

# 火星気候システムの安定性と進化

中村貴純<sup>1</sup>, 田近 英一<sup>1</sup>

## 1. 火星の気候システムとは

### 1.1 大気-極冠-レゴリスシステム

かつてマリナーやバイキングによる火星探査は、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地形が存在することを明らかにした。このことは、過去の火星表層において定常的な水輸送メカニズムが存在したことを示唆しており、火星の気候状態はかつて温暖湿潤だったのではないかと考えられてきた。そのため、「火星の気候状態はどのような進化をたどったか?」、あるいは「火星においてはどのような気候状態が実現可能なのか?」という問題が人々の興味関心を引きつけ、それらに関する研究が数多く行われてきた。

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。火星の気候システムおよび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、大気中のCO<sub>2</sub>による温室効果がある。CO<sub>2</sub>は、現在だけでなく過去の火星大気の主成分でもあったと考えられている。したがって、火星の気候状態がどのようにして決定され進化してきたかを解明するためには、大気中のCO<sub>2</sub>量をコントロールするメカニズムの理解が重要となる。しかしながら、火星大気中のCO<sub>2</sub>量を左右しうるプロセスはいくつも存在する。たとえば、もし火星環境が温暖かつ湿潤で、地表に液相の水(海または湖)が存在したら、地表鉱物の化学風化とそれにとまう炭酸塩鉱物の沈殿によって大気中のCO<sub>2</sub>はすみやかに除去されてしまうだろう[1]。また、たとえ地表が寒冷な環境にあったとしても、火星史初期

の激しい天体衝突によって大気ははぎ取られてしまう可能性がある[2]。さらに、火星史を通じたスパッタリングによっても大気散逸が生じてきたと考えられる[3]。

一方で、火星の表層システムにおいては、大気以外にもCO<sub>2</sub>極冠[4]とレゴリス[5]という2つのCO<sub>2</sub>リザーバが存在することに着目すべきである[6, 7]。CO<sub>2</sub>極冠は、大気中のCO<sub>2</sub>が凝結することによって形成される。したがって、CO<sub>2</sub>極冠の拡大・縮小によって大気圧が変動する。また、レゴリス層はその間隙にCO<sub>2</sub>分子を物理吸着するため、重要なCO<sub>2</sub>リザーバであると考えられる[5]。CO<sub>2</sub>極冠やレゴリスに蓄えられるCO<sub>2</sub>量は、大気との平衡によって決定され、温度・圧力に依存している。したがって、火星気候システムの安定性や変動を議論するためには、大気・極冠・レゴリスという3つのCO<sub>2</sub>リザーバから構成されるシステム(以下では「大気-極冠-レゴリスシステム」と呼ぶ)の挙動を理解することが重要である[7]。

### 1.2 年平均モデルを用いた議論

このような観点から、我々は火星の気候システムの安定性や進化に関する研究を行ってきた[7, 9]。まずはじめに、気候モデルとしてCO<sub>2</sub>の温室効果を考慮した南北1次元エネルギーバランスモデルを開発し、年平均日射を与えた場合の大気-極冠-レゴリスシステムの挙動の解析を行った[7]。その結果、現在の日射量のもとではシステム中の総CO<sub>2</sub>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[7]。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

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

冠が存在しない、より温暖な気候状態である。さらに、もし過去の火星が極冠の存在しない温暖な気候状態にあったならば、現在の気候状態へ進化するためには大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量は減少しなければならず、その場合、進化のある時点で大規模かつ急激な気候変動が起こらなければならないことを明らかにした[7]。このような大規模気候変動を「気候ジャンプ」と呼ぶことにする。この気候ジャンプは、大気圧の急激な減少と極冠体積の急激な増大を伴う現象で、Haberleら[6]が指摘した「気候崩壊」と本質的に同じものである。同様の議論として、CO<sub>2</sub>極冠のもつアルベドの変化やH<sub>2</sub>O氷床が引き金となり、大規模気候変動が起こる可能性が指摘されている[8]。

ところで、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する。その結果、極冠の面積とともに、アルベドの分布も季節変化する。このことは、火星気候システムにおけるエネルギーバランスに大きな影響を及ぼす可能性が考えられる。そこで、日射量の季節変化を考慮したモデルを用いて、その影響を正しく評価する必要がある[9]。また、日射量の季節変化をもたらす火星の自転軸傾斜は、火星史を通じて非常に大きな変化(0 ~ 60度)をくり返してきたと考えられている[たとえば、10]。自転軸傾斜角の変化は惑星の気候状態に大きな影響を与える。たとえば、AbeとNumaguchi[11]は、自転軸傾斜角の変化が火星表層における水循環にきわめて重要な影響を及ぼす可能性を指摘している。

本研究では、日射量や極冠の季節変化を考慮した南北1次元エネルギーバランスモデルを構築し、自転軸傾斜とその大きさの変化が火星の大気-極冠-レゴリスシステムの挙動と進化にどのように影響するかについて議論する。

## 2. モデル

本研究では、NakamuraとTajika[7]が用いた年平均日射量に対する南北1次元エネルギーバランス気候モ

デル(以下では年平均モデルと呼ぶ)を、自転軸の傾斜にともなう日射量の季節変化を考慮できるように拡張したモデル(以下では季節変化モデルと呼ぶ)を用いる[9]。これは、太陽放射と惑星放射の収支で気候状態が規定されるという惑星気候システムの本質を、単純・理想化して記述したモデルである。このモデルでは、火星においてこれらの放射過程に大きな影響を与える、火星表層における大気と極冠・レゴリス間のCO<sub>2</sub>平衡も考慮した。現時点でよく理解されている範囲での火星気候システムの特徴とその挙動を解析する目的において、有用なモデルあると考えられる。具体的には、各緯度帯ごとに以下のようなエネルギー方程式を考える。

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = D \nabla^2 T + QS(\phi, t) [1 - a(\phi, \phi_s)] - I(\phi, t) + LM(\phi) \quad (1)$$

ここで、 $t$ は時間、 $C$ は大気と地面を合わせた熱容量、 $T$ は地表温度、 $D$ は南北熱拡散係数、 $Q$ は火星軌道上での太陽定数、 $\phi$ は緯度( $\phi_s$ が極冠の末端に相当)、 $S$ は日射の緯度分布を表す関数、 $a$ は惑星アルベド、 $I$ は惑星放射である。CO<sub>2</sub>極冠は、地表温度 $T$ がCO<sub>2</sub>の凝結温度 $T_{\text{sub}}(P_{\text{air}})$ を下回った場合に形成され、表土よりも高い地表アルベドを持つと仮定する。ここで、 $P_{\text{air}}$ は大気圧である。また、CO<sub>2</sub>極冠上では常に大気との熱力学的平衡が成立するため、CO<sub>2</sub>極冠の表面温度は $T_{\text{sub}}$ に保たれると仮定する。これは、CO<sub>2</sub>の飽和蒸気圧が強い温度依存性を持つため、実際に極冠表面上の温度差が少しでもあると大きな大気圧勾配が生じ、強い熱輸送が起きることを表している。その結果、CO<sub>2</sub>極冠の表面温度はほぼ一定に保たれる。このことは、たとえばトリトンのような、大気主成分が凝結する衛星でも同様である[12]。そのために必要なCO<sub>2</sub>の相変化に伴う潜熱が、右辺第4項の $LM(\phi)$ で表現されている。ここで、 $L$ はCO<sub>2</sub>の単位質量あたりの潜熱、 $M$ は相変化したCO<sub>2</sub>の質量である。

惑星放射 $I$ の大きさはPollackら[1]の鉛直1次元放射対流平衡計算の結果を用いる。彼らのモデルは、CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの温室効果を考慮に入れたものであるが、CO<sub>2</sub>

雲とH<sub>2</sub>O雲の効果は無視されている。H<sub>2</sub>O雲が放射にどのような影響を及ぼすかは難しい問題であるが、本研究で主に扱う寒冷環境では大気中の水蒸気量は少なく、H<sub>2</sub>O雲の及ぼす影響は小さい可能性がある。少なくとも地球の場合には、Pollackらのモデルによる計算結果と観測のずれは大きくない[1]。一方、CO<sub>2</sub>雲はCO<sub>2</sub>大気の挙動を考える上で最も重要な問題の一つである。Kasting[13]は、大気中でのCO<sub>2</sub>凝結の効果を検討した放射対流平衡モデルを用いて、弱い太陽放射と高い大気圧のもとではCO<sub>2</sub>の凝結が起こることを示した。そして、CO<sub>2</sub>の凝結によって大気鉛直温度構造が変化し、地表温度が低下する可能性を示した。ところが最近、CO<sub>2</sub>雲は強力な温室効果を持ち、地表温度をむしろ上昇させる効果を持つ可能性が示された[14]。現時点ではCO<sub>2</sub>雲の光学特性はまだ不明な部分が多いため、CO<sub>2</sub>雲がエネルギーバランスに及ぼす影響はよくわからない。大気中におけるCO<sub>2</sub>の振る舞いが火星気候システムに及ぼす影響は、きちんと考察しなければならない重要なテーマであるが、本研究では簡単のため、CO<sub>2</sub>の大気中での凝結とCO<sub>2</sub>雲の効果は考慮しない。この効果を含めた場合、本研究の結果(とくに数百mbar以上の高圧下での振る舞い)は変わる可能性があることに注意されたい。

さて、大気-極冠-レゴリスシステムでは、3つのリザーバ間でCO<sub>2</sub>が分配される。したがって、極冠の体積またはレゴリス中への吸着量が変化すれば、大気中のCO<sub>2</sub>量は変動することになる。この場合、システム中の総CO<sub>2</sub>量を $P_{total}$ とすれば、火星表層におけるCO<sub>2</sub>量のバランスは、

$$P_{total}=P_{air}+P_{ice}+P_{rego} \quad (2)$$

と表される。ここで、 $P_{ice}$ は極冠中のCO<sub>2</sub>量、 $P_{rego}$ はレゴリス中のCO<sub>2</sub>量である。つまり、大気中のCO<sub>2</sub>量は、システム中の総CO<sub>2</sub>量が各リザーバにどのような割合で分配されるかによって決定される。本研究では、極冠中のCO<sub>2</sub>量はエネルギーバランス(式(1))にしたがって決定される(3.1節参照)。また、レゴリス中に吸着さ

れるCO<sub>2</sub>量は、

$$P_{rego}=K\int_0^{\pi} e^{-T(\phi)/T_0} P_{air}' \cos\phi d\phi \quad (3)$$

として求める[7, 9]。ここで、 $K$ はレゴリスの吸着能力(単位面積あたりの最大吸着量)を表す定数、 $T_0$ と $\gamma$ は、それぞれ吸着量の温度依存性と圧力依存性を定めるパラメータである。 $K$ の値は、レゴリス中に現在含まれているCO<sub>2</sub>量から決めることができる。

ある太陽定数とシステム中の総CO<sub>2</sub>量のもとで、火星の気候状態はエネルギーのバランス(式(1))とCO<sub>2</sub>量のバランス(式(2))を同時に解くことによって求めることができる。

### 3. 火星気候システムの挙動

#### 3.1 残存極冠による大気圧制御メカニズム

大気リザーバと極冠リザーバ間でのCO<sub>2</sub>の分配はエネルギーバランスのみによって決定される。すなわち、大気と極冠におけるCO<sub>2</sub>量の合計が与えられた場合に $P_{air}(t)$ と $P_{ice}(t)$ とが式(1)から決定されることになるので、CO<sub>2</sub>極冠が形成されるか否か、あるいはどのようなCO<sub>2</sub>極冠が形成されるかは、大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量と様々な初期条件及び境界条件に依存して決まる。以下では、1火星年(以下、単に1年)を通じて存在する極冠のことを「残存極冠」、冬に形成されるが夏には消滅してしまう極冠を「季節極冠」と呼ぶことにする。

本研究では様々な条件を用いて数値計算を行い、周期変動を示すまで時間発展させた結果を安定解とする。安定解は、CO<sub>2</sub>極冠のふるまいに注目すると以下の4つに分類することができる(図1): (i) 残存極冠が存在する解(残存極冠解)、(ii) 残存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CO<sub>2</sub>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残存極冠が存在する解(片側残存極冠解)。片側残存極冠解は、南北対称な初期条件を与えた場合には実現されなかったが、初期状態

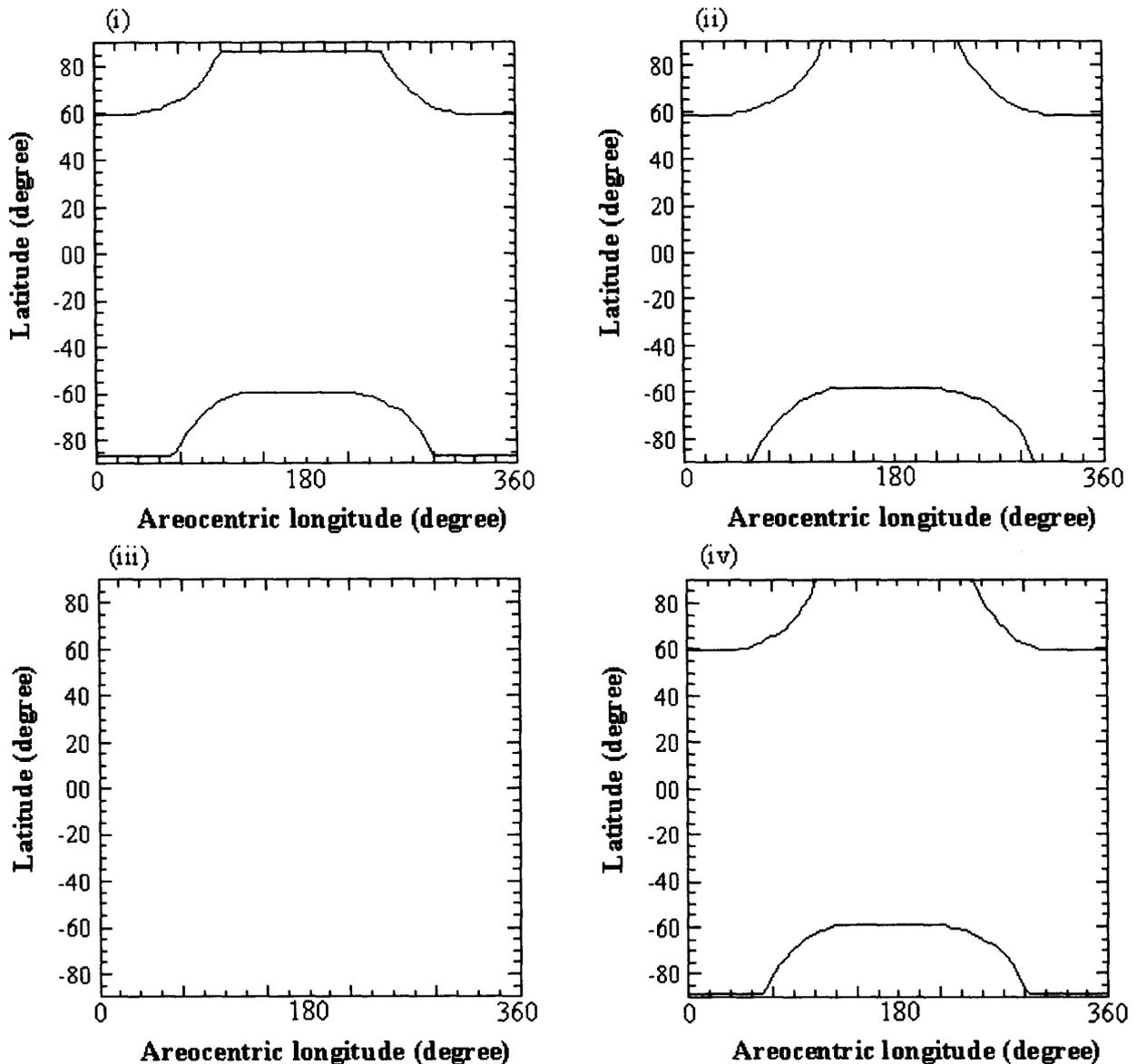


図1: 季節変化モデルから得られた, CO<sub>2</sub>極冠の季節変化. 大きく4つに分類できる. 横軸は火星中心黄経(火星の公転軌道上の位置. 0度が北半球の春分をさす), 縦軸はCO<sub>2</sub>極冠の末端緯度を表す.

で片側残存の平衡解に近い条件を与えた場合に安定な解として得られた. しかしながら, 以下で述べるように, 片側残存極冠解は定性的にも定量的にも残存極冠解ときわめて似た性質を持っている. そこで, 両者は本質的には同様の解であるとみなすことができる.

現在の太陽定数のもとで, それぞれの解が実現される大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量と, そのときの年平均大気圧を図2に示す. 現在のレゴリス中のCO<sub>2</sub>量はまだまだよくわかっておらず不確定性が大きい, ここでは現在50 mbar分のCO<sub>2</sub>がレゴリス中に蓄えら

れている場合を考え, そのような定数 $K (= 0.57)$ を与えたときの結果を示す. 図2の(A)の領域では季節極冠解のみが存在し, (C)の領域では(片側)残存極冠解のみが実現される. ところが, (B)の領域では, 初期状態で(片側)残存極冠が存在する場合には(片側)残存極冠解が, そうでない場合は季節極冠解が実現される. 同様に, (D)の領域でも, 初期条件によって無極冠解または(片側)残存極冠解が実現される. 大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量が等しくても, 条件によって複数の異なる安定解が実現可能であることが



果が強くなるためにCO<sub>2</sub>は昇華しやすくなり、大気圧はますます増加することになる。安定解が存在するためには、温室効果フィードバックよりも凝結温度フィードバックの方が強いことが必要条件である[7]。同じ飽和蒸気圧曲線と温室効果モデルを用いる限り、両者の強弱関係は大気圧のみに依存する。現在のような低い大気圧のもとでは凝結温度フィードバックのほうが強い。それに対し、高圧条件下(数百mbar以上)では温室効果フィードバックのほうが強くなる。

図3は、大気圧の関数としてCO<sub>2</sub>の凝結温度と極における地表温度の2つをプロットしたものである。この図において、曲線の傾きが凝結温度フィードバックと温室効果フィードバックの強さを表す。2本の曲線の交点が、昇華と凝結のバランスによって実現される解である。凝結温度曲線の傾きは地表温度曲線の傾きよりも急なので、この解は安定解である。たとえば、大気圧が何らかの理由で高くなったとする。すると、凝結温度フィードバックが強くなるために凝結量が昇華量に勝り、正味の凝結が起こる。このため大気圧は減少し、もとの状態に戻る。逆に、大気圧が何らかの理由で低くなったとしても、同様の理由によりもとの状態に戻る。これが、残存極冠による大気圧制御メカニズムである。このようなメカニズムが機能しているという点で、残存極冠モードは、年平均モデルにおける部分凍結解[7]に相当するものだと考えられる[9]。

一方、非残存極冠モードでは、年平均大気圧は大気-極冠システム中の総CO<sub>2</sub>量に依存する(図2)。季節極冠解では、冬に凝結して極冠を形成したCO<sub>2</sub>は、夏にはすべて昇華して大気へと戻ってしまう。そのため、季節極冠はCO<sub>2</sub>を”固定”する役割はもっておらず、1年を越えての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CO<sub>2</sub>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。この点で、非残存極冠モードは、年平均モデルにおける無極冠解[7]に相当すると考えられる[9]。

このように、CO<sub>2</sub>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ことがわかった。これに対し、レゴリスリザーバの挙動に着目した場合、これまで考えられている吸着パラメータの範囲[7]では、複数の気候モードは存在しない。すなわち、レゴリスリザーバのサイズは、大気圧の変化に応じて連続的に変化するだけである。したがって、火星の気候システムの挙動を定性的に理解するという意味においては、大気リザーバと極冠リザーバの間におけるCO<sub>2</sub>分配がより重要であると言える。

### 3.2 多重平衡解は存在するのか？

年平均モデルを用いた議論によれば、現在の太陽定数のもとでは、大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量によらず、2つの安定な多重平衡解が存在する[7]。すなわち、現在の状態(部分凍結解)以外に、極冠の存在しない解が実現可能である。しかしながら、季節変化モデルを用いた場合は、現在の状態(残存極冠モード)以外の気候状態(非残存極冠モード)が常に存在するとは限らない。このことは、図2の(C)領域では残存極冠モードしか存在し得ないことからわかる。これは、年平均モデルと季節変化モデルとで大きく異なる結果のひとつである。この違いは、日射量の季節変化の効果によって生じたものである[9]。年平均モデルでは、現在の太陽定数は無極冠状態を維持できるほど十分に大きい。季節変化モデルにおいては日射量が大きく変化し、冬には極域の受ける日射量がゼロになってしまう。したがって、同じ太陽定数のもとでも、季節変化モデルのほうが極冠が形成されやすいということになる。いったん形成された極冠は高いアルベドを持つため、夏の大きい日射量をもってしても完全に融けきることが難しくなる。そのため、季節変化モデルにおいては、現在の太陽定数のもとで常に非残存極冠モードが存在するとは限らない。もちろん、太陽定数が十分に大きければ、季節変化モデルであっても大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量によらず、

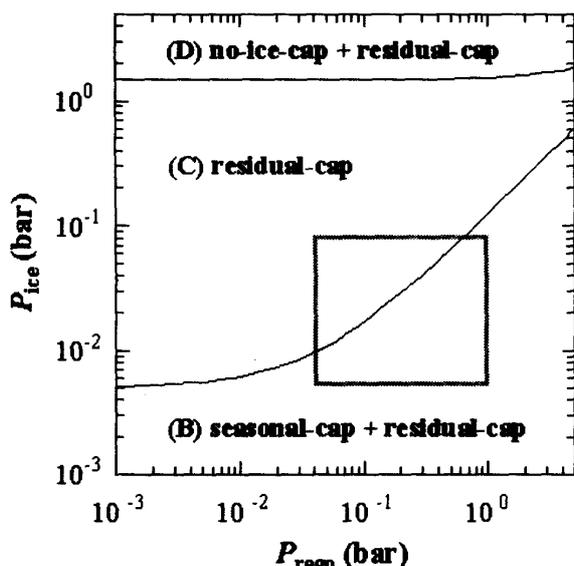


図4: 現在の大気-極冠-レゴリスシステムが多重平衡解を持つための条件。横軸が、現在レゴリス中に吸着されているCO<sub>2</sub>量、縦軸は、現在の極冠CO<sub>2</sub>量を表している。長方形のハッチは、現時点におけるこれらの量の推定範囲[15, 16, 17]。

非残存極冠モードを維持できる[9]。

このように、日射量の季節変化が火星気候システムの挙動に大きな影響をもつことはわかったが、それでは、季節変化モデルにおいてはどのような条件で多重平衡解が存在するのだろうか？現在の火星において、レゴリス中に吸着されているCO<sub>2</sub>の量(定数 $K$ の値)はあまりよくわかっていない。一方で、極冠中に蓄積されているCO<sub>2</sub>の量もはっきりとわかっているわけではない。したがって、現在の大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量の推定値は不確定性が大きい。そこで、現在の $P_{ice}$ と $P_{reg}$ という2つの量を独立変数にとり結果をプロットし直したものが、図4である[9]。現在の $P_{reg}$ を決めることは定数 $K$ の値を決めることに相当し、さらに現在の $P_{ice}$ を定めることによって、大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量が決定される。すると、図4に示したパラメータの範囲では、(片側)残存極冠解と無極冠解が存在可能な領域、(片側)残存極冠解のみが存在可能な領域、(片側)残存極冠解と季節極冠解が存在可能な領域の3つの領域が存在することがわかる。これらは、図2における(D)、(C)、(B)の各領域に相当する。図4には、極冠中のCO<sub>2</sub>量の推定値[15, 16]とレゴリス中のCO<sub>2</sub>量の推定値[16, 17]も示す(長方形の

ハッチ)。すると、現在の火星気候システムにおいて、現在の状態以外に無極冠解が存在できる可能性(D)はほとんどないことが分かる。一方、現在の火星において、季節極冠解も存在可能(B)であることは十分にありえる。しかしながら、現在の $P_{ice}$ と $P_{reg}$ の推定値には非常に大きな不確定性があるため、現在の火星気候システムが多重平衡解をもつか否かは、現時点では結論を出すことができない。

### 3.3 気候ジャンプはくり返す

火星の気候がCO<sub>2</sub>の温室効果によってかつて温暖であったなら、大気中のCO<sub>2</sub>量は現在よりもずっと多かったはずである[1]。しかし、そのためには大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量そのものも現在よりもっと多くなければならないことが、我々の年平均モデルを用いた議論から結論される[7]。すなわち、非常に長い時間スケール(10<sup>8</sup> ~ 10<sup>9</sup>年)での火星気候システムの進化を考える場合、大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量が減少してきた可能性を考える必要がある[7]。総CO<sub>2</sub>量の減少は、化学風化にともなう炭酸塩鉱物の沈殿[1]、巨大衝突現象による大気はぎ取り[2]、スパッタリングによる大気散逸[3]などによって説明することができる。その場合、前述したように、大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量の減少の過程において、気候状態が急激かつ大規模に変化したはずであると推定される[7]。このことは季節変化モデルを用いた議論からも結論することができる[9]。

たとえば、図2において、火星の気候状態がかつては温暖な無極冠解(iii)であったとしよう。そこから、大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量が減少すると、安定解はグラフ上を左向きにシフトする。そして、システム中の総CO<sub>2</sub>量がある臨界値に達すると、無極冠解が消滅するため残存極冠解(i)に落ち込むことになる。この場合の気候ジャンプは、大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量が減少したことにより生じるもので、年平均モデルから得られた結果[7]と本質的に同じものである。

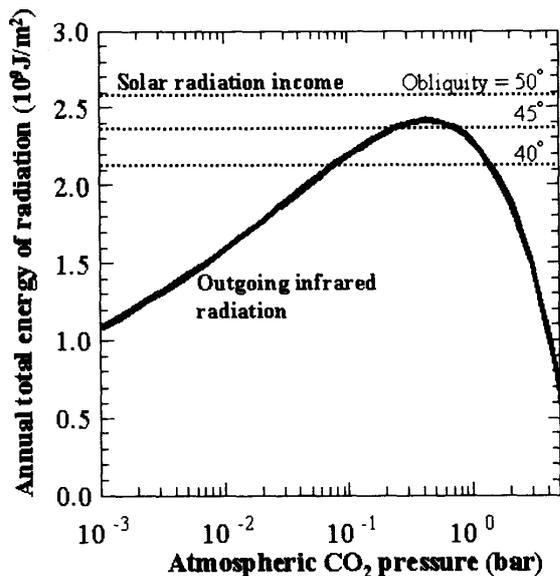


図5：残存極冠(極)における、太陽放射と惑星放射の収支。年間総惑星放射が上限値を持つことに注意。

ところが、これとは別の種類の気候ジャンプも存在する。火星の自転軸傾斜は短い時間スケール(10<sup>5</sup>～10<sup>6</sup>年)で大きく変化してきたと考えられている[たとえば, 10]。その変動幅は0～60度にもおよび、火星の気候状態に影響を与えたことは十分に考えられる。そこで、季節変化モデルを用いて自転軸傾斜角を変化させた場合について検討を行った。その結果、自転軸傾斜角がある角度(現在の太陽定数のもとでは約45度)よりも大きくなると、残存極冠モードが存在できなくなるといったことがわかった。以下ではこの理由について考察するため、極におけるエネルギーバランスについて考える。

CO<sub>2</sub>極冠上から宇宙空間へ放出される惑星放射の量は、 $I(P_{at}) = \epsilon \sigma T_{sub}^4$ と表される。ここで、 $\epsilon$ は射出率(大気圧の減少関数)、 $\sigma$ はステファン-ボルツマン定数、 $T_{sub}$ はCO<sub>2</sub>の凝結温度(大気圧の増加関数)である。したがって、残存極冠からの年間を通じた総惑星放射量は大気圧の関数として一意に決まる。年平均大気圧に対する残存極冠からの年間総惑星放射量は、図5の曲線(実線)のようになる。図5において、残存極冠からの惑星放射には上限値が存在することに注目したい。これは、大気圧が低いときには凝結温度上昇の効果が大きい、大気圧が高くなると射出率減少の

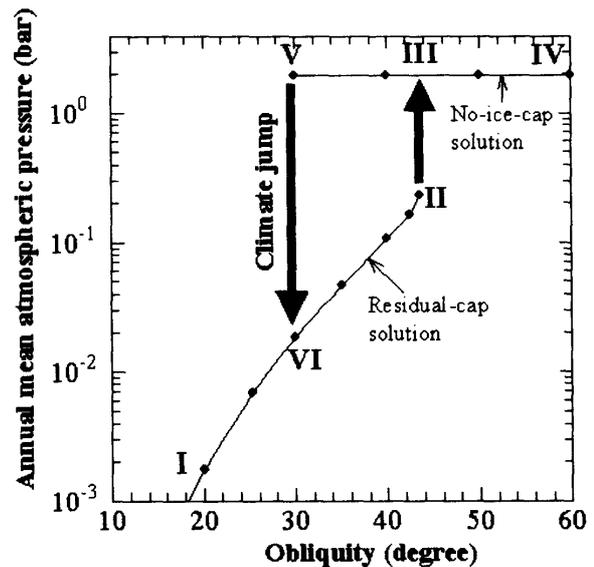


図6：自転軸傾斜角が変化した場合の年平均大気圧の挙動。現在の太陽定数で、大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量が2.0 barの場合。2本の解曲線は途中で途切れており、気候ジャンプがくり返し起こる可能性があることを示唆している。

効果のほうが大きくなることに起因しており、火星大気の射出限界とみなすことができる。図5には、年間を通じて極へ入射する総太陽放射量を、自転軸傾斜角を変えたいくつかの場合について示した(破線)。ただし、太陽定数は現在の値を仮定している。極への年間総太陽放射は自転軸傾斜角とともに増加することが分かる。

極における南北熱輸送が無視できる場合、もし極への年間総太陽放射が残存極冠からの年間総惑星放射の上限値を上回ったなら、両者はバランスすることができなくなってしまう。これは、残存極冠が存在できなくなることを意味する。図5に従えば、残存極冠が存在できなくなる自転軸傾斜角の臨界値はおおよそ45度程度である。この値は、簡単な概念モデルから導かれたものであるにも関わらず、数値計算結果とよく一致している。

このように、自転軸傾斜角の変化は火星の気候状態を大きく左右することがわかった。ここで、現在の太陽定数で大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>量が2.0 barの場合について考察してみる(図6)。図6には“寒冷な”残存極冠解と“温暖な”無極冠解が描かれている。残存極冠解を表す曲線は自転軸傾斜角が大きく

なると途切れ、逆に、無極冠解の曲線は自転軸傾斜角が小さくなると途切れることに注目してほしい。気候ジャンプはこれら2本の曲線の先端で起こると考えられる。

たとえば、いま気候状態が図中のIにあったとしよう。自転軸傾斜角が大きくなると、年平均大気圧はどんどん上昇していき、やがて残存極冠解の先端(II)に到達する。ここでさらに自転軸傾斜角が増加すると、解は無極冠解(III)にジャンプするものと考えられる。この気候ジャンプは急激な大気圧増加を伴うもので、結果として気候の温暖化をもたらす。その後も自転軸傾斜角の増加が続けば、解はやがてIVに達する。逆に、IVからスタートした場合、自転軸傾斜角が減少すると、解はやがて無極冠解の先端(V)に到達する。ここでさらに自転軸傾斜角が減少すると、解は残存極冠解(VI)へとジャンプすることになる。この気候ジャンプは急激な大気圧減少を伴い、気候の寒冷化をもたらす。その後、自転軸傾斜角がさらに減少すれば、解はやがてIに達する。

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わかった。これは、火星の気候進化を考える上で新しい発見といえる。それは比較的短い時間スケール(～10<sup>6</sup>年)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CO<sub>2</sub>量の減少が原因となっ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。

#### 4. さらなる問題点

季節変化を考慮に入れた南北1次元エネルギーバランスモデルを用いた考察によって、火星の気候状態には大きく分けて2つのモードが存在すること、残存極冠の存在によって大気圧が制御される可能性、2つの全く異なる要因による気候ジャンプの可能性、など、火星の気候システムの挙動と進化に関する新しい知見がいくつか得られた。しかし、未解決の問題はまだ多い。たとえば、大気-極冠-レゴリスシステム中の総CO<sub>2</sub>

量が具体的にどのような進化をたどったのかはまだわかっていない。また、CO<sub>2</sub>雲の影響も正しく理解されていない。さらに、過去の火星環境が温暖のみならず湿潤でもあった場合、表層におけるH<sub>2</sub>Oの挙動と、それが気候システムに及ぼす影響を考察することは重要である。火星研究者同士が切磋琢磨することによって火星気候進化の謎が一日でも早く解けることを期待している。

#### 謝辞

本研究を通じて、阿部豊さんには貴重な御意見をいただきました。査読者の方には非常に有益な御指摘・助言をしていただきました。また、編集長の井田茂さんには大変お世話になりました。この場を借りて、御礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] Pollack, J. B. et al., 1987: *Icarus* **71**, 203.
- [2] Melosh, H. J. and Vickery, A. M., 1989: *Nature* **338**, 487.
- [3] Luhmann, J. G. et al., 1992: *Geophys. Res. Lett.* **19**, 2151.
- [4] Leighton, R. B. and Murray, B. C., 1966: *Science* **153**, 136.
- [5] Fanale, F. P. and Cannon, W. A., 1974: *J. Geophys. Res.* **24**, 3397.
- [6] Haberle, R. M. et al., 1994: *Icarus* **109**, 102.
- [7] Nakamura, T. and Tajika, E., 2001: *Earth Planets Space* **53**, 851.
- [8] 横島徳太・倉本圭, 2001: *遊・星・人* **10**, 64.
- [9] Nakamura, T. and Tajika, E., 2001: *J. Geophys. Res.* (submitted).
- [10] Laskar, J. and Robutel, P., 1993: *Nature* **361**, 608.

- [11] Abe, Y. and Numaguchi, A., 2001: LPSC **XXII**, 1551.
- [12] Ingersoll, A. P., 1990: Nature **344**, 315.
- [13] Kasting, J. F., 1991: Icarus **94**, 1.
- [14] Forget, F. and Pierrehumbert, R. T., 1997: Science **278**, 1273.
- [15] Mellon, M. T., 1996: Icarus **124**, 268.
- [16] Fanale, F. P. et al., 1982: Icarus **50**, 381.
- [17] Zent, A. P. and Quinn, R. C., 1995: J. Geophys. Res. **100**, 5341.