

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14510

研究課題名（和文）大規模数値シミュレーションを用いた太陽の「熱対流の難問」への挑戦

研究課題名（英文）Challenge for convective conundrum with large-scale numerical simulations

研究代表者

堀田 英之（Hotta, Hideyuki）

千葉大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：10767271

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：太陽の内部構造はこれまでの理論・観測からよく推定されているが、その結果生成される熱対流、さらには差動回転が観測を説明できないことが「熱対流の難問」として知られていた。本研究では、大規模シミュレーションにより、太陽の「熱対流の難問」に挑戦し、差動回転の部分について解決することができた。富岳を用いた計算を実施することにより、太陽内部ではこれまで考えられていたよりも磁場が強いこと、その磁場が角運動量輸送に大きな役割を果たしていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽は活動的な恒星であり、その活動は磁場により維持されている。太陽の磁場活動を理解するためには、太陽内部の乱流構造を理解する必要があるが、これまでは観測と理論に大きな乖離があり、我々の理解を阻んでいた。今回の研究では、太陽内部を50億点以上で分解するような超大規模シミュレーションに挑戦し、その結果観測と理論の乖離を解決することができた。この成果により、今後、太陽活動の根元に迫るような研究が可能になるだろう。

研究成果の概要（英文）：Although the solar internal structure has been well inferred from previous theory and observations, the resulting thermal convection and differential rotation are inconsistent with observations. This discrepancy was known as the 'convection conundrum.' In this study, large-scale simulations were used to challenge the 'convection conundrum,' and we succeeded in solving the differential rotation aspect. By carrying out calculations using Fugaku, it was revealed that the magnetic field is stronger in the solar interior than previously thought and that this field plays a major role in angular momentum transport.

研究分野：太陽物理学

キーワード：ダイナモ 熱対流 乱流

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽はその中心で核融合によりエネルギーを生成し続けており、半径の70%までは、光の輻射により、それより外側では熱対流によってエネルギーを輸送している。太陽の大きなサイズ、小さな粘性により、この熱対流は非常に高度な乱流になっている。その結果、この乱流はエネルギー輸送の他に、角運動量輸送や、磁場生成など多くの役割を持っている。

これまでに多くの太陽内部乱流シミュレーションが実施され、その結果が観測と比較されてきたが、乱流の結実である差動回転がシミュレーションと観測で大きく乖離してしまうことが知られていた。これまでの理論では、自転の影響を受けた乱流的な熱対流が非等方性を持ち、角運動量のある方向に運び、差動回転を形成すると考えられていた。しかし、太陽のように成層などがよく確かめられた系でシミュレーションと観測が整合しないことは大きな問題であり、「熱対流の難問」と呼ばれ、我々の太陽活動理解の大きな障壁となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、富岳を用いた超大規模シミュレーションを実施することにより、この「熱対流の難問」を解決することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、まず富岳上で超大規模シミュレーションを実施するための数値シミュレーションコードのチューニングを実施した。富岳アーキテクチャを意識したチューニングを実施することにより、これまでにない大規模シミュレーションを実施することが可能になった。

数値シミュレーションは、太陽標準モデルの大気成層を背景に用いて、球座標で磁気流体シミュレーションを実施した。

4. 研究成果

これまでにない54億点で太陽対流層を分解するシミュレーションを実施したところ、観測を再現するシミュレーションを実現することができた。その成果は、Hotta & Kusano, 2021, Nature Astronomyとして学術誌に発表するとともに、文部科学省で記者会見を実施した。

さらに翌年には、そのシミュレーション結果を丁寧に解析し、物理機構を解明した論文をHotta, Kusano & Shimada, 2022, ApJとして出版した。結果の概要を以下に説明する。

まず、シミュレーションの解像度を大きく上げたことにより、磁場の散逸が抑えられ、小さなスケールの磁場を実現するようになった。その結果、運動エネルギーを超えるような磁気エネルギーを持つ磁場が対流層全体に存在するようになった。ダイナモの過程は、運動が磁場を作る過程であるので磁気エネルギーが運動エネルギーを超えることは直感に反するが、以下のように説明できることがわかった。熱対流のうち、下降流部分に乱流的な磁場が集められて、そこで圧縮的な効果が効くことにより内部エネルギーを間接的に利用して磁場を増幅することができる。太陽深部では、運動エネルギーよりも内部エネルギーが6桁も大きいので、内部エネルギーのほんのわずかの部分でも使うことができれば運動エネルギーを超えるような磁場を実現することができるのだ。

これまでは、太陽内部では乱流による角運動量輸送が支配的と考えられていたが、今回のシミュレーションでは、磁場が支配的な太陽対流層が実現したので、磁場による角運動量輸送が重要になった。今回のシミュレーションでは、小スケールの乱流を実現したことにより、実効的には回転のあまり効いていない系となっていた(専門用語では大きなロスビー数の系と呼ばれる)。その結果、乱流は動径方向内向きに角運動量を運ぶようになり、それは観測される差動回転を実現するには、不利となる。一方、流体の運動方程式を考えるとわかるように乱流による角運動量輸送と磁場によるものは、正負逆符号を持っている。また、磁場の誘導方程式を考えると磁場と速度場は平行になりやすいので、結果として、磁場は動径方向外向きに角運動量を運ぶようになったのである。この結果により、観測を再現するような差動回転を実現することができるようになった。磁場が支配的に角運動量を運ぶというのは全く新しいアイデアであり、太陽内部ダイナミクスのパラダイムシフトと言える。

本シミュレーションではいくつか副次的に重要な結果も得られた。まず、小スケールの乱流によるエネルギー輸送が活発化したことにより、大スケールのエネルギー輸送が大きく抑えられた。これは、「熱対流の難問」の一部である、熱対流そのものの速度と関わる成果である。熱対流の速度はまだ、観測的には確定していないが、今回我々が達成した熱対流速度は、一つの観測

の推定とよく整合するものである。

また、本シミュレーションで再現された物理状況が達成されれば、対流層の底では極に向かう子午面流が達成されるべきであることもわかった。この流れも観測的にはまだ収束した結果が得られていないが、我々の結果は一つの観測結果とは整合するものである。

今後、これらの観測を確定させるとともにシミュレーションとよく比較することが重要となるであろう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hotta H., Kusano K., Shimada R.	4. 巻 933
2. 論文標題 Generation of Solar-like Differential Rotation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 199 ~ 199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shimada Ryota, Hotta Hideyuki, Yokoyama Takaaki	4. 巻 935
2. 論文標題 Mean-field Analysis on Large-scale Magnetic Fields at High Reynolds Numbers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 55 ~ 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7e43	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kaneko Takafumi, Hotta Hideyuki, Toriumi Shin, Kusano Kanya	4. 巻 517
2. 論文標題 Impact of subsurface convective flows on the formation of sunspot magnetic field and energy build-up	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2775 ~ 2786
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2635	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mori K, Hotta H	4. 巻 519
2. 論文標題 Investigation of the dependence of angular momentum transport on spatial scales for construction of differential rotation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3091 ~ 3097
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac3804	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hotta H., Kusano K.	4. 巻 5
2. 論文標題 Solar differential rotation reproduced with high-resolution simulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 1100 ~ 1102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-021-01459-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyahara Hiroko, Tokanai Fuyuki, Moriya Toru, Takeyama Mirei, Sakurai Hirohisa, Ohyama Motonari, Horiuchi Kazuho, Hotta Hideyuki	4. 巻 49
2. 論文標題 Recurrent Large Scale Solar Proton Events Before the Onset of the Wolf Grand Solar Minimum	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2021GL097201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahata K, Hotta H, Iida Y, Oba T	4. 巻 503
2. 論文標題 Relationship between magnetic field properties and statistical flow using numerical simulation and magnetic feature tracking on solar photosphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3610 ~ 3616
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab710	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyahara Hiroko, Tokanai Fuyuki, Moriya Toru, Takeyama Mirei, Sakurai Hirohisa, Horiuchi Kazuho, Hotta Hideyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Gradual onset of the Maunder Minimum revealed by high-precision carbon-14 analyses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-84830-5	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kusano Kanya, et al.,	4. 巻 73
2. 論文標題 PSTEP: project for solar terrestrial environment prediction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-021-01486-1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hotta H, Toriumi S	4. 巻 498
2. 論文標題 Formation of superstrong horizontal magnetic field in delta-type sunspot in radiation magnetohydrodynamic simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2925 ~ 2935
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa2529	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahata K, Hotta H, Iida Y, Oba T	4. 巻 503
2. 論文標題 Relationship between magnetic field properties and statistical flow using numerical simulation and magnetic feature tracking on solar photosphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 3610 ~ 3616
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab710	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyahara Hiroko, Tokanai Fuyuki, Moriya Toru, Takeyama Mirei, Sakurai Hirohisa, Horiuchi Kazuho, Hotta Hideyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Gradual onset of the Maunder Minimum revealed by high-precision carbon-14 analyses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-84830-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計15件(うち招待講演 8件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Hideyuki Hotta
2. 発表標題 Current and next-generation simulations in solar physics
3. 学会等名 The 5th ISEE Symposium (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideyuki Hotta
2. 発表標題 Solar interior dynamics: Convection and Magnetic field
3. 学会等名 APPC15 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideyuki Hotta
2. 発表標題 Solar differential rotation reproduced with high resolution magnetohydrodynamic simulations
3. 学会等名 ICNSP2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideyuki Hotta
2. 発表標題 Generation of the solar magnetic field
3. 学会等名 IAU GA 372 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀田英之
2. 発表標題 対流層の底から光球までの浮上磁場シミュレーション:黒点对の非対称性生成の要因について
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堀田英之
2. 発表標題 大規模シミュレーションで解明した「反太陽型の差動回転は存在しない」可能性
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀田英之
2. 発表標題 超高解像度計算による太陽の表面勾配層、表面極向き子午面流、赤道加速の再現
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Hotta
2. 発表標題 Numerical simulation of solar convection zone and magnetic field
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Hotta
2. 発表標題 High resolution simulation of solar convection zone in Fugaku
3. 学会等名 AAPPS-DPP2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Hotta
2. 発表標題 Radiation Magnetohydrodynamics Simulations of Sunspot Formation with Influence of Deep Thermal Convection
3. 学会等名 AOGS (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Hotta
2. 発表標題 Successful reproduction of solar differential rotation in high-resolution calculation
3. 学会等名 SPD meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Hotta
2. 発表標題 Correct reproduction of solar differential rotation in high-resolution simulation with Fugaku
3. 学会等名 JpGU Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀田英之
2. 発表標題 富岳で実現する太陽の超大規模数値シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀田英之
2. 発表標題 差動回転の自転速度・解像度への依存性の調査
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideyuki Hotta
2. 発表標題 A calculation for the formation of sunspots in an unprecedentedly deep domain
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------