

金星の雲層における対流

樋口武人（東大理）、今村剛（ISAS/JAXA）、高木征弘（東大理）、前島康光（名大地球水循環）、安藤紘基（東大理）

研究背景・目的

金星は高度約45-70kmに存在する硫酸の雲に覆われている。VEGAのBalloon観測で、赤道上空高度55 km付近にて対流に伴うと考えられる鉛直風が観測された(Crisp et al., 1990)。また、電波掩蔽観測により得られた気温分布から雲層下部50-55km付近に中立成層があることが知られており、対流活動の存在を示唆している(Tellmann et al., 2009)。この対流は下層大気からの上向き熱放射が雲底で吸収されることで生じていると考えられる。Baker et al., 1998 では、雲層高度での背景密度・温度分布や正味熱流束を仮定し、2次元完全圧縮モデルによって安定層へ貫入する対流が計算された。しかし、本来は放射輸送によって雲層を出入りする熱流束を拡散によって表現していることが問題点として挙げられ、雲層の対流の性質が理解されたとは言い難い。金星の雲層における対流の基本構造を決める要因を理解するためには、より現実的な放射加熱をもとにした対流計算を行う必要がある。

本研究では、非静力学なメソ気象数値モデルCReSS (Tsuboki and Sakakibara, 2007)を使って金星の雲層における対流計算を行っている。短波放射はBaker et al., 1998と同じであるが、長波放射は先行研究よりも現実に近い形で与える。今回は加熱強制の大きさや領域の大きさを変化させた場合の対流の様相について調べた。さらに、より現実的な金星の雲層における計算として、放射対流平衡計算から算出された長波放射加熱率を取り入れた場合の対流計算を行った。

計算内容

x-zの2次元計算で、計算領域を東西200km、高度40-60kmの領域を設定して計算を行った。計算設定を表1に示す。以下に示す(1)-(3)の場合における対流を調べた。

(1) 長波放射による加熱強制を変化させた場合

大気安定度と太陽放射加熱率はBaker et al., 1998と同じもの(図1、2)を使用した。長波放射加熱率は加熱勾配を大(type-A)、中(type-B)、小(type-C)の3種類を仮定し(図3)、それぞれの場合について対流計算を行った。その結果を図4に示す。

(2) 計算領域を変化させた場合

対流のアスペクト比の計算領域依存性を調べるため、東西領域を大きくした場合と南北方向にも構造を持つ3次元計算を行った。大気安定度と太陽放射加熱率は(1)と同じものを使用し、長波放射加熱率はtype-Bを用いた。東西領域を200kmから500kmに変化(x方向格子数を100から250に変化)させたときの計算結果を図5に示す。南北方向に格子数100、格子間隔2kmの南北領域200kmを加えた3次元計算結果を図6に示す。

(3) 1次元放射対流平衡計算(池田ら, 2010)によって算出された長波放射を仮定した場合

初期温度はVIRAの温度データ(図7)を与え、全球平均加熱率(Tomasko et al., 1980)と、それをもとに行われた1次元放射対流平衡計算(池田ら, 2010)から算出された長波放射(図8)を仮定し、対流計算を行っ

た。その結果を図9に示す。

表 1 計算設定

格子数	: x方向 100 z方向 40
格子間隔	: dx = 2000 [m] dz= 500 [m]
計算領域	: x 方向 200km z 方向 40-60km
境界条件	: 側面: 周期境 上端下端: 固定壁 (上端と下端 2km にスポンジ層)
タイムステップ	: HE-VI 法時間積分 大:10s 小:2s
積分時間	: 83.3 時間
初期水平風	: 無風
初期温位擾乱	: 最大値 10^{-3} K の擾乱を領域全体にランダムに設定
移流計算	: 4 次の中心差分に 4 次の数値粘性項を付加
乱流計算	: 1.5 次のクロージャー
加熱強制	: 短波放射と長波放射の重ね合わせ

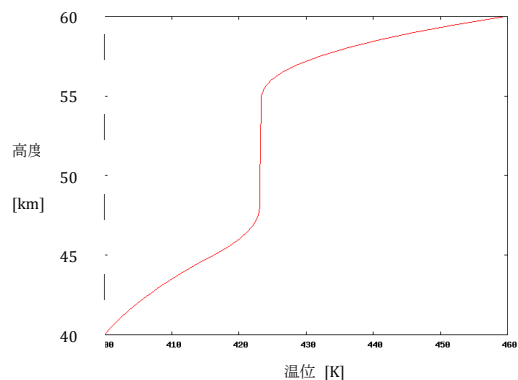


図 1. Baker et al.,1998 で使用された大気安定度から求めた初期温位

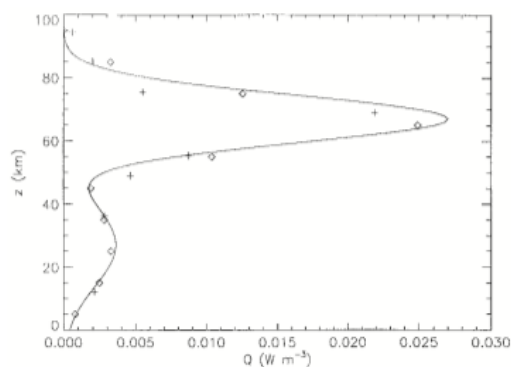


図 2. Baker et al.,1998 で使用された太陽放射加熱率

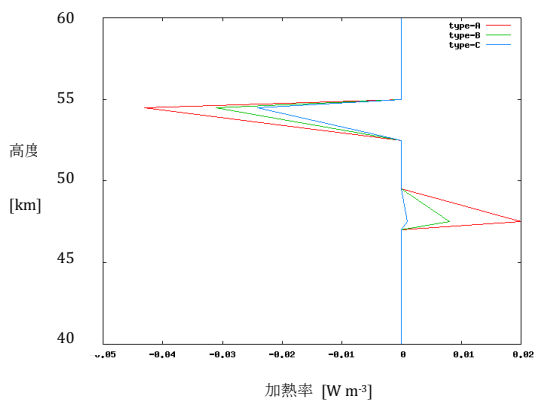


図 3. 3 種類の長波放射加熱率。type-A, type-B, type-C はそれぞれ

加熱強制大, 中, 小を示す。

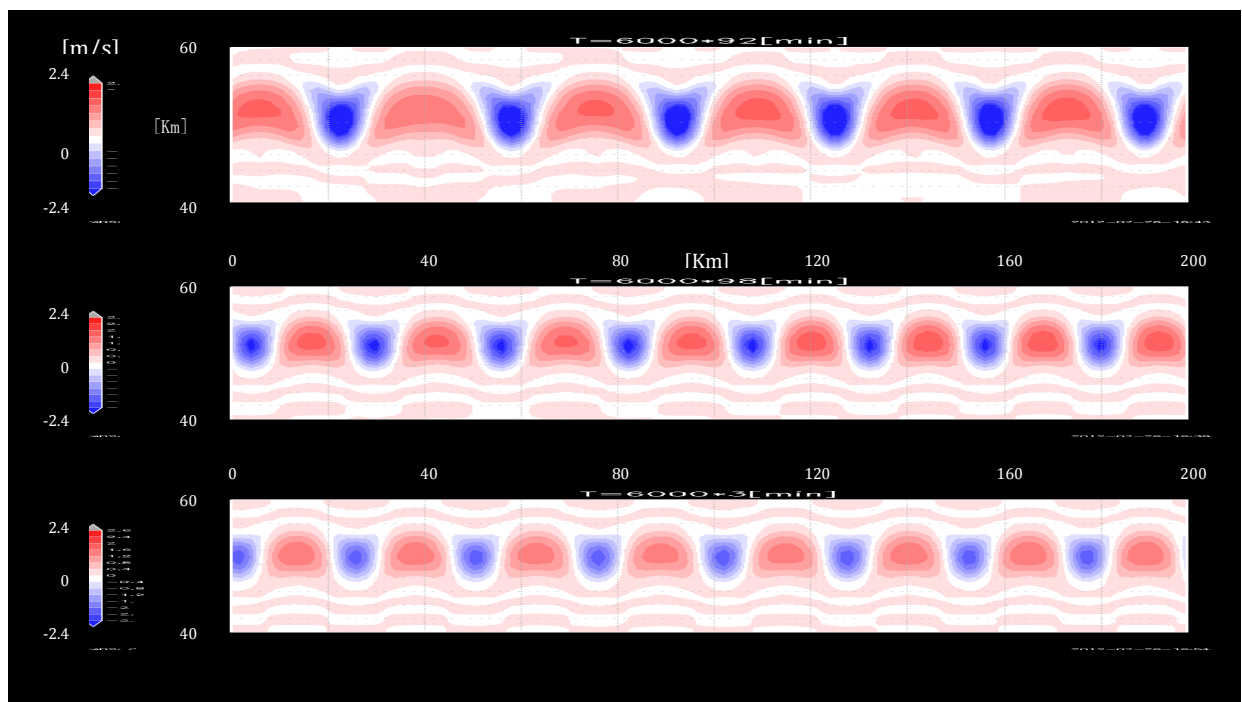


図 4. 対流計算結果。縦軸は高度[km]、横軸は緯度[km]、カラーコンターは鉛直速度[m/s]を示す。
[上 ; type-A 中 ; type-B 下 : type-C]

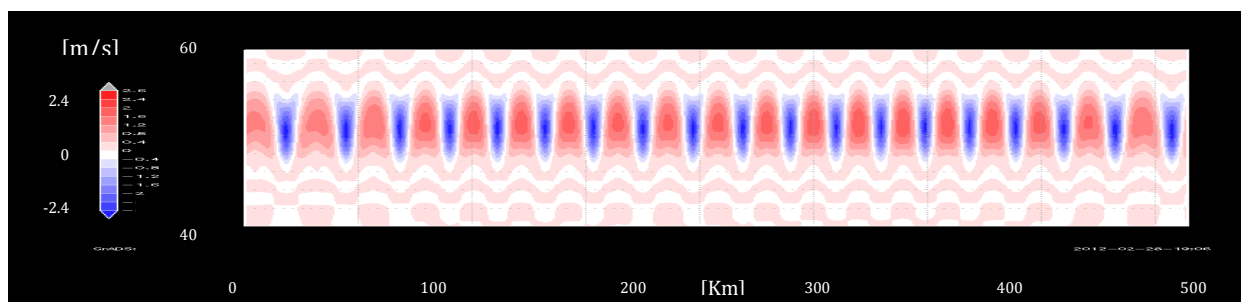


図 5. 水平領域 500km の場合の対流計算結果。

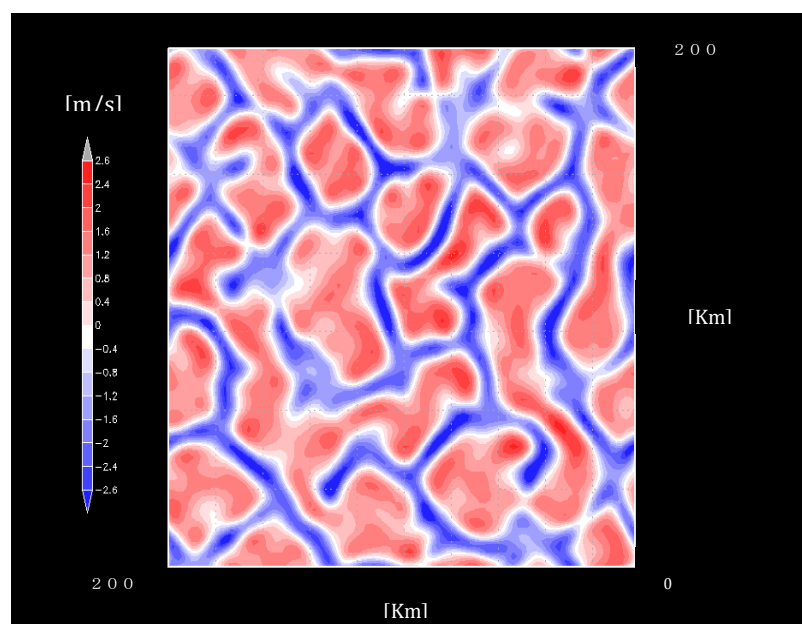


図 6. 3次元の対流計算結果。高度 52km の水平断面で、縦軸は経度[km]、横軸は緯度[km]を示す。

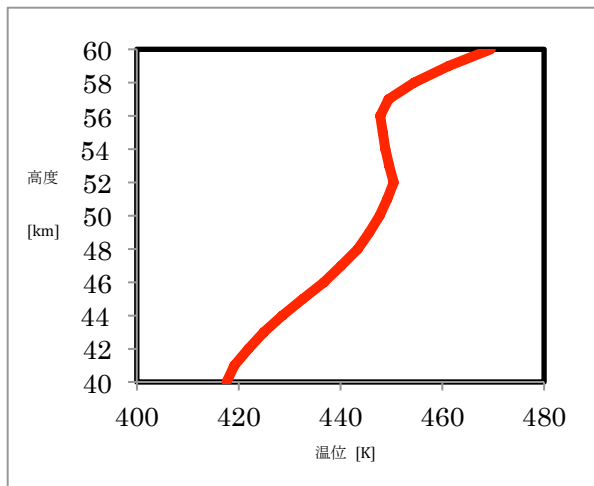


図 7. VIRA の温度データから求めた初期温度。

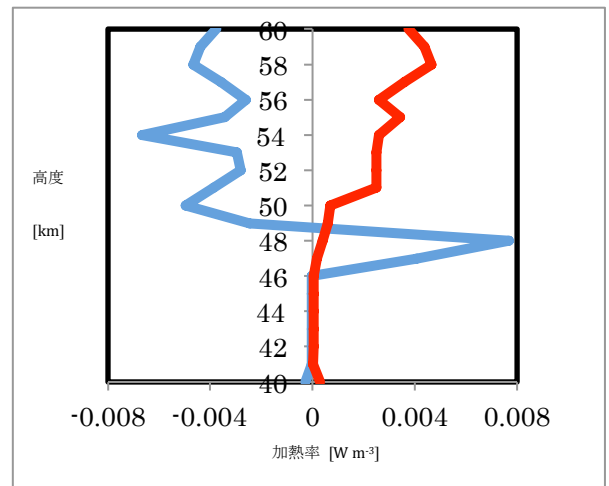


図 8. 赤線は全球平均加熱率 (Tomasko et al., 1980) を示し、青線は全球平均加熱率をもとにした 1 次元放射対流平衡計算 (池田ら, 2010) から算出された長波放射を示す。

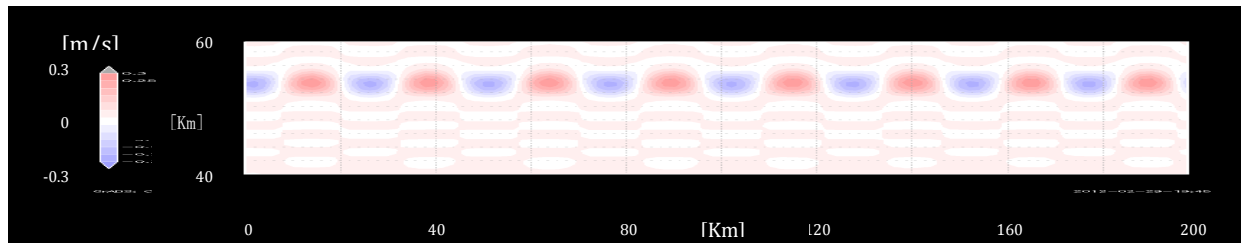


図 9. 1 次元放射対流平衡計算によって算出された長波放射を仮定した場合の対流計算結果。

まとめ

加熱強制を変化させた場合では鉛直速度に違いはあるものの、3つの計算ではアスペクト比が約 1:2~1:3 程度に統一した対流の構造が確認された。大きな加熱強制を与えるとセルの数が減っているようにみえるが、これらの3つの計算だけでは加熱強制の大きさとアスペクト比に関連があるとは言い難い。水平領域を変化させた場合ではアスペクト比に大きな違いはなく、水平方向の領域依存は小さい結果となった。しかし、2次元計算ではほぼ定常な対流の構造がみられたのに対して、3次元計算では定常に落ち着かない構造が生じた。現実的な長波放射を取り入れた場合ではアスペクト比がおおよそ 1:5 で、鉛直速度が最大 0.25m/s 程度の定常な対流が計算された。この値は **Vega Balloon** によって観測された鉛直風の大きさと同じか、やや小さな値になっている。

今後の方針

現在のグリッド間隔では、小さなスケールの乱流が表現されていない可能性がある。より細かいグリッド間隔で計算を行い、現在行っている計算の妥当性を検証していく。さらに太陽加熱も含めた加熱強制の変化させた場合の対流の様相を調べるとともに、対流が鉛直方向へ運ぶ熱フラックスの大きさを見積もる。

参考文献

- Baker, R. D. , G. Schubert, and P. W. Jones, 1998: Cloud-level penetrative compressible convection in the Venus atmosphere, *J. Atmos. Sci.* ,55,3-18.
- Crisp, D. , A. P. Ingersoll, C. E. Hildebrand, and R. A. Preston, 1990: Vega Balloon Meteorological Measurements, *adv. Space Res.* 10, 109-124
- Kazuhisa Tsuboki and Atsushi Sakakibara, 2007: Numerical prediction of high-impact weather systems, *The Textbook for Seventeenth IHP Training Course in 2007*, 281pp.
- Tellmann, S. M., Pätzold, B. Häusler, M. K. Bird, and G. L. Tyler, 2009: Structure of the Venus neutral atmosphere as observed by the Radio Science experiment VeRa on Venus Express, *J. Geophys. Res.*, 114, 1-19.
- Tomasko, M. G., Doose, L. R., Smith, P. H., and Obell, A. P., 1980a: Measurements of the flux of sunlight in the atmosphere of Venus, *J. Geophys. Res.*, 85, 8118667-8
- 池田恒平, 高橋正明, 2010: 新しい金星大気放射伝達モデルを用いた放射対流平衡実験, 日本気象学会 2010 年度秋季大会講演予講集, 98, 155.