

月・固体惑星内部の 構造、起源、進化、ダイナミクス

倉本 圭、小林憲正、大谷栄治

トップサイエンスの抽出

- 日本惑星科学会将来惑星探査検討グループのミッション提案手順

1. トップサイエンスの抽出（現段階）

2. ミッション提案の策定

3. ミッション提案の評価

宇宙開発関連機関とは独立に惑星科学コミュニティが行う

- 抽出にむけて

- 未解決の科学的問題の洗い出し（本講演）

- ・ さらなるブレインストーミングの場が必要

- 重要性の検討と整理

- ・ 波及性, 面白さ, 実現可能性

- 本講演ではいくつかの観点を示したい

固体地球と比較した 月・固体惑星の位置付け

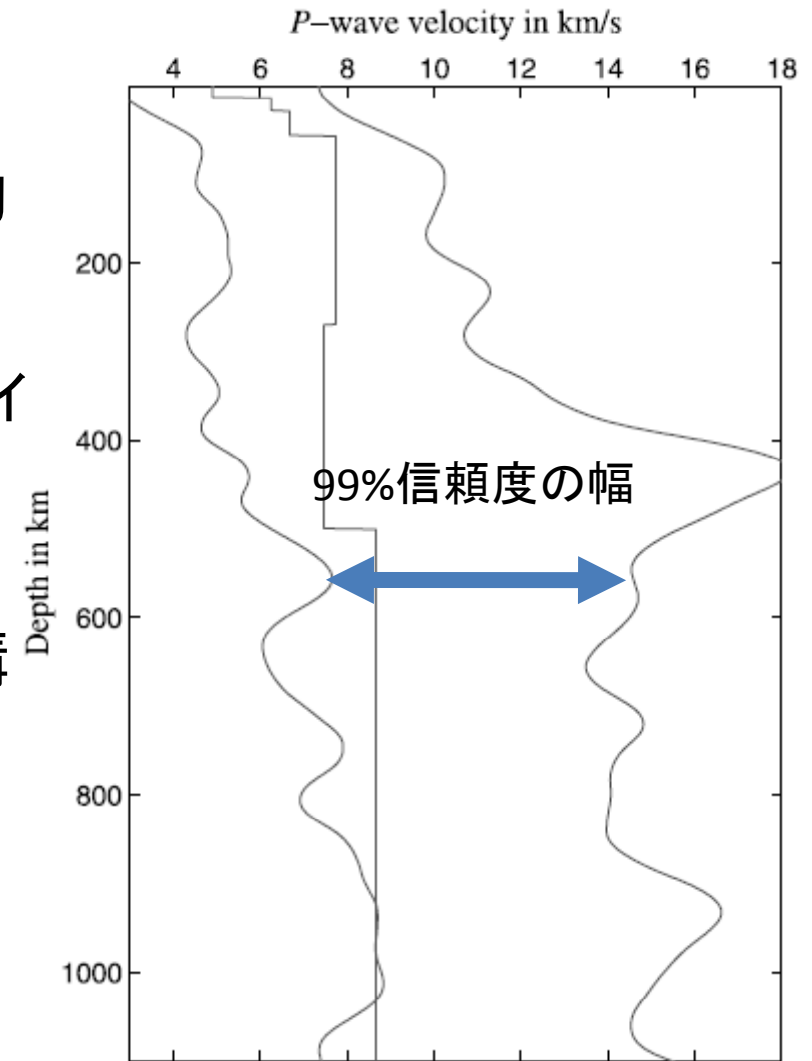
- 物質：主要元素・同位体組成の対比
 - － 太陽からの距離による組成勾配（Fe酸化度，揮発性元素量）
 - － 組成勾配と独立な固有性
- 構造：形成・分化機構の対比
 - － 各天体：内部構造に普遍性と特殊性
 - ・ サイズ・材料物質・熱的境界条件が違うとどうなるか
 - － 月・水星・火星：初期の地質記録を保存
初期分化の機構を探るために適したフィールド
 - － 金星：地球とほぼ同サイズ・密度．内部探査の技術的困難を除くと最重要比較対象．
- 活動：固体地球の活動を特徴づけるプレートテクトニクスとの対比
 - － 月・火星・水星：モノプレートテクトニクス
 - － 金星：プルームテクトニクス？

物質

- 固体惑星（含む月）の全体組成を知る重要性
 - 太陽系の起源と進化・各惑星の形成過程を解明するもっとも基本的な制約を与える
 - 各天体の分化過程を解明するための基礎的な情報となる
- 地球を除く天体では限られた情報しか得られていない

月の全体組成

- 地球以外で最もデータ豊富
- 標準モデル: 金属核小. 揮発性物質に涸渇、Al, Ca, U, Thなど難揮発性元素に濃集.
 - 巨大衝突説を支持. 月起源物質=インパクトーマントル部分蒸発物
- モデルの脆弱性: アポロデータの再解析では、難揮発性元素量の制約条件となった、地震波速度構造、熱流量値に大きな不確定性
 - 難揮発性元素濃集は不明
 - 巨大衝突シナリオ要再考
- 地球・月以外の内惑星ではさらに情報が限定



Khan and Mosegaard (2002)

惑星組成を求めるための主な手法

手法	得られる情報
リモートセンシング	表面元素、化学組成
重力・測地学	平均密度、地殻厚※、慣性能率、核状態
地震学	地震波速度構造、物質境界
熱	内部熱構造、放射性熱源量
サンプルリターン	主要・微量元素存在度、同位体組成
素粒子トモグラフィ	放射性熱源量・分布など

※ 地殻・マントル密度を別途要決定

組成決定にはそれぞれが相補的役割を果たす
地震学は物質境界の解像力に優れ非常に重要
H₂Oは微量でも重要な成分

組成に迫るために

● 地震波速度構造の決定

- － 月：多地点・広帯域化、球対称モデルの確立
 - ・ 物質境界面の決定
 - ・ 地殻・マントル・核組成の制約
- － 火星：大気励起振動（1ステーションでも）
 - ・ 地震活動が確認されれば多地点化
- － 他惑星はchallenging：熱対策技術の要高度化

● 測地学的手法の適用

- － 月・火星・水星：中心核サイズ・密度・状態
- － 金星：遅自転惑星の慣性能率をどう測るか？

● 熱計測

- － 共通：多地点直接計測・電磁探査の併用→平均量（熱流量・温度プロファイル）

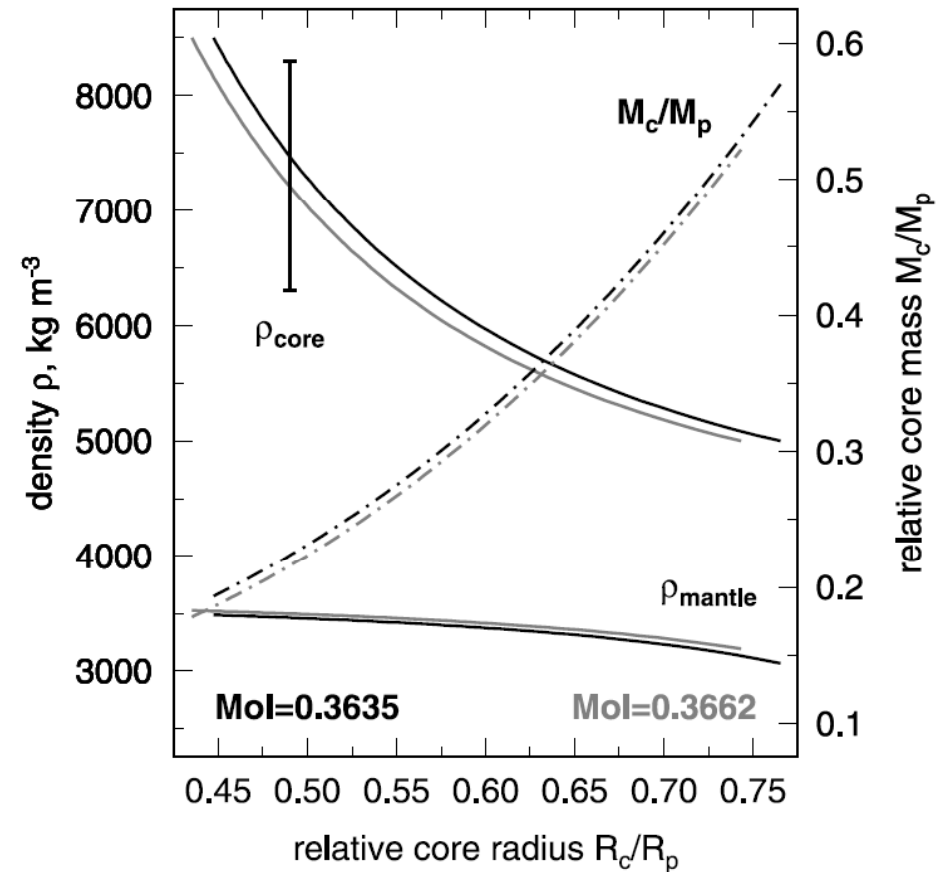
構造

● 成層構造を知る重要性

- － 形成進化過程を解明するための基礎的情報を提供
- － 化学組成・熱構造だけでなく、物質状態の深さ分布や年代情報をセットで求めることが重要
 - ・ 時間軸を入れ分化過程を解読することが可能になる
- － 固体惑星だけでなく大気進化・表層環境の研究にも密接に関連する
 - ・ マグマフラックス・組成の変遷
 - ・ 内部の揮発性物質分布→揮発性物質リサイクル
 - ・ 長期気候変動のメモリ(極冠と地下熱構造の関連等)

火星の成層構造

- 地球に最もよく似た表層環境
- 金属核：慣性能率因子から存在はほぼ確か
 - サイズ・組成・状態は未確定 or 不明
- 地殻：表面組成はかなり制約、マントルと密度差不明、厚さ不明
- 大気過程との結合：氷床荷重応答から固体火星の変形特性を求める試みもある
- 年代：クレータ年代学による間接推定、絶対値不定性大
- 熱構造：不明



Sohl et al. (2005)

構造に迫るために

- 全体組成決定と相補的に
 - － 地殻厚・熱プロファイル・核密度とサイズ・物質状態
 - ・ 分化過程解明のための基礎情報
 - － 月：核密度・状態→深部の揮発性元素(S)欠乏度，温度を制約
 - － 火星：地殻厚、熱プロファイル→火成活動フラックス、氷床凍土の安定性
 - － 金星：地殻厚→表面更新機構（転移仮説の検証）
- サンプルリターン
 - － 月：未踏地質区、年代学、深部由来物質
 - － 火星：地殻組成、揮発性物質、年代学
 - － 他惑星：challenging

活動

- 固体惑星はまだ「活着ている」か？
 - － 内因的な地震・火山活動は、地球以外では未検出
 - － 月：外因（おそらく水星も）
 - － 火星：境界？
 - － 金星：たぶん存在

確認するだけでも大きな発見
- 重要問題：テクトニクスの様式の違ひとその原因
 - － 様式の違ひは主に重力と地形データから認識
 - － 組成・内部構造に加えて、時間軸・物質・現在の活動性の知見が有益

活動に迫るために

- 現在の活動の検出
 - － 金星・火星：地震活動・噴火モニタリング
 - ・ 震源分布・活火山分布は内部ダイナミクスを知る鍵
- 過去の活動の特徴付け
 - － 地震波トモグラフィー
 - ・ 重力・地形・地質図との対比
 - － 溶岩流・火砕流の噴出口と堆積物の形態・物質・年代のその場調査
 - ・ 代表的な数地点でも意味がある

まとめ

- 惑星探査においては「比較惑星学的観点」が重要
 - 我々の住む地球の理解につながることが不可欠
- そのために月・固体惑星は適切な対象天体群の1つ
- 天体それぞれに適切な科学目的を置く必要がある

付録：探査計画に求められる要件

1) 第一級の科学目標：

惑星科学の本質的問題を解明するうえで重要な成果が期待できる科学目標を掲げる。このため探査計画において科学的意義の検討を充分に行う。

2) 独自性：

探査計画の立案において独自性を重視する。

3) 手段の最適化：

探査の実行において自由度をできるだけ広く確保し、最適な手段を用いる。

4) 完結性：

計画からデータ解析に至る全過程をわが国が独力で行える体制のもとで探査を実行する。

5) 国際協力：

4) のもとで国際協力を進める。

出典：日本惑星科学会将来計画委員会報告書（1996）

<https://www.wakusei.jp/news/announce/1996/1996-06/shourai.pdf>