火星における不凍水とその役割

猿 谷 友 孝^{*+}

Premelting Water and Its Role on Mars

Tomotaka SARUYA^{*+}

[Received 29 August, 2014; Accepted 10 March, 2015]

Abstract

Recent detailed explorations of Mars have revealed various types of landform that are similar to terrestrial periglacial landforms and provided direct and indirect evidence for ground ice. More than 60 % of regolith is occupied by ice at high latitudes. Phoenix lander has discovered pure ice by trenching at the landing site, and the volume fraction is up to 90 %. Many researchers have investigated formation mechanisms of excess ice, but uncertainties still remain. In addition to acquisition of detailed Martian surface data, a range of water forms such as premelting water and brine water have drawn attention in the Martian environment with the development of premelting dynamics. Premelting water (also called unfrozen water), which is adsorbed to particle surfaces and confined to capillary regions, remains in a liquid state below the nominal melting temperature. Migration and solidification of premelting water causes various periglacial processes such as ice lens formation, frost heave, and soil movement. Although bulk water cannot exist in the recent Martian environment, premelting water can remain in a liquid state due to interaction with regolith and the existence of salt. Electrolytes in water decrease evaporation rate and broaden the stable temperature range of liquid water. Sizemore *et al.* (2015) investigated the initiation and growth of Martian ice lens by developing an ice lens model and a climate model. Numerical simulations suggest that ice lens initiation is a ubiquitous phenomenon in the high latitudes, but the magnitude of ice lens growth depends highly on soil properties. In particular, deliquescent salts and water vapor are important sources of water. Further development of numerical models and experiments that simulate Martian environments are required.

Key words : premelting water (unfrozen water), ice lens, frost heave, Phoenix, ground ice

キーワード : 不凍水, アイスレンズ, 凍上, フェニックス, 地下水

I. 火星表面の周氷河地形と地下水

1) はじめに

近年の活発かつ詳細な火星探査によって、地球の周氷河地形と似た多くの地形が表面でみつかっ

てきた。これらの地形の具体的な成因や形成時期についてはいまだ明らかになってはいないものが多いが、地球と同じように凍結融解作用等の周氷河プロセスで形成されたのではないかと考えられている（詳細は本特集号の松岡，2016 参照）。

* 東京大学地震研究所

+ 現所属：国立極地研究所

* Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, 113-0032, Japan

+ Present address: National Institute of Polar Research, Tokyo, 190-8518, Japan

図 1 二酸化炭素と水の相図 (Longhi, 2006)。

Fig. 1 Phase diagram of CO₂ and H₂O (Longhi, 2006)。

しかしながら、現在の火星は非常に低温で大気圧が低く、周氷河地形をつくるほどの豊富な水や氷があるとは考えにくい。そのため、過去の温暖な時期に形成された可能性が高い。周氷河プロセスや地形形成は環境に強く依存しており、過去の環境変動の指標となりうるため、その研究意義は大きい。火星表層環境を議論する上で表面を覆うレゴリス層の役割は非常に重要である。地球と比べて大気-地表面（固体圏）の相互作用が強く、レゴリス層は大気成分の貯蔵領域になっており、大気進化において大気量を制約する役割を担っている。

本稿では観測によって明らかになってきた火星表層における氷・水蒸気の存在や周氷河プロセス、そして地形形成において重要であるマイクロスケールの液体や粒子層の凍結融解に伴う物理過程、すなわち Premelting dynamics について概観を述べる。

2) 大気中の水蒸気と地下氷の存在

火星を見た時にまず目につくのは極域の白い

塊、すなわち極冠である。これは、下部に水氷 (H₂O からなる氷) が埋もれているが、大部分が冬の間に堆積した二酸化炭素の氷 (ドライアイス) からなり、特徴的な層構造をなしている (詳細は本特集号の横川, 2016 参照)。火星は温度の日変動・季節変動が大きく、これらの変動を通して固相と気相の相境界を幾度となく横切る (図 1)。そのため火星大気の主成分である二酸化炭素の濃度は大きく季節的に変動し、冬には極冠としてかなりの量が固定される (Kelly *et al.*, 2006)。火星の大気や氷の大部分は二酸化炭素であるが、水蒸気も少なからず存在し二酸化炭素と同様に濃度が季節変動する。火星大気中における水蒸気濃度は、極冠の氷の拡大縮小に伴って季節変動することがバイキング (Viking) やマーズ・グローバル・サーベイヤー (Mars Global Surveyor) の観測によってわかっている (Jakosky and Farmer, 1982; Smith, 2002)。

水氷に関しては、探査機マーズ・オデッセイ (Mars Odyssey) に搭載されたガンマ線分光器

図 2 マーズ・オデッセイ搭載のガンマ線分光器によって観測された地下水の分布 (Feldman *et al.*, 2004). 高緯度帯ではレゴリスの 60% 以上が氷で占有されている。

Fig. 2 Global distribution of ground ice observed with a Gamma Ray Spectrometer aboard Mars Odyssey (Feldman *et al.*, 2004). More than 60% of the regolith at high latitudes is occupied by ice.

(Gamma Ray Spectrometer) のガンマ線・中性子観測によって、火星の地下に豊富に存在していることが明らかになった (Boynton, *et al.*, 2002; Feldman *et al.*, 2004)。低中緯度にも少なからずの地下水が存在するが、両半球 50° 以上の高緯度帯では、レゴリスの 60% 以上が氷で占有されていることが示唆されている (図 2)。また中高緯度地帯の新しいクレーターの下部には高純度の地下水層があることも可視・赤外観測によって示されている (Byrne *et al.*, 2009)。火星地表付近は一般に 2 層に分かれており、氷に乏しい乾燥した層が、氷に富む層を覆う構造になっている。これらの 2 層は ice table と呼ばれる境界で分かれている。この境界は低緯度側ほど深くなり、ice table の深さはおもに大気中の長期的な水蒸気の拡散平衡や表面温度によって決まる (Mellon and Jakosky, 1993; Mellon *et al.*, 2004)。しかし変動こそするものの、水蒸気量の絶対量は非常に少なく可降水量にして $100 \text{ pr-}\mu\text{m}$ 以下である。また、緯度依存性をもった地下水の分布とは別に、局所的に地下水が豊富に存在する地域があ

る。アラビア・テラ平原 (Arabia Terra) とタルシス (Tharsis) の火山地域である。これらの地域では地下水だけでなく大気中の水蒸気も局所的に高濃度となる季節があり (Fouchet *et al.*, 2007), 大気-地表面間での活発な物質交換の可能性が示唆されている (Saruya *et al.*, 2010)。このように火星の地下水を議論する際には、大気中の水蒸気とカップリングさせての議論が不可欠である。長期的な気候変動をみる際にも、大気-地表面間の二酸化炭素や水蒸気の物質交換は表層環境をコントロールする重要な要因である。

なお、ここでは詳細を述べることは避けるが、火星における二酸化炭素ハイドレートの形成が今後の重要なテーマになりうる。かつて豊富にあった二酸化炭素大気はその大部分が失われたが、散逸メカニズムや量は未解明な点が多く残っている。一般的に考えられる宇宙空間への散逸だけでは足りず、地下への固定の可能性も提案されている (Chassefière *et al.*, 2013)。効率的に二酸化炭素を減らす過程として二酸化炭素ハイドレートが形成された可能性がある。しかし、ハイドレート

をつくるような高圧環境をどのように獲得したのか、また現在も地下に二酸化炭素ハイドレートが保存されているかなどの疑問点は多く、今後の進展が期待される。

火星において氷の存在が観測されるようになり、これまでその分布や成因についての議論が室内実験や数値的な解析によってなされてきた。最近では着陸機による土壌の調査も進んでおり、火星表層を構成する物質の詳細がわかってきた。今後は氷や水蒸気の挙動に関してレゴリスや土壌の性質に着目した、よりマイクロスケールな物理や化学を用いての議論が必要になってくるだろう。

II. 不凍水と物理プロセス

1) 氷の表面融解

火星表面で起きている水の凍結や水蒸気の昇華、降霜は相転移に伴う水の性質変化によるものである。相転移のメカニズムは最近数十年の研究によって、氷表面に存在する「疑似液体層 (quasi-liquid water)」が本質的な役割を果たすことが明らかになってきた (Furukawa and Nada, 1997; Worster and Wettlaufer, 1999)。疑似液体層は氷の表面融解によって形成される水数十分子 (数 nm) の薄膜であり、0℃ 以下でも流動性を保っている。氷結晶内部では水分子が格子状に規則正しく並んでいるが、氷表面では規則性が乱れ液体のように乱雑な分布になる。そのため、疑似液体層は固体と液体の間のような性質をもっている。相転移はこの疑似液体層を通して行われるため、疑似液体層は氷の結晶成長や融解プロセスの中心的な役割を担っている。0℃ 以下であるスケートリンクの上を滑ることができるのはこの疑似液体層のおかげである。また、積乱雲のなかで氷粒子を介して衝突帯電が起こるのも粒子を覆う疑似液体層を通しての電荷の移動・集積が原因である (Baker and Dash, 1989)。このように氷表面の疑似液体層はさまざまな現象を引き起こす要因となっている。こうした氷表面の疑似液体層は、凍土中や 0℃ 以下の多孔質媒体中の粒子-氷界面や毛管部分にも存在する。0℃ 以下でも液体

の状態を保つものは「不凍水 (premelting water もしくは unfrozen water)」と呼ばれ、この不凍水の存在・移動がさまざまな周氷河プロセスや地形形成において重要となる。

2) 凍土・多孔質媒体中の不凍水

周氷河プロセスにおいて不凍水の役割は非常に多岐にわたっている。不凍水が存在するのは、氷-粒子間に働く全体の界面エネルギーは、氷と粒子が直接接しているよりも、間に水の薄膜を挟んだ方が小さくなるためである。一般に過冷却水は不凍水には含まれない。

凍土中の不凍水量は水と氷の比熱の違いと氷の融解熱を利用したカロリーメータ法、氷と水の誘電率の違いを測る時間領域誘電率測定 (TDR)、水と氷の緩和過程の違いを利用した核磁気共鳴 (NMR) 法などによって調べることができる。Ishizaki *et al.* (1996) は 0℃ 以下の多孔質媒体においてパルス型 NMR 法を用いて不凍水量曲線とよばれる不凍水量と温度の関係性を調べた。また Anderson and Morgenstern (1973) はさまざまな土粒子を用いて凍土中の不凍水量を測定し、ベントナイトのような微粒子は低温でも多くの不凍水を保持する一方で、玄武岩質の粗大粒子では不凍水がほとんど存在しないことを明らかにした。Zent (2008) は、Anderson and Morgenstern (1973) の測定結果をもとに、不凍水量と比表面積の関係性を見積もり、比表面積が大きいほど不凍水量が多くなること、そして -70℃ の低温でも数%の不凍水量が存在できることを示した。また、空隙水中の塩や電解質の存在は、不凍水の量や挙動に大きな影響を与えることが知られている。Watanabe and Mizoguchi (2002) は不凍水量と電解質の濃度の関係をパルス NMR 法で測定し、電解質濃度の増加に伴って不凍水量が多くなることを示した。不凍水中の電解質は濃度によって異なる挙動を示し、粒子間の相互作用にも影響を及ぼす。液中の電解質の挙動はコロイド科学分野の DLVO 理論によってよく理解されており (Israelachvili, 2011)、この理論を 0℃ 以下の不凍水中まで発展させた研究もされている (Wettlaufer, 1999)。不凍水の存在や挙動に関し

ては未解明な点が多く残されていたが、近年分子間・粒子間相互作用や Premelting dynamics と呼ばれるマイクロ・ナノスケールの流体力学に基づいて理解されるようになってきた (Wettlaufer and Worster, 2006; Dash *et al.*, 2006)。

原子間・分子間に働く力のなかでクーロン力や分極力は帯電原子・分子や双極性原子・分子のみに作用するが、瞬間的な電荷のゆらぎによって生じる分散力は中性原子や中性分子にも作用する。分散力は中性でも作用するため、原子・分子間の全ファンデルワールス力のなかで最も重要な寄与をし、粒子同士の付着や表面張力、ぬれ、相転移、粒子凝集などで大きな役割をもっている。近接した粒子間や物体間に作用するファンデルワールス力は分散力に起因しており、距離 h 離れた2つの半無限体に働く力は単位面積あたり

$$F = -\frac{A}{6\pi h^3} \quad (1)$$

で表される (Israelachvili, 2011)。ここで A はファンデルワールス相互作用の強さを表すハマーカ一定数で、接する物質の性質によって大きく異なる。ハマーカ一定数が負の場合は斥力となる。 0°C 以下で部分凍結した水-粒子の混合層では粒子間や水との間にこの力が作用するのに加え、温度依存性をもった不凍水の液膜を加えた取り扱いが必要となってくる。

水と粒子の混合層が 0°C 以下になると空隙部分の水は氷になるが、粒子近傍にはかなり低温でも不凍水の液膜が存在する。これは粒子と氷の表面を引き離して全体の界面エネルギーを下げようとするファンデルワールス力が作用しているためである。Premelting dynamics では、液膜を介して氷と粒子に作用するファンデルワールス力を熱分子間力と呼んでいる。また、多孔質媒体が微細構造をもっている場合や毛管部分では、曲率の効果によっても不凍水は生成される。液膜の安定的な厚さは温度とファンデルワールス相互作用の強さ、毛管部分の曲率によって決まる。温度 T における液膜の厚さを d とすると熱力学的な平衡条件より

図 3 水中の粒子と不凍水膜。

Fig. 3 Encapsulated particle in ice covered with a thin liquid film of unfrozen water.

$$\rho L = \frac{T_m - T}{T_m} = \gamma\kappa + \frac{A}{6\pi d^3} \quad (2)$$

が成り立つ。ここで ρ と L は氷の密度と潜熱、 T_m はバルクな氷の融点である。右辺第1項は毛管部分の曲率によるもので、 γ と κ はそれぞれ氷-水間の界面エネルギーと曲率を表す。第2項は熱分子間力による界面融解への寄与である。曲率による融点降下はギブス・トムソン効果として知られており、微粒子ほど大きい曲率をもつため融点降下は大きくなる。ギブス・トムソン効果による融点降下の影響は、微粒子を含む土壌ほど低温でも不凍水を多く保持しているという性質に現れている。

3) Premelting dynamics

このように氷の表面融解や 0°C 以下の多孔質媒体中の水や粒子の挙動を扱う分野が Premelting dynamics である。一般的な流体力学と違い、厚さ数 nm の液膜のダイナミクスは粒子や氷との相互作用などを伴うため、微小スケールでの取り扱いが必要となる。

水中にある粒子は温度勾配に沿って移動することが知られており、復氷 (thermal regelation) と呼ばれている。図3は温度勾配のある氷内にトラップされた粒子を示している。水中にある粒子はその周囲を不凍水の液膜で覆われている

(Rempel *et al.*, 2004)。水に温度勾配がある場合、式 (2) より低温側では液膜が薄くなり、粒子と氷を引き離す力 (熱分子間力: P_T) が高温側に比べて強くなる。そのため粒子は高温側へと移動し、それを補うように液膜を通して低温側へ水が移動する。一般に液膜のようなナノスケールの液体の流れは Lubrication theory によって記述され、工学分野では潤滑油の挙動などがこの理論をもとに調べられている。Premelting dynamics において Lubrication theory は熱分子間力の勾配に起因する水の流れを記述する (Dash, 1989; Wilen and Dash, 1995)。

ここでは単粒子の場合を示したが、より複雑な多孔質媒体中でも粒子の移動・水の流れは起こる。粒子は復水によって高温側へ移動していくため、粒子の背後には純粋な氷が残る。粒子の移動と水の供給が続けば氷は成長し、粒子を含まない氷層となる。粒子を含まない氷層は、空隙水と区別してアイスレンズと呼ばれている。水が安定して存在できない火星にとって、レゴリス内に存在する不凍水の役割は非常に大きい。地下水や水蒸気への不凍水の影響は、水が豊富に存在できる地球と比べて大きいだろう。

4) アイスレンズと凍上

地面が 0°C 以下にさらされると土壤空隙中の水が凍り、凍土が形成される。寒冷地の地表面では土壤の凍結時に「凍上」と呼ばれる地面の隆起が起こることが知られている。凍上による地面の隆起の力は非常に強く、コンクリートや建造物を破壊するほどの力をもっている。

凍上の原因となるのは地中における「アイスレンズ」と呼ばれる氷層の析出・成長である。アイスレンズは土壤凍結時に不凍水の移動・固化によって形成され、周囲の土壤粒子を吐き出しながら成長する。アイスレンズや凍上に関する研究は古い歴史をもっており、Taber (1929, 1930) 以来、実験的・理論的に数多くの研究が行われてきた。毛管現象に基づく形成モデル (Ozawa and Kinoshita, 1989) や、復水概念を用いた二次凍上モデル (O'Neill and Miller, 1985) などが考案されてきたが、実験結果との不一致などが原因

で形成プロセスの解明には至らなかった。近年 Premelting dynamics の理論に基づくモデルが提案されている。幾何学的な過冷却により大きな空隙からアイスレンズが成長していくクラックモデル (Style *et al.*, 2011) や熱分子間力により応力分布や不凍水の移動を説明するモデル (Rempel *et al.*, 2004; Rempel, 2007, 2008, 2011) などである。また、土壤粒子周りの液膜流によるカイネティクスに注目したモデル (Style and Peppin, 2012; Saruya *et al.*, 2013) も提案されている。Rempel (2008) はアイスレンズ形成モデルを發展させ、氷河下部の流動性や漂礫土と氷の相互作用を議論している。アイスレンズは単に水-土壤系のみならず、ガラスビーズ等の多孔質媒体や水の代わりにアルゴン、ヘリウムなどを用いた実験においても析出することがわかっている (Watanabe and Mizoguchi, 2000; Zhu *et al.*, 2000; Mizusaki *et al.*, 2007)。図 4 にさまざまな凍結実験によって得られたアイスレンズの写真を示す。

アイスレンズの形成や凍上のしやすさは土壤粒子の性質に強く依存しており、古くから工学的な見地によって土壤の凍上性の判定が行われてきた。とくに土壤粒子の粒径はアイスレンズの成長や凍上性を決定する基本的かつ重要な因子である。Beskow (1935) は粒径 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以上の土粒子からなる土壤は非凍上性であり、それより細かい土壤には凍上性があること、とくに $2\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ の粒子からなる土壤が最も凍上性が高いことを実験的に示した。一方、Saruya *et al.* (2013, 2014a) は均質粒径のガラスビーズを用いてアイスレンズの形成実験を行い、小さい粒径 (数 μm) ほどアイスレンズが大きく成長することを示した。これらの研究は、小さい粒径の土壤ほど不凍水を保持しやすいという性質と一致している。しかしながら、粒子周りの液膜を通しての水流と氷成長のカイネティクスを考慮すると、サブミクロンサイズの粒子ではアイスレンズの成長が抑制されるという理論予測もあり (Style and Peppin, 2012; Saruya *et al.*, 2014b)、さらなる実験が求められる。

アイスレンズ形成・成長は水や土壤粒子の移

図 4 凍結実験で得られたさまざまなタイプのアイスレンズ。(a) ガラスビーズを用いた冷却温度一定の凍結実験で得られたマクロなアイスレンズ (Saruya *et al.*, 2014a)。中央部の暗い部分がアイスレンズである。(b) カオリナイトを用いた凍結速度一定の実験で得られたアイスレンズ (横幅は 6 cm)。写真は 20 分間隔で上側の暗い層が古いアイスレンズを示す (Style *et al.*, 2011)。(c) 5 回のクーリングイベントで形成された層状のアイスレンズ。(d) 粉碎した玄武岩粒子層に形成されたアイスレンズ。

Fig. 4 Various ice lenses obtained with freezing experiments. (a) Macroscopic ice lens obtained with a step-wise freezing experiment using fine glass beads (Saruya *et al.*, 2014b). The central dark zone indicates an ice lens. (b) Ice lens obtained with ramped-freezing experiments using kaolinite. Images are taken at 20-min intervals and the width is 6 cm. The dark zone at the upper side indicates an ice lens (Style *et al.*, 2011). (c) Periodic ice lenses obtained with five cooling events. (d) Ice lens formed in crushed basalt grains.

動・再分配を引き起こし、活動層の崩壊やソリフラクション、岩石の凍結破碎の原因となる。部分的な凍上（差別凍上）は構造土の形成や土壌粒子の分級をもたらす。このようにアイスレンズ形成や凍上は凍結融解作用を伴う周氷河環境での本質的な物理現象である。近年、アイスレンズの形成や凍上は地球のみならず火星においても起きていると考えられるようになってきた。

III. 火星環境での不凍水

1) 火星環境での水と不凍水

火星表層において水の存在は長年議論されてき

た。現在の火星の低温低圧環境では、水は一部の季節・場所で存在可能であるものの、長時間存在することはできないと考えられている（例えば、Haberle *et al.*, 2001）。火星表層の特徴として先述した通り、気温や大気圧の日変動・季節変動が非常に大きい点があげられる。図 5 にあるように、火星表面の温度は周回機の熱赤外カメラ (TES や THEMIS) やローバー (スピリット Spirit とオポチュニティ Opportunity)、着陸機 (フェニックス Phoenix) などによって観測されているほか、数値シミュレーションによって地中や全球の変化が見積もられている (Mellon *et al.*,

图 5

Fig. 5

2004; Smith, 2004; Smith *et al.*, 2006; Zent *et al.*, 2010)。日変動は季節変動と同じくらい大きく、赤道付近のオポチュニティによると1日で地表面温度が70℃も変化する。また、赤道付近では日中には地表面の温度が頻繁に273 Kを超える。火星表面での詳細なデータが得られつつある一方で、最近のPremelting dynamicsの進歩に伴って、レゴリス内の粒子に吸着している不凍水の議論が火星環境においてもされるようになってきた(Zent, 2008; Stillman and Grimm, 2011; Boxe *et al.*, 2012)。不凍水は土壌の性質によってはマイナス数十度まで液体状態を保持することができる。また、大気圧が低くてもレゴリス内では粒子表面から受ける界面張力やファンデルワールス力によって十分な圧力を獲得できる可能性がある。例えば数 μm 粒子の場合、不凍水が粒子から受ける圧力は 10^4 Pa にも達する。火星表面は微粒子で覆われているため不凍水の存在には有利に作用する(Möhlmann, 2003, 2010)。

観測データと表面の熱力学的な解析によって火星表面での不凍水の存在領域を調査する研究も精力的に行われている(Kereszturi and Rivera-Valentin, 2012; Kereszturi and Appéré, 2014)。近年では、不凍水起源の水の流れの可能性も後述の塩の影響とあわせて議論されるようになってきた。砂丘やクレーター内壁に見られるガリーは不凍水の集積やアイスレンズの融解によって生じるという指摘もある(Kereszturi *et al.*, 2009; Kos-sacki and Markiewicz, 2010)。不凍水は温度勾配に沿って移動し、アイスレンズとしてまとまって集積することができるため、その融解によってある程度の量の水が流れる可能性も否定はできな

い。しかしながら、レゴリス内の粒子と氷の間にトラップされている(いわば閉じている)不凍水が表層環境にどのような影響を与えるかはいまだ明らかではない。

2) 塩の影響

火星表層の水や氷の挙動において、塩の影響が注目されている(例えば, Möhlmann, 2010; Möhlmann and Thomsen, 2011)。Sears and Chittenden (2005)は火星環境を模擬した実験装置を用いて、NaClとCaCl₂を含んだ水の蒸発率の測定を行った。実験と数値計算の結果から、塩水の蒸発率は純水と比べて有意に小さくなり、水の安定性が増すこと、つまり水が存在できる温度域が広くなることを示した。彼らの実験で示されたように、水中に溶け込んだ塩は融点を下げる効果があり、火星のような低温環境においてその効果は大きい。そのため、最近形成されたガリーは塩水が関与しているという指摘もある(例えば, Bryson *et al.*, 2010)。火星表層のレゴリス内には硫酸塩、塩化物や過塩素酸塩、炭酸塩などさまざまな種類の塩が含まれている(Möhlmann and Thomsen, 2011)。このなかでもとくに過塩素酸塩は局所的に高濃度で存在し、広範囲に存在する可能性もあるため、その役割が注目されている(Hecht *et al.*, 2009; Catling *et al.*, 2010; Navarro-González *et al.*, 2010)。過塩素酸塩の共晶温度はかなり低く、52 wt%の過塩素酸ナトリウムを含む水で約236 K、44 wt%の過塩素酸マグネシウムで約206 Kにもなる(Chevrier *et al.*, 2009)。火星表層においてこれらの温度を超えることは一般的であり、過塩素酸塩が豊富な地域では定常的に液体が存在している可能性もある。

図 5 (a) オポチュニティの観測によって得られた気温の日変化。上図が太陽経度 $L_s = 75\text{--}105^\circ$ (春～夏)、下図が $L_s = 225\text{--}255^\circ$ (秋) である。(b) スピリットが観測した気温の季節変化。上図が 15:30～17:00 に測定した各高度における温度、下図が各時間帯の温度を示している (Smith *et al.*, 2006)。(c) 数値モデルによって見積もられたフェニックス着陸地点の地表面温度 (上図) と地下温度構造 (下図) (Zent *et al.*, 2010)。

Fig. 5 (a) Diurnal variations of temperature measured with Opportunity. The upper and lower figures correspond to solar longitude $L_s = 75\text{--}105^\circ$ (spring to summer) and $L_s = 225\text{--}255^\circ$ (autumn), respectively. (b) Seasonal temperature variations at each local time measured with Spirit. The upper figure shows temperatures at each height at 15:30–17:00, and the lower figure shows each local time (Smith *et al.*, 2006). (c) Surface temperature and subsurface temperature profile estimated with a numerical model (Zent *et al.*, 2010).

図 6 フェニックスの掘削によって露出した、氷が関与している層 (Mellon *et al.*, 2009). 周囲のレゴリスサイズ分布および粒子画像 (Goetz *et al.*, 2010). (a) Dodo/Goldilocks と (b) Upper Cupboard トレンチにおいて明るい色の氷層が見られる. (c) 土壌表面は細かい粒子が非常に多く 100 μm を超える粒子はほとんど存在しない. 大気起源のダストは 5 μm 以下の“fines”と示された領域にある. (d) ロボティック・アーム・カメラによって撮影された土壌粒子の画像. “brown sand” と呼ばれる茶色の粒子と “black sand” と呼ばれる黒色の粒子が存在する.

Fig. 6 Examples of icy material exposed by trenching (Mellon *et al.*, 2009), size distribution, and image of Phoenix-excavated soil (Goetz *et al.*, 2010). Light toned ice layers are exposed in (a) Dodo/Goldilocks and (b) Upper Cupboard trenches. (c) Soil grains are very fine, while large grains ($> 100 \mu\text{m}$) are lacking. Airborne dust is smaller than 5 μm (fines region). (d) A soil image taken with Robotic Arm Camera showing brownish grains (called brown sand) and black grains (called black sand).

IV. 火星におけるアイスレンズと凍上現象

1) フェニックスによる氷層の発見

アメリカの探査機フェニックス (Phoenix) は着陸地点においてロボットアーム (RA) により地下の水層をはじめて直接観測した (例えば, Mellon *et al.*, 2009; Smith *et al.*, 2009) (図 6a, b; Mellon *et al.*, 2009)。フェニックスは北緯 68.22° の Vastias Borealis 平原に着陸し、夏のはじめから

中盤にかけて観測を行った。この地域は、マーズ・オデッセイなどの観測によって豊富な地下水や周氷河性の多角形構造土が存在する可能性が示唆されていた場所である (Mellon *et al.*, 2008; Zent, 2008)。

これまでもガンマ線分光器により火星全球的にレゴリス内にある地下水の存在が間接的に観測されてきたが、これらは大気中の水蒸気がおもな起源であると考えられている。一方、フェニックス

が発見した氷は氷の層であり、大気中水蒸気からのコールドトラップでは形成されないと考えられている (Mellon *et al.*, 2009)。氷層の起源はいまだ明らかではないが、アイスレンズと同様にその場で析出したという説が有力である (Mellon *et al.*, 2009)。しかしながら、この氷層がいつ頃形成され、どのくらいの厚さをもっているかなどは明らかにはなっていない。

2) 着陸地点の土壌と環境

フェニックスはトレンチ内に氷層を発見しただけでなく、さまざまな分析機器を用いて着陸地点付近の土壌や環境の調査を行い、膨大な量の分析結果を取得した (例えば, Chevrier *et al.*, 2009; Hecht *et al.*, 2009; Goetz *et al.*, 2010; Zent *et al.*, 2010; Stillman and Grimm, 2011)。図 6c, d はフェニックス着陸地付近の土壌の粒径分布とロボットアームカメラ (Robotic Arm Camera) によって撮影された土壌粒子の写真である (Goetz *et al.*, 2010)。図 6c の粒径分布では各採取・分析イベントの合計が示してある。粒径はほとんどが 100 μm 以下であり、50 μm 付近に分布のピークがある。これより大きい粒子はごく少量しか見られなかった。なお大気中のダストサイズは図中の “fines” で示される領域に相当する。(d) の写真において茶色の粒子は “brown sand”, 黒色の粒子は “black sand” と呼ばれており、どちらもシルトから砂ほどの大きさである。フェニックスの調査ではこれらの粒子に “red fines” と呼ばれる風成のダストとごく少量で塩と考えられる “white fines” の 2 つを加えて 4 種類に分類された。これらの粒子はタルシスの火山域かヘイムダル (Heimdall) クレーター起源と考えられている。

3) 火星でアイスレンズは形成されるか？

フェニックスが発見した氷層はアイスレンズである可能性が指摘されているが、その形成メカニズムや時期は明らかにされていない。現在の火星環境では液体の水が安定して存在できないため、過去の温暖期に形成されたと考えられており、気候変動や表層環境の変化とあわせて議論されている (Zent, 2008)。火星の自転軸は周期的に変動しており、それに伴って表層環境も変動してきた

(Laskar *et al.*, 2004)。自転軸が大きく傾く時代 (40° 以上) には高緯度で日射量が多くなるため、地下水などの季節的融解も起こりやすく、周水河地形も形成される可能性がある。しかしながら、この時期に形成された地形が現在まで保存されているかどうかは疑問であり、とくにフェニックスが発見したわずか地下数 cm の氷がそのまま保存されているかは問題である。

Sizemore *et al.* (2015) は火星環境でのアイスレンズ形成モデル (Rempel *et al.*, 2004 の熱分子間力を用いたモデルを改変) と過去 100 万年の気候変動とをあわせることにより、火星でアイスレンズが形成されるかを議論した。過去 100 万年について土壌や場所、時期などさまざまな条件のもとに数値計算を行った結果、アイスレンズの発生は高緯度の至る所で起こりうることがわかった。アイスレンズは深さ数 cm ~ 35 cm に形成され、北緯 55° より極側では 245 K の低温でも形成が可能である。成長する厚さは土壌粒子の性質に強く依存し、粘土のような凍上性の強い土壌では数 mm ~ 数 cm になりうる。しかしながら、シルトの場合は、土壌が水の存在量や供給量を増やすような化学的性質 (例えば豊富な塩の存在など) をもっていないとマクロには成長しないことがわかった。また、アイスレンズがマクロに成長するには夏における氷層の成長が何年も続く必要がある。Sizemore *et al.* (2015) が強調しているのは水供給源としての過塩素酸塩の存在と大気中の水蒸気の役割である。過塩素酸塩は潮解性の物質であり、大気中の水蒸気を吸収して液体となるため、水の供給源としての働きが期待される。この物質が水蒸気を伴ってアイスレンズの水供給源として働く場合、アイスレンズの成長速度は地球と同等もしくはそれ以上になると予測した。地球では地下水が凍土内のアイスレンズ形成の水供給源となることが多いが、Sizemore *et al.* (2015) が述べたような大気中の水蒸気が供給源として働くというメカニズムは乾燥した火星環境独自のものである。一般的に地球では水蒸気の供給はフラックスが小さいため無視されており、火星環境での水蒸気起源のアイスレンズ形成に関し

て実験的な裏づけが必要になるだろう。

また過塩素酸塩は生命に関する議論にも欠かさない物質である。地球には過塩素酸塩をエネルギー源とする微生物も存在している (Logan *et al.*, 2001)。火星表層における過塩素酸塩の存在は今後さまざまな方面において重視されるだろう。

V. おわりに

近年の活発かつ詳細な探査によって、火星表層での水や水蒸気の挙動、土壌粒子の性質や温度環境が明らかになってきた。とくにフェニックスが直接観測した氷層のインパクトは大きく、その供給源や形成機構の解明が求められている。それにはマイクロスケールの流体物理や化学を扱う Premelting dynamics に基づいて火星環境での不凍水の役割を明確にすることが不可欠である。今後は火星環境での不凍水の存在やアイスレンズ形成、さらには凍上現象に関して、理論的研究や低温低圧乾燥環境を模した実験的研究などさまざまな面からのアプローチが重要になってくるだろう。

謝 辞

本稿の執筆にあたっては、北海道大学低温科学研究所の一般共同研究の支援を受け、田中秀和准教授、古川義純教授をはじめ研究所の方々に多くの有益なコメントをいただきました。また、University of Oregon の Alan W. Rempel 准教授、東京大学地震研究所の栗田 敬教授には共同研究者としてさまざまな情報をいただきました。本稿を書く機会を与えてくださった編集委員の方々に感謝いたします。

文 献

- Anderson, D.M. and Morgenstern, N.R. (1973): Physics, chemistry and mechanics of frozen ground: A review. in *Permafrost: The North American Contribution to the Second International Conference*. National Academy of Sciences, 257-288.
- Baker, M.B. and Dash, J.G. (1989): Charge transfer in thunderstorms and the surface melting of ice. *Journal of Crystal Growth*, **97**, 770-776.
- Beskow, G. (1935): *Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Railroads*. The Swedish Geological Society, C, No. 375, Year Book No.3 (Northwestern University Technological Institute, Illinois) [Reprinted 1991 CRREL Spec. Rep. 91-23, 37-157].
- Boxe, C.S., Hand, K.P., Nealson, K.H., Yung, Y.L. and Saiz-Lopez, A. (2012): Adsorbed water and thin liquid films on Mars. *International Journal of Astrobiology*, **11** (3), 169-175.
- Boynton, W.V., Feldman, W.C., Squyres, S.W., Prettyman, T.H., Brückner, J., Evans, L.G., Reedy, R.C., Starr, R., Arnold, J.R., Drake, D.M., Englert, A.J., Metzger, A.E., Mitrofanov, I., Trombka, J.I., d'Uston, C., Wänke, H., Gasnault, O., Hamara, D.K., Janes, D.M., Marclalis, R.L., Maurice, S., Mikheeva, I., Taylor, G.J., Tokar, R. and Shinohara, C. (2002): Distribution of hydrogen in the near surface of Mars: Evidence for subsurface ice deposits. *Science*, **297**, 81-85.
- Byrne, S., Dundas, C.M., Kennedy, M.R., Mellon, M.T., McEwen, A.S., Cull, S.C., Daubar, I.J., Shean, D.E., Seelos, K.D., Scott, L.M., Cantor, B.A., Arvidson, R.E., Edgett, K.S., Reufer, A., Thomas, N., Harrison, T.N., Posiolova, L. and Seelos, F.P. (2009): Distribution of mid-latitude ground ice on Mars from new impact craters. *Science*, **325**, 1674.
- Bryson, K.L., Dixon, J.C. and Sears, D.W.G. (2010): Evaporation effects on the formation of martian gullies. *Icarus*, **210**, 72-82.
- Catling, D.C., Claire, M.W., Zahnle, K.J., Quinn, R.C., Clark, B.C., Hecht, M.H. and Kounaves, S. (2010): Atmospheric origins of perchlorate on Mars and in the Atacama. *Journal of Geophysical Research*, **115**, E00E11.
- Chassefière, E., Dartois, E., Herri, J.-M., Tian, F., Schmidt, F., Mousis, O. and Lakhli, A. (2013): CO₂-SO₂ clathrate hydrate formation on early Mars. *Icarus*, **223**, 878-891.
- Chevrier, V.F., Hanley, J. and Altheide, T.S. (2009): Stability of perchlorate hydrates and their liquid solutions at the Phoenix landing site, Mars. *Geophysical Research Letters*, **36**, L10202.
- Dash, J.G. (1989): Themomolecular pressure in surface melting: Motivation for frost heave. *Science*, **246**, 1591-1593.
- Dash, J.G., Rempel, A.W. and Wettlaufer, J.S. (2006): The physics of premelted ice and its geophysical consequences. *Reviews of Modern Physics*, **78**, 695-741.
- Feldman, W.C., Prettyman, T.H., Maurice, S., Plaut, J.J., Bish, D.L., Vaniman, D.T., Mellon, M.T., Metzger, A.E., Squyres, S.W., Karunatillake, S., Boynton, W.V., Elphic, R.C., Funsten, H.O., Lawrence, D.J. and Tokar, R.L. (2004): Global distribution of near-surface hydrogen on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **109**, E09006.
- Fouchet, T., Lellouch, E., Ignatiev, N.I., Forget, F., Titov, D.V., Tschimmel, M., Montmessin, F., Formisano, V., Giuranna, M., Maturilli, A. and Encrenaz, T.

- (2007): Martian water vapor: Mars Express PFS/LW observations. *Icarus*, **190**, 32–49.
- Furukawa, Y. and Nada, H. (1997): Anisotropic surface melting of an ice crystal and its relationship to Growth forms. *Journal of Physical Chemistry B*, **101**, 6167–6170.
- Goetz, W., Pike, W.T., Hviid, S.F., Madsen, M.B., Morris, R.V., Hecht, M.H., Staufer, U., Leer, K., Sykulska, H., Hemming, E., Marshall, J., Morookian, J.M., Parrat, D., Vijendran, S., Bos, B.J., El Maarry, M.R., Keller, H.U., Kramm, R., Markiewicz, W.J., Drube, L., Blaney, D., Arvidson, R.E., Bell III, J.F., Reynolds, R., Smith, P.H., Woida, P., Woida, R. and Tanner, R. (2010): Microscopy analysis of soils at the Phoenix landing site, Mars: Classification of soil particles and description of their optical and magnetic properties. *Journal of Geophysical Research*, **115**, E00E22.
- Haberle, R.M., McKay, C.P., Schaeffer, J., Cabrol, N.A., Grin, E.A., Zent, A.P. and Quinn, R. (2001): On the possibility of liquid water on present-day Mars. *Journal of Geophysical Research*, **106** (E10), 23317–23326.
- Hecht, M.H., Kounaves, S.P., Quinn, R.C., West, S.J., Young, M.M., Ming, D.W., Catling, D.C., Clark, B.C., Boynton, W.V., Hoffman, J., DeFlores, L.P., Gospodina, K., Kapit, J. and Smith, P.H. (2009): Detection of perchlorate and the soluble chemistry of martian soil at the Phoenix lander site. *Science*, **325**, 64–67.
- Ishizaki, T., Maruyama, M., Furukawa, Y. and Dash, J.G. (1996): Premelting of ice in porous silica glass. *Journal of Crystal Growth*, **163**, 455–460.
- Israelachvili, J.N. (2011): *Intermolecular and Surface Forces*, 3rd edition. Academic Press.
- Jakosky, B.R. and Farmer, C.B. (1982): The seasonal and global behavior of water vapor in the Mars atmosphere: Complete global results of the Viking atmospheric water detector experiment. *Journal of Geophysical Research*, **87** (B4), 2999–3019.
- Kelly, N.J., Boynton, W.V., Kerry, K., Hamara, D., Janes, D., Reedy, R.C., Kim, K.J. and Haberle, R.M. (2006): Seasonal polar carbon dioxide frost on Mars: CO₂ mass and columnar thickness distribution. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E03S07.
- Kereszturi, A. and Appéré, T. (2014): Searching for springtime zonal liquid interfacial water on Mars. *Icarus*, **238**, 66–76.
- Kereszturi, A. and Rivera-Valentin, E.G. (2012): Locations of thin liquid water layers on present-day Mars. *Icarus*, **221**, 289–295.
- Kereszturi, A., Möhlmann, D., Berczi, Sz., Ganti, T., Kutí, A., Sik, A. and Horvath, A. (2009): Recent theologic processes on dark polar dunes of Mars: Driven by interfacial water?. *Icarus*, **201**, 492–503.
- Kossacki, K.J. and Markiewicz, W.J. (2010): Interfacial liquid water on Mars and its potential role in formation of hill and dune gullies. *Icarus*, **210**, 83–91.
- Laskar, J., Correia, A.C.M., Gastineau, M., Joutel, F., Levrard, B. and Robutel, P. (2004): Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars. *Icarus*, **170**, 343–364.
- Logan, B.E., Zhang, H., Mulvaney, P., Milner, M.G., Head, I.M. and Unz, R.F. (2001): Kinetics of perchlorate- and chlorate-respiring bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, **67**, 2499–2506.
- Longhi, J. (2006): Phase equilibrium in the system CO₂–H₂O: Application to Mars. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E06011.
- 松岡憲知 (2016): 火星表面の永久凍土と周氷河作用. 地学雑誌, **125**, 63–90. [Matsuoka, N. (2016): Permafrost and periglacial processes on the Martian surface. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 63–90. (in Japanese with English abstract)]
- Mellon, M.T. and Jakosky, B.M. (1993): Geographic variations in the thermal and diffusive stability of ground ice on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **98** (E2), 3345–3364.
- Mellon, M.T., Feldman, W.C. and Prettyman, H. (2004): The presence and stability of ground ice in the southern hemisphere of Mars. *Icarus*, **169**, 324–340.
- Mellon, M.T., Arvidson, R.E., Marlow, J.J., Phillips, R.J. and Asphaug, E. (2008): Periglacial landforms at the Phoenix landing site and the northern plains of Mars. *Journal of Geophysical Research*, **113**, E00A23.
- Mellon, M.T., Arvidson, R.E., Sizemore, H.G., Searls, M.L., Blaney, D.L., Cull, S., Hecht, M.H., Heet, T.L., Keller, H.U., Lemmon, M.T., Markiewicz, W.J., Ming, D.W., Morris, R.V., Pike, W.T. and Zent, A.P. (2009): Ground Ice at the Phoenix Landing Site: Stability state and origin. *Journal of Geophysical Research*, **114**, E00E07.
- Mizusaki, T., Nomura, R. and Hiroi, M. (2007): Growth rate of frost heave in helium and mass transport in solid ⁴He. *Journal of Low Temperature Physics*, **149**, 143–150.
- Möhlmann, D.T.F. (2003): Unfrozen subsurface water on Mars: Presence and implications. *International Journal of Astrobiology*, **2**, 213–216.
- Möhlmann, D. (2010): The three types of liquid water in the surface of present Mars. *International Journal of Astrobiology*, **9**, 45–49.
- Möhlmann, D. and Thomsen, K. (2011): Properties of cryobrine on Mars. *Icarus*, **212**, 123–130.
- Navarro-González, R., Vargas, E., de la Rosa, J., Raga, A.C. and McKay, C.P. (2010): Reanalysis of the Viking results suggests perchlorate and organics at midlatitudes on Mars. *Journal of Geophysical Research*, **115**, E12010.
- O'Neill, K. and Miller, R.D. (1985): Exploration of a rigid ice model of frost heave. *Water Resources Research*, **21**, 281–296.

- Ozawa, H. and Kinoshita, S. (1989): Segregated ice growth on a microporous filter. *Journal of Colloid and Interface Science*, **132**, 113–124.
- Rempel, A.W. (2007): Formation of ice lenses and frost heave. *Journal of Geophysical Research*, **112**, F02S21.
- Rempel, A.W. (2008): A theory for ice-till interactions and sediment entrainment beneath glaciers. *Journal of Geophysical Research*, **113**, F01013.
- Rempel, A.W. (2011): Microscopic and environmental controls on the spacing and thickness of segregated ice lens. *Quaternary Research*, **75**, 316–324.
- Rempel, A.W., Wettlaufer, J.S. and Worster, M.G. (2004): Premelting dynamics in a continuum model of frost heave. *Journal of Fluid Mechanics*, **498**, 227–244.
- Saruya, T., Toyota, T., Baratoux, D. and Kurita, K. (2010): The exchange of water vapor between the atmosphere and the surface on Mars. *Proceedings of 41st Lunar and Planetary Science Conference*, Woodlands, United States, No. 1306.
- Saruya, T., Kurita, K. and Rempel, A.W. (2013): Experimental constraints on the kinetics of ice lens initiation and growth. *Physical Review E*, **87**(3), 032404.
- Saruya, T., Kurita, K. and Rempel, A.W. (2014a): Indirect measurement of interfacial melting from macroscopic ice observations. *Physical Review E*, **89**(6), 060401(R).
- Saruya, T., Rempel, A.W. and Kurita, K. (2014b): Hydrodynamic transitions with changing particle size that control ice lens growth. *Journal of Physical Chemistry B*, **118**, 13420–13426.
- Sears, D.W.G. and Chittenden, J.D. (2005): On laboratory simulation and the evaporation rate of water on Mars. *Geophysical Research Letters*, **32**, L23203.
- Sizemore, H.G., Zent, A.P. and Rempel, A.W. (2015): Initiation and growth of martian ice lenses. *Icarus*, **251**, 191–210.
- Smith, M.D. (2002): The annual cycle of water vapor on Mars as observed by Thermal Emission Spectrometer. *Journal of Geophysical Research*, **107** (E11), 5115.
- Smith, M.D. (2004): Interannual variability in TES atmospheric observations of Mars during 1999–2003. *Icarus*, **167**, 148–165.
- Smith, M.D., Wolff, M.J., Spanovich, N., Ghosh, A., Bandfield, D., Christensen, P.R., Landis, G.A. and Squyres, S.W. (2006): One Martian year of atmospheric observations using MER Mini-TES. *Journal of Geophysical Research*, **111**, E12S13.
- Smith, P.H., Tamppari, L.K., Arvidson, R.E., Bass, D., Blaney, D., Boynton W.V., Carswell, A., Catling, D.C., Clark, B.C., Duck, T., DeJong, E., Fisher, E., Goetz, W., Gunnlaugsson, H.P., Hecht, M.H., Hipkin, V., Hoffman, J., Hviid, S.F., Keller, H.U., Kounaves, S.P., Lange, C.F., Lemmon, M.T., Madsen, M.B., Markiewicz, W.J., Marshall, J., McKay, C.P., Mellon, M.T., Ming, D.W., Morris, R.V., Pike, W.T., Renno, N., Stauffer, U., Stoker, C., Taylor, P., Whiteway, J.A. and Zent, A.P. (2009): H₂O at the Phoenix landing site. *Science*, **325**, 58–61.
- Stillman, D.E. and Grimm, R.E. (2011): Dielectric signatures of adsorbed and salty liquid water at the Phoenix landing site, Mars. *Journal of Geophysical Research*, **116**, E09005.
- Style, R.W. and Peppin, S.S.L. (2012): The kinetics of ice-lens growth in porous media. *Journal of Fluid Mechanics*, **692**, 482–498.
- Style, R.W., Peppin, S.S.L., Cocks, A.C.F. and Wettlaufer, J.S. (2011): Ice-lens formation and geometrical supercooling in soils and other colloidal materials. *Physical Review E*, **84**(4), 041402.
- Taber, S. (1929): Frost heaving. *Journal of Geology*, **37**, 428–461.
- Taber, S. (1930): The mechanics of frost heaving. *Journal of Geology*, **38**, 303–317.
- Watanabe, K. and Mizoguchi, M. (2000): Ice configuration near a growing ice lens in a freezing porous medium consisting of micro glass particles. *Journal of Crystal Growth*, **213**, 135–140.
- Watanabe, K. and Mizoguchi, M. (2002): Amount of unfrozen water in frozen porous media saturated with solution. *Cold Regions Science and Technology*, **34**, 103–110.
- Wilén, L.A. and Dash, J.G. (1995): Frost heave dynamics at a single crystal interface. *Physical Review Letters*, **74**, 5076–5079.
- Wettlaufer, J.S. (1999): Impurity effects in the premelting of ice. *Physical Review Letters*, **82**, 2516–2519.
- Wettlaufer, J.S. and Worster, M.G. (2006): Premelting dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **38**, 427–452.
- Worster, M.G. and Wettlaufer, J.S. (1999): The fluid mechanics of premelted liquid films. in *Fluid Dynamics at Interfaces* edited by Shyy, W. and Narayanan, R., Cambridge University Press, 339–351.
- 横川美和 (2016): 氷上のサイクリックステップ—火星北極冠のスパイラルトラフとアナログ実験—. 地学雑誌, **125**, 91–104. [Yokokawa, M. (2016): Cyclic steps on ice: Spiral troughs on Mars' North polar ice cap and analogue experiments. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 91–104. (in Japanese with English abstract)]
- Zent, A.P. (2008): A historical search for habitable ice at the Phoenix landing site. *Icarus*, **196**, 385–408.
- Zent, A.P., Hecht, M.H., Cobos, D.R., Wood, S.E., Hudson, T.L., Milkovich, S.M., DeFlores, L.P. and Mellon, M.T. (2010): Initial results from the thermal and electrical conductivity probe (TECP) on Phoenix. *Journal of Geophysical Research*, **115**, E00E14.
- Zhu, D.-M., Vilches, O.E., Dash, J.G., Sin, B. and Wettlaufer, J.S. (2000): Frost heave in Argon. *Physical Review Letters*, **85**, 4908–4911.