

特集「変遷する火星環境」

火星の日射量変動と気候

伊藤孝士^{1, 2}

地球に於ける氷期・間氷期の繰り返しが長い時間スケールでの日射量の変化に駆動されていることは広く知られている。この日射量変化は惑星間の重力相互作用による地球の軌道要素変化と自転軸の運動によって持たられるが、この原理は火星に於いても同様に機能し、火星の大気上端への日射量変動を引き起こしているはずである。地球に於ける日射量変動が氷床の存在を介して気候システムに大きな影響を与えて来たように、火星に於いても日射量変動が氷床（極冠）を介して気候変動を支配している可能性がある。本稿では惑星の公転運動と自転運動が原因する日射量変動研究の現状を概観し、それらが火星の気候研究にとってどのような意味を持ち得るのかを考えてみたい。

1. 惑星の軌道と日射量変動

地球の話から始めよう。現在から遡ること過去約二百万年の時代は第四紀と呼ばれている。第四紀の気候は氷期・間氷期サイクルという周期変動により特徴付けられていると言って良い。氷期とは極域に大きな氷床が存在して全惑星の気候を寒冷たらしめる時期であり、間氷期とは氷床が縮小して気候がやや温暖になる時期である。第四紀に於いては氷期と間氷期が数万年から十万年の時間スケールで交互に訪れ、地球の寒暖を司って来た[1]。この繰り返しを本稿では氷期・間氷期サイクルと呼ぶことにする。第四紀の氷期・間氷期サイクルの存在は19世紀に於いて既に知られていた。その原因については19世紀後半から20世紀前半にかけて J. Adhemar, J. Croll, L. Pilgrim らにより議論され、

地球の軌道要素の変化と自転軸の歳差による極域への日射量の変動が要因しているのではないかという説が形成されて行った[2]。ひどく大雑把な言い方をすれば、極域への日射量が増えれば氷床は縮小し、極域への日射量が減れば氷床は拡大するであろうという予想である。地球上では白い氷床が太陽光を反射してしまうことによりますます気温を下げってしまう効果（「氷床・アルベドフィードバック」と呼ばれる）が働くこともあり、日射量変動と氷床変動の相関可能性はかなり高いと思われていた。

こうした一連の定性的議論を詳細な計算により初めて定量化したのがセルビアの科学者 M. Milankovitch である。Milankovitch は地球へ入射する日射量の緯度分布と季節変化を当時としては驚くべき高精度で計算し、また、当時得られていた最高精度の公転軌道変化理論を用いて日射量の長周期変化を詳しく計算した[3]。Milankovitchの研究の大半は1920年代から1930年代にかけて遂行され、1950年代辺りまでは地質学的なデータを解読するための時間目盛としてその結果を使おうとする地質学者も存在した。当時は現在のように放射性同位元素による精密な年代測定法が確立しておらず、氷期に関連する地質データを解釈する上での年代尺度が Milankovitch の日射量変動の理論計算値くらいしかなかったからである。当時のやり方は地質学的なデータから推測される気候条件の変化を Milankovitch の日射量変動理論計算値と定性的に比較して、データの年代を推算するというものであった。当然予想されるようにこの方法による年代推定の誤差や不確定性は大きい。やがて1960年代になると放射性同位元素による年

1. 大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台天文学データ解析計算センター

2. Lunar & Planetary Laboratory, The University of Arizona

代測定法がその精密さを増して来る。そうなると年代尺度として日射量変動の理論計算値を使う必要はもはやなくなってしまふ。その上に Milankovitch が計算した日射量変動と地質学的なデータの微妙な喰い違いが問題にされたりして、氷期・間氷期サイクルの要因を地球の軌道要素の変動に基づいて議論する風潮はいつの間にか消えかけてしまった[4]。

けれども1970年代から1980年代にかけて海洋底や氷床を掘削した堆積物のサンプルが採取されるようになると、その中に残された気候変動指標の変化が Milankovitch の理論的な日射量変化の周期と良く似ているという報告が続々となされるようになった[5]。気候変動指標とは、例えば海洋底から取得したサンプル中の酸素同位体比の値や浮遊性生物化石の種の構成、あるいは氷床コア中の気泡から得られる二酸化炭素濃度などである[6]。CLIMAP, SPECMAP などという大規模プロジェクトにより得られた海底堆積物の多くから Milankovitch の理論と調和的な周期の気候変動指標が得られたのである。こうした結果は第四紀の氷期・間氷期サイクルが日射量変動に駆動されたものであるという Milankovitch 仮説の正しさを示すものとなった。地球の気候システムを理論的にモデル化する研究も進展し、わずか数%の日射量変動でも氷期・間氷期サイクルのような気候の大変動を十分に持たらし得るといふ主張も強い説得力を持つようになった。こうして氷期・間氷期サイクルの主要因を惑星運動起源の日射量変動に求める考え方は見事に復活して一般に定着し、このような周期的日射量変化はミランコビッチ・サイクル (Milankovitch Cycles) と呼ばれるようになった。近年では第四紀のものに限らず、堆積物に見られる周期的な環境変動の要因を解釈する場合に「これはミランコビッチ・サイクルの反映ではないのか」という可能性を考えることはごく当然となっているように思える。この辺りの事情に関心のある読者は書籍[7,8]にある記事を参照されると良いだろう。

ミランコビッチ・サイクルの原因である地球の軌道要素と自転軸の変化は惑星間に働く重力により支配さ

れる物理過程であり、火星に於いても同様に発生している。惑星の公転・自転運動の長年変化に関する研究は伝統的な天体力学の範疇にあり、膨大な知識と精密な理論体系の蓄積がある。次節ではその一部の概略をざっと眺め、惑星の軌道要素の変動が日射量の変化に至るまでの道筋を駆け足でおさらいしてみたい。

その前に余談として、ミランコビッチ・サイクルに関してよく為される誤解について言及しておこう。それは「ミランコビッチ・サイクルとは第四紀の氷床変動そのものである」という説である。これはまったくの誤りである。ミランコビッチ・サイクルとはあくまで日射量変動の代名詞であり、氷床変動に代表されるような気候変動を指すものではない。日射量変動の周期は天体の公転運動と自転運動の力学から理論的に導かれるものに過ぎず、それらが惑星の気候変動にどのような影響を与えるかについては原理的に関与しない。専門書や学術論文の中でもこの点に関して誤った記述を載せているものが存在するので、読者は十分に注意する必要がある。

2. 軌道要素変動の摂動計算

摂動計算などと書くと仰々しく聞こえるが、要するに私達の目的である惑星への日射量変動計算のためには、万有引力に支配された質点系としての惑星の公転運動、および有限形状を持つ天体の自転軸の運動が計算できれば良い。広く知られているように天体が二個のみの場合、即ち重力二体問題には厳密な解析解(いわゆるケプラー運動)が知られているが、天体が三個以上になるとそれらの運動を表す解析的な解は存在せず、物事は急に複雑になる。太陽系惑星の軌道は楕円であるとしばしば表現されるが、これも「近似的には楕円に近い」というだけの話であり、実際の惑星軌道は互いの重力の影響によって常に揺れ動いており、一定の楕円形状を保っているわけではない。しかし太陽系惑星の運動に於いては太陽重力の影響が他の力に比

べて圧倒的に大きい。太陽重力の大きさを1とすると惑星間の重力相互作用の大きさは最大でも 10^3 程度である。これの意味するところは、太陽系惑星の運動はほぼ太陽重力に支配されており、それに対して惑星間の重力相互作用が微小な摂動として働いているということである。私達は重力二体問題に関してケプラー運動という厳密な解を知っている。従って、重力二体問題からさほど外れてはいない惑星運動の第一近似解としてケプラー運動を採用し、それに対して惑星間の重力相互作用による補正を少しずつ積み重ねて行けば(逐次近似)、最終的にはかなり正確な惑星運動の解を得ることが出来る。このような方法で「解けない問題」の近似解を得る手法は摂動論と呼ばれ、惑星の運動に限らず今や物理学全般で広く使われている概念である。

ところで惑星の軌道要素変動は大雑把に言って二種類に分類される。まず(1)その年その日の楕円軌道の上で惑星が時々刻々と位置を変える運動。いわゆる狭い意味での公転運動であり、強大な太陽重力に起因するものである。この時間スケールは地球であれば一年、火星であれば二年弱である。次は(2)惑星が日々それに沿って公転する軌道自体の形状や方向が変化する運動で、惑星間の重力相互作用が原因している。この現象の時間スケールは長く、一般に数万年から数十万年である。惑星の気候変動に影響を与えられる日射量変動を持たらずものは後者(2)であり、前者(1)に比べて非常にゆっくりとした変化を行う。言葉を変えれば、一公転周期程度では惑星の軌道形状や方向の変化は実に微々たるものだということである。理科年表や天文年刊を見るまでもなく、地球の近日点の位置や離心率の値は昨年も今年も来年もほとんど同じである。地球の近日点が必要な場所から大きく移動するには何千年もの時間が必要となる。この性質に着目し、惑星の運動方程式を公転周期について平均化するというテクニクが存在する。要するに(1)の効果を無視するのだが、これをやると惑星の運動に関与する項の数が激減し、方程式はとても簡単な形になる。こうして得られた方程式を用いて摂動論的に近似解を求めれば、計算量は

非常に少なく済む。この方法論もまた古くから知られており、永年摂動論と呼ばれている。最先端の永年摂動論の精度は非常に高く、惑星の運動方程式を計算機で直接解いた結果(数値積分)とも良い一致を示している[9]。

ちなみにこうした計算結果がどのくらいの期間にわたり有効であるのかという問いに答えるのは簡単なことではない。数百万年や数億年という長期間の惑星運動に関しては計算結果と比較できる観測事実も無いので、具体的に計算結果の有効期間を示すのは難しいのである。けれども、複数の計算方法から得られる結果が数億年以上にわたり良い一致を示すという事実(例えば[10])や、そもそも惑星運動の方程式の解はとても滑らかなので長期にわたり高精度での求解が可能であることなどから、数百万年間程度での惑星の日射量変動計算に関しては特に問題となるような計算誤差は発生しないものと考えて良いだろう。

さて、惑星に入射する日射量変動を計算するには公転軌道の変化を知るだけでは十分でない。例えば地球の場合、自転軸は公転軌道面に対して垂直ではなく約23.4度傾いている。また自転軸は慣性系に対して静止しているわけではなく、公転軌道面の法線のまわりを周期約2万6千年で周回している。これが歳差運動と呼ばれるものである。惑星に入射する日射量の変動はこの自転軸の傾きと歳差運動に大きな影響を受けているので、公転軌道要素に加えて惑星の自転軸の運動を知って初めて惑星への日射量変動を計算できるようになる。惑星の公転運動と同様に、惑星自転軸の歳差運動の周期も惑星の自転周期や公転周期に比べてかなり長いのが普通である。地球の歳差運動の周期2万6千年に対して公転周期は一年、自転周期は一日、という具合である。また、惑星の形状(正確に言えば重力ポテンシャル)は完全に球対称ではないものの、赤道部分が微妙に膨らんだ軸対称の回転楕円体として扱えばかなり良い近似になることがわかっている。従って、軸対称な惑星の自転運動に関する運動方程式を立て、それを公転周期に関して平均して簡略化してしまえば、公転軌

道要素の永年摂動を計算した際と同様にして惑星自転軸の長年変動を計算することが可能になる。

以上のような手続きを踏み、摂動論や数値積分などの解法を駆使して惑星の公転運動と自転運動の時間変化を追うことで、私達は過去や未来の特定の時点に於ける惑星軌道の形状と方向、および自転軸の傾きと方向と知ることが可能になる。それさえわかっしまえば、後は幾何学的な関係によって惑星上の任意の地点に於ける日射量の強さと時間変化を計算することが出来る。1930年代に Milankovitch が行ったのはこのような定量的計算であった。

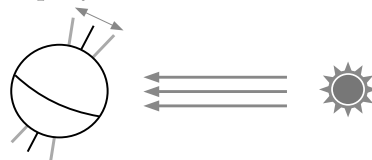
3. 地球と火星の日射量変動

惑星軌道面の形状や自転軸の方向とひと口に言っても、それを表現するのに必要な変数は数多い。しかし長い周期での日射量変動に直接影響するものはさほど多くない。特に重要なものは惑星軌道の離心率、近日点の方向を表す角度（近日点経度）、自転軸の傾きを表す角度（赤道傾角）、それに自転軸の方向を表す角度（ここでは歳差角と呼ぶ）である。これらの量がどのようにして長い時間スケールでの日射量変動に関与するのかを詳細に説明するには長い数式が必要となるが、本稿ではそれを行わずに簡略な定性的説明を試みてみよう。

気候変動を駆動し得る日射量変動は大雑把に言って次の二種類に分類できる（図1）。第一は自転軸の傾き（赤道傾角）の変化による日射量変動で、赤道傾角項と呼ばれる¹。二番目は自転軸の方向（歳差角）と近日点の位置および離心率の変化による日射量変動で、気候的歳差項と呼ばれる。

赤道傾角項の働きは直感的にわかりやすい（図1(a)）。地球の赤道傾角は主として公転軌道面の運動に依存して変化するが、赤道傾角が大きい場合、即ち地球の自転軸が大きく傾いている場合には高緯度の夏の日射量が相対的に大きくなり、低緯度の夏の日射量が相対的に小さくなる。逆に赤道傾角が小さい場合には高緯度

(a) Obliquity term



(b) Climatic precession term

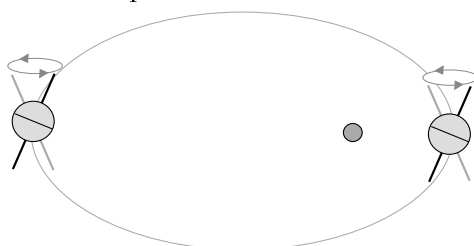


図1：日射量変動に関する赤道傾角項と気候的歳差項の効果の模式図。(a)赤道傾角項(obliquity term)は惑星の自転軸の傾きが時間変化することによる日射量変動の効果であり、(b)気候的歳差項(climatic precession term)は惑星が近日点または遠日点にいる時に自転軸がどの方向を向いているかによる日射量の違いの効果を表す。

の夏の日射量は減り、低緯度では日射量が増える。つまり赤道傾角項は緯度帯毎の日射量のコントラストを変える効果を持つのである。これに対して気候的歳差項は季節のコントラストに影響を与える（図1(b)）。自転軸の歳差により、惑星が最も太陽に近くなる地点（近日点）での自転軸の方向は刻々と移り変わる。もしも或る年に北半球の夏の時点で惑星が近日点にあれば、北半球での夏の日射量は非常に大きくなるであろう。一方、その年の冬は惑星は遠日点にあり、北半球が受ける日射は少なくなる。逆の場合も同様であり、北半球の冬の時点で地球が近日点にあれば北半球での夏の日射量は比較的小さくなるし、冬は近日点に当たるために日射量は比較的大きくなる。惑星の軌道が楕円であることと自転軸が歳差運動することにより、季節毎の日射量のコントラストが長い時間スケールで変動するのである。赤道傾角項と気候的歳差項の意味のより詳しい説明については[2,11]などを参照されたい。

こうした事柄を頭に入れて、地球と火星の離心率、赤道傾角、気候的歳差（ここでは離心率 $\times \sin$ [近日点の方向]の値）の時間変化の計算結果とその周波数

1. 「項」という呼称が使われるのは、具体的な日射量変動の数式の各項にこうした名称が付いているためである。本稿では「項」=「効果」くらいに考えてもらえれば良からう。

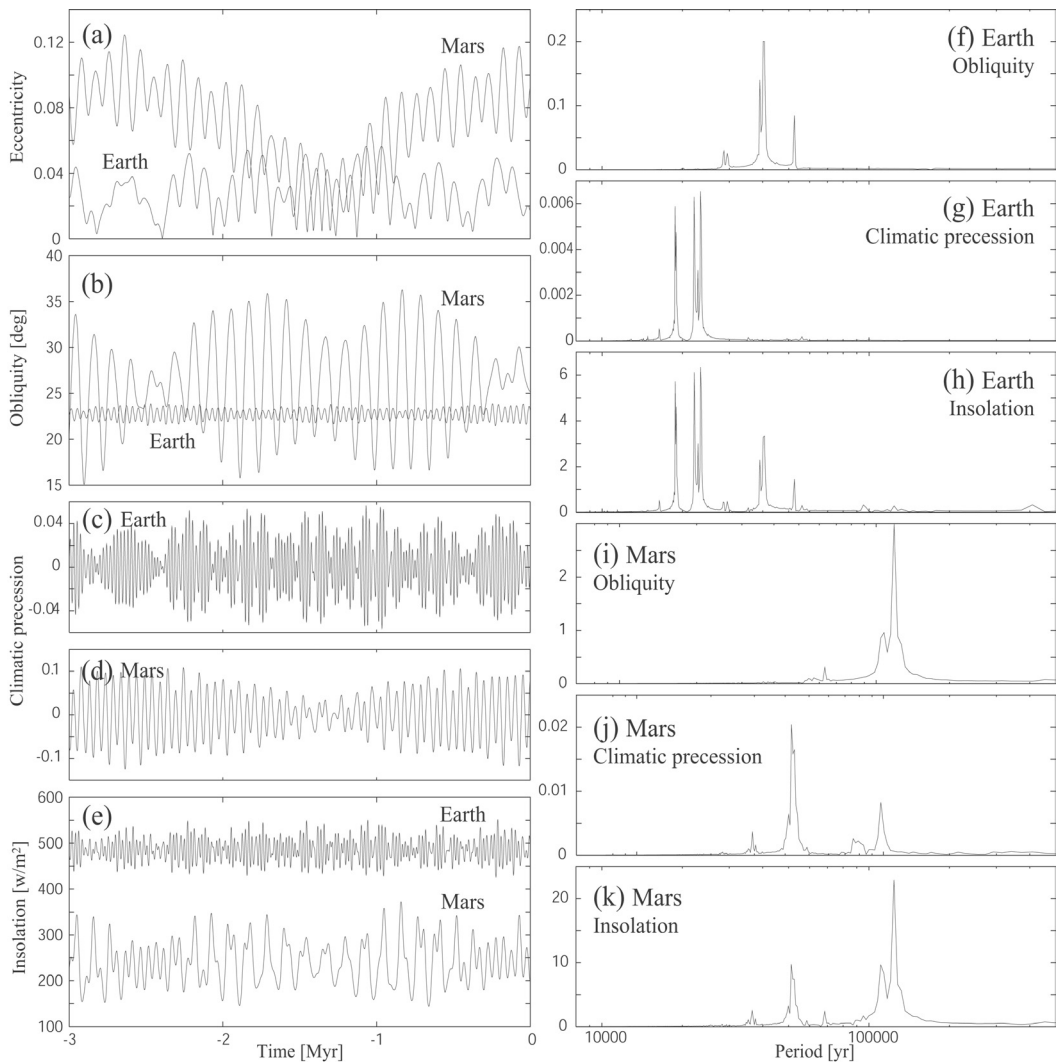


図2：左側は[14]による定式化を用いて計算した地球と火星の(a)離心率, (b)赤道傾角(度), (c)気候的歳差(地球のみ)および(d)気候的歳差(火星のみ), (e)北緯65度に於ける夏至の日平均日射量 (W/m^2)。現在から溯って三百万年前まで計算した。右側はそのフーリエ変換結果で, (f)地球の赤道傾角, (g)地球の気候的歳差, (h)地球の日射量, (i)火星の赤道傾角, (j)火星の気候的歳差, (k)火星の日射量, の各スペクトル。(f)-(k)の横軸は対数目盛り。

解析結果を見てみよう(図2)。地球の離心率の振動(図2(a))は約10万年と約40万年の特徴的の周期を持ち、赤道傾角には約4万年の周期が卓越している(図2(b)と(f))。気候的歳差は離心率と近日点経度に依存し、地球の場合には2万3千年付近と1万9千年付近に強い周期性を持つ(図2(c)と(g))。火星の赤道傾角(図2(b)と(i))と気候歳差項(図2(d)と(j))は地球のそれに比べてだいぶゆっくりと変動する。自転軸の歳差運動は重力的

に扁平な惑星に対して他天体から重力トルクが働くことにより発生するが、地球以外の惑星については太陽からの重力トルクが圧倒的に強い。地球だけは例外で、月からの重力トルクが太陽からの二倍ほどもある[12]。すなわち地球の自転軸は月からの強い重力トルクにより激しい歳差運動を強制されていることになる。火星にはそのような大きな衛星がないので、歳差運動の原因となる天体は太陽のみとなる。火星の赤道傾角と気

候的歳差の変動周期が地球のそれらに比べて随分と長いのはこの理由に拠る [13].

以上のような軌道要素の変化から計算される日射量変動の様子が図2(e)である. ここでは [14] の定式化を用い, 北半球の夏至に於ける北緯65度の地点での日平均日射量 (W/m^2) を地球と火星のそれぞれについて計算した. 長期の気候変動という観点からは北半球で言えば北緯65度付近での夏半年の日射量変動 (夏至の日平均日射量の傾向もこれとほぼ似たようなもの) を議論することが多いので, 本稿でもそれに従った. 地球に於けるこの時期のこの緯度帯の日射量には赤道傾角項よりも気候的歳差項の影響が強く, そのことは周波数領域に於ける図2(h)にも良く示されている. ここに図を示すことはしないが低緯度域では赤道傾角項の周期性は更に弱く, 日射量の時間変化はもっぱら気候的歳差項の変動を反映したものとなる.

図2(e)に示された地球と火星の日射量変動の様子を見るとすぐに気が付くことがある. 火星の日射量変動の振幅が地球のそれに比べてかなり大きいということである. 大雑把に言って図2(e)に於ける地球への日射量の平均値は約 $500W/m^2$, 最大変動振幅が \pm 約 $50W/m^2$ (平均値に対して \pm 約10%の振幅) であるのに対して火星のそれは平均値が約 $250W/m^2$, 最大変動振幅が \pm 約 $100W/m^2$ であり, 平均値に対して \pm 約40%もの振幅を持っている². 地球と火星の平均日射量の違いは太陽から各惑星までの平均的距離比の逆二乗の反映結果だと思えば良いが (太陽からの平均距離比は地球/火星 $\sim 1/1.5$), 振幅の比は赤道傾角の振幅の違いが大きく反映されている. 図2(b)にあるように火星の赤道傾角は地球のそれに比べて極めて大きな振動を行う. 図2(b)での火星の赤道傾角の最大値はせいぜい36度から37度程度だが, より長い時間スケールではこれよりも遙かに大きな値を取ることがわかっている. 最新の計算結果によると火星の赤道傾角は過去46億年にわたり40度近い平均値を持ちながら激しく振動し, その最大値は80度を超えるという報告までなされている [15]. この原因はいわゆる自転軌道共鳴というものである.

一般に, 惑星間の重力相互作用により惑星の自転軸のみならず惑星の公転軌道面も時々刻々と歳差する. 自転軸の歳差運動の周期は惑星の力学的偏平率や月や太陽と言った外部天体からの重力トルクの大きさに依存し, 公転軌道面の歳差運動の周期は惑星間の重力相互作用 (各惑星の相互配置や質量) に依存する. この両者, すなわち惑星の自転軸の歳差周期と公転軌道面の歳差周期が何らかの理由で近い値になると共鳴が発生し, 惑星の自転軸は非常に大きな振幅で振動するようになる [16]. これが自転軌道共鳴という現象であり, 現在の火星はまさにこの条件下にあるのである. 火星の日射量変動に於いては気候的歳差項に比べて赤道傾角項の寄与が大きく卓越する (図2(i)(j)(k)) のもこの理由による. 前述したように地球の場合には質量の大きな月に伴われているおかげで自転軸の歳差周期が短かく, 幸いにして自転軌道共鳴が発生して赤道傾角が大変動するようなことはない. けれどももし月が存在しなかったり, 存在しても現在よりもずっと小さくて軽いものだったりしたら, 地球の赤道傾角も火星と同様な大変動を経験する可能性がある. 現在の地球の穏やかな気候状態のひとつの要因が赤道傾角振動の振幅の小ささであるとするれば, 大きな月の存在が地球の気候を穏やかなものに保つために重要な役割を果たして来たのだと言えるかもしれない [17].

火星の自転軸歳差運動や自転軌道共鳴については1970年代から W. Ward らによって精力的に研究がなされて来た [13,18,19,20]. 最近では自転軌道共鳴の理論が拡張され, 太陽系外惑星の自転軸安定性と居住可能性 (habitability) に関する議論に適用されたりしている [21].

4. 日射量変動から気候変動へ

前節までに述べたように, 地球や火星に到達する日射量の分布や時間変化については天体力学的手法により精密に計算が可能である. そして地球に於ける $\pm 10\%$ 程度の日射量変動が第四紀の氷期・間氷期サイクル

2. 図2(e)に示された日射量変動は夏至一日平均のものであるがために振幅が大きいが, という効果もある. 夏至一日の代わりに夏季三ヶ月や夏半年の平均日射量を計算すれば, その変動振幅は図2(e)のものよりやや小さくなるであろう.

を駆動したのであれば、火星に於ける $\pm 40\%$ もの日射量変動が大きな気候変動をもたらした可能性はかなり高いのではないかという期待が発生するのは当然である。火星の気候変動に関する理論的予測や地形データから推測した気候進化の研究は古くから行われて来たが、近年の火星探査衛星による精密な画像データを基礎として、こうした議論は精密さを増している。最近では遂に火星の日射量変動と氷期・間氷期サイクルの関係に直接言及した論文が出版されるに至っている。文献[22]は Mars Global Surveyor (MGS) により撮影された火星北極域にある氷と塵の堆積構造に着目し、堆積物の輝度変動と北極域へ入射する夏の日射量変動の関係を比較した。堆積速度に関する客観的なデータが得られていないためにこの比較は主観的なパターン認識となるが、著者はその結果を元にして過去約百万年間の日射量変動がこの堆積構造の要因であると堂々と主張している。また文献[23]は火星探査機からの様々なデータを改めて総合的に解釈し、火星の中緯度域まで広がる塵と氷の堆積物が日射量変動に起因するものであり、過去210万年前から40万年前までは火星に氷期が訪れていたと言う。この論文の著者の説によると、火星の氷期は極域の日射量が大きくなって大気中の水蒸気と塵が中緯度域へ運ばれることにより発生する。即ち極域が暖かい時期が火星の氷期であり、地球のそれとは逆だとする説である。

こうした報告を聞くと火星表層で緑り広げられている気候変動と日射量変動の相関が具体的に手に取れるようでわくわくする面もあるが、現時点での議論を聞くにあたり私達は慎重な態度を崩してはいけないであろう。火星探査機から送られて来る堆積構造写真の解像度がいくら高いとは言え、私達はそうした堆積物の具体的な形成速度（時間的な堆積レート）も知らなければ、堆積のメカニズム自体も知らない。そのような堆積構造の時間スケールが日射量変動のそれと全く異なっている可能性すらあるわけである。上で紹介したような報告の結果は「火星の気候変動が地球と同様に日射量変動に駆動されてほしい」という希望的観

測の域を完全には出ていないと言っても過言ではない。日射量に関しても、私達が精密に計算できるのは惑星の大気上端に入射する太陽からのエネルギー放射量に過ぎない。地球に関して言えばそこから下には厚い大気があり、惑星を広く覆う海洋があり、陸面があり、地下水があり、高緯度域には氷床がある。大気上端に届いた日射量の変動が氷床の変動として発現するまでにはこうした複雑な気候システムの要素をひとつずつ介して行くことになり、その過程は単純なものでは決してない。言葉を変えれば、日射量変動が氷床変動に直結して反映されるという一般的保証はどこにも無いのである。実際のところ第四紀に於ける地球の氷床変動の最も強い周期性は約10万年であるが、この周期は日射量変動に於いては非常に弱いパワーしか持っていないという事実は文献[5]の時代から知られて来た大問題であり、これに対しては現在に至るまで未だ決定的な回答は得られていない。長い研究の歴史と膨大な量の観測データが蓄積されている地球の気候に関して、大気上端に届く日射量変動と気候変動（氷床変動）との関係はさほど自明ではないのである。火星の場合も同様であり、火星の気候に関する知見もそれにりに蓄積されてはいるものの（例えば[24]などを見よ）、大気上端に入射する日射量の変動が計算できたからと言って火星の気候変動を理解できたことにはまったくならない。しかも、火星の表層気候を司る物理過程は地球のそれとは大きく異なる。地球上には巨大な熱容量を誇る海洋が存在し、氷期・間氷期サイクルに大きな関与をして来たと予想されている。少なくとも現在の火星には海洋は存在しないから、気候変動に関するこの違いは極めて大きいであろう。また地球上では大気中の塵が雨で洗い流され（rainout）、その大部分が海底に堆積する現象が発生し得るが、火星ではそれも期待できず、多量の塵が大気中に放出されて気候に強い影響を与え続けて来た可能性がある。更に地球では氷期・間氷期サイクル中にも大気的主要成分が大きく変わるということは全くと言って良いほど無かったと思われるが、火星に於いては大気の主成分である二酸

化炭素が極冠にあるドライアイスと平衡状態にあるために、条件によっては大気全体の気圧や二酸化炭素濃度が甚大に変化し得る。こうした違いを始めとし、火星の大気、極冠、陸面、あるいは地下水（地下氷）などの複雑な相互作用体系としての気候システムに関して私達の造詣が地球並みあるいはそれ以上に深くなって初めて、日射量変動が火星の気候にどのように影響して来たかを正確に知ることが出来るようになる。そこへ到達する道程はまだまだ長く険しいものであるように思われる。

6. 謝辞

本稿の執筆に際しては東京大学気候システム研究センターの阿部彩子さんと東京大学大学院理学系研究科の田近英一さんから多数の助言を頂いた。この場を借りてお二人に深く御礼を申し上げたい。

参考文献

- [1] 阿部彩子, 2002: 「全地球史解説」, 234, 東京大学出版会.
- [2] 中島映至, 1980: 気象研究ノート 140, 81.
- [3] Milankovitch, M., 1941: *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitproblem*, Königlich Serbische Academie.
- [4] 増田耕一, 1993: 気象研究ノート 177, 223.
- [5] Hays, J.D. et al., 1976: Science 194, 1121.
- [6] 阿部彩子, 増田耕一, 1996: 岩波口座地球惑星科学11「気候変動論」, 103, 岩波書店.
- [7] Berger, A.L. et al., 1984: *Milankovitch and Climate*, D. Reidel.
- [8] 安成哲三, 柏谷健二, 1992: 「地球環境変動とミラノヴィッチ・サイクル」, 古今書院.
- [9] Laskar, J., 1988: Astron. Astrophys. 198, 341.
- [10] Ito, T. and Tanikawa, K., 2002: Mon. Not. R. Astron. Soc. 336, 483.
- [11] 伊藤孝士, 2002: 「全地球史解説」, 137, 東京大学出版会.
- [12] Ito, T. et al., 1995: J. Geophys. Res. 100, 15147.
- [13] Ward, W.R., 1974: J. Geophys. Res. 79, 3375.
- [14] Berger, A.L., 1978: J. Atmos. Sci. 35, 2362.
- [15] Laskar, J. et al., 2004: Icarus, 170, 343.
- [16] Laskar, J. and Robutel, P., 1993: Nature 361, 608.
- [17] Laskar, J. et al., 1993: Nature 361, 615.
- [18] Ward, W.R., 1979: J. Geophys. Res. 84, 237.
- [19] Ward, W.R. et al., 1979: J. Geophys. Res. 84, 243.
- [20] Bills, B.G., 1990: J. Geophys. Res. 95, 14137.
- [21] Atobe, K. et al., 2004: Icarus 168, 223.
- [22] Laskar, J. et al., 2002: Nature 419, 375.
- [23] Head, J.W. et al., 2003: Nature 426, 797.
- [24] Nakamura, T. and Tajika, E., 2003: Geophys. Res. Lett. 30, 1685, doi:10.1029/2002GL01672.