

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740125

研究課題名(和文) 太陽活動の長期予報の実現へ向けた太陽タコクライン層の基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental Study on the Solar Tachocline towards the Long-range Forecast of the Solar Activity

研究代表者

政田 洋平 (MASADA, Youhei)

神戸大学・その他の研究科・助教

研究者番号：30590608

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：フレアやコロナ質量放出等の太陽活動の源は、太陽黒点が蓄える巨大な磁気エネルギーである。本研究では、太陽黒点(=大局的磁場)の生成機構、すなわち太陽ダイナモ機構に対するタコクライン層の影響を、スーパーコンピュータを使った大規模シミュレーションで定量的に調べた。その結果、1. タコクライン層は大局的磁場の生成にとって本質的な役割を果たさないこと、2. 対流層におけるらせん状の対流が大局的磁場の組織化を担うこと、3. 対流による大局的磁場生成は乱流起電力(具体的には乱流効果)で定量的に説明できること、4. 磁気ヘリシティの損失が磁場の極性反転と空間マイグレーションの鍵であること、を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The origin of solar activities, such as flares and coronal-mass ejections, is the enormous magnetic energy stored in sunspots (= large-scale magnetic fields). In this research, we studied quantitatively the role of the tachocline, where is the thin interface region between the convective and radiative layers, in the solar dynamo mechanism by means of numerical simulations on state-of-the-art supercomputers. Our findings in this study are briefly summarized as follows: (1) the tachocline does not necessarily have a direct role in generating large-scale magnetic fields in the solar interior, (2) helical convective motions would rather play an essential role in organizing large-scale magnetic fields, (3) the turbulent electromotive force (specifically, the turbulent alpha effect) would be then responsible for the dynamo mechanism there, and (4) the magnetic helicity loss from the system would be a key for the polarity reversals and spatial migrations of the large-scale magnetic field.

研究分野：太陽天体物理学

キーワード：太陽 ダイナモ 乱流 プラズマ物理学 磁気流体力学

### 1. 研究開始当初の背景

太陽活動の異常が報告されはじめたのが、本研究を開始した2011年～2012年頃である。例えば、過去数百年間規則正しく続いてきた11年の太陽活動サイクルが約13年に延びたことや、極小期における黒点数が、地球に小氷期をもたらしたマウンダー極小期を想起させる少なさだったことなどが当時報告されている。また、太陽極域磁場や太陽風構造が従来とは大きく異なる状態に入ったことが指摘されたのもこの当時である。このような太陽活動の長期変動の原因を解明するためには、活動性の源である磁場の起源、即ち太陽ダイナモ機構の理解が不可欠である。太陽活動が異常な(過去に例を見ない)状態に向かいつつあることは現在では広く認識されており、太陽磁場の起源の研究は重要性を増していると言える。

### 2. 研究の目的

太陽活動の長期変動の原因を究明するためには、活動性の源である磁場の起源、即ち太陽ダイナモ機構の理解が欠かせない。本研究の目的は、対流層と放射層の間の境界層である『タコクライン層』のダイナモ機構への影響を解明することで、太陽活動の長期予報を実現するための物理基盤を構築することである。

### 3. 研究の方法

タコクライン層のダイナモ機構への寄与を調べるために、最先端のスーパーコンピュータと2種類の独自の計算モデルを駆使して、タコクライン層の効果を考慮した対流ダイナモシミュレーションを行った。我々が行った研究の3つの特色をまとめる：  
**[1] 計算手法**：本研究では、これまでの太陽ダイナモ研究では使われていなかった球殻格子(インヤン格子)を初めて導入したグローバルダイナモシミュレーションコードを独自開発し使用した。  
**[2] 超長時間積分**：数年から数十年スケールの太陽磁場の周期変動を捉えるために、従来計算よりも遥かに長時間のダイナモ計算を最先端のスーパーコンピュータ(京や国立天文台XC30)を使って行った。  
**[3] 相補的局所計算**：グローバル計算の欠点は様々なスケールの物理が混在しているが故の“本質的物理の抽出の難しさ”にある。それを補うべく、グローバル計算と同様の計算モデル(タコクライン層の効果を考慮)で相補的な局所ダイナモ計算を行った。これにより、太陽ダイナモ機構に対する小スケールの物理(特に乱流の効果)の寄与を、グローバルな物理とは分離し精査した。

### 4. 研究成果

本研究の結果、主に以下のことを明らかにした  
**【以下では、最も重要な成果を得た3本の論文(Masada et al. 2013; Masada & Sano 2014a,b)の内容についてまとめる】**：

#### (1) Masada et al.(2013)の成果

##### 【成果1:新しい太陽全球計算手法の開発】

対流によるダイナモ機構をとらえ、大局的磁場の極性反転までカバーする太陽全球グローバル計算を行うためには、乱流渦と計算領域間の十分な空間

スケール分離(=高精度化)と長時間積分が必要である。その両立のために我々が太陽全球計算モデルに初めて導入したのが『インヤン格子』(c.f. Kageyama & Sato 2004)と呼ばれる新しい計算格子である(図1a)。高精度化にともない極周辺に格子が集中し、計算の時間刻み幅が極端に小さくなるという従来の緯度-経度格子の問題点を、インヤン格子を導入することで解消し、高精度・長時間積分を両立する太陽全球グローバルダイナモシミュレーションを実現することに成功した。

#### 【成果2:全球計算による太陽型回転分布と太陽黒点型磁場の定性的再現】

全球計算の成果が『太陽型回転分布』と『太陽黒点型の大局的磁場』の再現である。図1b,cに日震学手法で精密測定された太陽内部回転の子午面分布と、それに対応するシミュレーション結果を示す。青が低速、赤が高速回転領域である。太陽内部回転の特徴である『赤道加速プロファイル(赤道が極より速く回転)』が定性的に再現されていることがわかる。図2aに全球計算の結果得られた『磁場の時間-緯度分布図(太陽蝶形図に相当)』を示す。赤が正、青が負極性に対応する。赤道反対称な大局的磁場の形成とその準周期的極性反転の定性的な再現にも成功していることがわかる。これらは計算の高精度化と長時間積分の両立がもたらした成果である。

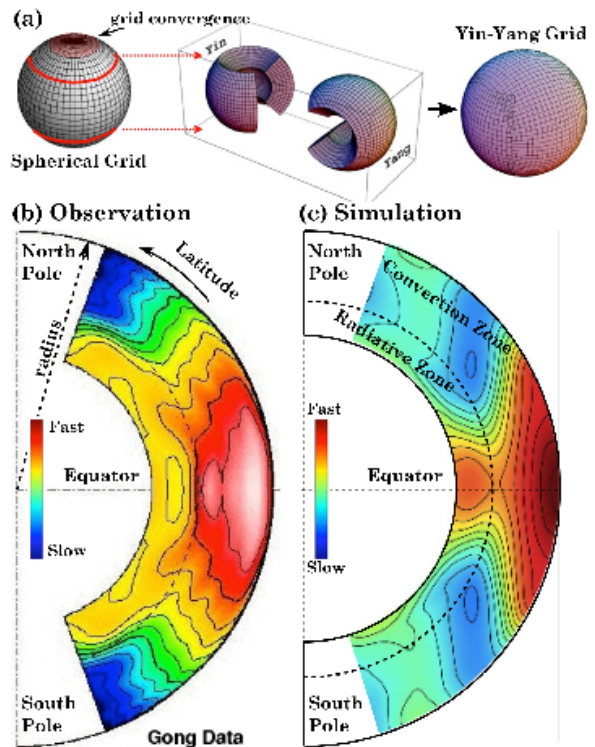


図1: (a) インヤン格子. (b) 太陽内部回転分布[観測]. (c) 全球計算結果 (Masada et al. 2013).

#### (2) Masada & Sano (2014a,b)の成果

##### 【成果1: 磁場の自発的組織化と周期的極性反転の発見: Masada & Sano (2014a)】

様々なスケールの流れが混在する全球計算の結果を受けて生じたのが『ダイナモを担うのはグロー

バルな流れか？それとも乱れた流れ(=対流)か？』という疑問であった。これに答えるべく行ったのが、局所領域に注目したシミュレーションである。局所モデルでは図1cに示したような全球スケールの差動回転は生じず、乱流のみがダイナモに寄与する。図2bに局所計算で得られた磁場の時空間進化図を示す。橙が正、青が負極性の磁場である。全球的差動回転が存在しない局所モデルでも、周期的極性反転をともなう大局的磁場(=乱流スケールより大きな構造を持つ磁場)が形成されることを、本研究で明らかにした。

**【成果 2:ダイナモ機構におけるタコクライン層の役割の解明:Masada & Sano (2014a)】**

さらに局所モデルを使って、本研究の当初からの目的であった『ダイナモ機構においてタコクライン層が果たす役割』も明らかにすることに成功した。対流層直下にタコクライン層を組み込んだモデルと、対流層のみのモデルを比較し、生じるダイナモ機構の違いが現れるかを調べたのである。その結果、『タコクライン層の有無はダイナモ機構には影響しない』ということがわかった。これら Masada & Sano (2014a)で得た成果(成果1と2)は、タコクライン層や全球スケールの流れはダイナモにとって本質的ではなく、『乱対流』こそがダイナモ機構の本質を担っていることを強く示唆するものである。

**【成果 3:新しい平均場モデリング手法によるダイナモ機構の同定: Masada & Sano (2014b)】**

これらの結果を受け『乱流のダイナモ効果』を実証するために我々が開発したのが『新しい平均場モデリング手法』である。磁場の誘導方程式を平均場(=大局場)と乱流場に分けて展開すると、乱流速度場の相関量を係数(=ダイナモ係数)として持つ『大局的磁場の誘導方程式』が得られる。我々が発見したのは、局所計算のデータから抽出した乱流のアンサンブル平均情報を使ってダイナモ係数を決めることで、局所計算の結果を完全に再現する平均場方程式の解が得られるということである。図2cに示したのが平均場モデルの解であり、図2bの局所計算の時空間パターンを再現していることがわかる。驚くべきことに、磁場の反転周期と振幅も局所計算の結果と定量的に一致する。本研究により『乱流の統計的ダイナモ効果』によって極性反転をともなう大局的磁場が組織化されることを、世界で初めて定量的に実証することに成功した

**【太陽ダイナモ研究へのインパクト】**

これらの研究成果は、太陽ダイナモ標準理論の再構築を迫るものである。なぜなら、標準理論では全球スケールの差動回転とタコクライン層が太陽ダイナモ機構の核であり、対流層内で発達する乱流は『極性反転をともなう磁場』の生成には寄与しないと考えられてきたからである。乱流ダイナモ効果は、対称性の破れに起因した乱流ヘリシティの空間非一様性によって生み出される(Masada & Sano 2014b)。現実的な太陽全球計算で乱流ヘリシティの球空間構造を定量的に解明することが、太陽ダイナモ理論の再構築へ向けての次のマイルストーンである。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者には下線)

**【査読付き論文】**  
**(査読無し論文は省略)**

**【雑誌論文】(計 12 件：全て査読付き)**

1. “Effect of Interacting Rarefaction Waves on Relativistically Hot Jets”, Matsumoto, J., [Masada, Y.](#) & Shibata, K. (2012), The Astrophysical Journal, Vol.751, id.140,18pp.
2. “Local Simulations of the Magnetorotational Instability in Core-collapse Supernovae”, [Masada, Y.](#), Takiwaki, T., Kotake, K., & Sano, T. (2012), The Astrophysical Journal, Vol.759, id.110, 11pp.
3. “Multimessengers from Core-Collapse Supernovae: Multidimensionality as a Key to Bridge Theory and Observation”, Kotake, K., Takiwaki, T., Suwa, Y., Iwakami Nakano, W., Kawagoe, S., [Masada, Y.](#), & Fujimoto, S. (2012), Advances in Astronomy, Vol.2012, id. 428757.
4. “Visualization Software with VR Juggler for Immersive Virtual Reality Environment”, Meno, D., Kageyama, A., & [Masada, Y.](#) (2012), Transaction of the Japan Society for Simulation Technology, Vol.4, No4, pp.190-193.

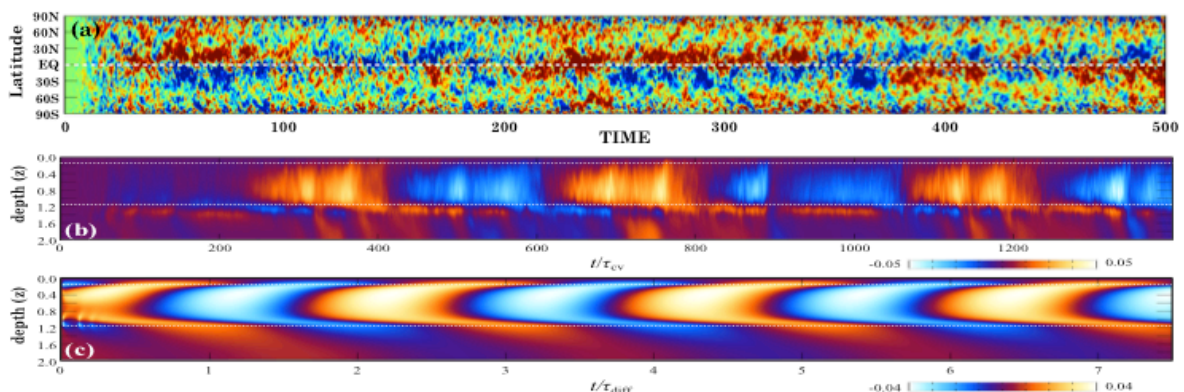


図 2 : (a) 磁場の時空間進化図 (全球計算の結果). (b) 磁場の時空間進化図 (局所計算の結果) (横軸：時間, 縦軸：半径). (c) 局所計算から得られた乱流の統計平均情報をカップルさせた平均場モデルの解. Masada et al. (2013) と Masada & Sano (2014b) より抜粋.



5. "Two-dimensional Numerical Study for Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov Instabilities in Relativistic Jets", Matsumoto, J. & [Masada, Y.](#), (2013), The Astrophysical Journal Letters, Vol.772, id.L1, 5pp.
6. "High-Speed Volume Rendering in CAVES", Yamaura, Y. [Masada, Y.](#), & Kageyama, A. (2013), Plasma and Fusion Research, Vol.8, 1201135.
7. "Applications and a Three-dimensional Desktop Environment for an Immersive Virtual Reality System", Kageyama, A., & [Masada, Y.](#) (2013), Journal of Physics, Vol.454, id. 012077.
8. "Effects of Penetrative Convection on Solar Dynamo", [Masada, Y.](#), Yamada, K., and Kageyama, A. (2013), The Astrophysical Journal, Vol.778, id.11, 14pp.
9. "Long-term Evolution of Large-scale Magnetic Fields in Rotating Stratified Convection", [Masada, Y.](#), and Sano, T. (2014), Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.66, id.S2, 7pp.
10. "Mean-Field Modeling of an  $\alpha^2$ -Dynamo Coupled with Direct Numerical Simulation of Rigidly Rotating Convection", [Masada, Y.](#), and Sano, T. (2014), The Astrophysical Journal Letters, Vol. 794, id. L6, 5pp.
11. "Magnetohydrodynamic Turbulence Powered by Magnetorotational Instability in Nascent Neutron Stars", [Masada, Y.](#), Takiwaki, T., and Kotake, K. (2015), The Astrophysical Journal Letters, Vol.798, id.L22, 7pp.
12. "Differential Rotation in Magnetized and Non-magnetized Stars", Mabuchi, J., [Masada, Y.](#), and Kageyama, A. (2015), The Astrophysical Journal, Vol.806, id. 10, 16pp.

-----  
**【学会発表】(計28件:国際会議9件、国内会議19件. 国内外合わせて招待講演が7件)**

**【国際会議発表】**

1. "3D MHD Simulation of Non-convective Spruit's Dynamo - Application to Polar Field Amplification in the Sun -" (**Poster**), [Masada, Y.](#), "IAU Symposium 294 :Solar and Astrophysical Dynamos and Magnetic Activity" (2012), Aug.25-31; Beijing, China
2. "Impact of MHD Turbulence on Thermal Wind Balance in the Sun" (**Poster**), [Masada, Y.](#), "IAU Symposium 294 :Solar and Astrophysical

Dynamos and Magnetic Activity" (2012), Aug.25-31; Beijing, China

3. "Mean Field Generation in Local Convective Dynamo Simulation", (**Contribution Talk**), [Masada, Y.](#), "The Fifth East Asia Numerical Astrophysics Meeting (EANAM)" (2012), Oct.30-Nov.2; Kyoto, Japan
4. "Angular Momentum Transfer in Solar Differential Rotation " (**Invited Lecture**), [Masada, Y.](#), "3rd East-Asian School and Workshop on Laboratory, Space, Astrophysical Plasmas" (2013), July. 8-12; Tokyo, Japan
5. "Oscillatory  $\alpha^2$  Dynamo Mode in Turbulent Stratified Convection" (**Contribution Talk**), [Masada, Y.](#), "Mathematical Analysis of Magnetohydrodynamical Processes in Stars" (2013), Sep. 24-27; Kyoto, Japan
6. "Large-scale Magnetic Field and  $\alpha^2$  Dynamo Wave in Turbulent Convective Dynamo Simulation" (**Contribution Talk**), [Masada, Y.](#), "Hinode 7: The 7th Hinode Science Meeting" (2013), Nov. 12-15; Hida, Japan
7. "Magnetic Field in Stellar Interiors and Supernova Cores" (**Invited Talk**), [Masada, Y.](#), "Multi-Messengers from Core-Collapse Supernovae" (2013), Dec. 2-6; Fukuoka, Japan.
8. "Solar Magnetism: Exploration with Local Convective Dynamo Simulations " (**Contribution Talk**), [Masada, Y.](#), "Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact (VarSITI)" session, JpGU (2014), April. 28-29; Yokohama, Japan.
9. "The Origin of Solar Magnetism - Large-scale Dynamos in Local and Global Convective Dynamo Simulations" (**Poster**), [Masada, Y.](#), "2014 Living With a Star (LWS) Science Meeting" (2014), Nov. 2-6, Portland Oregon, USA.
10. "Local and Global Dynamos by Rotating Penetrative Convection" (**招待講演**), [政田洋平](#), Solar and Space Plasma Seminar, 国立天文台 (2013年2月)
11. "局所および大局的シミュレーションで探る太陽ダイナモ機構" (**招待講演**), [政田洋平](#), CfCA User's Meeting 2013, 国立天文台 (2014年1月)

12. “太陽磁場の起源：太陽ダイナモ研究の現状と今後” (招待講演), 政田洋平, GEMSISワークショップ：第三期に向けての研究戦略, 名古屋大学 (2014年9月)

13. “MHD Turbulence Powered by MRI in Nascent Proto-Neutron Stars” (招待講演), 政田洋平, XI-th Kyoto Meeting about High-density Nuclear Matter and Compact Stars, 京都大学 (2014年12月)

14. “大局的ダイナモと太陽内部マルチスケール熱対流” (招待講演), 政田洋平, CfCA User's Meeting 2014, 国立天文台 (2015年1月)

#### 【国内一般講演】

15. “対流の自転角速度および緯度依存性と帯状流” (口頭), 政田洋平、佐野孝好, 日本天文学会2012年秋季年会, 大分大学 (2012年9月)

16. “局所対流ダイナモシミュレーション” (口頭), 政田洋平、佐野孝好, CfCA User's Meeting 2012, 国立天文台 (2012年12月)

17. “局所対流ダイナモシミュレーション” (口頭), 政田洋平、佐野孝好, 第25回理論懇シンポジウム「計算宇宙物理学の新展開」, 筑波エポカル (2012年12月)

18. “局所対流ダイナモシミュレーション” (口頭), 政田洋平、プラズマ研究会2012, 多摩スポーツセンター (2013年1月)

19. “局所対流ダイナモ：大局的磁場の周期変動とその物理機構” (口頭), 政田洋平、佐野孝好、日本天文学会2013年春季年会, 埼玉大学 (2013年3月)

20. “回転球殻MHDダイナモ：貫入性対流の影響” (口頭), 政田洋平、山田耕平、陰山聡, 日本天文学会2013年秋季年会, 東北大学 (2013年9月)

21. “局所および大局的シミュレーションで探る太陽ダイナモ機構” (口頭), 政田洋平、STEシミュレーション研究会太陽地球惑星系科学合同研究集会, 九州大学情報基盤センター (2013年12月)

22. “回転成層対流が励起する $\alpha^2$ ダイナモモードの時空間進化” (口頭), 政田洋平、佐野孝好、日本天文学会2014年春季年会, 国際基督教大学 (2014年3月)

23. “大局的磁場の振動周期およびマイグレーションと磁気ヘリシティ損失” (口頭), 政田洋平、佐野孝好、日本天文学会2014年秋季年会, 山形大学 (2014年9月)

24. “回転成層対流中での大局的磁場の組織化と太陽黒点の起源” (口頭), 政田洋平、佐野孝好、日本流体力学会2014年会, 東北大学 (2014年9月)

25. “ダイナモモデルの検証のために” (口頭), 政田洋平、スペース太陽物理学の将来展望, 宇宙科学研究所 (2014年10月)

26. “天体乱流研究と太陽内部物理学” (口頭), 政田洋平、佐野孝好、第27回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」, 国立天文台 (2014年12月)

27. “太陽内部マルチスケール熱対流と回転・磁場の効果” (口頭), 政田洋平、佐野孝好、日本天文学会2015年春季年会, 大阪大学 (2015年3月)

28. “ $\alpha^2$ ダイナモのスケーリング則が示唆する磁場の飽和の物理” (ポスター), 政田洋平、佐野孝好、日本天文学会2015年春季年会, 大阪大学 (2015年3月)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/csi-viz/members/masada/Top.html>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

政田 洋平 (MASADA, Youhei)

(現)愛知教育大学

理科教育講座宇宙物質専攻(助教)

(旧)神戸大学 大学院システム情報学研究科

計算科学専攻(助教)

研究者番号:30590608