



「プログラム意味論」

蓮尾 一郎 (情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻 講師)

プログラムを書いたら、とりあえず手頃な入力に対して結果が期待通りか確かめるだろう。これをプログラムのテストとよぶ。

しかし人命がかかっているような場合には、テストよりも気合の入った品質保証をしたくなる(試した以外の入力についてはどうなの?)。この気合を突き詰めたのが、プログラムの正しさに対する**数学的証明**である(プログラム検証とよぶ)。ともかく目標は、プログラムの正しさの証明を、あたかも幾何学の証明のように、与えることである。

プログラムを数学的議論の土俵に乗せてやるためには、プログラムの実行過程・実行結果・振る舞いを、数学的に扱える形で表現してやる必要がある。これがプログラムの**意味論**(セマンティクス)である。つまり、「このプログラムの意味

は何か?」を論じる営みだ。

本当に現実に沿うならば、プログラムの振る舞い・意味は「実行時のiMac内部の電圧変化」だ。しかしこれでは複雑すぎて手に負えないので、もっと単純な**数理モデル**を考える。プログラム意味論の分野では、書き換え系、順序集合…とさまざまなモデルが用いられる。ともかく良い数理モデルとは、単純で、一般的で、本質をついていて、よって数学的に美しく、しかもプログラム検証のために役に立つようなものである。このような、情報学的現象と数学の境目こそが、情報科学の中でも「セマンティクス屋さん」とよばれるわれわれの活躍(?)の場だ。

そもそも数学の歴史をひもとくと、物理学(自然現象の数理モデルをつくる営みだ)と、数学が手を携えて発展してき

た。これに対してプログラム意味論は、情報科学的現象とともに発展するような、新しい数学の方向性を示唆していないだろうか。前者の「数理物理学」は(少なくとも初期においては)解析学を中心に発展してきたのに対し、後者の「数理情報学」では代数学と数理論理学が大きな役割を果たす。

筆者らは最近、2つの新しい計算パラダイム—具体的には量子計算とハイブリッドシステム(デジタルデータと物理的なアナログデータが混在する)—に対して、新しい数理モデルを与えた上で検証手法に結実させた。このさい、代数学(とくに圏論)などの抽象数学のコトバの一般性が、たとえば古典計算・量子計算に共通する本質を抽出するためにフル活用されている。



「アクシオン」

蓑輪 眞 (物理学専攻 教授)

アクシオン(axion)は存在が予言されながら未発見の素粒子で、わずかに質量をもつと考えられ、暗黒物質の候補となっている。連続的対称性の破れとともに発生する南部・ゴールドストーンボソン(理学部ニュース2006年5月号「理学のキーワード第1回」参照)の一種である。素粒子の弱い相互作用では粒子と反粒子の入れ替えについての不変性(CP不変性)が保たれていないことが分かっている(小林・益川理論)。原子核をまとめている力、すなわち強い相互作用においても、それを記述する量子色力学(QCD)の基礎方程式には、理論では決まらない任意の「角度」 $\bar{\Theta}$ に比例してCP不変性を破る項が含まれている。と

ころが実験的には、強い相互作用においてはCP不変性が良い精度で保持されており、理論と実験が矛盾することから、「強い相互作用のCP問題」とよばれている。1977年にR.ペッチャイ(Roberto Peccei)とH.クイン(Helen Quinn)は、「角度」変数 $\bar{\Theta}$ を素粒子の場に関係する量とみなしてそのまわりの回転対称性を要請した上で、その対称性が破れて自然に安定点 $\bar{\Theta}=0$ に落ち着くことで強い相互作用をCP不変に保つ仕組みを提唱した(Peccei-Quinn機構)。この対称性の破れに対応して南部・ゴールドストーンボソンの存在が同時に予言されて、アクシオンとよばれている。

アクシオンは強い磁場とレーザー光

によりアクシオンと光子の結合を調べる非加速器素粒子実験によって精力的に探索が行われているが未発見である。また、身の回りに希薄な密度で充満し、宇宙の暗黒物質を形成していると思われるアクシオンを、強力な磁場中でマイクロ波に変換してとらえる実験が、アメリカおよび京都大学でそれぞれ行われている。筆者の研究室では、太陽の中で発生すると考えられるアクシオンを超伝導磁石による専用の望遠鏡(愛称Sumico)で探索する実験が行われている(理学部ニュース2004年7月号「望遠鏡ものがたり4」参照)。



「すばる望遠鏡」

本原 顕太郎 (天文学教育研究センター 准教授)

2011年現在、世界では口径8mを超える大型光学赤外線望遠鏡が13台、稼働している。ハワイ島マウナケア山(標高4200m)に設置されたすばる8.2m望遠鏡(以下すばる)もそのひとつで、1998年の初観測から今日まで、日本の光学赤外線天文学の研究を支える屋台骨である。それまで日本最大だった岡山観測所の1.9m望遠鏡に比べて、実に20倍の集光力をもつこの望遠鏡は、日本の光赤外線天文学のレベルを世界トップクラスに引き上げる原動力となった。

すばるの観測時間の15%は、マウナケア山頂にひしめく天文台群を管理するハワイ大学に提供されるが、残りの大部分(年間およそ250夜)は全国共同利用に供され、世界中からの観測提案を受け付けている。高い時は5倍を超える競争率の審査を経て採択された観測提案にもとづき、太陽系天体から星惑星形成、銀

河形成進化、宇宙論まで、幅広い分野の観測がほぼ毎晩、行われている。ただマウナケアといえども晴天率は70%不足で、天候不順によって観測できなかった場合は、次期以降に改めて観測提案を提出し直さないといけない厳しい世界でもある。

すばるは4つの焦点をもち、そこにさまざまな観測装置を設置することで、可視光から波長20 μm の中間赤外線までの幅広い波長で、多彩な観測を行うことができる。しかし何といても最大の特徴は、直径30分角(満月のサイズ)の広い視野をもつ主焦点である。ここに設置されている可視光広視野カメラのシュプリーム・カムは、天文学専攻の岡村定矩教授のグループにより開発され、初観測から12年経った現在も、その良好な結像性能と相まって、他の8mクラス望遠鏡の追従を許していない。このカメラに

より、2006年には当時としては最遠方の129億年彼方にある銀河(IOK-1)が発見されるなど、とくに初期宇宙の研究に大きな進展をもたらした。

この特長をさらに極めるため現在、視野を10倍近く広げ、直径1.5度角(満月9個分)の視野をもつ次世代の広視野カメラ、ハイパー・シュプリーム・カム(HSC)が国立天文台を中心としたチームにより開発されており、本研究科からは天文学専攻(嶋作一大准教授ら)、物理学専攻(須藤靖教授、相原博昭教授ら)、ビッグバン宇宙国際研究センターなどが参加している。このカメラで遠方銀河などの大規模サーベイ観測を行い、宇宙の加速膨張を起こしていると考えられている暗黒エネルギーを測定するプロジェクトが計画されている。



「隕石」

杉浦 直治 (地球惑星科学専攻 教授)

隕石は空から降ってくる石のことでほとんどは小惑星から来るが、中には月や火星から来るものもある。空から石が降ってくることは、聖書には書かれていないので、中世のヨーロッパでは隕石の存在は否定されていた。そのために、隕石の存在が一般に認められ、研究が行われるようになったのは1803年に大規模な隕石シャワー(大きな石が空気抵抗で破壊されてたくさんの小さな隕石として降ること)がフランスで観測されて以降のことである。隕石の研究のためには、多くの、良い隕石試料をつかう必要がある。そのために隕石の研究は大英博物館(大英帝国の華やかだった頃に、世界中から隕石を集めた)やアリゾナ大学(アリゾナの砂漠から多くの隕石を回収した)で盛んである。日本も1970年代以

降、国立極地研究所が南極で隕石を収集したので、現在ではたくさんの隕石を保有し、それを使って質の高い研究を行っている。現在ではサハラ砂漠からも貴重な隕石が回収されている。

小惑星は地球のような惑星に比べると、その名の通り小さい天体である。天体の冷え方はその表面積と体積の比によって決まるので、小惑星は地球のような惑星に比べると早く冷える。ほとんどの小惑星は今から45億年前には冷たくなって、それ以降は変化していない。そのために隕石を分析することによって、われわれの太陽系がいつどのようにして形成したのかを知ることができる。現在では放射性元素の崩壊を使った年代測定により、太陽系は45.682億年前に形成が始まり、その後300万年ほどの間に

ほとんどの小惑星が形成(集積)したことが解っている。しかしまだ解らないこともたくさんある。始原的な(熔けていない、堆積岩のような)隕石にはコンドルールとよばれる球状のケイ酸塩がぎっしりと詰まっている。これがどのようにしてできたのかは隕石研究の歴史を通じて最大の謎であるが、まだ解明されていない。地球惑星科学専攻宇宙惑星グループでは筆者と比屋根准教授が小惑星起源の隕石を使って太陽系の歴史を明らかにする研究をおこない、三河内准教授が火星起源の隕石を使って火星の歴史を解明する研究をおこなっている。関連した研究は地球惑星科学専攻システム科学グループでもおこなわれている。



「発光イメージング」

竹内 雅宣 (化学専攻 助教)

自然界には、ホタル、コメツキムシ、ウミボタル、夜光虫のように、自ら光を産み出し、その生存に利用しているさまざまな生物が存在する。これらの生物が光を産み出す分子機構は、古くから、多くの化学者を魅了し、その探究心を掻き立てて来た。1950年代から始まった物質レベルでの研究により、発光生物内では、ルシフェラーゼとよばれる酵素タンパク質が、ルシフェリンと総称されるさまざまな発光物質から光を放つ化学反応を触媒することが明らかにされた。その後の構造生物学の進展は、その反応の本質が、ルシフェラーゼの酸化反応により、発光基質ルシフェリンより生成された励起状態のオキシルシフェリンが、分解により基底状態に戻る際にきわめて高い光エネルギーを放出することであることを解明した。

近年では、生物発光は、その反応機構の解明が研究対象とされるだけではなく、生物現象の可視化にも積極的に応用され、その研究の進展に大きく貢献するようになって来た。発光イメージングとよばれる、この解析手法は、ルシフェラーゼの発光反応を利用し生物現象を可視化するものであり、生物試料に対する励起光の照射を必要としない。そのため、この手法は、皮膚組織などで覆われ、励起光の透過効率が著しく低下する、動物個体深部における解析を可能とした。また、励起光照射による生物試料への損傷を抑えることができるため、長時間観察も可能となった。また、発光反応は、高いシグナル／ノイズ比と優れた定量性をもつため、ルシフェラーゼ遺伝子をレポーター遺伝子として用いた発光イメージングでは、遺伝子発現を定量的かつ経時的

に検出することが可能となった。

現在では、ルシフェラーゼの構造情報を利用したまったく新しい解析手法も加えられ、発光イメージングはさらなる発展を遂げている。化学専攻の小澤研究室では、分割型ルシフェラーゼの再構成システムが開発され、タンパク質間相互作用の新しい発光検出法が提示されている。このシステムは、分断により発光活性を失ったルシフェラーゼのタンパク質断片が、任意の相互作用に依存して再結合し、ルシフェラーゼ分子が再構成され、発光能が回復するという検出原理に基づいている。このシステムを利用した発光イメージングは、自家蛍光の強い動物個体内などにおいて、タンパク質間相互作用や生体分子を可視化定量検出できる有用な手法として期待されている。



「Hox クラスタ」

赤坂 甲治 (臨海実験所 教授)

動物の体の前後軸に沿った構造のパターン形成を指令する一群の遺伝子であり、個々の遺伝子は homeobox とよばれる特有の DNA 塩基配列をもつ。多くの動物では、*Hox1* ~ *Hox13* が、染色体上に、番号順に一列に並んでいる。また、発現する（遺伝子が働く）領域も、番号順に、体の前方から後方に並んでおり、*Hox1* は体の前方領域の形成、*Hox6* は体の中央部、*Hox13* は尾部の形成というように、体の前後軸に沿って、それぞれの領域の形態に特徴を与える働きをもつ。Hox クラスタ遺伝子は、染色体上の並び順と、体の前後軸に沿う発現領域が一致するコリアリティーがある。コリアリティーは、5億年以上前の先カンブリア紀に分岐した旧口動物のハエと、新口動物のマウスの両方で示さ

れたことから、すべての多細胞動物に共通すると考えられてきた。イソギンチャクなどの単純で原始的な刺胞動物にも、遺伝子の数は少ないが、Hox クラスタが存在する。進化の過程で、DNA の複製・分配にミスが生じ、遺伝子が重複して Hox クラスタ遺伝子の数と種類が増え、複雑な形態を獲得してきたと考えられている。しかし、新口動物に属し、ハエよりはるかにヒトに近いウニやホヤは、成体の前後軸が不明であり、頭部もないため、疑問に思われてきた。とくに、ウニやヒトデが属す棘皮動物は、星形の5放射相称の体制をもち、その独特の形態を生み出す仕組みに興味を持たれている。近年のゲノム解析により、ウニでは *Hox1* ~ *3* が後方に転位していることが明らかになり、頭部の消失、脳・神経節

の消失との関連が示唆された。ホヤもクラスタ構造に大きな変化があることが示されたが、ホヤより脊椎動物から遠縁とされるナメクジウオでは、クラスタ構造が保存されており、明瞭な前後軸がある。ヘビや、寸詰まりのフグの特徴的な形態も、Hox クラスタ遺伝子の関与が示されている。Hox クラスタ構造の変化は、体の大規模な構造の進化と密接に関連する。臨海実験所の近藤真理子准教授・筆者のグループは、ウニ、ナマコや、棘皮動物の祖先的形質を継承し、神経節（脳?）をもつウミシダを対象に、棘皮動物の体軸と、特有の5放射構造の形成にかかわる Hox クラスタの働きについて研究している。