

「地球変動のメカニズム」  
平成11年度採択研究代表者

吉村 宏和

(東京大学 大学院理学系研究科 助教授)

## 「太陽輻射と磁気変動の地球変動への影響」

### 1. 研究実施の概要

本研究のねらいは、太陽の輻射変動が地球の気候変動の主たる原因でありうるのか、あるいは、そもそも気候変動に影響があるのか、あるとすれば、どの程度の影響で、どの程度の時間スケールの変動に対して影響があるのかを、定量的に検証することである。地球の気候は人類の活動が盛んになる以前から大きく変動してきた。現代の地球温暖化が、このような人類の活動によらない変動の一部かどうかを判定することも、本研究のねらいの一つである。また、太陽の輻射変動が地球の気候変動の主たる原因であることを確定できれば、未来の太陽輻射の変動を予測し、地球気候の変動を予測する方法を開発することも、本研究のねらいの一つである。

1970年代前半からの研究代表者の研究によって、太陽から地球に降り注ぐ輻射が、太陽周期とよばれる太陽の11年磁気周期変動と連動して変動することが予測されていた。この予測は、1970年代後半から現在にいたるまでの宇宙空間からの複数のスペース・クラフトからの測定によって実証されている。問題は太陽輻射変動と磁気周期変動は、位相を同じくするのか、すなわち、時間の遅れなく変動するのか、あるいは、時間の遅れをともなって変動するのか、ということである。時間の遅れなしに輻射が磁気変動とともに変動すれば、過去の輻射は比較的容易に再現できる。過去の磁気活動の変動をみる良い指標が数多く存在するからである。

理論的には、ふたつの量は時間の遅れをともなって変動することが予測されている。すなわち、輻射の変動は磁場の変動の後に起こることが予測されている。この予測は、太陽磁気の起源の理論である、太陽対流層内のプラズマの流れによって対流層のなかに電流を流し、磁場を励起するダイナモ理論の帰結として自然に得られる。遅れ時間をともなう輻射と磁場の変動の概念は、太陽輻射が地球の気候に影響を与えているかどうかを判定するときに重要な役割を演ずる。この判定には過去の輻射の履歴と地球気候の指標としての気温の履歴を比較するのだが、過去の輻射の履歴をとどめる直接の指標は今のところ見つかっていない。一方、地球の気温の履歴の指標は様々なものがある。太陽輻射と磁場との間の遅れ時間があり、その遅れ時間が定量的にわかれば、その遅れ時間だけ太陽磁場の履歴をずらして、太陽輻射

の履歴を再現し、地球気温の履歴と比較することができる。

これまでの研究代表者の研究では、この論法と逆に太陽輻射が地球の気候変動の主たる原因という仮説をたて、地球気温の履歴を太陽輻射の履歴と仮定し、地球気温の履歴を太陽輻射の履歴の指標として、太陽磁場と輻射変動の履歴を調べ、理論の検証をしてきた。その結果、数十年から数百年の地球気温の履歴は、理論から期待される太陽輻射の履歴と驚くほどよく似た行動をすることが解っている。すなわち、太陽磁場と地球気温の履歴は、理論から期待される遅れ時間をもった太陽磁場と太陽輻射間の履歴と酷似していることが解っている。つまり、地球気温の履歴曲線を理論から期待される遅れ時間だけ過去にずらすと、太陽の磁場の履歴曲線とほとんど、ぴったり、一致する。これは、少なくとも数十年から数百年の地球の気候変動は太陽輻射の変動の影響を強く受けていることを示唆している。しかし、これだけでは太陽輻射が地球の気候変動の主たる原因という仮説は、太陽輻射と地球気温の履歴のデータと照らし合わせて、自己矛盾がないということを立証したに過ぎない。

本研究では、この仮説の検証をさらにすすめ、太陽の独立なデータを使う。そのために、理論の精度を高める。特に、現存する太陽のデータから、太陽輻射の履歴のより直接的な指標をつくり、地球気温の履歴と比較する。このことにより、当初に述べた太陽の輻射変動が地球の気候変動の主たる原因であるか、あるいは、そもそも気候変動に影響があるのか、あるとすれば、どの程度の影響で、どの程度の時間スケールの変動に対して影響があるのか、という問題を定量的に検証することができる。

現在、太陽輻射の地球気候への影響は、太陽磁場の変動の指標を輻射の変動の指標と仮定して、多くの場で論ぜられている。この場合、磁場と輻射は、位相を同じくして変動することを仮定されている。太陽磁場の指標と地球気候の指標の変動は、同じ行動を示すときもあり、また、違った行動を示すときもあるので、太陽の地球気候への影響は確定的にあると断定できない状況にある。このようなとき、本研究の基本的な考えに基づき、磁場と輻射の変動の相互関係を、理論的な手法と過去の太陽を観測することにあたる既に撮影され蓄積された太陽像のデジタル化によって得られるデータの解析の手法を使い、太陽の輻射と磁場の地球気候への影響があるかないかを確定的に決めることができる。

## 2 . 研究の実施内容

本研究の実施の方法は二つの柱からなっている。一つは100年近くの間、写真乾板とフィルムの上に撮像された太陽像を精度の高い装置でデジタル化し、その結果として得られる大規模なデータを、高速計算機で解析し、太陽輻射の履歴を再現するため、太陽半径の時間変化を検出することである。

このとき、太陽面にある模様、特に黒点群も同時にデジタル・データとして記録されるため、この模様の位置の移動を計算機により自動的に測定し、微分回転の流れの時間変化、子午面還流の変化、そのほか、太陽全面にわたる大規模な流れを検出し、その時間変化を測定する。黒点群が太陽全面に存在することは少ないので、黒点群にのみ頼らないで、他に永続する模様も使う。大規模な流れは、太陽磁場を作り出す作用があり、また、そのなかでも対流は熱を運び、その変化は太陽輻射変動の原因にもなるので、大規模な流れとその変動の検出は太陽輻射の変動の直接的検出にもつながる。

もう一つの柱は、太陽対流層内部の流れと磁場と熱構造の変化の大規模な数値シミュレーション実験を実行し、対流層の構造と時間変化の新しい理論をつくることである。このことにより、太陽の半径の変化から輻射の変化を導く方法が確立できる。また、これらのことは太陽対流層内部の流れと磁場のダイナミクスと密接な関係があるので、黒点群等を運動の指標として使って推定される太陽の大規模な流れの構造と、その時間変化は、この数値シミュレーションの検証になる。

本研究の基本的考えをもとにものごとを考察したとき、はじめて明らかになる現象の一つの例は、グリーンランドの雪と氷の層に閉じ込められたベリリウム10の同位体であるベリリウム10の量から推定される、過去の太陽磁場変動の履歴曲線と、地球の極地域に生息する樹木の年輪の成長率から推定される、過去の地球の気温変動の履歴曲線が、時間の遅れを考慮に入れると一致するという事実である。

ベリリウム10は太陽系外から飛来する銀河宇宙線が地球大気中の原子と衝突して生成される。この生成率は太陽磁気活動が高いとき少なく、低い時に多い。銀河宇宙線の進入を阻害する太陽系の磁場は、太陽本体の磁場を太陽風が惑星系を越えて遠方に持ち出したものである。その磁場は、したがって、太陽磁気周期とともに変動する。進入の阻害は、太陽磁気活動が高いとき大きく、低いとき小さい。このため、夏冬の積雪量の差によって年輪のような層状構造をもつグリーンランドの氷や南極の氷の中に閉じ込められたベリリウム10の量は、過去の太陽磁気活動の良い指標となる。太陽輻射の変動が地球気候の変動をもたらすと考えるなら、太陽磁気活動と地球気温の時間変動の様子は必ずしも一致しなくて良い。太陽磁気活動と太陽輻射の時間変動は遅れ時間をもって関連しているからである。太陽輻射の変動と地球気温の変動の様子が一致すれば、太陽輻射が地球気温変動の直接の原因となるという考えの有力な証拠になる。このとき、太陽輻射が地球気温を変動させるためには、さほど時間がかからないということを前提としている。

本研究の一つの大きな目標は、過去の太陽輻射の履歴の再現である。太陽輻射の履歴は、太陽半径の履歴の測定によって行う。このために、過去約100年間の間に集積された白色光による太陽像をデジタル化する。この大規模なデータを様々な手法

で解析し、雑音となる要素を取り除き、半径の変化を抽出する。次に半径の変化から太陽輻射の変化を導きだすことを目的として、太陽内部の温度と密度の構造の理論を再検討し、次世代の対流層の内部構造理論を創りだす。

研究代表者の太陽磁気を創出するダイナモ理論は、太陽の緯度と深さ方向によって回転角速度が異なる微分回転の流れと、回転の影響を受けたグローバル対流の流れによって磁力線が引き伸ばされ、曲げられ、折りたたまれる過程の結果として、磁気エネルギーが創られ、増大し、磁力線の方向が反転するというメカニズムによるものである。天体ダイナモの基本問題はこのようにして解かれたのであるが、創られた磁場が、磁場を創るプラズマの流れにどのように働くかは、まだ、未知の部分が多い。

研究代表者は、この過程を磁場は流れのダイナモ作用を阻害するように働くという物理過程を単純化して、数学的モデルで表現し、そのモデルの解の特性を調べ、過去の磁場が流れを変え、ダイナモの効率を変化させるのに時間がかかる場合にのみ、すなわち遅れ時間がある場合にのみ、解は観測されるような太陽磁気活動を表現できることを見出した。磁場がプラズマに及ぼすローレンツ力は、時間をかけて、プラズマの流れを変化させる。したがって、磁場と流れの間には時間の遅れがあるのは、力学的に妥当な仮定である。この仮定の一つの実証は、流れの一つの種類である微分回転と太陽磁気活動の時間変化の履歴は酷似しその間には、約20年の遅れ時間を持つという事実である。これは、研究代表者と研究協力者の1人である Maspuł Aini Kambryが、黒点群の位置の変化から導きだした微分回転の時間変化と太陽磁気活動の時間変化を比較して発見したものである。ローレンツ力は、20年の時間をかけて微分回転の様子を変化させていくのである。この20年という遅れ時間は、理論により予測されていた値でもある。この結果、ダイナモ理論の非線形過程の一部が、観測データから実証されたことになる。

もう一方の流れである、対流の流れを変化させる過程では、対流が熱を運ぶ担い手でもあることから、磁場のローレンツ力は、太陽対流層の熱構造をも変えることがわかる。磁場の変化に応じて、対流層は熱を蓄えたり開放したりすることになる。蓄えるときは、表面から放射される太陽輻射の量は少なくなり、開放するときは、多くなる。この場合、熱を蓄えたり、開放したりする時間のスケールは、熱が蓄えられる対流層の深さによる。熱は様々な深さに蓄えられると考えられるので、磁場と輻射の変動の履歴曲線の間には、様々な複数の遅れ時間が存在すると考えられる。先に述べたように、これまでの研究代表者の研究では、地球気温の履歴を太陽輻射の履歴と仮定し、地球気温の履歴を太陽輻射の履歴の指標とした場合、200年、1000年の離散的な複数の遅れ時間が導き出されている。これらのことから、地球気温の履歴を太陽輻射の履歴とする仮定を検証することは、過去の太陽の磁場変動の履歴

から、未来の太陽輻射の変動を予測する方法、また、未来の地球気温を予測する方法を確立するためにも重要な問題であることがわかる。

平成12年度は、本研究プロジェクトが始動して半年がたったときからは始まっている。この半年に調査をしたインド天体物理学研究所のコダイカナル天文台が所有する、100年間の太陽像をデジタル化する装置を、米国、アリゾナ州、ツーサンのCCDカメラ製作会社と協議しながらデザインし、2機のデジタル化装置を製作した。

太陽像は、25cmx25cmのガラス乾板とフィルムに記録されている。この写真乾板とフィルムを下方から照らす一様光源として、直径約1メートルの積分球を採用したため、デジタル化装置は高精度な装置となった。この光源を採用することについては、このCCDカメラの会社とも意見を異にし、共同研究機関とした米国国立太陽天文台とも意見を異にしたが、できあがったデジタル化装置の性能の良さは、この両者とも認め、将来の高精度のデジタル化装置のモデルになると考えている。CCDは、大きさ15ミクロン四角の4096×4096個の素子からなっている。CCDそのものは1枚の素子である。また、積分球は、標準の設計のものを変更し、副積分球の1つの光源から、主積分球に光を送る構造に改造した。この改造は、米国ニューハンプシャーにある会社の構想である。標準の積分球を使い、テストを繰り返したところ、光源が強すぎ、デジタル化装置の結像レンズの前に光を弱くするフィルターをおいたが、この方法では、フィルターからの反射光が、レンズ面にあたり、干渉縞に似た模様をつくり、しかも、この模様が時間変化することがわかったのである。レンズの前にフィルタをおくことはできないことを見つけたので、積分球の会社と相談した結果、この改造で問題が解決できることがわかったのである。

できあがった、この2機のデジタル化装置を、米国政府の正式の輸出許可をとり、コダイカナル天文台に搬送し、コダイカナル天文台で受け取った。

また、デジタル化装置、および望遠鏡そのもののレンズによる、位置のずれの収差を補正する解決法をみいだした。レンズあるいは鏡を使うかぎり、多かれ少なかれ、位置のずれの収差はさけられない。いままでの太陽観測のよって得られた黒点あるいは黒点群などの模様を使う方法で微分回転を決定していたが、この収差の影響は避けられなかった。このプロジェクトでは、この誤差を、収差のまったくない結像系で、太陽像をとり、この太陽像と、望遠鏡ならびにデジタル化装置によって得られた像を比較することにより、望遠鏡ならびにデジタル化装置の結像系の収差を同時に補正する。この収差のまったくない結像系は、ピンホールによって得られる。このため、ピンホールにシャッターとフィルタを組み合わせたものを日本で製作し、デジタル化装置と同じCCDカメラと組み合わせてピンホール望遠鏡を製作するためコダイカナル天文台に送っている。平成12年度には、ピンホール望遠鏡の

ドームとデジタル化装置を設置する場所の整備を開始した。平成13年度はピンホール望遠鏡を製作し、太陽観測を開始する。

ピンホール望遠鏡は、収差はないが、CCDの大きさと同じ程度の太陽像をつくるためには、ピンホールとCCDの間を長くする必要があり、ドームも大きくなるという難点があったが、コダイカナル天文台に、現在使っていない20インチ屈折望遠鏡のドームがあり、このドームを使えることになったのである。

一方で、東京大学の研究室に導入した大容量のデータを解析する高速計算機のため、床に過重しない構造を考案し、計算機を安全に設置した。

計算ソフトの面では、データ解析と数値実験の両方のソフトを開発をすすめた。

### 3 . 主な研究成果の発表（論文発表）

Yoshimura, H. " Mechanism of Cyclically Polarity Reversing Solar Magnetic Cycle as a Cosmic Dynamo ",  
Journal of Astrophysics and Astronomy, Vol. 21, Nos. 3 and 4,  
pp. 365-371.

Proceedings of International Astronomical Union Colloquium No.179, Cyclically Evolution of Solar Magnetic Field : Advances in Theory and Observations, Published by the Indian Academy of Sciences, pp. 365-371.