

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01124

研究課題名（和文）恒星コロナ進化の理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical studies on evolution of stellar coronae

研究代表者

横山 央明（Yokoyama, Takaaki）

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：00311184

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：恒星全球ダイナモ計算について、回転影響下での太陽内部磁気熱対流の大規模高解像度計算を実行し、これまで誰も成しえなかった太陽差動回転を再現することに成功した（堀田・草野）。太陽表層から30太陽半径までについて、コロナ加熱・太陽風加速を物理整合的に解く大規模計算を世界で初めて実施した（飯島・堀田ら）。高解像度計算を行い、磁気トルネード構造形成で太陽大気中での磁気エネルギー輸送が数割増しとなることを示し星コロナループ加熱に成功した（国吉・横山・飯島ら）。黒点形成の大規模パラメータサーベイを実施し、太陽内部下降流と表面磁気エネルギー蓄積の関連を明らかにした（金子・堀田・鳥海・草野ら）。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義は、星コロナの磁気ループ描像を、物理的整合性がある第一原理計算に基づく統合モデルとして発展させたことにある。星の差動回転、星コロナ形成について、ad hocな仮定を最小にとどめた大規模数値計算を実行することで、小質量星とその惑星環境のX線紫外線環境について理論的にロバストなモデルを構築し、恒星進化と惑星系進化の理解に貢献したといえる。

研究成果の概要（英文）：Regarding stellar dynamo, we carried out large-scale, high-resolution calculations of the Sun's internal magnetothermal convection under the influence of rotation, and succeeded in reproducing the solar differential rotation, which no one had been able to achieve before (Hotta, Kusano). We conducted, for the first time, large-scale calculations to solve coronal heating and solar wind acceleration in a physically consistent manner from the solar surface to 30 solar radii (Iijima, Hotta et al.). Through high-resolution calculations, we showed that the formation of a magnetic tornado structure increases the magnetic energy transport in the solar atmosphere by several times, and succeeded in heating the stellar coronal loop (Kuniyoshi, Yokoyama, Iijima et al.). We conducted a large-scale parametric survey of sunspot formation and clarified the relationship between the solar internal downdraft and surface magnetic energy accumulation (Kaneko, Hotta, Toriumi, Kusano et al.).

研究分野：天文学

キーワード：太陽 恒星 プラズマ 磁気流体

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ハッブル宇宙望遠鏡・チャンドラ X 線天文衛星やケプラー衛星により、恒星物理学がこの 10 年で大きく進展してきた。膨大な恒星観測が行われ、星震学による解析も進んだことで小質量星についての情報が増えた。例えば、星進化段階が若く、自転が速い(ロスビー数 = 自転周期/熱対流時間が小さい)ほど X 線が明るくなるが、ある値より自転が速くなっても X 線は頭打ちになることや(図 1: Wright+ 2011, ApJ, 743, 48) 太陽のような半球対流の星と全球対流の M 型星とが同じ線上に乗ること(Wright & Drake 2016, Nature, 535, 526)などの興味深い関係がわかってきた。

いっぽうで、最近 30 年ほどの宇宙空間からの観測により、太陽物理学も大きく進展した。たとえば「ひので」衛星やロケット実験の高空間・時間解像度撮像により、表面对流のスペクトルや、コロナ中の磁気波動や小フレアの微小構造が捉えられ、コロナ加熱についての観測的理解が進んだ(例えば Klimchuk 2015, RSTA, 373, 20140256)。さらには、光球面での微細分光偏光観測により爆発現象へとつながる磁場構造の研究がすすんだ(例えば Toriumi & Wang 2019, LRSP, 16, 3)。

並行して、太陽数値シミュレーションによる大きな進展もあった。これまでアドホックにパラメタライズされてきた、太陽内部熱対流の乱流を解像できるようになり、11 年周期にかかわる角運動量・磁束輸送に小スケールダイナモが重要な役割を果たすことがわかってきた(Hotta+ 2016, Science, 351, 1427)。

フレア予測研究では、観測で直接は得られない 3 次元コロナ磁場を非線形フォースフリーモデルにより再現された磁場を使って、フレア規模を推定するスキームが提案された(Kusano+ 2020, Science, 369, 587)。またフレアアクティブな活動領域を形作る複雑な磁場分布の再現が、対流層内部から表面熱対流、さらに上空の熱力学まで輻射輸送を含めた統合的なモデルで可能になってきた(Iijima & Yokoyama 2017, ApJ, 848, 38)。このように太陽の観測結果を、物理に基づく第一原理計算で再現できる段階に入ってきた。

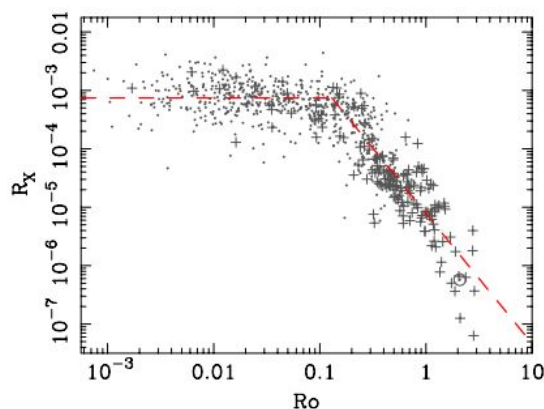


図 1 恒星の X 線光度(縦軸)対ロスビー数(横軸、自転周期/熱対流時間)(Wright+ 2011)

2. 研究の目的

1. で述べたように、恒星については、理論的には未解明な観測データが蓄積してきたいっぽう、太陽研究では第一原理計算による理論アプローチが成熟してきた。本研究では、太陽で得られた知見を活かし、恒星が形成するコロナの磁気プラズマ・X 線紫外線放射をさぐる。系外惑星はその生命存在可能性の観点でひろく議論されるが、その検討要素として惑星をとりまくプラズマ環境や、その母星が及ぼす可視光以外の電磁波環境も重要である。母星の磁気活動によりコロナが形作られることで紫外線や X 線が放射されるがそれは例えば光電離に伴う流失など惑星大気環境進化に物理的・化学的影響をおよぼす。また突発的なフレアはときに、スーパーフレアと呼ばれるような極端に強い宇宙線擾乱により生命環境に影響を及ぼす。

以上のような背景をふまえて、本研究課題で設定する学術的「問い」は、『(太陽質量以下の)小質量恒星の、スペクトル型・年齢・進化段階に対応した特徴量(質量・回転・年齢)が与えられたとき、そのコロナの磁気プラズマ活動(黒点形成・爆発現象)と X 線紫外線放射がいかなる様相を示すのか』とした。

3. 研究の方法

全球ダイナモ計算では、まず太陽質量・太陽回転のもとでの差動回転の実現をめざし、堀田が開発した R2D2 コードを用いて理研富岳上で大規模数値計算を実行した。次に、星の質量を太陽質量の 8%程度から太陽質量まで 4 ケースほど、自転速度をロスビー数に直して 0.03 から 3 程度までの 5 ケースほどの合計 20 ケースを網羅的に調査し、恒星質量、自転を変えた時の太陽全球の磁場分布を明らかにした。そして、上記の計算の中でまとまった形で上部境界に浮上してくる磁束を計測し、実際に恒星表面で黒点となりうる候補を探る。そのために、全球計算をいくつか切り出し、表面を含んだ短時間計算を行う(Hotta+ 2019, Sci. Adv., 5, eaau2307)。実際に黒点となる浮上磁束の特徴を確認したら、それぞれのパラメータでどの程度、表面で黒点が形成されるかを明らかにした。また、太陽内部の対流と太陽表面に蓄積される磁気エネルギー(フレアのエネルギー源)の関係を解明するために、黒点形成シミュレーションの大規模パラメータサーベ

イも実施した。計算領域は超粒状斑サイズの局所領域とし、対流速度場に対する磁束管の位置を系統的に変えて 93 例のシミュレーションを実施した。結果を統計的に解析した結果、対流層内部の大規模な下降流が、太陽表面のエネルギー蓄積に寄与していることが分かった。

また星コロナ形成計算では、構成する基本単位であるコロナループについて、表面熱対流を含めた自己整合的なモデルで計算した。また X 線紫外線放射強度を求めた。計算には、飯島が作成した RAMENS コードを使用した。惑星間空間にひらいた磁力線に沿った計算では、太陽風の実現もめざした。表面对流層から約 30 太陽半径までの大きな計算領域を用意し、その中でエネルギー発生・伝達・散逸までを自己整合的に解いた。この課題は飯島・堀田らが担当した。閉じた磁気ループについては、デカルト座標の直方体を使ってコロナ磁気ループを模し、その両端が星の表面に刺さっているとした。実際の磁気ループは円弧状になっているものを直線に引き延ばしたようなかっこうで重力もそれに応じて正弦関数的に与えた。両端には粒状斑・超粒状斑を再現するよう輻射磁気流体方程式を解き、磁力線への擾乱注入を自己整合的に与えた。この課題は研究協力者の国吉秀鷹（大学院生）が横山・飯島とともに担当した。

4. 研究成果

本研究計画の 1 年目である 2021 年度には、恒星全球ダイナモ計算について、大きな進展があった。研究分担者の堀田・草野は、回転影響下での太陽内部磁気熱対流の大規模高解像度計算を実行し、これまで誰も成しえなかった太陽差動回転を再現することに成功した。成果は Nature Astronomy 誌で出版された。星コロナ形成については、研究代表者の横山が協力者の Wang、Zhou らとともに、研究分担者の飯島が開発した RAMENS コードを用いて、太陽表層大気からコロナまでを網羅する計算を行い、コロナへのエネルギー輸送と深い関係がある彩層でのダイナミクスで成果を得て、論文出版・学会発表を行った。飯島は、RAMENS コードについて、コロナからの熱伝導の取扱いを改良し論文出版するとともに、堀田らと太陽表層の熱対流からコロナ・太陽風までをカバーする包括的 3 次元シミュレーションを実行し学会発表を行った。突発的エネルギー解放現象については、研究分担者の金子・草野らが、データ駆動型シミュレーションを実施して学会発表をおこなった。

本研究計画の 2 年目である 2022 年度には、恒星全球ダイナモ計算について、前年度に大きな進展があった。堀田・草野らが、太陽差動回転再現計算について、さらに詳しい解析を進めた。高解像度計算により初めて解像された小スケール磁場による Maxwell 応力の影響が差動回転維持に本質的であることを明確にした。研究協力者の森と堀田とは、全球計算のデータを用いて角運動量輸送の空間スケール依存性を差動回転維持の観点で詳しく調べた。その結果、対流層厚み程度の相対的に大きなスケールの半径外向き角運動量輸送が重要な役割を果たしていることが判明した。また研究協力者の鳥田と堀田・横山は、堀田らの高解像度計算を平均場モデルの観点で解析し、乱流磁気拡散の解像度依存性を明らかにした。また、金子・堀田・鳥海・草野らが、R2D2 を用いて黒点形成シミュレーションの大規模パラメータサーベイを実施し、太陽内部の大きなスケールの下降流と太陽表面の磁気エネルギーの蓄積に関連があることを明らかにした。これらの結果については全て査読論文として出版し、学会・研究会発表を行った。またフレア形成に関連して、草野が太陽地球環境予測についての書籍を編集した。いくつかの章では、草野・堀田が執筆者として参加している。これとは別に、横山は共著者らとともに、宇宙電磁流体力学についての教科書を執筆出版した。

本研究計画の最終年 3 年目である 2023 年度の成果は次のようなものであった。飯島・堀田らは、飯島が開発した輻射電磁流体コードを拡張し、太陽表層から 30 太陽半径までを計算領域とする、コロナ加熱・太陽風加速を物理統合的に解く大規模計算を世界で初めて実施した。低層大気における閉じた磁気ループと、太陽風の流路となる開いた磁力線との間の相互作用（磁気リコネクション）が加熱・加速に大きな割合を占めていることを実証した。また研究協力者の国吉と、横山・飯島らがコロナ形成について、RAMENS を用いて高解像度計算を行い、磁気トルネード構造が形成されることで太陽大気中での磁気エネルギー輸送が局所的に数割増しとなることを示した。これまでに観測された出現頻度を加味すると、エネルギー輸送の半分程度を磁気トルネードが担っていることが示唆される。フレア研究では、突発イベントのエネルギー源となる、活動領域磁束浮上に関連して、堀田・草野が共同研究者の鳥海と、堀田が開発した R2D2 コードを用いて、対流層内部での磁束ヘリシティ形成を大規模計算で調べた。対流層内部では初期ねじれない磁束管はほどけてしまい浮上できないという従来の認識を覆し、熱対流との相互作用でねじれを獲得することで表層まで現れることを明らかにした。また、堀田は恒星内部自転について、総説論文を出版した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wang Yikang, Yokoyama Takaaki, Iijima Haruhisa	4. 巻 916
2. 論文標題 Fast Magnetic Wave Could Heat the Solar Low-beta Chromosphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L10 ~ L10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac10c7	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 Iijima Haruhisa, Imada Shinsuke	4. 巻 917
2. 論文標題 A New Broadening Technique of the Numerically Unresolved Solar Transition Region and Its Effect on the Spectroscopic Synthesis Using Coronal Approximation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 65 ~ 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac07a5	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 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 e2021GL097201
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 堀田英之, 鳶田遼太, 草野完也, 横山央明
2. 発表標題 赤道加速を達成した超高解像度計算の解析結果
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鳶田遼太, 堀田英之, 横山央明
2. 発表標題 高磁気レイノルズ数での大規模磁場の成因に関する解析
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子岳史, 草野完也, 堀田英之, 鳥海森
2. 発表標題 太陽内部対流が黒点形成・進化へ与える影響
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯島陽久
2. 発表標題 離散的にエネルギー方程式の整合性を保つ頑健な磁気流体解法の提案
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤芳穂, 草野完也
2. 発表標題 太陽フレアの経験予測と物理予測の比較
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yeongmin Kang, Takafumi Kaneko, Kanya Kusano
2. 発表標題 Data-driven MHD Simulation of Solar Active Region NOAA 11283
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 飯島陽久, 今田晋亮
2. 発表標題 数値的に解像できない遷移層への対処法と分光観測量への影響
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鄭祥子, 横山央明, 烏海森, 原弘久, 今田晋亮, 大場崇義
2. 発表標題 Solar-C (EUVST) に向けたEUV スペクトル線仮想分光観測
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 国吉秀鷹, 横山央明, 飯島陽久
2. 発表標題 粒状斑間隙からのエネルギー発生を考慮したコロナループの輻射流体シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Haruhisa Iijima
2. 発表標題 A numerical treatment for the unresolved transition region in the solar atmosphere
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀田英之, 草野完也
2. 発表標題 赤道加速・表面勾配層・極向き子午面還流を再現した大規模数値シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯島陽久, 松本琢磨, 堀田英之, 今田晋亮
2. 発表標題 対流層からコロナ・太陽風までの包括的3次元輻射磁気流体シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ZHOU, Xinyu; YOKOYAMA, Takaaki; IIJIMA, Haruhisa; TORIUMI, Shin; MATSUMOTO, Takuma; KATSUKAWA, Yukio; KUBO, Masahito
2. 発表標題 Ca II 8542A synthetic Stokes profile on chromospheric reconnection events in 2D RMHD simulation of solar active region
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鳶田遼太, 堀田英之, 横山央明
2. 発表標題 高磁気レイノルズ数での大規模磁場誘導と極性反転に関する解析
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子岳史, 草野完也
2. 発表標題 活動領域12887で発生したXクラスフレアの観測データ駆動型磁気流体シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yeongmin Kang, Takafumi Kaneko, Kanya Kusano
2. 発表標題 Data-driven MHD Simulation of Long-term Temporal Evolution of AR 11283
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hideyuki 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, Plenary talk (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideyuki 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 Hideyuki Hotta, Kanya Kusano
2. 発表標題 Correct reproduction of solar differential rotation in high-resolution simulation with Fugaku
3. 学会等名 JpGU (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究分担者	堀田 英之 (Hotta Hideyuki) (10767271)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	草野 完也 (Kusano Kanya) (70183796)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授 (13901)	
研究分担者	飯島 陽久 (Iijima Haruhisa) (90783952)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任助教 (13901)	
研究分担者	金子 岳史 (Kaneko Takafumi) (40838728)	新潟大学・人文社会科学系・講師 (13101)	

	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
研究協力者	鳥海 森 (Toriumi Shin) (30738290)	宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授 (82645)	
研究協力者	国吉 秀鷹 (Kuniyoshi Hidetaka) (12601)	東京大学・大学院理学系研究科・博士課程大学院生 (12601)	

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
---------	---------