

# 作用素環と対称性

河 東 泰 之 (数理科学研究科)

yasuyuki@ms.u-tokyo.ac.jp

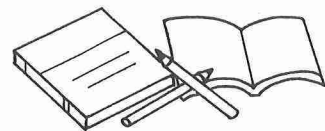
私の専門は数学の中の作用素環論と呼ばれる分野である。中でも、フォン・ノイマンが量子力学に関連して研究を始めた、フォン・ノイマン環と呼ばれるものを研究している。一般に代数系が2つあって、片方がもう片方に含まれている状況を調べることは、数学では昔から行われており、特に代数学でのガロア理論が古くから有名である。このガロア理論の類似をフォン・ノイマン環とその部分環に対して研究することは、かなり前から行われていたが、1980年代前半のジョーンズの研究によって、状況が劇的に変化した。ジョーンズはこの研究を通じ、それまで数学の中でも全く別の問題と思われていた、結び目の理論との意外な関係を発見し、それによって1990年のフィールズ賞を受賞したのである。作用素環論は無限次元の代数的構造を扱う理論であり、結び目の理論は素朴には、3次元空間内での紐の絡ませ方を研究する理論であるから、ジョーンズ以前にはこの両者が関係しているなどとは誰も考えていなかったのである。

数学ではある種の対称性を記述する言葉として、群の概念が極めて有効であることは古くから知られており、ガロア理論もその一つの例である。ジョーンズの理論においてもやはり、対称性を記述する代数的概念が現れるのだが、それはもはや普通の群ではなく、群を拡張した概念を考えなくてはいけないことが、1987年オクニアーヌによって見出され、paragroup と名づけられた。ここ

で"para"とは「もどき」を表す接頭語である。この種の一般化はしばしば量子化と呼ばれている。群の概念の量子化としては量子群と呼ばれるものが非常に有名であるが、paragroup はそれとは別の概念である。

数学の問題としては、普通の群ではない paragroup がどのくらいあるか、ということがすぐに考えられる。量子群の理論を使うとそのような例はたくさん作れるのだが、上で paragroup と量子群は違うと書いたばかりなのに、具体例の作り方で量子群の理論に頼っているのでは情けない。そこで、普通の群でも量子群でもない paragroup はどのくらいあるか、と言う問題が考えられる。「量子群でもない」という部分をきつく解釈すると、これはあると思われるのだが、これがそうだ、という具体的な例はハーゲラップによる1991年の例一つだけ、と言う状況が今年まで続いていた。

ハーゲラップはその他にもこれらがありそうだと、いう候補のリストを1991年に示していたのだが、それらが本当に存在するかどうかを決定するのは難しく、進展がないままだったのである。今年に入り、私のところの修士2年の浅枝雅子さんがこの問題に取り組み、ハーゲラップと共同で、そのリストの中でもっとも奇妙に見えるものが実際に存在することの証明に成功した。これが突破口になって、paragroup の理解がおおいに深まることを期待している。



## 型理論

長谷川 立 (数理科学研究科)  
ryu@ms.u-tokyo.ac.jp

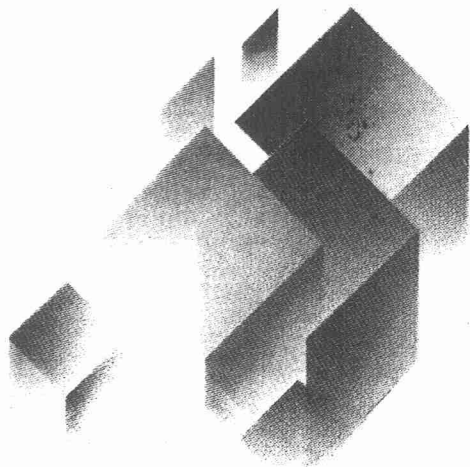
現在使われている多くのプログラミング言語は型を持っている。たとえば、Cでいう char とか int \* とかである。私が専門にしている型理論の「型」はこれに相当する。

この「型」を数学的に研究するのが型理論というわけであるが、なぜこんなものが真面目に研究するに足るのだろうか。これに答えるのがカーリー・ハワードの原理で、現在の型理論の根本原理となっている。誤解を恐れず簡単に言えば、「正しいプログラムを書くことは正しい証明をすることと同じであり、ひとたび正しい証明が得られれば、その証明をプログラムと考えて実行することができる」という主張がカーリー・ハワードの原理である。このとき、証明をするのであるから何か定理を証明しているはずで、この定理に相当するのが型である。実際のプログラミング言語で使われている型は int とか簡略化されたもので、とても数学の定理には見えないが、型がプログラミング言語に採り入れられる様になったのにはこういう背景がある。

現在、主として研究しているのは、パラメトリシティという概念である。たとえば、ソートをするプログラムを考えたときに、整数のソートでも実数のソートでも、

プログラムの構造を変えずに表現できるはずである。このようにプログラムの構造が型に依存しないような状況を「パラメトリシティ」と呼んでいる。これは純粋に計算機科学の中から出てきたアイデアであるが、型の背後に数学的構造があったように、パラメトリシティも豊かな数学的構造を持っている。このパラメトリシティの導き出す構造をプログラムの持っている根本的な骨組みと捉えて、プログラミング言語の性質を調べていこうというのが、研究の目標である。

数理科学としての計算機科学の目標は、計算という操作の背後にある数学的構造を明らかにすることにある。計算をするという行為は数学において非常に重要な部分であるにもかかわらず、それを体系的に扱おうとすることは試みは数学の主眼とはならなかった。今世紀後半になってからの計算機の発展によって、始めて計算そのものを数学的に研究する必要性が明らかになってきたのである。計算を通して数学を見直すことは、数学そのものにも新しい視点を提供してくれる可能性を秘めていると考えている。



# 並行プログラミング言語の理論と実践の接点を求めて

小林 直樹 (情報科学専攻)

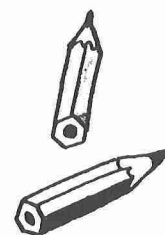
koba@is.s.u-tokyo.ac.jp

プログラミング言語の研究の重要なテーマの一つは、プログラムが正しくかつ効率よく動作することをいかに保証するかということである。筆者は並行プログラミング言語についてそのような研究をしている。プログラムの正しさというのは、例えば、ある人が2つの整数の最大公約数を求めるためのプログラムを書いたときに、そのプログラムによって実際に最大公約数が求められる事、あるいは百歩譲って出力は常に整数であるといったことである。そのような事を保証するには、プログラムをすべての入力について実際に実行してみるわけにはいかないので、プログラムの各部分の性質とそれらを組み合わせたときに全体としてどのような性質が満たされるかということを数学的に議論することが必要となる。

逐次型言語に関しては、上記のような議論のために型システムなどすでに確立した手法が存在し、実際のプログラミング言語に用いられている。一方、並行プログラミング言語についてはまだそのような手法が十分に確立しているとはいえ、現在盛んに研究されている分野である。なぜ並行プログラムの正しさを保証するのが難しいかというと、計算主体が複数存在するためにプログラムの実行順序が一意に決まらず、そのあらゆる可能な順序において正しく動作することを保証しなければならないからである。また、並行プログラムでは人間のグループ作業のように互いにコミュニケーションをとりながら仕事が進められるので、逐次プログラムと異なり、その動作を単純に入力と出力という観点からとらえることができない点も難しさの要因である。しかし、プログラマにとっても並行プログラムを正しく記述するのは逐次プログラムの記述よりはるかに難しいわけであり、言語の

側で並行プログラムの正しさを保証する意義は逐次プログラムの場合よりもはるかに大きく、やりがいのある研究テーマであるといえる。

そこで、筆者のグループでは並行プログラムに関して形式的な議論を行うための土台として並行計算の形式的モデルを構築し、それに基づいて型システムやプログラム解析の手法を開発している。これを用いると、従来の型システムのような送受信される値の種類の整合性の保証だけでなく、送受信のプロトコルの整合性も保証することができる。あまりいい例ではないが、人間社会での取り引きに例えると、商品と現金書留用封筒を送付し、代金を現金で封筒に入れて返送してもらう時に、従来の型システムでは「現金でといったのに商品券を封筒に入れて送ってきた」という間違いは検出できるが、そもそも「商品だけ受け取って封筒は捨てられた」という間違いは検出できなかった。それに対し、我々の新しい理論ではそのような間違いをあらかじめ検出できる（そのような顧客は最初から相手にするなと型システムが教えてくれる）ほか、「こちらは代金の支払いを確かめてから商品を送るといっているのに、先方は商品を確認してからでないか送金しないと言っている」といった状況（専門用語でデッドロックという）も未然に回避できる。並行プログラムの実行速度向上にも、形式的議論を用いた並行プログラムの各部分の動作の把握が役に立つ。これは、人間同士の共同作業をする場合にお互いのことをよく知り合っていた方が効率よく作業をすすめられることと原理的には同じである。このような研究をもとに、現在、並行プログラミング言語を設計し、実装をすすめている。



# CP非保存の物理

相原博昭 (物理学専攻)  
aihara@phys.s.u-tokyo.ac.jp

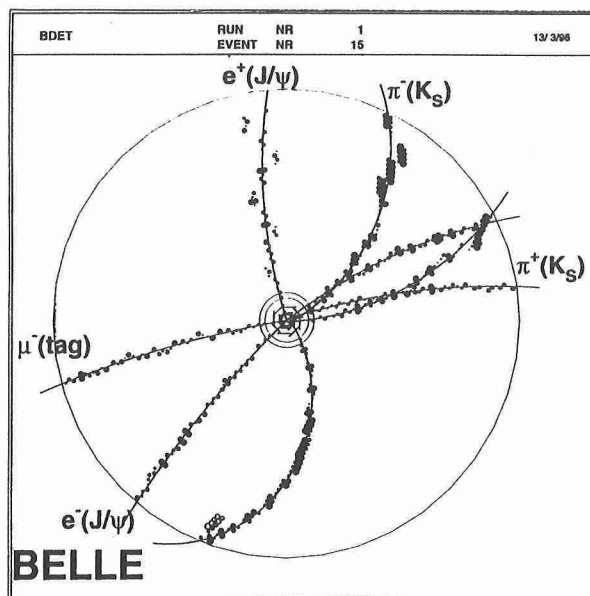
素粒子の弱い相互作用においては、荷電共役（粒子の持つ電荷の反転、 $+ \leftrightarrow -$  のことで、Cと表す）、空間反転 (Parity, P)、そしてCとPを組み合わせたCPのいずれの対称性も破れている。特に、CP対称性の破れの起源が、素粒子物理学の「標準理論」の重要な構成要素の一つである小林・益川理論で説明できるのか、あるいは、他の理論の導入を必要とするのかは、現代素粒子物理学の中心課題の一つである。小林・益川の導入した行列は、3種のクォーク（ダウクォーク、ストレンジクォーク、ボトムクォーク）が、弱い相互作用によってどのようにその状態を混合させるかを記述する。この行列に含まれる位相の存在が、CPの破れをひきおこす。CPの破れの実験的研究は、そのわずかな破れ（0.1%）が、1964年に中性K中間子の崩壊過程で発見されて以来、他の粒子の崩壊過程では観測されていない。小林・益川理論は、CPの破れがB中間子（例えば、ボトムクォークと反ダウクォークから成る粒子）の崩壊においては、K中間子の100倍の大きさに起こると予言する。

高エネルギー加速器研究機構は、このB中間子を大量に作り出すことのできる大強度B中間子生成加速器、Bファクトリーの建設を行ってきたが、いよいよ平成10年10月に完成する。当研究室では、このBファクトリーを使ってCPの破れの検出を目指している。

中性B中間子は、反中性B中間子とその状態を混合する。このとき、Bと反Bの両方から到達しうるCP変換の固有状態への崩壊を考えると、二つの振幅の間で量子力学的干渉が起こり、Bと反Bのその状態への部分崩壊

幅が等しくなくなる。これがB中間子系でのCPの破れである。Bファクトリーにおいては、B中間子と反B中間子は、スピン1のウプシロンという中間状態をとおり、一対として（コヒーレントに）生成される。B中間子自身はスピン0の粒子であるので、Bと反Bは軌道角運動量1の状態すなわちP状態にある。その後、B中間子と反B中間子は、お互いに混ざり合って進むが、ある時刻tにおいて、一方の中間子がB中間子であることがわかると、その瞬間には他方の中間子は必ず反B中間子である。なぜなら、同種のスピン0粒子（ボゾン）の波動関数は、P状態のような反対称の状態をとれないからである。このきわめて基本的な量子力学の法則を使うと、Bファクトリーにおいて、中性B中間子が、CPの固有状態に崩壊する頻度を時間（正確には、固有時間、すなわち、B中間子の静止系での時間）の関数として測定することができる。

実際の実験においては、平均150マイクロン程度飛んではから崩壊するB中間子の崩壊点を半導体を使った高精度の位置検出器で測定し、それをB中間子の固有時間にローレンツ変換する。当研究室は、この半導体検出器の製作を担当している。検出器は平成10年夏に完成予定である。図は、BELLE測定器と呼ばれるBファクトリーでの測定器によって、B中間子と反B中間子の崩壊がどのように観測されるかというシミュレーションである。我々の半導体検出器はこのBELLE測定器の最も内側にある。



## 表面電子準位バンドを通る電気伝導

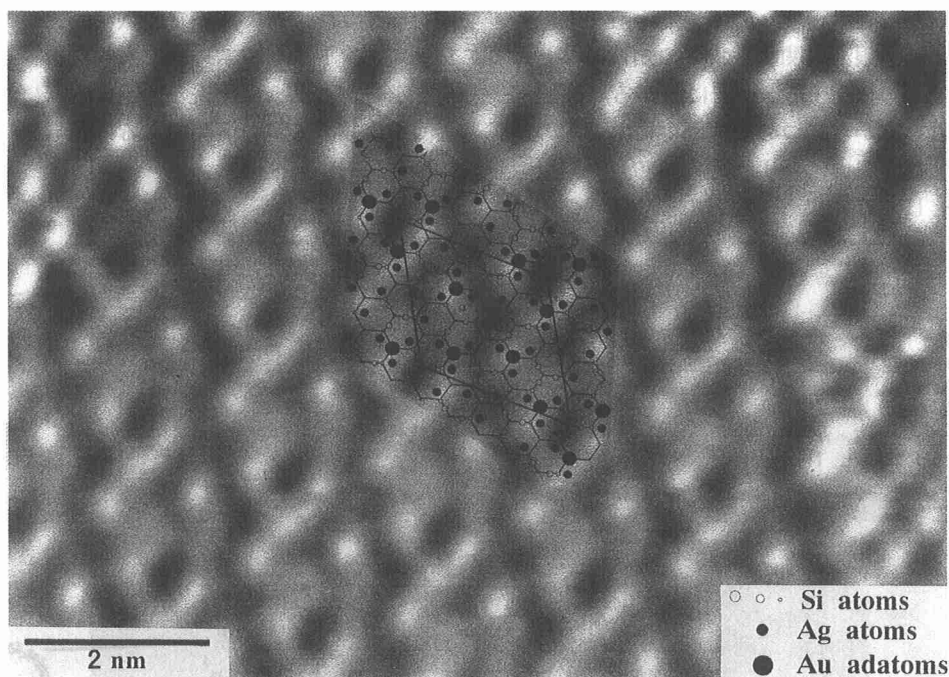
長谷川 修 司 (物理学専攻)

shuji@phys.s.u-tokyo.ac.jp

毎日お世話になっているパソコンやテレビなどの電子機器の心臓部は、シリコン (Si) からできている集積回路である。Si 結晶の中での電流の流れ方を制御して、様々な働きをさせているのである。結晶の中の個々の Si 原子は、4 本の「結合手」を持っており、最も近い 4 つの隣りあった Si 原子と結合して結晶を形作っている。しかし、結晶の最表面での Si 原子には、結合すべき相手の原子が片側に無いため、「結合手」があまって不安定になってしまう。そのため、なるべくエネルギー的に安定になるように表面近傍の原子が適当に並び換えて (例えば、2 つの最上層 Si 原子がお互いに結合して対を作る)、あまった「結合手」の数をなるべく減らすように結晶自身が自然に工夫する。このようにして、表面近傍には結晶内部では見られない特殊な原子配列である「表面超構造」が形成される。そうすると、電子状態も結晶内部とは異なるため、電流の流れ方も結晶の最表面では異なる。これが「表面電子準位バンドを通る電気伝導」である。

この種の電気伝導は、いわば表面の最上 1 原子層だけを流れるもので、究極的な 2 次元電子系を実現する物理

系として興味をもたれてきたが、実験的にはその存在を確認するまでにはいたっていなかった。しかし、最近私たちは、シリコン表面上に 1 原子層の銀と 0.19 原子層の金を吸着させた時に形成される「 $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ 」と呼ばれる表面超構造で、「表面電子準位バンドを通る電気伝導」を実験的に確認することに成功した。下図は、この表面超構造の走査トンネル顕微鏡写真である。一部に、原子配列構造模型をはめ込んである。シリコン表面上に、金と銀原子が特徴的な規則性をもって並んでいる。この表面超構造が表面全体を覆うと、電気伝導度が著しく増大したのである。光電子分光法による電子状態の解析の結果、この電気伝導の増大は、シリコン基板の表面空間電荷層によるものではなく、フェルミ準位を横切る金属的な表面電子準位バンドが新しく形成されることが原因であることをつきとめた。この研究成果は、1 原子層の「厚さ」の 2 次元電子系の輸送特性の研究の端緒を開いたばかりでなく、原子レベルの人工微細構造を利用する次世紀のエレクトロニクスデバイスの研究につながる一里塚になるものと考えている。



Si(111)- $\sqrt{21} \times \sqrt{21}$ -(Ag+Au)表面超構造の走査トンネル顕微鏡 (STM) 写真。原子配列模型もはめ込んである。Au の量がやや不足しているために、Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Ag 表面超構造が右上および左上に一部残存している。

## モザイク CCD カメラによる矮小銀河の観測

岡村 定 矩 (天文学専攻)

okamura@astron.s.u-tokyo.ac.jp

宇宙を構成するいわばビルディングブロックである銀河は、明るさ(質量)で4桁以上の範囲にわたって存在する。厳密な境界が定義されているわけではないが、太陽質量の $10^9$ 倍程度より大きな質量を持つものを巨大(ないしは通常)銀河、それより小さいものを矮小銀河と呼んでいる。楕円型、S0型、渦巻型などよく知られた形態分類は、巨大(通常)銀河の分類体系である(図1)。矮小銀河は楕円型をしたものが圧倒的多数を占めるが、巨大楕円銀河と比べると面輝度が低く、半径方向の輝度分布の形も異なり、両者は単に質量が異なるだけでなく構造的に違う種類の天体であることがわかっている(図2)。そのほかに、矮小銀河には星形成活動がパッチ状に見られる不規則型や面輝度が非常に高いが小さくコンパクトなタイプも見られる。矮小銀河は、銀河群や銀河団中にあることはわかっているが、一般のフィールドにどのくらい存在するかはよくわかっていない。個々の矮小銀河の構造とともに、矮小銀河全体としての存在量、空間分布などの存在形態は、銀河形成、進化の理論を検証する重要な観測データである。

これらの矮小銀河はもともと暗い(青色域での絶対等級で-16等級から-12等級程度)ので、近距離のものしか観測できない。矮小銀河に関する我々の知識のほとんどは、銀河系のまわり300万光年以内に広がる局部銀河群と、銀河系に近い方から二つの銀河団中にあるものから得られている。この二つはいずれも約5000万光年以内にあり、銀河団としてはメンバー数があまり多くない。

近距離の銀河群や銀河団は、空の上で大きく広がって見える。それを観測するには広視野の望遠鏡と検出器が必要である。このため、つい最近まで、大型の写真乾板が矮小銀河の観測には欠かせないものであった。

我々の研究グループは国立天文台と共同で、CCD素子(1k×1k画素)を40個並べたモザイク CCD カメラ(図3)を製作した。これをカナリー諸島にあるイギリスの口径4.2mの望遠鏡につけて、3億光年の距離にある、メンバー数の多い「かみのけ座銀河団」の矮小銀河を観測した。CCDの高感度のおかげで、5000万光年の「おとめ座銀河団」を写真で観測して到達できる限界より暗い銀河まで観測が届いた。また、モザイク CCD カメラの広視野のおかげで、多数の銀河を観測できた。その結果、おとめ座銀河団とかみのけ座銀河団という、二つのかなり異なった宇宙環境における矮小銀河の性質を、統計的な取り扱いができるほど多数のサンプルに基づいて比較することが初めて可能になった。最初の解析から、両者に属する矮小銀河は、集団としては、ほとんど同じ、大きさ、明るさ、面輝度(の分布)を示すことがわかった。このことは、矮小銀河の構造は、主に内在的なメカニズムで決まり、銀河同士の相互作用(銀河ハラスメント!と呼ぶ)は二次的な影響しか与えないことを示唆するように見える。巨大銀河に対する数の比、銀河を構成する星の情報である「色」の解析などが進行中で楽しみにしている。

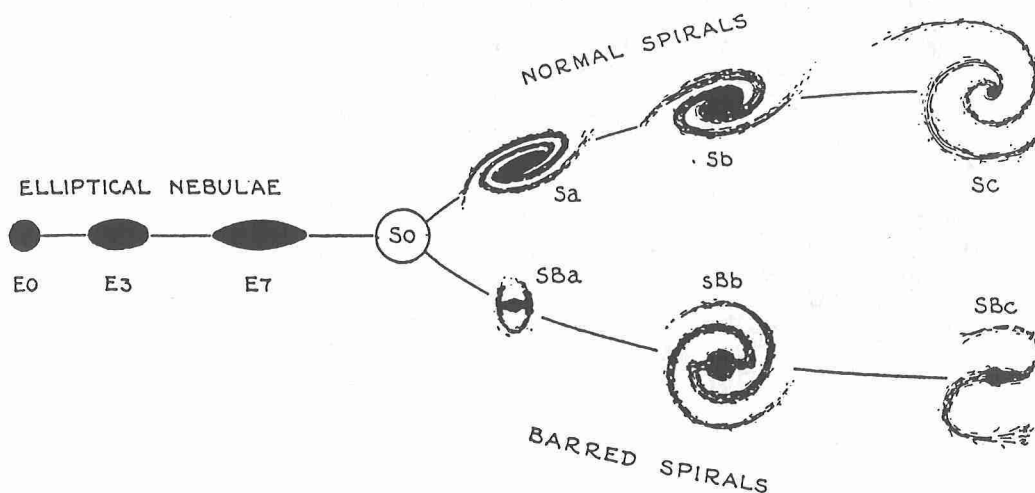


図1 巨大および通常銀河の分類体系として有名なハッブルの音叉図



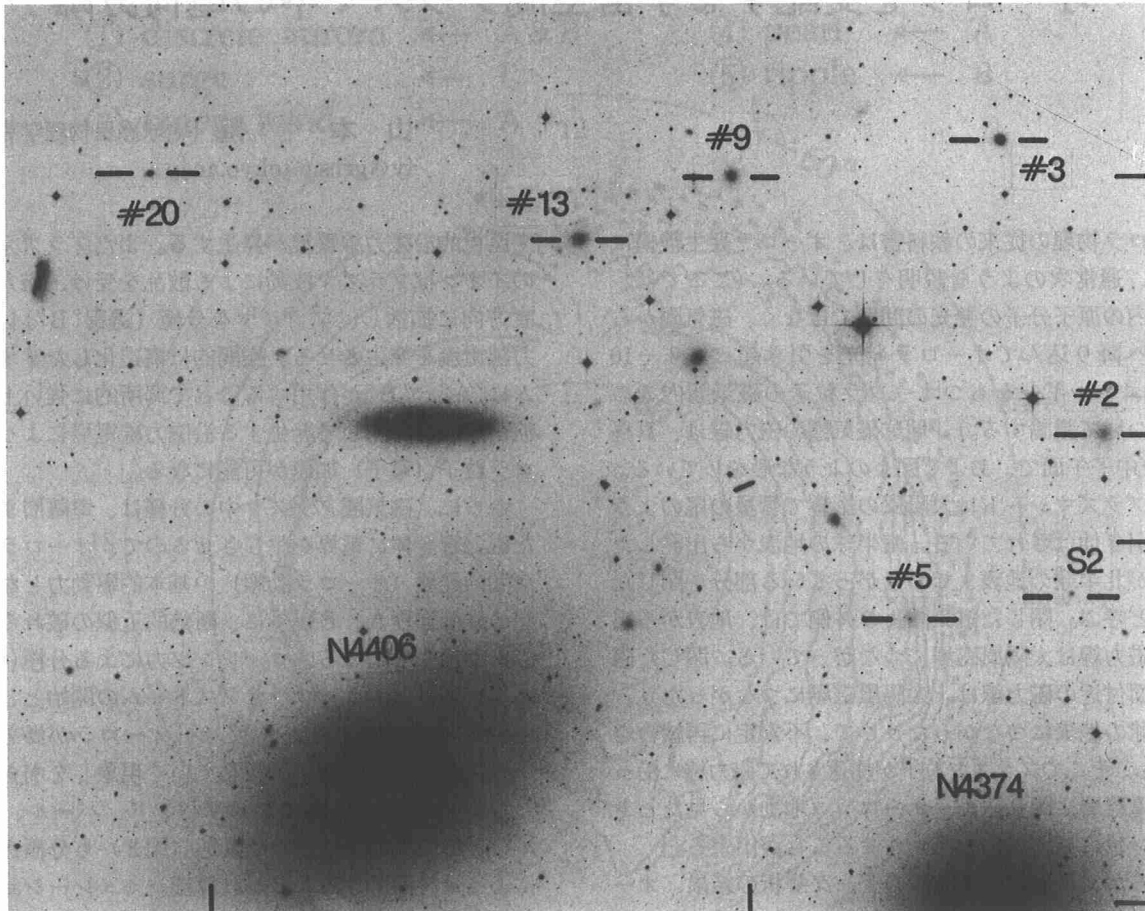


図2 おとめ座銀河団中の矮小楕円銀河（横線で挟まれ番号がついているもの）。N4406とN4374とラベルのついているのは、同じおとめ座銀河団中の巨大楕円銀河。両者の規模の違いがよくわかる。#13とN4406の間にあるのは横から見た通常渦巻銀河。（写真観測によるもの）

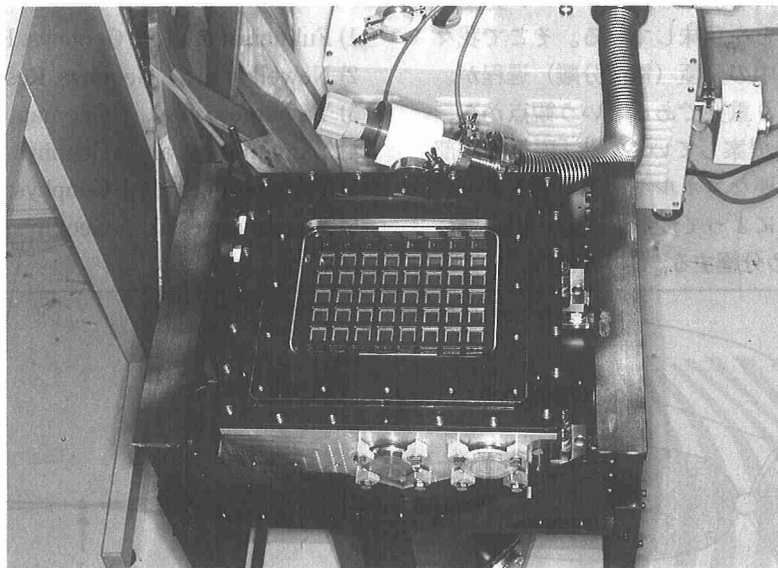


図3 東大ー国立天文台グループが製作したモザイク CCD カメラ。1 k × 1 k画素の CCD 素子（画素サイズ12ミクロン角）を8個×5列で40個並べてある。素子間には隙間があるが、市松模様のようにずらして撮影した4枚の画像をつなぎ合わせて一枚の大きな合成画像をソフト的に構成する。画像合成や合成した画像から天体を自動検出、分類、測定するソフトも我々のグループで開発したものである。

# オーロラを支配する宇宙空間プラズマ中の電荷分離

山本 隆 (地球惑星物理学専攻)  
ty@grl.s.u-tokyo.ac.jp

オーロラ物理の従来の教科書は、オーロラ発生機構について、通常次のような説明をしている。(ここでは、電離層内の原子分子の発光の問題ではなく、磁気圏から電離層へ降り込んでオーロラ発光を引き起こす1-10 keVのエネルギーをもつオーロラ粒子の磁気圏内での発生について議論する。)「地球磁気圏の磁力線は、真昼-真夜中子午面で、およそ図1のような形をしている。夜側のプラズマシートは太陽風の影響で彗星の尾のように長く引き伸ばされている。南半球の地表から出発した磁力線が北半球の地表までつながっている部分を閉じた磁気圏と呼ぶ。閉じた磁気圏より外側では、地表から出発した磁力線は太陽風磁場につながっている。閉じた磁気圏表面付近の磁力線は、太陽風磁場につながったり、反対半球の地表につながったりして、不安定に再結合を繰り返し、そこでプラズマ粒子が加速されて磁力線に沿って極域電離層に降り込み、オーロラ(地上から見たときカーテン状に見える)を発光させることができる。」

ところが、最近の人工衛星のデータ解析の結果、オーロラ帯(オーバル)の高緯度側境界のオーロラでさえ磁力線再結合で加速生成されたイオンビームより低緯度側に位置することがわかり、<sup>1)</sup> また、巨視的沿磁力線電流が上向き(電離層へ降り込む電子流に対応)になっている領域(夕方側オーバル)で、オーロラ粒子(電子)の出現頻度が極めて大きくなるのが統計的に見いだされた。<sup>2)</sup> これらの事実は、先の説明がオーロラ発生の本質には及んでいないことを意味している。そこで我々は、磁気圏内のプラズマ中の分極(電荷分離)過程が、オーロラ発生にとってより重要であるという観点から、次のような理論モデルを提案している。<sup>3)</sup> 「磁気圏尾部で加速されたイオンを主要なエネルギー源とするプラズマシートはプラズマ対流によって変形し、非一様磁場による粒子のドリフトのため分極する。この分極“A”によっ

て巨視的沿磁力線電流が発生する。またプラズマシートのイオンはプラズマ波動による散乱を受け、磁力線に垂直方向に拡散し、プラズマを分極(過程“B”)し、沿磁力線電流を発生させる。空間的に構造化したイオンビームに“A”、“B”が作用することで局所的に強い上向き電流が流れ、付随して発生する沿磁力線電場によってオーロラ粒子(電子)加速が可能になる。」

さらに、磁気圏プラズマ中の分極は、電離層まで含めた磁力管全体に電界を生じさせるので、オーロラの時間空間的發展(オーロラ動態)の基本的駆動力となる。上記の分極過程A、B以外に、断熱的近似の破れる領域=磁気中性面で起こる、ローレンツ力による分極(“C”)があり、これは、オーロラサブストームの開始とともに出現する“オーロラ・サージ”=「オーロラが渦を作りながら、西方に波状的に伝搬していく現象」を引き起こすと考えられる。<sup>4)</sup> 他にオメガバンド、パール、リップルなどの特異的なオーロラ動態(図2)も分極A及びBによって説明できることが計算機シミュレーションによってわかってきた。<sup>5),6)</sup> 少なくとも、オーロラ現象に関していえば、アルフヴェン波などの磁気流体波動を基本的物理過程と考える“波動的(古典的?)描像”よりもプラズマ粒子群に起こる電荷分離(A-C)を基本に置く“粒子的描像”に基づく方が、現象をよりの確に理解できると言えそうである。

- 1) Fukunishi et al., J. Geophys. Res., 98, 11235(1993)
- 2) Newell et al., J. Geophys. Res., 101, 2599(1996)
- 3) Yamamoto et al., J. Geomag. Geoelectr., 49, 879(1997)
- 4) Yamamoto et al., J. Geophys. Res., 98, 13653(1993)
- 5) Yamamoto et al., J. Geophys. Res., 102, 2531(1997)
- 6) Yamamoto et al., J. Geophys. Res., 99, 19499(1994)

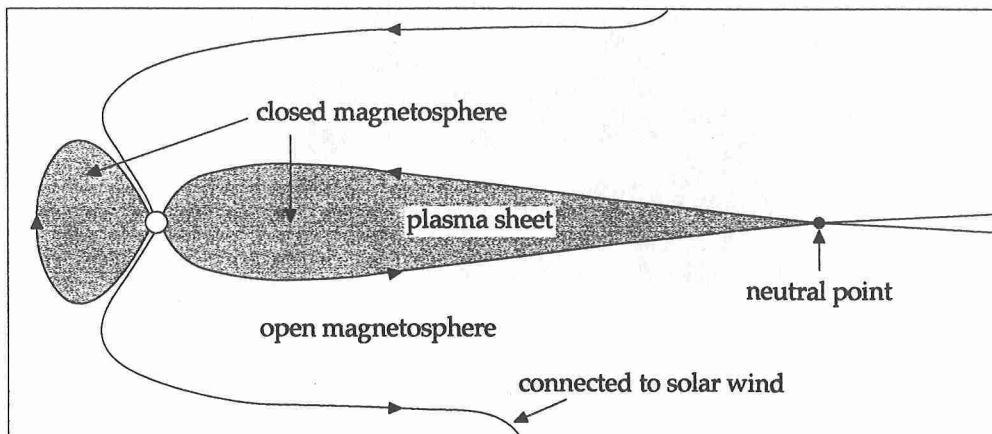


図1：地球磁気圏の真昼-真夜中子午断面



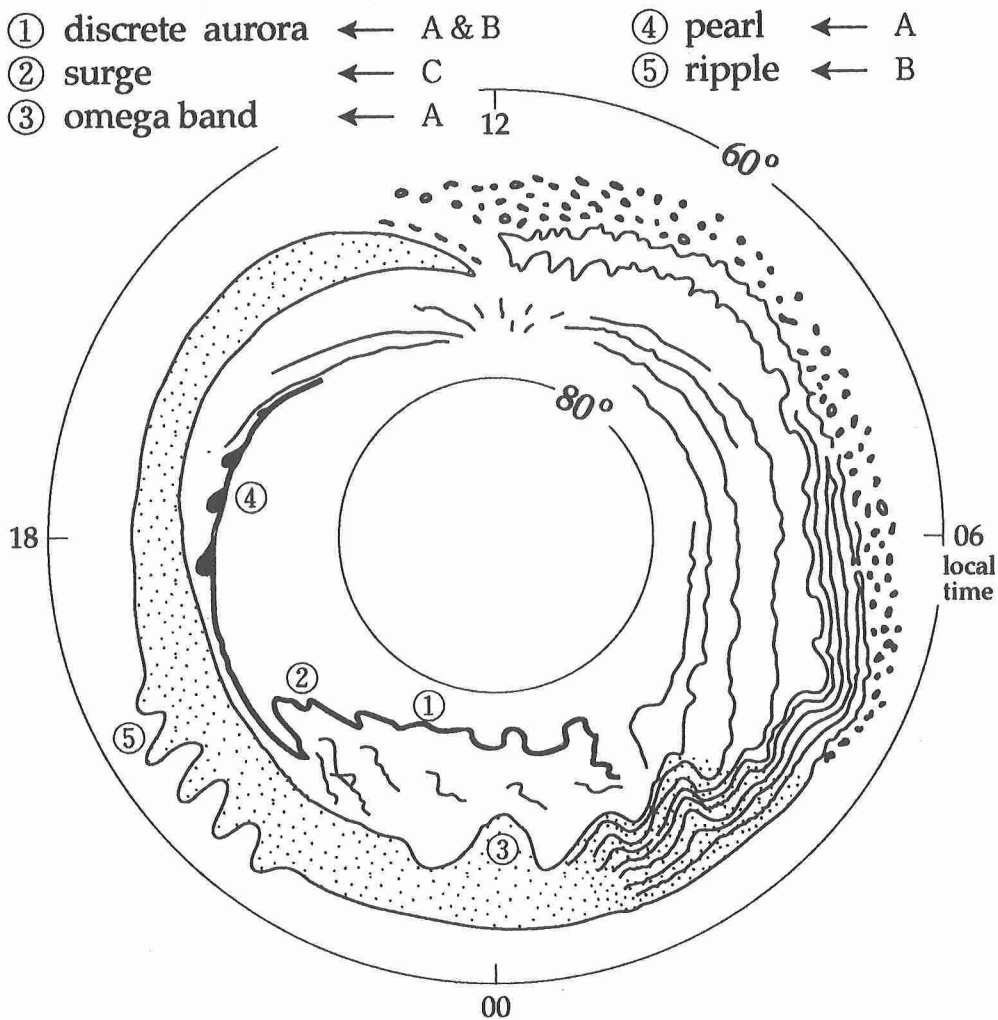
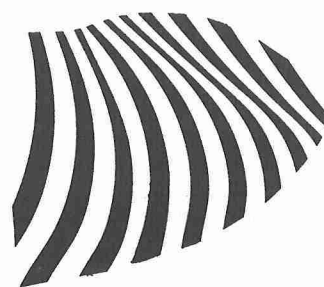


図2：極域電離層面上のオーロラ動態とプラズマ中の電荷分離（A-C）の対応



## 生物活性物質の分子センシング

菅原正雄 (化学専攻)  
sugawara@chem.s.u-tokyo.ac.jp  
梅澤喜夫 (化学専攻)  
umezawa@chem.s.u-tokyo.ac.jp

生体膜及び細胞内に存在するレセプターと呼ばれる一群の蛋白質は、アゴニスト (イオン・分子) を特異的に認識して、情報の変換/増幅を行う。生体膜に存在するレセプター蛋白によるアゴニストの認識は、膜透過性の変化、能動輸送、膜電位の変化、自己リン酸化などの膜を横切る信号の伝達 (transmembrane signaling) を引き起こす。さらに、情報変換された信号の細胞内部への伝達 (intracellular signaling) にもレセプターが関わる。これらレセプター蛋白とアゴニストとの相互作用の程度 (選択性) の評価はこれまで、binding assay と呼ばれる方法によりレセプターとアゴニスト間の結合能の相対的大きさを知ることや、アゴニストがレセプターの認識、情報変換機能を活性化する程度 (potency) を主として細胞レベルで放射性元素や蛍光色素を用いて評価し、活性化に必要なアゴニスト濃度を指標とすることによってなされてきた。最近、我々は、化学量論的に組成及びレセプター数が制御された人工系において、レセプター蛋白がアゴニストに対して示す、認識、情報変換/増幅能の大きさ“そのもの”を、相互に比較が可能なように、定量的に求める新規分子センシング法を構築し、それらを用いてアゴニスト間の情報伝達能を定量的に比較することを行っている。具体的には、生体系の最も重要な情報伝達系に関わるレセプターである (i) 大脳での神経情報伝達に関わるグルタミン酸レセプターイオンチャンネル蛋白、(ii) 細胞内カルシウム情報伝達を担

うカルモジュリン蛋白及び (iii) インスリンを特異的に結合してその情報を細胞内へ伝達するインスリンレセプターを対象としている。アゴニストとの結合能を求める binding assay は信号伝達の最も“上流”での化学選択性を与えるが、我々のアプローチは、より“下流”で選択性をも込みにして求めることができる分析法である。それにより、アゴニスト認識能に加えて、情報変換/増幅能そのものの大きさを用いるため、より生理適合性を有する。その一例として、アゴニストによって活性化されたグルタミン酸レセプターイオンチャンネル蛋白の開チャンネルを透過する全イオン量を新しい指標とした場合、3種の典型的アゴニスト間の選択性の相対的大きさは、binding assay に基づく結合能に比べて著しく (約100分の1に) 縮まっていることを見出した。カルシウム情報伝達系についても初段の  $\text{Ca}^{2+}$  のカルモジュリンへの結合のみではなくそれに引き続くターゲット蛋白 (ペプチド) との蛋白質/蛋白質相互作用の誘起までを込みにした assay 系を創案し、それを用いて情報の伝達が  $\text{Ca}^{2+}$  以外にも  $\text{Sr}^{2+}$ 、希土類金属イオン、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  などによっても引き起こされることを見出した。このように、情報伝達のより下流での化学選択性をも含めて評価できる assay 法はまだ始まったばかりであるが、binding assay 及び細胞レベルでの研究とともに、生体機能の更なる理解に役立つとともに新しい化学分析法の概念を与えている。

