

太陽内部のカオスから秩序を生み出す

堀田 英之 (千葉大学大学院理学研究科 hotta@chiba-u.jp)

太陽内部で、カオス的な速度場・磁場から秩序だった構造を作り出すメカニズムの発見について解説する。太陽には黒点という強磁場領域があり、この黒点の個数は11年の周期を持って変動している。黒点は、太陽内部で乱流によって生成された磁場が表面に浮き出た断面と考えられている。黒点には様々な極性や向きに関するルールがあり、90%以上の黒点がこのルールに従う。黒点は3万km程度の構造であり、円周440万kmの太陽から見ると局所的な構造であるにも関わらず、ただランダムに黒点が見れるのではなく、大局的なルールを持っているということは太陽内部に全球スケールの大規模磁場が存在することを示唆している。

太陽内部の外側30%である対流層は、お湯を沸かしたように熱対流不安定な状態にあり乱流で満ち溢れている。その巨大なシステムサイズと低い粘性によって、乱流を駆動する空間スケールと散逸するスケールに非常に大きな差があることが知られている。いくつかの仮定が必要だが、理論的にはこの二つのスケールには 10^7 ほどの比があると見積もることができる。磁場は小スケールでの生成が短い時間スケールを持っており、与えられた乱流の中で磁場を生成することを考えると、太陽では乱流の最小スケールであるcmスケールの磁場のみが卓越し、観測される大規模な磁場はできないと考えられる。このスケールギャップを如何にして埋め得るかが、本記事の主題である。

この考察の妥当性は、すでにアメリカやカナダのグループによる数値計算で確かめ

られている。2010年頃に達成した解像度の数値計算では、大規模磁場やその磁場の周期性を確認できたのだが、計算の高解像度化が進むにつれて、太陽で予想されるような大規模磁場が作られにくくなっていった。これは高解像度化によって自由度が増え、小スケールの乱流が大規模磁場を破壊してしまったことが原因なのであるが、太陽は言うなれば超高解像度のプラズマ流体であるので、どのようにして、大規模磁場を生成・維持しているかは大きな謎になっている。

この状況を解決しようと、筆者らはこれまでにない高解像度計算に挑戦した。超高解像度化したときのみに見れる物理現象を見逃しているのだらうと考えたのだ。大規模計算機を扱うための新しい計算手法、低粘性・低磁気拡散の計算スキーム、そしてスーパーコンピュータ「京」によってこの高解像度化は実現した。計算の結果を見ると、これまでの研究で実現できている範囲ならば、高解像度化したときに大規模な磁場エネルギーは小さくなり、過去研究と調和的であった。しかし、さらに高解像度化を進めると、大規模な磁場が再度強くなるという現象を発見した。今回達成した解像度では、小スケール乱流による磁場生成能力が非常に効率的になり、小スケールで磁場のエネルギーが運動エネルギーよりも大きくなった。この結果、小スケールの乱流が強く抑制され、大規模な磁場を破壊していた運動を避けることができたのだ。今回の発見では強い粘性を仮定しなくてよく、実際の太陽でも起こりうる重要な発見であると考えている。

—Keywords—

黒点：
太陽表面にしばしば見られる黒いしみである。太陽表面の黒点のない領域は平均10Gほどの弱い磁場が分布しているが、黒点は3,000Gほどの強い磁場を持つ。太陽内部から表面へとエネルギーを運ぶ熱対流を、この強い磁場が強く抑制するために温度が低く、暗くなっている。

乱流：
乱れた流れである。速度、粘性、系の大きさから決まり、速度の乱雑さを表すレイノルズ数が小さい時は、整った流れである層流という流れになっているが、レイノルズ数がある閾値(1,000程度)を超えるとカオス的な振る舞いをする乱流となる。宇宙の多くの状況でレイノルズ数がとても大きいように、太陽内部でもレイノルズ数が 10^{14} ととても大きく、非常に高度な乱流が存在していると考えられている。

スーパーコンピュータ「京」：
2016年6月現在、世界5位、日本1位の性能を持つスーパーコンピュータである。2011年6月、11月には世界1位となった。10ペタフロップス $=10^{16}$ フロップス $=1$ 京フロップスの性能を持つことから「京」と名付けられた。70万以上のコアを持つので、いかに並列計算をうまくおこなない性能を引き出すかが重要となる。