

金星雲層を想定した鉛直対流の3次元数値計算

杉山耕一郎¹, 川畑拓也^{2,4}, 小高正嗣², 中島健介³, 石渡正樹², 今村剛¹, 林祥介⁵



[1] JAXA 宇宙研, [2] 北大理・宇宙理学, [3] 九大理・地惑, [4] 株)テクノスジャパン, [5] 神戸大・惑星 sugiyama@gfd-dennou.org

まとめ

- 金星雲層を想定した鉛直対流の3次元計算を実施した
- 従来の数値的研究 (Baker et al., 1998; Imamura et al., 2014) の設定に従う
- 得られた対流構造の定性的特徴は従来の2次元計算の結果と整合的
- Imamura et al. (2014) を模した実験では、上昇流と下降流の大きさは ~ 2 m/s. ベガバルーンの観測結果と同程度。
- 今後は、鉛直方向の計算領域を拡大し、対流起源の重力波の性質を調べる。

はじめに

金星雲層の対流

- いくつかの観測的証拠から、雲層下部 (高度 47~55 km) では、対流運動が生じていると考えられている。
- Pioneer Venus の観測より、雲層下部はほぼ中立成層 (Seiff, 1983)
- Vega 気球観測より、赤道上空の高度 52-54 km 付近で $1\sim 3$ m/s の鉛直流の存在 (Crisp et al., 1990)。

これまでの数値的研究

- 雲層内の対流構造を調べることを目的とした数値的研究が数例行われてきた
- Baker et al. (1998, 2000)
- Imamura et al. (2014)

- 問題点: 系を水平鉛直2次元に限定

我々の取り組み/本研究の目的

- 金星探査機「あかつき」の観測に向けて (観測との比較を進める上で、対流運動の3次元的な取り扱いには必須)
- これまで開発してきた雲解像モデル (Sugiyama et al., 2009) を拡張することで、金星雲層に適用。
- Baker et al. (1998) と Imamura et al. (2014) と類似の設定を用いた3次元の数値実験を行い、統計的平衡状態における対流構造を調べる。

計算設定

数値モデル

(deepconv; <http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/>)

- 基礎方程式: 準圧縮系方程式 (Klemp and Wilhelmson, 1978)
- 雲微物理過程: 無し
- 放射過程: 陽に解かない

計算設定: 2通り

- Exp.B (Baker et al. (1998) と同様の設定)
 - 乱流過程
 - 陽に計算しない。計算領域全体で拡散係数一定。
 - 温位擾乱のみ拡散 (基本場は拡散しない)
 - 放射過程 (図 2)
 - 短波加熱: 太陽放射を模した熱強制
 - 上下境界の熱フラックス
 - 境界で短波加熱と釣り合う分の熱フラックスを与える。
 - 正味の加熱量 = 雲層での短波加熱の積分値
 - 上部で冷却, 下部で加熱
 - 計算領域
 - 水平 128 km, 鉛直 30 km (高度 40~60 km)
- Exp.I (Imamura et al. (2014) と同様の設定)
 - 乱流過程
 - Klemp and Wilhelmson (1978)
 - 放射過程 (図 3)
 - 短波加熱: 太陽からの短波放射を模した熱強制
 - 長波加熱: 放射対流平衡計算の結果 (Keda 2011)
 - 計算領域
 - 水平 128 km, 鉛直 30 km (高度 35~65 km)
 - 上下 5 km はスポンジ層
 - 共通設定
 - 短波加熱の日変化を考慮しない
 - 解像度: $\Delta x = \Delta y = 200$ m, $\Delta z = 125$ m
 - 計算時間 1.46e6 sec (~ 16 Earth days)

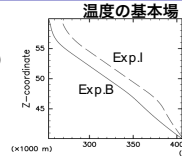


図 1: Exp.B (実線) と Exp.I (破線) で与えた温度の基本場の比較

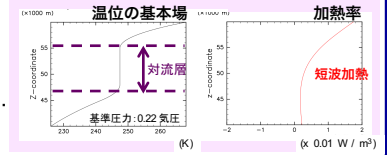


図 2: Exp.B で与えた温位の基本場と熱強制の鉛直分布。短波加熱として「日中」の太陽放射を模したプロファイルを与える。長波放射の代替として上下境界で与えたフラックスを模式的に示す。

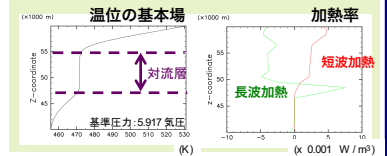


図 3: Exp.I で与えた温位の基本場と熱強制の鉛直分布。短波加熱として「時間平均」した太陽放射プロファイルを模したプロファイルを与える。

計算結果

- 鉛直運動 (図 4a, 4b-2, 5a, 5b-2)
 - Exp.B: 鉛直運動は非対称
 - 上昇流は広くて弱い (~ 3 m/s)
 - 下降流は狭くて強い (~ 10 m/s)
 - Exp.I: 鉛直運動はほぼ対象。
 - 鉛直流速は Exp.B に比べて弱い (~ 2 m/s)
 - Vega 気球観測の結果と整合的
 - 定性的特徴は従来の研究と整合的
- 対流セルのサイズ (図 4a, 4b-2, 5a, 5b-2)
 - 水平サイズは Exp.B の方が Exp.I よりも大きい。
 - Exp.B: ~ 40 km
 - Exp.I: ~ 25 km
 - 対流層の厚さはあまり変わらない
- 対流領域の上下では、鉛直流が対流層の上下に存在する安定層に貫入 (図 4b-1, 4b-3, 5b-1, 5b-2)
 - 下降域で正の温位偏差
 - 上昇域で負の温位偏差
- 対流運動の特徴の差異は、用いた長波加熱の鉛直プロファイルに起因。
 - Exp.B: 非常に強い冷却が対流層上部に集中 (図 4c)。
 - 上部境界での冷却が下降流の駆動源
 - 乱流拡散による鉛直輸送
- Exp.I: 放射加熱・冷却は鉛直方向に幅広く存在 (図 5c)。
- 高度 47~49 km: 正味で加熱
- 高度 49~56 km: 正味で冷却

図 4: Exp.B (Baker et al., 1998 を模した実験)

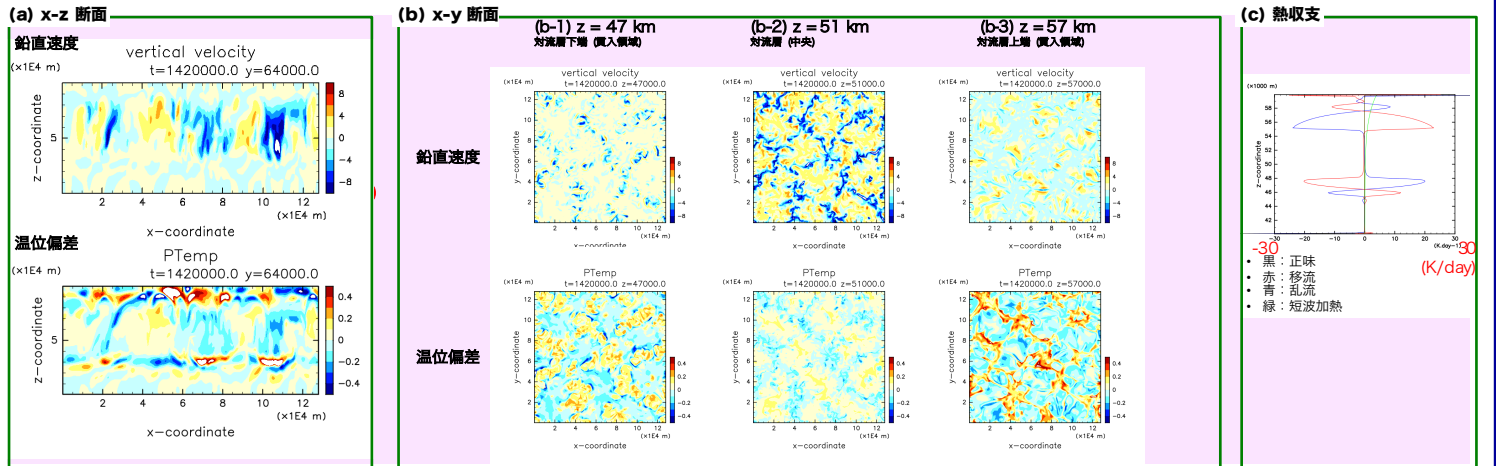


図 5: Exp.I (Imamura et al., 2014 を模した実験)

