木星型惑星大気の縞状構造について

竹広 真一

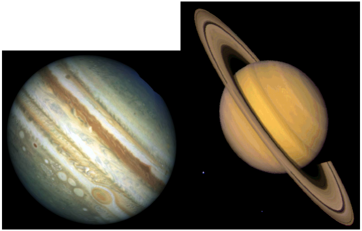
京都大学数理解析研究所

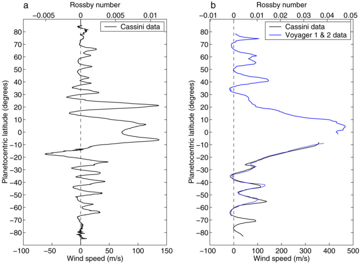
2015 年 3 月 6 日

惑星大気研究会 2015 早春@東京大学

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

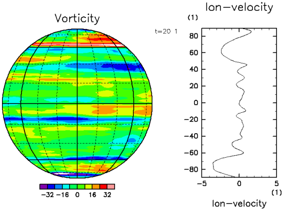




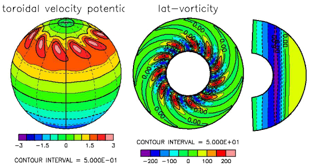
(Sukoriansky et.al, 2002)

「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 次元的流体運動
    - 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



深いモデル
回転球殻対流問題

回転球殻対流問題～定式化

- **運動方程式 (速度の時間変化)**

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

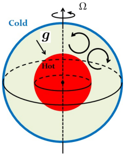
- **熱の式 (温度の時間変化)**

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

- **質量保存の式**

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

t : **時間**, $\boldsymbol{u}$: **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**



テイラープラウドマンの定理

- **回転が非常に大きい状況 (地衡流バランス)**

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

- rotation **を作用させると (密度一定なので)**

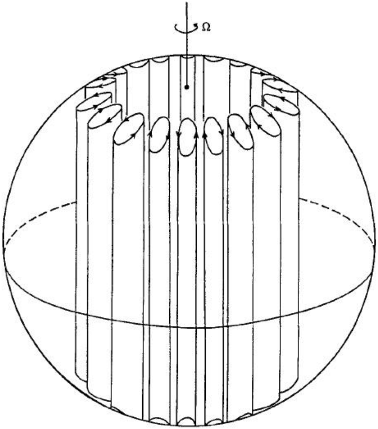
テイラー・プラウドマンの定理

$$(2\boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} = 0.$$

流れは回転軸方向に一様

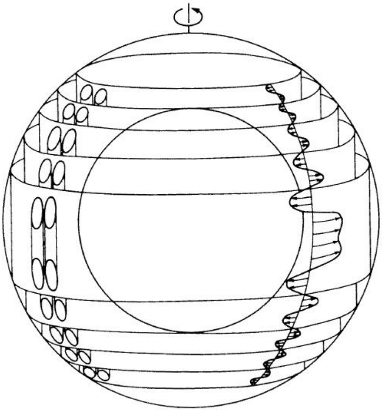
回転球殻内の臨界熱対流

- Busse (1970)
  - 高速回転する球
  - 回転軸方向に一様な運動場を仮定、摂動計算 (テイラー・プラウドマンの定理)
  - 球の中程に対流渦が局所的に発生
  - 対流セルは prograde 方向に伝播

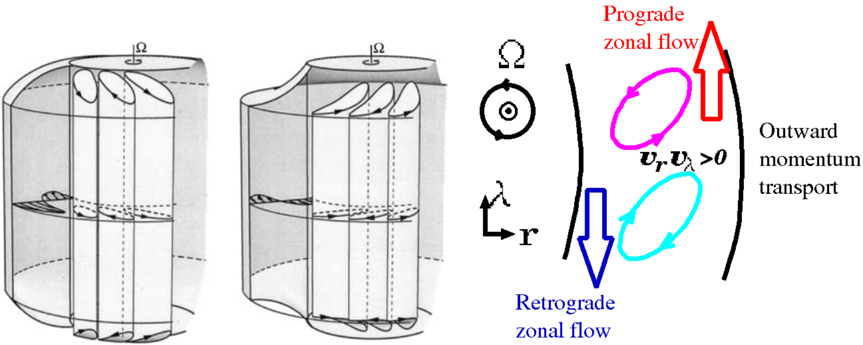


回転球殻対流での縞状構造形成

- Busse(1976,1983)
  - **レイリー数大**
    ⇒ 対流渦が動径方向に多数並ぶ
    ⇒ 縞状パターン形成
  - **平均帯状流生成**
    外側球面の曲率
    ⇒ 対流セルの傾き
    ⇒ 動径方向へ運動量輸送



平均帯状流生成メカニズム

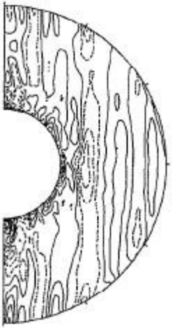


(Busse, 2002)

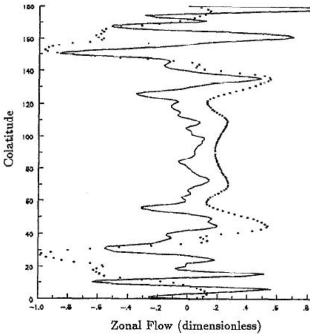
- **外側境界の曲率 ⇒ 対流渦の傾き⇒ 内から外への運動量輸送 ⇒ 帯状流生成**

シマシマができた?

動径速度の赤道面分布



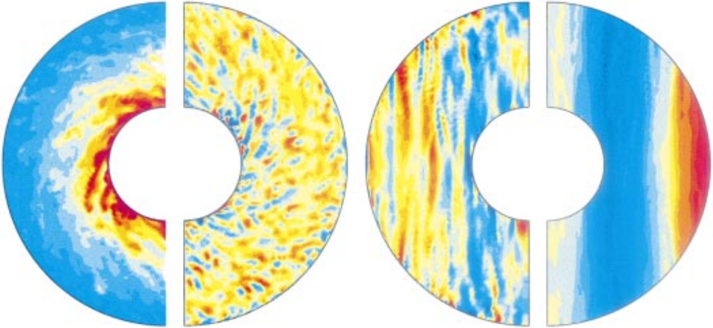
平均帯状流分布



表面帯状流分布

- Sun and Schubert (1995)
  - 高解像度・高レイリー数・低エクマン数での有限振幅対流の時間発展数値計算
  - 縞状パターンの形成?

シマシマは消えた

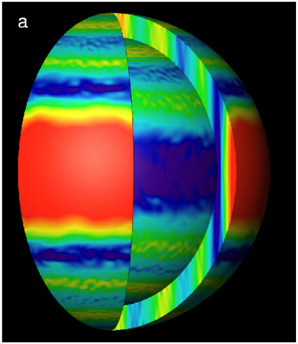


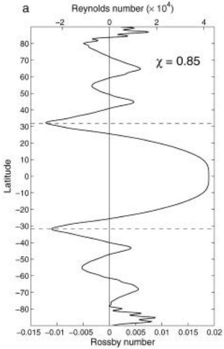
赤道面温度場　回転軸方向渦度 (赤道面, 子午面)　平均帯状流

- Christensen (2002)
    - 系統だった高レイリー数対流の有限振幅計算
    - 縞状パターンは生成されない.
    - Sun and Schubert (1995) の縞状パターンは偽り. 初期場が残っていただけ.
    - 赤道で回転と同方向 (赤道加速状態)

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**



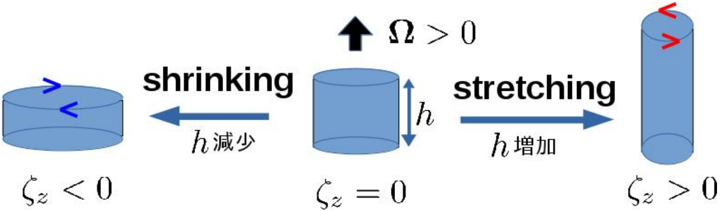


帯状流分布

- **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**?

ポテンシャル渦度保存則

- **ポテンシャル渦度保存 ∼ 局所的な角運動量保存**



ポテンシャル渦度保存則

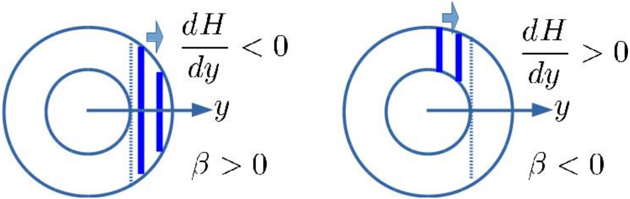
$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla\right) q = 0, \quad q = \frac{2\Omega + \zeta_z}{h}.$$

2 次元 β 面乱流問題

- **ベータ面モデル (ポテンシャル渦度保存則)**

$$\frac{\partial}{\partial t}\nabla^2\psi + J(\psi, \nabla^2\psi) + \beta(y)\frac{\partial\psi}{\partial x} = F - D.$$

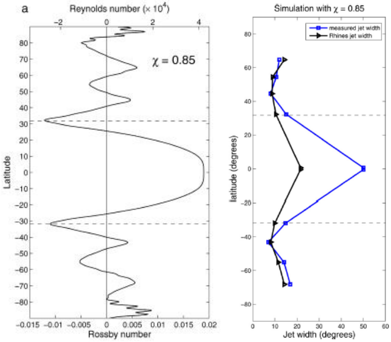
- **回転球殻内の** 2 **次元流** $\sim$ **地形性** β **効果**：
  $\beta(y) = -(1/H)(dH/dy)$



- cf. **回転球面** 2 **次元流** $\sim$ **惑星ベータ効果**
  $\beta = (df/dy) = (2\Omega/a)\cos\varphi$

高緯度縞状構造の説明

- Heimpel and Aurnou (2007)
  - **高緯度:回転系の熱対流** ⇒ 2 **次元的な小スケールの渦生成** ⇒ **逆カスケード** ⇒ **ラインズ効果で帯状構造**



ラインズスケールとジェット幅の比較

ここで疑問...

- Heimpel and Aurnou (2007) **は高緯度シマシマを 2 次元 β 面強制乱流の結果だと解釈している**
- **しかしわれわれは** Obuse et al. (2010) **を知っている**.
  長時間積分するとシマシマは消える
- Heimpel and Aurnou (2007) **の計算も**, **長時間積分すればシマシマは消えるんでないの**?

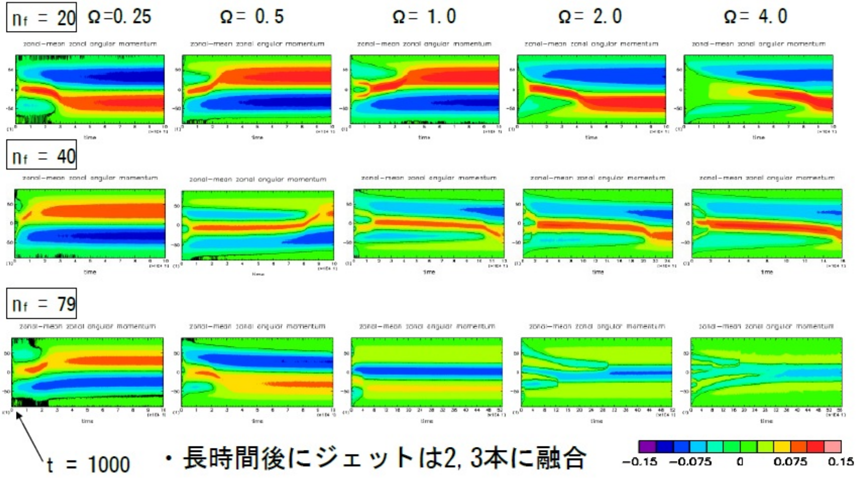
そこで...

薄い球殻対流計算をもっと長くやってみよう.
1/8 **セクターはやめよう**. **全球計算**.

(共同研究者 : 佐々木洋平, 石岡圭一, 中島健介, 林祥介)

回転球面 2 次元強制乱流問題

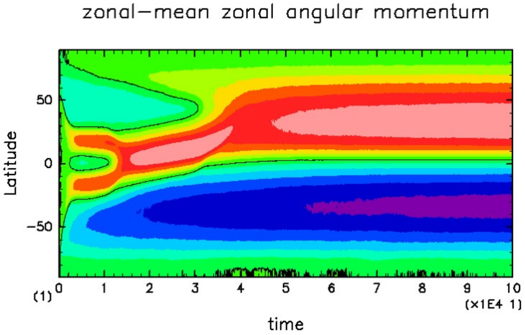
- Obuse et al.(2010)：**従来の研究よりも長時間積分すると…**

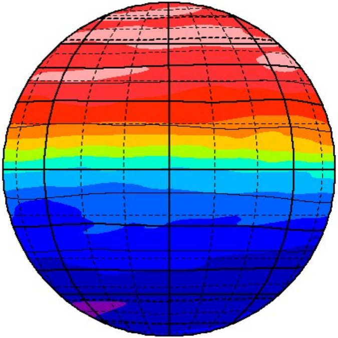


- 長時間後にジェットは2, 3本に融合

回転球面 2 次元強制乱流問題

- Obuse et al. (2010)
  - **ジェットの融合・消滅 ⇒ シマシマが消える！**





角運動量の緯度分布時間変化 (左) と帯状流分布最終状態 (右) (Obuse et al. 2010)

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
  - プランドル数: $Pr = \dfrac{\nu}{\kappa} = 0.1$
  - 修正レイリー数: $Ra^* = \dfrac{\alpha g_o \Delta T}{\Omega^2 D} = 0.05$
  - エクマン数: $Ek = \dfrac{\nu}{\Omega D^2} = 3 \times 10^{-6}$
  - 球殻の内径外径比: $\eta = \dfrac{r_i}{r_o} = 0.85$
- 境界条件: 応力無し条件, 温度固定

数値解法

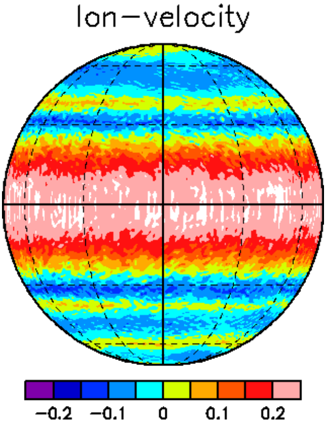
- 空間微分: スペクトル法
  - 速度をトロイダル・ポロイダルポテンシャルで表現
  - 水平方向は球面調和関数, 動径方向はチェビシェフ多項式で展開
  - 切断波数: 水平 341, 鉛直 48 (格子点数: 経度 1024, 緯度 512, 鉛直 65)
- 時間積分:
  - 拡散項は Crank-Nicolson 法, それ以外は 2 次の Adams-Bashforth 法
  - 次式の超粘性を使用

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

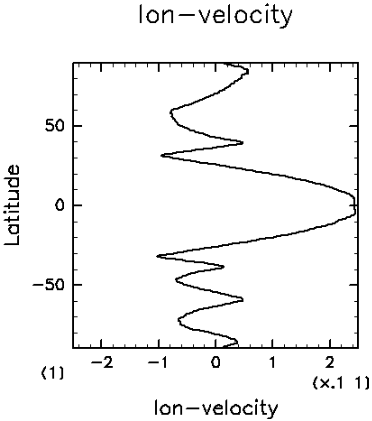
  - 本研究 : $l_0 = 21, 42, 85, 170,\ \varepsilon = 10^{-2}$. (段階的に超粘性の波数を大きくした)

全球長時間積分

- $t = 47630$ でのスナップショット
  - 中高緯度でシマシマ形成



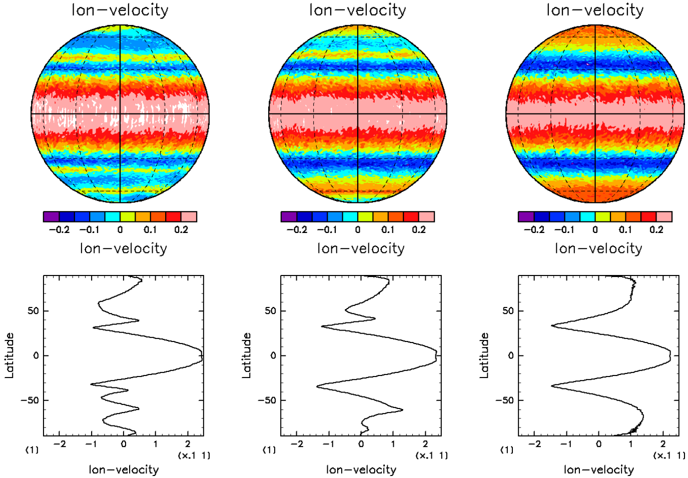
東西流分布



表面帯状流分布

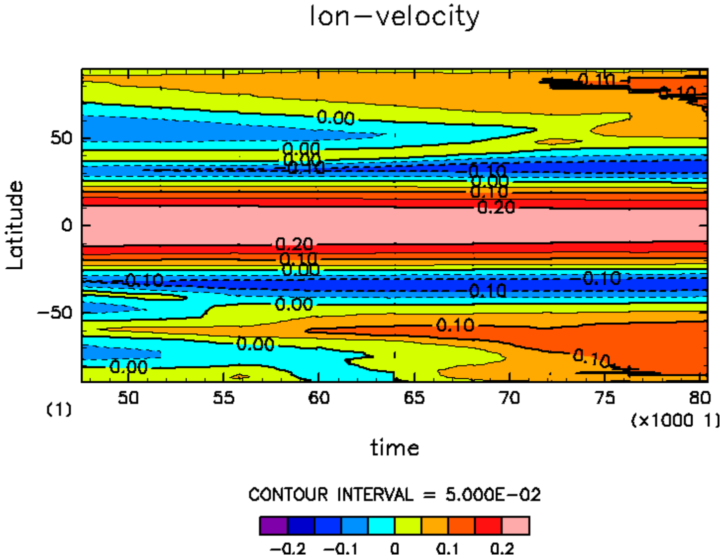
全球長時間積分

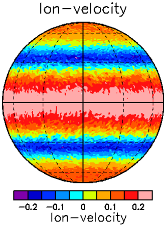
- もっと積分時間を延ばすと…
  - 次第に中高緯度のシマシマの数が減っていく

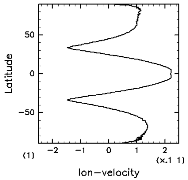


$t = 47630$ $t = 64030$ $t = 80430$

やっぱりシマシマは消えた!



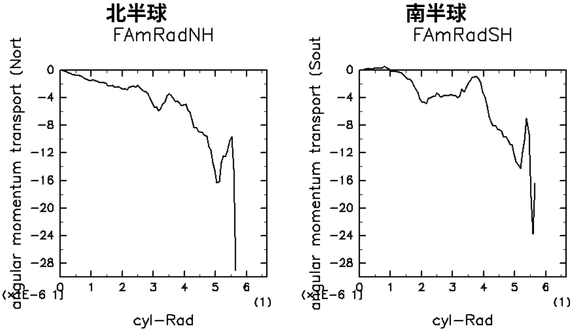




帯状平均角運動量の時間変化と最終状態の東西流分布

角運動量輸送

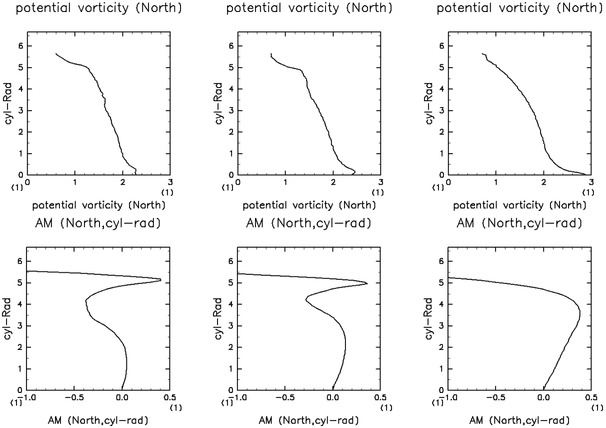
- **東西・回転軸方向平均角運動量輸送**



- **負の角運動量外側へ輸送 ⇒ ロスビー波の外側伝播 ⇒ 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

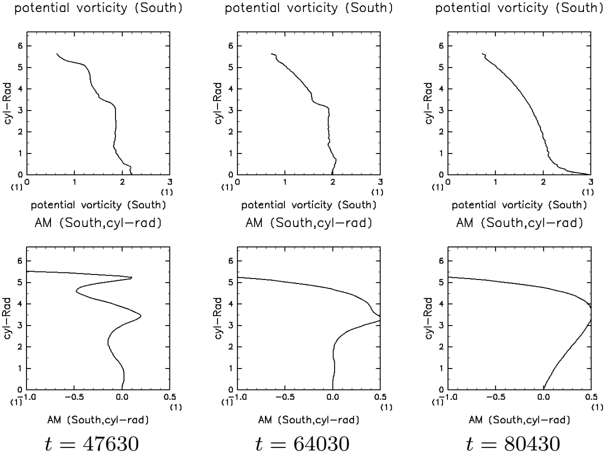
- 東西・回転軸方向平均ポテンシャル渦度 (上) と角運動量 (下), 北半球



$t = 47630$ $t = 64030$ $t = 80430$

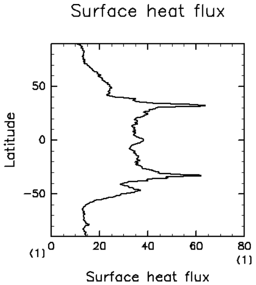
ポテンシャル渦度と角運動量

- **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**

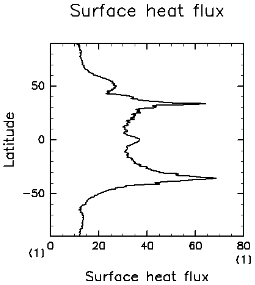


外側境界熱フラックス

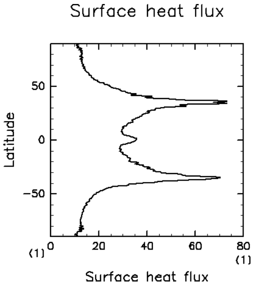
- **東西平均外側境界熱フラックス**



$t = 47630$



$t = 64030$



$t = 80430$

まとめ

- 木星・土星の縞状構造を説明できる決定的な流体モデルはまだない
  - これまでの計算結果は時間積分が足りていなかった. 過渡的状態での縞状構造
  - 長時間積分すると縞状構造が消える.
- なぜ縞状構造が消えていくのか?
  - 浅いモデル (順圧) : まだ良く分かっていない
  - 深いモデル : ロスビー波による加速?
- 縞状構造を説明できる新たなモデルの提案が必要

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を使用しました.

参考文献

- Busse, F. H., 1970 : Thermal instabilities in rapidly rotating systems. J. Fluid Mech., 44, 441–460.
- Busse, F. H., 1976 : A simple model of convection in the Jovian atmosphere. Icarus, 29, 255–260.
- Busse, F. H., 1983 : A model of mean zonal flows in the major planets. Geophys. Astrophys. Fluid Dyn., 23, 153–174.
- Busse, F. H., 2002 : Convective flows in rapidly rotating spheres and their dynamo action. Phys. Fluids, 14, 1301–1314.
- Christensen,U.R., 2002 : Zonal flow driven by strongly supercritical convection in rotating spherical shells. J. Fluid Mech., 470, 115—133.
- 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.
- Obuse, K, Takehiro, S., Yamada, M., 2010 : Long-time asymptotic states of forced two-dimensional barotropic incompressible flows on a rotating sphere. Phys. Fluids, 22, 056601.
- 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.
- Sun, Z.-P., Schubert, G., 1995 : Numerical simulations of thermal convection in a rotating spherical fluid shell at high Taylor and Rayleigh numbers. Phys. Fluids, 7, 2686–2699.