

金星 GCM にみられる惑星規模波動について

高木征弘（京都産業大学），杉本憲彦（慶應義塾大学），
安藤紘基（京都産業大学），松田佳久（東京学芸大学）

1. はじめに

紫外光で観測される雲頂上端付近の雲模様から，赤道ケルビン波（4日波）や中緯度ロスビー波（5日波）といった大気波動の存在が示唆されている（DelGenio and Rossow, 1990）。また，Y字型などの特徴的な雲模様を大気波動によって説明しようという試みも多くなされている（Yamamoto and Tanaka, 1997; Peralta et al., 2015）。しかしながら，DelGenio and Rossow (1990) の解析でも示されているように，いわゆる赤道ケルビン波と中緯度ロスビー波が検出されたのは1979年春の時期だけであり，他の時期には全緯度で4日波のみ（1980年春）あるいは5日波のみ（1982年春）が検出されている。近年の VMC UV/Venus Express データを利用した解析でも，赤道ケルビン波の卓越はまれであり，低緯度から中高緯度に振幅をもつ波の卓越する期間が多いことが報告されている（Kouyama et al., 2015）。

本研究では，大気大循環モデル（AFES for Venus）の数値シミュレーションに現れた大気波動について調べ，従来の観測事実をどのように解釈すべきか考察したい。

2. モデル

大気大循環モデルには AFES for Venus を利用した（Sugimoto et al., 2014a, b）。空間解像度は T63L120，高度領域は地面から約 120 km とした。太陽加熱の分布と強度は Tomasko et al. (1980) に基づくが，高度 80 km では太陽加熱を無視した。赤外線による放射輸送過程はニュートン冷却で簡単化した。ニュートン冷却で緩和させる温度分布は水平一様とし，鉛直分布は Venus International Reference Atmosphere に基づく。初期条件は理想化したスーパーローテーション（剛体回転）とそれにバランスする温度分布とし，5地球年の数値積分を行なった。モデル中の大気は 1-2 年で準定常状態に達し，現実的なスーパーローテ

ーション状態が維持される。解析には後半2年分のデータを用いた。

3. 結果

図1に平均東西風と温度（水平平均を除いたもの）の緯度・高度分布を示す。雲頂高度で約110 m/sに達するスーパーローテーションが維持されている。雲頂より上ではスーパーローテーションの風速が急に減少するため、70 km付近を境にして南北温度傾度が逆転している。赤道と極の温度差は30 K程度である。

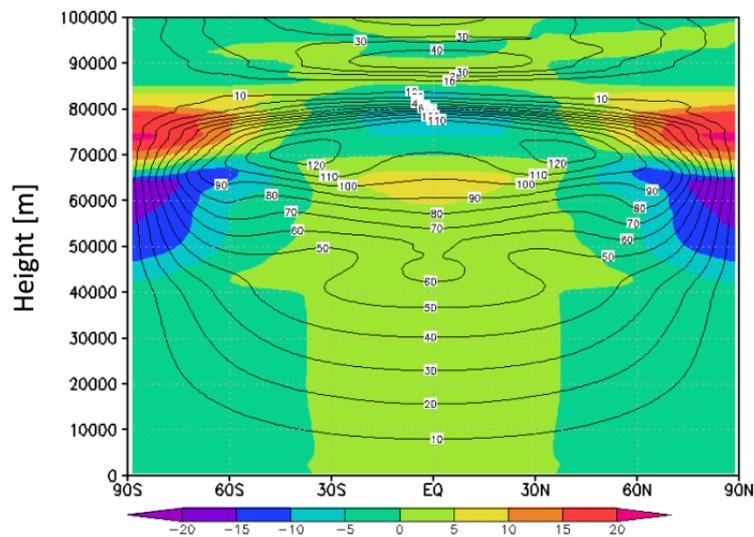


図1: 平均東西風と温度（水平平均を除く）の緯度・高度分布

図2にGCM中に現れた大気擾乱に対する周期解析の結果を示す。赤道域の東西風には高度40–80 kmの広い領域で周期5.5日の波活動がみられる。緯度60Nの東西風と南北風には高度50–70 kmに周期5.5日と7.5日の波がみられる。雲頂より上ではさまざまな周期の波がみられる。スーパーローテーションの急減少に伴うシア不安定などにより、重力波が励起されていることが示唆される。雲頂高度での熱潮汐波には波数1, 2だけでなく, 3, 4の成分もみられる。太陽加熱のフーリエ成分の大きさを考慮すると, 波数3, 4の熱潮汐波は太陽加熱によって直接励起されたものではなく, 熱潮汐波同士の非線形相互作用によって作られたものであることが示唆される。

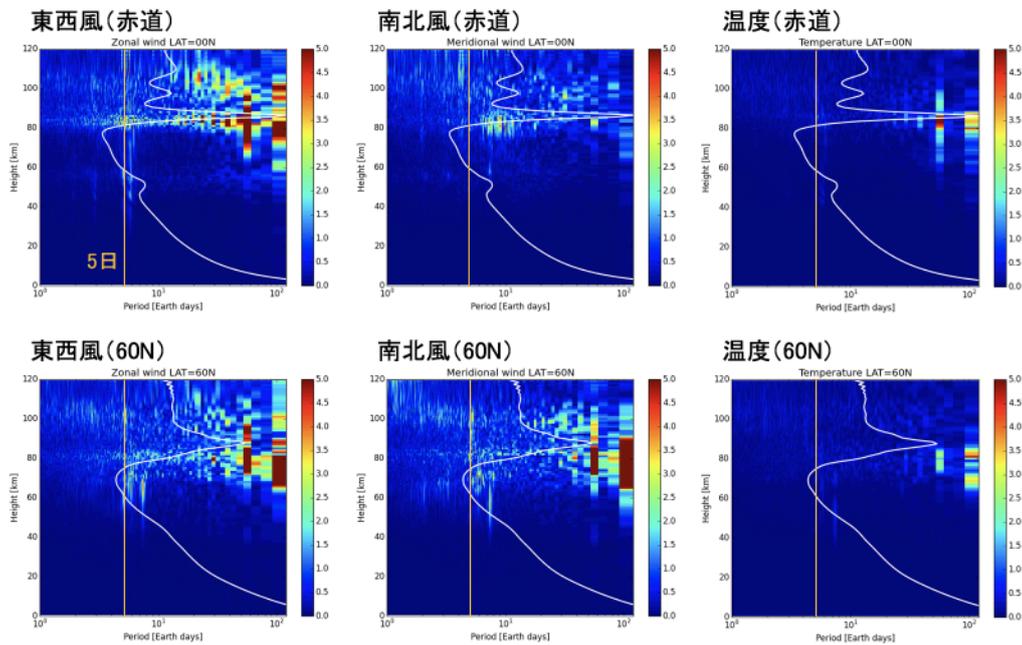


図 2: 東西風・南北風・温度に対する周期解析の結果（上: 赤道, 下: 60N）

図 3 に雲頂高度でみた東西風の水平分布（平均東西風+熱潮汐波）を示す。図の中心が太陽直下点である。この数値シミュレーションでは金星の自転の向きを地球と同じ方向にとっているため、90W が明け方境界、90E が夕方境界となる。この高度では熱潮汐波の振幅が大きいため、風速のローカルタイム依存性が大きい。明け方付近の中緯度には東西波数 3-4 の熱潮汐波成分が存在し、「くびれ」のような構造が作られている。30S-30N の平均東西風はほぼ等速である。

図 4 に高度 68 km で得られた短周期擾乱のスナップショットを示す。短周期擾乱は周期 10 日の時間フィルタで取り出した (Duchon, 1979)。中高緯度に見られる顕著な擾乱は傾圧不安定に伴うものと考えられる (Sugimoto et al., 2014a, b)。中高緯度の擾乱には明らかな南北対称性がみられる。南北対称性は地上観測でも指摘されており、興味深い (Sato et al., 2014)。また、低緯度には波数 1 の東西風偏差を伴う波が存在する。このスナップショットからは読み取れないが、時間変化を検討すると、基本場の東西風に「くびれ」が存在している明け方付近で Y 字型の構造が作られる。時々、弓状の構造 (bow shape) が作られ、下流に移流されていく様子もみられる。

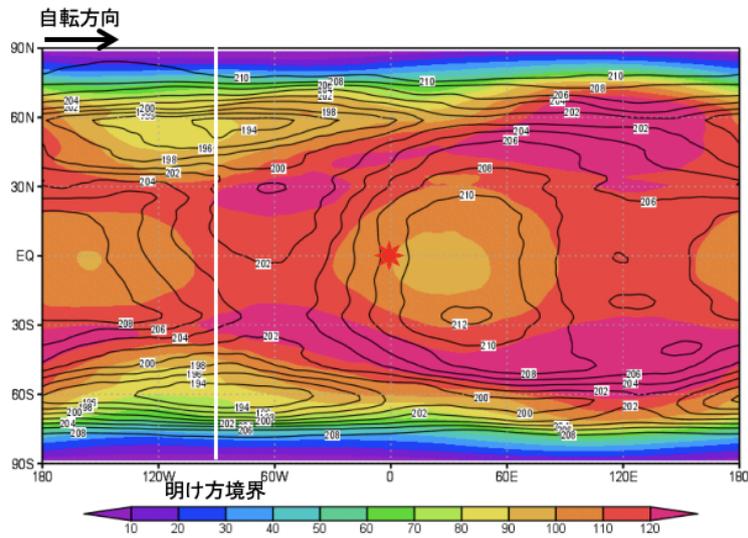


図 3: 雲頂高度における東西風（東西平均成分+熱潮汐波）の水平分布

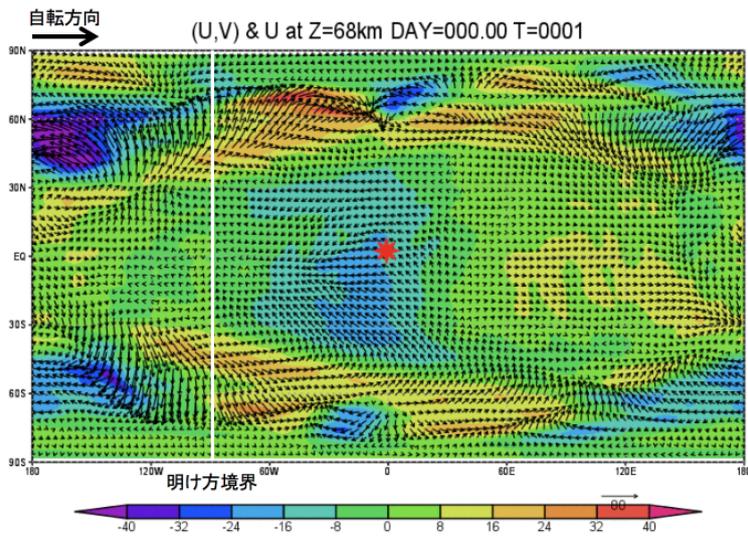


図 4: 短周期擾乱の風速の水平分布（高度 68 km）

図 5 に短周期擾乱の赤道での東西・鉛直構造を示す。高度 55 km（低安定度層の下端高度）の上下で鉛直構造が異なる。鉛直方向の位相伝播は明らかではない。55 km より上では東西風偏差と高度場偏差の位相が 180 度ずれている。擾乱の東西波数は 1 である。低安定度層より上では位相がほとんど直立している。下では東西に傾いた位相構造がみられ、傾きは高度 50 km（白線）の上下で逆になっている。

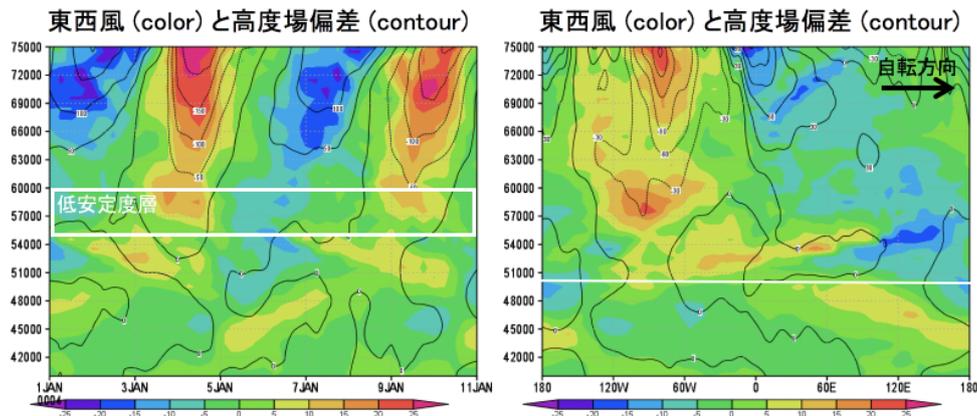


図 5: 短周期擾乱の鉛直構造 (赤道)

4. まとめ

- 雲層高度には周期 5.5 日と 7.5 日の波が存在する。
- 東西風でみると、5.5 日波は赤道付近、7.5 日波は中緯度から極域にかけて振幅をもつ。一方、南北風でみると、5.5 日波は中緯度 (30–60 度付近)、7.5 日波は極域で振幅をもつ。
- 5.5 日波は傾圧不安定 (Sugimoto et al. 2014a, b) に伴う波と考えられる。
- 低安定度層より下 (45–54 km) で赤道向きの運動量輸送がみられた。どのような波が関与しているかは今後調査したい。
- 擾乱の構造には高度ごとに顕著な違いがみられた。上部雲層では赤道対称な構造が卓越する。一方、下部雲層では低緯度に小スケールの渦が存在し、高緯度に鉛直流の作るストリーク構造を中心とする強い水平収束・発散および渦運動がみられた。
- あかつきや地上の観測結果と比較していきたい。