

# 二酸化炭素氷雲による古火星気候の温暖化とその安定性

## Warming and its stability of early Martian climate induced by CO<sub>2</sub> ice clouds

○光田千紘(北大・理), 横畠徳太(国立環境研究所), 倉本圭(北大・理)

### 1. 研究背景

地形学的証拠から初期(38億年前)の火星は液体の水が地表面で安定に存在できるほど温暖であったと推測されており, その温暖化メカニズムとして二酸化炭素氷雲による散乱温室効果が広く受け入れられている. この散乱温室効果は雲の粒径や光学的厚さに強く依存するが, ある理想的な雲が起こす強い散乱温室効果は温暖湿潤な気候を再現しうることが従来の研究から示された. しかしながら, そのような理想的な雲が形成及び維持可能であるかについてはあまり議論されていない.

本研究では雲層が放射加熱による雲粒の蒸発及び放射冷却による雲粒成長の促進に着目し, 雲の粒径及び面密度の推定, さらに温室効果の評価を行った.

### 2. モデル

二酸化炭素と各高度で飽和蒸気圧分の水蒸気を混合させた大気を扱う. 放射伝達は二方向近似, 雲層では特に $\delta$ -eddington近似を用いて解く. 雲粒の光学係数は球形粒子を仮定し, 二酸化炭素氷の復素屈折率を与えてミー理論により求めた. 雲粒の大きさ及び面数密度はパラメータとして与え, 粒径分布は無視した.

雲層の放射冷却のエネルギーを算出し, それを二酸化炭素の凝結潜熱と等しいと仮定しすることで雲の質量収支を調べ, 雲層の安定性を評価した.

### 3. 結果と議論

図1. に惑星全体の放射平衡と, 雲層の質量収支が釣り合う(ここでは凝結蒸発平衡と

呼ぶ)パラメータを図示した. このとき, 二酸化炭素の凝結潜熱と粒径の間には負の相関が存在しているため, 系は両平衡を見たすように収束するだろう.

さらにこの収束点は, 雲粒径や地表面温度の擾乱に対しても安定で, 維持可能な雲であると言える. このように雲は気候を温暖化させるだけではなく, その温暖な気候の安定化に寄与していたと考えられる.

このように見積もると, 古火星の温暖湿潤な気候を再現するために必要条件是, 大気圧 1 気圧以上, 凝結核面数密度  $10^{10}\text{m}^{-2}$  程度である事がわかった.

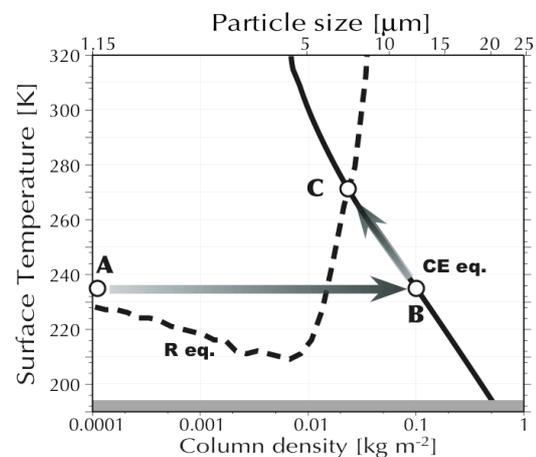


図 1. 各平衡を満たすような粒径-地表面温度. 大気圧 1 気圧, 凝結核面数密度  $10^{10}\text{m}^{-2}$  の場合. 凝結蒸発平衡の時定数は, 放射平衡の時定数よりも数オーダー小さいため, 系はまず粒径を増加させ(A→B), 凝結蒸発平衡を満たし, さらに放射平衡を満たすように粒径を小さくしつつ地表面温度を上昇させ(B→C), 最終的に, この両平衡を満たす値へ収束する.

先の結果を踏まえて地表面温度の推定を行う。地表面温度は先の凝結蒸発平衡に加えて放射平衡を満たすように決まるだろう。例えば図 3 の点 A の系がどう変化するかを考えます。

condensation nuclei is fixed at nearby  $10^{10} \text{ m}^{-2}$ . And a negative feedback mechanism between the particle size change and the radiative cooling rate may stabilize warm climate on early Mars.

The scattering greenhouse effect of CO<sub>2</sub> ice clouds is accepted as a mechanism to make the Martian climate warm enough to support flowing water under a faint young Sun. We construct a 1-D radiative model for the CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O atmosphere and analyze cloud stability on the basis of the numerical estimation of the ice condensation or evaporation rate in a cloud layer. Our numerical analysis suggests that a CO<sub>2</sub> ice cloud layer is stabilized and the global mean surface temperature rises above melting point of H<sub>2</sub>O when the atmospheric pressure is larger than 1 bar and the number column density of cloud

## 日本語要旨 (500 文字以内)

初期の火星はバレーネットワークなどの地形的証拠から液体の水が地表面で安定に存在できるほど温暖湿潤な気候を持っていた可能性が示唆されており、その温暖化メカニズムとして二酸化炭素氷雲の散乱温室効果が提案されている。従来の研究より適切な粒径や光学的厚さをもつ雲が存在すれば、惑星が温暖化する事が示された。しかしながら、そのような適切な雲の存在可能性についてはほとんど議論されていない。本研究では鉛直一次元放射モデルを用い、温暖なCO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O大気における雲の安定性を雲粒の質量収支より検討した。結果、大気圧が1気圧以上の場合、凝結核面数密度が $\sim 10^{10} \text{ m}^{-2}$ であれば雲が安定に存在でき、さらに雲の粒径変化と凝結率の負のフィードバックが温暖な気候を安定化させる可能性を示した。

## 英語要旨 (1200 文字以内)

The scattering greenhouse effect of CO<sub>2</sub> ice clouds is accepted as a mechanism to make the Martian climate warm enough to support flowing water under a faint young Sun. Previous studies have shown that such warm climate is possibly achieved if a cloud layer with suitable ranges of particle size and optical depth is given. However, it has not been examined whether or not such a suitable cloud layer could exist stably in the early Martian atmosphere.

In this study, we construct a 1-D radiative model for the CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O atmosphere and analyze cloud stability on the basis of the numerical estimation of the ice condensation or evaporation rate in a cloud layer. We assume that the latent heat release of CO<sub>2</sub> condensation is balanced with the radiative cooling in cloud layer.

Our numerical analysis suggests that a CO<sub>2</sub> ice cloud layer is stabilized and the global mean surface temperature rises above melting point of H<sub>2</sub>O when the atmospheric pressure is larger than 1 bar and the number column density of cloud condensation nuclei is fixed at nearby  $10^{10} \text{ m}^{-2}$ .