

火星の凍土融解過程について：表層地形への影響

Evaluation of melting process of the permafrost on Mars: its implication for surface features

小川 佳子[1], 山岸 保子[2], 栗田 敬[3]

Yoshiko Ogawa[1], Yasuko Yamagishi[2], Kei Kurita[3]

[1] 東大・理・地球惑星, [2] 固体フロンティア、海洋科学技術センター, [3] 東大・地震研

[1] Earth and Planetary Sci., Univ. of Tokyo, [2] IFREE, JAMSTEC, [3] ERI, Univ. of Tokyo

火星では水による侵食地形と思われる特徴的な地形が数多く観測されている。特に outflow channel はその地質学的な証拠から、地表面を液体の水が大量に流れて形成された「大洪水地形」であると考えられている。しかし、現在の火星は寒冷・乾燥の環境下にあり、液体の水が安定に存在することは難しい。過去においては温暖・湿潤であったとする考え方もあるが、降水を可能にする程の気候であったかどうか不明であり、また仮に全球規模の降水が実現されたとしても局在化した比較的最近の流水地形(outflow channel を含めて)の分布がうまく説明できず、問題点が多い。

では、降水以外で大量の水がどのように供給された(る)のか、そして流れ得た(る)のか。観測される流水地形の形成機構は謎のまま残されている。本研究では前者の問題の、大量の液体の水の供給過程について焦点を当てる。

水の供給過程のアイデアとしては降水以外に主に 2 つある。1 つは地下帯水層の水の解放、もう 1 つは地下凍土層の融解である。帯水層の水の解放では期待される体積が限られ、観測される地形から必要とされる量に不十分と思われる。その一方、凍土層とマグマの相互作用では、凍土(層)の融解による大量の水の供給が可能である。Outflow channel と火山帯の分布の相関や、channel 上流域にあたるカオス地形や chasma (いずれも陥没地形) がかつて湖であった可能性が高いこと(地質学的証拠から示唆)は、後者の可能性を強く示唆している。よって本研究では、凍土層とマグマの相互作用を想定し、凍土(層)の融解による水の発生過程を数値シミュレーションにより定量的に明らかにすることを目的とする。供給された水がどのように地表面に輸送され、outflow channel 及びその周辺の地形(カオス地形)形成に結びつくのか、そのメカニズムについて提案を行う。

本研究の特徴は凍土層の融解過程におけるメルト領域内での熱対流に注目した点にある。これは従来の凍土融解モデルでは考慮されることがなかった。対流が熱輸送過程にもたらす効果として、融解速度の上昇、融解形状の変化が予測される。これらは水の発生過程を大きく特徴づけ、地表面での地形形成過程に直接的に影響を及ぼす重要な効果である。

凍土層を、マトリックスが岩石(土)、 H_2O が空隙を満たした多孔質物質としてモデル化する。凍土層下部を非一様加熱し、融解した部分から自然(熱)対流を起こす系での相変化過程を数値的に扱った。多孔質物質における、いわゆるステファン問題と対流熱輸送の 2 つの結合問題を解いたことに相当する。融解領域での多孔質対流はダルシー則に沿うものとし、相変化はエンタルピー法により計算を行った。

結果、凍土層の融解過程において、メルト領域内の対流が系の熱輸送に徹底的な変化をもたらすことがわかった。その効果は 2 つに分かれる。熱輸送の局所化(集中)と効率化(促進)である。

熱輸送の局所化は融解領域の形状に直接反映される。融解形状は、水平方向に局在化し、鉛直方向に地表面直下まで延びた形となることが示された。 $Ra=700$ において、その上部が横に広がった様子はプリュームの形状に類似している。また熱輸送の効率化は融解速度を早め、活発な融解水の生成をもたらすことも定量的に見積もられた。

地表直下に比較的多量の融解水が存在することを示すこの新たな結果は、容易く多量の水が地上に供給される可能性を示唆している。地表面への水の移動過程として、メルト領域内での圧密を考察した。

この系で見積もられる、岩石の圧密(液体水の分離)、マグマの冷却時間、融解時間のタイムスケールの比較から、融解した水は十分早く岩石(土)から分離を起こして上昇し、メルト領域上部に水のみ、水たまり(プール)領域を形成すると考えられる。すると、周圧と静水圧の差によって、自噴することが期待される。噴出のイベントは地表面の崩壊を伴い、水を地表面に解放する。

最初に述べた、outflow channel の上流部に観測されているカオス地形は破碎の特徴を示しており、このイベントによる地表面崩壊に相当している可能性が高い。その地形のスケールは噴出規模を反映しており、かつての地表下の融解領域の形状と面積の広さに対応していると考えられる。計算結果によればレーリー数~数 102 で融解領域上面(プリュームの広がり)が凍土層の厚さと同じオーダーになることから、直上の~数 km の地表面が崩壊されることが期待される。これは観測スケールの~100km に及ばないが、1 つの噴出イベントによって形成された chaos が nesting した構造を作り、一見大きなスケールのカオス地形を形作っているためと思われる。考え得る一連のシナリオを提示する。

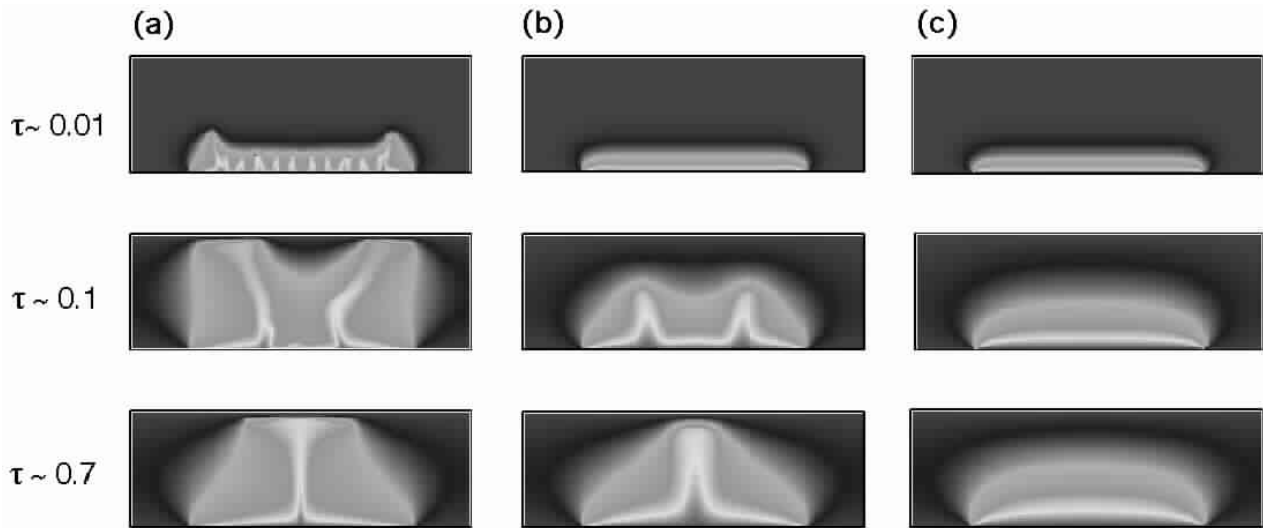


Figure 1. Evolution of temperature field at $Ra = (a) 100$, $(b) 700$. Other parameters are; $Ste = 1.87$, $\varepsilon = 0.2$, $W = 2H$ and $A = 3$ (Ste : Stefan number, ε : porosity, W : width of heterogeneous heating, H : thickness of the permafrost layer, A : aspect ratio). τ is dimensionless time, which is normalized by H^2/α (α : thermal diffusivity of water). The zone which is about a size larger than the bright region corresponds to the molten zone. Three snapshots at each case are illustrated; at the initial stage ($\tau \sim 0.01$), middle stage ($\tau \sim 0.1$) and steady state ($\tau \sim 0.7$). For comparison, temperature fields for the conduction case (c) are also shown. Note particularly significant difference in the morphology of molten zone in the steady state.

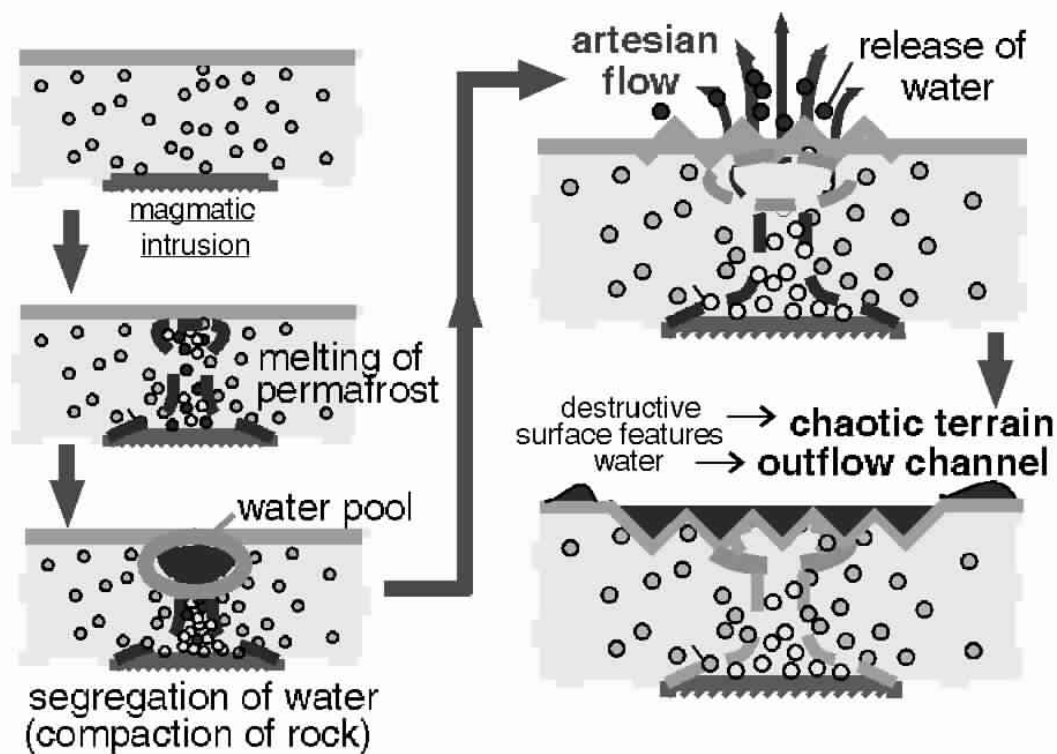


Figure 2. A scenario for formation of surface features; chaotic terrain and outflow channel.