



Studies of Selenodesy and Planetodesy using Space Geodetic Methods; till and after KAGUYA

宇宙測地手法を用いた 月惑星計測研究
～「かぐや」までと、これから～

Takahiro Iwata (*ISAS/JAXA*)

岩田 隆浩 (JAXA宇宙科学研究所)

自己紹介



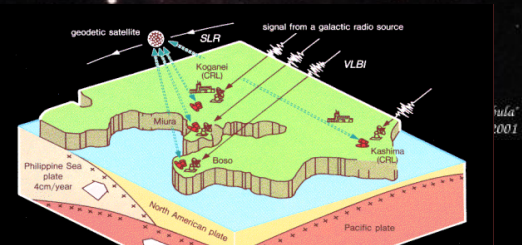
名古屋大学・理・物理A研
(学生～研究員)
4mパラボラアンテナを使った
オリオン座の「赤ちゃん星」の研究



郵政省 通信総合研究所(CRL)
鹿島宇宙通信センター
34mパラボラアンテナを使った
地球のプレート運動の研究



宇宙開発事業団(NASDA)
宇宙航空研究開発機構(JAXA)
月探査機「かぐや」を使った
月の誕生と進化の研究
(RSAT/VRAD サブPI、
おきな・おうな開発主担当)



内容

- § 1. 「かぐや」以前の月重力場探査
- § 2. 「かぐや・おきな・おうな」
- § 3. 「かぐや」後の月・火星探査

参考教科書

- 「物理測地学」, B.ホフマン-ウェレンホフ／H.モーリッツ著, シュプリンガー・ジャパン, ISBN4-431-71212-7.
- “Geodynamics”, Donald L. Turcotte and Gerald Schubert, Cambridge Univ. Press, ISBN-13: 978-0521666244.
- ウェーブサミット講座「VLBI技術」, 高橋富士信／近藤哲朗／高橋幸雄共著, オーム出版局, ISBN4-274-07852-3.
- 「現代測地学」, 日本測地学会 (1994).

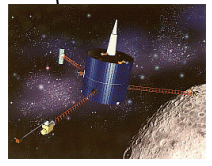
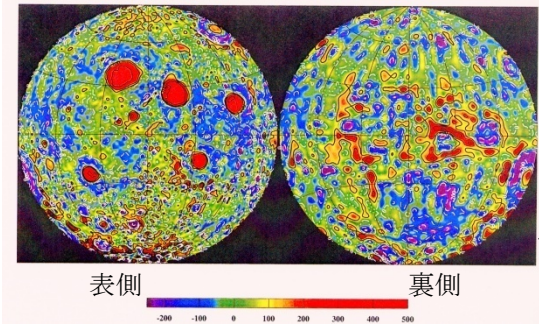
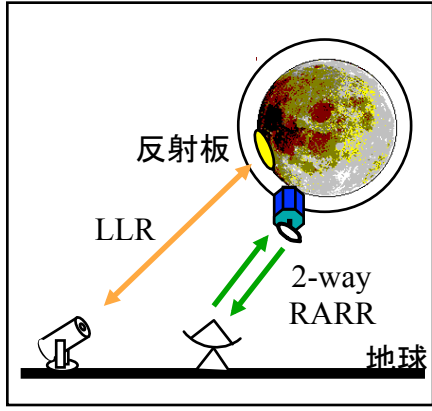
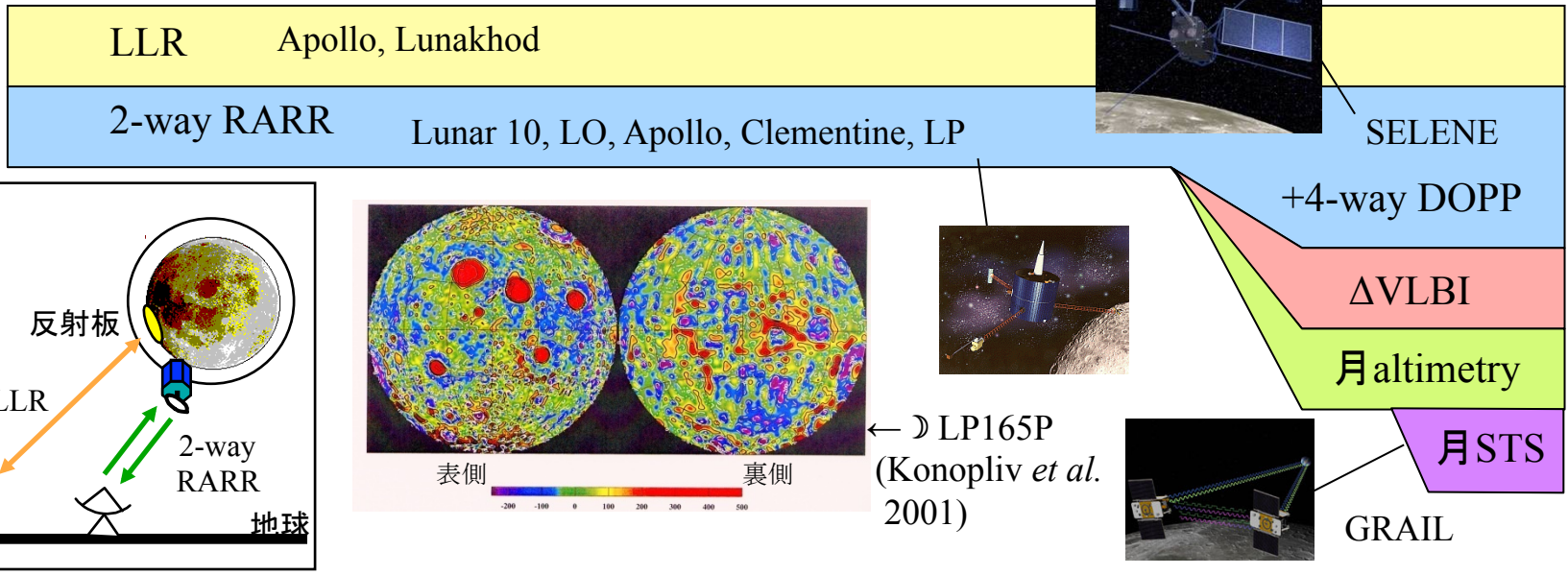
宇宙測地 (space geodesy) の計測手法

宇宙測地: 宇宙機の電波・光学航法を利用した測地観測
→ 月惑星の重力場分布、軌道・自転変動の測定に応用

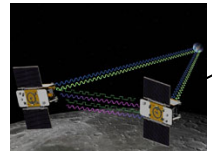
手法		特徴
RARR	Ranging and Ranging Rate 測距・距離変化率(*)計測 *) ドプラ計測	<ul style="list-style-type: none">・電波中継による測距・速度計測・視線方向に感度がある・月惑星の重力場を計測・掩蔽時に観測不可
SLR (LLR)	Satellite Laser Ranging (Lunar Laser Ranging) 衛星(月)レーザ測距	<ul style="list-style-type: none">・レーザ光反射による測距・視線方向に感度がある・月の軌道・回転変動を計測・新月、満月時に観測不可
VLBI	Very Long Baseline Interferometer 超長期線電波干渉計	<ul style="list-style-type: none">・衛星電波による測位・視線直交面方向に感度がある・月(惑星)の重力場(・回転変動)を計測

宇宙測惑星 (space planetodesy) による月惑星計測の流れ

月

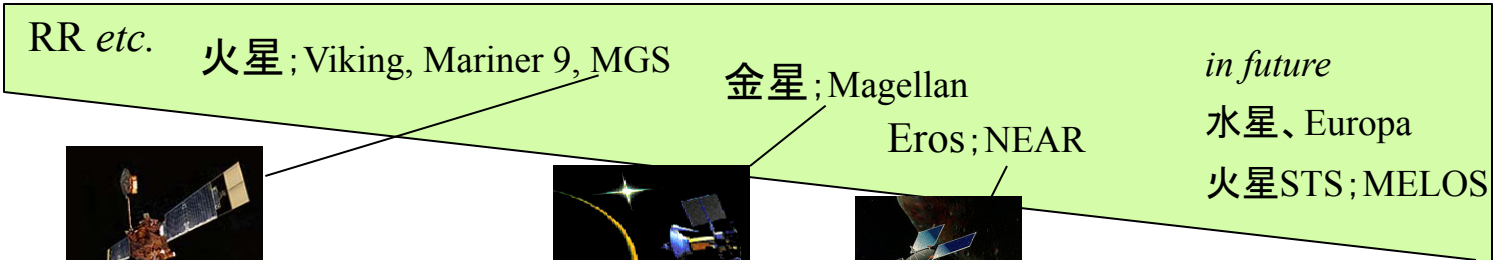


← \curvearrowright LP165P (Konopliv *et al.* 2001)



GRAIL

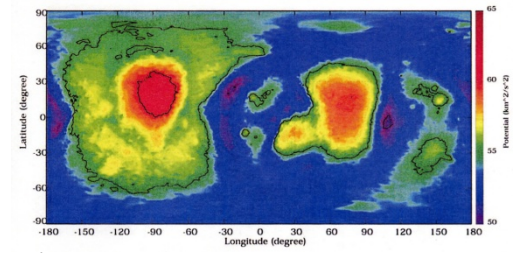
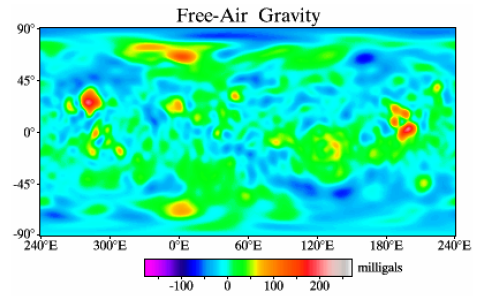
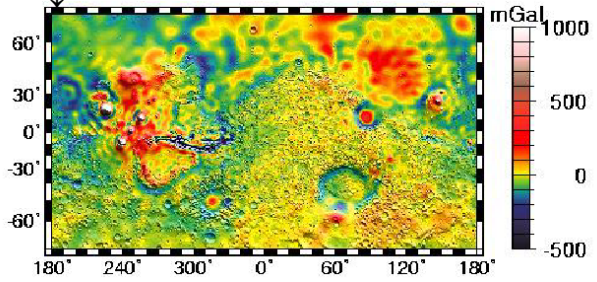
惑星



\curvearrowright free air (Zuber *et al.* 2000)

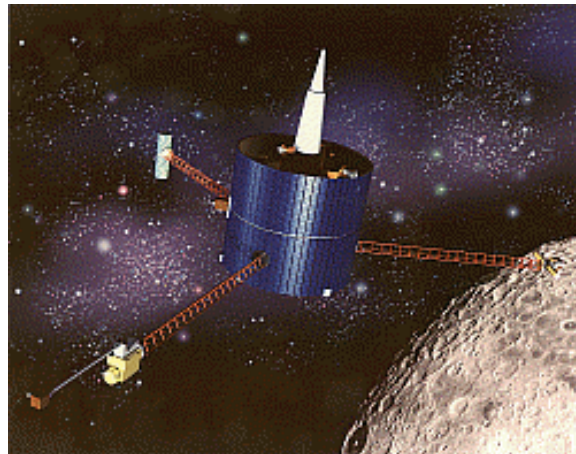


\curvearrowright Eros (Miller *et al.* 2002)



\curvearrowright free air gravity

pre-KAGUYA



月を知る意義

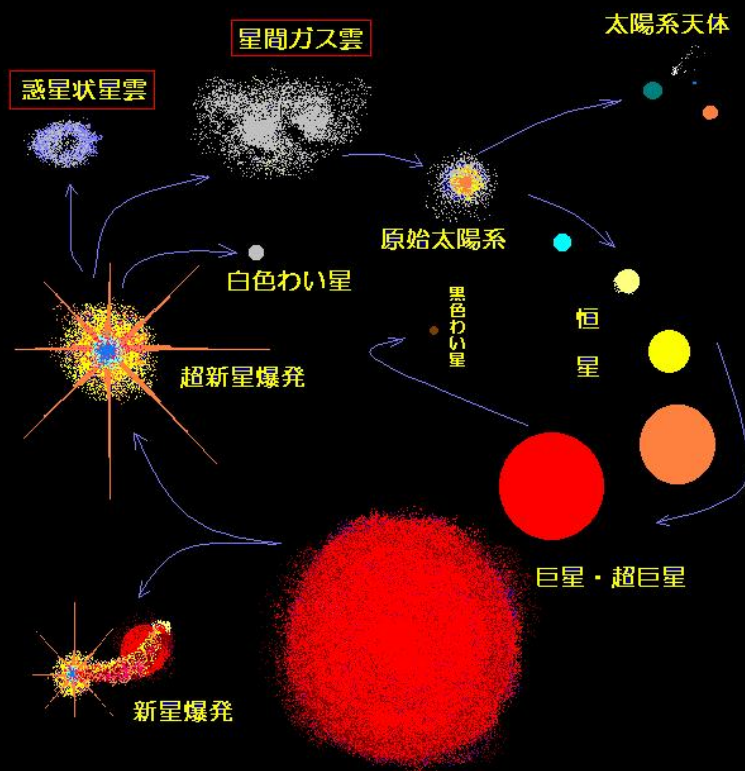


月は最も探査し易い天体

地球では失われた過去を留めている

◇月は普遍的な天体か？
特異な天体か？

◇特異な一天体を調べる意義は？



↑ <http://www.geocities.co.jp/Technopolis-Mars/5777/seiun.html>

←撮影:大沼 崇 (2004), <http://www.astroarts.co.jp/index-j.html>

太陽系の普遍性？

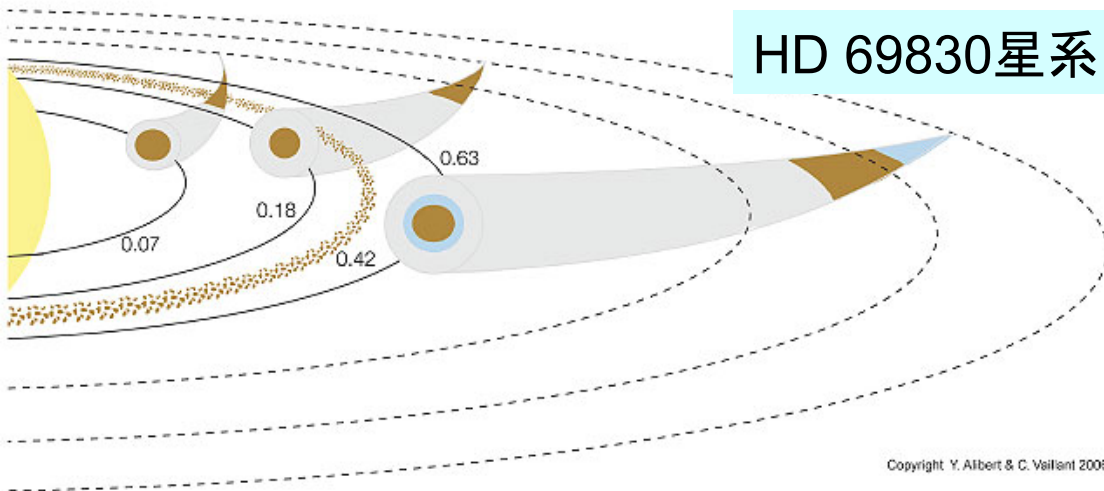
太陽系外惑星系（特徴: hot Jupiter, etc.）

- ・Sampling bias を有するであろう。
- ・いずれかの遷移状態を見ている可能性がある。

我々の太陽系

- ・1 sampleのみの存在
- ・普遍的／特異？

→太陽系的恒星系を見つける
または(シミュレーションで)作る

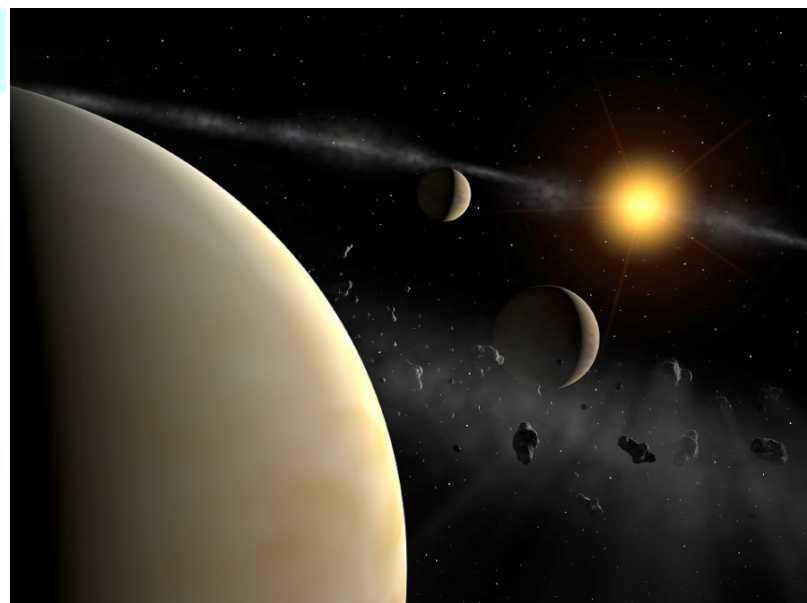


HD 69830星系

Copyright Y. Alibert & C. Vaillant 2005

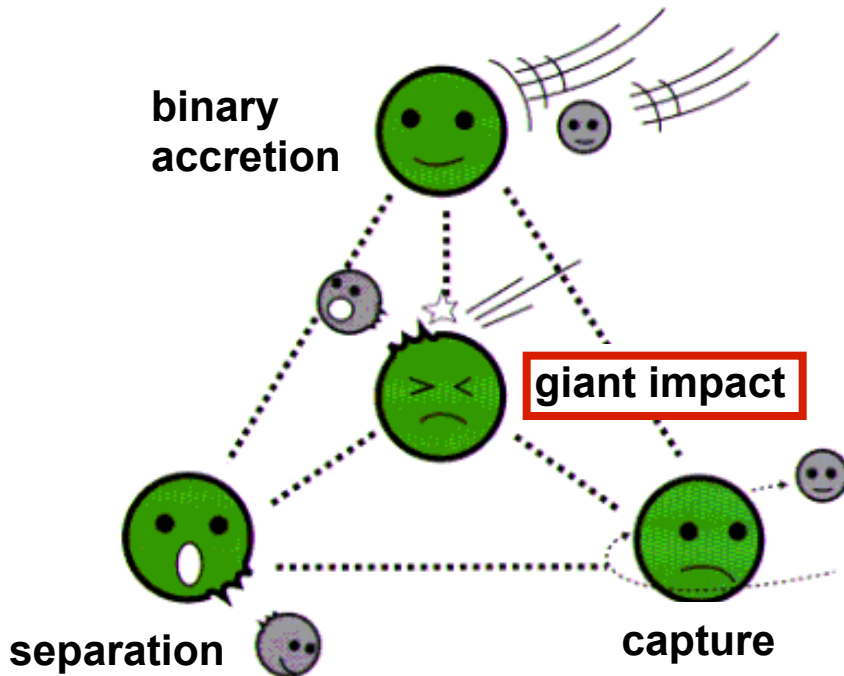
ex. Alibert *et al.* (2006)

Formation Process of Planetary System around HD 69830



Artist View of Planetary System Around HD 69830

Questions for lunar origin and evolution



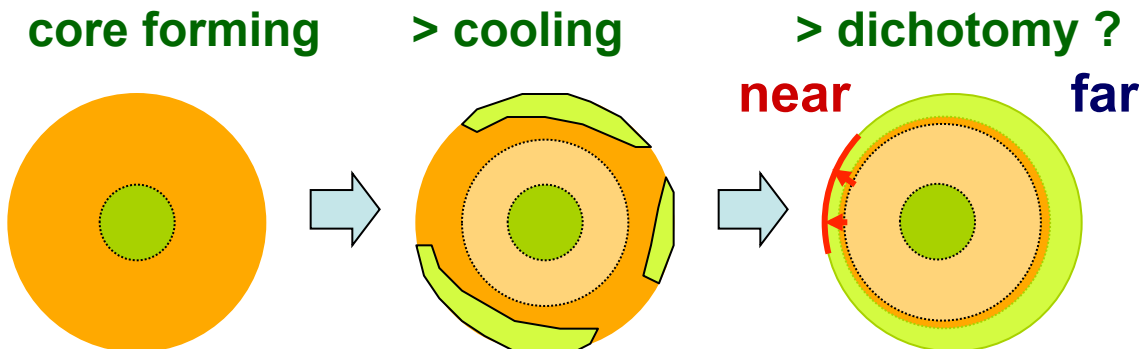
Questions:

- Origin: Is the **Giant Impact** Model completely understood ?
- Evolution: What caused **dichotomy**?
- ... ?

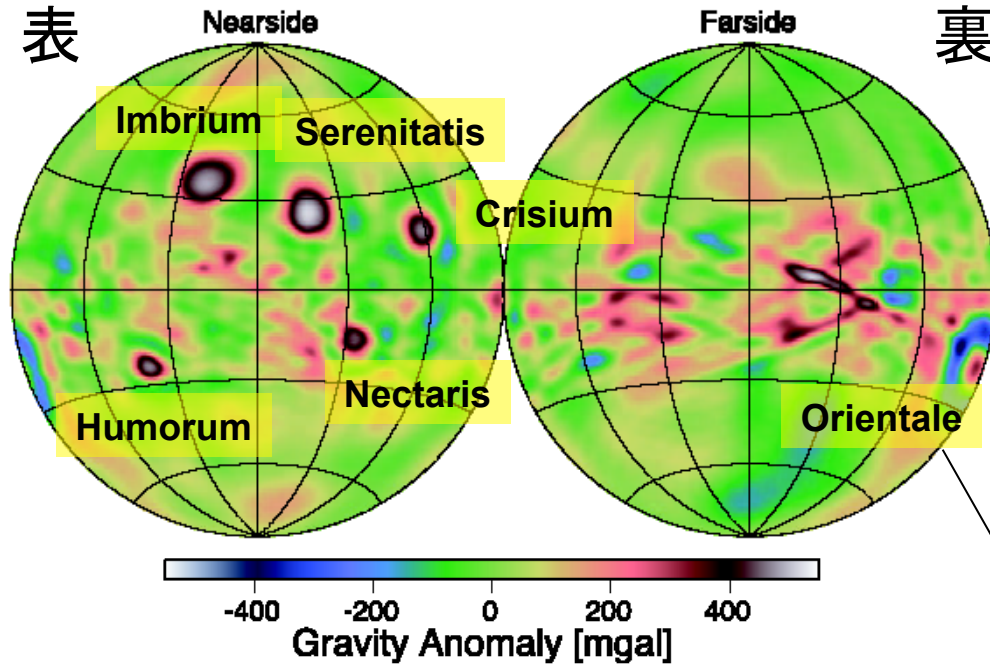


For answers:

- Global mapping by multi-instruments.



SELENE以前の月重力場マップ



Lunar Orbiter
Apollo
CLEMENTINE

↓
GLGM2
(70 x 70)

(Lemoine *et al.* 1997)

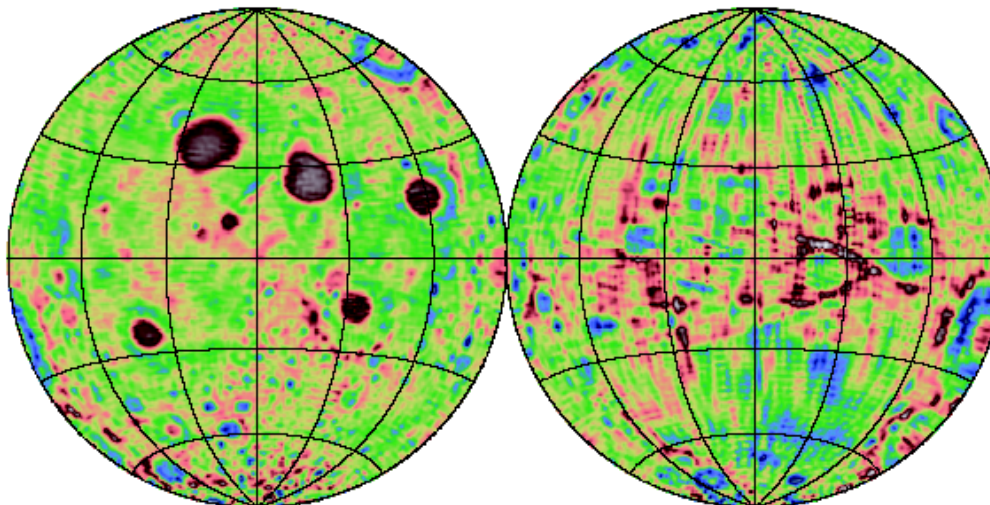
クレータに対応した
質量集中 (mascon)

+

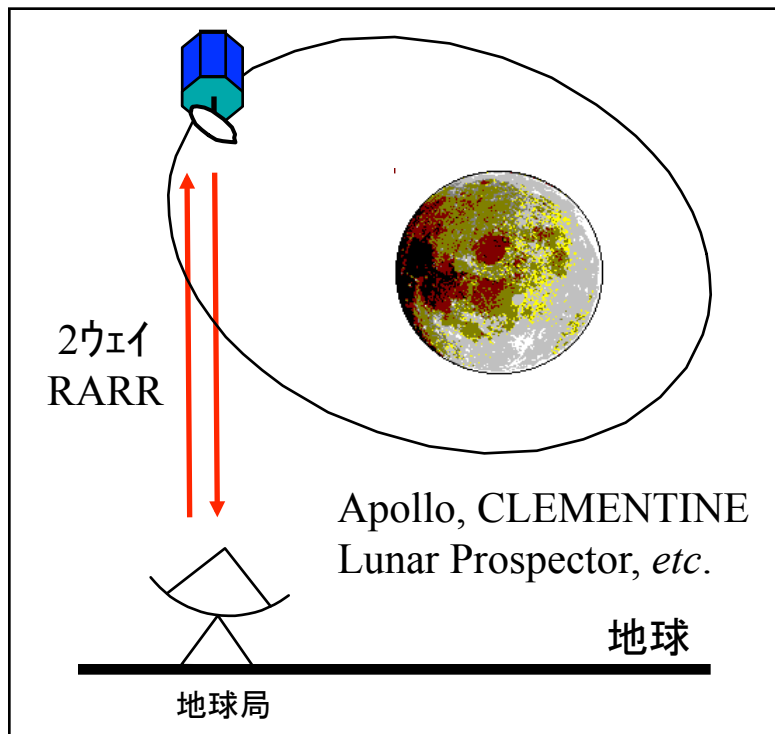
Lunar Prospector

↓
LP165P
(165 x 165)

(Konopliv *et al.* 2001)

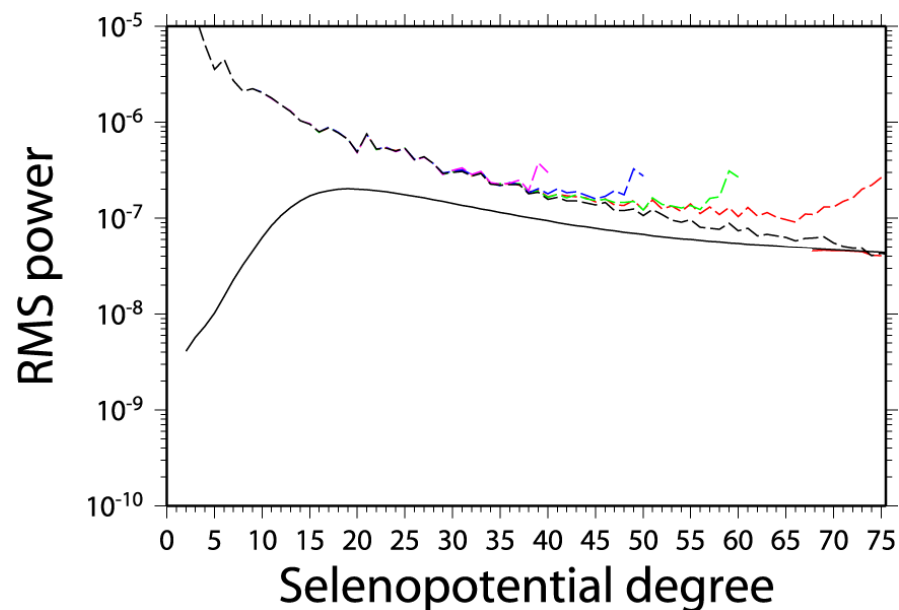


Lunar Prospectorまでの月重力場計測：2ウェイRARR



$P(r, \phi, \lambda)$ における重力ポテンシャルの
球面調和展開：

$$V(\phi, \lambda, r) = \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^N \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \phi)$$



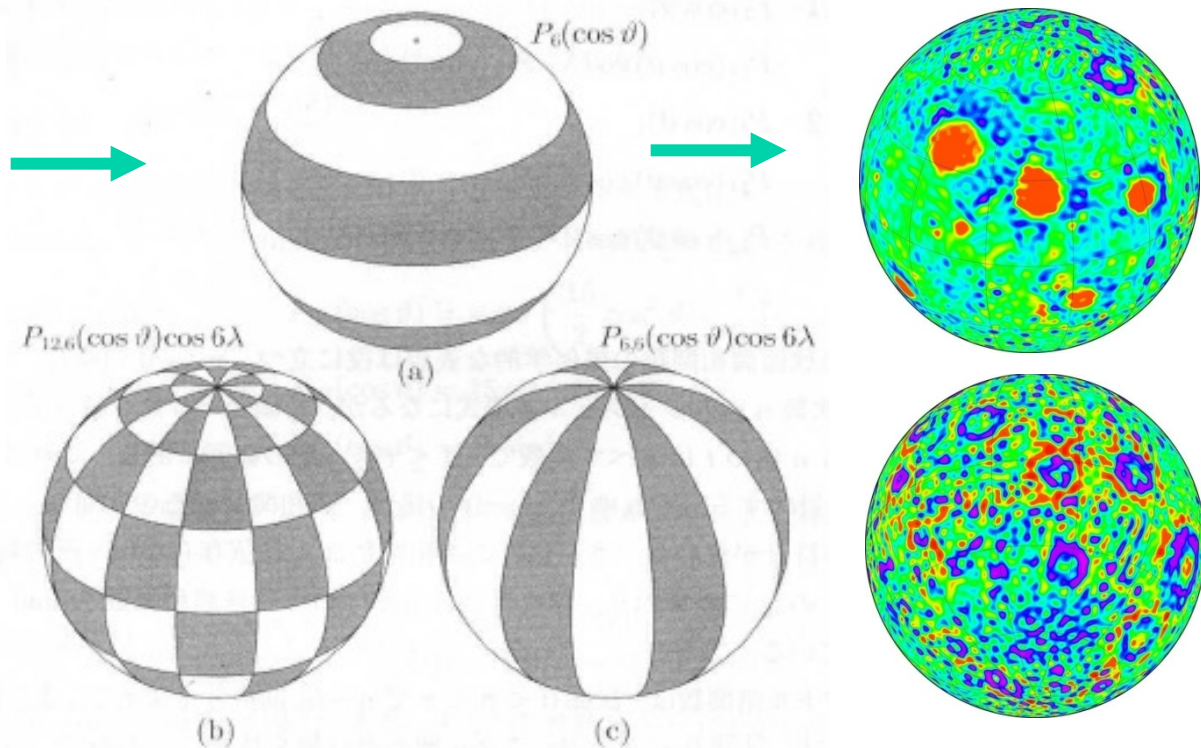
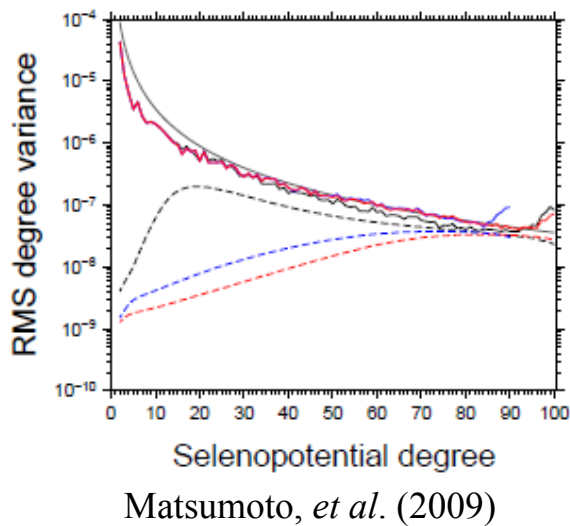
2ウェイRARR(測距・距離変化率)計測



軌道の摂動から重力場分布を推定

- 惑星の重力場は球面調和関数で表される

$$V = \frac{GM}{R} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \phi)$$



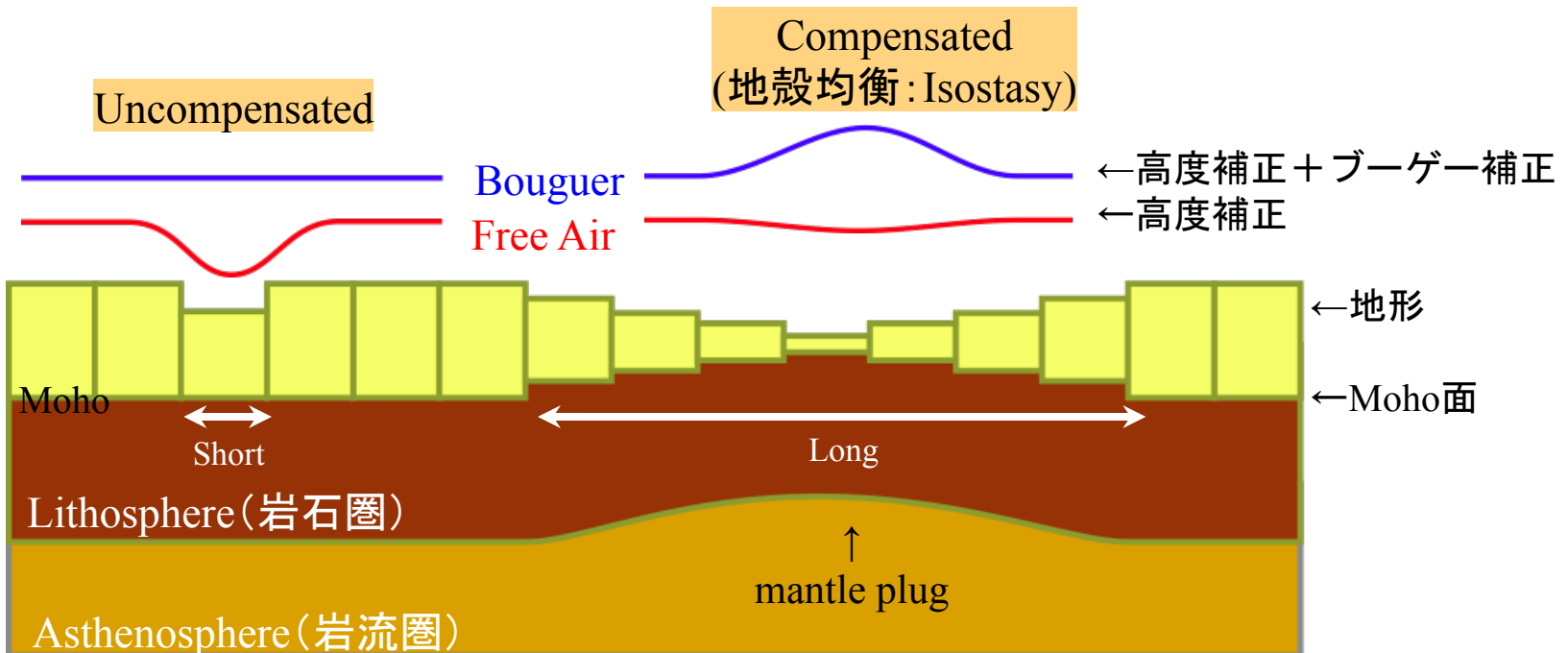
重力異常 等ポテンシャル面 (selenoid) 上の標準重力からの差

$$\Delta g = g_{\text{obs}} - GM / R^2$$

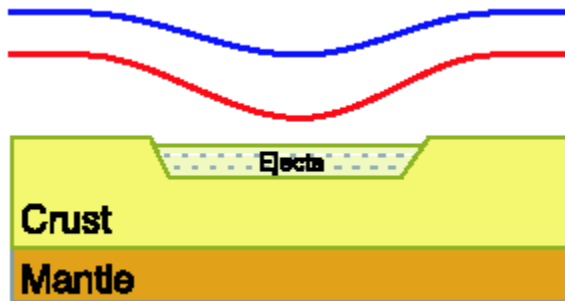
高度補正 測定点の高度を補正 (free air補正)

ブーゲ補正 測定点とselenoid間の物質の影響を補正

$$\delta g = 2\pi G\rho h$$

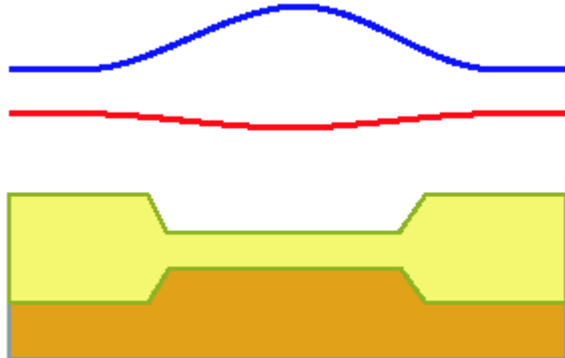


enhanced



e.g... small crater, avalanche deposit with light ejecta

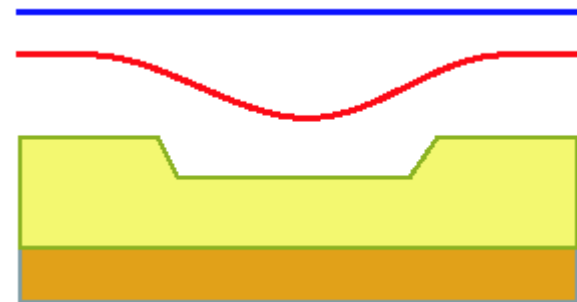
compensated



e.g... relatively large crater

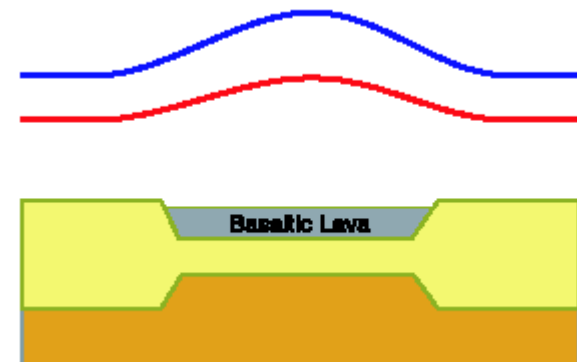
Bouguer
Free Air

uncompensated



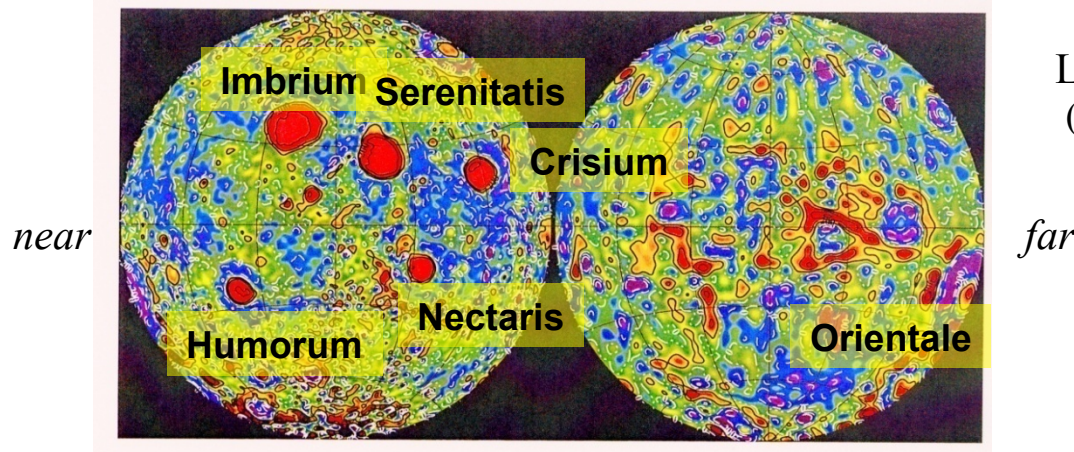
e.g... relatively small crater

mascon

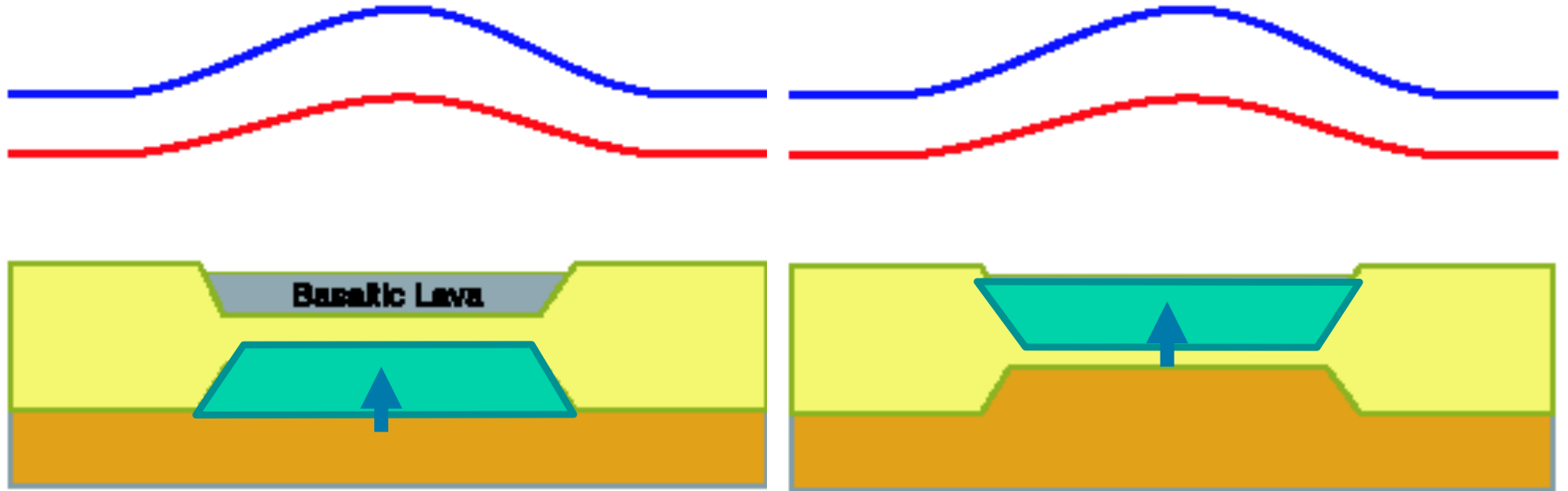


e.g... large crater filled with basaltic lava

Origin of Mascon

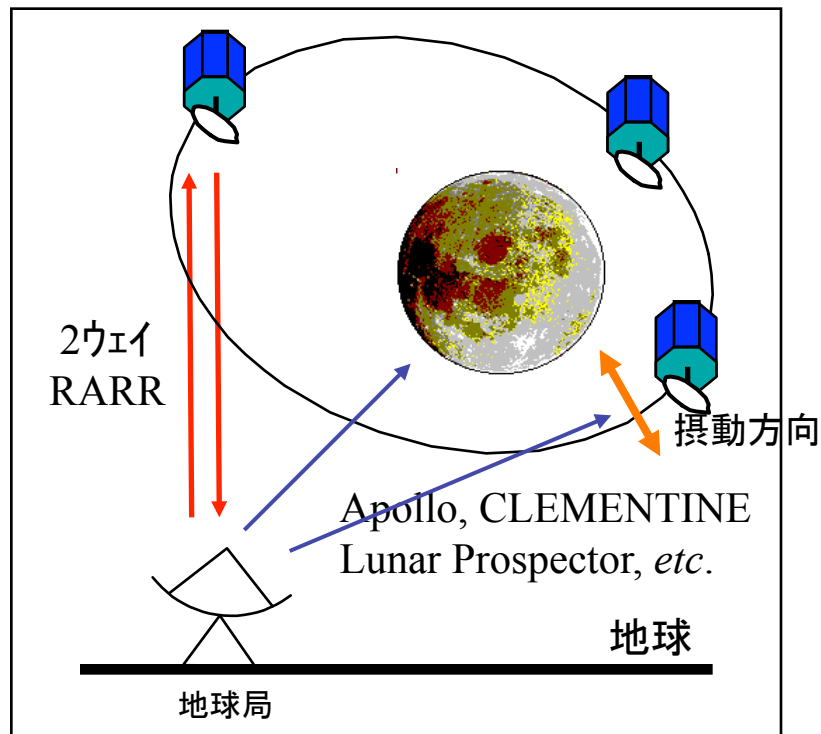


LP165P gravity maps
(Konopliv *et al.* 2001)



excess of mantle plug

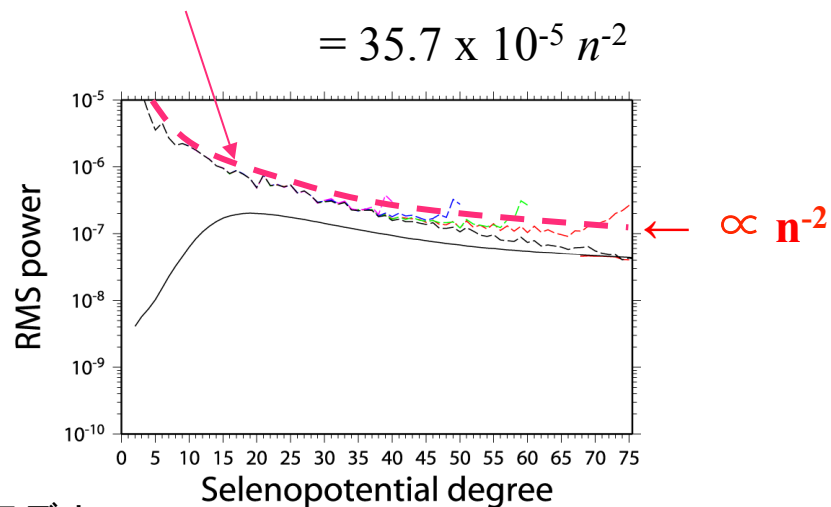
excess of basaltic lava



高次側はKaula (1966)の拘束条件を仮定

$$|s\{C_{nm}, S_{nm}\}| = \left[\sum_{m=0}^N \{C_{nm}^2 + S_{nm}^2\} \right]^{1/2}$$

$$= 35.7 \times 10^{-5} n^{-2}$$

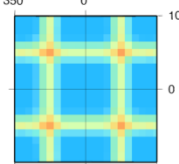


- 1) 月の表側のみ直接RARR計測
- 2) 地球局の原子標準(水素メーザ)に依存

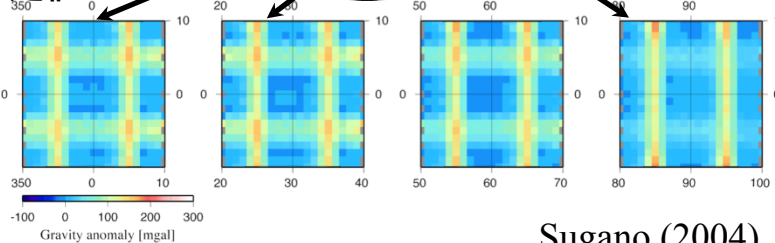


- 1) 裏側の重力場は表側の軌道から推定、縁辺部の感度も悪い。
- 2) 測定精度向上に限界

・モデル



・推定値

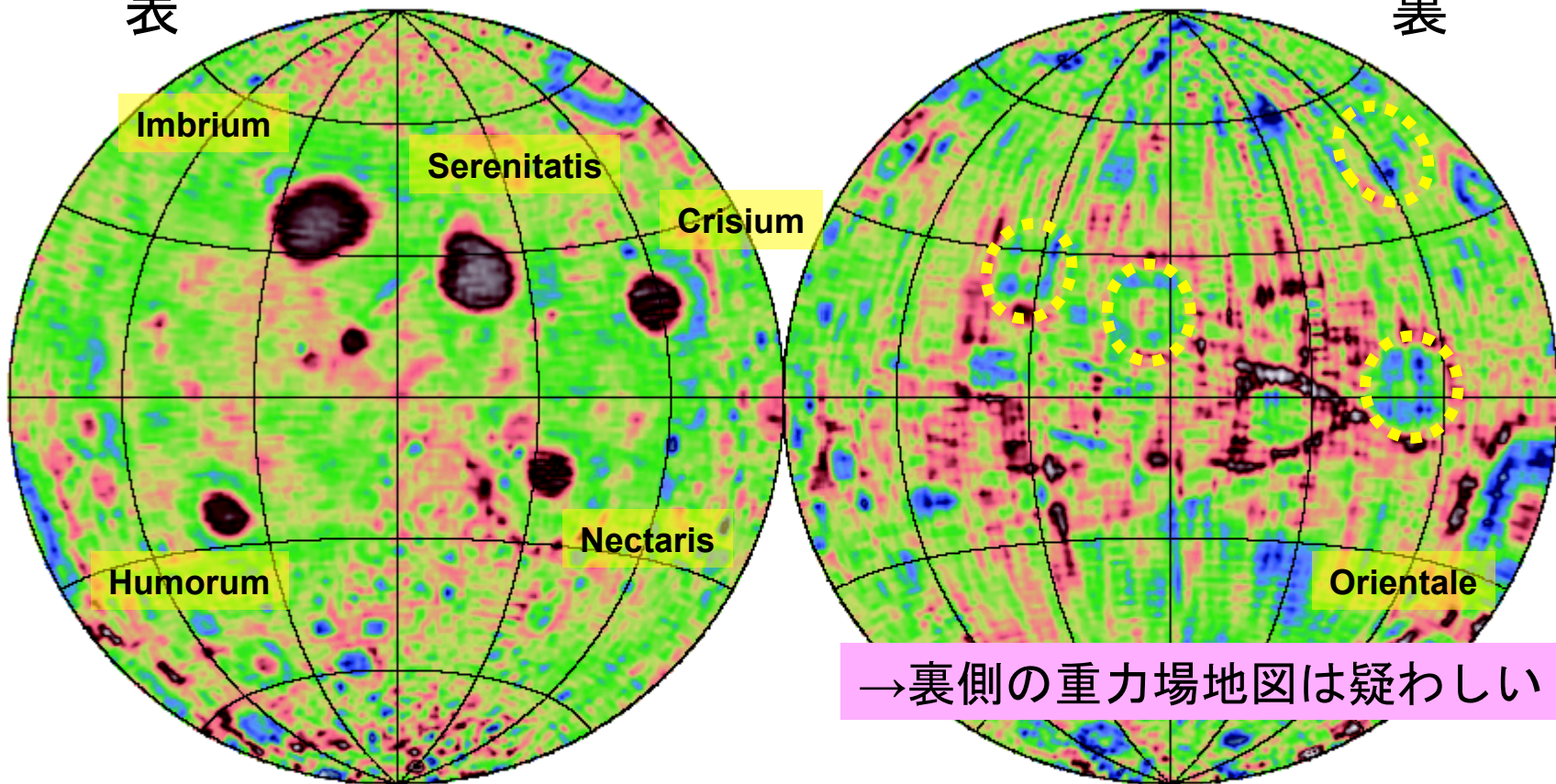


Sugano (2004)

月重力場地図:表(左)と裏(右)のリアリティ比較

表

裏



■表側のmascon、○裏側のmascon候補

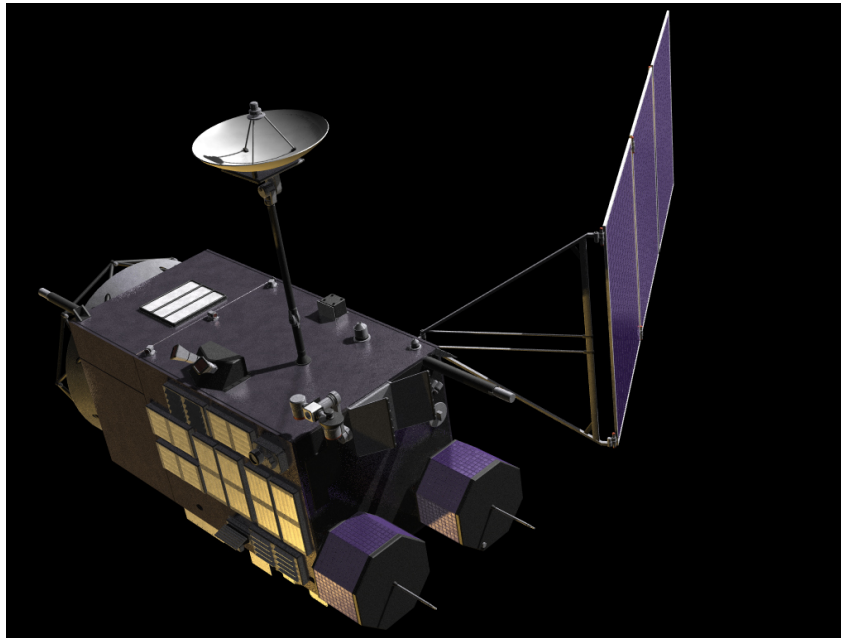
LP165P



Gravity Anomaly [mgal]

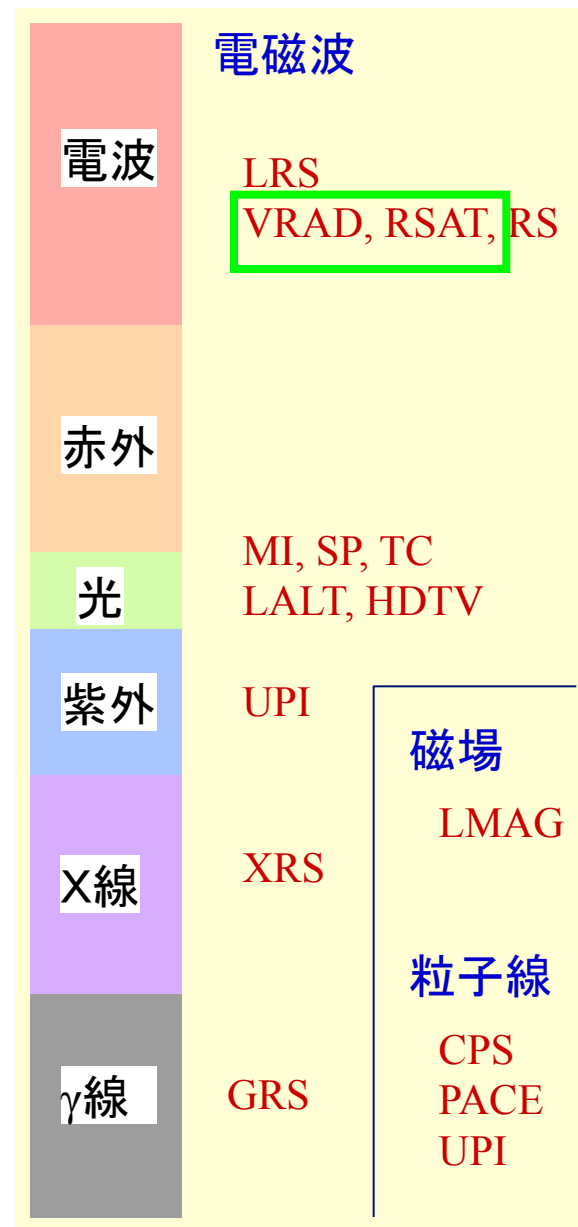
(Konopliv *et al.* 2001より
Sugano 2004が改変)

Results of KAGUYA



SELENE (かぐや) の観測機器の一覧

15のミッション	
主な目的	名称
元素の分布	XRS : 蛍光X線分光計 GRS : ガンマ線分光計
鉱物の分布	SP : スペクトルプロファイラ MI : マルチバンドイメージャ
表層の構造	TC : 地形カメラ LRS : 月レーダサウンダ LALT : レーザ高度計
月の環境	LMAG : 磁力計 UPI : プラズマイメージャ CPS : 粒子線計測器 PACE : プラズマ観測器 RS : 電波科学観測
重力の分布	VRAD : 相対VLBI用衛星電波源 RSAT : リレー衛星中継器
広報	HDTV : ハイビジョンカメラ



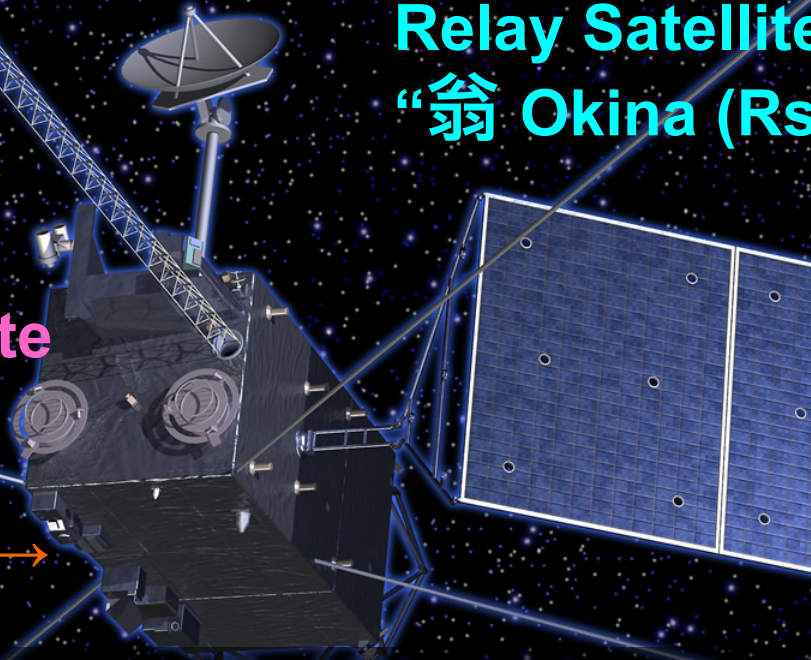
多様な観測手法(14観測機器)による**全球**観測
→ 月の起源と進化を探る

On-orbit configurations of SELENE



VLBI Radio Satellite
“**嫗 Ouna (Vstar)**”

Main Orbiter →
“**Kaguya**”



Relay Satellite
“**翁 Okina (Rstar)**”



Princess KAGUYA with her foster parents OKINA and OUNA;
(by Machiko Satonaka) →

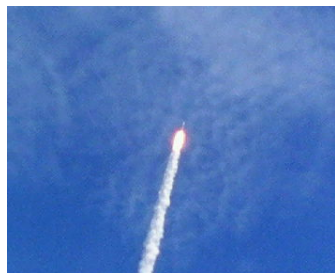


- SELENE consists of ;
 - 1) Kaguya : Main Orbiter
 - 2) Okina (Rstar); Relay Satellite
 - 3) Ouna (Vstar); VLBI Radio Satellite

Purpose of two small sub-satellites ;

- global and precise mapping of lunar gravity field.

ミッションプロフィール: 月への道のり



H-IIA 13号機での打上げ
2007年9月14日 10:31:01

2009年2月12日終了

おきな
100×2400km

おうな
100×800km

かぐや
100×100km

2009年6月11日終了

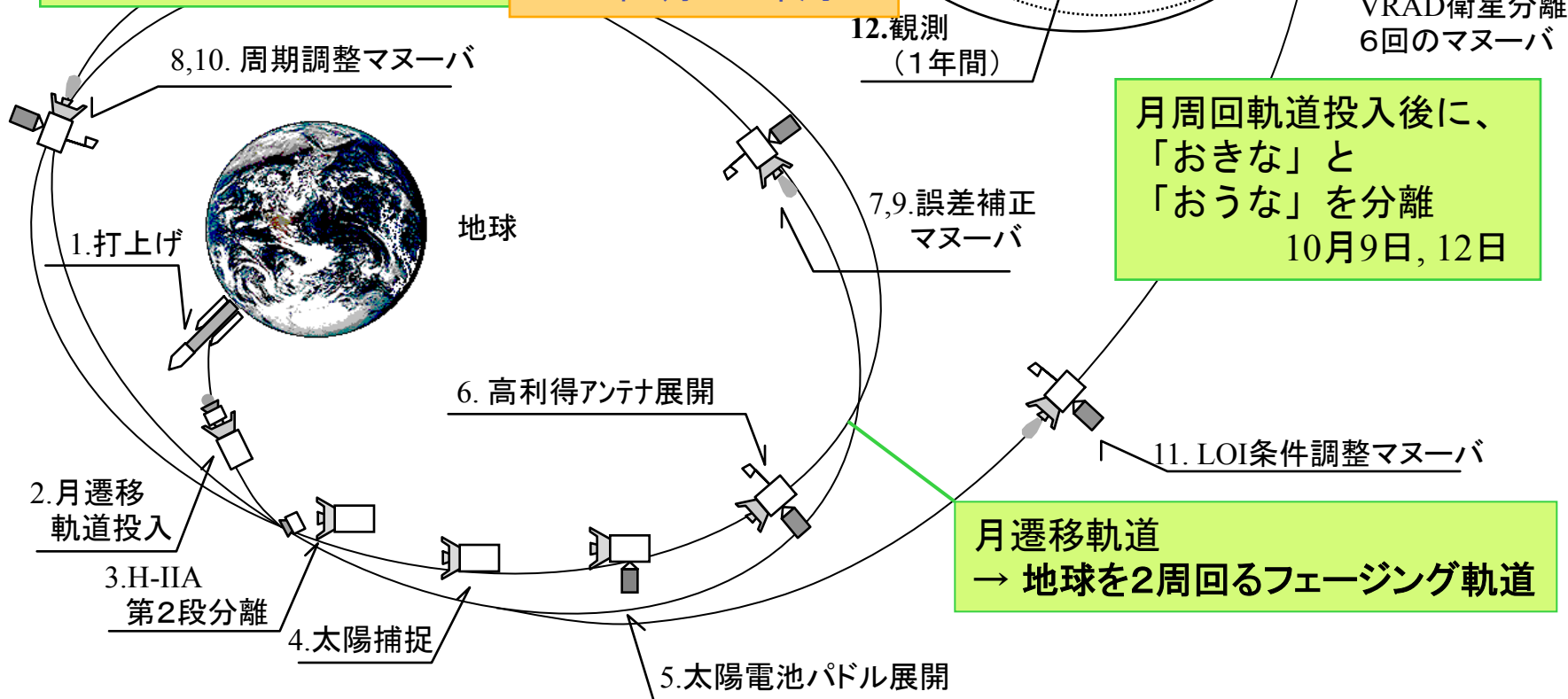
月に到着
10月3日

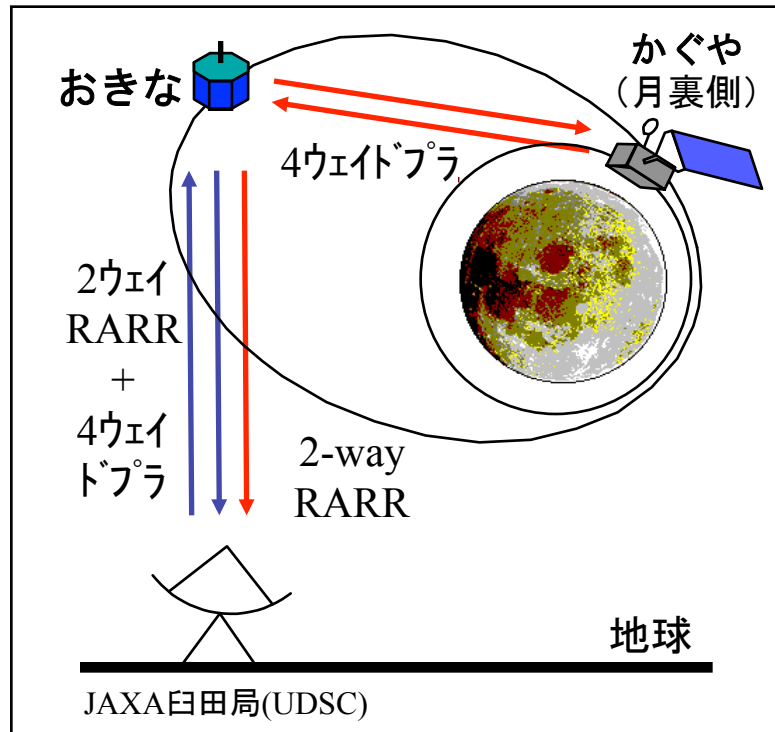
軌道傾斜角
 $i=90\text{deg}$

12. 月周回軌道投入
リレー衛星分離
VRAD衛星分離
6回のマヌーバ

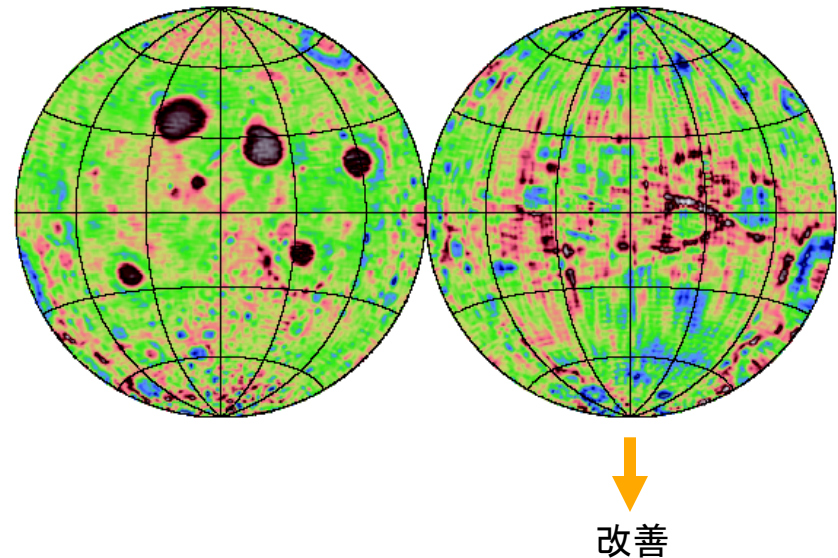
月周回軌道投入後に、
「おきな」と
「おうな」を分離
10月9日, 12日

月遷移軌道
→ 地球を2周回るフェージング軌道





月裏側の重力場の直接観測



月の裏側を飛行中のSELENE主衛星の軌道を、Rstar経由で計測する。

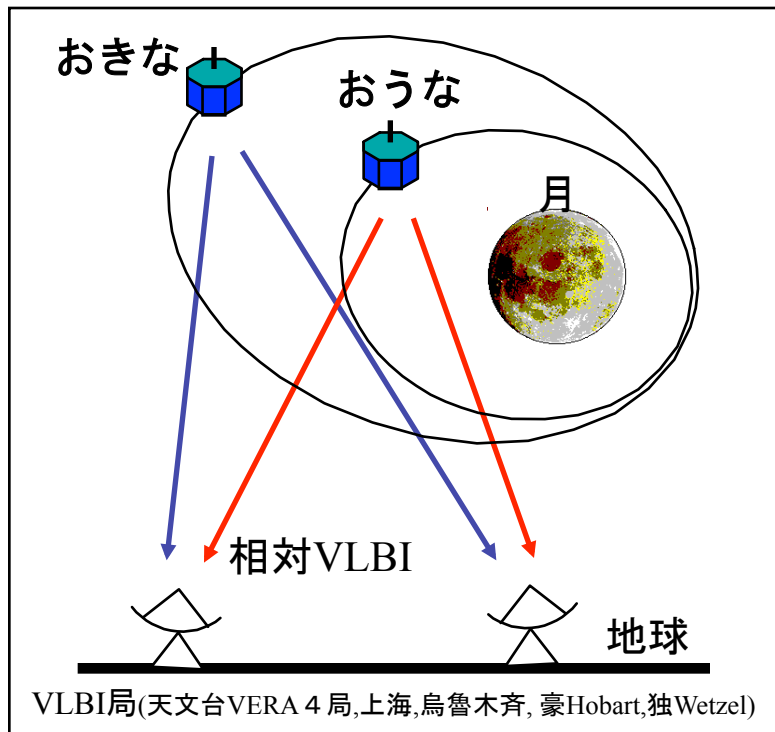


月の裏側の低い軌道を初めて直接観測し、Kaula (1966)の拘束条件に依らず重力場を決める。

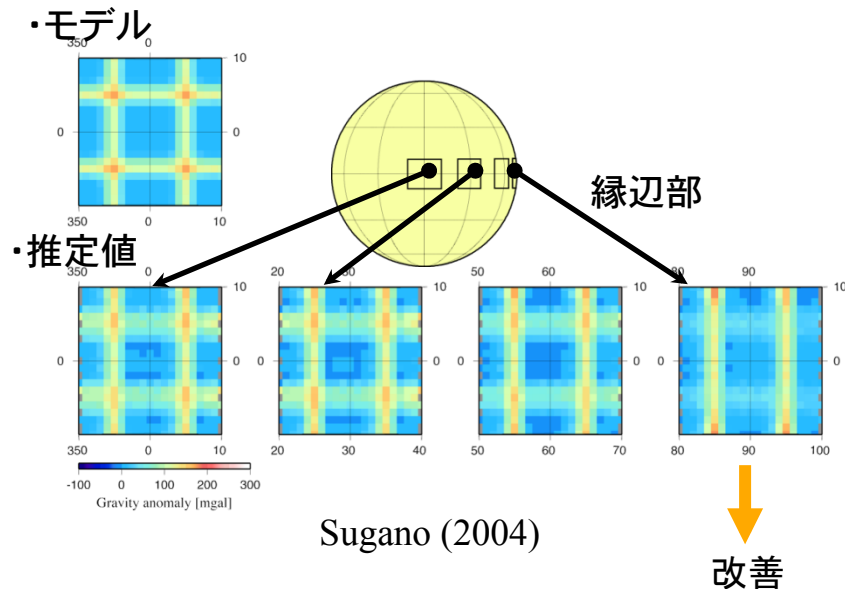


JAXA 臼田局(UDSC)

VRAD: 衛星電波源の多周波相対VLBI観測



月縁辺部の重力場精度の改善
月重力場の低次項の精度改善



RstarとVstarから発信される電波を多周波相対VLBI観測する。

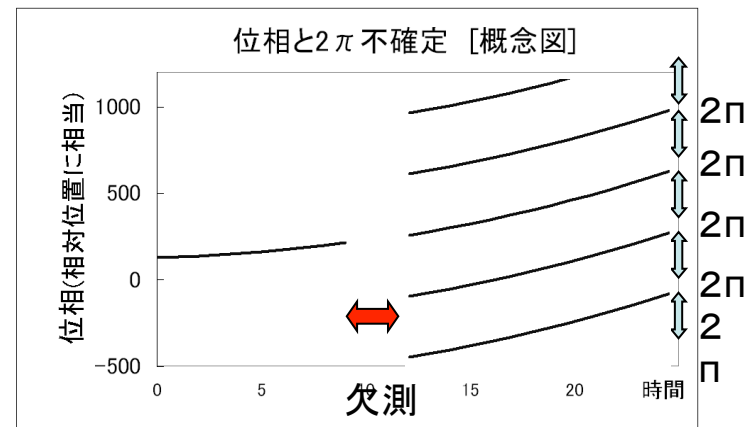
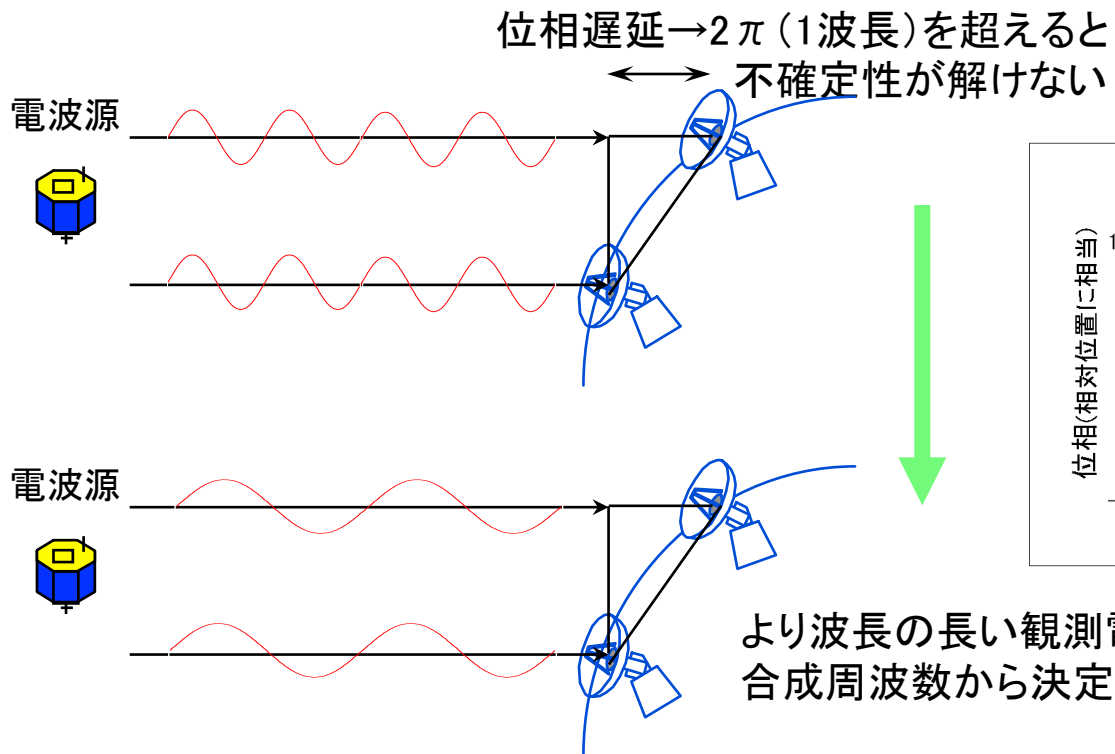


RARRより約2桁高精度の位置決定、視線垂直面方向の改善を行い、重力場の低次項を改善する。



VERA水沢局 VERA石垣島局 VERA小笠原局

多周波を用いた位相遅延決定の概念



VRADの周波数の条件

- 電離層補正のため、S帯とX帯を同期させる。

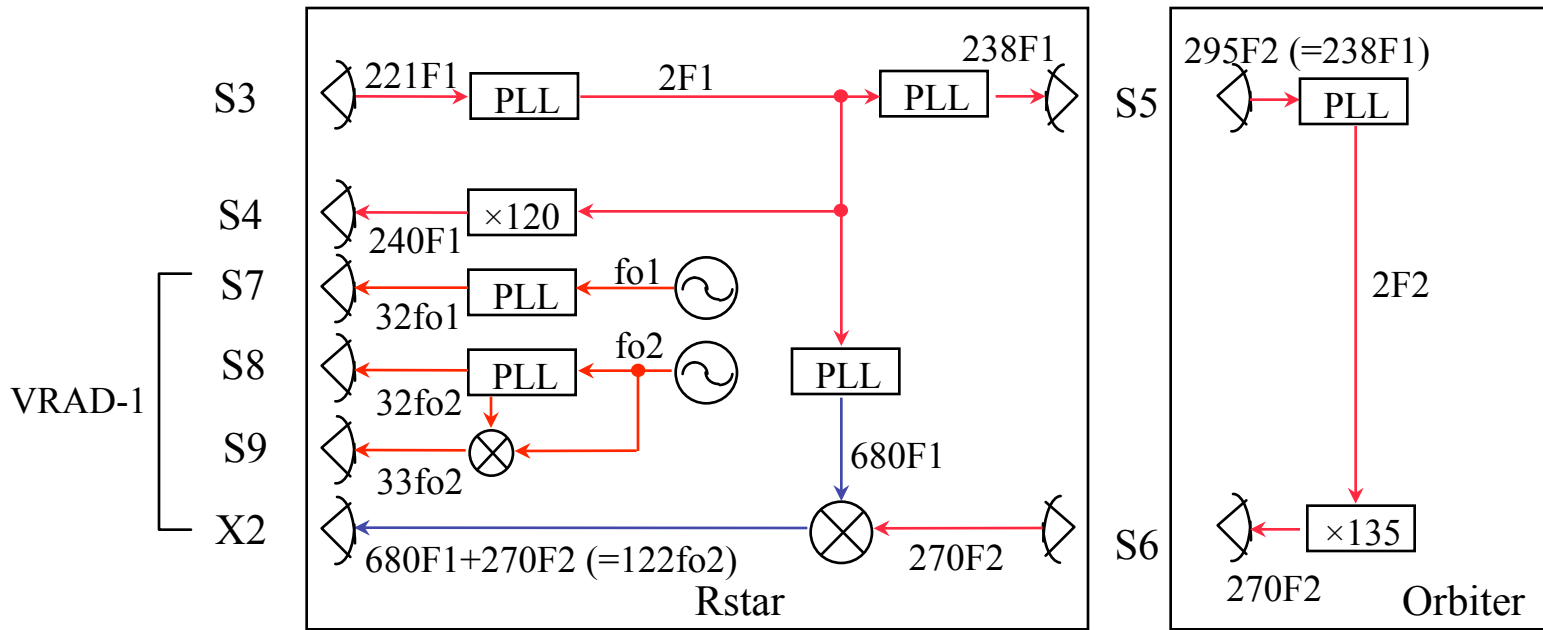
$$f(X) = (n/m) f(S)$$

- 位相差の不確定性を解くため、S帯に3波、X帯に1波を配置する。

$$f_{i+1} < (2\pi / \delta\phi) f_i \quad \text{where } \delta\phi = 10 \text{ deg}$$

VRAD周波数

- 2212 MHz
 - 2218 MHz
 - 2287 MHz
 - 8456 MHz
- 6 MHz
- 75 MHz



RSAT/VRADの周波数条件

周波数の条件

- ・位相不確定性を解く
- ・コヒーレント=整数比
(単純な素数)
- ・TTCと非干渉
- ・宇宙バンド

RSAT周波数の決め方

- S4; $2260\text{MHz} = S3 (240 / 221)$
- S5; $2242\text{MHz} = S3 (238 / 221)$
- S6; $2052\text{MHz} = S5 (270 / 295)$
- X2; $8456\text{MHz} = S6 + S3 (680 / 221)$

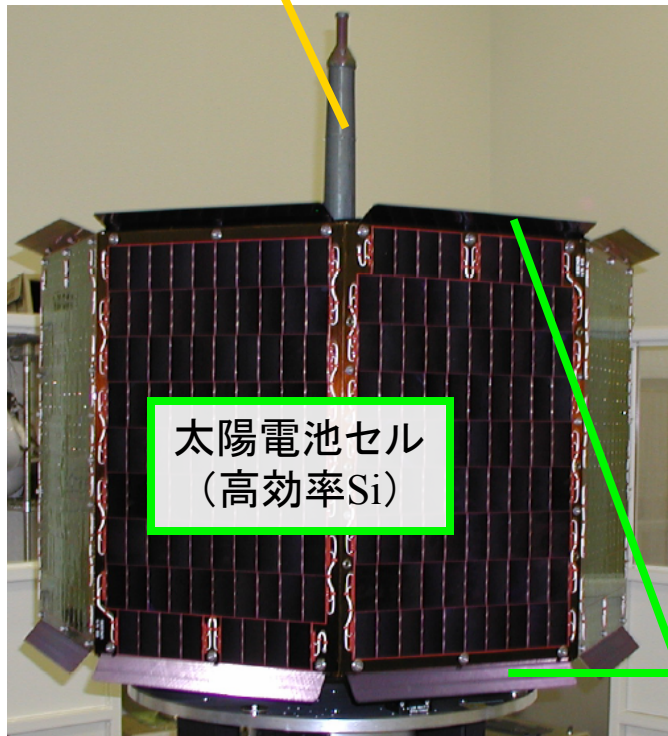
VRAD周波数の決め方

- S7; $2212\text{MHz} = f_{O1} \times 32$
- S8; $2218\text{MHz} = f_{O2} \times 32$
- S9; $2287\text{MHz} = f_{O2} \times 33$
- X2; $8456\text{MHz} = f_{O2} \times 122$

リレー衛星の外観

サイズ: 1m×1m×0.65m
 質量: 45kg
 電力: 70W

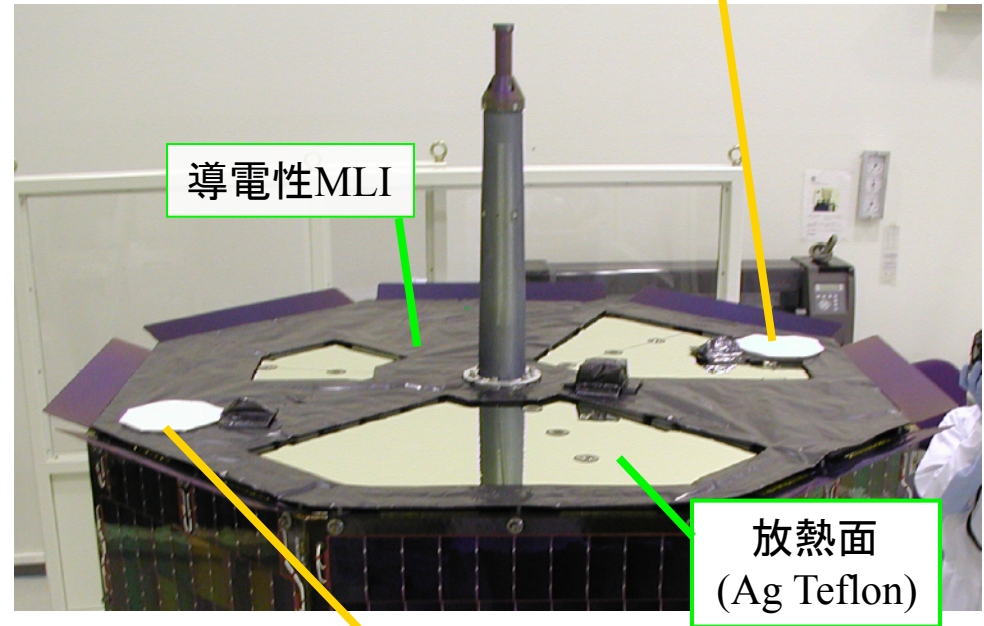
S/X帯垂直ダイポールアンテナ
 [地球向けビーム]



太陽電池セル
 (高効率Si)

太陽風キャンセル板
 (Geコーティング)

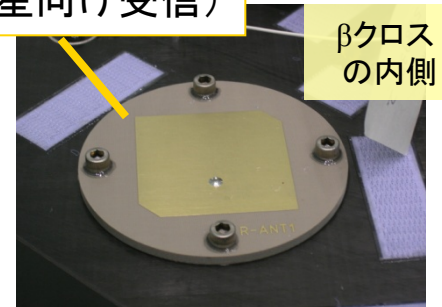
S帯平面アンテナ
 (主衛星向け送信)



導電性MLI

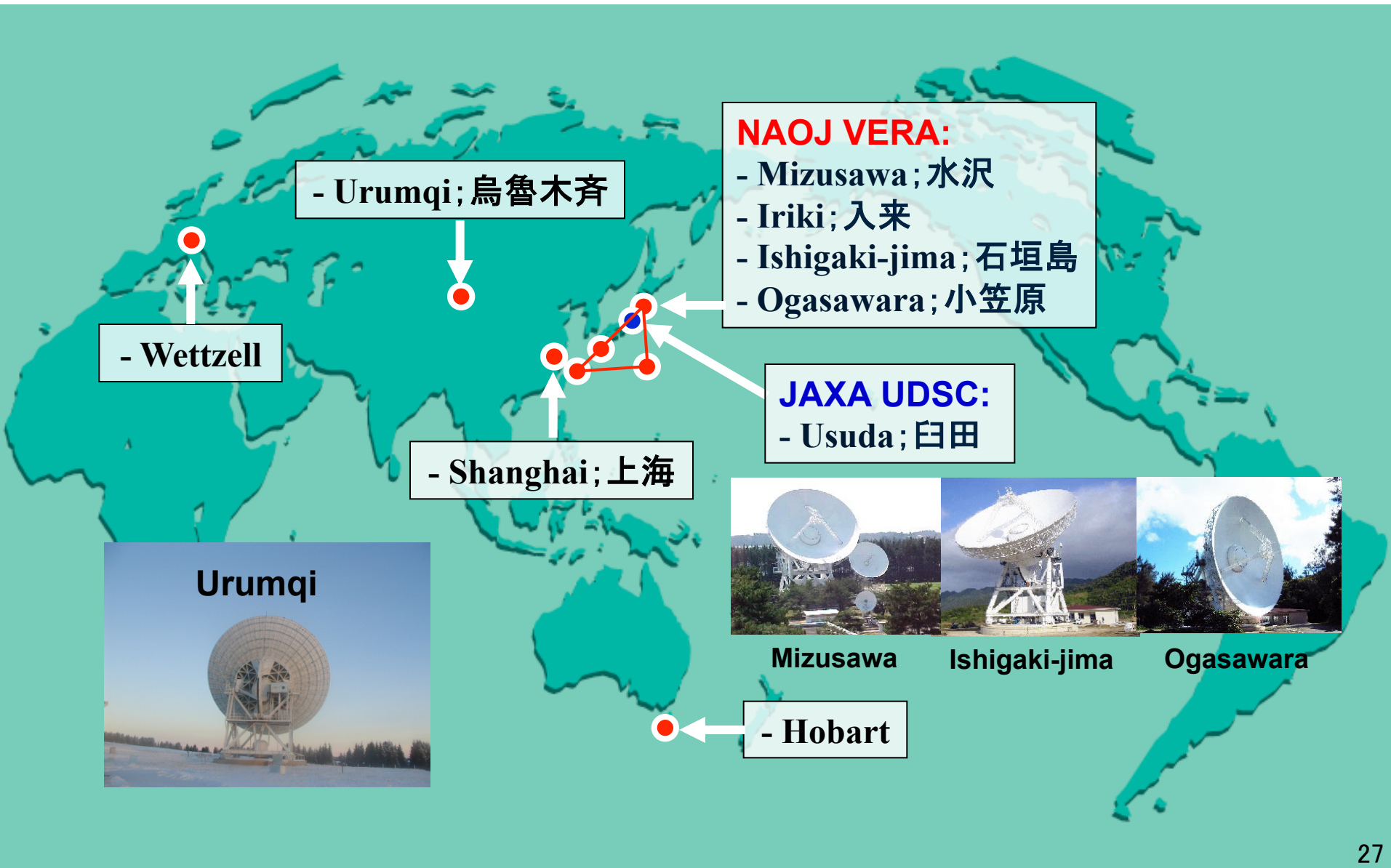
放熱面
 (Ag Teflon)

S帯平面アンテナ
 (主衛星向け受信)

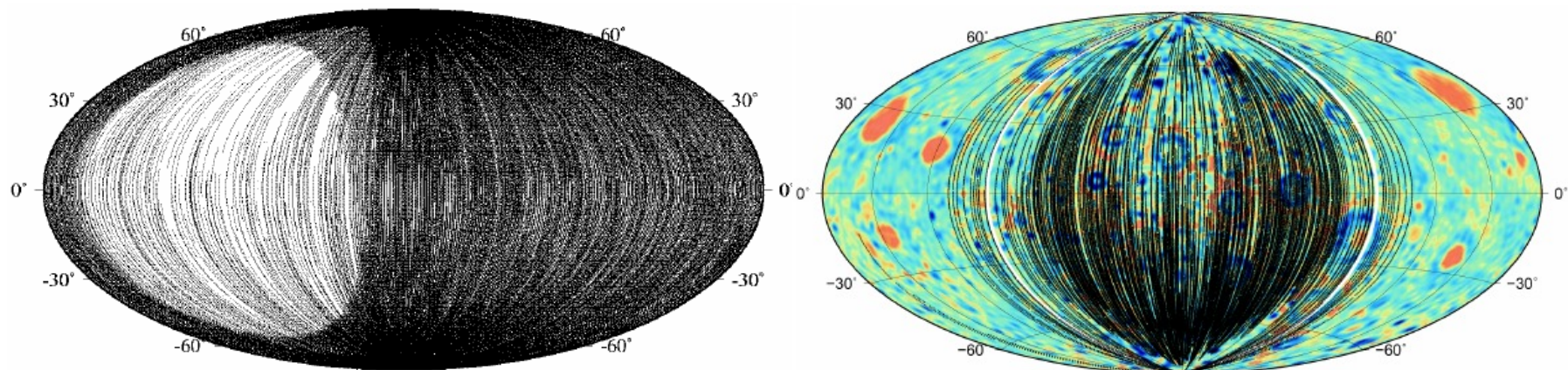


βクロス
 の内側

Ground stations for RSAT/VRAD



追跡データカバレッジ Matsumoto *et al.* (2010)

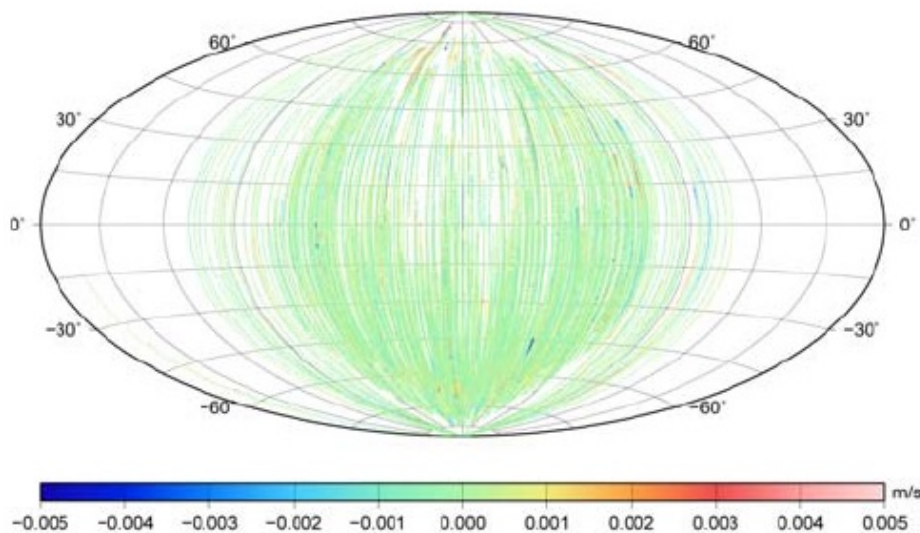


裏 ← → 表

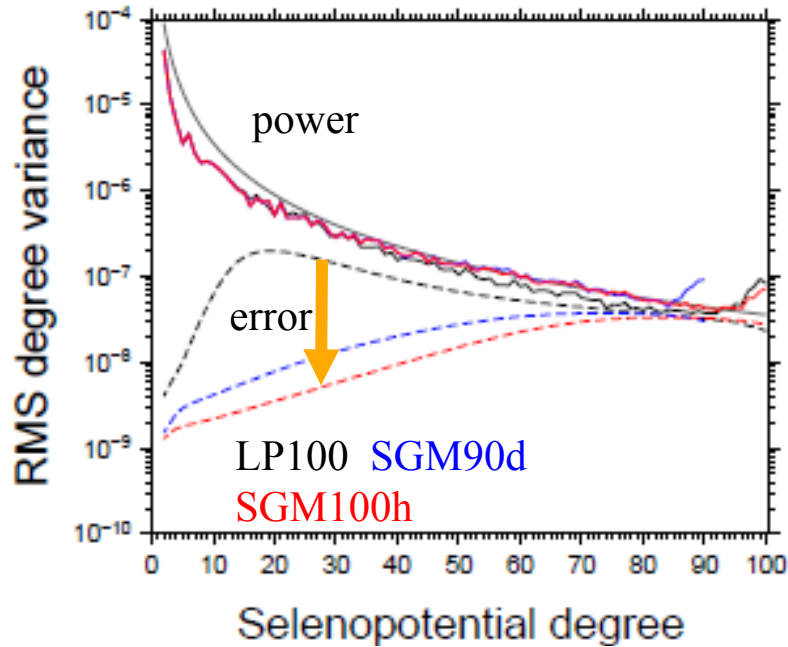
↓ 裏の中央

↑ 裏の中央

4-way Doppler residual



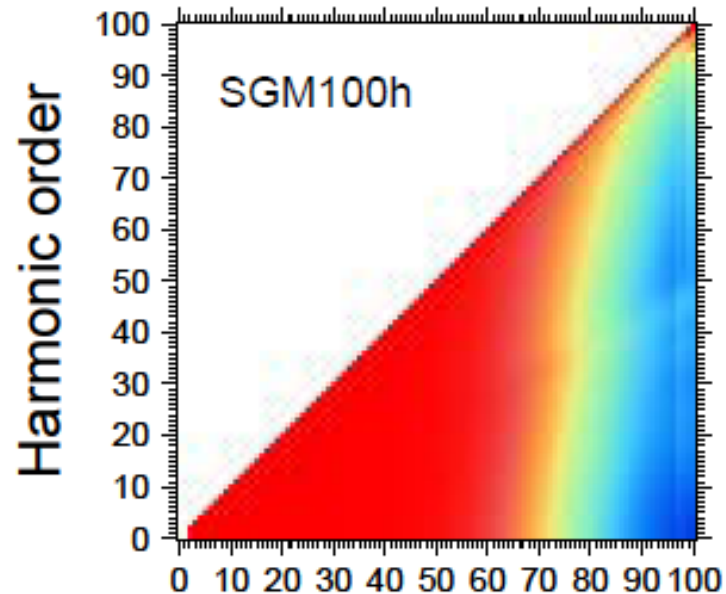
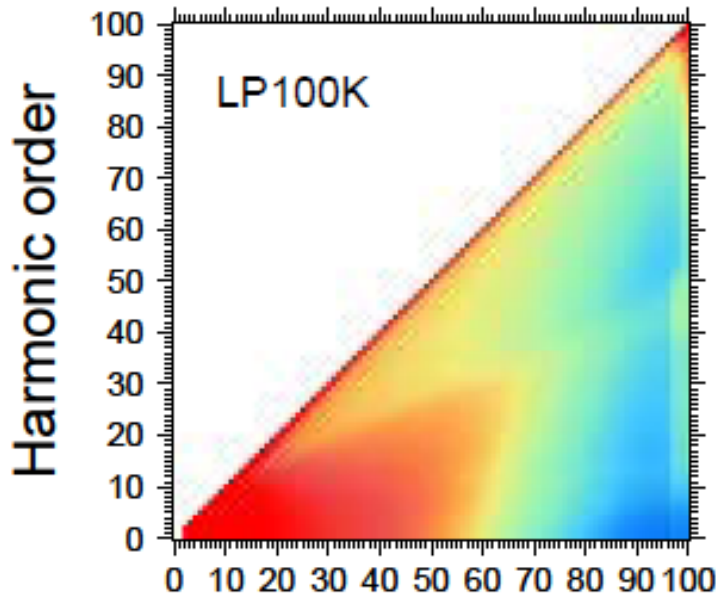
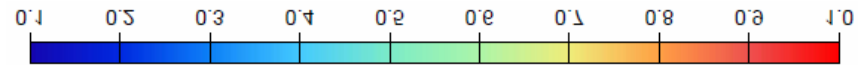
SELENE重力場モデル(SGM100h)による展開係数の精度

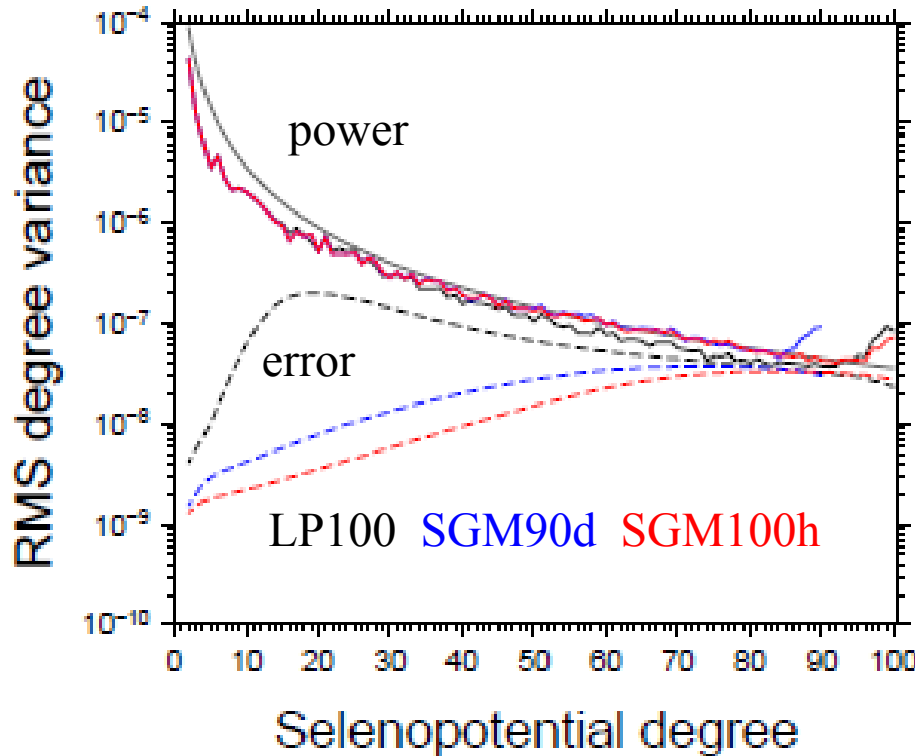


← 展開係数の次数(degree)の強度と誤差

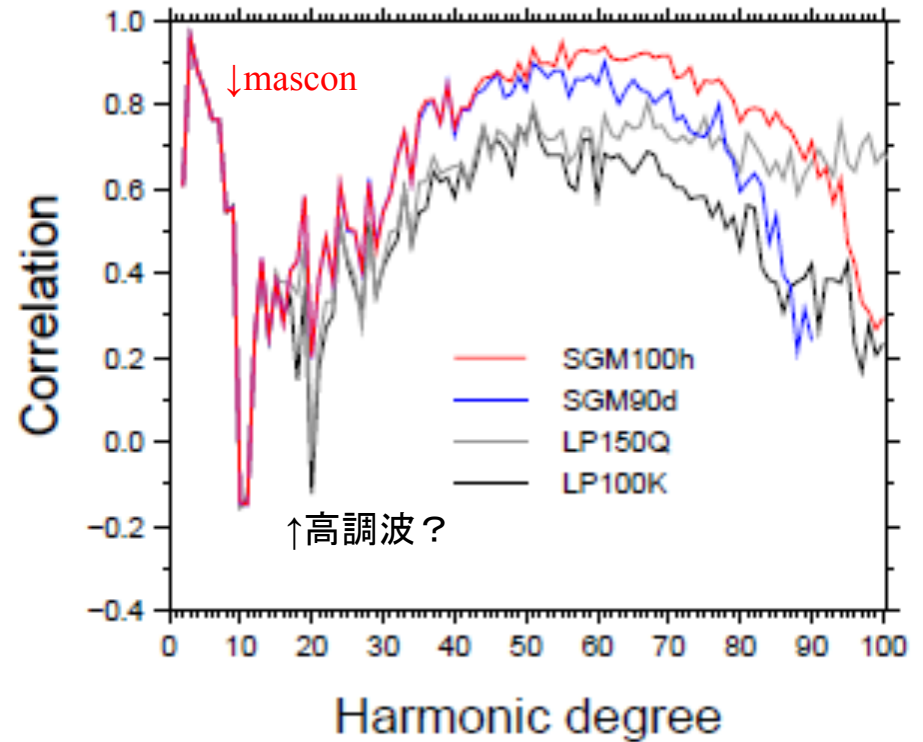
Matsumoto, *et al.* (2010)

↓ 展開係数の次数(degree)と位数(order)の観測依存性 (1=観測地から決定、0=a priori modelから決定)



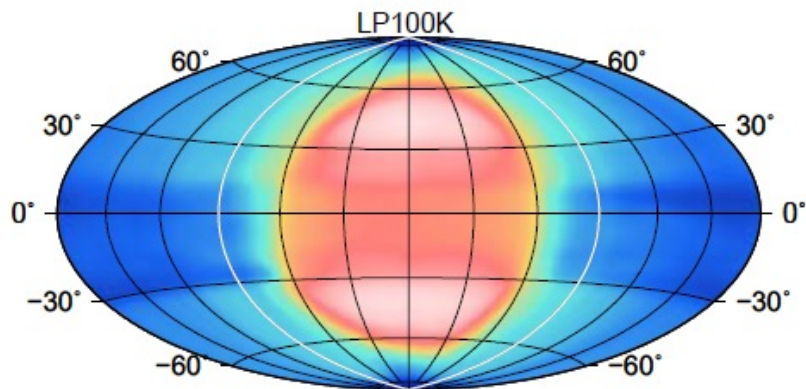


展開係数の強度と誤差

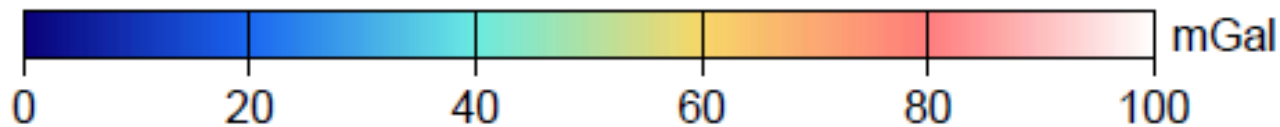
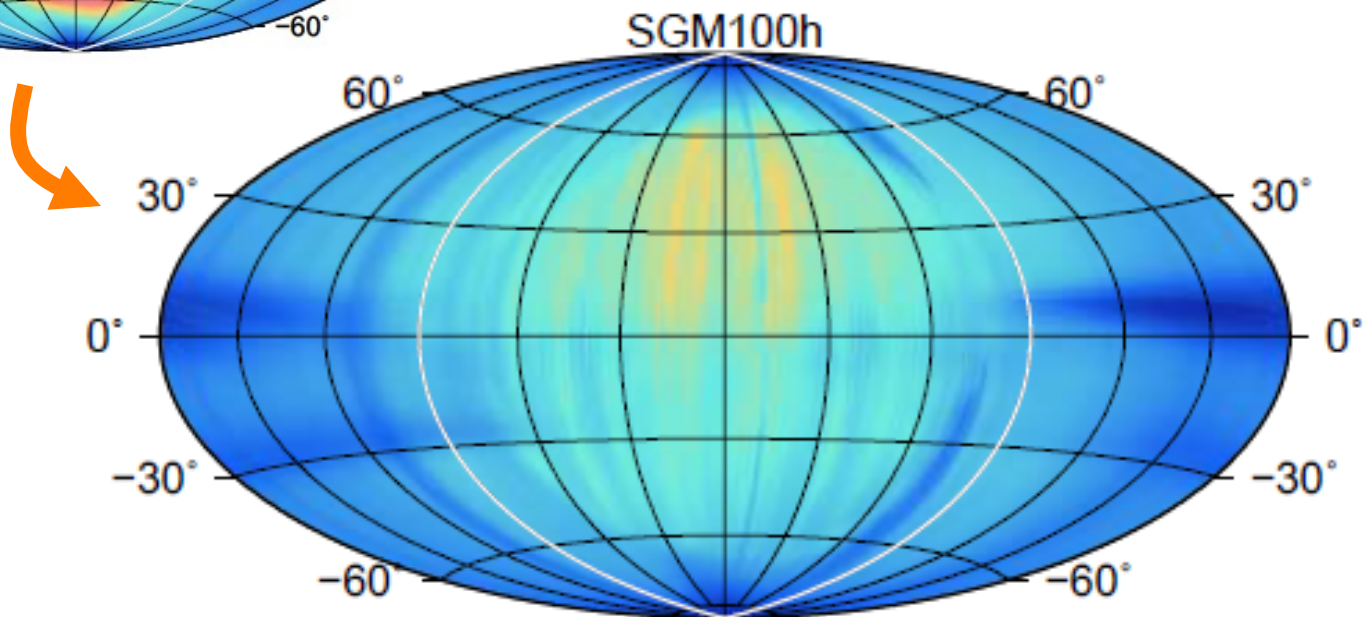


重力と地形の相関

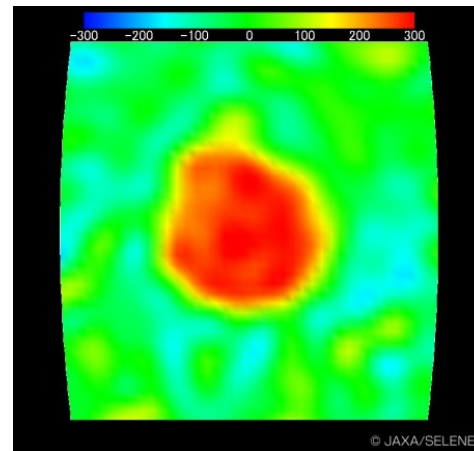
SELENE重力場モデル(SGM100h)による重力場分布の精度



Matsumoto, *et al.* (2010)

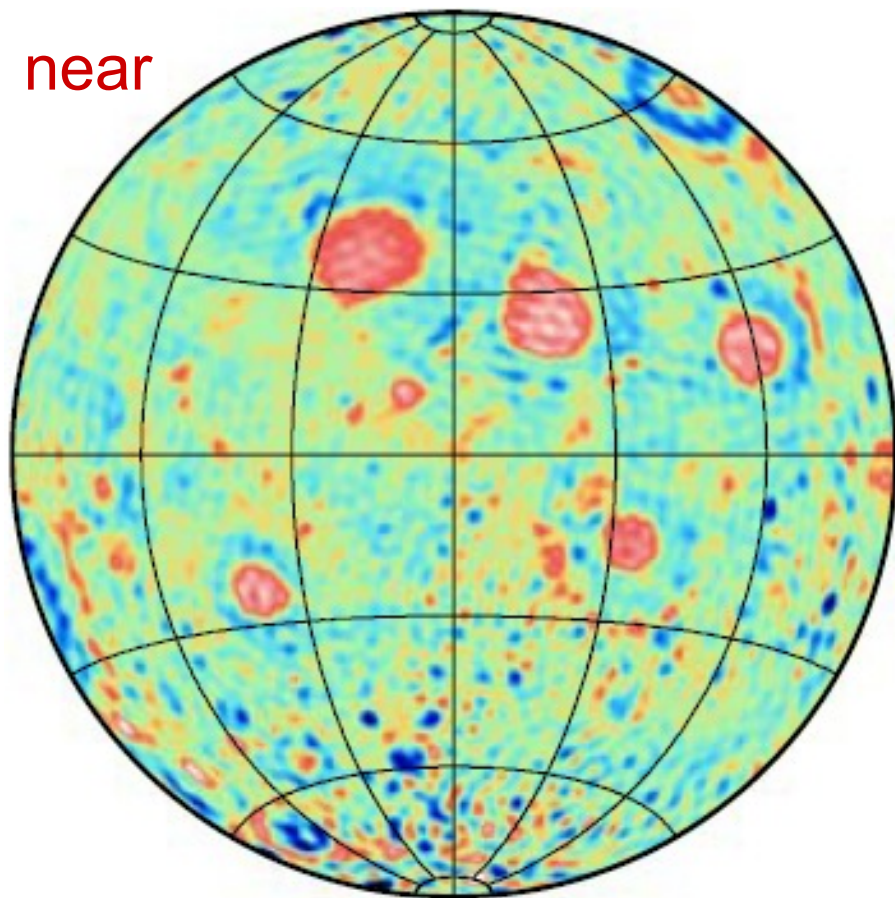


Gravity anomaly

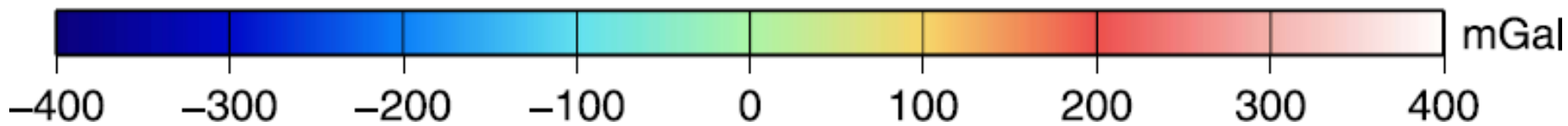
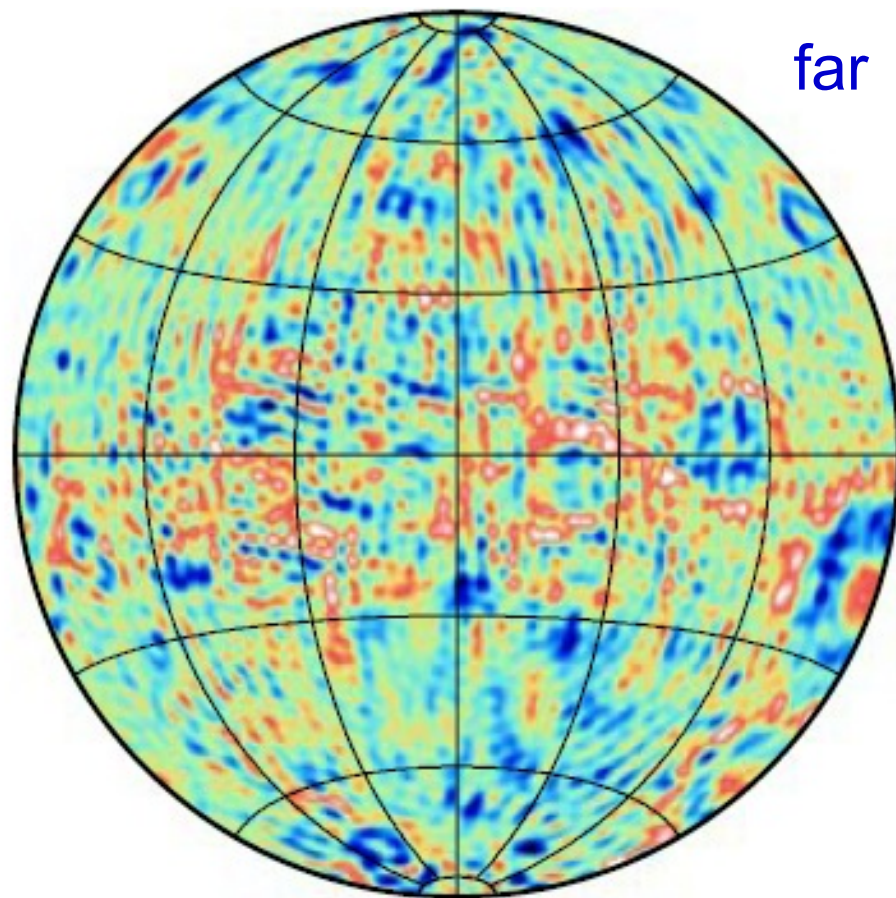


LP100K; 月表面の垂直方向重力加速度異常

near

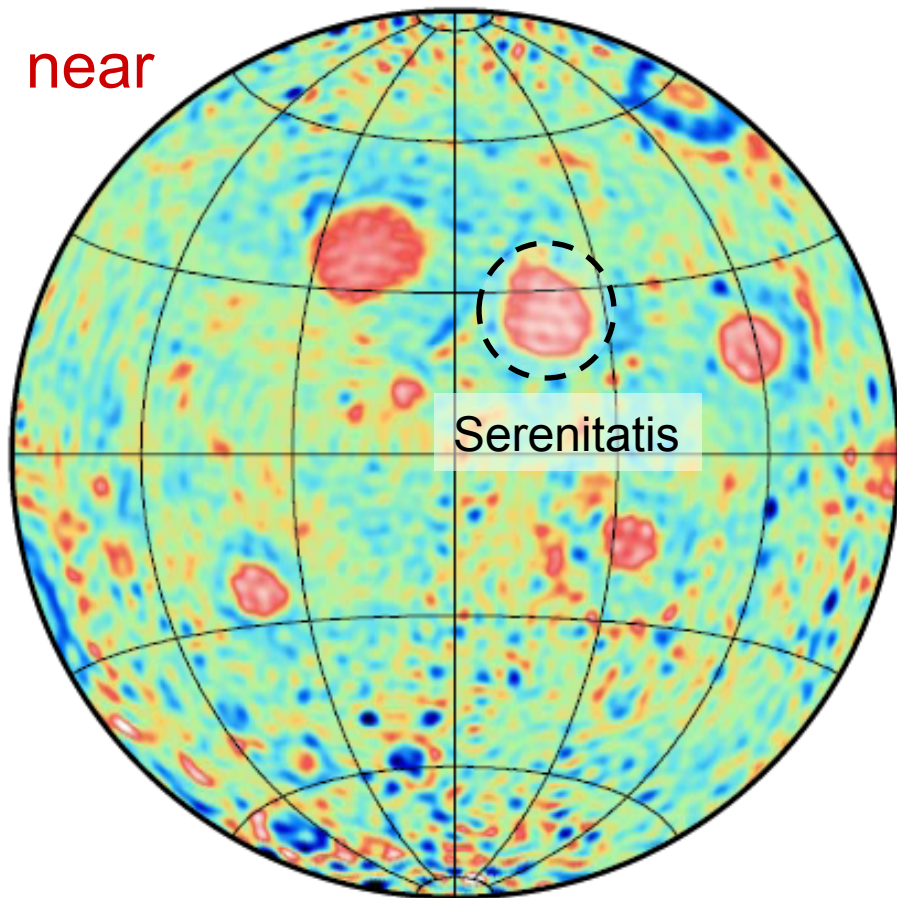


far

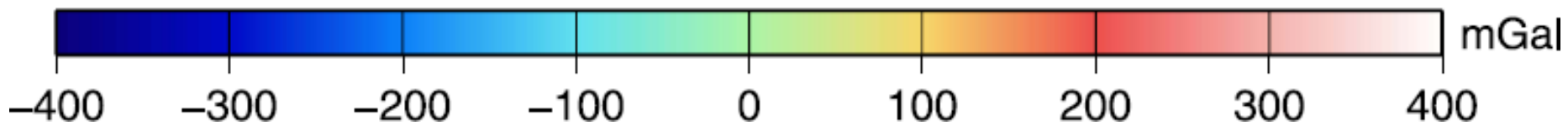
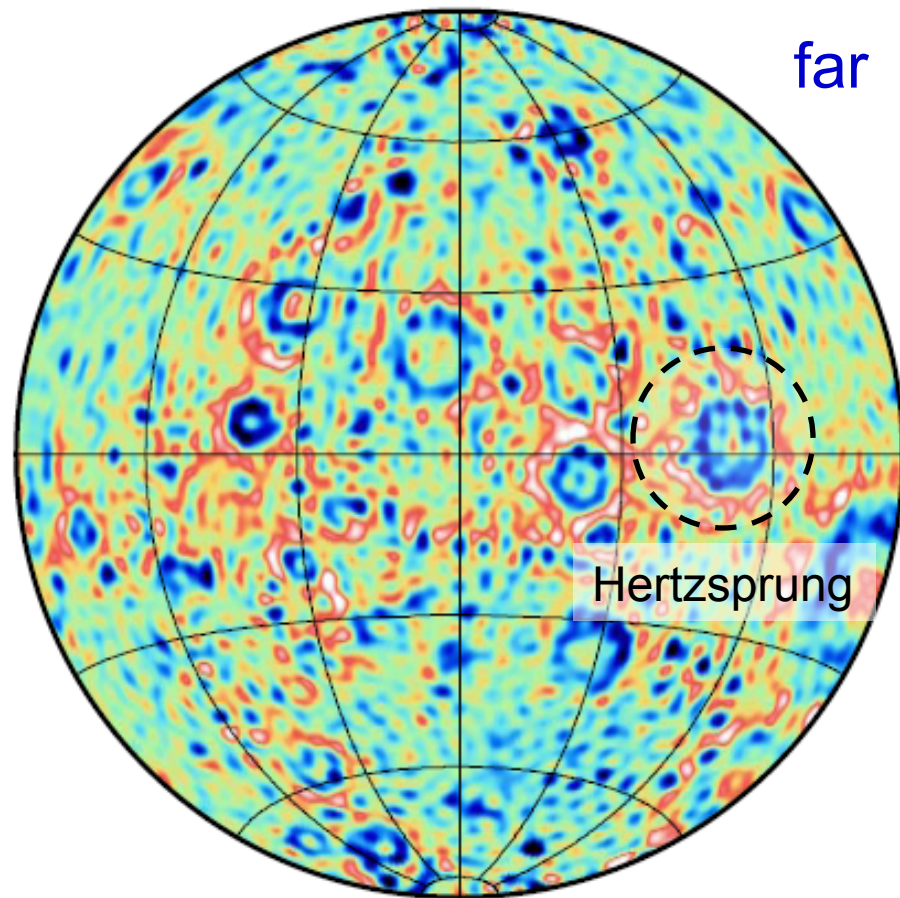


SGM100h; 月表面の垂直方向重力加速度異常

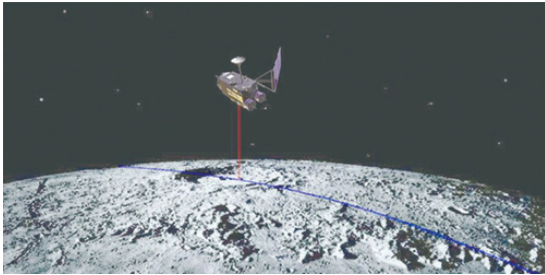
near



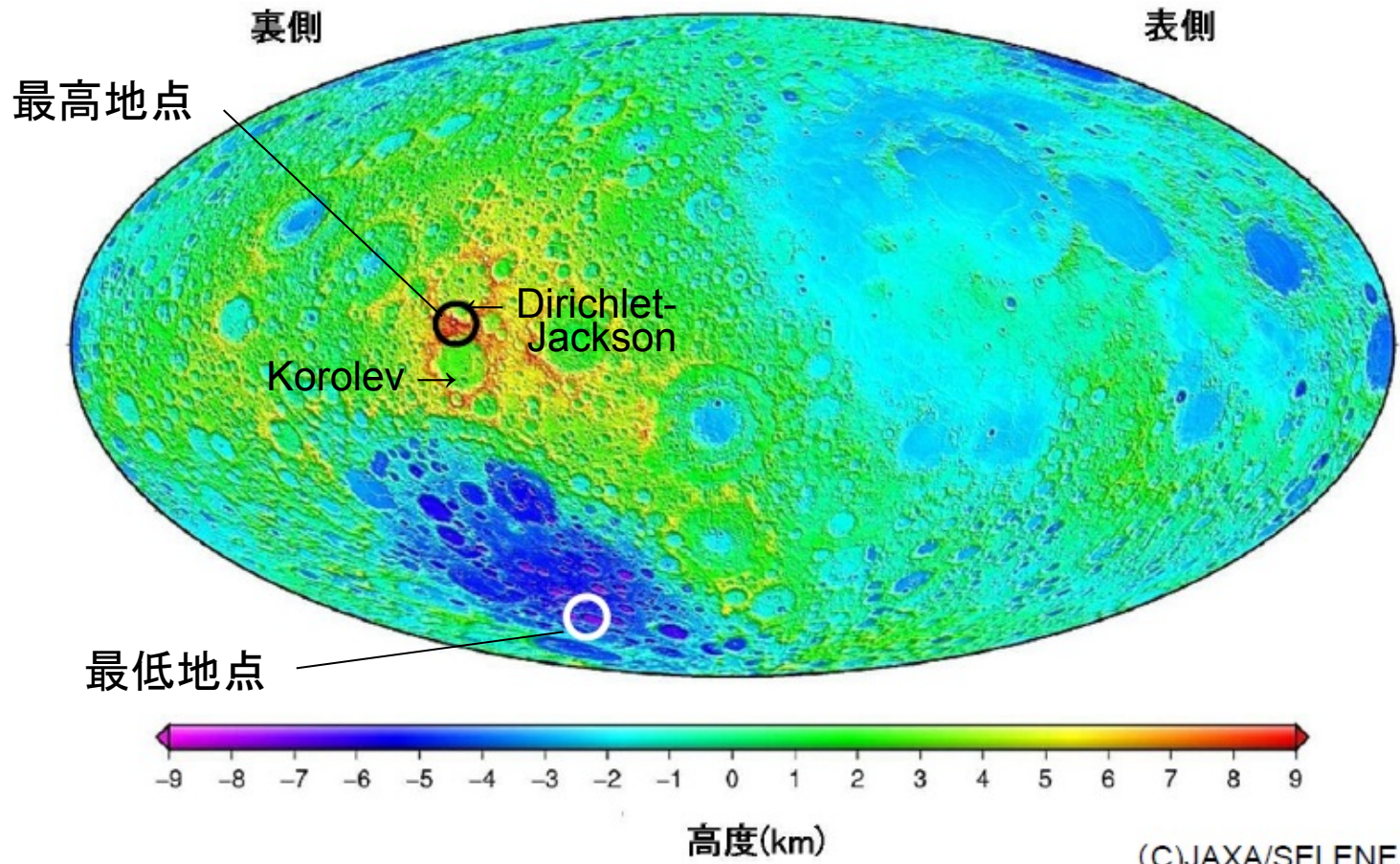
far



LALT(レーザ高度計)による月の地形

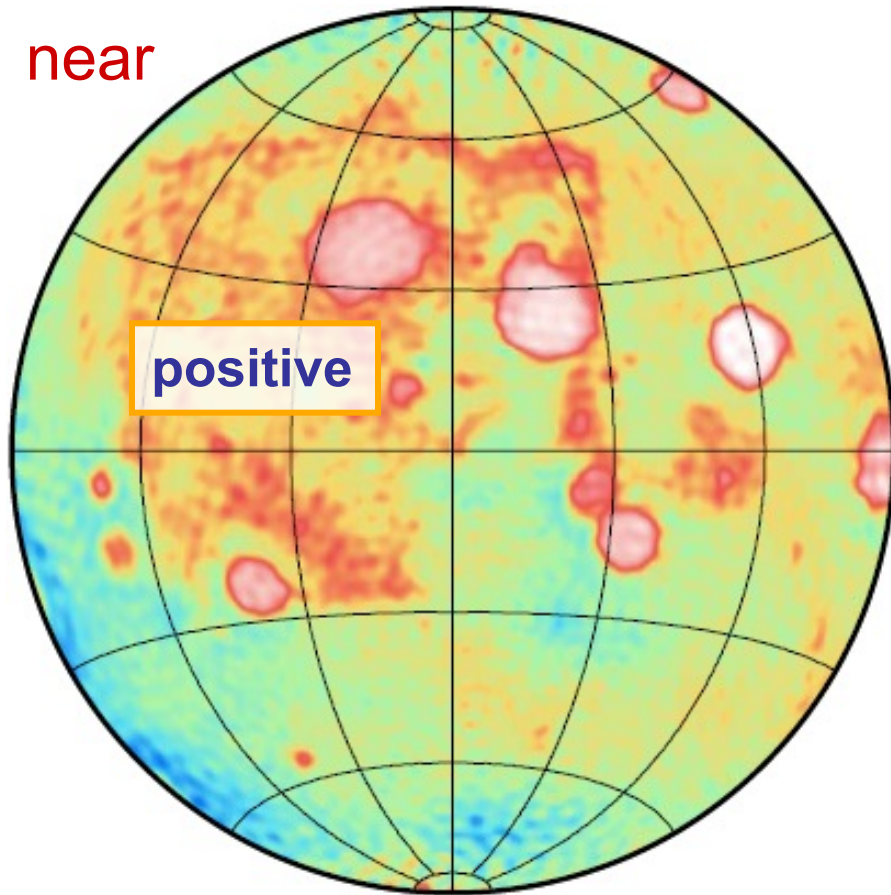


月の等高線地図 (ハンメル等積投影図法)

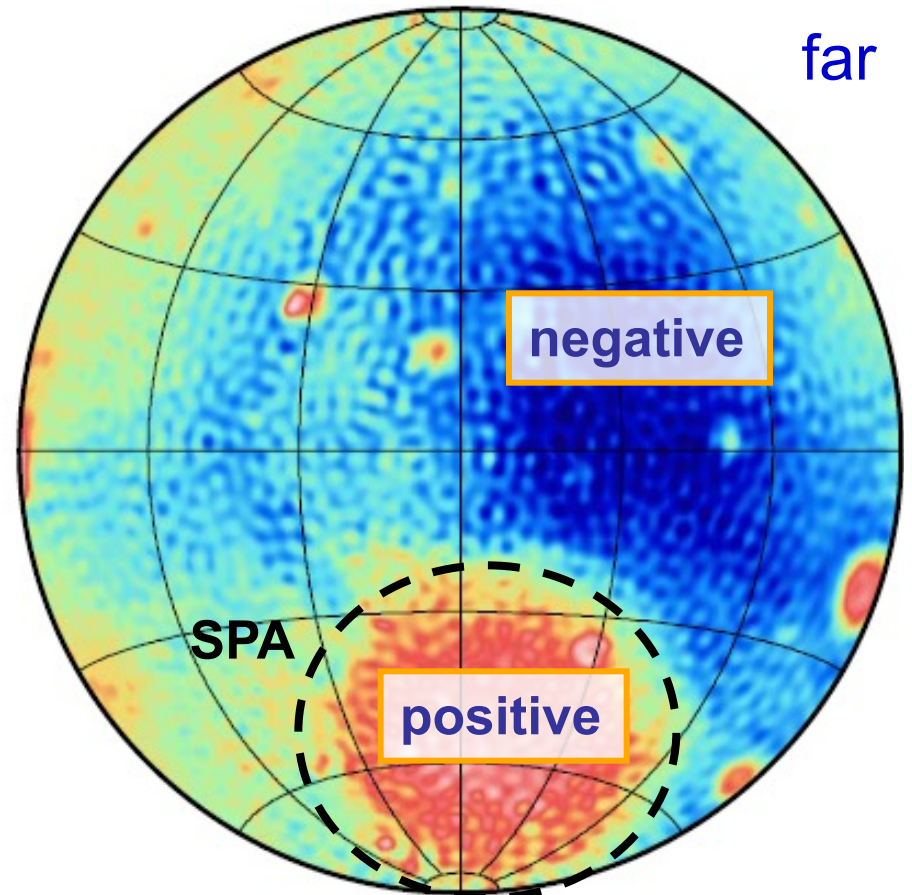


SGM100h; Bouguer重力異常

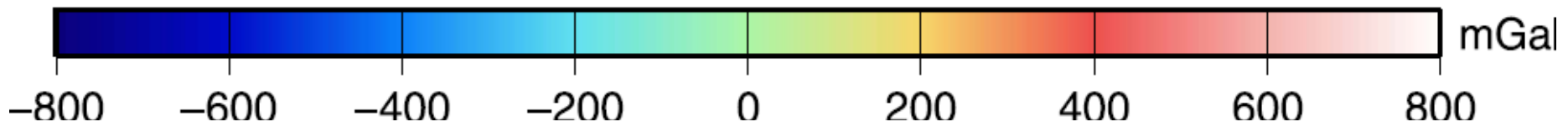
near



far

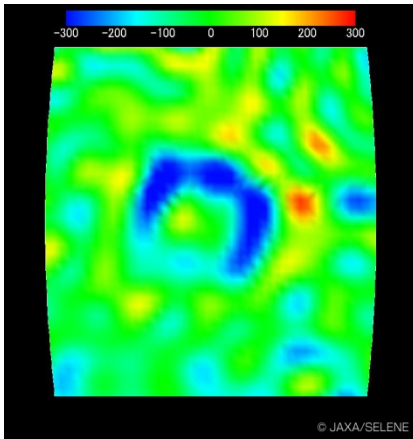


$$\delta g = 2\pi G \rho_{\text{crust}} h ; \text{ assuming; } \rho_{\text{crust}} = 2800 \text{ kg m}^{-3}$$



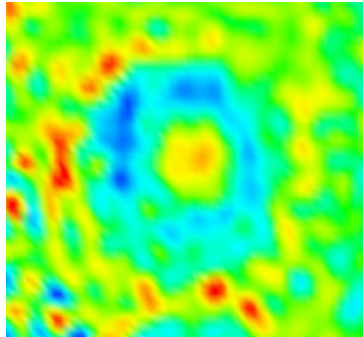
Three classifications of basins

after Namiki *et al.*,
(2009)



Apollo

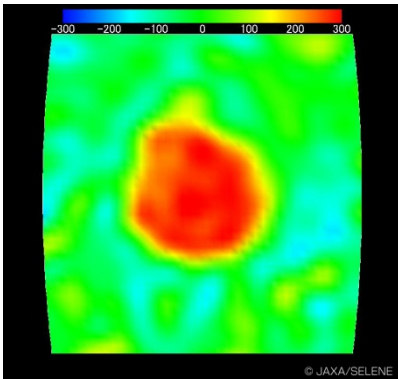
- Type 1** : - positive and negative ring
- no central peak in Bouguer



Orientale

- Type 2** : - positive and negative ring
- central peak in Bouguer

some of them have been reported as mascons



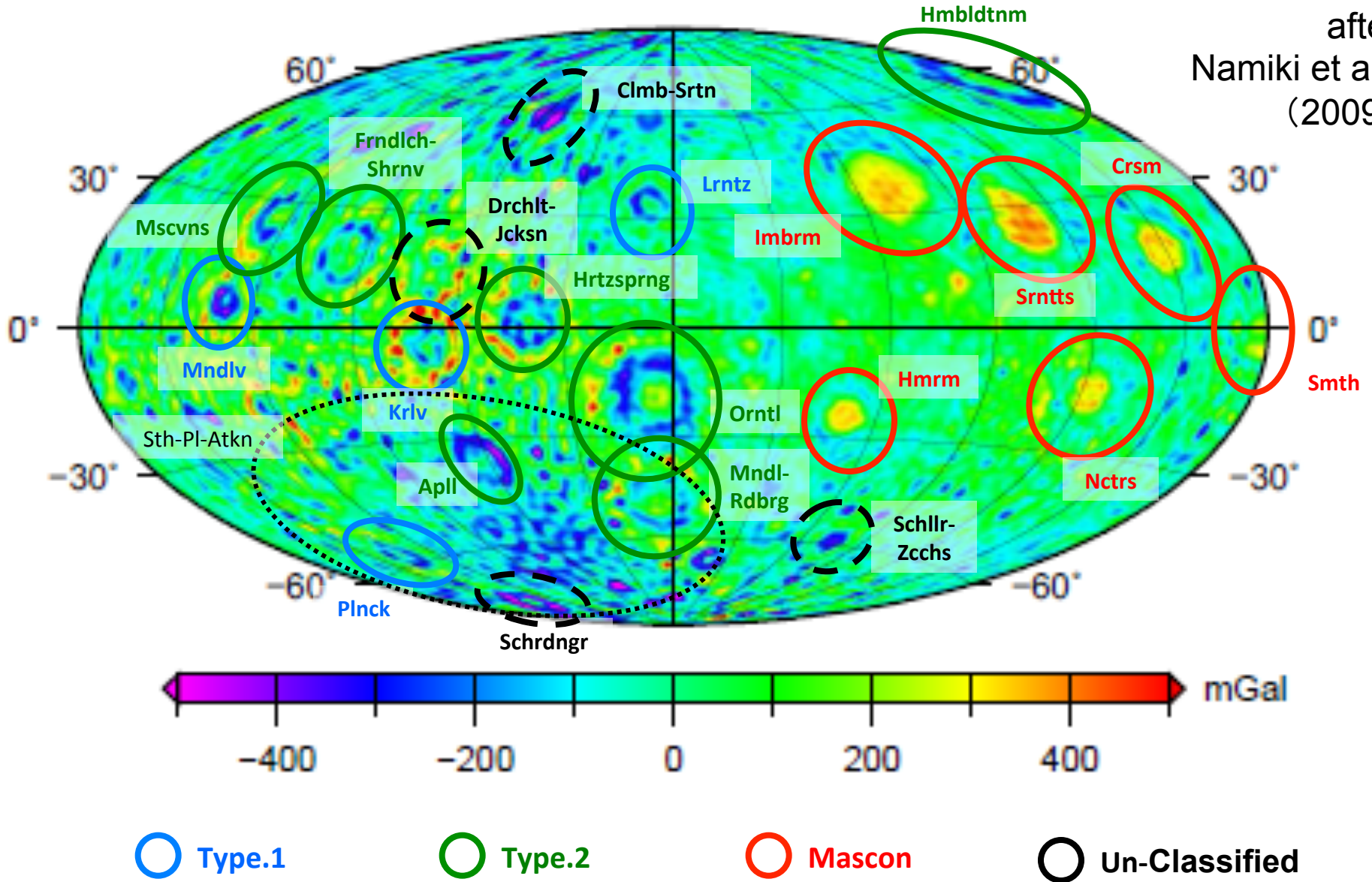
Serenitatis

Principal Mascon :

- positive circle in free-air and Bouguer

衝突盆地の再分類

after
Namiki et al.,
(2009)



Crustal thickness



Arkani-Hamed [1998]

$$W_{nm} = -\frac{\rho_c}{\Delta\rho} \frac{1}{\xi(n)} H_{nm}$$

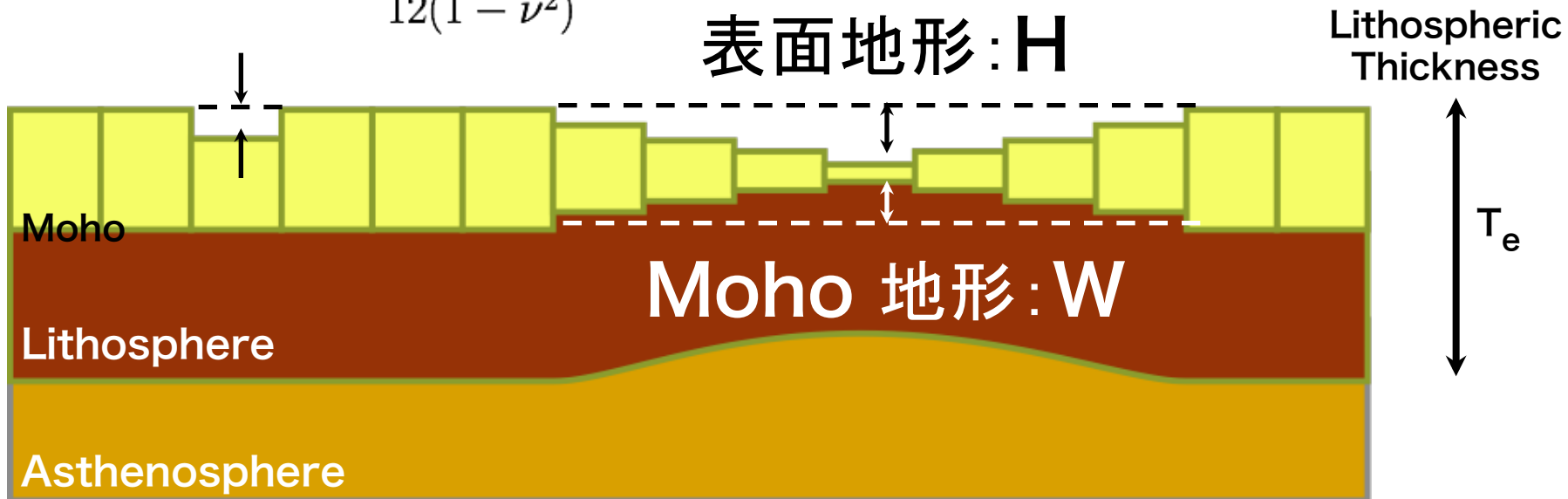
n : 球関数の次数
 $\Delta\rho$: 密度差
 E : Young率
 v : Poisson比

where

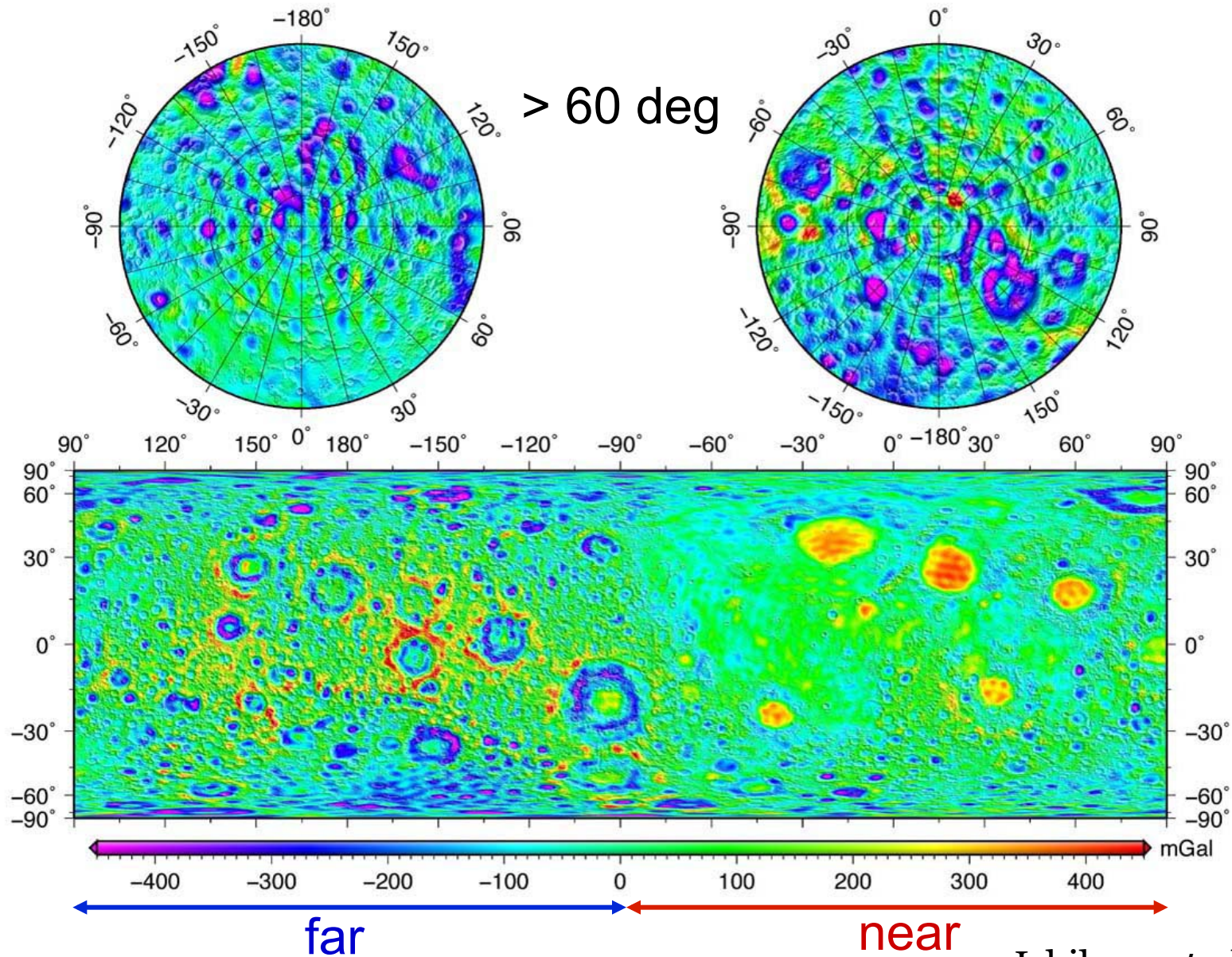
$$\xi(n) = \frac{Dn^2(n+1)^2}{R^4\Delta\rho g} + \frac{ET_e}{R^2\Delta\rho g} + 1$$

$$D = \frac{ET_e^3}{12(1-\nu^2)}$$

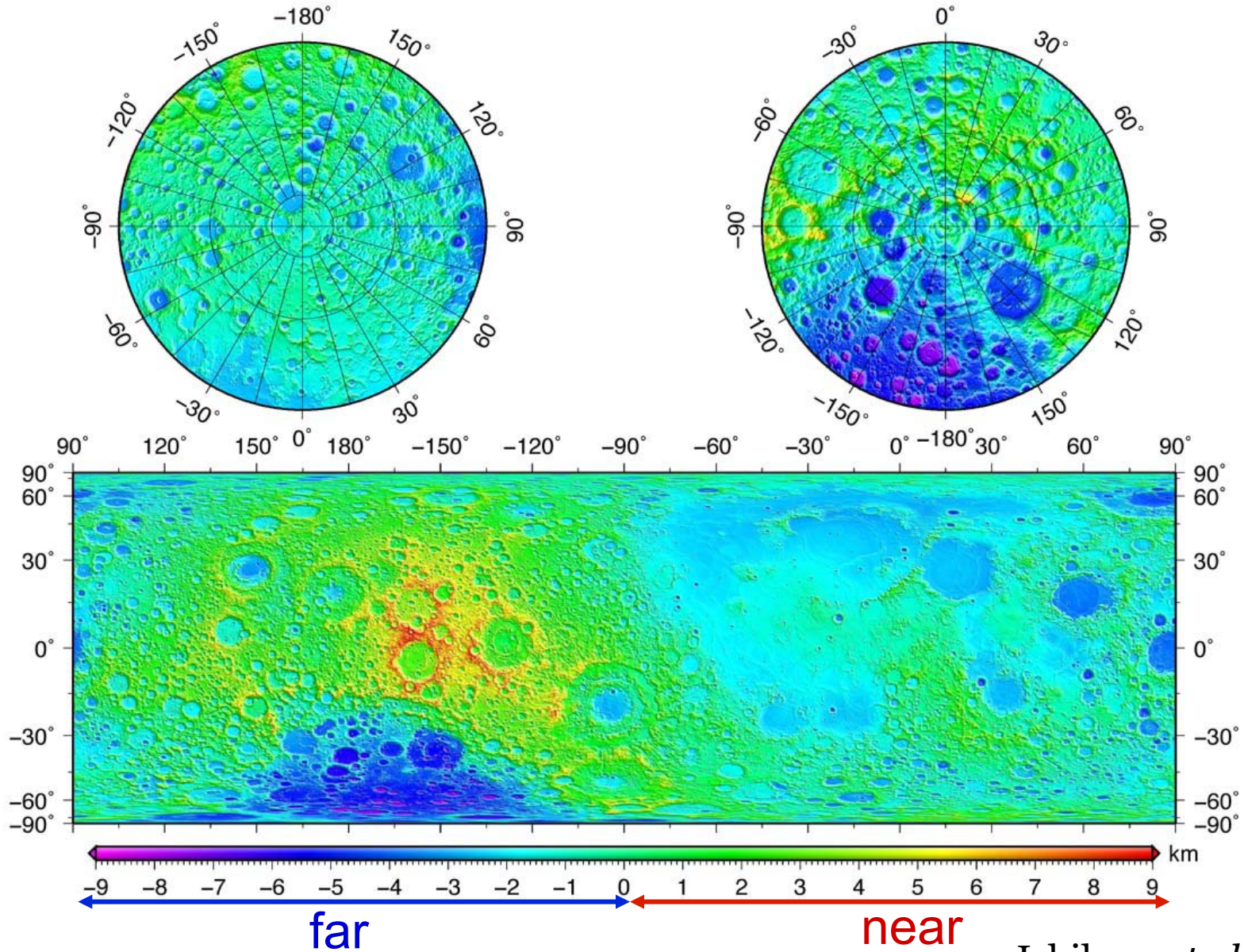
地殻均衡 → 地殻厚さの推定



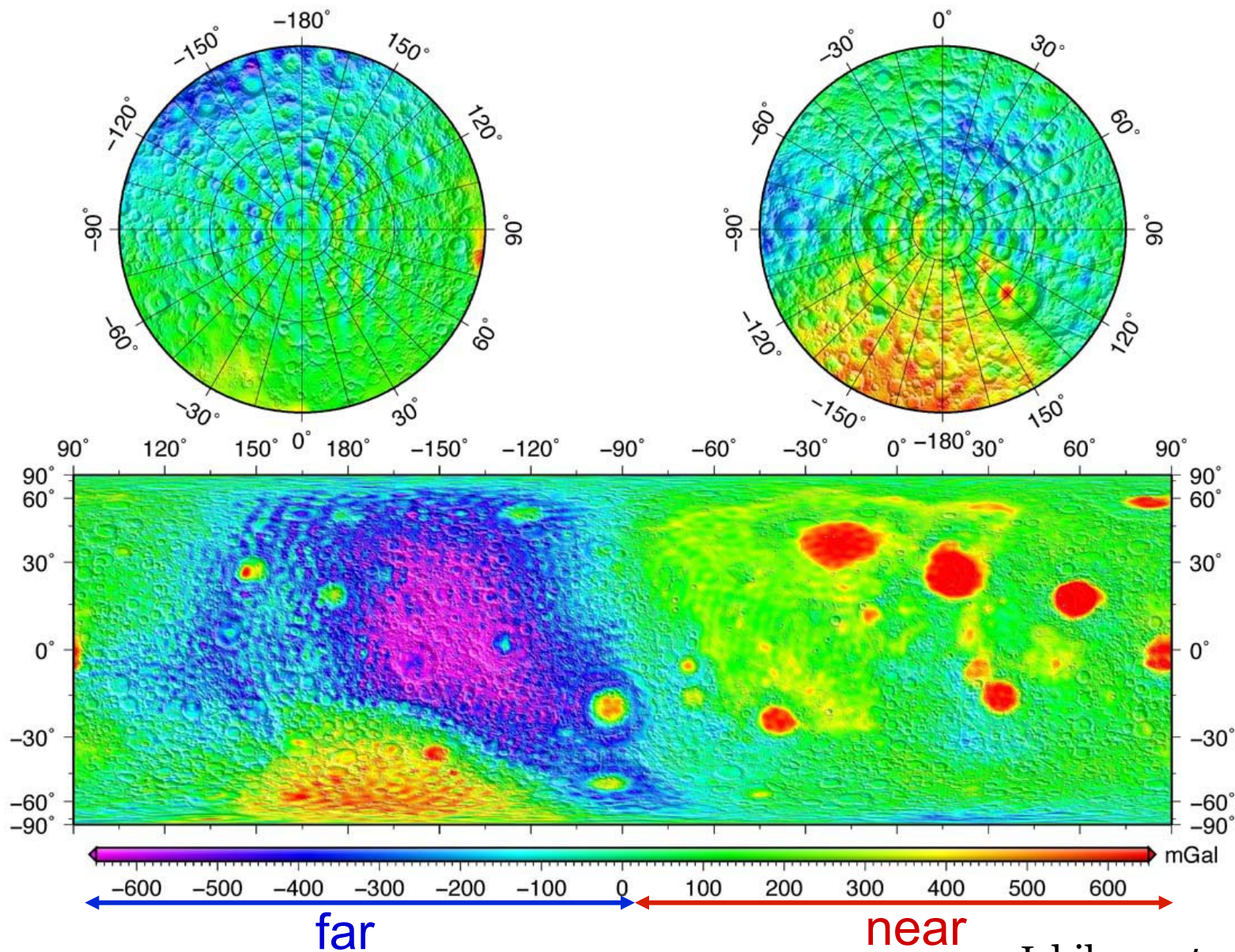
Free-air gravity anomaly



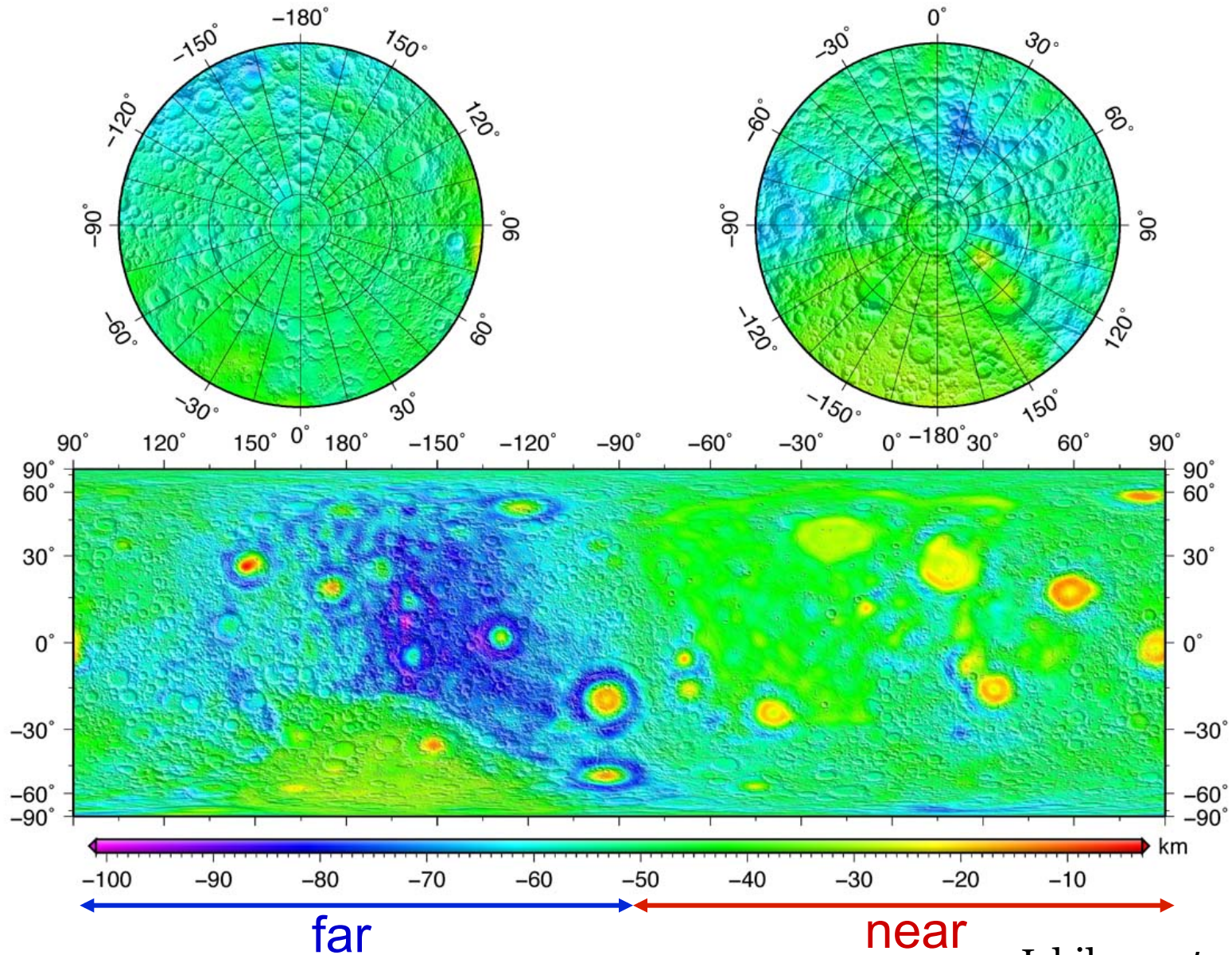
Topography by LALT



Bouguer gravity anomaly



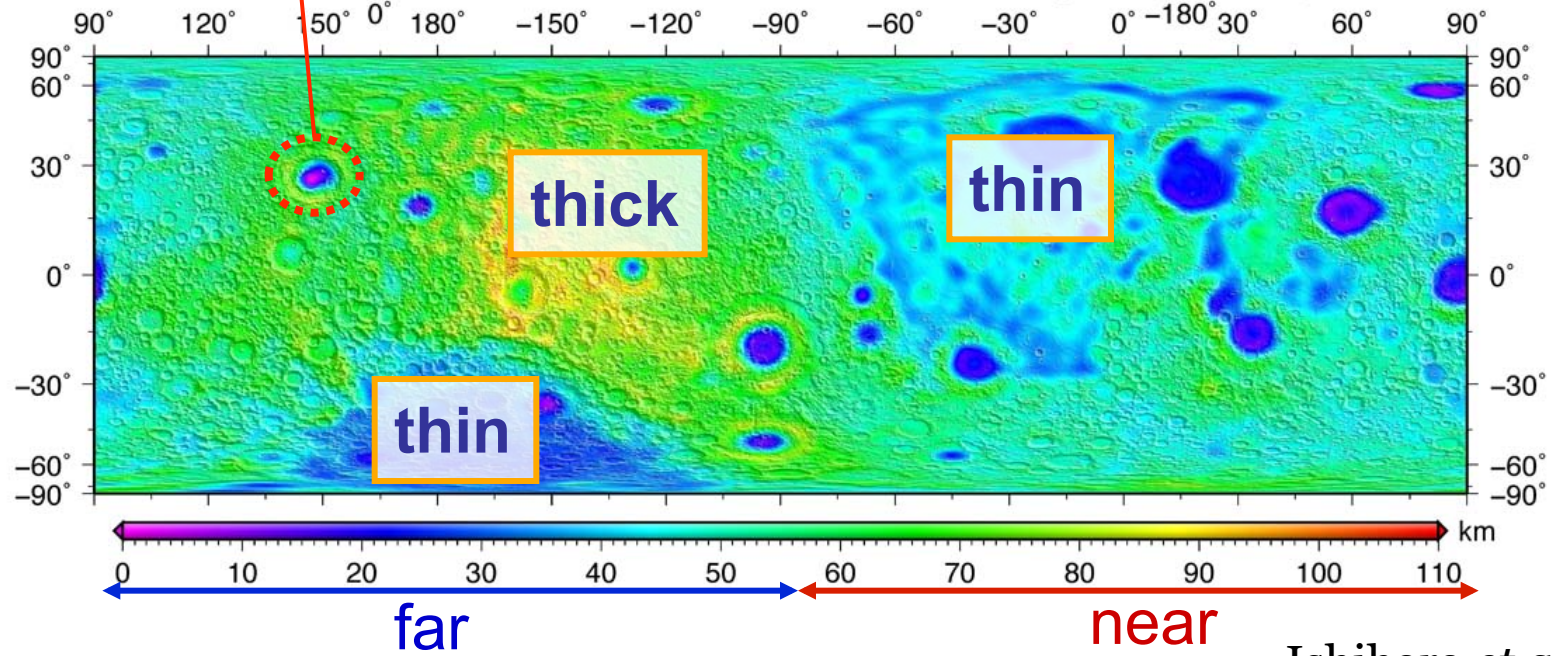
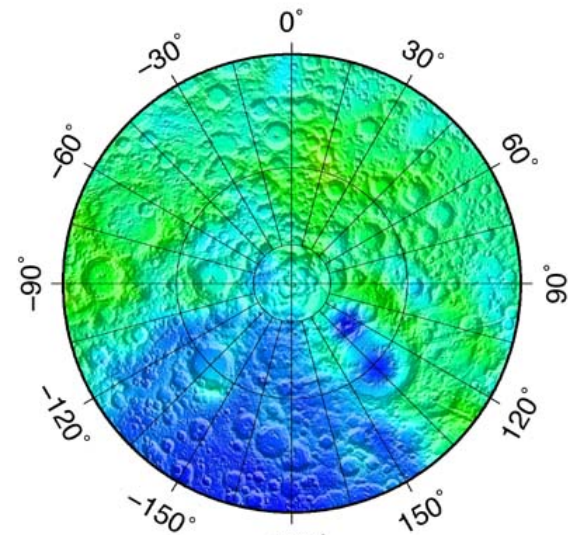
Moho depth



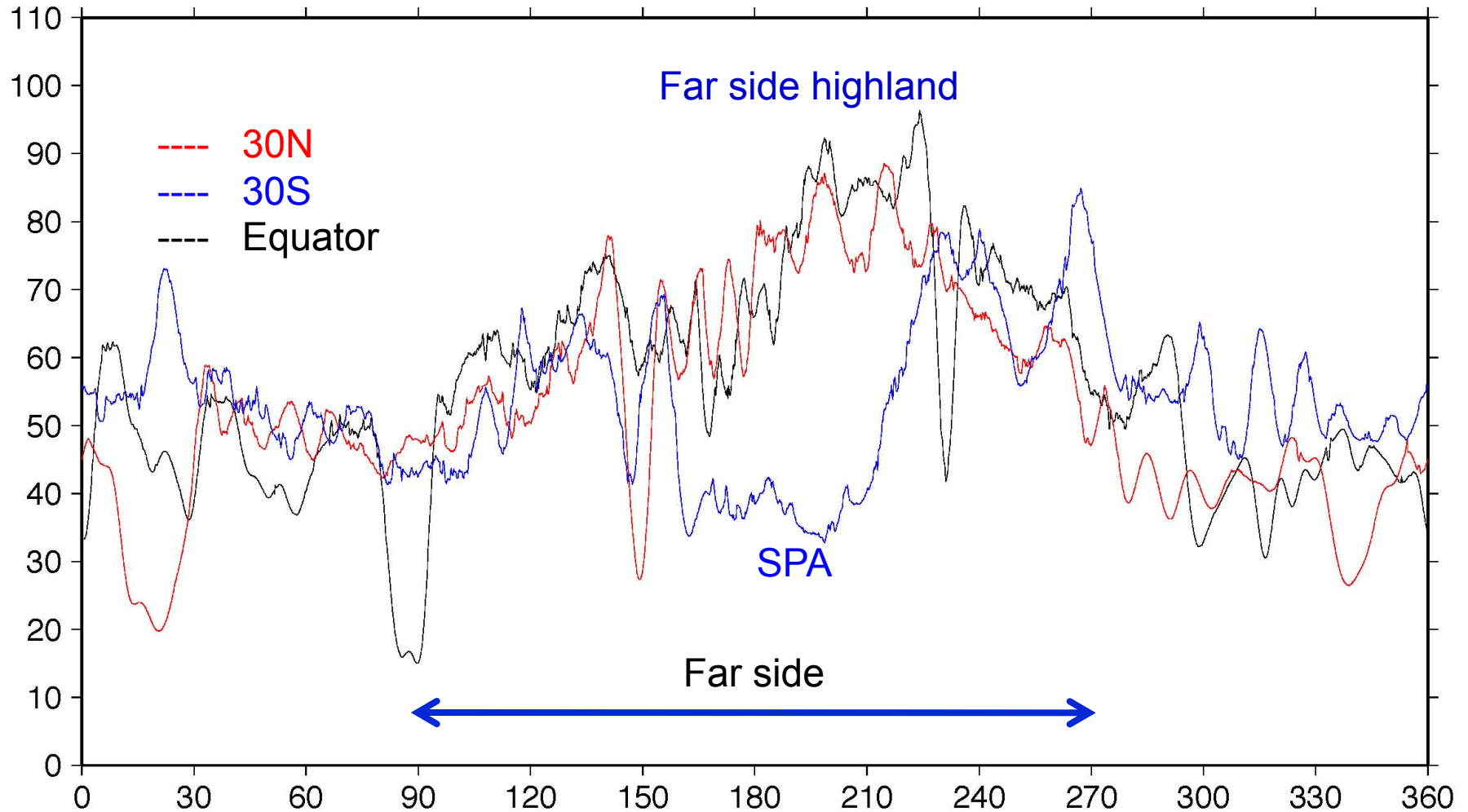
Crustal thickness

$$\rho_{\text{mantle}} = 3360 \text{ kg/m}^3$$
$$\rho_{\text{crust}} = 2800 \text{ kg/m}^3$$
$$\rho_{\text{basalt}} = 3200 \text{ kg/m}^3$$

The thinnest crust
> 0 km (Mare Moscoviense)



Crustal thickness variation



Comparison of crustal thickness

This work:

- Apollo 12 : 45.1 km
- Apollo 14 : 49.9 km

Khan *et al.*:

- Apollo 12/14 : 45 ± 5 km

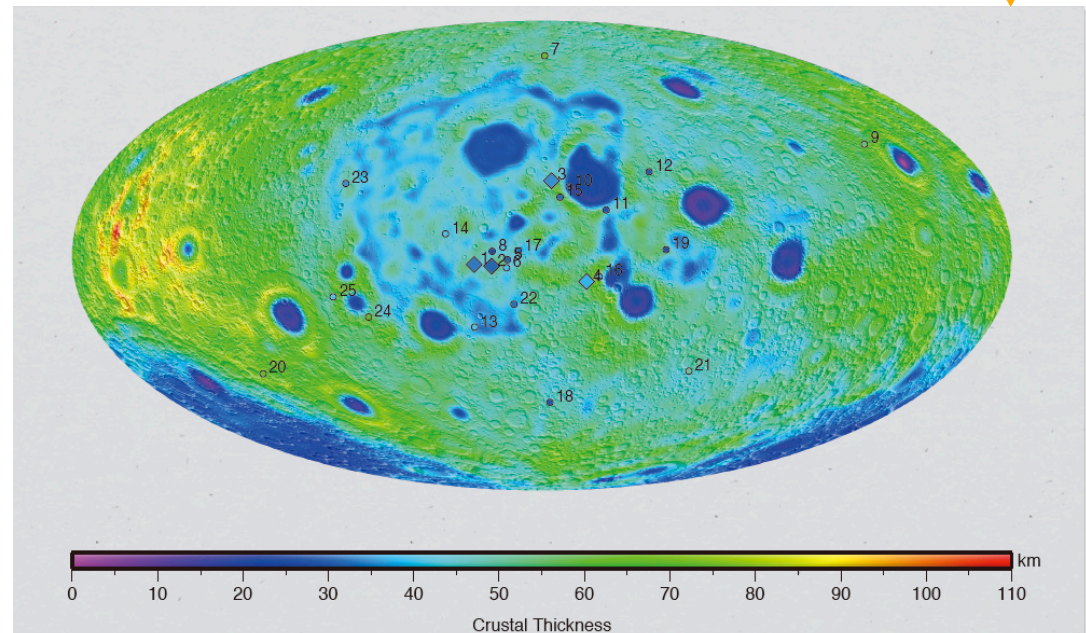
Lognonné *et al.*:

- Apollo 12/14 : 30 ± 2.5 km

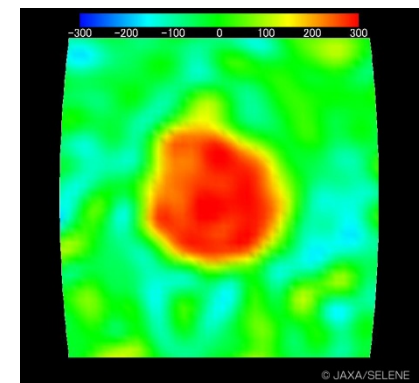
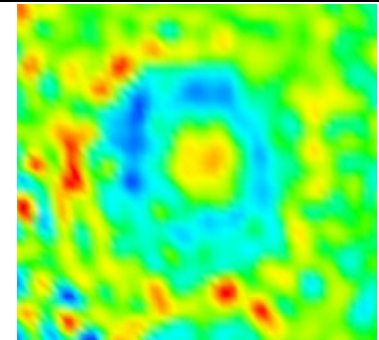
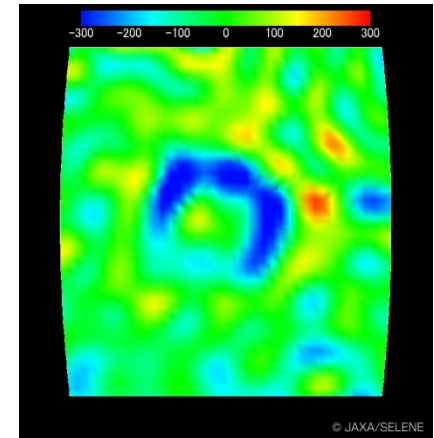
Chenet *et al.*:

- Apollo 12/14 : 33.4 ± 5.3 km

Comparison with Seismically-determined crustal thicknesses below impact points (Chenet *et al.*, 2006).



Origin of
Type 1 basin
Type 2 basin
Mascon



Excavation Cavityの復元

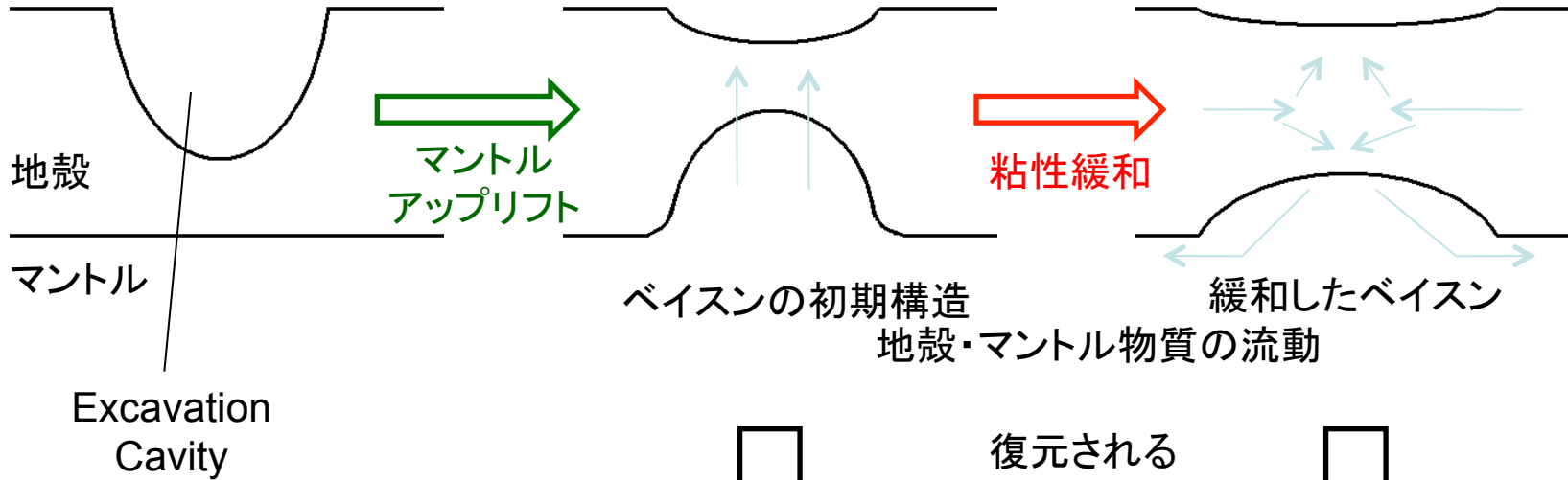
粘性緩和における
地殻・マントル物質の
流動

水平方向

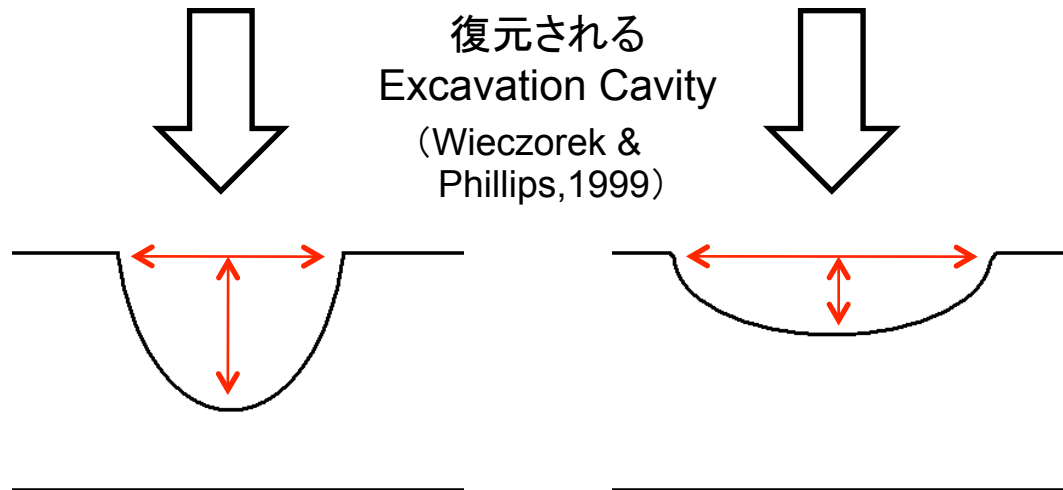
復元されるCavityの
深さ/ 直径比を減らす

鉛直方向

ベイスンをアイソスタシーの
状態に戻す

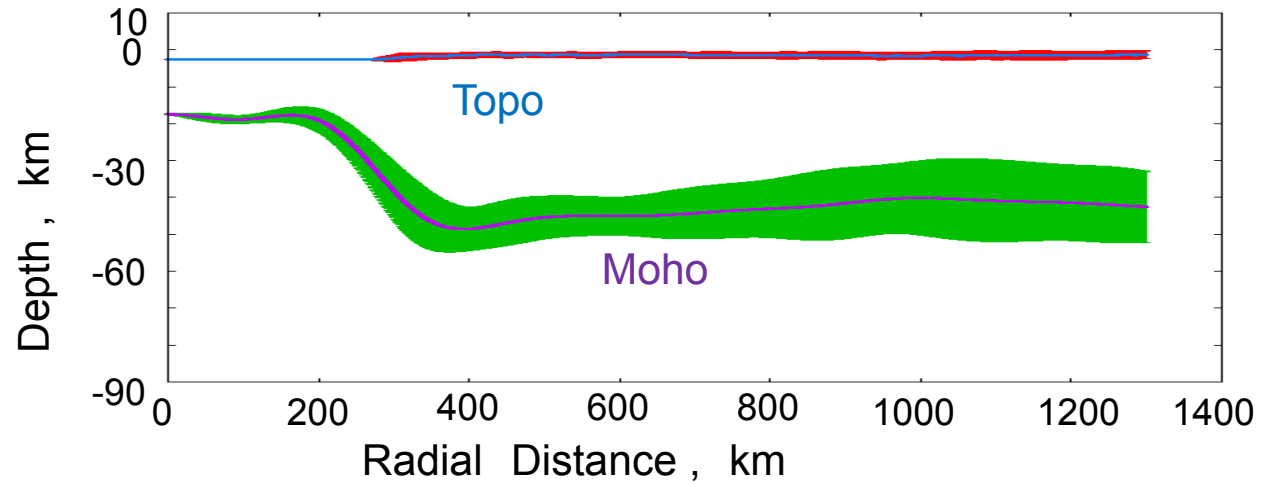


復元される
Excavation Cavity
(Wieczorek &
Phillips, 1999)

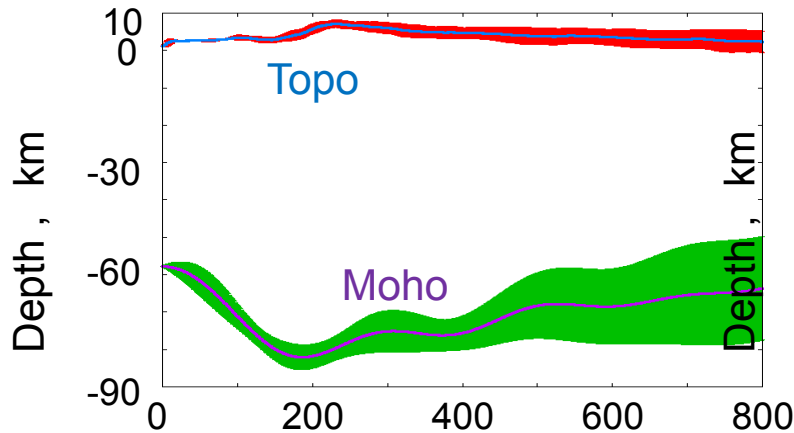


Examples of recovered excavation

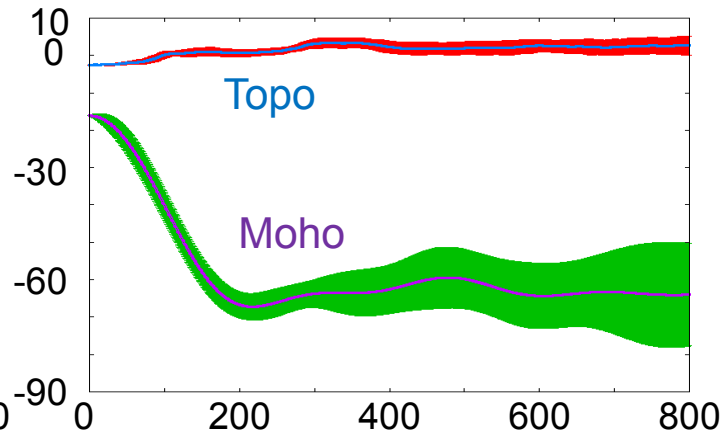
• Mascon
Serenitatis



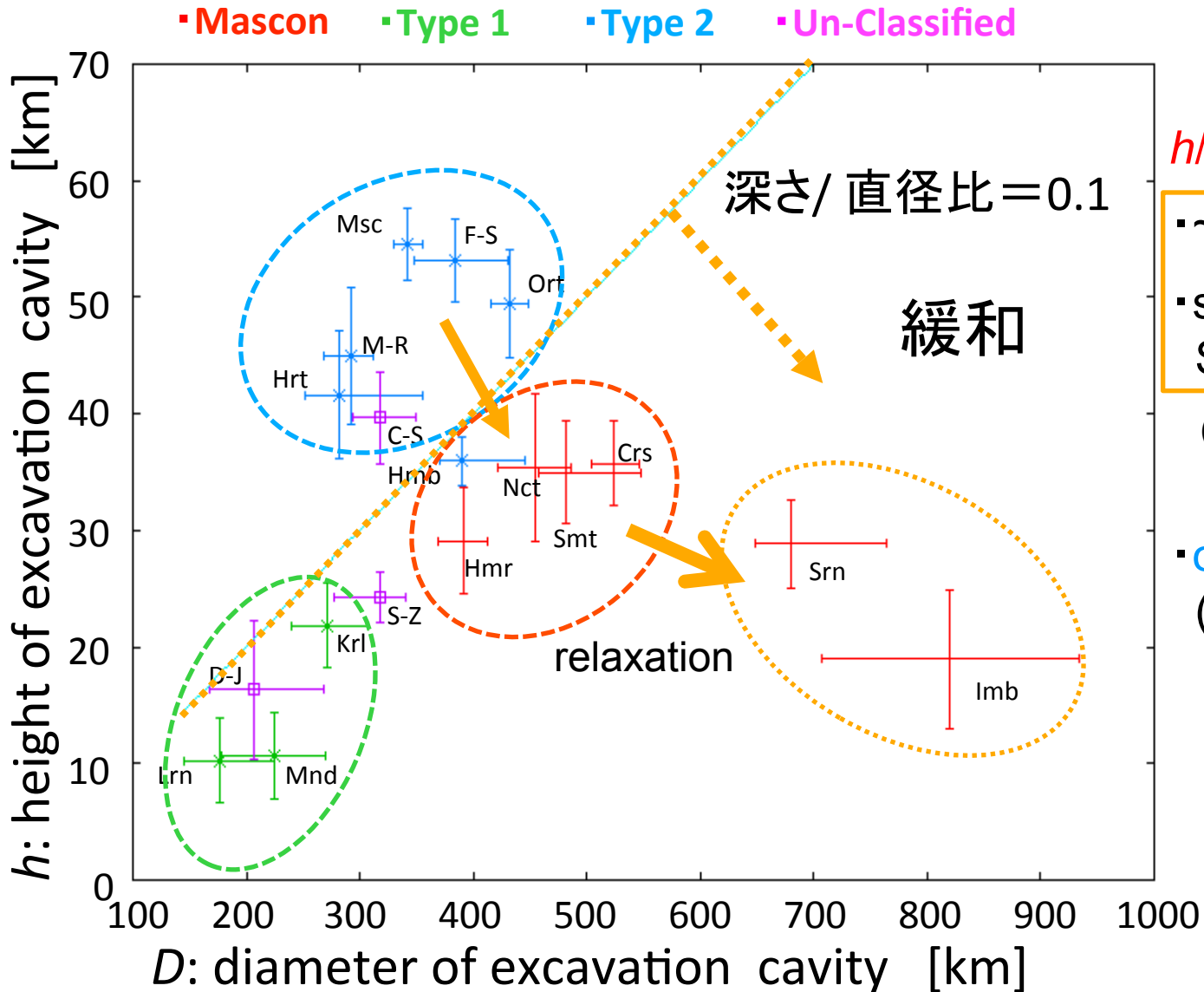
• Type.1
Korolev



• Type.2
Freundlich-Sharonov



height / diameter ratio of excavation cavities



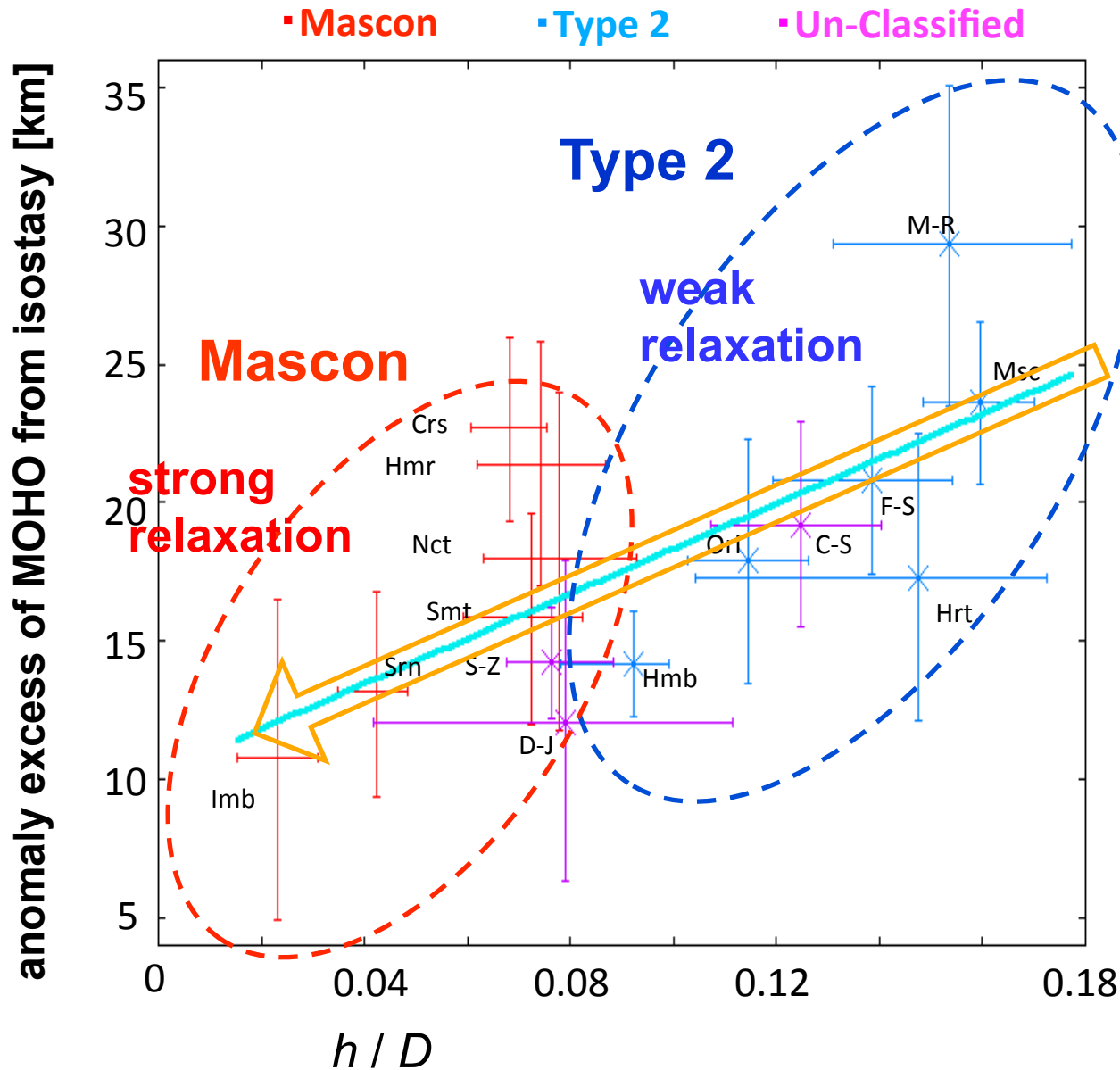
h/D ;

- ~0.1 at the most
- small at Imbrium, Serenitatis

(Wieczorek & Phillips 1999)

- other three types (this work)

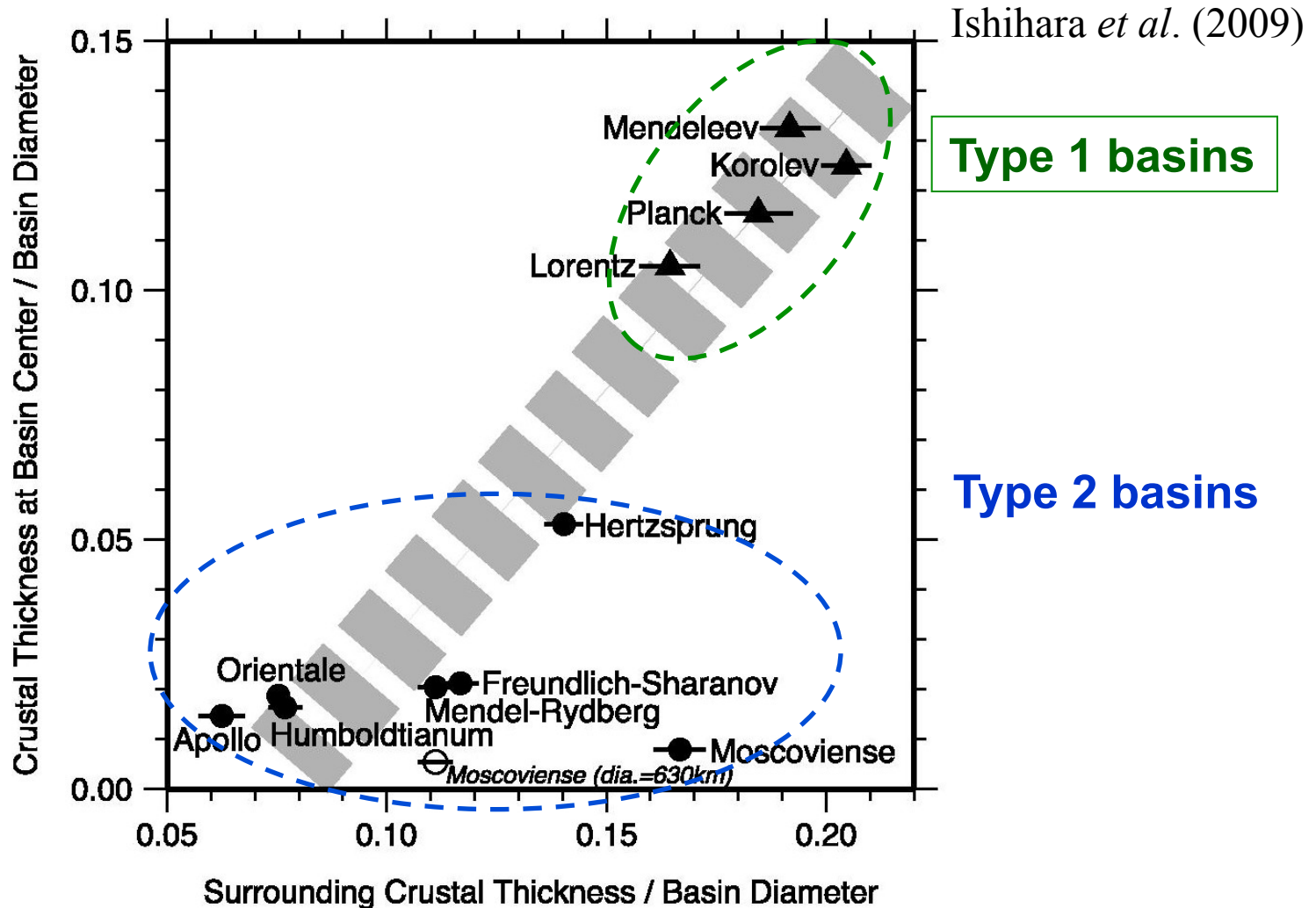
Relaxation from Type II basin to mascon



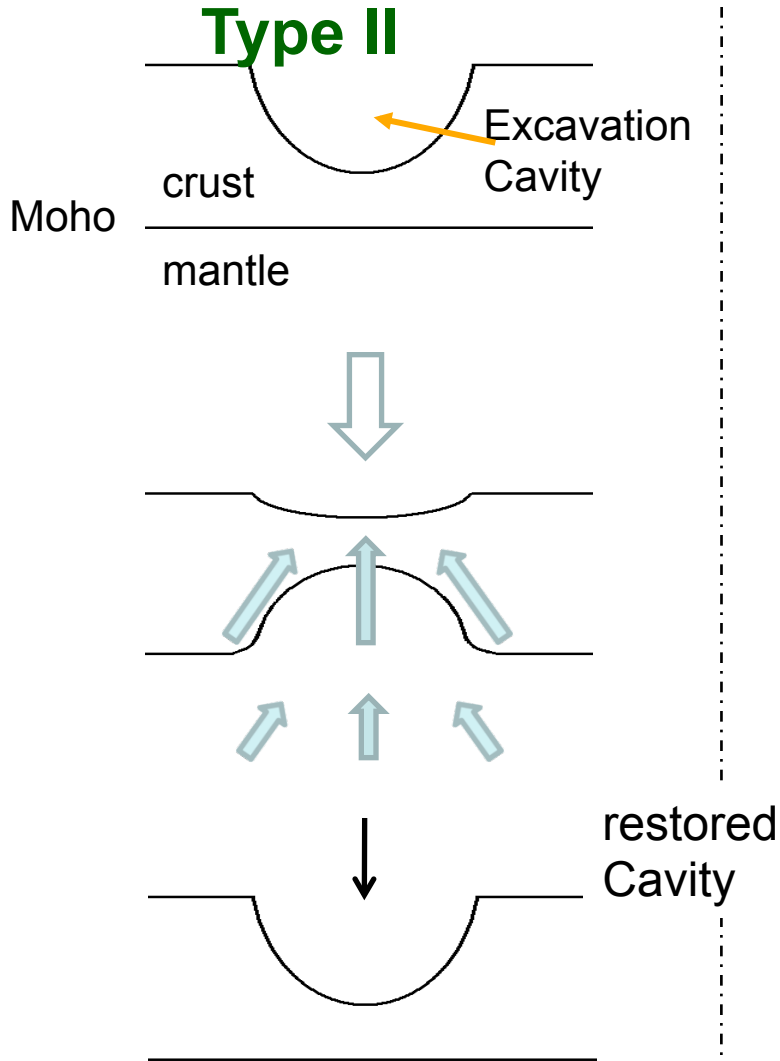
(correlation coefficient; 0.68)

Basin structures from crustal thickness

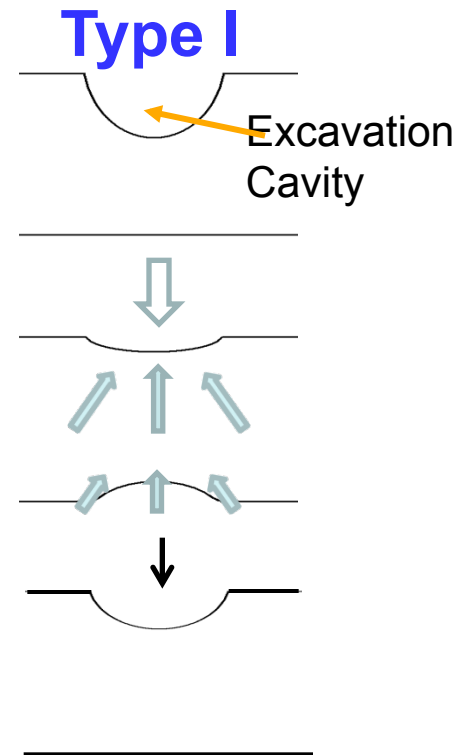
Difference **type 1** and **type 2** basins: ratio of pre-impact crustal thickness (Moho depth) and impact scale



Different magnitude of impact: Type I & II



Type II : large impact
Type I : small impact



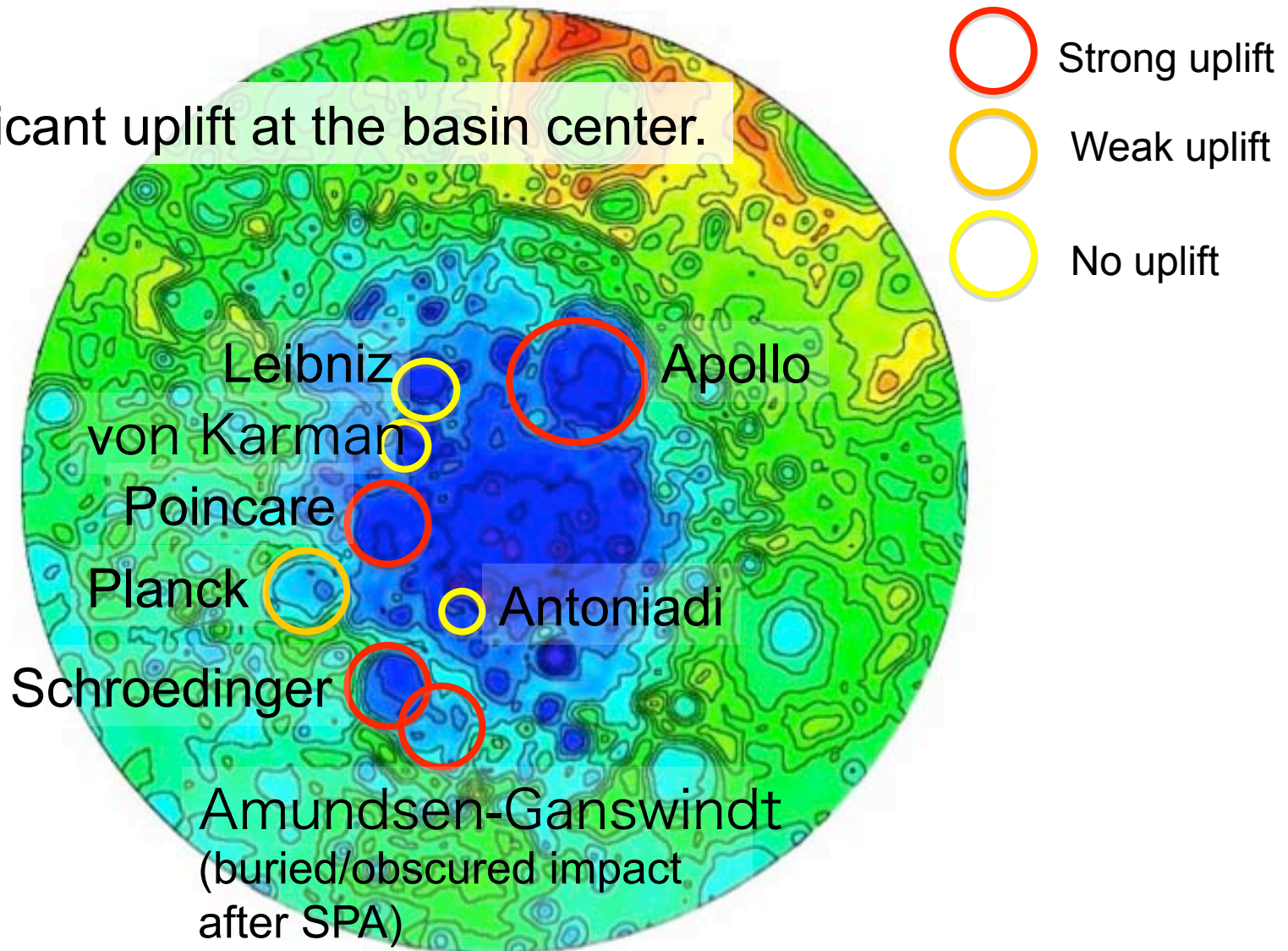
- Kaguya's global gravity map shows the **dichotomy of the gravity anomaly shapes** between lunar near and far side.
- **Positive** / **negative Bouguer** anomalies are associated on **FHT and SPA** / **far-side**, respectively.
- Crustal thickness variation is similar to the seismic estimate but would have constant offset.
- **Type 2** / **mascon** suggests the viscous relaxation processes.
- **Type 1** / **type 2** suggests the relationship between crust thickness and impact scale.

SPA: South-Pole Aitken basin

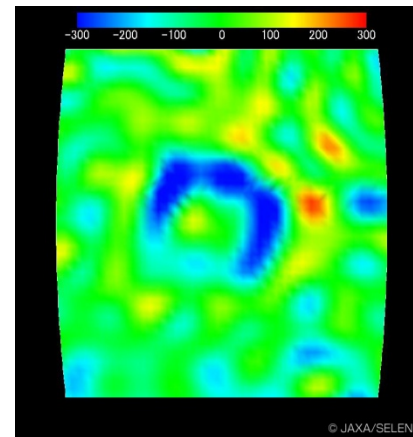
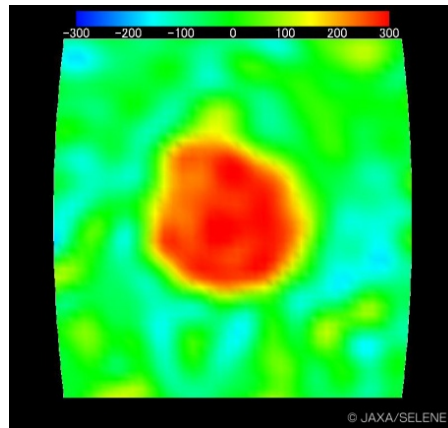


Mantle uplift below impact basins in SPA

Significant uplift at the basin center.



Dichotomy

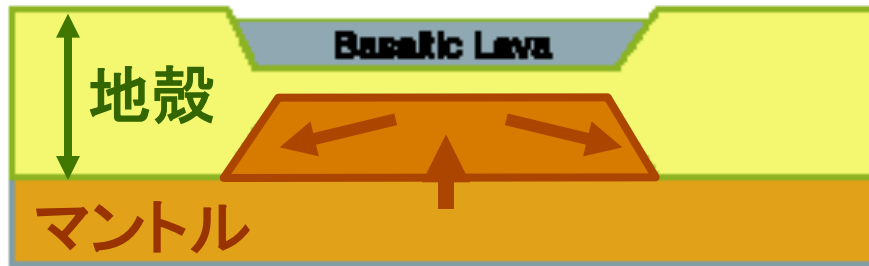


月の表と裏の内部の違い(二分性)

表

赤線=重力の強さ

↑強い



マントルの上昇

裏

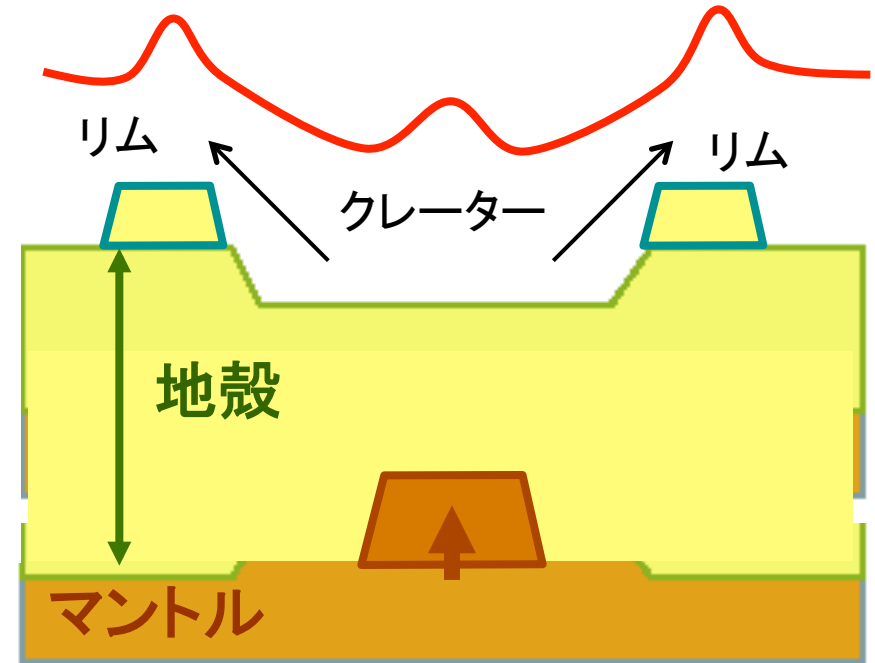


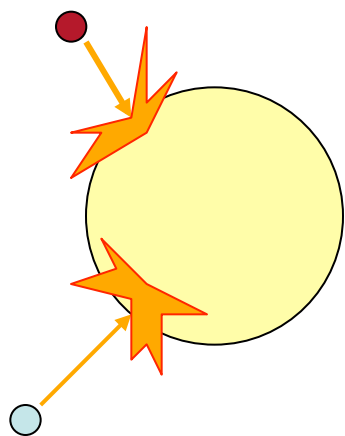
表: 地殻が薄い
温度が高かった

裏: 地殻が厚い
温度が低かった

→初期温度の違い?、冷却プロセスの違い?

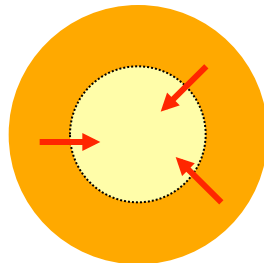
月の進化の再モデル化

月形成



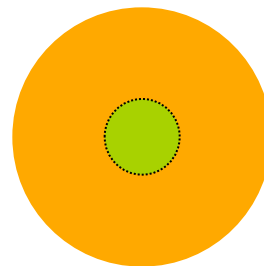
全／部分溶融

- 集積エネルギー
- 放射壊変エネルギー
- 地球潮汐作用



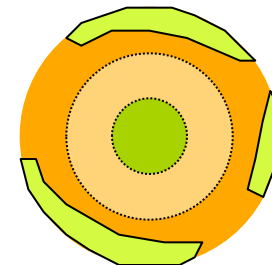
内部分化

- コア分離
- マグマオーシャンの発達

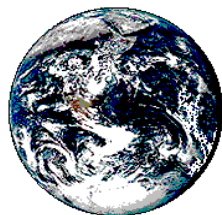


内部分化

- マントル固化
- 斜長岩地殻形成

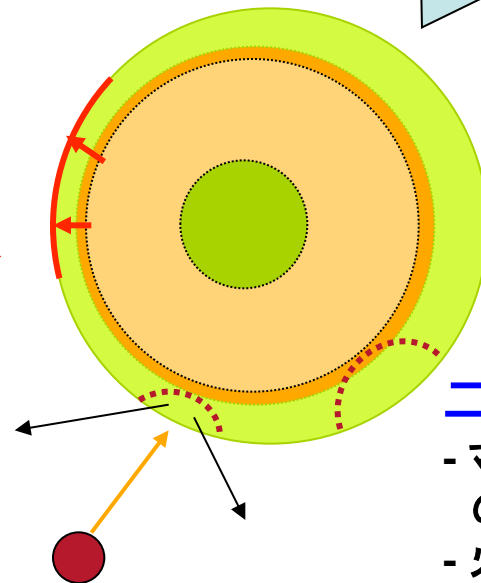


地球の引力の影響？



表

裏



二分性

- マグマオーシャンの固結
- 火成活動

Conclusions

- Global and accurate **gravity / topography** maps and **crustal thickness / MOHO** maps were obtained. The accuracy of gravity above the **far side** were significantly improved.
- **Mantle uplifts** and their **viscous relaxations** are exceeded below the impact basin on the **near side**.
- Impact basin-ring topography is mostly **supported by crust** on the **far side**.
- The difference of gravity field structure suggests the **dichotomy** of inner structures and viscous processes, which supports and suggests the difference of **crustal thickness and temperature**, respectively

Lunar core



慣性モーメントは重力場の2次の項で決まる：

$$C / MR^2 = 4 C_{22} / \gamma$$

$$I / MR^2 = 4 C_{22} (3 + \beta + \gamma - \beta\gamma) / 3\gamma(1 + \beta)$$

$$1 / MR^2 = 2 J_2 / [C - (A + B)]$$

力学的扁平率： $\beta = (C - A) / B$, $\gamma = (B - A) / C$

(A, B, C : 主慣性能率, $A < B < C$)

$C / MR^2 < 0.4 \rightarrow$ コア

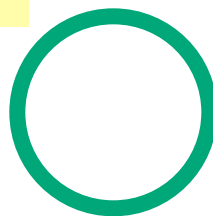
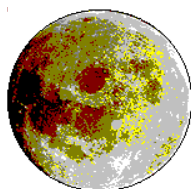
地球 : 0.33

火星 : 0.36

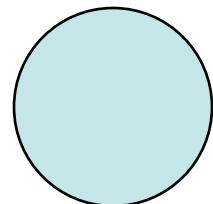
月 : 0.39

月の慣性モーメント？

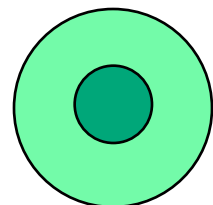
$$C / MR^2 = \boxed{?}$$



$$\boxed{2/3} = \text{球殻}$$



$$\boxed{2/5} = \text{一様球}$$



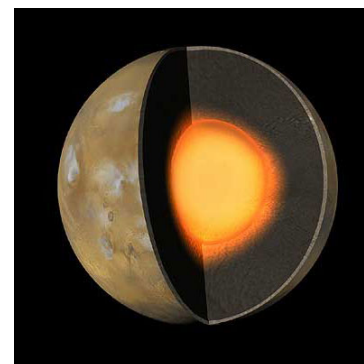
$$\boxed{<2/5} = \text{コア}$$

月重力場の
2次の係数に依存

cf.

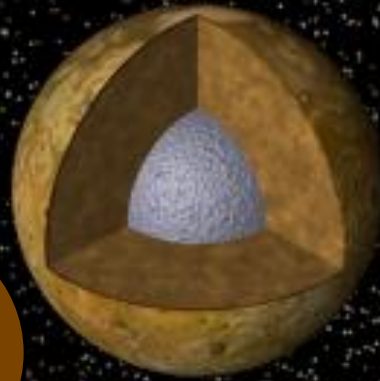
- 地球 : $C / MR^2(\oplus) = 0.33$

- 火星 : $C / MR^2(\♂) = 0.3635$

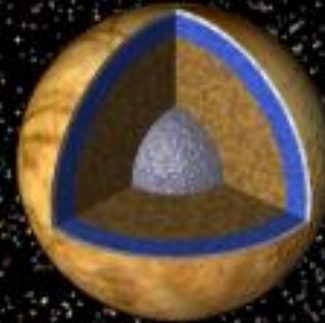


他天体との比較 : Galilean Satellites

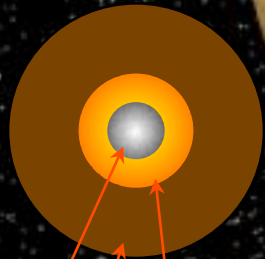
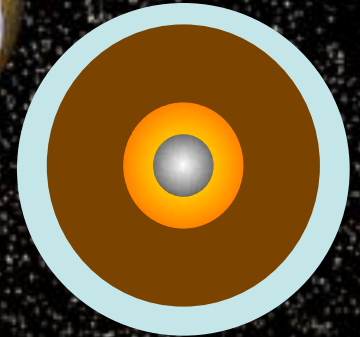
Heki (2004), Sasaki (1997),
and references there in



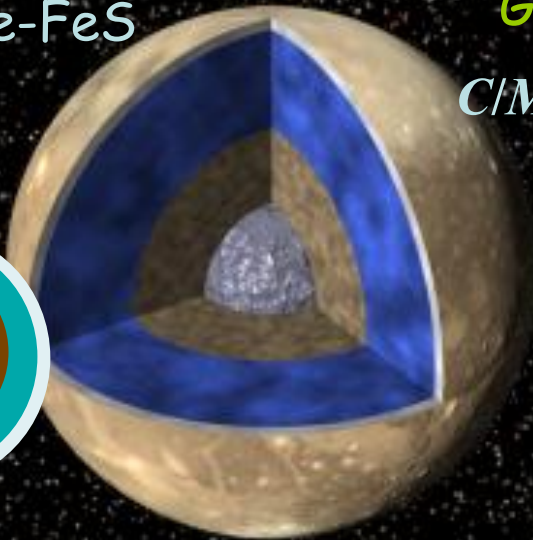
Io
 $C/MR^2=0.378$



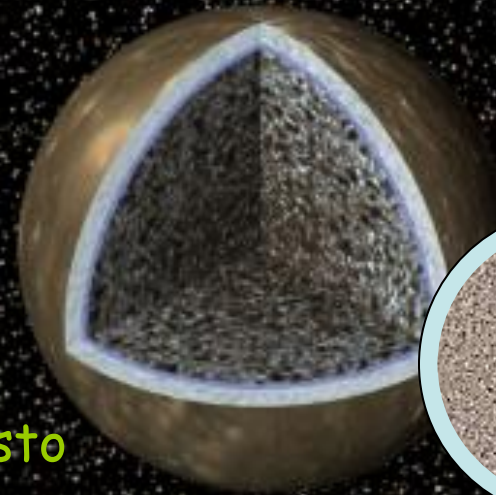
Europa
 $C/MR^2=0.330$



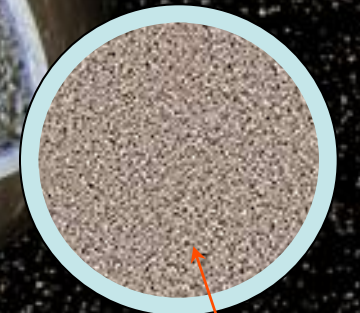
Fe Fe-FeS
Silicate



Ganymede
 $C/MR^2=0.3105$



Callisto
 $C/MR^2=0.406$
 $\rightarrow 0.3537?$



Mixture



Water Ice

LLR (レーザ測距)

0.394 ± 0.002



衛星測距 (LP75G)

0.3932 ± 0.0002



Fe-richが判明

→Feコアならば 半径 ; $320 + 50 / - 100$ km

FeSコアならば ; $510 + 80 / - 180$ km

(Konopliv *et al.*, 1998)



VRADで精度改善

0.393444 ± 0.000096

→コア密度の精度 ; 20%

(Goossens *et al.*, 2009)



<<月震波によりコアサイズを決定すれば

→密度が確定できる>>



ラブ数 k_2 の改善

LLR (Williams *et al.*, 2004)

0.0227 ± 0.0025

vs.

衛星測距 (LP165P;

Konopliv *et al.*, 2001)

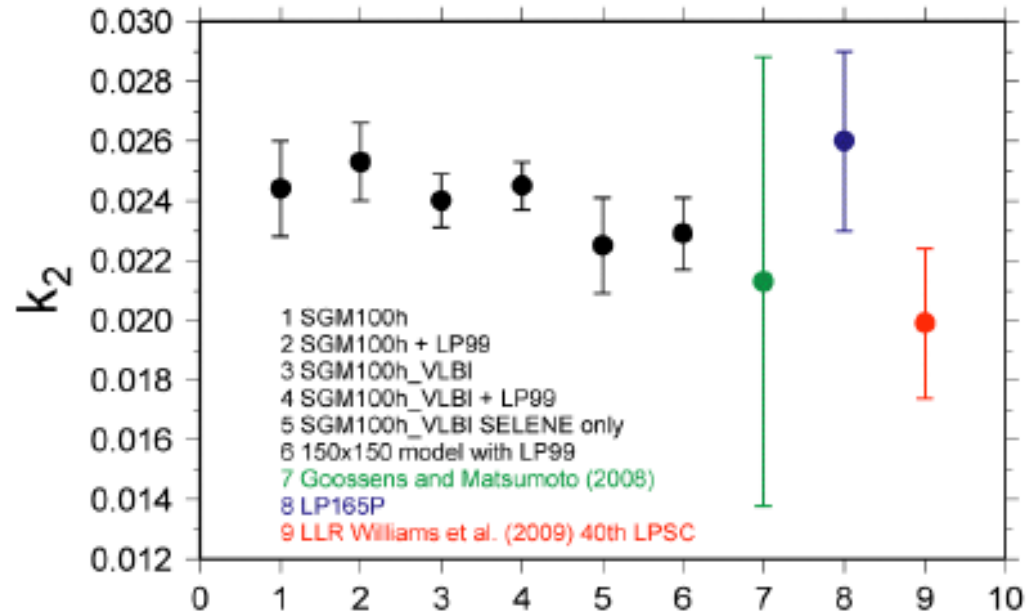
0.026 ± 0.003

↓
VRADで精度改善 (右図)

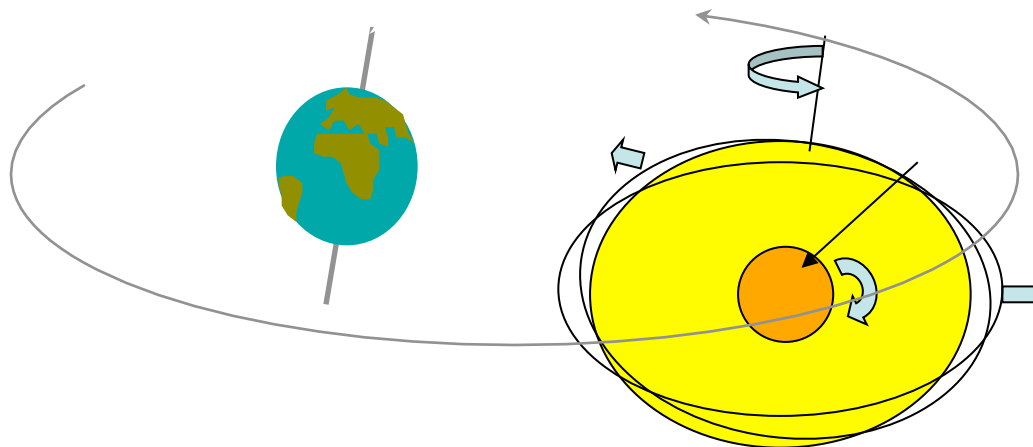
↓
<<月 ephemeris 精度: 5m が限界

→ in-situ 観測が必要 >>

k_2 estimates



Models

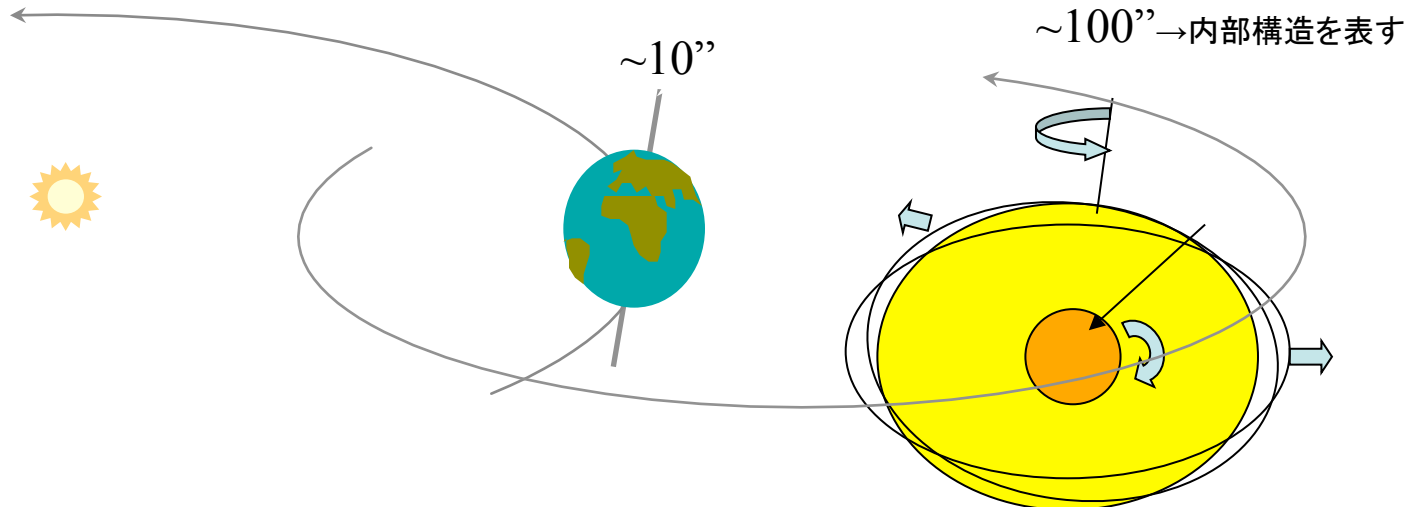


post-KAGUYA



月の流体核？

- Yoder, 1981 : 月の自転軸歳差と白道面歳差は同期
→ 自転軸法線ベクトルの位相は $0.26''$ 進んでいる
→ 月内部の消散に伴う位相遅れの反作用
- Williams *et al.* (2001) : LLRデータから、強制秤動の様々な周波数成分について消散項を求め、振幅を比較
↓
固体潮汐による消散 : 核マントル境界での消散 = 3:1
(LLRの精度としてはマージナル)

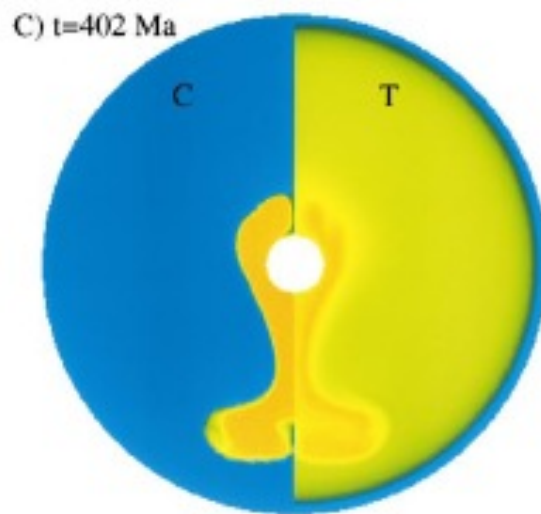


流体核 → mare basaltの二分性

- Zhong *et al.* (2000) : 流体核を前提に、mare basaltの二分性から
コアのサイズに制約を与える



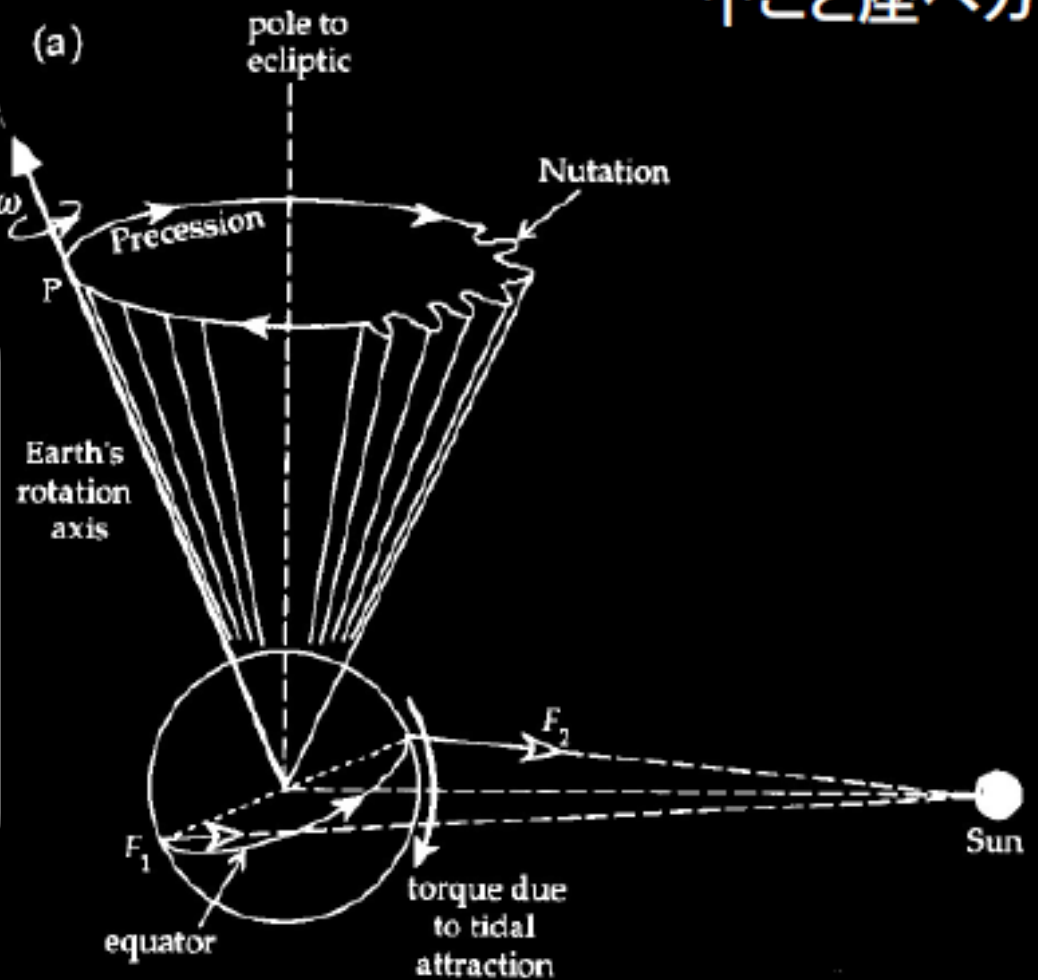
プルームが一本であるためのコア半径 < 250 km



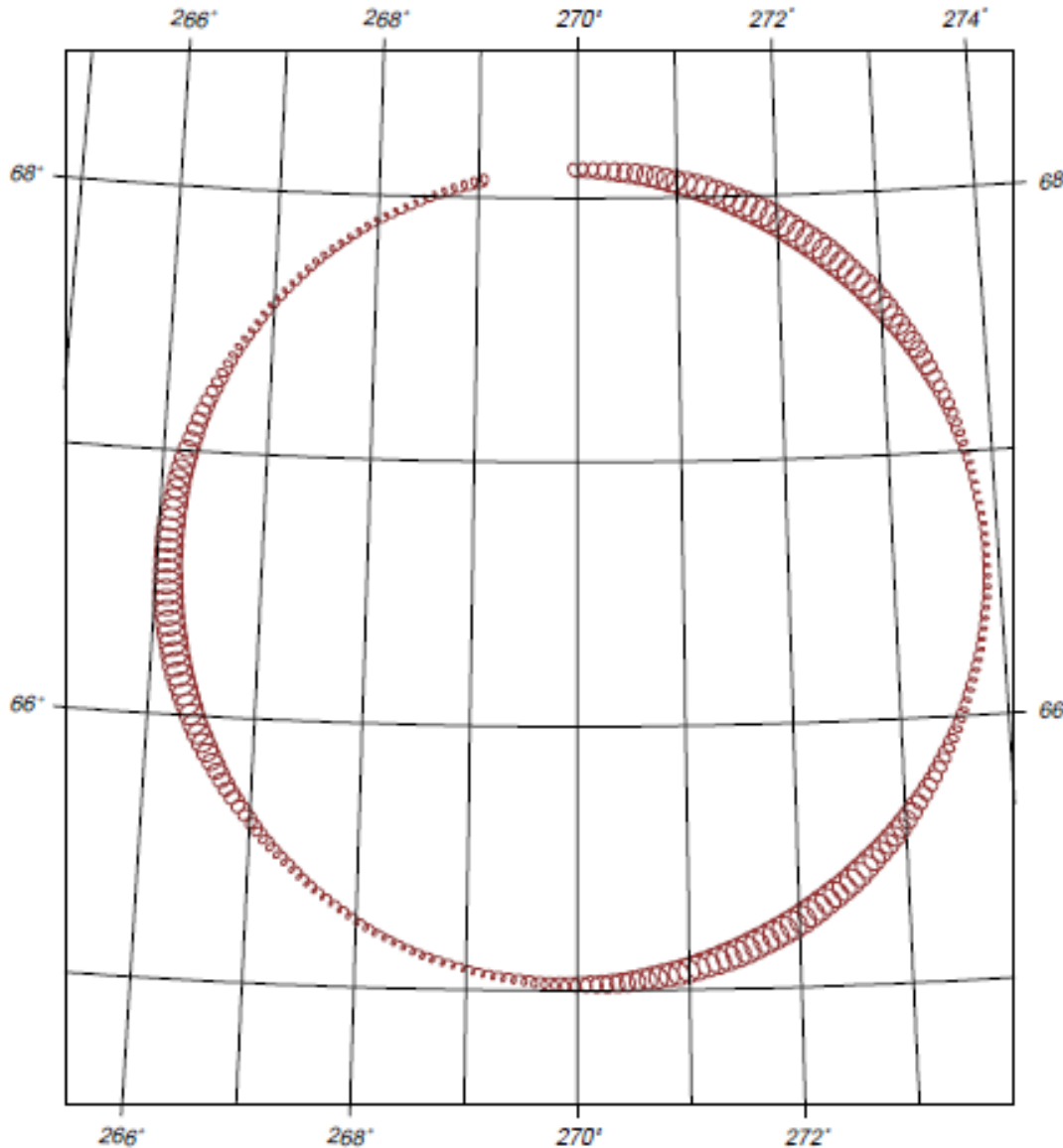
Zhong *et al.* (2000)

章動の励起源は潮汐トルク擾動

★ ←こぐま座アルファ星？
 ★ ↑こと座ベガ？



月の慣性主軸の天球上の軌跡



←DE403による約18年の軌跡
主に

18.6年 歳差

+

1ヶ月 強制秤動

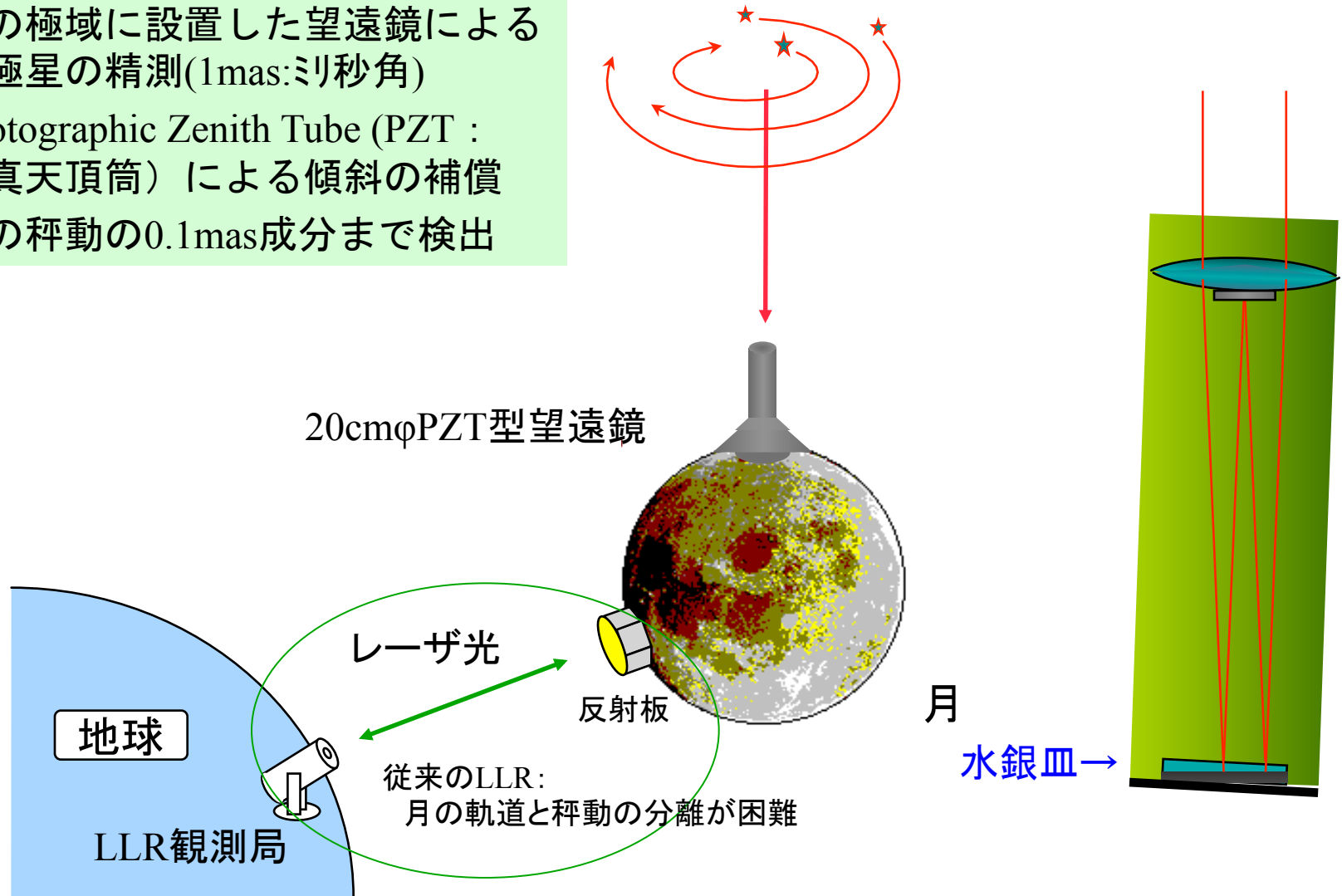
LLR観測による自由秤動の3成分

(Newhall & Williams, 1997)

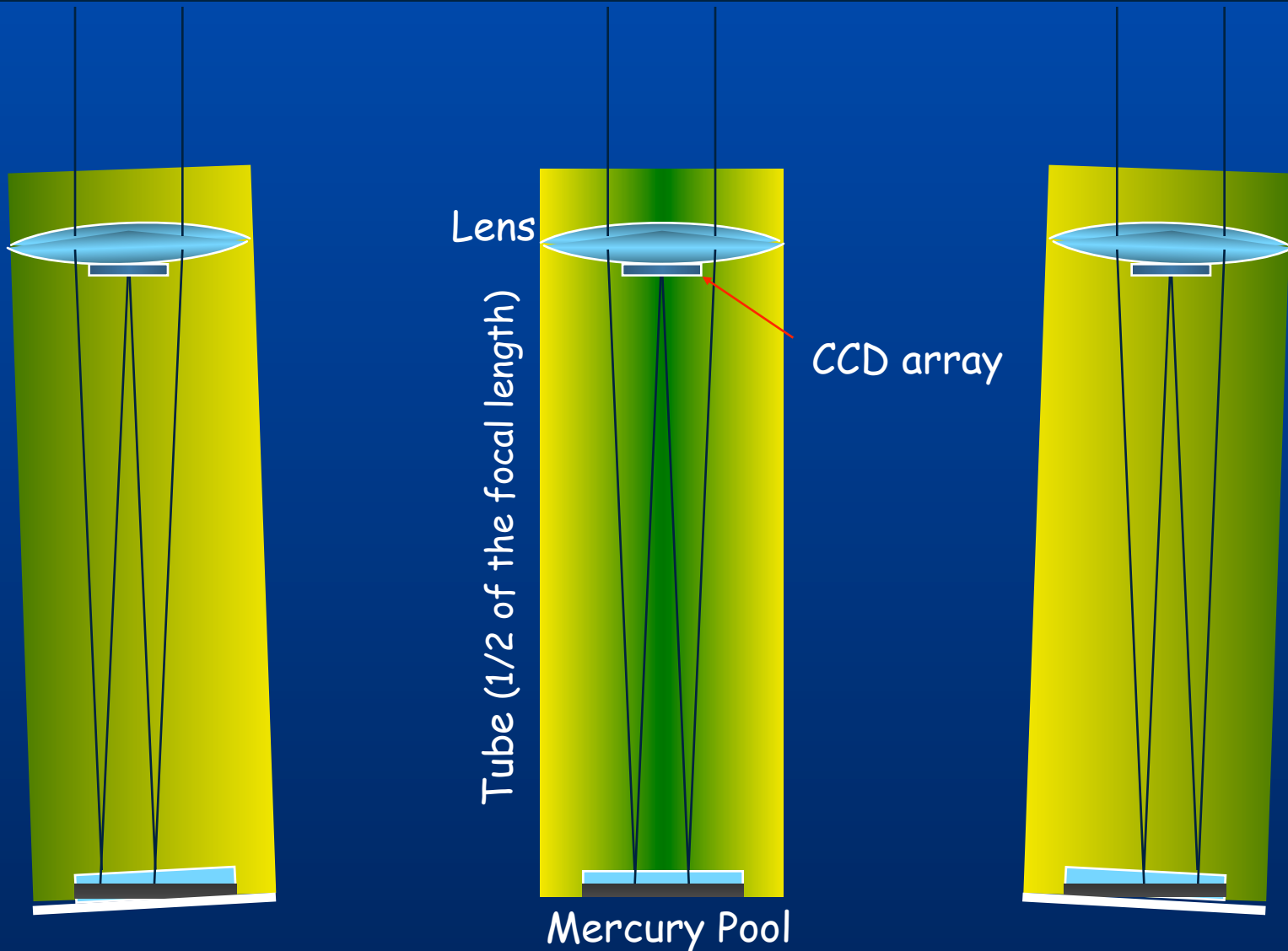
- ・自由極運動 (振幅; $\sim 3'' \times \sim 8''$)
- ・自由歳差 (振幅; $\sim 0.02''$)
→ 検出限界ぎりぎり
- ・経度方向の自由秤動 (振幅; $\sim 1.8''$)
→ 金星による摂動?

ILOM(月面天測望遠鏡)による高精度測月

- ・月の極域に設置した望遠鏡による周極星の精測(1mas:ミリ秒角)
- ・Photographic Zenith Tube (PZT : 写真天頂筒) による傾斜の補償
- ・月の秤動の0.1mas成分まで検出



ILOM : 写真天頂筒 (PZT) の原理



Tilts of the tube are nearly cancelled

(after Heki)

技術課題と検証・・・熱による姿勢変動が課題

◇姿勢の長期安定性

- ・鏡筒熱構造モデルによる熱歪試験
- ・傾斜計、レゴリスシミュラントによる地盤沈降測定

◇反射鏡、PZTの軽量化

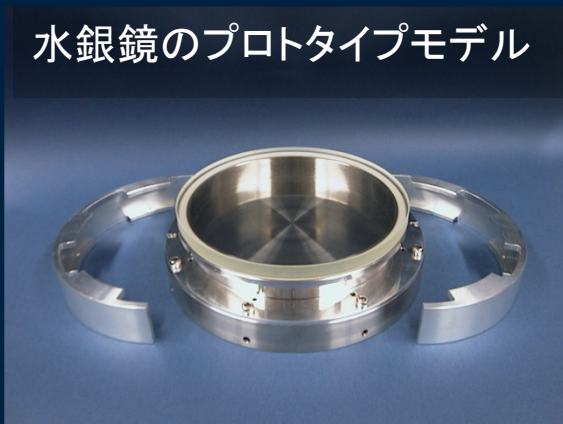
- ・小型水銀鏡の試作



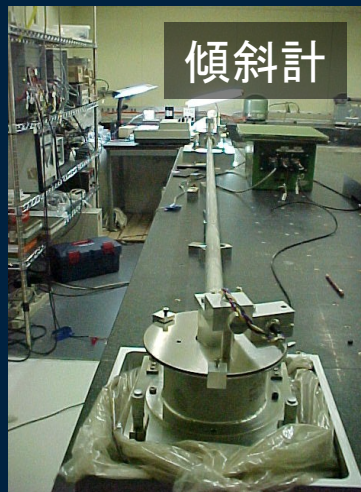
鏡筒熱構造モデル



水銀鏡のプロトタイプモデル



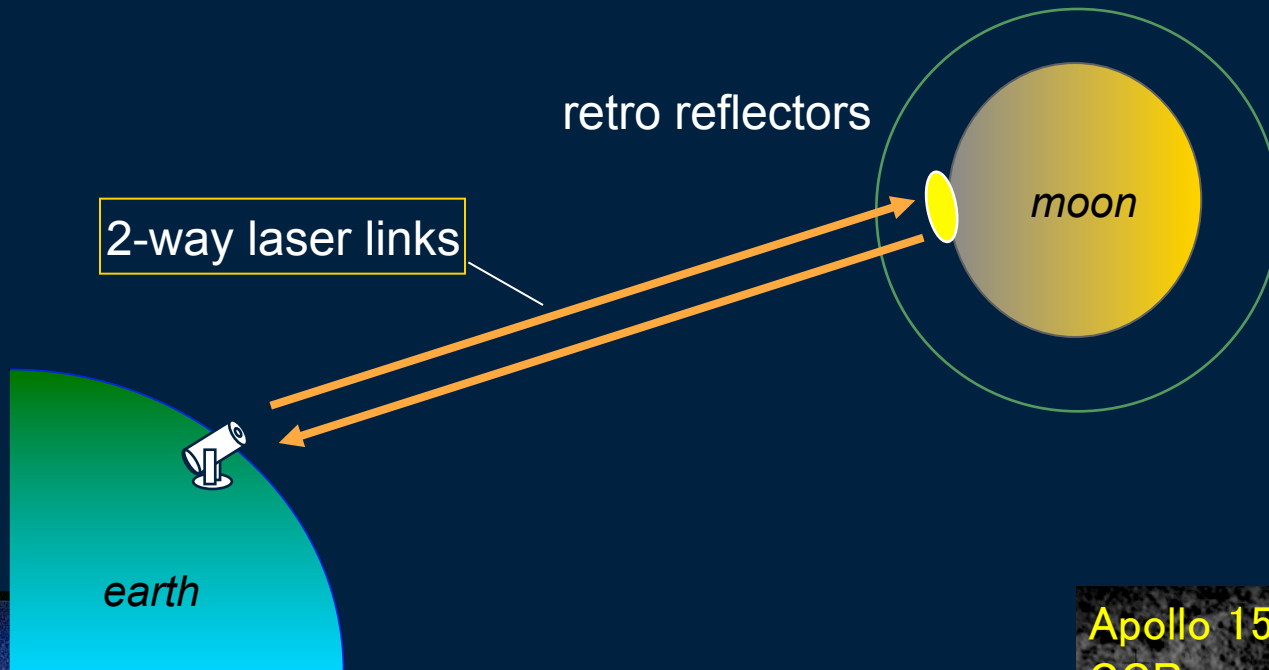
傾斜計



江刺地球潮汐観測所

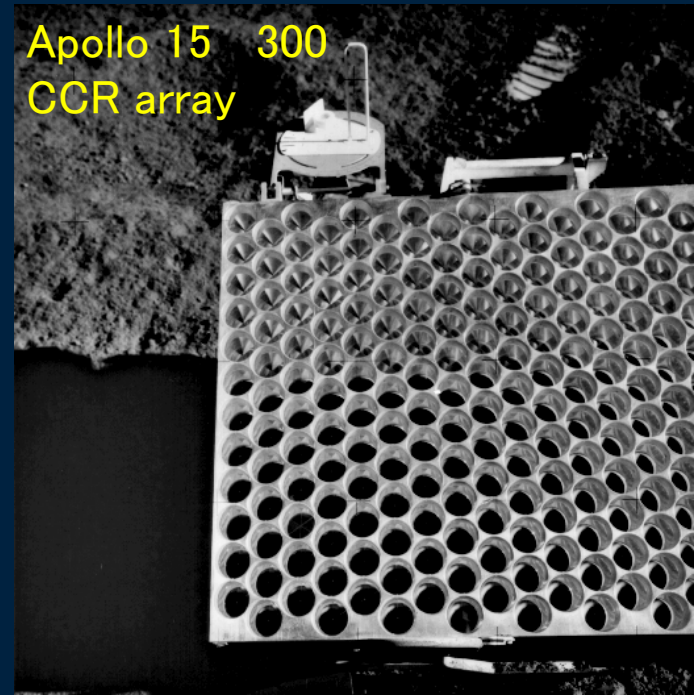


Configuration of LLR: Lunar Laser Ranging

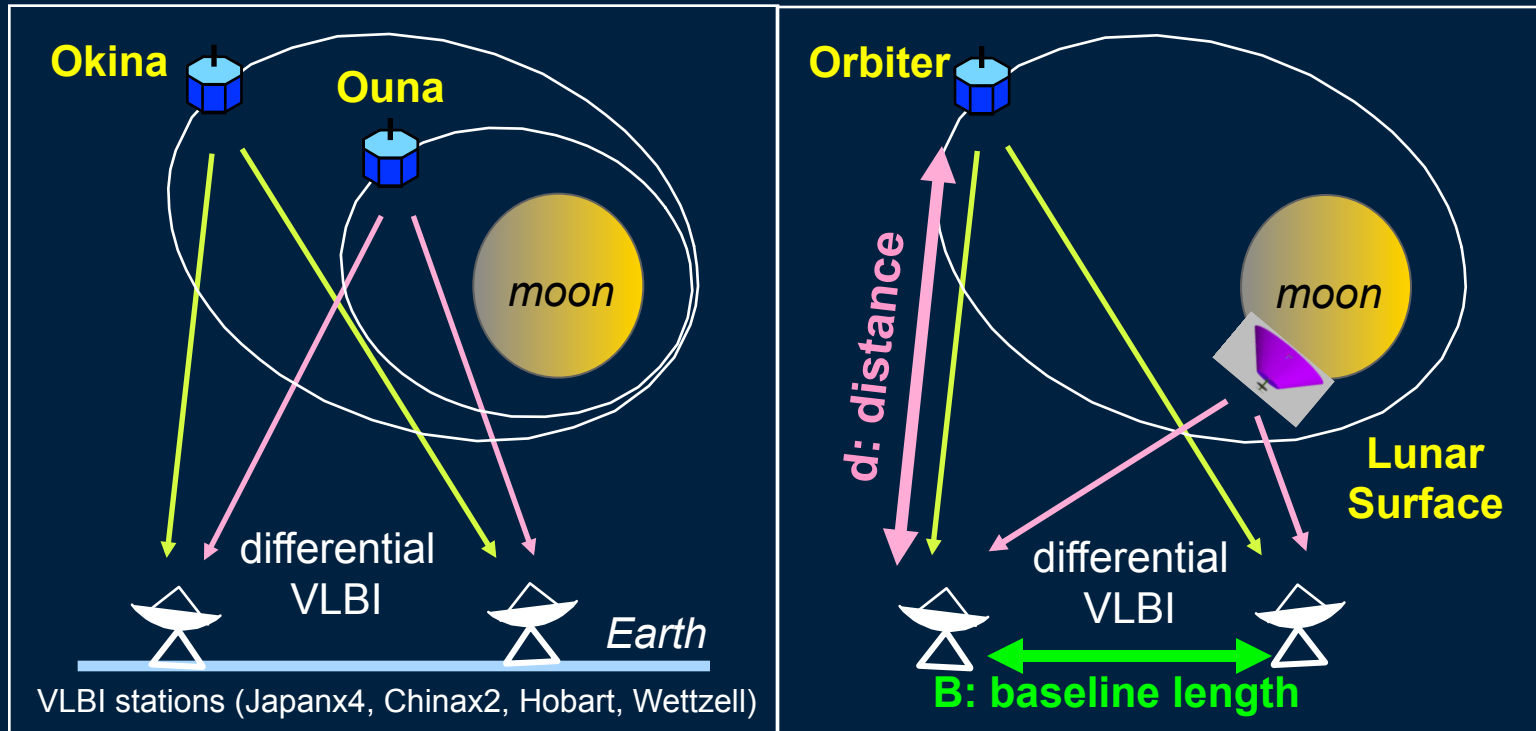


4 reflectors are ranged:
Apollo 11, 14 & 15 sites
Lunakhod 21 Rover
> settle one new site to improve accuracies

Apollo 15 300
CCR array



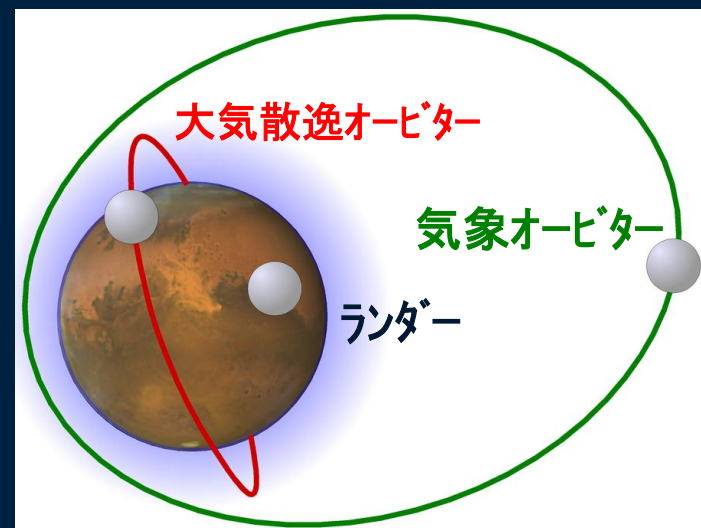
Differential VLBI by SELENE (left) and SELENE-2 (right)



MELOS: 火星複合探査計画

Mars Exploration with Lander-Orbiter Synergy

- ・2020年頃の打上げを目指す
- ・火星周回機^a + 着陸機^b (または飛行機) の協同(synergy)による複合探査
- ・青い地球と赤い火星の相違の謎?
- ・^a 気象観測、大気散逸、*etc.*
- ・^b 表面・**内部**・空中・生命の探査
地震、**回轉變動**、電磁場、...

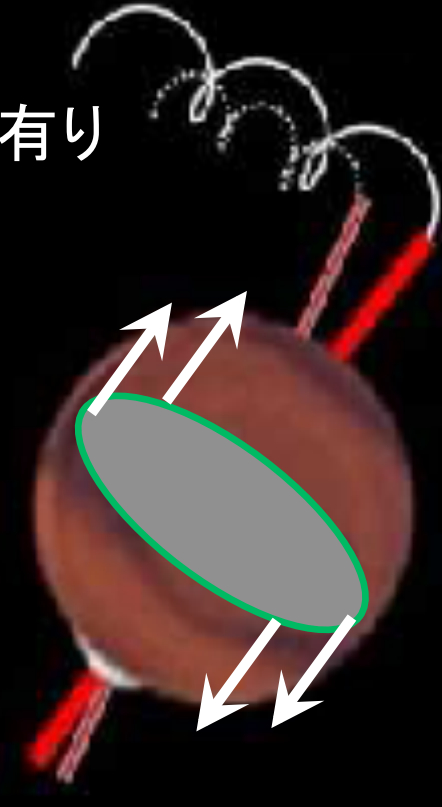
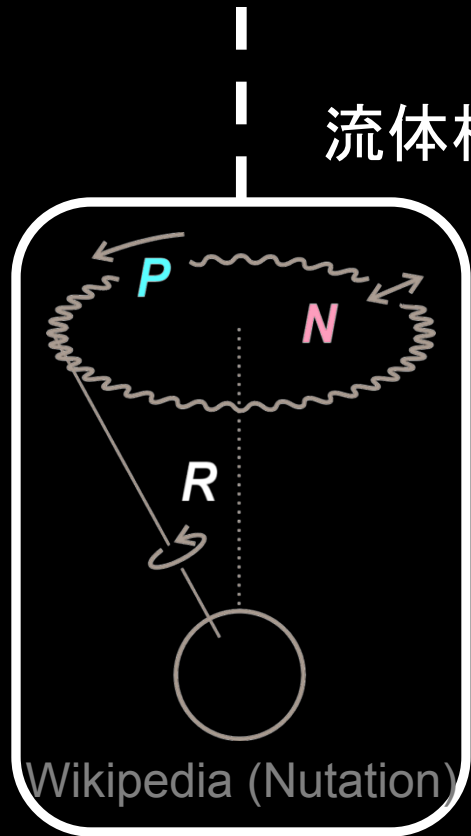


回轉變動計測による火星システムの理解

- **歳差 (世界最高精度 ; this work、以下同)**
 - 内部サブシステム : 慣性能率 – > 密度構造
 - 表層サブシステム : 自転軸傾斜角変動 – > 気候変動
- **章動 (世界初)**
 - 内部サブシステム :
核マントル境界半径・内核有無 – > 内部熱進化モデル
- **極運動 (世界初)・自転速度変動 (世界最高精度)**
 - 表層サブシステム :
大気極冠物質循環・ダスト含有量 – > 全球大循環モデル

章動の励起源

主に潮汐トルクの摂動成分(及び**流体核共鳴?**)



$k_2 > \sim 0.10 \rightarrow$ 流体核
 地球 : 0.3
 月 : 0.02~0.03
 火星 : $\sim 0.5 \rightarrow 0.153(*)$

〔 核・マントル間
 角運動量相互作用 〕

*) Yoder *et al.* (2003) \rightarrow ? (van Hoolst *et al.*, 2003)

回転変動計測による火星システムの理解

• 章動(世界初)

– 内部サブシステム:

核マントル境界半径・内核有無

–> マントル下部の圧力推定

+ 温度モデル

–> Spinel – Perovskite相転移面の有無

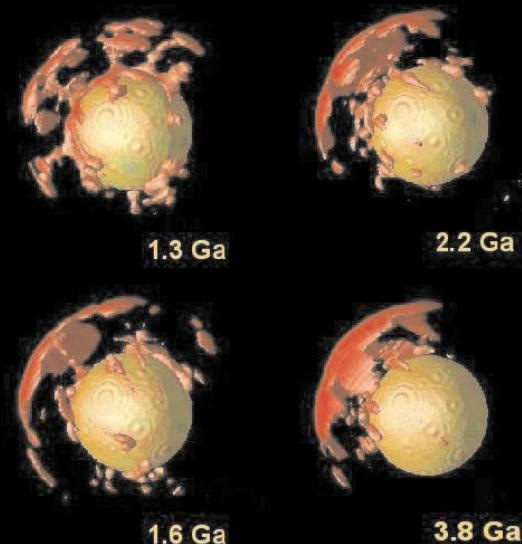
–> マントルの内部における熱輸送効率・

対流のパターンの推定: 内部熱進化モデル

–> 火成活動・ダイナモ活動・テクトニクス

↳ 磁場 → 大気散逸モデル

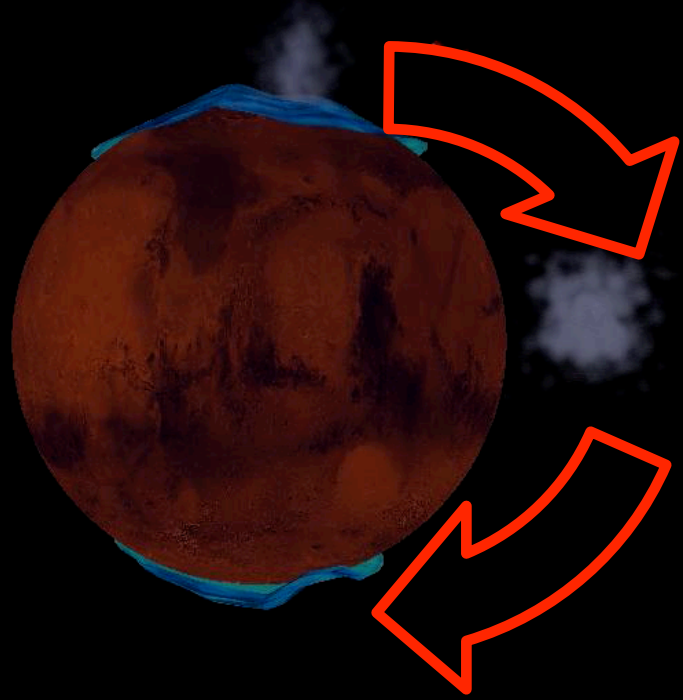
–> 各サブシステムにおける地球との相違



Sporn *et al.* (2001)

極運動・自転速度変動の励起源

主に大気・極冠の変動



大気・極冠の荷重

〔惑星システム全体
慣性テンソル擾乱〕

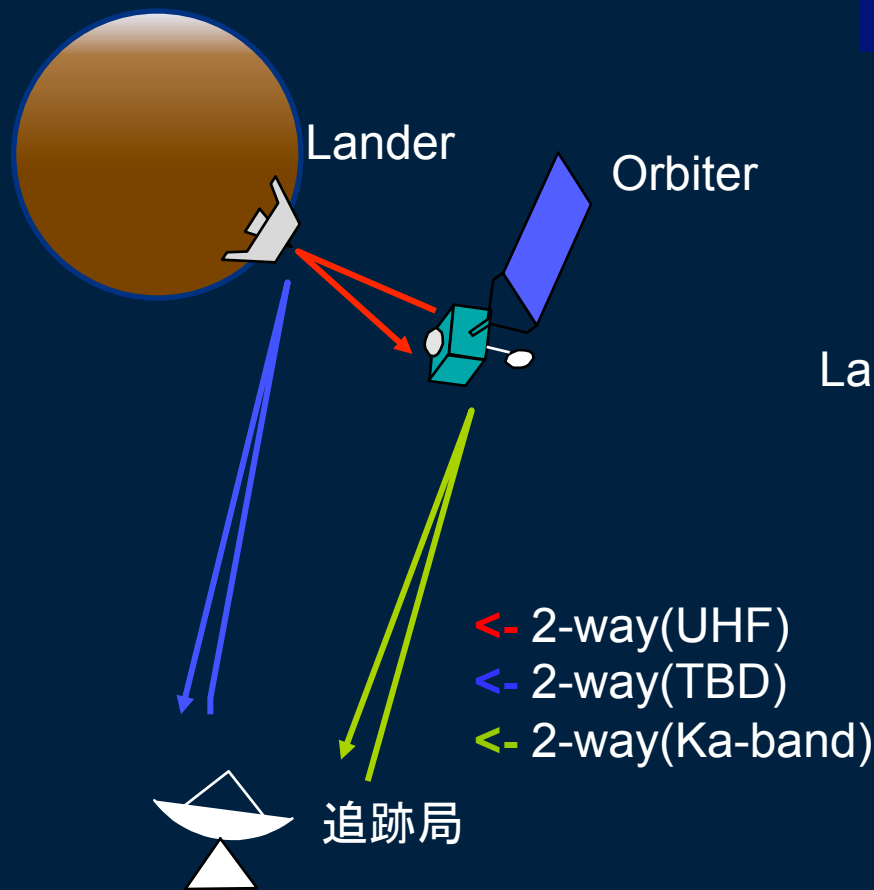


風の応力

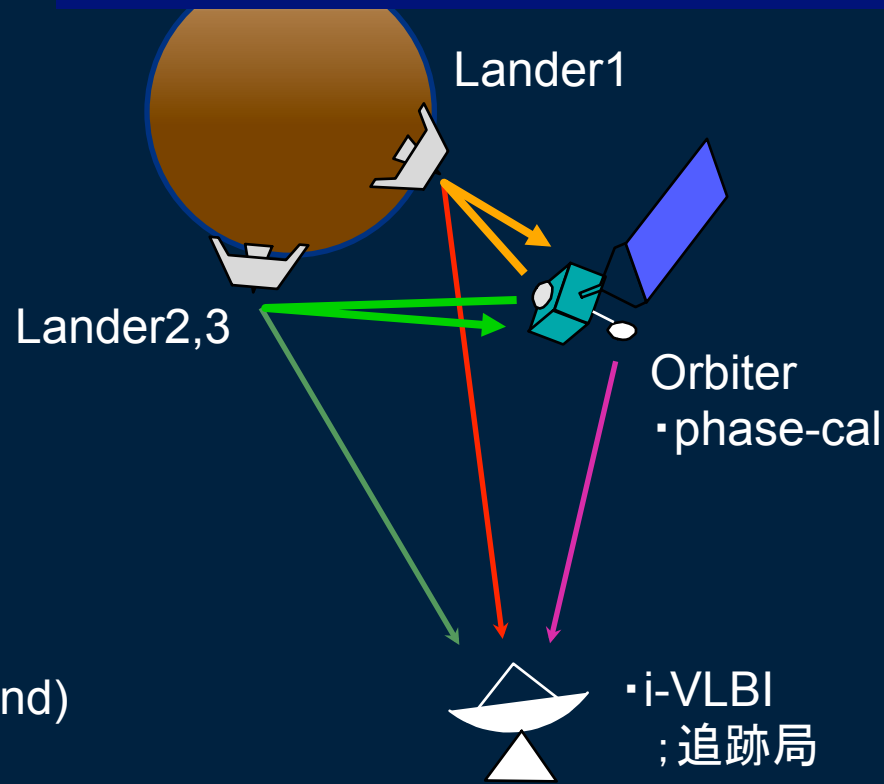
〔大気・マントル間
角運動量相互作用〕

左: 2-way衛星間ドプラ計測と 右: 逆VLBI (iVLBI)

cf. Kawano et al., JGSJ, 45, 181 (1999)

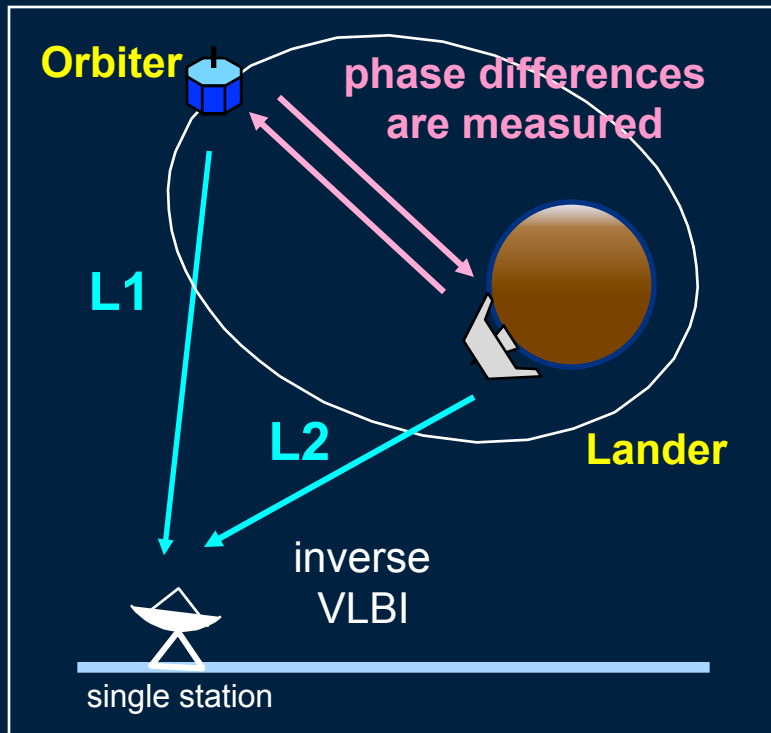


- ・ETS-VIII等で実績
- ・質量・電力小
- (Landerは1機に削減)
- 実現性が、より高い



- ・新技術
- ・多周波位相比較
→高精度
- ・消費電力大
- ・使用周波数多
- ・i-VLBI
; 追跡局
- ・d-VLBI
; VLBI局

i-VLBI : Inverse VLBI (逆VLBI)



Inverse VLBI

after Kawano *et al.*, *JGSJ*, 45, 181 (1999)

- 2機の宇宙機間で 位相を同期させる、又は 2-way ranging により 相対位相を測定 する。
- 地上の1アンテナ (VLBI観測網ではなく)が、2宇宙機 (L1, L2)を計測する。

sensitivity for positioning; $\sigma(x)$

$$\sigma(x; \text{i-VLBI}) = \sigma(\Delta L) = 0.3 \text{ mm}$$

$$\sigma(x; \text{d-VLBI}) = \sigma(\Delta L) * d / B = 9 \sim 60 \text{ m}$$

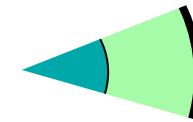
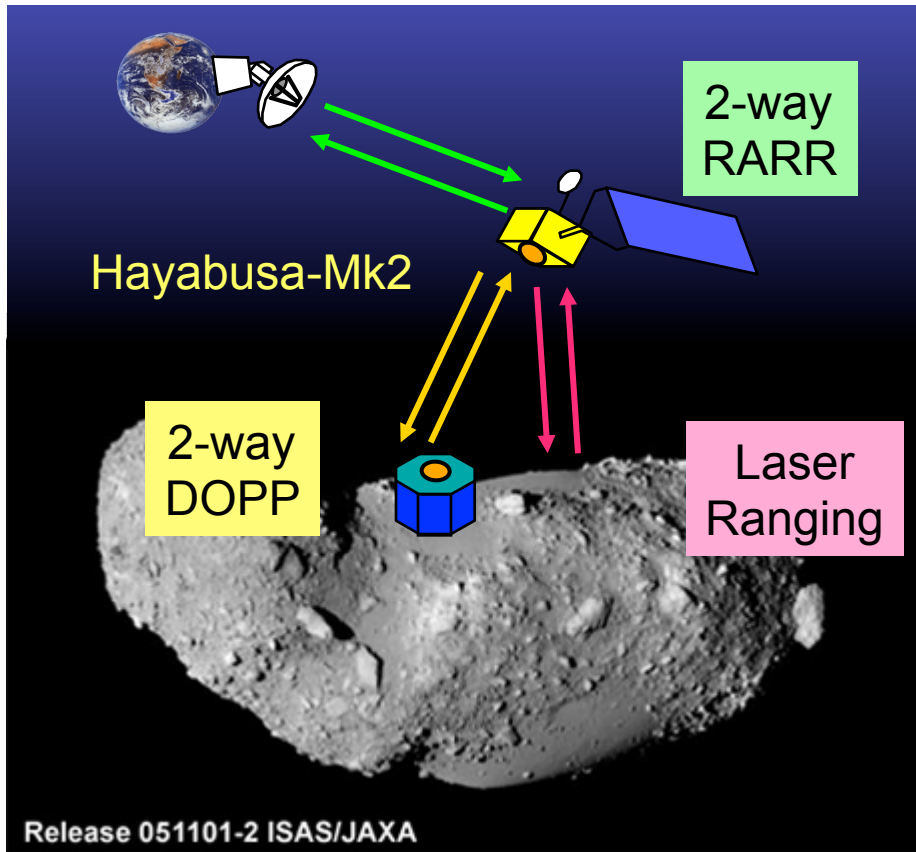
under

$$\sigma(\Delta \tau) = 1 \text{ ps} = 10^{-12},$$

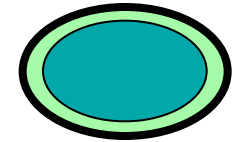
$$d = 0.4 \sim 2.7 \text{ AU}, B = 2,000 \text{ km}$$

- 位置推定精度は観測周波数に応じた位相安定度 ($\sigma(x)$) のみに依存し、地上と宇宙機の距離に依存しない。

小天体の内部構造探査



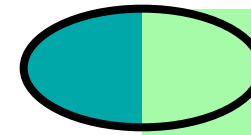
分化天体の
分裂？



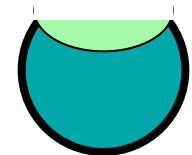
レゴリス？



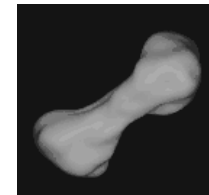
Eros



合体？



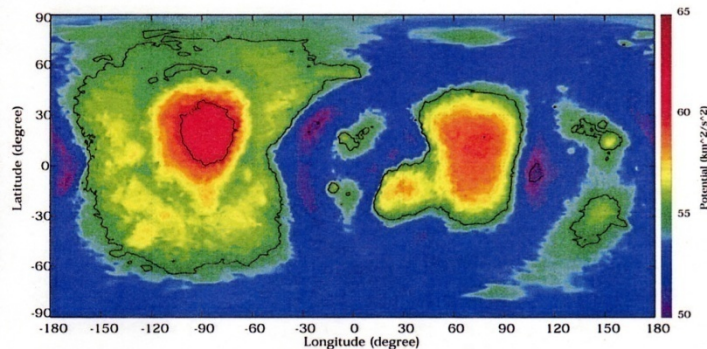
衝突クレータ？



Kleopatra



Mathilde



←Erosの重力場
(Miller *et al.* 2002)



月

LLR Apollo, Lunakhod

2-way RARR Lunar 10, LO, Apollo, Clementine, LP

SELENE

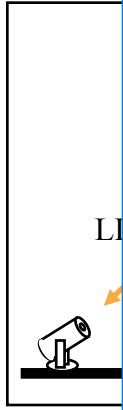
新しい計測技術・手法



新しい測定量



新しい物理

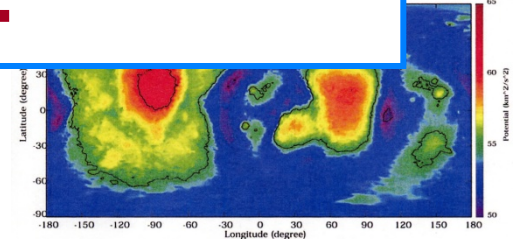
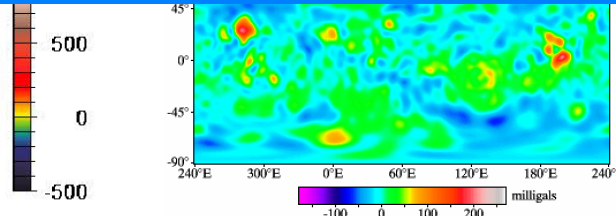
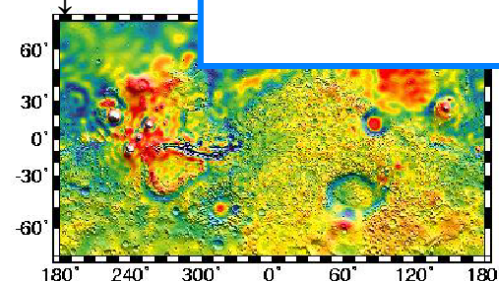


LI

惑星

♂ free air
(Zuber *et al.*)

et al. 2002)



← ♀ free air gravity