

重力波で生じる金星大気の微細構造に関する数値実験

山本 勝(九大応力研)

はじめに

金星大気では、静的安定度のギザギザした鉛直構造が観測されている。この静的安定度の微細構造は、おそらく対流や波動によると考えられるが、その形成メカニズムはよくわかっていない。本研究では、重力波によって形成される静的安定度の鉛直微細構造について調査した。雲層内での重力波の発生源としては、

- 対流層内での熱対流による貫入 (Baker et al. 1998)
- 惑星スケール波動の砕波 (Yamamoto 2001)
- Cloud-feedback heating (CFH) による強制 (Gierasch et al. 1973)

などが考えられる。Yamamoto (2001)の惑星スケール波の線形応答を見ると、雲頂では4日波(e.g., Del Genio and Rossow 1990)に対応する 131 m/s のシグナルと雲底では 5.5 日波(e.g., Crisp et al. 1991)に対応する 79 m/s のシグナルが見られる。このような高速の惑星スケール波動は簡略化 GCM(e.g., Yamamoto and Takahashi 2003, 2006)でも検出されている。Yamamoto (2001)では、経度—高度 2 次元力学モデルで非線形応答についても調べており、79 m/s の波では砕波が見られ、その砕波に伴う対流で重力波が発生しているようすが見られる。

最近 8.4 日周期の変動が観測されているが(Hosouchi et al. 2012)、この波に対応するシグナル(58 m/s)が Yamamoto (2001)の線形応答でも得られていた。この 8 日波の砕波についても詳しく調査する必要がある。

Yamamoto (2003)では、CFH (Gierasch et al. 1973, Smith et al. 1993)を経度—高度 2 次元力学モデルに適用した。その研究によると、CFH が無いとグリッドスケールの対流構造しか見えないが、CFH があると組織化されたアスペクト比が大きい対流が見られ、その対流やCFHに伴う重力波が発生している。Read(2013) は、静的安定度のギザギザした鉛直構造(Hinson and Jenkins 1995)を平滑化したものが、鉛直伝搬する重力波(Yamamoto 2003)に対応するのではないかと示唆している。

砕波やCFH で発生する対流や重力波によって形成される静的安定度の鉛直微細構造について調査しなくてはならないので、本研究では、

- 惑星スケール 5.5 日波の砕波
- 惑星スケール 8 日波の砕波
- CFH による対流

について、波動の強制および加熱パラメーターを変えた感度実験を行った。それらの実験で生じる対流と波動による帯状平均鉛直運動量フラックスや帯状平均鉛直熱フラックスについて調査した。そして、これらの波動や対流で生じる静的安定度微細構造を詳しく調べた。

モデル

使用モデルと基本場は Yamamoto (2001, 2003)の経度—高度 2 次元赤道モデルと同じだが、波の強制パラメーターに関する感度実験や 8 日波について追加実験を行った。臨界高度が雲内の低安定度層 (55 km) 付近に存在する 5.5 日波と 8 日波は、モデル下端から東西波数 1 の geopotential height ($h_{bottom} = 0-5$ m)変動で強制する。この惑星スケール波は下層大気から伝播する波動に対応する。

CFH のパラメタリゼーションは、Smith et al. (1993)をもとに

$$\delta Q = Q_{CFH} f(z) \delta z / H$$

を用いた(Yamamoto 2003)。 Q_{CFH} は Smith et al. (1993)の無次元パラメーターや放射の時定数などをまとめた係数で、加熱率の次元をもつ強制パラメーターとなる。無次元鉛直構造関数 $f(z)$ は、鉛直流による下層雲の濃淡変動に伴う加熱・冷却分布を表わす。

結果

5.5 日波の臨界高度は低安定度層の上、8 日波の臨界高度は低安定度層の下に位置する。この違いが惑星スケール波の砕波に大きな影響を与える。5.5 日波では、低安定度層の上部から下部で砕波が起こり、強制を強くするにつれて、低安定度層内の対流から上方へ重力波が伝播する。8 日波では低安定度層の下部で薄い構造が見られるが、上部で明瞭な構造は見えない。5.5 日波と同様に、強制を強くするにつれて、低安定度層から上方へ重力波が伝播する。 Q_{CFH} を与えた実験では、鉛直—水平のアスペクト比の大きい対流が形成され、その対流の上では重力波が上方へ伝播している。

上記の対流や重力波による熱および運動量輸送 (帯状平均鉛直フラックス) について詳しく調査した。それぞれの実験で共通に見られる特徴は低安定度層内では渦熱輸送が上向きで、強制パラメーターを大きくするにつれてその値は大きくなる。砕波の場合、低安定度層下部で下向きの熱輸送が、上向きの値に匹敵するほど大きい。5.5 日波が強くなるにつれて、低安定度層内で負の運動量フラックスが大きくなるが、8 日波の場合、砕波に伴う負の運動量フラックスは強制波の運動量フラックスに比べて小さい。他方、CFH では下向きの熱輸送が低安定度層の上下境界で見られるが、その値は小さい。運動量輸送は低安定度層の上部で大きな負のフラックスをもち、その運動量は上方へ鉛直輸送される。

CFH の対流や 5.5 日波の砕波は低安定度層内全域でおこるので、最大熱フラックスは、強制パラメーターを大きくするにつれて大きな値をもつ。ところが、8 日波の砕波は低安定度層下部に集中するので、低安定度層の熱フラックスは小さく、強制パラメーターに対してあまり変化しない。砕波や CFH 対流により生じる負の運動量フラックスは、この低安定度層内の上向き熱フラックスに比例する。

静的安定度鉛直分布の微細構造は重力波や対流によって形成される。砕波の場合、強制が大きくなるにつれて、その微細な変動の振幅も大きくなる。5.5 日波や CFH では、低安定度層の全体で対流が起こるので、それに伴う貫入によって低安定度層直上と直下で薄いシャープな変動が見られる。この低安定度層より上では波動構造が形成される。8 日波では、砕波が低安定層下部で起こり、それに伴う対流活動が弱く、薄いシャープな変動は見られない。低安定度層より上と下で小振幅の波動構造が見られる。

まとめ

惑星スケールの 5.5 日波と 8 日波の砕波と Cloud-feedback heating (CFH) について、波動の強制および加熱パラメーターを変えた感度実験を行い、対流や波動による帯状平均鉛直運動量フラックスや帯状平均鉛直熱フラックスについて詳しく調べた。砕波実験も CFH 実験も低安定度層内の対流熱輸送は上向きである。5.5 日波と 8 日波の砕波では低安定度層の下で大きな下向き熱輸送が見られるが、CFH の対流では、低安定度層の上端・下端で小さな下向き熱輸送が形成される。

低安定度層で形成される重力波に関しては、負の運動量フラックスとなる。8 日波では、低安定度層下端で砕波が起こり、その影響が低安定度層下部に集中するので、対流活動が弱く、低安定度層全体では上向き熱フラックスも砕波に伴う負の運動量フラックスも小さい。静的安定度の鉛直分布では、弱い対流活動のため、貫入に伴うシャープな変動は形成されず、低安定度層より上と下で小振幅の波動構造が見られる。他方、5.5 日波では、低安定度層全体で砕波が起こり、低安定度層内で重力波運動量輸送が大きい。静的安定度の鉛直分布では、砕波による対流に伴う貫入によって低安定度層直上と直下で薄いシャープな変動が見られる。低安定度層より上では、重力波による波動構造が形成される。

CFH では、負の鉛直運動量フラックスが高さとともに徐々に減少する。低安定度層内でフラックスが急変する砕波実験と比較して、CFH と対流で励起された重力波は効率よく鉛直伝播する。5.5 日波の砕波同様に、CFH の対流は低安定度層全域に及ぶので、静的安定度鉛直分布では低安定度層直上と直下で貫入による薄いシャープな変動が見られ、低安定度層より上で重力波による波動構造が形成される。

謝辞

本研究は科研費 (No. 20740273 と No. 22244060) の支援を受けた。数値実験では九州大学情報基盤研究センターの大型計算機を利用した。

参考文献

- Baker, R.D., Schubert, G., Jones, P.W., 1998. Cloud-level penetrative compressible convection in the Venus atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences* 55, 3–18.
- Crisp, D., Coauthors, 1991. Ground-based near-infrared imaging observations of Venus during the Galileo encounter. *Science* 253, 1538–1541.
- Del Genio, A.D., Rossow, W.B., 1990. Planetary-scale waves and the cyclic nature of cloud top dynamics on Venus. *Journal of the Atmospheric Sciences* 47, 293–318.
- Gierasch, P.J., Ingersoll, A.P., Williams, R.T., 1973. Radiative instability of a cloudy planetary atmosphere. *Icarus* 19, 473–481.
- Hinson, D.P., Jenkins, J.M., 1995. Magellan radio occultation measurements of atmospheric waves on Venus. *Icarus* 114, 310–327.
- Hosouchi, M., Kouyama, T., Iwagami, N., Ohtsuki, S., Takagi, M., 2012. Wave signature in the Venus dayside cloud layer at 58–64 km observed by ground-based infrared spectroscopy. *Icarus* 220, 552–560.
- Read, P.L., 2013. The dynamics and circulation of Venus atmosphere, Towards understanding the climate of Venus (ISSI scientific report series, Volume 11), 73–110.
- Smith, M.D., Gierasch, P.J., Schinder, P.J., 1993. Global-scale waves in the Venus atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences* 50, 4080–4096.
- Yamamoto, M., 2001. Blocky markings and planetary-scale waves in the equatorial cloud layer of Venus. *Journal of the Atmospheric Sciences* 58, 365–375.
- Yamamoto, M., 2003. Gravity waves and convection cells resulting from feedback heating of Venus' lower clouds. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 81, 885–892.
- Yamamoto, M., Takahashi, M., 2003. Superrotation and equatorial waves in a T21 Venus-like AGCM. *Geophysical Research Letters* 30, 1449, doi: 10.1029/2003GL016924.
- Yamamoto, M., Takahashi, M., 2006. Superrotation maintained by meridional circulation and waves in a Venus-like AGCM. *Journal of the Atmospheric Sciences* 63, 3296–3314.