解説・総説

火星氷床と地球極地雪氷学

東 信彦¹⁾, 東 久美子²⁾, 樋口 敬二³⁾

要 旨

1996年に米国により打ち上げられた火星探査機によって火星両極冠の表面地形が詳細に明らかになった。これにより火星極地雪氷に関する研究が急速に進展した。これまでドライアイスと考えられていた火星南極氷床もH₂O氷でできた氷床である可能性が強いことや、氷床の涵養消耗機構に関する新しい観測結果が続々と発表されている。これらの最新の研究を紹介するとともに問題点や今後の研究の方向性などについて述べる。

キーワード：火星氷床，MGS探査機，ドライアイス，涵養機構

Key words: Martian ice cap, polar layer deposit, MGS, CO₂ ice, accumulation mechanism

1. はじめに

氷床・氷帽と呼ばれるものは、例えば南極氷床のように、内陸部は殆ど平坦であり、降雪による内陸部涵養域を周辺部の消耗域が取り巻いているものと考えられてきた。ところがこれはどうやら地球的常識であって宇宙的常識でないらしい。1996年に米国によって打ち上げられたマース・グローバル・サーベイヤーズ探査機(MGS)に搭載されたマース・オービター・レーザ・アルティメーター(MOLA)やマース・オービター・カメラ(MOC)による火星両極冠の表面地形の詳細な観測によって、様々な面白いことが明らかになってきた。

火星の北極には厚さ3 km 直径1000 km ほどのH₂O氷の氷床が存在する。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、1998～2000年のMOLAによる表面高度測定により深さが500 m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)。写真(図2)の白い部分はテラス状であり涵養域と考えられ、溝内部の南に面した側壁が消耗域と考えられる。またMOCによる撮影画像からこの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り、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と考えられる。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いが、表面高度測定からやはり北極と同じように厚さ約3 km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

図1 MOLAによる表面高度データをもとに合成された火星北極氷床3D図形。(NASAのホームページより引用)

- 1) 長岡技術科学大学
〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1
- 2) 国立極地研究所
〒173-8515 東京都板橋区加賀 1-9-10
- 3) 名古屋市科学館
〒460-0008 名古屋市中区栄 2-17-1

図2 MGS探査機によって撮影された火星北極氷床.
(NASAのホームページより引用)

てCO₂氷で出来ていると考えられてきたが, 以下に述べるように, 表面は季節的にCO₂氷で覆われるもののその下には3 kmの厚さのH₂O氷が隠されているという説が有力になってきた.

このようにこの2, 3年間のMGS探査機がもたらした観測データは地球上の氷河・氷床を研究していた者たちの興味を急に惹きつけることになった. この経緯については「雪氷」の国際会議報告(東, 1999, 東, 2000)に述べたが, 今後この十年間に米国, 欧州, 日本と続々と火星に探査衛星を送り込む計画が進行しており, 間違い無く興奮するような多くの新発見と, さらなる疑問がもたらされるであろう. 以下にまず火星氷床に関する最近の研究を解説し, さらに今後研究されるべき課題について述べたい.

2. 火星氷床の構成物質と氷床流動

火星北極氷床はその表面温度の観測からH₂O氷で出来ていると考えられているのに対して, 火星南極氷床はドライアイスで出来ているのではないかと考えられてきた. Nye *et al.* (2000) は, “もし, 火星南極氷床がCO₂氷で出来ていたら, 自重に耐えて安定して存在できるか?” という命題を, NASAの探査衛星による詳細なトポグラフィデータ (Schenk and Moore, 2000) とCO₂氷のクリープ試験 (Durham *et al.*, 1999) で得られた流動則を用いて議論した.

図3 中心氷厚 h_0 の時間依存性. (Nye *et al.*, 2000)

Nye らは中心の高さが h_0 , 半径が r_0 の氷床を考え, 涵養も消耗もない場合の氷床の形の時間変化を考察した. 用いた連続の式および流動則は:

$$\left(\frac{\partial(qr)}{\partial r} \right) + r \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) = 0 \quad (1)$$

$$q = Ch^{n+2} \left(-\frac{\partial h}{\partial r} \right)_t^n \quad (2)$$

$$C = \frac{D(\rho g)^n}{n+2}$$

q は半径 r での流量, h は半径 r での氷厚, D は流動則の温度依存項, ρ はドライアイスまたは氷の密度, g は火星の重力加速度, n は応力指数である.

これより中心氷厚 h_0 の時間変化は

$$h_0(t) = H_0 \left(1 + \frac{t}{t_0} \right)^{-\frac{2}{(5n+3)}} \quad (3)$$

$$t_0 = \frac{1}{C(5n+3)} \left(\frac{2n+1}{n+1} \right)^n \frac{R_0^{n+1}}{H_0^{2n+1}} \quad (4)$$

ここで H_0 , R_0 はそれぞれ現在 ($t=0$) の中心氷厚, 氷床半径である. 中心氷厚 h_0 の時間依存性を図3に示すが, Nye らはこれにより氷床の年齢は t_0 よりも古くは成り得ないことを示した. t_0 は氷床を構成している物質の流動則 (C と n) と現在の氷床形状 (中心氷厚 H_0 , 氷床半径 R_0) により決まる. また逆に t_0 を与えれば現在の中心氷厚 H_0 が決まる. ドライアイスの力学的性質は実験条件 (応力, 温度) によって C と n はかなり変わる (Durham *et al.*, 1999) が, もっとも硬い場合の流動則で計算しても t_0 は6700年程度しか

らない。火星南極氷床の年齢は表面の隕石クレーターの密度から $10^7 \sim 10^8$ 年程度と見積もられており (Herkenhoff and Plaut, 2000), t_0 を 10^7 年として現在の中心氷厚 H_0 を算出してもドライアイスでは 2000 m 程度になってしまう。これに対して H_2O 氷では t_0 は 2.7×10^8 年となり、クレーター密度による年齢の見積もりと矛盾しない。つまりドライアイスの硬さでは早く流れてしまっただけで現在の 3000 m の氷厚を保てないのである。この計算では Nye らは岩盤を平面とし、温度は氷床全体にわたって均一で 180 K と仮定したが、その後の氷床の自重による岩盤の沈み込みと氷床内部での温度変化を考慮したモデルでも結論は同じであった (Nye, 2000)。

氷床内部温度は表面温度、氷厚、氷床構成物質の熱伝導率と比熱、岩盤での地熱流束で決まる。表面温度は火星自転軸の傾斜、離心率、表面アルベドによって決まる。Larsen and Dahl-Jensen (2000) は北極氷床の内部温度を次のように推定した。北極氷床の表面は冬にはドライアイスに覆われ夏にはそれらが昇華して H_2O 氷が露出すると考えられるので (Paige *et al.*, 1994; Zuber *et al.*, 2000) 年間の平均的なアルベドを両者の中間の 0.55 と見積もった。自転軸の傾斜 (現在の傾斜 25.2°) は 12 万年周期で変動し、その振幅は 120 万年周期で変動することが知られており、表面温度はそれに同期して大きく変動する。氷床は H_2O 氷にダストと CO_2 クラスレイトが混じったものと考えられているが、これらの混合量により熱伝導率が大きく変わる ($0.5 \sim 3.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)。地熱流束がもっとも不確定な値であるが、Clifford (1987) による推定値 $3 \times 10^{-2} \text{ Wm}^{-2}$ (地球の地熱流束の約半分) をこのモデルで用いた。彼らはモデル計算により、次の結論を導いた。1) 氷床表面温度の年平均値は自転軸の傾きにより約 27 K 変動する。2) これは深さとともに減衰し、氷床底面温度の変動幅は (熱伝導率と比熱に依存して) 1.5 ~ 9 K 程度となる。また底面温度が融解点に達していることは十分ありえる。もし、氷体内部に低熱伝導率である CO_2 クラスレイトやドライアイスが多量に存在していれば、底面温度は高くなり氷床流動を促進するとしている。今後探査ロボットによる氷床掘削も計画されているの

で、氷床温度プロファイルが明らかになる日までこれ以上の議論は待つしかない。

3. 火星北極氷床特有の表面地形

Fisher (1993, 2000) は火星北極氷床に見られる断崖と溝 (scarps and troughs) からなる特異な構造を、図 4 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。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。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られている。Hvidberg (2000) は実際に MOLA による表面トポグラフィデータを用いて “Accublation モデル” により流動シミュレーションを行ったが、非常に大きな消耗速度を与えない限り、流動によって溝 (troughs) は時間とともに埋まっていくという結果が得られた。

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 (2000) はカタバ風 (斜面下降風) による剥離作用で説明しているが、チャ

図 4 Accublation モデルによる氷床内部流線。 (Fisher (1993) の原図に基づく)

ズマ ボレアル (Chasma Boreale) のよう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。これに対して Fisher and Winebrenner (submitted to Icarus) 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 (Byrne and Ingersoll, 2000) 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が一致しない場合は溝のリニエーション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。

4. 火星氷床の涵養および消耗機構

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、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。

Herkenhoff and Plaut (2000) は Viking 探査機および Mariner 9 で撮られた両極氷床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、北極氷床表面の年齢は最大 10 万年程度であるのに対して南極氷床は約 1000 万年と考えられる。クレーターは積雪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表面形成速度 (涵養速度または消耗速度) は北極氷床で 1.165 mm/yr 南極氷床で 0.06 mm/yr と見積もられた。また、Fenton and Herkenhoff (2000) は MOLA および MOC データを用いて北極氷床の層構造から気候変動周期を見積った。氷床の断崖側壁に見られる堆積層の単一層の厚さは 20 ~ 60 m であり、涵養量を 1.165 mm/yr (Herkenhoff and Plaut, 2000) とすると 10^4 年に相当する。火星の回転軸の変動周期は $10^5 \sim 10^6$ 年であり一致しないが、この期間の一時期しか涵養が無いとすれば矛盾しないとしている。

Bass *et al.* (2000) 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 年間にわたる北極氷床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氷床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が高い。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。これらの観測結果より、北極氷床上への積雪 (または着霜) は主に北極の夏に起きていると考えられる。さらに観測された表面反射率データに対して、氷粒子の一次散乱に対するミー理論と積雪層中の多重散乱に対する delta-Eddington 近似を用いて積雪粒子径と積雪層の厚さを推定した。その結果、表面輝度は $20 \mu m$ の氷粒子径で $2.5 \mu m$ 径のダストを 50 % 含んでいる場合、または、 $100 \mu m$ の氷粒子径でダストを 10 % 含んでいる場合、または $1 mm$ の氷粒子径でダストを 1 % 含んでいる場合に相当する、としている。

氷床中のダスト含有量は上述したように氷床温度や流動速度を議論するうえでも極めて重要であるが、唯一の推定手法である表面輝度観測からは氷粒子径が分からないと決まらない。そして、主な涵養機構は降雪なのか表面への着霜なのか? が問題である。

Bass and Paige (2000) 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 200 K ($-73^\circ C$) 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ードが増加する。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ている。

夏の火星北極氷床の表面温度および下層大気温度は 220 K ($-53^\circ C$) ぐらいまで上昇する。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 200 K 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 (Kameda *et al.*, 1999) 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。Higuchi (2001)はこのドームふじでの観測結果およびViking2探査機による火星表面における H_2O 氷の形成に関する観測結果(Jones *et al.*, 1979)とKobayashi (1965)による低温における H_2O 氷の結晶成長実験の結果に基づいて、火星北極氷床の表面におけるFrost crystalの成長を試算し、0.1 mmから1 mm (in water)の涵養が冬季の100火星日の期間にあると推定した。このように氷床表面への直接凝結が重要な涵養機構である可能性は大きい。しかしながら、Tamppari *et al.* (2000)やTamppari and Bass (2000)はViking探査機のIRTMデータから H_2O 雲を検出する技術を開発し、それにより詳細に分析した結果、北半球の春と夏には北極氷床の上空に H_2O 雲がかなりの頻度で広がっており、ダストを核として凝結した雪が氷床上に降雪する可能性が大きいことを示している。

一方 CO_2 の雲の観察は最近のMGS探査機のMOLA装置によって調べられた。その結果、明るい(後方散乱のする) CO_2 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(Smith *et al.*, 2001)。この間北極氷床は CO_2 雪で覆われる(Zuber *et al.*, 2000)。

5. 疑問点と今後研究されるべき課題

火星氷床について最近明らかになってきたことを上述したが、観測データの解析や解釈はNASAを始めとする惑星科学者によって主に行われてきた。したがって、特に降雪機構に関する研究では、事象の定義があいまいで、雪氷や気象の研究者から見ると疑問に感ずる事が多い。論文中や国際会議の発表でMOLA(レーザー高度計)によって観測されたice hazesやwater ice cloudsの報告がよくされているが、これらの定義がはっきりしていない。つまり、レーザー高度計によってhazesやcloudsとされている被写体のparticleの種類、大きさ、数に関する観測の報告が無く、定義が明確でない。このようなことはほんの1例であるが、これまで地球の雪氷を研究していた者が参加すれば飛躍的に火星の極地科学の研究は発展するはず

である。火星の極地氷床研究で今後の興味ある課題を以下に挙げてみよう。

- 1) 降雪は起きるのか? 観測されているcloudsは地球上の雲のように、その中でsnow crystalが成長するような性質・構造を持っているのか? もし、成長するとすれば、そのためにはcloudsはどのような性質・構造をもっていればよいのか? 火星の場合snow crystalは H_2O 、 CO_2 およびその混合が考えられる。
- 2) レーザー高度計によるhazesやcloudsの観測について実験及び野外調査が望まれる。
- 3) 霜による氷床表面への直接凝結はどの程度あるのか?
- 4) H_2O 、 CO_2 のice crystalの成長過程を実験室で再現する。過去にKobayashi (1958)によって低圧大気中における H_2O crystal, Komabayasi (1970)によって CO_2 crystalの成長実験が行われていたが、最新の実験技術を駆使して進める必要がある。
- 5) 氷床の消耗速度はどれくらいか? 何らかの方法で測定するか推定する必要がある。
- 6) 地球の氷床に関するレーダーサウンディング観測の成果と技術を生かして、氷床の内部構造を探查する(藤田, 2000; Fujita, 2000)。
- 7) 氷床の構成物質と温度プロファイル。氷床中には H_2O 氷の他に CO_2 クラスレイトやダスト等の不純物が多量に含まれているはずであるが、これらを含んだ氷の流動特性は分かっている。実験室レベルでの研究が可能である。
- 8) 特異な氷床表面地形を形成するメカニズムの解明は興味ある研究課題である。
- 9) 遠い先のテーマであるが、氷床堆積層に保存されている火星の気候変動の解明。

6. 終わりに

地球南極氷床は地球の気候変動史の記録庫として、また地球気候システムの主要因子として重要な研究対象であり、多くの雪氷学者や気候学者の興味を惹きつけてきた。南極氷床の本格的な研究は前世紀の半ばに始まり、この特集号に書かれているように、最近の50年で氷床の最奥地での深層掘削が可能となり、地球の気候・環境変動メカ

ニズムが解き明かされつつある。一方、近年の惑星探査技術の進歩により地球外惑星にも地球の南極やグリーンランドに匹敵する氷床が存在することが確認された。火星氷床は両極とも H_2O 氷で出来ている可能性が高く、生命発見の可能性や将来の火星探査時のエネルギー資源として重要視されつつあるが、我々地球科学者にとって興味深いことは、地球氷床と比較できる別の対象ができたことである。火星氷床の形成・維持機構や大気・水循環システムを明らかにし、地球氷床と比較することは地球の気候・環境変動メカニズムを解明する上でも重要な意味を持つことは言うまでも無いが、何と言っても、純粋な興味として、地球上では考えられない新しい現象が発見される期待がある。筆者らの世代には火星氷床まで探査に行ける可能性は無いが、あと 20 年後ぐらいには今の若い誰かが火星北極氷床で降雪観測や氷床掘削をしているかもしれない。もうそんなに遠いことではない。

文 献

- 東 久美子, 1999: 火星の極域の科学と探査に関する第一回国際会議に参加して. 雪氷, **61**, 1, 49-50.
- 東 信彦, 2001: 「第2回火星の極域科学と探査に関する国際会議」報告. 雪氷, **63**, 2, 282-284.
- Bass, D. S., Herkenhoff, K. E. and Paige, D. A., 2000: Variability of Mars' North Polar Water Ice Cap; I. Analysis of Mariner 9 and Viking Orbiter Imaging Data. *Icarus*, **144**, 382-396.
- Bass, D. S. and Paige, D. A., 2000: Variability of Mars' North Polar Water Ice Cap; II. Analysis of Viking IRTM and MAWD Data. *Icarus*, **144**, 397-409.
- Byrne, S. and Ingersoll, A. P., 2000: Sublimation Model for Formation of Residual Cap Depressions. The Second International Conference on Mars Polar Science and Exploration, Reykjavik, Iceland, Lunar and Planetary Institute, 16-17.
- Clifford, S. M., 1987: Polar basal melting on Mars. *J. Geophys. Res.*, **92**, 9135-9152.
- Durham, W. B., Kirby, S. H. and Stern, L. A., 1999: Steady-state flow of solid CO_2 : Preliminary results. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3493-3496.
- Fenton, L. K. and Herkenhoff, K. E., 2000: Topography and Stratigraphy of the Northern Martian Polar Layered Deposits Using Photoclinometry, Stereogrammetry, and MOLA Altimetry. *Icarus*, **147**, 433-443.
- Fisher, D. A., 1993: If martian ice caps flow: Ablation mechanisms and appearance. *Icarus*, **105**, 501-511.
- Fisher, D. A., 2000: Internal Layers in an "Accublation" Ice Cap: A Test for Flow. *Icarus*, **144**, 289-294.
- Fisher, D. A. and Winebrenner, D.: Model for the Cottage Cheese Lineations on the North Cap of Mars, submitted to *Icarus*.
- 藤田秀二, 2000: 大陸氷と惑星氷のレーダーサウンディングー氷の高周波誘電物性からみた現状と将来展望. 雪氷, **62**, 1, 49-60.
- Fujita, S., 2000: Radar Sounding of Layering in Polar Ice Sheets: Possibilities and Limitations Considering the Dielectric Properties of Ice Crystals. The Second International Conference on Mars Polar Science and Exploration, Reykjavik, Iceland, Lunar and Planetary Institute, 46pp.
- Herkenhoff, K. E. and Plaut, J. J., 2000: Surface Ages and Resurfacing Rates of the Polar Layered Deposits on Mars, **144**, 243-253.
- Higuchi, K., 2001: Formation of Frost Layer of Water Ice on Mars. *Icarus*, **154**, 181-182.
- Howard, A. D., 2000: The Role of Eolian Processes in Forming Surface Features of the Martian Polar Layered Deposits. *Icarus*, **144**, 267-288.
- Hvidberg, C. S., 2000: An Ice Flow Model of the North Polar Martian Ice Cap. The Second International Conference on Mars Polar Science and Exploration, Reykjavik, Iceland, Lunar and Planetary Institute, 79pp.
- Jones, K. L., Arvidson, R. E., Guinness, E. A., Bragg, S. L., Wall, S. D., Carlston, C. E. and Pidek, D. G., 1979: One Mars year: Viking Lander imaging observations. *Science*, **204**, 799-806.
- Kameda, T., Yoshimi, H., Azuma, N. and Motoyama, H., 1999: Observation of "yukimarimo" on the snow surface of the inland plateau, Antarctic ice sheet. *J. Glaciol.*, **45**, 150, 394-396.
- Kobayashi, T., 1958: On the Habit of Snow Crystals Artificially Produced at Low Pressures. *J. Met. Soc. Japan*, **II**, **36**, 5, 193-208.
- Kobayashi, T., 1965: Vapour Growth of Ice Crystal between -40 and $-90^\circ C$. *J. Met. Soc. JPN.*, **II**, **43**, 6, 359-367.
- Komabayasi, M., 1970: Shape Instability of Crystals of Ice, Carbon Dioxide and Ammonia Grown in a Cold Chamber. *J. Met. Soc. JPN.*, **48**, 4, 270-286.
- Larsen, J. and Dahl-Jensen, D., 2000: Interior Temperatures of the Northern Polar Cap on Mars. *Icarus*, **144**, 456-462.
- Nye, J. F., 2000: A flow model for the polar caps of Mars. *J. Glaciol.*, **46**, 154, 438-444.
- Nye, J. F., Durham, W. B., Schenk, P. M., and Moore, J. M., 2000: The Instability of a South Polar Cap on Mars Composed of Carbon Dioxide. *Icarus*, **144**, 449-455.
- Paige, D. A., Bachman, J. E. and Keegan, K. D., 1994: Thermal and albedo mapping of the polar regions of Mars using Viking thermal mapper observations. 1. North polar region. *J. Geophys. Res.*, **99**, 25959-25991.
- Schenk, P. M. and Moore, J. M., 2000: Stereo topography of the south polar region of Mars: Volatile inventory and Mars polar lander landing site. *J. Geophys. Res.*,

- 105, E10, 24529-24546.
- Smith, D. E., Zuber, M. T., Frey, H. V., Garvin, J. B., Head, J. W., Muhleman, D. O., Pettengill, G. H., Phillips, R. J., Solomon, S. C., Zwally, H. J., Bruce Banerdt, W., Duxbury, T. C., Golombek, M. P., Lemoine, F. G., Neumann, G. A., Rowlands, D. D., Aharonson, O., Ford, P. G., Ivanov, A. B., Johnson, C. L., McGovern, P. J., Abshire, J. B., Afzal, R. S. and Sun, X., 2001: Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA): Experiment Summary after the First Year of Global Mapping of Mars. *J. Geophys. Res.*, **106**, E10, 23689-23722..
- Tamppari, L. K., Zurek, R. W. and Paige, D. A., 2000: Viking era water-ice clouds. *J. Geophys. Res.*, **105**, E2, 4087-4107.
- Tamppari, L. K. and Bass, D. S., 2000: Martian North Polar Water-ice Clouds during the Viking Era. The Second International Conference on Mars Polar Science and Exploration, Reykjavik, Iceland, Lunar and Planetary Institute, 166-167.
- Zuber, M. T., Smith, D. E., Neumann, G. A. and Lemoine, F. G., 2000: Structure and Dynamics of the Polar Regions of Mars from MGS Topography and Gravity. The Second International Conference on Mars Polar Science and Exploration, Reykjavik, Iceland, Lunar and Planetary Institute, 190-193.

Martian polar ice caps and terrestrial polar glaciology

Nobuhiko AZUMA¹⁾, Kumiko GOTO-AZUMA²⁾ and Keiji HIGUCHI³⁾

1) *Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188*

2) *National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515*

3) *Nagoya City Science Museum, 17-1, Sakae 2-chome, Naka-ku, Nagoya 460-0008*

(2001 年 10 月 24 日受付, 2002 年 6 月 4 日受理)