

月面における電磁場観測

Electromagnetic Field Measurements on the Lunar Surface

松島政貴¹・清水久芳²・綱川秀夫¹・渋谷秀敏³・高橋 太¹・松岡彩子⁴・藤 浩明⁵・
吉村令慧⁶・小田啓邦⁷・飯島祐一⁴・小川和律⁴・田中 智⁴

¹東工大, ²東大地震研, ³熊本大, ⁴ISAS/JAXA, ⁵京大, ⁶京大防災研, ⁷産総研

Masaki Matsushima¹, Hisayoshi Shimizu², Hideo Tsunakawa¹, Hidetoshi Shibuya³,
Futoshi Takahashi¹, Ayako Matsuoka⁴, Hiroaki Toh⁵, Ryohei Yoshimura⁶,
Hirokuni Oda⁷, Yuichi Iijima⁴, Kazunori Ogawa⁴, Satoshi Tanaka⁴

¹Tokyo Institute of Technology, ²ERI, University of Tokyo, ³Kumamoto University, ⁴ISAS/JAXA,
⁵Kyoto University, ⁶DPRI, Kyoto University, ⁷AIST

The electrical conductivity structure of the lunar interior is important to give a crucial and independent constraint on the lunar origin and evolution. However, estimates of the electrical conductivity obtained so far contain significant ambiguity, larger than two orders of magnitude, especially for shallow and deep lunar interiors. In the SELENE-2 project, we propose electromagnetic (EM) sounding of the Moon on the lunar surface by a lander. We expect that the precision and accuracy in the estimation of lunar electrical conductivity are improved by the EM sounding based on the magnetotelluric method with higher frequencies compared with previous magnetic field observations.

1. はじめに

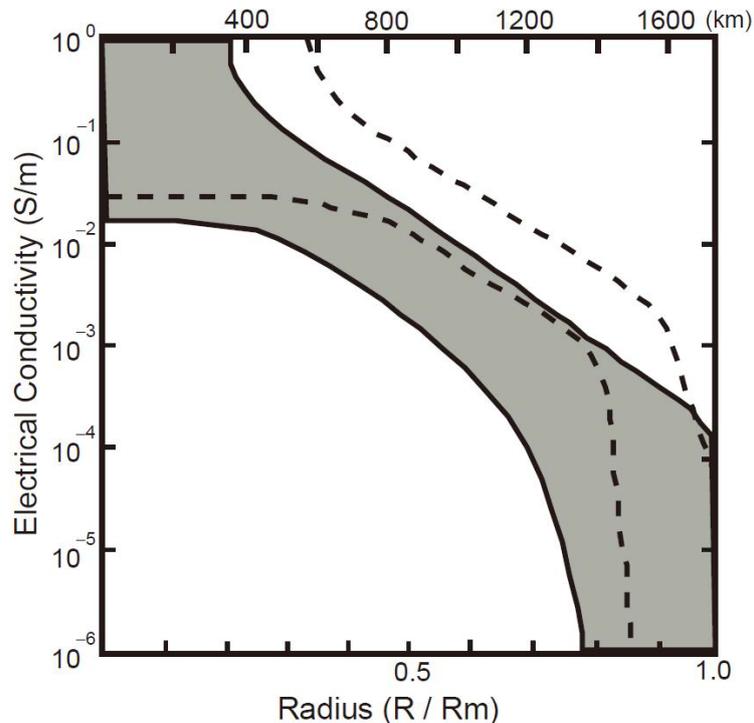
2007年9月14日に打ち上げられた「かぐや」(SELENE)は月面からの高度100 kmで月の極軌道を周回することにより、さまざまな観測を実施してきた。搭載されている観測ミッション機器の一つ、月磁場観測装置(Lunar Magnetometer: LMAG)は、月の磁場を観測することにより、(1)月の磁気異常の詳細構造と成因、(2)月の電気伝導度構造、そして(3)月の磁場環境と太陽風プラズマとの相互作用を明らかにすることを目的としており、成果を上げつつある(Tsunakawa *et al.*, 2008)。

次期月探査ミッションであるSELENE-2では、着陸機による月面での観測を通して、「月での科学」および「月の利用調査」が計画されている。我々は月において電磁探査を実施することにより、これまでよりも高い精度で月内部の電気伝導度構造を推定し、月の起源に迫るミッションを提案している。ここでは、月面において電磁場を観測するための検討状況を紹介する。

2. 月の電気伝導度分布

月の起源・進化に対する理解を深めるための一つの手段は、月の内部構造—物理状態—を明らかにすることである。例えば、月内部の熱的構造(温度構造)は、月面において熱流量を観測することによって推定されている。発熱源と熱伝導率の仮定のもとで得られている温度分布は、深さ300 kmで1100~1600 Kである(Keihm and Langseth, 1977)。温度の幅は500 Kであり、月マントルの構成物質を推定するための物理条件として、精度が良いとは言えない。また、月震観測によって月内部の弾性的構造(地震波速度構造)が推定されている。深さ270~500 kmにおける地震波速度の減少や1000 km以深の部分熔融の可能性が示唆された(Nakamura *et al.*, 1982; Nakamura, 1983)。しかしながら、地震波速度の減少の原因として、化

学組成によるものか，温度上昇によるものかなどは特定されていない．そこで，地震波速度構造とは独立な情報として，月内部の電磁氣的構造（電気伝導度構造）を調べるのが極めて重要である．月の地殻やマントルを構成すると考えられているケイ酸塩鉱物の電気伝導度は温度依存性が強いので，適切な物質を仮定すれば，電気伝導度構造から月内部温度場を推定することができるからである．月外部の磁場の時間変化によって月内部に誘導される電流は月内部の電気伝導度構造に依存する．したがって，月の電磁応答を調べることによって月内部の電気伝導度構造を推定することができる．



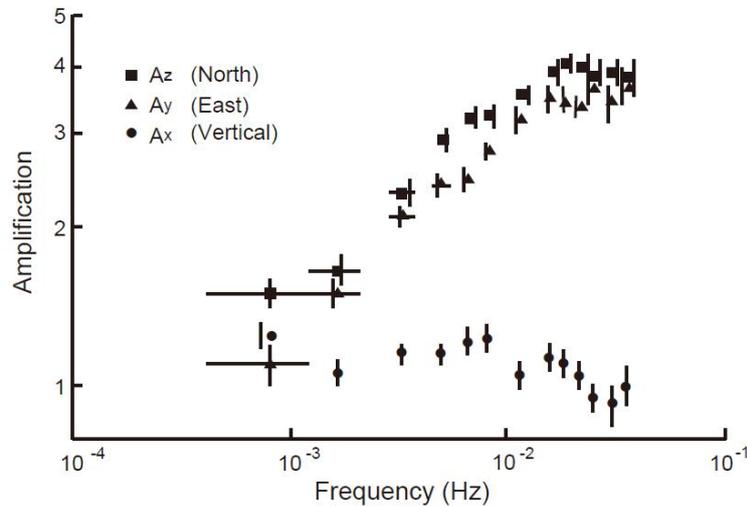
第1図. これまでに得られた月の電気伝導度分布の例. 破線で示された範囲は Dyal *et al.* (1976) による. 実線で示された範囲は Hood *et al.* (1982) による.

Fig. 1. Examples of the lunar electrical conductivity distribution obtained so far. The envelope by broken lines is obtained by Dyal *et al.* (1976), and the envelope by solid lines by Hood *et al.* (1982).

これまでも NASA のアポロ計画や 1998 年に打ち上げられた月周回探査衛星 Lunar Prospector によって月内部の電気伝導度構造が調べられてきた (第1図). 1969年, Apollo 12号の月面磁力計と Explorer 35号の月周回磁力計が同時に観測を実施することにより, 月の電磁応答が調べられた. 近月点高度 764 km, 遠月点高度 7886 km, 約 11 時間で月を周回する Explorer 35号の磁力計によって, 入力としての惑星間磁場を計測し, Apollo 12号の月面磁力計で出力としての応答磁場を計測した. しかしながら, Explorer 35号の磁力計は, 0.2 nT という測定精度において高周波側で 40 mHz までしか観測することができなかったため, 月浅部の電気伝導度を精度良く求めるために必要なデータが欠けている (第2図). したがって, 第1図に見られるように, 月浅部の電気伝導度はあまりよく決められていない.

一方, 月深部の電気伝導度構造を推定するためには, より長周期でより大きい磁場変化の入力が必要となる. Apollo 12号と Explorer 35号による長周期の磁場変動成分を励起源とする観測では, 約 4 ヶ月間に 10 回の観測が行われ, そのデータに基づいて深部電気伝導度構造が推定された. しかしながら, 月中心からコア半径とも考えられる半径約 400 km まで, 電気伝導度分布には 2 桁以上の不確定性がある (第1図). Lunar Prospector の磁力計による観測では, 月が地球磁気圏尾部において磁気中性面を横切ったときに生じる誘導磁場から月の金属

核の大きさが 340 ± 90 km と見積もられた (Hood *et al.*, 1999). ただし, 1998 年 4 月の一度だけの観測結果に基づいている. 同様の観測は, 「かぐや」 (SELENE) でも試みられているが, 月・地球・太陽の位置関係とそのときの軌道面の角度という点において, 好条件となる機会は少ない.



第 2 図. 月面における伝達関数 A_i ($i = x, y, z$) の周波数依存性 (Sonett *et al.*, 1971). $A_i(f) = \{B_i^{(e)}(f) + B_i^{(i)}(f)\}/B_i^{(e)}(f)$, ここで $B_i^{(e)}$ が外部起源の磁場 (inducing field) そして $B_i^{(i)}$ が内部起源の磁場 (induced field) に対応する.

Fig. 2. Frequency dependence of the transfer function, A_i ($i = x, y, z$), at the lunar surface (Sonett *et al.*, 1971). $A_i(f) = \{B_i^{(e)}(f) + B_i^{(i)}(f)\}/B_i^{(e)}(f)$, where $B_i^{(e)}(f)$ and $B_i^{(i)}(f)$ correspond to the inducing and the induced fields, respectively.

3. 月面における電磁場観測

このように, 月の浅部および深部に対して推定された電気伝導度には 2 桁以上の不確実性がある. したがって, 月の起源の理解に向けて, 電気伝導度構造から温度を精度よく推定することは難しい. そこで, SELENE-2 ミッションにおいて, MT 法 (Magneto-telluric 法) に基づき, これまでよりも高い 10 Hz 程度までの周波数の電磁場を観測することを提案する. 月面においてこのような電磁探査を実施することにより, 月地下浅部の電気伝導度構造をより高い精度で推定することができる. 浅部の構造を精度良く決めることは, より深部の構造を精度良く決めるために必要である. また, 月を周回するリレー衛星に搭載する磁力計を利用して, 惑星間磁場のステップ状の時間変化に応答した過渡磁場を観測することにより, 月浅部からより深部にかけての電気伝導度構造を推定することを提案する. 月のコアの大きさに制約を与えることができれば, 月の起源および月の熱史に対する重要な情報を提供することができる. 月震観測によって, 月のコアに対応する月最深部の境界を制約条件とすることができれば, つまり, コア半径を固定できれば, より高い精度でコアの電気伝導度を推定できる. 月中心部の電気伝導度はコアにどれだけの鉄が含まれるかの情報になると考えられる.

SELENE-2 の着陸機が月の海に着陸する場合, 「かぐや」 (SELENE) の月レーダサウンダー (Lunar Radar Sounder: LRS) による結果 (Ono *et al.*, 2009) とは独立に, 着陸地点における月の海の下部構造を推定することができる. 極域などの地下に氷が存在すれば, 電気伝導度としてその存在を推定することが可能になるかもしれない. 一方, 着陸地点が強い磁気異常地域の場合 (例えば, Kurata *et al.*, 2005; Toyoshima *et al.*, 2008; Purucker, 2008), いわゆるミニ磁気圏 (例えば, Kurata *et al.*, 2005) が形成されることが予想される. したがって, 太陽風中の昼間であっても, 太陽風中のイオンや電子というプラズマの影響が非常に小さい環境となることが期待される. この場合, 月表面外部の空間の電気伝導度を 0 とすることがよい近似とな

りうる。このように、解析に有利であると同時に、他の各機器にとっても電磁環境として良いかもしれない。

Hiroshima (2000) によれば、磁力計を適切な月面位置に3点以上設置すれば、月周回衛星における磁場観測をしなくても、inducing field と induced field との分離が可能になる。また、磁力計を適切な位置に5点以上設置することにより、標準偏差として0.1 nT のノイズを与えた場合とその1/3のノイズを与えた場合とで、インバージョンによって推定される電気伝導度構造に本質的な差がなくなる。つまり、ノイズの影響を減らすことができる。このような点において、月面において多点観測を実施することは、より良い結果を得るために重要であると言える。

また、月では地球上のように人工的な電磁場ノイズは極めて少ないと予想される。したがって、TEM法 (Transient Electromagnetic 法) に基づいて、入力となる電磁場源を人為的に与え、電磁場の過渡応答を測定することにより、月浅部の電気伝導度構造を効果的に決めることができると期待される。このような観測は、過去、月面で実施されたことはない。

4. 月面における電磁場観測の課題

地球上で自然電位を計測する場合、金属電極を大地に直接接地すると、金属電極と接地付近の土壤に含まれている化学成分および水との間の電気化学作用により、電極と大地との間に電位差が生じ、自然電位差を測定することができない。また、接地状況の変化で、ドリフトやノイズが大きくなることが知られている。そのため、非分極電極が使用される。しかしながら、月面では非分極電極を使用することができない。金属電極を使用したとしても、月面では接地抵抗を小さくすることが困難であると予想される。したがって、電位を計測するために、入力インピーダンスを非常に大きくする必要がある。このような困難を克服するために容量性電極の使用を検討している。

長周期電磁場変動の観測機会を増やすためには、長期間の観測が必要となる。しかしながら、月の昼夜はそれぞれ約15日間続く。そのため、アポロ17号の着陸地点では、最低温度約85 K、最高温度約375 Kであり、観測機器を含む機器が過酷な温度環境に耐えなければならない。そのため、熱的にミッションを成立させるためのモジュールとして、断熱コンパートメントが検討されている。昼間は熱を排出することにより、そして夜間は月レゴリスの蓄熱効果を利用することにより、機器の温度条件を緩和する。

「かぐや」では衛星本体から進展しているマスト (長さ約12 m) の先端に磁力計センサが取り付けられている。さらに、電磁適合性 (Electro-Magnetic Compatibility) 対策を施すことにより、衛星本体の磁性体や電流による磁場がセンサ位置においてノイズレベル以下に抑えられている (中澤ほか, 2008)。SELENE-2では電磁探査を実施するので、時間的に変化する電磁場が解析対象となる。したがって、磁場変化に対する分解能の許す限り、オフセットとしてのDC磁場はあってもよい。一方、AC磁場に対しては「かぐや」の場合と同様に、適切なEMC対策が必要となる。

断熱コンパートメントからのデータ送信レートには上限がある。したがって、観測した電磁場すべてを地球へ送信することは困難である。そのために何らかの工夫を必要とする。AD変換されたすべてのビットを送信するのではなく、変動部分のみのビットを送信すればデータ量を減らすことができる。また、磁場の時間変化が大きい時間帯のみを送信するなどの対策が必要となる。

5. まとめ

月面において電磁探査を実施するための電磁場観測にするために、

SELENE-2では着陸機による月面での観測が実施されること、月の起源を解明するためには、月の電気伝導度構造が重要な要素となっているにもかかわらず不確実性が多いこと、そして月面において電磁探査を実施することにより、これまでよりも高い精度で月内部の電気伝導度構造を推定できるであろう、ということ述べてきた。まだ課題も残っているので、

SELENE-2 計画において月電磁探査を成功させるために開発・対策をする必要がある。

地球上でも電磁探査などで資源探査が行われているように、SELENE-2 ミッションで月面において電磁場探査を実施することにより、月における資源探査の基礎を築き上げることができるであろう。また、月面における磁場環境は、各種の機器、将来的な月面基地の管理・運用において基本的なデータであり、将来の月利用を実現する上で必要な情報となるであろう。

参考文献

- Dyal, P., C. W. Parkin, and W. D. Daily, Structure of the lunar interior from magnetic field measurements, *Proc. Lunar Sci. Conf.* 7th, 3077-3095, 1976.
- Hiroshima, T., Feasibility study on the electrical conductivity survey of the lunar interior in the SELENE-2 project, Sc. M. Thesis, 85 pp., Tokyo Institute of Technology, 2000.
- Hood, L. L., F. Herbert, and C. P. Sonett, The deep lunar electrical conductivity profile: structural and thermal inferences, *J. Geophys. Res.*, **87**, 5311–5326, 1982.
- Hood, L. L., D. L. Mitchell, R. P. Lin, M. H. Acuna, and A. B. Binder, Initial measurements of the lunar induced magnetic dipole moment using Lunar Prospector magnetometer data, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2327–2330, 1999.
- Keihm, S. and M. G. Langseth, Lunar thermal regime to 300 km, *Proc. Lunar Sci. Conf.* 8th, 499–514, 1977.
- Kurata, M., H. Tsunakawa, Y. Saito, H. Shibuya, M. Matsushima, and H. Shimizu, Mini-magnetosphere over the Reiner Gamma magnetic anomaly region on the Moon, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L24205, doi:10.1029/2005GL024097, 2005.
- Nakamura, Y., Seismic velocity structure of the lunar mantle, *J. Geophys. Res.*, **88**, 677–686, 1983.
- Nakamura, Y., G. V. Latham, and H. J. Dorman, Apollo lunar seismic experiment — Final summary, *J. Geophys. Res.*, **87**, A117–A123, 1982.
- 中澤 暁, 飯島祐一, 綱川秀夫, 松島政貴, 小野高幸, 熊本篤志, 笠原禎也, 池上真悟, 石川知明, 月周回衛星「かぐや」の電磁適合性 (EMC) 対策, *日本航空宇宙学会誌*, **56**, 329–335, 2008.
- Ono, T., A. Kumamoto, H. Nakagawa, Y. Yamaguchi, S. Oshigami, A. Yamaji, T. Kobayashi, Y. Kasahara, and H. Oya, Lunar Radar Sounder observations of subsurface layers under the nearside maria of the Moon, *Science*, **323**, 909–912, 2009.
- Purucker, M. E., A global model of the internal magnetic field of the Moon based on Lunar Prospector magnetometer observations, *Icarus*, **197**, 19–23, 2008.
- Sonett, C. P., G. Schubert, B. F. Smith, K. Schwarts, and D. S. Colburn, Lunar electrical conductivity from Apollo 12 magnetometer measurements: Compositional and thermal inferences, *Proc. Lunar Sci. Conf.* 2nd, 2415–2431, 1971.
- Toyoshima, M., H. Shibuya, M. Matsushima, H. Shimizu, and H. Tsunakawa, Equivalent source mapping of the lunar crustal magnetic field using ABIC, *Earth Planets Space*, **60**, 365–373, 2008.
- Tsunakawa, H., H. Shibuya, F. Takahashi, H. Shimizu, M. Matsushima, Y. Saito, S. Yokota, K. Asamura, A. Matsuoka, M. N. Nishino, T. Tanaka, T. Nagai, T. Terasawa, T. I. Yamamoto, M. Fujimoto, T. Mukai, S. Nakazawa, H. Otake, and Y. Iijima, Initial global mapping of the lunar magnetic anomaly by MAP-LMAG on SELENE (Kaguya): Implication for the lunar crustal magnetism, American Geophysical Union Fall Meeting, 2008.