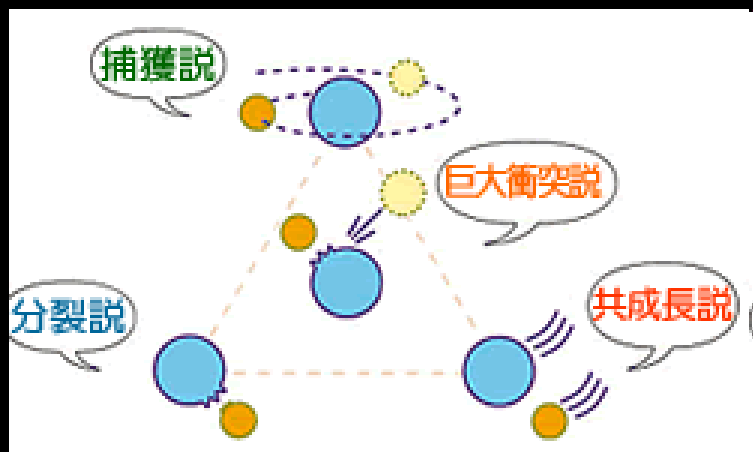


# 月着陸探査計画SELENE-2における VLBI技術を用いた月重力場計測



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>, 花田英夫<sup>1</sup>,  
河野 裕介<sup>3</sup>, 鎌田俊一<sup>4</sup>,  
石原吉明<sup>1</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

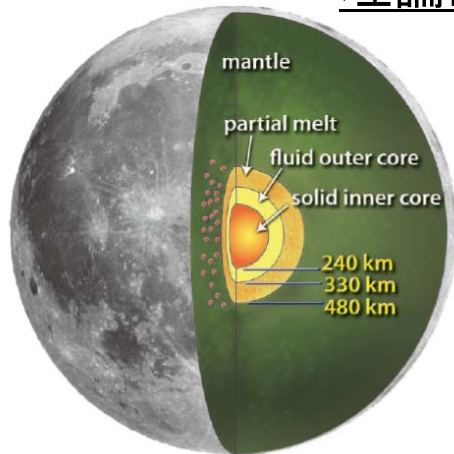
## 月の起源： 巨大衝突説

- 火星サイズの天体が原始地球に衝突
- マグマ大洋の形成
- 金属(Feなど)の沈降&コアの形成
- 斜長岩の浮上&地殻の形成

衝突体のサイズや組成、マグマ大洋の深度など未だ多くの謎が残されている

Image: NASA/JPL-Caltech.

## 理論的研究において制約条件となる内部構造の精度が不十分



Lunar internal structure model  
by Weber et al. (2011)

地殻：密度 $2700-3000\text{kg/m}^3$ 、厚さ $33-76\text{km}$

マントル：密度 $3300-3420\text{kg/m}^3$

コア：密度 $5300-8100\text{kg/m}^3$ 、厚さ $290-450\text{km}$

コアの有無？

月形成初期の温度

コアの状態(流体/固体)

Khan et al.,2000, Hikida and Mizutani, 2005, など

# 測地データと内部構造

質量M

$$M = GM/G \quad \text{人工衛星追跡}$$

$$M = 4\pi \int \rho(r)r^2 dr$$

密度構造を制約

慣性モーメントMOI

$$MOI = I/MR^2$$

$$I = \frac{A+B+C}{3} = \frac{8\pi}{3} \int \rho(r)r^4 dr$$

$$C_{20}、C_{22} \quad \text{人工衛星追跡}$$

$$\beta=(C-A)/B、\gamma=(B-A)/C \quad \text{LLR}$$

慣性モーメントの大きさは質量の中心への集中度を表し、核の存在への拘束条件となる。  
 MOI=0.4 内部の密度が均一。MOI<0.4 重い物質が中心に集中。

変位ラブ数h2

LLR

密度・ずれ弾性率( $\mu$ )の  
構造を制約

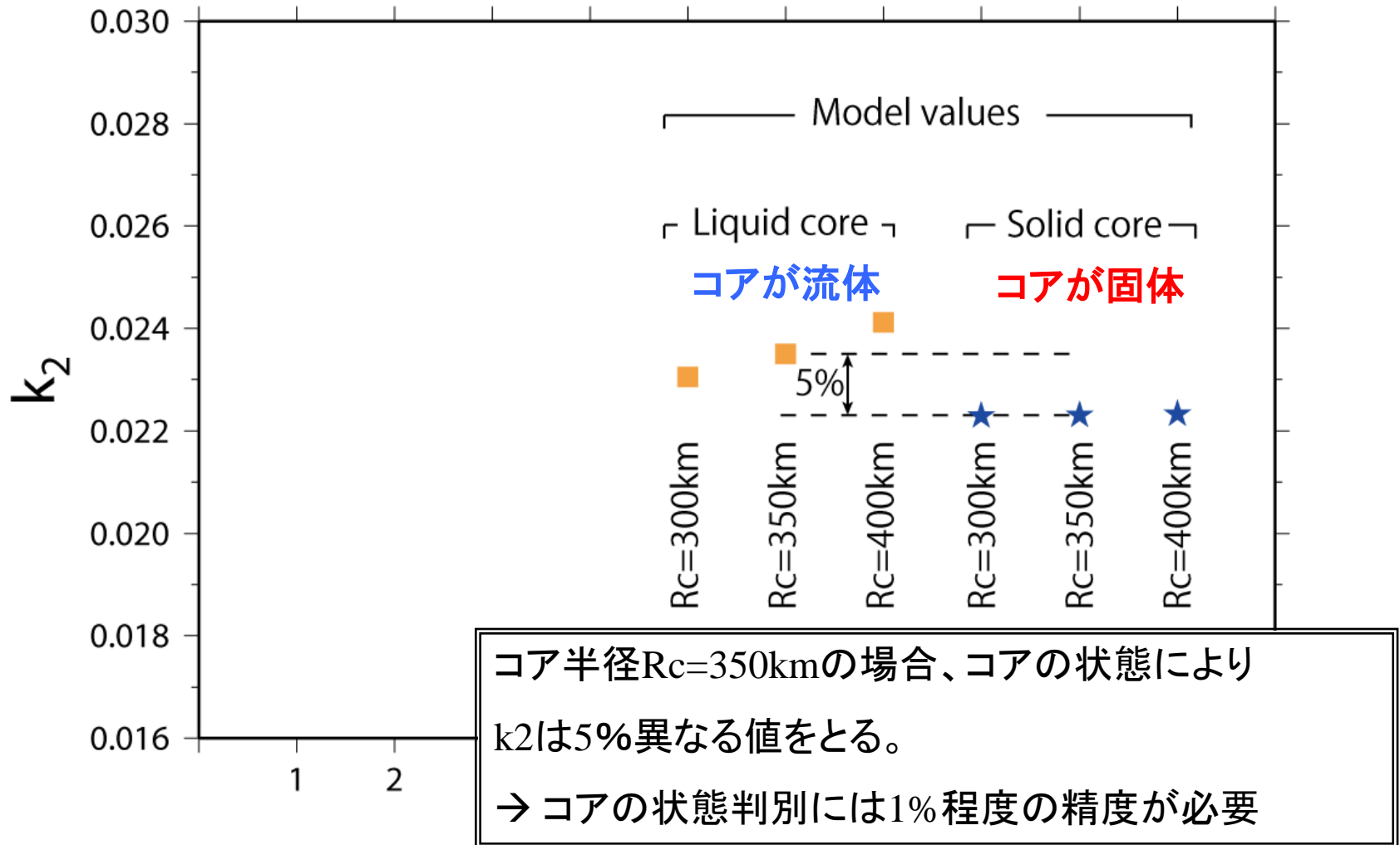
ポテンシャルラブ数k2

人工衛星追跡

LLR

潮汐力に対する天体の応答は内部構造、特に核の状態に依存する。流体部分を持つ天体は完全に固体の天体に比べて変形しやすいので、潮汐力に対する応答も大きい。部分熔融層の存在もラブ数の値を大きくする。

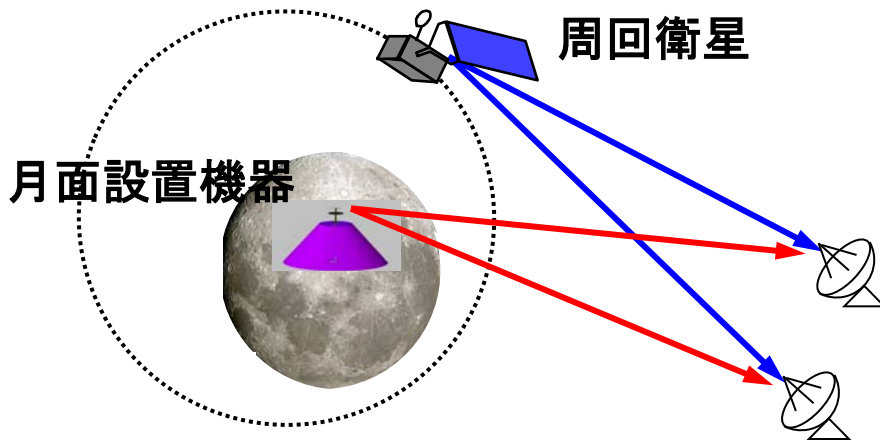
# 例) コアの状態(流体/固体)、サイズに対する $k_2$ の依存性



Uncertainties of the satellite results are 10 times the formal error.

# Selene-2 :次期月着陸探査計画

- 打ち上げ:2010年代中頃
- 構成:着陸機、周回衛星、月面越夜ユニット
- 着陸地点:表側 低中緯度  
(緯度±60度以下、経度±80度以下)
- 観測期間:2.5ヶ月以上(2度の越夜)



## 相対VLBI

周回衛星とサバイバルモジュールにVLBI用電波源を搭載し、S/X帯の電波信号を地上のVLBI局へ送信する。

### →同一ビームVLBI法の適用

2つの電波源を同時に観測し、大気遅延、電離層遅延を除去し、通常のVLBIに比べて一桁以上高精度に遅延時間を求める。

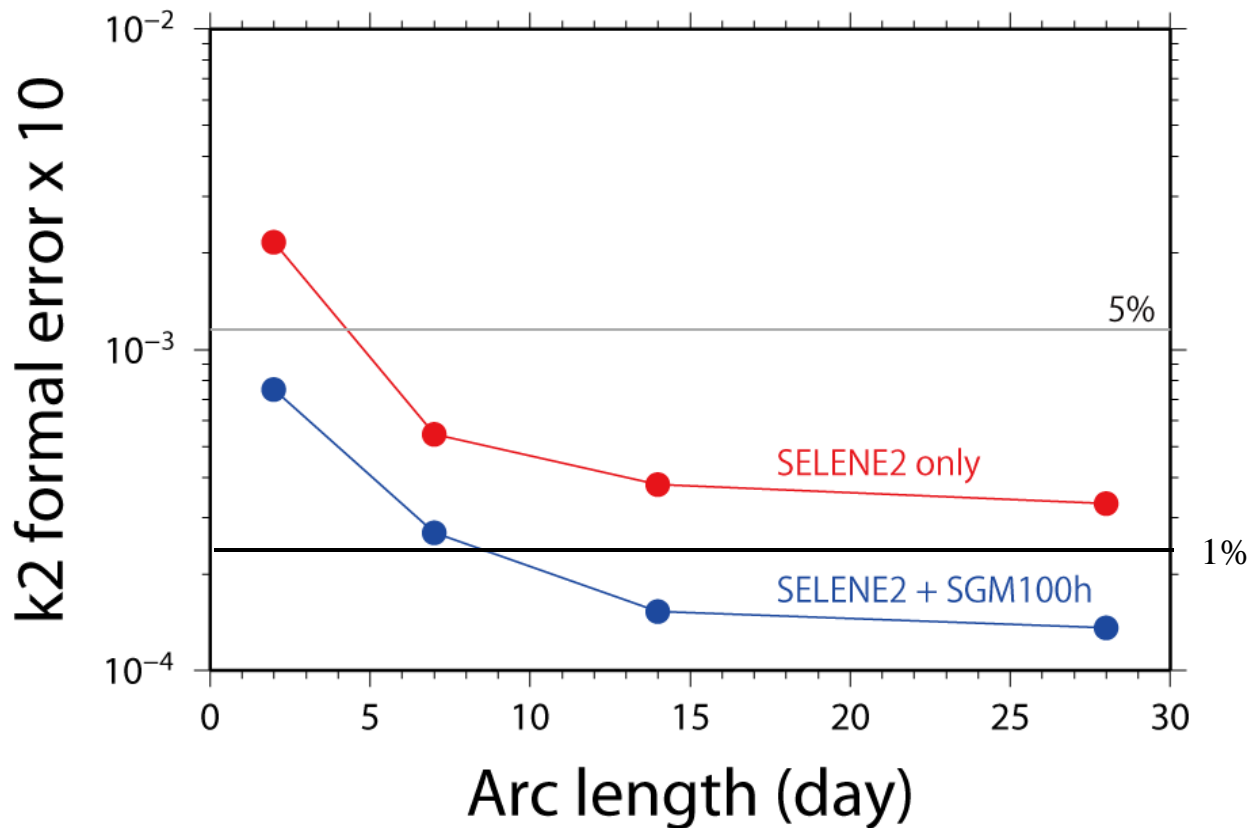
### →多周波数VLBI法の適用

S帯3波、X帯1波の信号を用い、位相遅延を推定する。一般的な群遅延に対して二桁近く精度が良い。

Doubly Differenced One-way Rangeの目標精度1mm

電波源の一方が月固定であること、電波源間の離角が小さくほぼすべての観測時間で同一ビーム法を適用できる点がSELENE/VRADとの違いであり、SELENE-2のメリット。

# Result of numerical simulation k2 uncertainty vs arc length



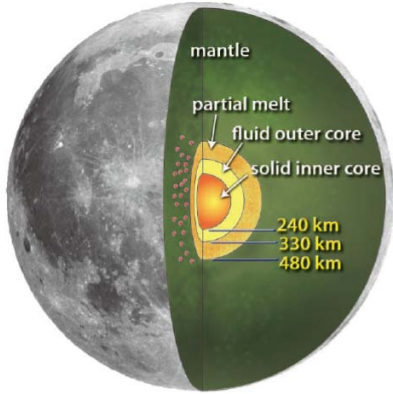
Orbit: 100km x 800km, Inclination: 90 deg, Lander coordinates (0 deg, 0 deg),  
Ground stations operated 6 hours/day, Mission duration: 3 months

1% of k2 accuracy can be achieved by SELENE-2 VLBI mission.

# 月内部構造の制約

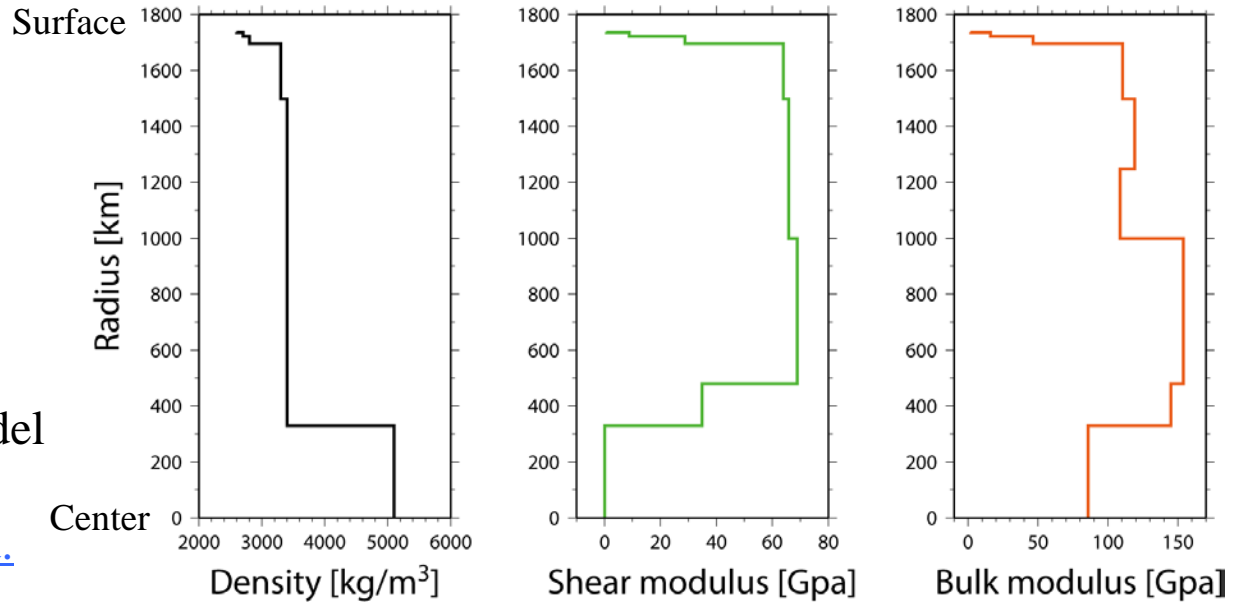
科学目標の達成見込みに関する検討

# How sensitive are the geodetic measurements to core parameters?



Lunar internal structure model  
by Weber et al. (2011)

Solid inner core is omitted.



Truth values : Mass =  $7.3310 \times 10^{22}$  [kg], MOI = 0.39393,  $h_2 = 0.04086$ ,  $k_2 = 0.02342$

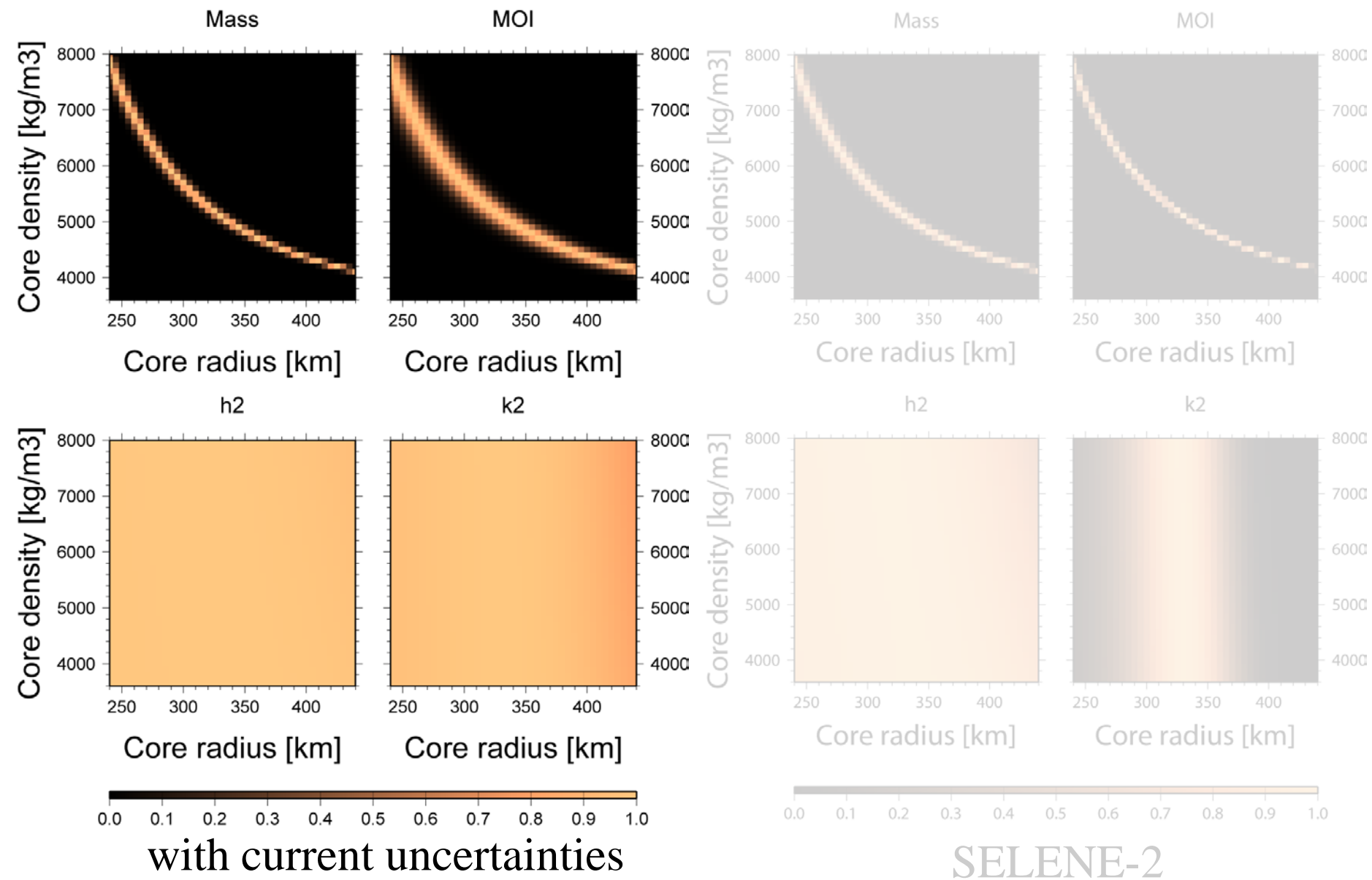
Likelihood function 
$$L(m) = \prod_j \exp \left\{ - \frac{[d_{obs}^j - d_{cal}^j(m)]^2}{2\sigma_j^2} \right\}$$

Evaluate the likelihood function for various model.



# Likelihood function

Test for various core radii and densities.



ただし...k2は他のパラメータにも感度を持つ

地殻の密度、厚さ、マンツルの密度  
マンツル下部の部分溶融層の有無  
(厚さ、剛性率)

SELENE-2

Core density [kg/m<sup>3</sup>]

[kg]

確率論的統合解析

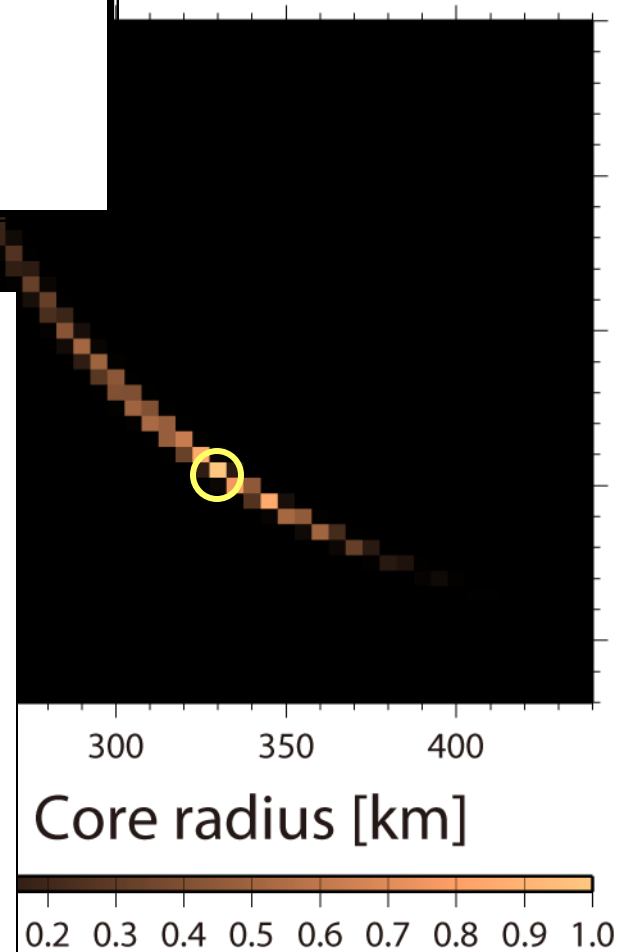
(Bayesian inversion)が必要

月震計測：月内部速度構造

回転計測 (LLR)：コアの状態

磁場計測：月内部温度構造

アポロサンプル、隕石の鉱物学的研究



The correct answer is  $R_{\text{core}} = 330 \text{ km}$ ,  $\rho_{\text{core}} = 5100 \text{ kg/m}^3$

# 機器開発状況

# 開発課題と開発状況

## -主な開発課題

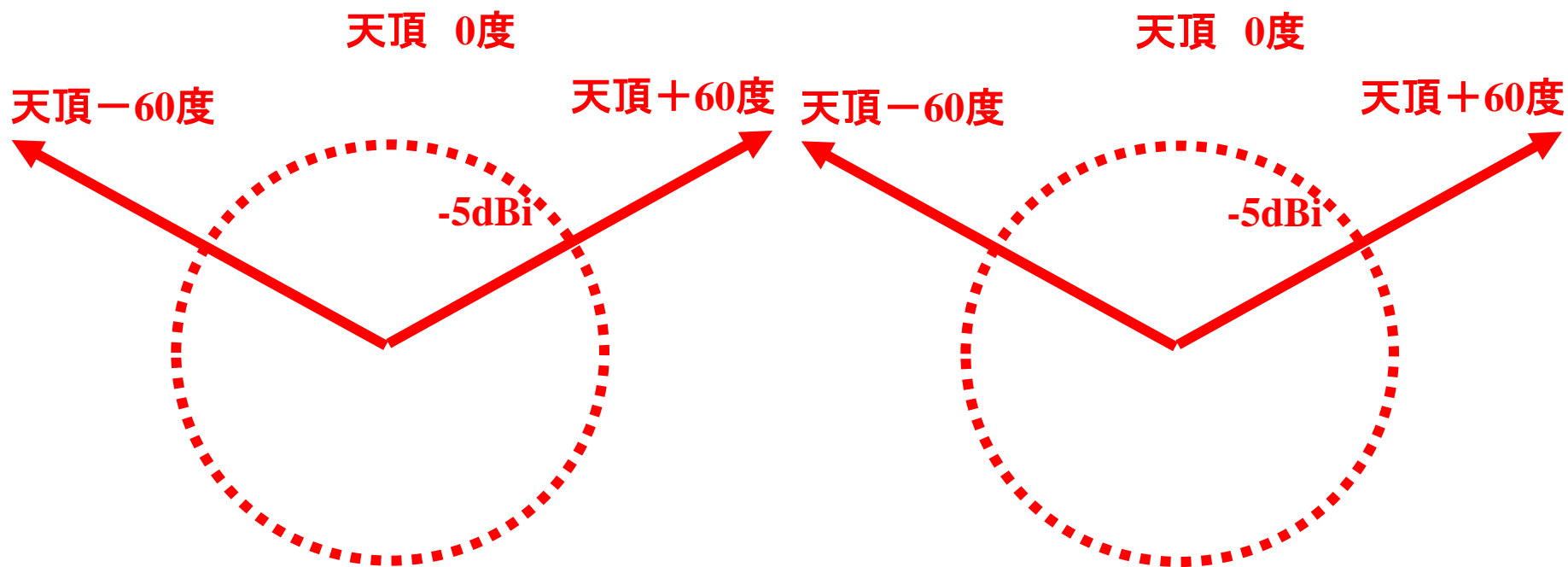
- 搭載機器の省電力化、軽量化(かぐや/VRADのリサイジング)
- 月面用耐低温アンテナの開発
- 軌道重力場解析ソフトウェアの改修

## -開発状況 一月面用耐低温アンテナの開発-

- 要求性能
  - 月面温度環境(-200°Cから+120°C) への耐性
  - 着陸地点の位置、傾斜等に依存しない対地球通信の確立  
(天頂±60度で-5dBi以上)
- ・アルミナ基板を用いたパッチアンテナを選定  
熱衝撃試験(常温+27°Cから低温-196°C)により、物理的強度、電気特性を計測し、題がなく、単体にて月面温度環境に耐えうることを確認。
- ・アルミナ基板を用いたパッチアンテナの概念設計

・電気特性解析(シミュレーション) —アンテナ利得の温度特性—

【目標:天頂±60度で-5dBi以上、使用温度-200°C~+90°C】



高温側+90°Cで1dBi程度の利得低下が見込まれるが許容範囲内

(注:レドームの使用により高温側の環境温度は+90°C以下に抑えられる)

図1. X帯用パッチアンテナの電気特性 (NEC,NEC東芝スペースシステム)

# アルミナ基板のパッチアンテナの問題点

- S帯パッチアンテナについては、-80°C~+80°Cの範囲でのみ性能実現
- 帯域幅が狭く(6MHz程度)、S帯3波 ( 2212, 2218, 2287 MHz)の送信にアンテナが3つ必要となる。

原因: アルミナの非誘電率の温度変化により共振周波数が変化し、送信周波数帯域での利得の低下とVSWRの低下(リターンロスの増加)を引き起こす

## 上記への対策、今後の課題

- アンテナの熱制御
- 成形ビーム方式の採用
- アンテナ新素材の検討  
周波数帯域を広くとることができると期待される新素材(macor)について、耐熱性、電気特性等の適応性を検討する。

# 開発体制

- ・(PI) 菊池 冬彦(国立天文台 RISE月探査プロジェクト)  
研究の総括、VLBIデータ解析(ソフトウェア開発を含む)、観測機器開発、月内部構造研究
- ・(Sub-PI) 松本 晃治(国立天文台 RISE月探査プロジェクト)  
研究の総括、軌道・重力場解析(ソフトウェア開発を含む)、月内部構造研究
  
- ・浅利 一善(国立天文台 RISE月探査プロジェクト) (以下、おうえお順)  
信号伝送系設計、観測機器開発
- ・石原 吉明(国立天文台 RISE月探査プロジェクト)  
運用計画、観測スケジュール作成、月内部構造研究
- ・岩田 隆浩(宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 固体惑星科学研究系)  
観測機器開発、月内部構造研究
- ・河野 裕介(国立天文台 水沢VLBI観測所)  
信号伝送系設計、観測機器開発
- ・佐々木 晶(国立天文台 RISE月探査プロジェクト)  
研究の総括、月内部構造研究
- ・鶴田 誠逸(国立天文台 RISE月探査プロジェクト)  
電力・熱解析、観測機器開発
- ・花田 英夫(国立天文台 RISE月探査プロジェクト)  
海外局との調整、観測機器開発

## 信号伝送系設計のアドバイザー

- ・竹内 央(宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 宇宙情報・エネルギー工学研究系)
- ・河野宣之(奥州市宇宙遊学館)
- ・劉 慶会(上海天文台)
- ・Goossens Sander(GSFC)

## サブシステム(保温コンパートメントの設計、開発、熱解析)

- ・田中 智(宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 固体惑星科学研究系)
- ・飯島 祐一(宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 固体惑星科学研究系)
- ・小川 和律(宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 固体惑星科学研究系)

# Conclusions

- 次期月着陸探査計画SELENE-2へVLBI技術を用いた月重力場計測を提案。
- 測地データを用いた内部構造推定の感度解析を実施し、特に $k_2$ がコアパラメータの制約に有効であることを確認した。今後、月震計、回転計測、磁場計測などのデータを用いた統合解析法について検討を進める。
- 月面用耐低温アンテナとしてアルミナ基板のパッチアンテナを選定し、月面環境にて保存可能であることを確認した。夜間(-80°C以下)の使用に関しては熱制御等の保温対策が必要であることが明らかとなった。

VLBI地上局としては、VERA4局や国内VLBIネットワークを使用させていただきたいと考えています。引き続き、ご支援、ご協力のほど、宜しくお願いいたします。