

金星中層大気 GCM の開発

山本勝（九大・応力研）
高橋正明（東大・CCSR）

はじめに

金星は 243 日周期でゆっくりと自転しているが、高度 65km 付近では自転の 60 倍を超える 4 日循環と呼ばれるスーパーローテーションが存在する。この高速流の形成・維持機構に関して諸説が提案されているが、未解決のままである。これらの説の妥当性を議論する上で、観測が不可欠であることは言うまでもないが、大気大循環モデル(AGCM)の使用も主要な研究手段の一つである。

我々は Venus-like AGCM を用いた数値実験で、スーパーローテーションを再現し、波動擾乱を解析することによって、スーパーローテーションの形成・維持メカニズムを調べてきた(Yamamoto and Takahashi 2003a, 2003b, 2004, 2006)。これと平行して、惑星スケールの波動が金星中層大気大循環に及ぼす役割や雲加熱に対する大循環の sensitivity を調べる目的で、金星中層大気 GCM も開発してきた。現在のところ、放射をニュートン冷却で簡略化した VMAGCM_NC(using Newtonian Cooling)と放射伝達を計算している VMAGCM_RP(including Radiative Process)の 2 つがある(Yamamoto and Takahashi 2007)。

本研究は、Newman and Leovy (1992)や Yamamoto and Tanaka (1997)の研究を中層大気 GCM に拡張することによって中層大気で観測される諸現象の力学を説明することを目的としている。そこで、惑星スケールの波動を強制するオプションを加えることによって、熱潮汐波と 4 – 6 日波が共存する状況下の大気力学を研究できるようにした。本稿では、上記のモデルの枠組みと予備実験の結果を紹介する。

モデル

本研究は、CCSR/NIES AGCM 5.6 (Numaguti et al. 1997) をベースに作成した VMAGCM_NC を用いて、高度 90 km 付近までの領域を T21L72 で計算した。この金星中層大気 GCM では、東西流が自転と同じ向きを正とするような座標系を用いている。予報変数は高度 30 km より上の領域で時間積分されるが、高度 30 km 以下では初期値のままである。鉛直流などを求める診断方程式は全領域で計算されている。鉛直解像度は高度 30 km 以下で 3 km、高度 30 km 以上で 1 km となっている。

惑星スケールの波動として、近赤外で観測されている惑星スケールの赤道 5.5 日波を、表 1 のような波数 1 のケルビン波として与えた。

表 1 実験条件

実験 A $h = 0$ m, 5.5 日波強制無し

実験 B $h = 10$ m, $c = 80$ m/s.

実験 C $h = 25$ m, $c = 80$ m/s.

実験 D $h = 50$ m, $c = 80$ m/s.

ここで、 h は地面の標高に換算した値であり、 c は位相速度である。

最上層付近で 30 日のレーリー摩擦を与えている。上層のレーリー摩擦は、静止状態へ引き戻すように与えている。30 m/s の剛体回転および金星標準大気気温鉛直分布を初期値として、平衡状態になるまで計算した。下層での波動強制によって生じる不安定や潮汐波の反射を防ぐために、高度 30–35 km に減衰層を与えた。上記以外は、Yamamoto and Takahashi (2004, 2006) と同じ条件で計算を行った。

結果

惑星スケールの波動の強制を与えていない実験 A では、雲頂や雲底では十分なスーパーローテーションが得られなかった。雲層以高で子午面循環が駆動されることと関連して、高緯度でジェットが形成される。 h を大きくするにつれて、雲頂のスーパーローテーションも増大する。赤道で鉛直伝播した惑星スケール波が雲層で減衰され、その角運動量が赤道域で平均流に移り、赤道スーパーローテーションが形成される。その赤道スーパーローテーションの角運動量は子午面循環によって高緯度に運ばれ、高緯度ジェットが形成される。このように、子午面循環の赤道域の上向きブランチで赤道波から角運動量が供給されるので、

赤道波が中層大気全体のスーパーローテーションを強化する．実験CやDでは，雲底でも $60\text{--}80\text{ m/s}$ のスーパーローテーションが起こり，現実に近い風速が得られた．下から鉛直伝播する赤道 4 日波では，固有位相速度が小さくなるにつれて赤道に捕捉される（Yamamoto and Tanaka 1997, Imamura 2007）ので，角運動量が赤道向きに輸送されることが Imamura (2007) によって指摘されている．雲底やその下では，赤道 5.5 日波でも同様の現象が見られた．

東西風の時間—高度断面を見てみると，どのケースも雲頂付近で一日潮と半日潮が卓越していて，上下に伝播している様子が見られる．実験Aでは，惑星スケール波を強制していないにもかかわらず，6 日周期変動が見られた．中高緯度ではジェットが形成されており，球面浅水系の理論計算(Iga and Matsuda 2005)や GCM の解析(Yamamoto and Takahashi 2006)で見られるシア不安定によって 6 日変動が発生するものと考えられる．実験Dでは，雲底で 5.5 日変動が，雲頂で 4 日変動が見られた．

実験Dの高度 70 km 付近の東西風の経度—時間断面を見てみると（図 1），半日潮が目立つが，経度 0W と 120W の振幅の大きさが異なることからわかるように一日潮が重ね合わさった構造となる．これら潮汐波に加えて，4 日波も加わった構造が見られた．

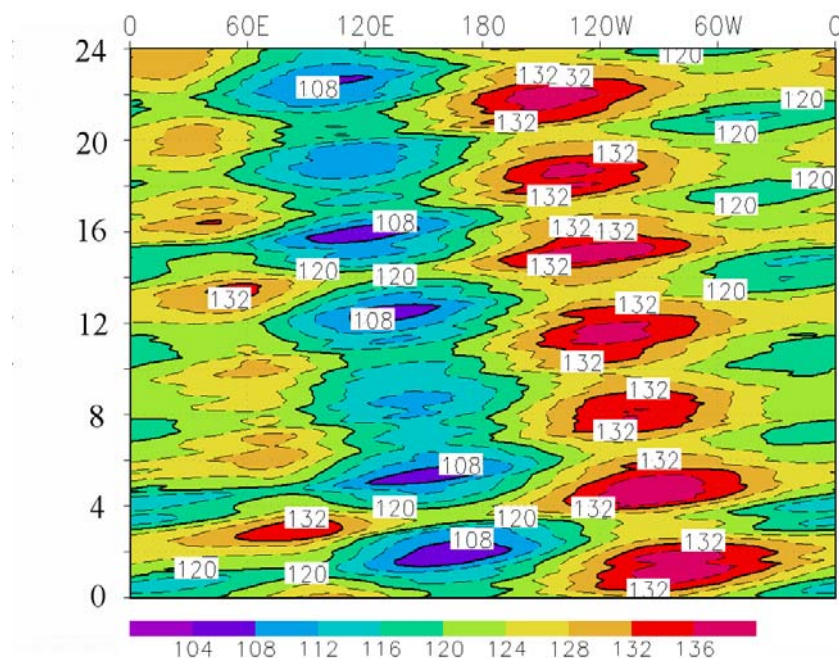


図 1 実験Dで平衡に達した後の高度 70 km 付近における東西風の経度—時間断面．縦軸の時間は地球日で表記している．横軸の左から右の向きがスーパーローテーションや自転の向きとなる．

最後に

VMAGCM_NC に惑星スケールの波動の強制オプションを加え，赤道 5.5 日波強制実験を行なった．実験 A では，5.5 日波の強制が無いにもかかわらず，6 日周期変動が見られた．実験 D では，雲底で 5.5 日変動が，雲頂で 4 日変動が見られた．熱潮汐波と 4–6 日波の相互作用については，今後解析しなければならない．また，GCM の計算結果と過去の観測結果を比較することで，力学過程の理解やモデルの改善を進めていきたい．

参考文献

- Iga, S. and Y. Matsuda, 2005: Shear instability in a shallow water model with implications for the Venus atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 2514–2527.
- Imamura, T., 2006: Meridional propagation of planetary-scale waves in vertical shear: implication for the Venus atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 1623–1636.
- Newman, M. and C. B. Leovy, 1992: Maintenance of strong rotational winds in Venus' middle atmosphere by thermal tides. *Science*, **257**, 647–650.
- Numaguti, A., S. Sugata, M. Takahashi, T. Nakajima and A. Sumi, 1997: Study on the climate system and mass transport by a climate model, *CGER's Supercomputer monograph report*, 3, p. 91.
- Yamamoto, M. and H. Tanaka, 1997: Formation and maintenance of the 4-day circulation in the Venus middle atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1472–1489.
- Yamamoto, M. and M. Takahashi, 2003a: 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, 2003b: Superrotation and equatorial waves in a T21 Venus-like AGCM, *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1449, doi:10.1029/2003GL016924.
- Yamamoto, M. and M. Takahashi, 2004: Dynamics of Venus' superrotation: the eddy momentum transport processes newly found in a GCM, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L09701, doi:10.1029/2004GL019518.
- Yamamoto, M. and M. Takahashi, 2006: Superrotation maintained by meridional circulation and waves in a Venus-like AGCM, *J. Atmos. Sci.*, **63**, 3296–3314.
- Yamamoto, M. and M. Takahashi, 2007: Simulations of superrotation using a GCM for Venus' middle atmosphere, *Earth Planets Space*, **59**, 971–979.