

火星の若い火山活動

東京大学 地震研究所

栗田敬

はじめに

現在の火星は、地球の半分の大きさしかないために地球と較べて進化が進み、相対的に冷却の進んだ状態にあるというのが従来の一般的な見解である(Grott 2008). 火星に存在する巨大な火山群は現在活動的であるという証拠はなく、また熱赤外のイメージングによる全球的なホットスポット探索もポジティブな成果は得られていない. また重力異常・地形解析からは表面の巨大火山体の質量や極冠の氷床の質量を支えるためには厚いリゾスフェアが必要であることが示されている ((Phillips et al. 2008)). いずれも過去に活発であった内部活動度は現在低下し、表層部分の冷却化が進んでいることを示している. (Ogawa and Yanagisawa 2012; Michel and Forni 2011; Ruiz et al. 2011; Ogawa and Yanagisawa 2011)しかし近年惑星探査データが蓄積されるにつれてこのような従来の描像と一見矛盾する観測データが現れてきており、「進化の進んだ火星」という見方は見直しを迫られている. 同時に地球内部で進行しているプレートテクトニクスを主体とした熱・力学過程とは別のプロセス、「火星システム」の存在が示唆され、その実態の解明は惑星科学のみならず地球科学へもインパクトを与えるものと予想される. 本講演ではその新しい火星学の展開のキーポイントにあたる若い火山活動に焦点を合わせて研究の現状をまとめる.

従来の見解と一見矛盾する観測結果

「冷却の進んだ火星内部」という従来の見解に相反するよう見える観測結果として、Bills らによる火星での潮汐散逸量の見積り研究と極めて若い年代を示す流動性に富んだ溶岩流の特定の研究が挙げられる. (Bills et al. 2005) はフォボスの軌道変化率から火星の潮汐散逸量を推定し、 $Q_{tidal}=86$ という値を得た. もしこの散逸が火星のマントルで起きているとすると、火星のマントルは大変に高い散逸量を示すことになる. 月地球系での潮汐散逸のうちで地球のマントルに対応する値、 $Q_{tidal}(M2)=280$ ((Ray, Eanes, and Lemoine 2001)) と比較すると、現在活発な火成活動が進行している地球のマントルよりもより大きな散逸量であることがわかる. この値から直接的にマントルの熱状態の推定には結びつかないが、一つの可能な解釈としては地球よりもより融点に近い温度状態の存在が示唆される.

一方探査衛星の取得した詳細な表面画像データの蓄積が進むにつれて若い年代を示す溶岩流の発見が相次いだ ((Hauber et al. 2011),(Jaeger et al. 2010),(Hartmann and Berman 2000) など). 特にCentral Elysium Planitia 地域での研究 ((Vaucher et al. 2009)) により流動性の高い極めて若い年代を示す溶岩流の存在があきらかにされた. またその活動様式は継続的な溶岩流の噴出によって巨大な山体を形成する従来の火成活動とは様相を異にするものである.

これらの観測事実はクレーター年代学により明きらかにされたタルシスなどの巨大火山群の活動史 ((Werner 2009),(Robbins, Achille, and Hynek 2011)) や数値シミュレーションによる熱史の推定 ((Ogawa and Yanagisawa 2012; Michel and Forni 2011; Ruiz et al. 2011; Ogawa and Yanagisawa 2011)) とは相矛盾している.

若い溶岩流の活動の特徴

現在推定されているこのような溶岩流はいずれも表面の起伏、特徴に乏しく、流動性の高いあまり厚くない溶岩流であると考えられている。このことは同時に溶岩流であるという同定が難しいということを示しており、現時点ではHiRISE画像によるRootless Coneの存在の有無が溶岩流同定の唯一の重要な判定材料となっている。HiRISEの画像がカバーする領域が非常に限定的であるために火星全球での分布や個々の溶岩流の分布域・給源などが明らかになっているわけではない。野口による予察的解析結果によれば多くの若い溶岩流は南北のDichotomy境界の北半球側に分布している傾向にある。

下部地殻剥離駆動型火成活動の可能性

タルシス高地やエリシウム地域に分布する巨大火山群は地球におけるホットスポット火山に相当し、マントル深部に起源を持つ熱化学プルームの活動により形成されたものと想定されている。一方若い溶岩流は巨大火山群と活動様式や化学組成が異なっていることから、起源が異なっていると考えられる。我々は幾つかの特徴を基にこの火成活動は下部地殻がBasalt-Eclogite転移を経験し、重くなった部分が重力落下することにより生じる「下部地殻剥離駆動型火成活動」によって生じているという作業仮説を提唱している (Kurita, Baratoux, Noguchi & Ohmori, IAVCEI 2013, EPSC2012)。このモデルの鍵となるものは火星の地殻の密度である。火星の地殻の密度は2900 kg/m³ という値が従来から信じられてきたが、実はその観測的な裏付けは薄弱であり、最近のアドミッタンス解析や表層の玄武岩の化学組成や火星隕石の組成からの地殻推定値は3100~3200kg/m³ という高い密度・高い鉄含有量を示している。このような鉄の高濃度の系ではBasalt-Eclogite転移がより低圧（火星内部の60kmの深さに対応）で進行することがOhmori 2013により示されている。現在の火星の地殻の厚さの標準的モデル (Neumann et al. 2004) では南半球ではBasalt-Eclogite転移が生じている可能性がある。このためにDichotomy境界付近の厚い南半球の地殻は下部がeclogite化することにより重力不安定を起こし、剥離 (Delamination) ・落下することが想定される。そのような場では補償流として上部マントル物質の断熱的上昇が引き越される。もし上部マントルが融点近傍の温度状態にいたとすれば断熱上昇過程で融解が生じる。これが下部地殻剥離駆動型火成活動である。このモデルの妥当性、若い溶岩流の生成メカニズムとしての蓋然性のチェックには多くの詰めるべき点が残されている。例えば鉄の多い系での融点、融解関係、生成メルト組成など物質科学的基礎研究や地殻の密度・厚さのより精度・確度の高い推定、Billsの研究の検証やマントルでの散逸量の推定など、広範囲の研究の総合的評価が必要である。若い溶岩流の起源の研究は広がりを持った魅力的な研究課題である。

Terrestrial Analog?

惑星科学の研究では常にチェックポイントの少なさが足かせとなっている。限定された観測データという制約条件の下で現象の理解を深めるためには、対応するプロセスと類似のものが地球に存在すれば大変大きな助けになる。この下部地殻剥離駆動型火成活動の「地球アナログ」として現在我々が注目しているのはピレネー山脈やカルパチア山脈など大陸内部の衝突境界に存在している玄武岩火山群である。特にピレネー山脈に存在しているGarrotxa Volcanic Zoneはその地殻構造がCentral Elysium Planitiaのそれと酷似しており、その地質学的調査は火星の火山活動の理解に大いに貢献することが期待される。

- Bills, BG, GA Neumann, DE Smith, and MT Zuber. 2005. "Improved Estimate of Tidal Dissipation Within Mars From MOLA Observations of the Shadow of Phobos." *J.Geophys.Res.E* 110 (E07): E07004. doi:10.1029/2004JE002376.
- Grott, M. 2008. "Is Mars Geodynamically Dead?." *Science* 320 (June 16): 1171–1172.
- Hartmann, WK, and DC Berman. 2000. "Elysium Planitia Lava Flows: Crater Count Chronology and Geological Implications." *J.Geophys.Res.E* 105 (E6): 15011–15025.
- Hauber, E, P Broz, F Jagert, P Jodłowski, and T Platz. 2011. "Very Recent and Wide-Spread Basaltic Volcanism on Mars." *Geophysical Research Letters* 38 (10) (May 17). doi: 10.1029/2011GL047310.
- Jaeger, W L, L P Keszthelyi, J A Skinner, M P Milazzo, A S Mcewen, T N Titus, M R Rosiek, et al. 2010. "Emplacement of the Youngest Flood Lava on Mars: a Short, Turbulent Story." *Icarus* 205 (1) (January 1): 230–243.
- Michel, Nathalie, and Olivier Forni. 2011. "Mars Mantle Convection Influence of Phase Transitions with Core Cooling." *Planetary and Space Science* 59 (8) (June 1): 741–748.
- Neumann, G A, T Zuber, M A Wieczorek, P J MCGovern, F G Lemoine, and D E Smith. 2004. "Crustal Structure of Mars From Gravity and Topography." *J.Geophys.Res.E* 109 (E8) (January 1): 18. doi:10.1029/2004JE002262.
- Ogawa, Masaki, and Takatoshi Yanagisawa. 2011. "Numerical Models of Martian Mantle Evolution Induced by Magmatism and Solid-State Convection Beneath Stagnant Lithosphere." *J.Geophys.Res.E* 116 (E8) (August 25). doi:10.1029/2010JE003777.
- Ogawa, Masaki, and Takatoshi Yanagisawa. 2012. "Two-Dimensional Numerical Studies on the Effects of Water on Martian Mantle Evolution Induced by Magmatism and Solid-State Mantle Convection." *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/2012JE004054.
- Phillips, R J, M T Zuber, S E Smrekar, M T Mellon, J W Head, K L Tanaka, N E Putzig, et al. 2008. "Mars North Polar Deposits: Stratigraphy, Age, and Geodynamical Response." *Science* 320 (5880) (May 30): 1182–1185. doi:10.1126/science.1157546.
- Ray, RD, RJ Eanes, and FG Lemoine. 2001. "Constraints on Energy Dissipation in the Earth's Body Tide From Satellite Tracking and Altimetry." *Geophysical Journal International* 144 (2): 471–480.
- Robbins, Stuart J, Gaetano Di Achille, and Brian M Hynek. 2011. "The Volcanic History of Mars: High-Resolution Crater-Based Studies of the Calderas of 20 Volcanoes." *Icarus* 211 (2) (February 1): 1179–1203.
- Ruiz, Javier, Patrick J MCGovern, Alberto Jiménez-Díaz, Valle López, Jean-Pierre Williams, Brian C Hahn, and Rosa Tejero. 2011. "The Thermal Evolution of Mars as Constrained by Paleo-Heat Flows." *Icarus* 215 (2) (October 1): 508–517.
- Vaucher, J, D Baratoux, M J Toplis, P Pinet, N Mangold, and K Kurita. 2009. "The Morphologies of Volcanic Landforms at Central Elysium Planitia: Evidence for Recent and Fluid Lavas on Mars." *Icarus* 200 (1) (February 20): 39–51. doi:10.1016/j.icarus.2008.11.005.
- Werner, Stephanie C. 2009. "The Global Martian Volcanic Evolutionary History." *Icarus* 201 (1) (April 8): 44–68. doi:10.1016/j.icarus.2008.12.019.