

# 下端に粘着条件・上端に 応力無し条件を課した MHD ダイナモ計算

佐々木洋平(北大・理/神大・理)

竹広真一(京大・数理研)

林祥介(神大・理)

倉本圭(北大・理)



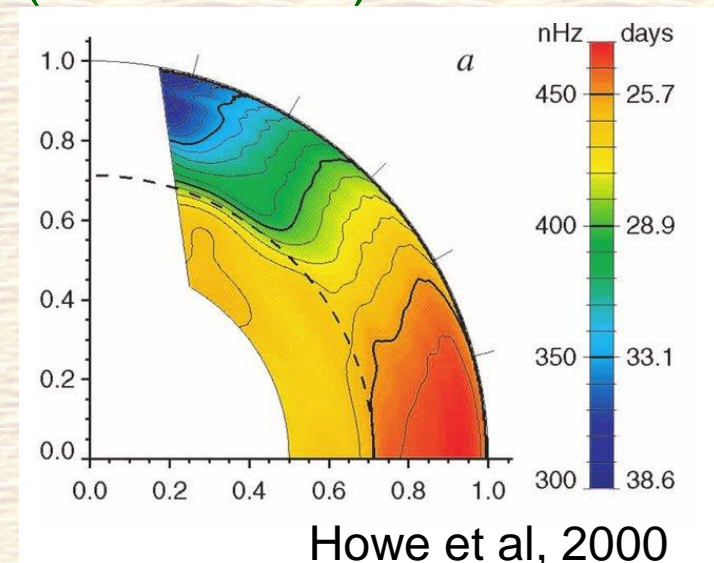
# はじめに

## ■ これまでのダイナモ計算

- 多くは両端とも粘着条件or両端とも応力無し条件

## ■ 太陽対流層には適切ではない, かもしれない

- 放射層は剛体回転
  - ◆ 対流層底部に強いシアーが存在(タコクライン)
- 対流層下端は粘着条件(剛体回転)を用いるのが良いのかも?
- 対流層上端は応力無し条件

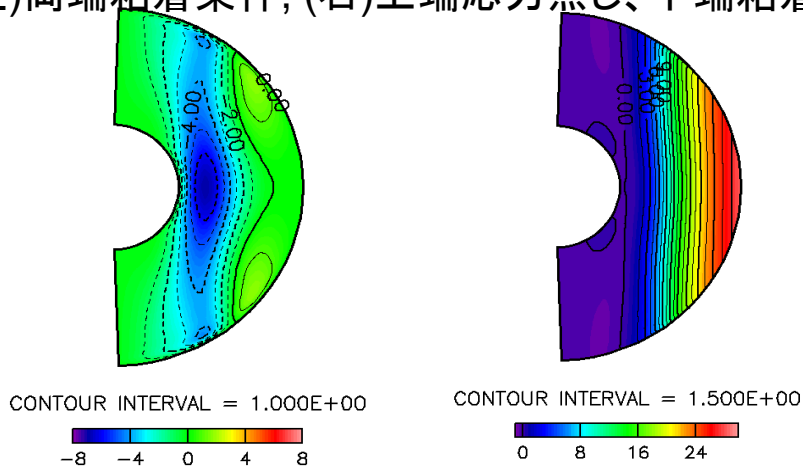


# 本研究の目的

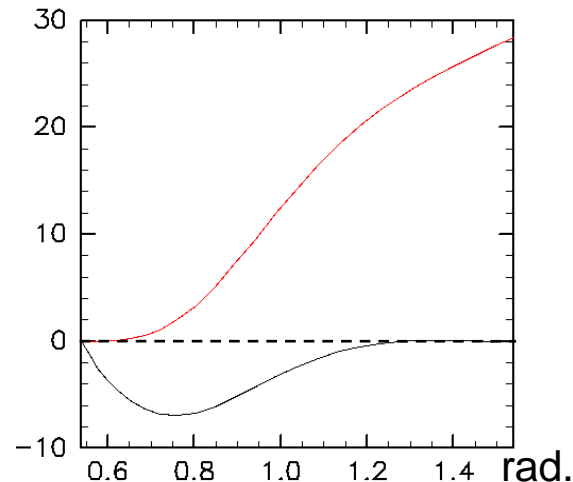
## ■ 力学的境界条件を変えたダイナモ計算

- 下端に粘着条件、上端に応力無し条件
- 境界付近での減速が無いので
  - ◆  $\omega$ 効果が強くなる?
  - ◆  $\alpha^2$  ダイナモ以外のダイナモ解が得られる、かも。

磁場無し球殻対流の帯状平均流  
(左)両端粘着条件, (右)上端応力無し、下端粘着条件



帯状平均流(赤道上)



# モデルと 計算設定

# 支配方程式系とパラメータ

## ■ 回転球殻ブシネスク MHD 方程式系

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0,$$

$$E \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \nabla^2 \mathbf{u} \right) + 2\mathbf{k} \times \mathbf{u} + \nabla P = \text{Ra} \frac{\mathbf{r}}{r_o} T + \frac{1}{\text{Pm}} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B},$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \frac{1}{\text{Pm}} \nabla^2 \mathbf{B},$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \frac{1}{\text{Pr}} \nabla^2 T$$

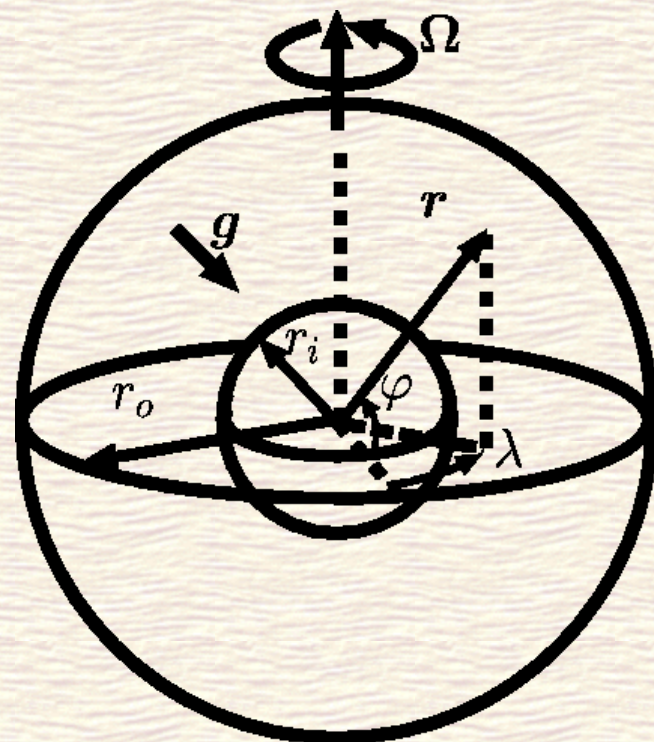
## ■ パラメータ

Ra: 修正レイリー数 (100)

E: エクマン数 ( $10^{-3}$ )

Pr: プラントル数 (1)

Pm: 磁気プラントル数 (5-50)



# 境界条件

## ■ 力学境界条件

- 球殻下端: 粘着条件
- 球殻上端: 応力無し条件

## ■ 熱境界条件

- 上下端とも温度固定
- 内部熱源無し

## ■ 磁場の境界条件

- 球殻の外側は不導体

# 実験設定

## ■ ダイナモベンチマークのパラメータをもとに

- $Ra=100$ ,  $E=10^{-3}$ ,  $Pr=1$ ,  $r_i/r_o=0.35$  に固定
- $Pm$  を 5, 10, 20, 30, 40, 50 と変えて計算
  - ◆ 解像度: 経度 128, 緯度 64, 鉛直 32 (T42N32)

## ■ 初期は熱対流計算

- 統計的平衡状態になったらダイナモ計算を開始
  - ◆ 平衡状態に達するまで無次元時間  $t=18$  まで計算

## ■ ダイナモ計算

- 初期値は双極子磁場.
  - ◆ ベンチマーク case1 の初期磁場

# 結果

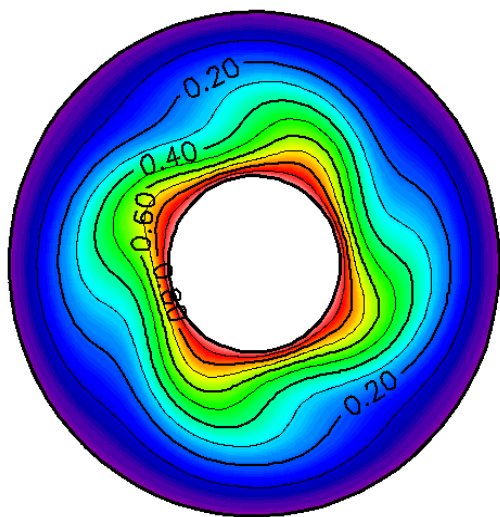


# 磁場無し球殻対流

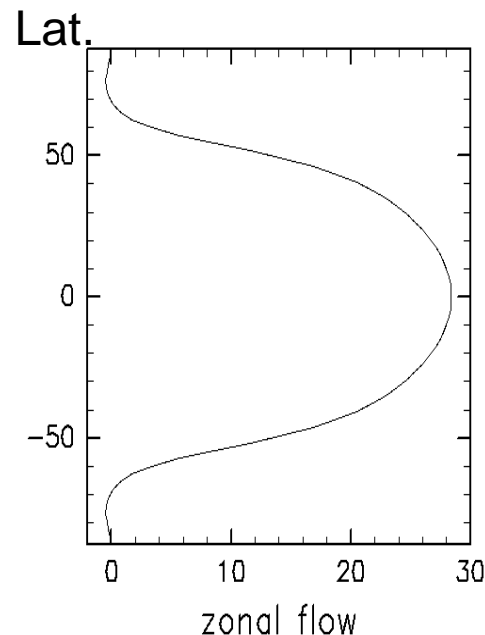
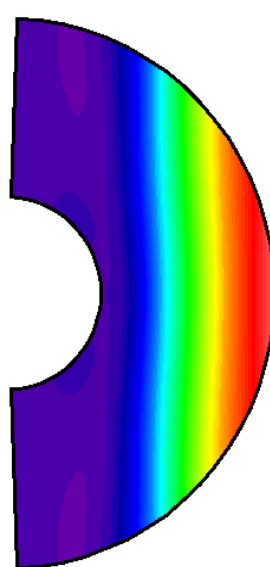
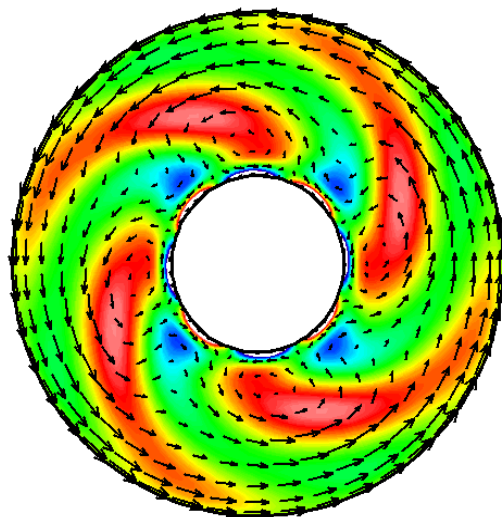
温度場(赤道断面)

渦度緯度成分(赤道断面)  
速度ベクトル,

平均帯状流: 子午面(左), 球殻表面(右)



CONTOUR INTERVAL = 1.000E-01



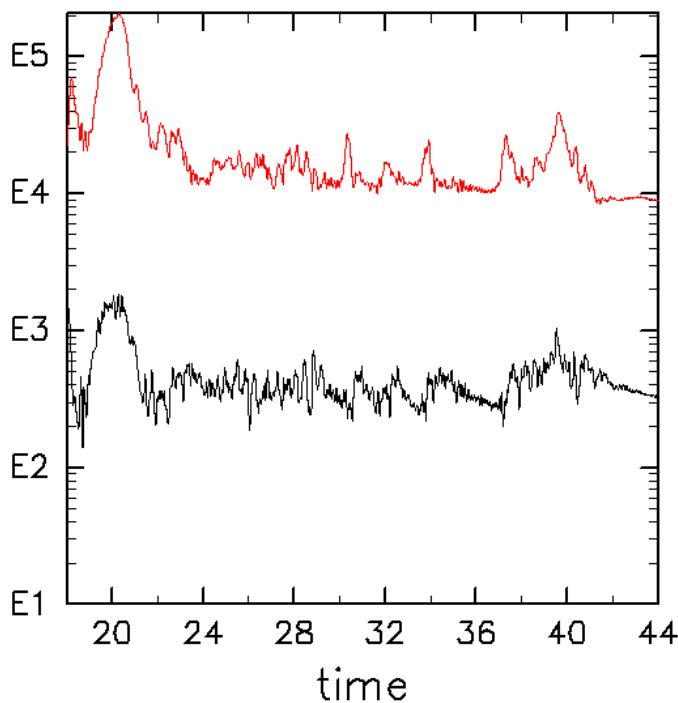
## ■ 低気圧性の渦柱が成長

- 強い東向き帯状流(場は東進)

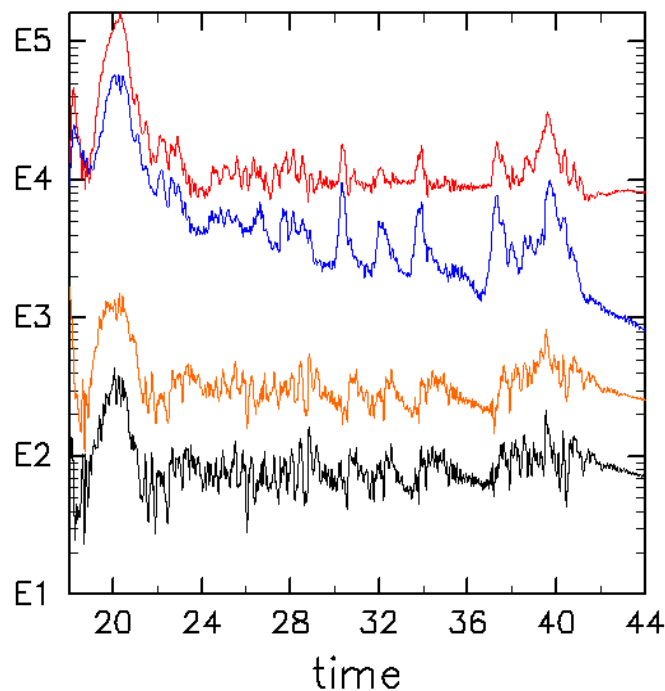
# ダイナモ(1):エネルギーの時間変化

## ■ $P_m=50$ のダイナモ計算

赤: 全磁気エネルギー  
黒: 全運動エネルギー

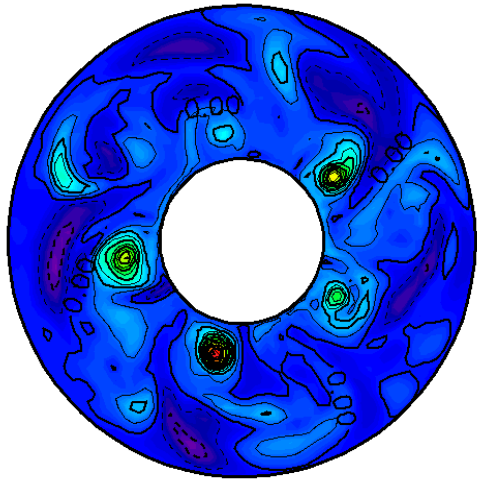


赤: 磁気エネルギートロイダル成分  
青: 磁気エネルギーポロイダル成分  
茶: 運動エネルギートロイダル成分  
黒: 運動エネルギーポロイダル成分



# ダイナモ(2):磁場と流れ場の様相

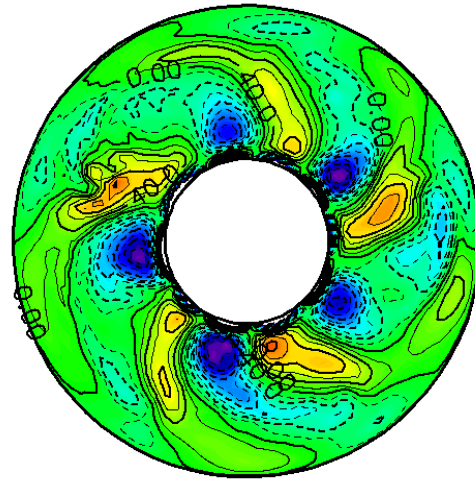
磁場緯度成分  
(赤道断面)



CONTOUR INTERVAL = 8.000E-01



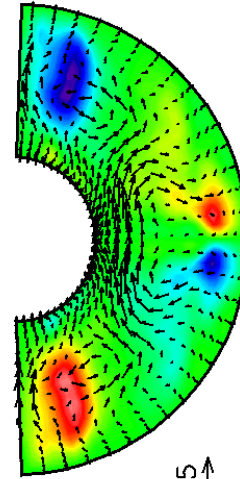
渦度緯度成分  
(赤道断面)



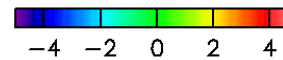
CONTOUR INTERVAL = 2.000E+01



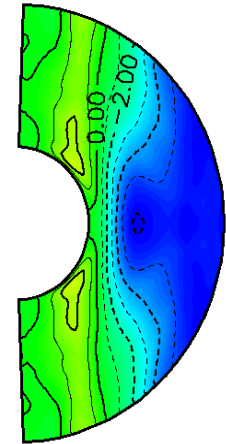
磁場経度成分  
(子午面平均)



2.5  
2.5



平均帯状流  
(子午面)



CONTOUR INTERVAL = 1.000E+00



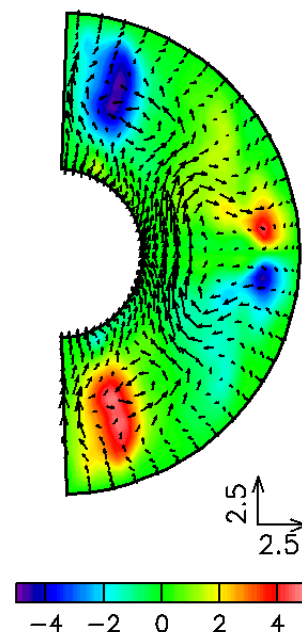
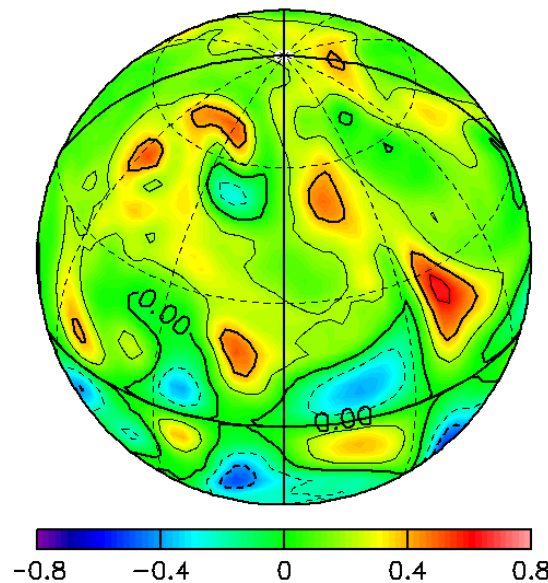
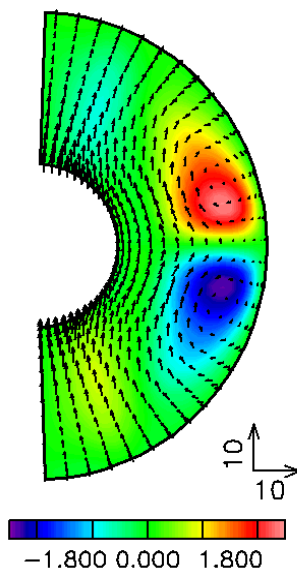
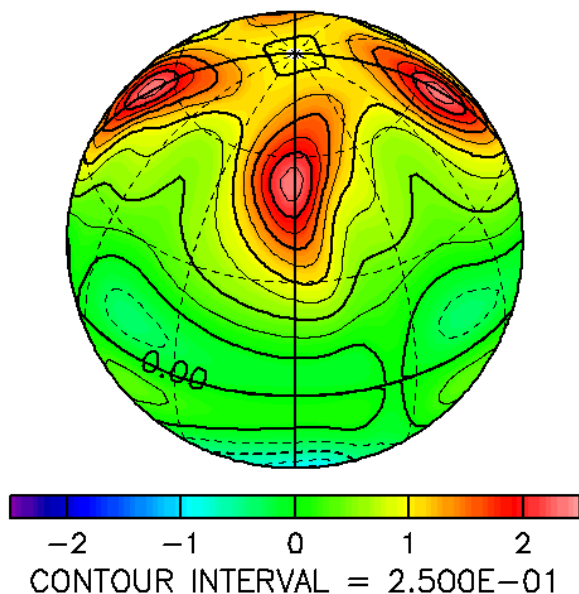
## ■ 高気圧性渦が成長

- ポロイダル磁場が渦に集中
- 弱い西向き帯状流(場は西進)

# ダイナモ(3)磁場の様相の比較

両端粘着条件(ベンチマーク case1)の  
ポロイダル磁場(球殻上端), トロイダル磁場(帯状平均)

本計算での  
ポロイダル磁場(球殻上端), トロイダル磁場(帯状平均)



## ● ポロイダル磁場

- ◆ 内核付近では強いが、球殻表面では弱い

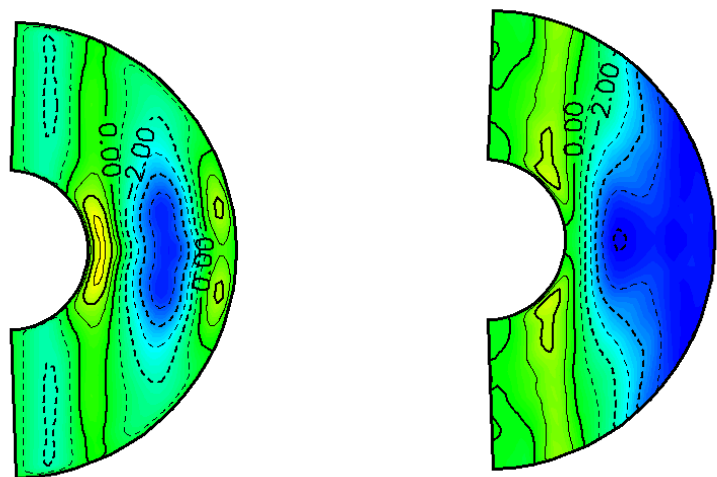
## ● トロイダル磁場

- ◆ 接円筒内部で強い磁場が存在する。

# 磁場の生成維持(1)

## ■ $\omega$ 効果は作用していない

ダイナモ計算の帯状平均流  
(左)両端粘着条件, (右)本計算



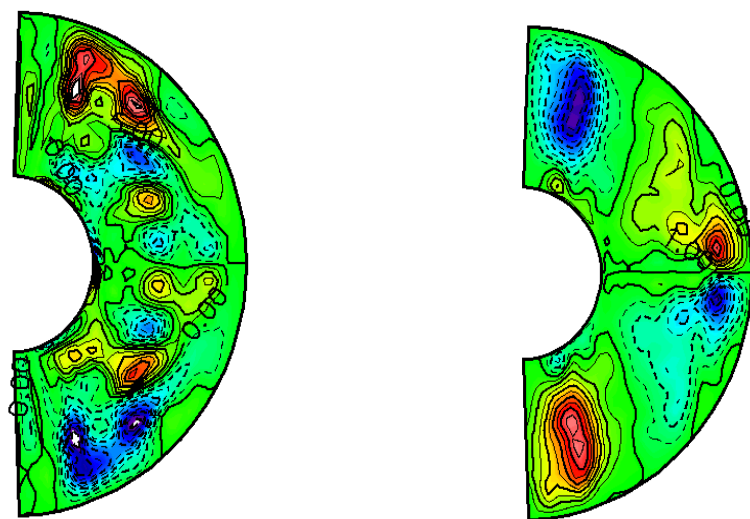
CONTOUR INTERVAL = 1.000E+00

CONTOUR INTERVAL = 1.000E+00



$\omega$ 効果

磁場経度成分(帯状平均)



CONTOUR INTERVAL = 2.500E+00

CONTOUR INTERVAL = 5.000E-01

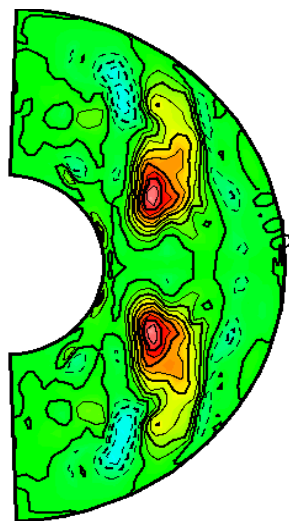


$$\left\langle r B_r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{u_\lambda}{r} \right) + B_\varphi \frac{\cos \varphi}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{u_\lambda}{\cos \varphi} \right) \right\rangle_\lambda$$

# 磁場の生成・維持(2)

## ■ $\alpha$ 効果は部分的には作用している

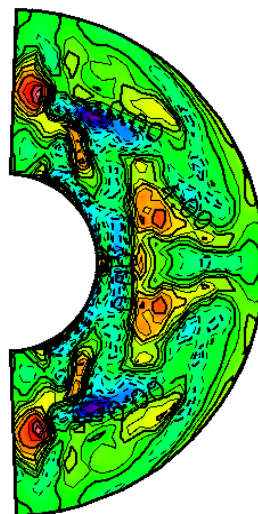
ヘリシティ  
×  
磁場経度成分  
(帯状平均)



-0.8 -0.4 0 0.4 0.8

$$\left\langle B_{\lambda} \cdot (u \cdot \nabla \times u) \right\rangle_{\lambda}$$

電流経度成分  
(帯状平均)



CONTOUR INTERVAL = 2.000E+00

-16 -8 0 8 16

# まとめ

## ■ 上端応力無し条件のダイナモ計算

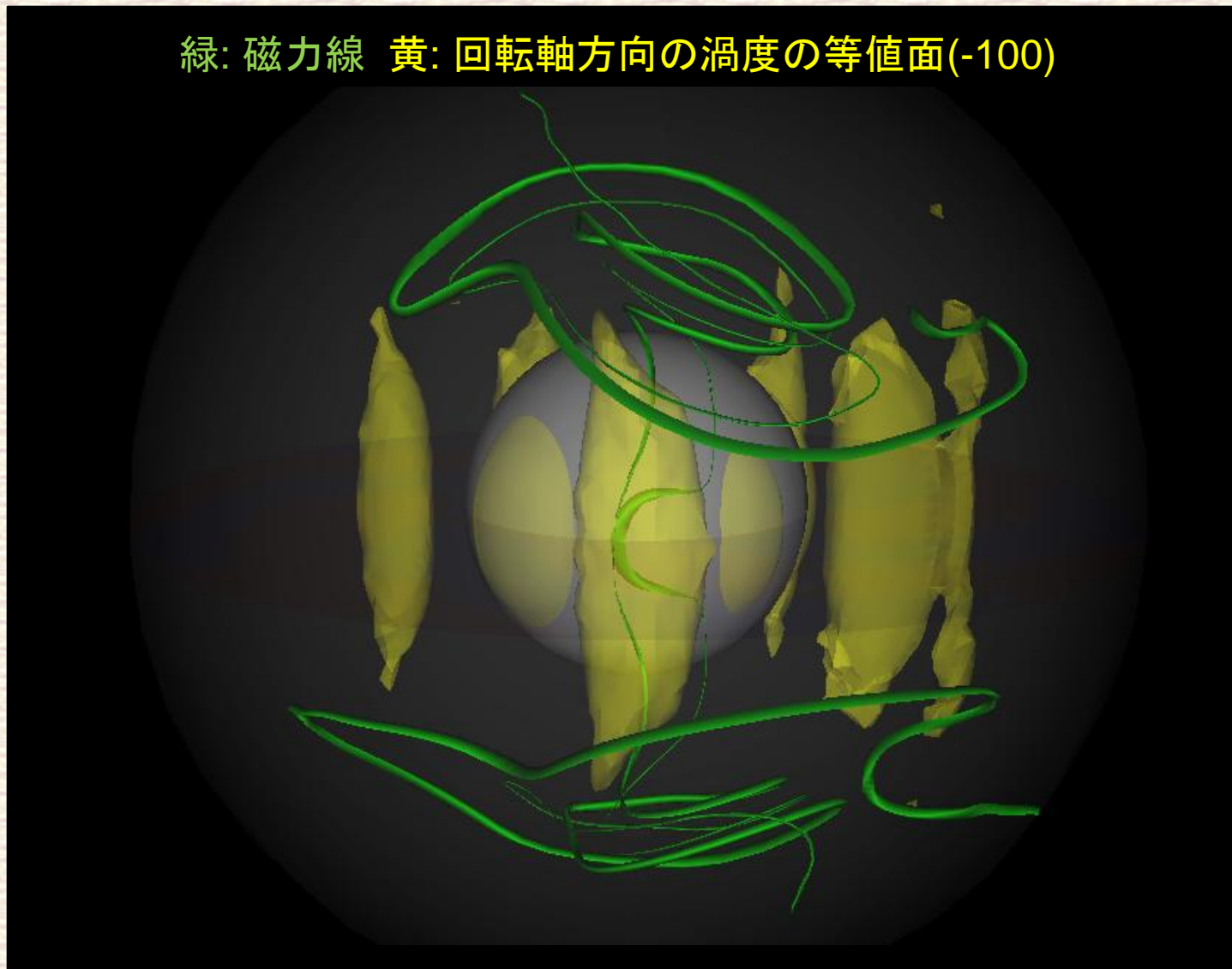
- 今回のパラメータではダイナモ解は得られにくい
  - ◆ 帯状流は期待したほど強くはならない
    - ▶  $\omega$ 効果は作用しなかった
  - ◆ ポロイダル磁場が球殻表面まで出て来ない.
    - ▶ エクマン収束が無いから？

## ■ 今後の課題

- 帯状流が強くなるのは？
- 接円筒内部の流れ場、磁場生成は？

# 磁場の生成・維持(3)

緑: 磁力線 黄: 回転軸方向の渦度の等値面(-100)

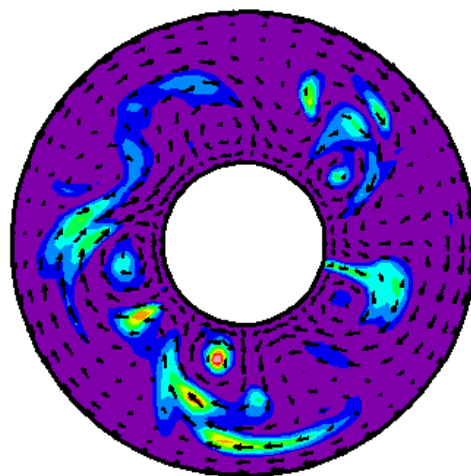




# 考察(2)流れ場の構造

## ■ なぜ平均流が小さくなるのか？

magnetic pressuer(rad-velocity,lon-velocity)



lat=20.9296 1

/usr/bin/gpvect 2008-05-27

magpress-pm50.nc@magpress,lat=2D(vrad-pm50.nc@vrad,lat=20,vlon-pm50.nc@vlon,lat=20)

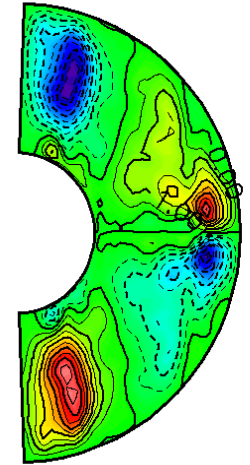
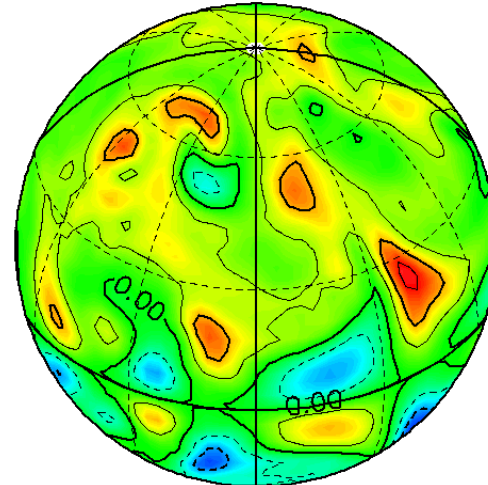
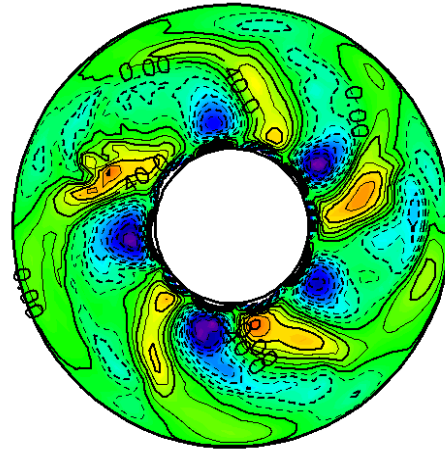
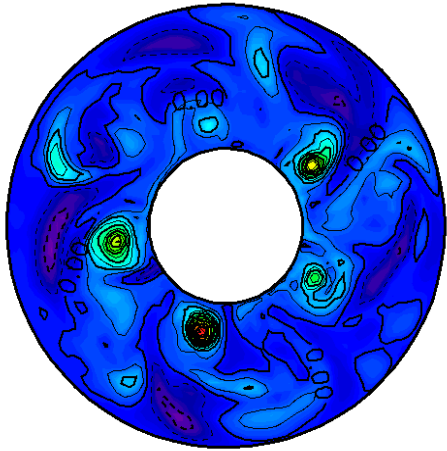
# ダイナモ(2):磁場と流れ場の様相

磁場緯度成分  
(赤道断面)

渦度緯度成分  
(赤道断面)

平均帯状流  
(子午面)

磁場経度成分  
(帯状平均)



CONTOUR INTERVAL =  $8.000E-01$

CONTOUR INTERVAL =  $2.000E+01$

CONTOUR INTERVAL =  $5.000E-01$

0 3 6 9 12

-160 -80 0 80 160

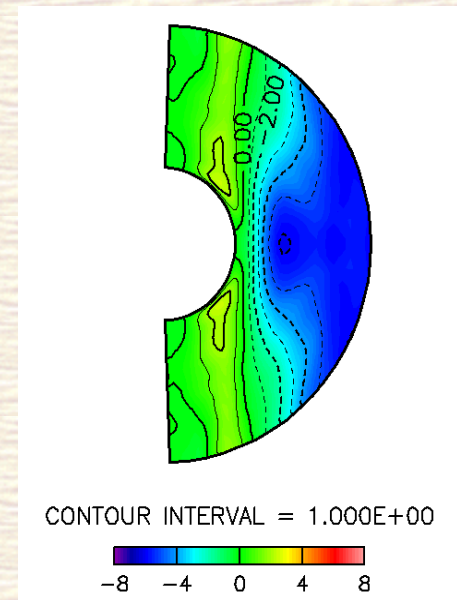
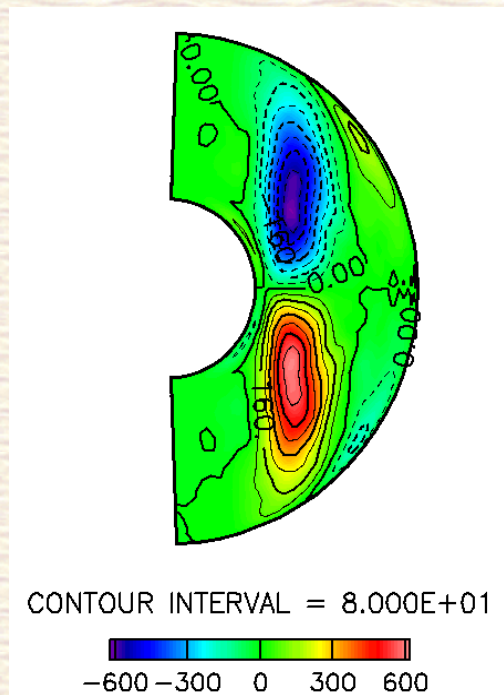
-0.8 -0.4 0 0.4 0.8

-4 -2 0 2 4

## ■ 高気圧性渦が成長

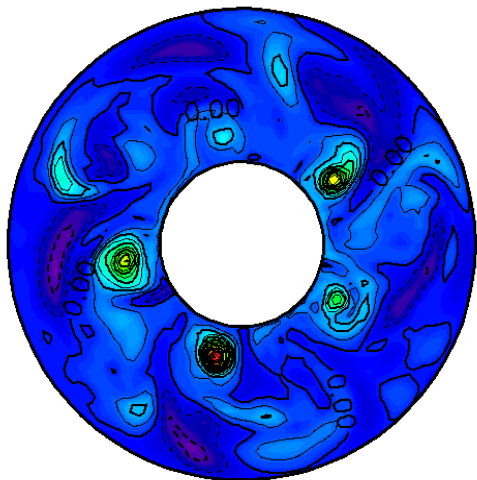
- ポロイダル磁場が渦に集中
- 弱い西向き帯状流(場は西進)

ヘリシティ  
(帯状平均)



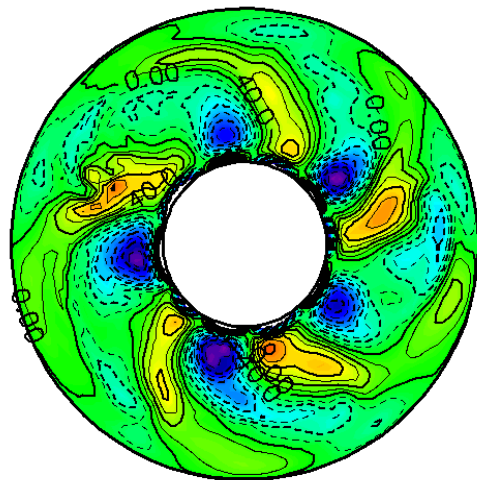
# ダイナモ(2):磁場と流れ場の様相

磁場緯度成分  
(赤道断面)



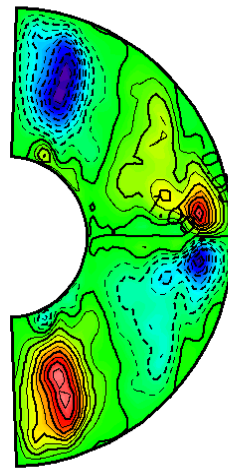
CONTOUR INTERVAL =  $8.000E-01$

渦度緯度成分  
(赤道断面)



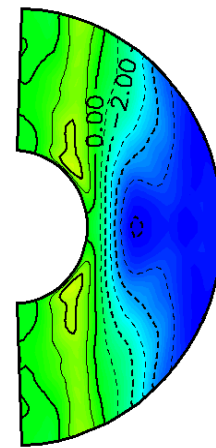
CONTOUR INTERVAL =  $2.000E+01$

磁場経度成分  
(子午面平均)



CONTOUR INTERVAL =  $5.000E-01$

平均帯状流  
(子午面)



CONTOUR INTERVAL =  $1.000E+00$

## ■ 高気圧性渦が成長

- ポロイダル磁場が渦に集中
- 弱い西向き帯状流(場は西進)