

二酸化炭素氷雲による初期火星の温暖化：雲面密度変化に対する凝結率の負のフィードバック

Warming of early Mars induced by CO₂ ice clouds: a negative feedback mechanisms for controlling cloud column density

光田 千紘[1]; 横畠 徳太[2]; 倉本 圭[1]

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

[1] 北大・理・地球惑星; [2] 環境研

[1] Earth and Planetary Sci., Hokkaido Univ.; [2] NIES

はじめに:

地形学的証拠から約 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いるが、そのメカニズムについては未だ解明されていない。当時の大気は現在と同様に光化学的に安定な二酸化炭素が大部分を占めていたと考えられる。しかし、火星が厚い二酸化炭素大気を持っていたとしても、当時の暗い太陽の下では二酸化炭素自身の凝結潜熱によって大気上層の温度が上昇し、その結果、雲の放射過程を無視した場合には温室効果が弱まり温暖な気候は再現されないことが指摘されている (Kasting, 1991)。そこで近年注目されているのが、二酸化炭素氷雲による散乱温室効果である (Pierrehumbert and Erlick, 1998)。従来の研究では氷雲による温室効果は大気圧のみならず雲パラメータ (雲粒半径, 雲面密度) に強く依存すること、適切な雲パラメータの場合には温暖湿潤な気候が再現され得ることが示された (Pierrehumbert and Erlick, 1998; Mischna et al, 2002; Yokohata et al, 2002)。しかし、実際にどのようなパラメータ値が実現され得るのかについてはこれまでほとんど調べられていない。そこで本研究では放射伝達計算から雲の凝結フラックスを求め、凝結蒸発平衡の条件を課すことにより雲パラメータの推定を行い、温暖湿潤な気候が再現される大気圧条件を検討した。

モデル:

鉛直一次元放射モデルを用い、大気成分は簡単のため二酸化炭素および水蒸気のみとした。鉛直温度分布は成層圏温度を薄い灰色大気に対する放射平衡解を用いて与えた。対流圏の温度分布は水蒸気の湿潤断熱減率により与えた。大気温度が二酸化炭素の凝結温度を下まわった高度で雲が形成されるものとし、雲層の温度分布は二酸化炭素の湿潤断熱減率に等しいものとしてその飽和蒸気圧曲線から与えた。太陽光度は 38 億年前を想定して現在の 0.75 倍の値とし (Gough, 1981)、地表面-大気系のアルベドは観測値から 0.216 (Kieffer et al, 1977) を与えた。成層圏及び雲下層の非散乱大気層における大気の吸収係数は line-by-line 法で評価し、吸収線パラメータは HITRAN 2000 を用いた。雲層の放射伝達は雲粒の散乱吸収および大気の吸収を考慮し エディントン近似を用いて解いた。雲粒の光学係数は二酸化炭素氷の複素屈折率 (Warren, 1986) を用いてミー理論から求めた。雲層内の気体の吸収係数はバンドモデルの一種であるランダムモデルを用いて評価し、バンドパラメータには Houghton (2002) を適用した。以上の計算から放射による雲層の正味冷却エネルギーを求め、これを凝結フラックスと等しいとした。

結果:

雲の粒径が 7 から 25 μm の場合には面密度と凝結フラックスの大きさの間に負のフィードバックが生じ、ある一定値の周りで面密度の擾乱が抑制される。凝結フラックスは太陽放射、赤外放射による加熱、及び雲の自己冷却を左右する雲温度に依存する。地表面温度が増加すると大気下層からの赤外加熱が強まると同時に雲温度が下がる (CO₂ 凝結高度が上昇する) ために凝結フラックスは減少する。また面密度が増加すると吸収量と射出量はともに増加するが、吸収量の増加が卓越し、凝結フラックスは減少する。7 から 25 μm の粒径を持つ雲が存在した場合、面密度が増加すると放射平衡下の地表面温度は上昇するため、ある程度以上に面密度が大きくなると凝結フラックスは負となる。凝結による粒径の変化を考慮しない場合、凝結フラックスの値が正なら面密度が増加し、負なら逆に減少するため、定常状態を仮定すると面密度は凝結フラックスが 0、すなわち凝結蒸発平衡を満たす値をもつと考えられる。粒径及び面密度はこれまで独立なパラメータとして扱われていたが、凝結蒸発平衡条件の下では依存関係が生じることになる。大気圧 1 気圧で放射対流平衡と凝結蒸発平衡を同時に満たす場合の地表面温度は、上述の粒径範囲を与えた場合およそ 270 K と見積もられた。

大気圧の増加に伴い二つの平衡条件をともに満たす場合の地表面温度は上昇する。面密度を固定して大気圧が増加した場合には凝結フラックスも増加するため、凝結蒸発平衡を満たすように面密度もしくは地表面温度が増加する。後者の場合はいうまでもないが、前者の場合でも面密度の増加によってより強い温室効果が生じ、地表面温度はやはり上昇する。大気圧 1 気圧の場合でも水の凝結点に近い地表面温度が再現可能であることから、温暖湿潤な気候を再現する為に必要な大気圧条件はおよそ 1 気圧以上と評価される。