



「シンプレクティック幾何学」

今野 宏 (数理科学研究科 准教授)

19世紀の数学者ハミルトンは、古典力学の運動方程式を位置と運動量を座標とする空間（相空間）上の方程式として定式化した。この相空間のもつ構造を抽象化したものがシンプレクティック構造である。長い間シンプレクティック幾何は純粋な幾何の問題というよりはむしろ微分方程式の問題と関連して発展してきた。ところが最近の30年ほど、物理学と幾何学との結びつきが深くなるとともに大きな変貌をとげた。

古典力学における運動量保存則などの枠組みは、シンプレクティック幾何において運動量写像として抽象化されて、シンプレクティック構造をもつ空間（シンプレクティック多様体）の対称性を調べる手段を与えている。シンプレクティック多様体が対称性をもつとき、シンプレクティック商とよばれる別のシンプレクティック多様体が構成される。一方、代数幾何においても対称性をもつ

空間から別の空間が構成される。この2種類の構成法は全く異なっているが、幾何において重要な空間はしばしばこの2通りの方法で構成される。その結果、ひとつの空間をシンプレクティック幾何と代数幾何という全く異なる側面から調べることが可能になり、深い結果が得られる。また、ハミルトンの運動方程式が正準量子化と関わるように、シンプレクティック幾何学において幾何学的量子化、変形量子化など量子化の幾何学的側面が研究されている。

また、M. グロモフ (Mikhael Gromov)、A. フレアー (Andreas Floer) により擬正則曲線の手法が導入されて、シンプレクティック幾何学は一変した。擬正則曲線とは、曲面からシンプレクティック多様体へのある写像のことで、この手法によりシンプレクティック多様体の大域的な性質が次第に明らかになってきた。近年この方法を組織的に用いることに

より、シンプレクティック多様体に対して、深谷圏とよばれるある代数系が構成された。これは素粒子物理学の弦理論の数学版とでもいうべきものである。20年ほど前に弦理論においてミラー対称性という現象が発見されたが、その後数学において M. コンツェビッチ (Maxim Kontsevich) によりホモロジー的ミラー対称性予想として定式化された。これは、ある多様体のシンプレクティック幾何（深谷圏）と別の多様体の複素幾何から構成されるある代数系が等価であるという、という驚くべき壮大な予想で、次第にその様子が解明されつつある。

本研究科では、細野忍准教授はミラー対称性を、筆者はシンプレクティック商を研究している。古田幹雄教授の最近の研究は幾何学的量子化に関連したものであるなど、シンプレクティック幾何学に関わる研究が数多くなされている。



「領域特化言語」

松田 一孝 (情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻 助教)

領域特化言語 (Domain Specific Language) は、特定の問題領域に対するプログラムを書くために設計されたプログラム言語である。

プログラムを書くことは難しく、しばしば不具合 (バグ) を埋めこんでしまいがちである。しかし、現在ではソフトウェアはPCや携帯電話はいうにおよばず、医療機器や交通システム・機関、工場などのいたるところで使われており、その不具合はたいへんな問題を引き起しかねない。実際、過去にソフトウェアの不具合により、人命が失われたり、数億ドルもの損害が出たりした例がある。

では、どうやったら不具合の少ないプログラムを作ることができるだろうか？ひとつの解答は、プログラムを書かないことである。冗談ではなく、通常プログラムを作るときは本筋部分以外に、解決したい問題とは関係ないさまざまなコードも書く必要がある。メモリ管理、効率的なデータ構造やアルゴリズム…本当に

それらは、個々のプログラマが考え書かなければならないのだろうか？

ひとつの解決策は領域特化言語の利用である。適切に設計された領域特化言語を利用すれば、メモリ管理などの低レベルな部分や、その問題を解くための効率的なデータ構造やアルゴリズムについて、プログラマが気にする必要がなくなる。それらは、領域特化言語の処理系の責任である。たとえば、データベース問合せのためのSQLは領域特化言語の例として挙げられるだろう。

領域特化言語の研究の面白さは表現力と効率/保証のバランスの追求にある。言語の表現力を大きくしさまざまなプログラムを記述できるようにすると、その言語や領域の性質に特化した最適化や不具合のなさの保証などが難しくなる。いっぽうで表現力が小さすぎても領域特化言語としての意味がない。領域特化言語の表現力を高めるためには、その領域の性質を利用した最適化や、不具合のな

さの保証のための手法や理論の研究が不可欠である。

最近でもさまざまな領域特化言語が研究されており、その対象とする問題領域は、構文解析、データベース問い合わせ、整形出力、テストケース生成など多岐にわたる。また、最近のプログラミング言語においては、領域特化言語を「埋め込み (Embedded) 領域特化言語」として実装できる場合がある。これは領域特化言語をホスト言語のライブラリとして実装するもので、ユーザには利便性というメリットが、領域特化言語の実装者には、最適化や型システムなどのホスト言語の機能が利用できるというメリットがある。

本研究科において、筆者は現在、保存/読込処理、アンドウ処理、構文解析と整形出力など、相互変換記述のための領域特化言語およびそれを支える最適化などの技術の研究に取り組んでいる。



「銀河間物質」

小林 尚人 (天文学教育研究センター 准教授)

宇宙には無数の銀河が存在するが、その銀河と銀河の間には写真をみただけでは何もない無味乾燥な空間が広がっているように見える。しかしそこには、さまざまな原子・イオンそして電子から成るガス雲が薄く広く、かつさまざまなムラをもって存在しており、「銀河間物質」とよばれている。現在の宇宙に存在する普通の物質（バリオン）のほとんどは、銀河ではなくこの銀河間物質が占めると考えられている。また、銀河は137億年前のビッグバンから数10億年程度の間になんかのようなガス雲が集まってできたと考えられており、銀河間物質を調べることにより、銀河が作られた過程やその進化を明らかにする貴重な情

報が得られる。

銀河間物質の存在は、水素原子が放射する電波の観測により1950年代にすでに認識されていた。それが宇宙全体の広範囲に存在することが明確になったのは、1960年代に次々と遠方に発見されたクエーサー（きわめて明るい銀河中心核；2012年5月号「理学のキーワード第36回」参照）のスペクトルを調べた結果、クエーサーとわれわれの間に存在する多数のガス雲による吸収線が普遍的に見られることがわかってからである。吸収線を用いると、銀河間物質の総量・密度・温度や化学組成などを高精度に求めることができるため、昨今の地上大望遠鏡の登場とともに、「クエーサー吸収線

系」の研究は宇宙論パラメータにも制約をつける精密科学へと飛躍しつつある。

しかし、バリオンの約30%についてはどのような形で存在しているかがまだわかっておらず、現在最先端の観測的かつ理論的探求がすすめられている。物理専攻の須藤靖研究室ではそのような「ミッシング・バリオン」候補である高温のプラズマガスについての研究をすすめている。また、天文学教育研究センターの筆者の研究室では、通常用いられる可視光ではなく「赤外線」を用いて、今まで観測が難しかった銀河形成時のさまざまな重元素吸収線の観測的研究を精力的にすすめている。



「ダイポールモード現象」

東塚 知己 (地球惑星科学専攻 准教授)

ダイポールモード現象は、数年に一度、東インド洋熱帯域の海面水温が平年よりも低くなり、西インド洋熱帯域の海面水温が平年よりも暖くなる気候変動現象のことを指す。インド洋に符号の異なる2つの海面水温異常の極をもつことから、ダイポール (dipole) モード現象と命名された。この現象は、まず、インドネシア付近において、何らかの原因で南東風が強まることで発生し始める。風が強くなると、東インド洋にある表層付近の暖かい海水は、西インド洋へと輸送されるので、東インド洋ではそれを補うように冷たい海水が下から上昇してくる。こうしてできた東西の温度差により、さらに東風が強まり、ダイポールモード現象は発達していく。

この現象は、1999年に山形俊男教授 (当時) が、共同研究者とともに1994年夏の日本の猛暑の原因を探る過程で発見され、世界中の研究者によって、そのメカニズムや世界各地への影響などに関する研究が行われてきた。予測については、海洋研究開発機構のグループが、地球シミュレータ上で高解像度大気海洋結合モデルによる予測を行い、世界に先駆けて2006年に発生した現象の予測に成功した。現在、1季節から2季節前から発生を予測できるようになっており、正確な予測により、この現象によって引き起こされる異常気象の影響が軽減されることが期待されている。最近では、エルニーニョ現象などのほかの地域で発生する気候変動現象との関係を解明する研究

や、地球温暖化が進行する中でこの現象の強度や発生周期がどのように変化するかについての研究が、活発に行われている。また、この現象の発見が、きっかけとなって、他の海に比べて観測が少なかったインド洋の海洋観測網も整備されつつある。

地球惑星科学専攻では、筆者らの研究室が、大気海洋結合モデルによるシミュレーションや観測データの解析から、ダイポールモード現象のメカニズム、遠隔地への影響、予測可能性に関する研究を行っている。また、茅根創教授の研究室では、ケニア沖のサンゴ年輪の分析から、過去約120年のダイポールモード現象の発生履歴を復元することに成功した。



「電気磁気効果」

廣瀬 靖 (化学専攻 助教)

一般に、物質の磁化（電気分極）は磁場（電場）の印加によって誘起される。いっぽう、電場（磁場）の印加によって物質の磁化（電気分極）が誘起される場合がある。このような現象は電気磁気効果（Magnetolectric effect）とよばれ、新たな動作原理に基づく多値メモリやスイッチング素子などに応用することができる。

電気磁気効果の概念は19世紀末にピエール・キュリーによって提案された。数十年にわたりその存在の有無が理論家によって議論されてきたが、1960年にはじめて Cr_2O_3 において電気磁気効果の存在が実証された。その後、電気磁気

効果を示す物質は次々と発見されたが、誘起される磁化や電気分極が小さいことから応用には至らなかった。ところが2000年代に入って、強磁性と強誘電性をあわせもった材料において、巨大な電気磁気効果を示すものが発見された。このような材料は複数の強的秩序（ferroic order）を有することから、マルチフェロイクス（multi-ferroics）材料とよばれる。現在では、マルチフェロイクス材料の開発がさかんに行われている。

マルチフェロイクス材料の開発はおもに、①ナノサイズの強磁性体と強誘電体を混合する、②らせん磁性など特有のスピン秩序によって巨視的な電気分極を

誘起する、という2通りの戦略にそって進められている。後者においては、大きな電気磁気効果が実現可能な反面、電気磁気効果の発現が低温（数10K程度）に限られるという課題があった。しかし、 CuO や六方晶フェライトなどの材料において室温付近で電気磁気効果が観測され、注目を集めている。

本研究科では化学専攻の長谷川哲也教授の研究室で磁性酸化物を中心としたマルチフェロイクス材料の開発が行われており、物理学専攻の島野亮准教授の研究室でテラヘルツ光を用いたマルチフェロイクス材料の基礎物性に関する研究が行われている。



「生体高分子のX線結晶構造解析」 石谷 隆一郎 (生物化学専攻 准教授)

構造生物学は、生体高分子（タンパク質、RNAなど）の分子機能をその分子構造から理解する学問である。この生体高分子の立体構造情報に立脚した構造生物学は、今世紀における生命科学の大きな潮流のひとつとなっている。X線結晶構造解析は、この構造生物学で用いられる立体構造解析手法のうち、もっとも強力な手法のひとつである。

X線を物質に照射すると、その一部は原子核の周囲にある電子によって散乱される。とくに原子や分子が3次元的に並んだ結晶に照射すると、特定の方向のみに散乱されたX線が干渉し強めあう「回折」が起きる。この回折の起きる方向とその強さには、結晶中の電子の分布についての情報が含まれている。すなわち回折X線を測定しコンピューターで解析することで、結晶中の電子の分布、さらには原子の配置を決定することができるわけである。以上のようにして分子の三次元構造を決定する方法がX線結晶構造解析法である。

X線結晶構造解析の歴史は、1895年のレントゲン（Wilhelm Röntgen）によるX線の発見にさかのぼる。さらに1912年にラウエ（Max von Laue）が閃亜鉛鉱の結晶によるX線回折現象を発見、翌年にはブラッグ父子（Henry Bragg, Lawrence Bragg）によりブラッグの法則が発見され、X線回折による構造解析の理論的な基礎が確立された。さらに20世紀中盤、X線回折を用いた生体高分子の研究が始まった。まず1953年、フランクリン（Rosalind Franklin）によりDNAのX線回折像測定が行われ、二重螺旋構造解明に重要な貢献をした。次に、1958年ペルーツ（Max Perutz）らによりミオグロビンのX線結晶構造解析が行われた。人類初のタンパク質立体構造決定である。そして今日までさまざまな生体高分子の構造が決定されてきたが、そのうちとくに重要な業績に対してはノーベル化学賞が贈られている。最近の例では、カリウムチャンネル（2003年）、RNAポリメラーゼ（2006年）、リボソ-

ム（2009年）の構造決定などが挙げられる。今日では、シンクロトロン放射光やコンピューターの進歩により、より複雑かつ巨大なタンパク質、結晶化が困難な膜タンパク質にも適用可能となってきた。2012年現在、8万以上の立体構造がデータベース（Protein Data Bank）に登録されている。

本研究科では、おもに筆者の研究室にて、X線結晶構造解析、さらには構造に基づいた機能解析や計算機シミュレーションを行うことで、細胞膜を介して物質を輸送する膜タンパク質、遺伝子の翻訳などに関わる非コードRNAとそれに関わるタンパク質、慢性炎症やがんに関わるタンパク質などについて研究を進めている。最近の研究成果としては、がんの悪性化にかかわる酵素「オートタキシン」や、膜タンパク質である光駆動型イオンチャンネル「チャンネルロドプシン」の構造機能解析が挙げられる。