

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540228

研究課題名(和文) 太陽磁場活動の中長期的変動を予測するセルフ・コンシステントなモデルの開発

研究課題名(英文) A self-consistent turbulence model for the long-term solar-activity cycle

研究代表者

横井 喜充 (Yokoi, Nobumitsu)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：50272513

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：通常モデルでは乱流起電力は大規模磁場とその微係数の線型函数で表現される。本研究では、大規模不均一流れの乱流起電力への効果を集中的に調べた。流れの非一様性は、大規模渦運動と結びつくクロス・ヘリシティ(速度=磁場相関)効果として乱流起電力に現れる。太陽の周期的活動を説明するため、クロス・ヘリシティ効果を組み入れた簡単なダイナモ・モデルを提案した。そこでは、磁場誘導方程式に加えて、乱流クロス・ヘリシティの発展も自己無撞着に解かれる。モデル方程式系の固有値解析によって、平衡周期解の存在が示された。解析により、磁場極性の反転は乱流クロス・ヘリシティの符号反転によって引き起こされることが確認された。

研究成果の概要(英文)：We focused on the effect of large-scale inhomogeneous flow in turbulent electromotive force, which is currently "misleadingly" supposed to be a functional of the linear combination of the large-scale magnetic field and its spatial derivatives. The flow inhomogeneity in turbulence naturally leads to the cross-helicity (velocity-magnetic-field correlation) effect coupled with the large-scale vortical motions. A simple dynamo model with this cross-helicity effect for the solar-activity cycle was proposed, where the turbulent cross-helicity equation as well as the mean induction equation is solved in a consistent manner. An eigenvalue analysis was performed to derive an equilibrium oscillatory solution. It was confirmed through the analysis that the magnetic-field reversal is caused by the sign reversal of the turbulent cross helicity.

研究分野：乱流の物理学

キーワード：太陽 磁場 ダイナモ 乱流

## 1. 研究開始当初の背景

太陽コロナ基底部の磁場活動により発生する太陽風は太陽磁場を引きずりながら太陽系空間に広がる。やがて太陽風磁場と地球磁気圏は相互作用し、磁気嵐、磁場による宇宙線の遮蔽などさまざまな現象を通して地球環境に大きな影響を与える。太陽の磁場活動は約22年の周期で規則的に変動しているが、このような周期性が崩れ「変調」を来すこともままある。17世紀のMaunder極小期はその代表的な例だが、他にもこのような極小期が約200年おきに現れており、その多くは地球の小氷期と一致する。また、現在の周期24の始まり前からの「変調」も記憶に新しい。太陽磁場活動の22年周期からのずれであるこのような「変調」は気候変動や温暖化あるいは寒冷化といった地球環境の変動とも密接している。そのため、太陽磁場の中長期的変動を予測することは、地球環境の視点からも大きな意味をもつ。

太陽磁場生成のメカニズムは太陽対流層あるいはその周辺のプラズマの運動によるダイナモ(発電)作用だと考えられている。通常、磁場の生成・散逸は、対流層の乱流的運動がもたらす乱流磁気拡散 $\beta$ と乱流中の一種の構造(ヘリシティ)からくるアルファ $\alpha$ 効果の組み合わせによるとされる。太陽磁場活動の変動との関連で、太陽の差動回転、磁場生成機構である $\alpha$ 、磁場散逸機構である $\beta$ の値をいろいろ変えることで、大規模磁場活動の南北非対称性を含むさまざまな「変調」を再現するモデルが提案されてきた。現在広く受け入れられているのは磁束輸送ダイナモという考え方である。このダイナモでは、しばしば輸送係数の $\alpha$ と $\beta$ はパラメータとして与えられ、それをういた数値計算によって大規模磁場の変動が議論されている。しかし、パラメータを調整すれば磁場の振る舞いのある程度再現できるというのは当然である。むしろ、なぜそのようなパラメータになるのか;その値や空間分布は物理的に妥当か;などの吟味が不可欠である。

そもそも平均場方程式に輸送係数として現れる $\alpha$ や $\beta$ は乱流場の性質を反映すべきものであり、決して調整可能なパラメータではない。このため、最近では、輸送係数の発展方程式を構成し、磁場の方程式と一緒に解くことも考えられ始めている。しかし、現状では、磁場の変動をうまく再現することには成功していない。その理由として、(i)輸送係数の発展方程式の妥当か;(ii)そもそも $\alpha$ と $\beta$ のみを輸送係数とすることが妥当か;などの問題点を挙げるができる。これまで申請者は非一様性乱流の理論とモデリングを研究してきて、ヘリシティやクロス・ヘリ

シティという擬スカラー量が乱流輸送をどう変えるか調べてきた。その知見をフルに活用して、磁場変動の乱流輸送のモデル化を行なう。

## 2. 研究の目的

太陽の磁場活動は、対流層やその付近での高温プラズマの運動のダイナモ作用によって生成・維持されると考えられている。磁場を生成し散逸する諸要因である実効的輸送係数は、従来のモデルでは調整可能なパラメータとして扱われてきた。しかし、それらの輸送係数は対流層の乱流運動の性質を反映すべきである。本研究では、輸送係数をパラメータとして与えるのではなく、乱流輸送係数の発展方程式を構成しモデルに組み入れる。そのような「閉じた」方程式系からなるセルフ・コンシステントなモデルで大規模磁場の時間発展を考察し、将来の変動を決める要因を特定する。

## 3. 研究の方法

従来、実効的抵抗あるいは乱流磁気拡散 $\beta$ とバランスする磁場生成機構としては乱流場のヘリシティ(helicity:らせん度)効果である $\alpha$ のみが考えられてきた。申請者は、大規模な渦度がある場合にはクロス・ヘリシティ(速度=磁場相関)による効果 $\gamma$ も無視できないことを世界で初めて示し、さまざまな地球・天体現象にこの効果を適用してきた(Yoshizawa & Yokoi 1993; Yokoi 1999)。この効果は近年注目されるようになり、申請者は2008年以来、NASA-GSFC(Maryland)、NORDITA(Stockholm)、Kiepenheuer(Freiburg)などに招聘され、多くの講演を行ってきた。従来の $\alpha$ と $\beta$ に加えてこのクロス・ヘリシティ効果 $\gamma$ が大規模磁場の発展に寄与するモデルを構築する。この点が本研究の第一の特色である。

第二の大きな特色は、輸送方程式の発展方程式も同時に解くという点にある。乱流研究では、輸送係数を決める乱流統計量(乱流エネルギー、散逸率など)の発展方程式を解くというアプローチは珍しいものではない。しかし、このようなアプローチは、地球惑星科学や天文学の分野ではほとんど行なわれてこなかった。現象自体が解明すべき多くの因子を含むため、乱流輸送の表現自体を洗練する余地がなかったためとも言える。本研究では、基礎方程式から輸送係数自体の発展方程式を構成する。これによって、輸送係数の発展を考慮しつつ磁場の発展を吟味するという、自己無撞着なアプローチが可能となる。

乱れは輸送係数として平均場の構造を決める。一方で、平均場の構造は乱れの性質を

定める。この両者は渾然一体となって発展するものである。輸送係数を調整可能なパラメータとして扱うことをやめ、輸送係数自体の発展方程式を考えることによって、上記の乱れと平均場のダイナミックな関係を反映したモデルを構築することができる。申請者のこれまでの研究から、クロス・ヘリシティの時空発展と磁場の構造変化とは密接な関係にあると予想される(Yokoi 2011; Yokoi & Hoshino 2011)。この関係を、因果も含めて明らかにする。そのことによって、磁場変動を予測するモデルは、物理に裏付けられたより確かなものとなる。さらに、乱流ダイナモで、どういう状況でどの効果が重要になるかについての、根本的な示唆を行なうことが可能となる。

#### 4. 研究成果

プラズマ乱流中の速度/磁場相関であるクロス・ヘリシティの効果によって、乱れの中でも大規模な磁場構造が定常的に存在していることを示した。これはプラズマの回転とクロス・ヘリシティ効果の組み合わせによる乱流ダイナモ機構および乱流輸送抑制機構ということができる。この磁場構造の生成および乱れの抑制を記述する乱流モデルを構築・整備した[研究発表, (1)-2)の雑誌論文]。

他方で、乱流輸送の促進と抑制という視点から、高速磁気リコネクションを記述する乱流理論・モデルを構築し、数値計算によって検証した。磁気リコネクションは磁場エネルギーを運動エネルギーに転換する過程で、運動エネルギーを磁場エネルギーに転換する仮定であるダイナモとは逆である。しかし、両者とも乱流輸送が鍵となり、乱流磁気拡散に代表される乱流による輸送促進あるいは構造破壊とヘリシティ効果やクロス・ヘリシティ効果に代表される乱流による輸送抑制あるいは構造形成との均衡で現象が進む点で共通している。磁気リコネクション回りの磁場や流れ場は不均一である。平均場の非一様性が乱流の源となり、乱流輸送の促進と抑制が、磁気リコネクションの速さを決めていくことを、一連の研究で示した。[研究発表, (1)-3), 4), 6)の雑誌論文]。

続いて、乱流輸送の抑制という視点から金星の超回転ジェット現象を解析した。乱流磁気拡散、渦粘性、渦拡散など乱流による輸送促進では、輸送係数はしばしば乱流強度と時間スケールの積で表現される。ある状況下では、乱流強度自体は大きく変化しなくても乱流の時間スケールが変化することで輸送が大きく変わる可能性がある。金星大気に典型的

な状況で、対流運動など大規模な流れに関係する時間スケールと渦回転などの時間スケールとを融合することで統合された時間スケールを構成した。この統合時間スケールを考慮することで、ひとたび形成された超回転ジェットの角運動量が拡散せず、長い時間ジェットが保たれうることを示した[研究発表, (1)-5)の雑誌論文]。

また、通常流体乱流の枠組みでヘリシティ(速度=渦度相関)による流れ生成の可能性を指摘し、直接数値計算を用いて検証した。回転や密度勾配などがあると乱流場の対称性が破れて有限のヘリシティが分布する。この乱流ヘリシティは渦粘性効果を抑制し、不均一な流れの構造を維持することに寄与すると考えられる。さらに回転系ではヘリシティ効果で大規模な流れ場が生成される可能性がある。回転を加えたボックス内乱流の直接数値計算で流れの生成を確認した。この成果は投稿され公刊される予定である[研究発表, (1)-10)の雑誌論文]。

従来の太陽磁場活動のモデルでは、非一様な平均流の乱流場への効果はほとんど無視されている。非一様平均速度はゆらぎの速度=磁場相関である乱流クロス・ヘリシティの効果として乱流起電力に寄与する。この効果を取り入れたダイナモ・モデルを構築した。モデル方程式は、ポロイダル磁場とトロイダル磁場の方程式に加えて、乱流クロス・ヘリシティの方程式も含む。このモデルを太陽を模した局所ボックスに適用し、数値的に磁場の周期的な発展を表すことができることを示した。クロス・ヘリシティ効果がトロイダル磁場を作り、トロイダル磁場がアルファ効果でポロイダル磁場を作る。このポロイダル磁場が元と反対符号のクロス・ヘリシティを生成し、磁場の反転へ導く。この成果は投稿され公刊される予定である[研究発表, (1)-11)の雑誌論文]。

これらの研究に関連して、強い圧縮性のもとでの乱流ダイナモについて研究を進めた。大きな平均密度勾配が存在すると密度ゆらぎが生成される。密度分散が乱流起電力にどのように寄与するかを理論的に解析した。平均密度勾配と磁場が平行ではないとき密度分散と結びついて乱流起電力を生むことを導いた。この状況は、遅い電磁流体衝撃波による磁気リコネクション(例えば Petcheck リコネクション)に典型的な配位である。このことから、密度分散効果の速いリコネクションへの寄与が期待される。[研究発表, (2)-20]の学会発表]

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- 1) 横井 喜充, 乱流磁気リコネクション, 生産研究, Vol. 65, No. 1, pp. 47-53, (2013).
- 2) Nobumitsu Yokoi, “Cross helicity and related dynamo,” Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, Vol. 107, 114-184 (2013).
- 3) Katsuaki Higashimori, Nobumitsu Yokoi, and Masahiro Hoshino, “Explosive turbulent magnetic reconnection,” Physical Review Letters, Vol. 110, 255001-1-5 (2013).
- 4) Nobumitsu Yokoi, Katsuaki Higashimori, and Masahiro Hoshino, “Transport enhancement and suppression in turbulent magnetic reconnection: A self-consistent turbulence model,” Physics of Plasmas, Vol. 20, 122310-1-17 (2013).
- 5) Akira Yoshizawa, Hiromichi Kobayashi, Norihiko Sugimoto, Nobumitsu Yokoi, and Yutaka Shimomura, “A Reynolds-averaged turbulence modelling approach to the maintenance of the Venus superrotation,” Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, Vol. 107, 614-639 (2013).
- 6) 篠原 育, 横井 喜充, リコネクションと波動・乱流の相互作用, Journal of Plasma Fusion Research, Vol. 89, No. 11, pp. 765-768 (2013).
- 7) 横井 喜充, 磁気リコネクションの乱流モデル, 生産研究, Vol. 66, No. 1, pp. 9-14, (2014)
- 8) Nobumitsu Yokoi, “Modeling helicity dissipation-rate equation,” Proceedings of iTi Conference on Turbulence VI (Sep. 21-24, 2014, Bertinoro, Italy) pp. 1-4 (2014)
- 9) 横井 喜充, 太陽周期を説明する新しいモデル, 生産研究, Vol. 67, No. 1, pp. 17-23 (2015).

10) Nobumitsu Yokoi and Axel Brandenburg, “Large-scale flow generation by helicity effect,” to be submitted to Astrophysical Journal, pp. 1-9 (2015).

11) Nobumitsu Yokoi, Dieter Schmitt, and Valery Pipin, “A new simple dynamo model with cross helicity for the solar activity cycle,” to be submitted to Astrophysical Journal, pp. 1-13 (2015).

[学会発表] (計 20 件)

- 1) Nobumitsu Yokoi, M. Hoshino, K. Higashimori, “Turbulence transport and magnetic reconnection,” Proceedings of US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection (Princeton, USA) p. 76, 2012. 05.
- 2) Nobumitsu Yokoi, “Cross-helicity dynamo and flow generation,” Proceedings of European GDR Dynamo & MHD Days (Nice, France) 4-4, 2012. 10.
- 3) Nobumitsu Yokoi, “Cross helicity effect in dynamo and reconnection,” Proceedings of the International Center for Mathematical Sciences Workshop: Tangled Magnetic Fields in Astro- and Plasma Physics (Edinburgh, UK) 2-3-4, 2012. 10.
- 4) Nobumitsu Yokoi, Katsuaki Higashimori, and Masahiro Hoshino, “Dynamic balance in turbulent reconnection,” Proceedings of American Geophysical Union Fall Meeting (San Francisco, USA) SM21B-2270, 2012. 12.
- 5) Nobumitsu Yokoi and Akira Yoshizawa, “Subgrid-scale model with structural effects implemented through the helicity,” Proceedings of the Frontiers in Computational Physics: Modeling the Earth System (Boulder, USA) P16, 2012. 12.
- 6) Nobumitsu Yokoi, “Dynamo and magnetic reconnection viewed from the correlation between the velocity and magnetic-field fluctuations,” Proceedings of the Nonlinear Waves and Chaos Workshop (NWCW9) (San Diego, USA) P31, 2013. 03.
- 7) 横井 喜充, シンポジウム「乱流が引き起こす角運動量輸送」まとめ, 日本物理学会講演概要集 (広島, 日本) 28pEA-8, 2013. 03.

8) Masahiro Hoshino, Nobumitsu Yokoi, and Katsuaki Higashimori, “Explosive Turbulent Magnetic Reconnection: A New Approach of MHD-Turbulent Simulation,” Proceedings of European Geosciences Union General Assembly 2013 (Vienna, Austria) ST4.1-EGU-1775, 2013.04.

9) Nobumitsu Yokoi, “Magnetic and flow induction in magnetohydrodynamic turbulence,” Proceedings of the 12th International Workshop on the interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (IPELS 2013) (1-5 July 2013, Hakuba, Japan) 01-8, 2013.07.

10) Nobumitsu Yokoi, Katsuaki Higashimori, and Masahiro Hoshino, “A self-consistent model for turbulent magnetic reconnection,” Proceedings of the 14th European Turbulence Conference (ETC14) (Lyon, France) SC-4-1, 2013.09.

11) 横井 喜充, D. Schmitt, 太陽磁場活動の変動を記述する新しいモデル, 日本物理学会 2013年秋季大会 講演概要集 (愛媛, 日本) 28pKC-1, 2013.09.

12) Nobumitsu Yokoi, “Flow induction due to helicity effect,” Proceedings of the 2nd Helicity Thinkshop on Solar Physics (Beijing, China) 2-3, 2013.10.

13) Nobumitsu Yokoi, “Dynamo and flow-induction in magnetohydrodynamic turbulence,” Proceedings of American Geophysical Union Fall Meeting (9-13 Dec. 2013, San Francisco, USA) NG23A-1482, 2013.12.

14) 横井 喜充, 構造効果を組み入れたMHD乱流のサブ・グリッド・スケール・モデル, 日本物理学会 第69回年次大会 講演概要集 (平塚, 日本) 29pAT-6, 2014.03.

15) Nobumitsu Yokoi, “A magnetic reconnection model for shock-turbulence interaction,” Proceedings of European Geosciences Union General Assembly 2014 (Vienna, Austria) ST4.1-EGU2014-10058, 2014.04.

16) Nobumitsu Yokoi, Katsuaki Higashimori, and Masahiro Hoshino, “Turbulent reconnection and dynamo,” Proceedings of

the US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection (MR2014) (20-24 May 2014, Tokyo, Japan) L2-10, 2014.05.

17) Nobumitsu Yokoi, “Modelling helicity dissipation-rate equation,” Proceedings of the iTi (interdisciplinary Turbulence initiative) Conference on Turbulence (21-24 September 2014, Bertinoro, Italy) Session 11-T3-4, 2014.09.

18) Nobumitsu Yokoi, “Density-variance effects in reconnection shock,” Plasma Conference 2014 (18-21 November 2014, Niigata, Japan) 18pC2-8, 2014.11.

19) Nobumitsu Yokoi, “Shock-turbulence interaction in magnetic reconnection: Density variance effects,” Proceedings of American Geophysical Union Fall Meeting (15-19 December 2014, San Francisco, USA) SM13E-4216, 2014.12.

20) Nobumitsu Yokoi, “Density variance effects in turbulent magnetic reconnection,” Proceedings of the 15th European Turbulence Conference (ETC15) (Delft, Netherlands), 2015.08.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

該当なし

[その他]

該当なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

横井 喜充 東京大学・生産技術研究所・助教  
(YOKOI, Nobumitsu)

研究者番号 : 50272513

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし