

木星型惑星大気の 縞状構造の成因の研究

竹広真一, 佐々木洋平, 石岡圭一 (京都大学)

2018 年 4 月 19 日

平成 29 年度地球シミュレータ利用報告会@一橋講堂

昔の観測

- ▶ ガリレオ・ガリレイ: 木星の衛星を発見(1610, ガリレオ衛星)
- ▶ カッシーニ: 木星のスケッチ(1665-1677, 大赤斑? 縞模様)



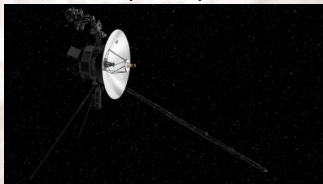
<http://cosmobiologist.blogspot.jp/2016/02/jupiter-king-of-worlds.html>

最近の観測：探査機

パイオニア 10,11 号
(1973,1974)



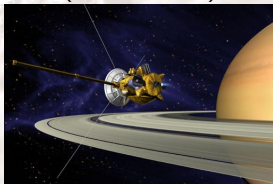
ボイジャー 1,2 号
(1979)



ガリレオ
(1995)



カッシーニ
(2000,2004)

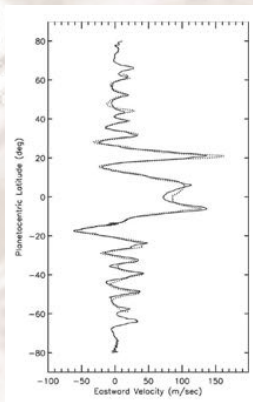


ジュノー
(2016)



<https://www.nasa.gov/>, <https://www.jpl.nasa.gov/> より

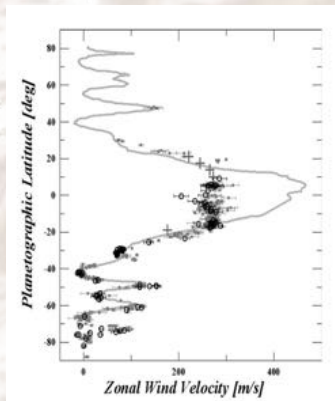
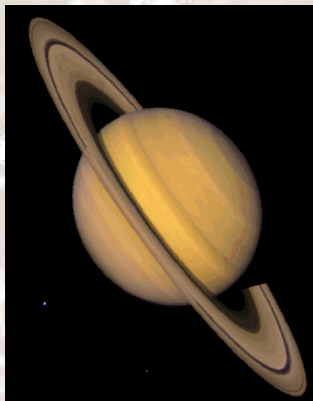
木星の風



Porco et al. (2003), Limaye (1986)

- ▶ 赤道で 200m/s (時速720km) の西風
- ▶ 中高緯度で向きが交互に変わる東西風
- ▶ 「しましま」と風の分布が対応

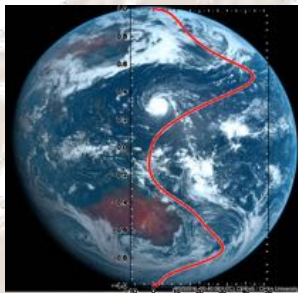
土星の風



Sanchez-Lavega et al. (2004)

- ▶ 赤道で 500m/s (時速1800km) の西風
- ▶ 高緯度で向きが交互に変わる東西風

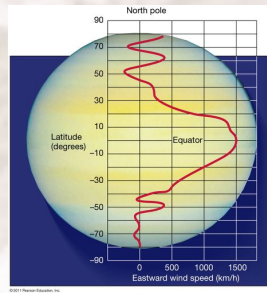
地球・木星・土星の風



地球



木星

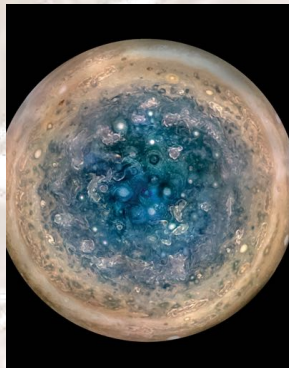


土星

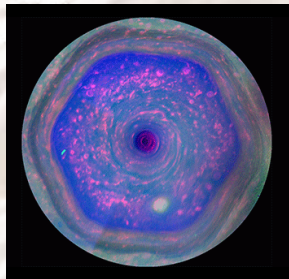
- ▶ 赤道で西風(赤道超回転) ⇔ 地球は赤道東風
- ▶ 中高緯度で多数の東西ジェット風
⇔ 地球は半球 1 本のジェット風

https://sciencesource.com/Doc/SCS/Media/TR1_WATERMARKED/1/1/e/9/SS2791609.jpg?d63644523866, (Kaspi et al. 2018),
http://pages.uoregon.edu/jimbrau/BrauImNew/Chap12/7th/AT_7e_Figure_12_05.jpg

木星・土星の極渦



木星 (Juno)



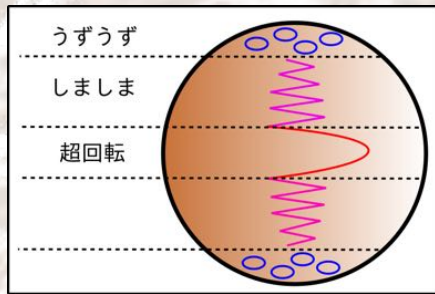
土星 (Cassini)

- ▶ 木星：小さな多数の渦
- ▶ 土星：六角形構造

<https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/17-051.jpg>

https://media1.s-nbcnews.com/j/news/cms/2014_06/162536/saturn-hexagonal-jet-stream_222c76fb83cf9099fdb9ef4bc9c1f5df.nbcnews-ux-2880-1000.jpg

木星・土星の風の特徴



- ▶ 赤道西風(赤道超回転)
 - ⇒ 角運動量保存則に反する? 赤道が一番遅くなるはず
- ▶ 中高緯度ジェット風
 - ⇒ たくさんできるのはなぜ? どうやって維持するの?
- ▶ (極域の渦)

木星・土星の表層の帯状流の成因の研究

- ▶ 「浅い」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
 - 伝統的には × : 赤道加速, ○ : 中高緯度の縞状構造
(eg. Nozawa and Yoden 1993)
 - 最近の GCM 計算 : 赤道域での対流 ⇒ ○ : 赤道加速
but 下端境界条件に難あり
(eg. Liu and Schnieder 2011)
- ▶ 「深い」モデル: 回転球殻対流
 - 非静水圧, コリオリ力を全て計算
 - 伝統的には ○ : 赤道加速, × : 中高緯度の縞状構造
(eg. Christensen 2002)
 - 薄い球殻対流 ⇒ ○ : 中高緯度の縞状構造
(eg. Heimpel and Aurnou 2007)

回転球殻対流問題～定式化(無次元)

時間を $1/\Omega$, 速度を ΩD で無次元化 (Ω は自転角速度, D は球殻の厚さ).

- ▶ 支配方程式

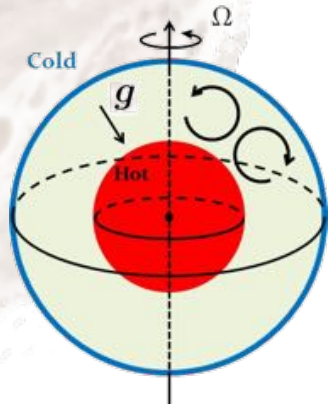
$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + 2\mathbf{e}_z \times \mathbf{u} = -\nabla p + \text{Ra}T \frac{\mathbf{r}}{r_o} + \text{E}\nabla^2 \mathbf{u},$$
$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \frac{\text{E}}{\text{Pr}} \nabla^2 T, \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0.$$

- ▶ 境界条件: 上下境界で温度固定, 自由すべり.

$$T = 1 \text{ at } r = \frac{\chi}{1-\chi}, \quad T = 0 \text{ at } r = \frac{1}{1-\chi},$$
$$u_r = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\lambda}{r} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\phi}{r} \right) = 0 \text{ at } r = \frac{\chi}{1-\chi}, \frac{1}{1-\chi}.$$

- ▶ 無次元パラメータ

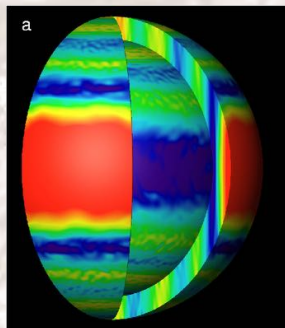
$$\text{Ra} = \frac{\alpha g_o (T_i - T_o)}{\Omega^2 D}, \quad \text{E} = \frac{\nu}{\Omega D^2}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu}{\kappa}, \quad \chi = \frac{r_i}{r_o}.$$



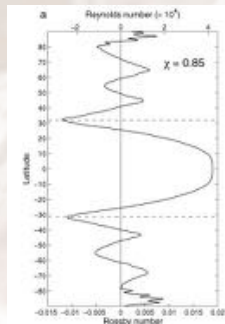
回転球殻対流：ブシネスク系

▶ Heimpel and Aurnou (2007)

- 薄い球殻計算：赤道順行ジェットと中高緯度縞状構造を実現
- 1/8 セクター計算：全球計算ではない (解像度 128x512x64)
- 計算時間短い：約 1600 回転(0.02粘性時間)



東西流

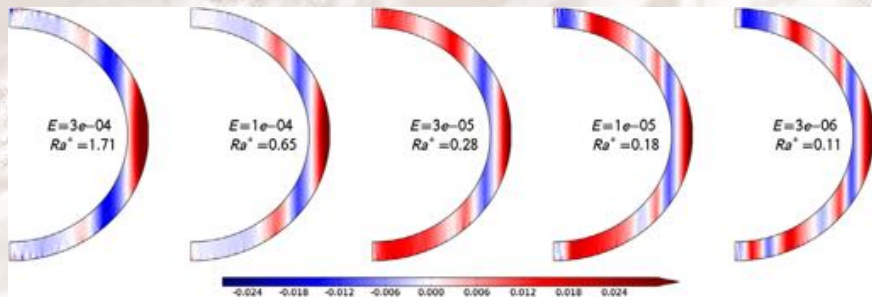


平均東西流

最近の回転球殻対流：非弾性系

▶ Gastine et al. (2014)

- $E = 3 \times 10^{-6}$ まで徐々に回転を上げる, 超粘性導入
- 解像度：緯度方向ルジャンドル関数 682 次, 動径チェビシェフ 193 次
1/8 セクター ($E = 3 \times 10^{-6}$ の場合)
(格子点だと経度×緯度×動径=256×1024×289 ぐらい)
- 非弾性系でも赤道順行ジェット, 中高緯度に縞状構造生成

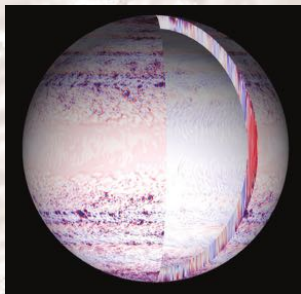


平均帯状流分布. 左から右へ E が小さい.

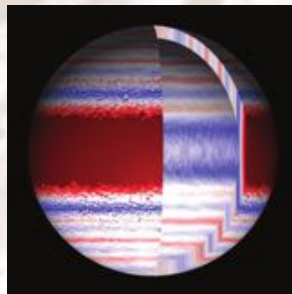
最近の回転球殻対流：非弾性系

▶ Heimpel et al. (2015)

- 解像度：緯度方向ルジャンドル関数 768 次, 動径チェビシェフ 288 次, 1/4 セクター (格子点だと経度×緯度×動径=576×1152×432 ぐらい)
- $E = 3 \times 10^{-6}$, 超粘性使用
- 赤道順行ジェット, 中高緯度に縞状構造
- 外側境界に薄い安定成層, 表層に細かな渦



渦度回転軸成分



東西流

既存の研究の問題点とこれまでの我々の計算例

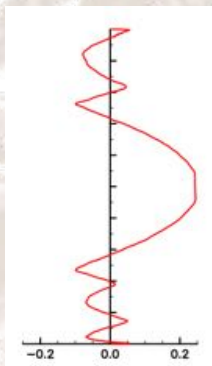
既存の研究の問題点

- ▶ すべてセクター計算(全球ではない)
- ▶ 積分時間が短い. せいぜい ~ 1 粘性時間

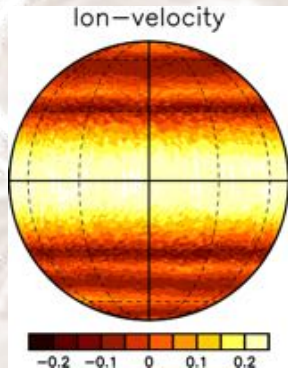
我々の研究/計算

- ▶ 全球計算を実行, セクター計算と比較
- ▶ できるだけ長時間計算
 - 計算資源が少なくて済み, 理解がより容易なブシネスク系で比較検討

全球計算に挑戦



表面平均風



表面



子午面断面

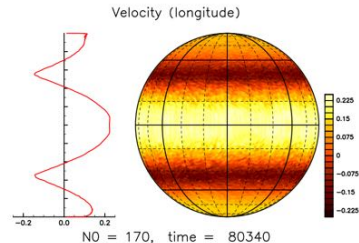
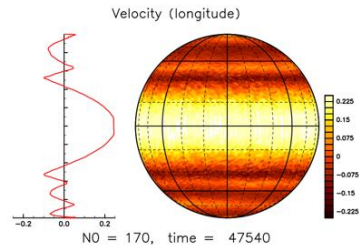
(地球シミュレータにて計算, Takehiro et al. 2017)

- ▶ 赤道超回転
- ▶ 中高緯度に複数ジェット(しましま)
- ▶ 内部は回転軸に沿った構造

全球計算：結果

- ▶ 赤道超回転
- ▶ 中高緯度ジェット風
 - 長時間積分の結果：
複数⇒ 1本に融合(しましま消える)

(地球シミュレータにて計算)
(Takehiro et al. 2017)



縞状構造と赤道加速の成因を探るには...

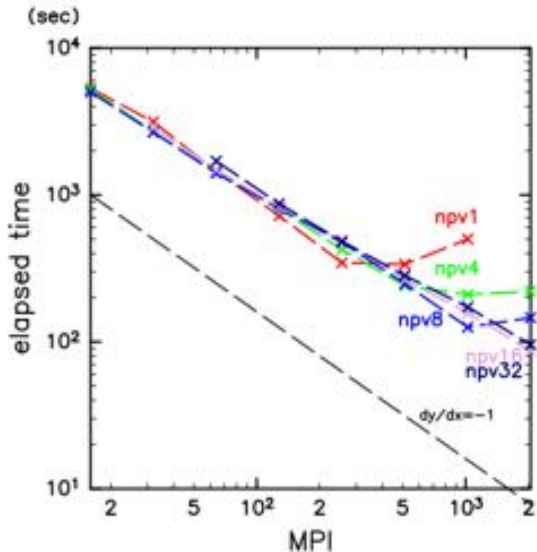
- ▶ 薄い回転球殻熱対流計算, 全球かつ長時間積分が必須
 - 先行研究は経度方向に対称性を仮定, セクター計算
赤道加速と中高緯度縞状構造を作れると主張.
 - しかし, 全球計算の長時間積分では中高緯度シマシマが消える?
- ▶ $E = 3 \times 10^{-6}$ 計算までしかやられていない.
しかも超粘性で高波数成分をより強く減衰させている.
 - 空間解像度をあげてより小さい E (回転大) を探る
 - 散逸過程の依存性を調べる必要. 超粘性なし計算ではどうなるか.

高解像度長時間計算のために...

- ▶ 球面調和関数変換ライブラリの改良
 - 緯度方向に加えて動径方向の並列化を実装
 - より高解像度・大規模並列計算が可能
- ▶ 非弾性系モデルの開発
 - 大規模高解像度計算のための並列化

動径並列化 (非弾性球殻対流モデル)

Anelastic 4096x2048x64 (T1365L64), 100step



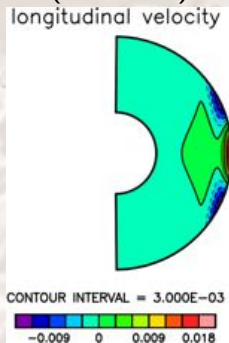
1 スレッド並列計算

NPV : 動径方向並列数

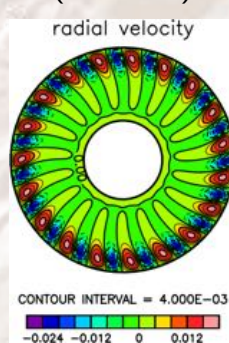
非弾性球殻対流モデル～計算例

- ▶ ベンチマーク計算(Jones et al. 2011 の追試)
- ▶ 解像度(経度×緯度×動径格子点数=1024×512×64)
- ▶ 緯度方向 32 並列, 動径方向 8 並列

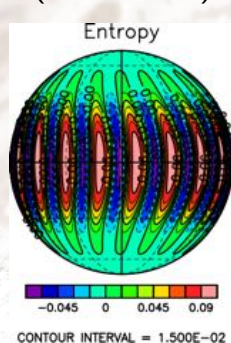
東西流
(子午面)



鉛直流
(赤道面)



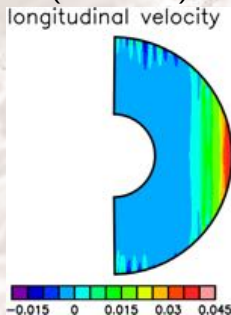
エントロピー
(表面付近)



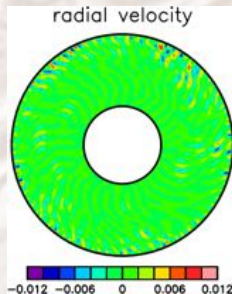
非弾性球殻対流モデル～計算例

- ▶ $E = 3 \times 10^{-5}$, $Ra = 9 \times 10^{-4}$, $Pr = 1$
- ▶ 解像度(経度×緯度×動径格子点数=512×256×64)
- ▶ 緯度方向 16 並列, 動径方向 4 並列

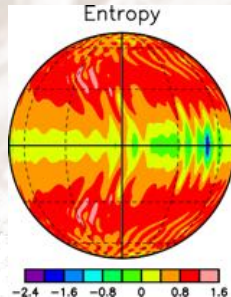
東西流
(子午面)



鉛直流
(赤道面)



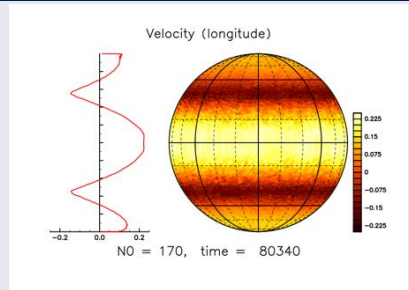
エントロピー
(表面付近)



まとめと今後に向けて

縞状構造と赤道加速の成因を探るために

- ▶ 「全球」「長時間」計算を実施
 - 赤道加速
 - ×縞状構造は消滅
- ▶ さらなる高解像度化、現実化に向けて
 - 鉛直層の並列化を実施
 - 非弾性球殻対流の数値モデルの構築



今後(今年度)の課題(目標)

高解像度での高速回転非弾性球殻対流の長時間数値実験