

特集「変遷する火星環境」

火星極地氷床の研究と探査

東 信彦¹

1. 火星氷床の特異性

前世紀末の火星探査機（マーズグローバルサーベイヤー：MGS）によって火星両極冠の表面地形が詳細に明らかとなった。これによりこれまで地球氷床を研究していた氷河学者の興味を引きつける事となり、惑星学者と氷河学者が参加して意見を交換し合う国際会議が活発に開かれるようになった（火星の極域科学と探査に関する国際会議；第一回開催地ヒューストン，米国1998，第二回開催地レイキャビク，アイスランド2000，第三回開催地レイクルイーズ，カナダ2003）。その後のMGS観測や最近の火星探査機Odysseyによる観測結果[1, 2]から，両極冠とも厚さ3km直径1000km程度の大きさの氷床で，氷にダストが混じったもので構成されており，その表面が厚さ1m程度のドライアイスで季節的に覆われていることがほぼ明らかとなった。これまでの雪氷学的な研究では，地球では見られない特異な表面地形について注目されており，火星氷床の流動とその涵養および消耗機構の解明が大きな課題となっている。

北極氷床に注目すれば平坦部と深い溝部分が交互に現れ，それが氷床中心から渦巻き状に放射する極めて特異な形状をしており，地球上では全く見られない。これは1971年のマリナー探査機で撮られた写真から渦巻き状のものであることが分かっていたが，MGS探査機に搭載されたレーザー高度計（MOLA）による表面高度測定により深さが500mに達する溝（黒い部分）が極を中心として反時計回りに渦巻き状になっていることが明らかとなった。図1はMGS探査機によって

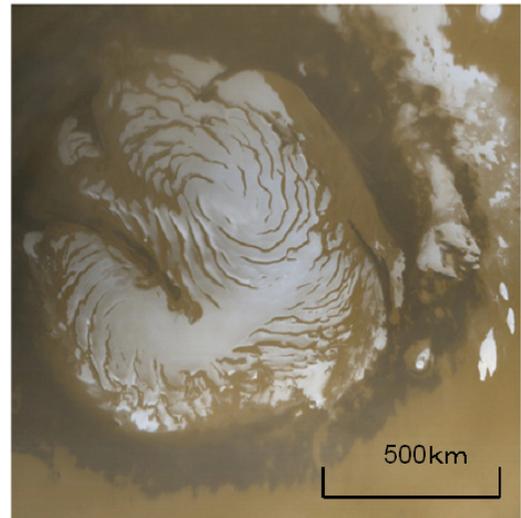


図1：マーズ・グローバル・サーベイヤー探査機（MGS）が撮った北極冠の写真（NASAのホームページより引用 http://www.msss.com/mars_images/moc/index.html）

撮影された北極冠の写真であるが，白い部分は平坦な部分で幅が約20kmあり，季節を問わず常に白く輝いている。そして白い平坦部分の南側が高さ約500mの断崖となって切れ落ちて溝となっている。このような幅20kmのテラス状部分が極を中心として渦巻き状氷床を構成している。また高分解能の撮影画像からこの断崖側壁は数メートルから数十mほどの厚さの無数の堆積層で構成されていることが明らかになった。このことは火星にも地球と同じように気候変動があり，その情報を氷床が保存していることを示している。

一方南極は北極と異なり常に白く輝いている部分は少なく，また渦巻き状の構造はしていない。しかし表面高度測定からやはり北極と同じように厚さ約3km

1. 長岡技術科学大学

の氷床がダストに覆われていると考えられる。これまで南極は北極と違って CO_2 氷で出来ていると考えられてきたが、欧州が火星に送り込んだ探査機マーズエクスプレスの最近の観測結果[3]によると、図2に示すように画像で白く見える部分は1~2mの厚さの CO_2 氷で、季節的に拡大縮小を繰り返す。黒く見える部分はダストと H_2O 氷が混じったものでその間が厚さ10m程度の H_2O 氷の三層構造になっていると考えられる。

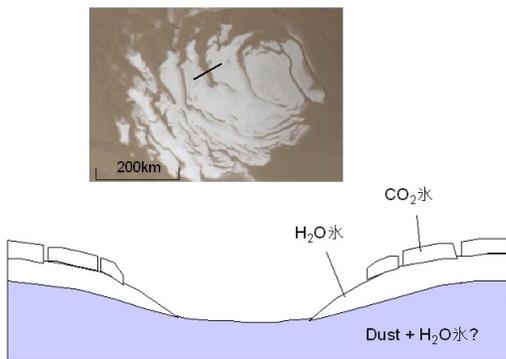


図2：火星南極氷床の層構造

2. 火星氷床と地球氷床の比較

火星の北極氷床の大きさは地球のグリーンランド氷床と同じくらいである。地球上の氷床（南極氷床とグリーンランド氷床）と最も異なる点はその形状である（図3）。地球の氷床はいわゆる鏡餅のような形状で中央のドーム頂部から周辺に向かって緩やかな傾斜が続く。これに対して火星の北極氷床は、前述したように、平坦部と深い溝部分が交互に現れ、それが氷床中心から渦巻き状に放射する極めて特異な形状をしており、地球上では全く見られない。この渦巻き状地形がどのようにして形成されたのか、そして維持されているのか、或いは過渡的なものであるのかは今のところ未解明であるがいくつかの説が出ている。

Fisher[4, 5]は火星北極氷床に見られる断崖と溝

地球氷床の流動と涵養・消耗

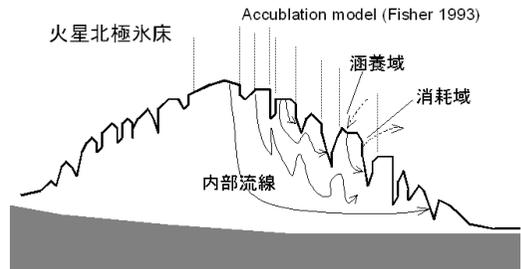
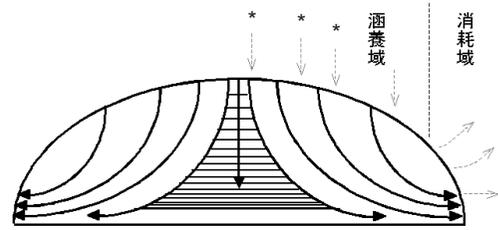


図3：地球氷床と火星北極氷床の涵養域と消耗域。火星北極氷床の内部流線はFisher（1993）の原図に基づく。

(scarps and troughs) からなる特異な構造を、図3に示すように、涵養域と消耗域が交互に存在するモデル“Accublationモデル”で説明した。南に面した斜面では日射による昇華が卓越する消耗域となり、平坦部や北に面した斜面では積雪（または着霜）による涵養域となると考えている。このように氷床頂部から下流に向かって涵養域と消耗域が交互に存在するような氷河氷床は地球上では存在しない。地球の氷河や氷床では上流部は涵養域で下流部が消耗域となり、ある高度を境界として二つの領域に分かれている。Hvidberg[6]は実際にMOLAによる表面形状データを用い、すべての領域で0.5mm/aの涵養速度を与えて有限要素法を用いて流動シミュレーションを行った。その結果、図3の“Accublationモデル”で示されるように溝の部分で消耗域（上昇流）、断崖上部で涵養域（下降流）となる内部流線が得られた。また氷床の流動速度は平らな部分で0.1~1mm/aであり、断崖と溝（scarps and troughs）の部分で1cm/aの程度になること、またその消耗速度が流動速度と同程度の大きさで無い限り流動によって溝（troughs）は10万年から100万年で埋まっ

てしまうことが分った。現在の火星北極氷床が（その形が変らない）定常状態にあるのか、或いは非定常状態にあるのかは明らかではない。

反時計回りの渦巻き状の断崖と溝 (scarps and troughs) の形成メカニズムについてはよく分かっていない。Howard[7]はカタバ風（斜面下降風）による剝離作用で説明しているが、Chasma Boreale（注：北極氷床にある大きな谷の地名）の様な大きな谷は説明できるものの、大部分の溝はカタバ風の方向（時計回り）とは逆であり説明できない。Fisher et al.[8]はこの特異な渦巻き溝を説明する"Cottage Cheese Lineation"モデルを提案した。これは初期に、日射による昇華によって氷床表面に円形の窪地が無数に出来るが、南に向いた側面は北に向いた側面に比べて昇華速度が大きいため南北に伸びた窪地となり、さらにそれらが合体しあって線状の溝が発達する。これに氷床の流動が加わり、流線の上流方向と北極点とが一致しない場合は溝のリニエーション（平行な線構造）は南北線に対してある角度を持つとしている。しかし、このモデルでは場所によっては時計回りの溝が発達することになる。

今後、氷床上の気象データなどが得られるにつれ、この謎は近いうちに明かされるであろう。

3. 火星氷床の涵養および消耗機構

地球の氷床では消耗速度が涵養速度を上回る消耗域は周辺部のみで、内陸の殆どの領域では雪が積もることによる涵養速度が上回っている。火星北極氷床では地球氷床と異なって、涵養域と消耗域が内陸部で交互に存在すると考えられることは前節で述べたとおりであるが、涵養域で1年間にどれくらい雪が降り積もるのか、或いは霜がどれくらいの速さで表面につくのかを知ることは重要である。

Herkenhoff and Plaut[9]はヴァイキング探査機およびマリナー 9号で撮られた両極冠表面の画像を詳細に分析し、隕石クレーターの分布密度から両極表面クレーターの年齢（生成してから消滅するまで）を推定した。

その結果、北極冠表面のクレーターの年齢は最大10万年程度であるのに対して南極冠のものは約1千万年と考えられる。クレーターは積雪（着霜）または表面の昇華によって消滅するので、クレーターの深さと年齢から涵養速度（または消耗速度）は北極冠で1.165 mm/yr 南極冠で0.06mm/yr と見積もられた。

火星氷床では氷床上に H_2O や CO_2 の雪が降り積もることにより氷床が涵養されるのか、或いは表面に霜となって凝結するのが主な涵養機構なのかについてはよく分かっていないが、着霜が主要因である可能性もある。地球の南極氷床でも内陸部の極寒の地では冬には相当量の霜の凝結が観測されている[10]。

夏の火星北極氷床の表面温度および下層大気の色度は -50 ぐらゐまで上昇する。温度だけでみれば地球の南極内陸部の冬に相当する。日本のドームふじ観測拠点の厳冬期の気温は-70 程度でちょうど同じくらいである。ここでは冬期に直径数 μm の針状結晶の霜が雪面に凝結する現象や年間を通して数 μm から数十 μm 程度の結晶サイズのダイヤモンドダストが降り注ぐ現象が確認されている[10]。Higuchi [11]はこのドームふじでの観測結果および Viking 探査機による観測結果と小林[12]による低圧下での結晶成長実験の結果に基づいて、放射冷却による Frost crystal の成長を試算し、年間0.1mm から1.3mm（水換算で）の涵養があると推定した。この値は前述のクレーター密度から推定した涵養量と一致する。

氷床上に H_2O や CO_2 の雪が降るのか或いは表面に霜となって凝結するのか、季節による違いはどうか等、火星両極氷床の涵養機構についてはよく分かっていない。これに関する最近の研究を次に紹介する。

Bass et al.[13]は北極氷床の表面の積雪（または着霜）状態について Mariner 9 号と Viking 探査機の3年間にわたる北極冠の画像を詳細に分析し、幾つかの重要な結果を得た。1) 夏至を過ぎたところが極冠の表面輝度が最も暗く、それ以降夏の終わりにかけて次第に輝度が増加する。2) 氷床の中心は回りの部分より常に輝度大きい。3) 氷床の明るい（白い）部分の

端の位置は同じ時期で見れば年毎の変化は無く常に同じである。これらは水蒸気の凝結が毎年同じ場所にかかること、そして氷床周辺部より中央部が凝結の度合いが強いことを示している。さらに Bass and Paige [14]は Viking 探査機の赤外放射温度計 (IRTM) と大気中水蒸気検出計 (MAWD) のデータを再分析し、北極氷床の表面温度と大気中の水蒸気濃度との間に強い相関があることを明らかにした。この中で、北極氷床の大気中の水蒸気濃度は夏に氷床頂部の温度が200Kを超えると急激に増加することを見出した。そして夏の終わりにかけて水蒸気濃度が減少するとともに氷床表面アルベドが増加する。つまり、氷床の温度が下がれば大気中の水蒸気が氷床表面に凝結すると考えられる。これらの観測結果より、北極氷床への H₂O 雪による積雪 (または着霜) は主に北極の夏から秋に起きていていると考えられる。

これに対して、CO₂ 雪による積雪 (または着霜) 時期は冬であることを示す観測結果がいくつかある。Smith et al. [15]は 北極冠および南極冠の表面高度の季節変化を探査機の MOLA 高度計により2年間観測し続けた。その結果、それぞれの極冠の冬にはその表面高度が夏に比べて1.5から2m増加することが明らかになった。この表面高度の変動は火星大気中の CO₂ 濃度の変動とタイミングが一致しており、CO₂ の雪または霜が極冠の冬に1.5から2mの厚さで表面に積雪或いは凝結して生じたと考えられる。また MGS 探査機から得られた重力データと表面高度データから、その雪 (または霜) の平均密度は $910 \pm 230 \text{ kg/m}^3$ と見積もられた。これは地球上の積雪に比べて極めて密な構造を持ったものと考えられる。さらに MOLA による CO₂ 雲の観察の結果、明るい CO₂ 雲は北極では秋に発達し始め、真冬に最大となりその後減少することが明らかとなった [15]。この間北極氷床は CO₂ 雪 (または霜) で覆われる。これまでのこのような観測結果を総合すると、極冠表面への堆積形態は降雪か着霜かは明らかではないが、その最も盛んな時期は H₂O の場合は夏から秋にかけてであり、CO₂ は冬であると考えるのが妥

当かもしれない。

4. 雪氷学的な興味と今後の課題

雪氷学的な立場で火星氷床のこれまでの研究をレビューしてきたが、筆者の専門分野である氷のレオロジーについて火星氷床の流動を論じる場合の問題点と今後の研究課題を述べておきたい。まず比較のために地球氷床の流動メカニズムについて簡単に説明する。地球氷床の構成物質は H₂O 氷で、ダストやその他の不純物濃度は火星氷床とは異なり ppm レベル以下である。氷床氷はその自重と氷床の表面傾斜から生ずるせん断応力による塑性変形により流動する。その変形機構は低応力で優勢である拡散クリープと高応力で優勢である転位クリープの両方を含んでいるが、流動の大部分を生み出す氷床深部 (特に岩盤付近) では氷は転位クリープで変形しており、その流動則は歪み速度が応力の3乗に比例する Glen の流動則 [16]として知られている。火星氷床の場合は構成物質は H₂O 氷にダストが10%から20%と、さらに CO₂ を含んでいると考えられる。このような氷についての力学的性質を調べた実験的研究は無く、流動則は殆ど分っていない。火星氷床が純粋な H₂O 氷で出来ていると仮定しても、拡散クリープがかなり働いている領域となることが考えられ、上述のこれまでの火星氷床の流動シミュレーションは (Glen の流動則を用いているため) かなり異なった結果を与えていることになる。最近、極氷床だけでなく中緯度の表層でも H₂O 氷を50%程度含んでいることがわかり [2]、Milliken et al. [17]はこの表面地形が地球の氷河地形に類似していることから、高濃度ダスト含有氷の最近の粘性流動によるものと説明している。しかし、彼らの計算も純氷の流動則における最も軟らかい場合に基づいており、果たしてそれほど流れるのか疑問である。実験や観測を主とする雪氷研究者にとってはもう少し探査が進んでデータが出てこないとまだ活躍できる場ではないかもしれない。

2003年の第3回火星極域科学と探査に関する国際会

議[18]の後、惑星科学者と氷河学者が議論し、火星の極域科学に関して未解明の問題点と今後の推奨すべき研究課題として次のようにまとめた。

火星の極域科学に関する未解明の問題点

1. 極冠堆積物の構成物質、構造、年齢の解明
極冠堆積物の年代、組成、構造、表面変位速度、極冠堆積物の物性、岩盤地形、内部構造、地熱流束、温度プロファイル、密度および空隙率など。
2. 極冠堆積物の質量および熱収支とそれを支配するプロセスの解明
現在の放射熱収支、極冠堆積物の質量収支、地軸の傾斜の影響、北極南極の非対称の原因、砂嵐の年変動の起源など。
3. 極冠堆積物の変遷の歴史と水、炭酸ガス、ダストの全球サイクルの関係
堆積物の流動の証拠、極冠の溝の起源など。

今後の推奨すべき観測・研究課題

1. 全球的な長期（10年程度）かつ多点（約20観測点）の気象観測ネットワークの設置
2. 極冠堆積物の内部構造、岩盤地形の物理探査
3. 極冠堆積物の表面高度変化、物性、年代を調べるための高分解能リモートセンシング
4. 極冠堆積物を構成する氷、ダスト他の電気的、熱的、力学的性質を明らかにする実験的研究

これらは2003年11月にNASAのMars Program Officeの主要ミッション計画書"Scientific Goals, Objectives, Investigation and Recommended Investigations"に盛り込まれた。ここに挙げられた項目は極冠堆積物に関してであるが、極冠の氷床に限らず、高緯度の表層中に60%（体積比で）にも及ぶ氷が存在していることが探査機Odysseyのガンマ線分光計（GRS）で明らかになったことにより[2]、雪氷研究者にとって興味範囲が広まったことはいうまでも無い。それがいつどのようにして出来たのか？火星の極氷床を含む高緯度の雪氷堆積物の変遷の歴史と水、炭酸ガス、ダストの全球サイクルおよび火星の気候変動との関連が、上に列記した種々の課題の中で、雪氷研究者にとって

も特に注目されている課題である。

参考文献

- [1] Smith, D.E. et al., 2001, J. Geophys. Res., 106, 23689
- [2] Boynton W.V. et al., 2002, Science, 297, 81
- [3] Bibring, J.P. et al., 2004, Nature, 428, 627
- [4] Fisher, D.A., 1993, Icarus, 105, 501.
- [5] Fisher, D.A., 2000, Icarus, 144, 289.
- [6] Hvidberg, C. S., 2003, Ann. Glaciol., 37, 363
- [7] Howard, A.D., 2000, Icarus, 144, 267
- [8] Fisher, D.A. et al., 2002, Icarus, 159, 39
- [9] Herkenhoff, K.E. and Plaut, J.J., 2000, Icarus, 144, 243
- [10] Kameda, T. et al., 1999, J. Glaciol., 45, 394
- [11] Higuchi, K., 2001, Icarus, 154, 181
- [12] Kobayashi, T., 1965, J. Met. Soc. JPN. II, 43, 359
- [13] Bass, D.S et al., 2000, Icarus, 144, 382
- [14] Bass, D.S. and Paige, D.A., 2000, Icarus, 144, 397
- [15] Smith, D.E. et al., 2001, Science, 294, 2141
- [16] Glen, J.W., 1955, Proc.R.Soc.London, Ser.A, 228, 519
- [17] Milliken, R.E. et al., 2003, J. Geophys. Res. 108, 5057
- [18] <http://www.lpi.usra.edu/meetings/polar2003/>