

学 位 論 文 題 名

Role of CO₂ Condensation
in the Surface Environmental Evolution on Mars

(火星表層環境進化における CO₂凝結の役割)

学位論文内容の要旨

本研究では火星の大気主成分 CO₂ が地表面および大気中で凝結する過程に着目し, 1) 大気-地表面間の CO₂ 交換に対する大気の安定性と, 2) CO₂ 雲の持つ温室効果について理論的に調べた。

現在の火星は平均気温が 210 K 程度の非常に寒冷的な惑星である。しかし様々な地形学的証拠から, 初期(約 38 億年前)の気候は液体の H₂O が安定に存在できるほど温暖で, それ以降も温暖な時期がたびたびあったと推測されている。恒星進化の理論によれば過去の太陽光度は現在値よりも小さかったはずである。しかしそれにも関わらず現在より温暖な気候が繰り返された原因は, 未だ解明されていない。

火星表層環境の重要な特徴として, 大気の主成分である CO₂ が地表面および大気中で凝結しうるものがあげられる。地表面における CO₂ の凝結は極域において生じ, これは現在においても大気量を決める本質的な過程となっている。一方大気中には CO₂ 凝結によって CO₂ 氷からなる雲が形成され, 大気中の放射伝達過程に影響をおよぼす。

極域に CO₂ 氷が存在する場合, 大気圧は極域の地表面温度下での飽和蒸気圧によって決定される。これまでの研究では惑星軌道要素や表層の CO₂ 総量などが変化することにより, 極域の熱平衡状態ひいては大気に分配される CO₂ 量に変化し, 全球的な温暖化ないしは寒冷化が生じると考えられてきた。しかしこうした推測は, 気候モデルに多様な境界条件を与え, それぞれに実現される定常状態を求めることによってなされている。そのため, 気候変動をもたらす大気圧変動が生じる時間スケールについてはほとんど調べられていない。また従来の研究では, 火星古環境が現在とは著しく異なったものであった可能性が十分には考慮されていない。特に温暖期の火星には表面に H₂O が豊富に存在し, 現在とは著しく異なるアルベド分布を持っていた可能性がある。本研究では緯度および高度方向に分解能を持つエネルギー収支モデルを構築し, より多様な境界条件を想定した大気圧の安定性解析に加え, 気候遷移過程の数値シミュレーションを行った。

一方太陽光度が小さい時代に火星が温暖化した機構は近年まで大きな謎とされてきた。しかし最近では、過去に実現したと考えられている高圧の大気中では厚い CO_2 雲層が形成され、これが強い温室効果をもたらしたという理論が広く受け入れられている。しかしこれまでの研究では、雲は放射散乱体として扱われ、放射吸収の効果は無視されている。本研究では放射吸収も取り入れた雲放射モデルを構築し、過去の火星大気の温室効果について調べた。

モデル計算によって得られた主要な結果は以下の通りである。

1) 大気—地表 CO_2 交換に伴う気候変動過程

火星における安定な気候状態は、大気圧を決める機構によって大きく二分できる。一つは CO_2 極冠が存在し、大気圧が極冠表面温度の飽和蒸気圧に保たれる状態 (CO_2 氷緩衝状態)である。これは大気圧が現在値程度の低い値となり、寒冷な気候に対応する。もう 1 つは CO_2 極冠が全て蒸発した状態 (CO_2 氷消失状態)である。表層に CO_2 が十分な量存在すれば、これは大気圧が高く温暖な気候に対応する。

これらの気候状態を不安定化する原因として、地表アルベドの変化が特に重要である。 CO_2 氷消失状態は H_2O 氷に覆われた高アルベド領域が拡大すると不安定化する。これにより大気 CO_2 一方的な凝結が生じて CO_2 氷緩衝状態へと遷移する(「大気崩壊」)。一方 CO_2 氷緩衝状態は CO_2 極冠アルベドが低下することにより不安定化する。これにより CO_2 極冠の一方的な蒸発が生じ、 CO_2 氷消失状態への遷移(「暴走蒸発」)が起こる。

ひとたび大気崩壊および暴走蒸発が生じると、 10^3 年程度と地質学的にはごく短い時間で大気圧の大きな変化をもたらされる。大気崩壊に伴う大気圧の減少量は、 H_2O 氷で覆われた高アルベド域の広がりが多いほど、また太陽光度が小さいほど大きい。約 38 億年前の太陽光度の下では、一度の大気崩壊によって約 10^5 Pa から約 10^3 Pa まで、大気圧が急激に減少した可能性がある。大気崩壊にともって形成される CO_2 極冠の広がり、現在のもの(下限緯度 ~ 85 度)と比べてかなり大きい(70–80 度)。一方暴走蒸発は、約 38 億年前の小さい太陽光度の下でも十分極冠アルベドが低下すれば発生する可能性がある。

H_2O および CO_2 氷のアルベドフィードバック機構を考慮すると、温暖化と寒冷化が繰り返される気候変動のシナリオを構築することができる。温暖な CO_2 氷消失状態の下では全球的な H_2O 循環が活発化するため、 H_2O 氷で覆われた高アルベド域が徐々に拡大するだろう。このような地域が十分に拡大すれば、全球的なアルベド上昇によって大気崩壊が起こり、大気圧の低く寒冷な CO_2 緩衝状態への遷移が起こる。液体 H_2O の存在しない寒冷気候下では、 H_2O は大気を介して惑星上でもっとも寒冷な極域へ運ばれ、 H_2O 露出面積は徐々に縮小するであろう。地表および大気中 H_2O の減少(乾燥化)と相まって

地表ダストが大気中に供給されるようになり、ダストの拡散と堆積によって CO₂ 極冠アルベドの低下がもたらされると考えられる。CO₂ 極冠のアルベドが十分に低下すれば CO₂ 極冠の暴走蒸発が発生し、温暖な CO₂ 氷消失状態への遷移が起こる。現在南半球低緯度域に観測される氷河地形は、過去に H₂O 氷床が拡大したなごりである可能性がある。また CO₂ 極冠を取り巻いて存在する極層状堆積物は、過去における大気崩壊によって形成された CO₂ 極冠の痕跡かも知れない。

2) CO₂ 雲による散乱温室効果

地表気圧が数気圧に達する 38 億年前の CO₂ 大気を想定し、そこで CO₂ 雲が存在する場合の放射伝達過程と雲物理過程について理論解析を行った。放射の射出および吸収量の見積りから、CO₂ 氷からなる雲粒は凝結可能であることが分かった。つまり雲は放射による加熱を受けても蒸発せず、安定に存在可能と考えられる。

雲の面密度は雲層における CO₂ 凝結の生成質量フラックスと雲粒の沈降による消滅質量フラックスとの釣り合いから求めることができる。また雲粒の数密度を仮定すると、雲粒の生成消滅質量フラックスと平均滞在時間を用いてその平均粒径を見積もることができる。雲粒の数密度が地球の巻雲と同程度と仮定した場合、粒径は $\sim 10 \mu\text{m}$ と推算され、この場合の面密度は $\sim 1 \text{ kg m}^{-2}$ となる。

CO₂ 雲による温室効果が最も強いのは雲粒の粒径が $10\text{--}20 \mu\text{m}$ 、雲層の面密度が $\sim 0.1 \text{ kg m}^{-2}$ の場合である。これはこのときに惑星放射が効率的に後方散乱されるためである。しかし面密度が大きい ($\sim 1 \text{ kg m}^{-2}$ 以上) 場合には、雲は粒径によらず日傘効果を持つ。本研究による粒径の見積もりは温室効果をもたらすための必要条件を満たすが、面密度の見積もりは雲がむしろ日傘効果を持つことを示唆する。しかし今回の面密度の見積もりは上限値に相当するため、実際の雲は面密度がもう少し小さく、温室効果をもたらした可能性もある。

学位論文審査の要旨

主査	教授	渡部	重十
副査	助教授	倉本	圭
副査	教授	林	祥介
副査	助教授	橋元	明彦

学位論文題名

Role of CO₂ Condensation in the Surface Environmental Evolution on Mars

(火星表層環境進化における CO₂凝結の役割)

本学位論文は、火星の大気主成分 CO₂ が地表面および大気中で凝結する過程に着目し、(1) 大気-地表面間の CO₂ 交換に対する大気の安定性と、(2) CO₂ 雲の持つ温室効果について理論的に研究したものである。

現在の火星は平均気温が 210 K 程度の非常に寒冷な惑星である。しかし様々な地形学的証拠から、初期(約 38 億年前)の気候は液体の H₂O が安定に存在できるほど温暖で、それ以降も温暖な時期がたびたびあったと推測されている。恒星進化の理論によれば過去の太陽光度は現在値よりも小さかったはずである。しかしそれにも関わらず現在より温暖な気候が繰り返された原因は、未だ解明されていない。

本研究は、放射吸収を取り入れた雲放射モデルと過去の火星大気の温室効果を含む緯度および高度方向に分解能を持つエネルギー収支モデルを構築し、より多様な境界条件を想定した大気圧の安定性解析に加え、気候遷移過程の数値シミュレーションを行った。その結果は、(1)火星における安定な気候状態は、CO₂ 極冠が存在し大気圧が極冠表面温度の飽和蒸気圧に保たれる状態 (CO₂ 氷緩衝状態)と CO₂ 極冠が全て蒸発した状態 (CO₂ 氷消失状態)が存在する。これらの気候状態を不安定化する原因として、地表アルベドの変化が特に重要である。CO₂ 氷消失状態は H₂O 氷に覆われた高アルベド領域が拡大すると不安定化する。これにより大気 CO₂ の一方的な凝結が生じて CO₂ 氷緩衝状態へと遷移する(「大気崩壊」)。一方 CO₂ 氷緩衝状態は CO₂ 極冠アルベドが低下することにより不安定化する。これにより CO₂ 極冠の一方的な蒸発が生じ、CO₂ 氷消失状態への遷移(「暴走蒸発」)が起こる。ひとたび大気崩壊および暴走蒸発が生じると、10³ 年程度と地質学的にはごく短い時間で大気圧の大きな変化がもたらされる。(2)地表気圧が数気圧に達する 38 億年前の CO₂ 大気を想定した CO₂ 雲が存在する場合の放射伝達過程と雲物理過程についての理論解析から CO₂ 氷からなる雲粒は凝結可能である、ことを明らかにしている。

これらの成果は、火星極冠・火星表層・火星大気間の相互作用をモデリングすることにより、その物理過程を初めて詳細に明らかにしたものである。本研究は地球惑星科学分野に大きな貢献をしたものと高く評価できる。

よって、著者は北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。