

修士論文

金星の雲層における対流の数値実験

樋口 武人

東京大学大学院理学系研究科

地球惑星科学専攻

宇宙惑星科学講座

平成 25 年 1 月提出

## 要旨

金星は高度約48–70 kmに存在する濃硫酸の雲に覆われている。この雲は入射する太陽光の約80%を反射し、金星のエネルギー収支において大きな役割を果たしている。この雲層の下部50–55 km付近には中立成層があることが気温計測から知られており、この層は下層大気からの上向き熱放射が雲底で吸収されることにより大気が加熱されるために生じる対流層であると考えられる (Crisp et al., 1990)。対流は雲の中の物質輸送の重要な担い手であり、金星の雲システムを理解する上で重要な物理過程である。

地球と同様に金星においても緯度ごとの放射エネルギー収支はバランスしておらず、低緯度帯では過剰な短波加熱があり、高緯度帯では逆に過剰な放射冷却がある。このエネルギーの不均衡は雲層における対流の構造に影響を与えると考えられる。さらに、雲層高度の大気はスーパーローテーションによって流され、周期的に変化する放射加熱を受けている。したがって、雲層における対流の振る舞いを理解するには対流の緯度依存性と日変化を理解する必要がある。Baker et al. (1998; 2000) は、金星の雲層における対流の数値実験を行い、対流の強度、縦横比、対流層の上下にある安定層にプルームが貫入するなどの特徴的なプロセスを議論した。しかし、対流の緯度依存性や日変化が考慮されていないことと、現実的な放射加熱・冷却が取り入れられていないことが問題点として挙げられる。

本研究では、非静力学気象モデル CReSS (Tsuboki and Sakakibara, 2007) を使って対流モデルを構築し、金星の雲層における対流の緯度依存性と日変化について調べた。長波放射による加熱・冷却は池田 (2010) の一次元放射対流平衡計算で求められた分布を用い、短波放射による加熱はローカルタイムと緯度の関数として扱う。鉛直流の大きさはVega気球観測の結果や混合距離理論からの見積りと整合的であり、モデルがもっともらしい対流強度を再現しているといえる。緯度依存性に関しては、低緯度よりも高緯度で深く強い対流が生じるという結果が得られた。このことは電波掩蔽観測によって示された雲層内の中立成層の領域が高緯度ほど厚いという結果 (Tellmann et al., 2009) と定性的に整合的であり、重力波の振幅が高緯度ほど大きいという結果 (Tellmann et al., 2012) も説明する。また、スーパーローテーションの東西移流効果によって生じる日変化に関しては日中よりも夜間で深く強い対流が生じるという結果となった。このような地球とは逆の緯度とローカルタイムへの依存性は、金星の雲層内の対

流を駆動する下層大気からの長波加熱が緯度やローカルタイムによってほとんど変化しないのに対して、変動の大きな短波加熱が雲層高度の成層を安定化して対流を抑制する働きを持つといった、特殊な対流駆動メカニズムによって生じる。

## **Abstract**

Venus is covered by clouds of sulfuric acid which float in the altitude region from 48 to 70 km. The clouds reflect about 80% of the incident sunlight and play a major role in the energy balance of Venus. A neutral stability layer has been known to exist at around 50-55 km in the middle and lower cloud region; this layer is considered as a region of convection driven by the heating of the cloud base by the upward thermal radiation from the lower atmosphere (Crisp et al., 1990). The convection is thought to play important roles in the transport of cloud-related materials, and thus constitutes an essential part of the cloud system.

On Venus, in a manner analogous to the Earth, energy fluxes of incoming shortwave radiation and outgoing longwave radiation do not balance each other out at each latitude: low latitudes are subjected to excessive shortwave heating, while high latitudes are subjected to excessive longwave cooling. Such energy imbalance should affect the structure of the cloud-level convection. Excessive heating and cooling occur also periodically with the period of the atmospheric super-rotation, because irradiation to a certain cloud-level air changes as it is advected by the super-rotation. Therefore, it is necessary to understand the latitude dependence and the diurnal variation of the structure of cloud-level convection. Baker et al. (1998; 2000) performed numerical experiments of cloud-level convection and studied the characteristics of convection such as the intensity, the aspect ratio and the penetration of plumes to the stable layer located above and below the convective layer. However, the latitude dependence and the diurnal variation were not addressed in their studies, and furthermore, their numerical model drives convection by diffusive heat fluxes from below and realistic radiative heating and cooling distributions were not introduced into the model.

In this study, I constructed a numerical model of Venus's cloud-level convection based on the non-hydrostatic meteorological model CReSS (Tsuboki and Sakakibara, 2007) and studied the latitude dependence and the diurnal variation of cloud-level convection. Longwave heating and cooling are taken from a one-dimensional radiative-convective equilibrium calculation for a globally-averaged condition made by Ikeda (2010), and shortwave heating is given as a function of the local time and the latitude. The magnitude of the vertical velocity is consistent with the Vega balloon measurements and the estimate by the mixing length theory, suggesting that the model

reproduces convection of realistic strength. With respect to the latitude dependence, stronger and deeper convection occurs at high latitudes than at low latitudes. This result might explain the latitudinal tendency revealed by radio occultation observations that neutral stability layer in the cloud tends to be thicker (Tellmann et al., 2009) and gravity wave amplitudes are larger in the high latitude than in the low latitude (Tellmann et al., 2012). With respect to the diurnal variation caused by the advection of cloud-level atmosphere by the super-rotation, strong, deep convection occurs during nighttime rather than daytime. Such dependences on the latitude and the local time, that are opposite to those of the Earth's convection, come from the unique mechanism of Venus's cloud-level convection: shortwave heating of the upper cloud layer suppresses convection, whereas longwave heating of the lower cloud and the longwave cooling of the upper cloud, which drive the cloud-level convection, do not vary much with the local time and the latitude.