

## コラム

## コンピュータシミュレーションでせまる太陽の素顔

東京大学大学院理学系研究科 磯部洋明

## 1. はじめに

太陽は人類にとって最も身近な恒星でありながら、いまだに多くの謎に満ちている。天体としての太陽の研究の歴史は古く、ガリレオによる黒点の発見にまで遡るが、数百年たった今も黒点の形成メカニズムは完全には分かっていない。一方、近年の観測技術の発達は、激しく活動する太陽の新しい素顔を明らかにしつつある。実験の難しいこれらの天体現象の研究には、コンピュータを用いた数値シミュレーションが威力を発揮する。以下では、日常生活では感じることもない太陽の激しい素顔と、巨大コンピュータを用いた最新の研究の一端を紹介する。

## 2. 活動する太陽の素顔

我々の目に見える光、つまり可視光で見た太陽は、黒点の他に目立った構造はなく、時間変動をほとんど示さない。一方、人工衛星からX線で見た太陽はまったく違った激しい素顔を見せる。図1に太陽全面を可視連続光と軟X線(波長の長いX線)で撮像した像を示す。軟X線は200万度以上の高温のガスが発したもので、太陽の縁の外側にも広がっていることから分かるように、表面(光球)の上空のコロナと呼ばれる高温の大気から出ている。両者をよく比べると、黒点の上空が特にX線で明るい。黒点とは数キロガウスの強力な磁場を持つ領域であり、このことからコロナを加熱しているエネルギー源は磁場であることが分かる。太陽からのX線強度

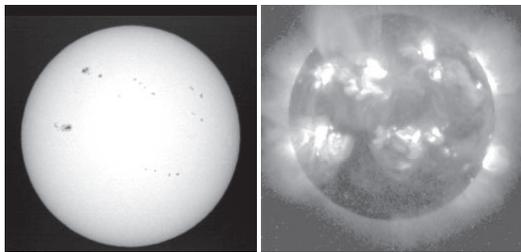


図1 左:京大飛騨天文台フレアモニター望遠鏡で撮影した2000年4月24日の太陽全面の可視連続光像(飛騨天文台提供)。右:ようこう衛星軟X線望遠鏡による同じ日の太陽全面像(宇宙航空研究開発機構提供)。

は、数秒から数時間の時間間隔で激しい時間変動を示し、時折フレアと呼ばれる大爆発を起こす。フレアのエネルギーは最大のもので $10^{25}$ ジュールにもなり、太陽系内最大の爆発現象である。またフレアに関連してコロナ中の物質が大量に惑星間空間に放出されることがあり、コロナ質量放出(CME)と呼ばれている。これが地球へ到達すると地球の磁場と相互作用し、磁気嵐やオーロラなどを引き起こす。これらの爆発現象のエネルギー源も全て磁場である。

黒点、コロナ、フレア、CMEなど磁場に関する様々な激しい現象が起きるのは、太陽の大気が高温のためほぼ電離したプラズマになっているためである。プラズマ中では荷電粒子と磁場が相互作用し、磁力線とガスが一体となって複雑な運動をする。太陽物理学の中心テーマは、プラズマ物理学の手法を用いて黒点、コロナ、フレア等の種々の現象の正体を明らかにすることである。太陽と同様の磁場による活動現象は、他の恒星、銀河、ブラックホール周辺など様々な天体で普遍的に起きていることが明らかになってきている<sup>(1)</sup>。

## 3. 数値シミュレーションによる研究

さてここからは本題である、数値シミュレーションによる太陽の研究について述べよう。シミュレーションとは、ごく簡単に言えばコンピュータの中に太陽を再現してその振る舞いを調べることである。もう少し具体的に言うと以下のようなになる。プラズマの巨視的な運動は、電磁気学と流体力学の方程式を連立させた、磁気流体学(MHD)方程式によって記述される。MHD方程式を解析的に紙と鉛筆で解ける問題は極めて限られていることから、コンピュータによって数値的に解を求めることが必要になる。実際には、空間中に格子点を配置し、各格子点上の物理量の時間変化を方程式に従って数値的に計算する。このようにして得られた時間発展解の性質を調べることで、現実の天体で起きていることとそのメカニズムを明らかにしようとするのが、数値シミュレー

ションによる太陽・天体物理学研究の正体である。

## 4. シミュレーション研究の一例

ここでは筆者らによる最新の研究成果の一つを紹介する。上に述べたようにコロナ加熱やフレアなどの爆発現象のエネルギー源は磁場であるが、その磁場は太陽内部のダイナモ機構と呼ばれる未解決の物理機構により作られていると考えられている。内部で作られた磁場はやがて表面に浮上し、浮上した磁力線の束と光球の断面が黒点として見える(図2)。筆者らは世界最高級の性能を誇る日本のスーパーコンピュータ、地球シミュレータ<sup>(2)</sup>を用いて、浮上する磁場のMHDシミュレーションをかつてない高解像度で行った。

図3に浮上磁場領域の観測データとシミュレーション結果を可視化したものを示す。左は浮上磁場領域を水素のH $\alpha$ 線付近の光で撮影したもので、光球の上の彩層と呼ばれる層の構造を反映している。特徴的なのはアーチフィラメントと呼ばれる、黒点の間の筋状の模様で、これは図2にあるように二つの黒点をつなぐ磁力線の構造を反映していると考えられているが、なぜ特定の磁力線にだけガスがたまり、細長いフィラメント状の構造ができるかはこれまでよく分かっていなかった。右はシミュレーション結果をコンピュータグラフィックスにより3次的に可視化したもので、シミュレーション中で彩層

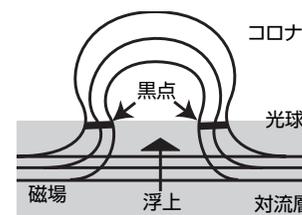


図2 磁場浮上と黒点形成の模式図。実線は磁力線、グレーの部分は太陽内部を示す。

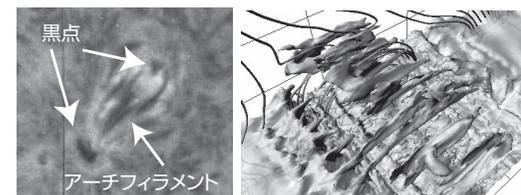


図3 左:京大飛騨天文台ドームレス太陽望遠鏡で撮影した太陽浮上磁場領域(飛騨天文台提供)。右:シミュレーション結果の可視化。

ションにより現実には似たものが再現できただけでは何も分かったことにならない。他の物理量や時間変化を詳しく調べた結果、浮上磁場の中で磁気レイリーテイラー不安定と呼ばれる現象が起きたことにより、筋状の構造が自然発生的に形成されたことが分かった。これは簡単に言えば軽い磁場の上に重いプラズマが乗ることで不安定になり、磁力線と磁力線の間にプラズマが落ち込む現象である。さらに詳しくシミュレーション結果を解析した結果、磁気レイリーテイラー不安定に伴いコロナ中のあちこちで電流が流れ、それがコロナの加熱に寄与していること、同様の現象がフレア中の微細構造の発達にも関係しているらしいことなど、次々と新しいことが分かってきた。これらの成果は2005年3月24日発行のNature誌<sup>(3)</sup>に掲載され、新聞やNHKのニュースなどで取り上げられたので御覧になった方もいるかもしれない。

## 5. おわりに

シミュレーションというとコンピュータに計算を任せて人間はほとんど何も考えていない様に思われることもあるが、シミュレーションの結果は単に数字の羅列であり、そこから何を読み取るかは研究者の物理的直感と想像力にかかっている。コンピュータが発達し計算が大規模になるにつれ、膨大な結果のデータからいかに有益な情報や新しい発見を見いだすかが勝負になってくる。

2006年の夏には日本の新しい太陽観測衛星Solar-B<sup>(4)</sup>が打ち上げられ、我々がこれまで知らなかった新たな太陽の素顔がさらに明らかになるだろう。現在太陽の研究は理論・シミュレーション、観測ともに非常にダイナミックに進展しつつある、大変エキサイティングで魅力的な分野であり、若い人たちにもぜひ興味をもってもらい、あるいは研究の世界に挑戦して欲しい。

## 参考文献

- (1) 活動する宇宙 柴田一成他共著 裳華房
- (2) <http://www.es.jamstec.go.jp/esc/jp/>
- (3) Isobe et al. *Nature*, 434, 478 (2005)
- (4) <http://www.isas.ac.jp/j/enterp/missions/solar-b/index.shtml>