGI* の発見は雌雄性の進化を遺伝子・ゲノムレベルで解明する研究の突破口となった。

本研究科では生物科学専攻進化多様性生物学大講座(筆者)でこのジャンルの研究への取り組みがなされている。



「南海トラフ」

木村 学 (地球惑星科学専攻 教授)

日本の紀伊半島沖や四国沖に広がる溝状の凹地のこと。深さは4,000 m程度であるが、日本海溝やマリアナ海溝と同じく、海洋底の岩盤(プレート)が日本列島の下へ沈み込んでいく場所である。他の海溝に比べて浅い理由は、海洋底の岩盤の年齢が若いことに加えて、1,500 m以上に及ぶ厚い堆積物が埋め尽くしていることによる。沈み込みの速度は年間4~6 cm程度である。

南海トラフでは100年から150年程度の間隔で、巨大地震と津波がくりかえされて来た。くりかえしの歴史の記録は、1300年以上に及んでおり、世界で最長の記録をもっている。前回の地震と津波は1944年の東南海地震と1946年の南海地震であり、

今世紀中に再度発生することが確実視されている。地球上の約4万キロにおよぶ海溝の中で、南海トラフのみが次回の発生に向けて世界でもっとも稠密な観測網が配置されている。

日米が主導し世界の27カ国が参加する統合国際深海掘削計画[Integrated Ocean Drilling Program (IODP), <http://www.iodp.org/>] は、日本が建造した世界初の海面下約10 kmまで掘削が可能な海洋研究開発機構所有の科学目的深海掘削探査船「ちきゅう」を用いて、南海トラフで地震を発生させるプレートの境界断層を掘削することを決定し、2007年秋よりを開始した。東京大学では、理学系研究科の地球惑星科学専攻・海洋研究所・地震研究所

の多くの教員がこのIODP計画に参画、海洋底の掘削により地球を探る研究に従事している。

これまでの地震の研究は、地震やその前後の地殻変動を、その原因となる地下深部の断層から遠くはなれた地点で観測し、断層のすべりの原因を推定することであった。医学に例えると、これまでの各種観測は、いわば体外表層から病気の原因を推定する間接診断に相当する。それに対してこのIODPによる計画は、生きている体内病巣患部を開いて直接診断を施すことに相当する。このまったく新しい科学の手法は世界に先んじてこの研究分野に飛躍的發展をもたらすと期待される。