

# 磁場閉じ込めプラズマの乱流時空間ダイナミクス解析

日大生産工 ○中村 美香(学部)

日大生産工 佐々木 真

## 1. 研究の背景・目的

乱流は細胞内から宇宙まで様々な空間スケールで見ることができる。特に惑星のような回転系や磁場閉じ込めプラズマでは、準二次元的な乱流が発達し、その非線形過程によって活発な構造形成が引き起こされる。例えば、木星における縞模様<sup>1)</sup>やプラズマにおける帯状流などがある。

核融合プラズマにおける帯状流は、プラズマの性能を支配しており、その特性の理解は、喫緊の課題である。近年、帯状流と共存する長寿命なコヒーレントな渦構造が観測され<sup>2,3)</sup>、木星における大赤斑との関係も議論されている。

本研究では、簡約流体モデルを用い、帯状流と形式の乱流シミュレーションを行い、長寿命コヒーレント渦の励起条件や特性を明らかにする。

## 2. 簡約流体モデル

本研究は、長谷川-若谷方程式(HW)と呼ばれるドリフト型乱流の非線形過程を記述するモデルを用いる。静電ポテンシャル、密度の2場から構成される非線形連立微分方程式である。<sup>4)</sup> HWモデルを二次元スラブ系において直接数値計算する。シミュレーションの座標系はFig.1に示す通りである。磁場をz方向、密度勾配をx方向に選んでいる。このときドリフト波はy方向に伝搬する。

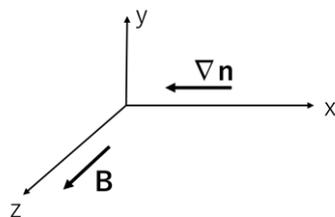


Fig.1 HWモデルで用いる座標系

HWの条件を変化させることで、帯状流の生成とコヒーレント渦を含む乱流の実空間構造の関係をみいだすことができる。なお、HWモデルの物理量は時間をイオンジャイロ周期、空

間はイオンジャイロ半径、速度は反磁性ドリフト速度で規格化をされている。

以下では、電子の拡散係数 $\alpha$ を変化させたときの乱流乱流と帯状流の挙動について述べる。

## 3. 乱流と帯状流の挙動

HWモデルの非線形シミュレーションを行うことで、静電ポテンシャル、密度、渦度の時間発展を得ることができる。この3つは、密度勾配と $\alpha$ によって制御されており、条件を変えることで、様々な乱流状態を得ることができる。

HWモデルの長時間シミュレーションを実行し、非線形飽和状態を得た。飽和状態における渦度のスナップショットをFig.2に示す。

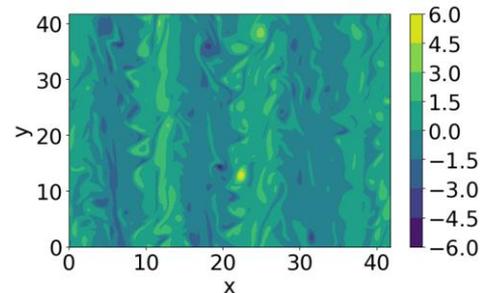


Fig.2 渦度の様子( $\alpha=1$ )

Fig.2より、y方向に層状の構造が見えるが、これが帯状流に対応している。また、y方向に有限な波数を持つ揺らぎも見ることができる。これがドリフト乱流に対応する。

次に、渦度のフーリエモードでのエネルギーの時間発展と飽和状態における波数スペクトルをFig.3に示す。

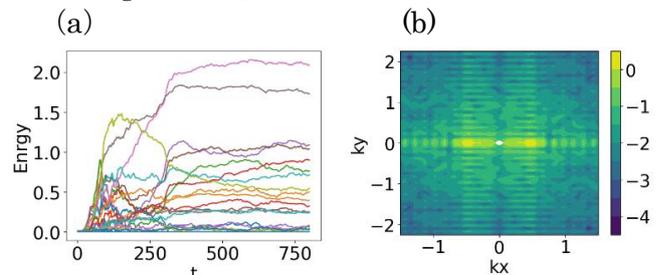


Fig.3(a) フーリエモードエネルギーの時間発展

(b) 飽和状態における波数スペクトル

Analysis of spatio-temporal dynamics of turbulence in magnetically confined plasma

Mika NAKAMURA and Makoto SASAKI

ただし、Fig3の  $k_x$ 、 $k_y$  はそれぞれ  $x$ 、 $y$  方向の波数である。Fig3(a)より、フーリエモードエネルギーは  $0 < t < 150$  で指数関数的に成長し、 $t > 375$  で飽和していることが分かる。 $k_y$  方向で0が強く、 $k_x$  方向では0.5付近が強い。 $k_y = 0$  は帯状流成分に対応する。

次に、乱流と帯状流の関係性について Fig.4に  $\alpha = 1$ 、Fig.5に  $\alpha = 0.1$  の渦度の乱流成分と帯状流のスナップショットを図に示す。ただし、乱流成分と帯状流成分は以下に示す式で分けることができる。

$$\text{帯状流成分 } \langle \zeta \rangle = 1/L_y \int \zeta \, dy \quad (1)$$

$$\text{乱流成分 } \tilde{\zeta} = \zeta - \langle \zeta \rangle \quad (2)$$

ここで、 $\zeta$  は渦度、 $L_y$  は  $y$  方向の波長を示す。

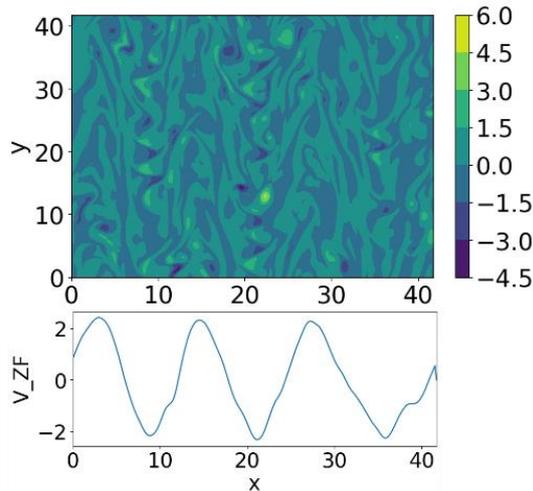


Fig.4 渦度  $\alpha = 1$   $t = 800$  における乱流(上図)と帯状流(下図)のスナップショット

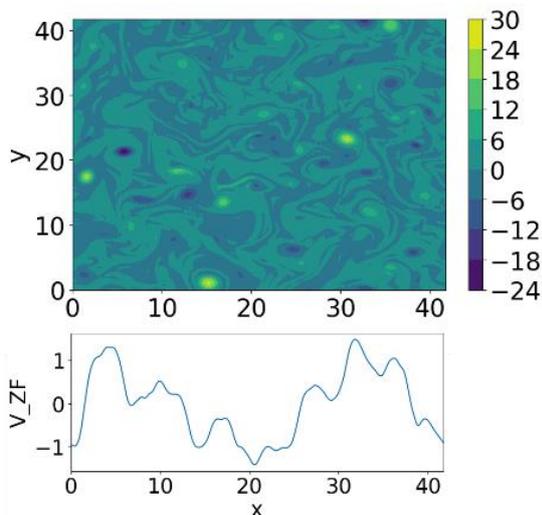


Fig.5 渦度  $\alpha = 0.1$   $t = 800$  における乱流(上図)と帯状流(下図)のスナップショット

Fig.4 と 5 の上部に示しているカラー等高線が乱流成分、下部が帯状流の速度である。帯状流の速度は  $E \times B$  ドリフトを仮定し、静電ポテンシャルの帯状流成分を  $x$  方向で微分することで求めている。帯状流の振幅は、 $\alpha = 1$  では2程度、 $\alpha = 0.1$  では1程度となり、 $\alpha$  が大きいケースの方が帯状流のもつ運動エネルギーが大きい。一方で、帯状流の波長を見ると、 $\alpha = 0.1$  のケースの方が短波長な成分をもっており、シアの効果は  $\alpha = 0.1$  の方が大きい可能性がある。ただし、この短波長成分は長い寿命を持つわけではないことに注意が必要である。一方で、乱流成分を見ると、 $\alpha = 0.1$  では、空間的に存在したコヒーレントな渦構造が形成されていることが分かる。渦構造は、 $\alpha = 1$  のケースに比べ5倍程度の大振幅を持っている。発表では、 $\alpha$  をスキャンしたときのコヒーレント渦の大きさや数、寿命に関する特性について詳述する。

#### 4. まとめ

HWモデルを用いて、帯状流と乱流の相互作用の素過程を調査した。HWモデルの長時間シミュレーションを実施し、非線形飽和状態を得た。電子拡散係数  $\alpha$  を変化させることで、複数の乱流状態を得ることができた。帯状流の振幅は、 $\alpha$  が大きいケースの方が帯状流のもつ運動エネルギーが大きく、乱流成分を見ると、 $\alpha = 0.1$  と小さい方が、空間的に存在したコヒーレントな渦構造が形成されていることが分かった。

#### 参考文献

- 1) Y.kaspi, et.al, Space Sci Rev(2020)216:84
- 2) H.Arakawa, M.sasaki, et.al, Sci. Rep. 6, 33371 (2016)
- 3) H.Arakawa, M.Sasaki, et.al, Plasma Fusim Res., 17, 131106 (2022)
- 4) R.Numata, et.al., Phys. Plasmas, 14, 102312 (2007)