

研究会報告：Workshop on Martian Young Volcanism

栗田 敬¹

地球の半分ほどの大きさの火星は、地球と較べて現在の内部活動度は低く、より進化の進んだ、冷却の進行した天体と考えられてきた。タルシスなどに存在する巨大火山の活動度は最近の10億年ほどの間に低下してきたことが山体のクレーター年代学の解析から明らかにされ[1]、熱史のシミュレーション結果[2]とも調和的である。一方近年これらの見方とおおきく矛盾する観測事実が明らかになってきた。それは、1)極めて若い年代を示す特異な溶岩流の存在[3]、と2)フォボスの軌道変動から見積もられた火星マントルの大きな散逸量[4]、である。両者は現在の火星のマントルが融点に極めて近い状態にあることを示唆しており、「冷却の進行した火星」という今までの描像とは矛盾したものである。現在この若い火山活動の存在は火星の内部状態や内部の熱的進化を考える上で一つのキーポイントとなりつつある。このような問題意識を共有して、7月18日に小規模な研究集会「Workshop on Martian Young Volcanism」が東京大学地震研究所に於いて開かれた。研究集会では研究成果の発表というよりは現状の認識と今後この問題をどのように理解していくべきか、と言う研究展開に関する議論に焦点を絞った。本報告では研究集会で議論された重要なポイントを拾い出して解説をする。

1. 最近の研究の現状

1.1 火成活動の変遷について：

栗田 敬(東京大学), D.Baratoux(Midi Pyrenees Obs., France)により火星の火成活動の特徴、その時間的な変遷などのレビュー報告があった。オリンボスモンをはじめとする巨大シールド火山のマグマが基本的には地球におけるホットスポット火山と同等な玄武岩であること、ガンマ線スペクトルの解析からマグマの化学組成が年代とともに系統的に変化していること、pMELTSなどのプログラムを用いてマグマ組成変動を推定すると、融解が時代が新しくなるにつれて深い領域へ移行と同時に融解の程度が減少している、と言う系統的な変化が報告された。

1.2 若い火山活動について：

詳細な研究が進められているCentral Elysium Planitiaの溶岩流の年代、地形学的な特徴、溶岩流の給源域などが栗田敬, D.Baratoux, 野口里奈(東京大学)により紹介された。形成年代は極めて若く、噴出溶岩は低粘性であり、そのために起伏が乏しく、地形的な特徴が乏しく「溶岩流」であるとの同定が困難であったが、高解像度の画像によりRootless Cone (pseudocraterとも呼ばれる。溶岩と水(氷?)との相互作用で形成された2次的爆発性小型碎屑丘)の存在が明らかにされ、高温の溶岩流であることが確定した経緯が野口により報告された。またこの「Rootless Cone の存在」を判定基準として全球的な溶岩流の探索を行ったところ、南北半球境界の北部低地側に数得

1. 東京大学地震研究所
kurikuri@eri.u-tokyo.ac.jp

多く存在していることが報告された。高解像度の画像データが断片的であるために溶岩流と確定しているわけではないが、候補地が多数見つかったことは、大きな火山体を形成しない、低粘性の溶岩流が火星には多数存在している可能性を示唆している。これらのことは巨大な山体を形成する火成活動とは別のスタイルのマグマ活動：低粘性の溶岩原の形成と単成火山的性質、が存在していることを示している。

1.3 潮汐散逸から推定される火星マントルの熱的状态

従来フォボスの軌道情報から火星のフォボスによって引き起こされた潮汐の散逸がおおきいことが示唆されてきた。Bills[4]によるフォボスの影の画像から推定した潮汐散逸量($Q=86$)は地球のマントルと比べておおきな値であり、火星の内部の温度が融点(ソリダス)に近いことを示唆している。栗田は同様な結果を得た最近の他の研究(Laineyらの研究)も含めてレビューを行った。

2. 若い火山活動の理解のために今後焦点を当てるべき研究課題

2.1 鉄に富んだ重い地殻

火星の地殻の密度は重力異常の解析から 2900 kg/m^3 程度とされてきたが、実はその根拠はさほど明確ではない。この値はSNC隕石から推定された値やガンマ線スペクトロスコーピーから推定された火星地殻の化学組成とも矛盾していることがD. Baratouxにより報告された。密度として 3100 kg/m^3 程度、玄武岩の化学組成としてはFeO 20 wt% が妥当な値であることが示された。また小川佳子(会津大)は重力のアドミッタンス解析に基づいた研究で表層地殻密度として 3100 kg/m^3 程度が求まったことを報告した。このことは次項で述べる下部地殻の安定性と関連して重要な新しい知見であり、更に詳細な研究が必要とされる。

2.2 鉄に富んだマントルの融解条件とメルト組成

鉄に富んだ系の高圧融解実験の結果が松影香子(京都大学)により報告された。地球のマントルペリドタイトと比べソリダス温度は100度以上低く、メルト組成の圧力、温度依存性などが実験的に決められた。本

発表では精度の高いデータが提出されているSNC隕石の化学組成との比較が行われたが、惑星探査データとの対比が次の期待される展開である。pMELTSに基づきローバーが分析した表層玄武岩の化学組成や軌道上からのガンマ線スペクトロスコーピーの結果を解析しているD.Baratouxから、現状に於いて鉄の多い系への適用に問題を残すpMELTSへの貴重なリファレンスであるとのコメントが寄せられ、今後の共同研究が議論された。またD. Baratoux から鉄の多い玄武岩の粘性に関する実験的研究の紹介があった。鉄(FeO)は粘性の低下をも引き起こす。

2.3 鉄に富んだ下部地殻の安定性

玄武岩は高圧でエクロジヤイトに相転移するが、鉄の多い組成ではその相転移の圧力が低圧側にシフトすることが大森聡一(放送大学・栗田が代読)により示された。火星はサイズが小さいために内部圧力が低く、そのためバサルト・エクロジヤイト転移は起きないと考えられてきたが現在の地殻下部(60-80 km)で十分に生じることが熱力学計算により明らかになった。また南部高地の地殻の厚さがこの相転移によって決まっている可能性も示唆された。これは火星のマントルダイナミクスを考える上で極めて重要な、鍵となる研究結果であり更に詳細な検討が待ち望まれる。

2.4 下部地殻の剥離過程とマグマ生成

下部地殻がエクロジヤイトに相転移を起こせば、鉄の多いマントル組成においても十分に重くなりうる。すなわち地殻下部が周囲よりも重くなることで剥離が生じ、レーリー・テラー型の不安定をおこし、沈降することが予想される。大森の発表においても、このような剥離に続き強制的に生じた上部マントルの断熱上昇部分が融解を起こす可能性が示唆されている。市川浩樹(愛媛大学)により剥離・レーリー・テラー不安定・断熱上昇融解の可能性(空間スケールの要請・タイムスケール)に関する理論的な考察が紹介された。地球の地殻においてP. Molnar, H. Schmelingなどがその可能性をモデリングで示しているが、地殻下部のレオロジーの取り扱い、温度構造の取り扱い、3次元への拡張など問題が残されている。また栗田により下部地殻の剥離駆動のマグマ生成が火星の若い溶岩流火成活動の原因となっている可能性が議論された。

2.5 地球上の類似火山活動

惑星科学において常に問題となることは、「Ground Truth」となるデータが得にくい点である。本研究課題に則せば、地球上に同様な火山活動が存在すればその比較研究から得るところはおおきい。栗田はそのような例としてピレネー山中の Garrotxa Volcanic Zone を紹介し、その類似性を議論した。地球においては下部地殻やリソスフェアの剥離により生じたと想定される火山活動には米国コロラド高原の玄武岩活動やルーマニア・カルパチア山中の玄武岩活動などがある。どのような比較研究が可能であるのか、議論された。

3. 残された問題点

今回の研究集会を通して明らかになった未解決問題を以下に挙げる。

1) 厚いリソスフェア？ それに「保護」されている熱いマントル？

巨大火山や南北の極冠による荷重変形の解析からは極めて厚いリソスフェアが推定されている。このような厚いリソスフェアを作り出すメカニズムはなにか？

一方アドミッタンス解析からは遙かに薄いリソスフェアが推定されるが、解析手法による違いは何を表しているのか？ 本研究会で考察を進めた剥離駆動型火山活動が成立するためにはリソスフェア直下のマントルには融点近傍の温度状態が必要である。またフォボスによる潮汐変形の強い散逸は同様な状態を示唆している。「厚いリソスフェアの下の熱いマントル」を作りだしている機構はなにか？ 地球のマントルダイナミクスと何が異なっているのか？ 火星のみならず地球の理解においても興味深い問題である。

2) 初生マグマ組成の謎？

地球上においては表層で見られるマグマは玄武岩といえどもマントルでの融解の直接的な生成物であることは珍しく、何らかの変更を受けている。その説明が岩石学の主要な課題であった。火星においては McSween をはじめ多くの研究者が分析された玄武岩組成は初生マグマ組成に近いと考えている。今回の発表においてもガンマ線スペクトロスコピーから推定される表層地殻の玄武岩組成は pMELTS が予測する初生マグマ組成に極めて類似していることが示された。

なぜ厚いリソスフェアを通過してきたマグマが初生マグマなのか？、否、むしろ厚いリソスフェアを通過してきたからこそ初生マグマなのか、地球の大陸地域の玄武岩マグマの活動と関連して興味深い。

3) 火星のマントルダイナミクス vs. 地球のマントルダイナミクス

地球においてはプレートテクトニクスが内部の熱輸送・物質循環をコントロールしている。とくに沈み込み帯を通しての表層物質のリサイクリングがマントルの化学進化を支配している。一方プレートテクトニクスの働いていない火星においてはどのような形の熱輸送・物質循環が起きているのか、興味深い。本研究会に於いて議論された剥離駆動火成活動はその一つの可能性を示唆している。地球とは異なったこの「火星システム」に関して総合的な取り組み(物質科学、惑星探査、宇宙測地学、熱流体モデリング,...)が次のステップとして望まれる。

参考文献

- [1] Werner, S. C., 2009, *Icarus* 201, 44.
- [2] Ogawa, M. and Yanagisawa, T., 2012, *J. Geophys. Res.* 117, doi:10.1029/2012JE004054.
- [3] Vaucher, J. et al., 2009, *Icarus* 204, 418.
- [4] Bills, B. et al., 2005, *J. Geophys. Res.* E 110, E07004.