

# 人口の数理モデル

稲葉 寿 (数学科)

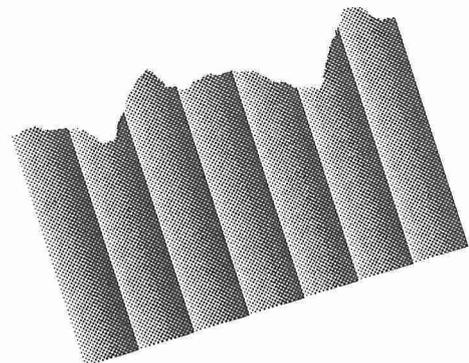
inaba@ms.u-tokyo.ac.jp

数学科をでたけれども就職した先は厚生省の人口問題研究所（現国立社会保障・人口問題研究所）。爾来、人口の数理モデルが専門になって今日に至っている。人口統計や人口問題を扱う人口学 (demography/population studies) は我が国のアカデミズムにおいて今日に至るも近代的な学術プロフェッションが確立されていないという不遇をかこっているが、欧米では長い伝統をもちよく研究されている。その基礎となるのが数理人口学で、その起源は17世紀のグラントやハレーによる生命表研究に遡る。しかしながら、人間人口を想定しない一般の生物集団の数量的変動 (Population Dynamics) のモデルは、今日では理論生物学において不可欠のツールとして確立されており、応用数学の立場からの研究も多数あるが、人間人口を正面から取り上げたモデルは、もっぱら人口学者の関心を引くだけで、応用数理としての発達はアルフレッド・ロトカによる独創的貢献以来、長い間あまり見るべきものがなかった。

人口学における数理モデルの特徴は、数理生態学において有名なロジスティックモデルやロトカ・ボルテラシステムなどとは異なって、年齢構造や様々な社会的ないし生理学的な状態変数によって構造化された人口 (structured population) を扱う点にある。したがって

連続時間で考えると一般にはそのダイナミクスは非局所的な境界条件をもつ一階の偏微分方程式で表される。その理論が急速に発達したのはようやく1980年代になってからで、主に関数解析的な手法が有効であることがわかった。この過程は単に既存の数学が応用されたというだけではなく、人口学や理論生物学が提起する問題による刺激が発展方程式の理論の本質的な進歩に貢献した点で相互的なものであったことは興味深い。

私自身は人口問題研究所時代は上記のような純数学的な研究だけでなく、人口推計、人口統計作製、標本調査からフィールドサーベイまでなんでもやらされた。これは非常に貴重な体験で面白かったが、駒場の数理科学研究科に移ってからは実体統計から縁遠くなり、もっぱら理論的な研究に専念している状況である。最近ではエイズやインフルエンザなどの伝染病流行の数理モデルや結婚モデル (ペア形成モデル)、年齢構造のある生態学的モデル等に関心を持って研究している。しかし益々深刻化する日本の少子高齢化、世界人口の急速な増大と生態系の崩壊、エイズ等の感染症流行を見るにつけ、実体的な人口研究の意義は高まっていると思うので、現実的な応用を視野に入れた研究の方ももっとやらねばと思っている。



# ダークマターハロー密度プロファイルの普遍性

須藤 靖 (物理学専攻)  
suto@phys.s.u-tokyo.ac.jp

宇宙にダークマター (暗黒物質) が存在する観測的証拠として良く取り上げられるものが、渦巻銀河の回転曲線である。これは、銀河の自転速度  $V(r)$  を中心からの距離  $r$  の関数としてプロットしたもので、中心から十分離れたところでは  $r$  に依らずほぼ一定の値となることが知られている。この観測事実を単純なケプラー運動の結果として解釈すれば、銀河の中心から  $r$  内の物質の総質量は遠方でも  $r$  に比例して増大する、言い換えれば、 $r$  での平均質量密度  $\rho(r)$  は  $r^{-2}$  という分布則を示すという事になる [1,2]。可視光で観測できる銀河の領域を包み込むようなこの質量分布は、ハロー成分と呼ばれ、ダークマターの存在を示すという意味で驚くべき結果である。

しかしここでは、その存在を認めた上でさらに、 $\rho(r) \propto r^{-2}$  という分布則が何を意味するかを考えてみたい。可能性は2つである。この密度プロファイルは、(a) 宇宙の初期条件を何らかの形でとどめている結果なのか、あるいは、(b) 初期条件によらず自己重力系における普遍的な結果なのか。実はこの問題は1980年代末の研究を通じて、解析的モデルと、当時の数値シミュレーションがともに一致して(a)を支持するという形で一応の決着をみていた。ところが1996年に、ダークマターハローは初期条件や質量にほとんど無関係に、 $r_s$  というスケールをパラメータとした普遍的な密度分布:

$$\rho(r) \propto \frac{1}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2} \quad (1)$$

に従うという数値シミュレーションの結果が発表された [3]。

過去のシミュレーションは粒子数が少なく、中心部のプロファイルを正しく決定するだけの分解能がなかったという主張である。しかしこれは単に定量的な違いにとどまらず、(b) という定性的に全く異なる解釈を支持することになる。ダークマターハローは、矮小銀河から銀河団という、質量にして5桁もの違いを持つ天体にあまねく存在するものと考えられており、その宇宙物理的な帰結は計り知れない。したがって、この結論は大きな反響を呼び、その後数多くの研究の火付け役となった。なか

でも、現在当研究科天文学専攻の牧野淳一郎氏は、より高分解能のシミュレーションから、中心部のべき指数がもっと急になることを見いだしている [4]。

我々もまた、国立天文台および初期宇宙センターのスーパーコンピュータを用いて、文献3よりも1桁~2桁近く多い約100万個の粒子を用いた高精度シミュレーションを行った [5]。その結果を図1に示す。このように目から受ける印象は極めて個性に富んでいるにもかかわらず、半径  $r$  内で平均化したときの密度分布はいずれも驚くほど似ている (図2)。

我々の結果は、

$$\rho(r) \propto \frac{1}{(r/r_s)^\mu (1+r/r_s)^{3-\mu}} \quad (2)$$

のような形で良くフィットされ、指数  $\mu$  は1ではなく、ハローの質量  $M$  に対して、近似的に

$$\mu \sim 1.6 - 0.15 \log(M/10^{12} M_\odot)$$

で与えられる。実はこの質量依存性は、ダークマターの密度プロファイルを(a)の立場から説明しようとする多くの解析モデルの予言とは逆センスである。一方、(b)の立場からこのプロファイルを説明できるような理論モデルもいまだ存在しない。このハロー密度プロファイルは、理想化された非線型自己重力系という純粋な力学系の問題、X線や重力レンズによって銀河団を観測する場合の経験的な密度モデルとしての有用性、宇宙論的密度ゆらぎの進化と組み合わせてその非線型時間発展を解析的に記述する可能性、等々、理論・観測・応用の立場から多岐にわたる研究が活発に進行しつつある。

## 参考文献

- [1] 須藤 靖, 1993, ダークマターと銀河宇宙 (丸善、パリティ-物理学コース)
- [2] 岡村定矩, 1999, 銀河系と銀河宇宙 (東京大学山版会)
- [3] Navarro, J.F., Frenk, C.S., & White, S.D.M. 1996, ApJ, 462, 563
- [4] Fukushige, T., & Makino, J. 1997, ApJ, 477, L9
- [5] Jing, Y.P. & Suto, Y. 2000, ApJ, 529, L69.

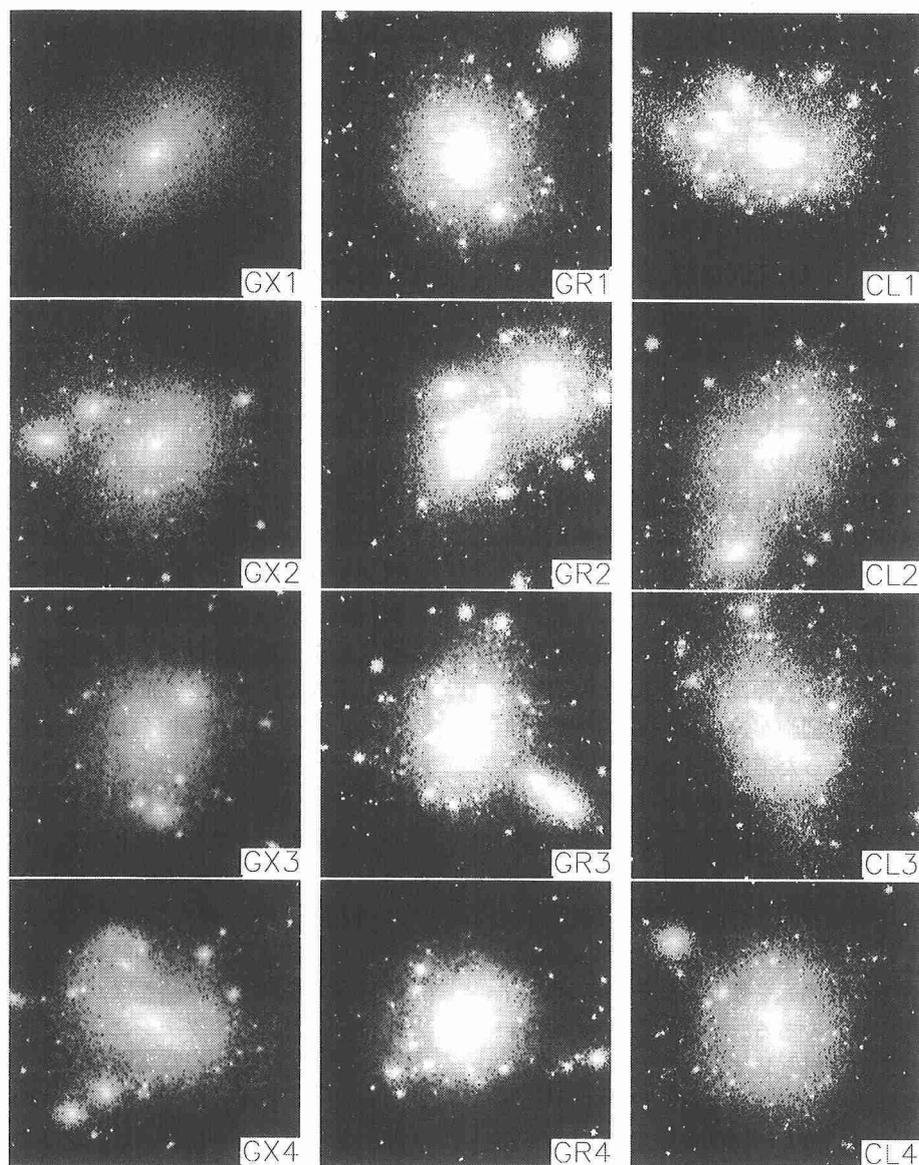


図1：冷たい暗黒物質宇宙モデルにおけるダークマターハローの構造。左から、銀河、銀河群、銀河団スケールの質量に対応する、4つの異なる例をプロットした。図のサイズは適宜スケールしてある。

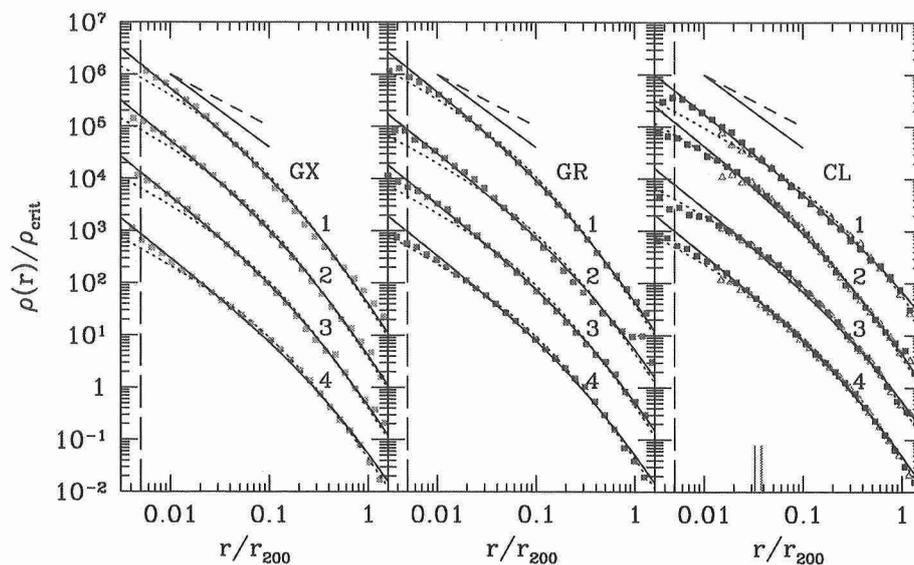


図2：平均化したダークマターハロー密度分布プロファイル。縦軸の値は見やすいようにずらしてある。

## 神経配線のメカニズムを探る

能瀬 聡 直 (物理学専攻)

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

われわれの体の中には、くまなく神経配線のネットワークがはりめぐらされていて、秩序だった行動を可能にしている。例えば、われわれが右手を動かしたいと思ったとき、ちゃんと動かすことができるのは、脳からの指令がいくつかの神経細胞をリレーして、最終的に右手の筋肉を刺激するからだ。脳神経系のネットワークは、一体、どのようにしてできあがるのか。思考や記憶、行動の制御など、複雑な機能を司る脳神経系の動きを理解するために、まず、それができる仕組みを明らかにすることが重要である。

神経の配線は、個体の発生過程において、神経細胞が軸索をその標的となる細胞へと伸ばすことにより形成される。この際、たとえ標的細胞が遠く離れていても、神経軸索は間違いなく、決まった道筋にそって伸び、多数の細胞の中から標的を正確に見つけ出す。このような神経細胞の驚くべき能力を説明するのに古くより提唱されてきたのが「標識路仮説」と呼ばれるものだ。我々が目的地に向かって車を走らせる際、さまざまな道路標識を確かめながら進んでいくように、神経軸索もその経路や標的領域に存在する様々な標識を頼りに、その結合の相手を見つけたすというものである。私たちはショウジョウバエの神経系をモデル材料として、このような「標識」となるような分子を探すことを試みている。

ショウジョウバエでは、多くの神経細胞をひとつひとつ識別し、その軸索の伸びる様子を追跡することができる。たとえば、腹部の筋肉を動かすためのRP1、RP5という隣あう2つの運動神経細胞は、同じ末梢神経に沿って軸索を伸ばし、標的領域に向かってそろって進んで行く(図1)。ところが標的となる筋肉に近づくと、RP1は必ず13番の筋肉と結合するのに対し、RP5はそれよりひとつ背側の12番の筋肉と結合する。つまり、これらの運動神経細胞は何らかの仕組みで自分が結合すべき相手を見分けているのである。

筋肉に何らかの標識があるに違いない。そこで、私たちはそのような標識をコードする遺伝子をエンハンサー・トラップという方法を用いて探すことにした。多くの遺

伝子をスクリーニングし、特定の筋肉において発現する遺伝子を2つ(コネクチンとカプリシャスと名付けた)見つけることに成功した。これら遺伝子のコードするタンパク質を調べたところ、筋肉の表面にあって、神経軸索との相互作用に関わり得るような分子であることが分かった。つまり標識として必要な特徴を備えていた。

より直接的にこれらの遺伝子の働きを調べるため次のような実験を行った(図2)。カプリシャス遺伝子はRP5神経細胞とその標的である筋肉12において発現するが、隣の筋肉13においては発現しない。まずカプリシャス遺伝子を壊してそれがつくるタンパク質ができないようにしてみた。すると、筋肉12と13の見分けがつかないためか、多くのRP5神経は軸索を枝分かれさせ、本来結合しないはずの筋肉13にも結つくようになった。逆に本来発現しない筋肉13において人工的にカプリシャスタンパク質を発現するようにした場合にも、同様の現象が起きた。このことはカプリシャスを発現することが、RP5神経によって標的とみなされるために十分であることを示している。以上の結果からカプリシャスが、特定の神経と筋肉が正しくつながる過程に関わっていることが分かった。コネクチンについても、同様の実験により、神経-筋結合における標識として働くことを示している。

このような研究を続けることにより、神経ネットワークの素子である1個の神経細胞がどのようにしてその配線のパターンを決定するのかを明らかにしていきたい。得られた知見をもとに、将来的には、さらに、この素子がつながってできる複雑なネットワークがどのように形成され機能するのかという問題にアプローチしたいと願っている。

### 文献

1. Shishido, E., Takeichi, M. and Nose, A. Science 280, 2118-2121(1998).
2. 能瀬聡直 細胞工学 18,68-76(1999).

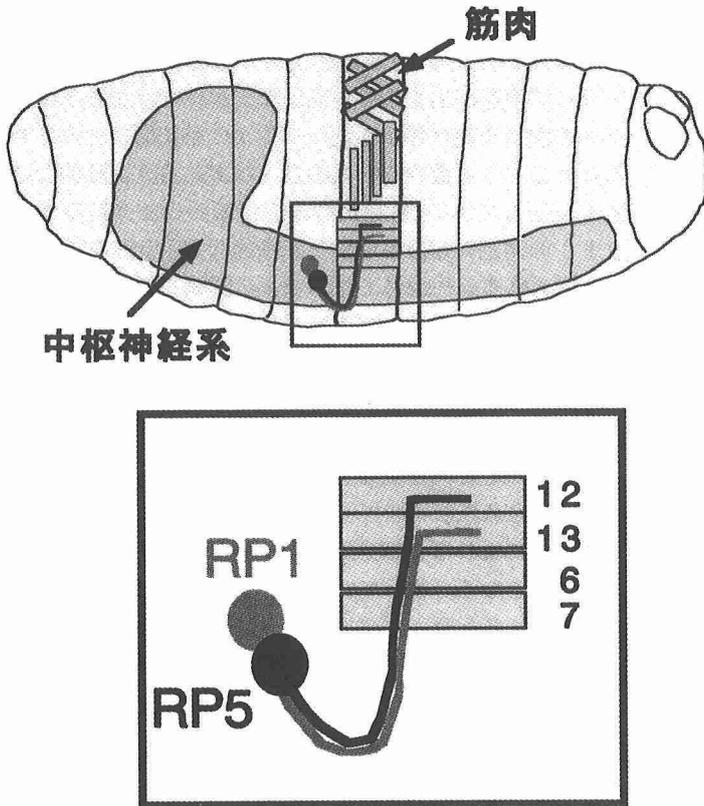


図1 1個の神経細胞を見る  
ショウジョウバエの胚の中で、中枢神経系、筋肉の位置を示したもの。1体節においてのみ、筋肉、および2つの運動神経細胞を示したが、腹部体節では基本的に同じパターンが繰り返される。四角で囲んだ部分を拡大したのが下の図。

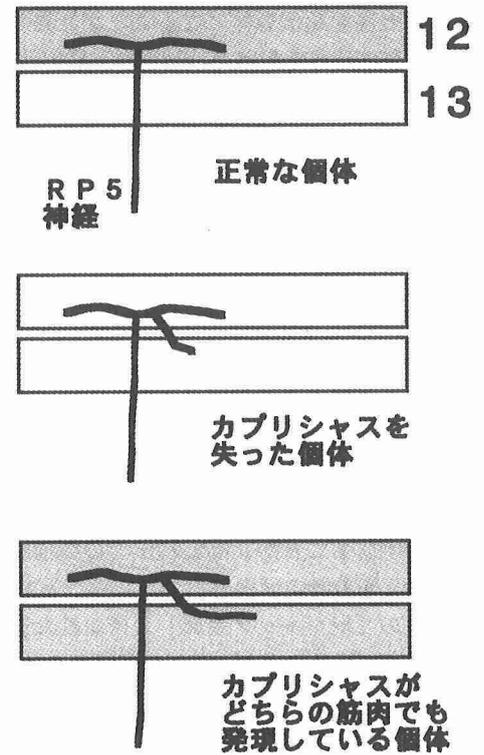


図2 標識分子としてのカプリシャスの役割  
正常な個体ではRP5運動神経は12番の筋肉に軸索を伸ばす。カプリシャス遺伝子を破壊したり、筋肉12、13両方において発現するようにすると、RP5からの軸索は13番の筋肉の方にも伸びてしまう。カプリシャスを発現している筋肉を灰色で示した。

# 絶縁体-超伝導体転移とストライプ構造

藤 森 淳 (物理学専攻)  
fujimori@phys.s.u-tokyo.ac.jp

本来は絶縁体である銅酸化物に正孔キャリアをドーブすると高温超伝導体となることが発見されたのは今から13年前のことであった。それまでは20Kを止まりであった超伝導臨界温度が一気に100Kを越え、室温超伝導の夢が近づいたことで、熱狂的な高温超伝導研究のブームが沸き起こった。この発見が与えたもうひとつの衝撃は、絶縁体と超伝導という極端に違う物性が、図1に示すように相図上で近接して起こるという事実である。絶縁体では電子が局在し、絶対零度に向かって電気抵抗が無限大に発散する。超伝導体では電子が2個ずつ対(クーパー対)を作り、すべての対がひとつの位相で表されるコヒーレントな量子力学的状態に落ち込んで、電気抵抗がゼロになる。このように全く異質な絶縁体と超伝導体間の相転移がどのようにして起こるのかは、学問的にも大変興味ある問題である。また、高温超伝導体の特徴的な相図を解明することが、高温超伝導の機構解明にもつながると考えられる。

図1の「擬ギャップ金属」と書かれた領域に異常な金属相が存在することが、様々な実験から示唆されてきた。擬ギャップ金属相は、金属であるにも関わらずバンド・ギャップが開きかけており、絶縁体と金属の中間的な状態である。この擬ギャップ金属相では、図1の挿入図のように、正孔キャリアがある方向に1次元的に整列するいわゆるストライプ構造を形成しかかっていることが、最近の中性子散乱の実験から示唆され大きな注目を集めている。

我々は、放射光を用いた光電子分光法により、この異常な擬ギャップ金属における電子状態を詳細かつ系統的に研究した。光電子分光法は、物質中の電子のエネルギー分布、運動量分布を直接的に調べる実験手法で、近年の

物質科学において非常に重要な役割を果たしている。我々が対象としたのは、La系超伝導体と呼ばれる、最もストライプ構造が出来やすい高温超伝導体で、正孔キャリアの濃度を絶縁体から超伝導体まで系統的に変化させることのできる数少ない系のひとつである。実験的な困難を克服して、La系超伝導体の信頼おける光電子スペクトルの測定に初めて成功し、動的なストライプ構造のゆらぎによると思われる電子状態の異常を見出した。そのひとつは、ストライプ構造を反映していると思われる1次元的な電子状態の観測、もうひとつは、1次元的なストライプ構造を横切るような電子の運動が阻害されることの観測である。また、正孔の化学ポテンシャルが正孔濃度に対して一定値という現象も、光電子分光実験から見い出された。

熱力学によれば、相分離した状態では化学ポテンシャルが一定となる。従って、上記の化学ポテンシャルの振る舞いは、ストライプ構造のミクロな相分離的性格を反映していると言えるし、正孔間に引力が働くことの自然な帰結とも言える。すなわち、ストライプ構造は、超伝導体と絶縁体が共存する最も自然な形態とも言える。高温超伝導機構の解明には、まだ多くの実験的情報が必要であるが、超伝導臨界温度が擬ギャップ金属と普通の金属の中間で最も高くなっているという事実(図1)は大変示唆的である。この付近の正孔濃度で、光電子スペクトルも最も大きく変化する。異なった相の境界付近に巨大な物性が出現するというのは、高温超伝導に限らず普遍的な現象のようである。

本研究は、新領域創成科学研究科内田研究室、工学系研究科岸尾研究室、スタンフォード大Shenグループとの共同研究であり、謝意を表す。

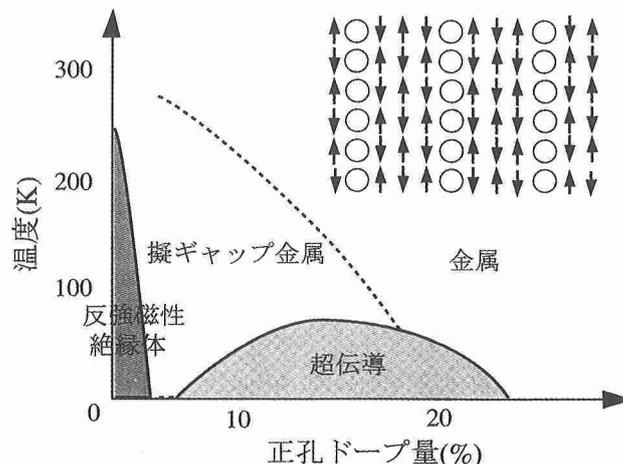


図1 高温超伝導体の相図。挿入図はストライプ構造の模式図。矢印は、正孔がドーブされる前から存在する局在電子のスピンの向き、白丸は正孔。

## 暗い銀河の赤方偏移を推定する

嶋 作 一 大 (天文学専攻)

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

宇宙には、観測可能なものだけで約一千億個の銀河が存在する。我々の銀河系（天の川）もその中に含まれる。これらの銀河がいつ生まれどう進化してきたかは、天文学の最大の謎の一つである。最近の観測で、赤方偏移が5を越える超遠方の銀河も見つかってきている。これらは宇宙がまだ十億歳余りの頃の銀河である。銀河の形成と進化の謎を解くには、現在から宇宙初期までのさまざまな時代にある銀河を系統的に多数調べる必要がある。

銀河の性質を調べる上でまず必要な情報は、その銀河までの距離、すなわち赤方偏移である。赤方偏移は銀河の光を分光してそのスペクトルに見られる吸収線や輝線の波長から求められるが、分光観測には撮像よりはるかに多くの光子が必要なため、赤方偏移の測れる銀河は撮像で見つかった銀河のごく一部でしかない。

しかし、分光せずに赤方偏移を推定することは可能である。銀河のスペクトルの形には共通の特徴があるので、複数の観測波長帯で銀河の明るさを測れば、その特徴的な形をおおまかに知ることができる。観測されるスペクトルは銀河の赤方偏移に応じて長波長側に移動するため、どの観測波長帯にその特徴的な形が来るかが分れば赤方偏移をある程度の精度で推定できる。

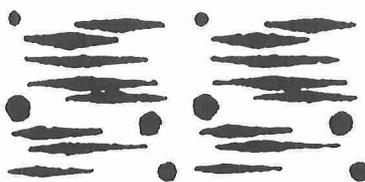
この考え方をもとに、赤方偏移の推定法がこれまでに何種類か考案されている。我々は今回、テンプレートフィッティング法という推定法を改良して、赤方偏移が0から6という広い範囲で、既存の推定法の中で最も正確に且つ安定して赤方偏移を推定するプログラムを開発した。テンプレートフィッティング法では、まず様々なタイプの銀河スペクトルを用意し、それを様々な赤方偏

移りに人為的に移動させた上で、実際の観測で用いられている波長帯で擬似的に観測し、スペクトルタイプと赤方偏移の全ての組み合わせについて観測波長帯毎の明るさの比の予想値（テンプレート）を作成する。このテンプレートを、赤方偏移を推定したい銀河のデータと比較し、銀河のデータを最も良く再現するテンプレートの赤方偏移を、問題の銀河の赤方偏移の推定値と見なす。

テンプレートフィッティング法は適用できる赤方偏移の範囲が広いという特長があるが、一方で、同じ銀河のデータが、赤方偏移の全く違う複数のテンプレートで同様に良くフィットされてしまうことがよく起こる。我々は、テンプレートに用いるスペクトルが現実の銀河をカバーするように種々の工夫を加えることで赤方偏移の推定ミスの頻度を大幅に低減させた。また、我々の方法は、赤方偏移と同時に銀河のスペクトルタイプや銀河のダスト吸収の量も推定できる。これは銀河の性質を調べる上で極めて有用である。

現在、我々は、この方法を遠方銀河が多数含まれていると思われる深い撮像データに適用して、分光が届かない遠方の暗い銀河の統計的性質を調べている。また、間もなくすばる望遠鏡で取得するデータ（そこには超遠方の銀河が多数隠れていると期待している）への適用も計画中である。分光を用いない赤方偏移の推定法は、ここ数年で非常に進歩した。今や、銀河を観測的に研究する上で不可欠な技術となりつつある。

本研究は、天文学専攻の古澤（博士課程）を中心にした、岡村（教授）、土居（助手）との共同研究である。



## エルニーニョの弟を発見 !?

山形俊男 (地球惑星科学専攻)  
yamagata@eps.s.u-tokyo.ac.jp

まだ記憶に新しいところですが、1993年は大変な冷夏で、東北地方では稲作が壊滅的な打撃を被りました。一昔前ならば飢饉になっても不思議ではなかったほどです。翌年、1994年には暑い夏が訪れました。東京付近でも八月に摂氏四十度を超える日が長期間続いたのです。日本や極東アジアに夏が来るというのは、地球規模で眺めるならば、大気の大気循環の下降域にあたる亜熱帯高気圧、すなわち北太平洋高気圧の西縁の部分（小笠原高気圧）に覆われるということです。大気の下降域は圧縮効果のために温暖で天候がよく、加えて日射のために暑くなるわけですが、この下降域の強度や広がりには熱帯域のフィリピン沖合に生じる大気の上昇域（対流域）の状況に左右されます。この関係は船のウェークに生じる波列を考えると理解できます。しかし自転する地球上の大規模な流れでは渦度が重要なので船による水面波のようなものではなく、渦列からなる定在波です。対流運動の活発な上昇域に低気圧性の巨大な渦が生じ、その北東部の下降域に高気圧性の渦、さらに大円に沿ってその北東部に低気圧性の渦という具合に波列が生じます。このように遠隔地の気候をつなぐ力学のメカニズムをテレコネクションと呼びますが、特に西太平洋の渦列パターンは気候システム研究センターの故 新田教授によってPJパターンと名付けられています。1994年はフィリピン沖合の上昇流が普段よりも強く、かつ北にずれたために、日本列島全体が強い太平洋高気圧に覆われてしまったということなのです。

どうして1994年にはフィリピン付近の上昇流が普段よりも強かったのでしょうか？

インドからの共同研究者（ベヘラ、クリシュナ両博士）とともに米国海洋大気庁の国立環境予報センターで発行している再解析データ（気象学では様々な観測データを同化した天気予報の結果を保存し、解析に使います）を用いて、この年の夏の降水量の分布を調べてみました。これが図1に示したものです。確かにフィリピンの沖合に正の偏差が、日本付近は負の偏差を見ることができます。北部インドからミャンマー、華南にかけてはフィリピンの沖合とともに降水量が増大しています。しかしなんととっても明瞭なシグナルはインド洋の熱帯域に東西にならんだダイポール構造です。熱帯域では海面水温が摂氏28度を越えると降水を伴う積雲対流が急激に活発化することがわかっていますので、インド洋の東で乾燥し、西の方で雨が降るといふ降水量分布に現れたダイポール・パターンは西で海水温度が高く、東で低いことを示唆します。実際、海面水温の偏差にも同じようなダイポール・パターンが生じていることがわかりました。

日本の暑い夏を解釈するにはこのインド洋のダイポール・パターンによるテレコネクションの可能性も考慮する必要が出てきたわけです。現在、中国やインドから来日している気象研究者とともに大気大循環モデルを用いた実験を通してこの物理機構の詳細を調べているところです。

1993年、94年の日本の異常な夏を調べる研究チームが1995年に筑波大学の安成教授の音頭で結成され、海洋学分野から参加させていただきました。これを契機としてセレンディピティ (serendipity) といえるのどうか、上で述べたインド洋熱帯域の奇妙な大気海洋現象に遭遇することができました。インドからのポストドクトラルのピナヤチャンドラン博士とインド洋内部の状況なども海洋大循環モデルを用いて調べたところ、随分と大きな海流の変動も伴うことがわかりました。それでインド洋のダイポールモード現象と命名し、サジ博士らとともに過去数十年の大気海洋データから、その出現頻度や発生から消滅に至るプロセスを昨年九月にネイチャー誌に発表しました。この現象はいわば大太平洋のエルニーニョ（神の子、イエスキリスト）のインド洋バージョンともいえるべきものです。これを取材したアメリカのサイエンス・ニュースの記者はエルニーニョとはかなり遠い現象ということで従兄弟というような表現を使っていました。このダイポールモードの強い現象は1961年、67年、94年に起きています。それ以外には72年、82年、97年というように強いエルニーニョの年にも起きていますので、この意味ではエルニーニョの兄弟現象の呼んだ方がよさそうです。

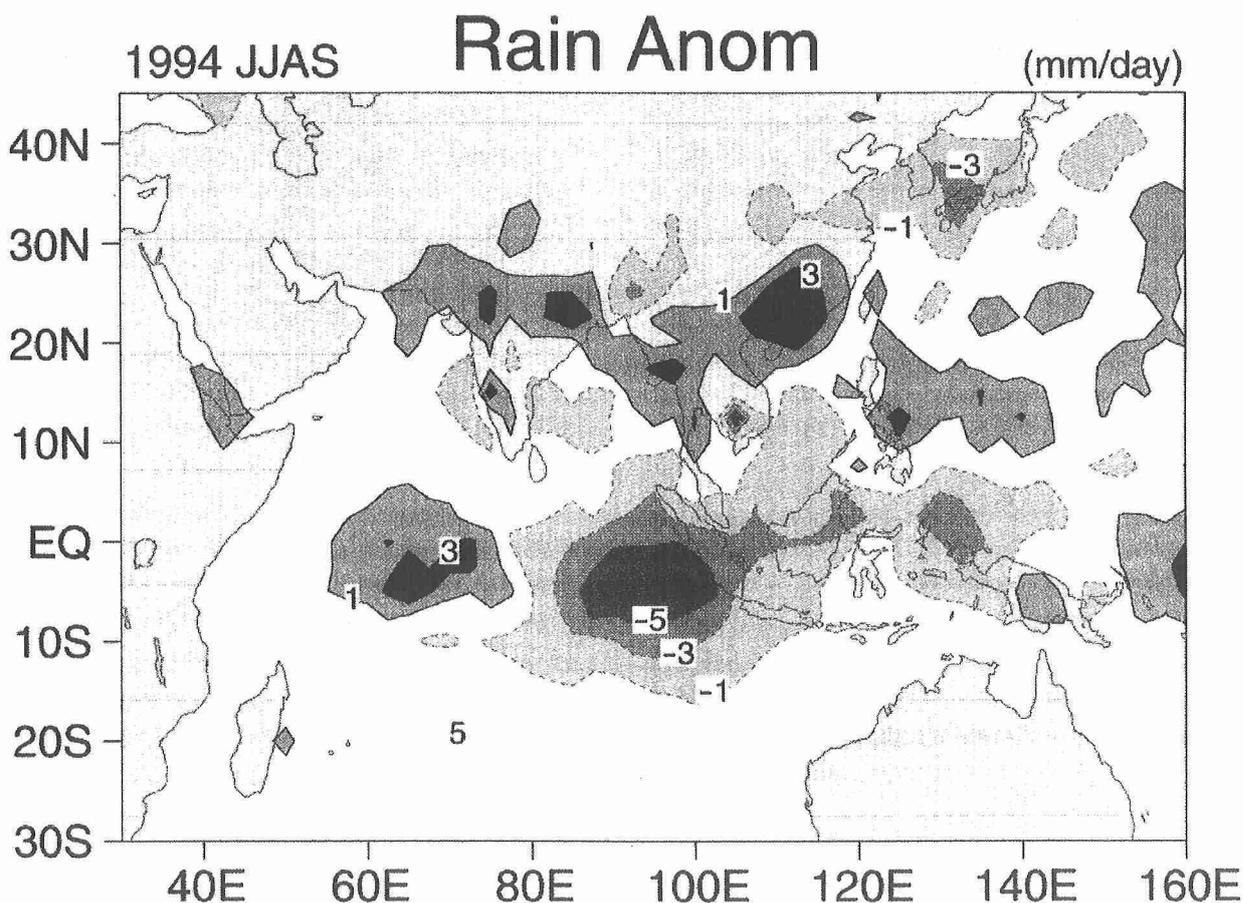
この現象の発達過程は次のようになっています。まずスマトラの沖合に南東貿易風が入り込み、それが赤道を越えるほどに強くなります。そうすると赤道上で東から西に吹く風の成分が生じ、それが暖水をソマリア、ケニアの沖合に運び、反対にスマトラの方が沿岸湧昇で冷えてきます。冷たい海洋上では大気が冷やされて丈の低い高気圧が生じます。一方で暖かい海水の上は低気圧性となるために、地球の回転効果を見無視できる赤道上では高圧部から低圧部にむけて東風がさらに強まります。こうして大気と海洋の間に正のフィードバックが働いて、ダイポールモードはどんどん成長するのです。10月あるいは11月に最盛期を迎えますが、南半球が夏になるにつれてスマトラの沖合の南東貿易風のパターンは南し、12月頃から急激に減衰します。このダイポールモード現象が起きると、インドネシアの周辺海域は冷えて大気は乾燥します。大太平洋のエルニーニョの時にも暖水が東部大太平洋に移動してしまうために、水温が低くなり乾燥することになるので、インドネシアの気候はそれを挟む両方の大

洋からダブルパンチを受けてしまうのです。これらの現象は現地では、昔から知られていてトゥアラング (Tuarang : 異常な乾期) という言葉で総称されているそうです。一方で、インド洋の西側は暖水がたまりますから、エルニーニョの時のペルーのような状態になり洪水が起こります。特にナイル河の上流の白ナイル流域やビクトリア湖の周辺に大雨をもたらしますが、その周辺は土が赤いようなので時ならぬ赤色の洪水をナイル河にもたらしたと推測できます。河口域は赤い水にあふれ、古代エジプト人はさぞかし驚いたことごとでしょう。『出エジプト記』に血の水で、あたり一面が覆われ、た

くさんのカエルが現れたというようなことが書いてありますが、これはインド洋のダイポール現象に関係あるのかもしれませんが。アレクサンドリアの沖合を掘削して、この現象を過去に遡って調べることができたらと、そんな夢を見ている。

参考資料：

- 1) 山形俊男、升本順夫 海が気候を決めている？ 科学、69巻、8号、706-713、1999年
- 2) 山形俊男、サジ・ハミード インド洋にもエルニーニョ？ パリテイ、5月号、36-39、2000年



図：1994年の夏季（6月から9月）の降水量の平年値からのずれ。 単位は mm/day

# 無衝突衝撃波の電子加速

星野真弘 (地球惑星科学専攻)  
hoshino@eps.s.u-tokyo.ac.jp

太陽惑星間空間で観測される衝撃波をはじめとして、超新星残骸における衝撃波、パルサー風—シンクロトロン星雲での衝撃波、宇宙ジェットでの衝撃波などすべて高エネルギー粒子の起源である。これら物理パラメータの異なる衝撃波の仲間のうち、特に太陽惑星間空間で観測される無衝突衝撃波は、直接観測の利点を生かしてプラズマの微視的過程に踏み込んだ研究が行われている。衝撃波加速過程を支配する物理過程の普遍性から、太陽惑星間空間で観測される衝撃波加速を理解することは、広く宇宙での宇宙線や非熱的高エネルギー粒子形成の理解にとっても重要であることは言うまでもない。

これまで衝撃波の研究では、1970年代にほぼ確立したフェルミ加速過程理論が、冪のエネルギースペクトルを持つ高エネルギー粒子の起源として、もっとも多く応用されてきた。フェルミ加速は、衝撃波上流と下流域に励起されている波を介して粒子が散乱される毎にエネルギーを得ていく過程で、衝撃波領域を何度も横切る必要があり、相応の加速時間が必要な「遅い」加速過程である。一方、衝撃波のエネルギー散逸領域を粒子が横切の際にそこでのプラズマ不安定を介して高エネルギーまで加速する「はやい」加速過程も存在することが古くから予想されていた。衝撃波のエネルギー散逸領域では大振幅の電磁場が存在するので、超音速のプラズマ流を安定な衝撃波下流の状態に移行するのに必要なプラズマ加熱だけでなく、非熱的粒子も同時に形成されているだろうと考えられる。しかし非線形性に富む衝撃波エネルギー散逸領域の物理を解析的に記述するのが困難であり理解が余り進んでいなかった。

ここでは最近の衛星観測・数値シミュレーションにより「はやい」加速過程の研究が進んできたことを簡単に紹介する。まず図1に示したのが超音速の太陽風と地球磁気圏との相互作用で出来たバウショックの衛星観測例で、衝撃波遷移領域で50mV/mを超える大振幅電場が励起されていることを示す。この観測では衝撃波のマッハ数が約10であり、最大200mV/mにも及ぶ電場が観測されたことが報告されている。通常太陽風の対流電場の大きさが数mV/mであることを考えるとかなり大振幅電場である。さて衝撃波が太陽風の擾乱などにより揺らいでいるので、一点での衛星観測では波動の空間スケールを決めるのは難しいが、1msecの時間スケールの波動はおよそ電子慣性長になる。図2に示したのがプラズマ粒子法で計算したマッハ数10の垂直衝撃波のシミュレーション結果である。上図が電子の位相空間、下図が電場であり、系の左側が超音速プラズマの流れる衝撃波上流、右側が加熱されたプラズマが存在する下流である。空間X座標は電子慣性長で規格化してあり、速度・電場はそれぞれ衝撃波上流での流速および対流電場で規格化してある。図2から空間的に局在化した電場は観測結果をよく再現しており、その電場に対応して電子位相空間に「あな（ホール）」が形成されていることが分かる。詳細は省くが「電子ホール」の下流で急激に電子が加熱されており、電子ホールの崩壊が非熱的高エネルギー電子の形成にも結びついていることが分かってきた。局在化した大振幅電場・電子ホールが、衝撃波遷移領域で電子加速加熱に大きく寄与するという考え方は新しく今後の研究発展が期待される。

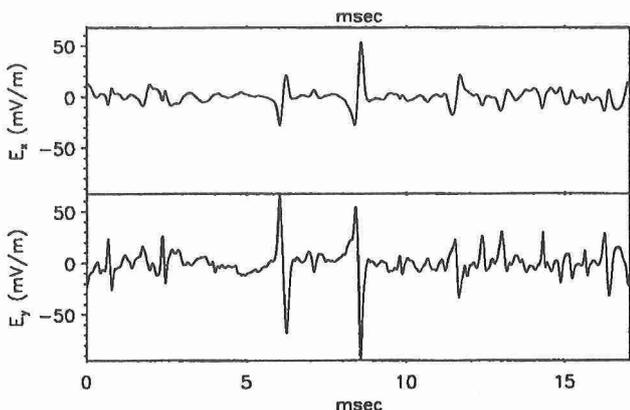


図1 磁気圏衛星で観測された衝撃波遷移領域の大振幅ソリトンの電場

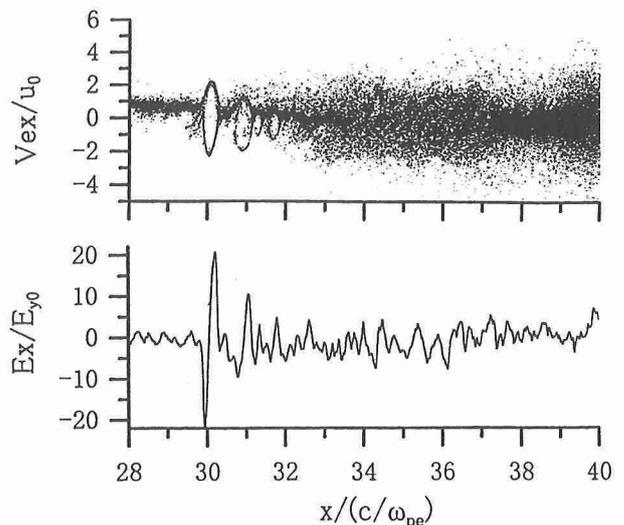


図2 無衝突垂直衝撃波の数値シミュレーション結果, (上) 電子位相空間, (下) 電場

## 二枚貝、巻貝の殻の破片化から探る捕食者の登場

大 路 樹 生 (地球惑星科学専攻)

oji@eps.s.u-tokyo.ac.jp

浅海性の地層の中で二枚貝や巻貝の殻が破片化して産出することはよく知られている。この原因として従来、水流や堆積物の圧密による物理的な破壊と、殻を割って捕食する動物による生物的な破壊が考えられてきた。私と大学院生を含む共同研究者らは、さまざまな時代の貝殻化石層を観察し、破片化した貝殻がいつ頃から出現し始めたのかを検討している。

現在までのところ、中生代の貝殻化石層からは破片化した貝殻はほとんど見つからない(付表参照)。例えば三疊紀前期の平磯層(宮城県)や白亜紀前期の宮古層群の浅海性化石層にはストーム堆積物に伴う貝殻層が多数挟まれ、非常に薄い殻を持つ二枚貝の殻が多数含まれているが、これらのほとんどは破片化していない。つまり物理的な破壊は顕著ではないということの意味している。中生代ではわずかに白亜紀後期の双葉層群から破

片化した二枚貝の破片が集積した化石が見つまっている。一方、房総に分布する第四系では破片化した貝殻層はさまざまな層準から知られている。また現在の海岸に打ち上げられている貝殻にも特徴的な割れ方をした二枚貝、巻貝が多く見られる。そのうちの多くはカニ類による捕食の結果であると推測される。

カニ類や真骨魚類、鳥類の一部などの、硬い殻を割って捕食する動物たちが増加したのは、中生代の後半からである。これらの捕食者が増加する以前、すなわち三疊紀やジュラ紀の浅海環境では、二枚貝、巻貝は破片化することはなかったのに対し、新生代に入ってからこれらは破片化する事が多くなったと推測される。現在、データの少ない古第三系の資料を収集しつつあり、殻を割る捕食動物の軟体動物に対する捕食圧の地史的变化を見積もることを目指している。

中生代の化石層における二枚貝、巻貝の破片化の有無

地 層 名	時 代	主 な 種	破片化?
双葉層群足沢層 (福島県いわき市、広野町)	Coniacian (白亜紀後期)	<i>Eryphyla</i> sp. <i>Steinmatella kimurai</i> <i>Glycymeris</i> sp., etc.	○
中部蝦夷層群三笠砂岩層 (北海道三笠、夕張)	Cenomanian (白亜紀後期)	<i>Glycymeris</i> sp. <i>Pterotrigonia</i> sp. <i>Entolium</i> sp., etc.	×
宮古層群田野畑層、平井賀層 (岩手県田野畑村)	Up. Aptian (白亜紀前期)	<i>Pectinella?</i> <i>miyakoensis</i> <i>Pterotrigonia hokkaidoana</i> <i>Nagaoella corrugata</i> , etc.	×*
萩野層 (高知県物部川)	Aptian (白亜紀前期)	<i>Acanthotrigonia moriana</i> <i>Laevicardium</i> (?) sp. etc.	×
銚子層群君が浜層 (千葉県銚子市)	Barremian (白亜紀前期)	<i>Pterotrigonia pocilliformis</i> <i>Nanonavis yokoyamai</i> <i>Nuculopsis ishidoensis</i>	×
志津川層群葦の浜層 (宮城県歌津町)	Hettangian (ジュラ紀前期)	<i>Vaugonia nirahohamensis</i> <i>Coelastarte</i> sp. <i>Cucullaea</i> sp., etc.	×
上村石灰岩層 (宮崎県高千穂町)	Low. Triassic (三疊紀前期)	<i>Eumorphotis</i> sp.	×
稲井層群平磯層 (宮城県本吉町)	Smithian (三疊紀前期)	<i>Eumorphotis iwanowi</i> <i>Neoschizodus</i> sp. <i>Entolium</i> sp., etc.	×

破片化 ○ — 有 × — 無

\* — 摩滅による破片化有り