

# 局所対流ダイナモシミュレーション

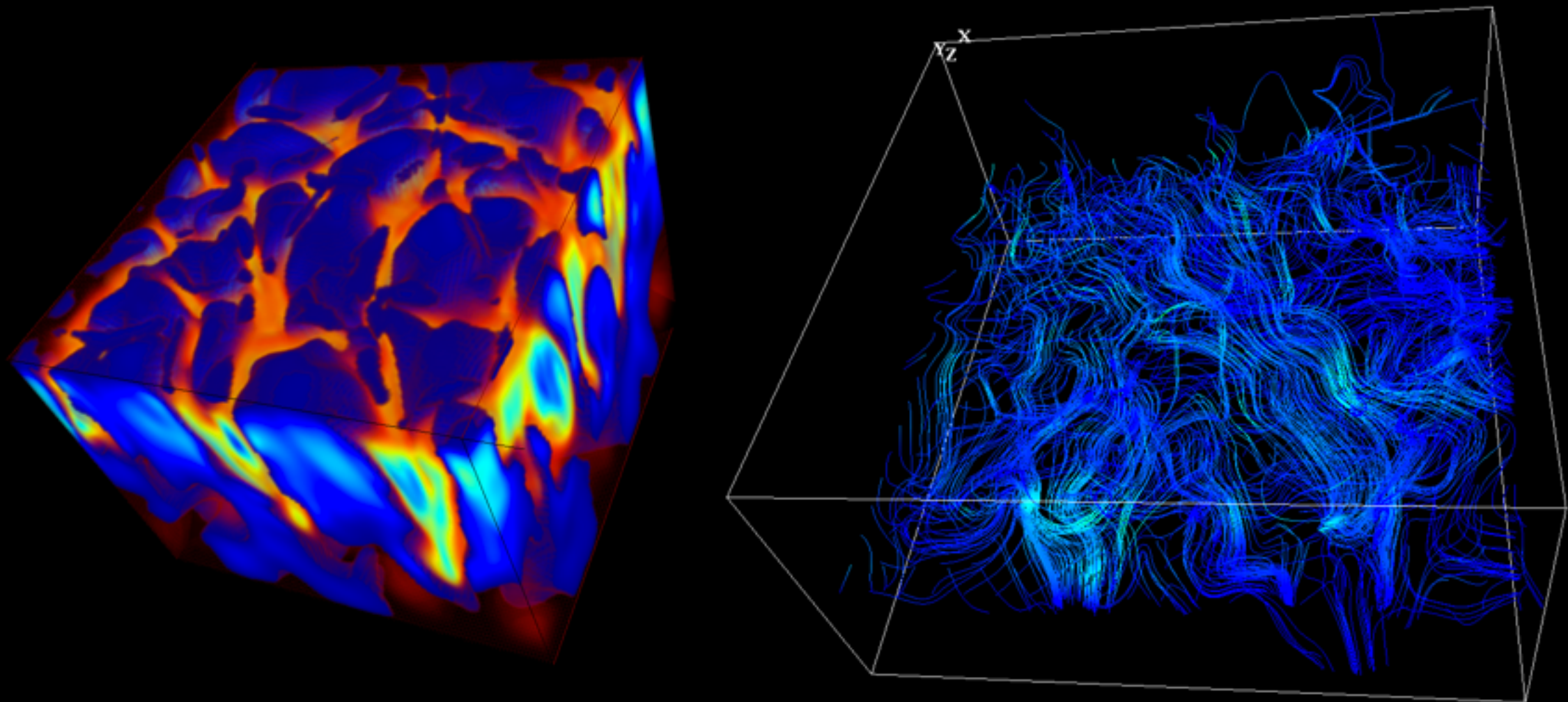
- 大局的磁場の周期変動とその物理機構 -

(Masada & Sano 2012 in prep.)

政田洋平 (神戸大学)

共同研究者：佐野孝好 (大阪大学)

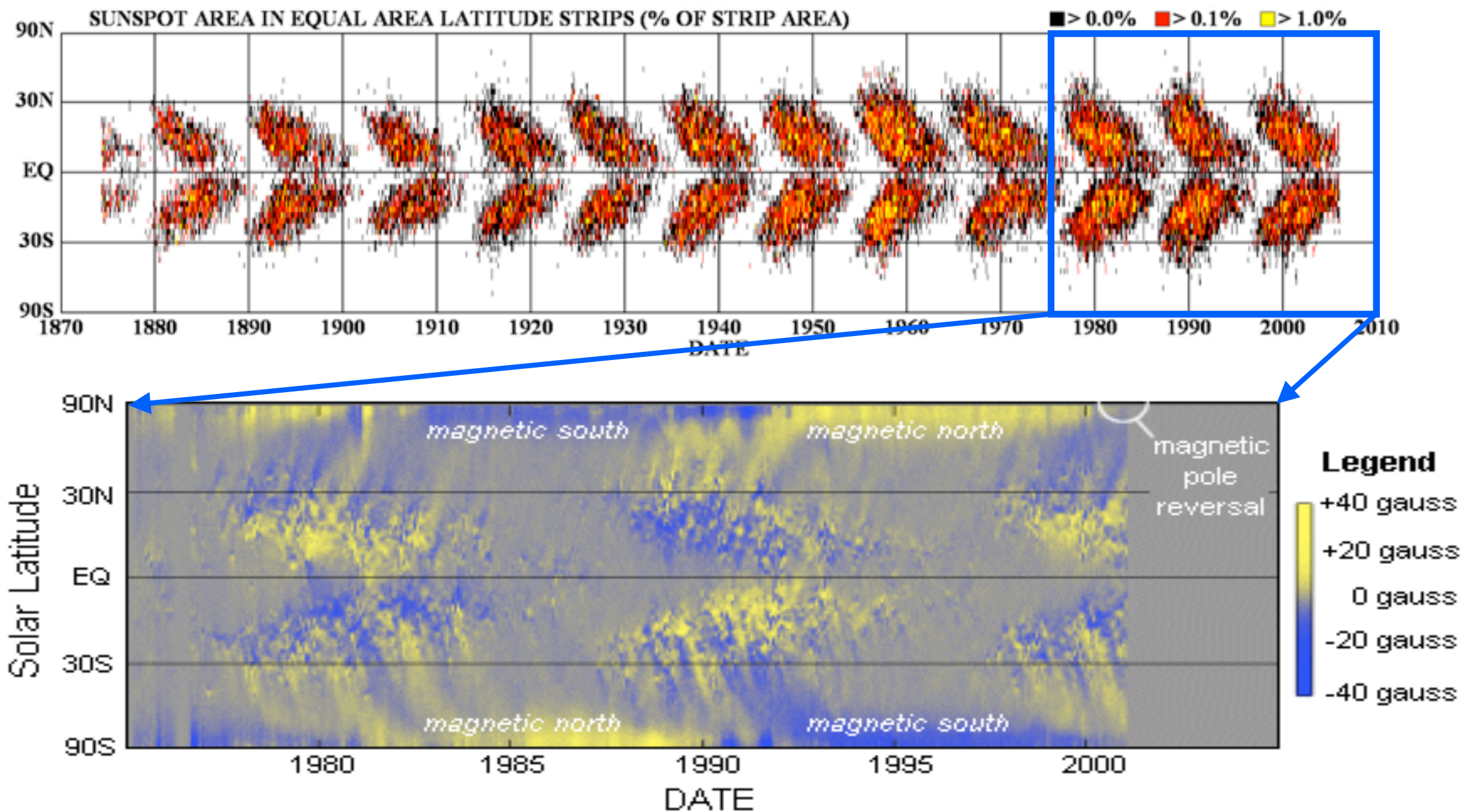
CfCA User's Meeting 2012 @NAOJ, 12 December 2012



# Cyclic Properties of Dynamo Generated Field in the Sun

## Butterfly diagram

: Time-evolution of latitudes of sunspots over several solar cycles.



バタフライダイアグラムは、ダイナモによって生成された太陽磁場の周期性が太陽表面で顕在化したもの。



# 研究の動機：太陽の周期的大局的磁場の起源

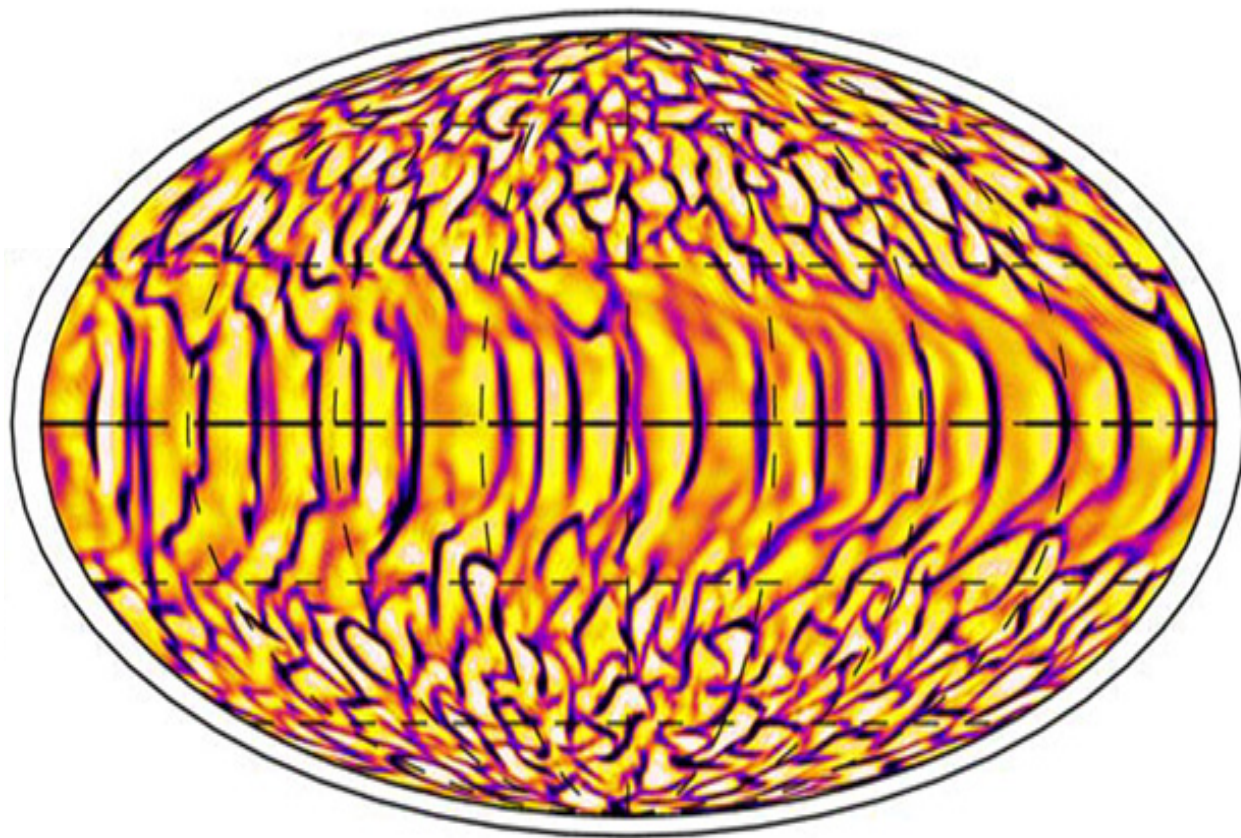
太陽ダイナモ研究はあまた行われているが・・・

■ 全球グローバル計算:

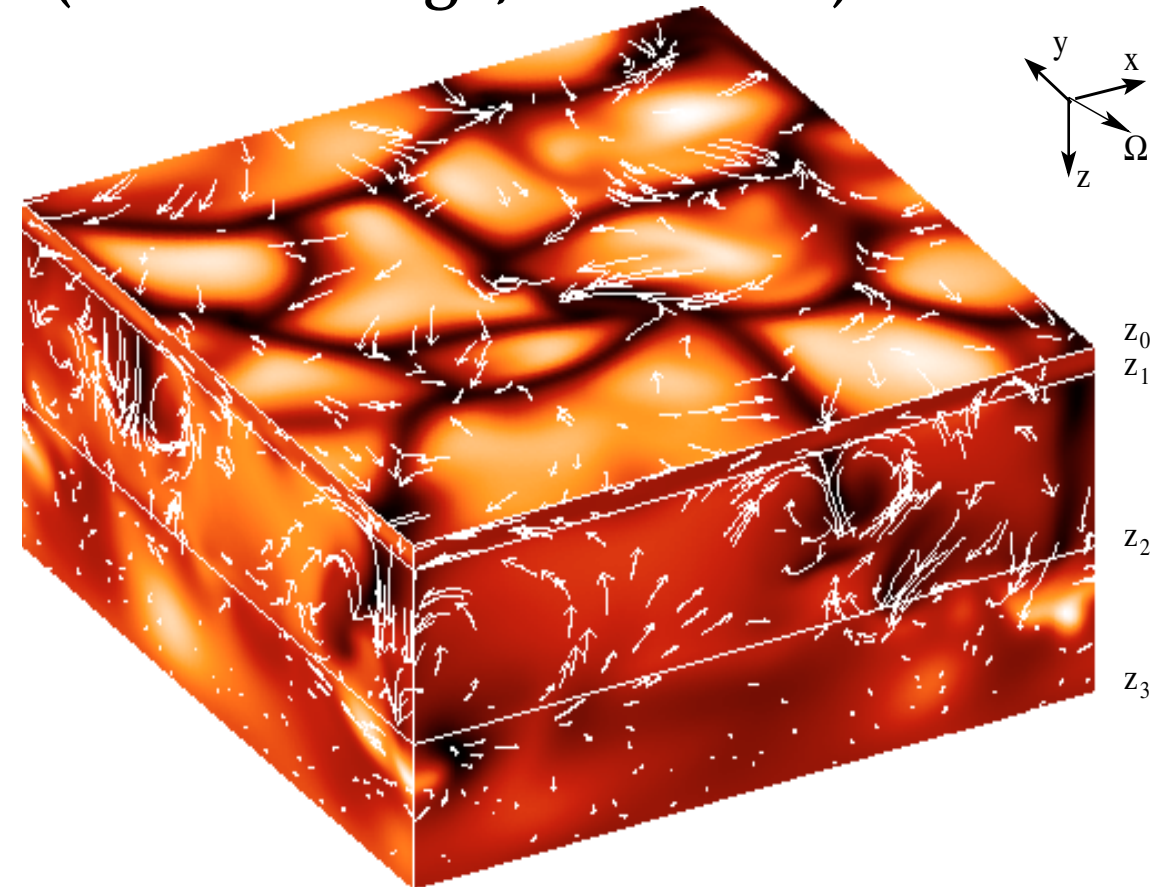
(Brun, Miesch +, Charbonneau+, Kypela+...)

■ 局所ローカル計算:

(Brandenburg+, Tobias+....)



Brown et al. 2010



Käpylä et al. 2004

乱流磁場は全球計算でも局所計算でも「比較的簡単に」生成・維持される。

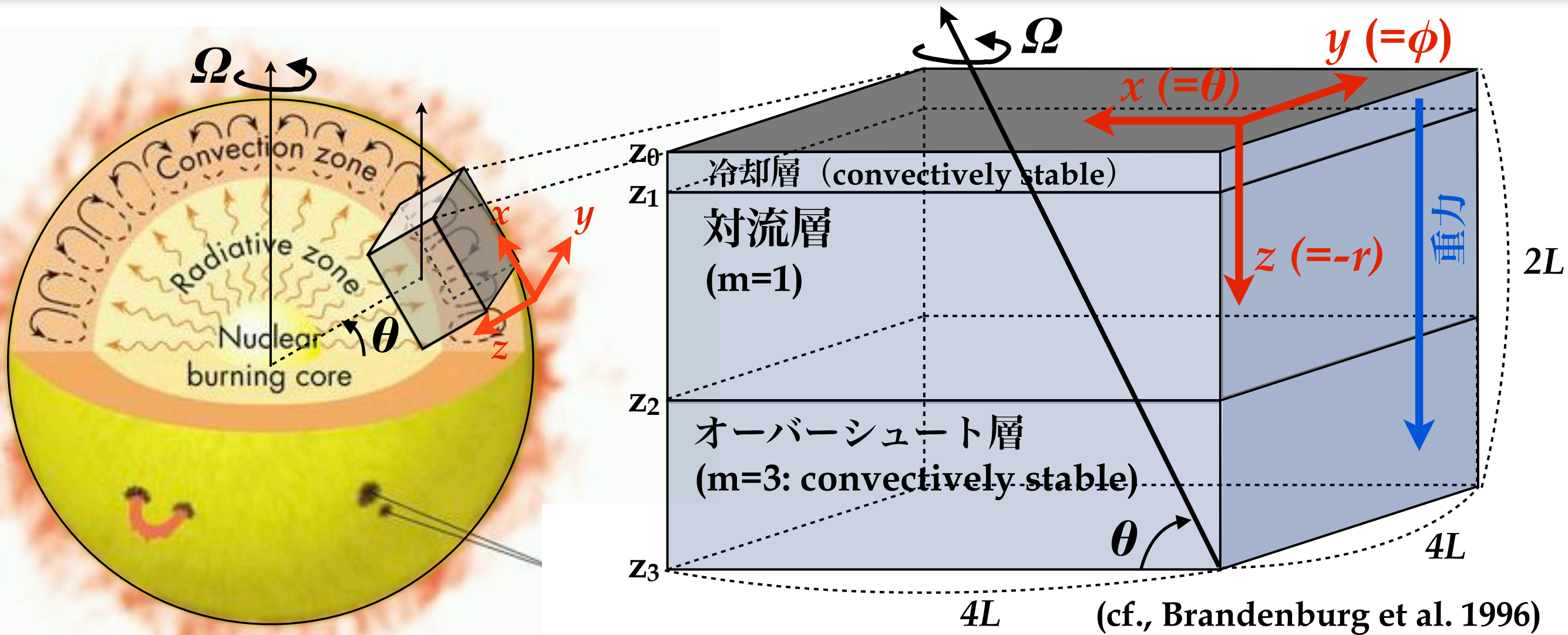
■ 太陽ダイナモシミュレーションの長年の課題：

どこで、いかにして大局的でコヒーレント磁場が作られているのか？

黒点の起源



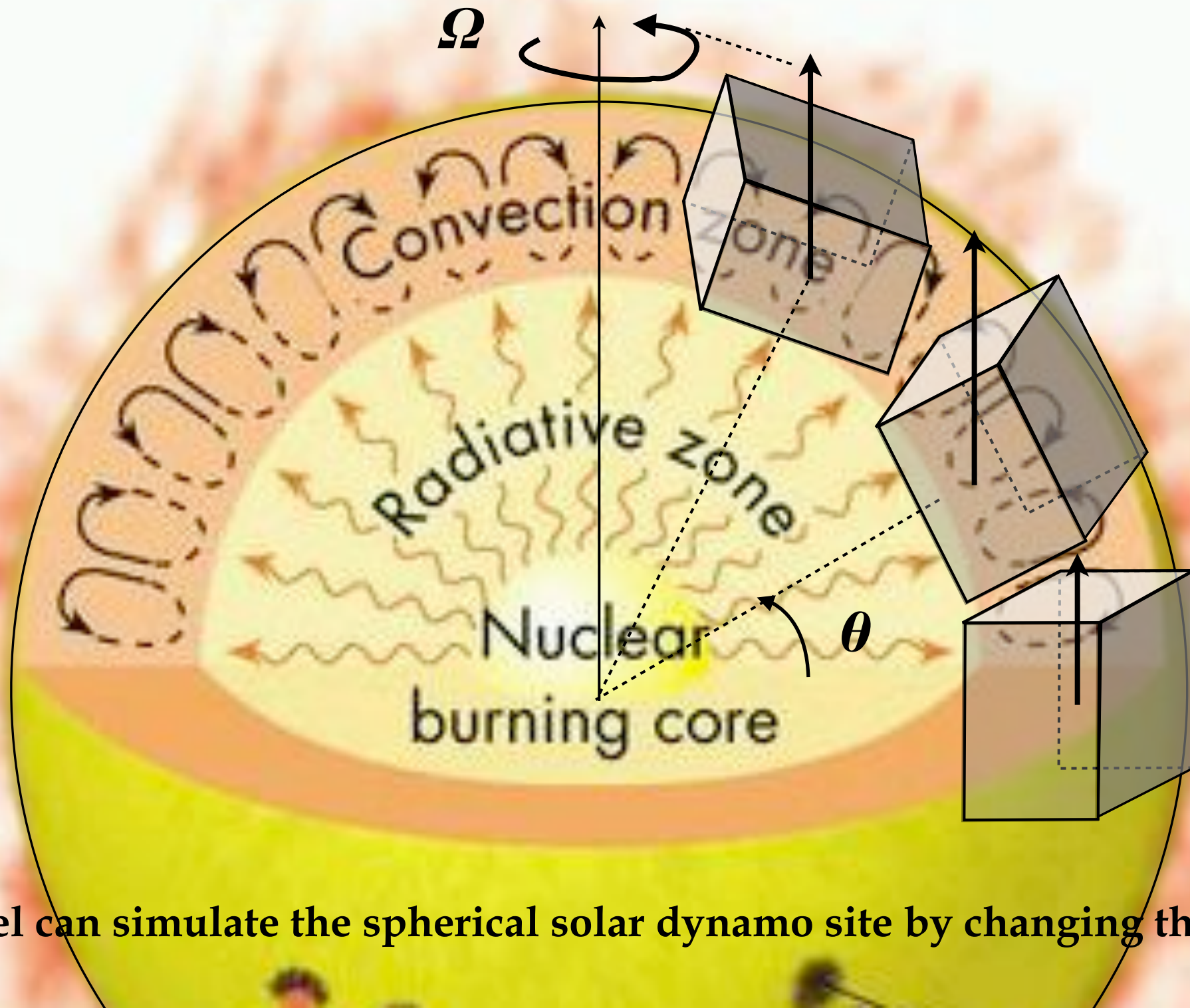
# 計算設定：Local Cartesian Box



- 圧縮性MHD方程式（回転座標系）
- 太陽内部の局所領域をカーテシアンボックスでモデル化
- 初期設定：静水圧平衡な区分的三層ポリトロープ構造  
(Top: 冷却層 + Mid :対流層 + Bottom :対流安定層)
- 特徴: 回転軸の向き (コリオリ力の働く方向) がコントロールパラメーター



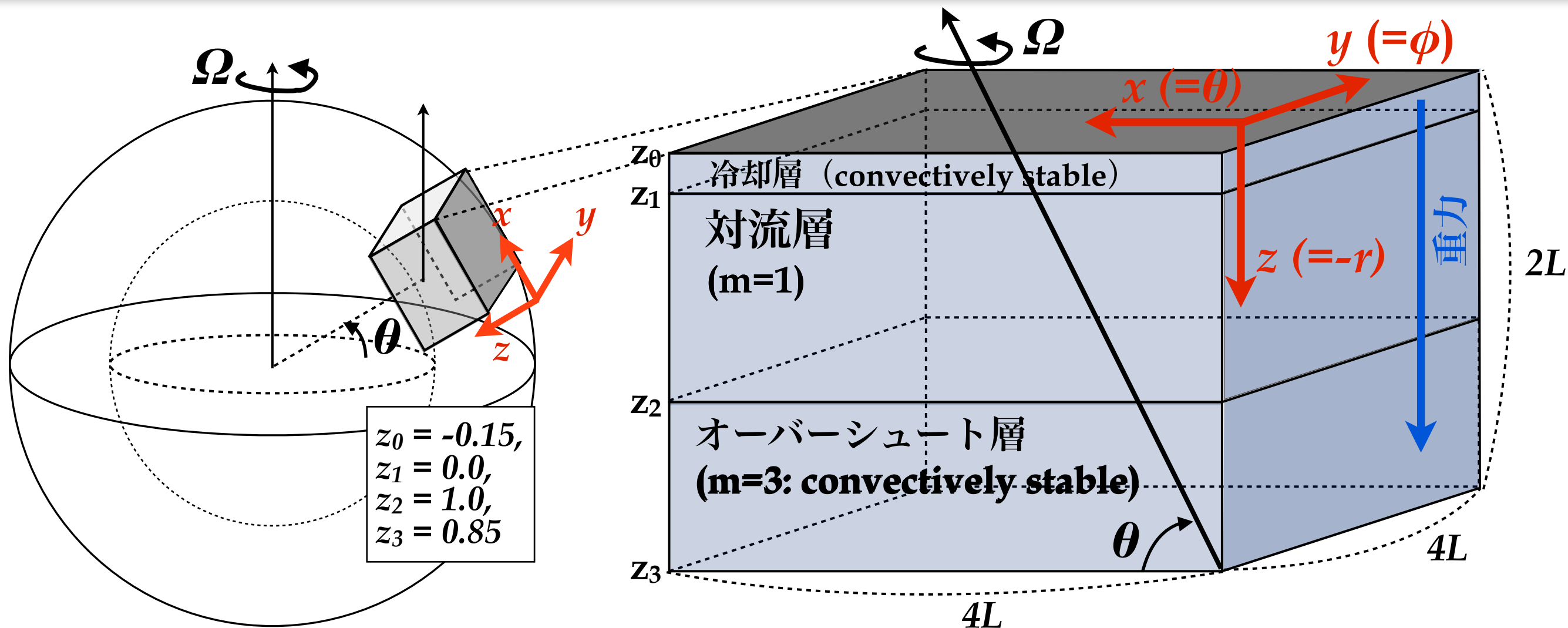
By changing the direction of the rotation axis, we can change and control the latitudinal location of the simulation box.



This model can simulate the spherical solar dynamo site by changing the rotation axis.



# 計算設定：Local Cartesian Box



- Horizontal B.C.: Periodic B.C.
- Vertical B.C.:
  - stress free B.C. for  $V$  at  $z_0$  and  $z_3$
  - open field B.C. for  $B$  @  $z_0$
  - perfect conductor B.C. for  $B$  @  $z_3$
  - $T = \text{const.}$  @  $z_0$
  - $\partial T / \partial z = \text{const.}$  @  $z_3$

- Numerical Scheme : Godunov CMoC-CT (c.f., Sano et al. 1998)

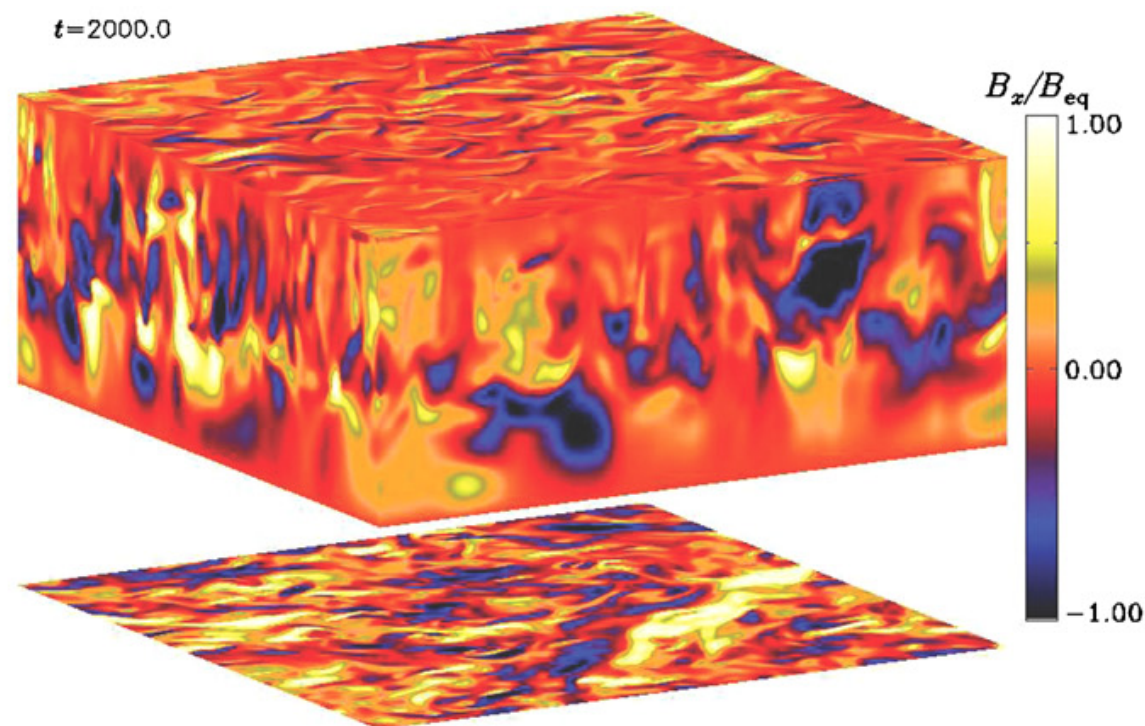
- Resolution :  $N_x \times N_y \times N_z = 256 \times 256 \times 128$

- コントロールパラメーター :
  - 拡散係数 :  $\nu, \kappa, \eta$  (fixed here)
  - 成層の強さ :  $\xi$  (fixed)
  - 緯度 :  $\theta$  角速度 :  $\Omega$

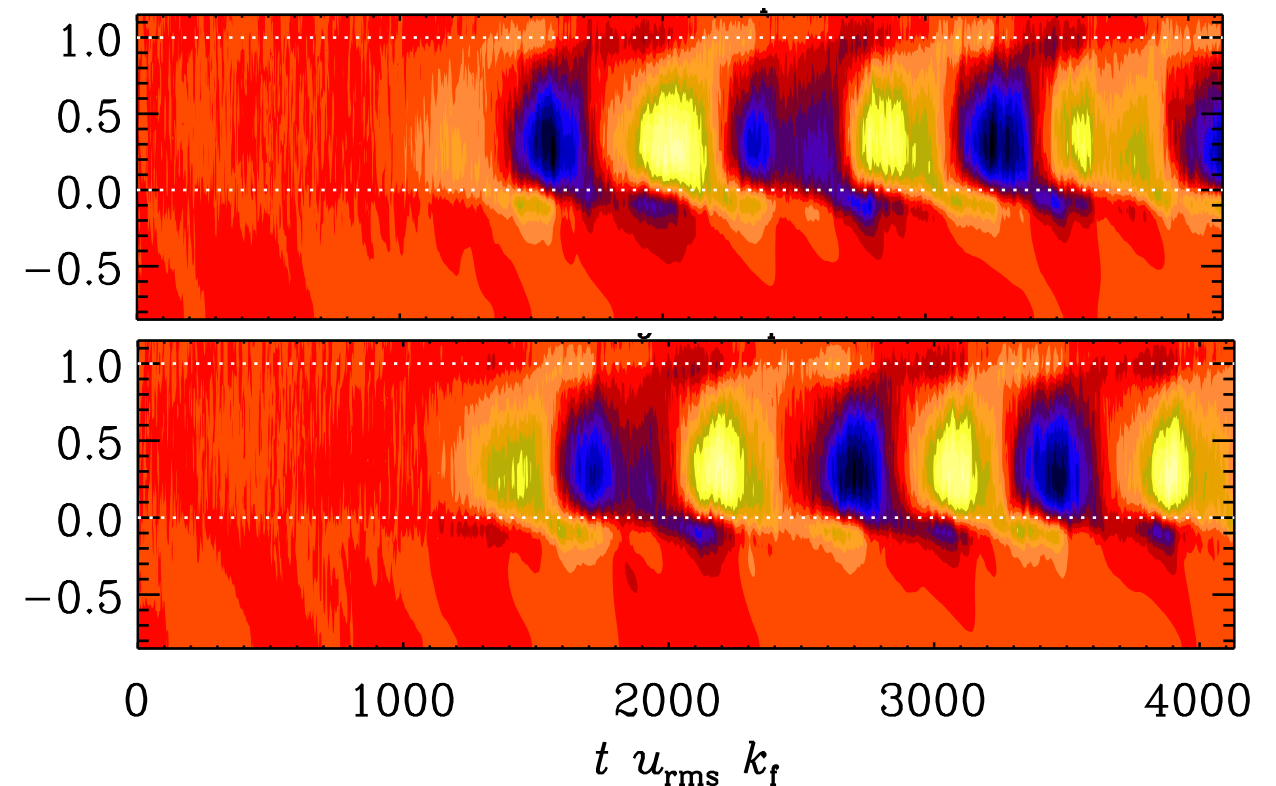


# 局所対流ダイナモシミュレーション：Current Status

## ■ Käpylä, Korpi & Brandenburg 2009



## ■ Käpylä, Mantere & Brandenburg 2011



- Käpylä et al. 2009が「局所計算での」大局的磁場生成を初めて報告.
- 大局的磁場が周期変動を示す (Käpylä et al. 2011) .
- Käpylä et al.は  $\theta=90^\circ$  の極域にしか注目していない.
- 大局的磁場の生成・周期変動メカニズムに対する十分な説明は無い.

※ 2つの疑問

- 1) 大局的磁場は他の緯度でも生成されるのか？
- 2) 大局的磁場の生成・周期変動の物理機構は？



# Convective Dynamo Simulation (Polar region model with $\theta=90^\circ$ )

( $B_y$  field at the saturated state is visualized by 3D volume rendering)

Generation of LMFs in the bottom of C.Z. and their reversals can be observed in this movie.

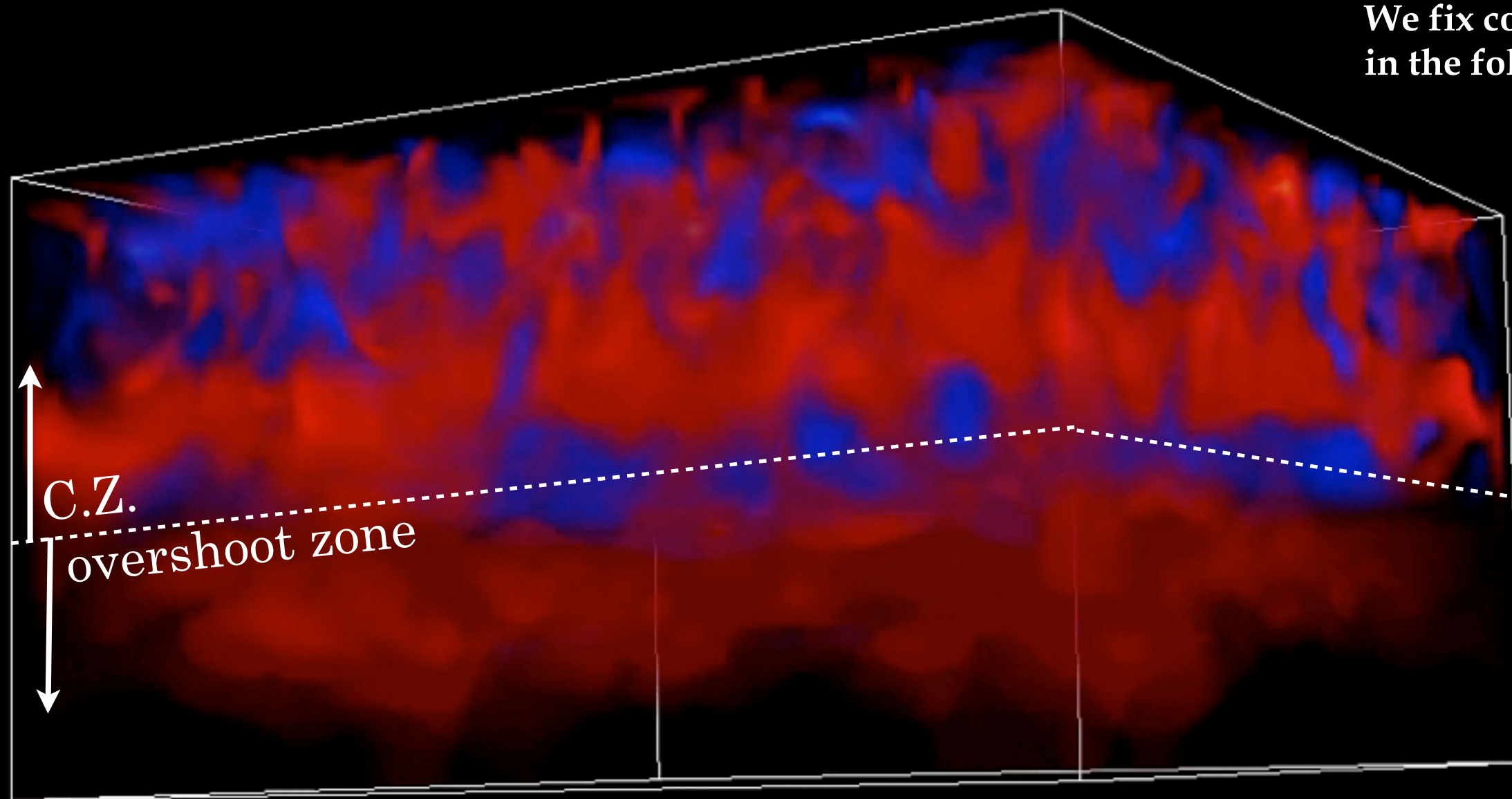
We fix control parameters in the following:

$$\begin{aligned} Pr &= 1.4 \\ Pm &= 4.0 \\ Ra &= 3.9 \times 10^6 \\ \Omega &= 0.4 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} Re &\simeq 100 \\ Rm &\simeq 400 \\ Ro &\simeq 0.025 \end{aligned}$$

(similar parameters with Kapyla's model)



**Blue:** negative  $B_y$  components  
**Red:** positive  $B_y$  components

$$\begin{aligned} (N_x, N_y, N_z) &= (256, 256, 128) \\ (L_x, L_y, L_{\text{conv}}) &= (4, 4, 1) \end{aligned}$$

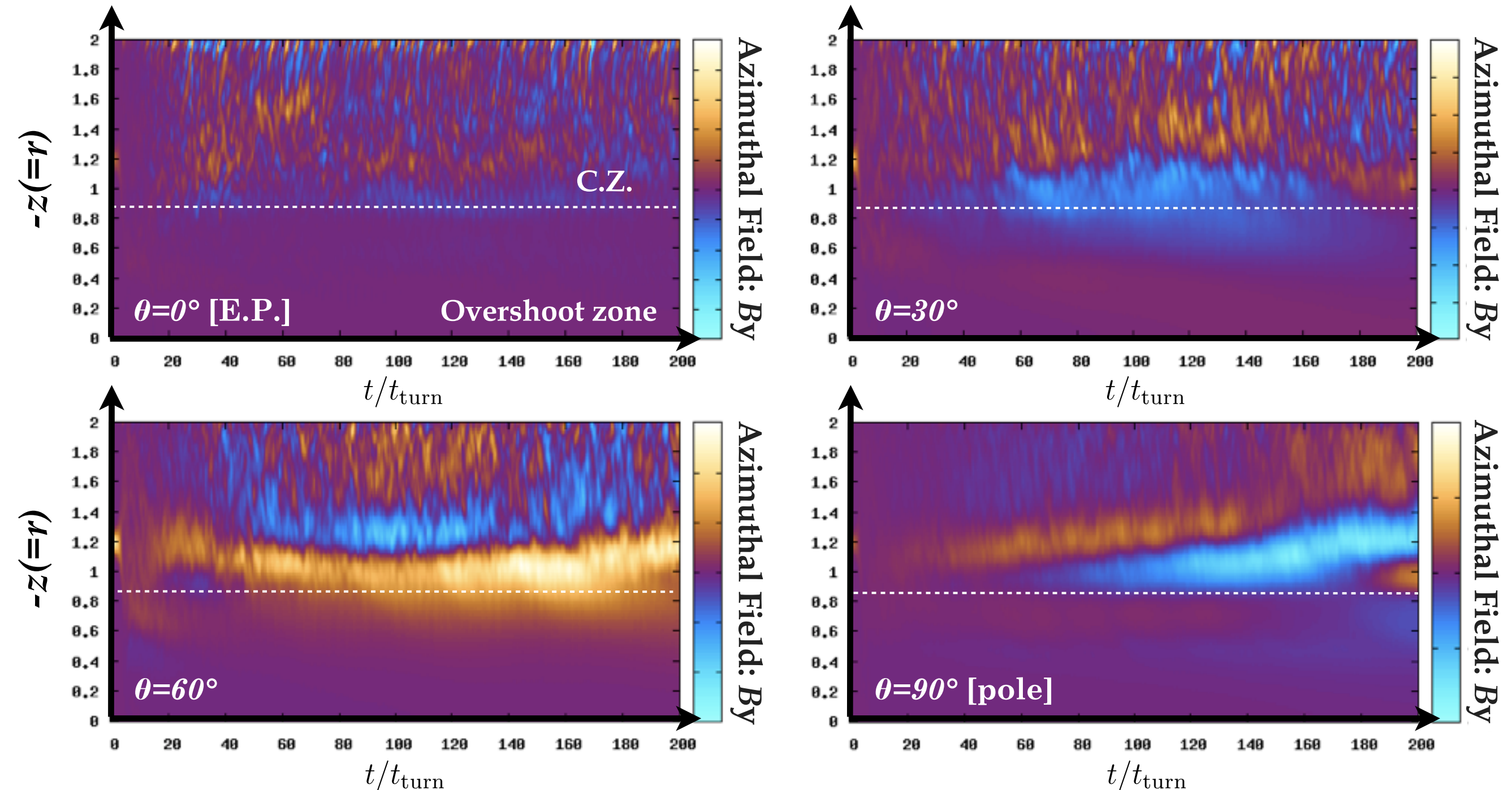
**seed: random field**

By changing the co-latitude  $\theta$ , we study the generation and cyclic variation mechanisms of LMFs in the following.

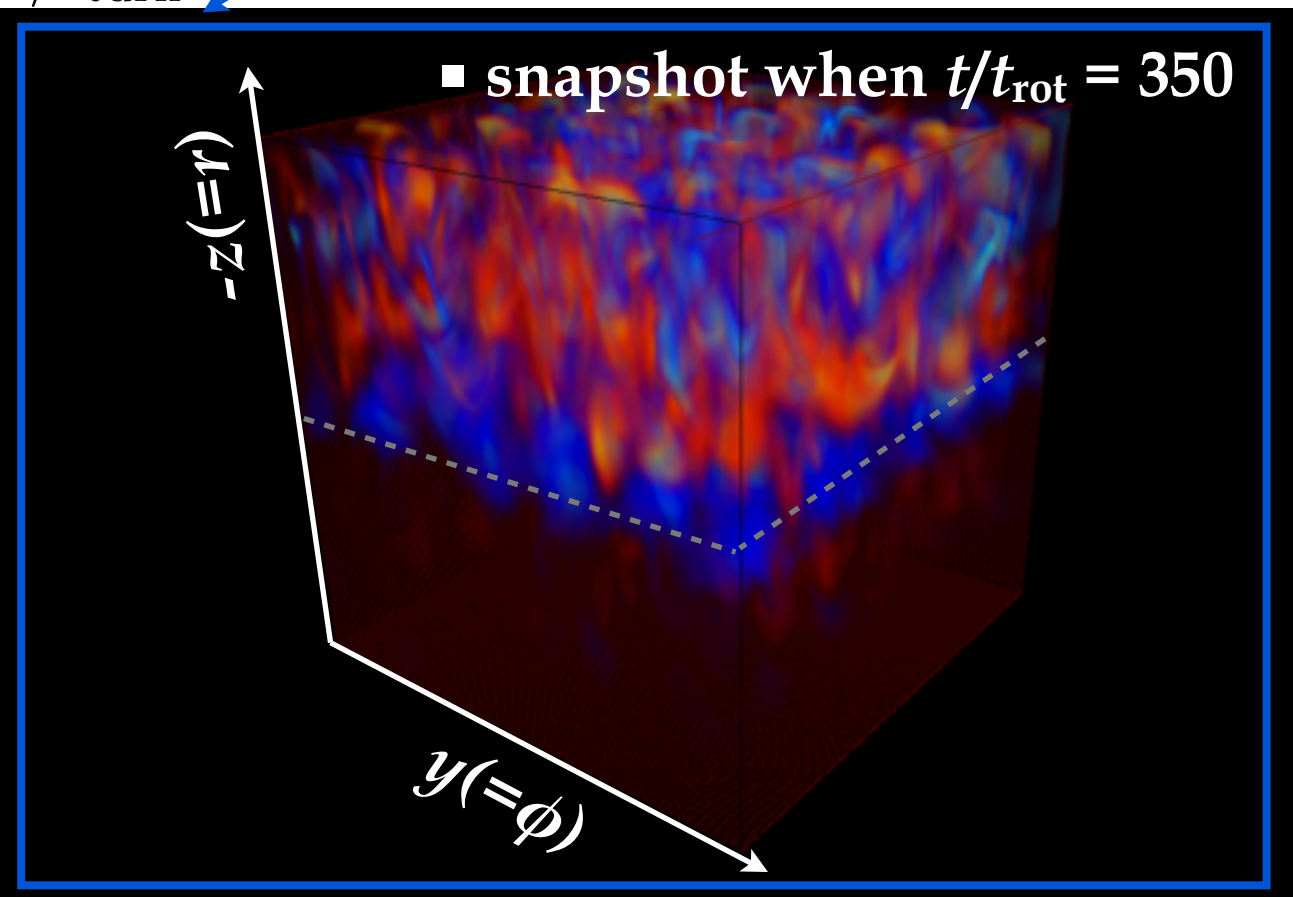
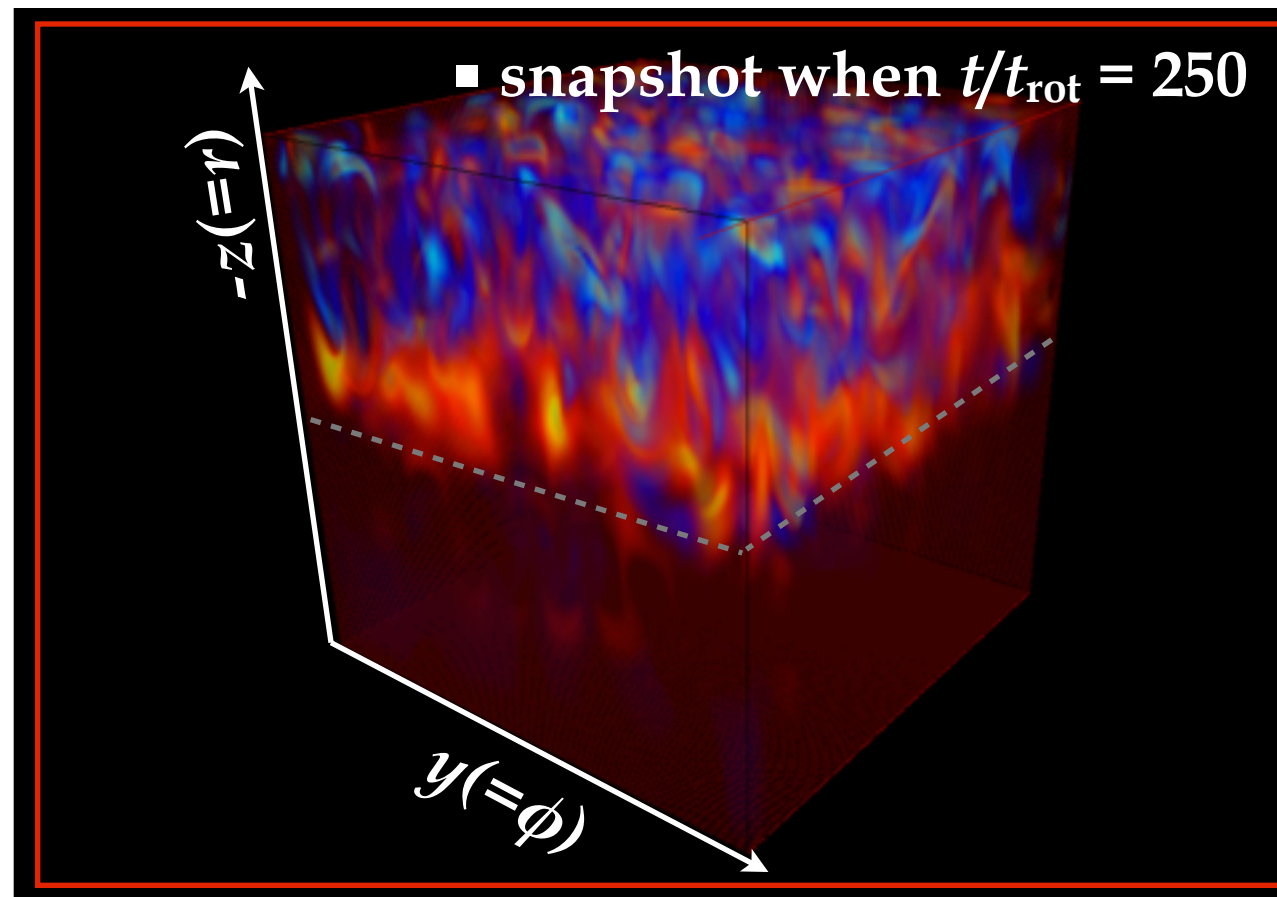
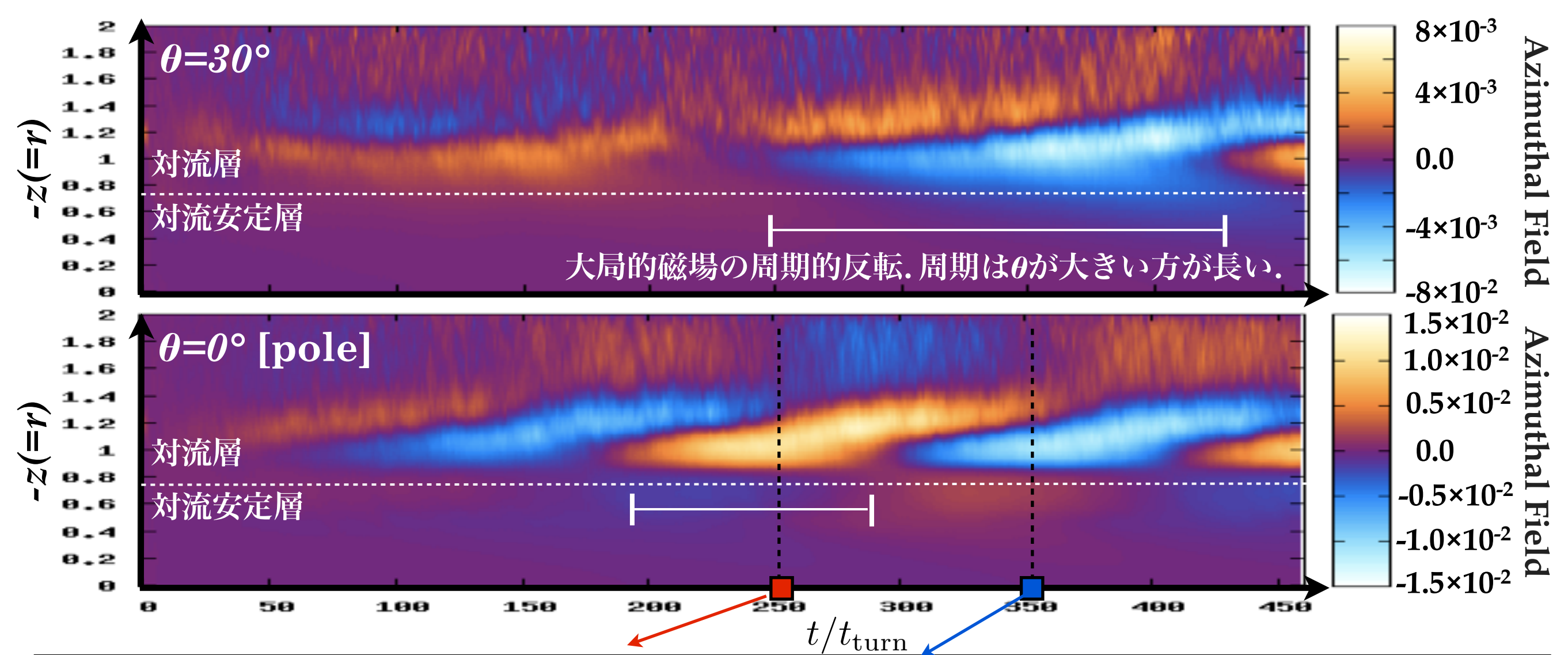


# 磁場構造の緯度( $\theta$ )依存性： Generation of Large-scale Magnetic Fields (LMFs)

- Time-evolution of horizontally averaged  $B_y$  field as a function of  $z$  (height).



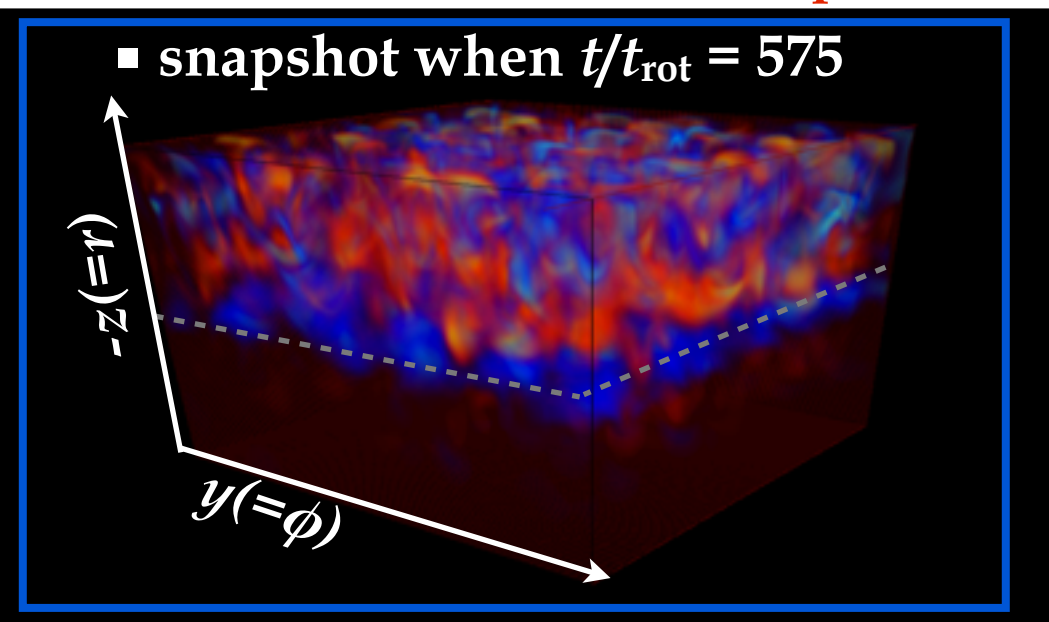
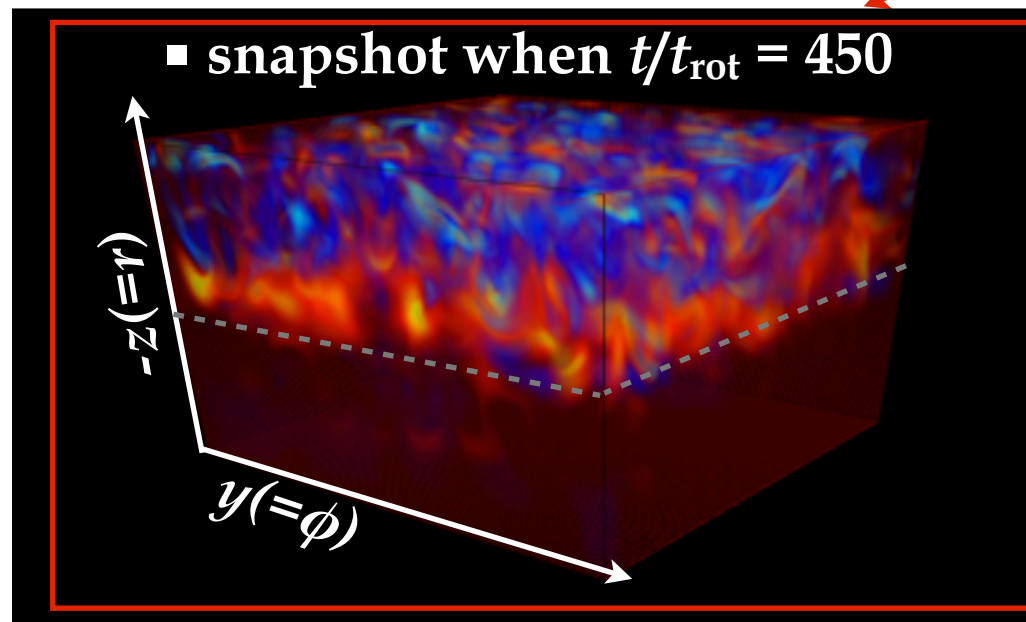
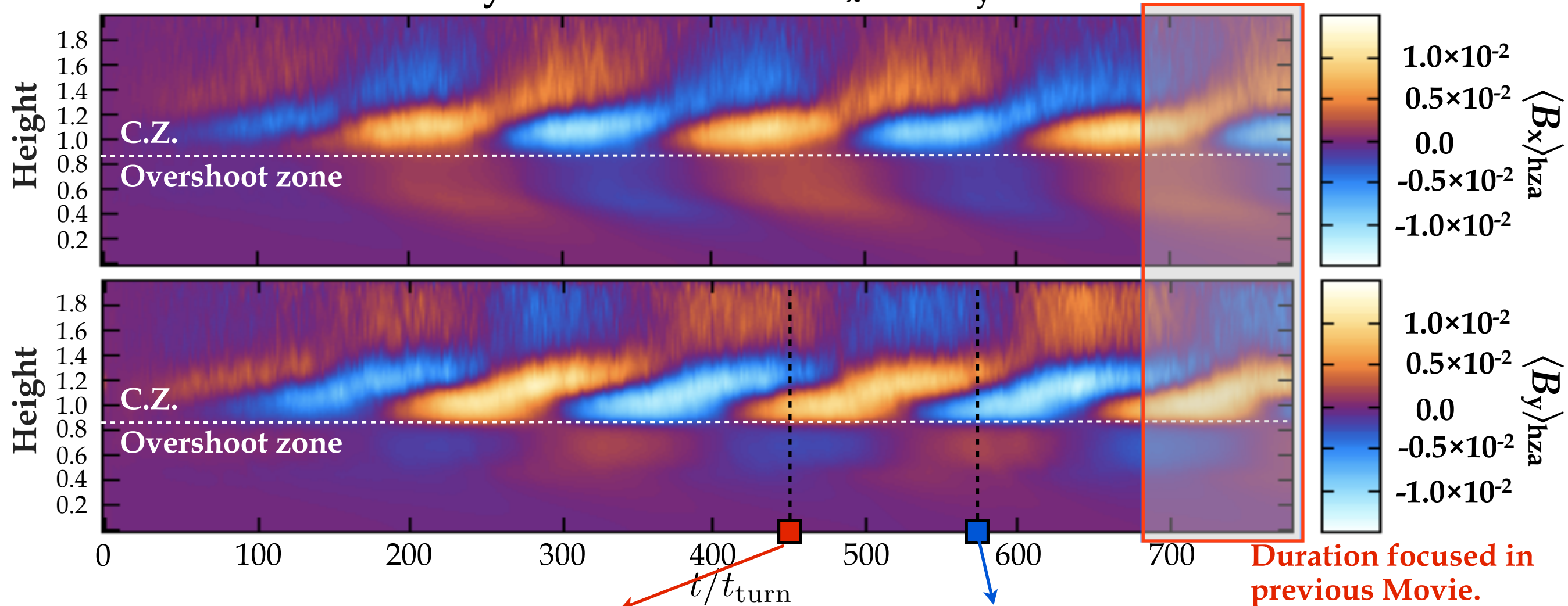
- 赤道以外の全緯度で大局的磁場が生成される。
- 大局的磁場の生成領域は対流層底部. 赤道以外の全緯度で周期変動の兆候。





# 長時間発展：磁場のサイクル変動

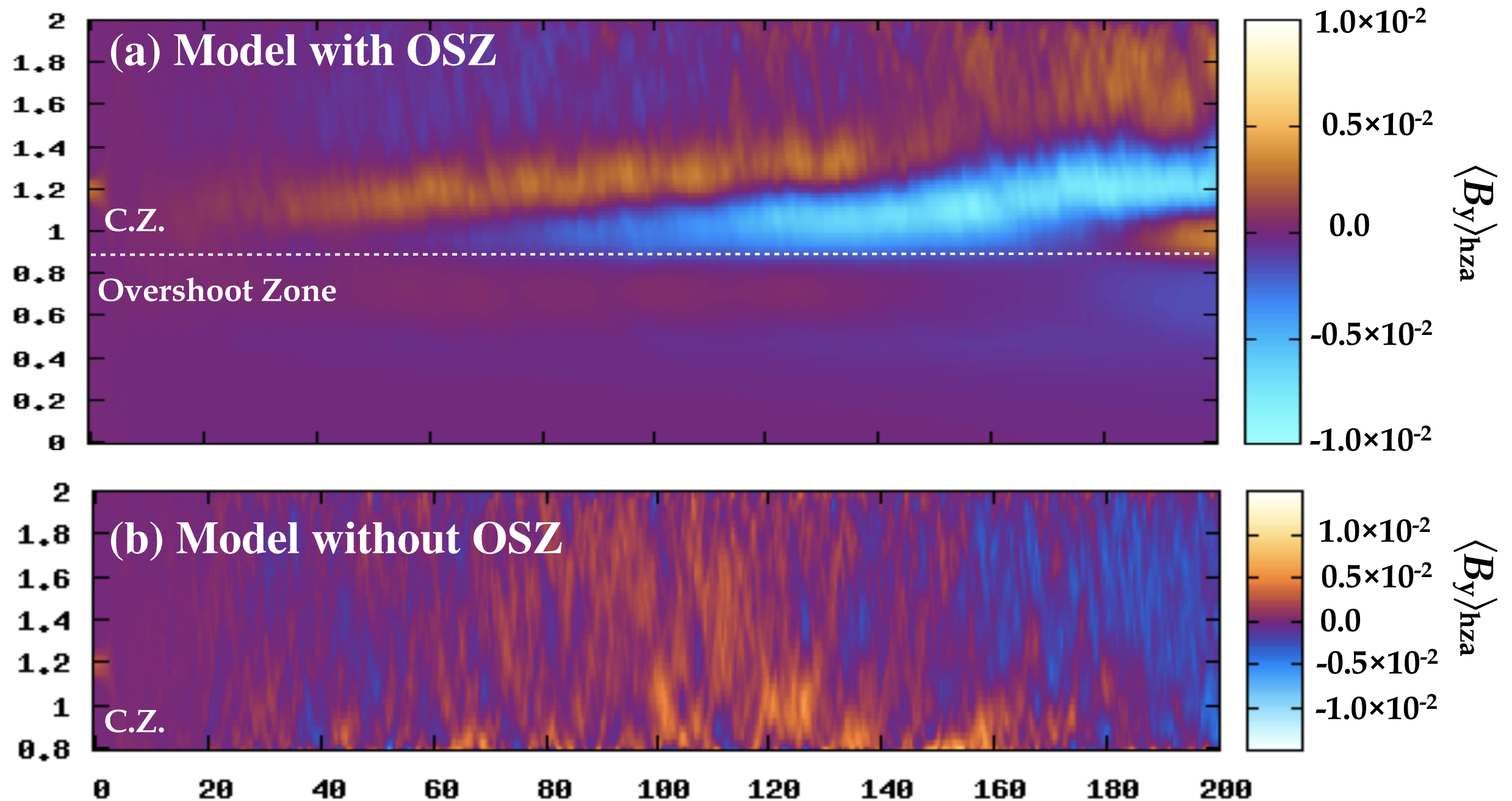
- Clear evidence of cyclic variations of  $B_x$  and  $B_y$  fields.



※ There is a phase difference of  $45^\circ$  between  $\langle B_x \rangle$  and  $\langle B_y \rangle$ .

# 対流安定層が果たす役割：対流層底部への磁場のストレージ

A Test Model with the same control parameters, but without overshoot zone.



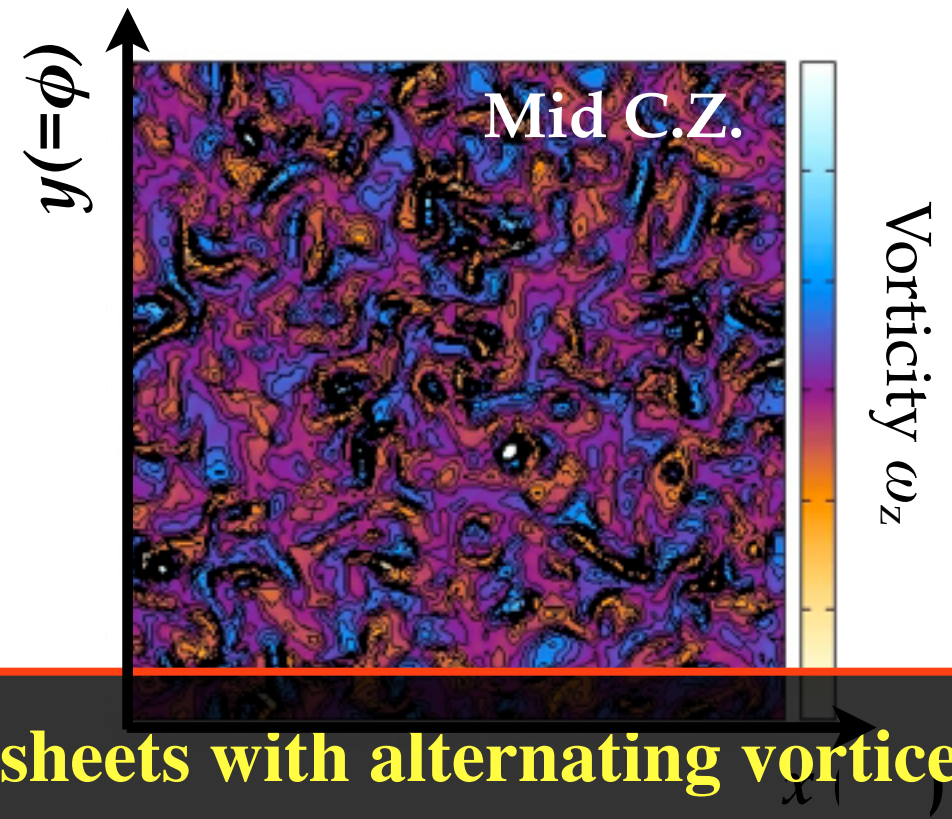
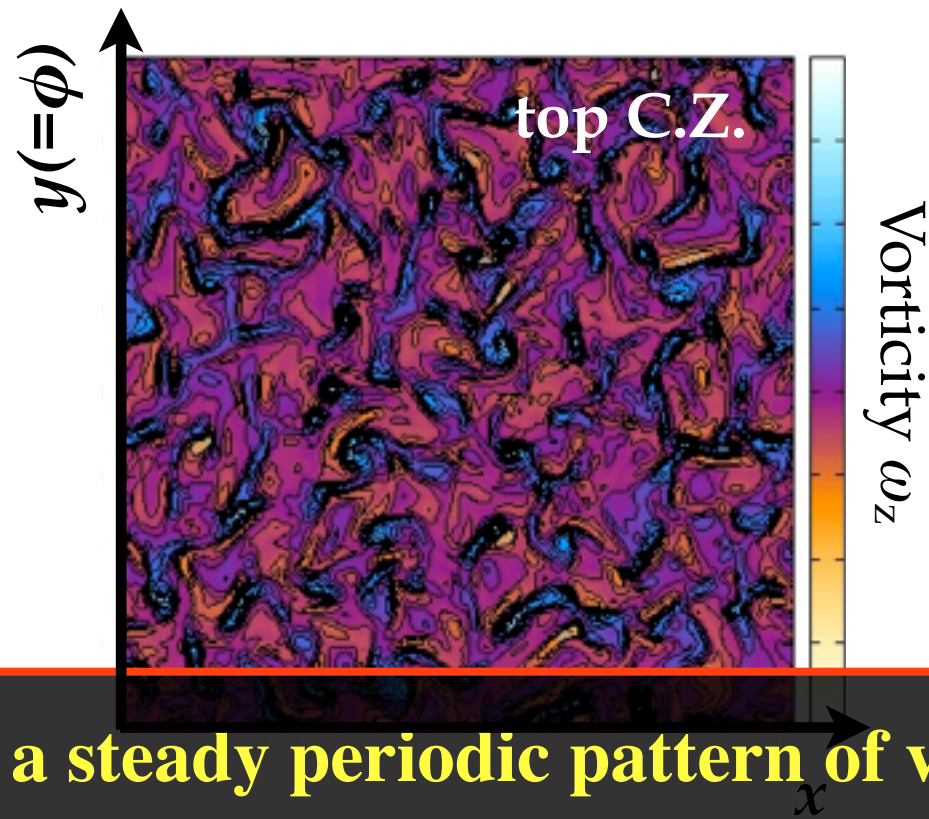
- 対流層無しの計算: 周期的な変動の兆候は示すがcoherencyは弱い。
  - 安定層の存在が対流層底部への磁場のストレージに寄与していることを示唆。
  - 境界層で何が起きているか？



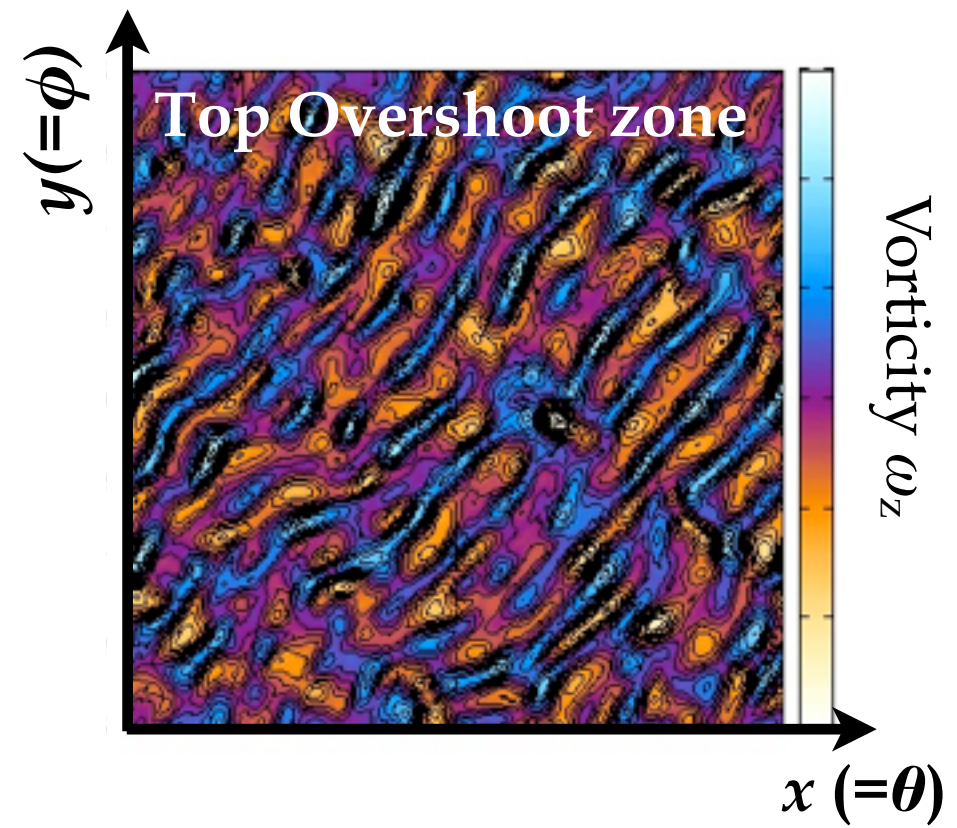
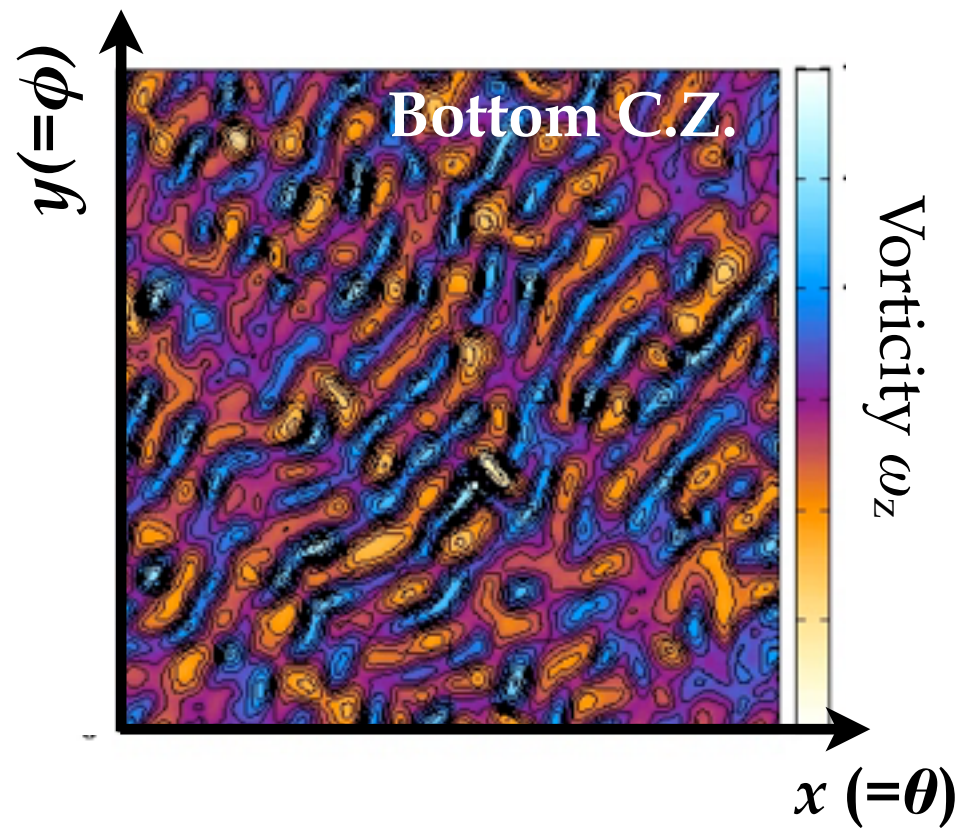
# 対流層-安定層境界に形成される渦シート構造

どうやって大局的な磁場が生成・維持されているのか？

→ 境界層にできる渦シート構造が鍵？

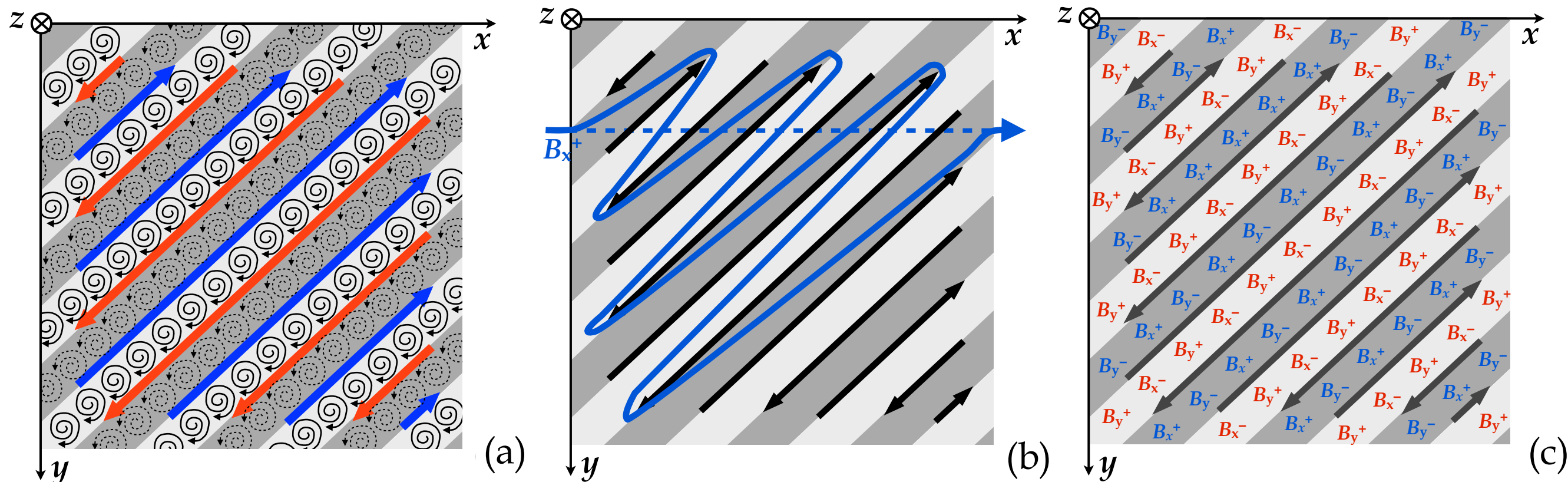


a steady periodic pattern of vortex sheets with alternating vortices





# 期待される渦シートの役割：選択的磁場増幅



■ 白の渦シート：渦度  $\omega_z > 0$ 、灰色の渦シート：渦度  $\omega_z < 0$

(a) 互い違いの渦度を持つ渦シート = Banded Shear Flow.

(b) x方向正の向きの磁場 ( $B_x^+$ ) を考える.

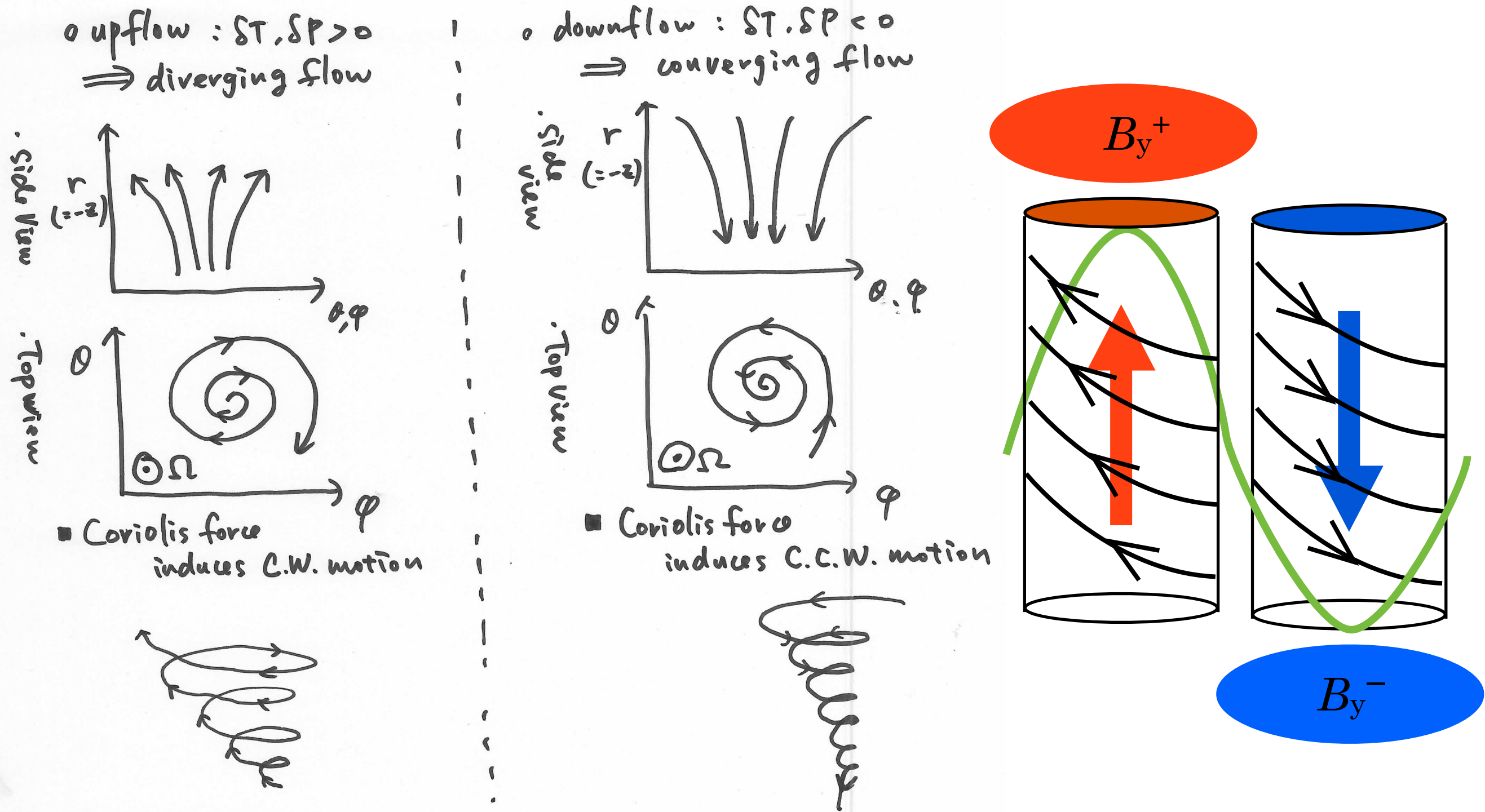
→ banded shear flow によるストレッチング.

(c)  $\omega_z > 0$ の渦シートでは  $B_y > 0$  ( $B_y^+$ )の成分が増幅される (磁場の増幅) .

$\omega_z < 0$ の渦シートでは  $B_y < 0$  ( $B_y^-$ )の成分が増幅される (磁場の減少) .



# 期待される渦シートの役割：選択的磁場輸送



渦度  $\omega_z > 0$  の渦シートでは  $B_y^+$  成分が増幅され対流不安定層に輸送。  
渦度  $\omega_z < 0$  の渦シートでは  $B_y^-$  成分が増幅され対流安定層に輸送。

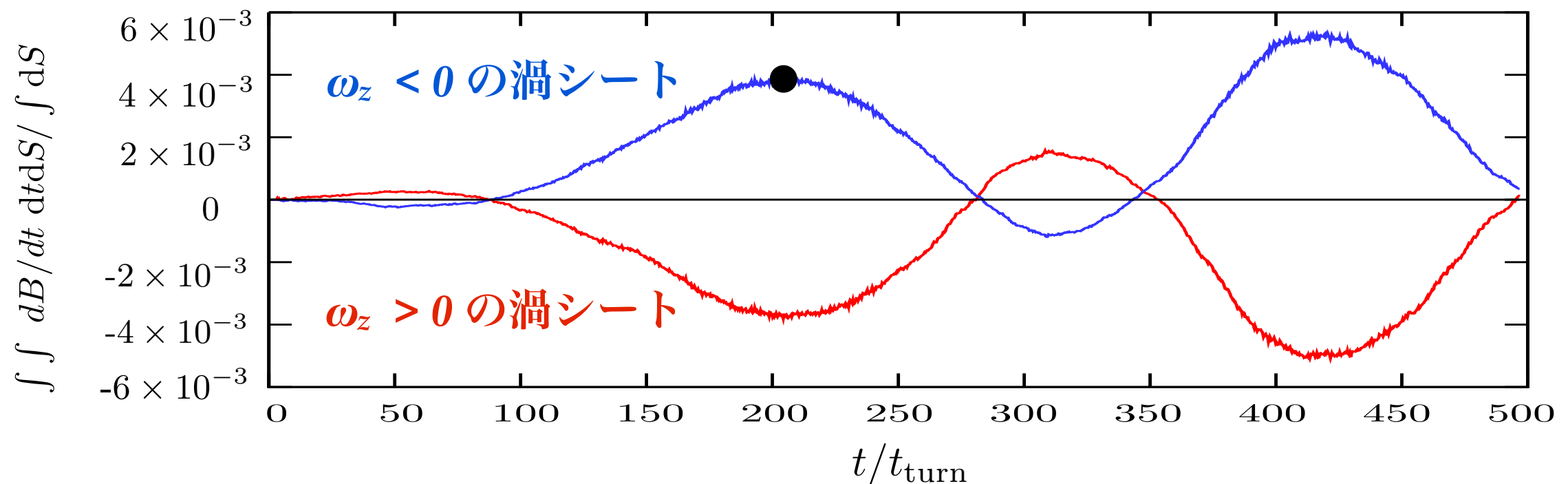
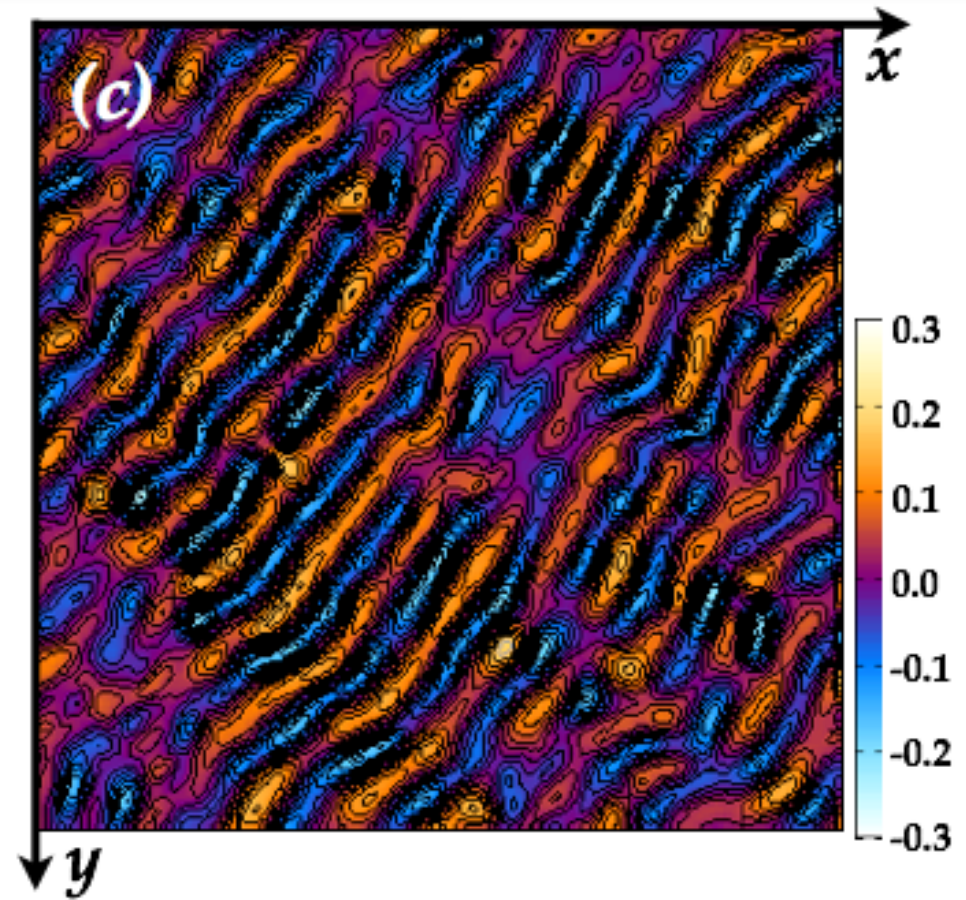
# 渦シートは実際そのような役割を果たしているか？

- $\omega_z > 0$  の全渦シートでの  $db_i/dt$  の面積分値の時間積分

$$\frac{\iint_{S_p} db_i/dt dS dt}{\int_{S_p} dS} \quad (i=x, y, z)$$

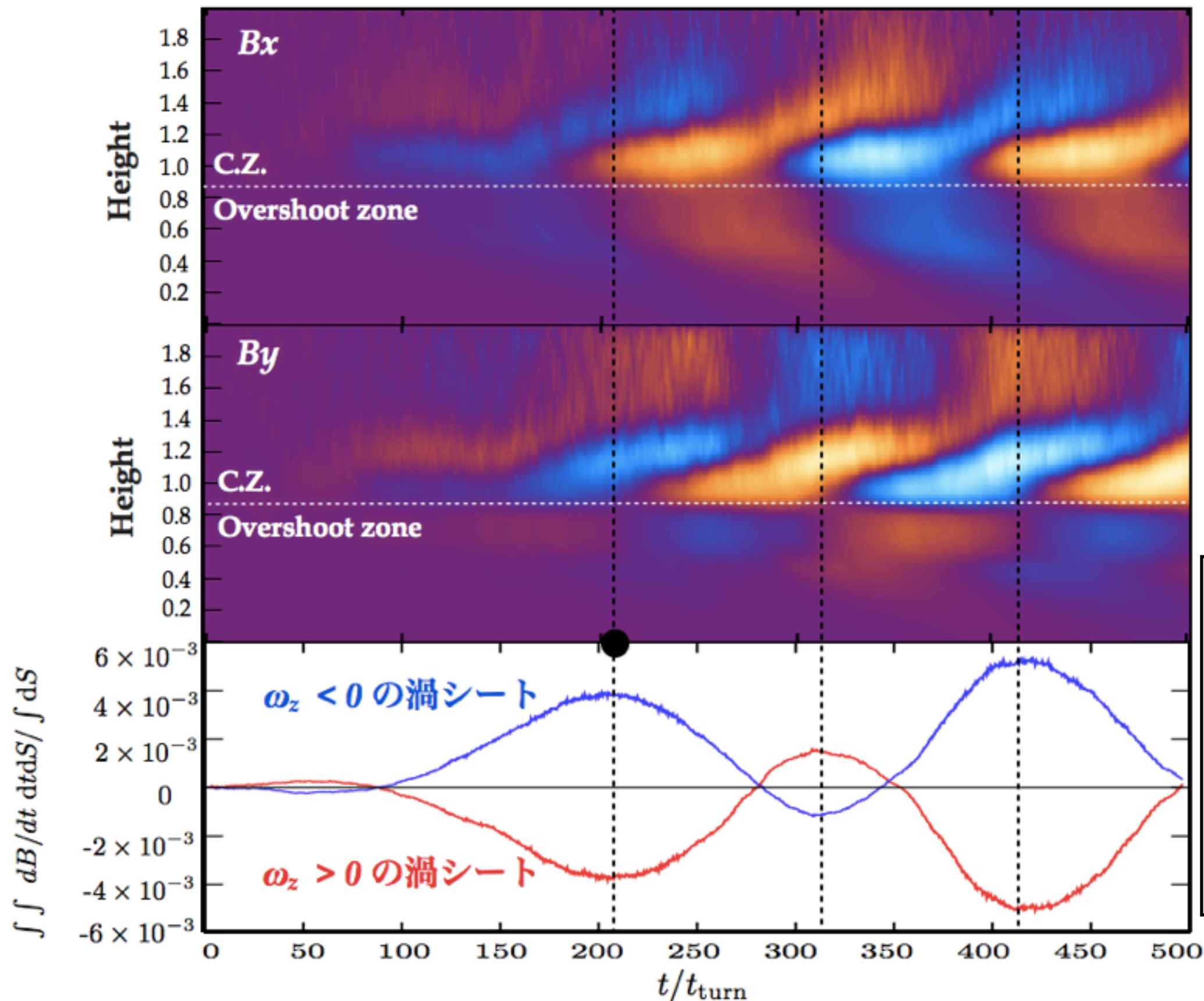
- $\omega_z < 0$  の全渦シートでの  $db/dt$  の面積分値の時間積分

$$\frac{\iint_{S_n} db_i/dt dS dt}{\int_{S_p} dS} \quad (i=x, y, z)$$





# 渦シートの役割：選択的磁場増幅＋選択的磁場輸送

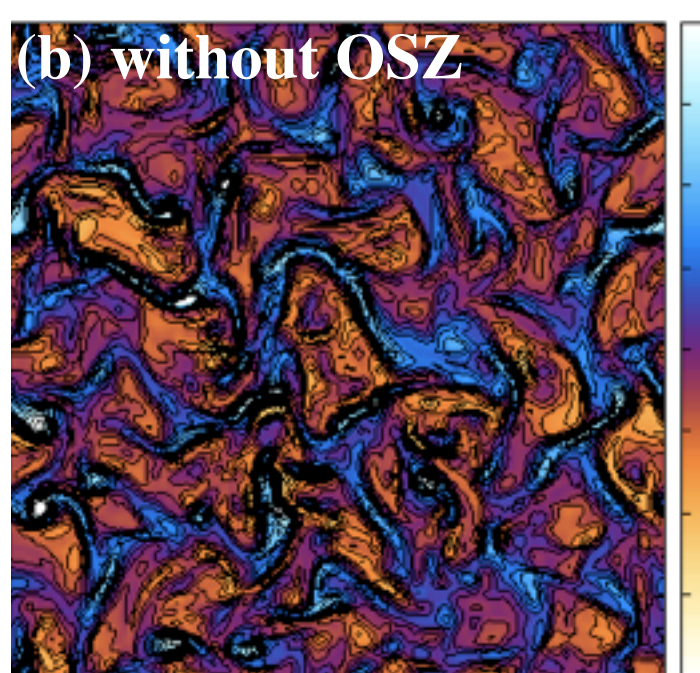
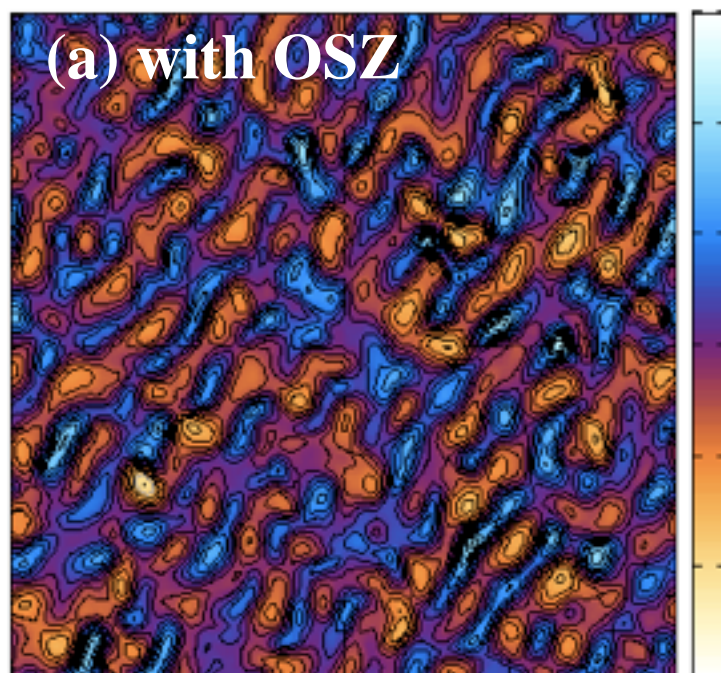
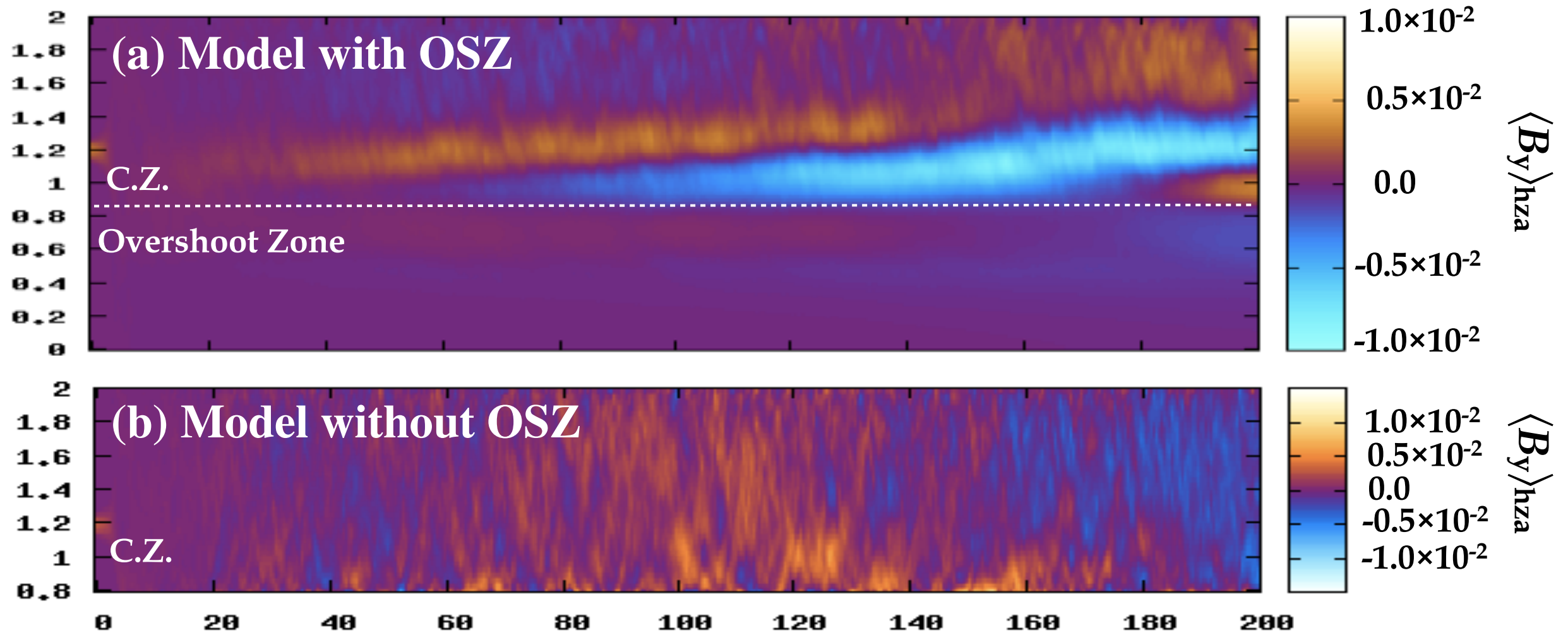


$\omega_z > 0$  の渦シート  
:  $B_y$ +増幅  
: 対流層への輸送  
 $\omega_z < 0$  の渦シート  
:  $B_y$ -増幅  
: 安定層への輸送



# 対流安定層が果たす役割：対流層底部への磁場のストレージ

A Test Model with the same control parameters, but without overshoot zone.



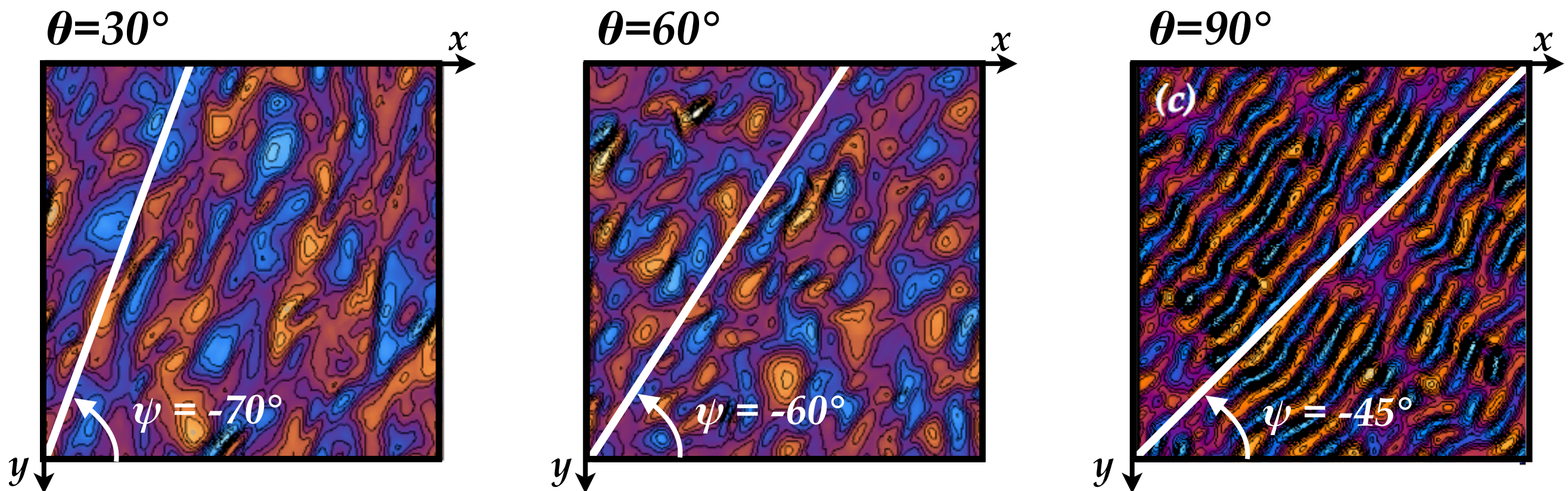
No coherent LMFs, and  
No vortex sheets for the  
model without OSZ.



境界層で誘起される互い違いの  
渦シート構造が大局的磁場の維  
持・貯蔵・輸送機構の鍵。



# 渦シート構造の普遍性：緯度の異なるモデル



計算ボックスを置く緯度を変えると渦シートの方角も変化.

$$\begin{aligned}\theta = 90^\circ &\rightarrow \psi = -45^\circ \text{ (計算結果)} \\ \theta = 60^\circ &\rightarrow \psi \sim -60^\circ \text{ (計算結果)} \\ \theta = 30^\circ &\rightarrow \psi \sim -70^\circ \text{ (計算結果)} \\ \theta = 0^\circ &\rightarrow \psi = -90^\circ ?\end{aligned}$$

計算ボックスを置く緯度を変えた時に変化する力 = コリオリ力.

コリオリ力に対する渦シートの方角の依存性を示唆.

# 渦シート (banded shear flow) 形成の物理 ~ 木星の縞模様??

対流安定層への対流のpenetration.

→ 対流安定層に対するstochasticなforcing (摂動).

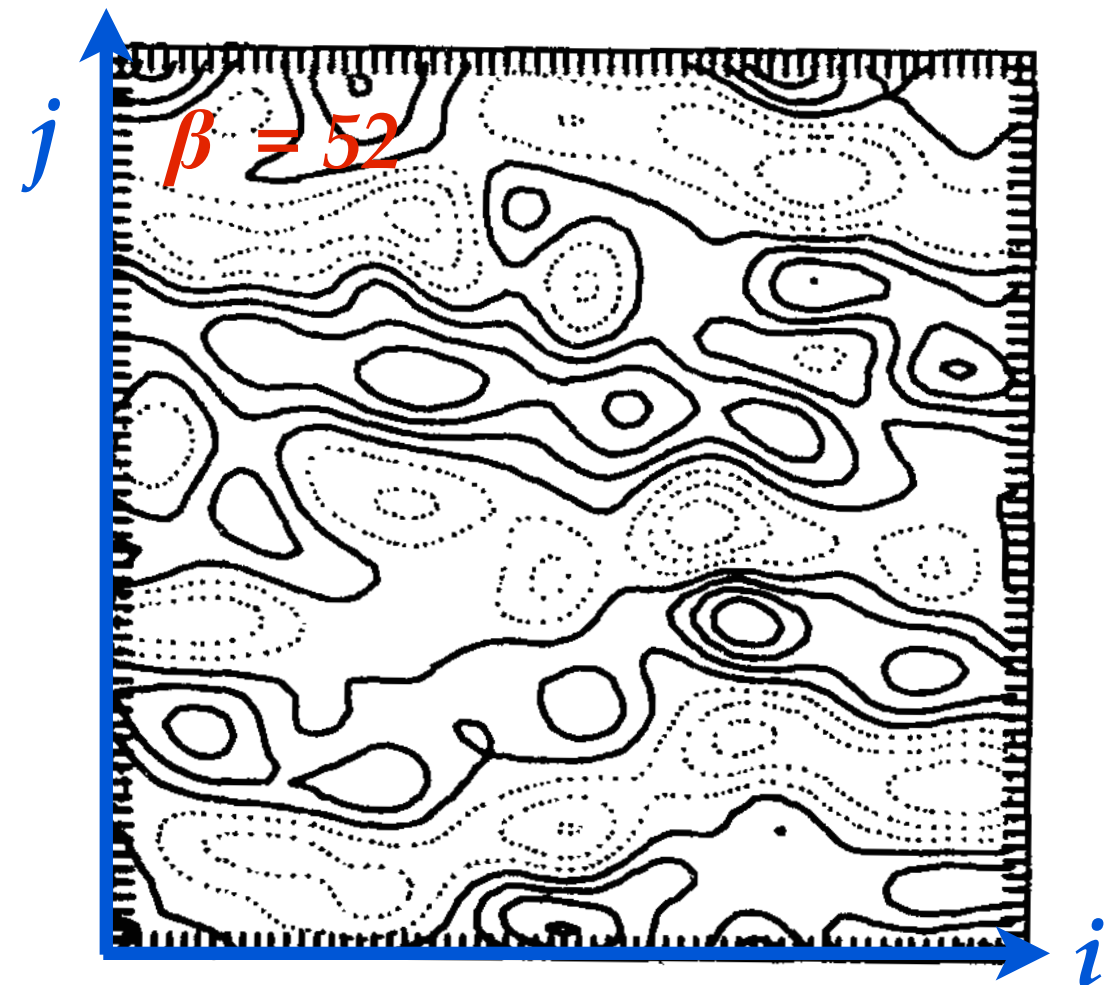
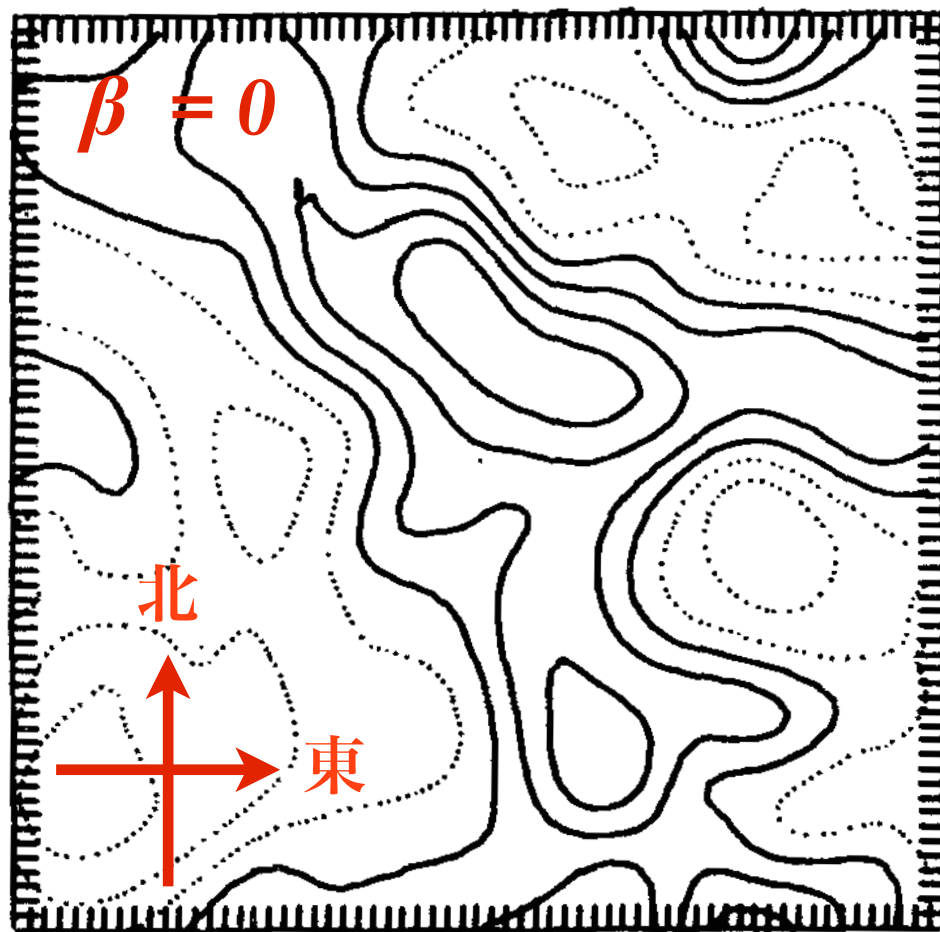
→ 安定成層による3次元的な運動の抑制.

→ 2次元的な (水平面方向に伸びた) 乱流の発達

→ インバースカスケードによる大局的流れ構造の生成

(太陽の対流安定層でどのような大局的流れが誘起される? cf. Miesch 2003)

Rhines 1975:  $\beta$ 面上の二次元乱流





# Summary:

This work adopts control parameters  $Pr = 1.4$ ,  $Pm = 4.0$ ,  $Ra = 3.9 \times 10^6$ ,  $\Omega = 0.4$

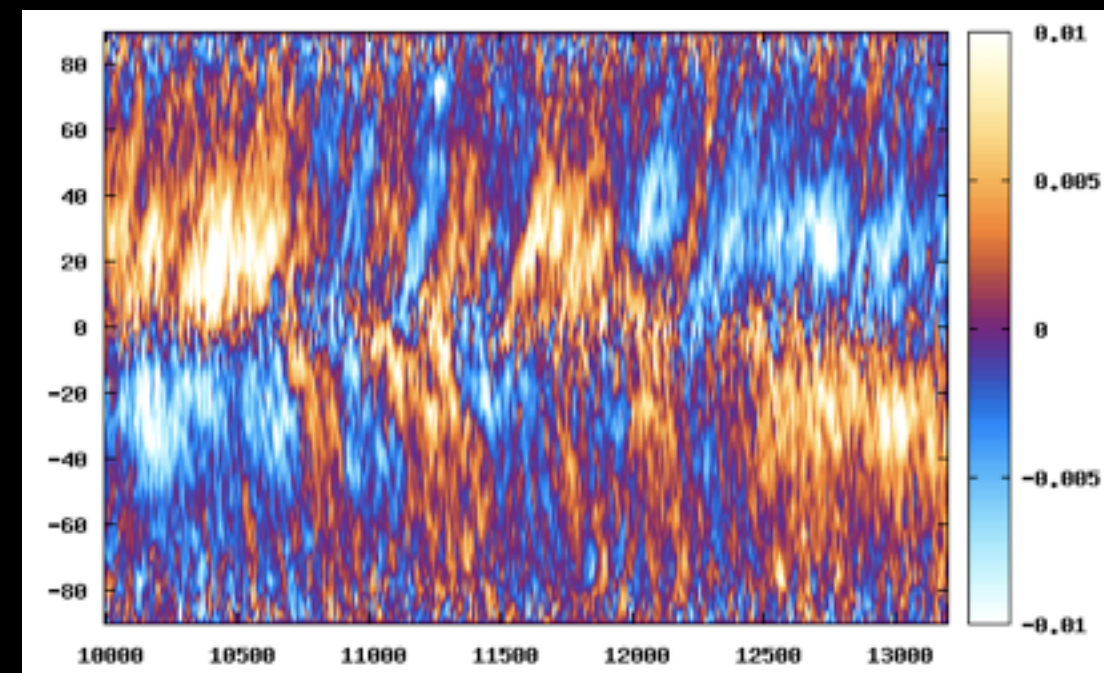
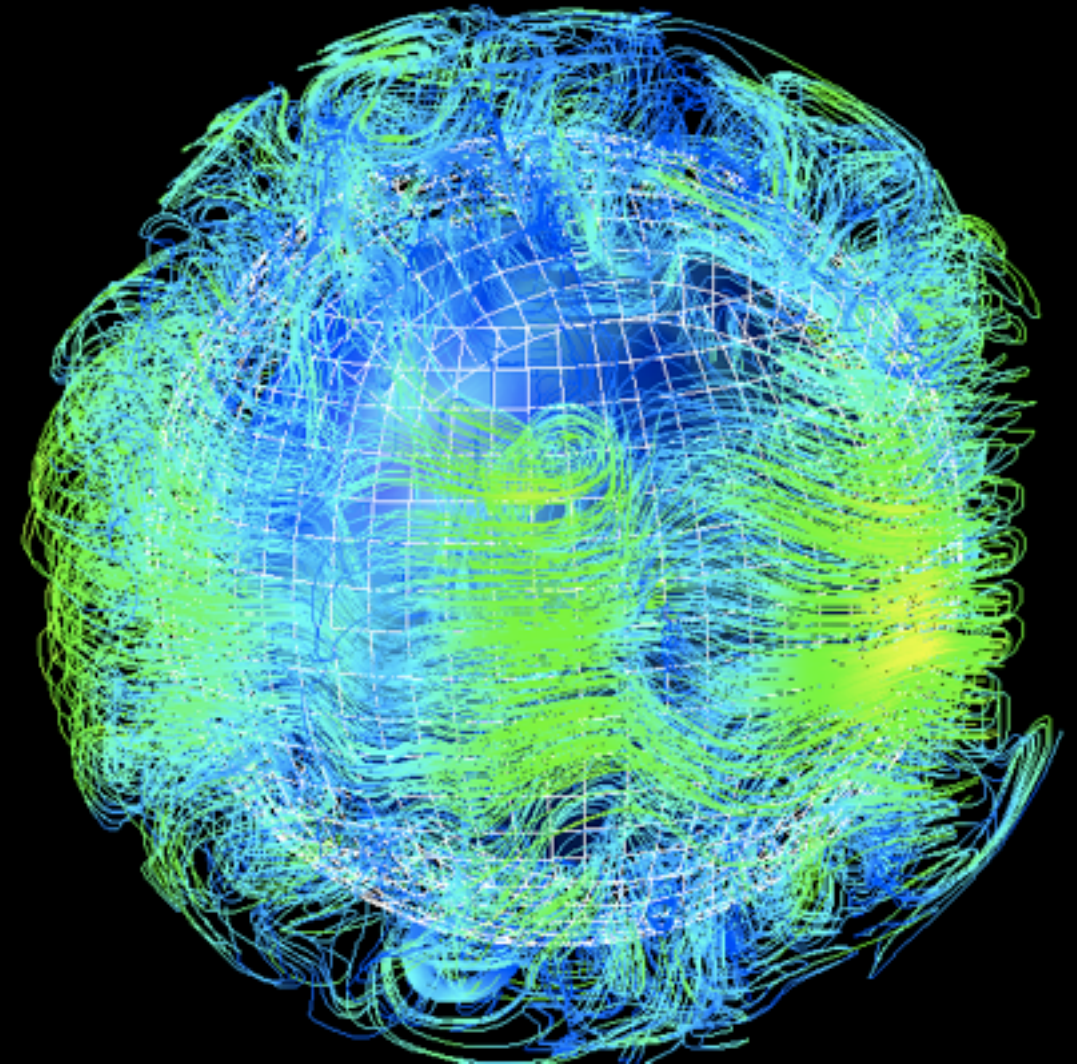
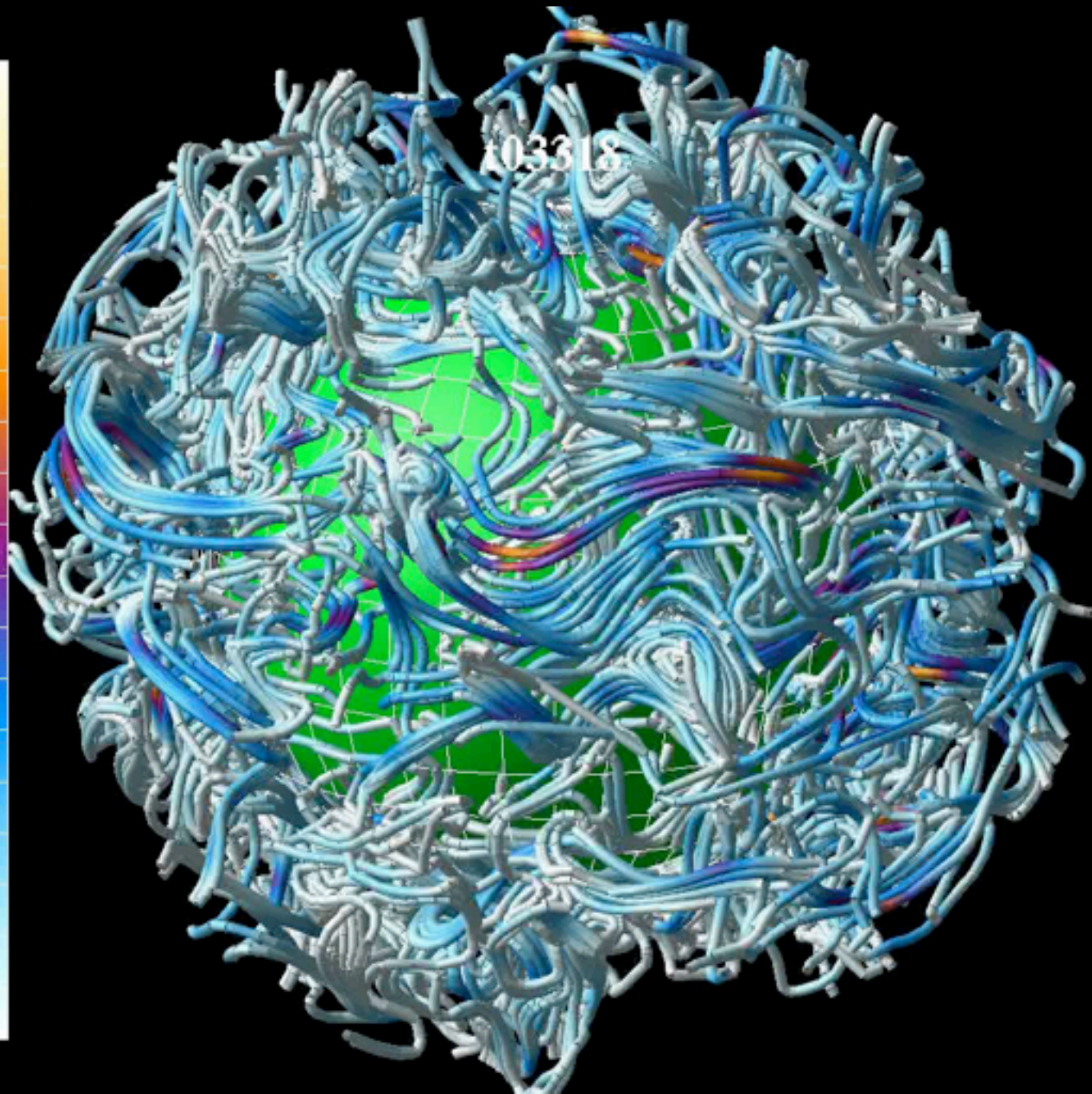
- Local Convective Dynamo Simulation with  $Ro \approx 0.025$ .
- Coherent LMFs is generated except the model at  $\theta = 0^\circ$  [equator].
- Common generation site of LMFs is the bottom of C.Z.
- Vortex sheets with alternating vortices would induce cyclic variations of LMFs.
- Overshoot zone seems to play an important role in sustaining
  - coherent vortex sheets with alternating vortices,
  - and thus LMFs in the bottom of C.Z..

A part of our Future works:

- We should reveal the formation mechanism of vortex sheets.
- Long-term evolution of the models located at the different latitudes.
- large  $Ro$  (Rossby number) model similar to that realized in solar C.Z..  
**What is the most important factor for the “Solar Dynamo” ??**
- Global simulation of solar-type convective dynamo with Yin-Yang Grid.



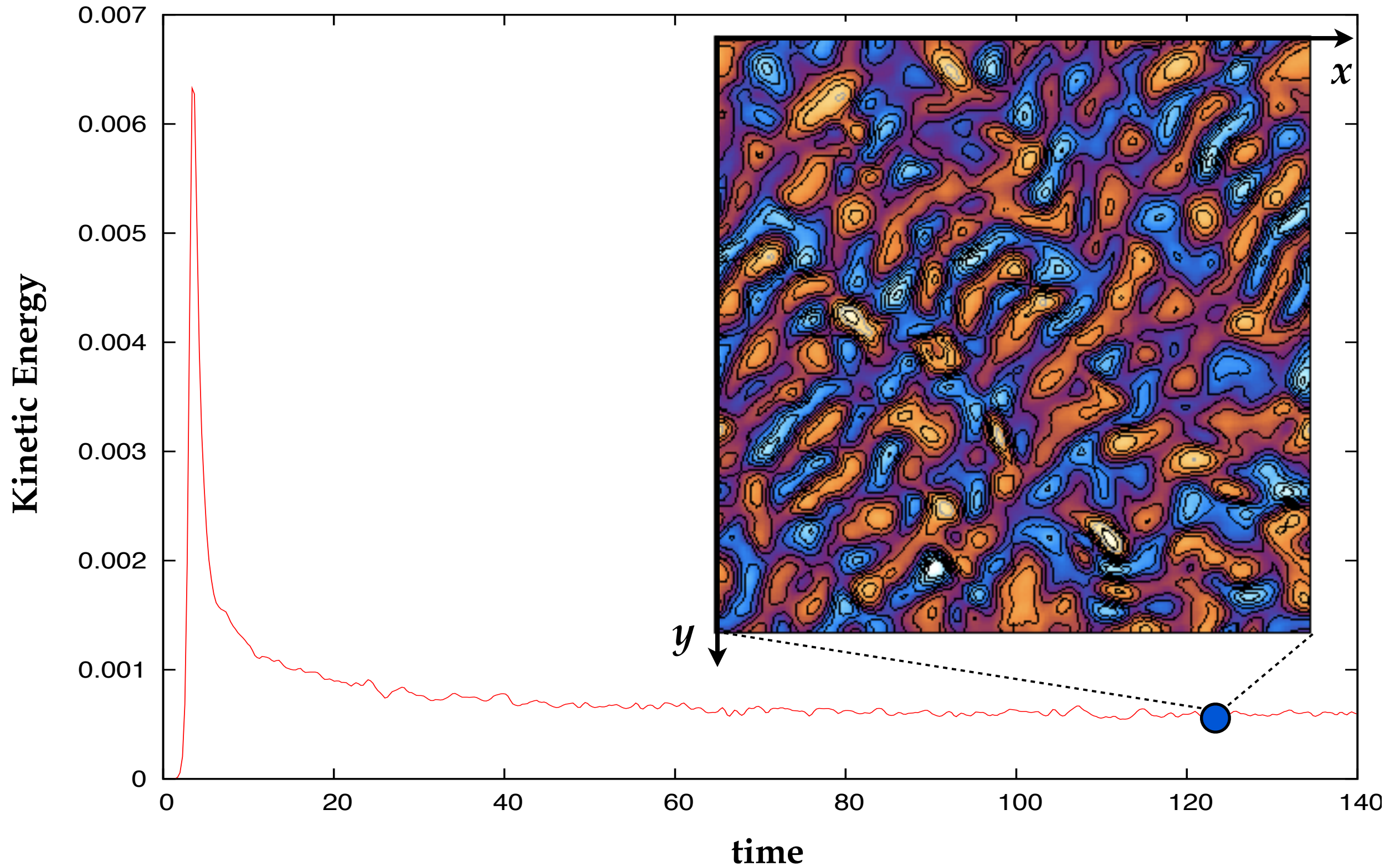
# Global Solar Dynamo Simulation





渦シート形成は物理的か？数值的か？

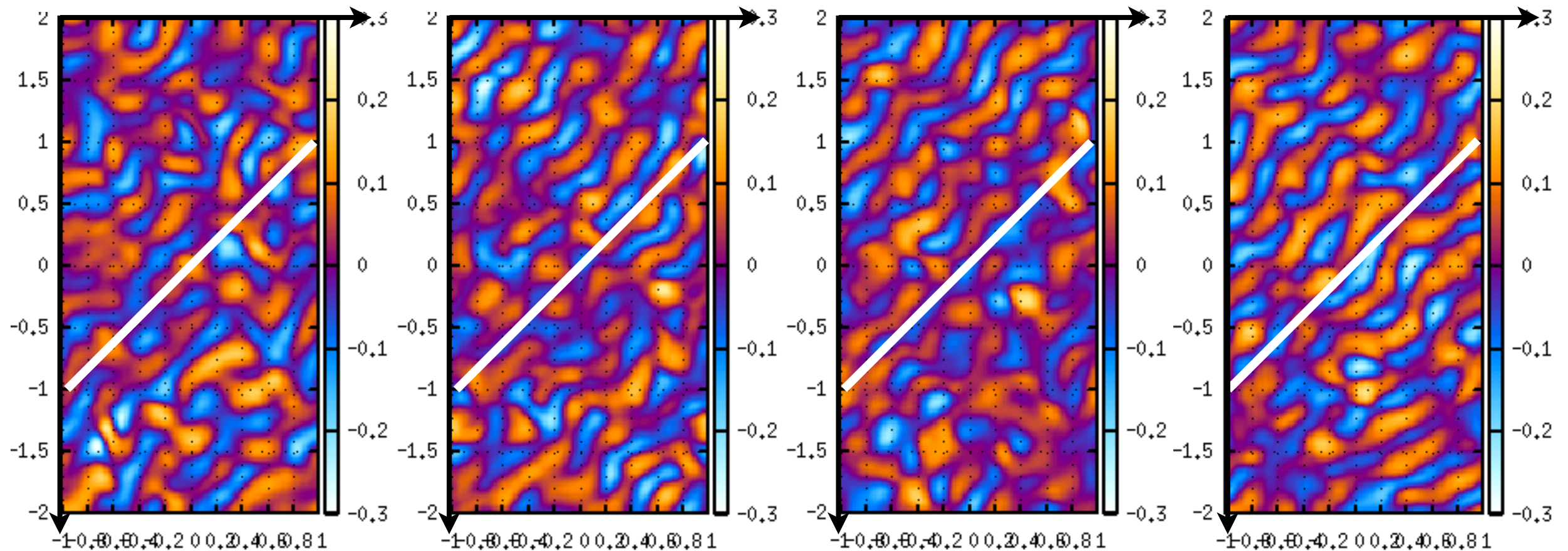
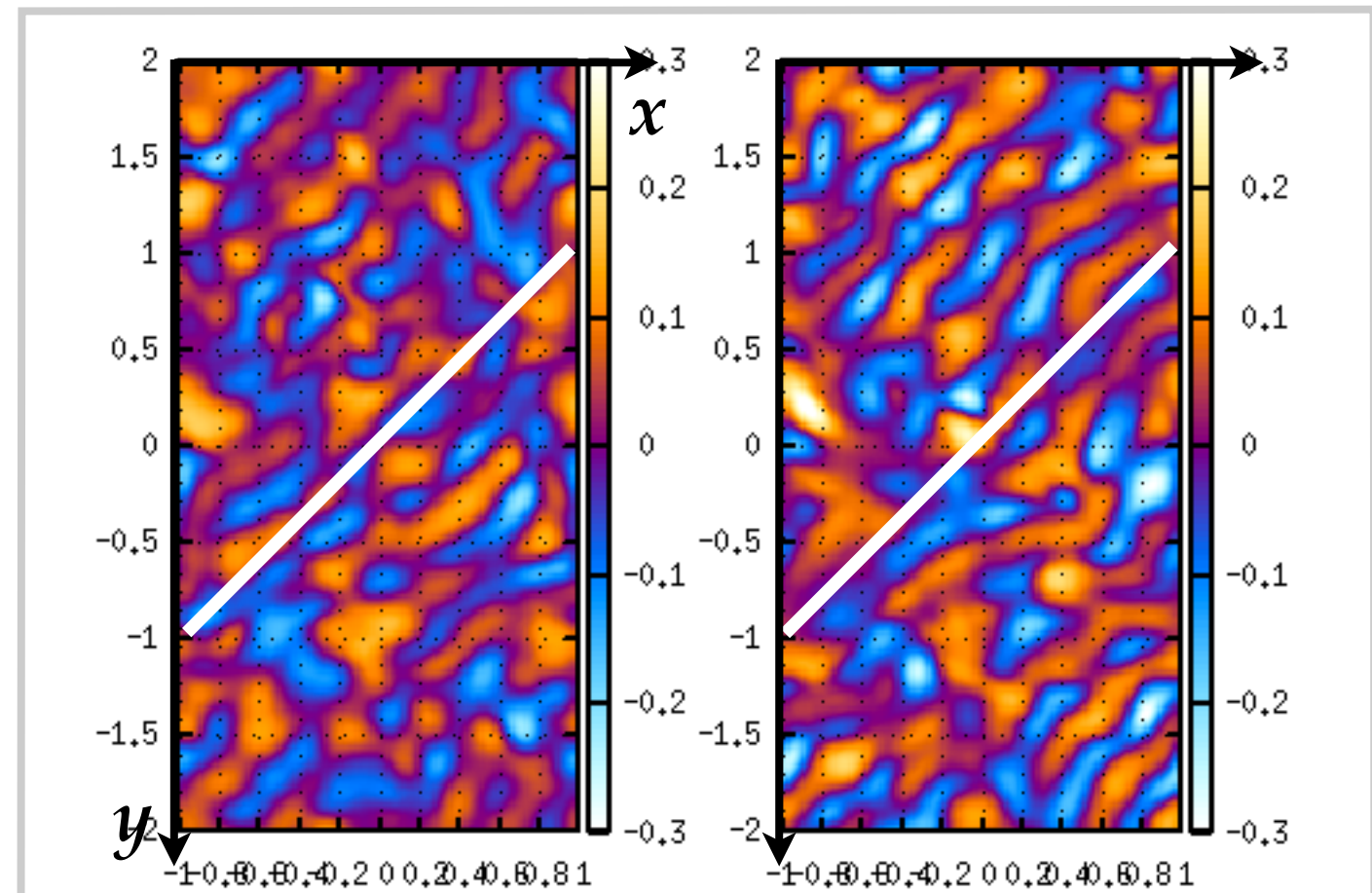
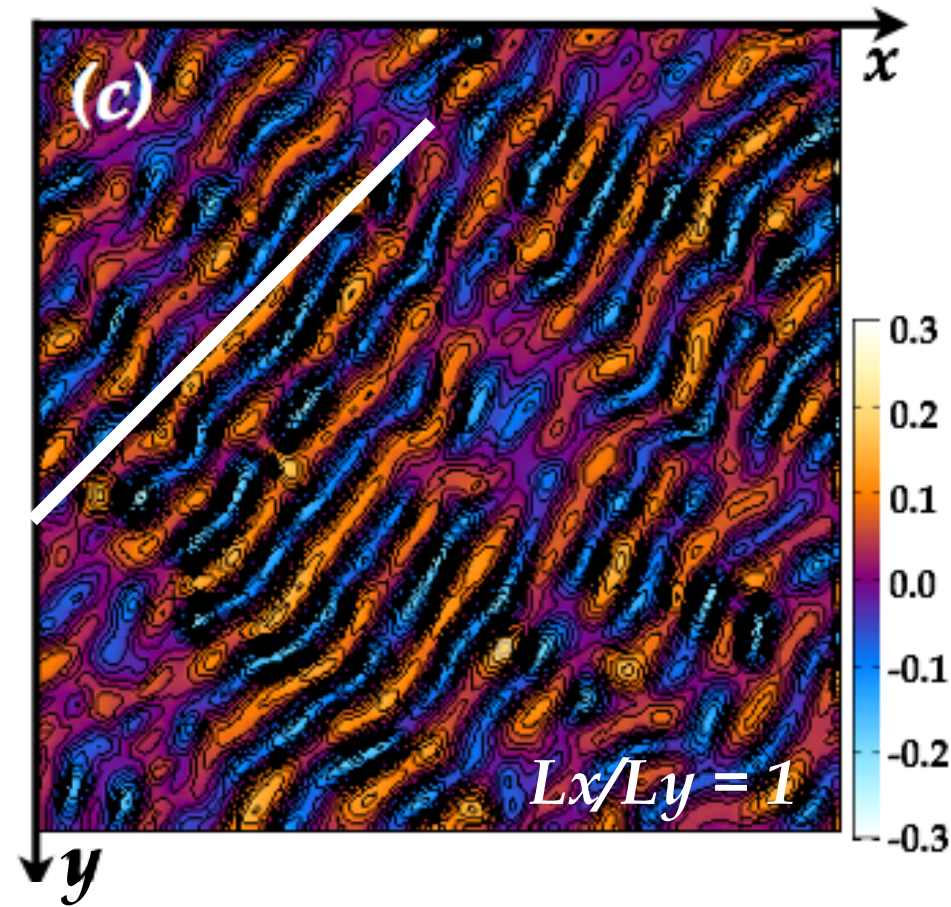
■ 磁場無しのモデル ( $L_x/L_y = 1$ )



磁場無しのモデルでも準定常な渦シートが形成されること、その向きが  $x$  軸に対し-45度をなすことを確認。

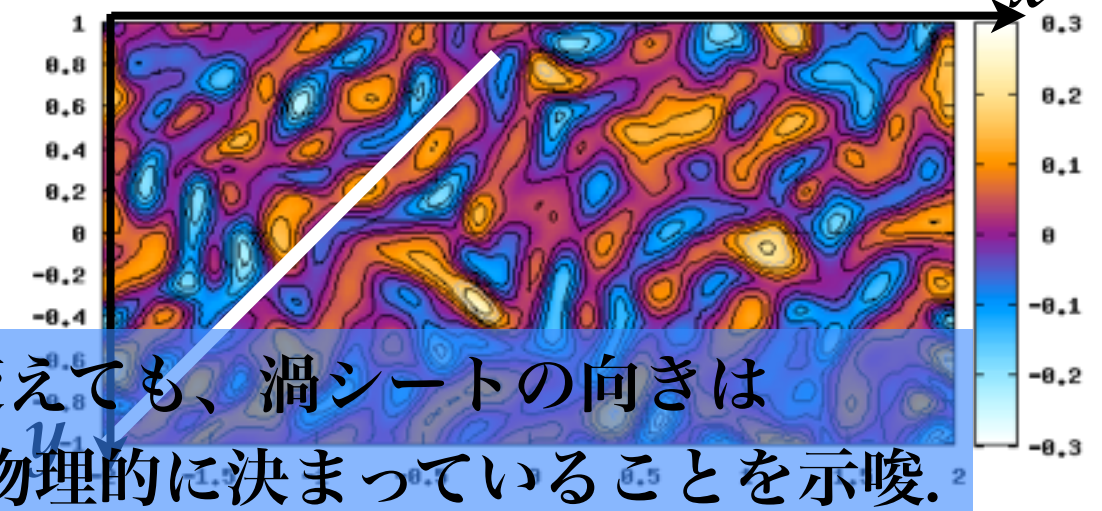
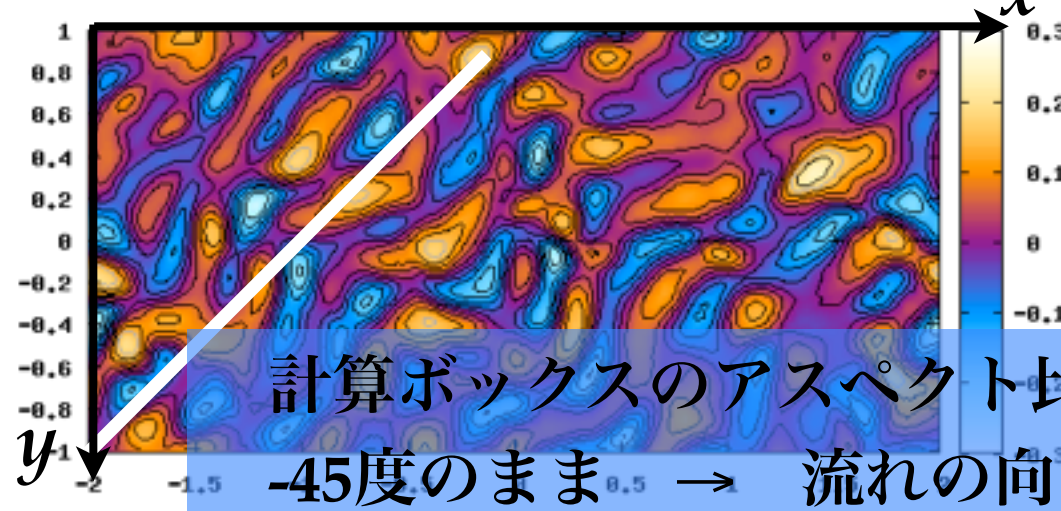
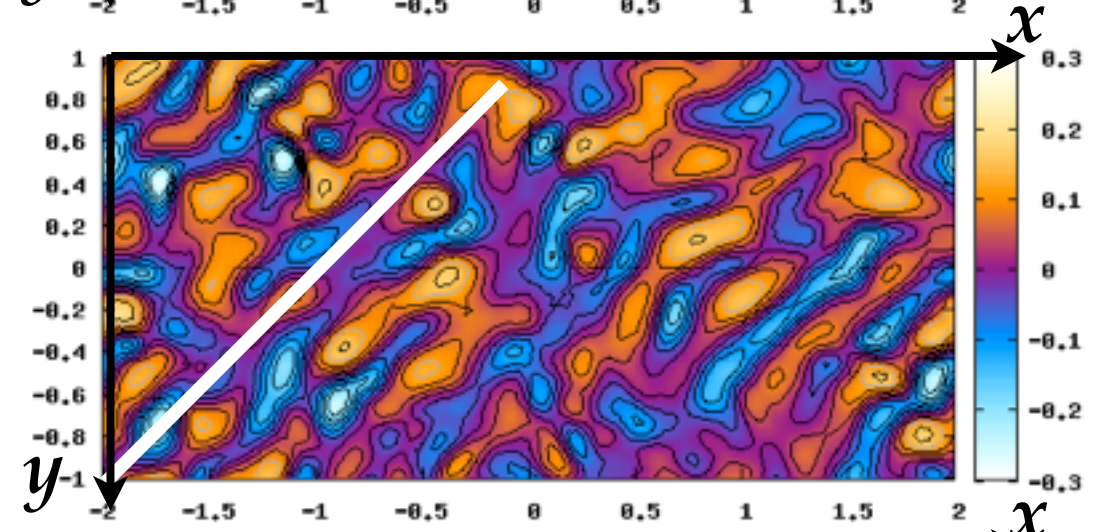
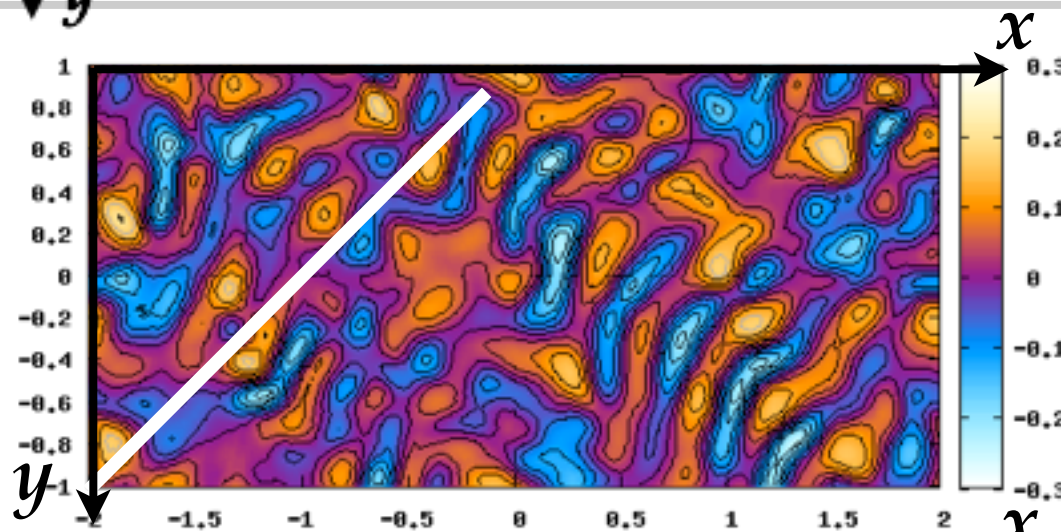
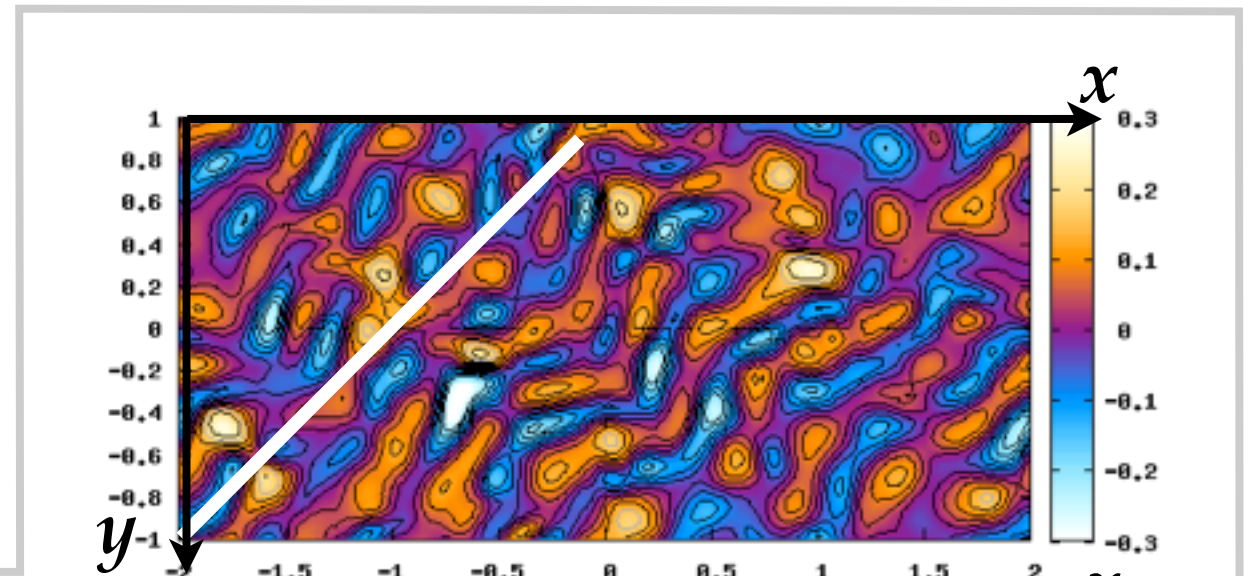
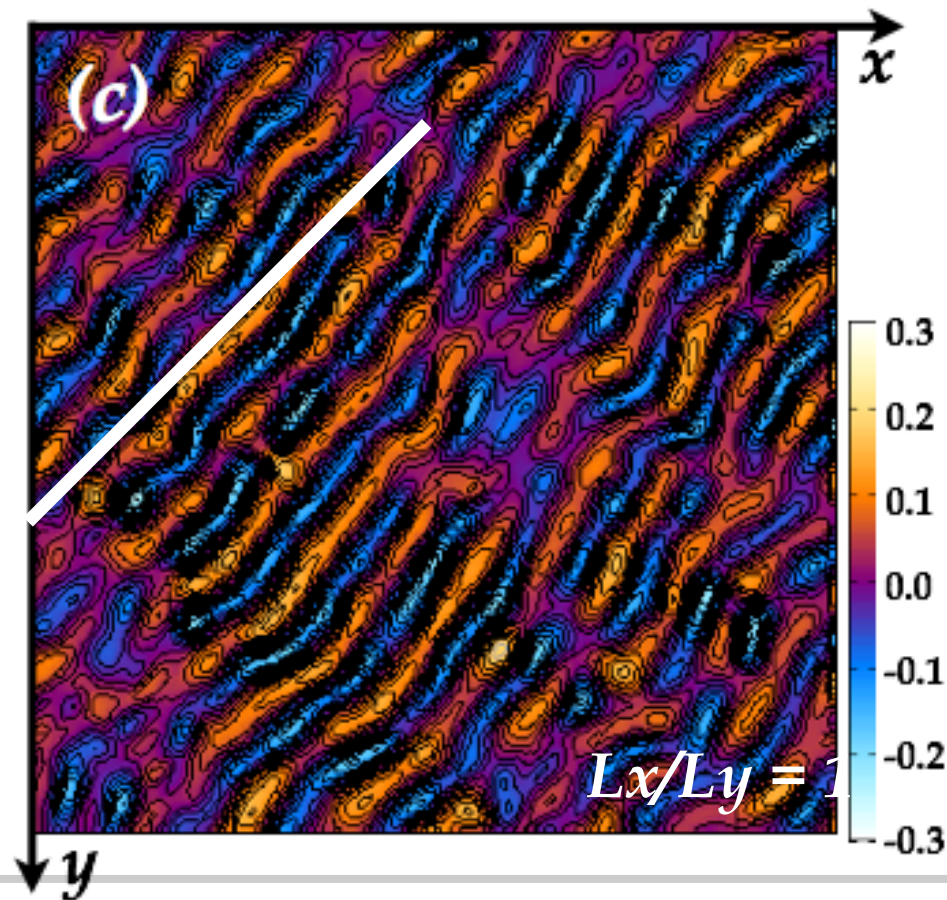


■ Effect of aspect ratio of domain: Case  $L_x/L_y = 0.5$  (磁場無し)





- Effect of aspect ratio of domain:  
Case  $L_x/L_y = 2.0$  (磁場無し)



計算ボックスのアスペクト比を変えても、渦シートの向きは  
-45度のまま → 流れの向きが物理的に決まっていることを示唆。