博 士(理 学) 光 田 千 紘

学 位 論 文 題 名

放射過程によって調節された二酸化炭素氷雲による古火星大気の温室効果

学位論文内容の要旨

研究の背景と目的

本研究では，古火星のような弱い太陽放射フラックス下で，厚い二酸化炭素大気中に形成される二酸化炭素氷雲が大気熱構造へ与える影響と，その結果もたらされる温室効果について理論的に調べた．

地形的証拠から形成当時，およそ 38 億年前の火星は温暖湿潤な気候が生じていたと考えられ，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．散乱温室効果は雲の放射特性を決める雲粒径や柱密度に強く依存することが従来の研究から示されているが，雲パラメタを決める物理は複雑であり，これらの物理的制約はほとんど行われていない．

そこで本研究では，凝結層の放射冷却によって形成された雲が凝結層を放射平衡化し，それ以上雲が形成されないような平衡状態へ自動的に収束するという放射過程による雲パラメタの調節機構を提案し，この過程の実現可能性と，そのときに生じる温室効果を一次元放射対流凝結平衡モデルにより数値的に検討した．さらに，この結果を応用し，古火星が温暖な気候を持つ大気圧および凝結核数濃度条件と，地球型惑星において温暖な気候が生じる可能性のある惑星質量，軌道半径，中心星質量条件を明らかにした．

放射過程による氷雲調節の可能性

凝結核数濃度が 10^5 -10^8 kg^{-1} ではエネルギー収支が釣り合い，大気構造がそれ以上変化しない平衡解が存在した．雲パラメタの収束は，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．この場合での臨界雲粒半径は 3 - 20 μm と小さく，落下による消失の効果は雲構造へ影響を与えない．さらに雲の温室効果により地表面温度が上昇すると雲へより強い熱放射が入射し，雲が蒸発するという雲と地表面温度とのフィードバック効果も働き，大気構造は収束する．凝結核がそれより少ないと，50 μm

を超える大きな雲粒が形成され，雲が平衡状態へ達する前に雲粒が落下する．凝結核がそれ以上多いと，雲粒は赤外放射を消散するほど成長できず，雲による反温室効果が生じるため，地表面温度が二酸化炭素の凝結温度まで下がっても平衡状態へと達しない．この場合，地表面での暴走的な大気の凝結が生じ，大気圧を下げる事で平衡状態へ達すると考えられる．

凝結層の放射平衡化による温室効果

地表面の熱収支は，太陽および赤外放射の入射による加熱と対流による熱輸送による冷却，そして地表面の赤外放射の射出による冷却で決まる．従来の研究では，雲によって太陽及び赤外放射の入射量が増加する温室効果のみが考えられていた．しかし，雲によって凝結層が放射平衡化すれば，対流による熱輸送が少なくてすむため温室効果は強まる．この効果は，雲の温室効果のうちの大部分を担っており，雲の赤外放射後方散乱による温室効果が生じていなくても，地表面温度は二酸化炭素の凝結を無視した場合の値よりも上昇する．

古火星大気への implication

古火星において 3 気圧分の二酸化炭素大気が存在すれば，雲の散乱温室効果によって温暖な気候を説明できる．また現在の地表からの巻き上げによって供給される火星ダストは 1 - 2 オーダの変動が起こることが知られている．その他にも凝結核数濃度は火山噴火，隕石衝突，宇宙線強度変化などにより変化しうるだろう．古火星で凝結核量の変動が生じ，それによって一時的に温暖な気候が繰り返し生じたかもしれない．二酸化炭素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．

液体の水が存在する可能性のある惑星条件

古火星のような惑星質量でかつ大気圧 10 気圧の場合には，温暖な気候が生じる最大軌道半径は 2.9 AU であり，従来の研究で示された晴天大気での 1.3 AU や，散乱温室効果が生じやすい雲を大気中に置いた場合の 2.4 AU と比較しても大きな値となった．これは，従来考えられてこなかった凝結層の放射平衡化による温室効果を考慮したためである．また，様々な惑星質量や中心星スペクトル条件下でも雲による強い温室効果は生じ，Habitable Zone は晴天大気の倍程度である 2.3 - 2.9 AU まで広がる．

学位論文審査の要旨

主　査　教　授　倉　本　　圭

副　査　教　授　渡　部　重　十

副　査　教　授　林　　祥　介（神戸大学大学院理学研究科）

副　査　准教授　阿　部　　豊（東京大学大学院理学系研究科）

学位論文題名

放射過程によって調節された二酸化炭素氷雲による古火星大気の温室効果

著者は，太陽光フラックスの小さな二酸化炭素主成分大気中で形成される二酸化炭素氷雲が大気熱構造に及ぼす役割と，その結果もたらされる温室効果について，数値的理論的に明らかにし，火星をはじめとする二酸化炭素大気を持つ惑星において，地表面で液体の水が安定に存在可能なほどの温暖化が生じるために必要となる太陽光度や大気圧などの条件を導出した．二酸化炭素氷雲による散乱温室効果は，古火星の温暖化機構として有力視されてきたが，温室効果の重要な因子である雲の粒径や光学的厚さの決定機構については，ほとんど明らかにされていない．著者は，雲の生成と二酸化炭素凝結層の正味冷却との負のフィードバックにより，凝結層が放射平衡化するように雲粒径が決まる機構を初めて提案し，その実現可能性と形成された雲による温室効果を数値的に調べた．

従来の研究では，雲によって地表面への放射エネルギーの入射が強まることが氷雲による温室効果の要因されてきた．しかしながら著者は，対流が起こると考えられてきた二酸化炭素凝結層が，雲の形成によって安定成層化し，地表から大気への対流熱輸送が弱まったことによって温室効果が強まるという効果が重要であることを初めて指摘し，その結果として従来の予想よりも強い温室効果が起こりうることを示した．また，温室効果を左右する雲の粒径や柱密度は，凝結核数濃度の関数として求まり，強い温室効果を生じさせるためには，凝結核数濃度が 10^5 - 10^7 kg^{-1} となる必要性があることを示した．

以上を過去の気候変動を示す地形学的証拠の残されている火星へ応用し，古火星の温暖化は 2 気圧の二酸化炭素大気で説明でき，また火山噴火や隕石衝突などによる凝結核の突発的供給と重力落下による消失によって，一時的な温暖化が繰り返し起ったとする，地形学的制約を満たす新しい仮説を提唱した．

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があるものと認める．