

「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、という問いに確実な証拠を示して、定量的に答えることである。この問いを具体的に表現すれば、太陽の輻射変動は、地球の気候変動に影響しているのか、影響しているとすれば、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しているのか、ということである。また、太陽の輻射変動と磁気変動のダイナミカルな関連を明らかにし、磁気変動を追跡することによって過去の地球の気候変動を再現できるのか、未来の地球の気候変動を予測することができるのか、という問いに確実な証拠を示して答えることである。

過去、また、近年も、再び新しくなった話題として、太陽と地球気候との関連が議論されてきている。しかし、その多くは、太陽の顕著な周期現象である磁場の11年周期との関連として議論されている。しかも、太陽11年磁気周期変動と太陽輻射変動は、直接、時間の遅れなく関連していて、太陽11年磁気周期変動を追跡することにより、直接、過去の地球の気候変動を再現でき、未来の気候変動を予測できると議論されている。この議論は、太陽輻射変動は太陽の比較的浅い層に起因していることを前提としている。このため、表面で観測される磁場と輻射は、直接、時間の遅れなく連動して、変動するとしている。本研究が、これらの議論と異なる点は、磁場の変動と磁場の変動に起因を研究代表者の理論の結果に求めていることにある。この理論によると、磁場の変動も輻射の変動も太陽の深いところに起因し、太陽の全輻射は、太陽の磁場と同じように、約11年で変動するが、両者の変動の間には時間差がある。多くの太陽変動と地球の気候変動との関連の研究は、太陽の磁場の変化と直接関連すべきであることを主張しているので、様々な観測事実との間の矛盾が明らかになり、太陽変動と地球の気候の変動の間には関連がないという議論も、長い間、続いている。これらの議論も、太陽変動を、磁場変動より、むしろ、輻射変動を主体にしたものと考えたと、矛盾がなくなると考えている。

本研究は、太陽の変動を磁場と全輻射の2つ別々の変動としてとらえ、この両者の間には、ダイナミカルな内部的連関はあるけれど、現象としては時間差があるため、2つの変動の高低は必ずしも一致しなく、従って、2つの量の変動を起因とする地球の変動も、2つの種類の変動として見なければならず、地球気候の変動は、太陽輻射の変動を主たる

原因とみなしていることを特徴としている。

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。従って、現代の地球温暖化が、このような人類の活動によらない自然の現象に起因する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となる。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実な証拠をもって示すことが、本研究の1つの大きな目標であるが、この目標を達成できれば、未来の太陽輻射の変動を予測することも、地球気候の変動を予測するために、重要な一つの要素となることを示すことができる。従って、未来の太陽輻射変動を予測し、過去の太陽輻射変動を再現する方法を開発することも、本研究のねらいの一つとなる。

過去の太陽の磁場活動を再現する指標は数多く存在するが、過去の輻射の変動を再現する指標は、ほとんどない。唯一、それに近いのが、太陽の半径の変動である。恒星の脈動にみられるように、輻射の変動と半径の変動は密接に関連していると考えられるからである。

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理論的に予測されていた。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・クラフトによって実証されている。問題は太陽輻射と磁気周期は、位相を同じくして変動するのか、すなわち、時間差なく変動するのか、あるいは、時間差があり、遅れをとまって変動するか、ということである。理論的には、ふたつの量は、時間の遅れをとま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。太陽対流層内部で熱を運ぶ対流は、太陽磁場を創成すると同時に、創成された磁場からの影響を受け、熱の流れに変化をもたらす、その結果、対流層は熱を溜めることができ、ある時間後に放出することができるからである。熱の流れの変化は、対流層の熱構造を変え、太陽表面から放出される太陽輻射の変化をもたらす。この予測は、太陽磁気起源の理論である、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（発電機）理論の自然な帰結として、1970年代中期に得られていた。

太陽対流層内部の微分回転と対流の流れによるダイナモによって創られた磁場は、また、微分回転と対流の流れの変化を及ぼし、その変化には時間がかかる。微分回転の変化と磁場の変化の間には、密接な関連があり、両者の変動の間には時間の遅れがあることは、すでに、研究代表者の研究によって実証済みである。対流の流れを変化させるのに時間がかかることは、まだ、直接には実証されていない。この実証のためにも、また、本研究の目的を達するためにも、対流の流れの変化と磁場の変化との間の時間の遅れを、定量的に、既存の観測データの解析と、理論的の両方の手法によって示すことは、重要なことである。

遅れ時間をとまら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。この判定のために、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。

現在、米国の研究者を始めとする世界各国の多くの研究者は、遅れ時間は無いものと暗黙の仮定を設け、太陽磁場の履歴を太陽輻射の履歴とみなし、太陽と地球の気候との変動の関係を研究している。太陽磁場の履歴の指標には様々なものがある。地球気温の履歴の指標にも様々なものがある。遅れ時間がないならば、磁場の履歴をそのまま使って、2つの量を容易に比較できる。しかし、遅れ時間があれば、その遅れ時間だけ磁場の履歴をずらして、太陽の輻射の履歴と地球気温の履歴とを比較しなければならない。

これまでの研究代表者の研究では、太陽輻射が地球の気候変動の主たる原因という仮説をたて、地球気温の履歴を太陽輻射の履歴としてみなしうるという仮定を採用し、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分かっている。

地球気温の履歴は、理論から期待される太陽磁場と太陽輻射の間の遅れ時間だけ太陽磁場の履歴をずらした太陽輻射の履歴と、酷似した時間変化を示している。すなわち、地球気温の履歴曲線を、理論から期待される太陽磁場と太陽輻射の間の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。

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る、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。

このように、本研究は、太陽の全波長で積分した量である全輻射と、太陽の磁気活動の変動が、地球の気象、気候、海洋、電離層の変動に、どのように、どのくらい影響を与えているかを、定量的に検討し、地球変動、気候変動の未来と過去の予測と再現に貢献することを目的とする。全輻射は宇宙空間からの測定によって10年に0.1パーセント程度変化していることがわかっている。これが、50年、100年、1000年の間にどの程度、どのように変化するかを明らかにすることが、本研究の第1の目標となる。研究代表者の基本的な研究の発想とコンセプトは次の5項目で表わされる。

- (1) 太陽の地球への影響は、太陽輻射と磁場との2つの量の変動によって2系統の過程を通る。
- (2) 約11年の基本周期の太陽輻射と太陽磁場の変動の間には時間差があり、その時間差は、太陽内部の流れと磁場のダイナミクスで決まっている。
- (3) 11年基本周期の変動の振幅は、数十年から数百年、数千年の時間スケールで変動し、

輻射変動と磁場変動の間の時間差は、この変動の時間スケールで異なる。

- (4) 太陽輻射の変動は、100年以上の間には、約20年の間、宇宙空間から実測されている0.1パーセント以上の変化をする可能性があり、その地球気候変動への影響は、地球の地表面と海面、そして大気を直接、暖め、地球の対流圏の運動を変化させて起こる。
- (5) 太陽磁場の影響は、太陽磁場変動に基づく紫外光の変動が地球大気上層部の磁気圏、成層圏を変化させて起こる。

太陽磁場の変動の指標となるものは、黒点数をはじめ、様々な指標がある。数十万年にわたる指標は、グリーンランドや南極の氷層に閉じこめられたベリリウム同位体であるBe 10の量によって、また数千年にわたる指標は樹木の年輪に閉じこめられ炭素同位体C 14の量によって得られる。これらの量の測定することにより、過去の太陽磁場の履歴は原理的に再現できる。これらの同位体は、太陽系のそとから降り注ぐ宇宙線によって地球大気中でつくられ、地上におり、氷の層や樹木の年輪などに閉じこめられる。氷の層や樹木の年輪を数えることによって、これらの層や年輪がいつ形成されたかがわかる。また、この宇宙線は太陽の磁場によって影響をうける。太陽の磁場が強い時には宇宙線強度は大きく、磁場が弱い時には宇宙線強度は小さいという相関があるから、これらの同位体の量を測定し、氷も層や樹木の年輪を数えることで、過去、いつ、どの程度の太陽磁場活動があったかが分かるのである。言葉をかえるなら、これらの同位体は、太陽磁場活動の履歴の指標となるのである。過去の太陽磁場の再現を目的として、500年程度、あるいは、1000年程度の時間スケールのBe10の量が測定されている。C 14についてはさらに長い時間スケールの期間の量が測定されている。

本研究では、これら、過去の太陽磁場活動の指標から、遅れ時間を考慮にいれ、過去の輻射の変動を再現し、未来の輻射の変動を予測することをねらう。この太陽輻射の変動と地球気候の気候変動を比較し、太陽輻射の変動が、どの程度、どのような時間スケールの地球気候の変動に寄与しているかを、定量的かつ確定的に示す証拠をみいだすことをねらう。

2. 研究実施内容

本研究は、インド天体物理学研究所・コダイカナル天文台の100年近くの白色光で撮影された太陽像のデータをCCDカメラでデジタル化し、コンピュータで処理する形にすることから始まる。このデータが、太陽対流層内部の磁場と流れの数値シミュレーション実験の結果を検証するものとなる。

すなわち、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年近くの間にはわたって撮像された太陽像を、精度の高い装置でデジタル化し、その結果得られた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、これらの模様の移動を、計算機により自動的に測定し、微分回転の時

間変化、子午面還流の変化、そのほかの、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。微分回転とそのほかの大規模な流れが太陽の磁場を励起し、その磁場が対流の流れを変え、太陽輻射変動を引き起こしていると考えられるので、これらの流れの検出とその時間変動の測定は、輻射変動の機構と予測のため、非常に重要なものである。

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、その時間変化も、この数値シミュレーションの検証になる。

上に述べたように、現在、多くの太陽輻射の地球気候への影響の議論は、太陽磁場の変動の指標を輻射の変動の指標と同一視することができることを仮定して論ぜられている。この場合、磁場と輻射は、位相を同じくして変動することが仮定されている。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。このため、本研究の基本的考えに基づき、輻射変動と磁場変動との間の相互関係を、理論的な手法と観測データを組み合わせて明らかにする。

このような考えをもとに考察したとき、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気温変動の履歴曲線とが、時間の遅れを考慮に入れると、驚くほど良く一致することである。さきに述べたように、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ことは、先に述べた。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的前提としている。

研究代表者の太陽ダイナモ理論は、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ことができるから、磁場と流れの間には時間の遅れがなければならないのである。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間には、約20年の遅れ時間を持つ。これは、研究代表者と研究協力者の1人である Maspu Aini Kambry が、黒点群の位置の変化から導き出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。これはまた、太陽対流層ないで、磁場は十分強く、流れを変化させる証拠ともなっている。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。これらの値は、太陽対流層の様々な深さの構造を反映していると考えられる。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、過去の太陽磁場変動の履歴から、未来の太陽輻射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11年度、12年度で、100年間の太陽像のデータを持つ、インドのコダイカナル天文台を訪問し、デジタル化する太陽像を撮像する望遠鏡を調査し、また、デジタル化装置を設置するための条件を調査した。コダイカナル天文台のデータを、高速デジタル化する装置をデザインし、このデザインを、米国、アリゾナ州、ツーサンのCCDカメラ製作会社と協議し、デジタル化装置を製作した。また、この装置を米国商務省の正式な輸出許可書を取り、インドのコダイカナル天文台に搬送した。また、一方では、東京大学の研究室に高速計算機を導入し、大規模なデータ解析と、数値シミュレーション実験の準備を

した。

平成13年度は、コダイカナル天文台に搬送したデジタル化装置を設置、環境を整備し、稼働させることができた。デジタル化は、コダイカナル天文台のデータを有効利用するためのデータ・マイニングの一環と位置づけ、コダイカナル天文台の本部であるバンガロールのインド天体物理学研究所の支持をとることができた。データ・マイニングは、原データの保存、デジタル化、デジタル化したデータの管理、解析等からなるが、本プロジェクトでは、デジタル化と解析に重点をおき、初期結果をできるだけ早く出すことを当初の目的とおいた。そのため、1903年から始まる約100年間のデータを全部デジタル化するには時間がかかることを見越して、1年の内、ある1ヶ月、この場合、1月のデータを選び、100年間、合計約100ヶ月のデジタル化データを100年間のデータのサンプルとして取得し、日本に運んだ。

平成14年は、このデータを解析するため、太陽半径の精密な測定法を確立し、その測定方法を実現する計算機ソフトを開発した。この解析の結果、コダイカナル天文台のデータには、1年より短い太陽半径の変動成分があるらしいこと、少なくとも、1年より短い時間で、大きく、変動する成分があるらしいことが分かった。そのため、さらに、時間解像度の高い、1ヶ月に1点のデータのサンプリング、1ヶ月に3点のサンプリングと進んだ。これらのサンプリングの解析の結果、大きく変動する成分は、太陽に起因するよりも、望遠鏡に起因するらしいことがわかり、大きく変動する期間は、現存するすべての写真データをデジタル化した。また、望遠鏡の構造を独自に調査し、このような、突然の大きな変動が、望遠鏡の構造と歴史の上から、起こりうることを確認した。このため、突然の大きな変動を取り除き、補正した太陽半径の変化の測定結果は、その信頼性を高めたと考えている。

これらのデータ解析の結果、太陽半径の変動成分の時間スケールは、1年程度、10年程度、100年程度のものがあることが分かった。これらが、太陽に起因するものであるか否かを、現在、確認中である。

また、太陽像を写真撮影する6インチ望遠鏡とデジタル化装置のレンズによる位置のずれ収差を同時に補正するため、収差が全くない光学系であるピンホール望遠鏡を制作し、デジタル化装置で使うCCDカメラと全く同じ仕様のCCDカメラを使い、太陽像のデジタル・データを取得する観測を開始した。位置のずれ収差の補正のためには、ピンホール望遠鏡と、太陽像を写真として撮像する6インチ望遠鏡で、同時に太陽を観測し、撮像し、かつ、写真のデータをデジタル化の作業と全く同じ条件でデジタル化する必要がある。このデータとピンホール望遠鏡のデジタル・データを比較し補正する。これらのデータも最小限の量を日本に持ち帰った。また、ピンホール望遠鏡による観測も2002年5月から2003年3月のものは得られ、日本に持ち帰った。

コダイカナル天文台での問題は数多く、電源の確保、モンスーン・シーズンを含む雨期の湿度制御、花粉を含む各種の埃の除去、働く人たちの生活習慣、作業習慣の違い、等があるが、これらを1つ1つ解決していった。ことに、室外に近い解放された望遠鏡のドー

ム内で、これらのことを達成するには、新しい工夫が必要になった。

デジタル化作業自身も常に円滑に進んだとは限らず、何度も、コダイカナルに出張し、機器の修理、易しい使用法の工夫が必要となった。デジタル化作業も幾度となく停止したため、作業体制の変化をコダイカナル天文台の本部であるバンガロールのインド天体物理学研究所で討議し、実行せざるを得なかった。

技術的には、歴史的な古い建物と施設のある天文台で、これらの歴史的な建物と施設を保存しつつ、最先端の機器を稼働させるという難しい事業を、平成13年度と平成14年度で達成できた。このため、1台のディーゼル発電機、5台のUPSシステム、6台の空調機、1台の工業用空気換気装置、4台の空気清浄機を平成13年度までに投入し、平成14年度にフル稼働に持ち込んだ。これにより、恒温、恒湿度のデジタル化のための空間を24時間体制で、維持できるようになった。

すでに、このプロジェクトは、米国、欧州で知れていて、参加を希望する研究者が、現れている。1方では、独自にデジタル化を進める動きが活発になっている。

長期間記録された黒点群のデータは、グリニッチ天文台のデータ、ウィルソン山天文台のデータ、パリ天文台のデータもある。グリニッチ天文台のデータというのは、大英帝国が建設した、英国のグリニッチ天文台、インドのコダイカナル天文台、南アフリカのケープ天文台のデータからなっている。グリニッチ天文台のプログラムのうち、コダイカナル天文台のみ、現在も観測を継続している。しかし、ウィルソン山天文台のデータ、パリ天文台等は、現在も観測を続けている。独自にデジタル化を進める動きが活発になっているのが明らかになったものは、ウィルソン山天文台のデータとロシアのプルコボ天文台のデータである。

3. 研究実施体制

研究分担グループ長：吉村 宏和（東京大学、助教授）

研究項目：太陽像のデジタル化装置製作、ピンホール望遠鏡製作、太陽像のデジタル・データ解析のためのソフトウェアの開発およびデータ解析、太陽内部の磁場と流れのシミュレーション、太陽圏における銀河宇宙線の太陽風による変化、Be10とC14による過去の太陽磁場の再現

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文（原著論文）発表

なし

(2) 特許出願

H14年度特許出願件数：5件（研究期間累積件数：5件）