

## 平成 24 年度 VLBI 懇談会シンポジウム集録

### 月着陸探査計画 SELENE-2/VLBI 電波源の開発状況

菊池冬彦<sup>1</sup>, 松本晃治<sup>1</sup>, 岩田隆浩<sup>2</sup>, 鶴田誠逸<sup>1</sup>, 浅利一善<sup>1</sup>, 花田英夫<sup>1</sup>, 河野 裕介<sup>3</sup>,  
鎌田俊一<sup>4</sup>, ホーセンス・サンダー<sup>5</sup>, 佐々木晶<sup>1</sup> 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

我々は、月着陸探査計画 SELENE-2 において VLBI 電波源というミッションを提案している。ミッションの目的は、月の内部構造を推定し、月の起源と進化について新たな知見を得ることである。そのために、月周回衛星と月面設置機器上に VLBI 観測用の電波源を搭載し、SELENE の VRAD ミッションで実績のある相対 VLBI 観測という手法を用いて月面設置機器を基準とした月周回衛星の高精度軌道決定を行い、低次月重力場係数とポテンシャル潮汐ラブ数  $k_2$  を推定する。月の回轉變動計測から推定される月の力学的扁平率と低次月重力場係数を組み合わせることで月の慣性モーメント (MOI) が推定される。この MOI と  $k_2$  は月内部の密度構造や剛性率から決まるため、MOI や  $k_2$  を観測量として逆問題を解くことで月の内部構造を推定することができる。我々が特に重要と考えるのは月のコア（核）の状態、半径、密度、組成である。これらの推定精度を改善することで、月の形成理論とその後の熱的な進化過程についてより詳細かつ具体的な研究が可能となる。

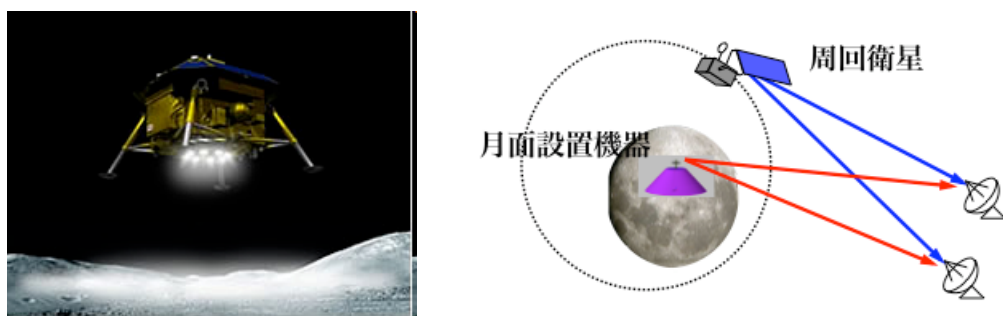


図 1. SELENE-2 の月着陸機（左：画像 JAXA）と、相対 VLBI 観測（右）

#### 2. 検討状況

科学目標関連では、SELENE-2 において月内部構造（コアのパラメータ）の推定精度をどれだけ改善することができるかを定量的に示すための計算機シミュレーションを実施した。この内容については 3 章にて詳しく述べる。機器開発

関連では、月面上での厳しい温度環境下（ $-200^{\circ}\text{C}$ から $+120^{\circ}\text{C}$ ）で使用可能な月面設置機器搭載用アンテナについて検討を行った。耐熱性に優れるマコール（セラミックの一種）をアンテナ基板とするパッチアンテナについて概念設計を行った。また、計算機による電気特性解析を実施し、 $-200^{\circ}\text{C}$ から $+120^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において、利得、ビーム幅、比帯域など要求仕様をすべて満たすことを確認した。現在、アンテナの評価モデル（BBM）の詳細設計を行っており、来年度には BBM を製作し、月面温度環境下での電気特性計測を予定している。この他、搭載機器の省電力化の検討、相対 VLBI 観測の運用方法の見直し、VERA 局 S/X 帯の 2beam 化に関する検討（科研費基盤 A）を行っている。

### 3. SELENE-2 における月内部構造の推定

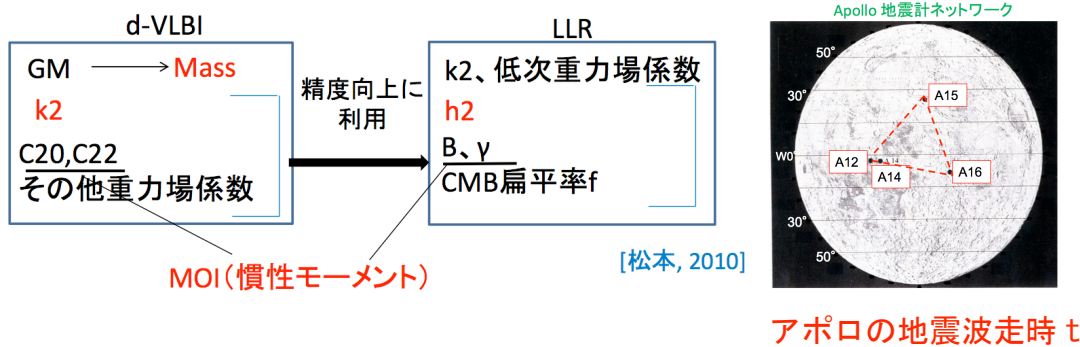


図 2. 月内部構造の推定に用いる地球物理学的な観測量

VLBI 電波源や回転変動計測（LLR）、月震計測などで計測される地球物理学的な観測量（図 2 中の赤字）は、月の内部構造を表すパラメータ（地殻の厚さ、密度、剛性率、マントルの密度、剛性率、コアの厚さ、密度）の関数として表すことができる。そこで、SELENE-2 で期待される内部構造の推定精度を定量的に評価するため、計算機シミュレーションによる逆問題解析を行った。パラメータの推定は、マルコフ連鎖モンテカルロ法によるベイズ推定により行った。各観測量について、SELENE の場合（現状）と SELENE-2 で期待される精度を下記に示す。

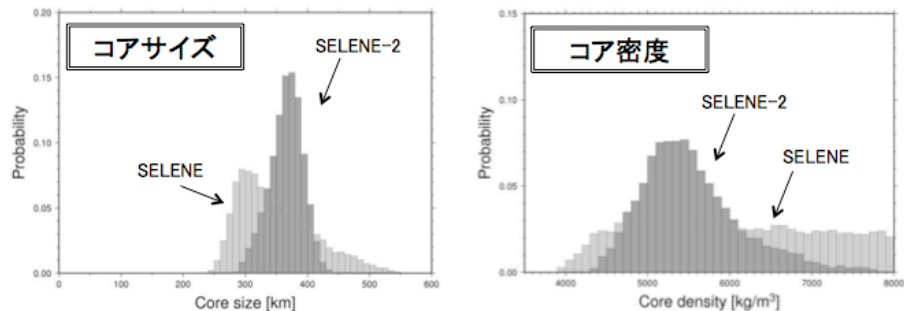
観測量の誤差 (SELENE の場合)	観測量の誤差 (SELENE-2 の場合)
$\Delta h_2: \pm 0.008$	$\Delta h_2: \pm 0.00267 \rightarrow \text{約 } 1/3$
$\Delta k_2: \pm 0.0015$	$\Delta k_2: \pm 0.0002 \rightarrow \text{約 } 1/10$
$\Delta MOI: \pm 1.2E - 4$	$\Delta MOI: \pm 3.5E - 5 \rightarrow \text{約 } 1/3$
$\Delta Mass: \pm 1.1E + 19$	$\Delta Mass: \pm 1.1E + 19 \rightarrow \text{ほぼ同じ}$

リファレンスとなる内部構造は地殻、マントル、コアそれぞれ 1 層の 3 層とし、内部構造パラメータの真値は最新のモデルのひとつである Garcia et al. (2011) の VPREMOMON を参考に設定した（表 1）。

表 1. 真のモデルの内部構造パラメータ

	厚さ $r$ (km)	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	shear modulus $\mu$ (GPa)	bulk modulus $\kappa$ (GPa)
地殻	28	2762	17.96	28.32
マントル	1329	3391	69.62	122.09
コア	380	5171	0	129.28

推定結果を図 3 に示す。SELENE の場合、コアのサイズ、密度の推定誤差は約 30% であるのに対して、SELENE-2 の場合では、サイズを約 5%、密度を約 6% の精度で推定可能である。コアの状態や組成を決定するためにはサイズ、密度ともに 10% 以下の精度が必要であることから、SELENE-2 は月内部構造推定において十分に効果的であることが示された。今後は、内部構造モデルの層数を増やした場合の推定精度への影響を調べるなど、より現実に近いモデル、条件のもとで評価を行う。また SELENE-2 で提案されている月震計測、電磁場計測、熱流量計測などの観測データを加えることにより推定精度の向上が期待されることから、これらを追加した場合についても評価を行う。



#### 推定結果

- (1) Apollo 走時 + SELENE    コアサイズ: 31.52(%)    コア密度 : 29.92(%)
- (2) Apollo 走時 + SELENE-2    コアサイズ: 5.19(%)    コア密度 : 6.23(%)

図 3. 計算機シミュレーションによる月内部構造の推定結果。