

「月惑星探査の来たる 10 年」第一段階パネルへの意見書

確認： 本意見書は日本惑星科学会が行う「月惑星探査の来たる 10 年」検討の第一段階においてパネルリーダーが意見取りまとめを行うための資料として提出して頂きます。 **将来の月惑星科学・探査において最も重要になるであろう、第一級の科学**について提案して下さい。意見書の内容は公開討論会などで議論の対象となり、最終報告に反映されます。

締めきり： 2010 年 8 月末日

提出： 電子ファイル (Word または PDF 形式) で「月惑星探査の来たる 10 年」事務局 (decade_sec@wakusei.jp) に送って下さい。事務局で取りまとめて、パネルリーダーに展開します。

- 「月惑星探査の来たる 10 年」検討の詳細については、惑星科学会サーバから資料をダウンロードすることができます。

https://www.wakusei.jp/news/announce/2010/2010_03_10/2010_03_09_introduction.pdf

■ 意見提出先パネル (希望するパネルに○をつけて下さい。複数回答可)

- (○) 地球型惑星固体探査パネル
- () 地球型惑星大気・磁気圏探査パネル
- () 小天体探査パネル
- () 木星型惑星・氷衛星・系外惑星探査パネル

■ 提案タイトル

(複数ランダーによる火星内部構造のネットワーク探査)

■ 代表者の氏名・所属・連絡先 (E-mail アドレス, または電話番号と Fax 番号)

(石原吉明・国立天文台 RISE 月探査プロジェクト・ishihara@miz.nao.ac.jp)

■ 共同提案者の氏名・所属 (適宜追加して下さい)

(MELOS 内部探査検討グループ)
()
()

■ 要約 (400 字程度)

(われわれは火星ではなく地球に住んでいる。これはなぜか—この問いに答えるためには、火星がシステムとしてどのように進化してきたかを知る必要がある。現在、欧米の精力的な探査により、火星表層についてはかなり詳細なデータが得られ、研究が進んでいるが、火星の内部構造については、探査データの欠落により、理解が進んでおらず、火星システムの進化を考える上で最大の障壁である。本提案は火星上に複数の着陸機を下し、少なくとも 1 火星年にわたり多角的な地球物理学観測を行うことで、火星の内部構造、すなわち基本的な成層構造の境界の位置、コアの様態や可能であれば地殻熱流量等をおさえ、信頼に足る火星一次元内部構造モデルを構築することを大目標とした探査を実施するというものである。構築された一次元内部構造モデル、さらにはマントル不均質の有無や、現在の火星の活動度といったデータに基づき、火星システムの形成と進化の議論を一段進めることが可能となる。火星の内部構造は、いまだ信頼に足る構造モデルが存在しておらず、内部構造のリファレンスモデルを得ることは、火星科学にきわめて大きな貢献となるだけでなく、地球環境の進化を理解する上でも非常に重要である。)

■ 本意見書の内容 (テキストおよび図表) をパネルリーダー並びに事務局がパネル討論と各種報告書へ引用することについて承諾しますか? (いずれかに○)

(○) 承諾する () 承諾しない

■ (上で「承諾する」に○をされた方のみ) 引用時には協力者リストを付加する場合があります。協力者リストに氏名を公表することを希望しますか? (いずれかに○)

(○) 希望する () 希望しない

・自由記述 (3 ページ以内, 図表の貼り付け可)

不確定な火星内部構造

天体の起源や進化を研究する上で、対象天体の内部構造を知るといことは、欠かすことが出来ない。しかしながら、現在の火星内部構造モデル (図 1) は、火星上での十分な精度をもった地球物理探査が行われていない為、惑星半径、質量、慣性能率と 2 次の潮汐ラブ数 k_2 を拘束条件とし、例えば火星隕石の分析結果をもとに火星の原料物質を推定してモデルが作成されている。これらのモデルは、拘束条件が少なく、また拘束条件に用いた物理量 (慣性能率・潮汐ラブ数 k_2) の観測精度が足りないなどの理由により、拘束条件を満たす内部構造が一意に決まらないといった不定性を持つ。特に現状のモデルではコア半径に約 300km の大きな不定性があり、火星の起源や進化を研究する上で大きな問題となっている。ここで言う進化とは、固体物理学的な視点のみに留まらない。火星はかつて地球と類似した環境を持っていたことが地質学的に明らかにされていることから、生命探査の意味で非常に興味深い天体である。しかしもし生命が発生したとしても、それが存続しえたのか、したとしたら何処で存続したのか—こうした問いに答えるためには、実は内部進化を精密に知る事が鍵となるはずだ。

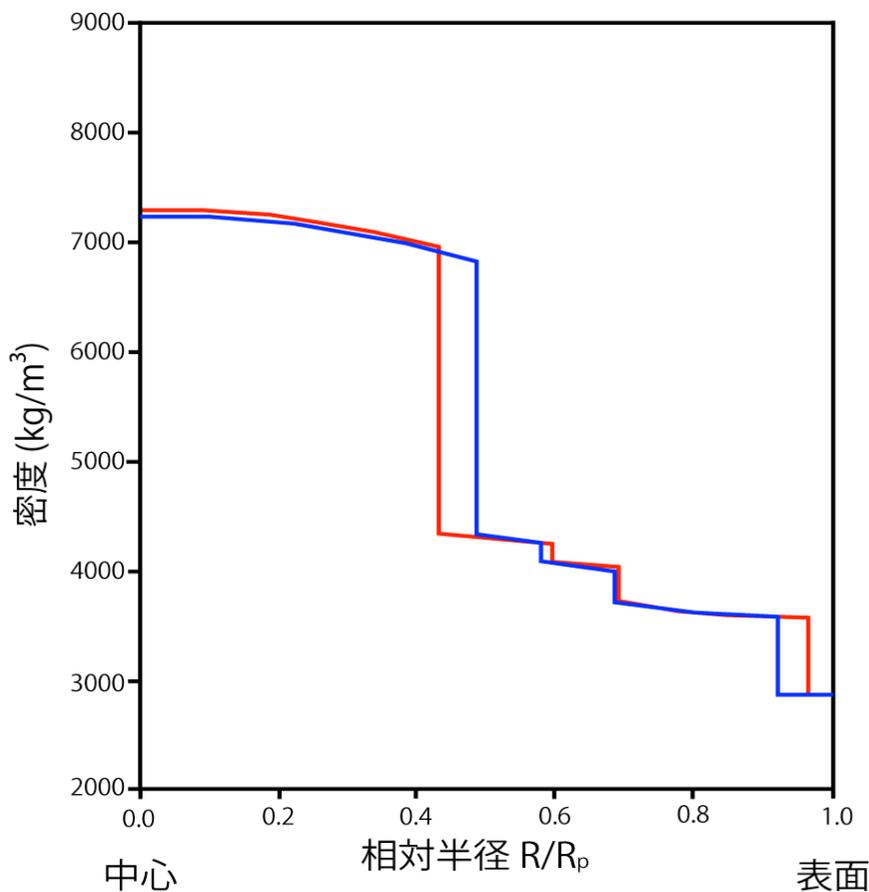


図 1. 火星の内部（密度）構造モデル [Sohl and Spohn, 1997]。二つのモデル（青・赤）によって、地殻厚やコアのサイズに大きな違いが見られる。

コアサイズとマントル構造・熱史

ケイ酸塩鉱物で構成される岩石天体のマントルは、温度圧力条件により、構成鉱物の結晶構造を変化させる。火星のマントルの相変化を考えた場合、火星は地球のほぼ半分のサイズであるため、マントル最下部において、地球の上部マントルと下部マントルの境界（ γ スピネル相-ペロブスカイト相境界）付近と同等な温度圧力条件となる。この際、現在の火星内部構造モデルでは、小コアモデルの場合、相転移をおこす条件に達するが、大コアの場合は相転移条件に達しない。すなわち γ スピネル相からペロブスカイト相へ変化の有無が、コアサイズの不定性によって左右され、現在の内部構造モデルではどちらもとりうる。ペロブスカイトと γ スピネルとの間の相転移曲線は負の勾配を持っており、火星マントル最深部において相転移が起きているか起きているか

か、また起きていた場合のペロブスカイト層の層厚がどの程度であるかにより、マンテルにおける熱輸送に大きな違いが生じる。コア半径の決定は、コアだけでは無く、マンテルの構造および火星の熱的進化を推定する上でも本質的に重要である。

地殻厚とマンテル構造・熱史

地殻厚を正確に決定することもマンテルの構造・進化を推定する上で重要である。初期地殻は火星形成時に存在したマグマオーシャンの固化過程において、組成・密度分別を受けて形成されるが、マンテルを形成する主要鉱物（かんらん石や輝石）の晶出した後の残滓から形成されるため、ウランやトリウムといった液相濃集元素は地殻に濃集することとなる。また、その後の火成活動においても、ウランやトリウムはマンテルの部分溶融に伴ってマグマ側に濃集・上昇し、噴火にもなるとして溶岩流として表層地殻に、もしくはイントリュージョンとして地殻内部もしくは地殻底部に付加される。すなわち、地殻が厚ければ厚いほど、相対的にマンテル中のウランやトリウムといった放射性熱源元素が枯渇することとなり、マンテル中での放射壊変による加熱が利き難くなり、また逆に地殻が薄ければより加熱されることとなる。地殻厚の正確な推定は、マンテルの熱的状态に大きく影響するため、熱史に制約を与える為にも欠かせない。現在火星の地殻厚やその分布は、周回衛星からの重力場測定結果と地形計測結果を用い、ジオイド地形比から推定した平均地殻厚や、それを拘束条件とした重力インバージョンから推定されているが、例えば地震学的に1点もしくは数点の地殻厚を正確に直接決定することが出来れば、現在よりもより正確な地殻厚推定が可能となる。また、地殻厚・地殻密度・地殻構造は、慣性能率に大きな影響を与えるため、深部構造についての議論の精度を向上させる為には、その正確な理解が欠かせない。

火星ダイナモ停止問題

火星のシステム進化の大イベントの一つとして、ダイナモ駆動の停止がある。火星は磁気異常や火星隕石の残留磁化などから、以前はダイナモの駆動にともなう固有磁場を持っていたのではないかと考えられており、現在の火星は固有磁場を持っていないため、火星は進化の過程のいずれかの時期に、ダイナモの駆動条件を満たさなくなり、ダイナモの駆動が停止し固有磁場を失ったことになる。ダイナモが駆動するには、溶融した流体コアが存在するだけでは不十分で、コアマンテル境界において、マンテルがある程度活発にコアから熱を奪う（高い冷却度）必要がある。火星の場合、潮汐ラブ数 k_2 からは流体コアの存在が推定されており、またコアマンテル境界での温度は 1700–2000K と推定されることから、Fe-Ni-FeS 系のコア（融点 1400K）を考えると、コアは完全融解状態であるとされる。すなわち、現在の火星でダイナモが駆動しない原因は、マンテルがコアから十分熱を奪えない状況にあるからと推定される。すなわち、ダイナモ活動史を推定するには、火星のマンテルの物理的・化学的な状態を知ることが重要であり、特にペロブスカイト相の有無が最重要である。これはコアサイズを知ることには帰着する。また、ダイナモが停止し、磁場を失うと太陽風が直接上層大気とインタラクションするようになり、大気が宇宙空間へ散逸しやすくなる。このため、大気進化を考える上で、ダイナモの停止時期は重要な意味を持つ。火星の現在の火星の内部構造・状態を知ることが、火星システム全体の理解に不可欠である。

火星のテクトニクス

火星システムの進化を考える上で、また比較惑星科学的観点で注目すべき点として、火星のテクトニクスがある。地球はマルチプレートテクトニクスが駆動されており、プレート境界は発散型境界・収束型境界・衝突型境界とその形態によって区分されるが、本質的に重要なのは収束型境界であると考えられる。地球の場合、収束型の境界は沈み込み帯において一方のプレートが他方のプレートの下に潜り込み、さらにマンテル内部へと沈降しているが、どのような場合に沈み込みが開始するのかは明らかではない。現在の火星はシングルプレートテクトニクスの状態にあると考えられるが、過去の一時期火星はマルチプレートシステムであった可能性が示唆されている。プレート運動を駆動する力として考えられるのは、マンテルの対流であり、沈み込み開始条件についても、マンテルの状態（堅さ等）に依存するのは間違いないと思われる。それゆえ、火星の内部構造、とりわけマンテルの状態を知ることが、プレートテクトニクスのより一層の理解を進める上でも重要である。また、過去にマルチプレートシステムを経験し、沈み込みがあったとするならば、火星マンテル中に沈み込んだプレートによる不均質が存在すると考えられる。また、

タルシスのような巨大な火山地帯下のマントルは、その他の部分のマントルと比較して異なった物理的・化学的性質を持っている可能性が高い。このようなマントル内の不均質を捉えることが出来れば、火星のシステム進化について、より確度の高い推定が可能となると考えられる。

複数ランダーによるネットワーク探査

固体火星の内部構造推定を目的として、着陸機に搭載されるべき観測機器候補は以下のようなものである。

- | | |
|---------------------|---------------------|
| 1. 地震計測パッケージ | ...自由振動・地震波干渉法・etc |
| 2. 測地（回転・重力）計測パッケージ | ...自由核章動・自転速度変動・etc |
| 3. 電磁場計測パッケージ | ...長周期磁場変動・etc |
| 4. 熱流量計測パッケージ | ...地殻熱流量・表層熱構造・etc |
- など

これらの探査データの複合解析により、火星の正確で信頼に足る火星の内部構造モデル (Preliminary Reference Interior Model on Mars (PRISM²), 図2) を構築する。

Preliminary Reference Interior Structure Model on Mars (PRISM²)

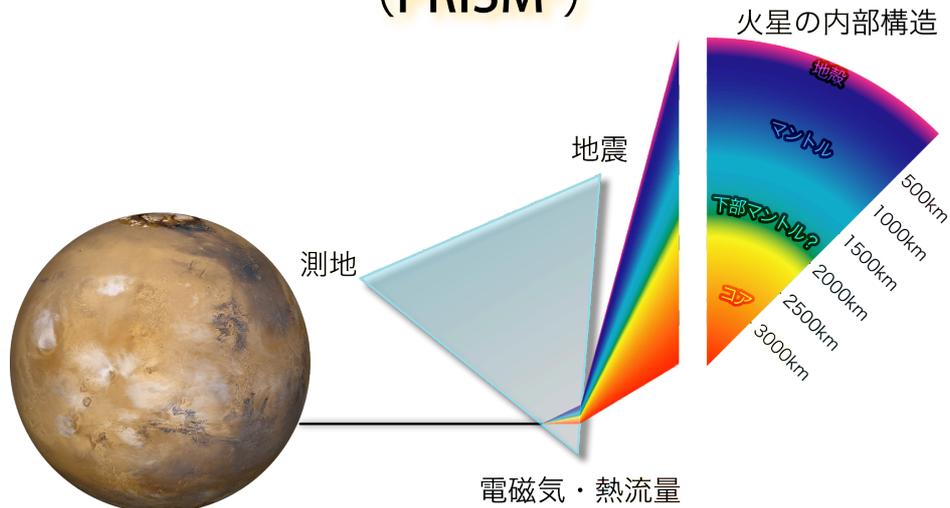


図2. 本提案の大目標。様々な地球物理学的計測を行い、信頼に足る火星一次元内部構造モデル (Preliminary Reference Interior Structure Model on Mars: PRISM²) を構築する。PRISM²には、プリズムによって白色光が多色に分光されるように、地球物理学的な観測で火星の内部構造を明らかにしようとする意味が込められている。