

放射によって調節された二酸化炭素氷雲の散乱温室効果と古火星の温暖化

Scattering greenhouse effect of radiatively adjusted CO₂ ice cloud in a Martian paleoatmosphere

光田 千紘 [1]; 横島 徳太 [2]; 倉本 圭 [1]

Chihiro Mitsuda[1]; Tokuta Yokohata[2]; Kiyoshi Kuramoto[1]

[1] 北大・理・宇宙; [2] 環境研

[1] CosmoSci., Hokkaido Univ.; [2] NIES

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、そのメカニズムとして高圧の CO₂ 大気存在とその対流圏上部に生じる CO₂ 氷雲による散乱温室効果が提案されている (Forget and Pierrehumbert 1997). 従来の研究では、散乱温室効果は雲の 1) 粒径 2) 光学的厚さ 3) 形成高度に依存することが示されている (Pierrehumbert and Erlick, 1998; Mischna et al. 2000). 一方でこれら雲パラメタの物理的制約はほとんどあまり行われていない。

雲パラメタを直接見積もるためには湿潤対流による運動を解く必要があると一般に考えられている。しかし、大気成分が凝結する系では、湿潤対流が励起されない可能性がある。この場合、凝結に消費された CO₂ ガスは周囲からすばやく再供給される。そのためこのような気層の放射冷却は、鉛直移流ではなく主に凝結による潜熱加熱によって解消されるかもしれない。さらに放射冷却によって成長した雲層が正味放射加熱を受ける効果があれば、雲層は自律的に粒径を調節し、放射平衡状態へと収束するだろう。この場合、CO₂ の降雨や降雪なしに雲の構造が決まることになる。

そこで本研究では一次元大気モデルを構築し、放射平衡および CO₂ 気固平衡を同時に満たす雲の鉛直構造とその温室効果の見積りを行った。この目的のために、一次元放射対流平衡モデルに CO₂ 気固平衡を満たすように大気温度と CO₂ 凝結量を調節する凝結蒸発スキームを導入した。この際、CO₂ の過飽和状態は対流ではなく、大気凝結によって速やかに解消されると仮定した。各層で一樣粒径を仮定し、その値は凝結量をパラメタとして与えた凝結核混合比で割って得られる粒子一個あたりの質量から算出した。また雲粒の落下は考えない。放射伝達は雲による多重散乱を考慮した二方向近似を用いて解く。雲の光学係数はミー理論に CO₂ 氷の複素屈折率を与えて求めた。CO₂ 及び H₂O の線吸収は、相関 k 分布法を用いて記述した。さらに、CO₂ と H₂O の連続吸収、CO₂ の圧力励起吸収を別途考慮した。太陽放射には現在の地球平均値の 0.75 倍、大気圧には 0.5-5bar を与えた。

凝結核混合比が 10^8 kg^{-1} 以下の場合、エネルギーの収支が釣り合い、大気構造がそれ以上変化しない平衡解が存在した。例えば、大気圧 2 気圧、凝結核混合比 10^7 kg^{-1} を与えると平衡解では高度 15 - 38 km の範囲に形成された平均粒径 3 μm 、光学的厚さ 1 程度の雲によって 25 K もの強い温室効果がもたらされる。また、初期状態を変えた数値実験を行い、同じ構造へと収束する事を確認した。平衡解への収束は雲がその発達につれてより強い放射加熱を受けるようになり、臨界半径値を超えた雲粒はむしろ蒸発するという負のフィードバックが働くことにより起こる。フィードバックを生じさせる要因は二つある。一つは雲の放射特性の変化である。雲が発達するにつれて雲層内の多重散乱が活発になり、そこでの放射加熱が強まる。もう一つは雲-大気全体の相互作用による。雲の発達につれてより強い散乱温室効果が生じ、地表面温度が上昇することによって、雲はより強い赤外加熱を受けるようになる。

パーセル法を用いた考察から、このような平衡状態にある雲構造は大気の断熱的摂動に対して基本的に安定である。上昇させた気塊中の気体密度は凝結によって周囲のそれと等しくなるが、雲粒は周囲よりも太いため、気塊は周囲よりも重くなり、下降する。ただし、ここでは雲粒は十分に小さく、気体中に浮遊していると仮定した。また雲層下端は雲密度分だけ直下の気層よりも重く、対流不安定である。しかしながら不安定な高度範囲は 1m 程度であり、雲層構造に大きな影響を与えないと考えられる。

一方で凝結核混合比が 10^9 kg^{-1} 以上の場合には平衡解は得られなかった。高い気圧を与えて計算をはじめると 1 μm 程度までしか雲粒が成長せず、強い反温室効果が生じ、地表面温度が CO₂ 凝結温度まで下がっても平衡状態に達しない。この場合、地表面における暴走的な大気の凝結、すなわち大気崩壊が生じると考えられる。

雲の散乱温室効果は大気圧や凝結核混合比に強く依存しており、大気圧 3 気圧以上、凝結核混合比 10^5 - 10^7 kg^{-1} の場合、暗い太陽の下でも地表面温度は H₂O の融点を越える程の強い温室効果が生じる。また地表面温度の強い凝結核混合比依存性を考慮すると、地形学から示唆されている温暖湿潤気候の一時性を説明できるかもしれない。CO₂ 氷雲の散乱温室効果が古火星気候へ与える影響をより詳細に見積もるためには、凝結核の供給消失過程を検討する必要がある。