

二酸化炭素氷雲の温室効果と温暖な古火星気候の間欠性

The greenhouse effect of CO₂ ice cloud and intermittency of warm Martian paleoclimate

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

高クレーター密度地域に残存する流水浸食地形から、火星はおよそ 38 億年前まで温暖湿潤な気候が生じていたと考えられている。ただし、多数のクレーターが残存していることから、地表の風化率は現在の地球と比べて小さく、温暖な気候は一時的ないし間欠的なものであったと推測される。近年、古火星の温暖化メカニズムとして、厚い二酸化炭素大気とその中に形成される氷雲の散乱温室効果が有力視されている。これまでに雲の粒径が 10-20 micron かつ光学的厚さが 1-20 であれば、強い温室効果が生じることが示されてきた。しかし、この機構による温室効果の持続性や間欠性はほとんど調べられていない。われわれはこれまでに凝結層が放射平衡を満たすように氷雲構造が定まるフィードバック調節機構によって、雲粒径の鉛直構造が求まる可能性を指摘してきた。本発表では、この機構によって決定される平衡雲大気構造の凝結核数濃度依存性を示し、さらに雲粒落下による凝結核数濃度減少効果によって温暖な気候状態が自動的に寒冷化する機構を提案する。

構築した数値モデルの概略を以下に示す。一次元放射対流平衡モデルに二酸化炭素気固平衡を満たすように大気温度と二酸化炭素凝結量を調節する凝結蒸発スキームを導入する。この際、二酸化炭素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する。各層で一様粒径を仮定し、その値は凝結量から算出する。ここでは雲粒の落下の影響は無視する。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。雲の光学係数は球形粒子を仮定し、ミー理論に二酸化炭素氷の複素屈折率を与えて求めた。気体の吸収係数は二酸化炭素及び水蒸気の線吸収、二酸化炭素と水蒸気の連続吸収、二酸化炭素の圧力励起吸収を考慮した。古火星大気の標準モデルとして、現在の火星の 75% の平均太陽入射と 2 気圧の二酸化炭素および飽和蒸気圧分の水蒸気を与えた。この大気圧は、与えた太陽入射下で雲粒が即落下すると仮定した場合にもっとも強い温室効果がもたらされる値である。凝結核数濃度は 10^3 - 10^9 kg⁻¹ とした。

凝結核数濃度が 10^3 - 10^8 kg⁻¹ の範囲内では平衡解が存在する。雲なしの放射対流平衡状態から計算を開始すると、凝結層の放射平衡化に要する時間はおよそ 1 日である。これは雲の成長時間の時間スケールに対応する。最終的な平衡状態における地表温度は凝結核数濃度に強く依存し、 10^5 - 10^6 kg⁻¹ ではおよそ 270 K まで上昇するが、 10^8 kg⁻¹ では二酸化炭素の凝固点まで下がる。これは、雲粒径の凝結核数濃度依存性による。単位大気質量あたりの雲の散乱係数は、雲が透明な場合の大気の放射冷却率で決まり、凝結核数濃度にほとんど依らない。雲の光学的厚さは、凝結核数濃度と個々の雲粒の幾何断面積との積で近似的に表現できる。結果的に、凝結核数濃度が大きくなるほど雲粒径が小さくなる。凝結核数濃度が 10^5 - 10^7 kg⁻¹ の場合での臨界雲粒径は 15-5 micron と赤外放射の選択的後方散乱に適したものとなるため、強い温室効果が生じ、地表温度が著しく上昇する。凝結核数濃度がその範囲をはずれると、温室効果は弱まる。さらに凝結核数濃度が 10^8 kg⁻¹ 以上になると、1 micron 程度の粒径へ調節され、太陽放射の反射により、むしろ雲による反温室効果が生じるようになる。

次に、粒径と雲層の厚さをもとに、平衡状態から出発したときに雲粒が重力によって落下して雲層を離脱するのに要する落下時間を見積もる。ここで落下時間は平衡雲層の上端から下端まで通過するのにかかる時間で評価し、落下速度には平衡状態における平均雲粒径を持つ粒子のストークス沈降速度を与えた。落下時間は凝結核数濃度が小さくなるほど短くなる。これは、平衡雲粒径が大きくなったためである。凝結核数濃度が 10^4 kg⁻¹ 以下では雲の落下時間は 0.1 日以下となり、凝結層の放射平衡化時間より短い。この場合、現実的には凝結層が放射平衡状態へ達する前に雲粒が落下し、雲による温室効果は生じないと考えられる。凝結核数濃度が 10^5 - 10^7 kg⁻¹ の場合では、雲粒の落下時間はおよそ 100 日程度である。すなわち凝結核の供給が無い場合には、およそ 100 日で雲粒が落下し、凝結核数濃度が減少すると考えられる。

38 億年前の火星に 2 気圧以上の二酸化炭素大気が存在すれば、氷雲の散乱温室効果によって温暖な気候が説明できる。ただし温室効果の強さは凝結核数濃度に依存する。火山噴火、隕石衝突などによって突発的に凝結核が供給され、気候が温暖化することが考えられる。しかし、凝結核の供給がなくなると雲粒の重力落下によって凝結核数濃度が減少し、気候は寒冷な状態へと戻ると考えられる。古火星では、このような機構で間欠的に温暖な気候がもたらされたのかもしれない。