

平成 23 年度 VLBI 懇談会シンポジウム集録

月着陸探査計画 SELENE-2/VLBI 電波源の検討状況報告

菊池冬彦¹, 松本晃治¹, 岩田隆浩², 鶴田誠逸¹, 浅利一善¹, 花田英夫¹, 河野 裕介³,
鎌田俊一⁴, 石原吉明¹, ホーセンス・サンダー⁵, 佐々木晶¹ SELENE-2/VLBI 検討チーム

1: 国立天文台 RISE 月探査プロジェクト, 2: 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, 3: 国立天文台水沢 VLBI 観測所,
4: 東京大学, 5: メリーランド大学

1. 背景

内部構造は月や惑星の起源・進化を考える上で非常に重要な情報である。特に月の場合、1000km より深い構造に関する現状の不確定性は非常に大きく、将来探査でコアの有無・サイズ・組成などのパラメータを知ることは意義深い。例えば、月のコアのサイズは、巨大衝突モデルにおける衝突体の鉄の含有量などのパラメータに制約を与え、コアの物理状態（流体 or 固体）は、コアの組成、温度、熱史に制約を与える。また、鉄のコアの形成はマンツルの組成に対しても顕著な影響を与える。

天体の内部構造を拘束し得る観測として、重力・地形・回轉變動などの測地学的な観測が挙げられる。月探査計画「かぐや」においても重力、地形観測が実施された。しかしながら、月のコアに感度をもつ重力場の低次項や 2 次のポテンシャル潮汐ラブ数 k_2 に関しては、コアのパラメータを制約するためには精度が不十分であった。

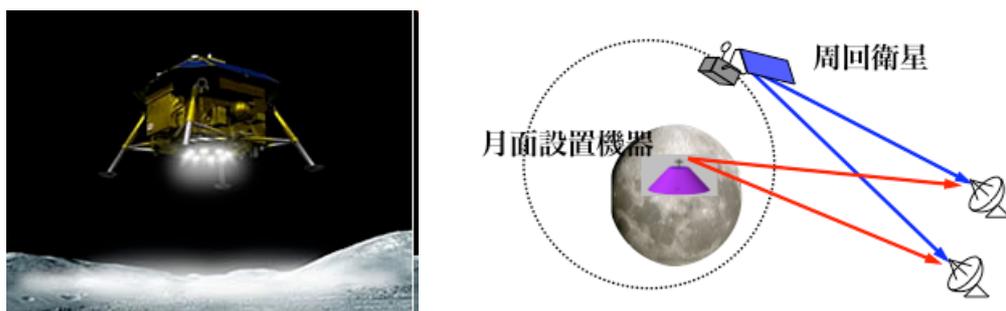


図 1. SELENE-2 の月着陸機 (左: 画像 JAXA)、SELENE-2 の VLBI 観測 (右)

2. 次期月着陸探査計画 SELENE-2 へのミッション提案

我々は重力場の低次項や k_2 の高精度化を目標とし、次期月着陸探査計画 SELENE-2 へ月重力場計測を提案している (図 1)。月周回衛星ならびに月面設置ユニット (着陸機または小型サバイバルモジュール) に S/X 帯の電波源を搭載し、「かぐや」の VRAD ミッションにおいても実施された多周波数 VLBI 法

と同一ビーム VLBI 法を用いた相対位相遅延計測を行う。同一ビーム VLBI 法では地球大気ゆらぎや電離層変動、地上 VLBI 局間の時刻系のオフセットなどのほとんどを2機の周回衛星間でキャンセルすることができる(Kikuchi et al., 2009)。また、多周波数 VLBI 法では S 帯 3 波、X 帯 1 波の搬送波信号を用いて相対位相遅延を S 帯 3.4 ps、X 帯 1 ps 以下の精度で計測する(Kono et al., 2003)。

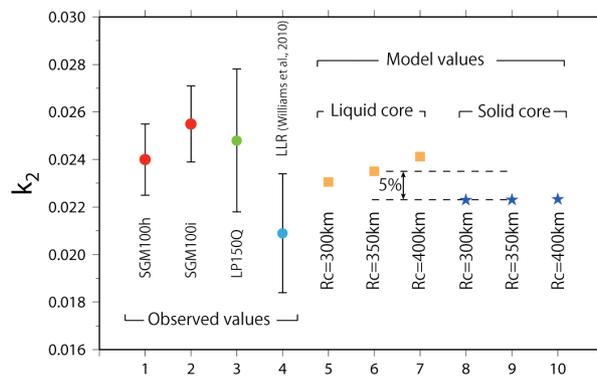


図 2. 月の核のサイズ、状態に対する k_2 の依存性

3. 月のコアの状態判別

コアが流体か固体かによって k_2 がどの程度変化するか、また その差がコア半径 (R_c) にどのように依存するかをモデル計算によって調べた。コアが固体の場合、 k_2 の値は核のサイズにほとんど依存しないが、流体の場合はそのサイズに応じて k_2 の値も大きくなる (図 2)。コアの状態 (流体 or 固体) による k_2 の差の 0.5×0.7 倍を状態識別に必要な k_2 の精度とすると、それらはコア半径 200km の場合 0.3%、コア半径 400km の場合 2.8%となる。「かぐや」の重力場計測とルナーレーザーレンジング観測 (LLR) から導かれる慣性モーメントの結果から、コア半径の最小値は 290km と見積もられており、月のコアの状態判別には 1%以上の精度が必要となる。現状の k_2 の推定精度ではコアの状態判別は困難である。

4. 期待される k_2 の推定精度

図 3 に計算機シミュレーションから求めた SELENE-2 における k_2 の予測推定誤差を示す。図中の i は月周回衛星の軌道傾斜角であり、極軌道 ($i=90$ 度) に近い程、誤差が減少する。 $i=90$ 度の場合には、S 帯の相対位相遅延計測を 3 ヶ月実施することにより、目標とする誤差 1%以下を達成できる。一方、 $i=60$ 度の場合には最も誤差が大きくなり S 帯 6 ヶ月、または X 帯 3 ヶ月以上の観測により目標を達成できる見通しである。

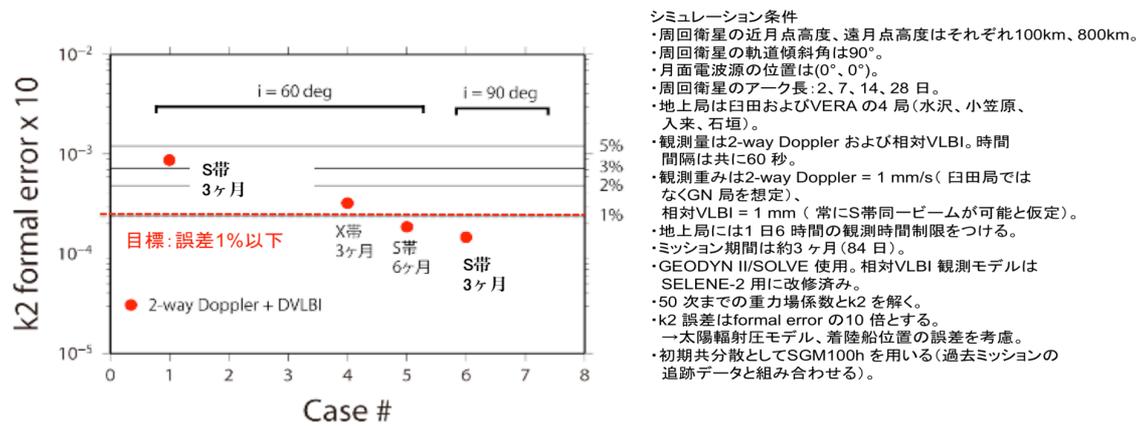


図 3. SELENE-2 における k2 の推定誤差とシミュレーション条件

5. 開発課題

主な開発課題として、月面設置ユニットに搭載するアルミナ基板を用いたパッチアンテナの概念設計と電気特性解析(計算機シミュレーション)を実施した。要求される性能は月面温度環境下(-200°C~+120°C)において、ビーム幅+/-60度以上の範囲で利得が-5dBi以上である。解析の結果、性能維持温度範囲が月面温度環境よりも狭く、X帯が-200°C~+80°C、S帯が-80°Cから+80°Cという結果が得られた。また、S帯アンテナの帯域幅が+/-3MHzと狭く、周波数が最大75MHz離れたS帯3波を送信するためには2ないし3個のアンテナが必要となった。主な原因は基板の比誘電率の温度変化であり、高温、低温状態でのアンテナ利得の低下、VSWRの増加が予想された。これらの課題に対処すべく今後は下記の検討を実施予定である。

- ・成形ビーム方式によるビーム幅の広角化
- ・アルミナ基板の比誘電率の実測
- ・アンテナの熱制御
- ・ジンバル等によるアンテナの指向制御
- ・基板の新素材の検討

6. 参考文献

1. F. Kikuchi, et al., Pico-second Accuracy VLBI of the Two Sub-satellites of SELENE (KAGUYA) using Multi-Frequency and Same Beam Methods, Radio Science, 44, doi:10.1029/2008RS003997.2009
2. Kono et al., "Precise positioning of spacecrafts by multi-frequency VLBI", Earth Planets Space, Vol.55, pp.581-589, 2003.