

論文の内容の要旨

論文題目 Evolution of the Surface Environment of Mars:
Numerical Studies on the Climate System
(火星の環境進化 — 数値モデルを用いた
気候システムの挙動解析 —)

氏名 中村 貴純

現在の火星はとても寒冷な気候であることが知られている。しかしながら、火星の気候は、その歴史を通じて変化してきた可能性がある。火星の気候変化を理解するうえで、気候状態を決定するメカニズムと、気候の安定性を調べるのが非常に重要である。火星の気候は、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 CO₂ による温室効果が挙げられる。したがって、大気中の CO₂ 量をコントロールするメカニズムを理解することが重要である。そのために、CO₂ を主成分とする大気と、大気と CO₂ 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 CO₂ システム（以下では、大気・極冠・レゴリスシステムと呼ぶ）の挙動の解析が必要である。この場合、大気中の CO₂ 量は、システム中の総 CO₂ 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。CO₂ の分配は表層でのエネルギー収支に依存するが、そもそもエネルギー収支自体が CO₂ 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。

本研究では、まず大気・極冠・レゴリスシステムの一般的な挙動を調べた。はじめに、気候モデルとして、CO₂ 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った。その結果、現在の日射量のもとではシステム中の総 CO₂ 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）が明らかになった。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ふ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。

そこで次に、より現実的な火星環境の挙動に基づいた解析をするために、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を行った。その結果、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種類の定常解が存在することがわかった。それらは、(i) 永久極冠が存在する解（永久極冠解）、(ii) 永久極冠は存在しないが季節極冠をもつ解（季節極冠解）、(iii) 1年を通じてCO₂極冠が形成されない解（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解（片側永久極冠解）、の4つである。しかしながら、気候状態のシステム中の総CO₂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気候モード（解(ii)と解(iii)）では大気圧が総CO₂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CO₂量によらず一定となることが明らかになった（図1）。したがって、実際には、火星の気候状態は2つのモードに分類することがより本質的である。

永久極冠が存在する場合に大気圧が一定値をとることは興味深い特徴であるが、これは永久極冠が大気圧をコントロールしていることを意味している。そのメカニズムは次のように説明可能であることがわかった（図2）。いま、永久極冠上におけるエネルギーの年間収支を考える。放出される惑星放射量は大気の温室効果と地表温度（CO₂の凝結温度）に依存するが、この両者は大気圧によって決まる。そこで、惑星放射は大気圧の関数として実線のように表すことができる（図2）。曲線の傾きには、大気圧変動に対する温室効果変化と地表温度変化の正味の効果が現れている。一方で、入射されるエネルギーは、大気アルベドと南北熱輸送量に依存するため、やはり大気圧の関数として点線のように描かれる（図2）。両者の交点がエネルギーバランスの定常解を表している。このうち、低圧側の解は安定な定常解であるが、高圧側の解は不安定な定常解である。すなわち、永久極冠が存在すると大気圧は図中の■の値のみをとりえる。これが、永久極冠による大気圧制御メカニズムである。極冠の形状(厚さ・面積)を考慮に入れても、この性質はほとんど影響されない。一方、永久極冠の存在しないモードでは、年平均大気圧はシステム中の総CO₂量に依存する（図1）。季節極冠解では、冬に凝結して極冠を形成したCO₂は、夏にはすべて昇華

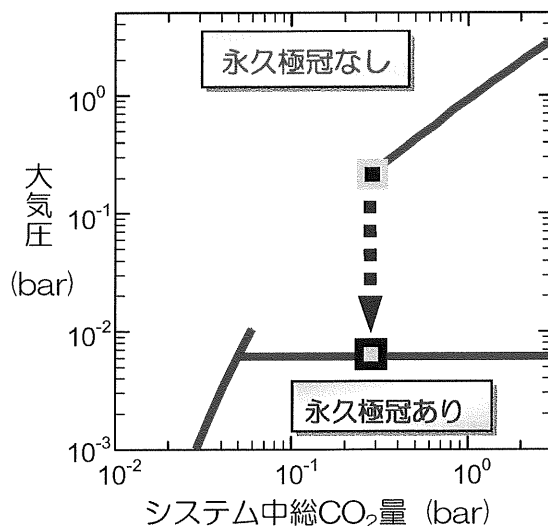


図1：大気圧のシステム中総CO₂量に対する依存性

して大気へと戻ってしまう。そのため、季節極冠は CO₂ を“固定”する役割はもっておらず、1年を越えた大気圧変動に寄与することはない。また、上で述べたような大気圧制御メカニズムも働かない。とくに、無極冠解の場合は1年を通じて CO₂ 極冠が存在しないので、大気圧制御メカニズムが働かないのは明らかである。

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わかる。永久極冠が存在しない状態から大気圧が減少してくると、ある点(図 1,2 の ■)で初めて永久極冠が形成される。この点是不安定な解であるから、少しでも大気圧が減少すると、一気に安定な定常解(図 1,2 の □)へとジャンプする。これが、総 CO₂ 量の減少による気候ジャンプである。

CO₂ 極冠の挙動に注目したとき、火星気候システムの状態が大きく性質の異なる複数のモードに分類できる一方で、レゴリスリザーバの挙動に着目した場合には、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明らかになった。したがって、火星の気候システムの挙動を理解する上では、大気リザーバと極冠リザーバの間における CO₂ 分配がより重要である可能性が高いといえる。

ところで、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。そこで次に、自転軸傾斜角の変化による、火星環境の 10⁵ - 10⁶ 年スケールでの変動についても解析を行った。図 3 に示すように、永久極冠が存在する状態から自転軸が傾いていくと、ある時点で解が消滅し、永久極冠なしの解へと遷移する(赤矢印)。このメカニズムは以下のように説明できる。極冠におけるエネルギーバランス(図 2)を考えたとき、自転軸傾斜が増加するとエネルギー入射を表す点線が上方にシフトする。すると、ある時点で点線は完全に実線の上方に移動してしまい、交点が消滅する。これは、常に昇華が卓越していることを意味する。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、ある時点で永久極冠が形成される。これは不安定な解であるから、安定な定常解に向けてジャンプする(図 3 の青矢印)。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明らかになった。それは比較的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という点で、前述したシステム中の総 CO₂ 量の減少が原因となっ

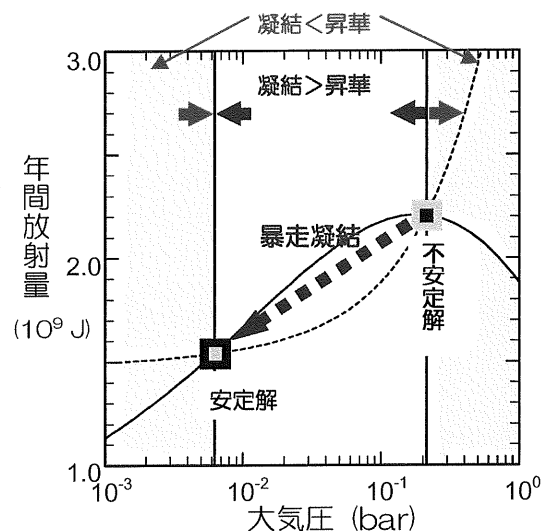


図 2：永久極冠上でのエネルギーバランス。実線がエネルギー支出，点線が収入を表している。

て引き起こされる気候ジャンプとは全く別のものであると言える。これらの解析結果を、天体力学計算によって再現された火星の自転軸傾斜変動の履歴と照らし合わせると、ここ数千万年においては、永久 CO₂ 極冠が存在しない時期のほうが存在する時期よりも長かった可能性が高い。特に、システム中の総 CO₂ 量が数百 mbar 以上ある場合には、ほとんどの期間で永久極冠が存在せず、高圧な環境が持続した可能性がある。この場合、火星における永久 CO₂ 極冠は一過性の現象だと考えられる。

さらに、大気-極冠-レゴリスシステムの挙動解析に基づいて、地質学的時間スケール(10⁸年以上)における火星の気候進化に関する議論を行った。この場合、システム中の総 CO₂ 量や太陽放射量の時間変化を考える必要がある。過去の火星において、永久極冠が存在した場合には、年平均大気圧は太陽放射量によって決まり、総 CO₂ 量によらない。この場合、過去の火星は現在よりも低圧・寒冷な気候状態にあったと考えられる。その後、太陽放射量が増大すると、徐々に大気圧が増加して現在に至る。しかし、かつての火星には、高い大気 CO₂ 分圧によって温暖湿潤な環境が存在していた可能性がある。その場合、温暖な気候状態は永久極冠が存在しない場合でのみ実現される。すると、温暖な気候から寒冷な気候へ遷移する際は、先に述べたように総 CO₂ 量の減少による気候ジャンプを経なくてはならない。実際の火星では、隕石重爆撃期の大気剥ぎ取りやスパッタリングによる大気散逸によって、総 CO₂ 量が減少したと考えられている。気候ジャンプによって形成された極冠中の CO₂ は地下へと輸送され、クラスレート、炭酸塩鉱物、または空隙中の気体ないしは液体という形で現在も存在している可能性がある。

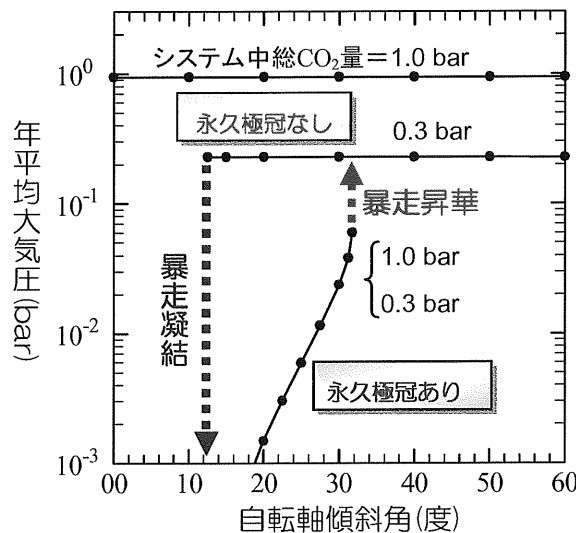


図 3 : 大気圧の自転軸傾斜角依存性