

金星大気の熱潮汐波

* 高木征弘 (京産大・理), 杉本憲彦 (慶應大・日吉物理),
安藤紘基 (JAXA), 松田佳久 (東京学芸大・自然科学系)

1 はじめに

金星大気スーパーローテーションの成因のひとつとして、熱潮汐波による運動量輸送が考えられている (Fels and Lindzen, 1974; Plumb, 1975; Newman and Leovy, 1992; Takagi and Matsuda, 2007)。また、熱潮汐波に伴う風速は雲層高度での物質循環に対して無視できない影響をもつ可能性があるが、熱潮汐波に伴う風速や温度分布を詳しく調べた研究はこれまで行われていない。最近、Venus Express に搭載された VIRTIS-M データの解析から熱潮汐波が検出されている (Peralta et al., 2012)。その結果によれば、高緯度では一日潮が顕著であり、南北風速は 4.7 m/s 程度である。近い将来、日本の金星探査機「あかつき」のデータからも熱潮汐波に伴う風速分布が得られると期待されるため、熱潮汐波の構造を理論的・数値的に研究し、観測データを力学的に解釈できる体制を整えておくことが重要である。

本研究では金星大気大循環モデル (GCM) を用いて熱潮汐波に伴う風速と温度の分布を詳しく調べることにする。

2 モデル

本研究で用いた GCM は AFES for Venus である。モデルの詳細については Sugimoto et al. (2014a, b) を参照されたい。解像度は T63L120 で、太陽加熱は観測に基づく現実的な分布を用いた (Tomasko et al., 1980)。赤外線による放射輸送はニュートン冷却で単純化した。緩和温度場は水平一様とし、鉛直分布は VIRA に基づく分布を用いた。初期条件は理想化したスーパーローテーション状態とした。この初期場から 5 地球年の時間積分を行った。雲層高度の大気は積分開始後 1 地球年程度で準定常状態に達し、その後はこの状態が維持された。解析に用いたデータは 4 地球年目以降のものである。

3 結果

図 1 に雲層上端付近の高度での平均東西風速の南北分布を示す。低緯度では等速分布に

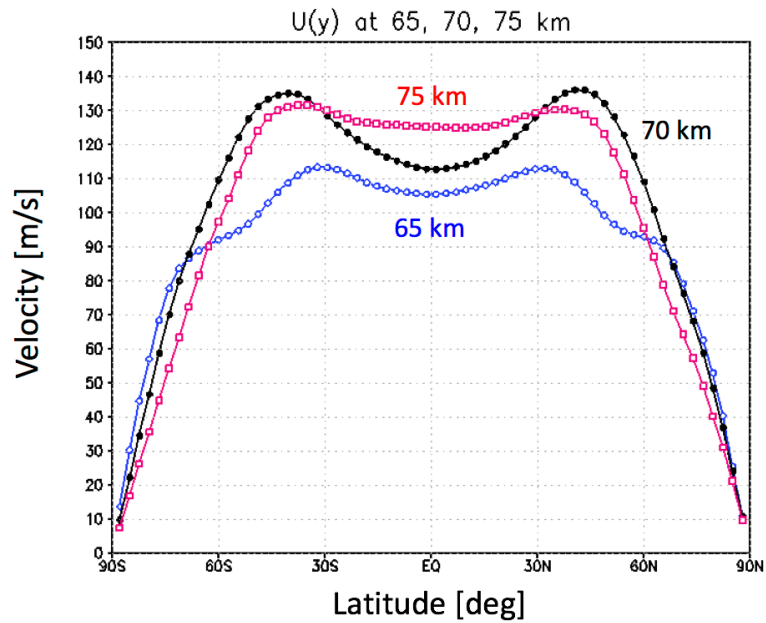


図1 準平衡状態における東西・時間平均した東西風速の南北分布。高度は赤: 75 km, 黒: 70 km, 青: 65 km である。

近く、中緯度 (40 度付近) に弱いジェットが存在しており、最近の観測結果とよく一致する分布が得られた (Machado et al., 2014)。

オイラー平均した子午面循環の様子を図2に示す。雲頂より下では、赤道付近の子午

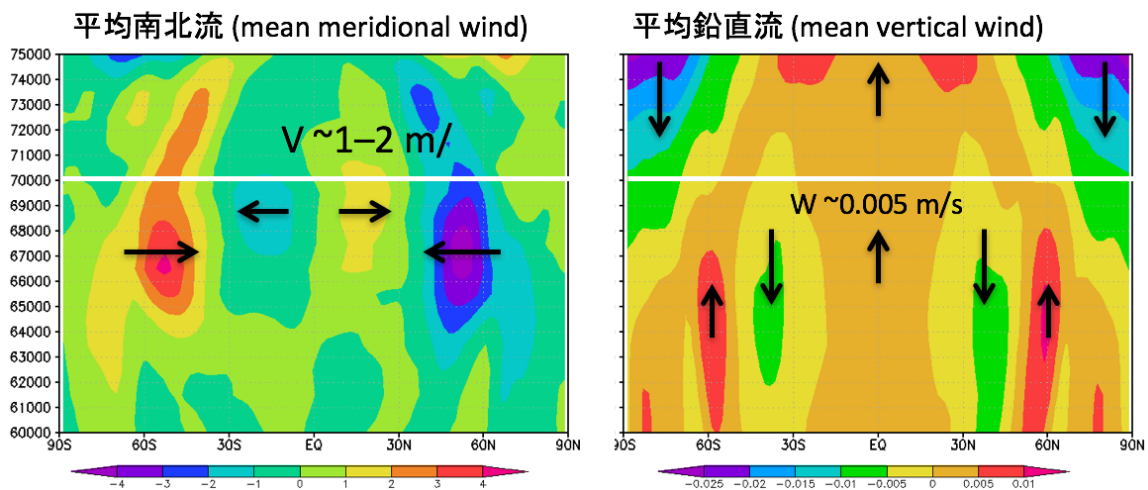


図2 高度 60–70 km における東西・時間平均した子午面循環の南北・高度分布。左が南北流, 右が鉛直流, 白線が雲頂高度 (高度 70 km) である。

面循環 (直接循環) の極向きの流れは緯度 30 度付近までしか到達せず, 中緯度には間接

循環が卓越している。従来は赤道から極に至る 1 セルの子午面循環が予想されていたが (Schubert et al., 1980), 金星雲層高度の子午面循環は地球的な子午面循環に近い分布をしている可能性が示されている。間接循環の成因はまだよくわからないが, 傾圧不安定波 (Sugimoto et al., 2014a, b) や熱潮汐波の南北熱輸送が影響している可能性がある。雲頂より上では, 低緯度で上昇流, 高緯度で下降流という 1 セルの子午面循環が卓越している。

図 3 に高度 70 km における熱潮汐波の水平構造を示す。水平風速については Newman

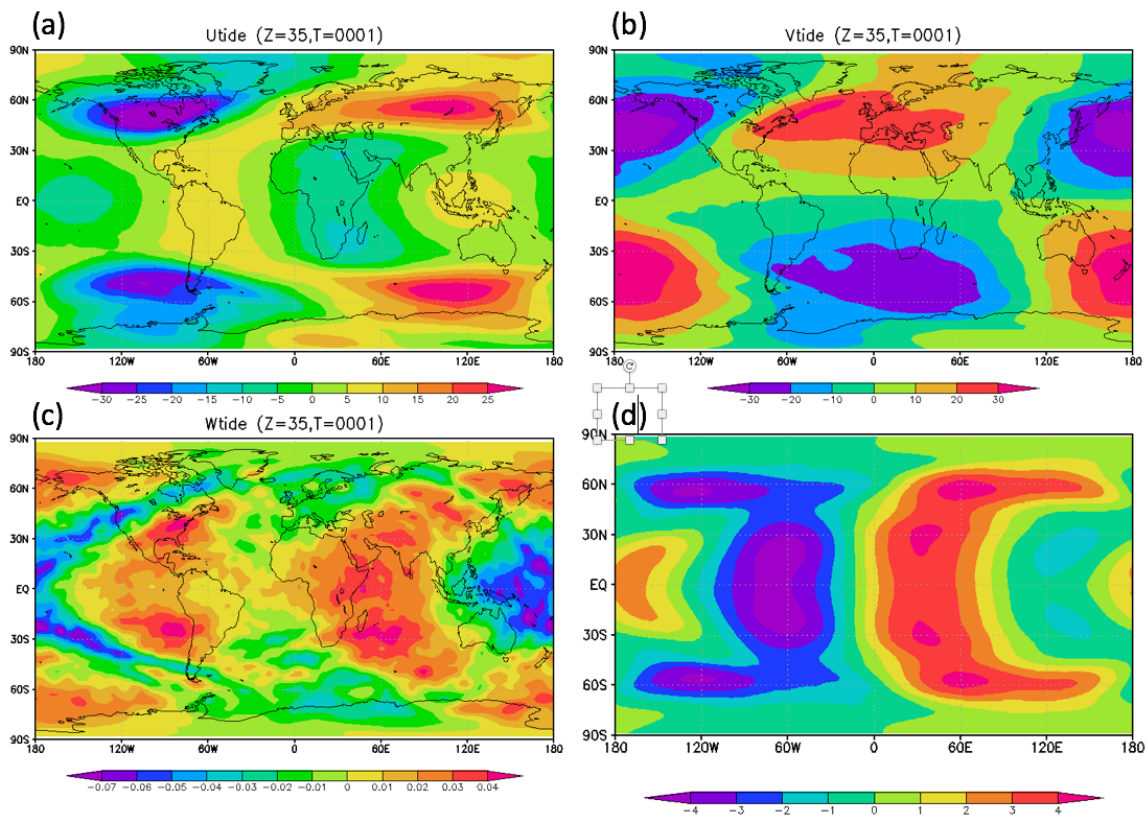


図 3 長周期成分を時間平均して得られた高度 70 km における熱潮汐波の構造。(a) 東西風速, (b) 南北風速, (c) 鉛直風速, (d) 温度偏差。惑星の自転は左から右向きで, 各図の中心が太陽直下点である。

and Leovy (1992) とよく一致する結果が得られた。南北風は昼面で極向き, 夜面で赤道向きになっており, 一日潮成分が卓越している。東西風速は低緯度で半日潮, 高緯度で一日潮が卓越している。温度偏差は午後側で最大となっている。温度偏差の最大が太陽直下点から午後側にずれているのは, 東西風による移流効果のためと考えられる (Takagi, 2001)。温度偏差の最小は明け方付近に存在し, 真夜中ではむしろ正の偏差がみられる。これには鉛直伝播する半日潮の位相が重要である。上昇流の最大も太陽直下点からやや午後側にず

れているが、下降流の中心はほぼ真夜中に位置している。鉛直流の分布には惑星規模の Y 字模様がみられる。位相速度の違いから、鉛直流分布の Y 字模様と紫外線で観測される雲頂上端の Y 字模様に直接の関係はないが、雲の生成過程などを通じて両者が関連している可能性も考えられる。

図 4 は赤道面上で観測した鉛直流の断面図である。図 3 に高度 70 km における熱潮汐波の水平構造を示す。太陽直下点の下流側（午後側）に顕著な上昇流が存在している。こ

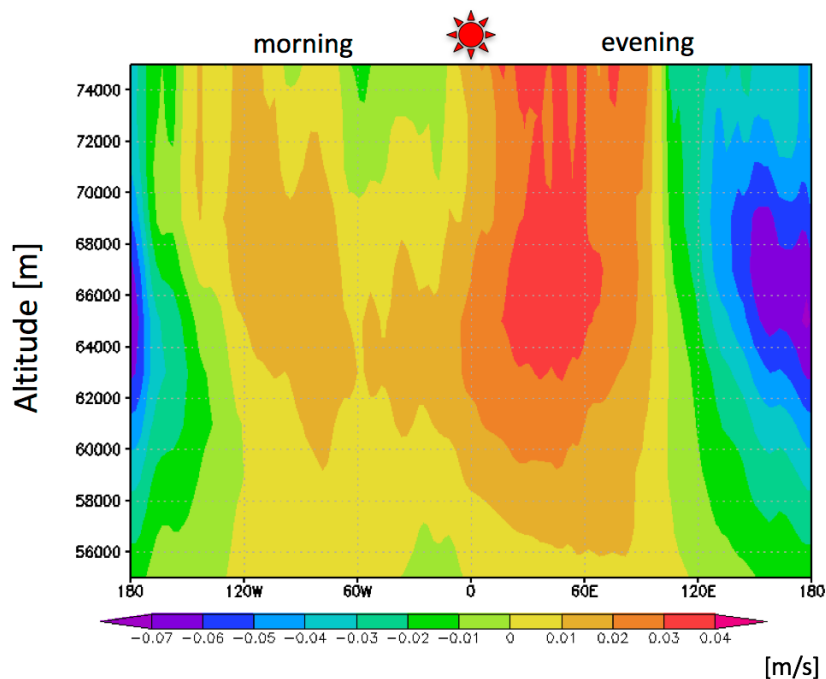


図 4 赤道面上の高度 55–75 km における熱潮汐波に伴う鉛直風速の東西・高さ分布。経度 0 度が太陽直下点である。

の高度では一日潮の位相はほぼ直立し、トラップモードとして存在している。この結果は、この高度で夜昼間対流 (SS-AS circulation) が卓越していることを示している。夜昼間対流に伴う上昇流は雲層上端で 0.04 m/s であり、平均子午面循環の上昇流の約 10 倍である。このことから夜昼間対流が雲層領域の物質循環に非常に重要であることが予想される。実際、Venus Express の紫外線観測では太陽直下点の下流側は暗くみえることが指摘されている (Titov et al., 2012)。今回の結果は、紫外線で観測される暗部が大気下層から上方に運ばれてきた紫外線吸収物質によるものだとする考え方とよく整合する。

4 まとめ

現実的な東西風分布を再現する GCM (AFES for Venus) を用いて熱潮汐波の構造を調べた。その結果、一日潮と半日潮の卓越が再確認できたが、雲頂高度では東西波数 3, 4 成分も強く励起され、鉛直流分布にみられる Y 字模様を作っている。また、熱潮汐波に伴う鉛直流の方が平均子午面循環に伴うものよりずっと大きく、硫酸雲の原料物質を始めとする雲層領域の物質循環に大きな影響を与えていることが示唆された。熱潮汐波と平均東西流 (スーパーローテーション) の非線型相互作用によって生じたと考えられる短周期擾乱もみられ、雲模様との関連が示唆された。

参考文献

- [1] Fels, S. B., and R. S. Lindzen (1974), The interaction of thermally excited gravity waves with mean flows, *Geophys. Fluid Dyn.*, 6, 149-191.
- [2] Plumb, R. A. (1975), Momentum transport by the thermal tide in the stratosphere of Venus, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 101, 763-776.
- [3] Newman, M., and C. Leovy (1992), Maintenance of strong rotational winds in Venus' middle atmosphere by thermal tides, *Science*, 257, 647-650.
- [4] Peralta, J., D. Luz, D.L. Berry, C.C.C. Tsang, A. Sánchez-Lavega, R. Hueso, G. Piccioni, P. Drossart (2012), Solar migrating atmospheric tides in the winds of the polar region of Venus, *Icarus*, 220, 958-970.
- [5] Sugimoto, N., M. Takagi, and Y. Matsuda (2014), Baroclinic instability in the Venus atmosphere simulated by GCM, *J. Geophys. Res. Planets*, doi:10.1002/2014JE004624.
- [6] Sugimoto, N., M. Takagi, and Y. Matsuda (2014), Waves in a Venus general circulation model, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 7461-7467, doi:10.1002/2014GL061807.