

R009-15

A 会場 : 11/24 PM2 (16:05-18:05)

17:35~17:50:00

凝結による木星大気対流の抑制に関する流体力学数値モデル実験

#宮本 彩花¹⁾, 中島 健介²⁾, 杉山 耕一郎³⁾

⁽¹⁾九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻, ⁽²⁾九州大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門, ⁽³⁾松江高専 情報工学科

Hydrodynamic numerical experiments on condensation-inhibited convection in Jupiter's atmosphere

#Iroha Miyamoto¹⁾, Kensuke Nakajima²⁾, Ko-ichiro Sugiyama³⁾

⁽¹⁾Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, ⁽²⁾Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kyushu University, ⁽³⁾Department of Information Engineering, National Institute of Technology, Matsue College

1. Background and Objectives

The abundances and internal distributions of icy materials (hydrogen compounds of oxygen, nitrogen, carbon, sulfur, etc.) in giant planets such as Jupiter provide key information for understanding the formation of gas giants and the evolution of planetary systems. In the atmospheres of giant planets, these icy species condense to form clouds. When their abundance exceeds a certain threshold, convection is inhibited because their molecular weight is larger than that of major components (Guillot, 1995; Leconte et al, 2017). In such cases, convective energy transport is inhibited in the condensation layers, and observational estimation of composition and temperature structures may become more difficult. However, previous studies have mainly employed 1D vertical models, which cannot fully represent convective dynamics. Furthermore, the effects of material transport due to the precipitation of condensates in cloud convection and the associated latent energy transport have not been considered. On the other hand, employing a 2D cloud convection model for Jupiter that includes multiple condensable species and cloud microphysical processes, Sugiyama et al (2014) performed long-term integrations to investigate the spatiotemporal evolution of convection and the mean atmospheric structure. However, they didn't explore conditions where the abundance of condensable species exceed the threshold values for convective inhibition. In this study, we employ their 2D cloud convection model, deepconv, to investigate dynamical and energy transport structures under convection-inhibited conditions focusing on the role of precipitation processes.

2. Numerical Model

The 2D cloud convection model deepconv solves a set of equations based on Klemp and Wilhelmson (1978), coupled with conservation equations for condensable species. Cloud microphysical processes are represented by the warm-rain parameterization of Kessler (1969), and turbulent mixing is parameterized following Klemp and Wilhelmson (1978). The computational domain extends 512 km horizontally and 300 km vertically, with 2 km grid spacing. The bottom boundary is placed at pressure of 30 bar. A radiative cooling of -0.1 K/day, which is approximately one order of magnitude stronger than that for Jupiter's atmosphere, is imposed over the pressure range from 2 bar to 0.1 bar. The initial vertical temperature profile is adiabatic below 0.1 bar and isothermal above. For simplicity, we only consider water vapor as the condensable species, which contributes most strongly to convection inhibition.

3. Preliminary Results

Simulations were performed with water vapor mixing ratios of $1 \times$, $10 \times$, and $40 \times$ the solar composition (Grevesse et al, 2007), each integrated for ~ 1000 days. Fig.1 shows snapshots of vertical velocity, potential temperature deviation from the initial state, cloud mixing ratio, and rain mixing ratio at an active convective phase in the $40 \times$ abundance case. The atmosphere is separated into moist and dry convective layers above and below the condensation level. The regions around the condensation level become up to ~ 20 K colder than the initial state. This cooling results from evaporation of raindrops descending from the upper cloud layers, while upward convective heat transport is inhibited.

4. Future Work

The preliminary results suggest that cloud microphysical processes, neglected in conventional 1D models, can significantly affect atmospheric dynamics and energy transport. We will perform longer integrations to reach statistically steady state. To accelerate the approach to the statistically steady states, we plan to further enhance radiative cooling. Based on such extended experiments, we aim to quantitatively evaluate the contribution of material and energy transport associated with cloud microphysics to the atmospheric structure. Ultimately, we intend to clarify atmospheric dynamics, energy transport, and material cycles also under more realistic thermal forcing conditions.

1. 背景と目的

太陽系の木星をはじめとする巨大惑星における氷物質（酸素、窒素、炭素、硫黄などの水素化物）の存在度および惑星内部での分布は、ガス惑星の形成過程のみならず、惑星系全体の形成進化の推定においても重要な情報である。氷物質は

巨大惑星の表層大気中では凝結して雲を形成する。その存在度が閾値を超えると、その分子量が主成分であるガスの分子量より大きいと、対流が禁止されることが知られている (Guillot, 1995; Leconte et al, 2017)。そのような場合、凝結層において対流によるエネルギー輸送が阻害され、その結果、惑星内部の組成構造や温度構造の観測的推定は困難となる。しかし、過去の研究では鉛直 1 次元モデルが用いられており、運動の効果を十分に考慮できていない可能性がある。さらに、雲対流において必然的に生じる凝結物の落下による物質輸送、およびこれに伴う潜熱のエネルギー輸送の影響が考慮されていない。一方、Sugiyama et al (2014) は、木星大気における複数の凝結成分の雲生成と雲物理過程を含む 2 次元雲対流モデルを開発し、これを長時間積分することにより、対流運動の時空間構造と平均的大気構造を調査した。しかし、同研究では、対流が禁止されるほど凝結成分が極めて多い条件での計算は行われていない。そこで本研究では、杉山らと同じ 2 次元雲対流数値モデル deepconv を使用して、これまで 1 次元モデルでしか考察されてこなかった対流禁止条件における運動・エネルギー輸送構造を、降水過程の役割を含めて明らかにすることを目的とする。

2. 数値モデルの概要

2 次元雲対流モデル deepconv の基礎方程式系は、Klemp and Wilhelmson (1978) と凝結成分の保存の式からなる。雲微物理過程は Kessler (1969) の暖かい雨のパラメタリゼーション、乱流混合過程は Klemp and Wilhelmson (1978) のパラメタリゼーションで表現されている。計算領域は水平 512 km、鉛直 300 km、解像度は 2 km とする。2 - 0.1 bar には -0.1 K/day の放射冷却を与える（実際の木星の値より約 1 桁大きい）。初期の大気の鉛直温度分布は、0.1 bar までは断熱的分布、それ以上の高度は等温とする。また、問題を単純化するために、凝結成分としては対流禁止に最も強く寄与する成分である水蒸気のみを考えた。

3. 予備的な結果

太陽組成 (Grevesse et al, 2007) の 1, 10, 40 倍の水蒸気混合比を与え、それぞれ約 1000 日分積分した。図 1 は水蒸気混合比が太陽組成の 40 倍と非常に多い場合の実験の、対流活動が活発な時刻の鉛直速度、乾燥断熱状態からの温度偏差、雲の混合比、雨の混合比の分布のスナップショットである。水蒸気の凝結高度より上は湿潤対流層、下は乾燥対流層である。また、水蒸気混合比が多い場合、時間経過とともに凝結高度付近の冷却が顕著に進み、水蒸気混合比 40 倍実験においては、乾燥断熱状態と比べて最大約 -20 K 程低温の領域が生じた。これは大気上部の雲から降下する雨滴が蒸発して大気を冷却している一方、下からの対流熱輸送が禁止されているためである。

4. 今後の方針

予備的結果は、従来の 1 次元モデルでは考慮されてこなかった雲微物理過程が、大気の運動構造やエネルギー輸送に一定の影響を及ぼしうることを示唆している。今後は、さらに長時間の計算を行い、統計的定常状態を実現する設定を確立する。積分時間を短縮するために、放射冷却をさらに強めて計算を加速させる予定である。その上で、雲微物理過程による物質・エネルギー輸送が大気構造にどの程度寄与するのかを定量的に評価することを目指す。また、最終的には、より現実的な強さの熱強制条件下における運動構造、エネルギー輸送、および物質循環の特徴を明らかにしたい。

References

- Guillot, T., 1995, Science, 269, 1697.
 Leconte, J., et al., 2017, A&A, 598, A98.
 Sugiyama, K., et al., 2014, Icarus, 71.
 Klemp, J. B., & Wilhelmson, R. B., 1978, J. Atmos. Sci., 35, 1070.
 Kessler, E., 1969, Meteor. Monogr., 10, AMS.
 Grevesse, N., et al., 2007, Space Sci. Rev., 130, 105.

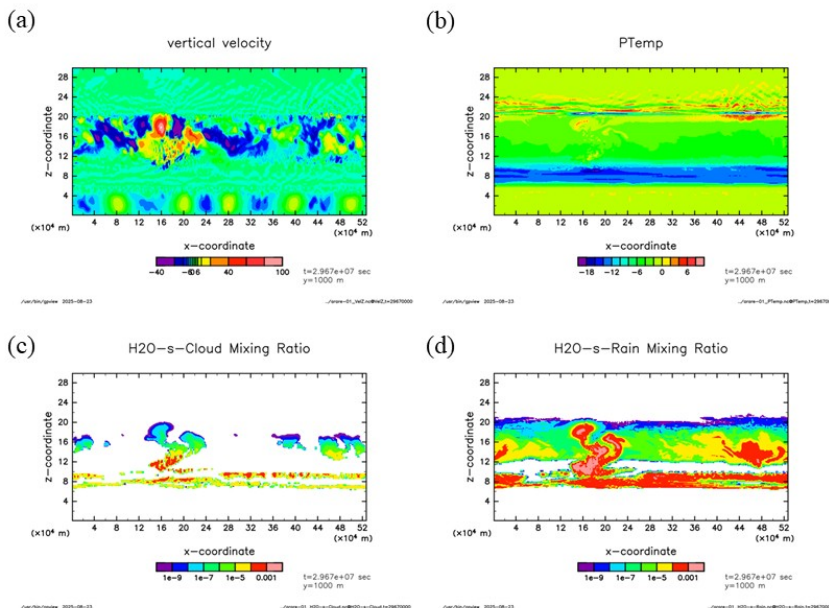


Fig. 1. Snapshots during an active convective phase in the 40 × solar experiment: (a) vertical velocity, (b) potential temperature deviation from the initial state, (c) cloud mixing ratio, and (d) rain mixing ratio.