

## 火星の大気\*

—マリナーからヴァイキングへ—

森 山 茂\*\*

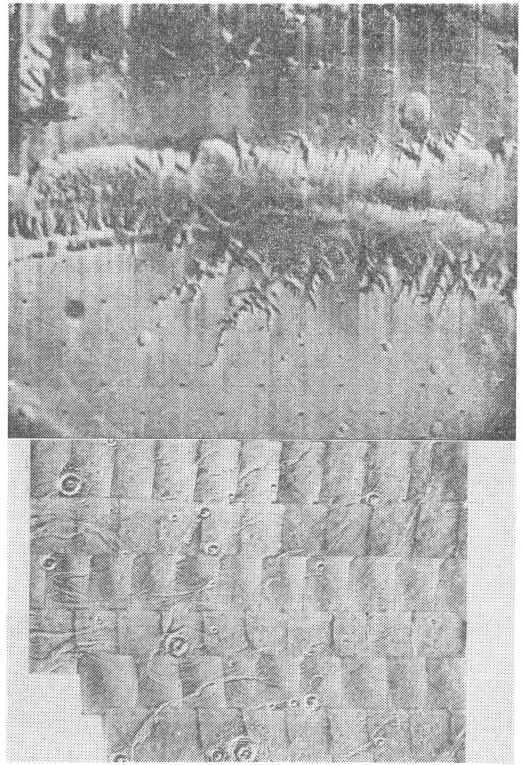
## 1. 序

1971年11月4日、火星周回軌道に入ったマリナー9号は、猛烈な砂嵐に見舞われている火星の姿を捕えていた。火星の表面から巻上げられた砂塵が、急激に発達したのち、遂には、全火星面を覆い隠してしまう大変な砂嵐になってしまったのである。この時、火星面の模様は、数か月間も続く大黄雲 (dust cloud) によって、殆んど姿を消した。不思議な事に、15年程に必ず1回現われる、この全球的な大黄雲は1956年の後、15年経って、マリナー9号の飛来した1971年の10月から数か月間、またまた出現したのである。この黄雲の層の高さは数10 km に及び、マリナーからは、高さ20数 km の大火山といわれるオリンピア山 (Olympus Mons) の頂上が僅かに望まれていた程だった。

しかし、その砂嵐も静まったあと、われわれの地球へ送られて来た火星表面、及び、大気に関する情報は、実に驚くべきものであった。日々変化してやまぬ細部の模様、クレーターから一定方向に強風で吹き流されている、吹き流し状の模様、火口の中の強風による規則正しい砂丘、局地的な砂嵐の頻発、波状雲……、どれを見ても、興味をそそるに十分なものばかりであったが、中でも、とりわけ最大の興味を引いたのは、何と言っても、水による浸食の跡としか思えぬ峡谷、細流の跡であろう。中でも、何千 km に渡る曲りくねった河の残骸や、巨大な峡谷に刻まれた支流の跡は驚く程のものだった (第1図)。火星にかつて河が流れていた! それも殆んど疑う余地の無い程に山を削り、谷を刻んでいたのだ。

けれど、現在の火星は、僅かに平均6.1 mb 程の CO<sub>2</sub> 大気しかなく、水蒸気は僅か数  $\mu\text{m}$ ~数 10  $\mu\text{m}$  (precipitable water) しか存在していない。更に、そのような

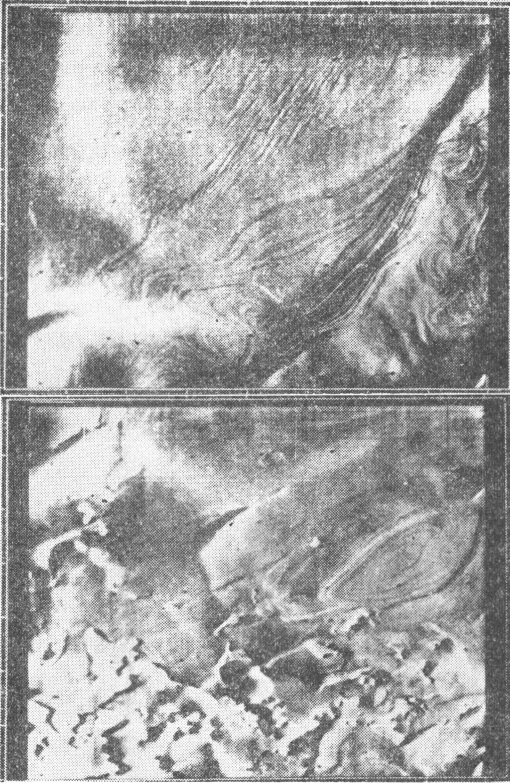
希薄大気では液体の水は存在できない。では、河を流れていた大量の水はどこへ消えたのか? 液体の水があったとは、今とは異なった 1 bar 近い濃い大気が、その昔、存在していたことではないのか? そのような、大



第1図 上：火星の巨大な峡谷と、その両側の水による浸食地形。東西 400 km、深さが 2 km と目される峡谷の両側にある樹枝状の浸食地形が、幼年期の支流系を思わせる。流水によって刻まれたものであろう。  
下：クリュセ着陸地付近のモザイク写真。左方に、水路が走っているのが見えている。

\* The Martian Atmosphere from Mariner to Viking.

\*\* S. Moriyama, 日大生産工学部 (習志野校舎)。



第2図 南極冠に見られる推積層。

幾つかの層が、何重にも年輪のように積重なっている。過去に何回かあった気候変動を暗示している。

気はどう変動して、現在の希薄な寒冷な、乾燥した大気になってしまったのか？ その気候変動のメカニズムはどうであったのか？ 火星の原始大気は、そもそもどんなものだったのか？ 水があったら、生命や、あるいは生命の発芽、生命の残骸でも存在しているのではないかと、気象学の問題のみならず、大気の進化や、生命の起源や、ひいては太陽系の起源へ迄も興味は拡大していった。

また、極冠には、明らかに何らかの気候変動の存在を暗示する、幾層もの年輪を持つ万年雪が見つかった(第2図)。これも、要するに火星は、その長い歴史において、幾度かの気候変動を経験してきたのだという事を示している。

こうして、1975年の晩夏、ヴァイキング1、2号は、それらマリナーのもたらした大いなる問への手掛かりを求めて、軍神「マルス」の赤い星へと旅立って行った。

## 2. ダストに満ちたピンクの空

1975年8月20日、地球を飛びたったヴァイキング1号は、約1年間の惑星間飛行ののち、1976年7月20日、クリュセ平原 (Chryse Planitia) に着陸した。着陸地点は、約  $22.5^{\circ}\text{N}$ ,  $48.0^{\circ}\text{W}$  の地点 (以後、VL1 と記す) で、季節は丁度北半球の真夏のシーズンである。

次いで、2号は、9月3日ユートピア平原 (Utopia Planitia) に軟着陸した ( $47.89^{\circ}\text{N}$ ,  $225.86^{\circ}\text{W}$ ; 以後、VL2 と記す)。

送られて来たパノラマ写真は、予想より100倍も明るいピンク色の空と、レンガ色に酸化された地面に、細かい赤いダストに覆われた岩石の散在する光景だった。火星には、全球を覆う大砂嵐もあれば、頻繁に発生している、局地的な砂嵐もある。しかも、重力が小さいため、1度舞上がると、なかなか落下することはない。かくて、大気中には常に、小さな粒子が多量に浮かんでいる事になる。マリナー9号の飛んで行った1971年には、砂嵐の静まる迄の約3か月間で、ダストの光学的厚さが2から0.2へと減少したが、ヴァイキング1号のカラー写真の解析では、波長  $0.67\mu\text{m}$  で、この厚さが依然として0.35もある事を示していた (Mutch *et al.*, 1976)。

現在の大气中のダストが、1971年の大砂嵐の名残りとしては、ヴァイキングの光学的厚さは大きすぎる。けれど、先述のように、局地的な砂嵐は、頻繁に起こっているので、空のピンク色は明らかに、大気中に大量のダストが、頻発する砂嵐の供給で、浮遊していることを反映している。地球大気の1/100以上の薄い大気中で、気体分子のレーリー散乱のみでは、100倍の明るさ、ピンクの空というような現象は到底説明がつかない。

粒子のサイズは  $1\mu\text{m}$  程で、また、ダストの光学的厚さにも明白な地域差が見られた (Mutch *et al.*, 1976)。同時にヴァイキング1号と2号の地点での波長  $0.67\mu\text{m}$  に対する測定では、その厚さが、それぞれ0.35と0.25であり (Mutch *et al.*, 1976)、かつ、VL2はVL1より低地という事を考えても、光学的厚さの地域差の存在には有意性があるようだ。

それにしても、大気中に平時でも、これ程の光学的厚さのダストが存在するという事は、放射的には希薄な大気より、むしろ、ダストの効果が卓越することを意味し、大気の温度構造や、熱潮汐や、全球的なダスト・ストームの発達機構に、地球の平生見られる大気現象とは異なった独特の特徴を与えている (Gierasch, 1974; Pirraglia・Conrath, 1974; Moriyama, 1976等)。過去

の  $H_2O$  の多い、濃い大気存在した時代を除いて、少なくとも、現在の火星大気は、かくも大きな光学的厚さを持つダストによる影響を、その種々の気象現象の説明に組込まねばならない程、ダストによって大きく特徴づけられていると言って過言でない。

以下、そのような現在、及び、過去の火星大気の問題を頭に浮かべながら、マリナー以後の重要な研究や、現在入手した限りでのヴァイキング1号、2号の観測結果を解説し、新しい火星像を提供しよう。

### 3. 火星の大砂嵐

火星の最も特徴的な、大気現象の1つである大砂嵐 (great dust storm) については、かなりの研究がなされている (たとえば、Gierasch・Goody, 1973; Golitsyn, 1973; Hess, 1973; Leovy *et al.*, 1973; Barenblatt・Golitsyn, 1974; Gierasch, 1974; Conrath, 1975)。この現象を完全に説明する為には、次のような、大砂嵐の特徴を総てうまく説明するような考察が必要である。

(1) なぜ、それが火星の近日点付近 (南半球の夏至近く) で発生するのか? でも、なぜ、それが毎年ではなくて、かなりの周期性を持って現われるのか? (2) なぜ、いつも決まって、その発生の源を、 $20^{\circ}S \sim 40^{\circ}S$  にある、Hellas, Noachis, Solis Lacus 地方に持っているのか? (3) どの位の大きさの風がダストを持ち上げ得るか? また、その風を起こすプロセスは何か? (4) どうして、その小さな砂嵐が、全球的規模に迄発達するのか? (5) どういうプロセスを経て、それが崩壊し、静まっていくのか?

典型的な大砂嵐は、次のように3つの段階に分ける事ができるだろう。(1) 明るい点が、先ず、Hellas-Noachis 付近に発生し、これはほぼ5日間のタイム・スケールで、おそらく、400 km 以下の直径のストームであろうが、夜間と昼間とで消長を繰り返して発達しようとする。(2) これは発達過程で、タイム・スケールとしては5日~30日程である。新しい所に、第2の明るい雲が発生したりする。先ず、雲は東西方向に広がり、火星をすっぽり取巻いてしまうのに20日とかからない。そして、20日~30日で、火星の大半が覆い隠される。(3) これは、崩壊過程で、そのタイム・スケールは50日~100日程度、極側から低緯度側へと、大気の浄化が広がって行く。

マリナー9号のTV観測や、赤外観測、それに電波掩蔽観測を総合すると、この時、ダストは高さ30~40 km に迄持ち上げられ、浮遊ダストによる強烈な太陽光の吸収加熱によると推測されるが、ほとんど、等温に近い

程の垂直温度分布になる。

この大砂嵐のメカニズムは、次のように要約しよう。

先ず、地面から砂を持ち上げるに十分な風速が必要である。この為の臨界風速としては、どうしても、30 m/s 位以上は必要であると見積もられている (たとえば、Hess, 1973)。こうした強風を作るためには、夏半球での大循環による風だけでは心許ないので、地形の効果や、熱潮汐による加速等があると考えられている。

こうして、ダストに満ちた小さなスケールの黄雲が発生する。頻繁に発生しているらしい塵旋風 (dust devil) は、こうしたものの1つで、やがて、ある条件下で発達するのであろう。後述もするが、ヴァイキングの地上観測機では17 m/s が最大風速であった。これは、ストームの発生には小さすぎる。

Gierasch・Goody (1973), Golitsyn (1973), それに Hess (1973) 等によって提案されているのは、1種のフィードバック・メカニズムで砂嵐を発達させるものである。そのエネルギーは、ダストを含んだ大気、強烈な太陽光吸収加熱である (光学的厚さ1.5位で、百数十度/日位の強烈な太陽加熱が起こる)。ダストに満ちた渦の中心核は、太陽光で強く加熱されて、そのまわりに渦流を引起こす。それは、地球の台風に似ていて、ただ、そのエネルギー源として、ダストによる太陽光の直接吸収を考えている点が異なる。この渦は、やがて、3日位で、30 m/s 程の風速を作る迄に発達しよう。こうした初期の渦が、壊れずにそのまま発達を続ける為には、その時の一般流が渦を壊さない程度に弱いものでないといけない、という条件が要る。また、ダストの多い所、及び、強い日射が要請されるだろう。要するに、ダストに満ちた何らかの小さな渦が、そうした条件下に先ず存在して、臨界サイズになると発達していく訳だ。渦の中では、エクマン層内で、サイクロニックな風の流入があり、それが垂直流を引起こし、ダストを持ち上げる。そうして、太陽加熱が温度を上昇させ、それによって、表面気圧の減少が起こり、更に、渦の強さが増大する。こうして、発達した渦は、やがてダストを成層圏迄巻き上げる程に成長する。その後、それらのダストは成層圏での一般流に吹き流され、広範囲に渡って拡散するが、下層へも沈降し、その事で逆に、水平方向の温度傾度が弱まり、ストームは崩壊してしまう。

こうしたモデルは、たとえば、どういうメカニズムで発達に要する臨界サイズ、及び、厚さを持つ黄雲を生じ

第1表 火星大気(地表付近)の組成.  
(Viking による)

CO <sub>2</sub>	~95%
N <sub>2</sub>	2~3%
<sup>40</sup> Ar	1~2%
O <sub>2</sub>	0.1~0.4%
H <sub>2</sub> O	0.01~0.1%
Ne	<10 ppm
Kr	<0.3 ppm
Xe	<1.5 ppm
<sup>36</sup> Ar/ <sup>40</sup> Ar	1:2,750±500
<sup>15</sup> N/ <sup>14</sup> N	1:160~1:200

させるかという点や、なぜ、毎年の近日点通過時には起こらなくて、かなりの周期的な出現をするのか、という点等で問題はありますが、現在知られている大砂嵐の特徴の大半を良く組込んでいる。後者の間は、おそらく、砂ぼこりに満ちた大気の安定度が関係していて、ある一定の大気の浄化期間を経ねば、発達に要するサイズを持つ黄雲が成長し得ないという事を意味しているようだ。

#### 4. 大気組成とその与えた問題

大気物理学者は、ヴァイキングの成果に大きな期待を抱いていたが、その中でも、次の3点が最大のものであろう。第1は、火星上を走る水路(channel)の成因について、その2は、極冠の氷の問題、その3は、原始大気の問題である。

ヴァイキングで、火星表面近くで観測された大気組成は、第1表の如くである(Metz, 1976等)。ここで注目されるのは、ArとNのアイソトープ比の大きさであろう。惑星形成の付着成長の段階から、微惑星との衝突、重力収縮、放射性元素の崩壊による加熱で、付着成長過程でできた原始惑星物質中の揮発性物質は脱ガスされ、原始大気を形成するようになる。火星においても、その歴史の初期に、こうした揮発性物質が内部加熱による脱ガスで絞り出されてきたと考えられる。けれど、その後、重いガスは地殻を形成している物質との化学反応で、あるいは凝結したり、凍結したり、あるいは吸着されたりして、大気から取除かれてしまう。一方、軽いガスは順次、惑星外へ逃出していく。ところが、希ガスは不活性ゆえ、化学反応で大気から取除かれてしまう事はない。そこで、希ガスの量は、惑星ができてから大気中にできたガスの全量を調べる目安として最適である。

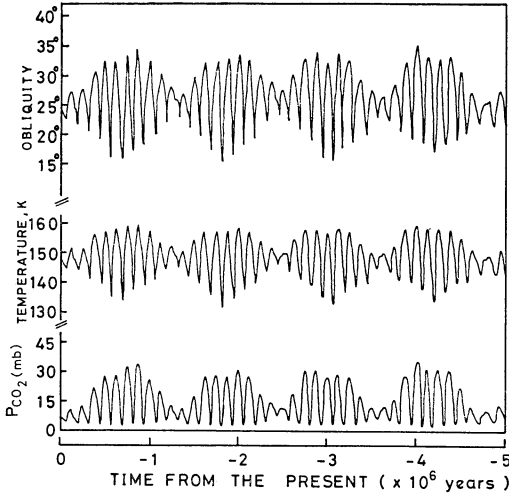
ソ連のマルス6号(1974年)は、35%というAr大気

の存在を報告したが(たとえば、Istomin・Grechnev, 1976)、これはヴァイキングによって、過大評価として退けられた。マルスが本当だったとすると、かつて大量の大気を持っていた事になるのだったが、実はArが2%しかなかったのである(Clark *et al.*, 1976等)。その殆んどは<sup>40</sup>Kの崩壊から生じた<sup>40</sup>Arなのだが、問題は、その1/2750±500という少量の<sup>36</sup>Arとの存在比である、地球の場合より1桁小さすぎるのだ。<sup>36</sup>Arは不活性で、しかも、非放射性元素ゆえ、火星内部からの脱ガス量の良い目安なのである。<sup>36</sup>Arが少ないことは、火星から放出された揮発性物質の量がそもそも少なかったからだという事で、Fanale(1976)の見積もりでは、せいぜい今の3倍程度の大気量しかなかった事になる。Owen・Bieman(1976)は、もう少し多く、それでも最大の見積もりで、今の10倍程の100mb位としている。どうか、流水を存在させ得る位の大気だったという事である。

ところが、<sup>15</sup>N/<sup>14</sup>Nの存在比の観点から見ると、これは逆に、地球に較べて約1.5倍も多い。このことは、Arの場合の解釈に対立して、原初には、現在の100倍もの濃い大気があったのだと説明された(McElroy *et al.*, 1976; Nier *et al.*, 1976)。<sup>15</sup>Nと<sup>14</sup>Nの質量の違いから、宇宙空間へ逃げる速度が異なり、原初にあったN<sub>2</sub>の中、<sup>15</sup>Nが相対的に、長い時間の後には増えたということである。<sup>15</sup>Nが多いことからの見積もりだと、総てのガスが1度に出たとして、CO<sub>2</sub>大気は1barに及び、水が火星表面の200mをカバーする位多量にあったということになる。

こうして、今の所、ArとNの解釈は1桁程、相異なった結果を出している。これを補おうと、いろいろな説が出され始めた。たとえば、清水(1977)は、隕石や木星等の例を挙げて、太陽系の外側の星は、超新星か何かの爆発で汚染されていて、火星大気生成期から、もともと<sup>15</sup>Nは地球より多かったとしている。いずれにせよ、この問題は、他の惑星や隕石等の中のアイソトープ比とも脱み合わせて、総合的な論争が行なわれる事になる。原始大気の起源の問題に、ヴァイキングが1つの重大な波紋を投げかけた事は間違いない。

しかし、どんなデータを見ても、それが、大きな海や湖を造る程でなかったかもしれないとしても、過去に水が流れていた事は疑う余地がないようだ。そして、いずれにせよ、今より10倍から100倍の濃い大気があったと思われる。こうした大気は、一体それでは、どこへ行っ



第3図 上：火星軌道面の傾きの永年変化による効果を入れて求めた、過去500万年間の自転軸の傾きの変化。  
中：それによる極冠の温度変化。  
下：大気圧の変化。

たのか？

### 5. 火星の気候変動

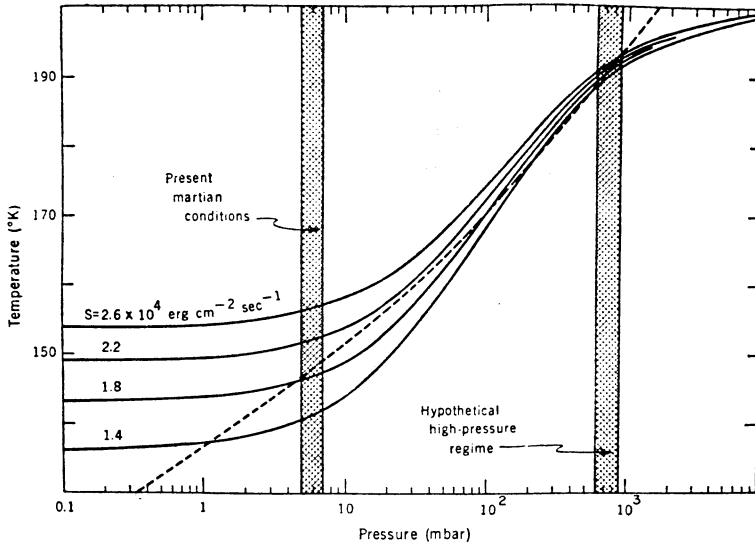
Fanale (1976) は、少なくとも、今大気中や極で見られる量の20倍の  $\text{CO}_2$  や  $\text{H}_2\text{O}$  が火星の地下に隠されている筈だと言っている。つまり、彼やその仲間、表層土1 km以上の厚さに、この  $\text{CO}_2$  や  $\text{H}_2\text{O}$  が吸着されているかも知れないとの見積もりを出した (Fanale・Cannon, 1971; Fanale, 1976)。日々の温度変化では、その表層のほんの数 cm 足らずの層の  $\text{CO}_2$  や  $\text{H}_2\text{O}$  が、昼間と夜間に周期的に出入りしているに過ぎない (これに関して、ヴァイキングの軌道周回船が、 $\text{H}_2\text{O}$  の日変化を強く示す地点を見つけている (Farmer *et al.*, 1976)) が、もし10万年オーダーの周期の変動で、じわじわ地面が暖められると、その影響は地下1 km近くに及び、そこから出されるガスは大気圧を上げ、温度を上げて、気候変動を引起こすことになる。極冠中に見られた万年雪の年輪は、そんな変動を反映しているかも知れない。

Ward (1973) は、離心率  $e$  と自転軸の傾き  $\theta$  の永年変化に注目した計算を行なった。極における日射強度は、 $e$  より  $\theta$  に大きく依存している。その  $\theta$  は、自転軸や火星軌道面 (特にその傾き) に及ぼす、太陽と惑星の力学的な摂動作用により変化を受ける。それを考慮す

ると、極での日射は  $\theta$  に対して、実に2倍も変動することが分かった (Ward, 1973)。その効果を加味して、極 ( $\text{CO}_2$ -cap) での放射平衡モデルで、気圧と温度の変化を計算すると第3図のようになる (Ward *et al.*, 1974)。ここで注目すべきは、上記の効果を反映して、2つの卓越周期、つまり12万年と120万年の2つの周期が出て来たことだ。気圧の最高が30 mbを越えるというのは、それだけでも驚く程の効果だが、このモデルには考えらるべきフィードバック・メカニズムが全く含まれていないから、実際には、もっと大量の大気圧になる筈である。更に、Fanale・Cannon (1971) 等の言うように、表層土中に大量に吸着されている  $\text{CO}_2$  や  $\text{H}_2\text{O}$  の放出を加味したら十分すぎる程のものになろう。彼等は、地下100 m~1 kmに吸着されている  $\text{H}_2\text{O}$  と  $\text{CO}_2$  が大気中に染み出すと、その量は何と、それぞれ  $1 \text{ kg/cm}^2$  (現在の大気中の  $\text{H}_2\text{O}$  は最大の所で  $0.01 \text{ g/cm}^2$ )、及び、 $400 \text{ g/cm}^2$  になると計算している。これだけの大量の水や  $\text{CO}_2$  が本当に表層土に吸着されているか、否かは、正確には分からないが、極冠と表層土中に、ともかくも、相当量の水がある事はヴァイキングの観測からも分かっており (後述)、どうやら気候変動の問題に対し、このような効果をフィードバック的に含めた詳しい計算が要請される。

更に、もう1つ、次の Gierasch・Toon (1973) や Sagan *et al.* (1973) の研究も注目されるので簡単に紹介しておこう。その要点は次のようである。

現在の火星の大気量は小さいので、大気の熱輸送が極冠を暖めるのには効果がない。しかし、太陽放射による極の加熱が何らかの理由で増せば、極の温度は上がり、極冠中から揮発性物質が大気中に昇華して、大気密度が上がる。これにより、極への顕熱輸送効果が効き始め、極での熱収支に大きな影響を与える事になる。だから、たとえ、太陽放射加熱の増加が無限小過程であっても、そのような不安定化メカニズムは、初期状態とは全く違った大気状態へと、火星大気を導く事になる。また、現在の大気圧を決定しているのは、最も冷たい地域、つまり極冠上での  $\text{CO}_2$  の蒸気圧と大気圧のバランスであって、このことは、全シーズンを通じて  $\text{CO}_2$  ice が幾らかある限り、極冠面積には依らない。問題なのは、これらの領域での熱収支である。そこで、彼等は太陽放射の吸収、大気からの熱放射、極冠からの赤外放射、顕熱輸送を考慮して、極冠、及び、極での大気自身の熱収支の式を解いて、第4図で示されるようなダイアグラムを導



第4図 極冠で吸収される太陽エネルギー ( $S$ ) の変動と、極での平衡温度、及び、大気圧のダイアグラム。  
極方向への大気による顕熱輸送効果を、フィードバック的に考慮して求めたもの。点線は  $\text{CO}_2$  の蒸気圧曲線。気候学的に安定な解は実線と点線の交点上で生ずる。3点で交わる場合、真中の交点は不安定で、そのような気候は実現しえない。

いた。このダイアグラムは、 $S$  と  $\text{CO}_2$  の蒸気圧曲線の交点が示す大気圧・温度のみが、気候学的に安定状態にある事を示す。現在の  $S$  は  $1.8 \times 10^4 (\text{erg}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  で、この時の交点は表面気圧 4.7 mb, 温度 146K を示して現在値に極めて近い。ところが、何らかの変動で、極で吸収される  $S$  の値が20%増加して、 $2.2 \times 10^4 (\text{erg}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  になると気圧 0.8 bar 迄、安定な極冠を持つ解がない事になる。更に面白い事に、このダイアグラムは、現在値と 1 bar 近くの大気圧が、現在の  $S$  に対して、気候学的には安定だという事を示している。少なくとも、40 mbar で赤道帯に流水が可能と言われているから、かくて大規模な気候変動のあった事は十分可能である。

ところで、 $S$  は、

$$S = \frac{S_0}{r^2(1-e^2)^{1/2}} \cdot \frac{\sin \theta}{\pi} (1-A) \quad (1)$$

と表わせる。ここで、 $S_0$  は太陽常数 (at 1 A.U.),  $r$  は火星の軌道半径、 $A$  はアルベドである。ところで、この中、 $S$  を20%増すには、天体力学上  $r$  と  $e$  では無理がある。これらは、そんなに迄変化できない。結局、 $\theta$ ,  $S_0$ ,  $A$  の変動が一番問題となって来る。先にWardの計算の所で述べた如く、現在の  $\theta$  値 ( $\theta=25^\circ$ ) が  $31^\circ$  に

なれば、それだけで  $S$  は20%近く増す。軌道面の傾きの効果を入れると、第3図のように  $\theta$  は、 $14.9^\circ \leq \theta \leq 35.5^\circ$  を10万年オーダーの周期で変わるので、 $\theta$  だけからも10万年周期での気候変動が誘起される可能性がある。また、 $S_0$  は1億年以上の変動に効くかも知れないと言われているが良く分からない。

ところで、最も鋭敏に、もっと短周期的に効くのは、アルベドの変化である。もっとも、緩和時間から見て、Gierasch・Toon (1973) の計算では、最低75年以上の周期を持つ変動がアルベドに対し起こらねば、現存の大気は不安定化できない。だから、頻発する砂嵐くらいでは他の大気状態へ突っ走り得ないのだが、それ以外に、アルベドへの何らかの変動メカニズムがあり得る事は十分考えられる。実は  $A$  が0.77から0.72になるだけで、 $S$  が20%も変動するゆえ、地球ならこの位は人為的原因で一変しうるに可能な値で、火星と地球とは異なるとはいえ、何か恐ろしい気がする。

以上のモデルはもちろん、まだ簡単なものだし、極から無尽の  $\text{CO}_2$  が供給されるとか、熱平衡の状態が現況から遠い場合にも、それに対応した処理が大気の熱輸送や、温室効果に対し十分になされてない等、いろいろな

問題はあがるが、非常に重要な示唆を含んだ、1つのフィードバック・モデルではある。今後、更にヴァイキングのデータを使って、詳しく改良されるだろう。

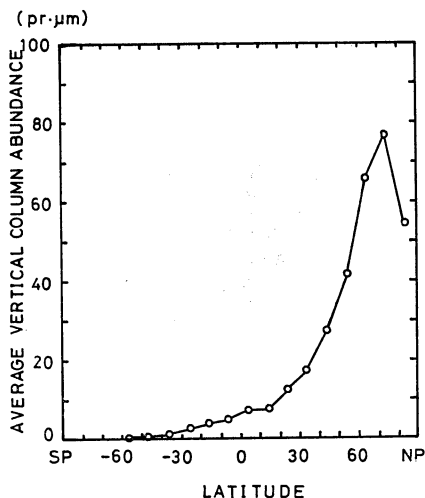
最近、Hays *et al.* (1976) が、氷河期の原因を地球軌道の変化に関するミランコヴィッチ理論で良く説明しようとした論文を出しているが、火星といい、地球といい、軌道要素と気候変動の関連は、考えられていた以上に深いのであろうか？

また、こうした気候変動が、その1部でも太陽活動に依存すれば、実は地球も火星も同じ時代に気候変動を受けた可能性を持つ事になる。そして、気圧の薄い火星の方が、より顕著な形でその変動を表現しているかも知れない。火星の気候変動は深刻である。火星の気候変動は案外、地球の問題と無縁でなかった事が将来示されるかも知れない。というより、太陽系全体に、かつて、何回か、何かの普遍の変動が起こった事があったという事が示されるのでもあろうか……？

## 6. 夏の北極冠の問題

1976年9月30日、ヴァイキング2号は夏の北極冠の全域を視野に納めるべく、その周回軌道を修正した。既に、冬の南極冠はドライアイスである事を、ヴァイキング1号の赤外温度測定で確認していたが（後述）、真夏でも残存する永久的な極冠の正体が、まだ知られていなかったからである。冬にはドライアイスが凍る程寒くなるのだが、日射も強く、地球の2倍近い長さの真夏にも消えずに残っている白い極冠の正体は何か、ということが問題だった。ジェット推進研の C. Farmer のチームが、 $H_2O$  の全球的な分布図作りを担当し、UCLA の H. Kieffer のチームが温度分布図を作製した。その結果、 $H_2O$  の濃度が極に向かって増し、どうも極にそのソースがあるらしい事を突き止めた (Farmer *et al.*, 1976)。第5図に、 $H_2O$  の緯度分布を示す。これによると、北半球の真夏 ( $L_s \sim 108^\circ$ ) で、 $70^\circ N \sim 80^\circ N$  の緯度帯でピークがあることを示している。そして、真冬である南半球より3オーダーも夏半球に  $H_2O$  が多い。更に、夏の高緯度、特に  $40^\circ N$  で急激に  $H_2O$  の量が増加している。

これは、ある意味で凍土層が火星全域にあることを暗示するかも知れない。1つの考えでは、年周的な変動に依らない永久凍土層の上に、季節的なサイクリングに加わる凍土層 (tempofrost) があり、寒い冬期には赤道を除く全域に広がり、春が始まり夏になると、この tempofrost は大気中へ、その  $H_2O$  を放出しつつ極方向へ移



第5図 経度  $180^\circ W$  上での水蒸気の緯度分布。水蒸気量は緯度  $10^\circ$  毎の平均値を示し、12時から14時の観測で得られたもの。季節は、北半球の夏 ( $L_s \sim 108^\circ$ )。

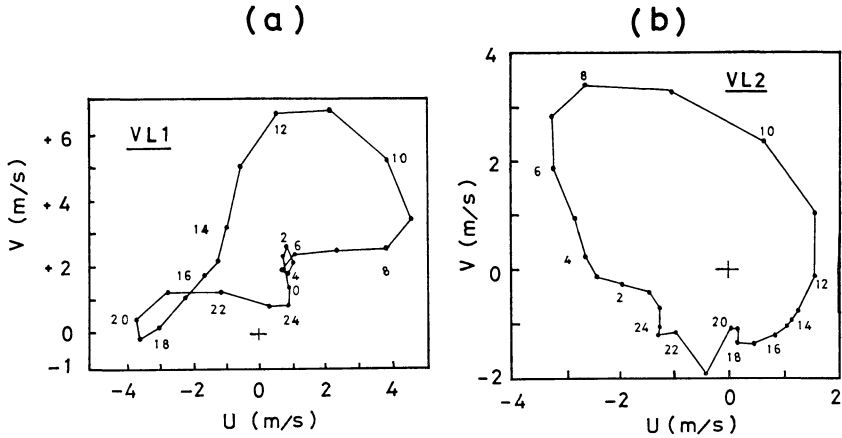
動するという説明である (Farmer *et al.*, 1976)。

また、ヴァイキングの軌道船による、大気や表面からの放射、及び、反射光の観測 (Kieffer *et al.*, 1976) から、夏の北極冠に依然として残存している極冠の温度は  $205 K$  で、そのアルベドは43%である事が分かった。また、その極冠周辺にも点々と、パッチ状に散在する小さな白い堆積物も、どうやら、ダストで汚れた氷らしい事が確認された。結局、夏、永久的に残存している極冠の温度  $205 K$  は、 $CO_2$  の凍結温度  $148 K$  よりも、また、 $CO_2 \cdot 6H_2O$  の  $155 K$  よりも余りに高すぎ、それらは夏には持ちこたえられない。こうして、北極上での多量の  $H_2O$  の確認とその温度とから、ドライアイス残存の可能性は否定された。

また、そのアルベドが純粋の水 (=0.7) より小さいのが目を引いた。これは、ダストが、秋と冬に存在する強い極方向の風で運ばれたものか、大砂嵐で運ばれたものである事を示している。

また、極付近に  $H_2O$  の雲の浮かんでいるのも見つかっている。これは高度も低く、薄いものだが、ともかく、下層大気が  $H_2O$  で飽和している事を示すと思われる。

では、その厚さはどの位かという事になるが、太陽光を下迄透さぬ数 cm の厚さから、クレーターの深さからの推測での  $1 km$  位という値が考えられる。もし、中

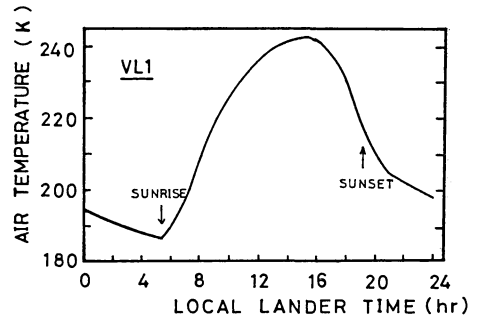


第6図 各着陸地点で観測された風の hod グラフ。(a) ヴァイキング1号, (b) ヴァイキング2号。各点の数字は時刻を示す。

間の 10 m の厚さとする、これだけでも、全火星大気中にある H<sub>2</sub>O 全量の 1,000 倍の水が存在している事になる。とにかく、大量の水が極にある事は間違いない。では一体、こうした極や凍土層としての氷の「貯蔵庫」は、前章で考えた気候変動を考える上で、現在、大気中の H<sub>2</sub>O に対して source になっているのか、sink になっているのか？ 今の所は分からないが、将来の観測に期待する重要な問題である。

ところで、もう一つ、ヴァイキング2号の周回船から撮った700枚の高分解写真は、北極地方に広大な氷の層状の推積層の存在を示している。そして、その層状が形態学的に見て、均一でなく、かなりの不均質性を示している。これは、それらが推積する期間の気候変動、それもかなり複雑な気候変動の歴史を受けたらしい事を示している。これは、マリナー9号でも南極に発見されて、気候変動の存在証拠として注目されていたものである(第2図)。

Cuttes *et al.* (1976) は、2つの異なった周期の気候変動を含む、こうした北極冠の形成過程に、地質学的な1つの仮説を打ち出している。彼等のモデルでは、地質学的に推測される気候変動の1つは比較的短周期で、それは写真で見られるように、厚さの等しい層状の推積物を形成する変動が繰返しあった事を先ず示している。そして、その後、その推積層は浸食を受けたらしいこと、そして、更に再び、先程のような、短周期の層状推積物の形成時代が繰返しあったこと、更に、最後にもう1回、別の浸食作用があって、現在見られる古い推積層と



第7図 VL1 での観測データから求められた気温(高さ=約1.6m)の日変化。

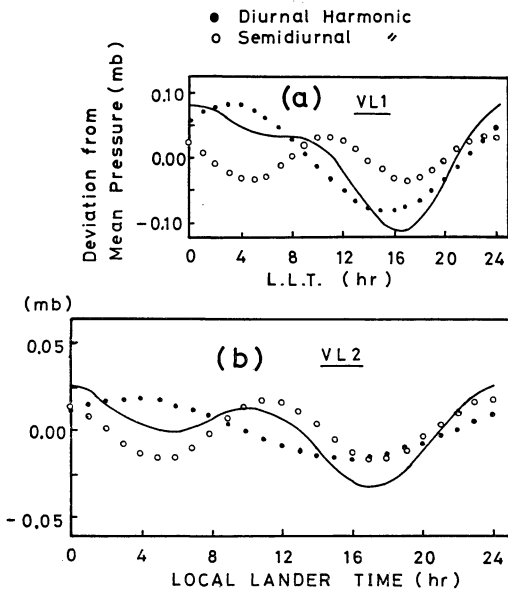
新しい推積層の混在地形の存在が見られるようになった事を示している。

この地質学的な北極冠の形成のモデル化からも分かるように、1つは層状推積層を作る周期的変動(10万年オーダー?)と、1つは、それより2~3オーダー長い周期で起こる変動で、急激に1つの推積期から、1つの浸食期へと環境が変化するような気候変動があったらしい。でも、いわゆる、河による浸食の示す気候変動と、北極冠から推測される気候変動とが、直接的に結び付くか否かは良くは分からない。

7. 着陸船による気象観測

ヴァイキング1号の着陸船に積んだ気象観測器からの報告は次のようである。先ず、Hess *et al.* (1976) によって初めの20 sols についての解析がなされた(1 sol は火星の1日の長さを示し、24.660時間に対応する。sol 0





第8図 気圧の1日周期成分(黒丸)と、半日周期成分(白丸)、及び、それらを合成したものの(実線)。(a)はVL1、(b)はVL2での結果。CO<sub>2</sub>の凍結による大気圧の漸減効果は除去して解析されている。

を着陸の当日として数えている)。それによると、温度、風、気圧とも、日々のパターンは、その20 solsの間非常に良く似たパターンを繰返していた。火星表面上1.6 mでの1日の最高気温は、VL1で15時に231.8 K、最低は日出前の5時に187.2 Kを示した(第7図)。最高気温が15時に現われるのは、昼、地表面からの顕熱輸送が盛んに行なわれ、その影響が後へ続く為と Hess 等は説明している。

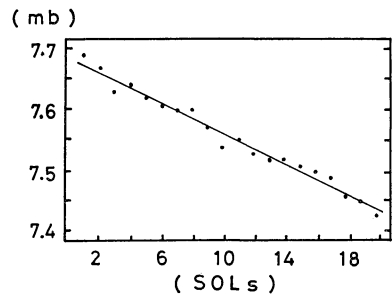
風向は南風が卓越していて、1日の平均風速は2.4 m/sであり、風の hodograph を書くと、1日に反時計まわりに日変化を示す(第6図a)。気圧は1日、及び、半日周期の振動成分を顕著に持っている(第8図a)。半日周期成分は、太陽潮汐の半日周期潮に帰せられるようだが、1日周期成分の方は複雑である。

地形による効果を受けないと、西進的なグローバル・スケールの気圧の太陽日周潮で、VL1の緯度では、気圧の最小と東西風の最大とが位相的に一致し、hodograph も時計回りになると予想される。しかし、第6図aと第8図aから分かる如く、実際は、それらが120°の位相のずれを示していて、hodograph も反時計回りである。

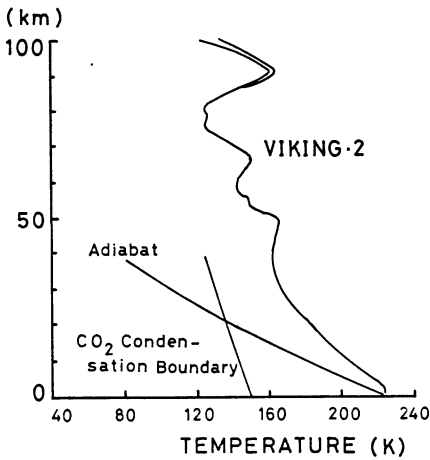
1977年4月

この解釈として、Hess等のチームは、少なくとも2つの要因が、VL1の気圧と風の日周期成分中に働いていると考えているようだ。つまり、気圧振動を支配しているのは、おそらく、グローバル・スケールのモードであるだろうという事だ。もし、そうでないとすると、気圧傾度が大きくなり過ぎて、風速の日周期成分の振幅が観測値よりもっと、ずっと大きくなる筈である。しかし、風の日周期成分の方は、グローバルなものよりは振幅の小さな、局地的な気圧振動で、主に支配されているのであろうと思われる。この局地的な気圧振動の方は、振幅という点ではグローバル・スケールの気圧振動よりは小さいが、風速を支配する気圧傾度の方は、それが小スケールであるがゆえに大きくなる。この風の方を支配する、局地的な気圧振動は、クリュセ地方のかなり大きな地形の傾斜と関係していると予想される。現実の地形効果を入れた火星大気大循環モデルでの数値実験でも、結果の hodograph はヴァイキングのものに類似していて、これを支持しているようだ(Pollock et al., 1976)。要するに、地形が風の日周成分に大きな影響を与えているらしい。VL1で見られる日周期的な風の振舞は、地球上での大きな斜面を持つ地方で見られるものに近いといわれる。更に、この気圧の日周潮成分中に、東方伝播的な、Kelvin 日周モード  $S_1^{1-1}$  が含まれている可能性も、また、大いにあり得る。このモードは、火星では、大規模な特に波数2を持つ山岳分布の下で、共鳴的に強く励起される筈だと Zurek (1976) は指摘している。

ところで、特に注目すべきは、日平均気圧が連続的にずっと観測期間中減り続けている事である(第9図)。これは、冬の真最中の南極で、大気の主成分たる CO<sub>2</sub>



第9図 1日平均した大気圧の漸減現象(VL1)。実線は、これらの最小2乗曲線で、次の様な関係式になっている： $p = 7.6844 - 0.0122n$  ( $p$ : 気圧(mb),  $n$ : sol)。



第10図 ヴァイキング2号の降下時に見られた、大気の垂直温度構造。比較のために、大気の温度が乾燥断熱的に減少する場合と、各高度でのCO<sub>2</sub>の凍結点も図に示してある。

が、大気から直接凍っている為の減少と思われる。

また、ユートピア平原に降りたヴァイキング2号の気象測器からの速報が出されたが、それによると、VL1同様、温度、風、気圧とも、やはり、その日変化は同じパターンを繰返した。1日の最高気温は平均して午後3時頃に現われ241 K、最低気温は日出3時間前の191 Kであった。風はVL1同様弱く、平均して南東の風0.7 m/sで、風の最大振幅で3 m/sであった。風のホドグラフはVL1とは逆に時計回りである(第6図b)。

VL1, VL2共、19時頃の風向が斜面上向きであったのは注目される。斜面が最高に熱せられている間、風は上向きに加速され、その6時間程後に、風の斜面向き成分が最大になるだろうという理論に、良く合致している。また、予想されていたように、日出後すぐ、日射の影響で接地境界層内で対流不安定が起こるので、風が乱れ、風向、風速の乱れは午後遅く迄続く。最高風速は17 m/sを示したが、これはダストを巻上げるには小さすぎる。またVL2でもVL1同様、気圧が日々減少し続けている。やはり南極冠でのCO<sub>2</sub>の凍結による質料損失で、大気圧が漸減するという予測を裏付けている。

VL1よりその振幅は小さいが、VL2でも、顕著な気圧の日周期成分・半日周期成分を見出した(第8図b)。半日成分は、VL1との比が幾分子予想値よりVL2で大きい、波数2の西方伝播モードたる太陽半日周期

潮 S<sub>2</sub>モードである事は、ほぼ間違いないと解釈されている。

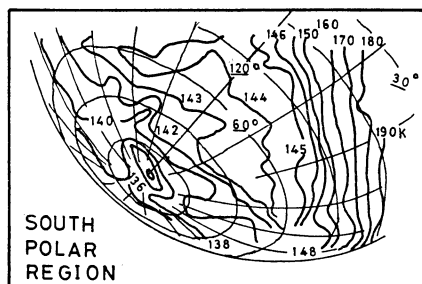
こうして、VL1, VL2とも夏半球の火星面上での観測をやったのだが、驚く程毎日毎日の同じ日変化パターンの繰返しは、これ迄予想されていたように、夏半球では、規則正しく毎日繰返す日射の効果が天気の支配に卓越し、また、水平方向の温度勾配や風が小さくて、種々の不安定現象を起こすのに十分ではないためと考えられる。一方、大循環モデルや、マリナー9号による報告では、冬半球の風系は夏半球のそれとは大いに異なっている事が分かっている(火星大気大循環の研究については、Leovy・Mintz, 1969 や Pollack *et al.*, 1976 等参照されたい)。

### 8. 大気の熱的構造

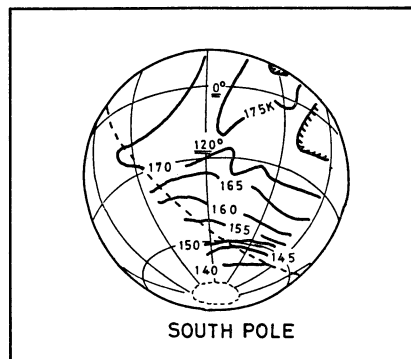
着陸船が大気中を降下する際に測られた、火星大気の測定データ(温度・気圧・密度)によると、下層大気(1.5~4 km)で朝方、等温層が生じている事が分かった。ヴァイキング1号による下層大気の垂直温度減率は-3.7 K/km(午後)、2号では-1.3 K/km(午前)である。つまり、朝方はまだ夜間の放射冷却の影響が残っているので減率は小さく、午後大きいのは日射による効果が地面から伝わって来る為であろう。また、2号では5~19 kmでも-1.8 K/kmと、安定な成層をしている。

これ以上の高度では、VL1, VL2共に、温度分布は平均値のまわりを振動する分布を示し、高さと共にその振幅は増し、90 kmでは約25 Kにも渡るウェーブ構造をしている(第10図)(Seiff・Kirk, 1976)。こうした上層大気の熱構造は、Zurek(1976)による垂直伝播性の日周期的な熱潮汐モデルの予測と、定性的に一致している。こうした垂直方向の温度分布に振動が現われるのは、要するに、熱的な要因で励起された振動が垂直方向に伝播する時、交互に大気が収縮、膨張する訳で、それによる加熱、冷却が伴うためである。データでは、その波長は17 km~23 kmである(理論では22 km~24 kmとなっている)。第10図から分かる如く、いずれにしても、大気の温度分布は非常に安定であり、下層(地表)で起こった、日周期的な加熱効果の上方伝播を容易にし、また、それは放射効果によって主として生じられ、それに大気中のダストが関与している事は間違いないであろう。

ダストによる大気の熱的構造への寄与の重大性は、周回船による赤外温度測定器による大気温度の観測からも



第11図 20  $\mu\text{m}$  帯で観測された南極域での輝度温度. 太い実線は、温度 (K) を示す. 緯度、経度を示す数字には、下線が引いてある.



第12図 0.63 mb 付近 (成層圏) の大気温度. 点線は明暗境界線 (夜明け) を示す.

分かった (Kieffer *et al.*, 1976). それによると、VL2 の高度20数 km の所での温度の日較差は、15 K の値を示している。ダストを入れない放射・対流平衡モデルや潮汐モデルの計算では、この高度では、そんなに大きな値にならない。VL2 での夕暮時の大気の明るさの観測からも、1  $\mu\text{m}$  程のダストが、少なくとも 30 km 迄は浮かんでいる事が分かった。大気温度減率が極端に小さい事や、20 数 km の高度での大きな温度の日較差は、筆者によっても指摘されたように (Moriyama, 1976)、ダストによる放射効果が、下層大気の温度の構造に決定的な役割を演じている事を示している。

また、第10図に示されているように、温度は  $\text{CO}_2$  の凍結点よりかなり高かった。この事は、少なくとも、夏の中緯度迄に見られる雲 (赤道地帯では広い領域で波長 10 km 程の波状雲も発見されている) や、朝霜 (クレター内で写っていたりする) (Corr *et al.*, 1976) は  $\text{H}_2\text{O}$  と思われる。こうして夏半球は、次に示す冬半球とは大気大循環の様子はもちろん、熱的構造もまた大変異なっている。

なお、ヴァイキングの着陸地点での火星の表面温度は、1日で、VL1 で 183 K~263 K、VL2 で 183 K~268 K の間を変化する (Kieffer, 1976)。

### 9. 真冬の南極域

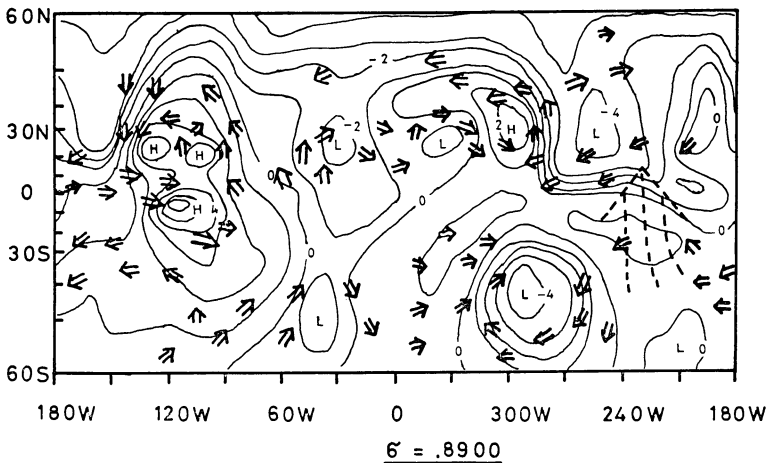
Kieffer *et al.* (1976) のチームは、火星表面や大気からの熱放射、それに反射太陽光のデータから、火星大気及び表面の温度地図を作った。これにより、かなり広範囲に、かつ小さなスケールの地域迄含めた、全球的な温度構造が明らかにされた。個々に詳しく見ると、熱的な様子は単純一様なものではなくて、詳細な表面の構造

や、雲の存在とかの付加的なファクターを含めて考えないと、個々の地域の温度構造を論じる事はできないのが分かる。

特に注目すべきは、南半球の極夜の領域が、ドライアイスのできる温度より、遙かに低い温度を示している事だ (第11図)。冬半球の極域の温度分布を見ると、50°S で既に約 148 K ( $\text{CO}_2$  の凍結) に達する訳だが、冬の低緯度から高緯度への南北温度傾度が、予想はしていたが凄く大きいのが目につく。そのあと、70°S を中心に、143 K~145 K の広い領域が見え、極で特に 134 K というような低温が出ている。この図の極を取巻いて、低温部が波状を描いている様子は、地球の冬の循環パターンに良く似ている。

これらの温度地図は、波長 17.7  $\mu\text{m}$ ~24  $\mu\text{m}$  帯で測定したものだが、14.56  $\mu\text{m}$ ~15.41  $\mu\text{m}$  帯でも同時に温度が測られている。この波長域は、主に、0.63 mb レベル (成層圏領域) 付近の大気放射温度を反映する。先の 20  $\mu\text{m}$  帯の測定で、その温度が 143 K~145 K だった地帯付近では、15  $\mu\text{m}$  帯での測定は 165 K~145 K (以下) へとゆっくり降下している (温度が逆転している事に注意) (第12図)。20  $\mu\text{m}$  帯で 141 K 以下の出た極付近では、15  $\mu\text{m}$  帯の測定温度は 145 K から 130 K へと落込んでいる。15  $\mu\text{m}$  帯の測定誤差は、140 K 付近の温度に対して、5 K 近くになる事を考慮しても、以上からどうやら、冬の南半球の 70°S 以上では、上空でドライアイスができる温度になるらしい (ちなみに、0.63 mb レベルでの  $\text{CO}_2$  の凍結点は 136 K である)。

ところで、地表近くで、ドライアイスのできる温度は、気圧 6.1 mb に対して 147.7 K であるのに対し



第13図 山を入れた、火星の大気大循環数値実験の結果の1例。  $\sigma=0.89$  レベルでの風向を実線の矢印で、また、赤道を越える上層気流の存在する領域を点線の矢印で示した。いずれも、時間平均したもの。細線は、このモデルに用いられた火星の山の、1 km 毎の相対的な等高線を示す。

て、 $20\mu$  帯の測定はそれより 10 K 以上も低い温度を示している。なぜか？ 134 K というと、約 0.46 mb レベルの高さ (19 km) での  $\text{CO}_2$  の凍結点に一致する。ところが、極がそんなに高い山の上にある筈もないし、そこでの放射率が低かった筈もない、というのは、温度測定で南極帯が  $\text{CO}_2$  で覆われている事は明白だし、ドライアイス放射率が 0.58 しかないというのは考えられないからだ。更に、極付近が低圧部だからというのも考え難い。どう見ても、気象力学的なプロセスでは、極での気圧を 1 mb 以上下げるなど不可能である。

そこで、19 km 付近に  $\text{CO}_2$  の雲があって、そこからの放射を見ているのだという考えが強い。先程述べたように、 $15\mu$  帯での測定では、 $70^\circ\text{S}$  以上では十分  $\text{CO}_2$  の雲が可能だからだ。現に、冬の極冠上にはヘイズがかかっている事が多い。

それと、もう一つ、次のような面白い考え方もある。つまり、 $\text{CO}_2$  が大気から凍って落ちてしまうため、Ar,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  のような非凍結性ガスで大気が薄められて、局所的に、極では  $\text{CO}_2$  の分圧が低下するからだという説である (Kieffer *et al.*, 1976)。  $\text{CO}_2$  の凍結が表面近くで起こると、非凍結性ガスの濃度が、非常に短時間に増す。たとえば、下層 100 m の気柱内に存在する非凍結性ガスは、試算によると低緯度からの補充を入れても、10日で16倍にもその分圧を増す事ができる。大気組成の

5%は、Ar や  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  等で占められているから、これは一挙に、 $\text{CO}_2$  分圧が全体の20%に迄落ちてしまう事を意味する。これ位の分圧になると、 $\text{CO}_2$  の凍結点は 137 K となるので観測を説明し得ると言う訳である。

どうやら、以上から、火星の夏も消えずに残っている永久的な極冠は  $\text{H}_2\text{O}$  であり、その上に、冬、ドライアイスが大気から凍って、中緯度帯に迄極冠が広がるという、よく言われてきた極冠説が正しかったようだ。

#### 10. 終わりに

こうして、火星大気の最近の話題を、マリナー9号以後ヴァイキングに迄、書き綴って来た訳だが、実に、この10年足らずの間の火星大気物理学の進展には感慨深いものがある。非常な細部に迄、定量的な計算がなされ、火星の大気現象が解明されようとしている。今日の大気物理学が創り育ててきたいろいろな知識が、火星大気分野にフルに応用・活用され、試されている。ここ迄読んで、気付かれる向きも多いと思うが、ある意味では火星の気象学は、平生における地球のそれとはまるで異なった、特異な現象が卓越している反面、その大気進化、気候変動などでの示唆も多いと思われる。われわれの気象学も惑星気象学を足場に、時間においても、空間においても、実に巨大なスケールに広がり、今、それへの対応が要請されている。

まだ、たとえば、山岳波 (lee wave) や、20数 km の

山岳、大陸規模の斜面が存在する火星上での境界層や、斜面風の話等でも重要な研究がある(たとえば、Blumsack・Gierasch, 1972; Blumsack *et al.*, 1973; Pirraglia, 1976)が、その他、紙面等の都合で省略したものも多い。

最後になったが、最近、Pollack *et al.* (1976)が、こうした火星の地形も含めた、大気大循環数値実験の報告を出しているので簡単に紹介しておこう。モデルは、Leovy・Mintz (1969)によるものを発展させたもので、山岳、 $H_2O$ の雲、地表面アルベドの変化等まで組込まれた、Arakawa-Mintzによる $\sigma$ 座標系の3層モデルである。もちろん、極での $CO_2$ の大気からの直接凍結効果も含まれている。これはヴァイキングが到着する季節での大気大循環の様子を予測しようとして実行され、北半球の夏( $L_s=90^\circ$ )を中心に数か月間に渡って計算が行なわれている。

第13図に、時間平均した風の場の結果の概要を示した。こうした定常波は主に山岳によって作られ、アルベド変化は殆んど影響しないという。これを見ると、オリンパス山(Olympus Mons;  $20^\circ N$ ,  $130^\circ W$ )付近と、Syrtris Major ( $30^\circ N$ ,  $300^\circ W$ )付近という波数2を持つ山岳分布の高地点に、熱的に励起された低気圧パターンが見られる。また、冬の南半球には、 $150^\circ W$ に高気圧的循環、ヘラス大陸(Hellas;  $290^\circ W$ )近くに低気圧的パターンという風に、大きな振幅を持つ長い波動が目につく。更に、その詳細はここには示していないが、上層(1.87 mb レベル)の $230^\circ W$ 付近に、強い赤道を横切る流れが存在している(第13図の点線参照)。更に、Hellas 上空での低気圧性パターンを除いては、冬半球中緯度上層で見られる大きな定常的パターンは、主に、赤道付近にある山岳によって熱的に励起されたものと、強く応答しているという。地形効果は、こうして大きな影響を与えているらしい。

だが、帯状平均場は大筋では山岳等を入れても、以前のLeovy・Mintz (1969)による結果と大変良く似ていた。また、もちろん、 $CO_2$ の凍結による大気圧の漸減も見られている。

彼等の大循環モデルには、これ迄述べてきたところから明白なように、その効果が火星では重要であると見られる。土中の $CO_2$ や $H_2O$ の大気との相互作用や、大気中に大量に浮遊するダストによる多重散乱の効果が含まれていない。われわれは、最近、こうした点も含めて、特にダストの放射効果を取入れた火星大気大循環

の、スペクトルモデルによる数値実験に取り組み始めた(森山・岩嶋・山元, 1976)。通常の格子点法によるモデルに比べて、非線型計算不安定が回避できる事や、計算機の容量が少なくても良い等、スペクトル法はいろいろな利点もあり、火星では初めての試みでもある。

ヴァイキングは、生命探査をその主要な目的に据えていた。しかし、報道されているように、3つの生命探査実験からは、火星上での生命の存在について何の結論も得られていない。こうして、生命存在の可能性に賭けた人類の夢は、これからの実験に持越されようとしている。

この報告のうち、ヴァイキングについては、「Science」のヴァイキング特集の第3報迄を主にまとめたもので、もちろん、今後も続々と楽しい結果が出される筈である。

それにしても、今、私の手元にある火星の夕暮れ——今まさに陽の沈まんとして、暗い空に、太陽のある地平線のみピンクに染まった夕空の光景は、何と幻想に満ちたものであろう。1976年8月20日、クリュセ平原に沈み行く夕陽の光景を、ヴァイキング1号の着陸船が撮ったものだそうである。そうした写真を届けられないのが残念である。地球を遠く離れて、遙かな星の夏の夕暮れに、自身が立っているという底知れぬ遠い幻想に捕われる。

## 文 献

- Barenblatt, G.I., and G.S. Golitsyn, 1974: Local structures of mature dust storms, *J. Atmos. Sci.*, 31, 1917-1933.
- Blumsack, S.L., and P.J. Gierasch, 1972: Mars: The effects of topography on baroclinic instability, *J. Atmos. Sci.*, 29, 1081-1089.
- Blumsack, S.L., P.J. Gierasch, and W.R. Wessel, 1973: An analytical and numerical study of the Martian planetary boundary layer over slopes, *J. Atmos. Sci.*, 30, 66-82.
- Carr, M.H., H. Masursky, W. Baum, K.R. Blasius, G.A. Briggs, J.A. Cutts, T. Duxbury, R. Greeley, J.E. Guest, B.A. Smith, L.A. Soderblom, J. Veverka, and J.B. Wellman, 1976: Preliminary results from the Viking orbiter imaging experiment, *Science*, 193, 766-776.
- Clark, B.C., P. Toulmin III, A.K. Baird, K. Keil, and H. J. Rose, Jr., 1976: Argon content of the Martian atmosphere at the Viking 1 landing site: Analysis by X-ray fluorescence spectroscopy, *Science*, 193, 804-805.

- Conrath, B.J., 1975: Thermal structure of the Martian atmosphere during the dissipation of the dust storm of 1971, *Icarus*, **24**, 36-46.
- Cutts, J.A., K.R. Blasius, G.A. Briggs, M.H. Carr, R. Greeley, and H. Masursky, 1976: North polar region of Mars: Imaging results from Viking 2, *Science*, **194**, 1329-1337.
- Fanale, F.P., 1976: Martian volatiles: Their degassing history and geochemical fate, *Icarus*, **28**, 179-202.
- Fanale, F.P., and W.A. Cannon, 1974: Exchange of adsorbed H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> between the regolith and atmosphere of Mars caused by changes in surface insolation, *J. Geophys. Res.*, **79**, 3397-3402.
- Farmer, C.B., D.W. Davies, and D.D. LaPorte, 1976: Viking: Mars atmospheric water vapor mapping experiment—preliminary report of results, *Science*, **193**, 776-780.
- Farmer, C.B., D.W. Davies, and D.D. LaPorte, 1976: Mars: Northern summer ice cap—water vapor observations from Viking 2, *Science*, **194**, 1339-1342.
- Gierasch, P.J., 1974: Martian dust storms, *Rev. Geophys. and Space Pys.*, **12**, 730-734.
- Gierasch, P.J., and R.M. Goody, 1973: A model of a Martian great dust storm, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 169-179.
- Gierasch, P.J., and O.B. Toon, 1973: Atmospheric pressure variation and the climate of Mars, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1502-1508.
- Golitsyn, G.S., 1973: On the Martian dust storms, *Icarus*, **18**, 113-119.
- Hays, J.D., J. Imbrie, and N.J. Shackleton, 1976: Variations in the earth's orbit: Pacemaker of the ice ages, *Science*, **194**, 1121-1132.
- Hess, S.L., 1973: Martian winds and dust clouds, *Planet. Space Sci.*, **21**, 1549-1557.
- Hess, S.L., R.M. Henry, C.B. Leovy, J.L. Mitchell, J.A. Ryan, and J.E. Tillman, 1976: Early meteorological results from the Viking 2 lander, *Science*, **194**, 1352-1353.
- Hess, S.L., R.M. Henry, C.B. Leovy, J.A. Ryan, J.E. Tillman, T.E. Chamberlain, H.L. Cole, R.G. Dutton, G.C. Greene, W.E. Simon, and J.L. Mitchell, 1976: Preliminary meteorological results on Mars from the Viking 1 lander, *Science*, **193**, 788-791.
- Hess, S.L., R.M. Henry, C.B. Leovy, J.A. Ryan, J.E. Tillman, T.E. Chamberlain, H.L. Cole, R.G. Dutton, G.C. Greene, W.E. Simon, and J.L. Mitchell, 1976: Mars climatology from Viking 1 after 20 sols, *Science*, **194**, 78-81.
- Istomin, V.G., and K.V. Grechnev, 1976: Argon in the Martian atmosphere: Evidence from the Mars 6 descent module, *Icarus*, **28**, 155-158.
- Kieffer, H.H., 1976: Soil and surface temperatures at the Viking landing sites, *Science*, **194**, 1344-1346.
- Kieffer, H.H., S.C. Chase, Jr., T.Z. Martin, E.D. Miner, and F.D. Palluconi, 1976: Martian north pole summer temperatures: Dirty water ice, *Science*, **194**, 1341-1344.
- Kieffer, H.H., S.C. Chase, Jr., E.D. Miner, F.D. Palluconi, G. Münch, G. Neugebauer, and T.Z. Martin, 1976: Infrared thermal mapping of the Martian surface and atmosphere: First results, *Science*, **193**, 780-786.
- Kieffer, H.H., P.R. Christensen, T.Z. Martin, E.D. Miner, and F.D. Palluconi, 1976: Temperatures of the Martian surface and atmosphere: Viking observations of diurnal and geometric variations, *Science*, **194**, 1346-1351.
- Leovy, C.B., and Y.H. Mintz, 1969: Numerical simulation of the weather and climate of Mars, *J. Atmos. Sci.*, **26**, 1167-1190.
- Leovy, C.B., R.W. Zurek, and J.B. Pollack, 1973: Mechanisms for Mars dust storms, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 749-762.
- McElroy, M.B., Y.L. Yung, and A.O. Nier, 1976: Isotopic composition of nitrogen: Implications for the past history of Mars' atmosphere, *Science*, **194**, 70-72.
- Metz, W.D., 1976: Viking (II): Water, ice, and argon—Three puzzles resolved, *Science*, **194**, 924-927.
- 森山 茂, 1974: 火星の大気, 天気, **21**, 1-10.
- Moriyama, S., 1976: Effects of dust on radiation transfer in the Martian atmosphere (III)—Numerical experiments of radiative convective equilibrium of the Martian atmosphere including the radiative effects due to dust, *J. Met. Soc. Japan*, **54**, 52-58.
- 森山 茂, 岩嶋樹也, 山元龍三郎, 1976: 火星の大気大循環スペクトルモデル——第一報: ダストによる多重散乱過程の導入, 月・惑星シンポジウム報告, 42-48.
- Mutch, T.A., R.E. Arvidson, A.B. Binder, F.O. Huck, E.C. Levinthal, S. Liebes, Jr., E.C. Morris, D. Nummedal, J.B. Pollack, and C. Sagan, 1976: Fine particles on Mars: Observations with the Viking 1 lander cameras, *Science*, **194**, 87-91.
- Mutch, T.A., A.B. Binder, F.O. Huck, E.C. Levinthal, S. Liebes, Jr., E.C. Morris, W.R. Patterson, J.B. Pollack, C. Sagan, and G.R.

- Taylor, 1976: The surface of Mars: The view from the Viking 1 lander, *Science*, 193, 791-801.
- Mutch, T.A., S.U. Grenander, K.L. Jones, W. Patterson, R.E. Arvidson, E.A. Guinness, P. Arvin, C.E. Carlston, A.B. Binder, C. Sagan, E.W. Dunham, P.L. Fox, D.C. Pieri, F.O. Huck, C.W. Rowland, G.R. Taylor, S.D. Wall, R. Kahn, E.C. Levinthal, S. Liebes, Jr., R.B. Tucker, E.C. Morris, J.B. Pollack, R.S. Saunders, and M.R. Wolf, 1976: The view from the Viking 2 lander, *Science*, 194, 1277-1283.
- Nier, A.O., W.B. Hanson, A. Seiff, M.B. McElroy, N.W. Spencer, R.J. Duckett, T.C.D. Knight, and W.S. Cook, 1976: Composition and structure of the Martian atmosphere: Preliminary results from Viking 1, *Science*, 193, 786-788.
- Nier, A.O., M.B. McElroy, and Y.L. Yung, 1976: Isotopic composition of the Martian atmosphere, *Science*, 194, 68-70.
- Owen, T., and K. Biemann, 1976: Composition of the atmosphere at the surface of Mars: Detection of argon-36 and preliminary analysis, *Science*, 193, 801-803.
- Pirraglia, J.A., 1976: Martian atmospheric lee waves, *Icarus*, 27, 517-530.
- Pirraglia, J.A., and B.J. Conrath, 1974: Martian tidal pressure and wind fields obtained from the Mariner 9 infrared spectroscopy experiment, *J. Atmos. Sci.*, 31, 318-329.
- Pollack, J.B., C.B. Leovy, Y.H. Mintz, and W.V. Camp, 1976: Winds on Mars during the Viking season: Predictions based on a general circulation model with topography, *Geophys. Res. Letters*, 3, 479-482.
- Sagan, C., O.B. Toon, and P.J. Gierasch, 1973: Climatic change on Mars, *Science*, 181, 1045-1049.
- Seiff, A., and D.B. Kirk, 1976: Structure of Mars' atmosphere up to 100 kilometers from the entry measurements of Viking 2, *Science*, 194, 1300-1303.
- 清水幹夫, 1977: ヴァイキングの成果から, *自然*, 32, 46-55.
- Ward, W.R., 1973: Large-scale variations in the obliquity of Mars, *Science*, 181, 260-262.
- Ward, W.R., B.C. Murray, and M.C. Malin, 1974: Climatic variations on Mars, 2. Evolution of carbon dioxide atmosphere and polar caps, *J. Geophys. Res.*, 79, 3387-3395.
- Zurek, R.W., 1976: Diurnal tide in the Martian atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, 33, 321-337.

## 月例会「長期予報・大気大循環」の報告

標記の月例会が2月24日(木)午前、気象庁予報部会議室で行なわれましたが、その際の講演要旨は次のとおりでした。

### 月平均 500 mb 偏差パターンの分類

荒井 康 (気象庁長期)

北半球の176地点の偏差パターンを、いわゆる相関法で分類し、得られた型の特徴を調べた。相関法にはいくつかの問題があるが、少なくとも出現度数の多い基本的な型について論ずることができる。用いた資料は1946～1975年の月平均偏差で、季節毎に90枚のパターンを分類した。相関係数がいくつ以上あれば類似している、とする類似限界は0.4で小さく、相関係数が0.7以上あるような非常によく似たパターンは極めて少ない。主な結論は次の通りである。

(1) 冬はよいが、夏は分類できないパターンが約40%ある。

(2) 冬と春には40～60°Nの東西指数や60°Nの超長波の振巾とかなりの対応がある。

(3) 経験的に知られているいくつかの型が相関法によって分類できる。

### 冷夏年および暑夏年におけるチベット高気圧周辺のうず度分布について

力武恒雄 (名古屋地台)

8月の月平均気温平年差の分布に、顕著な全国的冷夏、暑夏あるいは北冷西暑、北暑西冷などの特性が現われた数例を選んで、上層の循環の特徴と、それが中～下層におよぼす影響を考察した。夏期の300mbや100mb面ではチベット付近から高圧帯が東西にのび、主として