

特集：MELOS火星複合探査の科学検討

MELOSで狙う内部構造探査

小林 直樹¹, 菊池 冬彦², 新谷 昌人³, 栗田 敬³,
田中 智¹, 岩田 隆浩¹, 佐々木 晶²

2009年4月21日受領, 2009年5月12日受理.

(要旨) 火星内部構造はその原材料物質, 集積過程, 熱進化を理解する上でも重要である. コアの組成と大きさはマンツルのFe含有量, ペロプスカイト層の存在, 厚みを左右しマンツル対流にも影響を与える. マンツルからの溶融物でできた地殻は発熱性放射性元素を濃集する. 地殻の厚みは火星の慣性能率の値に影響するため, コアの大きさの推定において不定要因になっている. 火星の熱進化や内部構造の推定において地殻の厚さの決定は重要である. コア半径や地殻の厚さを計測するには地震計測が有効であり, コアの組成や地殻厚の分布を決めるには精度の高い回転変動計測, 重力場計測が求められる. また, 活きた火星の活動をモニターする上でも地震計測やVLBI 計測, 熱流量計測, 電磁気観測は欠かせないものである.

1. はじめに

惑星や多くの衛星は分化した内部構造を持つことが知られている. 分化の様態は惑星のサイズや惑星を構成する物質組成, 内部の温度状態に依存し, 惑星や衛星の集積過程, その後の進化を反映したものである. 火星の内部構造の現在の姿を知ることは火星の形成史や地表環境にも影響を与えるその後の熱進化を議論する上でも重要である [1], [2].

これまでのところ火星の内部構造を制約している情報は火星隕石から推定される化学組成と半径, 質量, 慣性能率, 地形, 重力分布, ラブ数などの地球物理学データである. 火星はSNC隕石の情報を基にC1コンドライト物質(40%)とC1コンドライトから揮発性成分が枯渇した非常に還元的な物質(60%)からなると考えられている[3]. その不揮発成分はC1コンドライトと同じであるため, 火星のバルクのFe/Si比やFe重量%はC1コンドライトと同じでそれぞれ1.71, 27.4%であることが帰結される. また火星隕石とC1コンドライトの組成比の比較から火星マンツルはFeOに富み(Mg#=0.75), コアはFe-Ni-FeSの合金であり火星質

量の22%を占めると推定されている(本稿ではこれを「化学モデル」と呼ぶ).

一方, 地球物理学的なパラメータは軌道衛星や着陸機のドップラー観測, 電波測距観測, レーザー高度計のデータから求められている. 火星内部の密度の分布を表す最大主慣性能率 C は重力ポテンシャル J_2 と歳差運動の観測から1%程度の精度で決められており[4], 地殻の平均厚 H はジオイドと地形の比から 50 ± 12 km(地殻密度 $2700 - 3100$ kgm^{-3} を仮定)と推定されている[5]. 表1に火星の内部構造を決める際の制約条件となっている主な地球物理学パラメータの観測値を挙げておく.

火星の半径, 質量を固定すると慣性能率は内部の密度分布(コアの組成と半径, マンツル組成と温度, 地殻の密度と厚み)によって決まる. 火星がC1コンドライト的な物質で作られているとすれば, それに基づいた火星内部構造モデルは慣性能率 C の観測値を誤差の範囲で満たさなければならない. 実際にそうした計算を実施してみるとC1コンドライトに基づいた「化学モデル」は慣性能率の観測値と矛盾する[1]. しかし軽元素として水素がコアに含まれる場合, FeHはFeSに比べ圧縮率が高いため H が50 mol%ほどコアに混入すれば「化学モデル」でも慣性能率に矛盾しなくなるという見積もりもあり[6], コア組成を推定する際に鍵とな

1. 独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部
2. 国立天文台
3. 東京大学地震研究所
kobayashi.naoki@jaxa.jp

表1. 火星内部構造を制約する物理特性の観測値

質量 M	6.41850×10^{23} kg
平均半径 R	3389.92 km
最大主慣性能率 C/MR^2	$0.3660 \pm 0.0012^{*1}$
ポテンシャルラブ数 k_2	0.153 ± 0.017
平均地殻厚 H	50 ± 12 km
自転周期 Ω	8.86427×10^4 s

表2. 計測手法と得られる科学情報

計測手法	科学情報
地震計測	コア半径, 地殻の厚さ, マントル不連続面, 地震活動, 地滑り活動, 火山活動, 隕石衝突頻度, 大気脈動
VLBI計測(回転変動/重力場)	コア半径, 地殻の厚さ, 極冠の季節変化
熱流量計測	地温勾配, 地殻の厚さ, 火山活動

るコア密度は火星の材料物質の議論においても重要である。

火星のコア-マントル境界での温度の推定値は1700 ~ 2000 Kであるが, Fe-Ni-FeS系の融点は1400 K程度であるから完全融解したコアが期待されている[6]. ラブ数の観測からも半径 1680 ± 160 kmのコアの少なくとも上部は融解していると指摘されている[4]. また軽元素量が多くなりコア半径が大きくなると高圧相であるペロプスカイト層は存在しなくなる[6]. ペロプスカイト層の存在はマントル対流にも影響を与えると考えられているためコアの大きさの決定は熱進化を考える上でも重要である. また, 地殻の平均密度, 平均厚は慣性能率の値に影響するため, 議論の精度を上げるためには地殻構造を正確に決める必要がある. 地殻の厚さはマントルの部分溶融量を反映するが, 地殻が多いほど放射性元素が地殻に濃集し逆にマントルの熱源を枯渇させる. マントルの熱源が枯渇するとコアとマントルの温度差が大きくなりコアからの熱流量を増やす効果をもたらす. コアからの熱流量は火星のダイナモ作用を議論する上でも重要である[2].

以上のようにコアの大きさと密度, 地殻の厚さと密度の決定は火星の内部構造の議論において鍵となっている. 最新の探査データを用いてもコアサイズの決定には300 km程の不定性があり, 許容されるモデルを十分には制約できるものではない ([4]の図2参照). こ

れらの量を決定することは火星内部構造を理解する上で鍵となる.

2. 内部構造探査

地殻の厚さやコアの大きさ, 更に内部の不連続面の同定といった内部構造の探査を1機もしくは2, 3機の少数の着陸機で行うには地震探査, 火星回転, 重力場計測, 熱流量計測などの多面的, 包括的な情報収集が不可欠である. また, MELOSのランダー単体では完結せず, 他のミッションとの連携や将来のミッションの礎となる探査としての位置付けという視点も必要であろう. 表2にランダー搭載機器候補として挙げられている地球物理学的測定機器とそれによって得られる科学情報をまとめた. コア半径の決定は内部構造学として最重要課題ではあるが, 地殻の構造の決定に比べより難易度が高い探査である.

(1) 地震計測

惑星の内部構造探査において潜在的に最も高い解像度を持つのが地震探査である. しかし1点もしくは2, 3点の観測点で達成できる内部構造の情報は限られる. そもそも火星に観測にかかる十分な地震活動があるのかという疑問もある. Viking搭載の地震計の計測は5ヶ月間の観測でランダーや風によるノイズの影響が少ない640時間分の記録を採取した. その記録の内, 1例のみ火星地震と思われる記録を得たのみである [7]. その統計的な解釈から火星の地震活動は地球に比べて

*1 文献[4]の値を平均半径Rで評価したもの.

低いと考えられている。

Mars Global Surveyorのレーザー高度計の記録から8500の断層地形を同定した研究では1年で 3.4×10^{16} Nmから 4.8×10^{18} Nmほどの地震モーメントの解放が見積もられている[8]。見積もりは断層の同定、火星の冷却収縮過程や用いた種々の地震のスケーリング則に依存する。上限値ではあるがマグニチュード4以上の地震が年に572個生じている換算になる。最も断層が集中しているTharsis地域で観測頻度が高いと考えられる。他にもHellasの南部、Utopia Planitiaの北側で頻度が高いと見積もられている。

マグニチュード4程度の地震が観測点から30度以内に起ればP波、S波ともに十分なS/Nの記録が取れ[9]、レーバ関数法により地殻のS波構造を決定することができる[10]。地震観測で地殻の厚さが何処か1点アンカーされれば、火星の重力場から地殻密度とマントル密度を仮定すればグローバルに地殻厚のマッピングが可能となる[5]。3成分の広帯域の地震計測と精度の高い重力計測によって地殻厚のグローバルマップが期待される。

しかしマグニチュード4程度の地震はコアでの反射波を捉えるにはやや小さい。実体波のコア表面での反射波以外にも角次数が2から7の伸び縮み基本振動の固有周期(>500秒)はコアの大きさに敏感な量である[6]。しかしコアサイズを決定するには火星のグローバルな振動を励起しなければならない。自由振動を十分な観測レベルに励起するには少なくともマグニチュード6.5以上の火星地震が必要である。これは多く見積もっても10年に1回程度と推定されており、1年程度の観測期間では検出は難しい。地震以外の自由振動の励起源として大気擾乱による励起が提案されており、地球で観測されている程度の常時自由振動が期待されている[11]^{*2}。条件が地球と同じであれば1年もあれば自由振動が検出できる。1点観測でコアサイズを決定するには常時自由振動に期待する他無いが、そのためには地球上で最高性能の高感度、高帯域な地震計を火星にも設置する必要がある。

現在、我々はレーザー干渉計測技術を用いたフィードバック型地震センサーを開発している。目標感度としてはmHz帯の常時自由振動が検出できることであ

る(目標感度： $10^{19} \text{ m}^2 \text{ s}^{-4} / \text{Hz}$)。コアサイズの同定にはこの要求が必要となる。レーザー干渉型地震計の利点は高感度・低ドリフトであり、その場でレーザー波長を基準とした絶対校正がかけられることである。試作機を用いた研究でこれらの利点を実証され、目標感度も達成できる見込みが得られている。一方、惑星探査のためにはレーザー光源や長周期振り子を、打ち上げ・着陸時の衝撃や温度変動に影響されにくい構造とする必要がある。広帯域地震観測に必要な安定性が得られる設置方法についても開発課題である。

(2) 回転変動計測と重力場計測

回転変動計測と重力場計測は火星内部の情報を得る手段として地震計測とともに有効な観測手法である。地球や火星などの太陽系内の天体では自転速度の変化や自転軸自体のゆらぎによる様々な回転変動(歳差、章動、極運動や物理秤動(強制秤動)など)が存在する。天体内の質量分布(重いコアの有無、コアの熔融など)や回転エネルギーの散逸メカニズムの違いによりその振幅、周期が異なる。これらの変動の精密計測により天体内部の情報を導くことができる。もし、地震学的手法でコア半径が与えられるならば、回転変動の情報と併せコア密度即ちコアの組成についても大きな制約を与える。

過去のNASAの火星探査ミッションVikingやMars Pathfinderのランダー電波による位置計測は1 m程の精度であった。内部構造、特にコアの情報を制限するためには、より高精度の観測が必要である。そこで我々は超長基線電波干渉計(Very Long Baseline Interferometry: VLBI)技術を火星の回転変動の計測に応用する。VLBIは、天体や宇宙機の高精度位置計測を目的として開発された技術であり、日本の月探査計画「かぐや」では重力場計測の精度を上げる技術として月内部構造の解明に大いに貢献すると期待されている[12]。今回は、同一ビームVLBI[13]に加えて、逆VLBI [14]という新しい観測手法を導入する。

回転変動計測では複数着陸機を用いた逆 VLBI観測が有効である。火星表面の2カ所以上に電波信号を送るVLBI用電波源を搭載した着陸機を設置する。これらから送信される電波信号を地上局の一つの電波望遠鏡で受信し、各電波源と地上局との間の距離差の変化を高精度に計測する。なお、各電波源から送信される信号は同期している必要があることから、火星周回

*2 文献 [11]の(6)式は因子 Q を $\sqrt{Q} \times \sqrt{2I+1}$ に修正する必要がある。

衛星に周波数安定度の高い発信器を搭載し基準信号を火星表面の電波源に供給する。任意の2つのランダーから送られてくる電波の位相差は火星から受信機までの経路の影響をキャンセルし、2つのランダーと地球間の距離の差 ΔL を精密に計測できる。2つのランダーから受信機への距離の差 ΔL は火星の回転運動によって時々刻々変化する。各電波源と地上局の距離差の計測精度としてはミリメートル(mm)からセンチメートル(cm)を目標としている。回転変動計測の質と量を向上させるためには火星表面に電波源を効果的に多数配置しネットワーク観測を行うことが重要であるので国際協力の呼びかけも行っている。

重力場計測では、衛星と着陸機間での逆VLBI観測と同一ビームVLBI観測の実施を検討している。衛星と着陸機間の逆VLBI観測は先述の着陸機間の逆VLBIを衛星と着陸機に置き換えた観測である。同一ビームVLBIは地上局から見て衛星と着陸機の距離が近い場合に両者を同時に観測する形式の相対VLBI観測である。同一ビームVLBIでは、主要な誤差要因である大気や電離層内の伝搬遅延の変動や観測機器内の局内遅延などを衛星と着陸機の間ではほぼ完全に相殺することが可能となる。また、従来の軌道決定に用いられてきたレンジ、ドップラ計測では地上局から見た衛星の方向(視線方向)への位置変化に感度を持つものに対して、同一ビームVLBI観測は視線垂直方向へ感度を持つため、この手法を用いることでより高精度な位置決定が可能となる。

これらのVLBI観測による衛星の高精度位置決定を通して火星重力場とポテンシャルラプ数(k_2)の決定を目的とする。これまでMars Global Surveyor, Mars Odysseyをはじめ歴代の火星探査ミッションにより詳細な火星重力場モデルが発表されているが[15]、コアのサイズの推定につながる重力場の低次項と k_2 の推定精度は未だ不十分である。特に k_2 の値は、探査衛星や解析手法によるばらつきが大きく、信頼度が低い[16]。例えば歳差運動の決定精度が4倍になれば、仮定したコア組成に対して10 km精度でコア半径が決定できる[16]。逆VLBI, 同一ビームVLBIによる新たな観測量は回転変動や重力場の観測精度を改善し、内部構造モデルの精度を向上させるであろう。

3. 環境変動計測

地球物理学的な観測は内部構造以外にも現在の表層環境の変動に関する情報をもたらす。地動を誘起する原因には地表を剝削し新たな表面を露出させる現象が多い。表面の更新は固体と大気との接触を通し両者の間の物質の交換を増進する。感度の高い広帯域地震計を設置すれば地震、地滑りなどの地表の更新作用を直接捉えることができる。隕石衝突は外因的な表層の更新作用である。それに伴う地殻物質の剥ぎ取りや周囲への放出は内部物質と大気の接触を増進する。隕石衝突も規模によって検出範囲は限定されるが、地震計測によって現在の衝突頻度を推定でき、クレーター年代学にも貢献できる。

回転変動計測は火星大気の利用においても重要である。火星の極にはCO₂の水が存在し、夏には昇華、冬には凝結という季節変化が起きる[4]。これは大気と火星との間の質量交換と角運動量輸送を誘起し、自転速度変化や極運動を生じさせる。逆VLBI観測を1火星年(地球のおよそ2年)以上行い極冠の昇華・凝結に伴う回転変動の検出を行う。これによりCO₂の昇華・凝結量を推定できれば火星大気循環のダイナミクスの理解の一助となる。

従来の火星像では「地球と比べてより進化の進んだ、活動を停止しかけている天体」とみられていたが、近年の探査は現在も活動を続けている活発な惑星であることを明らかにした。その代表例が若い火山活動である。クレーター年代学で「ほぼ現在」と同定される若い、流動性に富んだ溶岩流(高温を示唆する)が多くの地域で見つかっており、地球とは異なった様式のマグマ活動ではないかと関心を集めている。地震波速度探査・電磁気探査によるマグマ源・アセノスフェアの同定が探査目標となる地点で高い熱流量が想定される。1000 kmにも及ぶ長大な割れ目噴火と考えられているCerberus FossaeやTharsis火山周辺域の割れ目噴火地帯、巨大火山の山頂部のカルデラなどが着陸探査地点として考えられる。地震、回転運動、熱流量、電磁気観測によって活きた火星の活動が捉えられれば我々の火星像をより豊かなものとしてくれるであろう。

4. 謝辞

並木則行氏には本稿を丁寧に査読していただき有益なコメントを沢山いただいた。また火星探査のワーキンググループにおける多くの方々との議論が本稿の下敷きとなっている。深く感謝の意を申し上げる。

参考文献

- [1] Bertka, C. M. and Fei, Y., 1998, *Science* 281, 1838.
- [2] Nimmo, F. and Stevenson, D. J., 2000, *J. Geophys. Res.* 11, 969.
- [3] Dreibus, G. and Wanke, H., 1985, *Meteoritics* 20, 367.
- [4] Yoder, C. F. et al., 2003, *Science* 300, 299.
- [5] Wieczorek, M. A. and Zuber, M. T., 2004, *J. Geophys. Res.*, 109, E01009.
- [6] Gudkova, T. V. and Zharkov, V. N., 2004, *PEPI*, 142, 1.
- [7] Anderson, D. L. et al., 1977, *J. Geophys. Res.* 82, 4524.
- [8] Knapmeyer, M. et al., 2006, *J. Geophys. Res.*, 111, E11006.
- [9] Mocquet, A., 1999, *Planet and Space Sci.*, 47, 397.
- [10] Sverningsen, L. and Jacobsen, B. H., 2007, *Geophys. J. Int.*, 170, 1089.
- [11] Kobayashi, N. and Nishida, K., 1998, *Nature* 395, 357.
- [12] Kikuchi, F. et al., 2009, *Radio Science*, 44, doi:10.1029/2008RS003997.
- [13] Liu, Q. et al., 2007, *Advances in Space Res.*, 40, 51.
- [14] Kawano, N. et al., 1999, *J. geodetic soc. Japan*, 45, 181.
- [15] Konopliv, A. et al, 2006, *Icarus*, 182, 23.
- [16] Dehant, V. et al., 2009, *Planet. Space Sci.*, in press.