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」

# 天体乱流研究と太陽内部物理学

c.f., Masada & Sano (2014a), PASJ Masada & Sano (2014b), ApJL Masada & Sano (2015a) in prep.

政田洋平(神戸大学) 共同研究者:佐野孝好(大阪大学)



Masada & Sano (2015b) in prep.

Hinode SOT

## 太陽黒点・太陽蝶形図の起源の理解を目指して



Hinode SOT © じょうてん

1 大局性・赤道反対称性
 2 周期性(約22年周期)
 3 緯度方向のマイグレーシミモ

#### 8複雑なMHD乱流系

- ・強い密度成層
- ・コリオリカ
- · 差動回転, 子午面流
- ・対流安定層unspot
- ・高Re & 高Rem



なぜ太陽ダイナモ機構を研究するのか? ~天体乱流研究のプロトタイプ~

【基礎物理学的意義】

太陽ダイナモ:乱流中で生じる磁場の(局所から巨視的スケールへの)逆カスケード現象

乱流の対称性の破れがもたらす磁場の自発的組織化の帰結 (後述)

→ 自然界の自己組織化現象の背後に潜む共通原理に対する理解.

#### 【天文学的意義】

乱流:大規模構造から惑星形成に至る宇宙のあらゆる時空間・エネルギースケールで普遍的.
乱流によって生成される磁場は天体のダイナミクスに大きな影響.
観測可能な太陽は天体乱流の物理の『天然の実験場』.

→ 天体の活動性や形成・進化の理解に直結.

#### 【太陽地球物理学的意義】

太陽黒点の起源:

- ・太陽活動の中長期変動(数百年~数千年スパン)
- ・太陽活動の中長期変動と地球の気候変動との密接な関連 (e.g., Gray et al. 2010)
- ・近年の太陽活動の異常 (e.g., McComas et al. 2013)
- → 太陽-地球環境と生命の46億年の共進化とその未来に対する理解の深化.

## 太陽内部熱対流の物理 ~ 乱流場と平均場の相互作用の理解を目指して~



回転成層対流によるダイナモをシンプルなモデルで理解する

#### Ω効果(速度シアーによる磁場増幅)が無くても大局的磁場はできる

## 1. 回転成層対流によるダイナモ ~「大局的」磁場生成の物理機構~

Masada & Sano (2014a) PASJ Masada & Sano (2014b) ApJL





### Simple Model of Turbulent Convection and Dynamo

[3層ポリトロープモデル:上部放射層(冷却層),中部対流層 & 下部放射層]



## 周期的極性反転をともなう大局的磁場の生成

100

 $_{\rm K}(k)$ 

M(k)

 $10^{-5}$ 

 $10^{-6}$ 

 $10^{-7}$ 

 $10^{-8}$ 

 $10^{-9}$ 

(b) 磁気エネルギースペクトル

10

 $k/k_c$ 



(対流層のみのモデルの極性反転周期は3層モデルの1/3)

ダイナモ機構は何か?
 ざらに単純化
 直接数値計算(DNS)と
 カップルさせた1D平均場モデル



- ・乱流場の統計平均プロファイルをDNSの結果から直接抽出 → 乱流起電力を決める.
- 大局的磁場が乱流場に及ぼすbackreaction(非線形効果)も考慮 (quenching model).



★ 1D MF equation for 
$$B_h(t,z)$$
:

$$\frac{\partial \langle \boldsymbol{B}_h \rangle}{\partial t} = \nabla \times \left[ \alpha \langle \boldsymbol{B}_h \rangle - (\eta + \eta_t) \nabla \times \langle \boldsymbol{B}_h \rangle \right],$$

By using the information of the DNS, we determine

 $\begin{aligned} \alpha_k(z) &= -\tau_c [\langle \langle u_z \partial_x u_y \rangle \rangle + \langle \langle u_x \partial_y u_z \rangle \rangle] \\ \eta_t^k(z) &= \tau_c \langle \langle u_z^2 \rangle \rangle \end{aligned}$ (c.f., Ossendlijver+02)

## 平均場モデルの非線形解 vs. DNS

#### (Masada & Sano 2014b)



- DNSの磁場の時空間進化の特徴を平均場モデルで再現:
- ・時空間進化パターン(対流層中部から上下方向に伝搬)→α効果駆動型のダイナモ波の伝搬
- •パターンだけではなく、磁場の振幅と反転周期 (~ 乱流磁気拡散時間) も定量的に一致.
- B<sub>x &</sub> B<sub>y</sub>の間の位相のズレ π/2も定量的に再現. 反転周期は乱流磁気拡散時間程度.

→ 激しい対流そのもの (乱流α効果) が大局的ダイナモを担う.

## 2. 回転成層対流によるダイナモ ~ 極性反転周期を決める物理と表面活動現象との繋がり~

Masada & Sano (2015a) in prep.

★ parameter study
(a). 計算ボックス幅
(b). 磁気拡散率
(c). 放射層の厚み
(d). 冷却層の厚み

パラメータ依存性から物理を理解する



極性反転周期のスケーリング則 (c.f, Masada & Sano 2015 in prep.)



★スケーリング則(1): \* d<sub>RZ,t</sub>:表面冷却層の厚み
 *τ*<sub>cyc</sub> = *τ*<sub>diff</sub> 【*τ*<sub>diff</sub> = 2d<sub>RZ,t</sub>*W*/η<sub>0</sub> (~ 微視的磁気拡散時間)】
 →表面冷却層(対流安定)の磁気拡散時間と関連!!
 ★スケーリング則(2):
 *τ*<sub>cyc</sub> ∝ *τ*<sub>Alf</sub> 【*τ*<sub>Alf</sub> = d<sub>RZ,t</sub>/V<sub>A</sub> (Alfven横断時間)】



## ダイナモ極性反転の定性描像(1)





 $\langle B_y \rangle_v$  $\begin{array}{c} 0.03 \\ 0.02 \\ 0.01 \end{array}$  $B_{y}$  $|B_x\rangle_{\mathrm{v}},$  $-0.01 \\ -0.02 \\ -0.03$  $B_x$ 2 3 6 5  $t/\tau_{\rm diff}$ see MS14b  $\tau_{\rm cyc} = \tau_{\rm diff,t} \sim d_{\rm cz}^2 / \langle \eta_{\rm t} \rangle_{\rm cz}$  $\langle \eta_{\rm t} \rangle_{\rm cz}$ ・・対流層の乱流磁気拡散. **d**<sub>cz</sub>・・・対流層の厚み (亚均磁坦の非線形バックリアクションも考慮) d 1.2 1.6 (0)

## ダイナモ極性反転の定性描像(2)





## 3. 議論

### ~ 緯度方向の磁場のマイグレーションの起源と現実の太陽への拡張 ~



磁気ヘリシティロスの別ルート

★恒星では表面と赤道面を介した南北半球間の磁気ヘリシティ損失の可能性.



緯度方向への磁場のマイグレーション

#### **★テストモデル:磁場の境界条件を変更**

\* upper : Open B.C., bottom : Closed B.C. \* horizontal : Periodic B.C.



\* upper : Open B.C., bottom : Closed B.C.
\* y : Periodic B.C. x : Open & Closed B.Cs.



動径方向に加えて緯度方向のマイグレーション(ただし極向き)



緯度方向への磁場のマイグレーション

太陽ではB<sub>r</sub> & B<sub>θ</sub>が赤道反対称. 一方で、B<sub>θ</sub> は赤道対称 = 赤道が開放境界の役割.



・球殻系でのダイナモでは赤道での磁気ヘリシティロス(Mitra+10).

・グローバルな効果でα効果駆動型のダイナモ波は緯度方向に伝搬する.

0≤x≤4はDNSの結果.-4≤x≤0はその結果の $B_{\phi}$ の極性を反転させたもの.



より現実的な太陽内部構造モデルへの拡張 (Masada & Sano 2015b)



## まとめ

#### \*太陽黒点と太陽蝶形図の起源の解明へ向けて

- 太陽ダイナモは天体乱流研究のプロトタイプ.
- 2つの基本的ダイナモ効果:α効果とΩ効果.
- Ω 効果の存在しない対流ダイナモ計算.
- •大局的磁場の生成と周期的極性反転を発見.
- 平均場モデルでα効果の存在を定量的に実証.
- 2つのスケーリング則の発見:τ<sub>cyc</sub> ∝ τ<sub>diff</sub>, τ<sub>Alfven</sub>
- 反転周期は上部安定層の物理と深い関わり.
- ダイナモと彩層・コロナ加熱との繋がりを示唆.
- 緯度方向の磁気ヘリシティロスが緯度方向の
   マイグレーションを生む



#### 彩層・コロナ加熱問題 ≓ 太陽ダイナモ問題



## 天体乱流研究への応用① ~降着円盤ダイナモとの関連~

Shi et al. (2010)



- ・α効果によるダイナモは元々は降着円盤で調べられてきた (Baryshnikova & Shukurov 1987).
- ・赤道面上下で運動学的ヘリシティが逆転.
- ・赤道面を介した磁気ヘリシティロスが存在.
- ・Ω機構が無くても、振動型のダイナモ解が得られる.
- ・降着円盤シミュレーションで見られる蝶形図(上図)も 実は磁気浮上起源ではなくダイナモ波パターン? (see Gressel 2010)



天体乱流研究への応用② ~太陽コロナ加熱と超新星爆発機構との関連~



・熱源から離れるのに温度は上昇:不思議な状態 → コロナ加熱問題

- ・密度の高いところで運動エネ → 磁気エネ (ダイナモ問題) 【磁場の生成】
- ・密度の低いところで磁気エネ → 内部エネ (コロナ加熱問題)【磁場の散逸】

## 天体乱流研究への応用② ~太陽コロナ加熱と超新星爆発機構との関連~

![](_page_22_Figure_1.jpeg)

![](_page_22_Figure_2.jpeg)

**%** PNS has smaller *R*a, *R*e than those of the Sun:

- $-Ra = 10^{10} (Ra_{sun} = 10^{15})$  (c.f., Thompson & Duncan 1993)  $-Re_{M} = 10^{17} (Re_{Msun} = 10^{13})$
- $-Re = 10^4 (Re_{sun} = 10^{12})$

(太陽ダイナモよりもPNS dynamoの方が現実的な計算が可能)

**%** The magnetic field sustainable by the PNS dynamo:  $B = (4\pi\rho v_{cv}^2) \sim 10^{15} \text{ G } (\rho/10^{13} \text{ [g/cm}^3])(v_{cv}/10^8 \text{ [cm/s]})^2$   $\tau_{cv} = L_{MLT}/v_{cv} = 10^4 \sim 10^5/10^8 = 0.1 \sim 1 \text{ msec}$ (sufficiently enough time for the convective dynamo)