



「環付空間」

志甫 淳 (数理科学研究科 准教授)

環付空間 (かんつきくうかん) とは位相空間 (開集合の概念が適切に定まっている集合) X と構造層とよばれる X 上の可換環の層 \mathcal{O} との組 (X, \mathcal{O}) のことである。層の正確な定義は述べないが、 \mathcal{O} を定めることは、 X のすべての開集合 U に対して「 U 上の関数全体のなす環」 $\mathcal{O}(U)$ を適切に定めることにほかならない。

たとえば X が C^∞ 級多様体のとき、 X の開集合 U に対して $\mathcal{O}(U)$ を U 上の C^∞ 級関数全体とすると (X, \mathcal{O}) は環付空間となる。 X が複素多様体のとき、 X の開集合 U に対して $\mathcal{O}(U)$ を U 上の正則関数全体とすると (X, \mathcal{O}) は環付空間となる。 C^∞ 級多様体の研究では、多様体を位相空間としてのみ考えるのではなく、その上の C^∞ 級関数や、それらの間の

C^∞ 級写像を考えているので、実際は環付空間としてとらえ、研究していることになる。複素多様体についても同様である。このように数学の研究の至る所に環付空間は自然に現れているが、この概念の抽出が大きな威力を発揮したのは A. グロタンディーク (A. Grothendieck) による「代数幾何学原論 I」(1960 年) においてであろう。この著作においては、任意の可換環に対してその素イデアル全体のなす集合にザリスキ位相という位相と適切な構造層を入れることによってアフィンスキームなる環付空間が定義されている。さらに局所的にアフィンスキームと同型な環付空間としてスキームが定義され、これをもとに現代の代数幾何学、数論幾何学の基礎となる理論が構築された。

p 進数 (理学部ニュース 2008 年 5 月号「理学のキーワード第 13 回」参照) の世界における複素多様体の概念の類似として p 進解析空間という環付空間が J. テイト (J. Tate) により 1962 年に定義された (論文出版は 1971 年)。ただし、ここでは通常の位相の代わりにグロタンディーク位相なるものを考える必要がある。V. ベルコビッチ (V. Berkovich), R. ヒューバー (R. Huber) らによる一般化もある。筆者は p 進解析空間上の p 進微分方程式系や、 p 進解析空間を通じて構成される標数 p (1 を p 回足すと 0 になる世界) のスキームの p 進コホモロジー理論について研究を行っている。



「GPGPU」

須田 礼仁 (情報理工学系研究科 教授)

GPGPU は General Purpose computing with Graphic Processing Unit の略で、本来グラフィックス専用のプロセッサである GPU を汎用計算に活用するものである。GPU はグラフィックスに特化して、汎用の CPU より格段に高い性能を実現している。その高い性能をグラフィックス以外の計算にも使おうという試みは以前からあったが、近年 GPGPU のためのプログラミング言語が提供されるようになり、さまざまな分野で急速に利用が広がっている。

GPGPU の魅力は何とんでもその性能である。執筆時点で HPC 用途に広く使われている C1060 という GPU は、単精度浮動小数演算のピーク性能が 933Gflops ある。これはスパコン 1 ノー

ド 16 コアの性能のおよそ 4 倍である。メモリバンド幅でも C1060 の 102GB/s はスパコン 1 ノードの 2 倍以上である。CPU-GPU 間接続も 8GB/s で、スパコンのノード間接続より速い。そして価格はスパコン 1 ノードが数百万円以上するのに対して、C1060 は 10 万円から 20 万円程度であり、最近はさらに高性能、低価格の GPU も登場している。高性能を必要としている多くのユーザが GPU に興味をもつのは当然である。

GPU の弱点はいくつかある。まず、メモリが 4GB しかない。また、コア内の共有メモリは 16KB で、これは L1 キャッシュしかない CPU にほぼ等価である。また、GPU は 32 ウェイの SIMD 演算器をもつ 30 個のコアからなり、ひ

じょうに高い並列性をもった計算でなければ十分な性能は出ない。GPGPU のプログラミング言語は難しくはないが、既存のプログラムがそのまま動くわけではない。

筆者の研究室では、科学技術計算のほか、探索問題や文字列間距離計算などに GPU を用いて高い性能を達成してきた。キャッシュが効かないような問題では、CPU に比べ GPU が数十倍高速という例もある。逆に、並列度が低く分岐が多い問題では GPU の性能は CPU には遠く及ばない。すなわち、問題ごとに CPU と GPU を使い分ける必要がある。このため、高性能なプログラムが容易に記述できるような新しい枠組みが求められている。



「暗黒エネルギー」

横山 順一 (ビッグバン宇宙国際研究センター 教授)

暗黒エネルギー (ダークエネルギーともよばれる) とは、宇宙の膨張を加速するものになる未知のエネルギーのことである。これは、引力である重力によって宇宙が潰れずに静的状態を保つために、アインシュタインが導入した宇宙項とよく似た性質をもっている。

1929年にハッブルによって宇宙膨張則が発見され、宇宙は時間変化していることが明らかになると、宇宙項は無用の長物として顧みられなくなった。最初に大きな膨張速度を与えられれば (これがビッグバンである)、宇宙は銀河や暗黒物質どうしの重力によって減速しながらも、潰れずに膨張を続けられるからである。

ところが1998年、アメリカの2つの観測グループがあいついで現在の宇宙が加速的な膨張をしていることを発見した。彼らはいずれも、絶対等級すなわち

本来の明るさが推定可能なIa型超新星の見かけの明るさと赤方偏移の関係から、宇宙が加速膨張していることを結論した。見かけの明るさから超新星までの距離がわかり、赤方偏移から超新星爆発が起こった時の宇宙の大きさと現在の大きさの比がわかるため、そこから宇宙の大きさの時間変化が求められるのである。

この結果は、宇宙が膨張しても密度の減らない未知のエネルギーによって満たされていることを示唆する。この状態では宇宙が大きくなればなるほど宇宙の全エネルギーは大きくなるので、このエネルギーは負の圧力をもっていることになる。これが暗黒エネルギーである。

その正体は、宇宙項と同じく、単なる真空のエネルギーであるかもしれないし、100億年の時間スケールでもほとんど変化しない何らかのスカラー場のポテン

シャルエネルギーであるかもしれない。

別の可能性としては、宇宙膨張を規定する重力理論が一般相対性理論からずれていたたり、膜模型などの高次元宇宙論の名残が実効的な暗黒エネルギーを生み出しているシナリオなどを考えることができる。

暗黒エネルギーは現在、宇宙のエネルギーの約72%を占めるが、その性質を規定するパラメタとしてもっとも重要なのは、圧力とエネルギー密度の比を無次元量で表した状態パラメタ w である。超新星のほか宇宙背景放射や大規模構造を用いたこれまでの観測結果は、宇宙項や真空のエネルギーを意味する $w=-1$ と無矛盾であるが、そこからのズレを探る研究も活発に行われている。



「ブラックホール」

牧島 一夫 (物理学専攻 教授)

ニュートン力学では、1個の質点を作る重力ポテンシャルの深さは、質点からの距離に逆比例する。よって、その中で円運動する物体の速度は、質点に近いほど大きく、やがて光の速度に近づくため、一般相対論が必要となる。そこでアインシュタイン方程式を解くと、質点をとり囲む、ある特殊な面が現れる。これが「事象の地平線」で、それより内側の領域では、物体だけでなく、光さえも中心に引き込まれ、地平線の外へ逃げ出せない。これがブラックホール (BH) の概念であり、1967年にホイーラー (John Wheeler) が名付けたとされる。

事象の地平線の半径は、中心の質量に比例し、たとえば太陽の10倍の重さの質点では、半径30kmである。重い星が進化すると、中心部は自分の重力でしだいに収縮し、ついには自らの事象の地

平線より小さくなってBHとなり、星は超新星として「死に花」を咲かせると考えられる。

BH自身は光さえ逃さないが、そこに吸い込まれるガスは事象の地平線の外で、光、紫外線、X線などを放射するので、それを手掛かりにBHが検出ができる。小田稔らは1971年、米国の「ウフル」衛星の観測により、「はくちょう座 X-1」とよばれるX線星がブラックホールかもしれないと指摘した。その後の研究で、この天体はじっさいBHと大質量の星とからなる連星で、BHが相手の星からガスを吸い込むさいX線が放射されるとわかった。BHと認定された、第一号である。

その後のX線観測により、このようなBHが銀河系の中に、30個ほど発見されている。さらに宇宙にあまた存在する銀河は、その中心に1つずつ、太陽の

100万倍～10億倍の質量をもつ巨大BHを宿していることが知られているが、それらの成因は今なお謎である。これら2種類の間にあたる質量をもつ「中質量BH」が存在する可能性も浮上している。これらのBHはいずれも、質量、角運動量、電荷という「三本の毛」のみもつと考えられ、角運動量を測定する努力が続いている。

本研究科の天文学専攻では、可視光による巨大BHの観測的研究が行なわれ、物理学専攻 (牧島・中澤研究室) では「すざく」衛星などを用い、BHのX線観測が進められている。さらにビッグバン宇宙国際研究センターでは、宇宙初期に作られた可能性のあるミニブラックホールの研究も行なわれている。

「宇宙プラズマのその場観測」

平原 聖文（地球惑星科学専攻 教授）

宇宙を体積という視点で見ると、天体そのものが占める領域はごくわずかである。比較的多くの天体から構成される太陽系の場合でさえ、太陽・惑星固有の体積を合計しても全体の 10^{-11} を下回り、ほとんどは宇宙空間である。そしてその至る所に宇宙プラズマが分布している。プラズマとは電気的中性気体ではなく、たとえば中性の原子・分子から電子が飛び出し、原子・分子（正）イオンと電子が混在している電離気体であり、物質の第4の状態とも言われる。また、無衝突系、非平衡系、無重力系であることも多く、太陽系のみならず、宇宙における普遍的な物質形態であり宇宙空間の常態である反面、日常的な物質観とは異なる様相を呈する。この宇宙プラズマが地球・惑星周辺の宇宙空間や惑星間空間、銀河系宇宙、それに超新星やブラックホール

などの天体の周辺においても、さまざまな現象を引き起こしていることが20世紀後半からの理論的・観測的研究により明らかとなってきた。これらの研究において「その場観測」という手法は多くの知見をもたらしてきた。その場観測とは、現象が起こっている現場において、そのまま直接的な観測を行うことであり、観測目標から離れた地点において電磁波などで観測を行うリモートセンシングの対義語といえる。宇宙プラズマ粒子の場合、宇宙空間に計測器をもち出し、計数・エネルギー分析・飛翔方向弁別を行うことを指す。地球・惑星周辺の宇宙空間には、エネルギーに6桁以上の違いがある宇宙プラズマが同時・同領域に存在しており、電磁場・プラズマ波動を介して複雑に相互作用している。それらの理解には、eV～MeVのエネルギー帯を網羅する計

測と同時に、電磁場・プラズマ波動の計測も加えた統合的なその場観測が必要となる。そのため通常は、種々の計測器を搭載した観測ロケットや人工衛星が使われ、宇宙プラズマで満たされた領域に投入され多面的な観測がなされる。室内プラズマ実験とは異なり、広大な宇宙プラズマ領域に人工物（宇宙機）が存在しても、宇宙プラズマそのままの自然状態を乱すことは少ないので、宇宙プラズマのその場観測は、宇宙における普遍的物質のありのままの状態を観測できる唯一の手段である。いっぽう、宇宙機が到達できる領域が限定される、宇宙機的位置における物理量しか取得できない、などの欠点もある。

本研究科では、地球惑星科学専攻の複数の研究室で、JAXA宇宙科学研究所と協力し、研究が行われている。

「オーガナイザー（形成体）」

平良 眞規（生物科学専攻 准教授）

脊椎動物の胚発生の初期において中心的な役割を担う領域がオーガナイザー（形成体）である。真骨魚類の盾（シールド）、両生類の原口背唇部、鳥類のヘンゼン結節、哺乳類の結節（ノード）がそれに相当する。オーガナイザーは、たとえば隣接する外胚葉に対して神経組織を、中胚葉に対しては筋肉を「誘導」するなど、いわば胚発生における司令塔としての役割をもつ。誘導とは周りの組織に働きかけてその発生運命を決めることであり、それを行う因子を「誘導因子」という。

オーガナイザーは、ハンス・シュペーマン（Hans Spemann）とヒルデ・マンゴールド（Hilde Mangold）によって、イモリ胚を用いた原口背唇部の移植による二次胚誘導実験により見出された（図）。1924年に発表された彼らの論文は、胚発生のしくみを探る「実験発生学」の興隆をもたらし、その潮流は現在の発生学の発展にも大きく貢献した。正に発生学における金字塔である。しかしその

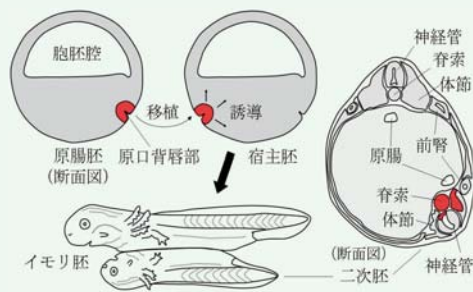
論文が出版された年、若き女性研究者マンゴールドは不慮の事故死をとげてしまう。1935年、シュペーマンは「胚発生におけるオーガナイザー作用」でノーベル生理学・医学賞を受賞した。

オーガナイザーの発見は多くの発生学者を刺激し、その後さまざまな研究が行われたことで、発生学の基本的な概念は確立した。しかし誘導因子の実態は明らかになることはなく、オーガナイザー研究はしだいに下火となっていく。そして1990年代前半、アフリカツメガエル（*Xenopus*）を用いて、オーガナイザーが初めて分子レベル・遺伝子レベルで明らかになった。オーガナイザーに特異的に発現し二次胚を誘導する遺伝子として、「ホメオボックス遺伝子（転写因子）」のGoosecoidとLim1（Lhx1）が、誘導因子としてNogginとChordinがまず見いだされた。その後、オーガナイザーに特異的に発現する多数の転写因子や誘導因子が発見さ

れることとなる。

さて、オーガナイザーにおける遺伝子制御ネットワークはどのようになっているか、また進化的にオーガナイザーの起源はどこまでさかのぼれるであろうか。これらの課題に生物科学専攻・分子生物学研究室ではLim1遺伝子を中心に取り組んでいる。

なお、オーガナイザーは発見者の名に因み、シュペーマン・オーガナイザー、あるいはシュペーマン/マンゴールド・オーガナイザーとよばれる。



オーガナイザーの移植実験。移植された原口背唇部(赤で示す)は主として脊索に分化するが、宿主胚に種々の組織を誘導することで、二次胚をつくり上げる。