

令和元年6月5日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17655

研究課題名（和文）太陽対流層全体を一貫して取り扱った数値計算への挑戦

研究課題名（英文）Challenge for comprehensive numerical calculation covering the whole convection zone

研究代表者

堀田 英之（Hotta, Hideyuki）

千葉大学・大学院理学研究院・特任助教

研究者番号：10767271

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：太陽全体を一貫して取り扱うための数値計算コードを新しく開発した。このコードでは、太陽表面で重要となる光によるエネルギーの損失を出来るだけ精確に取り扱いつつも、大規模数値計算機にも対応した先進的な数値計算コードである。この数値計算コードを用いて、世界で初めて太陽の外側にある対流層全体を包括した数値計算を実行した。また、太陽表面に現れる強磁場領域である黒点について、世界で初めて太陽深部から一貫した計算で形成を再現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究での成果には宇宙天気的な意義がある。太陽深部で発生する磁場は、黒点を形成し、しばしば太陽フレアなどの突発現象を引き起こし、地球にも影響を与える。この太陽深部黒点の過程を明らかにしたことで、太陽で起こる爆発現象で根本の理解に繋がるであろう。また、太陽磁場生成については、まだ多くの謎が残っている。これは太陽内部を光で直接観測することができないことが原因の一つであるが、本研究では、世界で初めて太陽深部と観測可能な表面を繋げることができた。このことにより今後太陽深部での磁場生成についてさらなる理解が進むであろう。

研究成果の概要（英文）：We develop the new numerical code for covering the whole convection zone. In the code, we treat the radiation energy loss as precise as possible and is applicable to the massive super computing. Using this numerical code, we carry out a comprehensive calculation of the solar convection zone for the first time. In addition, we also reproduce the formation of the sunspot in an unprecedentedly deep calculation domain.

研究分野：太陽物理学

キーワード：太陽対流層

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽は、我々も最も近くに存在する恒星であり、非常に馴染み深い存在であるがまだ多くの謎を残している。その一つが黒点 11 年周期の謎である。太陽深部で形成された磁場が太陽表面へと浮上し、黒点を形成すると考えられているが、太陽内部で大きくスケールが変わるために、その物理過程を一貫して数値計算で追うことは、非常に計算負荷の高い問題となり、これまでに計算を実行されたことはなかった。

2. 研究の目的

太陽の外側 30% 全体を包括するための数値計算コードを開発するとともに、その数値計算コードを用いて、太陽対流層全体を包括する計算を実行する。また、太陽深部を出発した磁束が太陽表面で黒点を形成するまでを数値計算により再現する。

3. 研究の方法

スーパーコンピュータを用いて数値計算を用いて、太陽対流層内部での熱対流・磁場の振る舞いについて調査する。

4. 研究成果

(1) 数値計算コード開発

R2D2(Radiation and RSST for Deep Dynamics)という数値計算コードを新しく開発した。いくつかの試行錯誤の結果、以下の手法をとることにした。

1. エントロピーの方程式を解く

太陽対流層内部は、熱対流不安定の状態にあるが、ほんのわずかなエントロピーの勾配があるだけである。このわずかなエントロピー勾配を正しく解くことが、今回の研究においては重要であるが、これは全エネルギーの方程式を解いては正しく取り扱うことができない。そこでエントロピーの方程式をエネルギーの方程式として使うことにした。一方、エントロピーの方程式では、太陽表面より上の領域で発生する衝撃波などを正しく取り扱うことができないという懸念があるが、テスト問題についていくつか試したところ太陽で発生する程度の衝撃波であれば、エントロピーの方程式を用いても正しく取り扱うことができることがわかった。

2. 通信なしの輻射輸送方程式

太陽表面を正しく取り扱うためには、太陽表面での輻射(放射)によるエネルギー損失を正しく取り入れる必要がある。当初の計画では、輻射輸送は解かず、近似式を用いて太陽表面を取り扱う予定であったが、実際に数値計算コードを実装したところ、密度擾乱や熱対流速度に 10% 以上の違いが現れることがわかった。そこで、輻射輸送方程式を光球付近で解くこととした。一方で、本研究では、大規模数値計算を目指しているの、なるべく通信の多い手法は避けたい。輻射輸送方程式は光の輸送を解くために本質的に局所的な問題でなく多くの通信を発生させてしまう。そこで、以下のような方策を考えた。水平方向では、光学的厚さのある程度厚いところで、拡散近似を使う。一方、鉛直方向には、光学的厚さが厚くなったところを境界条件として始めれば、多くの場合で通信がなく輻射輸送方程式が解けるということに気づいた。光学的厚さが十分大きければ、輻射強度はその場でのプランク関数と同じになるので、境界条件として問題ないのである。その上で、輻射輸送方程式を数値計算コードの中に実装した。

3. 状態方程式の自動変換

太陽の熱対流においては、太陽の表面付近では、背景場の 10% 程度の大きな擾乱を発生させるが、太陽の深部では 10^{-6} 程度の微小な擾乱のみを発生させる。この二つの大きな差を一つのコードで対応させるのは大きなタスクである。そこで、状態方程式をうまく操作することにした。太陽深部の擾乱の小さいところでは、線形の状態方程式を用いて、表面付近では OPAL から前もって用意する状態方程式を用意するのである。これによって、太陽深部表面どちらでも正確に熱対流による擾乱を解くことができる。

4. 音速抑制法

太陽表面での熱対流速度は 4 km/s 程度であるが、対流層深部では 50 m/s ほどとなる。一方、太陽表面での音速は 10 km/s ほどで、深部では、200 km/s ほどになる。この深部での速い音速が数値計算における時間幅を短く制限してしまう上に、深部においては、速い特性速度により深部での熱対流構造に大きな数値粘性がかかってしまう。この状況に対応するために、音速抑制法を取り入れた。この方法では、連続の方程式を変形することによって、実効的な音速を遅くする。これによって、通信を少なくしながらも時間幅を大きくとることができ大規模な計算が可能になる。

5. アルフベン速度抑制

黒点の再現においては、1000 km/s ほどの非常に速いアルフベン波が発生する。この波による時間幅への制限を回避するために Rempel+2009 で提案されたアルフベン波抑制手法を用いた。この手法と音速抑制法によって、時間幅を大きく取りつつも大規模数値計算を行うことが可能になった。

(2) 太陽全体を包括した熱対流計算

上記のように開発した数値計算コード R2D2 を用いて、世界で初めて太陽対流層を包括した数値計算をおこなった。水平方向には 200 Mm ほどをそれぞれとり、鉛直方向には、対流層の底から表面までの 200 Mm ほどをとった。上部の境界は、光学的厚さが 1 の平均的な面から 700 km ほどの高さの位置にとった。本研究では、太陽光球を取り入れることによって、太陽深部の熱対流がどのように変化するかに焦点を当てた。これまでの研究から、太陽光球を実際に取り入れると太陽深部の熱対流は大きく変わると予想されていた。太陽表面では、非常に効率的な輻射冷却が働き、その結果非常に振幅の大きなエントロピー擾乱が発生する。これが太陽深部に潜っていくと、その場では熱対流不安定でなくても、流れによってエネルギーを太陽の外側方向に運べるようになるというものである。しかし、これまで説明したように太陽深部と表面を同時に解くことは非常に難しくこの研究で初めて可能になった。数値計算の様子を図 1 に示す。表面付近で発生した 1 Mm 程度の非常に小さな熱対流が、深さを増すごとに合体し、最終的に 200 Mm 程度の大スケールの熱対流を構築する様子が捉えられている。この計算と平行して、光球は取り入れないこれまでの計算と同様のものを比較のために実行した。結果を見ると、太陽表面付近では多少の違いはあるものの、太陽深部では光球のあるなしに関わらず熱対流速度は同じとなることがわかった。これは、太陽表面付近の圧力スケール長が非常に短くその結果として、乱流が非常によく攪拌され、太陽表面付近の影響がかなり短い距離のうちになくなってしまふことが原因だと結論づけされた。この成果は、Hotta, Iijima, Kusano, 2019, Science Advances として論文が出版された。

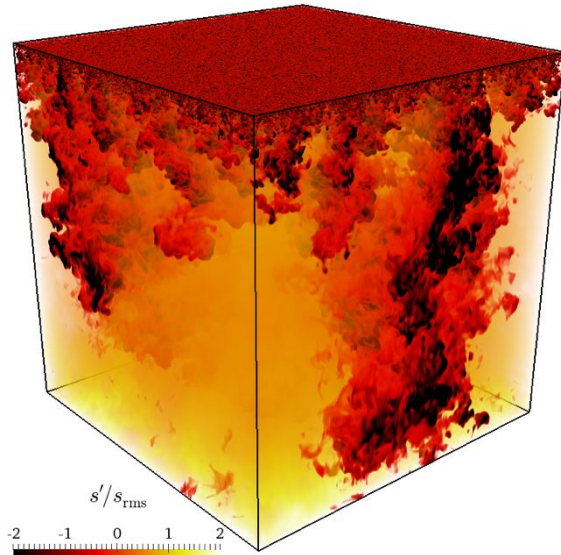


図 2 太陽対流層を包括した世界で初めての数値計算。各高さでの典型的量でエントロピーを規格化した。

t = 22.67 [hour]

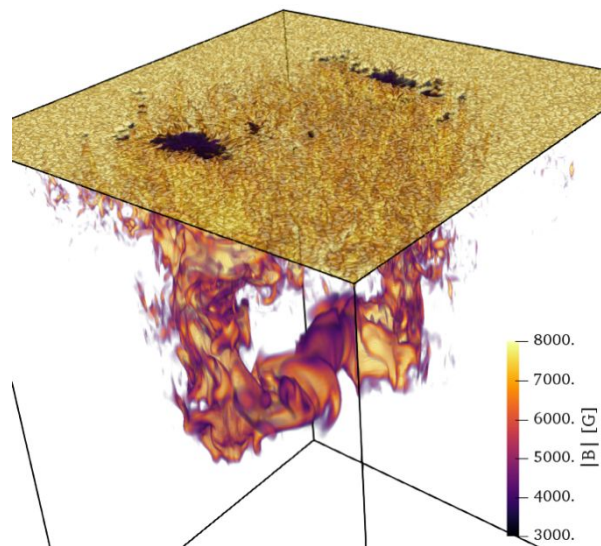


図 2 太陽深部を出発した磁束が表面で黒点を形成するところまでを追った数値計算の結果。黄色のカラースケールで、表面での輻射強度を表し、3D のボリュームレンダリングで、磁場強度を表す。

(3) 太陽深部を出発した磁束の黒点形成

太陽深部から表面までの一貫した数値計算が可能となったので、これを利用して太陽深部を出発した磁束が表面で黒点を形成するところまでを追った。水平方向には 100 Mm ほど、鉛直方向には 140 Mm ほどの計算領域を用意して、その計算結果にいくつかのタイプの磁束を挿入することで、その発展の様子を見た。その結果として以下のことが明らかになった。初期に太陽表面付近に水平な磁束が存在すると、最終的に表面で、黒点を形成するとき必ず黒点同士が衝突してしまうことがわかった。これは、対流層内部で水平な磁束管は安定に存在できずに結果として全て縦磁場になってしまうことが原因である。この問題を解決するためには、対流層のある程度の位置にはトーラスとして、磁束管が存在すべきであると結論づけた。

また、一方でトーラスとして磁束管が存在している場合にも表面で黒点を形成するためには条件があることを明らかにした。それは、深部で黒点の足元が大規模な下降流にあることである。下降流にあることによって、磁場を弱くする発散流を避けることができるほか、縦磁場を効率的に生成することができる。この成果は現在論文を準備中である。

〔雑誌論文〕(計 10 件)

1. H. Hotta, Iijima, H., Kusano, H., 2019, Science Advances, 5, eaau2307, "Weak influence of near-surface layer on solar deep convection zone revealed by comprehensive simulation from base to surface", 査読あり
2. H. Hotta, 2018, ApJ, 860, L24, "Breaking Taylor-Proudman balance by magnetic field in stellar convection zone", 査読あり
3. H. Hotta, 2017, ApJ, 845, 164, "Spatial inhomogeneity of kinetic and magnetic dissipations in thermal convection", 査読あり
4. H. Hotta, 2017, ApJ, 843, 52, "Solar overshoot region and small-scale dynamo with realistic energy flux", 査読あり

〔学会発表〕(計 23 件)

1. Hideyuki Hotta, Flux emergence simulation in a deep domain, Flux emergence workshop 2019, 2019
2. Hideyuki Hotta, Haruhisa Iijima, Kanya Kusano, From solar dynamo to formation of sunspot, MPPC meeting, 2019
3. Hideyuki Hotta, Haruhisa Iijima, Kanya Kusano, First comprehensive calculation of the whole solar convection zone, 2018 SDO Science Workshop, 2018
4. Hideyuki Hotta, Matthias Rempel, Haruhisa Iijima, Kanya Kusano, Takaaki Yokoyama, Solar and stellar convection and dynamo, ITC27 & APPTC2018, 2018
5. Hideyuki Hotta, Matthias Rempel, Haruhisa Iijima, Kanya Kusano, Takaaki Yokoyama, High Resolution Simulations of Solar Convection Zone and Dynamo, AAPPS-DPP2018, 2018
6. Hideyuki Hotta, Matthias Rempel, Haruhisa Iijima, Kanya Kusano, Takaaki Yokoyama, Calculation of solar convection zone with the reduced speed of sound technique, International Astronomical Union, 2018

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。