

## 変動する太陽の話

吉村宏和 (天文)

学問は螺旋階段を登りながら進歩するという。最先端の分野が次々と開かれ、研究されていくと、いつのまにか出発したところの、少しばかり高いところに戻っているという。そのとき、新しい視点とそれまでの研究の蓄積のために、さらに理解可能な領域が広がっているというのである。最近の太陽物理学の発展に参加していると、この言葉がいかに真実であることかと、私は深く感じているのである。

太陽は恒状的な星ではなく、さまざまな時間スケールで変動している星である。この事実の発見は長い間にわたる多くの発見の積み重ねによる。最近の太陽物理学の進展は、変動のありさまをより高い認識のレベルで明らかにしつつあり、その規則性の基本的機構を明らかにしつつある。最初の発見は、19世紀半端の Schwabe による太陽面の黒点頻度数の周期的変動の発見から始まる。その周期は約11年である。発表された当初は注目されなかったこの現象は、von Humboldt により、その大著 *Cosmos* の第Ⅲ巻で紹介されると、多くの人々に知られ研究されるようになる。Wolf は 1610 年の Galileo の発見以来の望遠鏡による黒点観測のデータを集め、黒点11年周期が過去にも継続していたことを確認する。黒点観測はこれより国際的に組織されるのである。そしてすでにこのとき、11年周期より長い時間スケールの変動が気付かれている。一つは規則的な変調であり、その周期は約80年と見られている。もう一つは、Galileo の発見のあと、1700 年頃まで黒点がほとんど出現しなかった時期があったらしいことである。この2つの現象は、以後太陽物理学者を悩ませ、つい最近になって理解が可能になったのである。

ついで Carrington は、黒点の出現する緯度が周期とともに、中緯度から赤道へと移動することを発見する。この黒点の周期性は、Maunder により時間-緯度を座標とする図に図示される。その分布のパターンは昆虫採集の展翅板上の蝶に似ているため、蝶形図と呼ばれ、現象自身は太陽周期と呼ばれることになる。この19世紀の研究のあと、20世紀初頭に、Hale は黒点の磁場を発見する。黒点は極性の異なる2つが一組となり、その双極軸はほぼ赤道に平行である。極性の向きは各南北半球毎に同一であり、赤道をこえると逆になる。この整った磁場の極性の向きは11年周期毎に反転する。蝶形図は、太陽内部に巨大な磁束管が形成され、これが表面に黒点群となって現われ、赤道方向に波動として伝播し振動することを表わしているのである。すなわち Hale は、太陽が磁気振動体であることを発見したのである。しかしながら、太陽周期の研究はこれ以後、大きな空白期間をむかえることとなる。Hale により創始された、地球上の実験室の物理学を天体の理解に適用する天体物理学は、それ以後、急速に他の方向に発展したのである。それは、太陽と星の大気と内部の構造と進化の概略を明らかにし、銀河系の構造と進化を明らかにしつつある。太陽物理学においては、原子分光物理学の発展とともに、太陽大気の化学組成、温度、密度が研究され、高温コロナの発見とともに外層大気の研究に大きな努力がそそがれたのである。さらに、光、電波、X線、 $\gamma$ 線などの観測技術の発展とともに、太陽は、短かい時間スケールで激しく活動する天体であることが明らかにされていったのである。しかし、これらの活動の源をなすものはなにかと考えるとき、再び内部の磁場の形成と変化、即ち太陽

周期の問題にたち戻るのである。このようにして再開された研究は今、太陽周期がただ磁場の変化を意味するばかりでなく、太陽の熱的構造の変動まで意味していることを明らかにしつつある。

太陽周期の直接の研究の空白期の間にも、黒点のデータは地道に蓄積され、その基本的理解への道は、他の多くの分野で用意されていた。それは電磁流体力学の発展であり、原子核物理学の発展にともなう宇宙線の研究の発展であり、さらに地球大気をはじめとする回転流体内の運動の研究の発展である。また電子技術の進歩と大型高速電子計算機の到来と、人工天体による観測技術の進歩は、太陽周期の理解の手段を準備していた。宇宙線の研究についていうと、1930年代からいくつかの高山で定期観測されている。そして1950年代、Forbushによりその強度が太陽周期とともに変動することが発見されている。この宇宙線は地球大気中の原子と核反応し、中性子をつくる。これは主反応として $^{14}\text{N}$ に吸われ、 $^{14}\text{C}$ をつくる。 $^{14}\text{C}$ は地上と海中の生物体に取りこまれ、蓄積され、半減期約5700年で崩壊していく。これを使って考古学などで年代測定がなされているが、逆に年代のわかっている有機物、特に木の年輪を使って、過去の $^{14}\text{C}$ 製造の変動、すなわち宇宙線強度の変動、そしてそれから太陽周期の変動を研究する学問分野が開けてきたのである。これはまず17世紀の黒点の出現しなかった時期を確証し、さらに遠い過去にも同じような黒点磁気活動の低下した時期がほぼ周期的にあったことを明らかにしている。電磁流体力学についていえば、その原理は19世紀のFaraday, Maxwellの時代から知られていたのは周知のことである。にもかかわらず、天体の現象を理解するのが遅れたのは、方程式を天体の状況のもとで解くのに、電子計算機の発達が必要だったからである。電子技術の発展はさらに黒点ばかりでなく、太陽全面の弱い磁場と速度場を精密に測定するマグネットグラフの開発を可能にする。電離した流体の磁場と流れの相

互作用を研究する電磁流体力学は、このように太陽物理学において強力な観測手段と理論的解法の手段を得たのである。

Haleの跡をうけたMt Wilson天文台では、1950年代から1960年代にかけて、はじめBabcock父子が、さらにその跡をHowardがマグネットグラフの開発につとめ、太陽全面の磁場と速度場を測定していく。そして太陽周期を理解するうえで重要な概念を、つぎつぎと提出していく。この地上からのデータと、さらに人工天体による太陽から吹きでる粒子と磁場の流れの直接測定データは、10年以上にわたって集積され、太陽周期にともなう変動を明らかにしていく。このようにして、1970年代は各分野の発展が収束して、太陽周期、すなわち太陽磁気振動の総合的理解を可能にしていた時期であったのである。

私はこれと時期を一つにして研究をはじめ、その理解の発展に参加する機会を与えられたのを幸いに思っている。1969年は理学部広報が発刊された年であるが、私はこの年研究をはじめ、1973-1974年と1977-1978年にコロラド州ボルダーの大気科学研究所のCDC 7600 / 6600計算機とCRAY-1計算機を使う機会を得、1974-75年と77年にMt Wilson天文台で集積されたデータを解析する機会を得た。この間、東京大学の大型計算機もHITAC 5020 E からHITAC 8800 / 8700へと移り、たいへん、お世話になったものである。

計算機を使う電磁流体力学の数値シミュレーションの技法は、ただ現象を再現するばかりでなく、現象を記述するモデルの内的パラメーターを人為的に操作する数値実験を可能にし、現象の内部のメカニズムの理解をより深め、さらに未だ観測されていない現象をも予測することができる。太陽周期の研究は、この数値実験の特徴がいかに発揮され、太陽周期を再現したばかりでなく、いくつかの重要な周期の性質を予測した。そしてその性質は、観測データ中に発見され、確認された

のである。さらに未だ確認されていない現象をも予測している。

この研究が創りだしていった太陽の磁場の起源とその振動、すなわち太陽周期の統一的描像は次のようなものである。太陽中心で発生したエネルギーは輻射層をにじみ抜け、対流層でその一部は流れの運動エネルギーに変換される。大部分のエネルギーは対流層を通り抜け、表面から放射されていくが、流れの運動エネルギーの一部分は磁場のエネルギーに変換される。この変換過程は電流の発生をとともなうため、ダイナモ過程と呼ばれる。それは流れの構造の空間配置とそれにとともなう磁力線の空間における運動によっている。太陽対流層では、対流は粒状斑対流（規模約  $10^3$  Km）、超粒状斑対流（約  $3 \times 10^4$  Km）、そしてグローバル対流波（約  $10^6$  Km）という3つの形態が共存して流れている。最初の2つの対流は回転の影響が小さいため、流れに空間的非等方性をつくるにいたらず、磁場を拡散する働きをもっている。磁場は空間的に方向をもつベクトル量なので、それをつくりだす流体運動には、なんらかの空間的非等方性が必要だからである。グローバル対流波は、その規模が太陽半径に匹敵に、その寿命が太陽回転周期より長いので、回転の影響は大きく、流れに空間的非等方性ができる。回転の影響は、対流のパターンをセクター（扇）型の南北両極をつなぐようなかたちにし、しかも回転軸の周りに波として伝播させる。さらに回転の影響は、流れにひねりを与え、対流が駆動する微分回転とともに、対流層内に螺旋状の波うつ流れの構造をつくる。この流れが、磁場に螺旋状の構造をつくり、螺旋状の磁力線からなる極性の異なる巨大な磁束管をつぎつぎと交互につくりだし、等回転面に沿って波動として伝播させる。

この過程を記述するダイナモ方程式は、時間と空間の役割を入れかえた拡散方程式と同じ形をもつ。その自然な線型解は拡大しながら伝播する波動解である。この波動はダイナモ波と呼ばれる。

波動の山と谷である磁束管は内部より表面に伝播し、現われる。そこにおける波動の切断面が蝶形図となって現われるのである。波動が等回転面に沿って伝播するという性質は、内部の回転構造を診断するのに有力な方法となる。さらに、黒点の蝶形図は磁場の回転方向成分であるトロイダル磁場の情報を伝えるのみだが、理論は子午面内成分であるポロイダル磁場の表面における分布をも予測した。これは観測データ中に発見されたばかりでなく、表面の磁場から計算できるコロナ-惑星間磁場の構造の太陽周期にとともなう変動に、新しい概念をもたらししたのである。

日食の時見えるコロナの形は、太陽周期極大期には太陽周縁に丸く、極小期にはあたかも太陽中心に巨大な磁石があるかのごとく、南北両極から双極型のいくつもの条が広がっている。このとき、赤道からは太陽半径の数倍以上に、吹き流し状の構造が述べている。太陽周期にとともなう表面の磁場から計算されたコロナの磁場の形状はまさにこのような形状を示したのである。その磁力線は、極大期には太陽全面にいくつものループ状の構造をつくり、粒子の出入りについて、閉鎖的となる。極小期には単純な双極子磁場が太陽風により吹き開けられ、変形したものとなり、その構造は開放的となる。コロナの磁場は、太陽風により吹き流されて、惑星間空間に満ち、太陽系磁気圏を形づくるから、この閉鎖的な構造と開放的な構造のくりかえしは太陽系磁気圏の構造の変化そのものを意味する。それは降りそそぐ宇宙線の飛翔に影響を与え、吹きでる太陽風の流れに影響を与える。すなわち、宇宙線も太陽風も、太陽周期極大期にはその飛翔をさまたげられ弱まり、極小期には開放的な太陽系空間を自由に出入りし、相対的に強まる。これはまさしく、観測されている事実である。

さて、対流層内部で振動しながら拡大する磁場は、流体運動をさまたげ、ダイナモの効率を弱める。こうして、ダイナモ方程式は非線型波動方程

式となるのである。ダイナモの効率は力の函数でなく、速度場の函数であるため、磁場のフィードバックには時間の遅れが必要である。結果として、方程式の系は函数偏微分方程式系となり、遅れ時間をもった力学系となる。この方程式系の解を数値的に求めると、まことにバラエティに富んだ振舞を示すことがわかる。その特徴は、多重周期性をもつことである。17世紀の黒点活動の異常に低下した時期はこの多重周期解として再現でき、磁場の非線型振動の表われと考えられるのである。数十年周期の変調も同時に自然に再現できる。理論の示す概念を使って黒点頻度曲線を解析しなおすと、新しい周期-振幅関係が発見でき、変調の周期は80年でなく、55年であることが発見できたのである。すなわち、太陽周期は周期-振幅を座標軸とする相空間で、5つの11年周期を一組とするループを描き、振動に履歴現象がある。振幅上昇期に周期は短かく、下降期に長い。

さらにこの理論は流体の微分回転とグローバル対流波の流れが太陽周期とともに変動することを要請している。微分回転の変動は Howard により検証されている。熱を運ぶ対流の変動は対流層の熱的構造が変動することを示している。それはさらに、対流層が一時的な熱溜めとなって、全輻射量が増加することを意味している。太陽物理学者はこれが真実なのか否なのか、まだ知らない。将来の観測的、理論的研究の発展を待たねばならない。ただ興味深いことは、17世紀の黒点活動低

下期が、地球上の小氷河期と呼ばれる寒冷な時期、ロンドンのテムズ河も凍った時期、と一致していることである。さらに、<sup>14</sup>Cの解析から導びかれた太陽周期の変動と、地球上の氷河の前進、後退とは良い相関を示している。これがなにを意味するか、決定的な理論と観測はない。しかし、非線型ダイナモ理論では、黒点活動低下期は、対流運動低下期であり、全輻射量の低下期であるはずという事実は興味深いことである。

一つの理論をつくるのは、一つの伽藍を構築するのにも似ている。太陽周期の理論は、今やっと骨格ができたところである。これから、屋根をつけ、壁をはり、内をつくらねばならない。いつまでかかることだろうか。我々はまた、もう一つの螺旋階段を登っているのであろうか。数学の非線型偏微分方程式論の発展を待たねばならないのだろうか。電子計算機のさらに大型化、高速化を待たねばならないのだろうか。太陽物理学は、つぎつぎと現われる新しい問題を独自に解いていくだろうか。この非線型磁気振動方程式は、解の相空間での固定点をも解として許し、地球をはじめとする定常ダイナモをも記述できる。太陽物理学は、再び一般天体の磁気の形態と活動を研究する分野を開いているのである。太陽は今、第21(11年)周期がはじまり、活動最大期に近づいている。しかもこれは、新しい第Ⅶ(55年)大周期活動の始まりである。観測ならびに理論の発展が期待でき、また新しい知見をもたらししてくれるであろう。