

論文題目

火星北極域の風紋から読み取る

大気循環過程

宮城教育大学教育学部学校教育教員養成課程理科教育専攻

c9280 西川 洋平

平成 13 年 2 月 8 日

ABSTRACT

火星では薄い大気が存在が地上観測や探査機によって明らかにされている。火星地表の地形は風成地形と呼ばれる、大気の流れの影響で変形・出現・消滅する地形が地表全体にわたって広く存在している。風成地形は砂丘や風紋のような大気の流れの影響によって形成される地形である。火星の代表的な大気現象として、およそ地球年の 2 年周期で発生する全球的な砂嵐がある。砂嵐は地上観測でも確認されている。風成地形の形成と砂嵐には密接な関係がある。1970 年代の **Viking** 探査機は火星地表を撮像し、デジタル画像として残した。**Viking** 探査機によって火星地表の鮮明な画像を得ることが可能となった。

本研究は **Viking** 画像を用い、火星北極域(北緯 70° ~ 80° の地域)の地表に存在する風成地形を解析し、そこから読み取ることのできる風向を追跡することで火星大気の循環の様子を探ろうというものである。この地域は極冠の季節変化にともなう増大・減少の作用によって、ドライアイスの堆積物が広がる季節があり、その結果、風成地形が発達しやすい地域である。本研究では風成地形に注目するため、風成地形がより多く存在し得る北極域を捉えることは優位である。**Viking** の画像は放射量補正などの幾つかの補正を画像解析ツール **ISIS** によって行う。解析された画像にある風成地形は地表付近の風向きを知る重要なカギになり得る。このような風成地形の判読を行うことは火星の大気循環過程を紐解く上で重要であり、惑星環境の理解につながる。

Viking 画像から風成地形を解析した結果を以下にまとめる。

- 地球年の 1976 年 10 月~12 月に撮像された画像の解析から、火星北極域における西から東への大気の大きな流れの存在が確認された。地球の自転と火星の自転の類似性から予想されるような東向き地球でも存在する大気の流れが、火星にも現れている。一方、この期間に北緯 70° ~ 80° 西経 200° 付近における特異な南南西風の存在の確認された。地形効果によって引き起こされているか、または、火星の秋における特殊な大気循環の一部である可能性がある。
- 地球年の 1976 年では風成地形が発達している地域は西経 0° ~ 200° にかけて多く存在している。これは土壌、堆積物、地形、極冠の発達の影響を受けている。
- 地球年の 1976 年 10 月~12 月、1978 年 1 月~3 月に撮像された画像の解析から、北緯 78° ~ 80° 西経 180° ~ 320° における特異な東風の存在が確認された。火星の秋、春に起こる、特殊な局地風である可能性がある。
- 地球年の 1976 年 10 月~12 月、1977 年 1~3 月・10~12 月、1978 年 1 月~3 月に撮像された画像の解析から、1977 年の全球的な砂嵐の確認された。砂嵐前後の風成地形の比較より、砂嵐によって風成地形が消滅し、砂嵐後に再形成されるプロセスが存在している可能性がある。また、1976 年の局地的な砂嵐の様子も確認された。

目 次

第1章	はじめに	1
1-1	火星の表層環境	
1-1-1	極冠	
1-1-2	南部高地と北部平原	
1-1-3	水的作用	
1-1-4	風的作用	
1-1-5	砂嵐	
1-2	風成地形	
1-2-1	風と水による物質運搬	
1-2-2	地球の風成地形	
1-2-3	火星の風成地形	
1-3	本研究のテーマ	
第2章	データ解析	6
2-1	解析画像	
2-1-1	Viking 計画	
2-1-2	Viking 搭載カメラと Viking 撮像画像	
2-1-3	調査対象画像	
2-1-4	画像選別方法	
2-1-5	データベース	
2-2	解析方法	
2-2-1	ISIS を用いた画像処理法	
2-2-2	風向の測定方法	
第3章	結果	18
3-1	風向マップについて	
3-2	1976 年風向マップ	
3-3	1977 年風向マップ	
3-4	1978 年風向マップ	
第4章	考察	19
4-1	高緯度地域の西風	

- 4-2 特異な風向
- 4-3 **1977**年の砂嵐の影響
- 4-4 風成地形の発達地域

謝辞	2 1
参考文献	2 2
資料	2 3
付録(1)データベース	
付録(2)地図投影法	

第1章 はじめに

1-1 火星の表層環境

火星は地球軌道のすぐ外側を回る外惑星の一つである。軌道の離心率が大きく近日点距離と遠日点距離の差が大きい惑星である。火星の自転周期は **24 時間 37 分** で地球とほぼ等しい。自転軸の傾きはほぼ **25°** であり、これも地球によく似ている。しかし、火星の公転周期は約 **678 日** であるから、季節の移り変わりは地球上の **2 倍** 近い長さになる。火星の赤道半径は **3,397 km** で地球の約半分。質量は地球の **1/10** である[小森, 1992]。表 1-1 に地球と火星のデータを示す。

1-1-1 極冠

極域にあるフロストのことである。フロストは主に二酸化炭素の氷や水の氷からなることが一般的に知られている。この極冠は季節によってフロストの量が増減し、大きさを変える。この現象は火星の大気循環や多発する砂嵐に大きな影響を与えると考えられている。南極では永久的な氷の組成は分かっていないが、北極の永久的なフロストでは H_2O の氷が存在している。また、極冠の地形的な特徴として、北緯 **80°** 以上の地域を覆っている厚い堆積物の層がある。この層は揮発性な物質が風によって堆積されて形成された。明暗の縞のように堆積した構造はダストとフロストが交互に積もってできたと考えられ、火星の天文学的摂動による周期的な気候変動を説明するものとしての議論もある[森山, 1984] (図 1-1)。

1-1-2 南部高地と北部平原

南部高地には月の高地のようなインパクトクレーターが多く、年代が古い。北部平原にはタルシス地域というオリンポス山をはじめとする巨大盾状火山が存在している地域がある。高地や平原という名がついているが、火星の回転楕円体の幾何中心からの高度はほとんど変わらない。しかし、重力中心を考えた場合、重力中心は幾何中心に比べて **3 km** ほど北半球に位置することから、重力中心からの高度は南半球の方が北半球より大きくなる[森原, 1997]。

1-1-3 水の作用

火星に生命が存在する可能性を求めて、水の存在に関してはいまだに数多くの議論がなされている。火星表面は水が流れたような跡が観測されている。火星には無数のチャネル（溝）があり、水の侵食作用を受けているようである。チャネルの中には短い期間に大量の水が流れ、洪水のようにあふれてできたようなアウトフローチャネルと呼ばれるものもある。水の起源についてはまだ不明な点が多い。一般的には火星の地下に水の氷の永久凍土が存在しており、マグマの活動によって地温が上昇し、凍土の氷が溶け、液体となった水が地表に流れ出したと考えられている【小森, 1992】。

1-1-4 風的作用

砂丘などに風が吹いた跡（風紋）がある。また、火星のある岩石は、スポンジのように穴が空いている。これは気泡（ガスが閉じ込められたと考えられる）が風で運ばれてきた微粒子によって削り取られたとされる（新太陽）。土壌の組成がバイキング 1号と 2号の着陸地点で大差がないのは砂嵐をはじめとする大気循環によると考えられている。土壌の粒子が火星全体に均一に拡散しているのも風の影響である【小森, 1992】。

1-1-5 砂嵐

火星表面の砂嵐については地球からも観測されている。砂嵐の Viking 画像を（図 1-2）に示す。砂嵐には年間 100 回以上も発生する局地的な砂嵐と、年に 1、2 回発生する全球的な大砂嵐がある。大砂嵐の発生は日射強度と関係があることが知られている。砂嵐の発生メカニズムには 2 種類のモデルが考えられている。第 1 にダストハリケーンモデルがある。これはダストの日射吸収をエネルギー源にして台風に似た渦流を発生させるというものである。もう一つのモデルは、春先において極付近の温度傾度の生じる地域で局地的な砂嵐が頻発する。そして、大気中に巻き上げられたダストは赤道付近まで拡散し、低緯度帯のダスト量が増加する。ダストが大気中に満ちてくると太陽光吸収による大気加熱効果が顕著になる。これは大気循環を強め、熱潮汐作用を増強することになる。こうした大規模スケールで起こる風は火星の特定の地域で地形効果の影響と重なり、長期間にわたる局地的砂嵐を引き起こす風を与えるというモデルが考えられている。ダストに満ちた大気ではダストの太陽光吸収によって温度上昇が加速される。高温になった緯度帯では子午面循環が高まり、ダストは他の地域に運ばれる。ダストの量は 10^{10} トンにも及ぶ。こうしたダストや砂嵐は火星気象に大きな影響を与えている。大砂嵐によってダストが十分に垂直方向に増してくると、大気温度が均一に近づき大気は安定する。安定した大

気においては対流が抑制され、ダストを巻き上げる働きが弱まる。また、ダスト量が増えると地表に達する日射量が減り、対流を促す地表の加熱も弱まることになり、温度の日変化も少なくなることから大気中の浮遊ダストは沈降すると考えられている[森山, 1984]。

1-2 風成地形

風は表土や堆積物を巻き上げ、運搬している。風には堆積物が運搬されることで粒度が分けられ、選別される分級という作用もある。また、極域の氷によって起こった下降風が氷河堆積物を巻き上げ、微粒子を運び、風が止むと大気から微粒子が落ちて厚い層となって地面を覆うような現象もある。巻き上げられた風塵 (**Dust**) は風の強さによっては数 km 移動する事がある。このような物質の運搬媒体は流体である。流体といっても、運搬媒体として見たとき、基本的には運搬機構は似ているが、細部で気体と液体では違いがある。それは、気体の流れは液体と違って厚く、水平的だけでなく垂直的に変化し、また、気体と液体では粘性と密度について大きな違いがあることである[William, 1988]。

1-2-1 風と水による物質運搬

風と水は似たようなベッドフォームができる。ベッドフォームとは水流などの堆積作用が砂床面に作り出す地形の事である。しかし、水と空気は粘性と密度が違うため形成プロセスは異なる。水中ベッドフォームの場合、形と大きさは流速、流れの深さ、地層を作る物質の粒度による。一方、風の場合、空気の運べる粒度の幅は狭いため、掃流量の粒度は均一で、細粒砂～中粒砂の範囲である。それよりも大きい粒子は残留してたまるか、表面を這うように移動する。風速が大幅に変化しても、砂は同じ機構 (躍動) でしか動かないので風速はベッドフォームの形態にほとんど影響しない[William, 1988]。

1-2-2 地球の風成地形

風紋は主に砂丘などで風が吹いた跡として残っている模様のことである。風速と粒度は風紋の形態に大きく関係する。風紋は砂が動くとはほぼ同時にできる。風紋の形成過程を示す (図 1-2)。縞の波長と、平均躍動距離はほぼ一致する。躍動の経路とリップルの波長比較すると、風速の増大につれて粒子の躍動距離も伸び、波長のながいリップルができる。ところが、通常の風紋は長い波長を持ち、しかも、粒子の躍動距離は特定な風速の下であっても、さらに長い波長を持っている。リップル

の波長と風速についての正確な関係は分かっていない。粒度がばらついているとリップルの波高と波長は風速だけでなく粒度にも作用される[William, 1988]。

砂丘の形成過程

砂丘とは砂が風で吹き寄せられて丘をなしている地形のことである。(国民百科事典 平凡社) 砂丘の形とサイズを決めているのは、風向・風力、風の断続時間、砂の供給である。風が障害物などにあたって風の陰を作るようなところならばどこにでも砂丘は発達する。砂丘成長のきっかけは木や岩石などの天然の障害物である。火星においてはクレーターなども障害物になりえる。成長プロセスは(図 1-4)に示す。そのようにして作られる砂丘の形を4つに分類することが出来る(図 1-5) [William, 1988]。

1-2-3 火星の風成地形

火星の表面にある風成地形は、クレーターや丘のような障害物の陰に形成される **bright streaks** (図 1-6)、**linearment** の砂丘のパターン (図 1-7)、三日月型の **barchan**(図 1-8)などがある。

streaks は大きく2つに区分することができる。**bright streaks** と **dark streaks** である。**bright streaks** は反射率の高いダストに覆われた地域が風による侵食の影響で障害物によってできる風の陰に高反射率のフロストのような粒が蓄積されたものである。一方 **dark streaks** は明るいダストで覆われた地域の表面が、風による侵食の影響で明るいダストが取りさらわれ、黒い傷跡のようになって現れているものである。クレーター起源の風紋は、大規模な砂嵐が起こった後に形成された。風紋はそのときの環境や時間経過とともに変形したり消滅したりする。火星表面の **streaks** のほとんどが **bright streaks** である。**bright streaks** は比較的变化しにくいとされている。しかし、**dark streaks** は寿命が短く、顕著に外形や方向を変える。**streaks** のなかには **dark streaks** と **bright streaks** が混じったように見えるものや、2方向に筋が延びるものも観測されている。**streaks** の出現・消滅・変形などのプロセスに砂嵐や風は大きく影響していると考えられる。**bright streaks** の変化の様子は **Syria** 地方などで観測されている。大きさや形状の変化、消滅などがはっきりとわかる。一方、**dark streaks** の変化する例が **Noachis** 地域などで見られる。もともと存在していた **dark streaks** は大規模な砂嵐によって一度は消滅し、その後、同じ方向に向かって再形成される。このような変化は毎年のように起こっていると考えられている[Thomas & Vevlрка, 1979]。

また、火星の砂漠に発達する **linearment** のパターンは地球上の砂丘に非常に良く似ている。**barcahn** の形がはっきりと確認される場合もある。北極域では極

冠による下降気流の影響で莫大な量の堆積物が広がっているため、**linearment**をもつ風成地形が多く存在している。

火星の場合、地球に比べて極端に大気が薄いため、ある粒子を動かすのに必要な風速は地球より大きくなる。したがって、粒子は一度動かされると地球とくらべて大きな速度で運ばれる。

1 - 3 本研究のテーマ

本研究のテーマは「火星北極域の風紋から読み取る大気循環過程」である。火星には地球より薄い大気が、**CO₂**を主成分とする大気が存在が認められている。ここでいう火星北極域というのは北緯 **70~80°** の地域を指している。火星の北極域には風紋が多数存在している。風紋は砂漠のような土地によく見られる地形で、主に風などの影響によって砂が運搬されたり、堆積されたりした跡である。言わば、風紋は風の向きを知る1つの指標になりうる地形である。風紋の方位決定は火星表面付近の強い風の方角や、風による季節的な物質運搬の変化を探る上で重要であろう [Thomas & Veverka, 1979]。本研究ではもっとも砂丘が発達している極域に着目し、風紋から読み取る風向から火星北極域の大気循環の様子を探ることを目標にしている。このように、地球以外の惑星の環境について知ることは太陽系並びに地球の起源や進化について知ることにつながる。本研究では地球に比較的環境が似ているとされる火星についてとりあげることで、地球環境との関わりが深いと考えられる。

第2章 データ解析

2-1 解析画像

本研究で使用する画像データは火星探査機 **Viking1** 号・**2** 号のそれぞれの **Orbiter** によって撮像された火星のリモートセンシング画像である。**Viking 1** 号の画像については **1976** 年 **6** 月から **1977** 年 **1** 月まで、**Viking 2** 号の画像については **1976** 年 **8** 月から **1977** 年 **9** 月まで、それぞれ火星軌道において撮像されている。

2-1-1 Viking 計画

以下、[Conway, 1997]による **Viking** 計画の概要をまとめる。

1968 年から着手されている。マリナー計画の続き。内惑星の研究の拡張を目的としている。地球以外の惑星への着陸はバイキングが初めてである。本来ならば、マリナー9号についてすぐの **1973** 年に打ち上げが計画されていたが、財政難のため2年間延長される。バイキングには1号2号があり、それぞれ2つの部分から成り立っている。**Orbiter** と **Lander** (図 2-1) である。打ち上げからおよそ6年もの間、調査を続けている。このバイキングプロジェクトの調査対象は火星に有機生命体が存在する証拠を探す、クローズアップされた惑星表層の画像を得る、大気の力学的・化学的構造を明らかにする、火星の地殻運動について調べる、といったものであった。

(A) Orbiter

52603 万の画像を送った。**7.5** mの高度から **150** 日間、マリナー4号より良い多くの画像は幾つかの波長を持っていた。それらの画像はより詳細な火星地図を作ることを可能にした。また、フォボスとダイモスの画像も撮った。

MAWD(Mars Atmospheric Water Detectors)により火星年での **1** 年間の **30** 日毎の水蒸気量についてのマップを作成した。そして、少なくとも **10 km** 以下の大気はよく循環していることを明らかにした。

IRTM(InfraRed Thermal Mapper) により以下の結果が得られた。

- 1 表面や大気(雲)の温度、地表の光度
- 2 全体の温度、アルベド、表面の熱慣性
- 3 局地的な多くの砂嵐の発見
- 4 決定的に北極付近には水の氷があることを論証
- 5 南極はドライアイスである
- 6 表面温度は **300 K**~**150 K**

(B) Lander

Lander はカラーカメラを有しており、実際に火星の地表に降り立ち、着地点周囲の地形の画像を送ってきた。岩をばら撒いたような赤味がかかった茶色の景色の画像などである。**2**つのミッションで計**4578**枚の画像を送信している。さらに、着地点の詳細な立体写真を作成した。また、溝を掘って力学的・磁気的な観点からの表面物質を詳しく調べた。砂嵐が行ったり来たりするような大気の不可解な変化を観察した。**2**号のカメラはある地域の地表が冬の間、雪に覆われているのを発見した。

どちらの**Lander**にも土を採取する**3**次元的に動く腕が装備されており、採取されたサンプルは生物学実験、分子分析、無機分析などが行われる。

(B)-1 生物学的観点で、以下の(a)～(c)の実験を行った。

a) 酸素同化作用…大気中の CO_2 、 CO から有機化合物による光合成についての実験。

b) サンプルの放射性養分の増加に伴う放射性ガスの進化の監視による新陳代謝(物質交代)の実験。

c) ガスクロマトグラフィーによる放射性ガスなしでの物質交代。

結果…サンプルが湿っているとわかったときは生命存在の期待が高まったが、結局、化学反応が原因であるとわかり、生命への期待は消える。しかし、未だに火星生命への関心は高く、まだ論争が盛んである。

(B)-2 分子分析

ガスクロマトグラフ分光を行った。

結果…有機化合物は見つからない。

大気組成	CO_2	95 %
(北半球春)	N_2	2.7 %
	A r	1.6 %
	O_2	0.13 %

- CO_2 の量は変化しやすい…大気圧が**1**年で**30**%も変化する。
大気中の CO_2 は極域で凍ったり、溶けたりするためである。
- 同位体元素の構成や含有量を知ることは大気の歴史や源を語る上で重要である

(B)-3 x-ray 無機分析…火星表面の物質。

S i	21%
F e	13%
M g	5 %
C a	4 %
A l	3 %
S	3 %

残り 50%を構成する元素は発見できなかった。

(B)-4 気象調査…火星年での 3 年間、 2 つのポイントで気象観測が行われた。

結果…気温は最大でも 160~250 K

最小だと 150~190 K

- どれをとっても氷点下である。
- 大気圧は Lander1…6.85~8.90 mbar
Lander2…10 %増し (高度が 1 号より低かったため)
- 風はたいてい、非常に穏やか。
- Orbiter は、複雑な形をした雲や、砂嵐を観測することによって気象学的データを得ている。

なお、地震学の実験は Lander 1 号の地震計の故障により失敗している。Lander 2 号は風による機体の揺れを記録したが、地震を示す明確な信号は記録されていない。

2-1-2 Viking 搭載カメラと Viking 撮像画像

Image ID (例 : 071 B 44) は 6 つの文字によって構成されている。3 桁の数字と 1 つのアルファベットと 2 桁の組み合わせである。

どちらの Viking Orbiter も同型の vidicon カメラ (Visual Imaging Subsystem) を 2 台搭載していた。それぞれ、VIS A、VIS B である。いずれの VIS カメラも望遠鏡、slow scan vidicon、フィルターホイール、電子装置などからなる。ライゾーパターンによって定義されるカメラの視野角は $1.51^{\circ} \times 1.69^{\circ}$ である。画像に含まれる地域は衛星の高度と放射角の関数として変化する。デジタル画像は vidicon の face plate を走査し、角位置 (pixel) における信号を 7 ビットとしてデジタル化する (0 から 127 のレンジの範囲で)。EDR 画像データは元の 7 ビットか

ら8ビットに変換される。最大解像度において、未圧縮の **Viking Orbiter** の画像は **1056** 画素 (**line**) × **1204** 画素 (**sample**) という画素の配列からなっている。しかし、画像の左右の端にある、それぞれ **11pixel** ずつの幅をもつ **dark band** が存在するため、**1line** 毎に **1182pixel** しか有効な **sample** 画素は存在しない。**Dark band** は **vidicon** の前についている不透明な覆いによって作られる。いずれの **dark band** も約 **11** 画素分ずつが両端に存在する。しかし、実際には **dark band** の幅は画像ごとに異なる。各々の **VIS** カメラは下記の5つの波長域を選択できるフィルターホイールを装備している。

- | | |
|---------------------|--------------------------------|
| ● Blue | 0.35~0.53 μm |
| ● Minus-blue | 0.48~0.70 μm |
| ● Violet | 0.35~0.47 μm |
| ● Green | 0.50~0.60 μm |
| ● Red | 0.55~0.70 μm |
| ● Clear | フィルターなし |

また、画像の **Image ID** は、例えば(**071B44**)のように3桁の数字と1つのアルファベットと2桁の数字の組み合わせとなっている。最初の3桁の数字は **Orbit Number** (軌道番号) を示している。次のアルファベットはA、S、Bの3種類のいずれかが使用される。AまたはSの場合は **Viking** 1号、Bの場合は **Viking** 2号によって撮られたことをそれぞれ意味している。最後の2桁はその軌道内における **Sequence number** (通し番号) である。このようにして **Viking** の画像の **Image ID** は定義されている。

2-1-3 調査対象画像

画像については **CD-ROM[NASA Mission to Mars Viking Orbiter Images of Mars]** から得る。この **CD-ROM** は **Viking1** 号の **Orbiter** について **vo_1001~vo_1032** の **32** 枚、**Viking2** 号の **Orbiter** について **vo_1051~vo_1064** の **14** 枚の合計 **46** 枚ある。**46** 枚の中から本研究の対象地域である北緯 **70° ~80°** 西経 **0° ~360°** の地域の画像をすべて抜粋する。ところが緯度幅 **10°** であっても画像数は何千枚にもなり、かつ、風紋が全ての画像に存在するわけではない。そこで、調査対象画像を厳選するために調査地域の画像データをまとめたデータベースを作成した。

データベース作成にあたり使用した画像データは **Mars Geoscience Navigator** [<http://wundow.wustl.edu/marsnavr>] というインターネット上の検索システムを用いて、特定の地域内に存在する画像の **flame ID** 等の画像データを得ることが出来る。**Mars Geoscience Navigator** は **NASA** の **Planetary Data System (PDS)** の一環としてワシントン大学地球惑星科学リモートセンシング研を拠点に、地球型

惑星の内部及び表層の研究に関するデジタルデータを配布したり、保管したりすることで科学者の援助をしている。また、**Mars Geoscience Navigator** は主に火星や火星衛星について取り扱っており、緯度や経度、画像番号、あるいは地域などを元に **Viking** の画像を検索することができ、画像ごとのデータ（例えば、緯度・経度、画像番号、フィルター名、撮像日時、など）も検索することができる。本研究に用いたデータについてはデータベースに示す。

2-1-4 画像選別方法

Mars Geoscience Navigator を用いて、緯度 **70~80°** の地域を経度 **0°** から **10°** 毎に、**Viking Orbiter1** 号及び **2** 号が撮像した全ての生画像 (**2200** 枚程度) を観察し、風成地形が現れているもののみを抽出する。反射光の大気の状態による透過率の都合上、**filter** の長波長のもののみが地表を写し、長波長域の **filter** で撮像された画像のみを抽出することも考えられたが、短波長域の **filter** のものでも、大気の状態によっては地表が確認できる画像が存在するため、全ての画像を観察する必要がある。抽出された画像は画像処理の段階で、高解像度画像 (**400** 枚程度) のみを選択する。低解像度画像は幾何変換の計算の負担と、処理時間の都合、画像容量の問題上、本研究では取り上げないものとする。最終的に風成地形が撮像されている、高解像度画像を選別し、画像処理を施す。

2-1-5 データベース

作成目的は画像処理・解析の段階で必要になるであろう項目について表形式でまとまっているデータベースがあると便利である。また、画像を選ぶ時の基準となる項目も含まれるため、画像をシステムティックに扱うためにはこのようなリストは必須であると考えられる。

Mars Geoscience Navigator によって、画像ごとの表 **2-1** に示す項目の **9** 項目のデータを取得しデータベースにまとめた。画像を取得する際に、実際に **Viking** の生画像を表示させ、風成地形である **linearment, barchan, streaks** が画像上に現れているかを確認し備考の欄にまとめた。データベースは付録**(1)**として添付する

2-2 解析方法

火星の画像判読を行う際、探査機の搭載カメラが撮像したそのものの元画像では様々な意味で問題が生じる。それは機器の劣化や撮像時の状態などにより、元画像は必然的に歪みを含んでいる。また、ノイズなど入っている場合も多い。そこ

で、より、見やすく正確で信頼性ある情報を得るために、元画像をそのまま使用するのではなく、より、本来の被写体に元画像が近づくようにいくつかの補正を行う。

2-2-1 ISIS を用いた画像処理法

本研究で **Viking** の画像処理に用いたのは **ISIS** という画像処理ツールである。**ISIS** は包括的でユーザーにやさしく、軽便な惑星のリモートセンシングデータの画像処理・分析・表示を行うためのツールである。**ISIS** は本来、分光器とカメラからとられた2-D画像データ（シングルバンドキューブ）と3-Dデータ（マルチスペクトラルやハイパースペクトルキューブ）を扱う。**ISIS** には3つの機能がある。第1に画像処理としてデータ取得、放射量補正、幾何調整、位相角補正、画像モザイク、地図合成などができる。第2に画像分析としてフィルタリング処理、ストレッチ、比演算、統計、計算、スペクトル分析、スペクトル書庫機能などがある。第3に画像表示として2-D画像及び3-Dキューブの表示、コントラスト強調、輝度分割、対象地域の統計とプロット、相互作用編集、移動などが可能である。**ISIS** がサポートしているミッションは **Clementine, Galileo NIMS, Galileo SSI, Mariner, Viking, Boyager, Imager for MarsPathfinder(IMP), Mars Global surveyor, MOC(MGS/MOC)** である。

本研究では画像処理ツール **ISIS** によって **CD-ROM** に入っているファイルの解凍、データの更新、各種キャリブレーション、光学補正、幾何変換、フィルタリング処理、**ISIS** 形式 (**.cub**) の表示をするなど機能を使用して補正する。以下に処理過程と対応する **ISIS** コマンドを以下に示す。

① ファイル変換 (**CD2ISIS**)

CDROM に入っているデータは **PDS(Planetary Data System)**ファイルであり、圧縮形式**.imq** で保存されている。これを**.cub** 形式に変換する。これは **Viking** 画像のみならず、**Voyager** 画像にも対応している。最近ではラベルと分離された **PDS image file** を読むことができるようになってきている。これによって、**PDS** がラベルと画像が分離されていても扱うことができる。この **CD2ISIS** プログラムは**.imq** 形式の **PDS** ファイルを扱うために発展してきた。圧縮・未圧縮の両方の **Objection Descriptor language(ODL)Version1,0** に対応する **PDS** ファイルを変換することができる。未処理の生画像を図 2-2 に示す。

② ラベル情報の更新 (**SPICELAB**)

放射量補正や幾何変換に必要な画像撮像時のパラメータや軌道情報等の更新されたデータが保存されている新しいスパイスファイルから、キューブファイルのラ

ベル部分キーワードを更新する。スパイスファイルは **USGS** (米地質調査所) のコントロールネットワークによる。スパイスファイルは2種類あり、**EVENT** ファイルと **GEOM** ファイルが有る。具体的には **EVENT** ファイルには **exposure time**(露出時間)、**filter** などの情報が入っており、**GEOM** ファイルには **camera pointing angel**、**spacecraft vector** などが入っている。**SPICELAB** によって、更新したい内容の詳細をユーザーが入力することで情報を得ることができる。今後の処理でラベルを読ませるプログラムを実行する場合は、その前に **SPICELAB** を行い、更新する必要がある。

③ ライゾーの検出 (**FINDRX**)

Viking、**Voyager**、**mariner** などのライゾー情報の入ったファイルを読む。それぞれのライゾー周辺のデータと、対応するファイルから読み取ったライゾーのデータを比較することでライゾー位置を決定する。決定されたライゾー位置はキューブラベルに書き込まれる。後の処理で行う **REMRX** の前に実行する必要がある。ここまでの処理段階を図 **2-2** に示す。

④ キャリブレーション (**VIKCAL**)

Viking 画像に **Radiometric** (放射量) 補正を行う。この補正結果はカメラ視野角、**GAIN** 値、露出時間、フラットフィールド、**OFFSET**、太陽距離、などの要素によって計算されている。

カメラ視野角について

カメラ視野角幅の各 **pixel** の感度差を補正する。

GAIN 値について

Gain は **vidicon** 上で入射光に対する **VIS** カメラの感度の指定である。**Gain** には **low** と **high** 2種類あり、**high gain** モードは **low gain** モードの2倍の感度である。したがって、**low gain** モードはダイナミックレンジが拡張される。露出補正と予想される場面の明るさのレベルは画像順序から **high** と **low** のゲインを選択される。

露出時間について

vidicon カメラの露出時間である。**Viking** 画像はおよそ8秒間隔で **Viking Orbiter** によって取得された。画像の画素の明るさは **0.003~2.66** 秒の間の値から露出時間を選択する事によって調節することができる。

フラットフィールドについて

各画素の光に対する感度はどの画素も等しいわけではなく、画素ごとに微妙な差がある。その差を埋める補正である。白色スクリーンに対しての太陽光を垂直

に当たったときに撮像された輝度値と、観測時に撮像された輝度値の比で補正している。

OFFSET について

露出時間が **0** であっても電子回路における電荷の移動などによる電氣的なノイズ（暗電流）が発生する。この影響で正しい輝度値を読み取ることが出来ない場合がある。露出時間 **0** の場合に輝度値がマイナスにならないように出力輝度値を微妙に上乘せしている。これらの上乗せの輝度値を **OFFSET** という。元々の上乗せ分の輝度値（**OFFSET**）をカメラ信号から引くことで、光量と電荷の増減を線形にする。

太陽距離について

撮像時の太陽と火星との距離の違いによる太陽光の反射率の差を、太陽と火星との標準距離と太陽と火星の撮像時の距離の比を用いて補正する。

その他に、**DN 値 (Digital Number)** の線形補正が行われる。

ISIS は **Viking** のいくつかのデータファイルを管理している。放射量データファイル、**OFFSET** 状態についてのデータファイル、**OFFSET** 補正值のファイルなどである。このプログラムは自動的にそのファイルを読ませたり、またはキューブラベルを読ませたりすることができる。

放射量補正を終えた画像を図 **2-3** に示す。

⑤ ライゾーの除去 (**REMRX**)

Viking だけでなく **Voyager**、**Mariner** の画像からもライゾーを取り除くことができる。ライゾー除去の方法には2種類あり、周囲の画素でバイリニア補間するか、単順に入力画像のライゾー位置の周辺画素をゼロにおくことで、後に行うフィルタリング処理の段階で取り去る。ユーザーがライゾー除去のボックスの大きさ (**sample × line**) を入力することができる。また、以前に **FINDRX** によってライゾー位置を書き込まれたキューブラベルをプログラムが読むことでライゾー位置を確定する。ライゾーを取り除いた画像を図 **2-4** に示す。

⑥ フィルタリング処理 (**BOXFILTER**)

キューブファイルに3次元ボックスフィルタリング処理を施す。これはボックス内の平均中心画素を置き換えるような処理である。中心画素の選別は突飛な値をとる画素である。選別のレンジを設定できるため、無効な画素の特定幅を任意に定めることができる。この処理は中心の画素データにだけ作用する。ユーザーはボックスの大きさを指定することができる。フィルタリング処理後の画像を図 **2-5** に示す。

⑦ 位相角補正 (PHOTOMPR,PHOTOM)

Viking 画像に対して位相角補正を行う。位相角は火星表面を照射する太陽光線の向きとの間の角であり、同じ地点であっても、太陽高度やカメラの撮像アングルによって面の明るさは変化する。そのため、これらの位相角・入射角・放射角の補正を行い、標準値に統一することで表面の反射率を同一条件で比較できる。

ここで

L_h : 水平面における放射量

L_r : 斜面における放射量

I : 太陽光の入射角

θ : 位相角

である。

補正後の画像を図 2-6 に示す。

⑧ 幾何変換 (PLANSINU,NUPROJ,GEOM)

Viking Orbiter の軌道や撮像時カメラの向きなどによって方位が画像ごとに異なっている場合があるため、画像は方位の識別可能な地図投影法に表現する必要がある。**ISIS** では 20 種類以上の地図投影法に画像を変換することができる。本研究では火星表面に存在する風紋の方位決定が重要である。方位決定である以上は地図上の任意の点における角度を重視したい。したがって地図上の任意の点における角度が等しく表現される正角円筒図法であるメルカトル図法を採用する。メルカトル図法は漸長図法とも呼ばれる。この図法は正角条件を満たした円筒図法である。地図上で任意の点での角度が球状の角度と常に等しくなるためには、経線方向の距離の歪みと緯線方向の距離の歪みが等しくなる必要がある。これを満たすと、球面の微小面積の形状は地図上の各部において常に相似である。しかし、一般的なメルカトル図法においては、中心緯度が 0° になっており、高緯度地域は歪みが大きくなって表現できない。そのため、北極域を表現するには適さない。そこで、本研究では北緯 75° を中心緯度に設定し、歪みを少なくして貴下変換を行った。地図投影法の詳細については付録(2)を参照されたい。

メルカトル図法の性質

- (1) 子午線はすべて等間隔の平行直線で表わされ、平行圏はこれに直行する平行直線で表わされる。
- (2) 地映上の航程線は頭上に全て直線で表わされる。航程線とは一定の角で相次ぐ子午線群を切る線をいい、船が経路を一定に保つときの航路の線がこれで、地球上では極に向かう螺旋となる。特殊な場合には子午線あるいは平行圏となる。
- (3) 航程線が子午線となす角度は、そのまま図上に正角に表わされる。た

たとえば子午線となす角度が地球上で 15° ならば、海図上でも 15° を示す。

- (4) 緯度の高低により縮尺が変化しているから、1枚の地図上で緯度が違うと、同一距離の縮尺が異なるため面積の比較が出来ない。緯度 0° と 60° の地域では同一図上で比較すると同一距離がちょうど2倍に描かれる。したがって緯度 60° 以上の地域では通常用いられない。
- (5) 海図は世界各国ともこの図法によって作図されている[山口, 1984]。幾何補正後の画像を図 1-7 に示す。

⑨ シェルスクリプト作成

シェルとは **UNIX** におけるユーザーインターフェースのことで、スクリプトとはプログラムのことである。今回使用したのは **C** シェルである。**C** シェルはカリフォルニア大学のビル・ジョイによって作られた。具体的には、対話的に **UNIX** コマンドを実行し（対話機能）、作業環境を自分用に定義し（調整機能）、**C** シェルスクリプトとして新たなツールを作り出す（プログラミング機能）ことができる[Gail, 1986]。この **C** シェルスクリプトを使うことで、400枚程度の画像に同じ **ISIS** の画像処理コマンドを繰り返し実行することが可能となり、作業時間の短縮・効率化を図った。本研究で作成し使用したシェルスクリプトを以下に示す。

reduction06.csh

```
foreach k (`cat volnumPCUT.txt`)
#mv $k.txt $k.d
foreach j (`cat $k.txt`)
mkdir Fwork/$j
#mv $j.txt $j.d
foreach i (`cat $j.txt`)
    cd2pics FROM=/cdrom/$k/$j/$i.imq TO=WorkA/$i.pcs
    pics2isis FROM=WorkA/$i.pcs TO=WorkB/$i.cub
    rm WorkA/$i.pcs
    spicelab TO=WorkB/$i.cub EVENT=YES VFLAG=YES
    vikcal FROM=WorkB/$i.cub TO=WorkA/$i.cub
    rm WorkB/$i.cub
    findrx FROM=WorkA/$i.cub
    remrx FROM=WorkA/$i.cub TO=WorkB/$i.cub
    rm WorkA/$i.cub
    boxfilter FROM=WorkB/$i.cub TO=WorkA/$i.cub FILTER=STD SAMP=3
LINE=3 BAND=1
    rm WorkB/$i.cub
    photompr FROM=WorkA/$i.cub TFILE=TFILE/$i.dat FUNC=MIN
    photom FROM=WorkA/$i.cub TO=WorkB/$i.cub TFILE=TFILE/$i.dat
    rm WorkA/$i.cub
    rm TFILE/$i.dat
    plansinu FROM=WorkB/$i.cub TFILE=TFILE/$i.dat
    geom FROM=WorkB/$i.cub TFILE=TFILE/$i.dat TO=WorkA/$i.cub
    rm WorkB/$i.cub
    rm TFILE/$i.dat
    nuproj FROM=WorkA/$i.cub TFILE=TFILE/$i.dat PROJ=MERC
CLAT=75.0
    geom FROM=WorkA/$i.cub TFILE=TFILE/$i.dat TO=Fwork/$j/$i.cub
    rm WorkA/$i.cub
    rm TFILE/$i.dat
    rm vikspot.kep
    echo Fwork/$i
end
end
#eject
stop
end
```

2-2-2 風向の測定方法

ISISには **qview** という簡易画像表示機能がある。**qview** では画像を表示するだけでなく、各々の画素の緯度経度表示、画素の (**line, sample**) 位置の表示、2点間距離の計測、画像の拡大縮小表示、ストレッチ操作などが可能である。

Viking Orbiter によって撮像された画像は **Orbiter** の軌道に沿っているため、等解像度で同じ地域を写しているものが存在する。大局的な風向の傾向をつかむために、これらの画像に簡易モザイク処理を施したものもある (図 2-8)。

Viking 画像は画像処理の段階で幾何変換によってメルカトル図法に変換され、方位が統一された状態にある。したがって、画像上の任意の点における方位はメルカトル図法の特長により等しい。画像上のある2点を通る直線とメルカトル図法における子午線のなす角によって風向を定義する (図 2-9)。なす角は以下の式により得ることができる。

$$\theta = (\arctan(-\Delta \text{line} / \Delta \text{sample}) + \pi/2 (\Delta \text{sample} / |\Delta \text{sample}|)) 180 / \pi$$

θ : 画像上の2点を通る直線とメルカトル図法における子午線のなす角 (deg)

Δline : $\text{line}_{\text{風下}} - \text{line}_{\text{風上}}$

Δsamlpe : $\text{sample}_{\text{風下}} - \text{sample}_{\text{風上}}$

風向は北風を 0° にして東風を負、西風を正にとって $-180^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で表す。

画像上の2点の決定については、火星の風成地形を **liner**、**barchan**、**streaks** の3種類に分類し、各々に対して2点の決定法は以下にならう。

① **linerment** について (図 2-10)

リニア構造に並行な直線を通る2点を決定し、その直線に対して $\mp 90^\circ$ の方向を与える。 90° の符号決定はリニア付近の **barchan** の向きや、**streaks** の向きによる。

② **barhan** について (図 2-11)

いくつかの三日月状の **barhan** が合体して、直線構造が見えるものに関しては、その直線に平行な直線を通る2点を決定し、その直線に対して $\mp 90^\circ$ の方向を与える。 90° の符号は **barchan** の向きによる。なお、直線構造がないものは、 $\mp 90^\circ$ の正負の指針にするにとどめる。三日月型でないものは対象外とする。

③ **streaks** について (図 2-12)

吹流しの端からクレーターに2本の接線をひき、その2本の接線が示す方向を風向の範囲と捉える。

*モザイクした画像については方向性が顕著に表れている個所に注目して測定する (図 2-8)。

この方法で得られた風向を 16 方位に分配する。

第3章 結果

3-1 風向マップについて

風向を横軸に経度(deg)縦軸に緯度(deg)をとった散布図に表す。火星では経度は西向きを正にとらえる。したがって、風向は北風を 0° にして東風を負、西風を正にとって $-180^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で表わしてある。 16 方位で表現するため 22.5° 間隔でデータを色分けする。ここで、南風にあたる $-180^\circ \sim -168.75^\circ$ と $168.75^\circ \sim 180^\circ$ に属するデータは同一色で表現した。ただし、測定地域の中から方向の特定できない **linearment** や未発達な **barchan** などの方向不明なデータについては囲いをつけることで表現している。風成地形が見られず、地表が撮像されているものを「風成地形なし」、砂嵐の影響で地表がまったく撮像されていないものを「**dust**」としてプロットした。また、同一地域で2つの方向性をもつ場合には数値の大きいものを優先的に表現した。

3-2 1976年風向マップ

3-1節に示されるような書式にしたがって、1976年の10月~12月の風向マップを図3-1に、また、月別に表現したものを図3-4(a)~(c)にそれぞれ表わす。ただし、1976年8月にも **Viking** は火星表層を撮像しているが、風成地形が存在しておらず、画像数も2枚しかなかったため、ここでは省略する。それ以外の **Viking** 画像については全て網羅してある。

3-3 1977年風向マップ

3-1節に示されるような書式にしたがって、1977年の1月~3月、10月~12月の風向マップを作成した。1977通年を図3-2に、1977年の月別に表現したものを図3-5(a)~(f)に、それぞれ表わす。1977年4月~9月の画像に関しては、**Viking** はその期間、調査対象地域の画像を撮っていないことにより、本研究では対象外とした。

3-4 1978年風向マップ

3-1節に示されるような書式にしたがって、1978年の1月~3月までの風向マップを図3-3に、月別に表現したものを図3-6(a)~(c)にそれぞれ表わす。ただし、**Viking** は1978年の11月まで撮像を続けていたが、1978年4月以降は低解像度の画像になってしまったため、本研究では対象外とした。

第4章 考察

4-1 高緯度地域の西風

図 3-1 から、この時期の大まかな風向の傾向を図 4-1 に示す。図 3-1 において西風を示す風成地形がいたるところに存在している。したがって、調査地域の下層大気には西風が存在している。特に西経 0° ~ 200° の地域で、その傾向は顕著である。一方、図 3-2 および図 3-3 においても同様に西風を示す風成地形が存在していることから、季節にかかわらず西風は存在していることがわかる。地球の場合、中・高緯度地域には西風が存在しているが、火星においても西風の大きな流れが存在していることがわかる。地球の下層大気において、地球が西から東へと自転していることにより、低緯度地域では大気の東西方向の速度が自転の速度より大きいいため西風が起こることが角運動量保存則によって説明される[廣田,1992]。火星大気においても同じようなことが起こっていると西風の傾向から考えられる。

4-2 特異な風向

図 3-1 において、西経 210° 付近の風向は南西を示している。西風は別に南西の風が北緯 74° ~ 78° 付近まで連なっている。ここで、図 4-2 より、 210° 付近の地形的な特徴として南北に伸びる谷が発達している。この谷に沿ってこのような北向きの風向成分が促進されて、下層大気では南西の向きを示す風向が発達している可能性もある。また、図 3-1 において、北緯 78° 以北の地域には西風に逆らう東風が存在している。それらの地域には明らかに東風を示す **barchan** が存在している。この東風は図 3-3 にも現れており、恒常的に発達する局地的な風である可能性がある。また、これらの特異な風向は傾圧渦や波のような大気の循環の一部である可能性があり更に広範囲の調査に期待がもたれる。

4-3 1977年の砂嵐の影響

火星の公転周期は地球の約2倍である。地球年の1976年1月は火星の北半球の秋であるから、地球年1977年1月は火星北半球の冬、地球年1978年1月は火星北半球の秋にあたる。したがって図3-1、図3-2、図3-3はそれぞれ火星北半球の秋、冬、春に相当する。図3-4(a)~図3-6(g)から風成地形の消滅と再形成の流れが見られる。図3-4(a)~(c)より、1976年10月~12月では風成地形が多数存在している。また、ダストに覆われた地域は少なく、風成地形無しのマーカーが多いことから、このころの火星は全球的な砂嵐は起こっておらず、大気がクリアな状況になっている。ただし、局地的に小規模な砂嵐は起こっている。

なお、図 4-3 における北緯 74~76° 西経 300° の地域には局地的な砂嵐が発達しているが、図 4-2 の地形図と比較すると、その地域は崖になっており、砂嵐の発達と関係がある可能性がある。図 3-5(a)~(f) では 1977 年の全球的な砂嵐の様子がよく現れている。図 3-5(a) は 1977 年 1 月、すなわち火星北半球の冬である。ここから明らかなように大気の状態はダストに満ちている。以後、1977 年 11 月までは風紋や地表の様子を撮像している画像が極端に少なくなっている。1977 年には全球的な砂嵐が起こっている[森山,1984]ことが今回の調査によっても確認された。しかし、Viking 画像では、砂嵐時の地表の様子を判読する事ができないため、全球的な砂嵐が起こっているときの西風や局地的に存在する特異な風向の様子を知ることはできない。砂嵐時における大気運動の存在については今回の調査からはわからない。砂嵐は 1977 年 11 月まで続き、図 3-5(f) に示されるように 1977 年 12 月では風成地形が撮像され、地表も見られることから、大気の状態はダストが少ないクリアな状態になっていることがわかる。それ以降については、図 3-6(a)~(c) から、1978 年になると風成地形なしのマーカがほとんどである。これは 1977 年の砂嵐が終わっているため大気の状態はクリアであることが示されている。また、図 3-6(a) において、風成地形が激減しているということは 1976 年に形成されていた風成地形が一度、1977 年の砂嵐によってダストが堆積することで消滅し、砂嵐の後の 1977 年 12 月以降、新しく再形成されていることを示唆している。このように、火星北極域では全球的な砂嵐によって風成地形が消滅し、再形成されることを繰り返している。図 3-1 に示されているような 1976 年末の多くの風成地形は前回の砂嵐以後、徐々に形成されてきたものの集大成といえる。

4-4 風成地形の発達地域

風成地形が多く存在することを示す図 3-1 に注目すると、西経 0° ~200° 付近までは風成地形がよく発達しているが、西経 200° を超えると風成地形が少なくなる傾向が読み取れる。地形的に見ても、とりわけ特徴があるわけではないので、堆積物の違いや極冠の発達の影響によるものかもしれない。一方、図 3-1、図 3-3 はいずれも北緯 75° 以北の地域について多く風成地形が現れている。今回測定した風成地形は **linearment** がほとんどであった。**Linearment** はドライアイスに覆われた地域によく発達する地形である(M.H.carr et al., 1980)。よって **linearment** が存在する地域はドライアイスの影響を受けているということが考えられる。北極冠の季節変化による増大・減少がドライアイスを撒き散らす効果があるならば、北緯 75° 付近までは確実にその効果の影響を受けているといえる。なお、北極域の地質図を図 4-3 に示す。図 3-1 と図 4-3 から、Am の地域に風成地形が発達していることがわかる。Am はマントルマテリアルの地域である。ダストやドライアイスの堆積作用が起こっている地域と言える。このように風成地形はダストやドライアイスの堆積作用が起こりやすい地域に出現すると考えられる。

謝 辞

本卒業論文のための研究を進めるに当たって、さまざまな場面でのご助言や丁寧なご指導をしていただいた宮城教育大学教育学部惑星科学研究室（地学科）の高田淑子助教授に深く感謝致します。

また、同大学地学科の青木守弘教授、森洋介教授、川村寿朗教授、菅原敏博士、出村裕英氏（現宇宙開発事業団）には、日頃からのご支援をいただいたことに深く感謝致します。

そして、研究活動全般を通して暖かなご援助をいただいた、須田敏典さん、隅山智子さん、堀籠直人さん、中堤康友さん、松下真人さん、加藤真治さん、小笠原直人さん、その他関係者の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- Conway,W.S. (1997):p909~910 「ENCYCLOPEDIA OF PLANETARY SCIENCES」
Jams,H.S/Rhodes,W.F.編 CHARPMAN & HALL
- Gail,A/Paul,A (1986):p31 「UNIX C SHELL フィールドガイド」 落水浩一郎/大木敦雄訳
(株)パーソナルメディア
- Harold,M (1983):p83~92 第 8 章火星「新太陽系」 J,Kelly.B/Brian,O/Andrew,C 編 伊藤謙
哉/桜井邦郎監訳 倍風館
- K.E.Fishbaugh/J.W.Head III (2000): 「North polar region of Mars:Topography of
circumpolar deposits from Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) data
and evidence for asymmetric retreat of the polar cap」 Journal of
Geophysical Research, Vol.105, No.E9,Page 22,458,September 25,2000
- M.H.carr (1980):p84~93、p106~137 「VIKING ORBITER VIEWS OF MARS」 Cary.R.S
編 NASA
- P.Thomas/J.Veverka(1979): 「Seasonal and Secular Variation of Wind Streaks on
Mars: Analysis of Mariner 9 and Viking Data」 Laboratory Planetary
Studies, Cornell University, Ithaca, New York 14853
- U.S.Geological survey(1991): 「TOPOGRAPHIC MAPS THE POLAR 1:15,000,000」
- William,J.F/Jonnie,N.M(1988):p214~221 第 6 章風による運搬と堆積「層序学と堆積学の
基礎」 William,J.F/Jonnie,N.M 著 原田憲一訳 愛知出版
- 木下宙(1997):p86 「理科年表」 国立天文台編 丸善
- 小森長生(1922):p42~62 第 3 章火星「現代の惑星学」 小森長生著 東海大学出版会
- 永原裕子(1997):p65~76 第 1 章 1.7 節「比較惑星学」 住明正/平朝彦/鳥海光弘/松井孝典編
倍風館
- 新田尚(1980):p3~18 第 1 章プロローグ大気循環とは何か「大気大循環論」 新田尚著 東京
堂出版
- 廣田勇(1992):p31~32 第 3 章 3-1 節「グローバル気象学」 廣田勇著 東京大学出版会
- 森山茂/松田佳久(1984):p61~70 第 3 章 3-2 節惑星を覆う気候変動、p82-91 第 3 章吹き荒れ
る火星の砂嵐「現代の惑星科学下」 東京大学出版会
- 山口恵一郎(1984):p114~125 第 2 章地図を知る(3)地図を作る「図説地図辞典」 山口恵一郎
武揚堂

