

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：13902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17611

研究課題名(和文) 相補的磁気流体モデリングで迫る太陽黒点の起源

研究課題名(英文) The Origin of Sunspot: Exploration by Local and Global MHD Numerical Models

研究代表者

政田 洋平 (MASADA, YOUHEI)

愛知教育大学・教育学部・講師

研究者番号：30590608

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：太陽の活動性の源は黒点に蓄えた磁気エネルギーである。しかし、太陽内部における黒点の形成機構は解明されておらず、太陽物理学における最大の未解決問題と言われる。本研究では太陽黒点の起源の解明を目指し、大規模MHDシミュレーションで、熱対流による非線形磁場増幅過程(ダイナモ過程)を調べた。その結果、「熱対流による大局的な磁場形成」から、「対流層表面での黒点状磁場の自発的組織化」までを、自己無撞着なMHDモデルで一貫して計算することに世界で初めて成功した。また、磁気熱対流の系の回転率に対する依存性を調べた結果、回転率がある臨界値を超えると、ダイナモが励起され磁束集中構造の形成も起きることがわかった。

研究成果の概要(英文)：A longstanding goal of solar interior physics is to self-consistently reproduce sunspots from magnetic fluxes generated in the solar interior. However, there is still a large gap between the dynamo theory in the interior and the active region formation theory at the surface. For bridging the gap between them, we conducted in this study a convective dynamo simulation in a strongly stratified atmosphere resembling the solar interior in Cartesian geometry. In addition to the large-scale dynamo which has physical properties similar to those in earlier weakly-stratified convective dynamo simulations (Masada & Sano 2014a,b), we found that large-scale structures of the vertical magnetic field are spontaneously organized in the convection zone surface only in cases with a strongly-stratified atmosphere (Masada & Sano 2016, ApJL). Additionally, we found the critical Rossby-number for successful large-scale dynamo is around $Ro = 0.03$ (Masada & Sano 2018 in prep.).

研究分野：天体物理学

キーワード：太陽 ダイナモ 電磁流体力学 天文学 流体力学

1. 研究開始当初の背景

太陽物理学の最重要課題が、黒点の起源、すなわち太陽ダイナモ機構の解明である。黒点の時空間進化が、約11年周期の蝶形パターンを示すことは良く知られている。しかし、黒点形成過程を首尾一貫して記述する理論は未だ確立されていない。近年、現太陽活動サイクル(サイクル23)の磁気活動の異常が相次いで報告されているが、標準ダイナモ理論ではその定性的な原因すら説明できない。太陽活動の中長期変動を理解し、その影響を受ける地球気候の未来を予測するために、ダイナモ機構の解明は急務である。

太陽内部は激しい乱流に支配された対流層と、大局の流れに支配された静穏な対流安定層からなる。太陽ダイナモの標準モデルでは、激しい対流は磁場の秩序構造を壊す要因だとみなされており、黒点は静穏な対流安定層で形成されると考えられてきた。しかし、標準モデルの枠組みだけでは説明できない近年の太陽活動の異常を契機に、現在世界中でその見直しの機運が高まりつつある。

我々は本課題を提案する前段階のシミュレーション研究で、標準モデルの枠組みに見直しを迫る以下の2つの成果を得た。

- (1) 激しい乱流をとまなう対流層で周期的極性反転をとまなう大局磁場が組織化されることを発見 (Masada & Sano 2014a)
- (2) 大局磁場の組織化の原因が、回転が誘起する対称性の破れとそれに起因した実効的な乱流起電力にあることを定量的に証明 (Masada & Sano 2014b)

これらの成果は、従来は磁場の秩序構造を乱す要因と考えられてきた対流が、実は黒点形成そのものを担っている可能性があることを強く示唆するものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、太陽黒点の起源に迫ることである。太陽ダイナモ標準モデルの根幹を担う『対流は磁場の組織化の阻害要因』という前提を見直し、対流が担う乱流起電力と対流中での磁場の自発的組織化過程に注目する。物理素過程の理解に根ざした独自の**太陽磁気流体計算モデルで世界初の『対流層での黒点形成』を実現**し、観測結果との定量比較から真の黒点形成領域に迫る。太陽ダイナモ理論を再構築し、太陽活動の長期変動とその影響を受ける地球環境の共進化を理解するための強固な土台を築くことが、本研究の最終目標である。

3. 研究の方法

既存の太陽全球計算モデルで、黒点形成を実現できた例は存在しない(e.g., Ghizaru et al. 2010; Kapyla et al. 2012; Masada et al. 2013)。これは①乱流の分解が不十分で

乱流ダイナモ効果が小さいこと、②太陽のような恒星の内部を特徴づける「強い密度成層」が実装されていないこと、が原因だと考えられる。①と②を克服するために、まず広範なパラメータサーベイが可能なボックス型の磁気流体ダイナモモデルを使って、『黒点の形成条件』を定量的に明らかにする。ダイナモ素過程の理解を還元し、現実的な乱流モデルを構築、太陽全球計算に実装することで、対流層での黒点形成を実現する。

4. 研究成果

本研究の主な成果を以下の①-③にまとめる。

①まずMasada & Sano (2016, ApJL)では、太陽内部のような強い密度成層を課した場合に、対流層において黒点状磁場が自発的に形成されることを世界で初めて発見した。

基礎方程式は回転系での圧縮性MHD方程式である。図1にこの研究で用いた強密度成層MHD熱対流のシミュレーションモデルを示す。

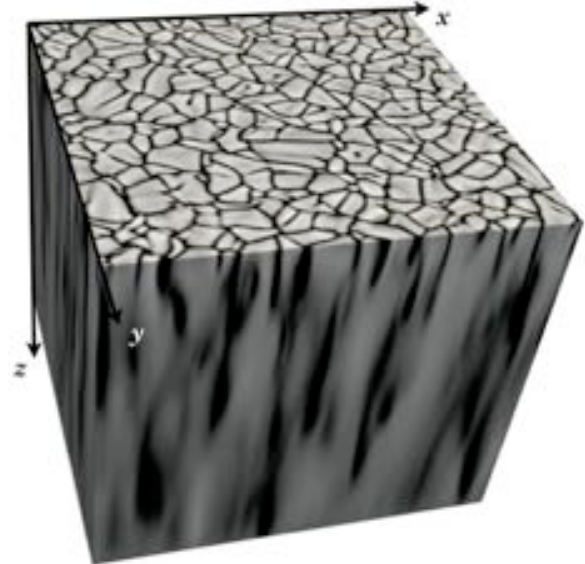


図1. ボックス型MHD対流シミュレーションモデル

密度成層構造は、太陽対流層の97%に相当する半径 $0.7R_{\text{Sun}}$ から $0.99R_{\text{Sun}}$ の領域を、ポリトロップ指数 $m=1.49$ のポリトロップ大気で模擬する。この時の上下の密度比はおおよそ700である。密度プロファイルを図2に示す。実線が本研究モデルの密度構造であり、一点鎖線が現実の太陽の内部構造 (Standard-Solar Model: Christansen-Dalgaard+1996) である。

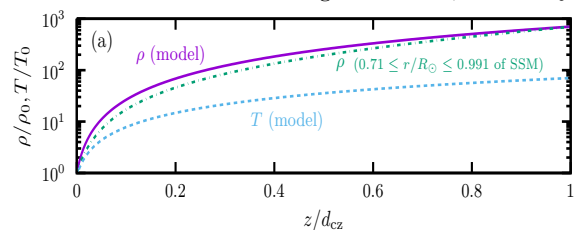


図2. 計算モデルの密度プロファイル

速度の境界条件は対流層の上下とも応力無し境界条件、磁場の境界条件として、底部は完全導体条件を、表面では垂直磁場条件を採用している。水平方向には全ての物理量に周期境界条件を課す。また対流を駆動するために、対流層の底から一定の割合でエネルギーフラックスを流入させ、対流層表面では温度を一定に保つような境界条件を課す。このような系では表面境界を介し、熱と磁気ヘリシティが系外へ流出する。

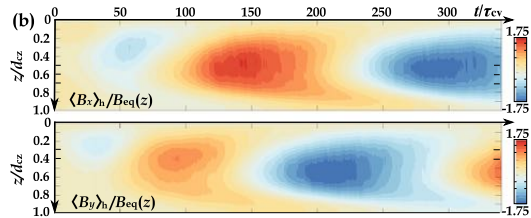


図3. 大局磁場の時空間進化 (深さ-時間図)

本研究で得た主な成果を図3と図4に示す。図3は大局的磁場の時空間進化図(縦軸は深さ、横軸は時間、上パネルがBx成分、下パネルがBy成分に対応)である。このプロットでは磁場に対し水平平均(xy平均)をとっているため乱流磁場成分は均されておられ、平均場のみが残されている。

図3より、対流層全体で周期的振動をともなう大局的磁場が生成されていることがわかる。対流層で生成された磁場はダイナモ波として対流層の上下に伝搬する。このようなダイナモの性質は、我々の以前の研究(弱密度成層モデルにおける対流ダイナモ: Masada & Sano 2014a, b)でも見られたものであり、密度成層の強弱に依らず「乱流起電力が担うダイナモ」が磁場生成に寄与していることを示している。

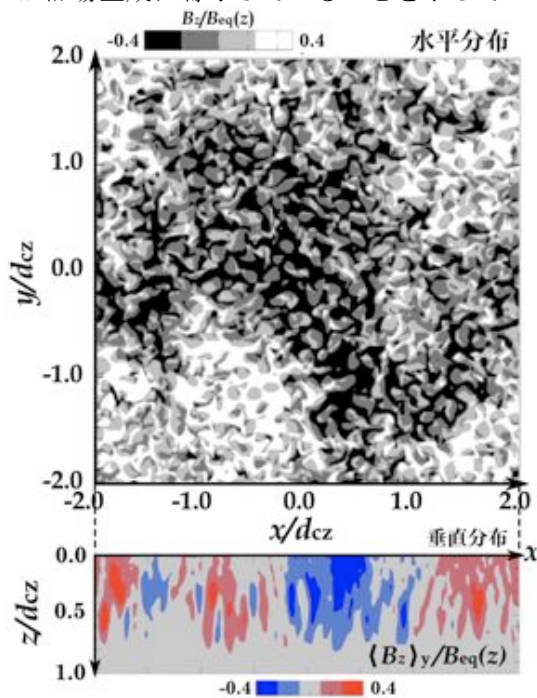


図4. 垂直磁場のスナップショット

一方、本研究で行った強密度成層MHD対流シミュレーションに特有の現象が、垂直磁場(重力に平行な成分)の組織化である。図4に示したのが、磁場の垂直成分の水平分布と深さ分布である(スナップショットデータ)。強密度成層下では、対流ダイナモによって生成された磁束が、対流層表面付近で自発的に黒点状のスポット構造に組織化することを発見した(弱密度成層下ではこのような磁束集中は起きない)。形成された磁気スポットは対流セルよりも遥かに大きな空間スケールを持ち、強度もダイナモ生成磁束と同程度である。対流ダイナモによる磁束の生成から、対流層表面での黒点様のスポット状磁場構造の形成までを首尾一貫して再現した例はこれまで存在しておらず、本研究の成果は太陽ダイナモ機構の理解の進展にとって大きなインパクトを与えると期待される。

②Masada & Sano (2016, ApJL)では、fiducialなモデルにフォーカスしてそのダイナモの特性を調べたが、Masada & Sano (2018)ではこのような表面磁場構造の自発的組織化をともなうダイナモの成否が、ロスビー数(Ro数)によってコントロールされることを見出すことにも成功している(ロスビー数は慣性力とコリオリ力の比に対応する無次元量)。

図5はRo数の異なる4つのモデルの磁場の時空間進化図であり、(a), (b), (c), (d)の順に系のロスビー数が小さくなっている。この図からわかるように、ロスビー数が大きなモデル((a)と(b))では大局的磁場は維持できず乱流磁場が支配的になる。一方、ロスビー数が小さなモデル((c)と(d))では、周期的な振動をともなう大局的磁場が生成される。いずれのモデルでも対流層表面には磁束集中構造が出現されることもわかっており、この結果は、強い密度成層が表面磁束集中構造の形成の鍵であることを強く示唆する。臨界Ro数

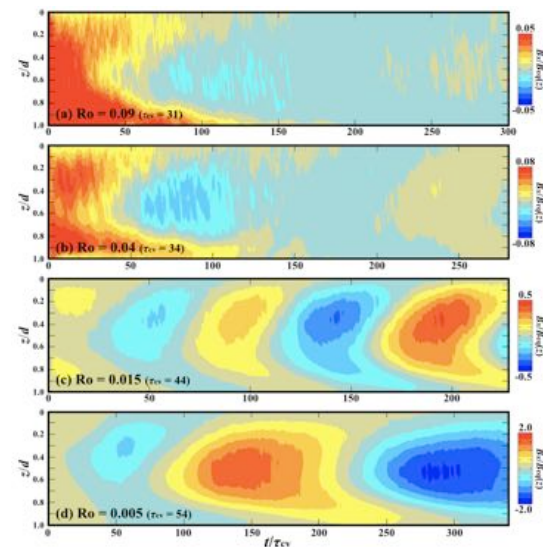


図5. Ro数が異なるモデルの磁場の時空間進化

はおおよそ $Ro_{crit} = 0.03$ である。

実際の太陽内部のロスビー数がどの程度の値になっているかについては、太陽内部対流の観測が難しい上に、対流に関する理論的な理解も不十分であるため決着がついていない (e. g., Spruit 1997; Hanasoge et al. 2012)。今後は太陽内部の対流についての理解を深め、ロスビー数がどのような値になるかを定量的に決定することがダイナモの理解にとって必要である。これらの成果に関しては現在論文を執筆中である (Masada & Sano 2018 in prep)。

③これらの成果に加え、対流ダイナモに関する国際共同研究も実施した。図6, 7は, Bushby, Kapyla, Masada et al. (2018, A&A)の成果である。この研究では、対流ダイナモのベンチマーク問題を開発し、様々な計算コードでその非線形解を比較した。図6はそれぞれのコードで得たダイナモ生成磁場の時空間進化図である【上が英ニューキャッスル大学のスペクトルコード, 中がNORDITA (スウェーデン)のPENCILコード, 下が我々のGodunovコードの結果に対応】。この比較より、対流ダイナモが普遍的な現象であること、また我々の用いているシミュレーションコードが、磁場の生成・維持を的確に捉えていることがわかる。

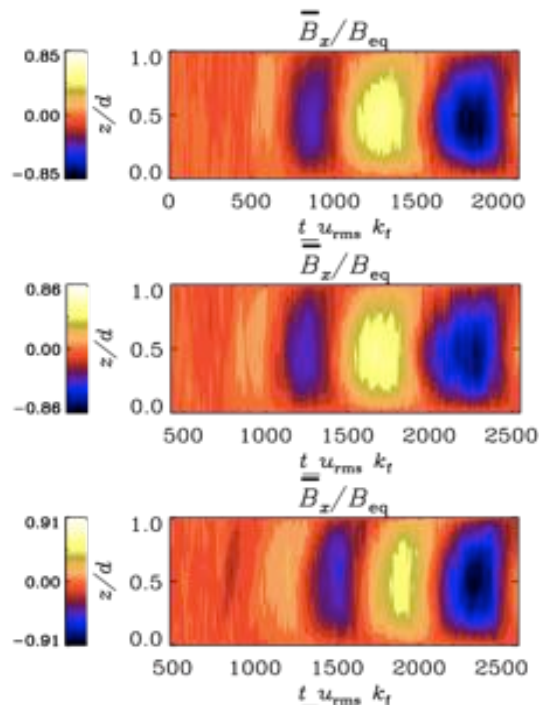


図6. ベンチマーク問題の非線形解の比較

ベンチマークモデルの開発に加え、ダイナモの時間的なモジュレーションがレイリー数に依存することも、この国際共同研究で見出した。図7はレイリー数の異なる2つのモデルにおける体積平均磁場の時間進化である。(a)が低レイリー数のモデル、(b)が高レイリー数

のモデルに対応する。両者の比較からわかるように、レイリー数が大きくなると、磁気活動の中に、太陽活動のマウンダー極小期を想起させる様な大極小期が現れる。太陽内部のレイリー数は極めて大きいと考えられており、本研究は太陽活動の中長期変動の理解にとってもインパクトを及ぼすことが期待される。

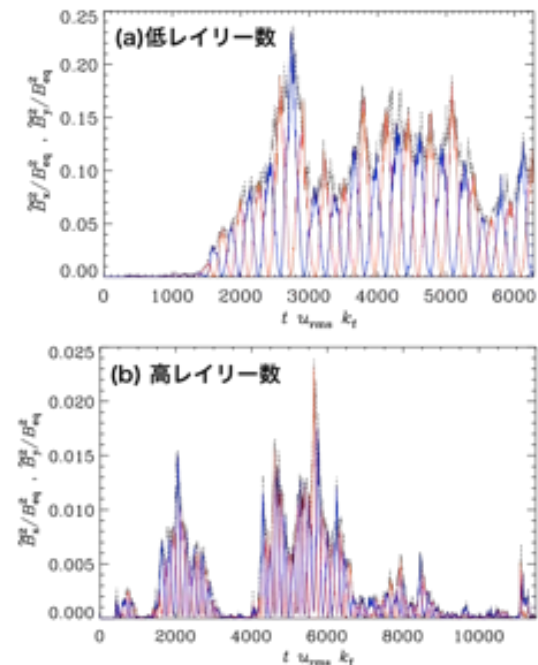


図7. レイリー数の異なるモデルの磁場の時間変動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 5 件)

1. "Large-scale Dynamos in Rapidly-rotating Plane-layer Convection", Bushby, P., Kapyla, P., **Masada, Y.**, Brandenburg, A. et al. (2018), *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 612, id. A97, 16pp. (査読有り)
2. "Spontaneous Formation of Surface Magnetic Structure from Large-scale Dynamo in Strongly-stratified Convection", **Masada, Y.**, & Sano, T. (2016), *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 822, Issue 2, id. L22, 7pp. (査読有り)
3. "Differential Rotation in Magnetized and Non-magnetized Stars", Mabuchi, J., **Masada, Y.**, & Kageyama, A. (2015), *The Astrophysical Journal*, Vol. 806, Issue 1, id. 10, 16 pp. (査読有り)
4. "乱れた熱対流中での乱れない磁場の生成", 天文月報【2015年10月号 (EUREKA)】著: **政田洋平** (査読なし)

5. “太陽ダイナモ機構 - 理解の現状と将来展望 -”, プラズマ核融合学会誌 2015 年 10 月号 (講座 MHD ダイナモ: 流れによる磁場の自発的生成) 著: 政田洋平 (査読なし)

[学会発表] (計 18 件)

[国外]

1. “The Rossby number dependence of large-scale dynamo in solar-like strongly-stratified convection”, Masada, Y. “Helicity Thinkshop 3” (2017) (口頭発表)

2. “Numerical Modeling of Solar and Stellar Dynamos - Current Status and Future Perspectives -”, Masada, Y. “1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics” (2017) (招待講演)

3. “Spontaneous Formation of Surface Magnetic Structure from Dynamo-maintained Magnetic Flux: The Impact of Strong Stratification”, Masada, Y. “Solar and Stellar Dynamos and Magnetic Flux Emergence, COSPAR 2016 (The 41th COSPAR Scientific Assembly)” (2016) (招待講演)

4. “Organization of Coherent Magnetic Fields in Turbulent Thermal Convection” Masada, Y. “NASA LWS Workshop on Solar Dynamo Frontiers: Helioseismology, 3D Modeling, and Data Assimilation” (2015), (招待講演)

[国内]

1. “カイラル電磁流体中でのダイナモとその重力崩壊型超新星爆発への影響”, 政田洋平, 滝脇知也, 固武慶, 山本直希 @ 日本天文学会 2018 春季年会 (2018 年) (口頭発表)

2. “カイラル電磁流体中でのダイナモとそのコンパクト天体への影響”, 政田洋平 @ブラックホール磁気圏研究会 2018 (2018 年) (口頭発表)

3. “熱対流が担う上部対流層での磁場の構造形成”, 政田洋平, 佐野孝好 (大阪大学) @ 日本天文学会 2017 春季年会 (2017 年) (口頭発表)

4. “熱対流ダイナモの励起条件と太陽活動のグランドミニマム期に対する考察”, 政田洋平 @CfCA User’s Meeting 2017 (2017 年) (招待講演)

5. “ダイナモの MHD 数値計算”, 政田洋平 @磁気流体プラズマで探る高エネルギー天体現象研究会 (2017 年) (招待講演)

6. “太陽内部進化と磁気活動”, 政田洋平 @地球型惑星圏環境に関する研究集会 (2016 年) (招待講演)

7. “熱対流中での磁場の構造形成とそのメカニズム”, 政田洋平 @CfCA User’s Meeting 2016 (2016 年) (招待講演)

8. “太陽ダイナモの数値モデリング研究とそのブラックホール降着円盤系への応用・展望”, 政田洋平 @第 9 回ブラックホール磁気圏研究会 (2016 年) (招待講演)

9. “強密度成層が誘起するダイナモ生成磁束の浮上と活動領域の自発的生成”, 政田洋平, 佐野孝好 (大阪大学) @ 日本天文学会 2016 春季年会 (2016 年) (口頭発表)

10. “太陽内部 MHD 熱対流シミュレーションで探る太陽活動のグランドミニマム”, 政田洋平 @理論懇シンポジウム 2015 「宇宙における天体形成から生命まで」 (2015 年) (ポスター発表)

11. “他分野の MHD シミュレーション研究の現状など - 今後の太陽の理論研究へ向けて -”, 政田洋平 @Solar-C 時代 (10-20 年後) の太陽研究検討会 (2015 年) (口頭発表)

12. “強い密度成層下での対流ダイナモと磁気スポット形成の物理”, 政田洋平, 佐野孝好 (大阪大学) @ 日本天文学会 2015 秋季年会 (2015 年) (口頭発表)

13. “強密度成層下での対流ダイナモと磁気活動領域形成の物理”, 政田洋平 @CfCA User’s Meeting 2015 (2015 年) (招待講演)

14. “対流ダイナモの励起条件から探る太陽活動のグランドミニマム”, 政田洋平 @第 5 回極端宇宙天気研究会 (2015 年) (招待講演)

[その他]

ホームページ等

<http://www.phyas.aichi-edu.ac.jp/~ymasada/id-3.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者: 政田 洋平

(MASADA, Youhei)

愛知教育大学・教育学部・講師

研究者番号: 30590608