

雲解像モデルを用いた金星大気重力波の2次元数値実験

○安藤紘基（京産大）、杉山耕一郎（松江高専）、
小高正嗣（北海道大）、中島健介（九州大）、野口克行（奈良女子大）、
今村剛（東京大）、林祥介（神戸大）

1. 背景

近年、金星大気中の重力波に関する観測が盛んに行われている。人工衛星に搭載された光学機器により、波の水平構造について明らかにされている(e.g. Peralta et al. 2008; Garcia et al. 2009)。また、電波掩蔽観測によって波の鉛直構造や伝播特性についても理解されつつある(e.g. Tellmann et al. 2012; Ando et al. 2015)。しかし、これらの観測は同時に行われておらず同じ波を見ているとは限らない。従って、波の空間構造や3次元的な伝播特性については良くわかっていないというのが現状である。

本研究では、波の励起源である金星雲層中の対流と波の励起・伝播を全て網羅したモデルを構築し、波の構造や伝播特性を明らかにする。金星雲層中では、平均東西流の鉛直シアが存在する中で対流が生じるため、対流セルが経度方向に伸びたものが緯度方向に連なっていると考えられる。故に、この対流によって励起された重力波は緯度-高度断面内を主に伝播すると予想し、本研究ではまず2次元で数値実験を行った。

2. モデルの設定

用いた数値モデルは非静力学モデル `deepconv` (Sugiyama et al. 2009) である。計算水平領域は 500 km、鉛直領域は金星の高度 35–135 km として、水平解像度と鉛直解像度はそれぞれ 200 m、32 m とした。境界条件は上下端にて応力なし、鉛直流・温位フラックスなしとし、側面は周期境界とする。また、上下端からの波の反射を抑えるために、上端から 35 km と下端から 5 km の範囲にレイリー摩擦とニュートン冷却を加えた。数値粘性は $1 \times 10^{-3} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ とした。また、運動の結果として平均流が生成されないように人工的な摩擦を波数0成分に対して加える。初期に与える温度の鉛直分布は、放射対流平衡の下での温度分布 (Ikeda et al. 2010) を用いた (図 1)。この時の静的安定度は、高度 48–54 km で中立、その上下の領域で安定である。放射過程は陽に計算せずに、水平一様かつ時間変化しない熱強制として与え、正味の加熱・冷却の鉛直分布は Ikeda et al. (2010) の計算結果に準ずる。

本計算では、初期に大気は静止しているとした。実際の金星はスーパーローテーション

オンが生じているが、前述のように緯度-高度断面内での重力波の振る舞いを考察することが目的であり、この断面内では風はほとんど吹いていないと見なしても良い(e.g. Hueso et al. 2008)。また本計算では、対流運動を励起するために最大振幅 1 K の温位擾乱を高度 50 km に与え、そこから 15 日間の計算を行った。

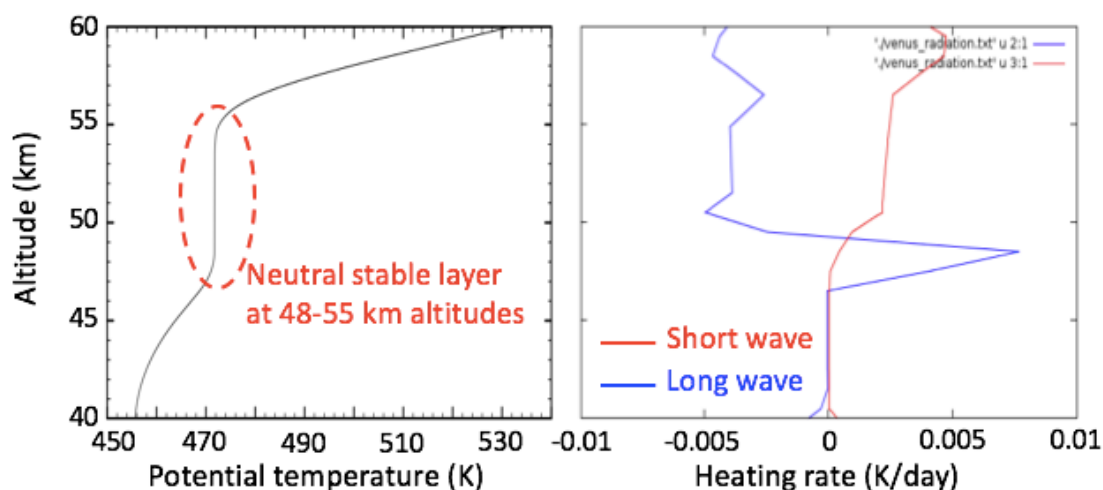


図 1 初期状態での温位と短波・長波放射加熱率の高度分布。

3. 結果と考察

対流セルは、水平方向に 20 km ほどの大きさを持つ。鉛直流の大きさは 3.6 m s^{-1} であり、周期は 10^3 s 程度である(図 2)。これらの特徴は、Imamura et al. (2014)と整合的である。そして、対流層の上には、鉛直伝播する重力波が見えている。その水平-周波数スペクトルと高度-周波数スペクトルを図 3 と図 4 に示した。もっとも卓越する成分の水平波長・鉛直波長・周期は、それぞれ 100 km, 1 km, $2 \times 10^4 \text{ s}$ である。水平波長と周期については、対流層のそれらとは異なっている。また、高度とともにスペクトル密度が減少している様子も見られた。これは、ニュートン冷却や碎波によって重力波の振幅が減少していることを示している。実際、図 5 に示すように、波の碎波に伴うと思しき $10 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 程度の乱流拡散が高度 90 km 周辺で生じている。これは、Ando et al. (2015)の観測結果と整合的である。

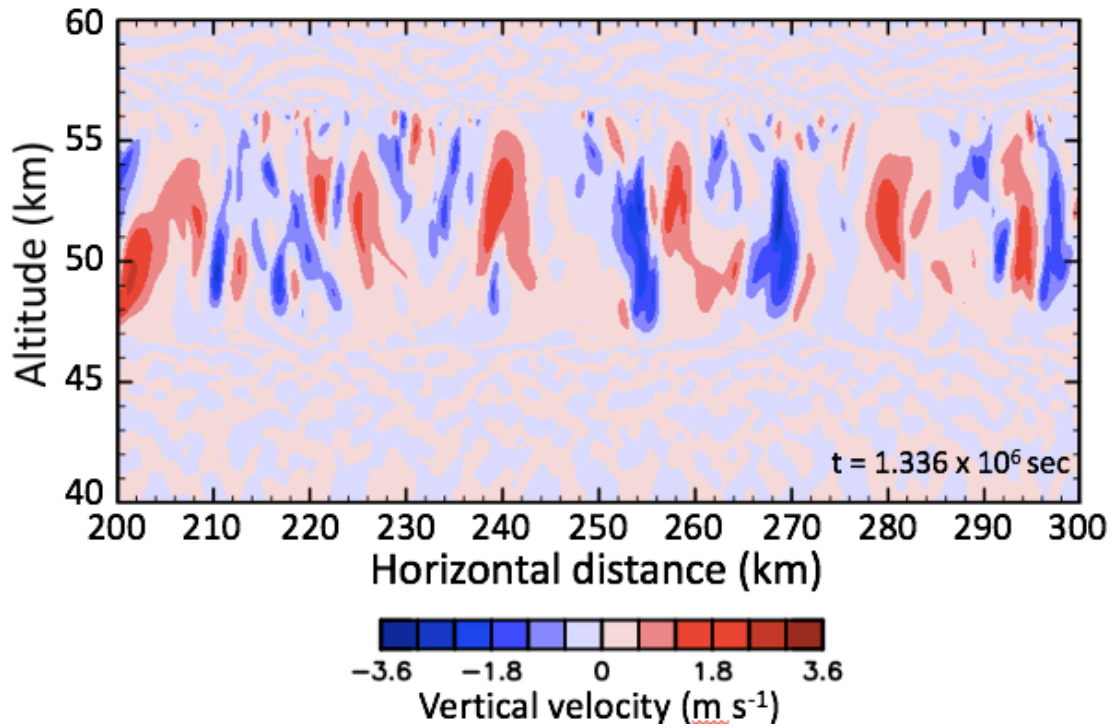


図 2 対流層内における鉛直流の水平分布。水平距離 200-300 km を拡大した。またデータは計算開始から 1.336×10^6 s 経過した時のもの。

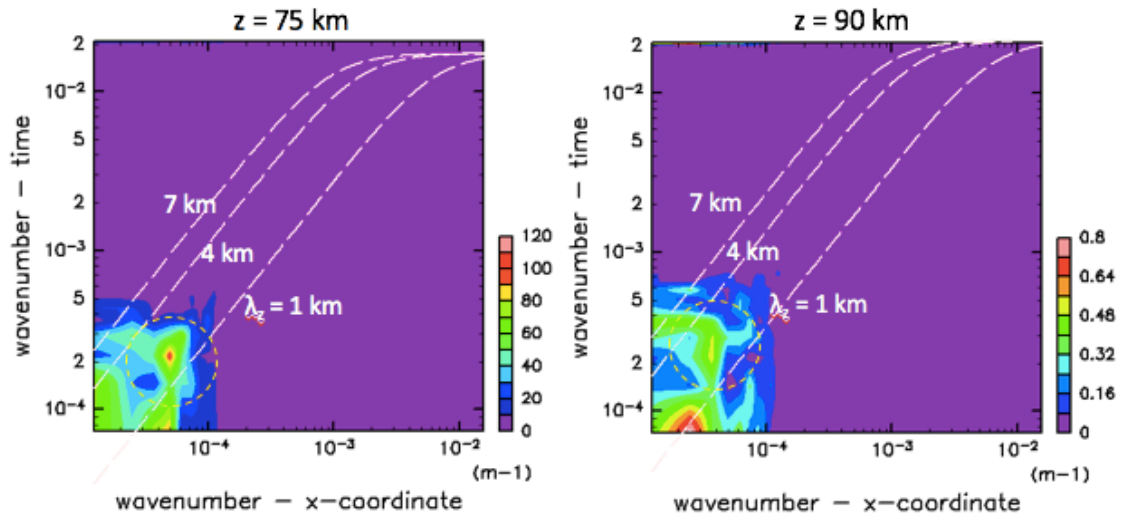


図 3 高度 75 km と 90 km における、重力波に伴う運動エネルギー密度の水平波数-周波数スペクトル。

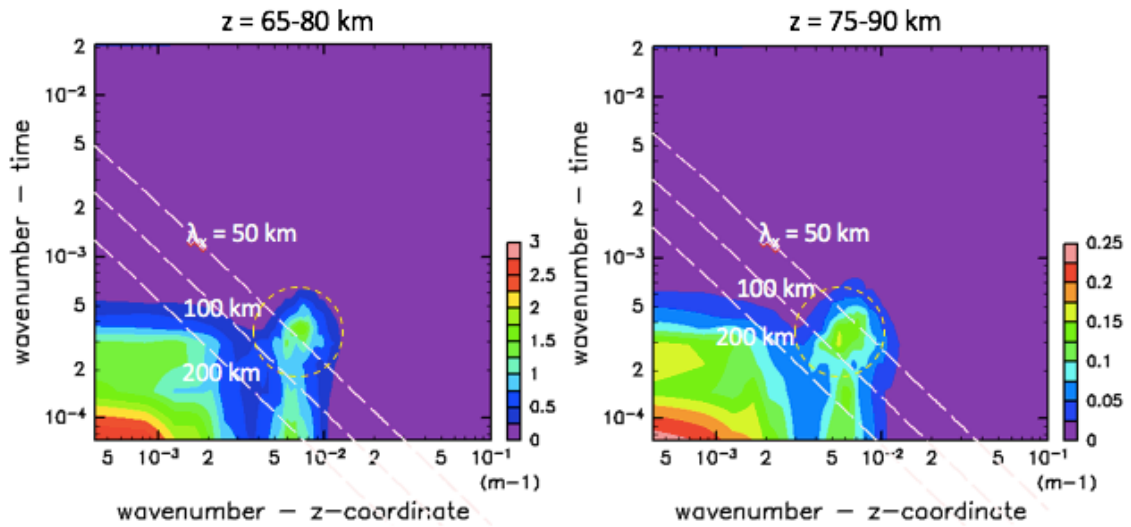


図4 高度 65-80 km と 75-90 km の範囲で計算した、重力波に伴う運動エネルギー密度の鉛直波数-周波数スペクトル。

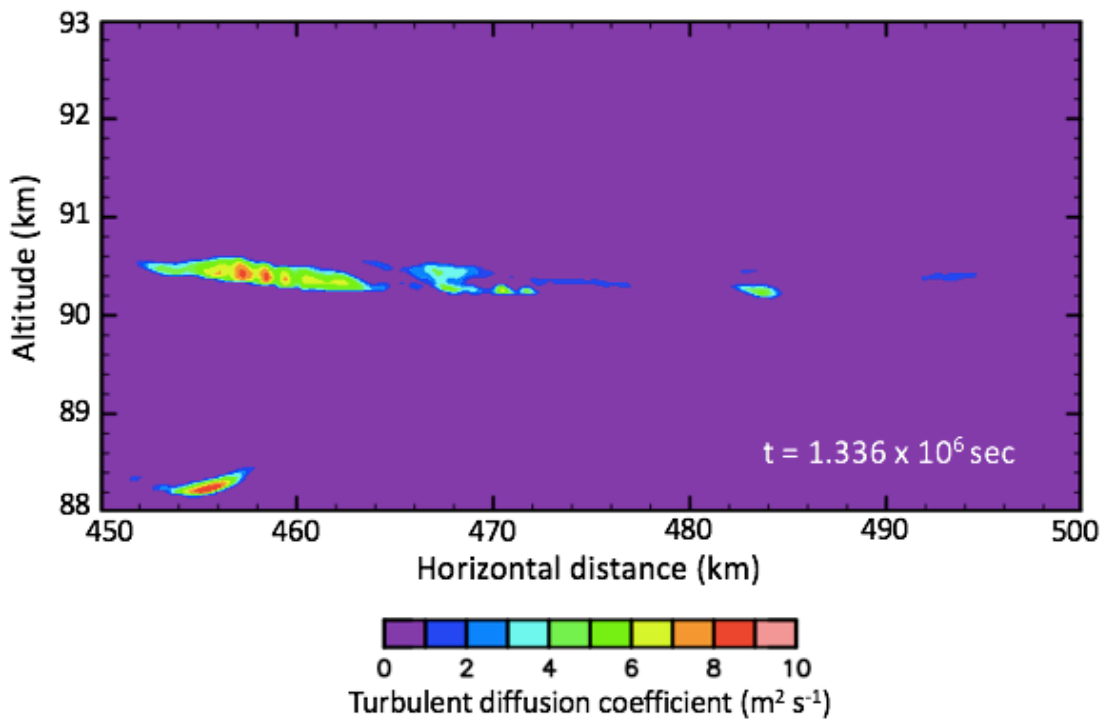


図5 高度 90 km 付近における乱流拡散係数の水平-高度分布。データは計算開始から 1.336×10^6 s 経過した時のもの。

4. まとめ

本モデルで再現された重力波は、対流の挙動も波の伝播も共に良く再現できており、特に重力波は分散関係式に従うことが示された。さらに、高高度では重力波の砕波に伴っていると思われる乱流拡散が生じている様子を見ることができた。これは電波掩蔽観測の結果(Ando et al. 2015)と整合的である。

対流セルの水平スケールは 20km 程度であり、また対流の時間スケールは 10^3 s 程度である。一方、重力波の支配的な水平スケールは 100km 程度、周期は 10^4 s 程度であり、対流の水平・時間スケールとは異なるものが目立つ。この理由については、今後考察する予定である。

また、本研究は 2 次元計算であるが、厳密に言えば実際の金星大気中では重力波は 3 次元的に伝播する。本研究を拡張して、スーパーローテーションに伴う平均流の鉛直シアの影響も考慮したような、重力波の励起と伝播を同時に解くモデルの構築も今後行う。