

火星の気象—ダストの支配する大気—*

—学会賞受賞記念講演—

森 山 茂**

今から何年前でしたでしょうか、仙台で行われた惑星大気のシンポジウムで、駒林先生が「観測手段を持たぬ日本で、現在の惑星大気を研究してメンを喰おうとしたら、定員が3人位しか日本にはない。しかし、過去の大気の研究ならそういう handicap をまだ負わなくてもよいだろう」というような意味のことを言われていたのを思い出します。確かに、現在の惑星大気を研究することは、観測手段を持たない日本においては困難なことに思われます。データの直接的な部分はほとんどわれわれには分らないわけでありまして、発表されるものは、そうした惑星探査データの外国人に消化されたもので、一次消化された論文はすべて米ソの連中に先取りされるわけでありまして、われわれはいわば、そうした一次消化された論文を基にして、さらに連中より深く、または異なったアプローチをせねばならないのですが、宇宙科学弱小国たる日本においてはいろいろな主張をしても、なかなか着目してもらえないという情無い悩みもあります。そういう所からして、惑星大気の研究が日本ではなかなか育ち難い状況にあるともいえましょう。そうした中で、思いがけなくも今回栄えある賞を頂き、よくもまあここ迄やって来たとの感を深くしています。それと、学芸大の松田さんを始めとして、そうした条件下でも最近この方面の研究をやってやろうという若手の方が（私もまだ若いのですが）2, 3現われて来たということで、日本での惑星大気物理の発展の一助にでもなれるかもしれないと、素直に考えているわけでありまして。

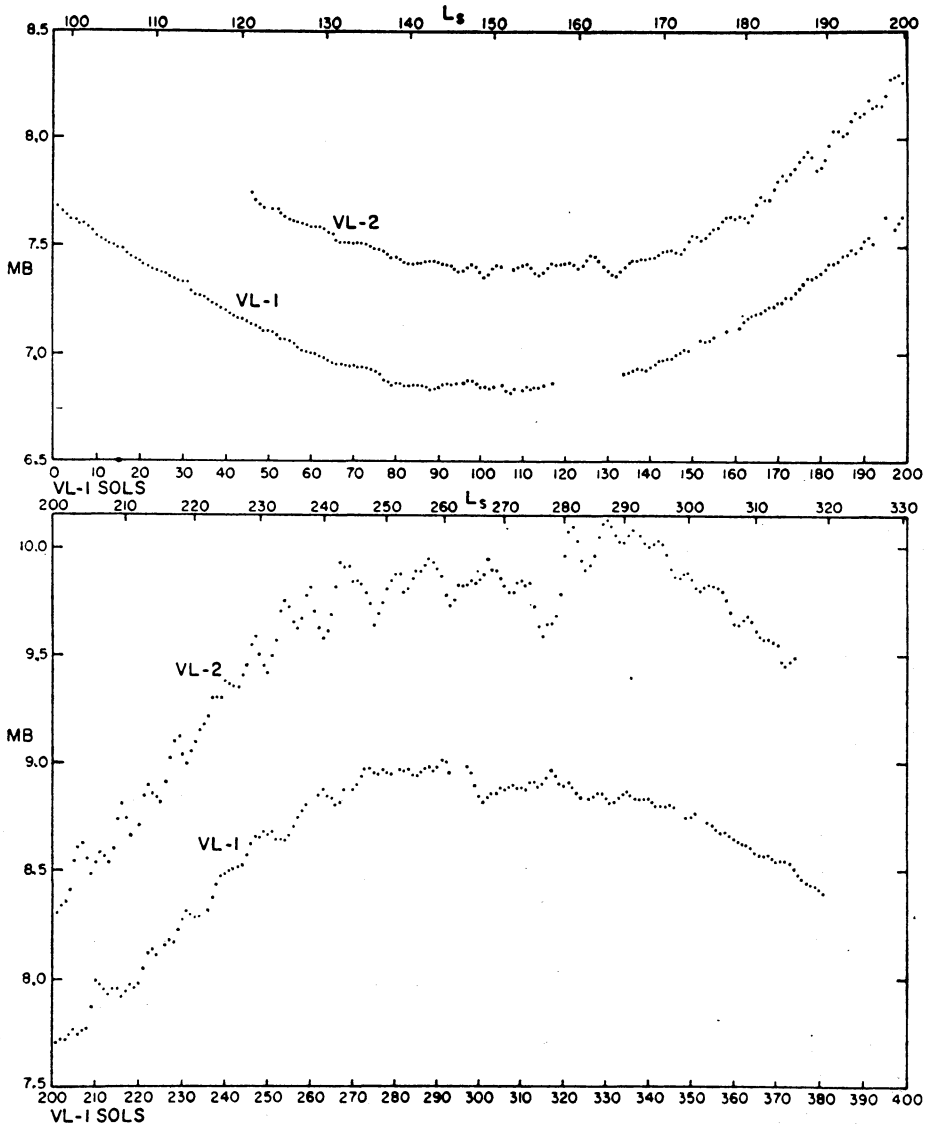
* The Martian Meteorology—Atmosphere Characterized by Suspended Dust—

** Shigeru Moriyama, 日本大学生産工学部物理教室。

もともと遠い星空に夢を馳せるのが好きな私が火星大気に首を突っ込んだのは、京大の4回生の頃からであります。気象関係では、まだ周囲にはもちろん誰もそんな他の星のことを考える人もいなかった頃でありますし、惑星探査機が初期のデータをやっと出し始めた頃のことでありました。目覚ましい惑星大気物理の進展を振り返ってみますと、私が4回生の頃という今から十数年前は、まだ曙期で、惑星大気組成がようやく決まりかけた位の所であったようです。卒業研究で、山元龍三郎先生の所へ伺って、惑星大気をやってみたい旨をお伝えした際、「今に誰かそういう者が出るかも知れないと思って、本だけは揃えておいたのだよ」と、ドサッとひと山の教科書を机の上に置かれたのを思い出します。今にして思えば、それらの内容も大変古めかしくなってしまったのですが、ひと夏信濃の山奥の村で、惑星大気物理の基礎固めをしたのが本当に懐しく想われて来ます。

しかし、この十数年来の惑星大気に関する知見は本当に凄じいものがありまして、本論に入る前に、火星大気に関する基本的な知識を述べておいた方が、以後の話にも都合がよいでありましょう。

火星は地球の外側に位置しておりまして、その半径は地球のおよそ半分強、また太陽からの放射量は2分の1弱ということになっております(第1表)。また、火星の自転軸の傾きは25度、その自転周期も24時間半で、ほとんど地球に良く似ているわけでありまして、また軌道離心率は0.09とかなり偏平でありまして、それにより、南北両半球で同じ季節といってもかなり状況が異なるのであります。現在は南半球の夏至点が近日点にきわめて近く位置しており、従って、南北でかなり気象現象の振舞が異なっています。それは例えば、南北両極冠の大きさに



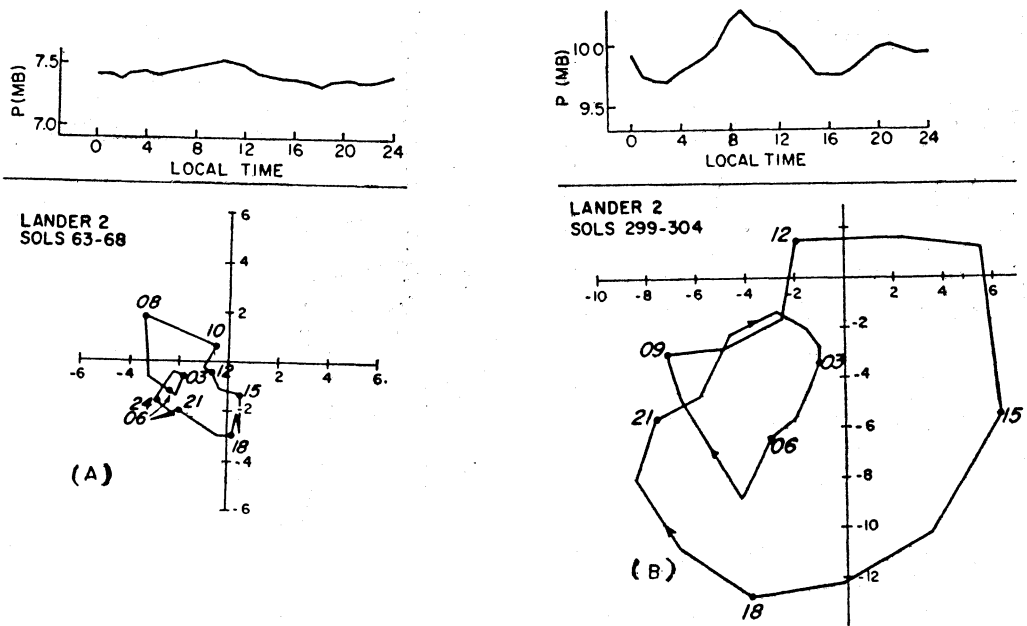
第1図 火星大気圧の季節変動 (Hess *et al.*, 1979).

Ls: 火星中心黄経, SOLS: 火星着陸後の日数. VL-1 (22.3°N, 47.9°W),
VL-2 (47.7°N, 225.7°W).

も象徴されますし、全球的砂嵐が南半球の春～夏にのみ発生するとか、あるいは、ヴァイキング探査で知られたように、北極の永久極冠は氷から成っているのに、その反面、南にはダストの多いせいで夏でもドライアイスの極冠が依然として残存しているとか、多くの違いが見られるのであります。

さらに最近分って来たかなり決定的な火星大気の描像

でありますが、それはヴァイキング着陸船の気圧測定から分って来たのですが、大気圧が猛烈に変動しているということであります。まず季節変動ですが、1年で25%以上も大気圧が変わっているという驚くべき事実が分って来たのであります(第1図)。これは極で大気主成分たるCO₂が凍り落ちるための大気の質量損失によるものでありまして、そうした大気からのCO₂の脱落によっ



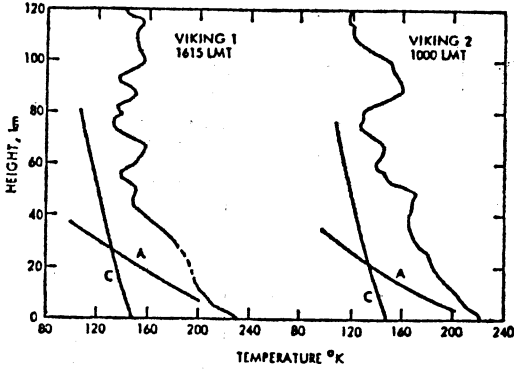
第2図 火星の平時（比較的ダストの少ない時節）(A)と大ストーム時(B)の気圧日変化、および、風のホドグラフ (Leovy and Zurek, 1979). VL 2 (2号着陸点)でのもの。

て、猛烈に年々大気が揺さられているのであります。と同時に1日の変動を見ましても、第2図のように大気はやはり大きく振動を繰り返しております。もっとも、これはあとで述べますように、火星大気気圧振動が大気中の浮遊ダストの日射の吸収による強烈な大気加熱、および、薄いCO₂大気の短い放射緩和時間のせいによる、そうした大気・熱潮汐の重要性を示していると言えましょう。さらに、大気温度構造にも顕著な特徴が見られます。第3図はヴァイキング1, 2号のentry observationsですが、下層大気が非常に安定だということ、もう1つは、おそらく上方伝播的な大気潮汐の影響を強く受けて、上層大気温度が大きく振動しているということとであります。

ところで、私が火星の研究を始めた頃はまだマリナー7, 8号の頃でありまして、その頃の探査で大気組成であるとか、極冠の成分などがようやく分りかけて来ただけでした。当然、未知の惑星へのアプローチとして、まず大気温度構造を決めようということになります。同時に米国でも、かの有名な Gierasch や、Goody, Leovy らが温度構造や大気大循環の研究を始めておりました。もっともその頃は、地球の気象学のアナロジーという事で、ただ、異なった大気組成、薄い気圧、約2

第1表 火星・地球のパラメータ。

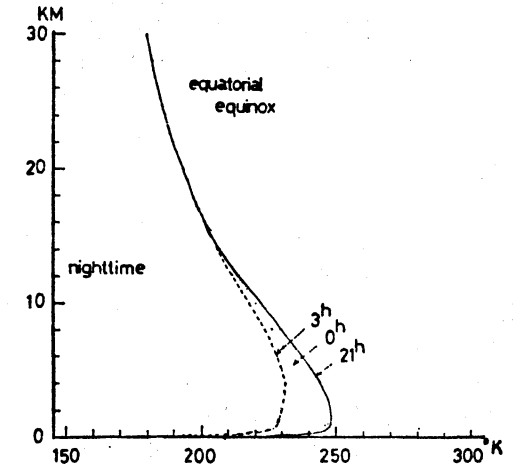
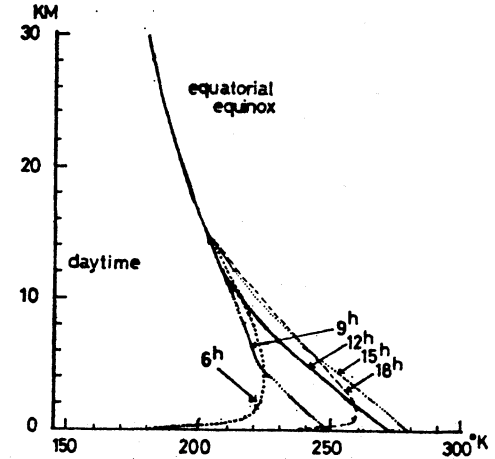
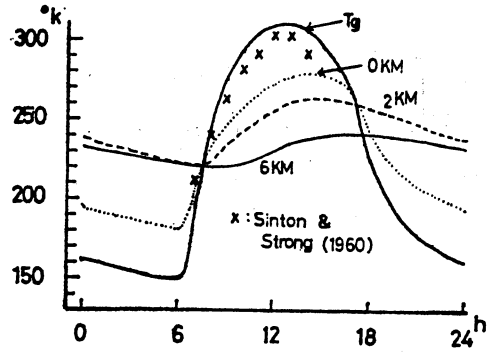
	火星	地球
惑星質量 (kg)	5×10^{22}	6×10^{23}
惑星半径 (km)	3394	6369
重力加速度 (m/s ²)	3.72	9.81
太陽常数 (W/m ²)	591	1373
軌道離心率	0.093	0.017
自転軸の傾き	25°	23.5°
1年の長さ (地球の1日で)	687	365
1太陽日 (s)	88775	86400
アルベド	0.24	0.29
大気主成分 (%)	CO ₂ (95.32) N ₂ (2.7) ⁴⁰ Ar(1.6) O ₂ (0.3)	N ₂ (78.08) O ₂ (20.95) ⁴⁰ Ar(0.93) H ₂ O(0~2)
表面気圧 (mb)	6.1	1013
平均スケール・ハイト (km)	10	7.8
乾燥断熱減率 (K/km)	4.5	9.8



第3図 火星大気の垂直温度構造。ヴァイキング1号(左)と2号(右)の entry observation (Seiff and Kirk, 1977)。A:断熱線, C:CO₂凍結点。

日程の短い放射緩和時間という、放射に sensitive な大気の振舞が注目を集めていた訳であります。そんな中で、有名な Leovy and Mintz (1969) の大循環数値実験などが出されて、日射に相当支配されているであろう火星の天気や、大気温度構造も第4図のようなものであろうという事で、CO₂ 大気から成る希薄な、放射緩和時間の短い大気の振舞が理論的にも知られて来たわけでありませう。

ところが、1971年のマリナー9号や1976年のヴァイキング1, 2号が直接測定してみると、どうもそうではないらしい。第4図から知られるよりは非常に大気温度構造は安定だという事が注目されて来るのであります。もっとも、マリナー9号の時はたまたまそれが大砂嵐の時、及びその直後ということだったので、まだ一部の人を除いては余り気にはしなかった様ですが、どうも第4図のようではないのではないかと考えたのであります。つまり、火星には局地的な砂嵐が頻繁にある訳だし、常時ダストが大気中に浮遊しているだろうと考えられる。実際、後にヴァイキングの直接測定で知られた訳ですが、火星では平常時でも0.4以上の optical depth τ のダストが浮遊していたのであります。ところが、そういうダストの役割は、火星大気の研究を始めた頃には、地球の気象の常識があったから余り気にしなかったし、殆んど問題にされなかったようです。しかし、大気中のダストの加熱率を $\frac{\partial T}{\partial t} \sim \frac{I_0(1-e^{-\tau})}{P_0} \frac{g}{C_p}$ (T : 温度, t : 時間, I_0 : 入射太陽エネルギー量, P_0 : 表面気圧, g : 重力加速度, C_p : 大気定比熱) という簡単な式で見積って、ダストの熱効率を計算してみても、同じ量のダ



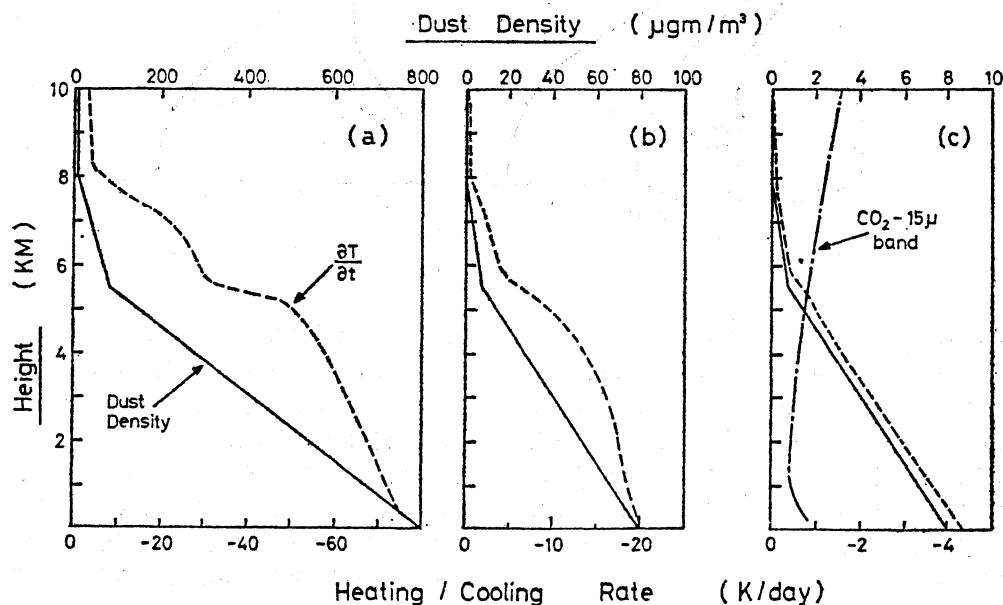
第4図 CO₂・H₂O 大気モデルによる放射・対流平衡の計算から得られた火星大気温度構造 (Moriyama, 1972)。上: 地表面温度, 中・下: 昼と夜の大気温度構造。

ストでも火星ではその効率が地球より約30倍も大きいという事になります。そうしますと、火星の大気温度構造はどうしてもダスト抜きでは考えられないということになります。現にマリナー9号は、火星下層大気が等温に近いということを示して来ました。

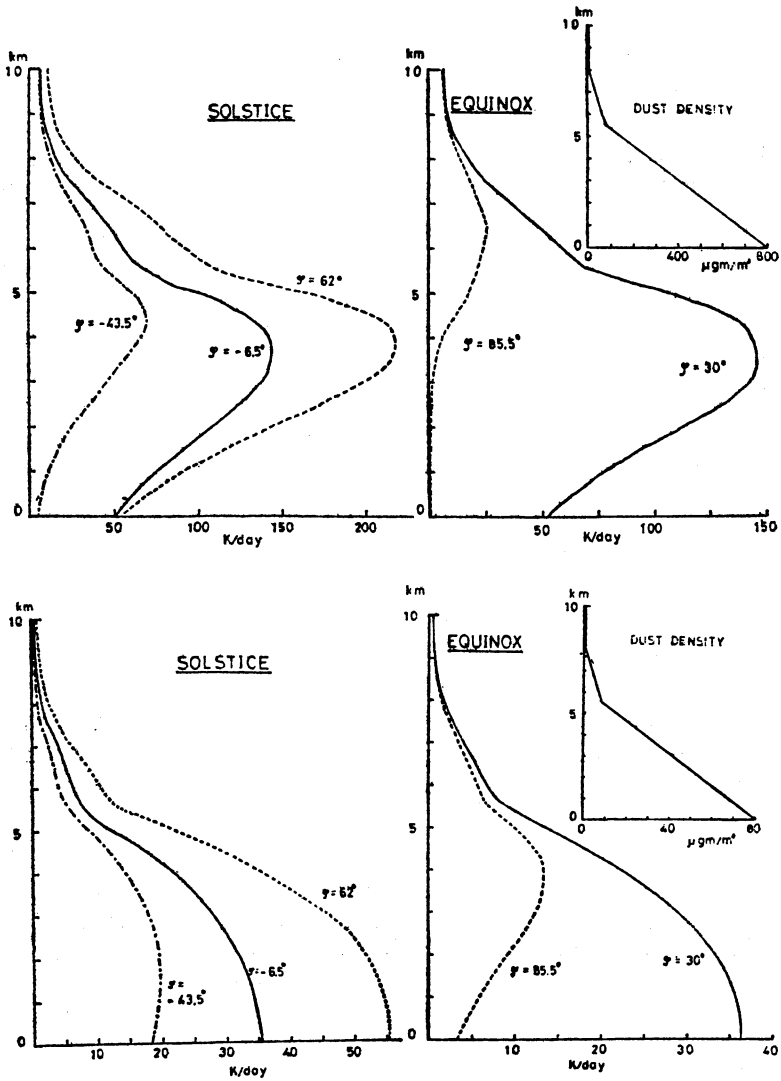
そこで、ダストの組成を遠赤外領域迄かなりきちんとデータの出ている SiO_2 として、一応赤外ではそうしたケイ酸塩粒子を使って、また可視ではその single scattering albedo が当時、0.67 位だという事で、そうした光学的特性を用いて多重散乱の放射伝達方程式を解くことで、ダストの放射効果を定量化してみたのであります(今ではもっとも、多少吸収の小さな可視での光学特性を仮定した方が良さそうに思いますが(0.75~0.85?), その代り、浮遊ダスト量が予想より多い)。その結果(第5、6図)は、optical thickness が小さくとも、どうも大気主成分たる CO_2 ガスよりは、予想どおりにダストの radiative な効果がずっと大きく、結局、大気温度構造はむしろダストによる放射過程で支配されているのではないかと言うことになります。確かにヴァイキングで実際に大気温度分布を測ってみましても、やはり、最も対流の盛んな午後でさえ、そうした convective layer は 4 km しか行かないということが分って来ました。こうしたことは CO_2 のみの大気の放射対流平衡か

ら予想される所(第4図)と全然違っているのであります。安定な温度成層もダストの放射効果で再現されますし、第5図に見られるように、非常にダストが少なくてさえ、 CO_2 15 μ 帯による寄与と同程度の放射効果をダストは持ち得るという事で、ダストの放射効果、ひいては大気温度構造への寄与が決定的に大きいという事が知られてくるわけでありませう。

もっとも、向うの連中は、ヴァイキングで平常でもダストの optical thickness が 0.4 以上もあるということが分って来てから、ダストの効果を真剣に考えたふしがありまして、Zurek (1978) が可視での私の計算を新しい光学的パラメータを使ってやったりしまして、ダストの効果は森山の言うように大きい事に注意すべきだというような論文を出したりしていますが、その頃から、色々な火星の大気現象や、大気循環、あるいは熱潮汐において、ダストが非常に重要な役割を果しているのだと認識するようになって来たようであります。かくして、浮遊ダストの火星気象に与える影響は甚大で、それはあたかも地球が水(水蒸気)で特徴づけられる気象を有しているのに対して、火星はダストの気象を持つのだと言った方がよいと思います。現に、大砂嵐を始めとして、大気温度構造はもちろんのこと、地球成層圏の突然昇温に似た現象まで大砂嵐との関連現象として発見さ



第5図 ダストによる赤外域での火星大気冷却率の計算 (Moriyama, 1974)。



第6図 ダストによる太陽光吸収による大気加熱率 (Moriyama, 1975).

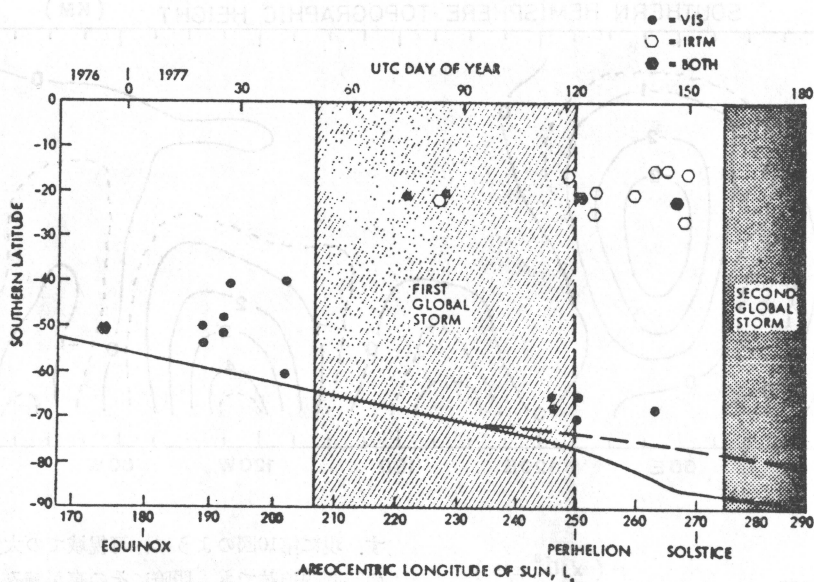
れ、ここではそれらに触れる暇はありませんが、火星大気中のダストの重要性を痛感させられる思いです。ヴァイキング着陸船から送られて来た例のサーモンピンクの空の色が、地球の35 km ほどもの上空に対応する希薄大気中に明るく輝く様は、大気分子の Rayleigh 散乱のみではとうてい考えられない所です。まさに大気中のダストの存在と重要さが、目視的にも裏付けられた象徴的なことと言えましょう。

そうした訳で、火星の大気の温度構造がどうもダストを抜きにしては考えられない、否、ダストにむしろ支配

されているという事になりますと、当然その大気大循環や熱潮汐がクローズ・アップされて来る訳であります。

御存知のように、火星にはダストと切っても切れぬ縁があるようでありまして、昔から global dust storm がその全面を覆ってしまう事が知られております。そのメカニズムは未だに謎に満ちておりますが、最近ヴァイキング1, 2号の観測(火星年で2年近くもの定点観測やオービターからの観測)から、かなり有力なある1つのストーム発生シナリオが浮んで来ました。

第7図はオービターから可視、赤外光で発見された局

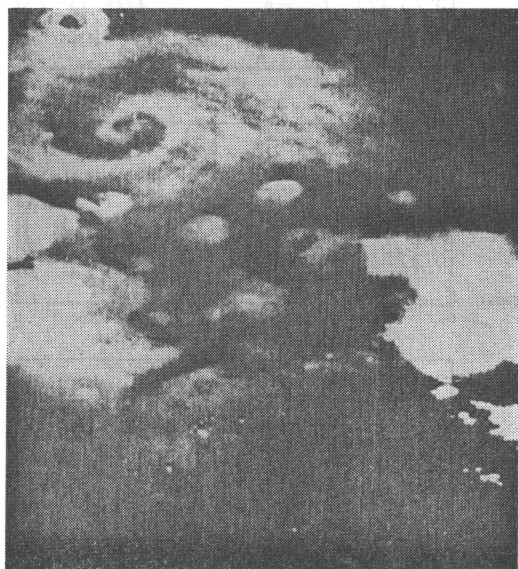


第7図 局地砂嵐の発生日点，横軸は L_s (火星中心黄経)．南極冠の境界も示されている．点線は南極冠が非対称になるため (Peterfreund and Kieffer, 1979)．

地的砂嵐の発生日点を南半球の春から夏にかけてトレースしたものです．第7図のように局地砂嵐は，1つは極域と，もう1つはどちらも 20°S 近くのそれも決った地点にのみ発生するようであります．

極域では，極冠 ($\sim 148\text{K}$) と，春～夏にかけて熱せられる極冠周辺地域での温度差が大きくなり (あるいは，先の気圧変動の示すように，ドライアイスの sublimation による out-flow も重要とも思えますが)，それによりかなりの強風が吹きまわっていると思われます．現に，強い傾圧場がそこでは生じておまして，第8図のような cyclone がオービターから高緯度地方 ($60\sim 80$ 度付近) に存在することが写し出されています．

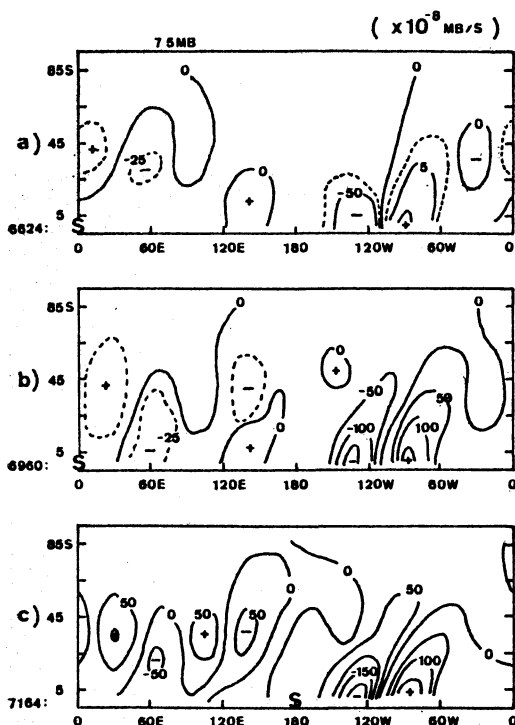
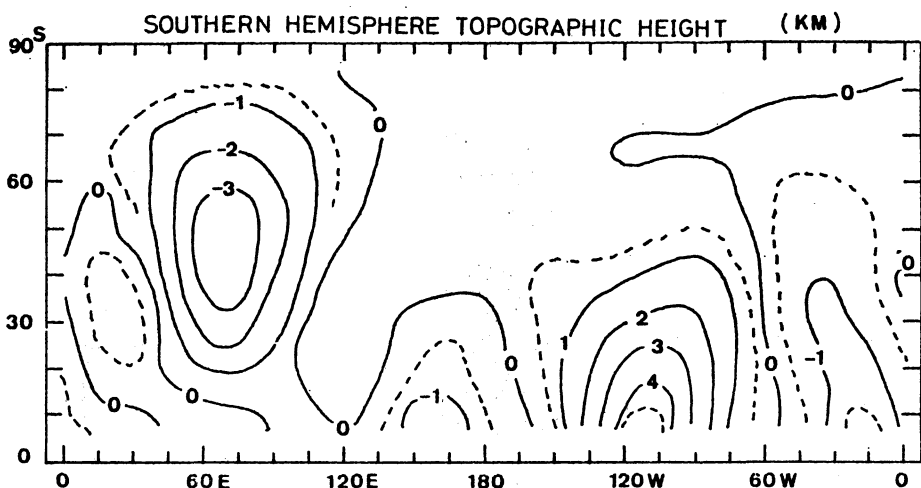
一方， 20°S (それもソリス平原 ($20^{\circ}\text{S}, 90^{\circ}\text{W}$) とクラルス水道 ($20^{\circ}\text{S}, 110^{\circ}\text{W}$) という2地点で繰り返し発生している) の方ですが，どうもこれは地形的なものによる様でありまして，私と京大の岩嶋さんの山岳を入れた数値実験では，dust-free の場においては，どうやらかの storm 発生の地として有名なヘラス地方よりも，ソリス平原地方で風の場に異常が認められるのであります (第9図)．そこは，北半球の高地タルシスから赤道を越えて続いている高地の南端に当たりますので，そうした高地斜面に力学的な強風の場があることは充分に考えられますし，われわれの数値実験はそのことを表わして



第8図 北緯 81° 付近で発見されたサイクローン， $L_s=105^{\circ}$ (Hunt and James, 1979)．

おります．

おそらく，そうした異なった2ヶ所で局地的砂嵐が，南半球の春から夏にかけてせっせとダストを大気中へ供給し，大気ダストレベルを上げているようでありま

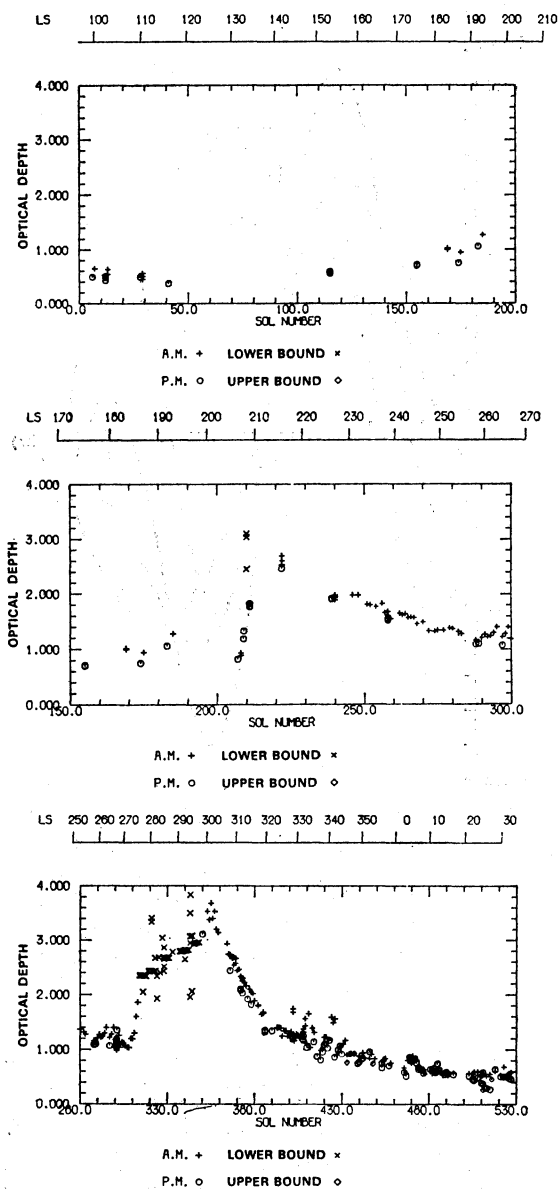


第9図 ダストを入れない大気大循環スペクトルモデルで、山岳の力学的効果を入れた計算から得られた ω -速度場の平均値からの偏差を示す図(下図)。S: 太陽, 横軸: 経度, 縦軸: 緯度。南半球(最上図)に対する数値実験 (Moriyama and Iwashima, 1980)。

す。現に第10図のように、可視域での大気の光学的厚さの時間的追跡でも、明瞭にその事が読みとれます。第10図はストーム発生地点とは逆の、北半球での測定ですから、大気の一般場の光学的厚さであると見なされます。また第10図から、一般場の optical depth が1に近くなりますと、いつも global storm が発生するようになります(大ストームの時には、ダストの流入により、時に $\tau=8$ に迄値がはね上りました)。

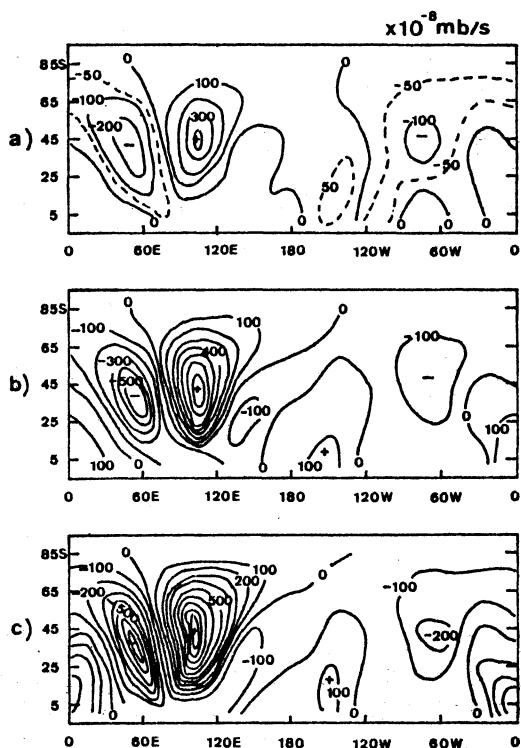
ところで、大ダストストームは何故、ヘラス付近に選択的に発生するのでしょうか? どうも global storm が発生するのは、先の 20°S 地点や極地方でなくて、ヘラスのある中・高緯度帯がその源となった時のように見えます。しかも、第10図から、その頃はダストで大気が相当充満して来た時のように思われます。としますと問題は、何故 global storm はヘラスに源を持つのか? また、何故その時大気が dusty なのか(ダスト量に trigger point があるか)? ということと関連すると思います。まあ、その1つの入口とも言うべき事を、先の私と岩嶋氏の数値実験が現わしている訳でして、それを示しますと第11図のようになります。今度は、大盆地たるヘラス付近に強烈な風の場の anomaly が生じます。それは恐らく次のように説明できるでしょう。

ダストが大気中に満ちて来ますと、高緯度では見掛けの光学的厚さが(太陽天頂角 θ の $\sec\theta$ で効きますから)、急激に増してくるようになります。第10図のように、 τ が1以上ともなりますと、高緯度では日射が遮られ、それに連れて水平方面の温度勾配の極大はより高緯度側へシフトすることになります。そうしますと、大規



第10図 火星大気の光学的厚さ(可視光)の時間変化(Pollack et al., 1979). ヴァイキング1号, 値の急増は大砂嵐による。

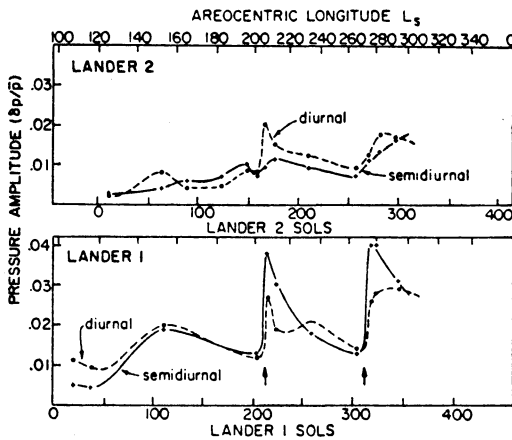
模スケールの風はそうした温度勾配の極大付近で強まりますから、ダストに満ちた場ではダストの少ない場と比べて、ヘラスのあるようなより高緯度帯で強い風が期待されるという訳です。確かにヴァイキングでストームの直前に、急激に水平温度勾配の極大が高緯度ヘソフトしたという報告がありますし、ダストによる高緯度の日射



第11図 第9図に対して、山岳効果やダストの効果を取り入れた南半球の大循環数値実験の一例。太陽は経度0°のところにある(Moriyama and Iwashima, 1980)。

の遮へいはとても大きく、例えば夏の南極冠は、火星で最も日射が多いはずなのに、夏の北極冠と異なって、依然として低温のドライアイスが凍っているのです。そのことはダストによる大きな日射の遮へい作用を考えねばどうしても説明出来ないのです。それくらいにダストの効果は大きいのです。

ヘラス付近でのこうした一般場の風の強まりとともに、ダストが大気中に満ちて来ると、今度は熱潮汐波の増幅が無視しえなくなります。実はヴァイキング着陸船の測定では、2回のストームが真上を通過した時、顕著に日周、半日周気圧振幅が増大したことを報じております(第12図)。こうした事自体、dust stormと潮汐が深い関係にあるらしい事を示唆するものですが、私は現在、浮遊ダストとそうした潮汐成分の関係を調べておまして、ここで少し火星の熱潮汐のことを話してみたいと思います。今調べているのは、どのようなダスト分布の時に、また、どんな温度構造の下で、いろんな潮汐成

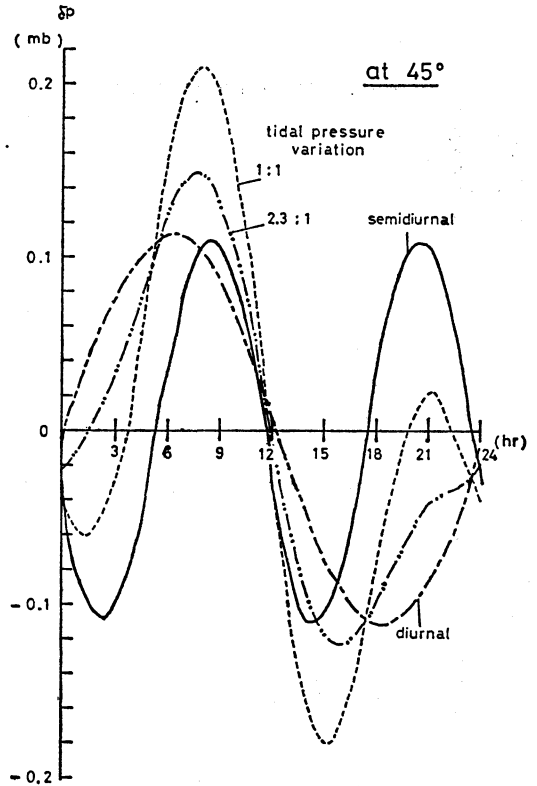


第12図 ヴァイキング1号着陸地点での大気圧の日周・半日周潮成分の変動 (Leovy and Zurek, 1979). 大ダスト・ストーム時での増幅に注意.

分がどんな振舞をするのか、という問題であります。そして分った重要なことを述べてみますと、例えば、大ストーム時に特に半日周潮が卓越すること (第12図) は、上空を大量のダストが流れて行くことで理解出来る (それは、卓越的な半日周潮^②の垂直波長が ~ 200 km もあって、いわゆる interference effect が日周潮のようにはそういうダスト分布では効かないから、地上で半日周潮が卓越的に現われると説明づけられよう) し、思っていたよりも熱潮汐で励起される風は大きいのだということでもあります。また、熱潮汐理論から予想される気象要素の振舞は、例えば大気圧の振舞を取って見てもかなりよく合っています (第2図 (b) と第13図参照)。

先述のように、私の計算で分って来たのですが、trapped components も含めた潮汐風は、ダストの大気加熱による励起によって、充分ダストの saltation レベルに達するように思えます。実はダストを火星表面から持ち上げるには、その摩擦速度として 2 m/s が必要といわれておりました、それを作るには free atmosphere で $20\sim 30$ m/s の風があれば良いということが、火星と同じ環境を模した室内実験から分って来ました。それ位の風は、 $\tau=1$ 以上で潮汐風で作ることが可能なのです。

おそらく、春から次第に dusty になって行く大気は、潮汐風の高まりによって、やがて saltation レベルに達することが出来るように思えます。要するに大気中にダストが増大する事によって、1つは高緯度方向での大循環規模の風の強まりと、1つは潮汐風の強まりによって、



第13図 熱潮汐モデルで計算した火星表面気圧の日変化。一点鎖線：日周潮成分、実線：半日周潮成分、点線：日周・半日周成分の励起が同等の場合の全気圧、一点鎖線：日周、半日周成分の励起が $2.3:1$ の全気圧。緯度 45° 、 $(1:1)$ ケースではダストによって太陽光の約 43% が吸収されている (Moriyama, 1981)。

ヘラスのような大盆地のある大斜面が saltation level に達するのでありましょう。そこでは強烈な風が吹き荒れ、大気中へ一挙に大量のダストを供給するのでありましょう。そうしたダストは上空を流れ、北半球へ流れ込みます。その事は先の半日周潮の増大 (第12図) で理解されます。ただ、そうしたダストの増大で温度分布が非常に安定化し、循環が下層では弱まり (変形し)、発生地地点でのダストの供給ストップと共に、decay phase へ移行するように思います。

現在考えておられますのは、山岳 (火星では波数 2 が卓越) と西方伝播する潮汐波との相互作用で 2 次モードが生ずるらしいのですが、それがどんなものになるだろうか、という事でもあります。既に、日周潮と山岳のカップリングということで Zurek (1976) が東方伝播的な

Kelvin diurnal mode の存在を予想する研究を出していますが、あの火星の大山脈と潮汐波の interaction は大変興味深い所です。

以上のような訳で、大砂嵐の発生が潮汐風を考えることで大前進しそうな所迄来た訳でありまして、私自身、火星のダスト・ストームの解明の手掛りがぼんやりと見えて来たような感が最近はしているのであります。今後、1つのシナリオを作ることと、そうした事を詰めて行くことを考えております。

最後に、学生時代から私の惑星大気の研究を励まし育てて下さった京大の山元先生、研究に協力して戴いた岩嶋さんをはじめとして、日本での惑星大気の研究を育てることに尽力下さっている気象学会の皆様、大型計算機の使用に言い知れぬ便宜を与えて下さった日大理工の三橋さんや、わが研究室の方々に深謝致します。

(後記) 講演では大幅な時間の削減のため話せなかった部分も合せて、本文に掲載した。