

金星重力波の2次元数値実験

安藤 紘基 [1]; 杉山 耕一朗 [2]; 小高 正嗣 [3]; 中島 健介 [4]; 今村 剛 [5]; 林 祥介 [6]

[1] ISAS/JAXA; [2] JAXA 宇宙科学研究所; [3] 北大・理・宇宙; [4] 九大・理・地惑; [5] JAXA 宇宙科学研究所; [6] 神戸大・理・地惑

Venusian gravity waves simulated by a two dimensional numerical model

Hiroki Ando[1]; Ko-ichiro Sugiyama[2]; Masatsugu Odaka[3]; Kensuke Nakajima[4]; Takeshi Imamura[5]; Yoshi-Yuki Hayashi[6]

[1] ISAS/JAXA; [2] ISAS/JAXA; [3] CosmoSciences, Hokkaido University; [4] Earth and Planetary Sciences, Kyushu University; [5] ISAS/JAXA; [6] Earth and Planetary Sciences, Kobe University

Recently, gravity waves are often observed by a lot of optical and radio occultation measurements in the Venusian atmosphere. For example, wavy structure having the horizontal wavelength of 60-150 km is observed at the cloud top altitude by UV cameras. However, these optical measurements can observe the atmosphere at the specific altitude, then it is difficult to investigate the vertical propagation characteristic and estimate the momentum flux. On the other hand, the vertical distribution of the temperature fluctuation associated with the wave is obtained from 65 to 90 km altitudes by radio occultation measurements, and its vertical wavenumber spectrum shows that the wave having the vertical wavelength of 5-10 km is predominant. However, small scale gravity waves cannot be detected because of its long distance averaging in the horizontal direction. In addition, horizontal wavelength and phase speed cannot be calculated. Therefore, it is difficult to investigate how gravity waves influence the atmospheric dynamics in the Venusian atmosphere only by observational studies.

In this study, we perform a two-dimensional numerical simulation of the gravity waves, which are generated by the convection in the Venusian cloud layer, to investigate the wave propagation characteristic and calculate the phase speed and acceleration rate. There are some theoretical studies which investigate how gravity waves influence the atmospheric dynamics in the Venusian atmosphere, but they include the empirical wave spectrum based on the observations in the Earth's atmosphere in these models. Imamura et al. (2014) has already investigated theoretically the behavior of the convection in the Venusian atmosphere, but they do not study the characteristic of the waves above 60 km altitude. Therefore, our study is the first one which includes both the generation and propagation of the gravity waves.

We use the semi-compression equations (Klemp and Wilhelmson 1978). The horizontal domain is 0-500 km, and the vertical one is corresponding to 35-135 km in the Venus atmosphere. Top and bottom boundary conditions are that there are no stress, vertical flow and potential temperature fluxes. Side ones are periodic. To prevent the wave reflection, sponge layer is put from 35-40 km altitudes and 100-135 km ones. Initial vertical temperature profiles is that in the radiative-convective equilibrium temperature based on Ikeda et al. (2010), which has a neutral stable layer from 48 to 54 km altitudes and stable ones above and below it. Vertical distribution of the net heating rate is based on Ikeda et al. (2010). It is horizontally uniform and does not change temporally. The atmosphere is rest in the initial stage, and the artificial damping is given to the wavenumber 0 component to prevent generating the mean flow. We give the potential temperature perturbation with the maximum amplitude of 1 K at 50 km altitude randomly to drive the convection and run the calculation for 15 Earth days.

We examined the dependence of the calculation results on the vertical resolution and numerical viscosity by calculating the horizontal spectral densities. Horizontal resolution is fixed to 200 m, and vertical one is set to 16, 32 and 62 m. Numerical viscosity is set to 1×10^{-4} , 3×10^{-4} , 1×10^{-3} , 3×10^{-3} , 1×10^{-2} . As a result, there are little differences of the spectral densities in the case of vertical resolution < 32 m and numerical viscosity $< 3.0 \times 10^{-3}$. Furthermore, we referred to the modeled zonal wavenumber spectrum of the gravity waves constructed in the Earth's meteorology and concluded that the optimal case is vertical resolution = 32 m and numerical viscosity = 1.0×10^{-3} .

大気中の重力波は、その伝播と碎波にともなう熱と運動量の輸送を介して、大規模循環に影響を与えている。近年、金星でも重力波が光学機器や電波掩蔽観測により盛んに観測されている。例えば、前者による観測例として、紫外光カメラの撮像観測により、雲頂(高度 70 km)で水平波長が 60-150 km の重力波が確認されている(e.g. Peralta et al. 2008)。しかしこの観測では、ある特定高度での重力波しか観測できず、波の鉛直伝播特性を考察することや運動量フラックスを見積もることが難しい。一方、後者により高度 65-90 km の範囲で得られた鉛直温度分布から重力波に伴う温度擾乱が検出され、そのスペクトル解析から鉛直波長 5-10 km の波が卓越することが示されている(Ando et al. 2015)。しかしこの観測では水平方向に物理量を積分するので、上記の様な小規模な重力波は捉えられず、また水平波長や水平位相速度について知ることができない。このように、現段階では重力波が金星大気の運動に与える影響を観測のみから理解することは難しい。一方、過去にも重力波が金星大気の運動に及ぼす影響に関する理論研究は行なわれているが、いずれも地球の重力波観測に基づいた経験的なスペクトルをモデルに組み込んでいる。波の励起源となる運動と波の生成、伝播を陽に計算した研究はこれまであまり行なわれていない。

金星大気中を鉛直伝播する重力波の励起源の一つとして、雲層内(高度 50-70 km)に存在すると思われる鉛直対流がある。これまで我々は、金星雲層内の対流運動とそれによる波の励起と伝播を、2次元の数値モデルを用いて調べてきた(安藤他 JGU 2014)。その結果、再現された重力波は分散関係式を良く満たしているが、波の振幅やエネルギー密度がモデルの解像度や数値粘性に強く依存していることが分かった。そこで本発表では、モデルの解像度と数値粘性をさまざまに

変え、それにもなうエネルギースペクトルの形状の変化を調べることにより、鉛直対流起源の重力波の生成と伝播を計算するのに適切な解像度と数値粘性を探索する。

モデル方程式として準圧縮系方程式 (Klemp and Wilhelmson, 1978) を用いる。計算の水平領域は 500 km、鉛直領域は金星の高度 35-135 km とした。境界条件は上・下端にて、応力なし・鉛直流なし・温位フラックスなしとし、側面は周期境界とする。また波の反射を抑えるため、上端から 35 km と下端から 5 km の範囲でそれぞれスポンジ層を設けた。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。この時の静的安定度は、高度 48-54 km で中立層、その上下に安定層を持つように分布している。放射過程は陽に計算せず、水平一様かつ時間変化しない熱強制を与え、正味の放射加熱・冷却の鉛直分布は Ikeda et al. (2010) に準ずる。初期では大気は静止しているとし、波によって平均流が生成しないように人工的な摩擦を波数 0 成分に対して与えている。そして対流運動を駆動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 日分の計算を行う。そしてモデルの水平解像度は 200 m に固定し、鉛直解像度を 16, 32, 62 m と変化させ、また数値粘性も 1×10^{-4} , 3×10^{-4} , 1×10^{-3} , 3×10^{-3} , 1×10^{-2} と変える。

各解像度と数値粘性を与えた計算結果を比較した結果、数値粘性 3.0×10^{-3} 以下、鉛直解像度 32 m 以下の計算では、スペクトル密度の大きさと水平波数に対する依存性はおおむね一致することがわかった。このとき、スペクトル密度は波数領域 $10^{-4} < k < 10^{-3}$ において k^{-2} の傾きをもち、 $10^{-3} < k$ では k^{-3} の傾きを持つ。波数領域 $10^{-4} < k < 10^{-3}$ のスペクトルの傾きは、地球気象で提唱された経験的な重力波の水平波数スペクトルに一致する。以上の結果から、数値粘性 = 1×10^{-3} 、鉛直解像度 = 32 m とすることが、鉛直対流起源の重力波の生成と伝播を計算するのに適切な値であると判断した。本発表では、その結果を示すと共に、今後の展望・研究方針についても論じる。