

連載 理学のキーワード 第22回

※ 2009年9月号に掲載したキーワード「赤方偏移」の本文、第3段落3行目「赤方偏移約 10^{89} 」、および7行目「波長が 10^{90} 倍」は、それぞれ「赤方偏移約1089」、「波長が1090倍」が正しい表記でした。誤植を訂正し、お詫びいたします。



「星間塵」

尾中 敬（天文学専攻 教授）

夜空に輝く星々の間も永遠の虚無ではなく、ひじょうにわずかな量ではあるが、ガスと固体の微粒子からなる星間物質とよばれるものが存在する。天文学では星の間に存在するこれら固体の微粒子を、身の回りのゴミになぞらえて星間塵とよんでいる。星間塵は、最近話題になっている地球のまわりに漂っている人工衛星の残骸の人工のゴミとは別もので、自然の創造物である。星間塵は、遠くの星や銀河からの紫外線や可視光を吸収、散乱し、われわれにたどり着くことを邪魔する。

19世紀半ばにはすでにストループ（W. Struve）により、星間物質が星の光を遮っていることが示唆されている。しかしその後の研究で、星間塵は宇宙で核合成されている重元素の大部分を保持し、

星間空間のさまざまな物理および化学過程を通して宇宙の物質進化に重要な役割を果たしていることがわかってきた。紫外線や可視光を吸収した星間塵は、赤外線でその吸収したエネルギーを再放射しているため、赤外線のみでみた空は星間塵の光で満ちあふれている。遠くの銀河についても同様で、とくに星がさかんにつくられている銀河は星間塵に埋もれていることが多いため、可視光では見にくく、赤外線で見える。埋もれた宇宙の星の形成の歴史をひもとくためにも、星間塵の性質を知ることは重要である。

しかし星間塵については、驚くほどまだわかってないことが多い。おもには、石ころとすすのよなもの微粒子からできていると考えられているが、その本当の姿は完全には解明されていない。

0.1マイクロメートルより小さいものが多いと考えられていたが、最近の赤外線観測から1ナノメートル程度の巨大分子との境界にあるような有機物の星間塵も、多量に存在することがわかってきた。星間塵の本当の出自は不明で、その一生も解明されていない。超新星の爆発にともなう衝撃波により破壊される寿命は、数億年と見積もられている。他方、進化した星から流出するガスの冷却とともに固体微粒子がつくられる現象が観測されているが、これだけで破壊される量を補うには数十億年かかる。まだわれわれの知らないところで星間塵が生まれていることが予想される。

日本の「あかり」をはじめとした赤外線衛星の活躍により、星間塵の真の姿が解き明かされていくことが期待される。



「合成生物学」

田中 文昭（情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻 助教）

生物学や物理学の分野では、「生命とは何か？」という根源的な問いに答えるため、さまざまなアプローチで生命を解明しようとする研究が行われてきた。従来のアプローチでは、「個体→臓器→細胞→タンパク質→DNA・RNA」というように、生命システムを構成している部品の性質に遡って解明していくことで、生命システム全体の理解を目指すものであった。しかし、このような要素還元的アプローチだけでは、生命をつくるための部品の性質はわかっても、生命システム全体を理解することはできない。そこで、性質が明らかになったDNAや大腸菌などの生体部品を改変して組み合わせ、新規の生体高分子システムを構築することにより、生命システムへの

理解を深めようとする合成生物学が注目を集めている。

合成生物学のもっとも特筆すべき活動として、マサチューセッツ工科大学が主催している、iGEM（the International Genetically Engineered Machine competition）が挙げられる。iGEMは、いわば生物学版のロボットコンテストのようなもので、学生主体のチームがつくった生体高分子システムをさまざまな観点から競い合うイベントである。これまでに「〇×ゲームをプレイする大腸菌」や「大腸菌で作られた血液」などのユニークなものが発表されている。

iGEMで興味深い点は、発表された部品やシステムがweb上のデータベースに蓄えられ、公開されるということである。

これにより、有用な生体部品を万人が再利用することができ、より大規模な生体高分子システムを構築することが可能となる。実は、この手法は大規模なコンピュータプログラムを多人数でつくる手法と同じである。これは偶然の一致ではない。複雑で大規模なシステムを構築するためには、部品をモジュール化し、それらを共有・再利用するといった情報科学的な手法が強力な方法論となっているからである。

情報理工学系研究科の萩谷研究室では、生体部品だけでなく各種の実験技術やデータ解析の方法などもデータベース化し、web上で共有するための情報基盤システムの構築に向けて研究を行っている。



「月の海」

加藤 學 (宇宙航空研究開発機構 教授, 地球惑星科学専攻 兼任)

月表面の暗い部分を海 (マーレ, mare), 明るい部分を高地 (テラ, terrae) とよんだのは, 紀元1世紀頃のギリシャ人たちだといわれている。海は月全表面積の約35%を占めているが, 裏側では5%以下である。ガリレオが17世紀に望遠鏡を使って観測して海は平らであり, 高地は起伏に富んでいてと著書で述べている。アポロ計画で月に人間を安全に降ろすために行った先行計画で, 月の探査機による近接観測が始まった。アポロ計画で地球にもち帰られた岩石試料から, 海は玄武岩でできていることがわかった。溶岩(マグマ)が固まったものであり, 地球上で見られるものと大きな差はない。黒くみえるのは2価の鉄によるものである。

海はクレータ盆地に溶岩が噴出して窪みを埋めたもので, 表側ではその噴

出が35~25億年前に活発であったが, 10億年前くらいまでも続いた。海表面をよく見るとまだら模様であったり, クレータの数密度が同じ海でも領域ごとに異なったりしているのがわかる。噴出した時期が複数回に及んでいることやその時の溶岩の組成が異なっていることを示している。

では, その海の厚みはどんなものであるか。推定方法はさまざまであるが, 実測値といえるものはまだない。月のクレータの直径と深さの関係はおおよそわかっているため, 溶岩を満々と湛えている海の深さは形状から推測できる。また, 重い溶岩がクレータを満たしたことによってクレータ底中心部に圧縮, 周縁部に伸展が生じ, 応力の集中した場所に直線的な盛り上がり(リッジ)や

割れ目(リル)が生じている。その分布から重い溶岩の量(海の深さ)を推測する方法がある。表側の中心付近に見られる直径700kmの晴れの海では周縁部で1km, 中心部で6から8kmと見積もられている。月の溶岩の研究もアポロ計画以来活発になったものではあるが, まだ月の表側の表面が調査されたのみで裏側の海や地下の調査は始まったばかりである。裏側の最大の海であるモスクワの海の形成は「かぐや」の観測により35~25億年前まで続いたこと, この海の下の地殻の厚みがきわめて薄く, マントルがせり上がって来ていることもわかった。

筆者や新領域創成科学研究科の杉田精司教授らのグループが実施した月探査機「かぐや」の観測により, 新しい事実やサイエンスが明らかになってきている。



「有機触媒」

山下 恭弘 (化学専攻 准教授)

「有機触媒 (organocatalyst)」は有機分子触媒ともよばれ, 金属元素を含まず, 炭素・水素・酸素・窒素・硫黄などの元素から成り, 触媒作用をもつ低分子有機化合物のことを指す。この定義によると, 単純な有機酸や有機塩基をも含むことになるが, 最近の研究の流れから「有機触媒」は, おもに不斉合成を制御する光学活性な有機分子触媒を指す場合が多い。

自然界に存在する分子(おもに有機分子)には, 同じ組成であってもその鏡像を重ね合わせることができない構造をもつものがあり, これらの分子をキラルな分子(光学異性体)という。これらは物理的性質が似通っているため容易に分離できず, 片方の鏡像体(光学活性体)のみを得るにはこれらを選択的に合成することが必要である。この手法を不斉合成という。

最近, 医薬品等として用いられる化合物でも光学活性体のみを使用することが求められており, 本手法の重要性は高い。

このような光学活性体を効率的に合成する手法として, 触媒的不斉合成が挙げられる。これまでに, この手法ではおもに金属を含む不斉触媒を使用することが多かったが, 近年, 金属を含まない触媒が開発されてきている。これらを「有機触媒」とよぶ。「有機触媒」は近年の環境調和を目指す化学プロセス開発において, 有害な金属廃棄物を伴わない不斉触媒として注目を集めている。

「有機触媒」が大きく注目されるきっかけとなったのは, 2000年に報告された, 低分子天然アミノ酸のひとつであるプロリンを触媒として用いる不斉合成である。プロリンは安定, 安価, 安全であるのに

ひじょうに高い選択性を実現できることから, 実用性に優れた不斉触媒として大きな注目を集めた。この研究を機に, 金属を含まないさまざまな有機分子を不斉触媒として用いる研究が大きく発展した。本研究科化学専攻の小林修教授の研究室でも, 光学活性なスルホキシドやホスフィンオキシドを有機触媒として用いる検討がなされている。

不斉合成の研究では, これまでにさまざまな金属や配位子を駆使して高選択性を示す複雑な不斉触媒が開発されてきたが, そのいっぽうで, プロリンのようなありふれた天然アミノ酸が同様の高い選択性を示すという事実は, 試行錯誤をくりかえしてきた化学者にとって大きな驚きであった。やはり自然はすごいと言わざるを得ない。



「重力波」

坪野 公夫 (物理学専攻 教授)

重力波は1916年にアインシュタインが一般相対論から導いた重力の波動解である。一般相対論によって、重力は時空の幾何学に還元された。つまり重力は、時空の曲がりとして表現されることがわかった。重力をつくり出すのは星などの質量であるが、たとえば連星のようにその質量分布が時間的に変化すると、その周りの時空の曲がりも時間的に変化する。この時空の変化が四方八方に光の速度で広がっていくのが重力波である。重力波の存在は連星パルサー PSR1913+16 の軌道変化の観測により初めて確認された(1993年ノーベル物理学賞)。しかし重力波の直接検出にはいまだ成功していない。

連星中性子星は、公転運動にともなう重力波の放出によりエネルギーを失い、最終的に衝突・合体する。衝突直前に強く特徴的な重力波を放出するが、この波形は十分な精度で計算することが可能

なため、重力波を雑音と区別する手掛かりとなる。そのほかブラックホール同士の衝突や、超新星爆発にともなう重力波など、さまざまな重力波源が考えられている。重力波研究の最終的な目標は、重力波を通して宇宙の始まりを見ることである。重力波の相互作用がきわめて弱いという性質のため、初期宇宙の密度揺らぎによって生じた重力波もまだ残っているはずである。ビッグバンから 10^{32} 秒後のインフレーションの様子が重力波によって解明されるかもしれない。これは電磁波では決して見ることのできない世界である。

重力波の検出実験は1960年代から始まり、1990年代後半からは巨大なレーザー干渉計を用いた検出方法が主流となった。2000年には日本のTAMA300重力波検出器が完成し、世界に先駆けて観測を始めた。その後、アメリカのLIGO、ヨーロッパのVIRGOやGEOが

相次いで建設され、世界的な競争が続いている。日本の次期大型レーザー干渉計 LCGT 計画が実現すれば、重力波の検出は確実になるものと期待されている。

宇宙空間を利用した重力波検出の研究も始まり、NASA/ESAが進めるLISA計画や日本独自の重力波衛星計画DECIGOも本格的に開発研究が行われるようになった。DECIGOの前哨衛星としてDPF(DECIGO pathfinder)が提案されているほか、2009年には技術テストのための小型衛星SDS-1が打ち上げられ、搭載されたSWIM μ ν 装置により、軌道上での運用およびデータ取得に成功している。

理学系研究科では筆者の研究室が地上および宇宙空間での重力波検出実験のための技術開発を進めている。そのほか東京大学では、宇宙線研究所、新領域研究科、地震研究所で重力波検出の実験的研究が行われている。



「群の表現」

松本 久義 (数理科学研究科 准教授)

さまざまな音の中で、音叉の出す音は波形が単純な正弦曲線になり、もっとも単純なものである。さまざまな音の高さの音叉を同時に鳴らすことで、複雑な波形の音を近似していくことができる。これを支える数学的原理が、周期関数は三角関数による級数で表せるという、フーリエ(Fourier)級数の理論である。複雑なものを単純なものに分解して考えることができるので、たいへん役に立つ理論である。この背景には(円周の)回転群の対称性がある。

群というのは、対称性を記述する数学的構造である。円周は回転対称性をもっているが、一般に対象が対称性をもつことは、群のその対象への作用というこ

とで数学的には表される。その作用をよりわかりやすいベクトル空間への作用で置き換えて考えると、自然に「群の表現」という概念が出てくる。そのさい重要なのは、既約表現という基本的な表現を理解することと、応用上でくる重要な表現を既約表現によって分解することである。フーリエ級数論は、円周上の関数のつくる空間を回転群の既約表現に分解することに他ならない。

群の表現の概念自体は19世紀後半にフロベニウス(F. G. Frobenius)によって導入され、20世紀前半にワイル(H. Weyl)によってコンパクト群の表現論が確立され、その後の大発展の基礎が築かれた。その後「群の表現論」は数学の

みならず物理・化学など自然科学のさまざまな分野で応用をもつことが認識され、一大分野が形成されている。たとえば、数論において非可換な類体論の確立が課題であるが、ラングランズ(R. Langlands)らによる有力な定式化は、数論的な群の表現論そのものである。群の概念も一般化され、近年は量子群などの表現も盛んに研究されている。筆者は連続的な対称性を記述するリー群の表現論を研究している。たとえば2行2列からなる可逆行列のなす(見掛けは)簡単な群の表現論は古典的だが、きわめて豊かな内容をもっているのに驚かされる。表現の研究とは対称性の研究そのものといえその深さ、美しさは私を魅了してやまない。