

特集「物理探査ミッションで知る月の内部構造と進化」

鉄のコアの観測可能性

倉本 圭¹

1. Lunar-A, SELENE計画のコア探査

来年9月打ち上げ予定のLunar-A計画では、地震学的探査によって月のコアの有無とサイズを調べる。この他に熱流量測定や、軌道船による地形撮像なども予定されているが、地震学的なコア探査が同計画の主眼である。一方、2003年の打ち上げを目指しているSELENE計画は、10点を越える観測測器を搭載した衛星を周回させ、月について多角的な観測を行う。そのうち月のコアに関する観測項目としては、測地学的手法によるコアの密度・物理状態についての探査、そして磁場観測による古月地磁気の探査が予定されている。

ここで月のコア探査の重要性を簡単に整理しておこう。地球のコアについては、我々はかなり前からそのサイズ・密度・物理状態・構造そしてダイナミクスについて知っている（もちろん完全にはないが）[1]。しかし他の惑星や衛星については、それらのコアに関する情報は非常に乏しい。せいぜい固有磁場の存在や、慣性能率からその存在について議論されているという段階にある[2]。Lunar-A, SELENEの探査によって月のコアの有無・サイズ・密度・物理状態・過去のダイナモ作用について確かな知見が得られれば、月は地球に次いでそのコアの性質が詳しく知られた天体となる。これは比較惑星学的なコアの研究に大きな弾みをもたらすであろう。月のコアは地球のそれと

大きく異なる環境下で形成・進化したかも知れないが、異なる条件下でのコアのあり方を知ることには、コアに関係するさまざまな過程の一般的な理解に寄与するはずである。

月はその平均密度などから、全体として鉄に欠乏した組成を持っていることは間違いないが、金属コアのサイズと密度の決定はこの欠乏の割合に定量的な値を与えることになる。これは例えば月の総鉄性元素量の評価を可能にし、月材料物質の観点から月の起源論へ重要な制約を与える[3]。また現在月の形成機構として有力視されている巨大衝突説は、その数値シミュレーションの解像度が次第に上がりつつあり[4]、将来的に金属コアサイズの再現性がモデルの良し悪しの判断材料に加わるかも知れない。密度はコア中の硫黄等の不純物の濃度を反映する。したがって密度がわかれば、そこから月の材料物質について手掛かりが得られる。また、そもそも月にいかにコアが形成されたのかという問題についても、コアのサイズ・組成についての情報は非常に貴重である。さらに、コアの物理状態を知るとは、月の現在の中心温度に制約を与えることになる。そして古月地磁気の探査から過去のダイナモ作用について制約が得られれば、当時の月のコアの対流強度ひいては冷却率について知見が得られるかも知れない。これらは月の熱史について重要な制約となる。

このようにLunar-A, SELENE計画によるコア探査は科学的に大変面白くかつ意義深い。しかし実

¹ 北海道大学低温科学研究所

り多い成果を引き出すには、幾つか乗り越えるべきハードルもある。このセッションでは、1) ごく小数点の地震波観測でいかにコアを調べるのか、2) 測地学的探査において地殻マントル系の密度成層の影響を補正できるか、そして3) 磁場探査により過去のダイナモ起源磁場をいかに抽出・解釈するかについて焦点を当て、問題の整理とその解決に向けた議論を行った。各講演者にはこれらの問題設定を良く理解してもらい、分かりやすい講演をしていただいた。それぞれの論点については本特集の各講演者による稿にゆずり、ここでは実際に Lunar-A と SELENE の探査から月のコアについてどこまで分かりそうなのか、足りない点があるとしたらどういふ点なのか整理して、本セッションのまとめとしたい。

2. 有無とサイズ

コアの有無とサイズについてはかなり明確になることが期待される。竹内氏の評価では、Lunar-A 計画で設置される月の裏側の地震計が、コアを通過してくる地震波（コアフェーズ）を捉えることができればサイズを求められる。その精度は、実際のコアサイズにもよるがおよそ100kmか、条件によってはそれ以下に絞られる。震源メカニズムや月中心部の減衰構造によっては、コアフェーズが観測にかからないケースもありうるが、その場合制約は緩くなるものの、やはりコアのサイズに一定の制限が与えられる[5]。

サイズの決定精度は深発月震源（これらの震源では潮汐作用によって定期的に地震が発生する。Lunar-A 計画ではこの性質を利用した観測計画が練られている）の位置決定精度に束縛されている。今回の計画では震源位置の決定精度を改善することは困難である。今後 Lunar-A に続く探査として、多数点の地震観測網の展開したり、自由振動を捉

えられる長周期地震計の設置が望まれる。地球内部構造の地震計ネットワークによる観測計画のノウハウ[6]は、将来の月惑星内部についての地震学的探査計画をたてる上でおおいに参考になるであろう。

また SELENE の磁場観測では、月のクレーターの磁気異常を調べ、過去に全球規模の双極子磁場が存在したかどうか調べる。もしこうした過去の双極子磁場の存在が確からしいと結論できれば、月の金属核の存在は非常にもってもらいことになる[7]。しかし現時点では磁場データの解釈の一意性については曖昧さが残ることも否定できない。地球のコアのダイナモ作用の理解は数値シミュレーションによって近年非常に発展しつつあり、今後こうした知見が観測結果の合理的な解釈に活かされることが期待される[8]。

3. 密度と物理状態

コアの密度と物理状態については今回ははっきり決定できる手順は示されず、今後の課題として残された。まず密度についてだが、SELENE 計画の測地学的探査では月の慣性能率が高精度で決定される[9]。これは月内部の密度成層度の指標になるが、これに月の平均密度、Lunar-A 計画で決められるであろうコアサイズを加えても、なおコアの密度を求めるには条件が足りない。地殻・マントル系の密度成層の寄与が不明なことが足かせとなる。奥地氏の講演によると、岩石学的にみて地殻・マントル系はかなり大きな密度成層性をもつ可能性があり、これをきちんと押さえる観測が必要である。SELENE 計画では高い次数の重力係数の決定も行う。これらのデータを用いた方策を考えることは重要であろう。

またこれは逆接的であるが、コアが存在した場合、物質科学的にみて、その尤もらしい密度はあ

る程度狭い範囲に収まる。このことは高精度の慣性能率とコア半径のデータが、コアよりむしろ地殻マントル系の平均密度と密度成層度について厳しい制約を与えることに注意しておきたい。例えば、地殻-マントル-コアの3層モデルに対しては、これらの量（月平均密度・慣性能率・コア半径・コア密度）に、地殻の密度が既知量として加わると、地殻厚とマントルの密度も求まることになる。もっとも、実際の月はもっと複雑な構造をしているだろうから、これで十分と言うわけではない。

コアが固体か液体かという物理状態については、月の自由秤動の精密観測から区別しうる。しかし、花田氏の講演によると半径800キロ以上と相当大きなコアでなければ判別は難しいようである。一方、竹内氏の講演によると、Lunar-Aの地震観測により物理状態が区別できる可能性がある。これは月震波の振幅の情報を利用するので、月深部の地震波減衰構造の不確定性を取り除けるかが今後の課題となろう。

参考文献

- [1] 例えば、田近英一, 1996: 地球の構成, 『地球惑星科学入門』(岩波講座地球惑星科学1), 岩波書店, 47-100.
- [2] 例えば、松井孝典, 1997: 惑星・衛星の内部構造, 『比較惑星学』(岩波講座地球惑星科学12), 岩波書店, 414-431.
- [3] Newsom, H. E., 1984: Constraints on the origin of the Moon from the abundance of molybdenum and other siderophile elements, In "Origin of the Moon," edited by W. K. Hartmann et al., Lunar and Planetary Institute, pp. 203-234.
- [4] Cameron. A. G. W., 1997: The origin of the Moon and the single impact hypothesis V,

Icarus 126, 126-137.

- [5] 竹内 希, 1998: Lunar-Aミッションによる月のコアの検知, 本特集
- [6] 例えば、坪井誠二, 1998: 海半球プロジェクト: 地震計配置の戦略, 本特集
- [7] 渋谷秀敏・網川秀夫, 1998: 月の核と月磁気/古月磁気学, 本特集
- [8] 桜庭中, 1998: 月ダイナモの可能性について, 本特集
- [9] 花田英夫, 1998: 重力ポテンシャルの観測によるコア密度の制約, 本特集