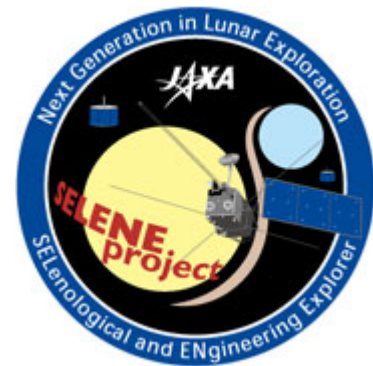


# SELENE (かぐや) 月重力場モデルについて

国立天文台 RISE月探査プロジェクト  
松本晃治



# SELENE(かぐや)による 月重力場観測

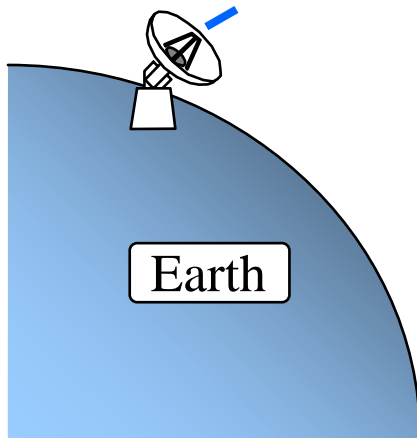
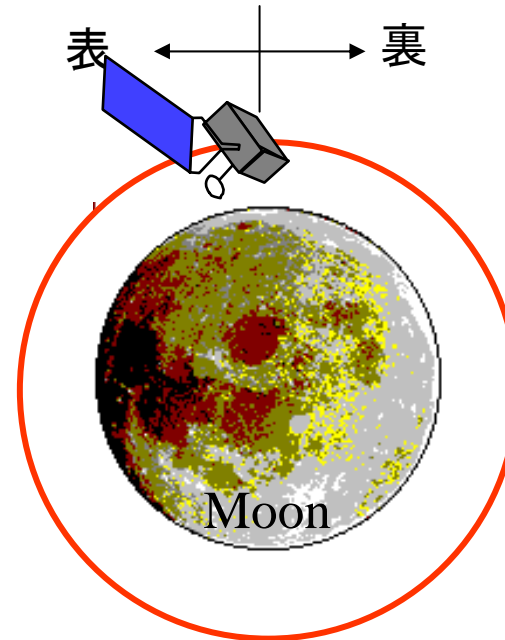
SELENE(かぐや)

- ・日本の月探査衛星
- ・2007年9月14日打ち上げ
- ・2009年6月29日運用終了

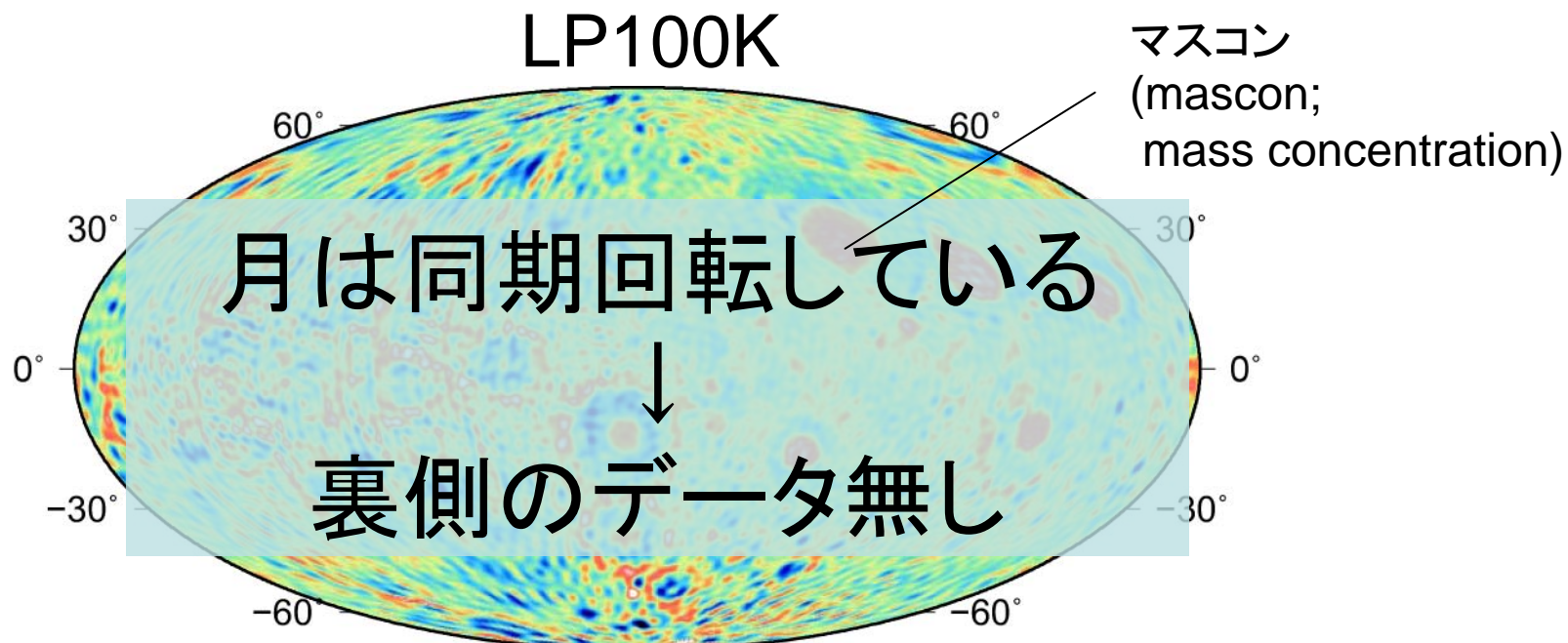
# 伝統芸能：2-way ドップラー観測



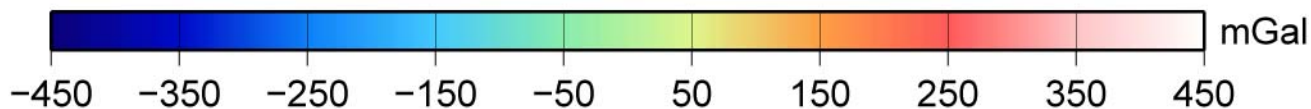
ドップラー効果によって送信周波数と受信周波数が異なる。この違いから、人工衛星の視線方向の速度が観測できる。



# SELENE以前の衛星追跡データ から求めた月の重力異常



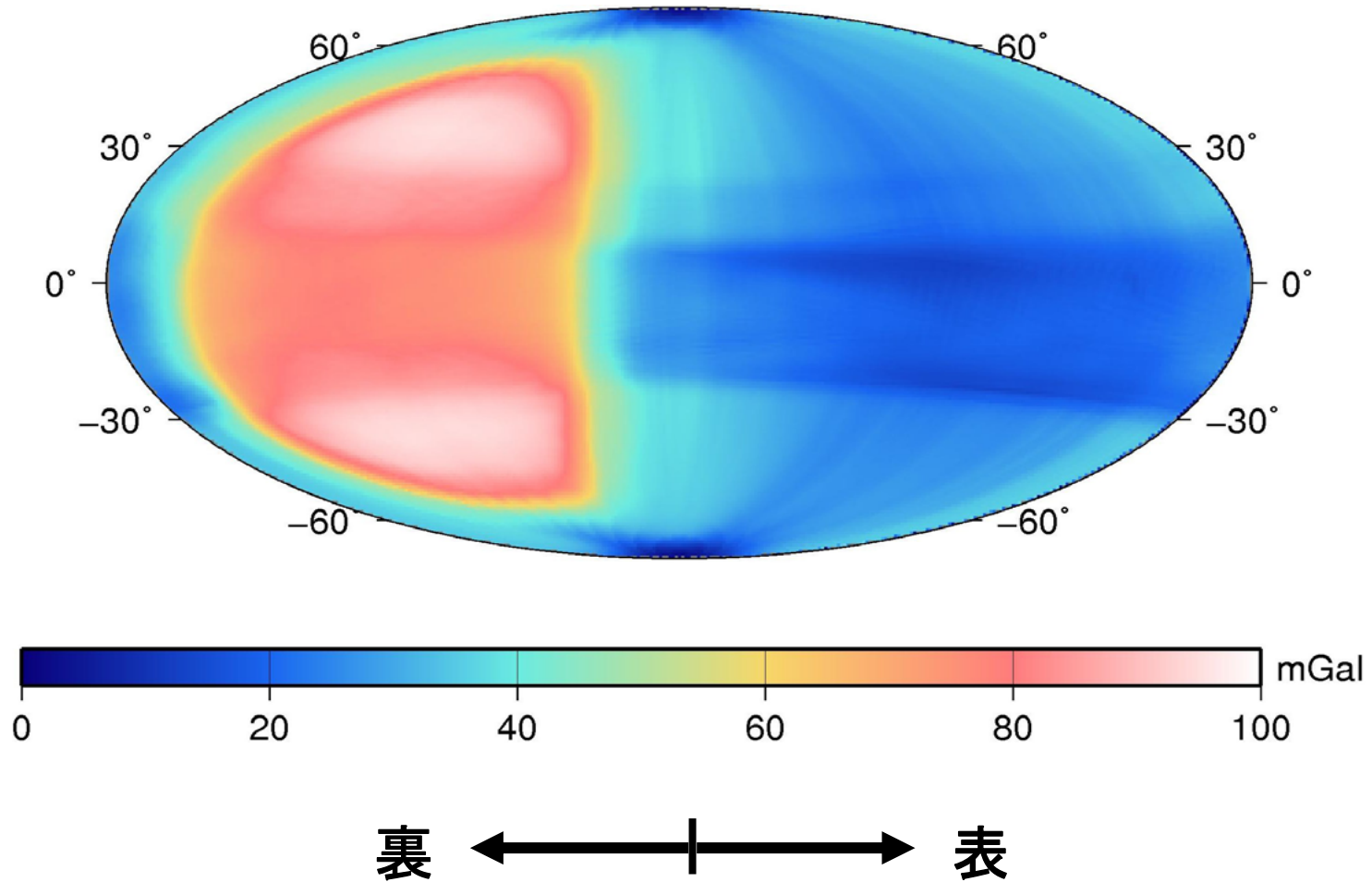
1mGal =  $10^{-5}m/s^2$



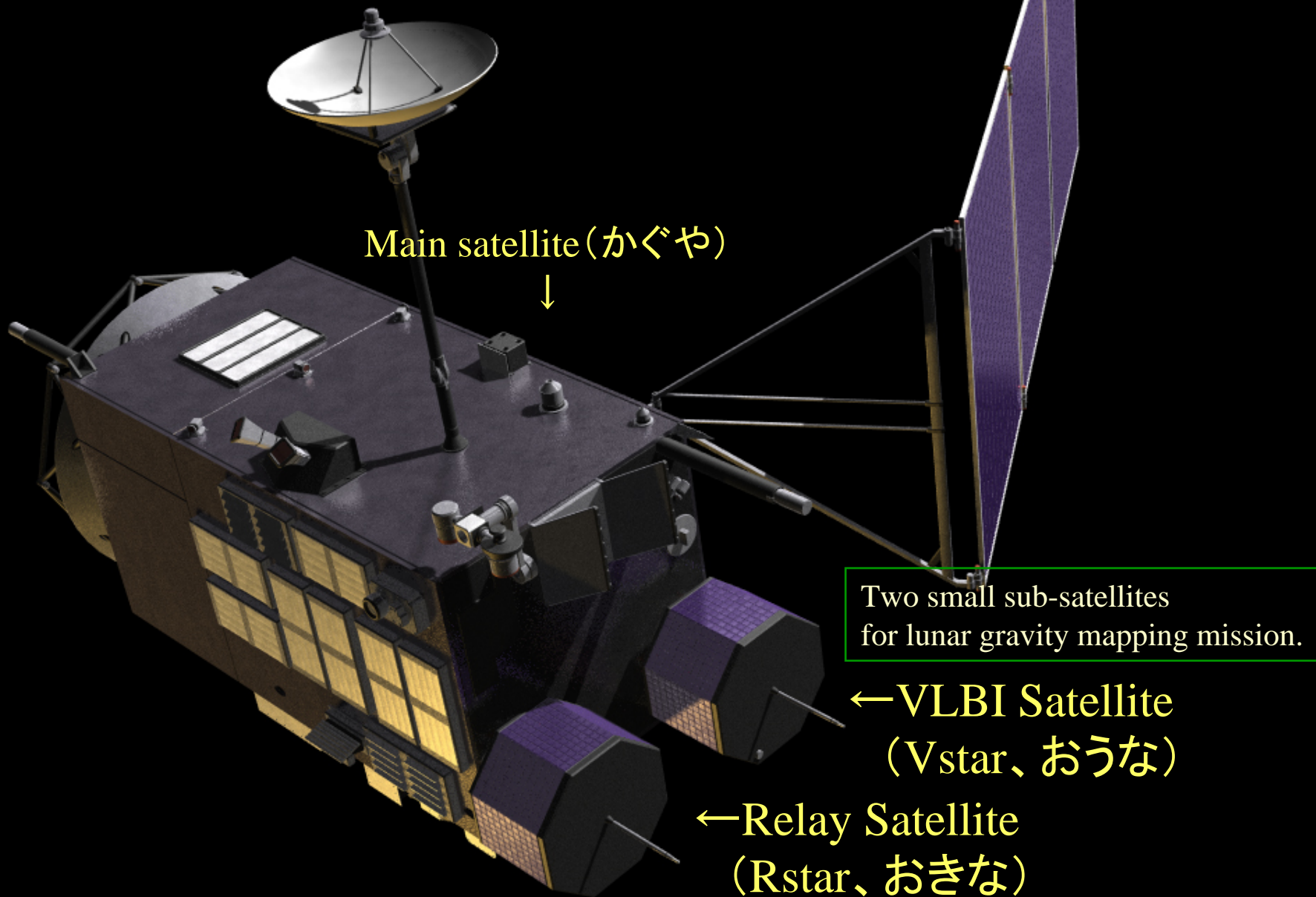
裏 ← | → 表

平均からのズレは  
月重力の数百分の一

# 表側の追跡データに基づく重力場モデルの誤差



On-orbit configuration of SELENE  
(before separation of two small sub-satellites)

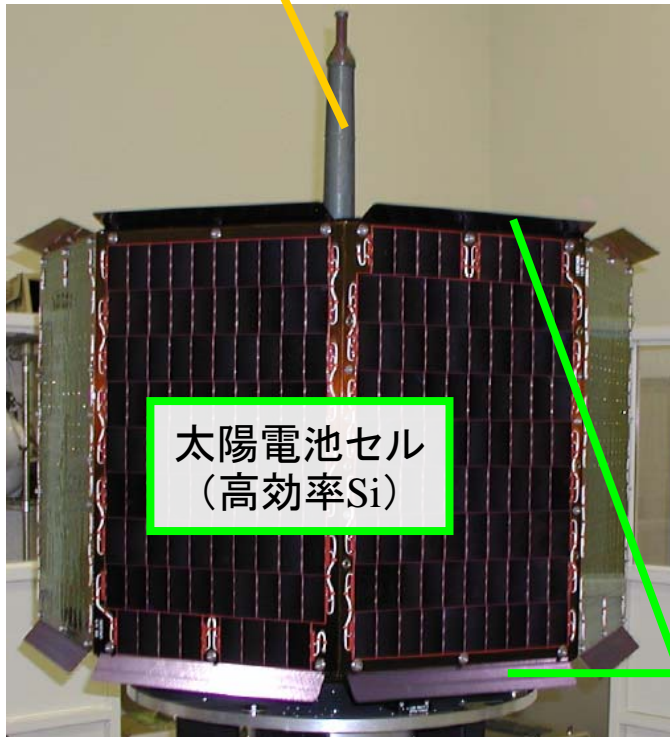


# リレー衛星 (Rstar、おきな)



サイズ: 1m × 1m × 0.65m  
質量: 45kg  
電力: 70W

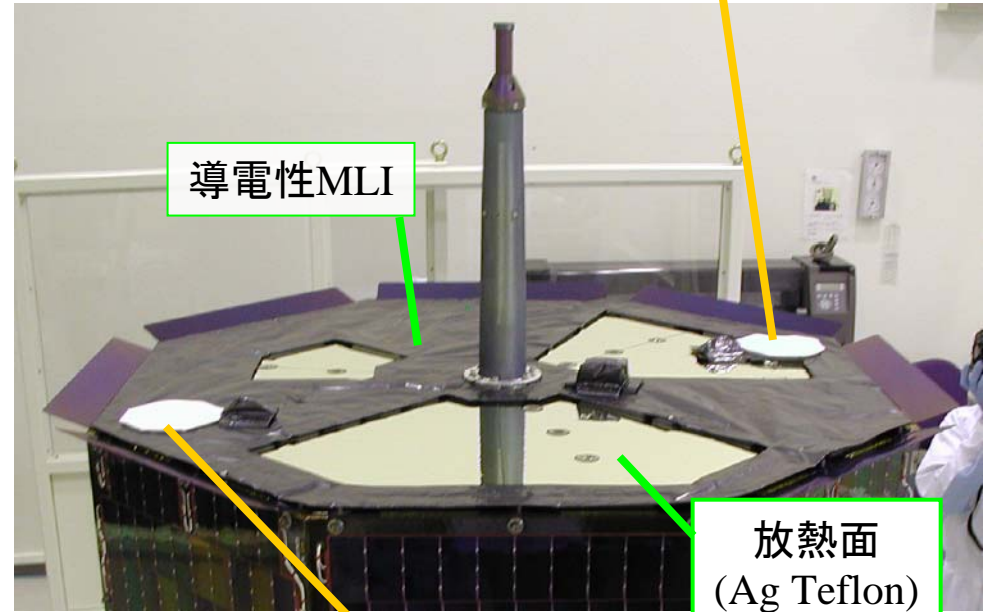
S/X帯垂直ダイポールアンテナ  
[地球向けビーム]



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)

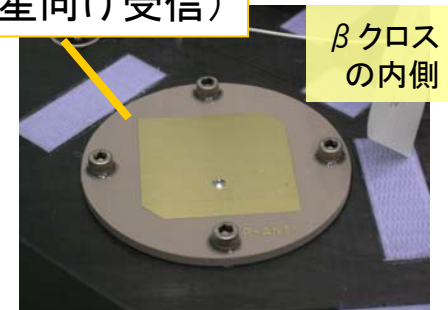
S帯平面アンテナ (上下に配置)  
(主衛星向け送信)



導電性MLI

放熱面  
(Ag Teflon)

S帯平面アンテナ  
(主衛星向け受信)



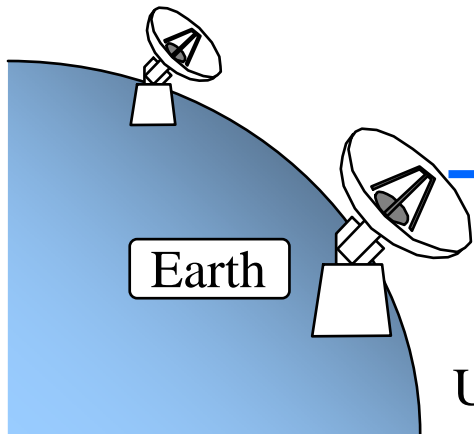
$\beta$  クロスの  
の内側

# 4-way ドップラー観測



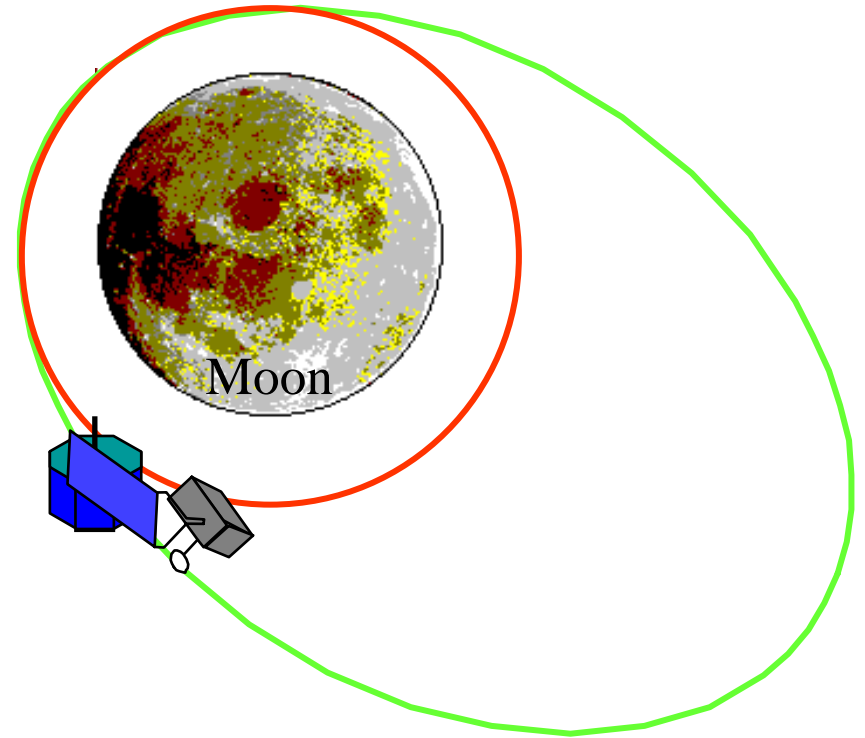
世界初！月裏側重力場の  
直接観測！

JAXA GN



JAXA  
UDSC-64m

表 ← → 裏



リレー衛星を介した主衛星「かぐや」の  
4-way ドップラー観測。精度1mm/s。



# 臼田64mアンテナ



# 相対 VLBI 観測



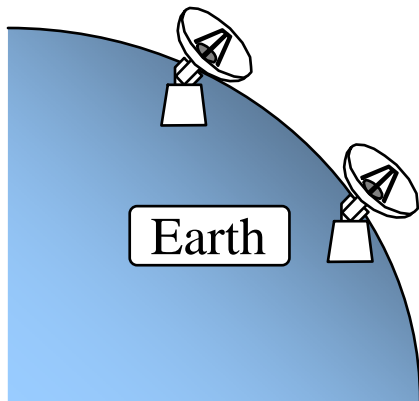
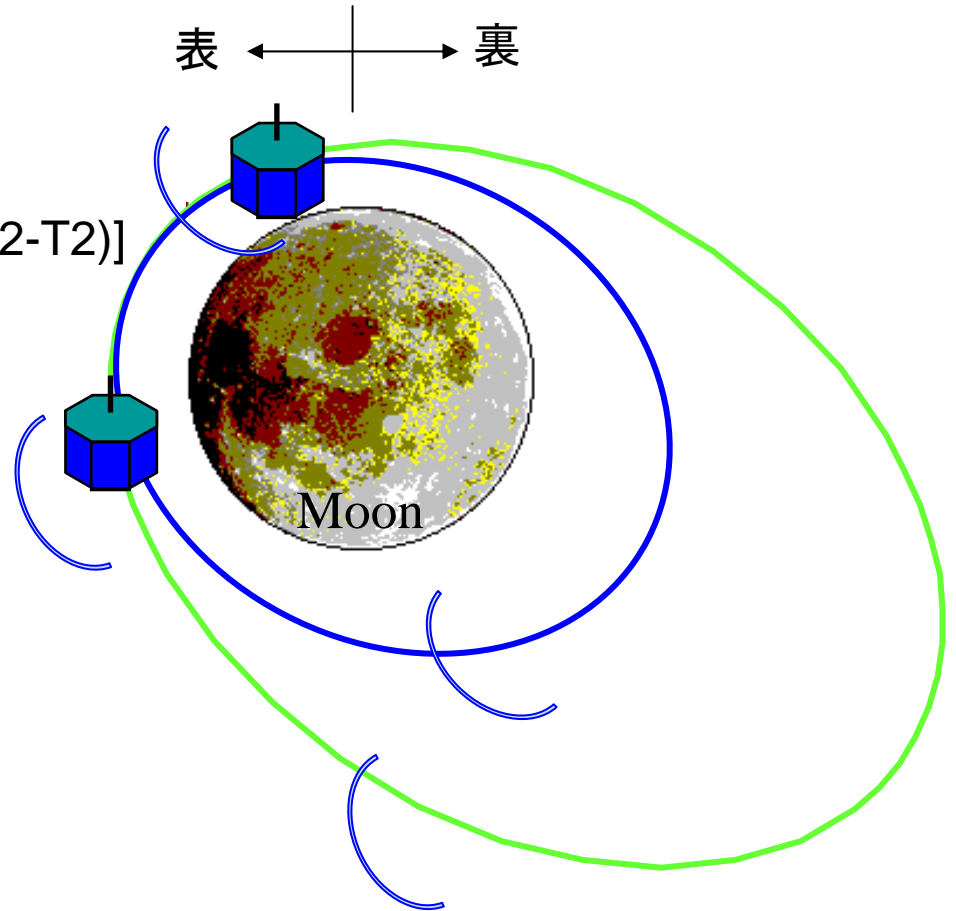
- ・ Rstar と Vstar の間の相対VLBI
- ・ 距離の2重差を1mmの精度で観測

$$[(S1 - T1) - (S1-T2)] - [(S2 - T1) - (S2-T2)]$$

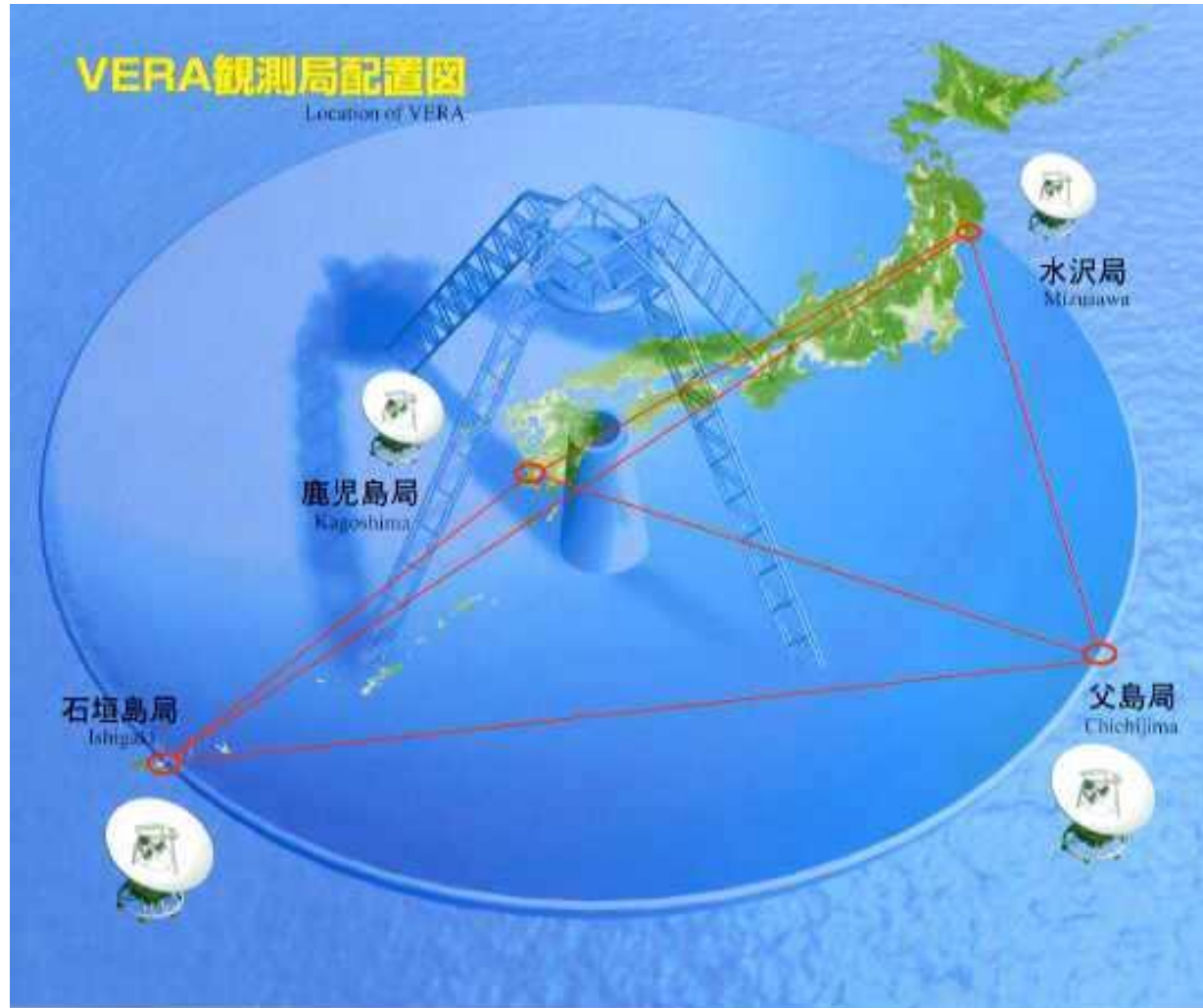
S:Satellite

T:Tracking Station

○大気・電離層によるゆらぎがキャンセルされる



# VLBI局 (VERA)



VLBI局 定常:VERA

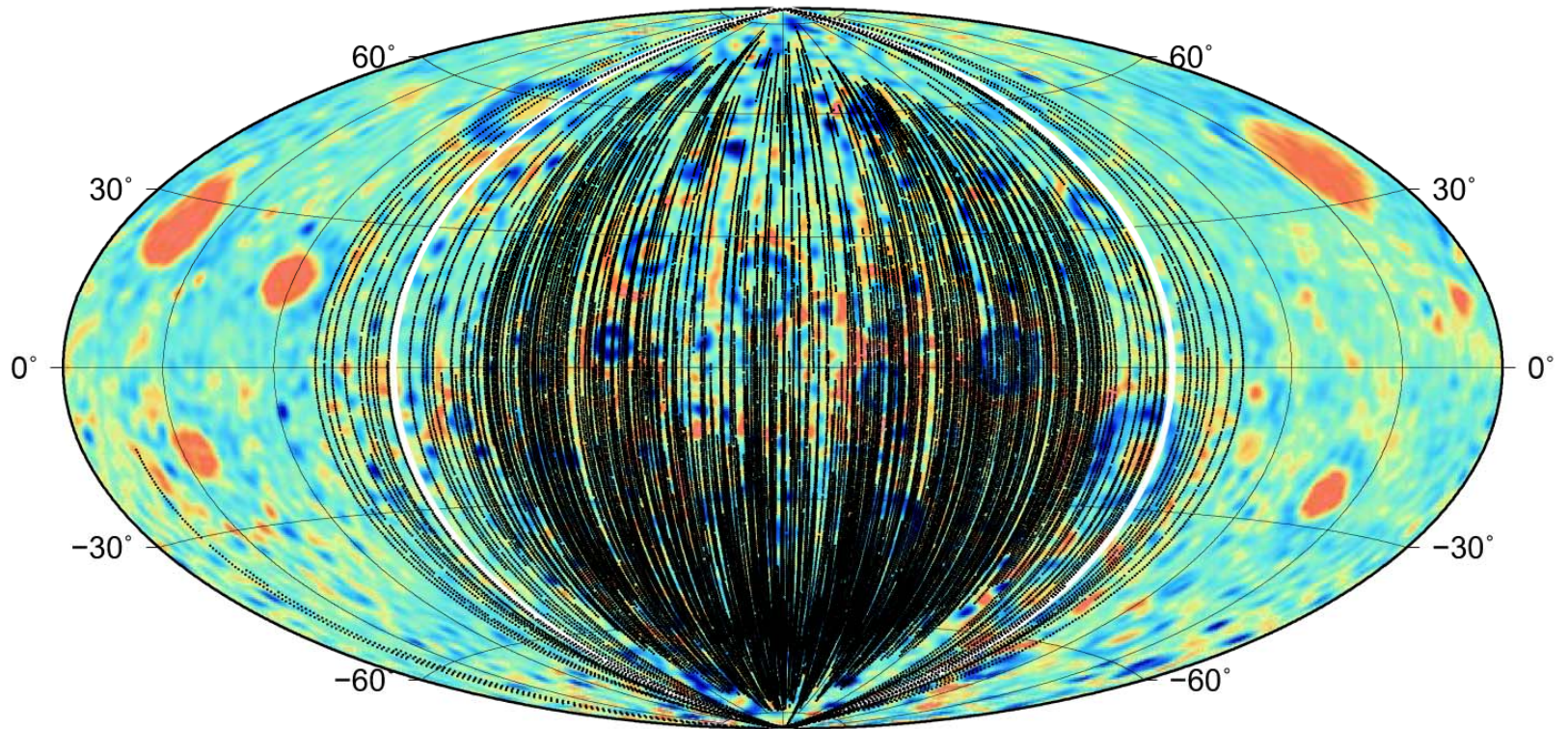
強化月間(×2):VERA+(上海+ウルムチ+ホバート+ウエッツェル)

# SELENE重力場モデル

SGM: SELENE Gravity Model

# 4-way Doppler data coverage achieved during the lifetime of Rstar

071031-090130



White solid line indicates the boundary between the near-side and the far-side

# Data and analysis setting for SELENE Gravity Model version h (SGM100h)

## Tracking data

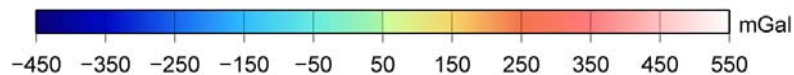
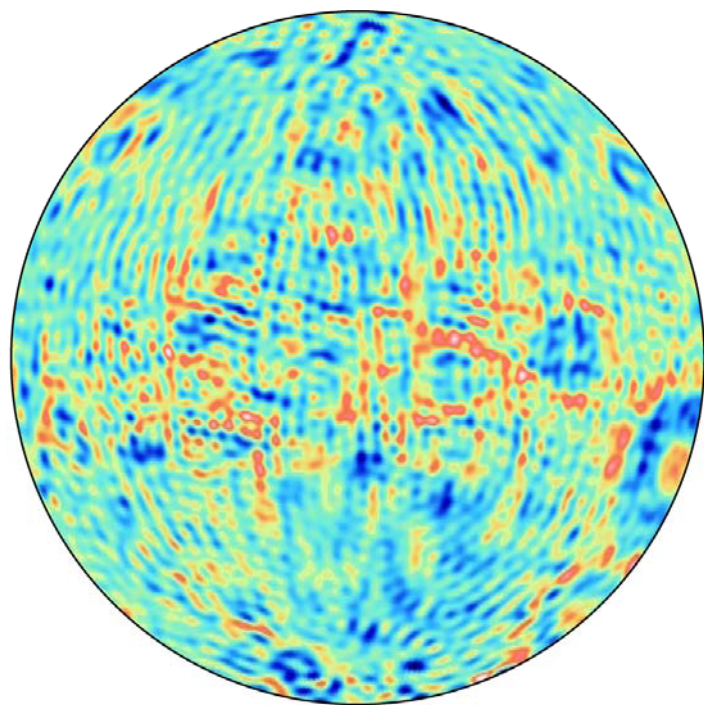
- SELENE: 2007.10.20 ~ 2008.12.26 & 2009.01.30  
Doppler + range
- Historical: LO I-V, A15/16ss, Clementine,  
LP nominal mission, SMART-1

## Setting

- GEODYN II, SOLVE system
- Expanded up to degree and order 100
- Ephemeris: DE421
- A Kaula-type constraint of  $3.6 \times 10^{-4}/n^2$
- Solar radiation pressure model  
SELENE Main: box + wing  
SELENE R/Vstar and other satellites : cannonball
- Mean arc length of Rstar = 2.6 days
- VLBI data not included

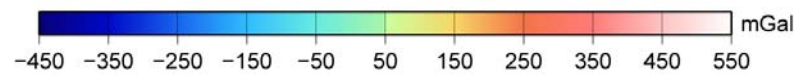
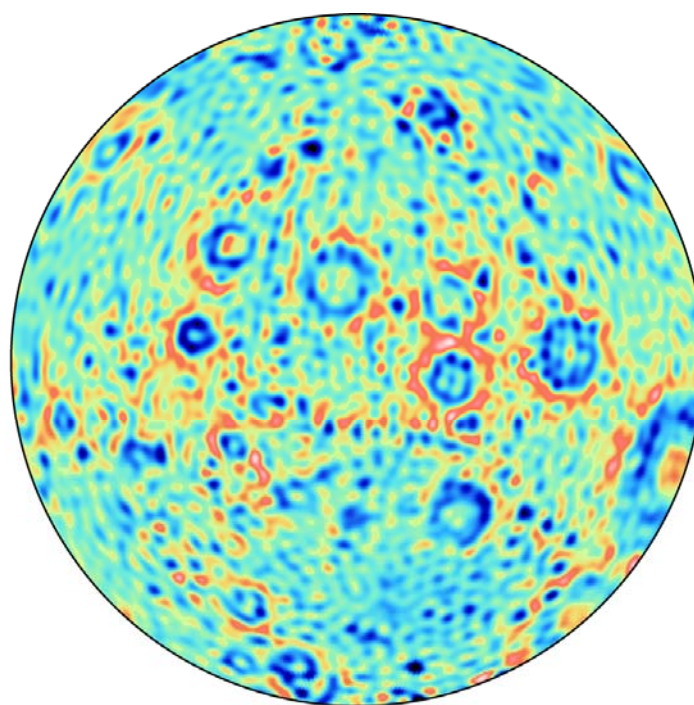
# 裏側の重力場の見え方はこんなに変わった

Before



LP100K

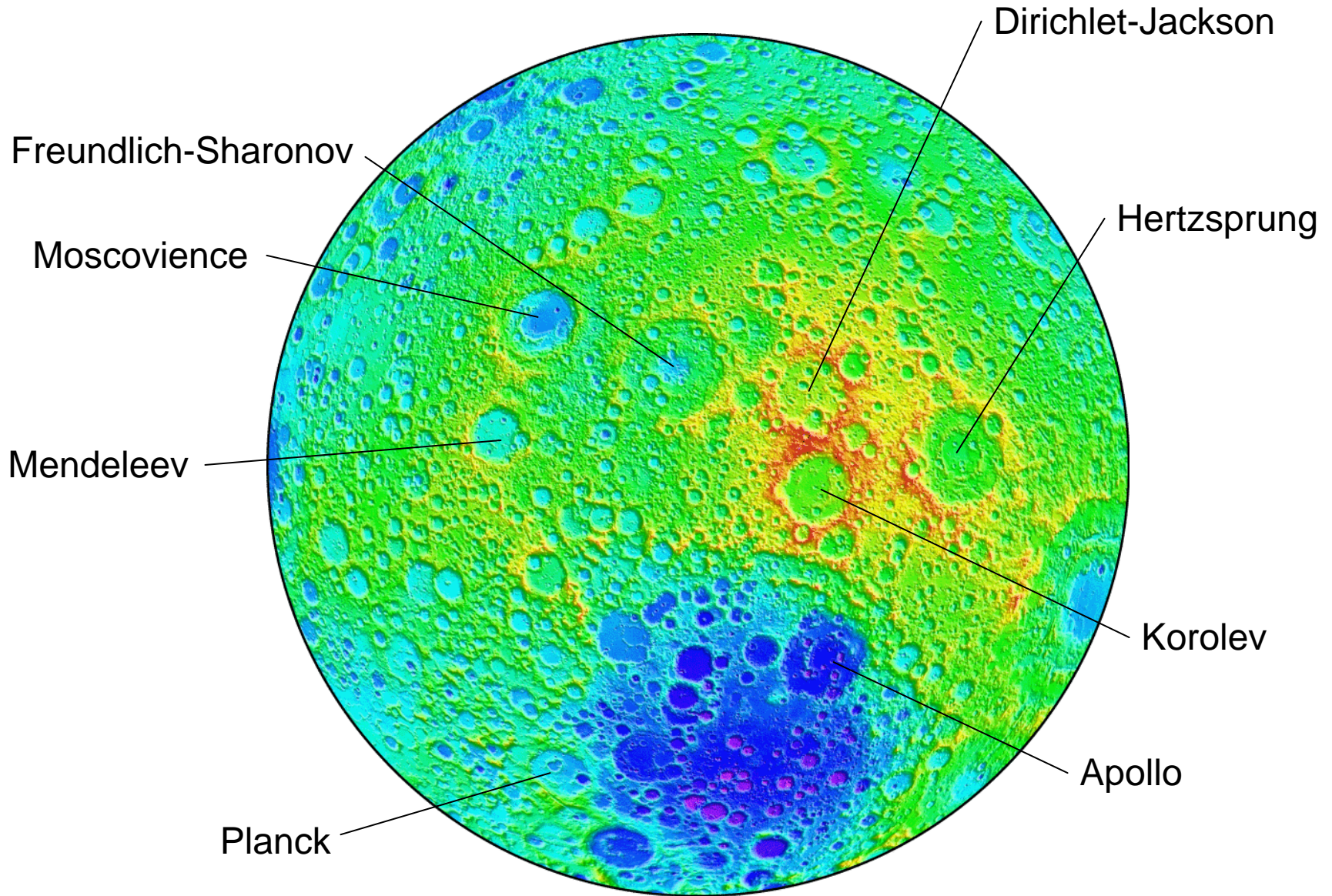
After



SGM100h

VLBIデータはまだ入っていない

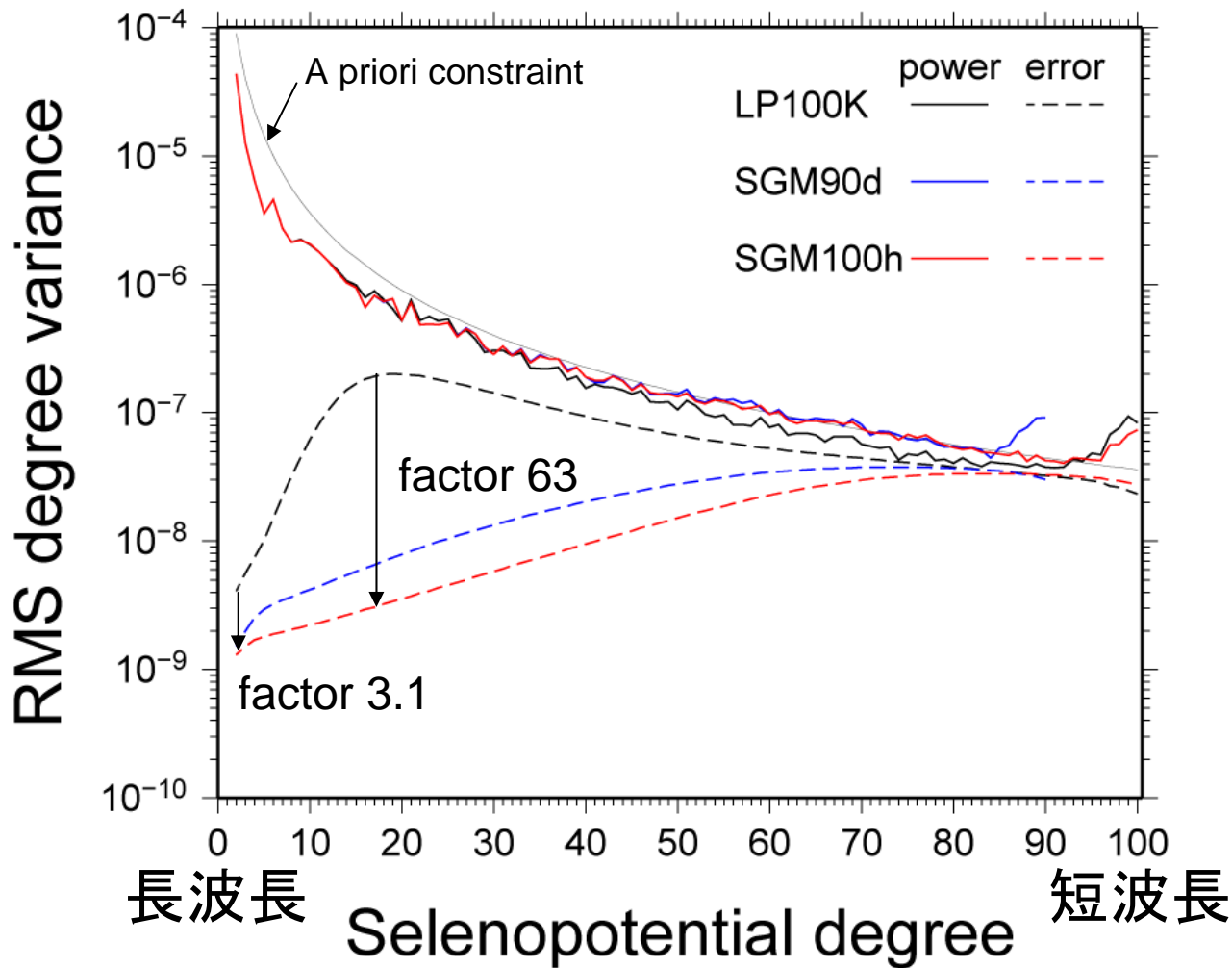
# 地形と重力が良く対応



地形モデルは「かぐや」レーザ高度計データから作成 (Araki et al., Science, 2009)



# 重力場係数スペクトル

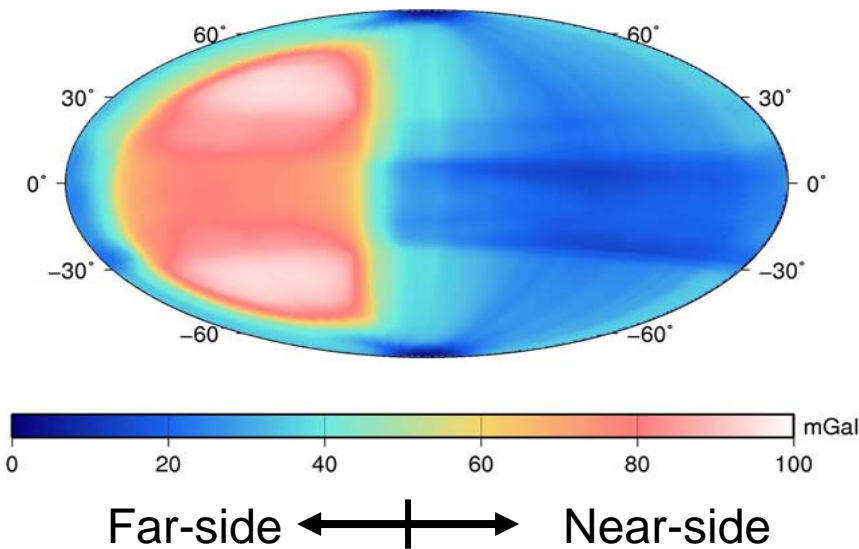


SGM90d: 初期成果モデル  
(Namiki et al., Science, 2009)

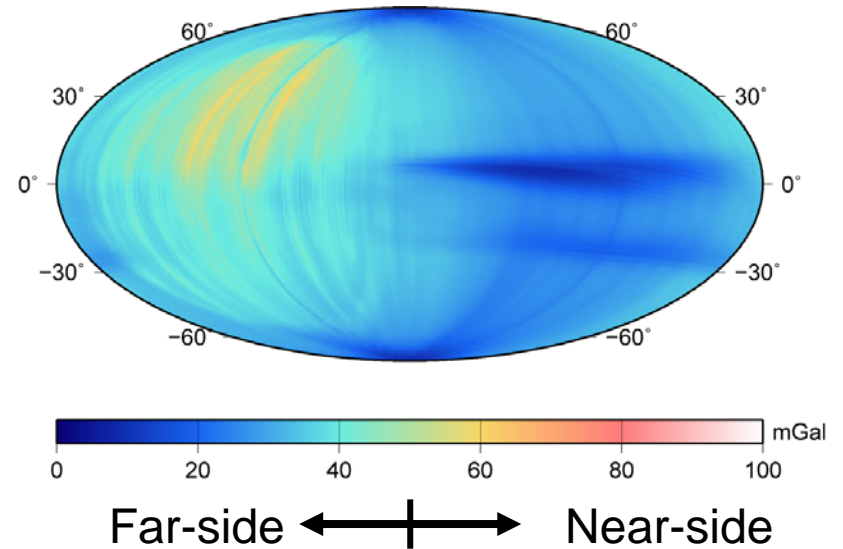
SGM100h: 最新モデル  
(Matsumoto et al., JGR, submitted)

# Gravity anomaly errors from the full covariance matrix

LP100K

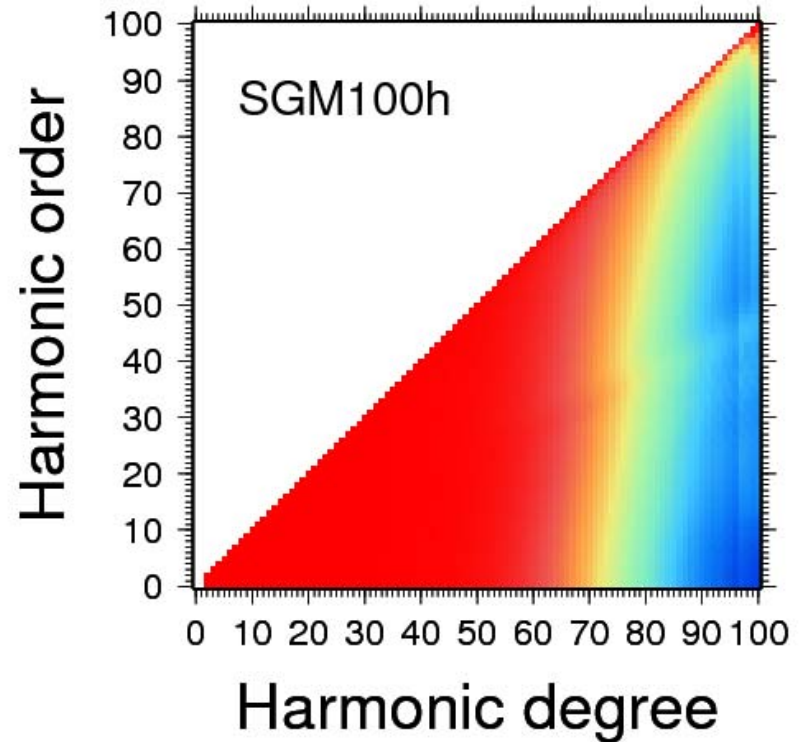
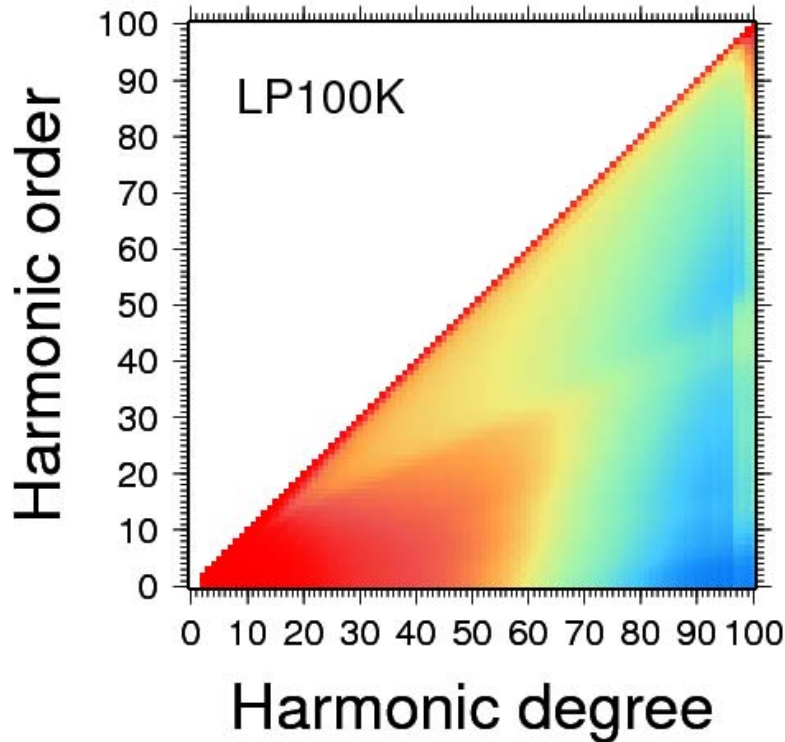


SGM100h



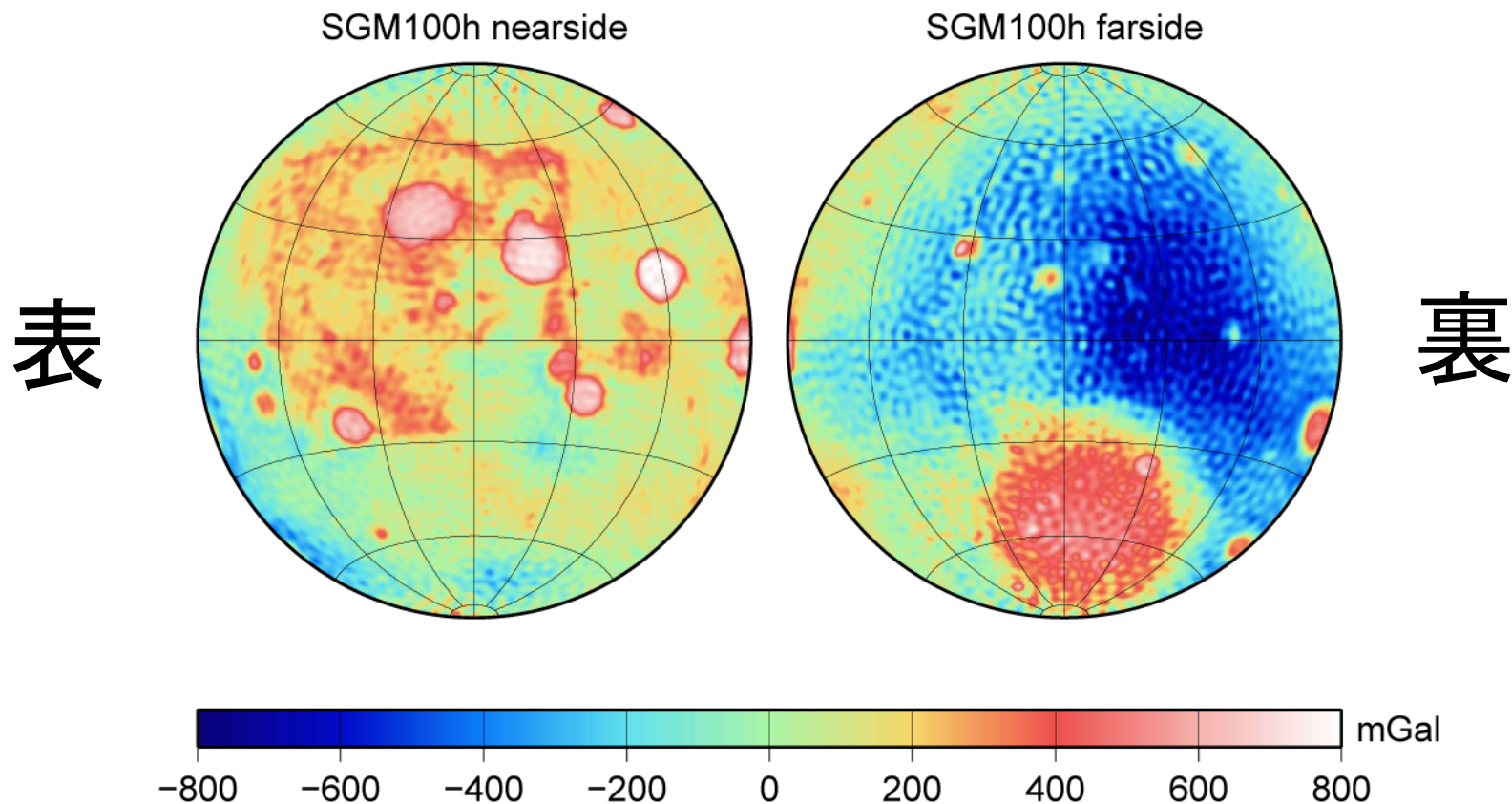
裏側の誤差が劇的に減少

# 重力場係数の決定に対する観測の寄与率



# 衝突盆地地形補償メカニズム

# 表面地形が作る引力を差っ引くと・・・



ブーゲー重力異常：主に地下構造(地殻とマンツルの境界の形状)を反映

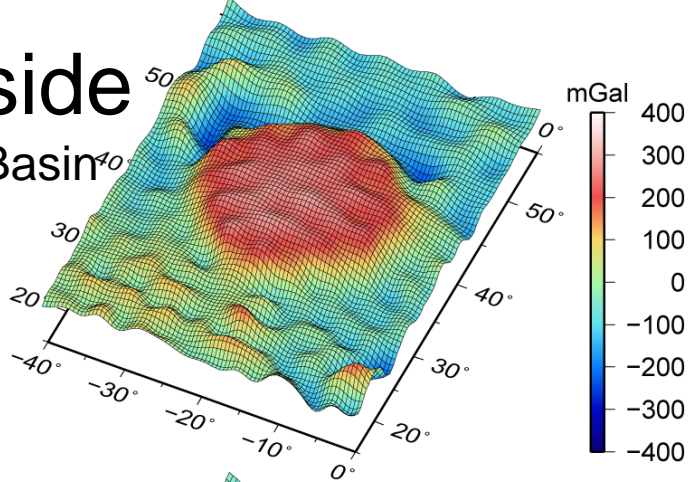
表と裏で様子が違う

表面だけでなく、地下構造にも表と裏の二分性があることが明らかに

# Nearside

Imbrium Basin

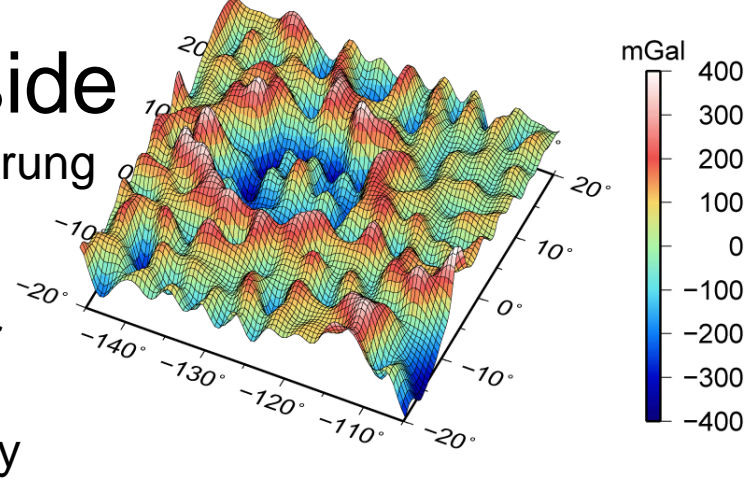
Free-air  
gravity  
Anomaly



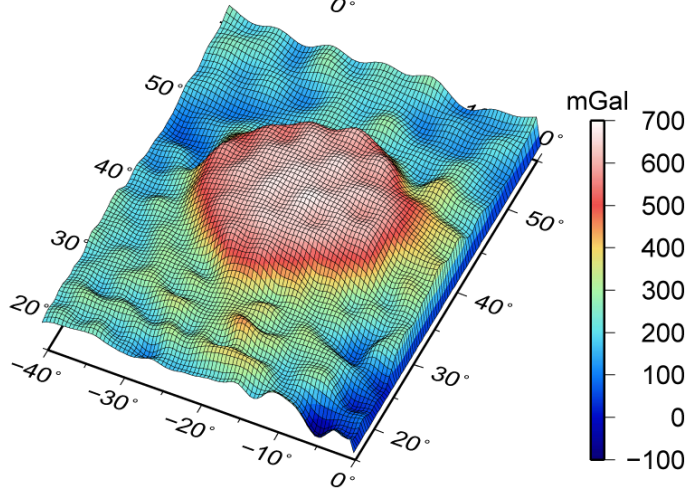
# Farside

Hertzprung  
Basin

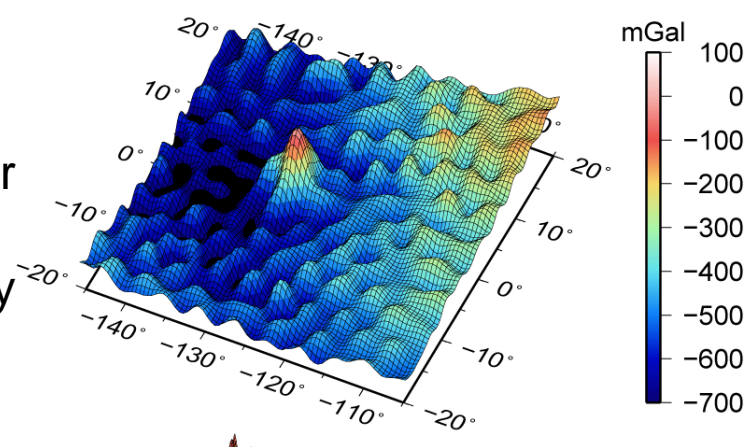
Free-air  
gravity  
Anomaly



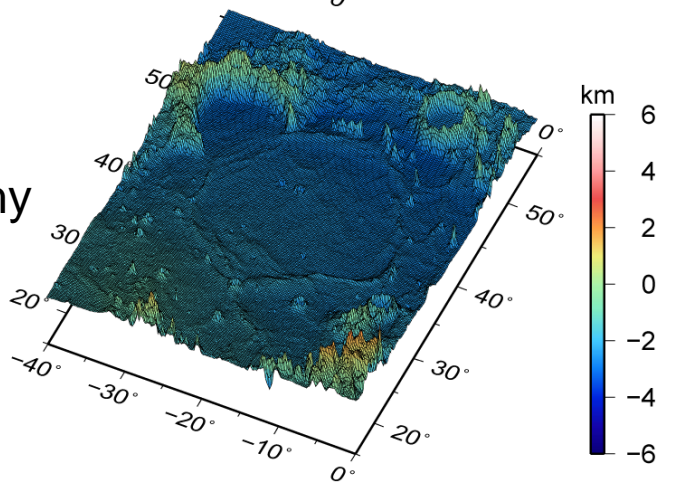
Bouguer  
gravity  
anomaly



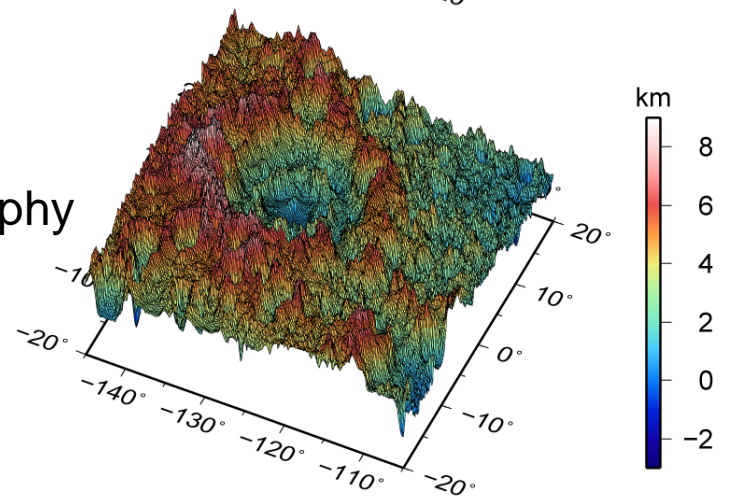
Bouguer  
gravity  
anomaly



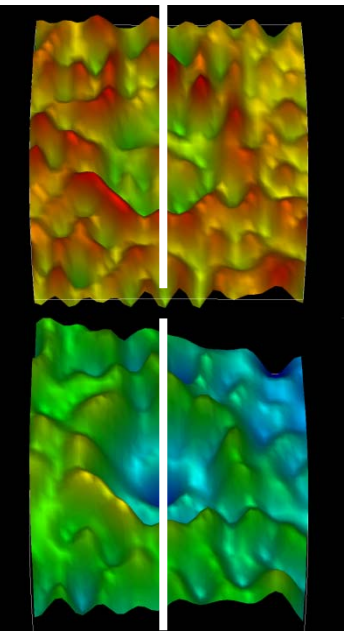
topography



topography



# Farside basins: A new classification



gravity

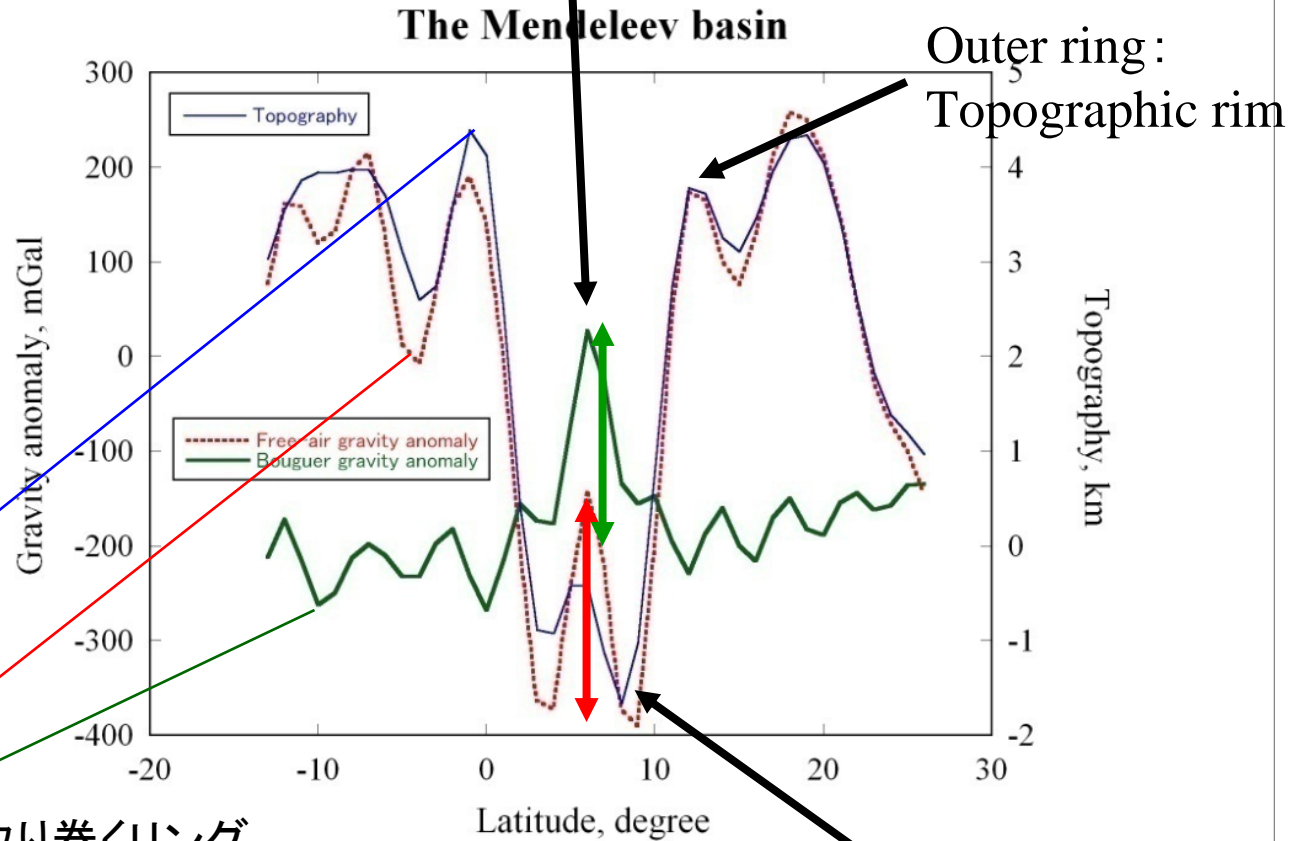
topography

topography

Free-air anomalies

Bouguer anomalies

Central high: Density anomalies in the interior



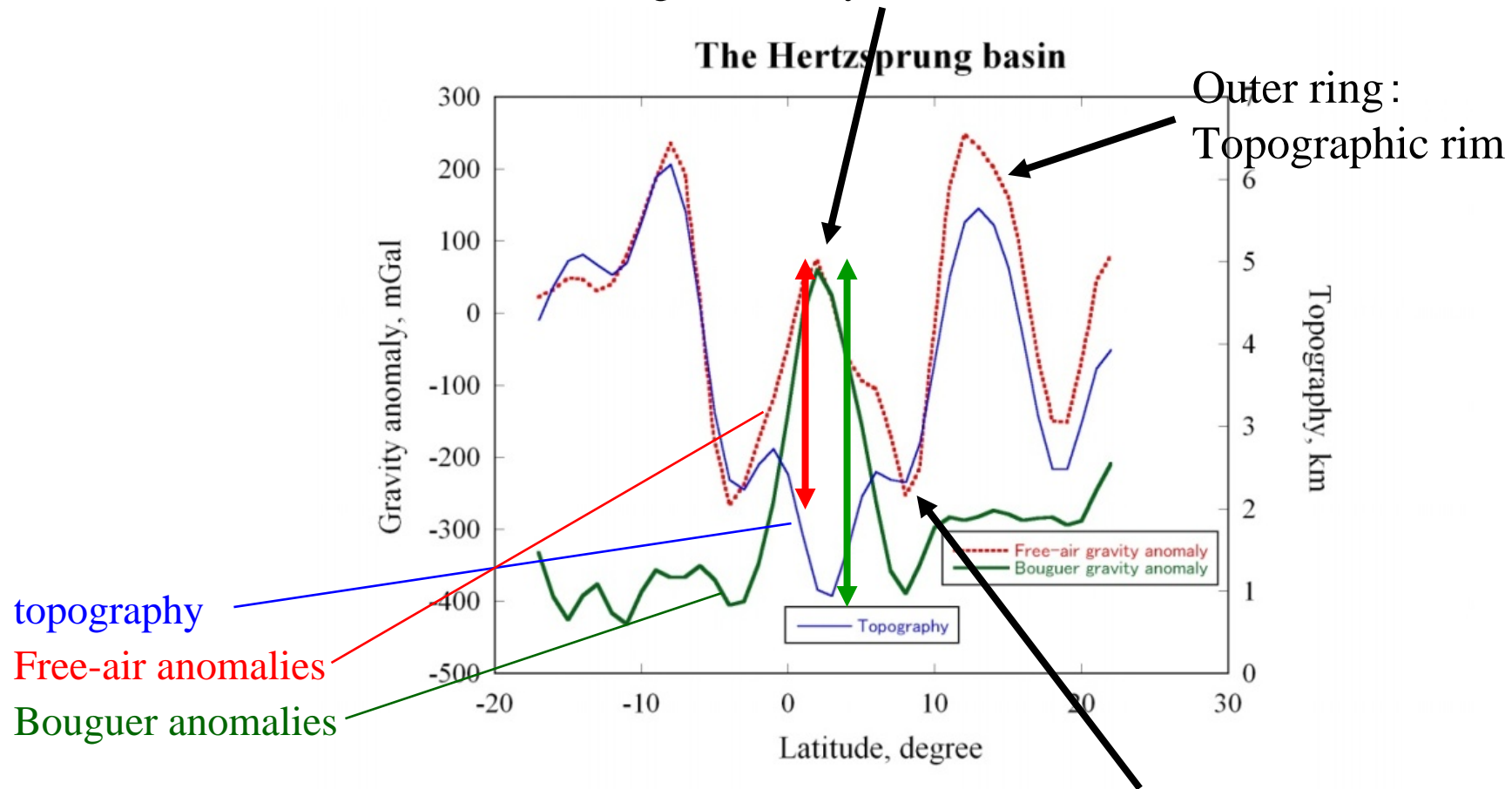
Inner ring: Topographic depression

## Type I

- 盆地地形の凹みとそれを取り巻くリング地形は、形成後、弾性的に固いリソスフェアによって支えられ続けた。
- Free-air ~ Bouguer: アイソスタシーに向かう地形補償がなかった。

# Farside basins: A new classification

Central high: Density anomalies in the interior



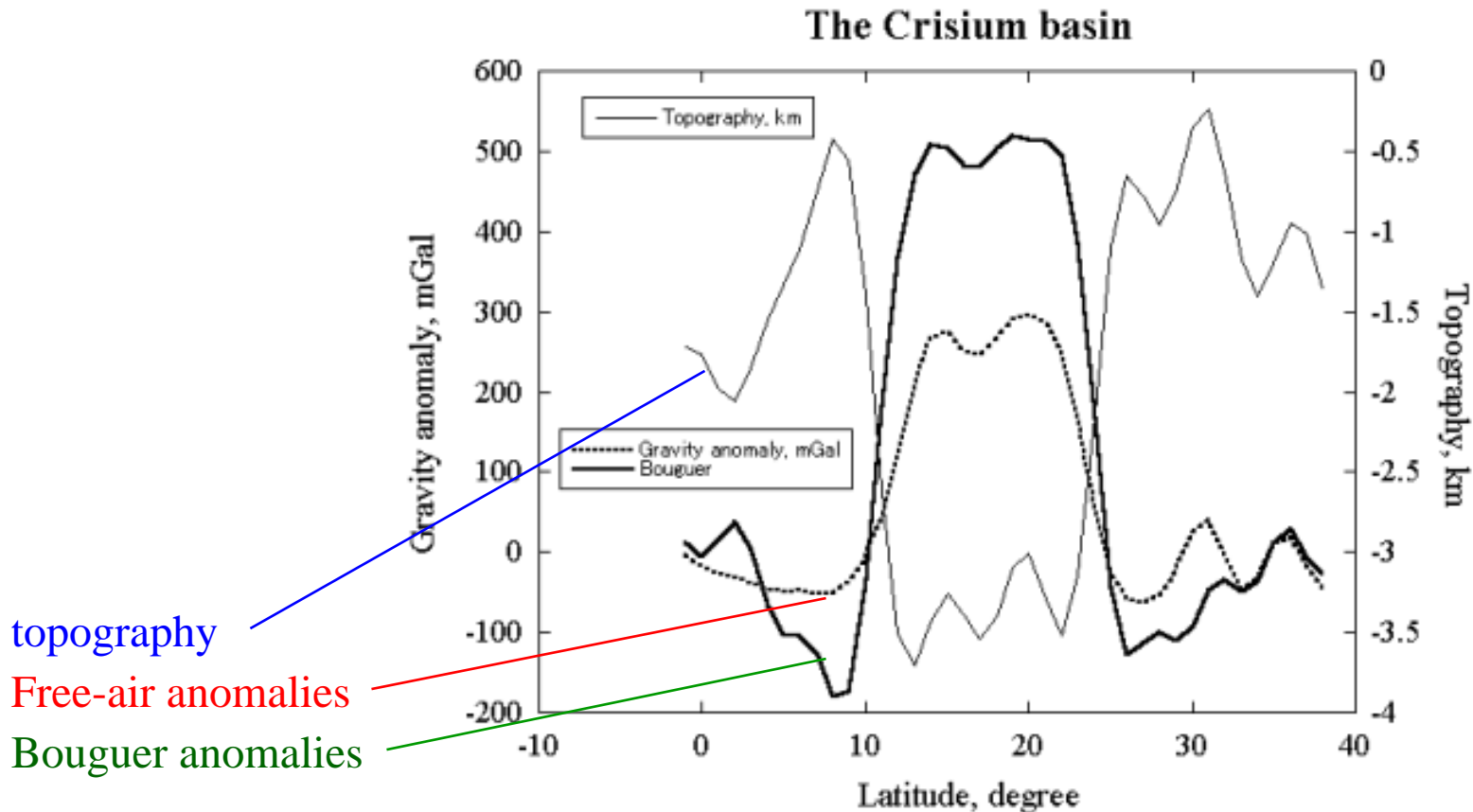
Inner ring: Topographic depression

## Type II

- Free-air < Bouguer: 中心部に限って  
アイソスタシーに向かう地形補償が起きた。  
→脆性変形?

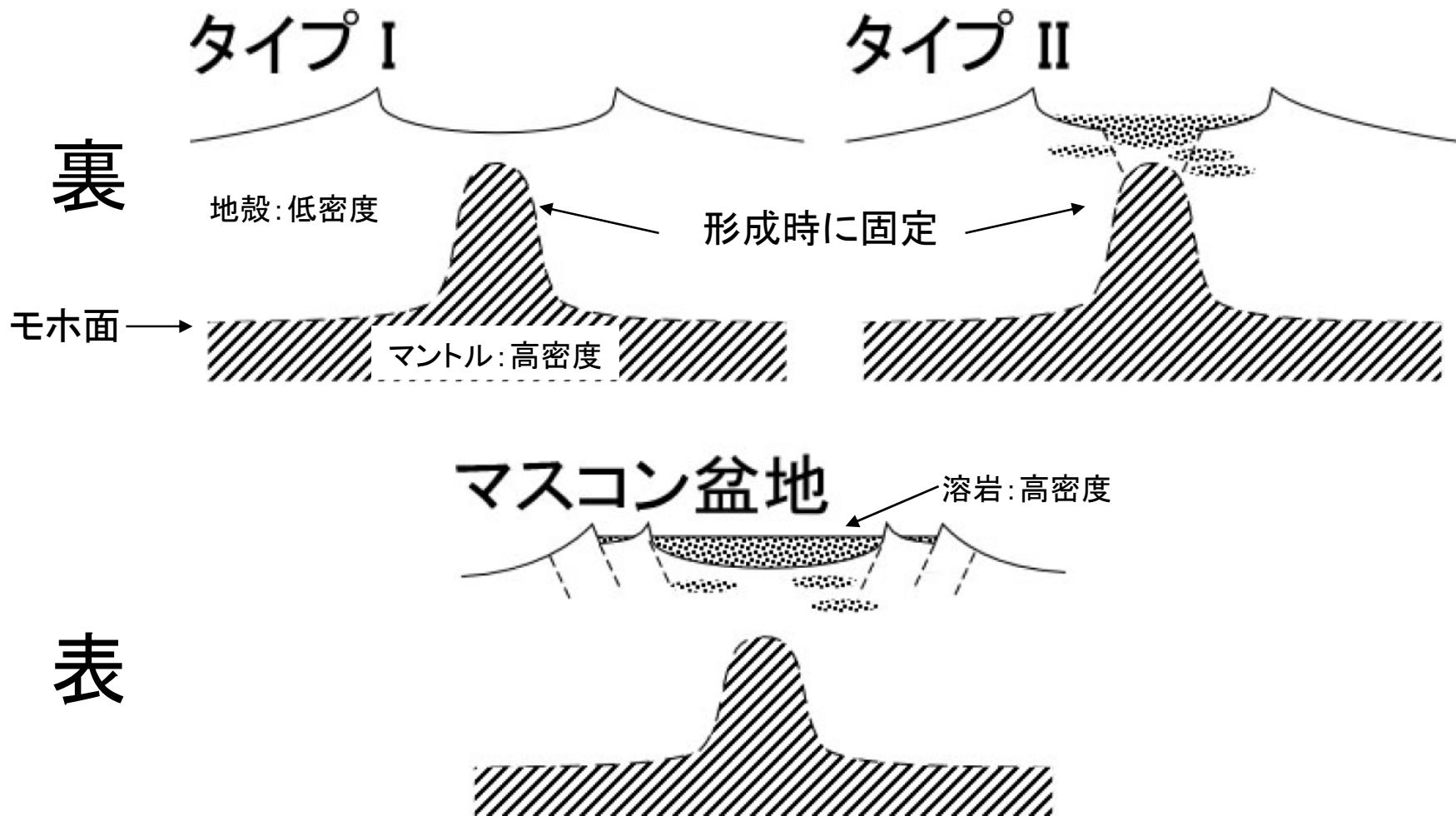


# 表側のマスコン



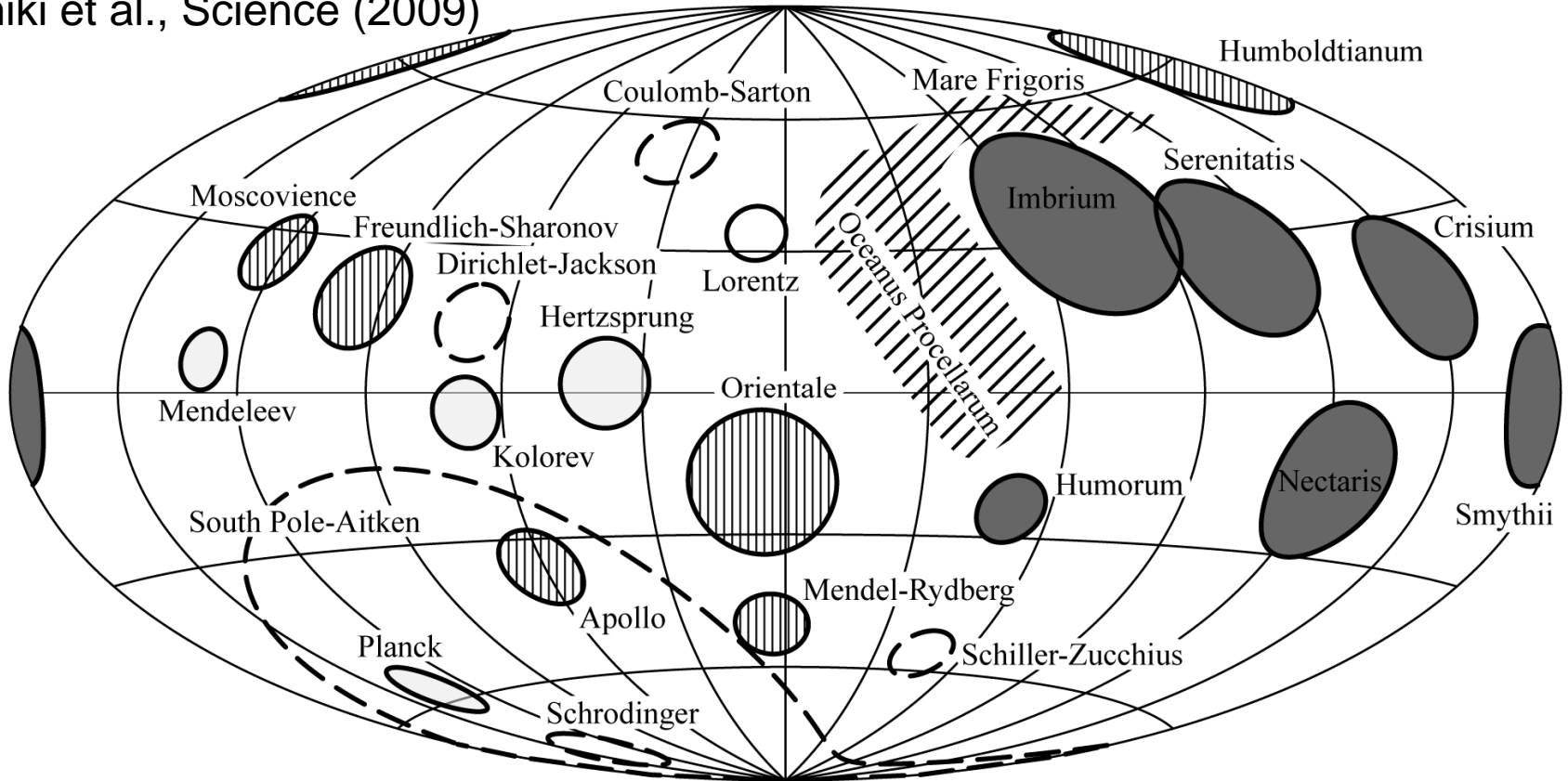
- ・外側の負-正のリング構造がFree-air異常にはっきりと認められない  
→表側では表面地形の緩和が進んだ
- ・重力異常の中心部が平ら  
→モホ面形状の緩和が進んだ

# 衝突盆地の分類: 地下構造



# Distribution of major lunar basins

Namiki et al., Science (2009)



Shaded = primary mascon basins,  
Lightly shaded = Type I basins,  
Hatched = Type II basins  
**No temporal order** recognized.

# まとめ

- SELENE (かぐや) の4-wayドップラーデータにより、月重力場モデルの裏側の精度が向上した。
- 表と裏の二分性は、表面地形だけでなく、衝突盆地の重力異常の様子にも見られる。



月の熱史を反映。

表と裏では熱史にはっきりとした相違があった。