

大気重力波の金星熱圏大気循環への影響

星野直哉[1], 藤原均[1], 高木征弘[2], 笠羽康正[1]

[1] 東北大学・理, [2] 東大・理

1. Introduction

これまでの金星中間圏 (70 - 110 km)・熱圏 (>110 km) の風速場観測より、金星熱圏においても金星雲層 (50 - 70 km) におけるスーパーローテーションと同様の、風速 100 m/s にも及ぶ西向き高速風の存在が報告されている [e.g., Shah et al., 1991]。大気大循環モデル (GCM) を用いた先行研究では、この熱圏高速東西風のメカニズム解明を目的に、雲層起源の大気重力波による西向き運動量の上方輸送に着目した研究がなされている。例えば、Bougher et al. [1988] は重力波による wave drag 効果のパラメタリゼーションとしてレイリー摩擦を用い、高度約 140 km 以上において約 60 m/s の熱圏高速東西風をモデル中で再現した。また、Zhang et al. [1996] は、波の飽和理論に基づいたより現実的なパラメタリゼーションを用い、先行研究における大気重力波の扱いを改良し重力波の運動量輸送効果を評価した。しかし、先行研究の重力波パラメタリゼーションは重力波同士の波動-波動相互作用や分子粘性における波の減衰過程を考慮しないなど、重力波に関わる物理過程を十分に考慮出来ていないという問題があった。本研究では、Medvedev et al. [2000] において開発された波動-波動相互や分子粘性における波の減衰効果を考慮可能な重力波パラメタリゼーションを用い、より現実的な運動量輸送効果の評価をおこなった。

2. Model

GCM

本研究では金星中間圏・熱圏の大気大循環モデル (GCM) を用いた数値シミュレーションを行った。GCM ではプリミティブ方程式系を解いている。モデルの下端高度は 80 km、分解能は経度方向 10° 、緯度方向 5° 、高さ方向 0.5 スケールハイトである。モデルでは超高層大気に特有な紫外光加熱、赤外光加熱、 CO_2 -15 μm 冷却などの加熱・冷却過程に加え、渦/分子粘性を考慮している。紫外光の加熱効率は 0.14 であり、太陽活動極大期 ($F_{10.7} = 206$ @地球) の条件で計算を行っている。GCM により計算可能な物理量は風速 (東西方向、南北方向、鉛直方向)、温度、数密度 (O , CO , CO_2) である。下端境界条件は、過去の温度観測結果に基づき温度 196 K とした。下端風速条件は高度 70 km 付近のスーパーローテーションの風速分布を模擬し、赤道風速約 80 km の剛体回転を仮定した。

重力波パラメタリゼーション

本研究では Medvedev et al. [2000] で開発された重力波パラメタリゼーション (以後 Medvedev スキーム) を GCM に組み込んで数値計算を行った。Medvedev スキームは、Weinstock の非線形重力波の理論に基づいており、重力波同士の波動-波動相互作用を考慮可能である。Medvedev スキームにおけるパラメータは重力波の水平波長とモデル下端における重力波の鉛直波長スペクトルである。本研究では、Venus Express (VEX) 搭載の VIRTIS の観測結果 [Peralta et al., 2008] から、重力波の水平波長を約 100 km、鉛直波長スペクトルを鉛直波長約 2km にピークを持つスペクトルを与えている。本パラメタリゼーションでは、Yigit et al. [2008] に基づき、分子粘性による波の減衰効果を Medvedev スキームに加えて考慮している。

Results

本シミュレーションから得られた、帯状平均した東西風の緯度-高度分布を図 1 に示す。下端で与えた赤道風速 80 m/s のスーパーローテーションは高度とともに減衰し、高度約 105 km で強度はほぼ 0 m/s となった。高度約 105km 以上では、高度とともに西向き風が卓越し高度約 120 km 以上において 60 m/s もの高速東西風が赤道にて形成された。重力波パラメタリゼーションを考慮しない時の計算では、帯状平均した東西風強度はほぼ 0 m/s であったことから、図 1 に見られる西向き風は重力波の運動量輸送効果により形成されたものである。

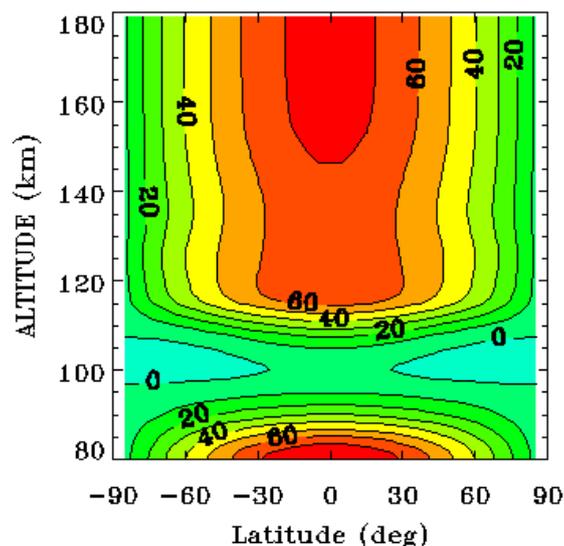


図 1. 帯状平均した東西風の緯度-高度分布。単位は m/s。正が西向き、負が東向きの風を表す。

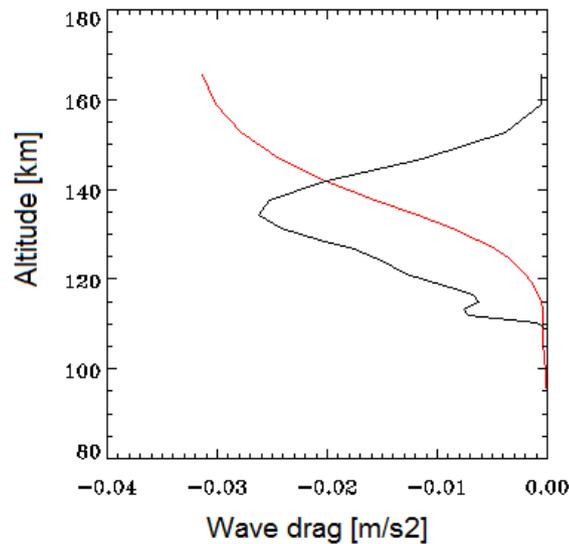


図 2. 06:00 LT における、重力波の wave drag による加速・減速率。(赤線：レイリー摩擦、黒線：Medvedev スキーム)

図 2 に 06:00 LT における、wave drag による東西風加速度の高度分布を示す。従来のパラメタリゼーションによる wave drag 効果との比較のため、Medvedev スキームによる加速度(黒線)に加え、先行研究[Bougher et al., 1988]で用いられているレイリー摩擦による加速度(赤線)も示す。高度とともに加速度が単調増加するレイリー摩擦と異なり、Medvedev スキームは高度約 140 km 以上において加速度が減少している。これは本パラメタリゼーションで初めて導入した分子粘性による波の減衰効果により高度 140 km 以上において上方への波による運動量輸送効果が妨げられたためと考えられる。

我々は Sandor らにより行われた 2004-2009 年におけるミリ波を用いた高度 100 - 115 km の金星風速観測結果と本シミュレーション結果を比較した。Sandor らの結果では、高度約 100 km から 115 km にかけて高速東西風強度が高度とともに増加することを示唆しており、これは本シミュレーション結果と整合している。また、観測から得られている高度 100 - 115km の高速東西風強度の鉛直勾配は 4.5 m/s/km 程度であるのに対し、本シミュレーションによる高速東西風の鉛直勾配は約 5 m/s/km であり、両結果ともほぼ一致している。

本研究では、高速東西風の高度 95km 付近における O_2 -1.27 μ m 大気光分布への影響を見積もった。図 3 に O_2 -1.27 μ m 大気光の水平面分布の計算結果を示す。図 3 より大気光の発光ピーク位置が真夜中(00:00 LT)から 02:30 LT にシフトしていることがわかる。この結果は、高速東西風によって大気光発光ピークが朝側にシフトするという従来の考え[e.g., Bougher et al., 2006]と整合的である。

Crisp et al. [1996] による大気光地上観測では 02-12.7 μm 大気光の発光ピーク領域の 00:00 LT-03:00 LT へのシフトを報告しており、今回の結果は Crisp らの観測結果と整合的である。

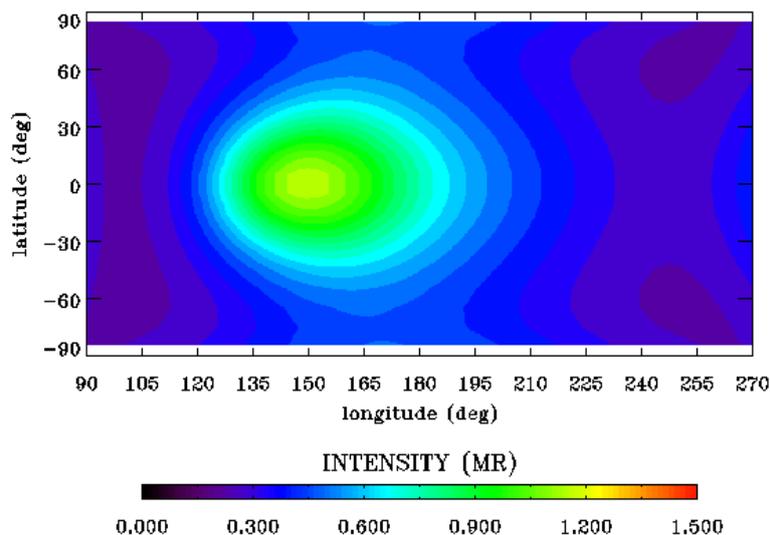


図 3. O_2 -1.27 μm 大気光の水平面分布

Conclusion

本研究では、重力波による金星中間圏・熱圏の大気大循環への影響を評価することを目的に、重力波の波動-波動相互作用や分子粘性による重力波の減衰過程を考慮可能な重力波パラメタリゼーションを用いて数値シミュレーションを行った。その結果、重力波による運動量輸送効果により、高度約 120 km 以上において、赤道風速約 60 m/s の熱圏高速東西風が形成された。熱圏高速東西風は高度約 100 km 以上において高度共に強度が強くなっており、その風速鉛直勾配は 5.0 m/s/km であった。また、大気光分布のシミュレーションにより、熱圏高速東西風に対応した大気光発光ピーク位置の朝側シフトがみられた。本研究では大気光発光ピークが真夜中から 02:30 LT にシフトしており、Crisp et al. [1996] の大気光地上観測の結果と整合的であった。

参考文献

- Bougher, S. W., R. E. Dickinson, E. C. Ridley, and R. G. Roble (1988), Venus mesosphere and thermosphere, III, Three-dimensional general circulation with coupled dynamics and composition, *Icarus*, 73, 545-573.
- Bougher, S. W., S. Rafkin, and P. Drossart (2006), Dynamics of the Venus upper atmosphere: Outstanding problems and new constraints expected from Venus Express, *Planet. Space. Sci.*, 54, 1371-1380.
- Crisp, D., V. S. Meadows, B. Bezard, C. de Bergh, J. P. Maillard, and F. P. Mills (1996), Ground-based near-infrared observations of the Venus nightside: $1.27 \mu\text{m}$ O_2 (a? g) airglow from the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 101, 4577-4594.
- Medvedev, A. S., and G. P. Klassen (2000), Parameterization of gravity wave momentum deposition based on nonlinear wave interactions: basic formulation and sensitivity tests, *J. Atm. Sol. Terr. Phys.*, 62, 1015 - 1033.
- Peralta, J., R. Hueso, A. Sanchez-Lavega, G. Piccioni, O. Lanciano and P. Drossart (2008), Characterization of mesoscale gravity waves in the upper and lower clouds of Venus from VEX-VIRTIS images, *J. Geophys. Res.*, 113, p. E00B18.
- Shah, K. P., D. O. Muhleman, and G. L. Berge (1991), Measurements of winds in Venus' upper mesosphere based on Doppler shifts of the 2.6 mm ^{12}CO line, *Icarus*, 93, 96-121.
- Yigit, E., A.D. Aylward and A.S. Medvedev (2008), Parameterization of the effects of vertically propagating gravity waves for thermosphere general circulation models: sensitivity study, *J. Geophys. Res.* 113.
-