

超水滴法を用いた金星硫酸雲構造の 形成メカニズムの解明

安 藤 紘 基

要 旨

雲は惑星の大気循環や表層環境を理解する上で不可欠な要素である。金星には分厚い濃硫酸の雲が全球的に存在し、金星の大気循環や表層環境の理解には雲の内部構造（雲粒の粒径分布と各粒径粒子の数密度の緯度・高度依存性）の形成メカニズムの解明が必要である。そのための手法の一つとして、雲微物理過程と大気運動を高速かつ同時に解ける超水滴法がある。本研究では、超水滴法が金星雲粒の成長過程の考察に対して有効かどうか検証する為に、0次元モデルによる試験的な数値実験を実施した。

キーワード：金星，雲物理，超水滴法，0次元モデル，硫酸液滴

1. 研究背景

雲は惑星大気の運動や熱構造を支配する根幹的要素である。地球と異なり、金星には高度 50-70 km にかけて全球を覆う分厚い硫酸の雲が存在している。この雲層は太陽光や下層からの赤外放射を散乱・吸収するため、大気波動・大気循環の励起や金星大気の熱構造に大きな影響を与える。金星における平均的な雲の水平分布については赤外線を利用した光学機器観測によって理解が進んでおり（e.g., Crisp et al., 1991; Cardesin-Moinelo et al., 2018），その成因についても数値モデルによる理論的な研究によって次第に明らかになってきている（e.g., Ando et al., 2020）。一方、雲粒の粒径分布や数密度分布といった雲の鉛直構造は、太陽光や赤外放射に伴う放射輸送過程を通じて計算される加熱・冷却率に直接効く。故に、鉛直構造を知ることとは上記の金星大気の運動や熱構造を根幹から理解する事と等価である。

雲の鉛直構造についての知見は、過去の Pioneer Venus ミッションで為されたプローブによる直接観測の結果がある（e.g., Knollenberg et al., 1980）。それによれば、金星の雲粒は Mode 1, 2, 3 の 3 つに分類されると指摘されている。Mode 1 は粒径が $0.5\ \mu\text{m}$ 以下の凝結核またはモヤだと言われている。Mode 2 は粒径が $0.5\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ の硫酸液滴であり、金星雲層の主要構成物である。Mode 3 は粒径が $2.5\ \mu\text{m}$ 以上の結晶質であると言われているが、単に Mode 2 が巨大化しただけの大きな硫酸液滴であり、Mode 3 については単なる人為的な観測エラーによるものという指摘もある。

このように金星の雲については3モード分布が長年唱えられてきたが、雲の鉛直構造についての知見はこれらの直接観測の結果しかなく、観測領域も赤道周辺に限定されており、時間や場所を問わず常に3モード分布になっているという保証はない。また、3モード分布になるとしても、その成因について全く理解が進んでいない。そこで本研究は、雲粒の粒径や数密度分布の決定要因について、数値モデルを用いて理論的に考察することを目的としている。

2. 研究手法

本研究では、粒径成長や数密度分布を連続的に解く超水滴法を用いる。超水滴法は発達中の積乱雲の数値実験など地球気象で実績がある。ただ、超水滴法を用いた本格的な金星雲の数値シミュレーションを行う前に、まずは超水滴法が金星雲粒の成長過程の数値実験に対して有効かどうか検証する為に、過去の3次元雲モデル研究（Ando et al., 2021）で指摘された Mode 1 から Mode 2 または Mode 3 への成長過程について、0 次元のボックスモデルを用いた数値実験を実施した。Ando et al. (2021) は、雲底付近に捕捉された大規模なケルビン波に伴う気温偏差（ ~ 5 K）によって、雲底付近にある Mode 1 の小さな硫酸液滴が Mode 2 または Mode 3 といった粒径が比較的大きな硫酸液滴に成長する可能性を示唆している。そこで、ボックスモデルの中で Mode 1 粒子・水蒸気・硫酸蒸気が平衡である状態を作っておき、そこから Ando et al. (2021) で指摘された 5 K の気温偏差をボックス内で与えて、粒径がどこまで成長するのか調べた（図 1）。初期の硫酸液滴の半径を一律な値に設定する。そして、液滴の材料である水蒸気と硫酸蒸気の混合比を適当に設定し、5 K の気温偏差を与えることで硫酸液滴への凝結やその蒸発を通じて平衡状態における粒径の大きさを求める。その際、硫酸液滴は全て一様に時間成長すると仮定した。

3. 結果と考察

本実験を通じて得られた結果を図 2 に示す。初期の粒径を $0.3 \mu\text{m}$ とし、過飽和の状態から周囲の温度を 5 K 低下させると、水蒸気や硫酸蒸気の凝結が起こって硫酸液滴が時間と共に成長し $1.2 \mu\text{m}$ 程度まで大きくなることが分かる。この粒径は Mode 2 程度の大きさに相当するため、雲底付近の雲が大気波動に伴う気温擾乱で成長する可能性を示唆する。または、雲層下部で生じている鉛直対流によっても空気塊が移動することで周囲の気温も変化するので、鉛直対流が金星雲層の鉛直構造に寄与する可能性も示唆している。

4. まとめと今後の課題

本研究では、Ando et al. (2021) で指摘された Mode 1 なる小粒径の硫酸液滴から Mode 2 または Mode 3 といった大きな粒径を持つ液滴への成長について、超水滴法を用いた 0 次元ボックスモデルで数値実験を行ったところ、Ando et al. (2021) の予測通り Mode 1 の小液滴が短時間で Mode 2 程度の液滴に成長することが示された。今後は本研究を拡張して、超水滴法を 2 次元（水平 - 鉛直断面）

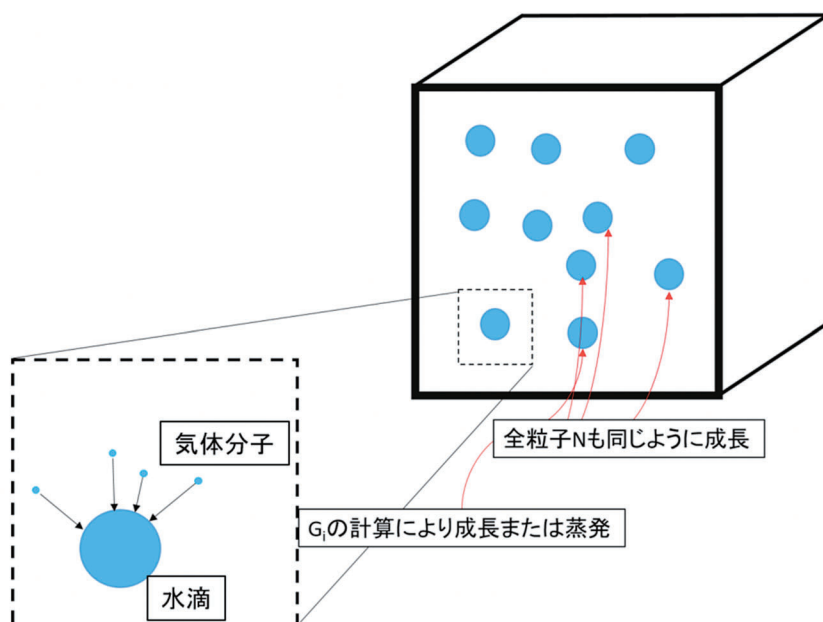


図 1：数値実験の模式図

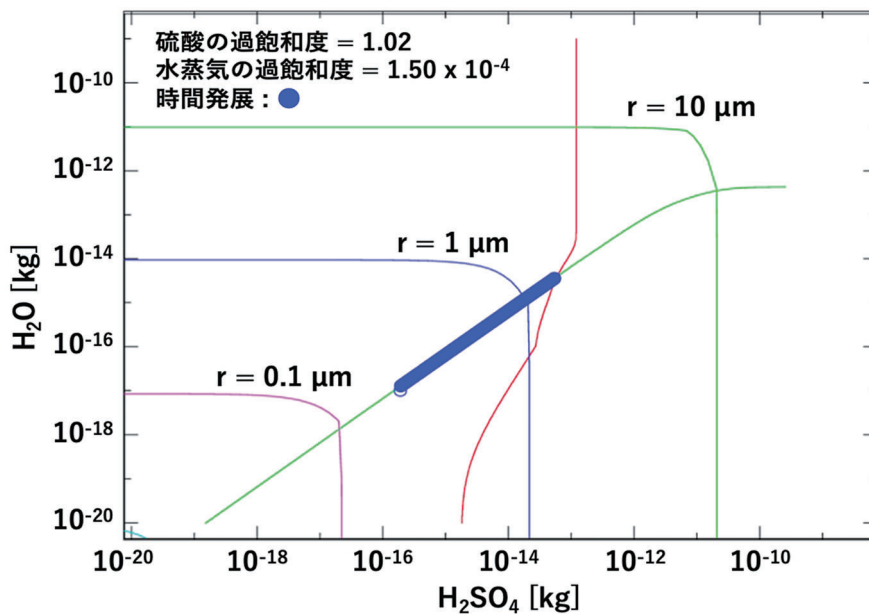


図 2：初期の粒径（半径）と硫酸質量濃度がそれぞれ $0.3 \mu m$ と 95% である Mode 1 の雲粒が、周囲の気温が 5 K 減少して過飽和になった時の成長時間発展の一例。成長後は、粒径（半径）と質量濃度がそれぞれ $1.2 \mu m$ と 93.8% であり、Mode 2 の雲粒として安定に存在できることを示す。

モデルに組み込むことで、対流運動や子午面循環に伴う上昇流または下降流の中での雲粒の成長過程を調べる。また、その時の雲粒の成長や数密度分布についても考察する。これらの研究成果は、NASA の新しい金星探査ミッション DAVINCI (2030 年代に打ち上げ予定) で実施される金星雲の直接観測の結果を解釈する際の、貴重な考察材料になると期待できる。

参考文献

- Ando et al. (2020), Venusian cloud distribution simulated by a general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 125, e2019JE006208.
- Ando et al. (2021), Quasi-periodic variation of the lower equatorial cloud induced by atmospheric waves on Venus, *J. Geophys. Res.*, 126, e2020JE006781.
- Cardesin-Moinelo et al. (2020), Global maps of Venus nightside mean infrared thermal emissions obtained by VIRTIS on Venus Express, *Icarus*, 343, 113683.
- Crisp et al. (1991), Ground-based near-infrared imaging observations of Venus during the Galileo encounter, *Science*, 253 (5027), 1538–1541.
- Knollenberg & Hunten (1980), The microphysics of the clouds of Venus: Results of the Pioneer Venus particle size spectrometer experiment, *J. Geophys. Res.*, 85, 8039–8058.

Formation mechanism of the Venusian cloud structure investigated by Super Droplet Method

Hiroki ANDO

Abstract

Cloud is one of the most essential components when we understand planetary atmospheric circulation and surface environment. There is a thick cloud layer composed of sulfuric acid droplet and surrounding the Venus globally. It is necessary for us to understand the Venusian atmospheric circulation and surface environment by clarifying the mechanism how the internal structure of the cloud layer is formed and maintained. One of the methods to investigate it is super-droplet method, which enables us to simulate rapidly both cloud microphysics and atmospheric dynamics at the same time. In this study, we conducted an experimental numerical simulation using a box model to verify the validity of the super-droplet method for considering the growth process of the Venus cloud particle.

Keywords : Venus, Cloud physics, Super-droplet method, Box model, Sulfuric acid droplet

