

論文審査の結果の要旨

氏名 中村 貴純

現在の火星は希薄な大気を持ち寒冷な気候であることが知られている。しかしながら、マリナー探査機やバイキング探査機による火星探査では、火星の地表面に数多くのアウトフローチャネルやヴァレーネットワークなどの流水関連地形が存在することが明らかになった。このことから過去の火星表層環境は現在とは異なっていたと考えられている。本研究は、火星がとり得る気候状態について比較的単純な気候モデルを用いた解析を行い、火星の気候進化について検討したものである。

惑星の気候状態は、そこに供給されるエネルギー（太陽放射）と放出されるエネルギー（惑星放射）のバランスによって支配されている。火星におけるそのようなエネルギーバランスを論じる上で非常に重要な要素として、大気主成分である二酸化炭素による温室効果が挙げられる。本研究は、大気中の二酸化炭素量をコントロールするメカニズムを理解するために、二酸化炭素を主成分とする大気と、大気と二酸化炭素のやり取りをするリザーバ（極冠・レゴリス）とを組み合わせた二酸化炭素システム（以下では、大気-極冠-レゴリスシステムと呼ぶ）の挙動の解析を行ったものである。大気中の二酸化炭素量は、システム中の総二酸化炭素量がどのように各リザーバに分配されるかによって決定される。二酸化炭素の分配は表層でのエネルギー収支に依存するが、エネルギー収支は二酸化炭素の分配のされ方に影響を受ける。エネルギー収支と物質収支が密接に関連したこのシステムは、火星気候システムの最大の特徴である。

第1章では、まず大気-極冠-レゴリスシステムの一般的な挙動が検討されている。はじめに、気候モデルとして、二酸化炭素の温室効果を考慮した南北1次元エネルギーバランス気候モデルを開発し、年平均日射を与えた場合の解析を行い、現在の日射量のもとではシステム中の総二酸化炭素量によらず2つの安定な気候状態が実現可能であること（多重平衡解の存在）が示される。ひとつは、極冠が存在する状態（現在の火星がこれにあたる）であり、もうひとつは、極冠が存在しないより温暖な気候状態である。しかし、実際の火星は自転軸が傾いているため、地球と同様に日射量の緯度分布が季節変化し、それに応じて極冠の面積も大きく季節変化する。夏に融けきることなく一年中存在する極冠は永久極冠と呼ばれ、冬に形成されるが夏には融けて消滅してしまう極冠は季節極冠と呼ばれる。年平均日射を扱うモデルでは、季節極冠と永久極冠を区別して表現することができない。

第2章では、日射量の季節変化を考慮した時間発展気候モデルを用いた議論が行われる。時間発展モデルにおいては、火星の気候状態として見かけ上4種類の気候状態が存在することが示される。それらは、(i) 永久極冠が存在する状態（永久極冠解）、(ii) 永久極冠は存在しないが季節極冠をもつ状態（季節極冠解）、(iii) 1年を通じて二酸化炭素極冠が形成されない状態（無極冠解）、(iv) どちらか片側の極にだけ永久極冠が存在する状態（片側永久極冠解）、の4つである。しかし、気候状態のシステム中の総二酸化炭素量の変化に対する応答を調べると、永久極冠の存在しない状態

(解(ii)と解(iii))では大気圧が総二酸化炭素量に強く依存して変化するのに対し、それが存在する気候モード(解(i)と解(iv))では、大気圧は総二酸化炭素量によらず一定となることが示された。このことは、火星の気候状態は、永久極冠が存在する状態と、存在しない状態の2つに分類することがより本質的であることを示唆する。

永久極冠が存在する場合、極冠上でのエネルギー収支によって大気圧がコントロールされることが示される。極冠から宇宙空間に放出される惑星放射は、大気の温室効果と地表温度に依存するが、永久極冠上では地表温度は与えられた大気圧での二酸化炭素の凝結温度、温室効果もまた大気圧で決まることから、惑星放射は大気圧で決まることになる。一方、エネルギー収支が釣り合っているときには、惑星放射は極冠への正味の日射と南北熱輸送で低緯度から運び込まれるエネルギーフラックスに等しい。南北熱輸送量は大気圧に関係しているから、結局、日射が与えられると、エネルギー収支が成り立つ大気圧が一意に決まり、それは極冠に取り込まれる二酸化炭素量には第一次近似的にはよらなくなる。

一方、永久極冠が存在しない場合、冬に凝結して極冠を形成した二酸化炭素は、夏にはすべて昇華して大気に戻るため、1年を越えて二酸化炭素が極冠に固定されることはない。結果として大気圧は系が持っている総二酸化炭素量に依存する。

このように極冠の振る舞いによって、大きく性質の異なる複数の気候モードが多重的に出現することが示される一方で、レゴリスへの二酸化炭素吸着によっては、適切な吸着パラメータの範囲では、複数の気候モードは存在しないことが示される。このことから火星の気候システムの挙動を理解する上では、大気と極冠の間における二酸化炭素分配がより重要である可能性が高いことが示唆される。

このような火星気候システムの振る舞いの理解から、永久極冠が存在しない、より高圧で温暖な状態から、永久極冠が存在する低圧で寒冷な状態に遷移する際には、必ず大気の暴走的な凝結を伴った気候ジャンプを経ることが示される。はじめに永久極冠が存在しない状態から出発して、大気-極冠-レゴリス系に含まれる総二酸化炭素量が減少し、大気圧が減少してくる場合、ある大気圧まで減少すると、永久極冠が存在しない状態は消滅し、一気に大気の凝結が進行して永久極冠を持つ状態へと遷移する。これを総二酸化炭素量の減少による気候ジャンプと呼んでいる。

第3章では自転軸傾斜の変化に伴う気候遷移が検討される。火星の自転軸傾斜は大きく変動してきた可能性が知られている。永久極冠が存在する状態から自転軸が傾いていくと、ある傾斜角で永久極冠ありの状態が消滅し、永久極冠なしの状態へと遷移する。逆に、永久極冠がない状態から自転軸が立ってくると、極で受けるエネルギーは減少し、ある永久極冠が消滅したのとは異なる、ある傾斜角で永久極冠を持つ状態に遷移し、大気圧は激減する。これが、自転軸傾斜変動による気候ジャンプである。このように、気候ジャンプは自転軸傾斜角の変動によっても引き起こされる可能性があることが示される。自転軸変動の周期は、表層における総二酸化炭素量の変化の時間スケールに比べて短いと考えられるため、第2章で論じられた総二酸化炭素量の減少に伴う気候ジャンプに比べて、短い時間スケールで容易にくり返し生じる可能性があることが示される。この点において、これら2つの気候ジャンプは異なる性質のものであると結論づけられる。

第4章では、第2章、第3章で論じた気候ジャンプの概念を用いて、火星の大気進化についての検討が行われる。ここでは特に、自転軸傾斜の変動に伴う気候ジャンプについて、天体力学的な自転軸傾斜変動史との比較の上で議論が行われる。それにより、現在の様に永久極冠が存在し、低圧の大気が出現したのは、比較的最近

の出来事であり、火星は長時間にわたってより高圧の大気を持っていた可能性が示唆される。

第5章は全体の要約である

また、Appendix では、火星環境発展史に関するレビュー、火星の表層地下構造に関するレビュー、および、本研究の成果から推測される極冠を中心とした火星環境進化史が述べられている。

このように本研究では、火星大気、極冠、レゴリスの間での二酸化炭素分配に注目した気候モデルの解析によって、火星表層環境が複数の多重平衡状態をとり得ることを示すとともに、その状態間での遷移を詳しく論じたものである。そのことによって火星表層環境が劇的な気候遷移を経験したことが示唆された。特に、現在の環境が火星史を通じてみた場合には、比較的特殊な状態である可能性が示唆された点は重要である。

本論文は全体として田近英一博士との共同研究であるが、論文提出者が主体となって数値モデルの構築、数値実験および結果の解析を行ったものであって、論文提出者の寄与が充分であると判断する。

したがって、博士（理学）を授与できると認める。