

リーマン面のモジュライ空間の上で新しい「テンソル解析」をめざして

河 澄 響 矢 (数学科)

kawazumi@ms.u.-tokyo.ac.jp

トポロジー (位相幾何学) の誕生は、コンパクト・リーマン面が g 人乗りの浮き輪、 $g=0, 1, 2, 3, \dots$ のどれかに同相 (homeomorphic) であるという事実を明確に認識した時点にあったと言えよう。この数 g は種数と呼ばれる。種数 g コンパクト・リーマン面を過不足なく集めて自然な位相を入れた空間は、種数 g コンパクト・リーマン面のモジュライ空間とよばれ、複素解析幾何学の重要な研究対象となっている。それは同時に、曲面の自己同相写像全体のなす群の位相的情報のほとんど全てを含んでおり、トポロジーの立場からも解明すべき問題は多い。むしろ問題は日々増殖中である。

私はこのモジュライ空間のコホモロジー環、平たくいえば「穴の開き具合」、を、複素解析と群のコホモロジー理論という二つの手法を取り混ぜて研究してきた。今回、ご報告したいのは、現在開発中の、複素解析的手法を用いたモジュライ空間の曲がり具合の新しい記述法である。

そもそもテンソルとは空間の局所的な曲がり具合を記述する道具であり、それを不変多項式によって微分形式に直し、大域的にとらえることによって、空間のコホモロジー類が現れるのであった。モジュライ空間のコホモロジー環の中身として、最も基本的なのが、D. Mumford と森田茂之により独立に発見された第 n 森田・マンフォード類、 $n=0, 1, 2, 3, \dots$ である。我々の目標は、森田・マンフォード類を微分形式として局所的に捉え、そこからモジュライ空間の繊細な曲がり具合を具体的に読み取ることにある。

森田・マンフォード類の微分形式表示としては S. Wolpert による双曲幾何 (非ユークリッド幾何) 的アプローチがあり、第一森田・マンフォード類がヴェイユ・ピーターソン形式によって表示されることが証明されていたが、2 番目以降の森田・マンフォード類についてはそこから読み取れる情報は殆ど無かった。それは無理からぬことである。自明係数のコホモロジーだけを考えている森田・マンフォード類は分解不能であり。その内部構造は見えてこないからである。

さて、ねじれ係数の森田・マンフォード類というものを導入すると、森田・マンフォード類の全体 (生成する部分環) は、(拡大ジョンソン準同型、または、第 $(0, 3)$ ねじれ係数森田・マンフォード類とよばれる) ただ、一つのねじれ係数コホモロジー類を色々に組み合わせることによって構成されるコホモロジー類の全体に、ぴったり一致することが分かる。そして、この拡大ジョンソン

準同型は第 3 種アーベル積分という古典的概念を使って複素解析的に捉えられるのである (森田茂之氏との共同研究)。

我々はこれらの事実をもとに微分形式を構成する。つまり、第 3 種アーベル積分の擬等角第一変分の計算を実行することで拡大ジョンソン準同型を表示するねじれ微分形式が具体的に得られた。これらを色々に組み合わせることによって森田・マンフォード類を表わす微分形式が複数得られる。これらの微分形式には、モジュライ空間の繊細な情報が取り出せる形で含まれているようである。例えば超楕円曲線の上では微分形式として 0 になることが直ちに分かる。また、整数論におけるアラケロフ幾何学と密接に関連しているようであり、普遍リーマン面の相対接束の認容計量の曲率形式を我々の微分形式を用いて表わすことができる。独立に R. Hain 氏は、拡大ジョンソン準同型をホッジ理論の立場から解釈することにより、我々と同一の第一森田・マンフォード類の微分形式表示を得ており、リーマン面の退化にともなう振る舞いを精密に調べている。

あと一歩研究を進めて、リーマン面のモジュライ空間について確かな手触りを実感したいと思っている。



安全な分散環境を目指して

河野 健二 (情報科学専攻)

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

文字通り日進月歩で計算機の高性能化・低価格化が進み、ここ数年でわれわれを取り巻く計算機環境は大きく様変わりしてきた。インターネットに接続された計算機が急激に増大し、World Wide Web(WWW) が情報共有のための基盤として社会的に認知されつつある。いわば分散環境がよい意味で大衆のものとなった。

インターネットの大衆化にもかかわらず、その基盤となるソフトウェア技術は十分に成熟しているとはいえない。ソフトウェアの研究は、需要があつてはじめて研究としての価値が出るという側面が強く、インターネットの大衆化の兆候をみてやっと活発に研究が始まったといつてよい。世界中の研究者が活発に情報交換しながらさまざまな方面からアプローチしている段階である。

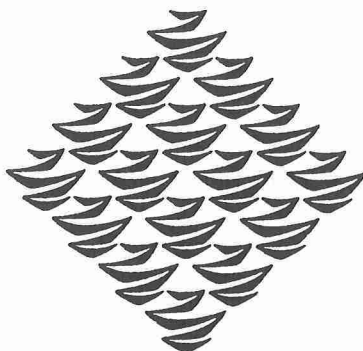
インターネットに代表される広域分散環境の特徴は、その匿名性の高さにある。不特定多数のユーザがサービスを提供でき、不特定多数のユーザがそれを利用できる。しかしながら、従来のオペレーティングシステム (OS) は、あらかじめ登録されたユーザのみから利用されることを想定しており、不特定多数のユーザにサービスを提供することは想定していない。そのため、広域分散環境の匿名性を悪用した不正アクセスに対して、従来の OS が提供する保護機構はきわめて無力である。一般のニュースや新聞紙上でコンピュータウィルスが話題となり、システム管理者の間でしばしばセキュリティの問題が話題となる背景には、OS に代表される基盤ソフトウェアの

不備がある。

われわれの研究グループでは、「インターネットに接続しても安心」な計算機環境の実現を目指し、OS の基本設計から見直していこうとしている。従来の OS は、事前に認証されたユーザから利用されることを前提とし、その設計方針も公平性を金科玉条とするものであった。われわれのグループで研究・開発を行っている OS では、ユーザおよびプログラムの信頼性に応じて、OS の提供するサービスの種類や質を適応的に調整し、悪意のあるユーザやプログラムによる不正攻撃から計算資源を保護することをねらっている。この設計方針は、これまでの OS が提供してきた抽象化とその実装方式の再検討を必要とし、プロセス・保護・資源管理などの OS の基本的なサービスから再設計を進めている。

OS のような基本ソフトウェアを新たに設計することに異論を唱える研究者も多い。基本ソフトウェアは一種のインフラであり、大学の 1 研究室から新たな OS を提案しても、実用化の道は閉ざされていると考えるようだ。そのような方々は、Windows NT のような商用 OS に、80年代後半の OS 研究の成果が盛り込まれていることをご存じないのだろうか？

大学という過去のソフトウェア資産にしばられない環境だからこそ新しい概念につながるようなチャレンジングな研究ができるのであり、そうありたいと考えている。



第一原理電子状態計算による水のプロトンリレー型解離の解明

塚 田 捷 (物理学専攻)
tsukada@phys.s.u-tokyo.ac.jp

表面・界面の性質を原子のスケールから解明し、それらの新しい機能を予言するには、電子状態に遡って原子間の結合機構、構造に特有な様々な性質、反応や動的な現象などを統一的に理解しなければならない。このような研究では密度汎関数法による第一原理的な電子状態計算が重要な役割を果たしている。

原子尺度で構造が明らかにされた固体表面における水分子の振る舞いを明らかにすることは、半導体ウェットプロセスの制御のような応用面はもちろん、電気化学のいろいろな現象やミクロな「ぬれ」の問題など、固液界面の原子論を研究する上で重要である。このような系では、水分子と表面構造との吸着力と水分子同士の水素結合力とがせめぎあっている。我々はSi(001)表面上における水分子や水クラスターの吸着状態や解離現象を、密度汎関数法に基づく第一原理分子動力学法を用いて計算し、その結果から表面上での水の意外な振る舞いを見出した。

孤立した1個の水分子はSi(001)表面上で、ダイマール列の中間の弱い吸着サイトか、ダイマールの沈んだ原子の上の強い吸着サイトに吸着する。興味深い事実は強い吸着サイトにある水分子の近くに、他の水分子が付着すると吸着エネルギーが相乗的に著しく増加することである。この機構は水2量体の異なる分子上に最高被占軌道(HOMO)と最低非被占軌道(LUMO)が存在し、これらが最適な姿勢で基板Si表面のLUMOおよびHOMOとそれぞれ相互作用することによる。この状況では水素結合のボンド長が気相の場合に比して顕著に減少するが、さらに興味深い事実は、この状況では水分子が水素原子をリレーすることにより容易に解離吸着が進むことである。すなわち第1水分子から第2水分子へと水素原子がリレーされ、これと同時に第2水分子の水素原子が解離して基板Siに吸着する「プロトンリレー型解離」が、0.1eV程度の低い活性エネルギーでおこることが見出された。このような水分子の自己触媒的なプロトンリレー型解離機構が、大規模な第一原理計算から始めて明らかにされたということは、興味深いことである。この過程はシリコン表面上に限らず多くの固体表面の上で期待されるもので、固体・液体界面の微視的性質を解明する基本的なコンセプトとなる。

参考文献

塚田捷著；「表面物理入門」(東京大学出版会、1989年)
小間篤、八木克道、塚田捷、青野正和編著；「表面科学入門」(丸善、1994年)
K.Akagi, and M.Tsukada;Phys. Rev.B, in press, Surface Sci., in press

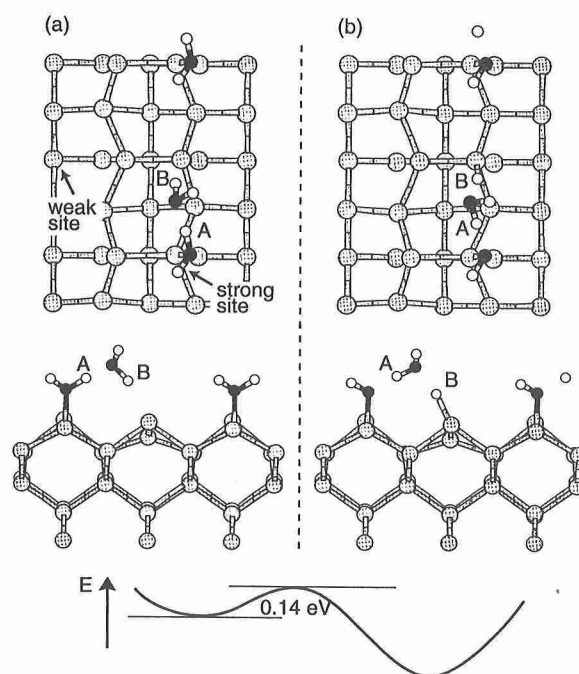


図1 Si(001)表面上における水分子のプロトンリレー型解離
(a)解離前 (b)解離後

タンパク質のフォールディングの分子機構

桑 島 邦 博 (物理学専攻)
kuwajima@phys.s.u-tokyo.ac.jp

酵素や抗体などの球状タンパク質は生体反応を直接与える、生命現象にとってなくてはならないものであるが、その化学構造は20種のアミノ酸がつながった直鎖状の高分子であるに過ぎない。細胞の中では、いろいろな仕組みが働いて天然の活性あるタンパク質が生合成される。それらのタンパク質は各々に固有の特異的な立体構造を持っており、それがタンパク質の生理活性をもたらす。

今から30年以上も前に、Anfinsenらは、タンパク質の特異的な立体構造の形成がそれ自身のアミノ酸配列によって決まる物理化学的な過程であることを示した。アミノ酸配列（つまり遺伝情報）が決まると、タンパク質ポリペプチド鎖内およびポリペプチド鎖-溶媒（水）分子間の物理的相互作用が決まり、それらが駆動力となって熱力学的に安定な天然立体構造が形成される。生命は、その40億年の進化の歴史を通して、このような特異的なアミノ酸配列を獲得したのである。

タンパク質の天然立体構造形成の分子機構を物理化学的立場から解明しようとするのがタンパク質のフォールディング研究である（フォールディングとは立体構造形成を言う）。現在、タンパク質のフォールディング研究は、理論的な研究と実験的な研究が互いに影響し合いながら、ますますその活力を増しつつある。

最近の理論的な研究で一躍脚光を浴びたのが、タンパク質フォールディングのエネルギランドスケープ理論である。これは、ヘテロ高分子鎖の統計力学理論や単純化されたタンパク質モデル（格子タンパク質）（図1）の計算機シミュレーションなどに基づいており、タンパク質がその特異的な立体構造に折り畳まる性質（foldability）の物理的な要因を明確にしたと評価されている。しかし、その成果があまりにも見事であったため、全ての結果を、これらの理論から得られたモデルに当てはめようとする傾向もある。

実験的な研究では、その技術の飛躍的な進歩により、いろいろなタンパク質の構造形成途上にある中間構造状態の詳細が明らかとなった。これらの中間状態では、タンパク質は、天然様の主鎖二次構造とコンパクトな分子形態を持つが、アミノ酸残基側鎖の堅いパッキング構造（側鎖の三次構造）は形成されていない。このような中間状態は以前からタンパク質の中間構造状態として知られていたモルテン・グロビュール状態と同一であることも明らかとなっている。

しかし、モルテン・グロビュール状態がタンパク質天然立体構造形成の積極的な中間体であるか否かについては意見が分かれる。モルテン・グロビュールはタンパク質の間違った構造の集まりであり、天然構造の形成をむ

しろ阻害しているのだとする主張がある。その根拠の一つとなっているのが、格子タンパク質のモンテカルロ・シミュレーションによる研究結果である。格子タンパク質の鎖内の平均的な引力相互作用を強めると（現実のタンパク質では疎水性相互作用を強めることに対応する）、シミュレーションの初期に、さまざまな間違った構造に折り畳まったコンパクトな分子のアンサンブルが形成され、このようなアンサンブルから確率過程を通していかに抜け出せるかが構造形成の律速段階となる。現実のタンパク質で観測されるモルテン・グロビュールもこのようなアンサンブルに対応するといっているのである。

モルテン・グロビュールに関するこの新しい見解はタンパク質フォールディング研究の“New View”の名の下に一人歩きしつつある。しかし、格子タンパク質と現実のタンパク質の構造（図2）を比べてみると、本質的な違いのあることも事実である。その違いとは立体構造の階層性についてである。タンパク質は、（主鎖二次構造）→（超二次構造）→（側鎖三次構造）のような階層構造を持っており、各階層で働く物理的相互作用も異なっている。この階層構造をほとんど省略して単純化したのが格子タンパク質に他ならない。現在、タンパク質のフォールディング研究で必要とされているのは、タンパク質構造の階層性がいかにその構造形成の速度過程に反映されているかを、実験的にも理論的にも明らかとすることである。そのためには、実験的に得られた現象論的パラメータを分子原子レベルの物理的相互作用に還元できるシステムの構築と構造の階層性まで取り入れた理論的な研究とが必要とされている。

参考文献

桑島邦博（1997）“フォールディング機構”シリーズ・ニューバイオフィジックス①タンパク質のかたちと物性（中村春木、有坂文雄編）、第2章－1、pp. 78-97、共立出版。

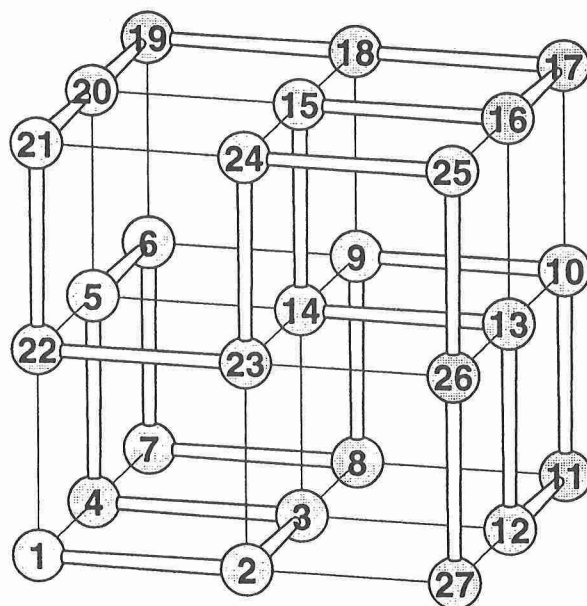


図1：27個のモノマーユニットよりなる格子タンパク質モデル

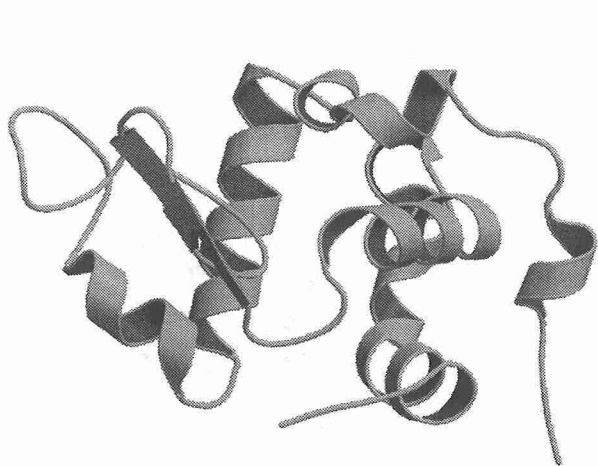
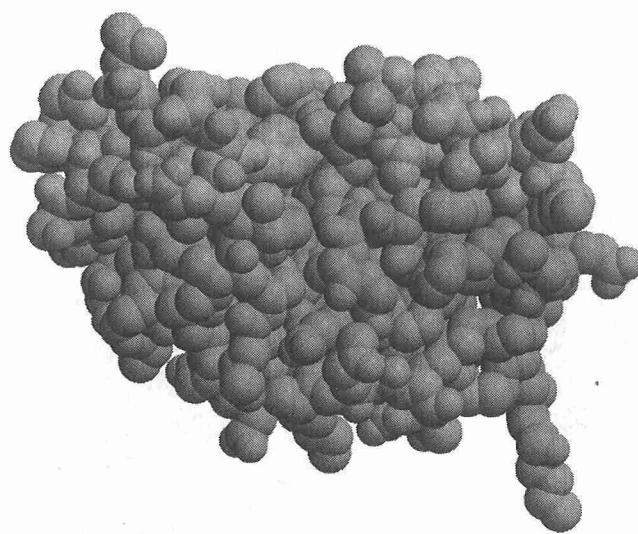


図2：タンパク質（ α -ラクトアルブミン）の立体構造
 (Molscrip (Kraulis(1991). *J. Appl. Crystallog.* 24, 946) 使用)
 (a) リボンモデル



(b) 実体積モデル

見えてきた星間分子雲形成： 富士山頂サブミリ波望遠鏡による観測から

山 本 智 (物理学専攻)

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

星間分子雲から星が生まれる過程は1980年代から活発に研究されてきた。電波や赤外線観測から、分子雲中の高密度コアが星形成の舞台であることが確立し、その中で生まれた原始星が一人前の主系列星に達する道筋は、電波からX線までの幅広い観測と理論的研究によってかなりよくわかってきている。しかし、星形成の場である分子雲がどのようにして形成されるのかについては、いまだに漠然とした理解にとどまっている。

その原因は、これまで「できてしまった分子雲」ばかりを見ていたからである。電波望遠鏡による一酸化炭素の回転スペクトル線の観測がそれである。分子雲の構造や性質を調べるのには適しているが、それだけでは分子雲の成り立ちはわからない。私たちは、分子雲のもとになる希薄な星間雲では炭素がまだ一酸化炭素になっておらず、中性原子として存在していることに着目している。そこで、中性炭素原子の分布を調べることで、星間分子雲になる直前のガス雲を捉えようというわけである。

中性炭素原子は波長0.6mm (周波数492GHz) にスペクトル線をもつが、その観測は容易ではない。大気に含まれる水蒸気によってサブミリ波は強く吸収を受けるので、標高が高く乾燥した場所でなければ観測ができない。そのため、中性炭素原子の分布はごく限られた領域について調べられているだけであった。

私たちは、富士山頂がサブミリ波観測の好適地であることを見だし、1995年度より始まったCOE形成プログラム「初期宇宙の探求」(代表：佐藤勝彦教授)のプロジェクトの一つとして、口径1.2mのサブミリ波望遠

鏡を富士山頂で運用する計画をスタートした。約3年かけて望遠鏡を開発、テストしたあと、1998年7月にヘリコプターによって富士山頂に望遠鏡を設置し、10月下旬から衛星通信を利用した遠隔操作による本格的運用を開始した(図1)。わが国ではじめてのサブミリ波望遠鏡は冬季を通じてほぼ順調に稼働し、全体で約20平方度を超えるかつてない規模の領域について中性炭素原子の分布を明らかにした。

その中で、ひとつの観測例を紹介しよう。図2は牡牛座分子雲の一角を中性炭素原子のスペクトルで見た強度分布図である。下側(南側)に等高線が集まった部分で中性炭素原子が豊富に存在している。この部分は、比較的希薄で若い段階にあるとみられ、まさにこれから分子雲がつくられる直前の雲を捉えたと言える。一方、すでに形成された分子雲は、この部分よりも北側に分布していることが一酸化炭素の観測から知られている。これらを総合すると、この領域では北のほうから南に向かって分子雲形成が進行していることが示唆される。このように、炭素の存在形態の変化という物質的観点を取り入れることによって、時間軸を導入して現象を捉えることができるようになった。この手法は、分子雲形成過程の理解を格段に押し進める原動力となろう。

この研究は、国立天文台野辺山観測所と分子科学研究所のグループとの共同研究である。また、研究を進めるにあたり、気象庁東京管区气象台、浅間大社、富士山運搬組合、および理学部の多くの方々のご支援をいただいた。この場を借りて深く感謝の意を表したい。

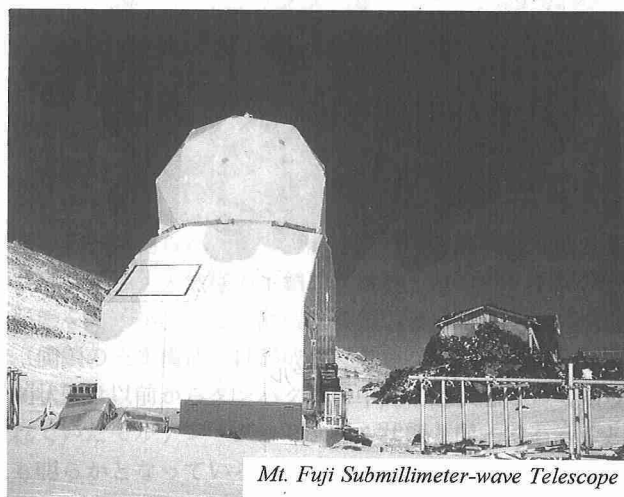


図1 富士山頂サブミリ波望遠鏡。アンテナは直径3mのレドームに格納されている。

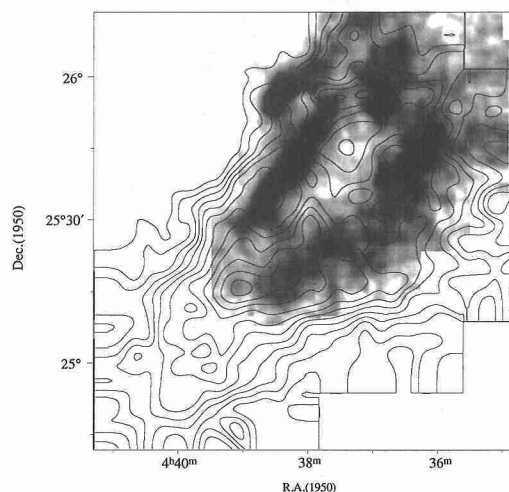


図2 富士山頂サブミリ波望遠鏡で捉えた牡牛座分子雲における中性炭素原子の分布(実像)。グレースケールは宇宙科学研究所の北村氏と国立天文台の砂田氏によって観測された一酸化炭素($C^{18}O$)の分布

太陽輻射変動メカニズムの解明に挑戦する

吉 村 宏 和 (天文学専攻)

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

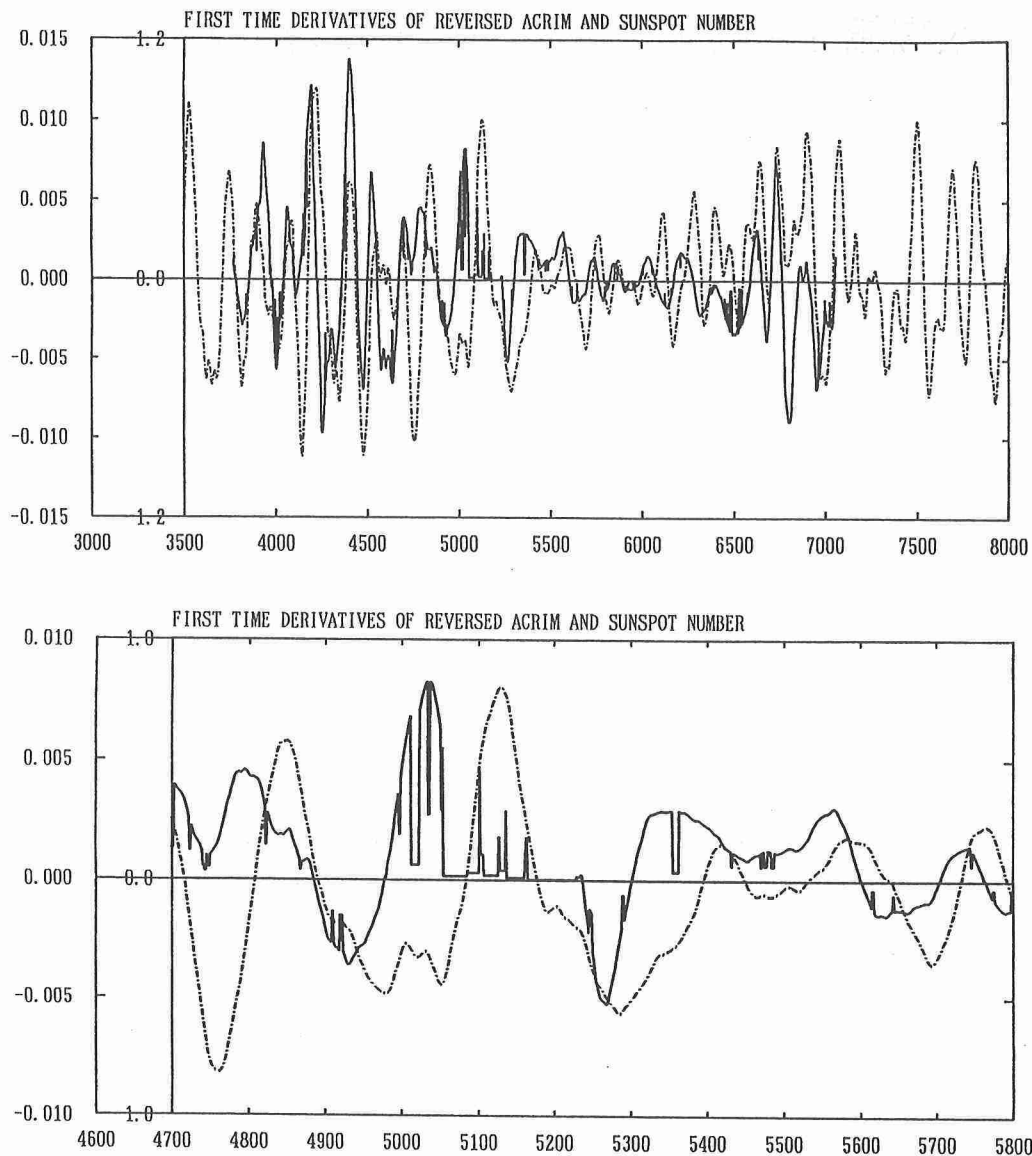
太陽から降り注ぐ輻射を全波長域で積分した量である全輻射は、地球の大気と海洋の運動を駆動し、気象、気候の変動の源泉である。近年、この量を、複数の宇宙探査機が20年以上にわたって継続的に測定した結果、太陽の全輻射は決して一定ではなく、様々な時間スケールで変動していることが解ってきた。私の研究でも、この太陽の全輻射は数10年から数1000年以上の時間スケールにわたって変動せざるを得ないことが理論的に帰結されてから20年以上になる。私は、この20年間、太陽輻射の変動のメカニズムを解明するため、新しい太陽内部のダイナミックスのパラダイムを構築し、輻射変動のメカニズムの解明に挑戦している。このパラダイムは次の5つの過程からなっている。(I)内部の流体の流れが磁場を創る。(II)磁場は流体の流れを変動させる。(III)流体の流れの変動は熱の流れを変動させ、熱を蓄え、内部の熱構造を変動させる。(IV)蓄えられた熱は、やがて太陽表面から放射され、その変動は太陽の輻射の総量を変動させる。(V)それぞれの過程は、ある時間を要するため、それぞれの現象の間には時間の遅れが生じる。しかも、この時間の遅れは離散的な複数の遅れ時間で表現される。

(I)の磁場の起源と変動のメカニズムの基本的な部分、天体ダイナモ理論の基本的部分については、ほぼ解明できたと考えている。文献[1]に詳細に説明している。私のダイナモ理論は、基礎方程式の数値積分の方法と磁力線の変形過程を具体的に追尾する方法により、ダイナモ過程による持続的な磁気エネルギーの創成が可能であること、太陽の磁場のように、約11年毎に、その極性を反転する現象はダイナモ過程の自然な振る舞いであること、の二つを初めて明確に示している。(II)については、ダイナモを駆動する微分回転の流れがダイナモから創られる磁場によって変動させられることを、観測データの解析から実証している。微分回転は、太陽の場合、磁場の変動より約20年遅れて変動する。また微分回転の緯度方向と深さ方向の回転角速度の差は約100年の時間スケールで変動する。(III)(IV)(V)の過程が、全輻射の変動に関わるもので、現在、私の研究の中核をなすものである。

これまでの研究の結果、太陽磁場と全輻射は、系統的な複数の周期を持った変動を示し、その両者は複数の離散的な遅れ時間をもって関連していることが、磁場と全輻射の直接観測と、その代理指標の解析から解っている。発見された離散的な遅れ時間は、50日、10年、200年、1000年の4種類に及んでいる。磁場の微分回転に対する反作用が20年かかって現れるという結果と、磁場が対流を変化させて、対流層の熱構造を変化させ、全輻射を変動さ

せるに要する時間が、少なくとも、200年と1000年の2つの離散的な遅れ時間からなることは、ダイナモ理論で要請されていたことである。図は、発見された現象のなかでも理解しやすい現象の1例である。宇宙探査機によって直接測定された太陽の全輻射と、地上から観測された太陽表面の磁場を解析して得られている。全輻射と磁場は、約200日という同じ周期で変動し、太陽表面の磁場が強くなる約20日前に全輻射は弱くなり、従って太陽は暗くなることを示している。また、太陽表面の磁場が強くなると、約50日後に全輻射は強くなる、つまり太陽は明るくなることも解っている。これらの現象は、内部の磁場が対流による熱の流れを阻害し、熱を蓄え、蓄えられた熱は、後に表面に現れることを示している。この現象は、太陽内部で一時的に熱の蓄えが起こっていることの実証である。熱の蓄えが、もっと深いところで起こると、太陽が暗くなったり、明るくなったりする変動の時間スケールと、全輻射の変動と磁場の変動との間の遅れ時間スケールは、もっと長くなる。この現象の実証は、太陽の磁場の変動の指標として、グリーンランドに降り積もった氷のなかに閉じ込められたベリリウムの同位体 ^{10}Be の逆数を使い、全輻射の指標として地球の年平均気温偏差を使って得られた。 ^{10}Be は太陽系外から降り注ぐ銀河宇宙線が地球大気中の元素と衝突することによって創られ、雪、雨などに付着して地表に降りてくる。宇宙線の太陽系への進入は太陽風で運ばれた太陽の磁場が妨げ、太陽磁場活動極大期には、宇宙線の進入は少なく、生成される ^{10}Be も少ない。極小期には、逆に、 ^{10}Be の生成は多い。このため、グリーンランドの氷層に閉じこめられた ^{10}Be の量の逆数は太陽磁場活動の良い指標になる。このこともあって、太陽風の流れと磁場の研究も私の重要な研究テーマである。地球の年平均気温偏差を全輻射の指標とすることには、地球の温暖化および寒冷化には太陽の全輻射の変動が寄与しているということが仮定されている。現在の研究段階では、これは仮説である。様々な現象を解析し、数値シミュレーション実験を繰り返し、この仮説を実証しようとしている。文献[2]-[6]に詳しく説明している。

これらの研究をとうして、太陽の磁場と全輻射の変動のメカニズムの解明には、理学の多くの分野の研究の手法と結果に深く関与せざるを得ないことに驚いている。そのなかでも、太陽輻射の過去の記録が気候変動の歴史として地球上に残っている可能性が高い証拠が次々と見つかりつつあることに驚いている。これらを手がかりに太陽輻射変動のメカニズムを解明し、その確定的な長期変動の証拠を示そうと研究を続けている。



人工衛星ソーラー・マキシマム・ミッション (Solar Maximum Mission) により測定された全輻射と黒点相対数により代表される磁場の時系列に50日の移動平均を3度ほどこして、その1次微分の時系列を図示したもの。

全輻射と磁場は、同じ周期、約200日で変動し、太陽表面の磁場が強くなる約20日前に全輻射は弱くなり、太陽は暗くなることを示している。2つの量の時系列を表

す曲線は、遅れ時間だけずらすと、山と谷の位置が一致するばかりでなく、形状が非常によく似ている。

横軸は1970年1月1日からの日数。第1の縦軸は全輻射のもの。単位は $\text{Watts/m}^2/\text{day}$ 。第2の縦軸は黒点相対数のもの。単位は $1/\text{day}$ 。実線で示した全輻射の時系列の1次微分の時系列は正負を逆に示している。上図は測定の全体図。下図はその一部を拡大したもの。

参考文献

- [1] 吉村宏和、科学69巻2号(1999年), pp.134(岩波書店)。
- [2] Yoshimura, H., Astron. Nachr. Vol. 315, No. 3 (1994), pp. 189.
- [3] Yoshimura, H., Astron. Nachr. Vol. 315, No. 5 (1994), pp. 371.

- [4] Yoshimura, H., Proc. Japan Academy Vol. 72, Ser. B, No.10 (1996), pp.197.
- [5] Yoshimura, H., Proc. Japan Academy Vol. 73, Ser. B, No.7 (1997), pp.115.
- [6] Yoshimura, H., Proc. Japan Academy Vol. 73, Ser. B, No.7 (1997), pp.120.

電離層内電場の観測

中 村 正 人 (地球惑星物理学専攻)

mnakamur@geoph.s.u-tokyo.ac.jp

我々の実験グループは衛星および惑星プローブに搭載する観測機器を開発して宇宙プラズマの諸量を測定している。今回は1996年8月に行った観測ロケットによる電離層内電場の測定について述べたい。

京都大学超高層電波研究センターの深尾教授を中心とするグループは中緯度スプラディックE層(以下Es層)に見られる小スケールの沿磁力線イレギュラリティ(磁力線に沿って電子密度が不均一になる現象)を信楽に設置されたMUレーダーを用いて研究している。この発生には、Es層が大気波動により変調を受け、それに伴い波動と同程度の空間規模を持った電場が生成され、プラズマ不安定が成長した結果であるとの学説がスタンフォード大のTsunodaらにより提唱されていた(図1)。発生メカニズムの総合的な解明を目指し深尾教授は2機のロケット観測と可搬型地上レーダー、さらに地上からの全天カメラによる大気波動観測等を含むキャンペーンを企画された。我々は電場観測への協力を依頼され荷電粒子ビーム電場測定法による観測装置を東京大学で製作しロケットに搭載することになった。

荷電粒子ビーム電場測定法は衛星やロケットの周りに出来るシース電場の影響を避けるために考え出された。ドイツの研究者によって端緒が開かれたこの観測法は80年代に我が師、鶴田浩一郎(宇宙科学研究所)により改善され大きな飛躍を遂げた。荷電粒子が磁力線の周りを旋回運動するときに電場が加わるとこれに比例したドリフト運動を行う。ドイツで開発された方法はこのドリフト量を直接測ろうとする試みであったが、この為には荷電粒子を放出する装置を検出器から離して置く必要があり、電場測定の精度はこのベースライン長に依存するものであった。鶴田は荷電粒子が電場磁場に垂直方向に打ち出されたときには出発点に戻ってくる性質に注目した(図2)。この時粒子の出発から帰還までの時間は電場がないとき(旋回周期)に較べて電場に比例する量だけ

伸び縮みする。この飛翔時間の差から電場が求められるのである。鶴田は荷電粒子の軌道からの類推によりこの測定法をブーメラン法と名付けた。疑似ランダム信号により荷電粒子ビーム強度を変調し、送出信号と帰還ビーム強度の時間変化の相関を解析する事により飛翔時間を求めることが出来る。この方式の採用により測定器を極めてコンパクトに出来ると同時に電場の決定精度が飛躍的に向上した。

SEEK (Sporadic E Experiment over Kyushu) と名付けられた今回のキャンペーンの為にリシウムイオンビームを使用する装置(図3)を製作し、これを搭載した観測ロケットは種子島に設置した可搬型レーダーにより確認されたEs層を狙って8月21日午前0時30分発射された。

図4は打ち上げ後の時間に対してイオンビームの飛翔時間をプロットしたものであり、ロケットが地球磁場を横切って飛行する事による誘導電場から計算される飛翔時間(3本の破線の内の上および下)からのずれが電離層中の電場に起因するものである。図5ではロケット軌道を同一高度に投影し(破線)、ロケット位置からの電場ベクトルをプロットした。これらはTsunodaの理論から予測される電場をはるかに上回る強度であり、さらに空間的に変動していると考えられる。現在一連の実験データを用いた新たな理論が再び構築されつつある。

参考文献

- [1] 宇宙科学研究所報告特集第38号 SEEK キャンペーン報告 1998年3月
- [2] K. Tsuruda, H. Hayakawa, and M. Nakamura, Electric Field Measurement in the Magnetosphere by the Electron Beam Boomerang Technique, Measurement Techniques in Space Plasmas: Fields, Geophysical Monograph 103, AGU, 1998

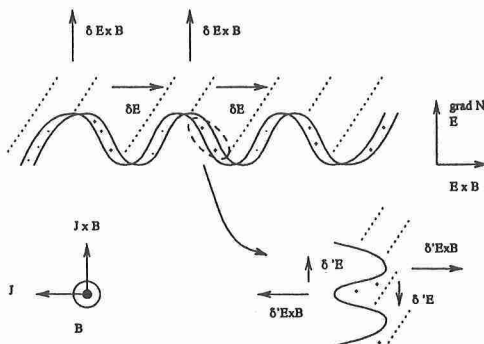


図1 大気波動により変調を受けたスプラディックE層は不安定を増大させる

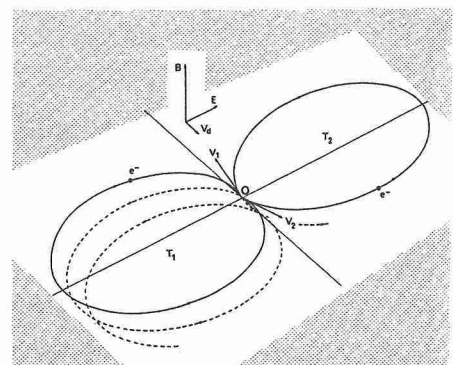


図2 磁場(B)と電場(E)に垂直に放出された荷電粒子は再び出発点へ

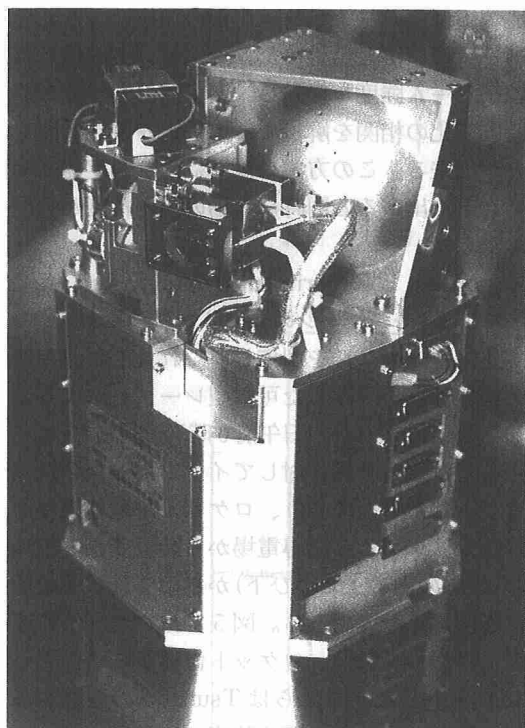


図3 ロケットに搭載された電場測定装置。制御回路部の上にリシウムイオン銃（手前）と半球型エネルギー分析器を持つ検出器（背を向けている）が設置されている。リシウムイオン銃はDCモーターにより方向を変えられ、磁場に垂直にビームが放出されるように制御される。

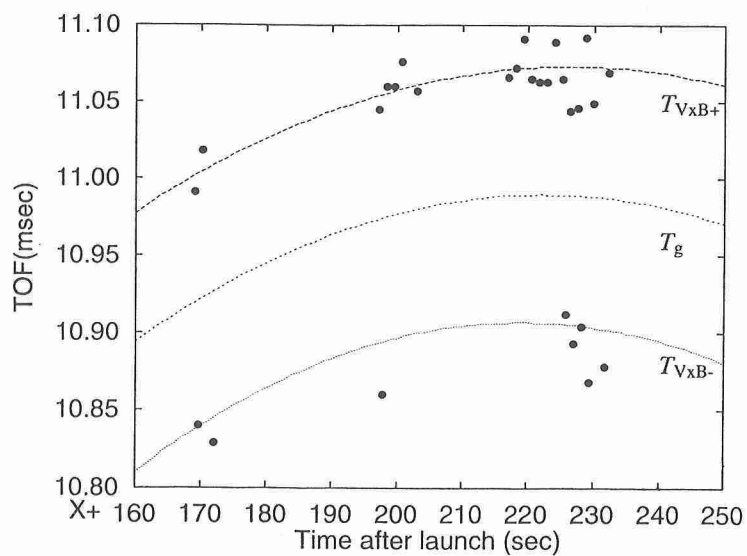


図4 イオンビームの飛行時間。データ欠損部はロケットの姿勢が観測に適さず、放出ビームが戻ってこなかった。

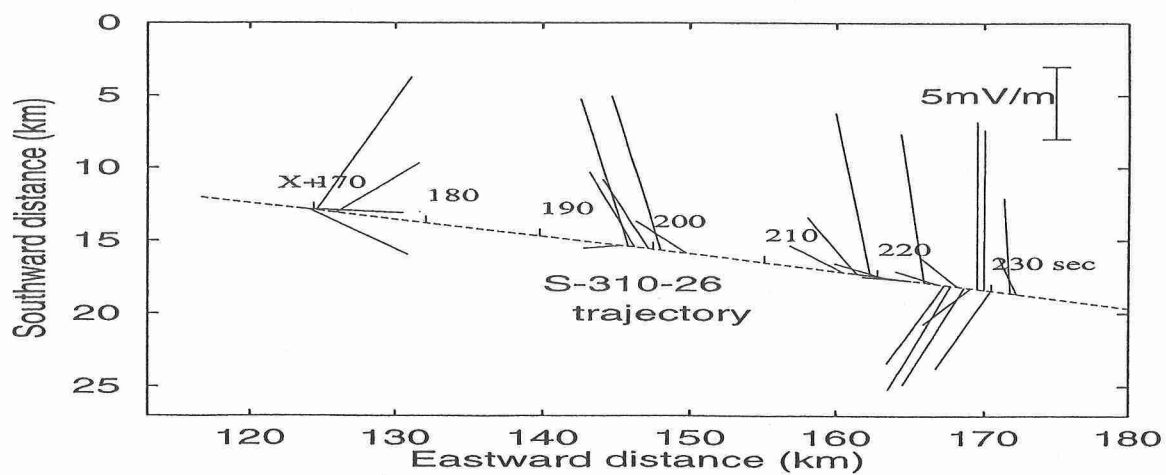


図5 電離層に投影した電場ベクトル。各ベクトルの起点はロケットの位置。