

金星大気大循環モデルの開発とシミュレーション

東京大学 気候システム研究センター 池田 恒平 (IKEDA Kohei)
九州大学 応用力学研究所 山本 勝 (YAMAMOTO Masaru)
東京大学 気候システム研究センター 高橋 正明 (TAKAHASHI Masaaki)

金星大気スーパーローテーションの形成・維持メカニズムを明らかにするために,CCSR/NIES/FRCGC AGCM を用いた金星大気大循環モデルを開発し数値実験を行った.本研究のモデルでは,従来とは異なり物理過程で放射伝達方程式を計算している.その結果,鉛直温度構造はある程度再現することができたが,帯状平均した東西風は雲頂高度の赤道域で 45m/s 程度であった.

1 はじめに

金星大気では高度約 70km の雲層上端で 100m/s に達する東風が観測されておりスーパーローテーションと呼ばれている.金星の自転周期は 243 日で,地球と比べるとはるかに遅く,自転速度は赤道で 1.8m/s である.スーパーローテーションは自転速度の 60 倍で回転していることになり,このような高速東西流の形成・維持メカニズムはよくわかっていない.

これまでの放射過程を簡略化した Venus-like AGCM による研究では,子午面循環が重要な役割を果たす Gierasch 機構 (Gierasch,1975) が示唆されている (Yamamoto and Takahashi,2003,2004). 地表面付近から雲層上端まで達する鉛直一セルの子午面循環が角運動量を効率良く運び,スーパーローテーションが形成されている.しかし,下層大気で現実よりも大きな加熱を与えていたり,地表面で赤道-極間に温度差を与えるとといった仮定も含まれている (Yamamoto and Takahashi,2004) ため,現実の金星大気で Gierasch 機構によって超回転が形成・維持されているのかわかるとは,放射過程をきちんとした,より現実的な金星 AGCM で検証する必要がある.そこで我々はまず,CCSR/NIES/FRCGC AGCM の放射伝達コードを用いた金星大気大循環モデルを開発し数値実験を行なった.

2 モデル

本研究で用いるモデルはCCSR/NIES/FRCGC AGCM5.7bである.惑星半径や自転周期,気体定数などのパラメータを金星の値に変更している.水平分解能は T21,鉛直方向には高度 95km 付近までを 52 層に分けた.金星の地形は組み込まれていない.二酸化炭素および水蒸気の赤外領域の吸収係数は Matsuda and Matsuno(1978) の値を AGCM の放射伝達コードの波数帯に合わせて設定した.金星は高度 45 から 70km までを厚い雲で覆われており,太陽光の大部分は吸収されている.この雲層を成す硫酸エアロゾルを粒径によって 3 つのモードに分け,光学的性質と鉛直分布は Crisp(1986,1989) を参照した.各モードごとに消散効率因子 Q_e と散乱

効率因子 Q_a , 非対称度 g を設定し , それぞれの鉛直分布は大気上端から着目する層までの消散光学的厚さ $\tau_e(0.63\mu\text{m})$ で与える . そして , 18 波数帯に分割された各バンド i ごとに消散光学的厚さ τ_e^i , 散乱光学的厚さ τ_s^i を下記のように求める . (Crisp,1986)

$$\tau_e^i = Q_e^i / Q_e^* \times \tau_e(0.63\mu\text{m})$$

$$\tau_s^i = Q_s^i / Q_e^* \times \tau_e(0.63\mu\text{m})$$

ここで , Q_e^* は $0.63\mu\text{m}$ を含むバンドの消散効率因子である . 地表面アルベドは 0.3 とし , 1 太陽日は金星に合わせ 117 日としている . 今回の実験では鉛直拡散係数を全領域で $0.8\text{m}^2/\text{s}$ とし , 地表面気圧 $9.2 \times 10^4\text{hPa}$, 730K 等温静止大気から平衡状態になるまで計算した .

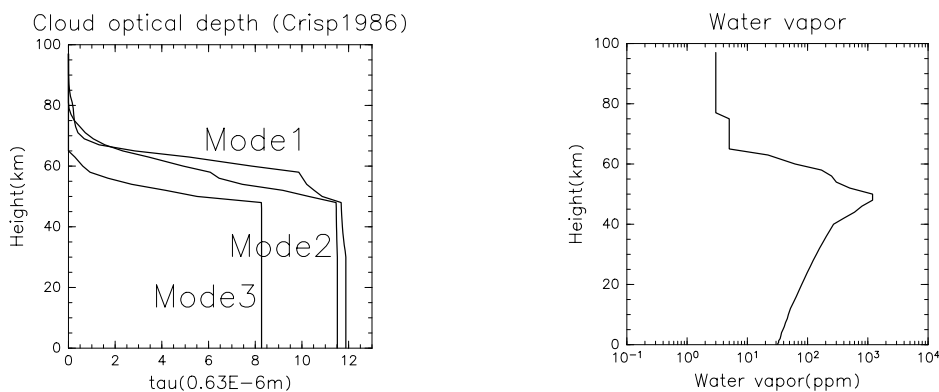


図 1: 硫酸エアロゾルの光学的厚さの鉛直分布 (左) と水蒸気の鉛直分布 (右)

3 結果

図 2 に , 帯状平均した太陽光による加熱の緯度-高度分布と , 全球平均した加熱率の鉛直分布を示す . 高度 65km 付近にピークがあり , その値は Tomasko(1985) や Crisp(1986) と整合的である .

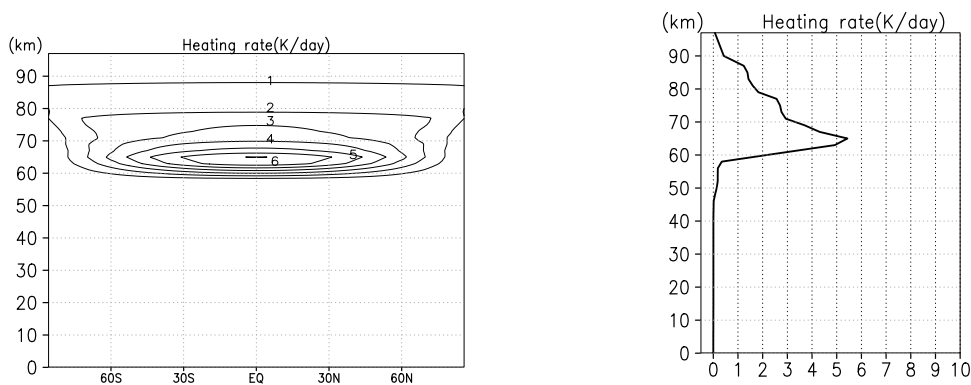


図 2: 帯状平均した太陽光加熱の緯度-高度分布 (K/地球日)(左) と全球平均した加熱率の鉛直分布 (右)

図3に帯状平均した温度の緯度-高度分布と，鉛直温度構造の観測との比較を示す．地表面の気温は約735Kとなっており，約70kmまでの温度構造はよく再現されている．しかし，高度約80km以上では温度は観測よりも低くなっている．

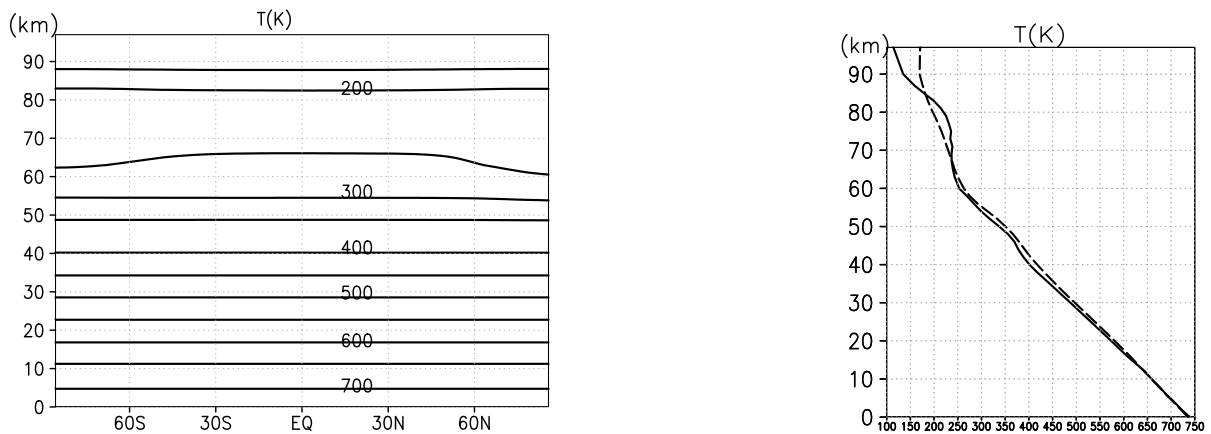


図3: 帯状平均した温度の緯度-高度分布(左)と鉛直分布の観測との比較(右)．実線がモデルの結果，点線は観測値 (Seiff et al. 1985)

平均東西風は70km付近で45m/sに達する．この風速は金星大気スーパーローテーションの半分程度の風速である．中緯度には60m/sを超えるジェットが存在する．50km以下では風速は非常に小さかった．雲層による太陽光加熱が大きくなっている高度と対応して高速東西流が得られたがそれ以外のところ(下層大気)では風速は弱い．

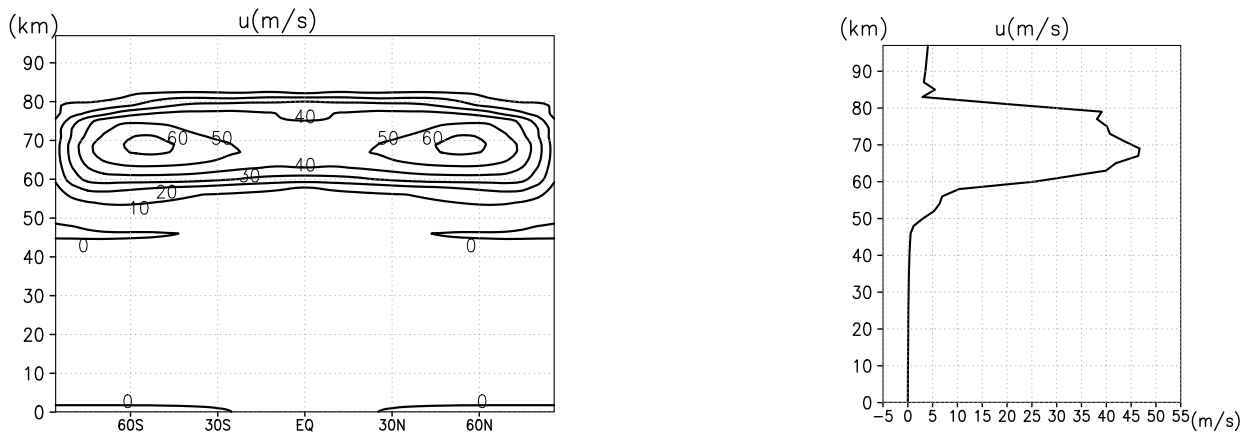


図4: 帯状平均した東西風速の緯度-高度分布(左)と赤道での鉛直分布(右)

帯状平均した南北風速と，鉛直流を図5に示す．鉛直流は低緯度で下層から雲層の上端まで上昇流で，中高緯度側で下降流となっている．ただ，南北風速は鉛直方向に複雑な構造となっており，明確な子午面循環は確認できない．

次に赤道域での運動量バランスを求めるため，プリミティブ方程式系でのオイラー平均方程式 (Andrews et al. 1987) を用いて，各項を見積もった．

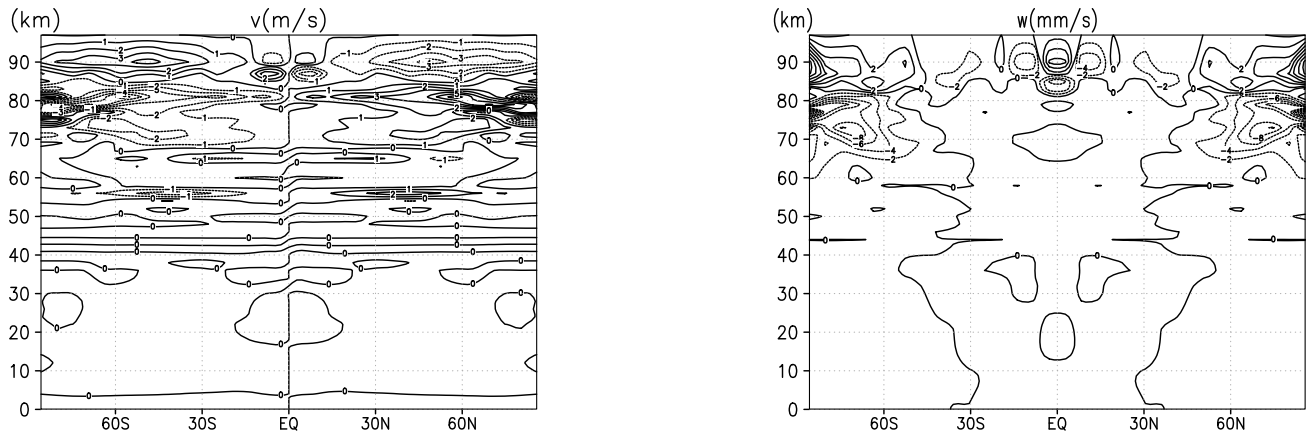


図 5: 帯状平均した南北風速の緯度-高度分布 (左)(等値線の間隔は 1m/s) と鉛直流の緯度-高度分布 (右)(等値線の間隔は 2mm/s)

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{1}{a} \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \phi} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z^*} - f \bar{v} - \frac{\tan \phi}{a} \bar{u} \bar{v} - \bar{X} = -\frac{1}{a \cos^2 \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\overline{u'v'} \cos^2 \phi) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z^*} (\rho_0 \overline{u'w'})$$

ここで, z^* は log-p 座標系での鉛直座標で, ϕ は緯度である. 図 6 に結果を示す. 図中に示す各項は次のように定義している.

$$A = -\bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z^*}, \quad B = -\frac{1}{a \cos^2 \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\overline{u'v'} \cos^2 \phi), \quad C = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z^*} (\rho_0 \overline{u'w'})$$

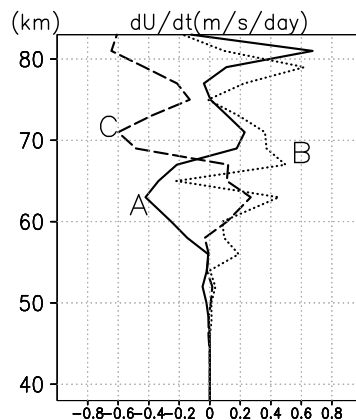


図 6: 赤道での加速の鉛直分布. 実線は鉛直移流 (A 項), 点線は水平方向の eddy による運動量 flux の収束 (B 項), 破線は鉛直方向の eddy による運動量 flux の収束 (C 項) を示している.

高度 60km ~ 70km では eddy による運動量 flux の収束による加速と鉛直移流項がつりあっている. この高度は太陽光による雲層加熱の大きいところと対応している. Fels and Lindzen(1974)

は雲層加熱域で励起された熱潮汐波によって平均流が加速されることを示している．そこで，擾乱による加速における熱潮汐波による寄与を調べた．熱潮汐は太陽が地面に対して動く速さ（赤道で約 3.8m/s）と同じ位相速度の波で，波数 1 の波を一日潮，波数 2 の波を半日潮という．本研究では，一日潮，半日潮のみの効果を考える．図 7 は B 項，C 項における熱潮汐波の寄与を示す．共に熱潮汐波が大きく効いていることがわかる．

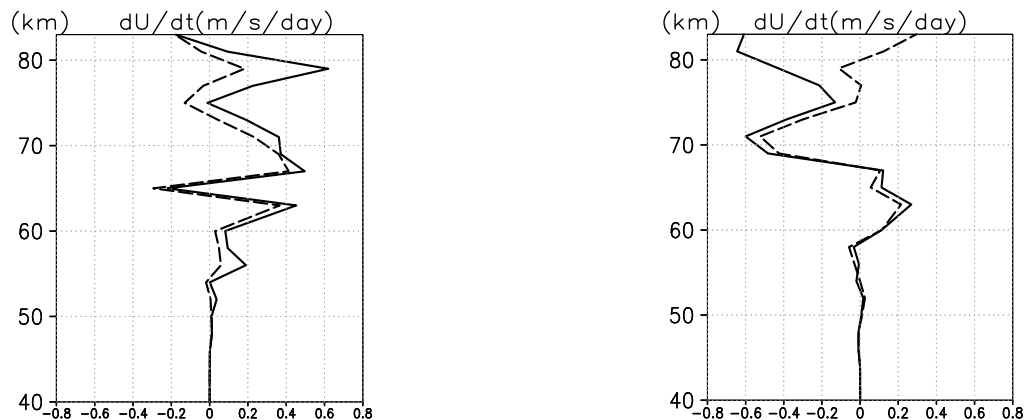


図 7: 左図は実線は水平方向の eddy による運動量 flux の収束 (B 項)，点線はそのうちの熱潮汐波による寄与 (一日潮 + 半日潮) を表している，右図も同様に実線は鉛直方向の eddy による運動量 flux の収束 (C 項)，点線は熱潮汐波による寄与を示している．

4 まとめ

CCSR/NIES/FRCGC AGCM5.7b を用いた金星大気大循環モデルによって，スーパーローテーションの再現を試みた．従来の金星 AGCM とは異なり，放射伝達方程式を計算している．70km ぐらいまでの鉛直温度構造はよく再現され，また硫酸エアロゾルの雲層での加熱率も過去の研究や観測と整合的であった．数値実験の結果，高度約 65km の赤道域で 45m/s 程度の平均東西風が得られた．これは観測のスーパーローテーションの半分程度の風速である．雲層における太陽光加熱域では高速東西流が形成されたが，下層大気 (50km 以下) では風速は小さかった．加熱域に対応するところでは熱潮汐波による加速が効いていることがわかった．

今のところ，下層大気ではほとんど風は吹いておらず，子午面循環による角運動量の上方輸送メカニズム (Gierasch 機構) は効率良く働いていないようである．今後は，密度が大きく，金星大気大循環にとって重要な下層大気の再現が課題である，

5 参考文献

Andrews, D. G., J. R. Holton, and C. B. Leovy, 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*, Academic Press, San Diego, 489 pp.

Crisp, D., 1986: Radiative forcing of the Venus mesosphere I. Solar fluxes and heating rates. *Icarus*, **67**, 484-514.

- Crisp, D., 1989: Radiative forcing of the Venus mesosphere II. Thermal fluxes, cooling rates, radiative equilibrium temperatures. *Icarus*, **77**, 391-413.
- Fels, S. B. and R. S. Lindzen, 1974: The interaction of thermally excited gravity wave with mean flow. *Geophys.FluidDynamics*, **6**, 149-191.
- Gierasch, P. J., 1975: Meridional circulation and the maintenance of the Venus atmospheric rotation. *J.Atmos.Sci.*, **32**, 1038-1044.
- Matsuda, Y. and T. Matsuno, 1978: Radiative-convective equilibrium of the Venusian atmosphere. *J.Meteor.Soc.Japan*, **56**, 1-18.
- Seiff, A., et al. 1985: Models of the structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100km altitude. *Adv.SpaceRes.*, **5(11)**, 3-58.
- Tomasko, M. G., L. R. Dose, and P. H. Smith, 1985: The absorption of solar energy and the heating rate in the atmosphere of Venus. *Adv.SpaceRes.*, **5**, 71-79.
- Yamamoto, M. and M. Takahashi, 2003: The fully developed superrotation simulated by a general circulation model of a Venus-like atmosphere. *J.Atmos.Sci.*, **60**, 561-574.
- Yamamoto, M. and M. Takahashi, 2004: Dynamics of Venus' superrotation: the eddy momentum transport process newly found in a GCM. *Geophys.Res.Lett.*, **31** doi:10.1029/2004GL019518.