

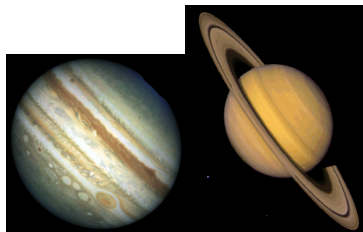
高速回転する薄い球殻内の熱対流により引き起こされる表層縞状構造への力学的境界条件の影響

佐々木 洋平 (京大・数学),
竹広 真一 (京大・数理研), 石岡 圭一 (京大・理),
中島 健介 (九大・理), 林 祥介 (神戸大・理/CPS)

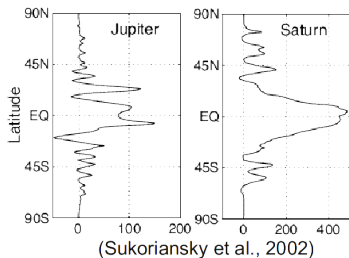
2016 年 3 月 10 日

惑星大気研究会 「水惑星」 @ 神戸大学 CPS

木星, 土星の表層の帯状流



- 赤道域
 - 幅の広い西風 (赤道加速)
- 中高緯度:
 - 縞状パターンに対応した幅の狭い東西流

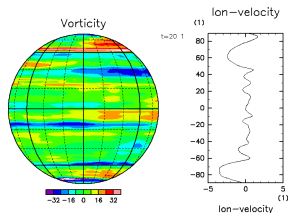


(Sukoriansky et.al, 2002)

「深い」モデルと「浅い」モデル

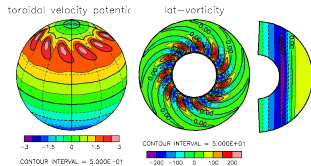
● 「浅い」モデル:

- 回転球面 2次元強制乱流
- 回転球面多層モデル
 - 惑星表層内の (ほぼ)2次元の流体運動
 - 静水圧近似, コリオリ力水平成分のみ
 - ○ : 中高緯度の縞状構造
 - × : 赤道域のジェット



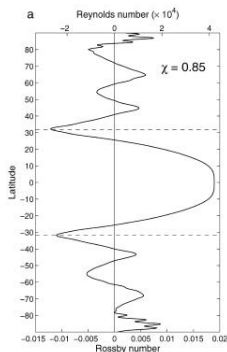
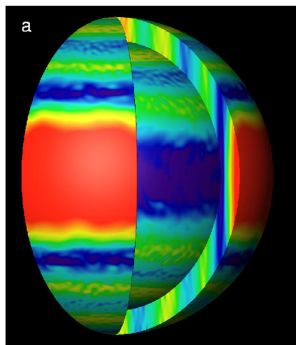
● 「深い」モデル:

- 回転球殻対流モデル
 - 流体層全体の運動
 - 非静水圧, コリオリ力を全て計算
 - ○ : 自転が速い ⇒ 赤道加速
 - × : 中高緯度の縞状構造



薄くするとシマシマできる？

- Heimpel and Aurnou (2007)
 - 薄い球殻
 - 1/8 セクター計算
 - 超粘性の計算
 - 低エクマン数・高レイリー数計算

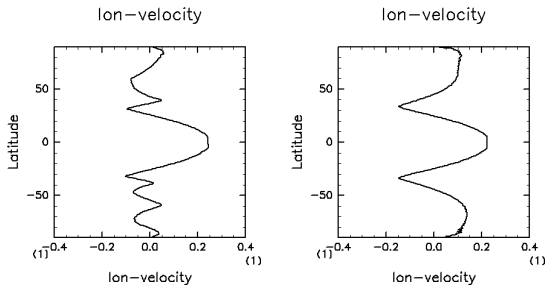


帯状流分布

- 赤道付近:強い東風 (赤道加速) \Leftarrow レイノルズ応力による運動量輸送
- 中高緯度:縞状パターンの形成 \Leftarrow 2次元 β 面乱流 + ラインズ効果?

シマシマは消える？

- 佐々木 他 (2015)
 - 全球の薄い回転球殻対流, 長時間積分
 - 長時間後には中高緯度の縞状構造が消滅
 - Heimpel and Aurnou (2007) の解は過渡的な状態



上下端が自由すべり境界条件の場合の平均帯状流の $t = 47630$ (左) および $t = 80430$ (右) でのスナップショット. $Ra = 0.05$, $Pr = 0.1$, $Ek = 3 \times 10^{-6}$, $\eta = 0.85$.

目的

- 縞状構造の消滅：境界球面での自由すべり条件に依存？
- 本研究：下端境界を自由すべり条件から粘着条件へ
 - 下端での粘着条件：中性=電離大気遷移層での MHD 抵抗

回転球殻対流問題～定式化

- 運動方程式 (速度の時間変化)

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \alpha g T \mathbf{r} + \nu \nabla^2 \mathbf{u},$$

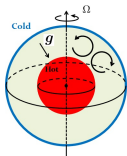
- 熱の式 (温度の時間変化)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \kappa \nabla^2 T + Q,$$

- 質量保存の式

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0.$$

t : 時間, \mathbf{u} : 速度, T : 温度, ρ : 密度, p : 圧力 $\boldsymbol{\Omega}$: 自転角速度,
 α : 熱膨張率, g : 重力加速度 ν : 粘性率, κ : 熱拡散率, Q : 内部熱源



全球長時間積分

- 全球計算 HA2007 は 1/8 セクター計算
- 長時間計算 (現状 12800 回転 = 0.2 粘性拡散時間)
HA2007 は 1600 回転 = 0.024 粘性拡散時間)
- パラメータ設定
 - プラントル数: $Pr = \frac{\nu}{\kappa} = 0.1$
 - 修正レイリー数: $Ra^* = \frac{\alpha g_o \Delta T}{\Omega^2 D} = 0.05$
 - エクマン数: $Ek = \frac{\nu}{\Omega D^2} = 3 \times 10^{-6}$
 - 球殻の内径外径比: $\eta = \frac{r_i}{r_o} = 0.85$
- 熱境界条件は温度固定
- 上端で自由すべり, 下端で粘着条件

数値解法

- 空間微分: スペクトル法

- 速度をトロイダル・ポロイダルポテンシャルで表現
- 水平方向は球面調和関数, 動径方向はチェビシェフ多項式で展開
- 切断波数: 水平 341, 鉛直 48 (格子点数: 経度 1024, 緯度 512, 鉛直 65)

- 時間積分:

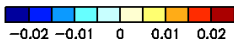
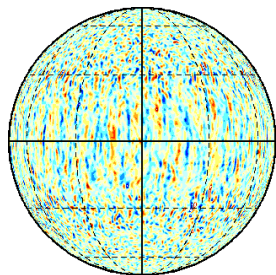
- 拡散項は Crank-Nicolson 法, それ以外は 2 次の Adams-Bashforth 法
- 次式の超粘性を使用

$$\nu = \begin{cases} \nu_0, & \text{for } l \leq l_0, \\ \nu_0[1 + \varepsilon(l - l_0)^2], & \text{for } l > l_0. \end{cases}$$

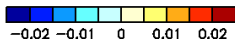
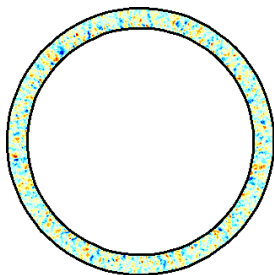
- 本研究: $l_0 = 21, 42, 85, 170$, $\varepsilon = 10^{-2}$. (段階的に超粘性の波数を大きくした)

対流活動度

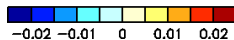
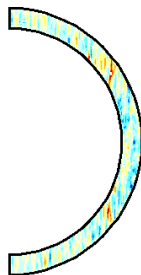
- 速度動径成分 @ $t = 80000$ (約 12000 回転).



球殻中層



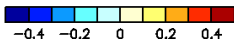
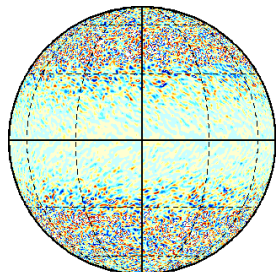
赤道断面



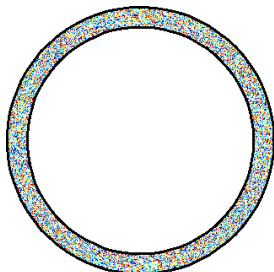
子午面断面

渦度

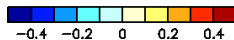
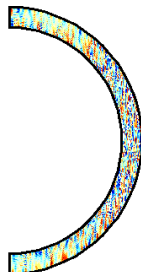
- 渦度回転軸方向成分 @ $t = 80000$ (帯状平均成分は除いている)



球殻中層



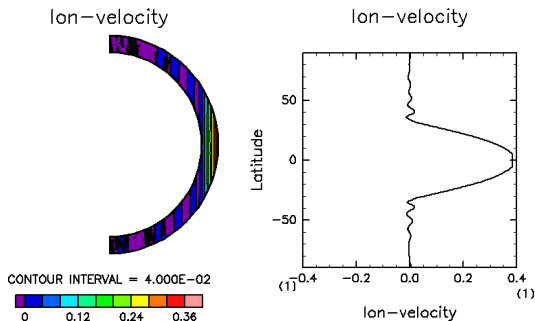
赤道断面



子午面断面

平均帯状流

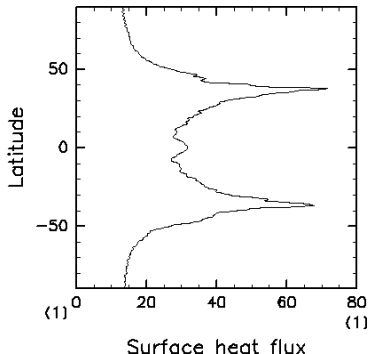
- 80000 無次元時間 (約 12000 回転) までの時間積分
⇒ **強い赤道ジェットと弱い中高緯度の縞状構造**
 - 12000 無次元時間 (約 19000 回転) まで維持されている



上端が自由すべり, 下端が粘着境界条件の場合の表面帯状流 (左) と平均帯状流 (右) の $t = 80000$ でのスナップショット.
 $Ra = 0.05$, $Pr = 0.1$, $Ek = 3 \times 10^{-6}$, $\eta = 0.85$.

外側境界熱フラックス

- 東西平均外側境界熱フラックス @ $t = 80000$ (約 12000 回転).



まとめ

- 下端の粘着条件
 - 大規模場に効率的に作用するエクマン摩擦
 - 2次元流れのエネルギー逆カスケードが阻害?
- もっとレイリー数を上げると?

謝辞

回転球殻対流計算は海洋研究開発機構の地球シミュレータ 3 を使用しました。

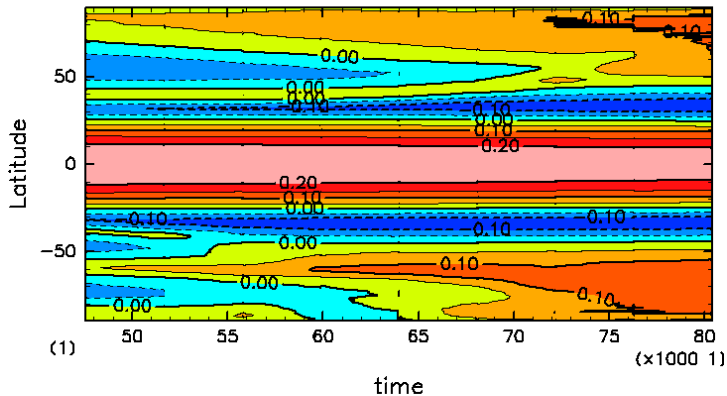
参考文献

- Heimpel, M., Aurnou, J., 2007 : Turbulent convection in rapidly rotating spherical shells: A model for equatorial and high latitude jets on Jupiter and Saturn. *Icarus*, 187, 540–557.
- Sukoriansky, S., Galperin, B., Dikovskaya, N., 2002 : Universal spectrum of two-dimensional turbulence on a rotating sphere and some basic features of atmospheric circulation on giant planets. *Phys. Rev. Lett.*, 89, 124501-1–4.
- 竹広 真一, 佐々木 洋平, 石岡 圭一, 2015 : 高速回転する薄い球殻内の熱対流により引き起こされる表層縞状構造の消滅. 平成 26 (2014) 年度地球シミュレータ利用報告書.

付録

やっぱりシマシマは消えた!

lon-velocity



(1)

($\times 1000$)

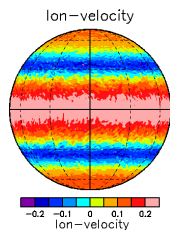
time

CONTOUR INTERVAL = $5.000E-02$



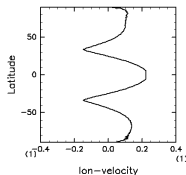
-0.2 -0.1 0 0.1 0.2

帯状平均角運動量の時間変化と最終状態の東西流分布



lon-velocity

-0.2 -0.1 0 0.1 0.2
lon-velocity



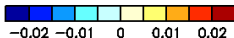
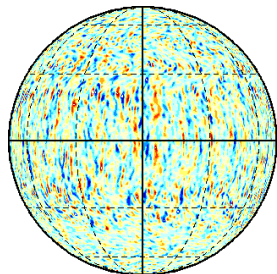
(1)

(1)

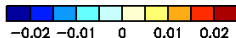
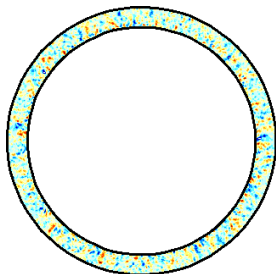
対流活動度 (FF)

- 速度動径成分 @ $t = 64030$ (約 10000 回転).

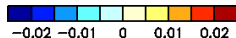
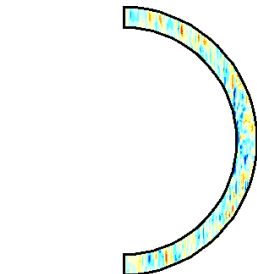
rad-velocity



rad-velocity



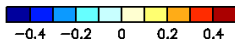
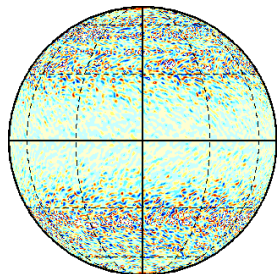
rad-velocity



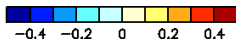
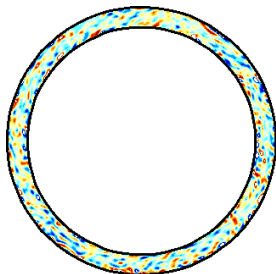
渦度 (FF)

- 渦度回転軸方向成分 @ $t = 64030$ (帯状平均成分は除いている)

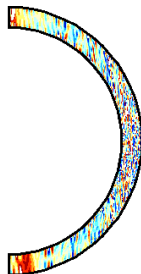
vorticity (cyl-Z)



vorticity (cyl-Z)

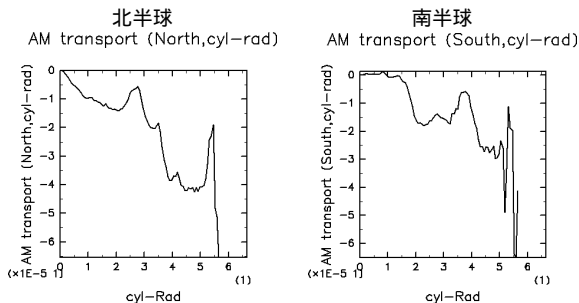


vorticity (cyl-Z)



角運動量輸送 (FF)

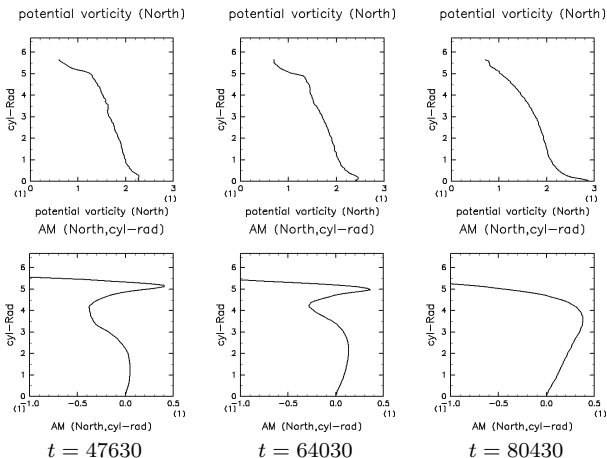
- 東西・回転軸方向平均角運動量輸送



- 負の角運動量外側へ輸送 \Rightarrow ロスビー波の外側伝播 \Rightarrow 中高緯度を加速, 接円筒附近を減速

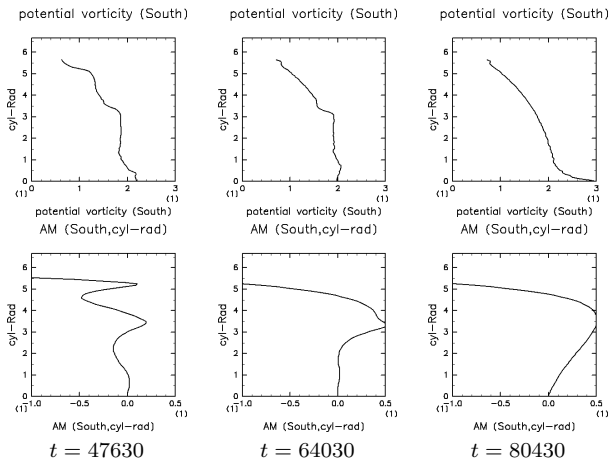
ポテンシャル渦度と角運動量 (FF)

- 東西・回転軸方向平均ポテンシャル渦度(上)と角運動量(下), 北半球



ポテンシャル渦度と角運動量 (FF)

- 東西・回転軸方向平均ポテンシャル渦度 (上) と角運動量 (下), 南半球



外側境界熱フラックス (FF)

- 東西平均外側境界熱フラックス

