

カラビーヤウ多様体を通じて

小木曾 啓 示 (数学科)
oguiso@ms.u-tokyo.ac.jp

専門は複素代数幾何学で、主に標準束が自明であるような多様体に関する研究をしている。標準束が自明である多様体は、ある意味で無重力状態におかれた多様体であり、“方向性”をつけるには人工的に偏極をあたえる必要があるという意味で自然に扱えない面もあるが、他方、周期に関する振る舞いはよく、 $K3$ 曲面とよばれる、その性質の美しさで多くの数学者を魅了してきた曲面の一般化でもある。従って、いろいろな、美しくかつ面白い性質をもっているに違いないと信じられている多様体でもある。

その1つのクラスが3次元カラビーヤウ多様体と呼ばれる多様体で、10年ほど前に物理学者 Candelas らによってミラー対称性と呼ばれる純数学的には予想だにできなかった意外な対称性が発見されたことで、数学者、物理学者の間に一大センセーションを巻き起こした多様体のクラスでもある。90年の中頃には e-print server に毎日の様にタイトルにカラビーヤウという文字のはいった preprint が出ていた。Candelas らが実際に観察したと思われる超曲面型カラビーヤウ多様体に対する、ミラー現象は、数学者バテレフによるトーリックファノ多様体の超曲面族に対する位相的ミラーの数学的構成、コンセヴィッチ、マニンらによる曲線の安定写像のモジュライ理論、量子コホモロジー群の数学的整備発展を経て、最終的には数学者ギヴェンタールによって純数学的にも検証され、ある意味で一段落ついたところもあるようである。

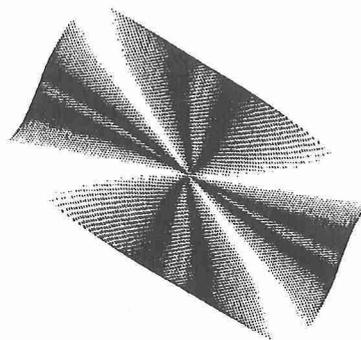
ところで、筆者は、川又氏による3次元代数多様体のアバダンス予想の解決に触発され、92年頃から、ミラーとは無関係に、純代数幾何学的な視点から3次元カラビーヤウ多様体の研究をはじめていた。だから、その過程で何となく感じていたことが、錐予想と呼ばれる、ミラー対称性予想の1つの数学的定式化の中に現れる予想と密接に関係することを、Morrison 氏から指摘された時は驚いた。そこで錐予想の幾何学版であるファイバー空間予想（一般にはファイバー空間構造は無限個あるのに同型を法とすれば有限個になってしまうという予想）をたて、その予想の解決を目指すことにした。調べていくうちに第2チャーン類と呼ばれる特性類が問題とかかわることがわかってきた。このことは、“第2チャーン類がある程度大きい”場合に予想を解決した Perternell 氏との共同研究（98年出版・preprint は96年頃完成）で明らかになった。この論文の方法は Alexeev 氏の対数的曲面のモジュライ空間の有界性定理に基くもので、比較的

abstract な方法であった。難点はその方法で得られる結果は、予想より強く「本当の有限性」をも導いてしまうところにあった。従って、「本当の有限性」には反例のある) 第2チャーン類が消えてしまうようなファイバー空間構造には、全く無力な方法だった。今年の今ごろ（10月頃）、対極にある、第2チャーン類を消してしまうファイバー空間構造についても有限性予想を解決することが出来た。その解決には、前段階として、第2チャーン類を消してしまうようなファイバー空間の幾何学的構造をかなり詳細に明らかにすることが必要になった。対数的極小モデル理論、表現論など、証明にはいろんな道具が（少なくとも筆者の方法では）必要になったが、結果的には非常に簡明な構造になってしまうことがわかった。これは筆者には少し驚きでもあり、この構造定理自身が予想解決の過程で得られた副産物にもなった。（ただ前提としていた筆者の論文の1つに不備が見つかってしまい、最初からやり直さなければならないところが出てきてしまうというハプニングはあったが。）ファイバー空間予想の完全解決には、あと、特性類を消してしまう（仮想的）ファイバー空間構造へのファイバー空間構造の収束の解析にかかわる問題が残っているが、力不足でまだ出来ていない。この一連の研究は、結果や方法はミラーとは関係しないのに、ミラー予想がなかったら定式化することに思い至れたかどうかすらわからないという点で、ミラー予想に大きく依存した。

また、もう一つの貴重な“副産物”は、この研究を通じて、いろいろな数学者、物理学者と知り合え、時として海外の研究集会に呼んでもらえたり、その時々違うバックグラウンドをもった研究者の人達と議論できたことだった。昨年1年はフンボルトフェローとして Viehweg 氏の下、ドイツのエッセン大学に滞在し、氏と新しい共同研究をするという機会に恵まれた（近く出版予定）。その研究は、すぐ後に、氏によって違った方法で一般の場合に拡張されてしまったという点では必ずしも成功作とはいえないし、筆者の貢献度もあまり大きくないものではあったが、ある種の楕円曲面族の準自明性という今までの筆者の研究とは異質な問題であったにもかかわらず、カラビーヤウ多様体のファイバー空間構造を調べる時に学んだ楕円ファイバー空間構造に関するいくつかの技法や、 $K3$ 曲面の研究によくでてくる周期写像の考えが役立ち、そこで少しお手伝い出来たことがちょっと嬉しかった。また、この研究と Borchers らによる先駆けの仕

事に触発されて、標準束が自明である単連結多様体のもう一つのクラスである超ケーラー多様体 ($K3$ 曲面の最も忠実な高次元化) の1次元小変形に伴うピカル数のジャンピング現象を明らかにできたことは、出来てしまえば簡単なことではあったが、今後の研究にも繋がる一つの成果だったと思う。この研究の初版はいくつかの技術的仮定付きであったが、その後、川又先生のご助力等もあって、技術的仮定を全て取り除くことができた。一つの応用として楕円 $K3$ 曲面のモーデルヴェイユ格子達の中に階層構造があることを明らかにした。また、稠密性問題に関する従来にはなかった視点も得られた。近く最終版を投稿する予定である。

この論文をきっかけに、今現在の興味は、超ケーラー多様体、 $K3$ 曲面及びそれらの族の研究に移ってきている。



データマイニングとゲノム情報科学

森 下 真 一 (情報科学科)
moris@is.s.u-tokyo.ac.jp

平成11年9月に理学部情報科学科に赴任しました森下真一です。大規模なデータベースから経験則を高速に抽出するためのデータマイニング技術の研究と、膨大なゲノムデータの解析を、やはり高速に行うゲノム情報科学の研究をしております。

データマイニング (data mining) は、耳慣れない言葉かもしれませんが、巨大なデータベースを鉱山にたとえ、そこから値千金の鉱脈のような経験則を発見するという意味をもつ造語です。1993年ごろからIBM アルマデン研究所で研究が盛んになり、特にビジネスデータへの応用が著しく、遺伝子情報へも適用されています。従来の回帰分析などとの違いの一つとして、連続量ではなく離散的な値をもつパラメータを対象とし、パラメータの値がある離散値と等しくなる条件の論理積を考え、論理積の間に相関度を定義し、相関度の高い組合せを高速に計算することが大きな研究テーマになっています。パラメータ数が数百万におよぶことが稀ではないため論理積の数は膨大になり、計算の最適化が必要になります。計算中に考慮すべき論理積をうまく選択し、調べても無駄な論理積の集合を切り落とす pruning 法の設計が重要になります。我々は相関度を定義する統計量の性質を利用した pruning 法である AprioriSMP 法を設計開発し、以前は解法が難しいとされたベンチマークテストを効率的に解くことに成功しました⁽¹⁾。

データマイニングの応用として、ゲノム情報科学の研究も行っております。例えば、ゲノム医学分野では SNP と呼ばれる遺伝的多型性をもつゲノム上の1塩基の変異を数十万から数百万のオーダーで収集する計画があります。遺伝病との相関の高い SNP の組合せを計算するために AprioriSMP を利用することを考えています。

ゲノム情報科学の研究では、他に約2万個のヒト遺伝子 (mRNA) が様々な異なる細胞中でどれだけ働いている (発現している) かという定量的な情報を公開中の www サーバー BodyMap (<http://bodymap.ims.u-tokyo.ac.jp/> 図1参照) を開発しています⁽²⁾。各細胞に発現している遺伝子とその分布の偏りからランキングする機能⁽³⁾、発現の類似性から遺伝子をグループ化することで機能の異なる遺伝子を分別する機能など、他に類のないユニークな情報を提供するサーバーとして認識され、海外からのアクセスも過半数に及んでいます。

また、ゲノム上高精度遺伝子地図の作成にも取り組んでいます。従来のゲノム情報科学の貢献の一つとして、数百万個におよぶ cDNA をデータベース化し、配列の類似性が高い cDNA を探す機能 (Blast などのツール) を提供したことがあります。実際、多くのユーザに利用されています。しかし cDNA 間の比較だけでは、選択的スプライシング・プロモータ配列など転写に関連する重要な情報が見えないという問題もあります。幸い1999年後半以降はヒトゲノムの公開が進展し、DNA 配列という正確かつ完備な情報をもつ物差しの上に、cDNA をすべて写像して比較することが不可能ではなく現実味を帯びてきています。しかし、数百万個にも及ぶ全 cDNA 配列を塩基数約30億のヒトゲノム上に exon-intron の構造情報も明らかにしながら高速に写像するのは容易ではありません。また、高精度に読まれたヒト DNA とは異なり cDNA 配列には読取のミスが多く、このような読取ミスにも柔軟に対応ができる感度の高い動的計画法の利用が望ましいのですが、動的計画法は Blast などの近似的解法に比べ計算の負荷が大きいという問題があります。我々は現在、塩基数が約3千万の DNA 配列に長さが数千の cDNA 配列を平均10秒程度で写像するソフトウェア技術を開発しましたが、もう1桁の性能向上かできないか模索しています。そして近い将来 WWW からゲノム上高精度遺伝子地図 (図2参照) を公開したいと考えています。

参考文献

- [1] S. Morishita and J. Sese. "Traversing Itemset Lattices with Statistical Metric Pruning." *Proc. of ACM SIGACT-SIGMOD-SIGART Symp. on Database Systems (PODS)*. pp. 226-236, May 2000.
- [2] T. Hishiki, S. Kawamoto, S. Morishita, K. Okubo: "BodhMap: a human and mouse gene expression database" *Nucleic Acids Research*, Volume 28, Issue 1, pp. 136-138, January 2000.
- [3] J. Sese, H. Nikaidou, S. Kawamoto, Y. Minesaki, S. Morishita and K. Okubo. BodyMap incorporated PCR-based expression profiling data and a gene ranking system. To appear in *Nucleic Acids Research*.

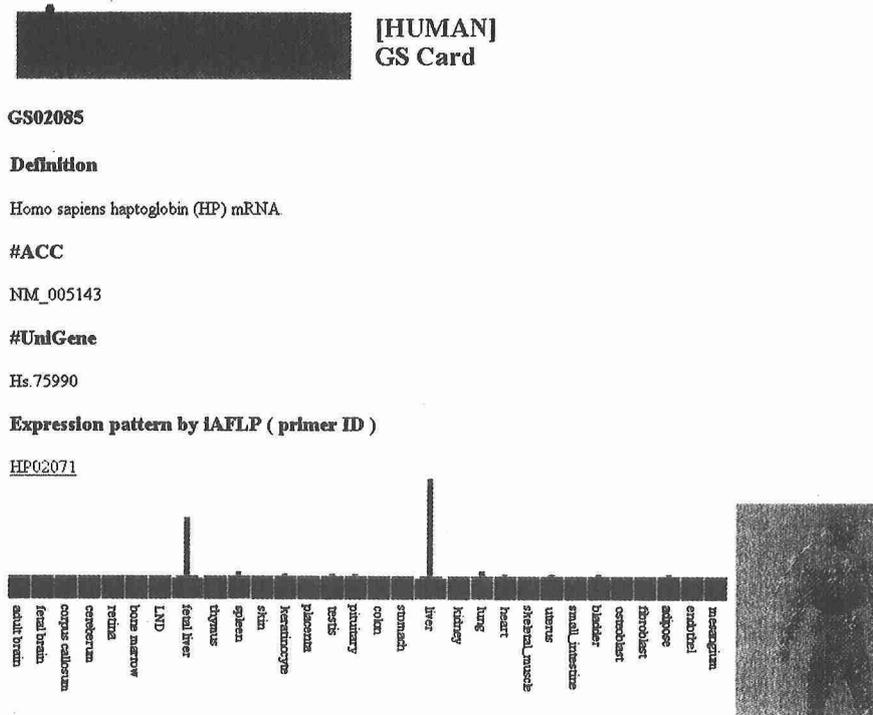


図1 WWW サーバーBodyMap <http://bodymap.ims.u-tokyo.ac.jp/>
図は遺伝子の細胞別発現量を表示した GS Card の例。

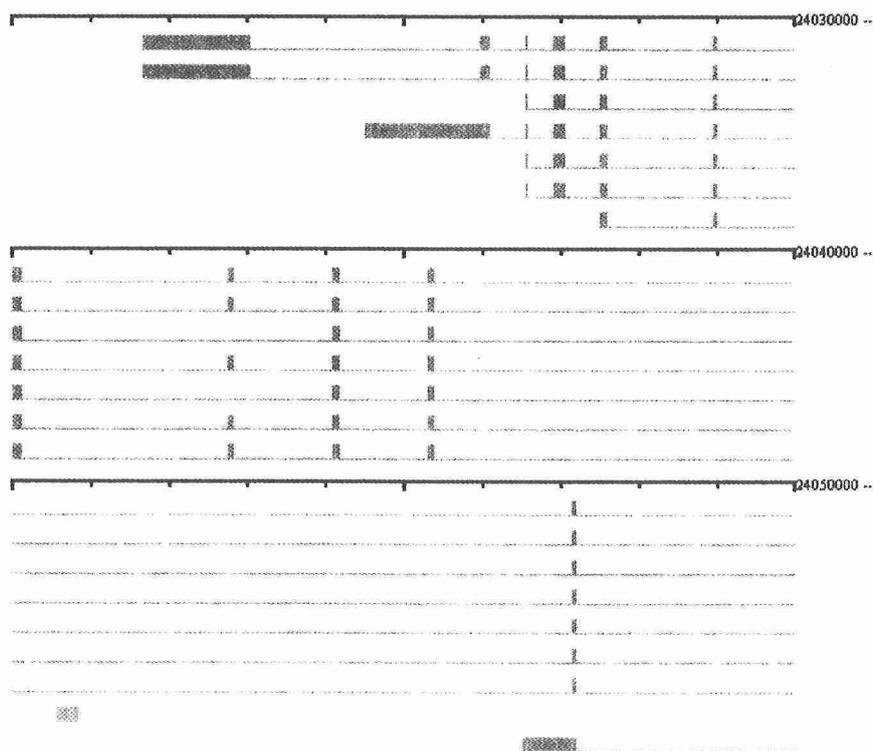


図2 開発中のゲノム上高精度遺伝子地図のイメージ
21番染色体 DNA 配列の一部に cDNA を写像した結果。
複数の alternative splicing やプロモータ配列が分かる。

太陽の100倍の質量をもつ回転ブラックホール

牧島 一夫 (物理学専攻)

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

重い星は、進化の最期に潰れてブラックホール (BH) になる。BH は、その質量に比例した半径 R_S の「事象の地平線」に囲まれ、その内側からは光も逃げ出せない。暗い夜空に潜む BH は簡単には発見できない。しかし BH と星とが近接連星をなし、星から BH へとガスが降着すると、BH の周りにできる降着円盤から強い X 線が放射され、目立つ天体となる。はくちょう座にある強い X 線天体 Cyg X-1 が BH 連星に違いないという達見を、世界に先駆けて1970年代はじめに唱えたのは、本学名誉教授の小田稔博士である [1]。

以来、日本は BH 連星の研究で世界のトップを走り続けてきた。ある条件で降着円盤は、幾何学的に薄く光学的に厚い「標準状態」となり、そこからの X 線放射は、各種の温度の黒体放射を一定の比率で混ぜ合わせた「多温度黒体放射」になると考えられる。この予想は、宇宙科学研の3世代の衛星「てんま」「ぎんが」「あすか」により、5個ほどの BH 候補の観測を通じて検証されてきた [2]。BH を中性子星から区別する方法が確立し、観測データから求めた降着円盤の内縁の半径が $3R_S$ とよく一致することも見出された。この $3R_S$ は、一般相対論のために安定な円軌道が消失する半径なので、理論的な予想とも辻褄が合う。1996年には王者 Cyg X-1 の降着円盤が、16年ぶりに標準状態となり、我々が開発した「あすか」ガス蛍光比例計数管 (GIS) [3] の観測データから R_S を求め、そこから BH 質量を推定したところ、 $\sim 12M_\odot$ と求まった。これは光学対応天体の軌道ドップラー運動から求めた値とよく一致するため、我々は「Cyg X-1 は正真正銘の BH である」と宣言するに至った [4]。

系外銀河には新たな驚きが待っていた。20年も以前から、近傍の渦巻銀河の腕には、異常に明るい点状の X 線源がしばしば観測されており、大きな謎となっていた。それらの X 線光度は太陽光度の数百万倍にも及ぶ。重力がその放射圧に勝つためには、中心天体に $\sim 100M_\odot$ もの質量が必要なため、それらは BH だろうと考えられて来た。しかし $\sim 100M_\odot$ の BH が星の進化の果てに作られるというコンセンサスは無く、この考えは仮説の域を出なかった。

我々はこうした天体を ULX (Ultra-Luminous Compact X-ray Source) と名付け、「あすか」を用いて

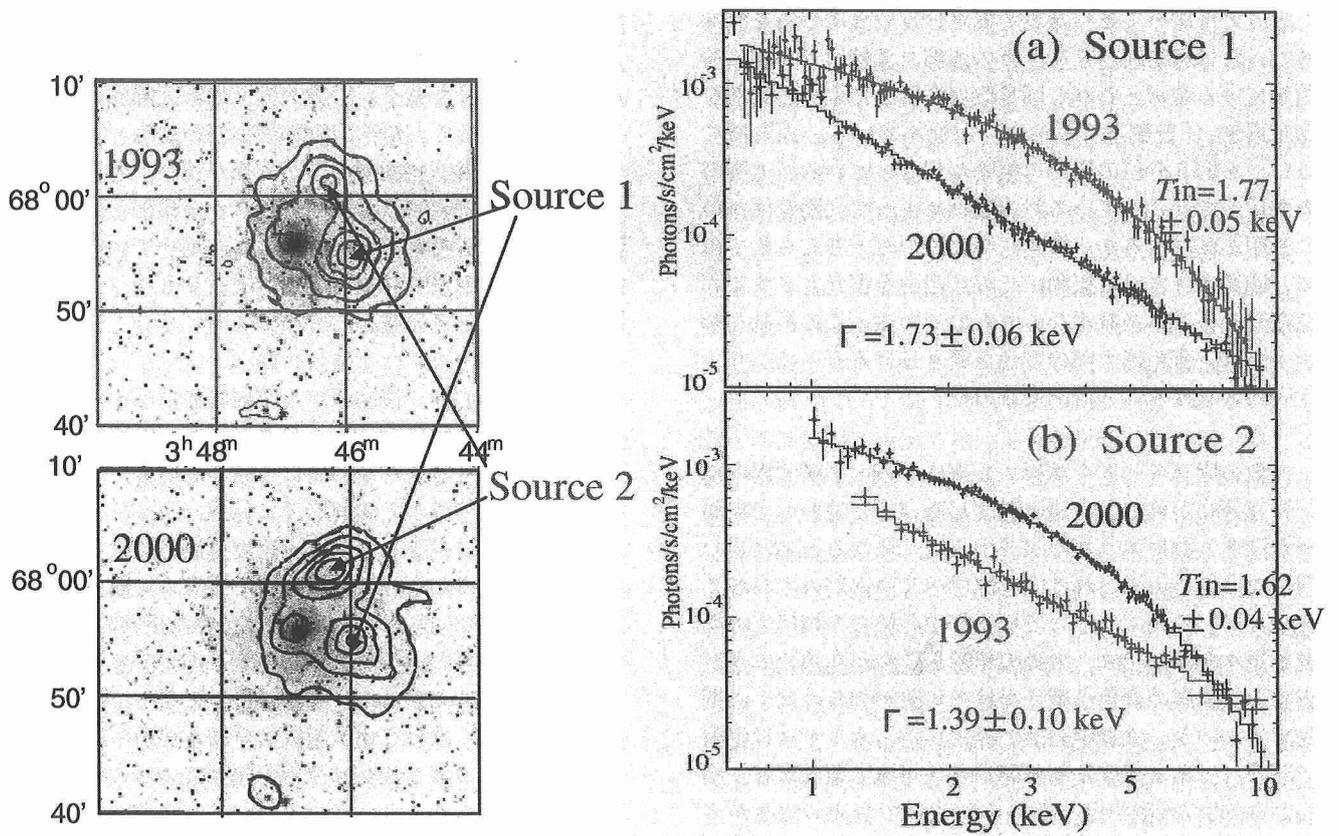
系統的な X 線分光を行ってきた。その結果、8個ほどの ULX は標準降着円盤のスペクトルを示し [5]、残る3個ほどは硬い「べき関数」型のスペクトルをもつことを発見した。後者は、光学的に薄い降着円盤からの放射であり、やはり BH 連星に特有である。さらに IC342 という渦巻き銀河にある2個の ULX は、7年を隔てて再観測したところ、一方のスペクトルは標準状態から「べき関数」状態に遷移し、また他方のスペクトルは、偶然ではあるが逆向きに遷移したことが発見された [6]。この様子を図に示す。こうした遷移は BH 連星に固有な特徴なので、ULX が $\sim 100M_\odot$ の BH 連星であることは確定的となった。

この結果には続きがある。 $\sim 100M_\odot$ と重い BH では、降着円盤の内縁温度は、理論的には ~ 0.5 keV を越えないはずなのに、ULX で観測された内縁温度は、いずれもその3~4倍に達する。我々は、BH が高速で回転する「Kerr ブラックホール」になっていて、その場合には安定な円軌道が $0.5R_S$ まで接近できるため、円盤の内縁温度が高くなると考えている。超高速回転する重い BH をどうやって作るか、そのシナリオに興味をもたれる。

こうした進展の一方で2000年2月10日には、「あすか」の後継機となるべき ASTRO-E 衛星が、M-V-4 ロケット1段目の不調により、我々が釜江研などと共同で心血を注いで開発してきた硬X線検出器もろとも、失われてしまった [7]。筆舌に尽くせない痛手であるが、皆様のご支援のおかげで、再挑戦への道が開けつつあることを、ご報告かたがた感謝したい。

参考文献

- [1] レビューは、M. Oda, *Space Science Reviews* 20, 757 (1977)
- [2] K. Makishima *et al.*, *Astrophys. J.* 308, 635 (1986)
- [3] 大橋隆哉、牧島一夫、*物理学会誌*、1994年4月号、p.287
- [4] T. Dotani *et al.*, *Astrophys. J. Letters* 485, L87 (1997)
- [5] K. Makishima *et al.*, *Astrophys. J.* 535, 632 (2000).
- [6] A. Kubota, T. Mizuno, K. Makishima, Y. Fukazawa, J. Kotoku, T. Ohnishi & M. Tashiro, *Astrophys. J. Letters*, in press (2001).
- [7] 牧島一夫、「科学」、2000年8月号、p.642.



図の説明

「あすか」衛星で、1993年と2000年に、近傍の渦巻き銀河 IC342 を観測した結果。左の2つは光の画像にX線の画像（角分解能があまり良くない）を重ねたもので、Source 1 と Source 2 という、きわめて明るい2つのX線源が見られる。1993年にはSource 1 が Source 2 より明るかったが、2000年には逆転した。右はそれらのX線スペクトル（装置の応答を取り除いたもの）で、7年間に Source 1 は「標準状態」から「べき型状態」へ、Source 2 はその逆の遷移をしたことがわかる。

太陽の内部を音波で見る

柴橋博資 (天文学専攻)

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

スイカを叩いてその音色を聞き分け、食べごろを調べる。これは音を使ってスイカの内部を直接目で見ずに診断している訳だ。これと同じ原理を使って太陽の内部を探る研究（「日震学」と呼ぶ）が進んでいる。太陽面ではいつも約5分位の周期の振動が起こっている。太陽の表面近くで起こっている対流運動によって太陽全体がいつも叩かれているから振動しているのだと考えられていて、観測されている振動は、ガス圧力を復元力とする固有振動モードが多数重なったものである。この振動を解析すれば、言わば太陽の音色を聞き分けることになり、太陽内部を探ることが出来るのだ。

多数の固有モードを解析する事により、まず太陽内部の音速分布が判る。音速は温度が高いほど速いので表面から深さと共に速くなるが、中心近くになると逆に少し遅くなっている。これは中心部でヘリウムが外より多く含まれていることを示している。中心核での核反応の証拠と見なす事が出来、太陽の年齢をこれから決める事が出来る。太陽の音色を聴くだけで年齢が判るとは、画期的ではないか。太陽中心部で発生したエネルギーは輻射で運ばれ、ある程度より外側からは対流で運ばれる。中心から約0.7太陽半径ぐらいのところで音速の傾きがガクッと急に変わっていて、ここが輻射層と対流層の境であると判る。恒星の一生の過程を追う理論に基づいて作られた太陽の進化モデルの音速分布と、こうして求めた現実の太陽内部の音速分布を比べてみると、全体として割合良く合っているが、対流層の直下で、現実の太陽の方が音速が顕著に速い。

太陽が自転している事も固有振動数に影響する。そこで、詳細に解析すれば自転の様子が深さや緯度の関数としてどんな風になっているかを求める事が出来る。太陽

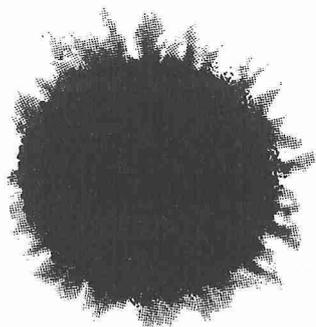
が誕生してからその進化の過程で、中心部は収縮していく。角運動量を保存しながら収縮すれば、当然、回転は速くなっていくだろう。一方表面では、太陽風が外に吹き出しているの、次第に回転が遅くなっていくだろう。ところが結果は、表面層の方が回転が速い。対流層内の自転は、大雑把に言うとも表面で見られる自転と同じで、緯度に強く依っていて深さにはあまり依っていない。一方、内部の輻射層は、表面赤道付近よりもゆっくりした剛体回転になっている。

この対流層の非一様回転から輻射層のほぼ一様な回転への遷移層は非常に薄い。この遷移層が、対流層直下で進化モデルより音速が速い層に一致している。進化モデルでは、対流層直下の輻射層では拡散によって水素が深さと共に僅かに減少している。音速は温度だけでなく化学組成にも依るから、この遷移層で現実の太陽の音速が速いのは、自転の様子の急激な変化に伴う攪拌のために、深さに伴う水素の減少をモデルよりも抑えているからではないかと、考えられた。実際、最近になって太陽の振動数解析を更に進めて化学組成の分布も決められるようになり、水素の深さ分布は攪拌が起きていることを示唆する結果が得られるようになった。

日震学は、太陽ニュートリノの問題、太陽表面でのリチウム欠乏の問題、恒星進化に伴う内部での角運動量配分の問題、太陽活動の問題等、太陽・恒星に関する重要な基本的な問題に新たな切り口・取り組み方を提供せんとしている。

参考

<http://www.astron.s.u-tokyo.ac.jp/group/shibahashi/helioseismology99.html>



大気の進化：鉱物—水—大気の相互作用からの推定

村上 隆 (地球惑星科学専攻)
murakami@eps.s.u-tokyo.ac.jp

先カンブリア時代(約46—6億年前)に大気の組成は大きく変化したと考えられている。例えば、二酸化炭素は現在の1万倍から現在程度まで減少したと考えられている。この減少には風化反応(鉱物—水—大気の相互作用)が大きく関与し、大気中の二酸化炭素は主に炭酸塩として地殻に移り、大気からは除去されていった。先カンブリア時代における二酸化炭素の減少の定量的取り扱い、シミュレーションで行われている。我々の研究室では、先カンブリア時代の実際の岩石から推定値を導出しているが、本小稿では紙面の関係で割愛する。一方、地球上の生命活動により生じたと考えられている酸素の増加は、シミュレーションではなく、地質時代に起こった様々な現象を元に、推定されている(図1の点で示した領域)。このモデルで重要なのは、約20億年前の2、3億年の間に、2桁から3桁の急激な酸素濃度の上昇があったという点である。ところが、少なくとも30億年前から現在まで酸素濃度は大きく変化してないというモデルもある(図1の線で示した領域)。我々の研究室では、大気の酸素濃度の推定に古土壌(paleosol)と呼ばれている岩石を利用している。現在と同様、鉱物—水—大気の相互作用により、風化した岩石・土壌に当時の大気組成の情報が記憶されているという考えに基づく。しかし、現在の土壌と異なり、古土壌は風化後、例外なく続成・変成作用を受けており、実際には弱変成岩として存在する。一般には風化生成物も変質・変成するので、当然、風化後の続成・変成作用がデータに影響し、異なる解釈も生じ、上記のように相異なる結論が導き出された。もし、当時の風化生成物が古土壌に残っていれば大気の進化のより深い理解が可能であろうが、十数億

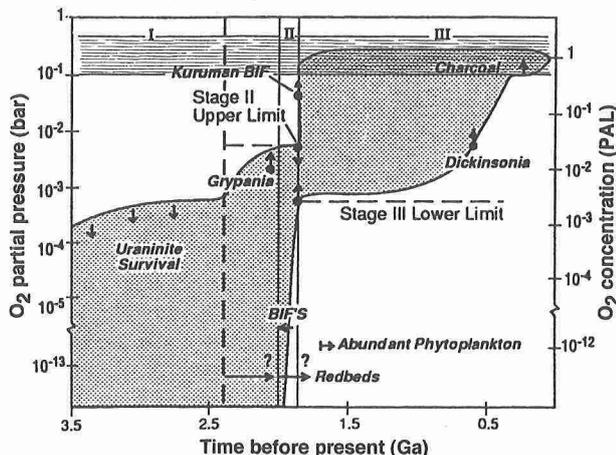


図1 大気中の酸素濃度の変遷(Kasting (1993)を一部修正)。点で示した領域が酸素の増加を表す説に基づくもので、上方の横線の領域が地質時代を通じ酸素濃度はほぼ一定であったという説に基づくもの。

年以上前の古土壌には風化生成物は今まで発見されていなかった。このような状況で、我々は当時の大気の情報に直接反映する風化生成物を見出す作業を行ってきた。最近ついにカナダ、プロントの古土壌から、25億年前の風化生成物を発見したので紹介したい。

原岩である花崗岩は Apatite (Ca phosphate) を多く含んでいる。この Apatite の縁に、風化の度合いが強くなるにつれ、Rhabdophane ($(La, Ce, Nd) PO_4 \cdot nH_2O$) が、より多く形成していた。どの試料の Rhabdophane も Ce-rich であり、また La/Ce/Nd の濃度比は、Rhabdophane 中でも、全岩中でも、ほぼ一定であった。全岩の希元素パターンでは Ce anomaly はなかった。これらは当時の地下水中で、Ce が La や Nd と同様の挙動をしていたことを強く示唆する。現代の風化でも Rhabdophane が形成することは知られているが、酸化的条件では、溶出した Ce(3+) はすぐに Ce(4+) となり、 CeO_2 として沈殿し、結果として、Ce-free または Ce-poor な Rhabdophane が形成する。即ち、酸化的条件では、溶液中での Ce の挙動は La と Nd の挙動とは異なる。一方、Rhabdophane は溶解度が低く、また、500度まで安定に存在することが実験的に確かめられている。以上のことから、プロントの Rhabdophane は25億年前の風化時に生成され、かつ、その当時 Ce は3価として溶液中を移動したと考えられる。これは当時の大気が非酸化的であったことを意味する。Apatite は花崗岩に広く分布するので、今後、様々な時代の古土壌中の Rhabdophane を調べることで、先カンブリア時代の大気の進化の理解が飛躍的に進展すると考えられる。

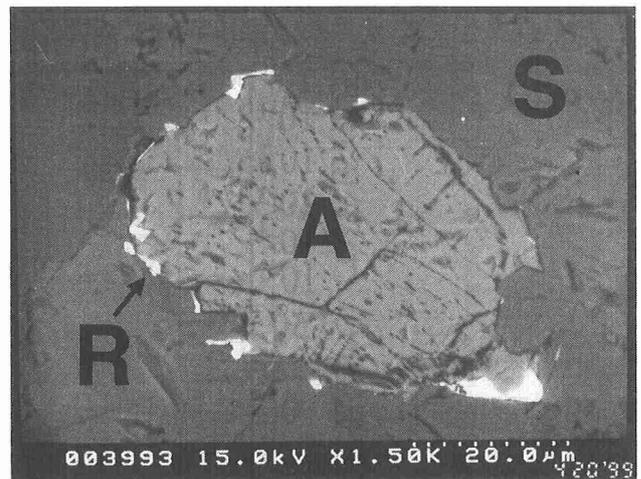


図2 Apatite の縁にされた Rhabdophane の反射電子像。コントラストの高い小粒子はすべて Rhabdophane。S は sericite (aluminosilicate の一種)。

地球システムの変動とスノーボール・アース現象

田近 英一 (地球惑星科学専攻)
tajika@eps.s.u-tokyo.ac.jp

地球環境は、地球史を通じて、基本的には現在とあまり変わらない温暖な気候状態が維持されてきたものと考えられている。地球の長期的な気候状態は大気中の二酸化炭素分圧の変動によって支配されており、二酸化炭素分圧は炭素循環によって調節されている。炭素循環の主要プロセスのひとつに珪酸塩鉱物の化学的風化過程があるが、それは明瞭な温度依存性を持つことが知られており、このプロセスが地表温度に対する負のフィードバック機構として働く結果、地球の気候状態は安定に保たれてきたのではないかと考えられてきた。

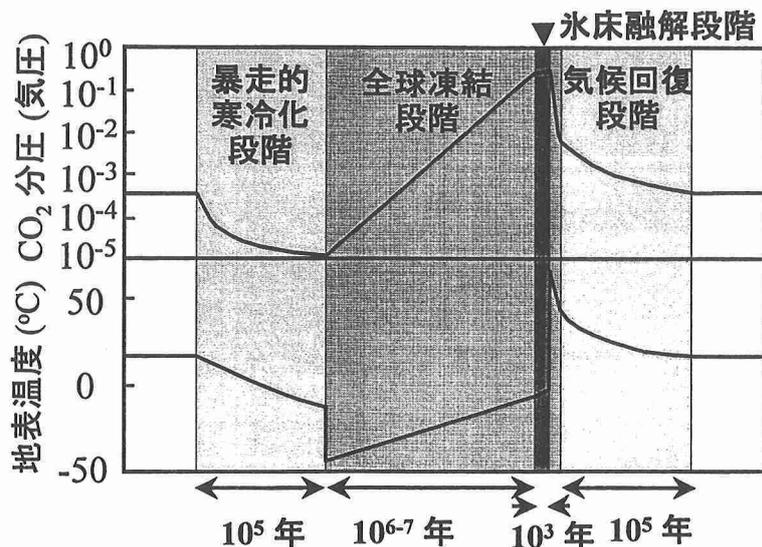
ところが、今から約7億5千万年前のスターチアン氷期においては、大陸氷床が赤道域に存在していたという証拠が見つかっている。さらに、当時の氷河性堆積物には鉄鉱床が含まれ、その直上にはキャップ・カーボネートと呼ばれる炭酸塩岩が延々と堆積しており、海水中の炭素同位体比が異常な挙動をするなど、通常の氷河時代にはみられない大きな特徴を持つことが明らかになった。これらはすべて、当時の地球表面の大部分が氷で覆われていたと考えることによってのみ説明することが可能である。これが、最近大きな注目を集めている、“スノーボール・アース仮説”である。このような現象は、実は、今から8～6億年前頃に何度か繰り返し生じたらしい。

筆者は、気候モデルと炭素循環モデルとを結合させて、スノーボール・アース現象における地球システムの挙動解析、とくに、支配的な物理化学過程とそれらの特性時間に注目した研究を行っている。その結果、火成活動度

の低下もしくは有機炭素埋没率の増加によって大気海洋系に対する二酸化炭素の正味放出フラックスが低下することで大気中の二酸化炭素濃度が減少し、ある臨界値を下回ると、ついには地球が全球凍結することを見いだした。このことは、炭素循環システムによる地球環境の安定化機構には限界が存在することを意味し、地球システム内の擾乱がその限界を超えた場合、地球環境は暴走的な振る舞いをする可能性を示唆している。

全球凍結状態においては、平均気温はマイナス40°Cという極端な寒冷状態となり、海洋は表層約1000メートルが完全に凍結してしまう。このような状態から脱出するためには、大気中の二酸化炭素分圧が0.2気圧程度にまで増加する必要があるが、これは火山ガスが徐々に蓄積することによって達成される。しかし、氷の融解は急速に起こると推定されるため、氷が融解した直後には、今度は地表気温が60°Cという高温環境が実現される。

スノーボール・アース現象は約1千万年程度の時間スケールを持ち、その過程を通じて大気中の二酸化炭素濃度と地表温度は非常に大きな振幅で変動する(図参照)。スノーボール・アース現象とは、単なる氷河期の大規模なものではなく、気候の安定状態間の相転移を伴うような特異な現象なのである。しかしながら、地球全体が1千万年ものあいだ凍結したとしたら、生物は一体どうやってそのような過酷な環境を生き延びたのかなど、まだ未解決の課題が多い。地球環境の安定性の観点からみても、スノーボール・アース現象は大変興味深い問題である。



図：スノーボール・アース現象における大気CO₂分圧と全球平均温度の時間変化。

RI ビームを用いたメスbauerアースペクトル測定 — ^{57}Mn から生成した ^{57}Fe の化学状態

久保 謙 哉 (化学専攻)

kubo@chem.s.u-tokyo.ac.jp

一般的な鉄のメスbauerアースペクトルは、 ^{57}Fe を対象核種とし、市販されている半減期270日の ^{57}Co がEC壊変 ($^{57}\text{Co} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$) して生成する 14.4keV の ^{57}Fe の第一励起準位を利用している。 ^{57}Fe にはもう一つのメスbauer親核 ^{57}Mn があるが、半減期が87秒と短いため ^{57}Mn を製造しつつ測定を行う必要がある。以前に我々は $^{54}\text{Cr}(\alpha, p)$ ^{57}Mn 反応を用い、3分間製造—3分間測定というサイクルを数百回繰返してクロム金属やクロム酸化物中に生成した ^{57}Mn を線源とする ^{57}Fe のメスbauerアースペクトルを測定した[1]。

理化学研究所リングサイクロトロンでは、高エネルギー重イオンビームをターゲットに照射し、入射核破碎反応で生成する短寿命RIをビームとして取り出すことができる。 ^{59}Co をベリリウムに照射することにより ^{57}Mn のビームが得られ、これを試料に打込んで ^{57}Mn を線源としたメスbauerアースペクトルの測定が可能となった[2]。

鉄は金属から生体酵素まで幅広い化学形をとり、酸化状態も様々であるが、化学的に合成されているものでは K_2FeO_4 などの鉄酸化合物中での $\text{Fe(VI)}(3d^2)$ が最高酸化状態である。 ^{57}Mn は β^- 壊変して ^{57}Fe になるが、 β^- 壊変では原子番号が1だけ増えるから、壊変直後の娘原子の酸化状態は、親原子の酸化状態と同じか、壊変電子が飛び去れば+1だけ大きくなる。マンガンには過マンガン酸カリウム KMnO_4 という $\text{Mn(VII)}(3d^0)$ の化合物がある。これに ^{57}Mn を打込めば、壊変して生成した ^{57}Fe がいままでになかったexoticな化学状態をとるのではないかと期待し、理化学研究所リングサイクロトロン

からのMnビーム使用し、 KMnO_4 を試料として実験を行った。

得られたスペクトルを図1に示す。25Kと155Kいずれのスペクトルも線幅の広いシングレット2本で解析することができ、どのピークについても四極分裂が小さいことから鉄原子の周りのd電子の分布の歪みは小さく対称性がよいことがわかる。どちらのスペクトルにも共通してみられる 0.80 mm s^{-1} のピークは典型的な $\text{Fe(II)}(3d^6)$ の異性体シフト値である。もう一方のピークを与える鉄化学種は Fe(III) よりも高酸化状態にあり、これまでに報告されている安定な鉄化合物のメスbauerパラメータと比較すると高スピン $\text{Fe(V)}(3d^3)$ や低スピン $\text{Fe(IV)}(3d^4)$ に近く、現段階では Fe(VI) 以上の高酸化状態の鉄化学種は見つかっていない。壊変直後に生成した高酸化状態の鉄は短時間に還元されると推定される。

メスbauer効果を観測されるためには試料が固体である必要があるが、 ^{57}Mn を外からビームで注入する方法は多様な試料に適用可能である。今後種々のマトリクスに ^{57}Mn を打込み、通常の化学的手法では作り出せないexoticな鉄化合物の合成とキャラクタリゼーションを進めていく計画である。

なおこの研究は、理化学研究所、東京理科大学との共同研究である。

参考文献

- [1] M. Nakada et al., Bull. Chem. Soc. Japan., 65(1), 1-5 (1992).
[2] Y. Kobayashi et al., Hyp. Int., 126, 417-420 (2000)

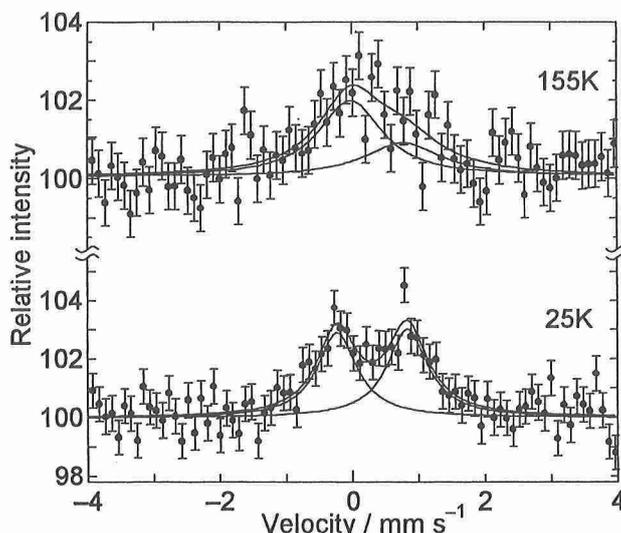


図1. 過マンガン酸カリウム中に打込んだ ^{57}Mn を線源とする ^{57}Fe のメスbauerアースペクトル。上155K、下25K。通常のメスbauer吸収スペクトルにあうように横軸の符号をかえてある。