

太陽型星磁場生成機構を明らかにするための電磁流体力学計算

Magnetohydrodynamic Simulation to Resolve Dynamo Mechanism in Solar-Type Stars

研究代表者： 畠田 遼太（京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻）

研究分担者： 横山 央明（京都大学理学研究科附属天文台）

担当： 議論

研究目的 (Research Objective):

太陽を含む低質量の恒星は、表面直下に対流不安定な対流層が分布しており、このような恒星を太陽型星と呼ぶ。この対流層では、プラズマの流体運動による磁場生成(ダイナモ)が働くと考えられている。観測から、太陽型星の表面磁場強度はその自転率に系統的に依存し(Fig. 1)、特に太陽では、表面の磁場の極性が約11年おきに反転する磁気活動周期がよく観測されている(Fig. 2(a))。しかし、太陽の磁気活動周期や、太陽型星磁場の自転率依存性を駆動するメカニズムは不明である。太陽型星磁場は周囲の惑星環境にも重要な影響を与えるため、これを理論的に理解することは非常に重要である。

また、太陽における理論的な課題として、太陽内部の自転角速度は勾配を持っており(差動回転)、この勾配はダイナモを駆動する上で重要と考えられている(Fig. 2(b))。一方で、先行研究(Hotta, Kusano, and Shimada, 2022)から、太陽を代表するパラメータを用いた電磁流体力学計算では、非常に高い解像度で計算を行わない限り差動回転を再現できないことが明らかとなった(Fig. 3)。しかし、差動回転生成に重要であった乱流磁場を高解像度で分解しながら、磁気活動周期に迫るための長時間計算(100 年程度)を行うことは困難であるという課題がある。

一方、太陽型星については、電磁流体計算によって恒星磁場生成に迫る先行研究は行われているものの、それらは先述の問題により太陽を再現できないモデルとなっており、モデルの不確実性が大きい。また、太陽と異なり流れ場に対する観測的な制約も少ないためモ

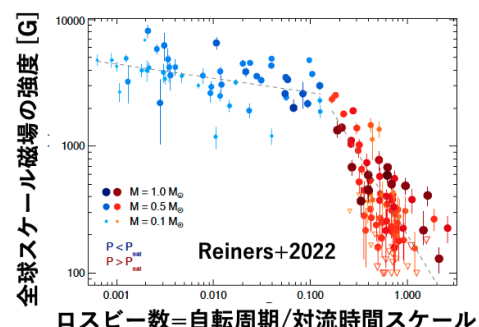
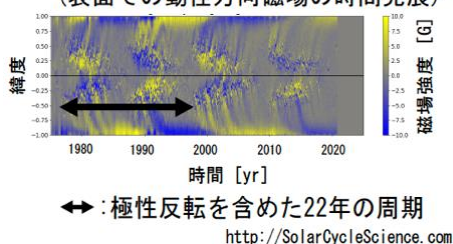


Fig. 1 観測された太陽型星磁場の自転率依存性

(a) 観測されている磁気活動周期の例
(表面での動径方向磁場の時間発展)



(b) 観測されている差動回転

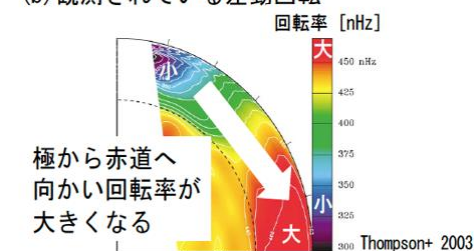


Fig. 2 太陽での観測的制約の例

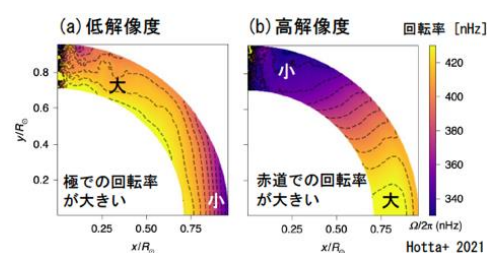


Fig. 3 解像度による差動回転の違い

デルの検証が不十分である。このため、太陽を再現できるモデルで、包括的な太陽型星磁場の理解を目指す必要がある。

このような背景の下、本研究は太陽を含む恒星の磁場生成機構に対して、近年高解像計算で分解された乱流の効果がどのように影響を与えるのかを理解することを目的とする。

本研究では、高解像度での乱流の効果のモデル化とその妥当性の検証、本モデルを用いた長時間計算による恒星磁場生成機構の分解とその解析を行う。

計算手法 (Computational Aspects) :

計算手法として、目的に応じて 2 次元、3 次元それぞれでの電磁流体力学計算を行った。

2 次元電磁流体計算では、太陽型星での大規模な磁場生成メカニズムの乱流角運動量輸送を調査することを目的とした。このため、Rempel (2006) によって提案された、太陽差動回転を再現する乱流角運動量輸送モデルを 2 次元電磁流体方程式系に組み込んでいる。このモデルの中で、乱流角運動量輸送の振幅を代表する乱流粘性と、乱流角運動量輸送に対する自転率の効果を変化させることで、広いパラメータサーベイを行った。コードは時間方向、空間方向に 4 次精度となっており、grid 数は 320×640 とした。

3 次元電磁流体計算では、太陽型星での小規模な磁場生成メカニズムと、計算コスト削減のための小規模磁場生成モデルの構築を目的とした。太陽型星対流層を模した箱型領域で 3 次元電磁流体方程式系を時間方向、空間方向に 4 次精度で解くコードとなっており、自転率をフリーパラメータとしている。小規模磁場生成機構の解像度依存性を調べるため、grid 数は $72 \times 256 \times 256$, $144 \times 512 \times 512$, $288 \times 1024 \times 1024$ まで変化させている。

研究成果 (Accomplishments) :

2 次元電磁流体計算では、3 次元乱流による角運動量輸送がモデル化されており、本モデルにおけるフリーパラメータとなっている乱流粘性と自転率を変化させた計算を行った。

結果として、大規模磁場強度が自転率を代表するロスビー数および乱流粘性に対して一定のスケール則を満たすことが明らかとなった (Fig. 4)。

さらに、本計算の解析を通じてこのスケール則をもたらす物理が、乱流角運動量と大規模磁場による角運動量輸送の釣り合いにあることが明らかとなった。これらの結果は、

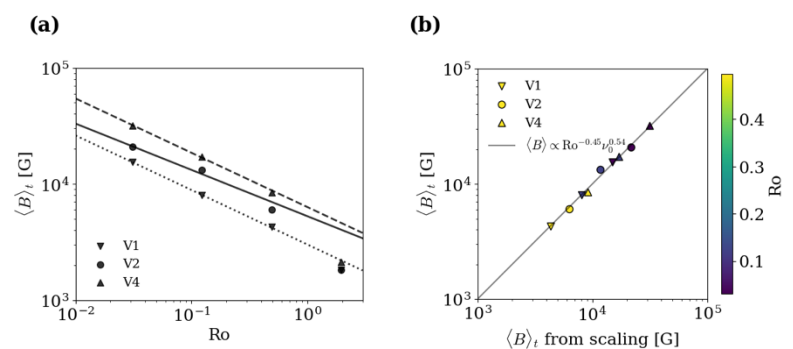


Fig. 4 (a) 大規模磁場強度のロスビー数依存性 (Ro) (b) 大規模磁場強度のロスビー数、乱流粘性依存性

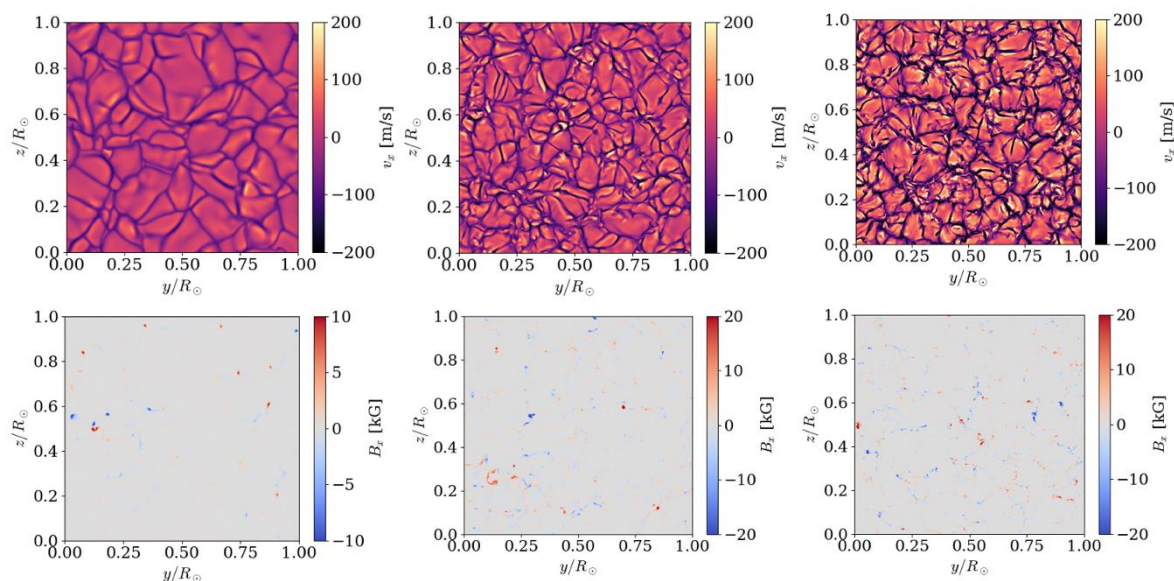


Fig. 5 0.95 太陽半径での動径方向速度(上段)と動径方向磁場(下段)。左から右へと解像度を上げたケースを示している。

高速自転(低 Ro) 下での乱流速度抑制(Bekki 2025)と合わせることで、太陽型星において観測から指摘されている高速自転(低 Ro)における磁場強度の飽和の説明が可能な結果となり非常に重要である。さらに、大規模磁場強度に対する乱流効果の重要性を示唆する結果となっている。

3次元電磁流体計算では、この乱流効果を陽的に解き、可能なモデル化を検討している。今回の計算では、grid 数を $72 \times 256 \times 256$, $144 \times 512 \times 512$, $288 \times 1024 \times 1024$ 変化させ、小規模磁場生成が解像度の増加とともに上昇する先行研究の結果を再現した(Fig. 5)。さらに、この小規模磁場の強化メカニズムについても、下降流付近の圧縮が、解像度の増加とともに強調されていることであることも確認された。

このような圧縮の強調による小スケール磁場強化は、高解像計算で実現されている強い熱力学量擾乱を模した擾乱を低解像度計算に人工的に追加することで、低解像度計算においても再現できる可能性がある。このようなモデル化は、数 $10 \sim 100$ 年スケールでの計算時間が要求される太陽大規模磁場の活動周期を捉えるための長時間の3次元電磁流体計算において大いに有益である。このようなモデル化の妥当性の検証を行うため、高解像度計算内での熱力学量の擾乱の解析、および考案したモデルの低解像度計算への実装を行なった。高解像度計算での小スケール磁場再現の観点から本モデルの最適なパラメータを特定することが今後の課題となっている。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Shimada, R. and Yokoyama, T., Saturation of the Large-scale Magnetic Field for Fast Rotating Solar-like Stars Driven by Inefficient Turbulent Angular Momentum Transport. The Astrophysical Journal, 999(1), pp.44, 2026