

球面軸対称循環に関するパラメータスイープ実験 ハドレー循環とスーパーローテーション

山本 博基, 石岡 圭一, 余田 成男 (京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻)

1. はじめに

地球のハドレー循環の力学は Held & Hou(1980)がブシネスク流体で自転軸対称(東西に一様)のシンプルな理論モデルで説明した。以後、このモデルは **Held & Hou モデル** と呼ばれている。

一方、金星の自転周期は243地球日と非常に遅いにも関わらず、金星大気はおよそ4地球日で自転方向に一周している。このように自転の何倍もの速さで大気が回転する現象は**スーパーローテーション**と呼ばれている。スーパーローテーションが維持されるメカニズムとして有力なのはGierasch (1975)が提唱した、“強い水平拡散と子午面循環によって維持される”とする説(**Gierasch メカニズム**)である。このGieraschメカニズムは**Matsuda (1980)**によってブシネスク流体で解析的に研究されている。

2. Held & HouモデルとMatsuda(1980)の関係

共通点

軸対称, 赤道対称,
ブシネスク流体, ニュートン加熱・冷却

相違点

水平拡散 なし/大

目的: ハドレー循環のHeld & HouモデルとスーパーローテーションのGieraschメカニズムとをつなぐ形でパラメータスイープ実験を行い、両者の関係性を調べる

3. ブシネスク流体のプリミティブ方程式系

本研究で扱う、ニュートン加熱・冷却を入れたブシネスク流体のプリミティブ方程式系は以下の通りである。

運動方程式

$$\frac{v}{a} \frac{\partial u}{\partial \phi} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{uv \tan \phi}{a} - 2\Omega v \sin \phi = \nu_V \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \nu_H HD(u)$$

$$\frac{v}{a} \frac{\partial v}{\partial \phi} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u^2 \tan \phi}{a} + 2\Omega u \sin \phi = -\frac{1}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} + \nu_V \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \nu_H HD(v)$$

熱力学方程式

$$\frac{v}{a} \frac{\partial \Theta}{\partial \phi} + w \frac{\partial \Theta}{\partial z} = -\frac{\Theta - \Theta_e}{\tau} + \kappa_V \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2}$$

静力学平衡

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = g \frac{\Theta}{\Theta_0}$$

連続の式

$$\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial (v \cos \phi)}{\partial \phi} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

水平拡散項

$$HD(u) = \frac{1}{a^2 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\cos \phi \frac{\partial u}{\partial \phi} \right) - \frac{u}{a^2 \cos^2 \phi} + \frac{2u}{a^2}$$

$$HD(v) = \frac{1}{a^2 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\cos \phi \frac{\partial v}{\partial \phi} \right) - \frac{v}{a^2 \cos^2 \phi} + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (v \cos \phi) \right] + \frac{2v}{a^2}$$

境界条件

$$z = H \text{ で } w = \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial \Theta}{\partial z} = 0$$

$$z = 0 \text{ で } w = \frac{\partial \Theta}{\partial \phi} = 0, \nu_V \frac{\partial u}{\partial z} = C_u, \nu_V \frac{\partial v}{\partial z} = C_v$$

放射対流平衡温位場

$$\frac{\Theta_e}{\Theta_0} = 1 - \Delta_H \sin^2 \phi + \Delta_V \left(\frac{z}{H} - \frac{1}{2} \right)$$

ν_V, ν_H : 鉛直及び水平渦粘性係数 κ_V : 鉛直熱拡散係数 H : 領域の高さ C : 摩擦係数
 Θ_0 : 基準温位 Δ_V, Δ_H : 放射平衡温位場の鉛直及び南北温位差/基準温位

4. 無次元パラメータ

支配方程式系を無次元化すると、自転角速度 Ω や粘性係数 ν などの、外部パラメータで定義される無次元パラメータが6つと、流速などで定義される内部無次元パラメータが2つ得られる。

外部無次元パラメータ

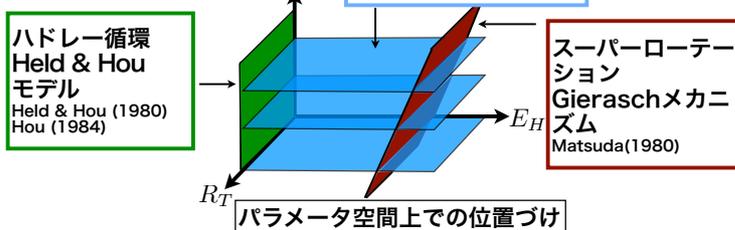
$$E_V = \frac{\nu_V}{\Omega H^2} \quad E_H = \frac{\nu_H}{\Omega a^2} \quad R_T = \frac{gH\Delta_H}{\Omega^2 a^2} \quad \tau\Omega \quad \frac{\nu_V}{\kappa_V} \quad \frac{\nu_V K}{CH}$$

スイープパラメータ

内部無次元パラメータ

$$R_v = \frac{V}{a\Omega} \quad \gamma = \frac{U}{V}$$

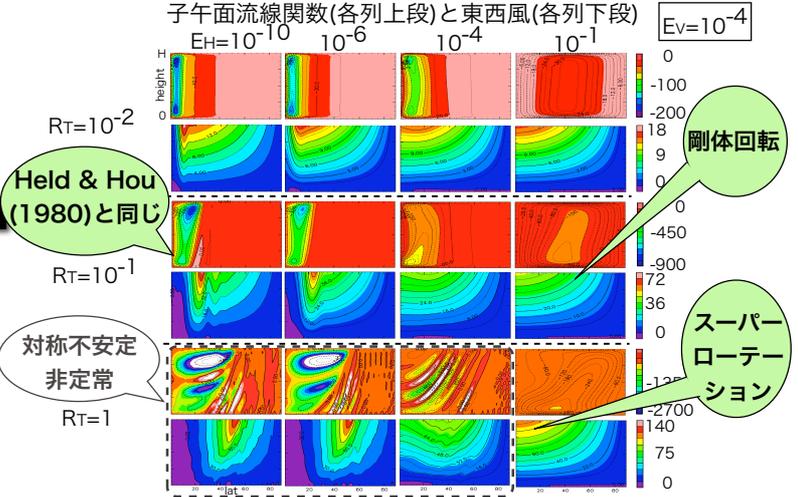
E_V, E_H, R_T をスイープパラメータとする。
この3つのパラメータによるパラメータ空間上で、これまでの先行研究を位置づけると次のようになる。



5. 実験設定

- ・球面スペクトル法 (東西波数0)
- ・鉛直32層
- ・初期条件は等温位静止大気
- ・切断波数 85(極から赤道まで64グリッド)
- ・赤道対称
- ・定常になるまで計算(時間発展)

6. 代表的な計算結果



7. 指標の導入と結果の診断

スーパーローテーション強度: S

$$S = \frac{U}{a\Omega}$$

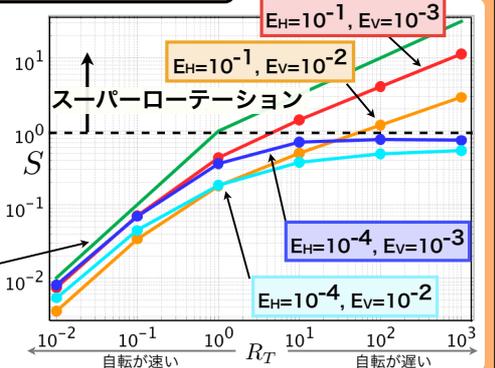
U : 最上層の東西風の平均値
 $a\Omega$: 惑星回転の速さ

傾度風平衡からの見積り

$$S^2 u^2 \tan \phi + S u \sin \phi \sim R_T \frac{\partial \Phi}{\partial \phi}$$

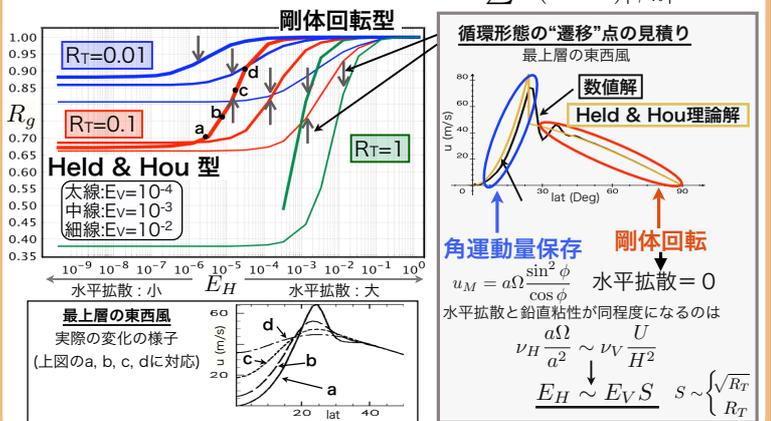
$$S \gg 1 \iff S \sim \sqrt{R_T}$$

$$S \ll 1 \iff S \sim R_T$$



剛体回転の割合: R_g

$$R_g = \frac{\text{剛体回転成分による運動エネルギー}}{\text{最上層の東西風の運動エネルギー}} = \frac{2|\psi_1|^2}{\sum n(n+1)|\psi_n|^2}$$



8. まとめ

◆Held & Hou モデルとGieraschメカニズムとをつなぐ形でパラメータスイープ実験を行い、両者のつながり方を明らかにした。

◆Held & Hou 型と剛体回転型とが“遷移”する、水平拡散の見積りを与えた。

参考文献

- Gierasch, P. J.: Meridional circulation and maintenance of the Venus atmospheric rotation, JAS, **32**, 1038-1044, 1975
- Held, I. M. and A. Y. Hou: Nonlinear axially symmetric circulation in a nearly inviscid atmosphere, JAS, **37**, 515-533, 1980
- Matsuda, Y.: Dynamics of the four-day circulation in the Venus atmosphere, JMSJ, **58**, 443-470, 1980
- A. Y. Hou: Axisymmetric circulations forced by heat and momentum sources: a simple model applicable to the Venus atmosphere, JAS, **41**, 3437-3455, 1984