

北極砂海の風成地形から読み取る火星大気大循環

惑星地形地質学(photogeology)からのアプローチ

出村裕英¹, 西川洋平², 高田淑子³

1. ねらいと背景

赤い砂漠の星火星には、風系を知るのに格好のターゲットがある。アルベド特徴として見える風条(streaks)や砂丘といった、風の作る地形、風成地形である。風成地形を形成するためには地形種に応じた風向×継続時間が必要であり、一瞬一瞬の風向きではなく、その地域のある期間での卓越風向を示している。風条とは、クレーターリムなどの凸部から風下側にたなびくもので、明条と暗条、更に細分類がある[1]。季節変化も報告され[2]、現在の風系を敏感に反映していると考えられる。一方、砂丘地形は地球の砂漠と同じものが見られ、形成までのタイムスケールは異なるものの、地球と同じ形成機構が働いていると見なされている。

火星探査機による地表気象観測は、精密ではあるが時空間的に極めて限られたデータである。これに対して風成地形の示す風系は、取扱方法に注意が要るものの広範囲かつ高頻度の撮像データに基づくもので、両者に相補性がある。すなわち風成地形が示す風系は、風向/風速の直接観測を全球に外挿する根拠となり、火星大気大循環モデルの検証項目となり、分野をまたがって重視されている。例えば、大気の循環モデルで起伏や表層物質といった地域性をどこまで考慮すべきか、判断材料に使われたりしている。本論では、惑星地形地質学(photogeology)のアプローチ例として、火星北極冠近傍の風系・大気大循環様式につ

いて得られた知見を報告する。

火星の風系調査としては、雲の流れに基づく解析[3]や、クレーターの風条に基づく中低緯度の調査[4,5]がなされている。それら雲および風条では季節変化が確認され、そのほとんどが地形起伏効果を考慮しない大気大循環モデルとも整合的である[6]。それに対し、タルシス盆地オリンポス山周辺の起伏の大きい地域では、風成地形は、谷風・山風等の風系を反映しており、地形効果が支配している[7]。砂丘の示す風系については見解が分かれているものの、中低緯度における砂丘が示す風系は、むしろ局所的な起伏や熱慣性等の表面特性パターンとの整合性を指摘され[8]、モデルの精密化によって説明されつつある。しかし、火星大気大循環モデルと砂丘に基づく風系とを直接比較して理解するには、起伏に影響されずかつ経度について広く押さえられる場所が理想的である。

以上を踏まえて、北極冠周囲の砂海(sand sea: 北緯75-80度, 西経40-280度, $6.79 \times 10^5 \text{ km}^2$)を選択した。そこは火星砂丘地帯の中で最大の面積を占め、起伏標高差が3km以内に収まる平坦さを示し、かつ地球南極海のようにほぼ経度を一周しているため、全球規模の風系を風成地形から抽出しやすい。また、極冠の成長・後退に伴う風系変化を、地形から明らかにできる可能性も高い。調査対象とした風成地形は、図1に示したような砂丘を主とし、風条も併用した。北極低地の砂丘地帯に関する記載には、主なものだけで四編[9-12]が知られ、逆の卓越風向を同時に示す砂丘の存在に基づいて現在も活動中の地形であると推定されている。しかし、この高緯度帯で砂丘の季節変化を調

1 宇宙開発事業団月利用研究センター

2 宮城県角田市立北角田中学校

3 宮城教育大学

査した例はなく、現在の風系を反映した地形なのか、現在は活動していない化石地形であって示されるのが太古の風系であるのか、明らかにされていない。そこで、本解析では、撮像時期別の風向マップを作成し、季節変化を初めて直接示した。

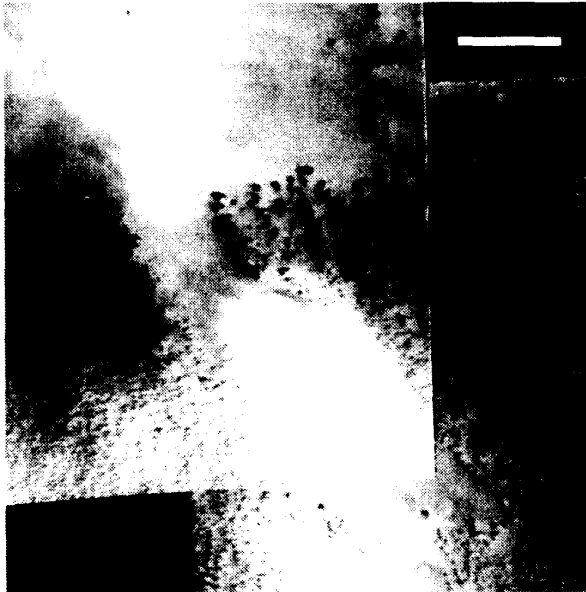


図1：火星の砂丘地形と風条の例

a) 三日月状砂丘バルハンの群：白色スケール10km, 北緯75度, 西経46度, 解像度 48-51m/pixel, VO069B01-05モザイク画像より抜粋。黒い斑点が個々のバルハンで、中央上部に弓張り模様の比較的大きなバルハンが幾つか見られる。

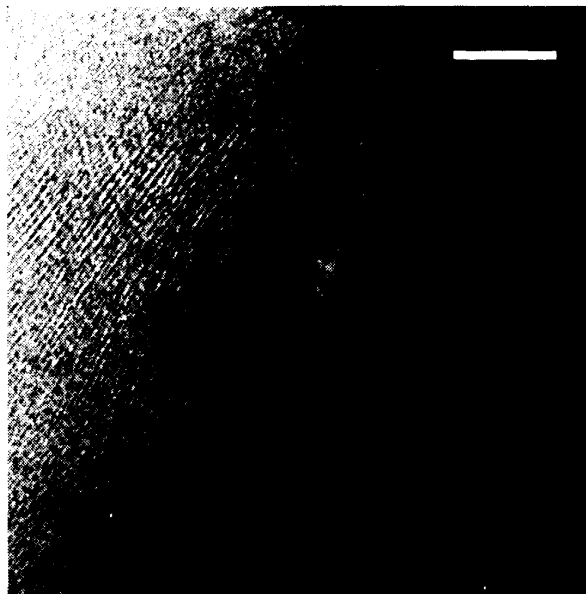


図1：火星の砂丘地形と風条の例

b) 線状横列砂丘トランスバースの群：白色スケール10km, 北緯80度, 西経90度, 解像度45m/pixel, VO514B30より抜粋。2時の方向から畑の畝のような線状構造が見られる。中央の白抜き部分は、高まっているために砂が不足して砂丘ができなくなっている領域。

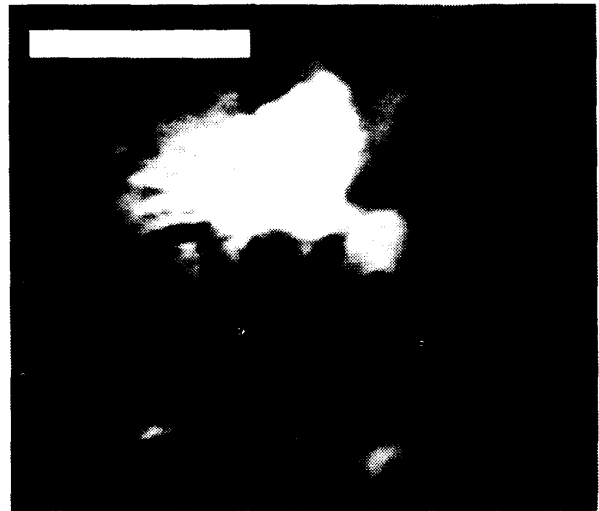


図1：火星の砂丘地形と風条の例

c) 風条 (明条)：白色スケール3km, 北緯75度, 西経217度, 解像度58m/pixel, VO063B21より抜粋。中央右のクレーターの上側で白い筋がたなびいているもの、中央左のクレーター上部に広がる飽和した領域は、高反射能の霜の風条である。

2. データセットと解析手順

NASA Mission to Mars Viking Orbiter images of Marsとして配布されているヴァイキング軌道船 (1976-1978年)のCDROM46枚から、北緯70-80度帯の全2200枚の画像データを抽出した。更に、前処理を施した画像から、砂嵐の有無や大気の状態、風紋の有無、撮像日時、解像度等に関するデータベースを作成した。その中で、風成地形が存在する高解像度画像約400枚を抽出し、輝度補正ならびに幾何補正の画像処理を施した。風条はアルベド特徴であるため、ヴァイキングのような輝度値レベルの差が小さい画像の判読には、輝度較正と強調が必須である。また、風成地形の方向解析には、正角図法への投影変換が必要である。そこで、輝度較正した各画像に、メルカトル投影図法を用いた幾何変換を施し、各風成地形単位の卓越方向を調査した。これらの画像処理には米地質調査所の画像解析ソフトISISを用いた。各画像における風成地形の示す風向は、データベースに追加され、任意の撮像地点での、撮像時点における風成地形が示す風向との関係が明らかになった。これらは、各月毎の傾向としてまとめられ、別に砂嵐の発展経過も確認するこ

とができた。

さらに、該当地域の撮像被覆割合と解像度を鑑みて、1976年10-12月、1977年1-12月(但し4-9月は欠測期間)、1978年1-3月という、3つの時期に整理して、卓越風の傾向を見た。地球と同じく火星にも四季があり、それぞれ、北半球の秋、冬(砂嵐の不可視期間)、春、に相当する。

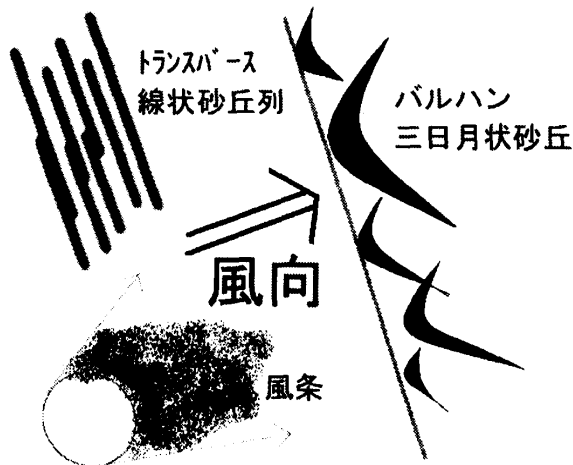


図2: 風向解析に用いた風成地形三種と風向の関係

3. 結果

図3に、三つの時期の風向図を示した。矢印は風向を、○は、地表は見えるが風成地形の見られない地点を、*は砂嵐で何も見えない画像の地域を、それぞれ表している。

北半球の秋(1976年10-12月)、北緯70-80度帯の概況は偏西風の卓越を示した。1977年の全球砂嵐期間中でも砂嵐の発生初期および末期には地表が見える場所があり、風成地形の消失している箇所を確認した[例えば図4]。砂嵐中に卓越風向を示した例は砂嵐最末期の12月かつ西経40-60度の領域のみで、これは砂嵐前と同じ北寄りの偏西風を示した。北半球の春(1978年12-3月)は、砂嵐前に比べて風成地形が激減し、偏東風と偏西風をそれぞれ示す風成地形の出現頻度が拮抗している。

また、風成地形に大きな影響を与えたと考えられる砂嵐は、1976年10月の西経320-30度付近に局所的な発生が見られる。この地域は、極域堆積物等の広がる砂丘地域から外れる地域であり、何らかの地表特性と関係しているのかもしれない。その後の砂嵐の発展を追跡したところ、1976年1月には、調査領域全域が被覆され、1977年11月から徐々に砂嵐が収まり、再び風成地形が現れてきていた。

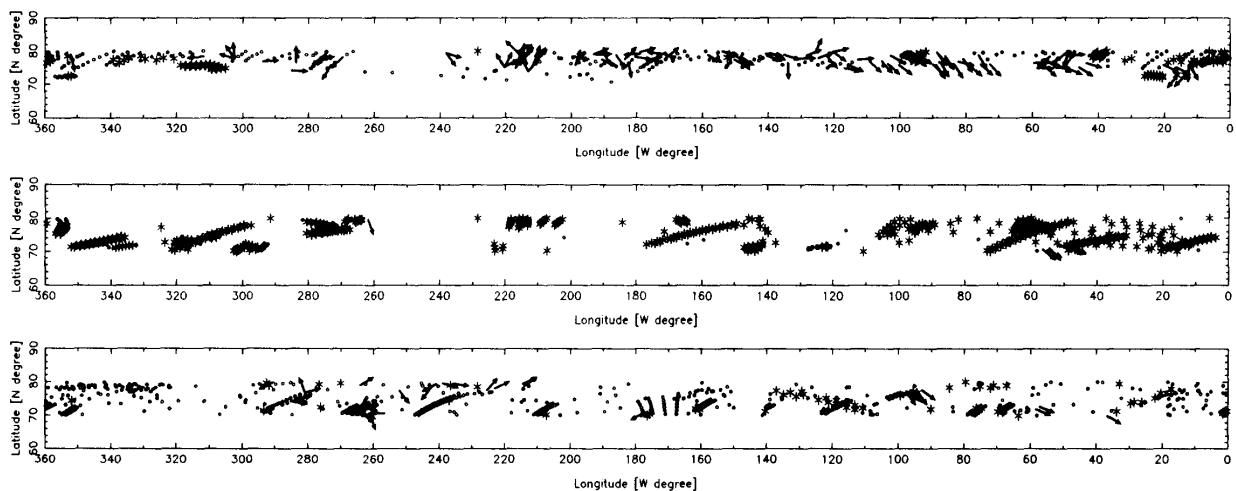


図3: 風成地形の示す卓越風向の変遷

上から、北半球の秋(1976年10-12月)、冬(1977年、但し砂嵐および極帽を踏まえた欠測期間が4-9月)、春(1978年12-3月)、それぞれの北緯70-80度帯の風向図。各記号の位置は各々画像の調査地点を示し、矢印は風向を、○は地表が見えるが風成地形の見られない地点を、*は砂嵐で何も見えない地点を、それぞれ表している。

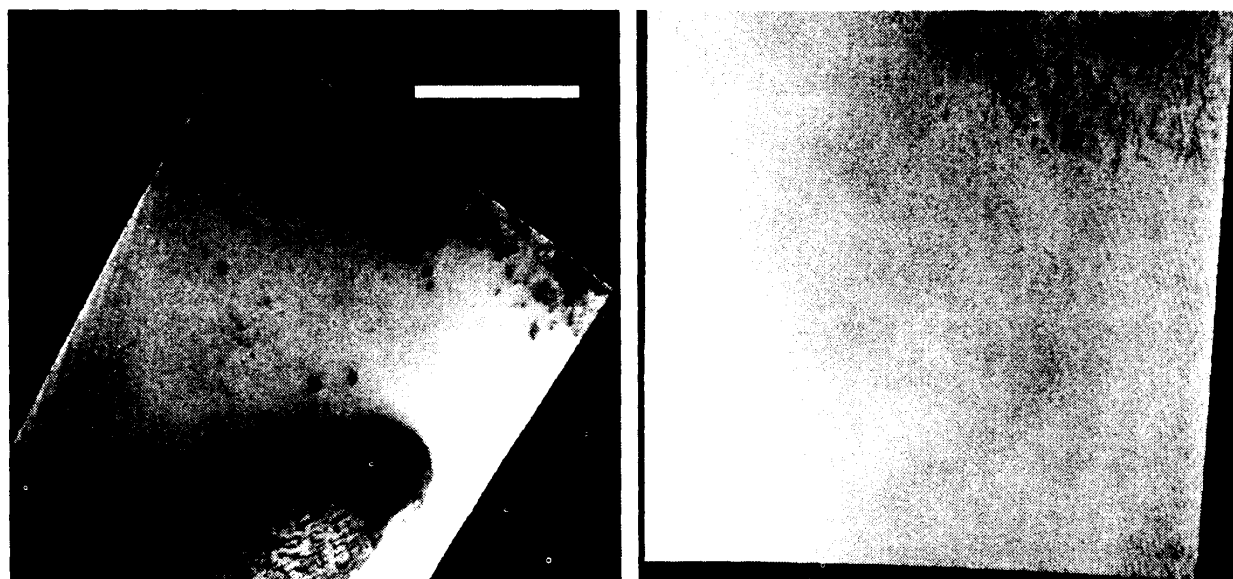


図4：砂嵐前後の風成地形

左右がそれぞれ砂嵐前後の同一地点画像。白色スケールは20km。上辺が北緯80度、下辺が北緯79度、中心が西経238度、解像度45m/pixel。砂嵐前には見えていた黒い砂丘地帯が右では消え、北側の砂丘地帯も微妙に変化している。それぞれ、VO120B37、VO051B18より。

4. 議論

北半球の秋、北極冠は大気中の二酸化炭素が凝縮する場となり、北極低気圧として南から大気が供給される。逆に春には、北極冠から昇華した二酸化炭素が高気圧となって四方南向きに大気を供給する。それによる気圧の季節変化は平均値の1/4という大きなものである。この南北輸送はコリオリ力によって風向が曲げられるので、北極冠周辺では、秋に偏西風、春に偏東風が吹くと考えられる。北緯70-80度帯における本風向図で、北半球の秋の偏西風卓越は確認されたものの、春の偏東風ははっきりしない。また、1976年と1978年、各3ヶ月間の撮像期間中、おおよそ同等のサンプル画像があるが、1976年に比べ1978年では、風成地形が確認できない画像が多い。以上のことから、これは風系の切り替わりを反映して風成地形が変化しつつあるためと考えられる。

また、偏西風もしくは偏東風から大きく外れた、幾つかの特異な風系が見つかった。例えば、図3の1976年では、西経210度付近、北緯74-78度に、南南西の風が卓越している。これは、ちょうどその場所に南北に走る

谷地形があり、その局所的な地形起伏が支配しているためと考えられる。しかし、この風系は、砂嵐後の1978年には全風成地形が消失したため、確認できない。

ここで、風成地形の示す風系が現在のものであるかどうかという問題を、ふたつの観点から考えてみよう。ひとつは、ある風成地形を形成するのに必要な卓越風の最低継続時間について。もうひとつは、現在の風成地形は活動を停止していて、いわゆる化石風系を示している可能性である。風条の形成継続時間は、観測から数日ないし数ヶ月と言われている。砂丘形成のタイムスケールは1,000年から10,000年と言われている[12]、その時間スケールで平均化された卓越風系を見ている、との意見もある。過去、実測で季節変化が確認された風成地形は風条だけで、ヴァイキング画像で砂丘地形の風系季節変化を確認した例は見あたらなかった。最近、マースグローバルサーベイヤーとヴァイキングの画像を比較して、この二十年間活動していない砂丘が発見されたりするなど[13]、化石風成地形の概念が脚光を浴びた。風成地形が示す卓越風向が現在の風系を反映しているのか、もしかしたらかつてのより厚い大気の時代[例えば14, 15]を反映した化石風系なのかは、興味深い点である。しかし、本研究

の解析領域では、砂嵐前後で風成地形の消失が確認され(図4)、少なくとも北極冠周囲の砂海では現在の風系を反映して砂が移動していることが示された。これまでの砂丘の活動、砂の移動に関する考えを再検討する必要があるだろう。

ちなみに従来は、砂丘の活動判定指標として風速を用いる例が多かった。火星を模擬した風洞実験に基づいて、ヴァイキング観測高度1.6mでの砂の移動開始風速を25-30m/sと見積もった例[16]がよく引かれる。ヴァイキングの観測した砂嵐最大風速は25.6m/sで、地表の砂は動いていると推定されているが [17]、砂嵐の前後でヴァイキング着陸船周囲の景観が変わらなかったことから、全般に火星の砂丘の活動度はかなり小さいのではないかと考える向きも多い。しかし、こうした風速だけに基づく推論方法は非常に問題である。砂の移動開始を支配するのは風速だけではなく、風の動圧と、粒子直径および地表面粗さの関数である地表面摩擦応力だからである。この中で最も不確かなのが地表面の粗さで、これをきちんと記述することが困難なために、風速だけでは粒子の移動を論ずることができない。風速に基づく議論には注意を喚起したい。

5. 結論

米火星探査機ヴァイキング(1976-1978年)画像から風成地形とその卓越方向を抽出し、それらを形成した風向を求めた。北極冠周囲の北緯70-80度帯で、秋の偏西風卓越と、春の偏東風切り替わりが認められた。例外は、1976年10-12月(秋)、北緯70-80度、西経200度付近の南南西風で、これは当地の谷地形が支配しているためと考えられる。また、1977年の全球砂嵐および1976年の局地的砂嵐による風成地形の消失と更新を確認し、少なくとも北極砂海のそれが現在の風系を反映して活動中であることを改めて示した。マースグローバルサーベイヤーの成果が次々に挙がってくる現在、20年前のヴァイキング画像との比較で十年スケ

ールの風系変化などの研究も可能になるだろう。

謝辞

匿名の査読者より貴重な助言を頂いたことを、ここに記して感謝したい。本解析に用いたヴァイキング画像のクレジットはNASAにある。また、較正・前処理に用いたソフトウェアISISは米地質調査所で開発されたものである。

<http://www.flag.wr.usgs.gov/isis-bin/isis.cgi/>

附録

米国同時多発テロ以来、幾つかのサイトが閉じられたままになっているが、画像データおよび解析ソフトウェア・検索エンジンは、PlanetaryData SystemからたどれるImaging NodeおよびGeoscience Nodeが助けになる[例えば18]。

<http://pds.jpl.nasa.gov/>

#一枚ずつのヴァイキング画像検索サーバ(プロトタイプ)

<http://www.pdsimage.jpl.nasa.gov/PDS/public/vikingof/frontpage.html>

Planetary Data SystemオンラインCDROM

(但し、系統概査やダウンロード枚数が百を越える場合は、メディアを購入した方が良い。)

<ftp://pdsimage.wr.usgs.gov/cdrom>

#メディア供給サイト(NSSDC CDROM Catalog, 実費負担。)

http://nssdc.gsfc.nasa.gov/cd-rom/set_bd/mdim.html

(2001, 11/2現在)

なお、最近のMars Global Surveyorカメラの成果は次のサイトに集められている。

Malin Space Science Systems (MSSS)

<http://www.msss.com/>

参考文献

- [1] Thomas, P. C., 1981: *Icarus* 48, 76-90
- [2] Sagan, C. A. et al., 1973: *J. Geophys. Res.* 78, 4163-4196
- [3] Kahn, R., 1984: *J. Geophys. Res.* 89, 6671-6688
- [4] Thomas, P. C. and Veverka, J., 1979: *J. Geophys. Res.* 84, 8131-8146
- [5] Thomas, P. C. et al., 1984: *Icarus* 60, 161-179
- [6] Magalhaes, J. A., 1987: *Icarus* 70, 442-468
- [7] Lee, S. W. et al. 1982: *J. Geophys. Res.* 87, 10025-10041
- [8] Greeley, R. et al., 1992: *Mars*, chapt. 22, 730-766
- [9] Tsoar, H. et al., 1979: *J. Geophys. Res.* 84, 8167-8180
- [10] Breed, C. S. et al., 1979: *J. Geophys. Res.* 84, 8183-8204
- [11] Lancaster, N. and Greeley, R., 1990, : *J. Geophys. Res.* 95, 10921-10927
- [12] Thomas, P. C. and Gierasch, P. J., 1995: *J. Geophys. Res.* 100, 5397-5406
- [13] Edgett, K. S. and Malin, M. C., 2000: *J. Geophys. Res.* 105, 1623-1650
- [14] 横畠徳太, 倉本圭, 2001: *遊星人* 10, 2, 64-74
- [15] Nakamura, T. and Tajika, E., 2001: *Earth Planets Space*, 53, 8, 851-859 もしくは, 中村貴純, 田近英一: *遊星人* 10, 4, 192-201
- [16] Greeley, R. et al., 1980: *Geophys. Res. Lett.* 7, 121-124
- [17] Ryan, J. A. and Henry, R. M., 1979: *J. Geophys. Res.* 84, 2821-2829
- [18] 出村裕英: *遊星人* 9, 1, 5-16