

表面地形と溶岩の流動方向を利用した  
古セレノイドの復元

*Reconstruction of paleoselenoid using surface shapes of  
mare basalts and flow directions of sinuous rilles*

北海道大学院理学院 自然史科学専攻

宇宙測地学研究室

20113078

小川 達彦

2013年3月1日

指導教官：日置幸介

## 概要

月はその歴史を通じてほぼ円に近い低離心率の軌道で自転周期：公転周期=1：1の同期自転運動をしていると考えられている(e.g. Stacey and Davis, 2008)が現在のセレノイド(月の重力等ポテンシャル面)はそのような同期自転運動をする衛星の静水圧平衡状態からずれている(Innanen, 2006)。この問題を解き明かしていくに当たり、本研究では二つの測地学的アプローチを用いて過去のセレノイドを局地的に復元する試みを行い、地球-月力学系の進化の議論を目指した。

一つ目の方法として、レーザ高度計(LALT)による地形データ(Araki, et al., 2009)と月重力モデル(SGM100h, Matsumoto et al., 2010)を用い、マスコン盆地内の溶岩表面とセレノイドの形状を比較した。月の玄武岩溶岩は地球上の溶岩と比較して粘性が低く(Murase and R. McBirney, 1970)、地球の平均海水面がジオイドの形状を示しているのと同様に、溶岩表面が当時のセレノイドの形状を記憶している可能性が考えられる。本研究では比較的平らで当時のセレノイドを保持している可能性のある5つのマスコン盆地内の月の海(Mare Imbrium、Mare Serenitatis、Mare Humorum、Mare Crisium、Mare Nectaris)を利用した。

まず月の海の表面が実際に過去のセレノイドを記憶しているかを評価するために、それらの‘丸み’の検証を行った。マスコン盆地内のセレノイドは、マントルプラグや溶岩の自己重力によって凸型に膨らんでいる。Mare Imbrium、Mare Serenitatis、Mare Humorumの三つの月の海表面地形において、月重力モデルから求められたセレノイドと同程度の凸型の膨らみを確認することができた。このことは、この三つの地形が古セレノイドの情報を現在も保存している可能性を示唆している。

三つのマスコン盆地内のセレノイドは、凸型の膨らみに加えて、平均的な月地殻表面に対して全体的な傾きを示した。Mare Serenitatis、Mare Humorumの平面的な傾斜は、静水圧平衡状態の2次の形状( $J_2 : C_{22} = 10:3$ )と支持する方向を示したが、一方でMare Imbriumは異なる結果を示した。

二つ目の方法として、この結果を検証するために、地形カメラ(TC)による地形データを利用した sinuous rille の流動方向の調査を行った。sinuous rille は玄武岩溶岩流の痕跡で、その多くは地球の河川と同様重力ポテンシャルが下がる向きに流れているが、現在のセレノイドに対して上昇方向へ流れているケースが発見されており、これは現在と過去のセレノイドの傾きが若干異なる可能性を示唆している。その中で特に興味深いケースが Rima Suess である。Rima Suess は Mare Imbrium の南西方向に位置し、その流動方向は現在のセレノイドに対して上昇方向へと流れている。しかしながらこの上昇流動は、Mare Imbrium 周辺の平面的な傾斜に対して、静水圧平衡状態の2次の形状を支持する方向を向くように地形データに勾配のバイアスを与えると、下降流動になる。このことは Mare Imbrium が異常な傾斜を示した原因として、地形形成後に大規模な傾斜変動を起こした可能性を示唆することができた。

## 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b> .....	<b>3</b>
1.1	月探査周回衛星計画(SELENOLOGICAL AND ENGINEERING EXPLORER, SELENE).....	3
1.2	本研究の目的.....	7
<b>2</b>	<b>月の重力場</b> .....	<b>8</b>
2.1	重力場モデル.....	8
2.2	$J_2$ と $C_{22}$ について .....	9
2.3	慣性モーメント .....	9
2.4	月の形状.....	11
2.5	次数と共に小さくなる月の重力場係数：カウラの法則.....	15
2.6	月のアイソスタシー .....	15
<b>3</b>	<b>現在の月の形状から推察する過去の軌道進化</b> .....	<b>21</b>
3.1	GARRICK-BETHEL ET AL.(2006)による推論.....	21
3.2	Cuk, M.(2010)の概要 .....	24
3.3	2次の重力場係数の有意性 .....	25
<b>4</b>	<b>月の海を用いた古セレノイドの復元</b> .....	<b>28</b>
4.1	月の海における古セレノイドの情報保存の検証.....	29
4.2	月の海から古セレノイドを復元する.....	40
<b>5</b>	<b>溶岩の流動方向を用いた古セレノイドの復元</b> .....	<b>44</b>
5.1	SINUOUS RILLE の概要.....	44
5.2	SINUOUS RILLE の流動方向に関する考察.....	51
<b>6</b>	<b>まとめ</b> .....	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>謝辞</b> .....	<b>53</b>
<b>8</b>	<b>参考文献</b> .....	<b>54</b>

# 1 はじめに

本章では、本研究にて用いられた月探査衛星「SELENE」の測地学に関するミッションの概要を紹介する。また、ミッションの成果とそれらを用いた本研究の目的について記述する。

## 1.1 月探査周回衛星計画(Selenological and Engineering Explorer, SELENE)

2007年9月14日、日本初の大型月探査衛星「SELENE」は15の観測機器を搭載して打ち上げられた (Table.1)。この中には月の測地を目的とした2つの子衛星「おきな」(Rstar)と「おうな」(Vstar)及び主衛星「かぐや」に搭載されたレーザ高度計、地形カメラも含まれている。Rstarは4way Dopplerによって月の裏側の高次重力場を測定、Vstarは相対VLBI (Very Long Baseline Interferometry)を用いたRstarの3次元位置決定、レーザ高度計と地形カメラは表面地形の測定を目的としていた。

Table.1 観測ミッション一覧。提供：宇宙航空研究開発機構(JAXA)

項目	ミッション機器	ミッション内容
元素分布	<u>蛍光X線分光計(XRS)</u>	太陽からのX線を受けて月面から放射される二次X線を観測し、月表面の元素(Al、Si、Mg、Feなど)の分布を調べる。
	<u>ガンマ線分光計(GRS)</u>	月面から放射される $\gamma$ 線を観測し、月表面の元素(U、Th、K、Hなど)の分布を調べる。
地質・鉱物分布	<u>マルチバンドイメージャ(MI)</u>	月面からの可視近赤外光を9つの波長バンドで観測し、鉱物分布を調べる。
	<u>スペクトルプロファイラ(SP)</u>	月面からの可視近赤外光における連続スペクトルを観測し、月表面の鉱物組成を精度良く調べる。
地形・表層構造	<u>地形カメラ(TC)</u>	高分解能(10m)カメラ2台のステレオ撮像により、標高を含む地形データを取得する。
	<u>月レーダサウンダー(LRS)</u>	月面に電波を発射し、その反射により月の表層構造(地下数km程度まで)を調べる。
	<u>レーザ高度計(LALT)</u>	月面にレーザ光を発射し、その反射時間により、地形の起伏、高度を精密に測定する。
環境	<u>月磁場観測装置(LMAG)</u>	月面および月周辺の磁気分布を観測する。
	<u>粒子線計測器(GPS)</u>	月周辺における、宇宙線や宇宙放射線粒子、および月面のラドンから放射される $\alpha$ 線を観測する。

	<u>プラズマ観測装置(PACE)</u>	月周辺における、太陽風等に起因する電子およびイオンの分布を測定する。
	<u>電波科学(RS)</u>	VRAD 衛星から送信される電波の位相変化を測定し、希薄な月電離層を観測する。
	<u>プラズマイメージャ(UPI)</u>	月軌道から、地球の磁気圏およびプラズマ圏を画像として観測する。
月の重力分布	<u>リレー衛星中継器(RSAT)</u>	月裏側を飛行中の主衛星の電波を中継し、これを地球局でドップラ計測することによって主衛星の軌道の擾乱を観測する。これにより月裏側の重力場データを取得する。
	<u>衛星電波源(VRAD)</u>	リレー衛星およびVRAD衛星に搭載するS、X帯電波源を対象に、地球局による相対VLBI観測を行い、各衛星の軌道を精密に計測する。これにより月重力場を精密に観測する。 (VLBI: 超長基線電波干渉計。電波の経路差から電波源の位置を正確に求める)
精細画像	<u>高精細映像取得システム(HDTV)</u>	地球および月のハイビジョン撮影を行う

特に SELENE の技術的ポイントとして、月裏側の重力場の直接観測がある。中継衛星を経て交信することで月裏側にいる主衛星の追跡ができる(Fig.1)。これにより月の重力場モデルが大幅に改善された。(Namiki et al., 2009)

## 4-way Doppler

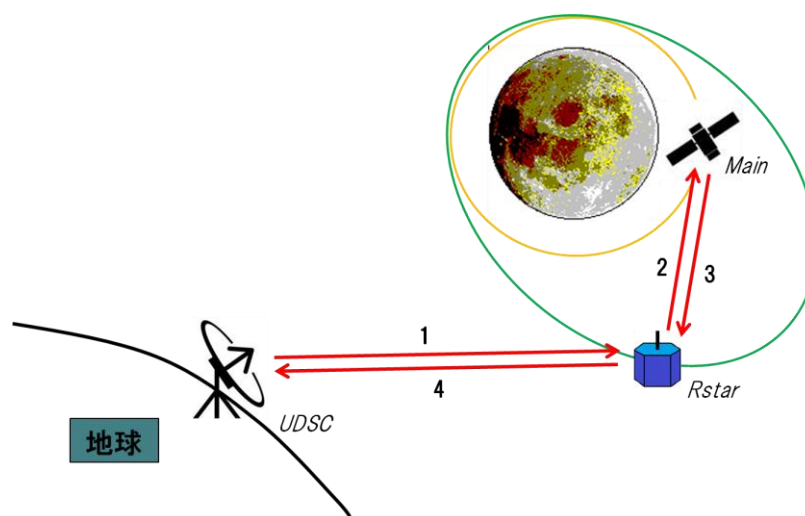


Fig.1 SELENE による 4-way Doppler 観測のイメージ図

月の重力場観測とともに本研究で主にその成果を利用したのは、レーザ高度計(LALT)と地形カメラ (TC) による月の表面地形のデータである。特に全球の高度データは、SELENE 以前では Clementine が本格的な地形観測を行っていたが、全データ数は72300にとどまり、極域付近の緯度 $\pm 80$ 度以上の観測はできず、空間分解能も20~60kmほどであった。

SELENE の LALT と TC の測定原理は Fig.2、3 に示す。

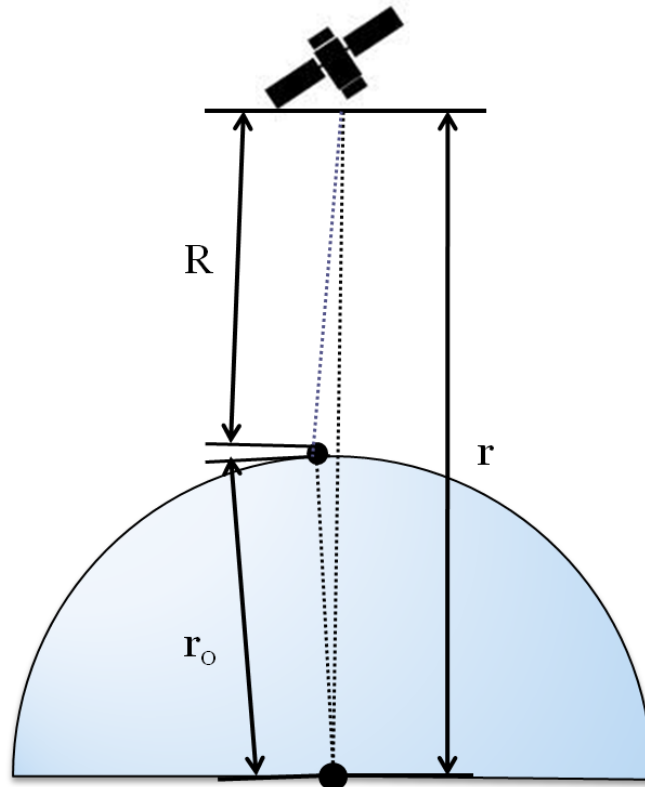


Fig.2 SELENE/LALT による月地形のレーザ観測

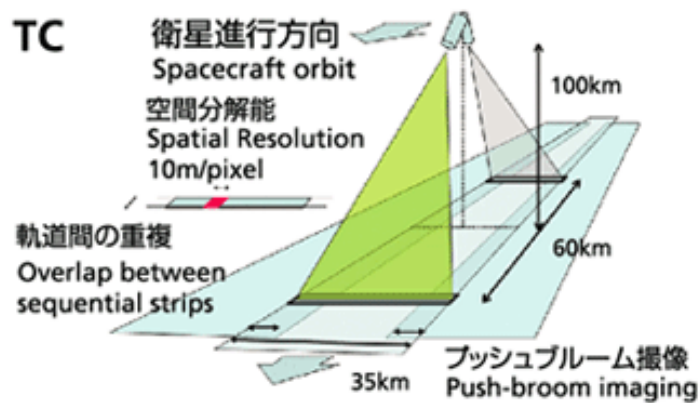


Fig.3 SELENE/TC による月地形の立体視観測. 提供：宇宙航空研究開発機構(JAXA)

LALT (Fig.2) は主衛星からレーザーパルスを発射し、その反射が到達するまでの時間を測ることで距離  $R$  を測る。 $r$  は別途ドップラー及び VLBI 観測で決定されているので、月の重心から表面までの距離  $r_0$  が求められる。主衛星が極軌道を取り、月の自転を利用して観測する経度を変えていき、全球にわたる  $r_0$  の観測が行われる。

TC(Fig.3)は主衛星から前方と後方へ向けた 2 台のカメラによって月全球の立体視(ステレオ)観測が行われた。空間分解能は 10m/pixel。

SELENE では 2009 年 2 月末日までに、測定精度数  $m$ 、観測点は 1300 万点を超え、観測点間隔も 0.5 度以下を達成している。下図が LALT で観測された地形データを使用した月全球地形グリッドデータで描写した図で、分解能は 16pixel/degree( $2^4$ )である。

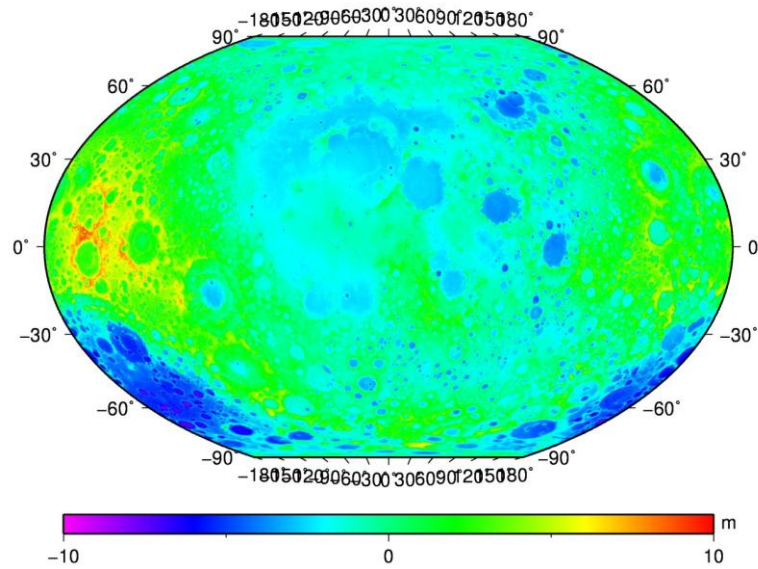


Fig.4 SELENE/LALT の観測データを使用した月全球地形図

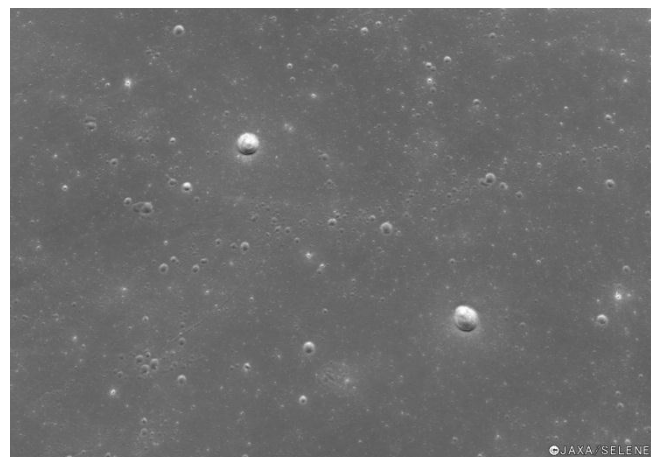


Fig.5 SELENE/TC の撮影した「晴れの海」提供：宇宙航空研究開発機構(JAXA)

## 1.2 本研究の目的

月は現在、地球の周りを軌道長半径約 $60R_e$  ( $R_e$ は地球の半径)、離心率0.055で自転周期と公転周期が等しい同期自転を行っている(国立天文台, 2005)。月の起源には諸説あるが、46億年前に巨大衝突によって地球の近傍で誕生し、その後海洋潮汐摩擦によって現在の状態まで軌道半径が増大していったと考えられている (e.g. Stacey and Davis, 2008)。このような月—地球系の歴史を通じて同期自転が維持されていた場合、月はその2次の重力場係数  $C_{20}$  ( $\equiv -J_2$ ) と  $C_{22}$  の比が  $C_{20} : C_{22} = 10 : 3$  という簡潔な比になることが理論的に示される。

しかしながら実際に測られた値は  $J_2 / C_{22} = 9.09$  (かぐやによる値, Namiki et al. (2009)) となっており、理論値に対して  $J_2$  が  $C_{22}$  に比べて大きすぎる。このズレに対し現在までに合理的な説明はなされておらず、地球-月力学系の進化における未解決の問題となっている。

この問題のさらなる研究のため、我々は月の海の表面地形から後期重爆撃期当時のセレノイドの一部を復元し、地球—月力学系の進化の議論を試みる。我々は玄武岩溶岩が月の盆地を埋めた当時のセレノイドの形状を復元するために、本研究では、地球-月力学系の進化に対し二つの測地学的アプローチで考えていく。

まず1つ目の方法として、LALTの地形データ (Araki, et al., 2009) と月の重力モデル (SGM100h, Matsumoto et al., 2010) を比較し、マスコン盆地内の溶岩表面がセレノイドと平行であるか調べた。月の玄武岩溶岩は地球上のどの溶岩よりも粘性が低いので (Murase and R. McBirney, 1970)、溶岩表面から当時のセレノイドの形状を推測できる。本研究では比較的平らで当時のセレノイドを保持している可能性のある4つのマスコン盆地を見出した。そして、LALTで得られた4つの盆地表面の地形過去のセレノイドを推察し、現在のセレノイドと比較することで月の軌道進化について議論することを目指した。

この結果を別のデータから確認するべく、我々はTCデータから *sinuous rille* の流れた方向を調べた。*sinuous rille* は溝もしくは谷で、玄武岩溶岩流の熱浸食によってできたとされる。これらの流れた方向は地球の河川と同様重力ポテンシャルが下がる向きである。しかし中村 (2011, pers. Comm.) は、*Rimae Plato* (雨の海の北側に位置) が、現在のセレノイドに対して上向きに流れたように見えることを見出した。これは現在と過去のセレノイドの傾きが若干異なる可能性を示唆している。雨の海周辺には多くの *sinuous rille* が存在するが、*Rimae Plato* 以外にもいくつかの *sinuous rille* が現在のセレノイドに対して上向きの流れを示す。その中でいくつかの興味深いケースを報告する。



## 2 月の重力場

### 2.1 重力場モデル

月の重力ポテンシャルは、以下のように球面調和展開してモデル化される (Matsumoto et al., 2010)。

$$\text{Gravity}(\varphi, \lambda, r) = \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^N \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \quad (1)$$

ここで  $\text{Gravity}(\varphi, \lambda, r)$  は重力ポテンシャル、 $\varphi$  は緯度、 $\lambda$  は経度、 $r$  は半径、 $G$  は万有引力定数、 $M$  は月の質量、 $R$  は月の標準半径 (1378.0km; Matsumoto et al., 2010)、 $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$  は正規化された重力ポテンシャルの球面調和係数、 $\bar{P}_{nm}$  は正規化されたルジャンドル陪関数、 $n, m$  はそれぞれ次数と位数である。このように、重力場のモデルは各次数・位数毎の球面調和係数 (ストークス係数)  $\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$  を用いて表現される。重力場モデルの使用例として、SGM100h (SELENE Gravity Model with the maximum degree and a version number; Matsumoto et al., 2010) を用いてセレノイド (月のジオイド (等ポテンシャル面)) を描く。セレノイド高  $V(\varphi, \lambda, r)$  を求める式 (式(2)) とそれによって描いた図 (Fig.6) を以下に示す。

$$V(\varphi, \lambda, r) = R \sum_{n=0}^N \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \quad (2)$$

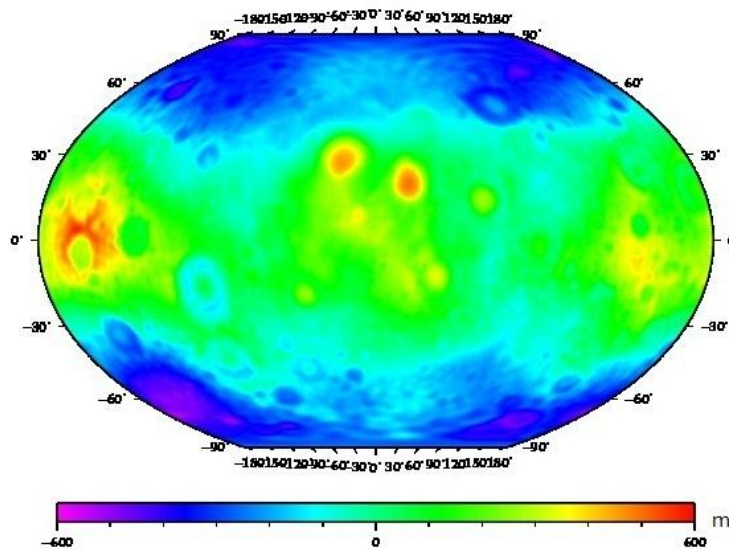


Fig.6 セレノイド高 (月のジオイド (等ポテンシャル面)) の図(SGM100h; Matsumoto et al., 2010).

## 2.2 $J_2$ と $C_{22}$ について

重力場における天体の形状を示す指標として、重力場を球面調和展開した時の係数（ストークス係数）がしばしば用いられる。本研究では月の大局的形状をみるために、特に 2 次の重力場係数の  $J_2$  ( $\equiv -C_{20}$ ) と  $C_{22}$  を利用する。これらは質量分布により次のように記述できる (Sagitov et al., 1986)。なお重力場係数としてデータ公開されている値には、完全直交正規化のために次数と位数から決まるある係数がかけられており、本来の定義である下記の式で求められた値と異なっている。そのためストークス係数の絶対値を用いて議論する場合は注意が必要である

$$J_2 \equiv -C_{20} = \frac{1}{2MR^2} \int_{\Omega} \sigma[(x^2 + y^2) - 2z^2] d\Omega \quad (3)$$

$$C_{22} = \frac{1}{4MR^2} \int_{\Omega} \sigma[x^2 - y^2] d\Omega \quad (4)$$

ここで  $M$  は天体の質量、 $R$  は平均半径、 $\sigma$  は密度、 $x, y, z$  は重心に原点を置く三次元直交座標での位置である。これらの係数の値が示す意味を視覚化すると以下ようになる。

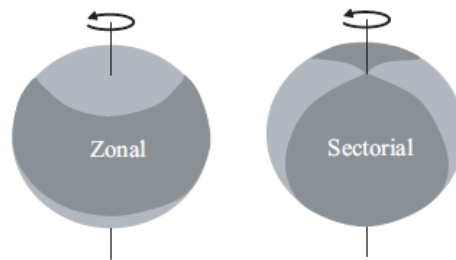


Fig.7 左と右がそれぞれ  $J_2$  と  $C_{22}$  成分を示す。色の濃い部分と薄い部分が隆起・沈降する。地球内部物理学講義ノート（日置幸介）より。

## 2.3 慣性モーメント

慣性モーメントは物体を「回す」ときの重さである。慣性モーメント  $I$  を質点ごとの質量  $m$  と回転軸からの距離  $r$  を用いて表すと

$$I = \sum_i m_i r_i^2 \quad (5)$$

となる。

### 2.3.1 慣性モーメントと惑星の内部構造

回転楕円体の三軸の周りの慣性モーメントについて考える。下図のように  $x,y,z$  軸周りの慣性モーメントをそれぞれ  $A,B,C$ (Fig.8) とすると

$$A = \frac{1}{MR^2} \int_V (y^2 + z^2) \rho dv \quad (6)$$

$$B = \frac{1}{MR^2} \int_V (x^2 + z^2) \rho dv \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{MR^2} \int_V (x^2 + y^2) \rho dv \quad (8)$$

となる(Sagitov et al., 1986)。ここで  $M$  は天体の質量、 $R$  は平均半径、 $\rho$  は密度である。月のような比較的大きな天体は球形に近いので、(6)~(8)で計算される三つの慣性モーメントはほとんど同じ値となる。

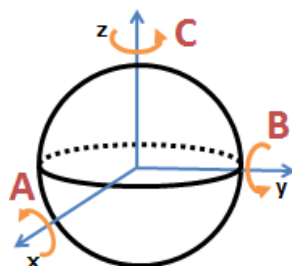


Fig.8 回転楕円体の  $x,y,z$  軸周りの慣性モーメント  $A,B,C$ .

慣性モーメントは、天体の内部構造において質量が中心に集中する度合いを表す基準となる。既知の慣性モーメントは以下のとおりである(Stancey and Davis, 2008)。ただし  $M$  はそれぞれの天体の質量、 $a$  は平均半径である。均一な内部構造を持つ球体の慣性モーメントの係数は  $2/5 (=0.4)$  になるが、実際の月惑星の慣性モーメントがその値より幾分小さいのは金属核の存在を判定している。

Spherical shell	$(2/3)Ma^2$	
Uniform sphere	$(2/5)Ma^2$	
Moon	$0.391 Ma^2$	
Mars	$0.366 Ma^2$	
Earth	$0.3307 Ma^2$	
Homogenized Earth	$0.3727 Ma^2$	(9)

### 2.3.2 慣性モーメントと二次の重力場係数および力学的扁平率の関係

軸周りの慣性モーメント  $A, B, C$  を用いて、天体の形状を表す諸パラメータを表現することができる。まず天体の回転軸の変動を支配する「力学的扁平率」 $\alpha, \beta, \gamma$  は

$$\alpha = (C - B) / A \quad ; \quad \beta = (C - A) / B; \quad \gamma = (B - A) / C \quad (10)$$

のように表現できる。(Sagitov et al., 1986)。次に天体の 2 次の重力場の調和係数  $C_{20}$ 、 $C_{22}$  は、

$$C_{20} = \frac{A+B-2C}{2} \quad ; \quad C_{22} = \frac{B-A}{4} \quad (11)$$

のように表現できる。(Sagitov et al., 1986)。

## 2.4 月の形状

月の形状は大局的にみて真球からずれた三軸不等の楕円体となっている。その原因としてあげられるのが (i) 月の自転からくる遠心力による扁平と、(ii) 地球からの潮汐力による地球-月方向の伸張である。楕円体の球体からの微小なずれは、緯度を  $\theta$  として次数 2 の球関数  $P_{20}(\sin \theta)$  で表すことができる。

$$P_{20}(\sin \theta) = \frac{3\sin^2 \theta - 1}{2} \quad (12)$$

月は現在、自転周期：公転周期 = 1 : 1 の同期軌道で地球の周りをまわっている。この場合の (i) と (ii) によるポテンシャルを  $P_{20}(\sin \theta)$  を用いて表す。

### 2.4.1 自転による月の遠心力ポテンシャル

まず自転からくる遠心力による扁平を考える。まず簡単のために場所を赤道の 1 点の単位質量について考える。ここで遠心力  $F$  とそれによるポテンシャル  $\Phi$  は

$$F = R\omega^2 \quad (13)$$

$$\Phi = \int R\omega^2 dr = \frac{1}{2} \omega^2 R^2 \quad (14)$$

となる。同様に、緯度  $\theta$  では

$$F = R\omega^2 \cos \theta \quad (15)$$

$$\Phi = \int R\omega^2 \cos \theta dr \cos \theta = \frac{1}{2} \omega^2 R^2 \cos^2 \theta \quad (16)$$

となる。これを次数 2 の球関数  $P_{20}(\sin \theta)$  で表して、緯度依存項をとりだすと

$$U_{\text{rotation}}(\theta) = -\frac{1}{3} \omega^2 R^2 P_{20}(\sin \theta) \quad (17)$$

となる。ただし  $R$  は天体の平均半径、 $\omega$  は自転角速度である。

#### 2.4.2 月における地球の潮汐ポテンシャル

潮汐力は、他の天体の引力（月の各点で異なる）と公転による遠心力（月のすべての点で同じ）の差によって起こる力である。以上をそれぞれ  $f_d$ 、 $f_r$  とすると

$$f_d = \frac{GM}{d^2} \quad (18)$$

$$f_r = \frac{GM}{r^2} \quad (19)$$

ただし  $G$  は万有引力定数、 $M$  は地球の質量、 $r$  は月の重心から地球の重心までの距離、 $d$  は月のある 1 点から地球の重心までの距離である。ここで任意の 1 点を月の重心におくと  $d=r$  で潮汐力はゼロとなる。

下図(Fig.9)のように  $\theta$ 、 $\theta'$  をとる（ $\theta$  は月から見た地球の天頂角であり、月における緯度ではないことに注意）、潮汐力を水平成分  $f_{th}$ 、鉛直成分  $f_{tv}$  に分けると

$$f_{th} = f_{dh} - f_{rh} = GM \left[ \frac{\sin \theta'}{d^2} - \frac{\sin \theta}{r^2} \right] \quad (20)$$

$$f_{tv} = f_{dv} - f_{rv} = GM \left[ \frac{\cos \theta'}{d^2} - \frac{\cos \theta}{r^2} \right] \quad (21)$$

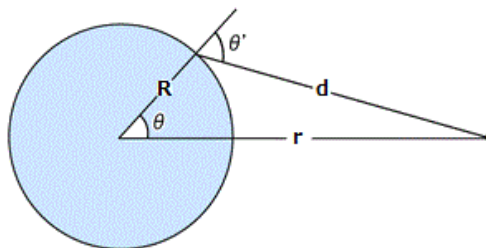


Fig.9

Fig.9 より

$$\sin \theta' = \frac{r}{d} \sin \theta \quad (22)$$

$$\cos \theta' = \frac{r \cos \theta - R}{d} \quad (23)$$

余弦定理より

$$d^2 = r^2 \left\{ 1 + \left( \frac{R}{r} \right)^2 - 2 \left( \frac{R}{r} \right) \cos \theta \right\} \quad (24)$$

$$\frac{r^3}{d^3} = \left\{ 1 + \left( \frac{R}{r} \right)^2 - 2 \left( \frac{R}{r} \right) \cos \theta \right\}^{-3/2} \cong 1 + 3 \left( \frac{R}{r} \right) \cos \theta \quad (25)$$

ただし  $\left( \frac{R}{r} \right) \ll 1$  として高次項を省略した。以上の4つの式を式(20)、(21)に代入すると潮汐力の水平、鉛直成分は

$$f_{th} = \frac{3}{2} \frac{GMR}{r^3} \sin 2\theta \quad (26)$$

$$f_{tv} = 3 \frac{GMR}{r^3} \left\{ \cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right\} \quad (27)$$

となる。また潮汐力のポテンシャル  $U_{\text{tide}}$  は以下のように表される。

$$U_{\text{tide}} = \frac{3}{2} \frac{GMR^2}{r^3} \left\{ \cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right\} = \frac{GMR^2}{r^3} P_{20}(\cos \theta) \quad (28)$$

### 2.4.3 同期自転天体の形状

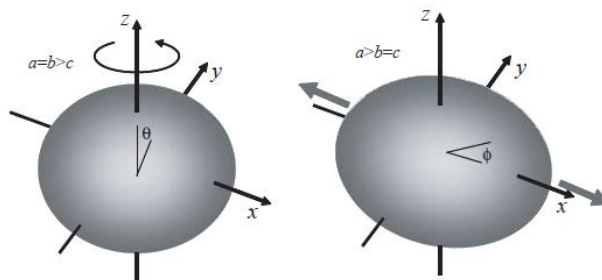


Fig.10 それぞれ遠心力 (左)・潮汐力 (右) のポテンシャル.  
地球内部物理学講義ノート (日置幸介) より.

Fig.10 のように  $\theta$ 、 $\varphi$  を定義すると遠心力ポテンシャルと潮汐ポテンシャルは、

$$U_{\text{rotation}} = -\frac{1}{3} \omega^2 R^2 P_{20}(\cos \theta) \quad (29)$$

$$U_{\text{tide}} = \frac{GM R^2}{r^3} P_{20}(\cos \varphi) \quad (30)$$

のようになる。ケプラーの第 3 法則  $GM = r^3 n^2$  を用いると

$$U_{\text{tide}} = n^2 r^2 P_{20}(\cos \varphi) \quad (31)$$

ただし  $n$  は公転角速度。同期自転天体は自転角速度  $\omega$  と公転角速度  $n$  が等しいので、式 (29)(30) の二種類のポテンシャルは同類項となり、 $U_{\text{rotation}}$  と  $U_{\text{tide}}$  の振幅比は  $1 : 3$  という簡潔な比になる。そのため Fig.11 のように、中心天体の方向、赤道面内で中心天体の方向と直交する方向、極方向の張り出し (半径の球からのずれ) は遠心力による張り出し  $1:1:-2$  と潮汐力による張り出し  $2:-1:-1$  を三倍したものを足して、合計で  $7 : -2 : -5$  という単純な比となり、その結果三軸不等の楕円体になる。

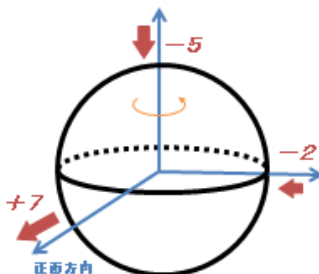


Fig.11 同期自転衛星の三軸についての理想的な伸張.

またこのとき、2 次の重力場係数  $C_{20}$ 、 $C_{22}$  の比も、 $C_{20}$ 、 $C_{22} = 10 : 3$  という簡潔な比になる。

## 2.5 次数と共に小さくなる月の重力場係数：カウラの法則

地球の重力ポテンシャルの解析で、Kaula (1963)は重力場の球面調和展開時に、重力ポテンシャルの調和係数のある次数  $l$  における値は、平均値がゼロでその周りの標準偏差  $s\{\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}\}$  が、次数と共に下記の式のように小さくなってゆくことを経験的に見出した。

$$s\{\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}\}_{\text{earth}} \equiv \left[ \frac{\sum_{m=0}^l \{C_{lm}^2 + S_{lm}^2\}}{2l+1} \right]^{\frac{1}{2}} \approx 10^{-5}/l^2 \quad (32)$$

Kaula(1963)は、月を構成する物質が地球と同等の強度を持つという前提で、このカウラ則の月の場合の比例係数  $\beta$  を推察した。

$$s\{\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}\}_{\text{moon}} \approx \beta * 10^{-5}/l^2 \quad \beta = 35.7 \quad (33)$$

月では重力場を球面調和展開する際に、重力場データが地理的に偏っている（かぐや以前ではそもそも表側のドップラーデータしか得られていなかった）ため高次で推定値が発散してしまう。一方かぐやでも観測データだけでは60次以降の高次になると推定値が安定しないため、拘束条件としてカウラ則を使用している (Namiki et al., 2009)。本研究で使用しているかぐやの重力場のデータ SGM100h では  $\beta=36$  としている (Matsumoto et al., 2010)。

## 2.6 月のアイソスタシー

### 2.6.1 アイソスタシー

アイソスタシーとは、長い時間スケールでは密度の大きい惑星深部の岩石が流動性を有するために、地表付近の質量の過不足がその浮力によって補われる現象である。

アイソスタシーのモデルとして、(1)エアリー・ハイスカネンモデル(Fig.12)、(2)プラット・ヘイフォードモデル(Fig.12)、および(3)それらを複合させたモデル(Fig.14)、がある。

エアリー・ハイスカネンモデル(Fig.12)は、地殻は密度一定で、標高の高いところほどその下に大きな地殻の‘根’を持っているというモデルである。



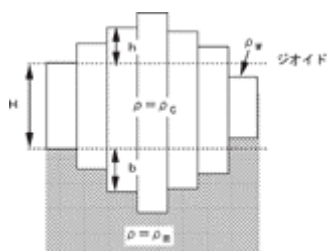


Fig.12 エアリー・ハイスカネンモデルの概念図. 測地学テキスト(web版)2004より.

プラット・ヘイフォードモデル(Fig.13)は、地殻の‘根’の下端は一定の深さで、標高によって地殻の密度が変化するモデルである。

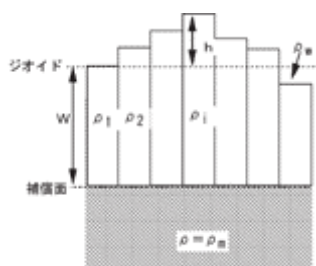


Fig.13 プラット・ヘイフォードモデル概念図. 測地学テキスト(web版)2004より.

上の二つのモデルを組み合わせたモデルが、現在もっとも実際に近いと考えられている。(2)のモデルでは補償面は地殻とマンツルの境界面であるモホ面に置かれていたが、実際に力学的に流動性があるのはアセノスフェアなので、補償面をリソスフェアとアセノスフェアの境にとり、地殻の‘根’はリソスフェアの弾性によっても支えられているモデルである(Fig.14)。

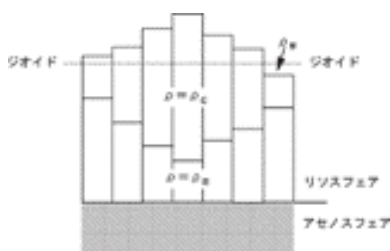


Fig.14 エアリー・ハイスカネンモデルとプラット・ヘイフォードモデルの複合モデルの概念図. 測地学テキスト(web版)2004より.

## 2.6.2 月の衝突盆地の補償メカニズム

では実際に月では全球的、あるいは局地的にアイソスタシーは成り立っているのだろうか。衝突盆地形成による月面の質量欠損に対する応答を見ることで検証する。

### 2.6.2.1 南極エイトケン盆地のアイソスタシー補償

月における最大の衝突盆地として知られる南極エイトケン盆地について考える。Fig.13 はかぐやによる月重力場モデル SGM100h (Matsumoto et al., 2010) を用いて描いた月のフリーエア重力異常図である。LALT のデータに基づいて描かれた地形図(Fig.16)と比べると、南極エイトケン盆地による巨大な質量欠損が見られない。これは南極エイトケン盆地ではアイソスタシーが成立している（地形のへこみに対応してその地下にモホ面が盛り上がっている）ことが分かる。

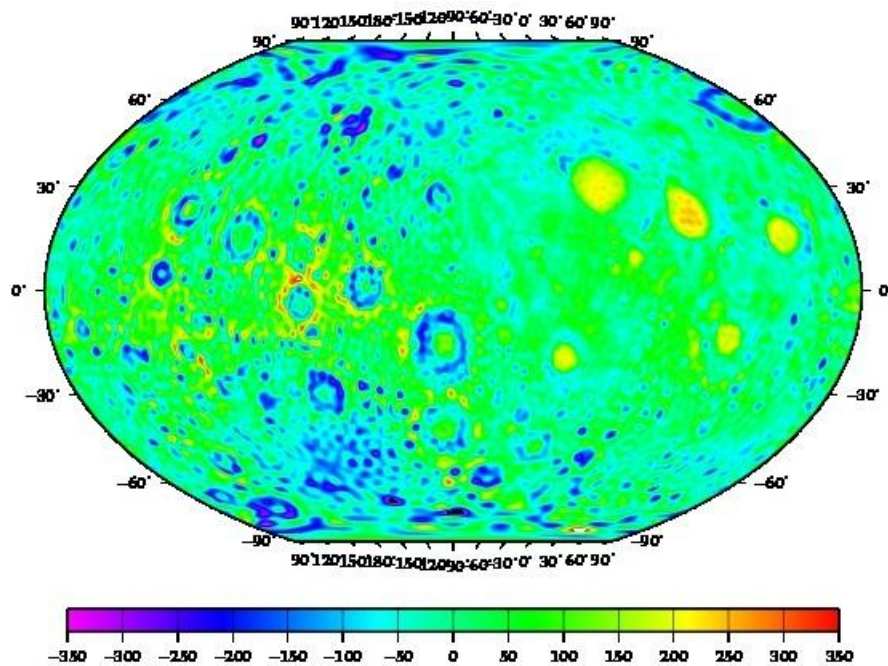


Fig.15 月の重力異常図 (Matsumoto et al., 2010) .

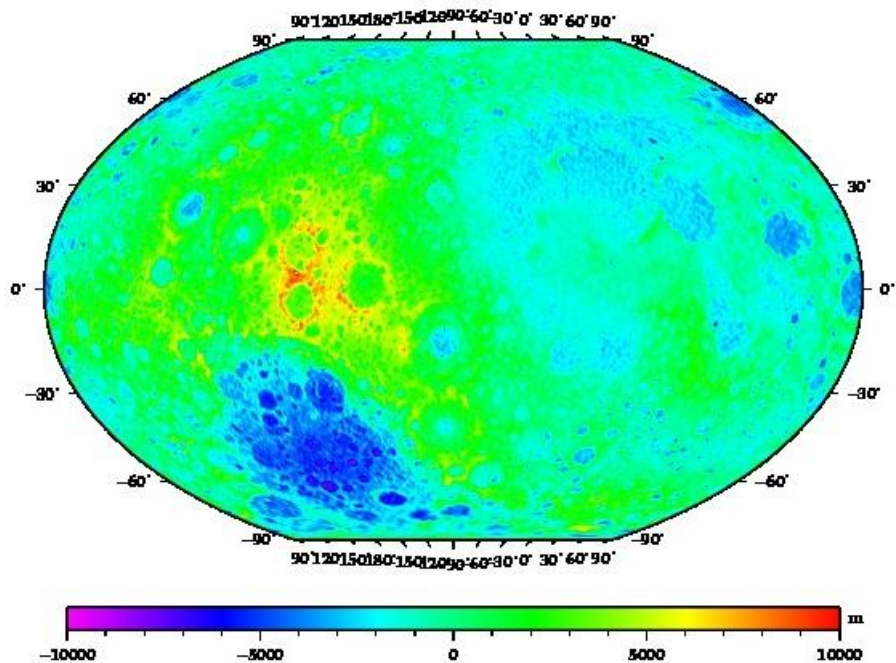


Fig.16 月の地形図 (Araki et al, 2009) .

### 2.6.2.2 衝突盆地の補償メカニズム

かぐやにより月裏側の重力場が直接観測され、初めて信頼性の高い月の全球重力異常図が作成された。その結果、月の衝突盆地は大きく 3 つのタイプに分類されることが明らかになった。Namiki et al.(2009)はそれらを Type I basin、Type II basin、Primary mascon basin と呼んだ。Type I basin、Type II basin は月裏側や縁辺部に分布しており、Primary mascon basin は、月表側にある所謂マスコン盆地である。

3 つのタイプの盆地すべてに共通することは、盆地中央に正の重力異常がみられることである(Fig.15)。これは衝突時のモホ面の過補償による上昇が原因と考えられているが、定量的なメカニズムはこれまで提唱されていない。

アイソスタシー補償の有無の判断で重要なのは、フリーエア重力異常と盆地地形との相関である。重力異常図で Type I 及び Type II basin は、中央で過補償による正の異常を示すが、そこから外側に向かって盆地地形と良く相関した正-負-正の重力異常のリング構造がみられる(Fig.15)。例として Type II に分類される Korolev 盆地の地形とフリーエア重力異常との断面図による比較を示す。(Fig.17)。これはアイソスタシー補償によるモホ面の緩和が起きていないことを示唆している。

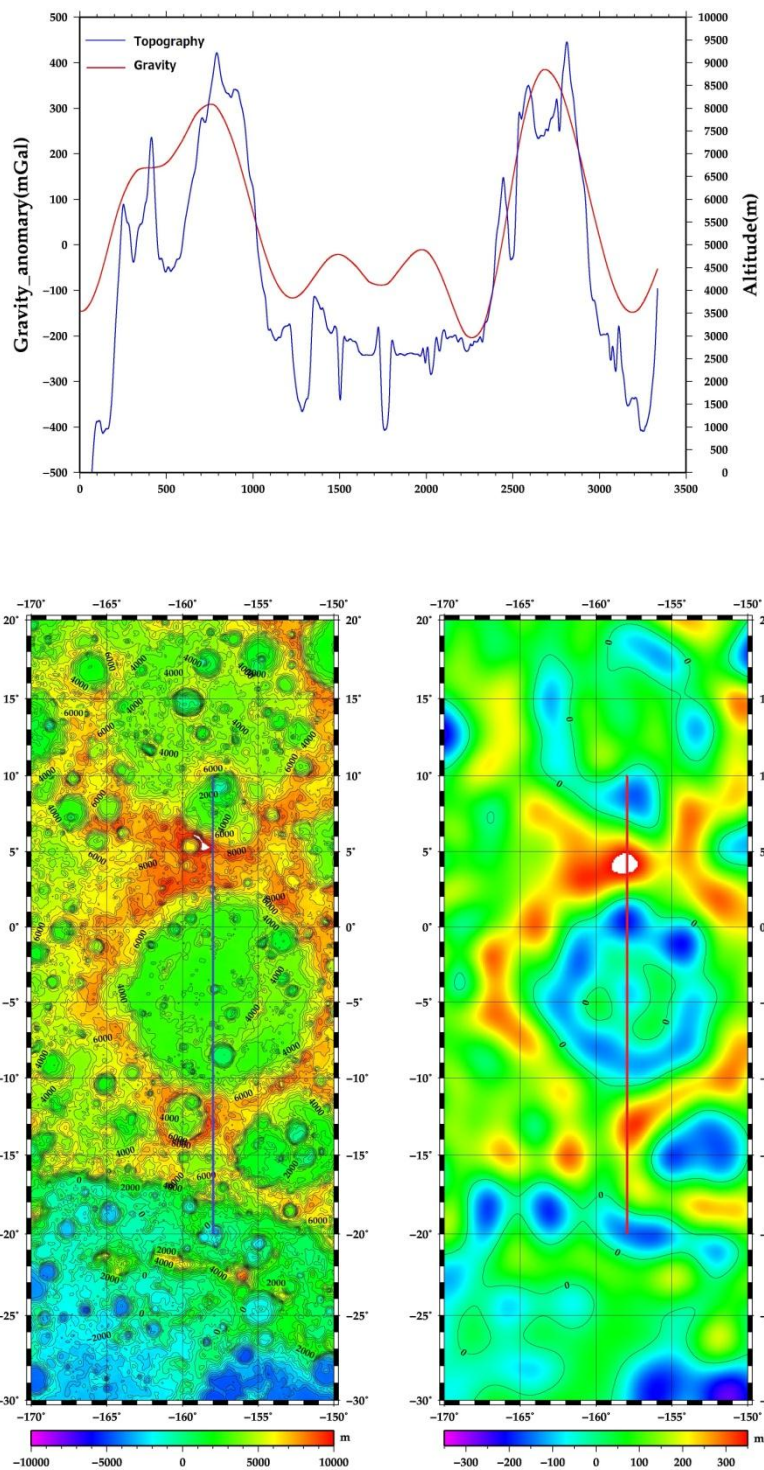


Fig.17 Korolev basin での地形(青)とフリーエア重力異常(赤)の profile の比較 (上図) .  
左下と右下の図はそれぞれ地形と重力異常の図である.

一方でマスコン盆地は、盆地中心の重力異常が平らな台地状になっており、Type I 及び Type II basin でみられる盆地地形と良く相関した正-負-正の重力異常のリング構造ははつき

りとは認められないことが、同様の断面図による比較でよく見てとれる(Fig.18)。このことはマスココン盆地の表面地形に対して、アイソスタシーが成り立っていることを示唆している。

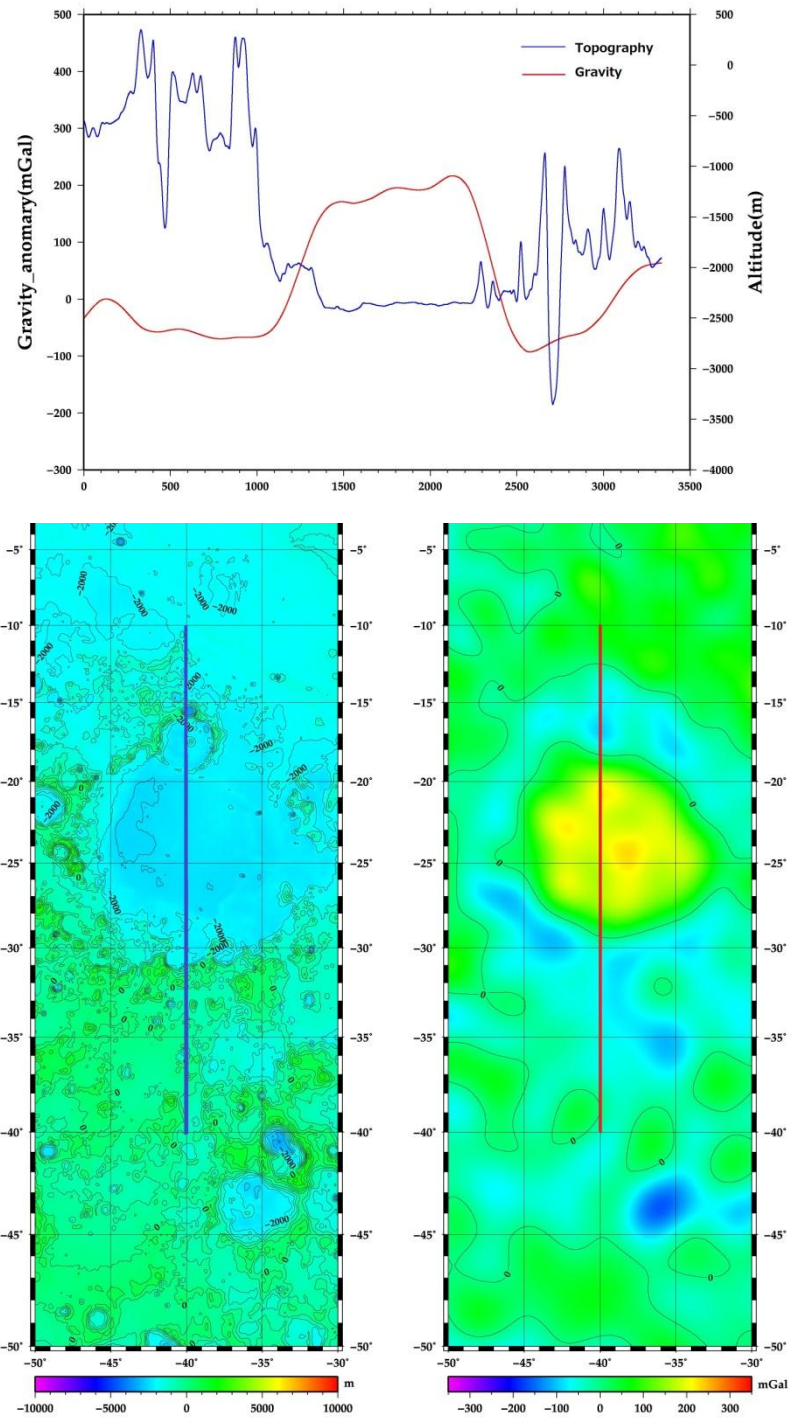


Fig.18 Humorum basin での地形(青)とフリーエア重力異常(赤)の profile の比較.

### 3 現在の月の形状から推察する過去の軌道進化

#### 3.1 Garrick-Bethell et al.(2006)による推論

前述 (§2.4) のように、月のような同期自転天体の理想的な静水圧平衡形状では 2 次の重力場係数の比が  $C_{20} : C_{22} = 10 : 3$  となる。しかしかぐやで得られた最新の月重力場モデル (Namiki et al., 2009) によるとそれらの値は  $C_{20}/C_{22} = 9.09$  となっており、理論値に対して  $J_2$  の値が大きすぎる (又は  $C_{22}$  の値が小さすぎる)。

月の形状が同期自転衛星の理想的形状からズレていることの原因として、Garrick-Bethell et al. (2006) は、(1) 月が初期に離心率の大きな楕円軌道をとっていた、または (2) 自転と公転の周期が 3:2 の比をとる水星型の同期自転天体 (Fig.19) であった、という二つの可能性を示唆した。本章では彼らの主張について簡単にまとめたい。

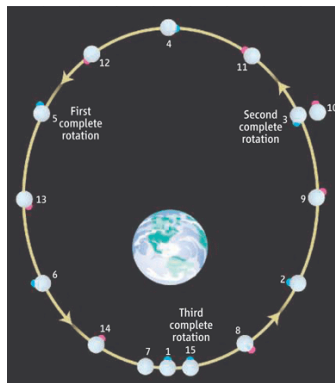


Fig.19 月の自転周期：公転周期=3：2の共鳴運動の模式図. Innanen (2006)より引用。ここで灰色の円が月。青・赤色の点は表側中心で、1~6番が公転1週目（青色）、8~14番が公転2週目（赤色）。

##### 3.1.1 月の形状におけるランダム成分と系統的な成分

月の地形や重力場の球からのずれの起源に関して、(i) 潮汐や遠心力ポテンシャルによる化石バルジとしての変形、(ii) 様々な原因に起因する不均一な質量分布によるランダムな成分 (Lambeck and Pullan, 1980) の 2 つが考えられる。(ii) によって二次の形状を含めた月全体の形状を十分説明できるとする見解もあるが (Goldreich and Toomre, 1969; Lefftz and Legros, 1993; Bills and Lemoine, 1995)、Lambeck and Pullan (1980) は二次の係数の大きさがランダム成分にしては大きいこと、及び  $C_{22}$  が  $S_{22}$  より圧倒的に大きい (潮汐バルジが地球の方を向いている) ことから (i) のように化石バルジが現在の月の 3 軸不等の形状に有意に貢献しているという考えも有力である。ちなみに Garrick-Bethell et al. (2006) は (i) の考え方、

すなわち現在の二次の係数はその全体が遠心力と潮汐のポテンシャルを反映しているとしている。この考え方に関する問題点については 3.3 章で議論する。

### 3.1.2 過去の月の軌道の求め方

ここで Garrick-Bethell et al.(2006)が示している過去の月公転軌道の導出方法について説明する。彼らは、月の形を三つの独立な量として  $C_{20}$  (セレノイドの扁平を表す重力場係数)、 $\beta$ 、 $\gamma$ (いずれも力学的扁平率) で代表させた ( $C_{22}$  はそれらの組み合わせで表すことができるため独立ではない)。さらにそれらの値を月の公転軌道の  $a$  (軌道長半径) と  $e$  (離心率) の関数として表現し、現実の  $C_{20}$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  の値が実現される  $a$  と  $e$  の組み合わせが存在するか否かを議論した。まず同期自転の場合(自転：公転=1：1)は

$$\begin{aligned} C_{20} &= \frac{MR^3}{ma^3} \left[ -\frac{1}{2} X_{-3,0,0}(e) - \frac{3}{4} \right] \\ \beta &= \frac{5}{2} \frac{MR^3}{ma^3} \left[ -\frac{1}{2} X_{-3,0,0}(e) + \frac{3}{4} X_{-3,2,2}(e) - \frac{3}{4} \right] \\ \gamma &= \frac{15}{4} \frac{MR^3}{ma^3} X_{-3,2,3}(e) \end{aligned} \quad (34)$$

自転：公転=3：2 の場合は

$$\begin{aligned} C_{20} &= \frac{MR^3}{ma^3} \left[ -\frac{1}{2} X_{-3,0,0}(e) - \frac{11}{8} \right] \\ \beta &= \frac{5}{2} \frac{MR^3}{ma^3} \left[ -\frac{1}{2} X_{-3,0,0}(e) + \frac{3}{4} X_{-3,2,3}(e) - \frac{11}{8} \right] \\ \gamma &= \frac{15}{4} \frac{MR^3}{ma^3} X_{-3,2,3}(e) \end{aligned} \quad (35)$$

ここで  $M$  は地球の質量、 $m$  は月の質量、 $R$  は月の平均半径、 $a$  は軌道長半径、 $e$  は離心率、 $X_{l,p,q}(e)$  はハンセン関数である(Garrick-Bethell et al., 2006)。

上記の式に実際に計測された  $C_{20}$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  の値を入れ、それぞれで 3 つの式を満たす  $a$  と  $e$  の組み合わせを探した結果が Fig.20, 21 である。

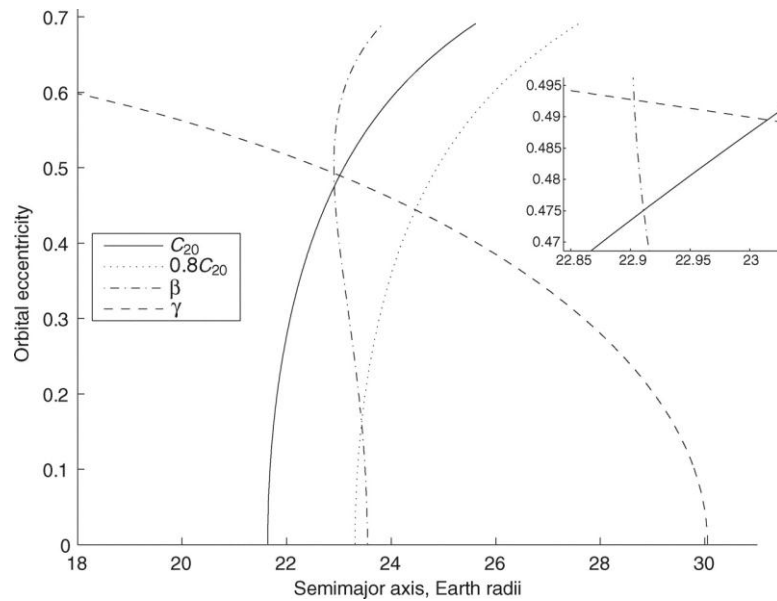


Fig.20 同期自転の場合(自転：公転=1：1)に、 $C_{20}$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ の三つのパラメータが現在の値となるために  $a$  と  $e$  が満たす値の集合をそれぞれ実線、一点鎖線および破線で表している。それらが一点で交われば、それがすべてのパラメータが現在の値をとることを実現する組み合わせとなる (Garrick-Bethell et al., 2006). 点線は  $C_{20}$  の値を現在の値より二割小さな値に仮定した場合の  $a$  と  $e$  が満たす組み合わせを示す。

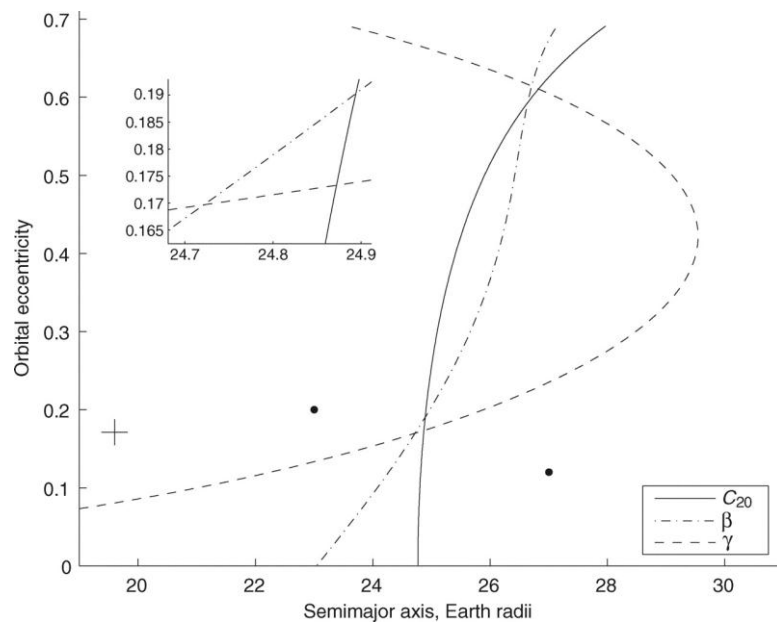


Fig.21 自転：公転=3：2の場合の各パラメータによる曲線(Garrick-Bethell et al., 2006).詳細は Fig.20 と同様.



Fig.20, 21 で  $C_{20}$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  の現在の値を実現するために満たすべき  $a$  と  $e$  の組み合わせを示す三つの曲線が描かれている。それらの曲線が一点で交われば、そこにおける  $a$  と  $e$  の値が現実を説明できる  $a$  と  $e$  の組み合わせだというのが彼らの主張である。1 : 1 の同期軌道では、離心率が今より大幅に大きな軌道ですべてを満足する解が1つある (Fig.20)。また自転 : 公転 = 3 : 2 共鳴の軌道では、離心率の大きい軌道と小さい軌道の2つの解が存在することが示されている (Fig.21)。彼らはこれら3つの状態のいずれかの軌道上で月が現在の形状を持つにいったと示唆している。

しかし Fig.20 で示すように  $C_{20}$  の値が現在の値より二割小さいと仮定するだけで、存在したはずの三つの曲線の交点は消えてしまうことも示されている。つまり現在の  $C_{20}$  や  $C_{22}$  の値には偶然生じたランダムな成分ほとんど存在しないことが Garrick-Bethell et al. (2006) の主張の前提条件である。

### 3.2 Cúk, M.(2010)の概要

Cúk, M.(2010)は、現在の月の形状から過去の月の軌道を推し量るという考えに否定的であり、主に次の3つの観点から Garrick-Bethell et al.(2006)を否定する内容のものである。

(1) Garrick-Bethell et al.(2006)が採る前提条件の緩さ(2)特殊な軌道 (高離心率軌道、3 : 2 共鳴軌道) に落ち込むプロセス(3)隕石衝突による共鳴運動への影響、である。

まず(1)について、Garrick-Bethell et al.(2006)は  $C_{20}$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  をそれぞれ互いに独立として扱っている。しかしCúk, M.(2010)は  $C_{20}$  を  $\beta$ ,  $\gamma$  と z 軸周りの慣性モーメント  $C$  を用いて次のように表現できることを示している。

$$C_{20} = \frac{C(2\beta-\gamma)}{2mR^2} - \frac{C\beta}{mR^2} \left( \frac{\beta-\gamma}{\beta+1} \right) \quad (36)$$

ここで  $m$  は月の質量、 $R$  は平均半径。これで  $C_{20}$  は慣性モーメント  $C$  が独立な場合のみ独立である。形式上、 $C$  は  $\beta$ ,  $\gamma$  と独立であるが、しかし  $C/mR^2$  は形状による変動は少なく、内部構造(コアの大きさ)によるところが大きい。このことが Garrick-Bethell et al.(2006)の主張を全くの無為にするわけではないが、Cúk, M.(2010)はこの  $C_{20}$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  の相互依存により、Fig.20, 21 で示すほど、Garrick-Bethell et al.(2006)の解と月の形状はドラマティックには合っていないと主張している。

次に(2)について、ここでは特に Garrick-Bethell et al.(2006)が推している 3 : 2 共鳴運動に対して、Cúk, M.(2010)はこの共鳴による軌道と月の形状の‘鶏と卵’問題を主張している。つまり、Garrick-Bethell et al.(2006)は月の形状は 3 : 2 共鳴運動により現在のような形を残しているという考えだが、そもそも 3 : 2 共鳴運動で安定するにはそのような形状をもとから持っていなければならないとしている。

また、高離心率を得る原因を考えなければならない。最も有力なものは太陽の出差共鳴(太陽の引力によるもの)だが、これは Touloukian and Wisdom(1998)によって否定されている。現在の月の離心率の大部分が比較的最近起こった惑星の共鳴であるので(Cúk, M., 2007)、過去の高離心率に説得力が全くないとしている(Cúk, M., 2010)。

最後に(3)について、仮に(2)における問題をクリアして 3 : 2 共鳴運動をもった場合の問題を考えている。ここでの問題提起は、Garrick-Bethell et al.(2006)は月の大局的形状が決定するのに要した期間は 10 億年ほどとしているが、その間隕石衝突に対して共鳴運動を維持できるのか、というものである。結果は「NO」である。Imbrium 盆地(直径 1160km)を作った隕石衝突の、一回り小さい規模のものでも共鳴のロックが外れてしまう(Lissauer, 1985)。このため、Cúk, M.(2010)はたとえ月が過去に 3 : 2 共鳴運動をもったとしても、その影響による形状を現在に残すことはあり得ないとしている。

### 3.3 2 次の重力場係数の有意性

ここで、カウラ則を用いて現在の 2 次の重力場係数の値にランダムな成分がどの程度含まれるかを考える。もしランダムな成分が数割以上あれば Garrick-Bethell et al. (2006)の主張がそもそも成り立たないからである。カウラ則については既に 2 章で説明した。ここでは潮汐や遠心力ポテンシャルと無縁な 3 次以降の値からカウラ則の係数を推定して、それを 2 次の係数に外挿してみる。その大きさが、ランダム成分の次数 2 における大きさであろう。こうして推測したランダム成分に比べて実際の 2 次の係数が十分大きい場合、2 次はランダム誤差を超える信号を有する(化石バルジとしての情報を持つ)と考えられる。

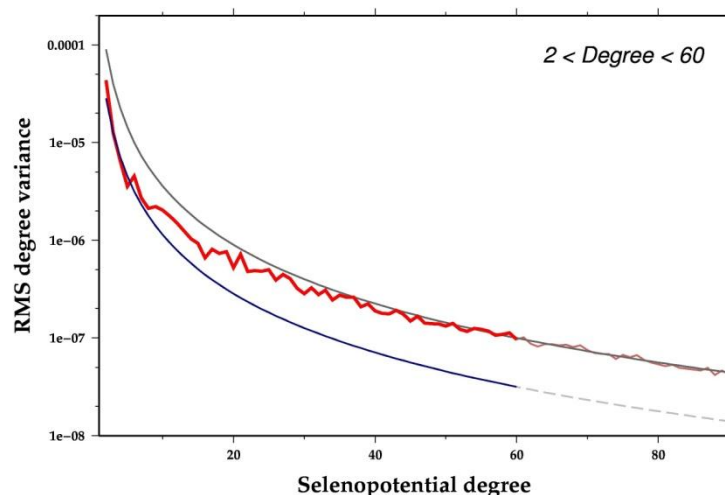


Fig.22 球面調和展開した月重力場の振幅

赤色の曲線は観測された重力場係数 (SGM100h; Matsumoto et al., 2010) から得られた次数毎の RMS (root-mean-square)、青色の曲線は観測値に最もフィットするようにカウラ則の係数  $\beta$  を推定した時の曲線 ( $y = \beta * 10^{-5}/l^2$ ;  $\beta = 11.4$ )、灰色の線はこの重力場モデルの導出にあたって拘束条件として用いられたカウラ則 ( $y = \beta * 10^{-5}/l^2$ ;  $\beta = 36$ ) である。60 次以降では求められた重力場係数とカウラ則がほぼ一致しているが、これは実際にかぐやの軌道がその次数以上の高次の重力場へあまり感度がないことを物語っている。赤色の曲線で色の濃い部分は青色の曲線の比例係数  $\beta$  を求めるのに使用した範囲 ( $3 \leq \text{degree} < 60$ ) を示す。 $\beta$  の推定には、観測値の貢献がほぼ 100% である 60 次未満の係数を用いた (Fig.23)。60 次以降では拘束条件が無視できない割合で混じり、カウラ則に対する情報を含まないと考えられるため、 $\beta$  の推定時には除外した。2 次の値が良く見えるように拡大図を Fig.23 に示す。

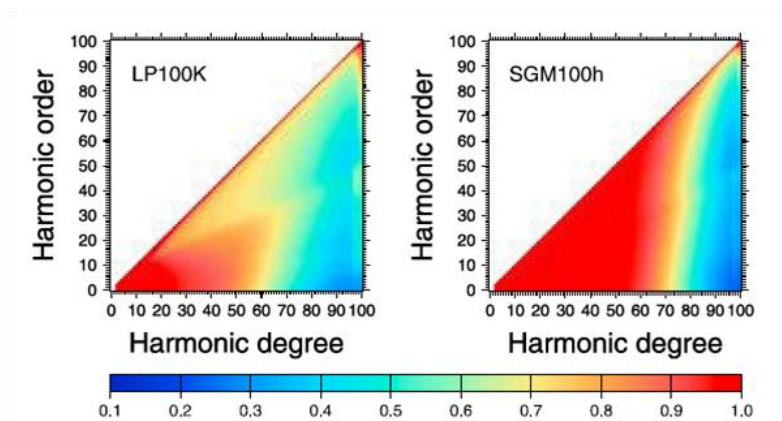


Fig.23 観測値の重力場係数への貢献を示す図 (Matsumoto et al., 2010) . 左がひと世代前の LP100K モデル、右が今回使用している SGM100h モデル. “1.0” は係数の値が完全に観測値のみによって決定されていることを示し、逆に “0” は係数の値が完全に拘束条件のみによって決定されていることを示す。

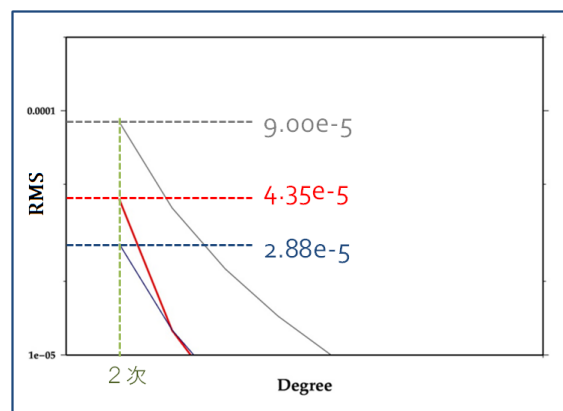


Fig.24 Fig.22 の低次部分の拡大図

2 次の実測値（赤色）と 3 次以降から外挿された値を比較する。ここで縦軸の値は RMS なので、2 つの差は

$$\sqrt{[(4.35e - 5)^2 - (2.85e - 5)^2]} = 3.29e-5 \quad (37)$$

となる。これは実測値の 3/4 程度であるので、「2 次の重力場係数の 3/4 程度は有意である」ことを意味している。Garrick\_Bethell et al.(2006)の結論は、例えば  $C_{20}$  の値が二割異なっただけで破たんすることが著者自身によって示されている。従って、2 次の係数の現在の値に全面依存して過去の月軌道を推定した彼らの結論は根拠が薄弱であることがわかる。

一方この結果は 2 次の成分が議論の価値がある有意な成分を持つことも確かであることを意味する。次章からはここで示された 2 次の成分の有意性に基づき、過去の 2 次のセレノイドの復元から月の軌道進化についての議論を試みている。

## 4 月の海を用いた古セレノイドの復元

本章ではマスコン盆地を埋めている溶岩地形から、過去のセレノイドを推察した研究を紹介する。ここで用いられるのは、LALT による月の全球地形データ（空間分解能：16pixel/degree）であり、局地的な地形も十分精度よく観測されている。

マスコン盆地を埋めている溶岩地形は、約 40 億年前に後期重爆撃期に隕石衝突によってマスコン盆地が形成された際に地下から噴出した玄武岩溶岩による地形である。この玄武岩溶岩は地球のものとは比べて粘性が非常に低く、常温の重油程度であることが知られており (Fig.25; T. Murase and Alexander R. McBirney, 1970)、この溶岩表面は溶岩が冷え固まった当時のセレノイド（等ポテンシャル面）を記憶している可能性がある。本研究では 5 つの代表的なマスコン盆地に対し、過去のセレノイドを記憶している可能性の検査と、その可能性のあるマスコン盆地からの過去のセレノイドの推察を行った。また、推察された過去のセレノイドの情報から、当時の月の軌道運動の状態についての議論を目指す。

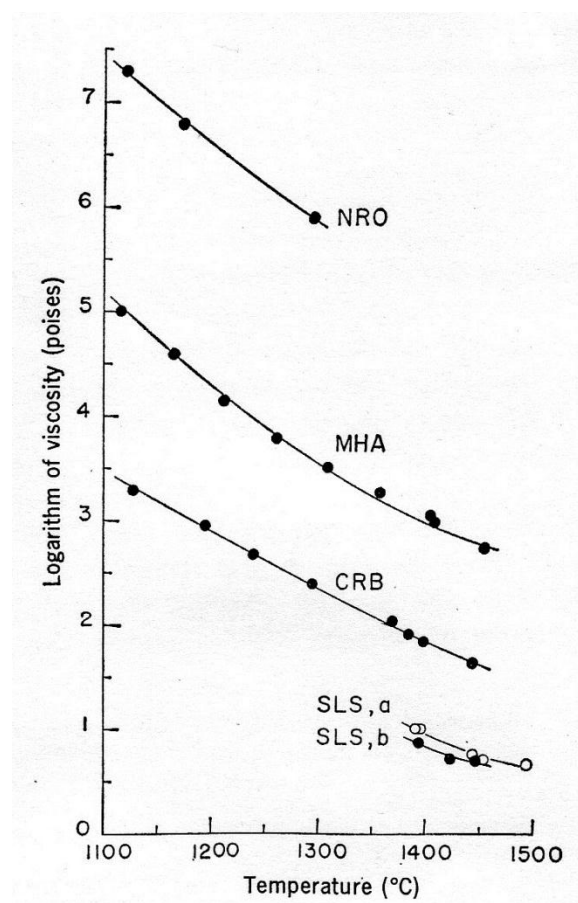


Fig.25 地球と月の溶岩の粘性(T. Murase and Alexander R. McBirney, 1970)

#### 4.1 月の海における古セレノイドの情報保存の検証

マスコン盆地内の玄武岩溶岩が、冷え固まった当時のセレノイドの情報を保存しているかどうかの評価を行う。その手段として、マスコン盆地内の玄武岩溶岩の LALT による地形データと現在のセレノイド(SGM100h)との比較を行う。マスコン盆地内のセレノイドには正の重力異常による「盛り上がり」(以下バルジと称する)が存在している(Fig.6; §2.1)。マスコン盆地を埋める溶岩地形が、セレノイドと同等のバルジを保存しているかどうかで、過去のセレノイドの情報を十分に保存されているかどうかの評価を行った。

本章では5つのマスコン盆地、Imbrium、Serenitatis、Humorum、Crisium、Nectaris (Fig.26)を用いた。この5つは Primary mascon basin のなかで、溶岩が盆地内に一様に広がり、表面のランダムな凹凸が十分に小さいと判断したものを抜粋している。

評価の具体的方法は、各マスコン盆地において、セレノイドのバルジを精度よく検出できるように複数の高度プロファイルを、LALT の地形データとセレノイドの両者でとり、比較した。高度プロファイルの取り方は、1. セレノイドのバルジの頂点が複数の高度プロファイルの交点となる、2. 表面のランダムな凹凸の影響が十分に小さくなる、点を留意して決定している。

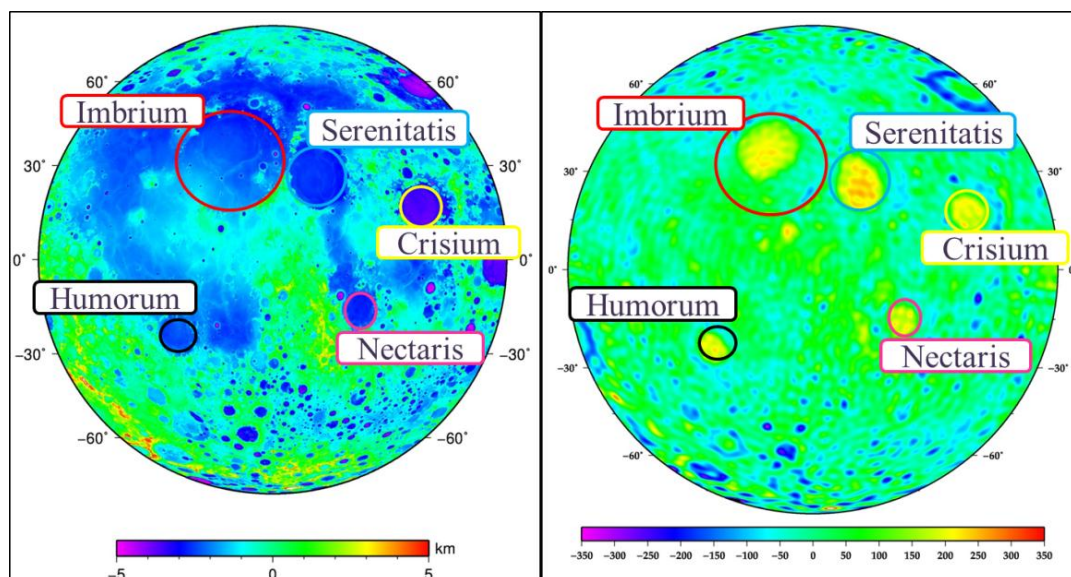
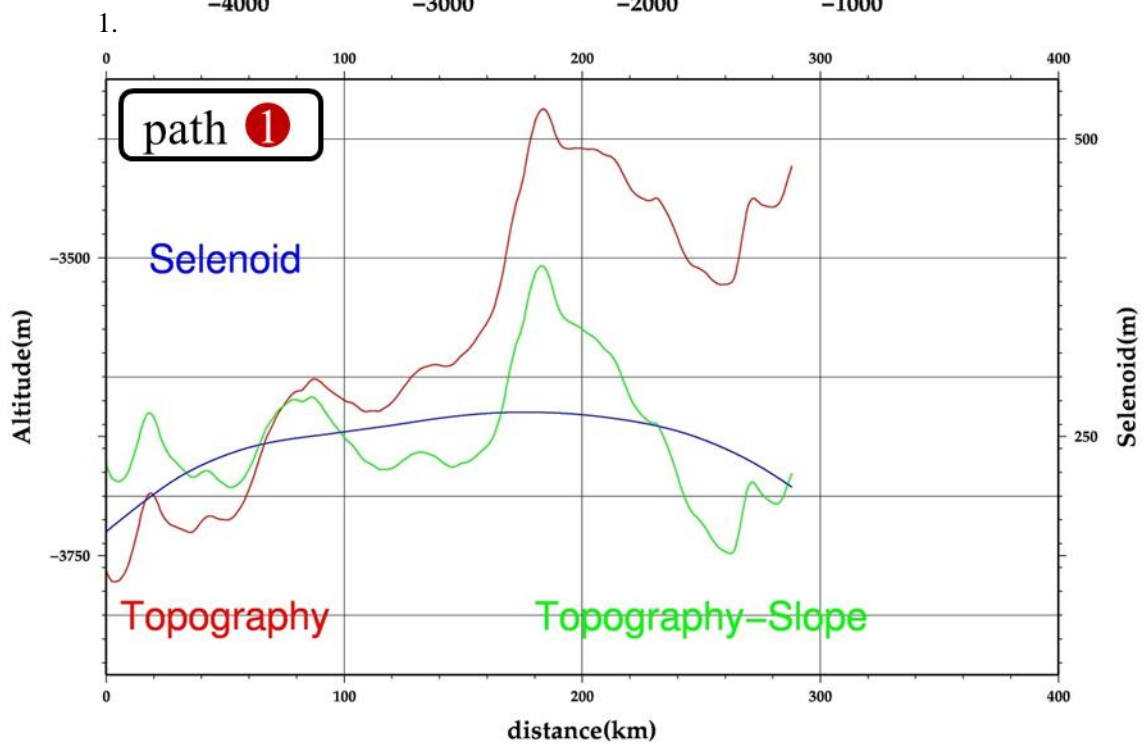
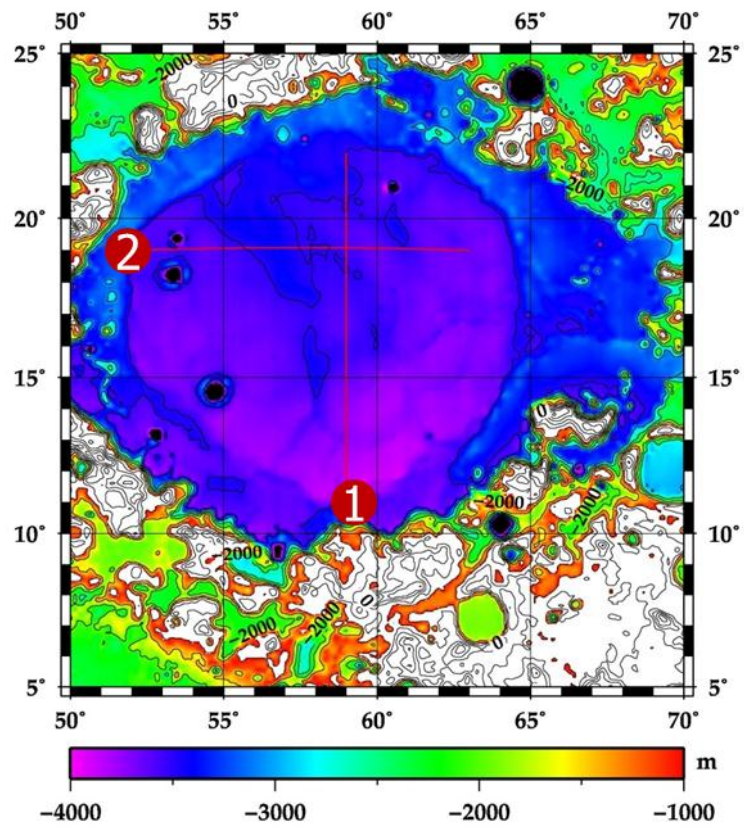
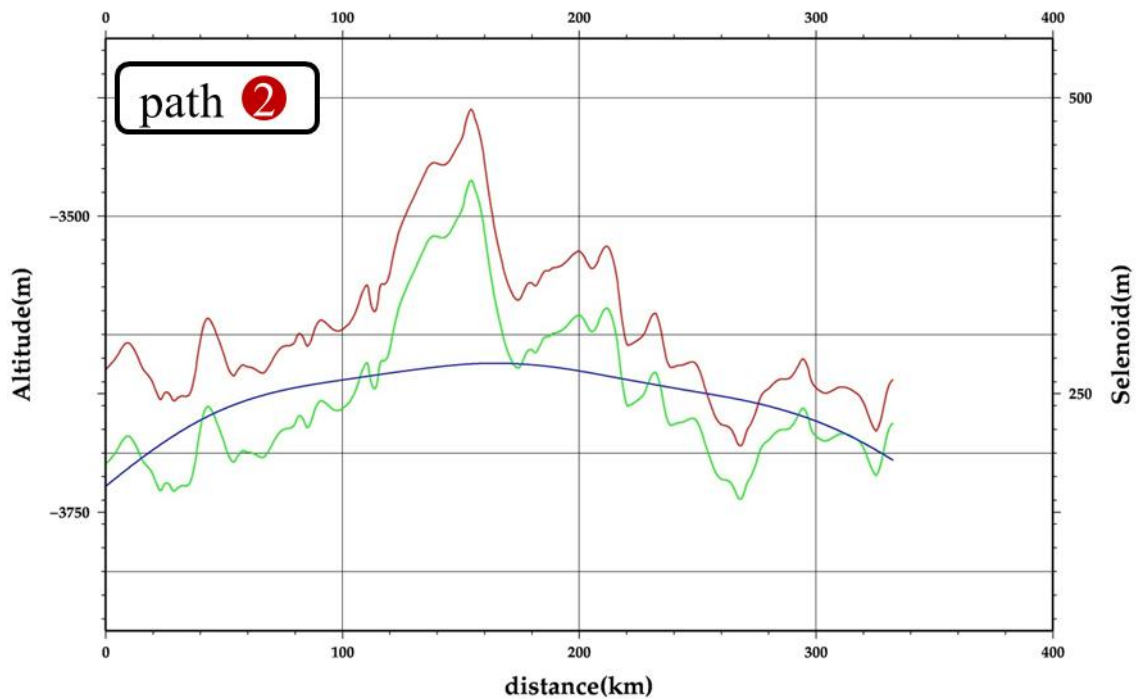


Fig.26 LALT による地形図(左図)と重力異常図(右図)上のマスコン盆地(Crisium, Humorum, Imbrium, Nectaris, Serenitatis)





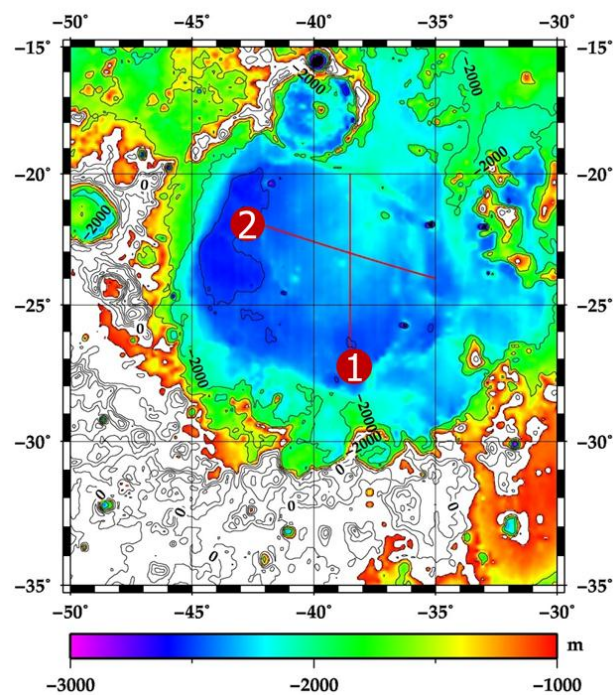
3.

Fig.27 1. Mare Crisium の高度プロファイルの経路①,②,

2. 高度プロファイルのグラフ(経路①),

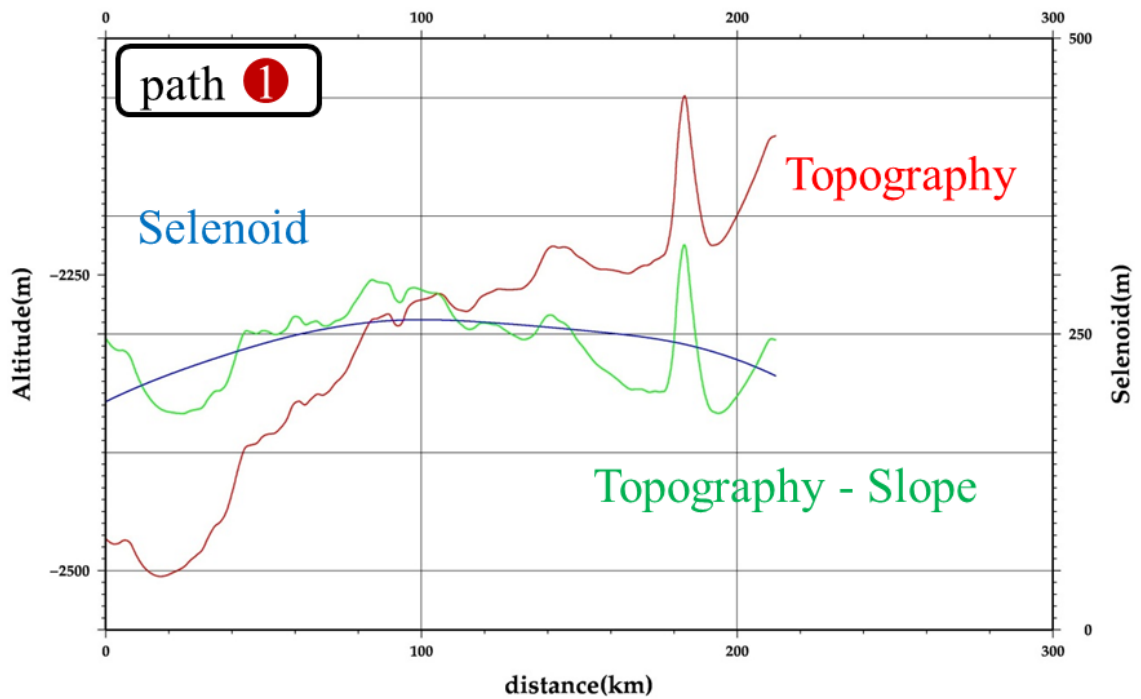
3. 高度プロファイルのグラフ(経路②)

グラフは、セレノイドの高度プロファイル(青), 地形の高度プロファイル(赤),  
地形の高度プロファイルから全体的な傾きを取り除いたグラフ(緑).

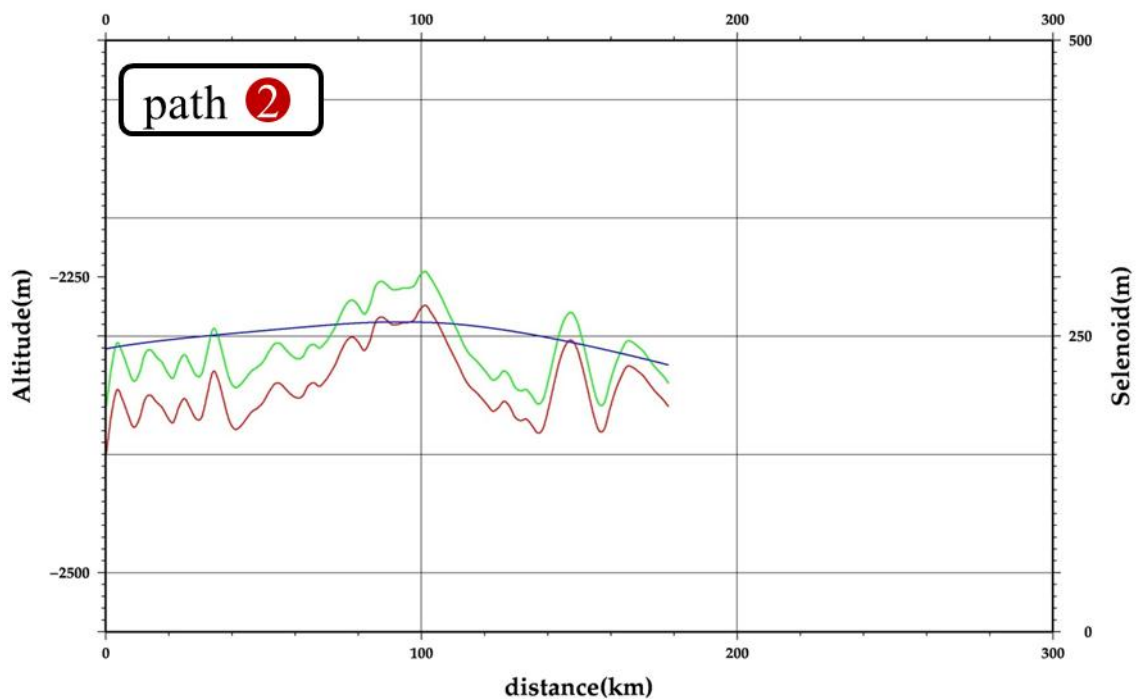


1.





2.



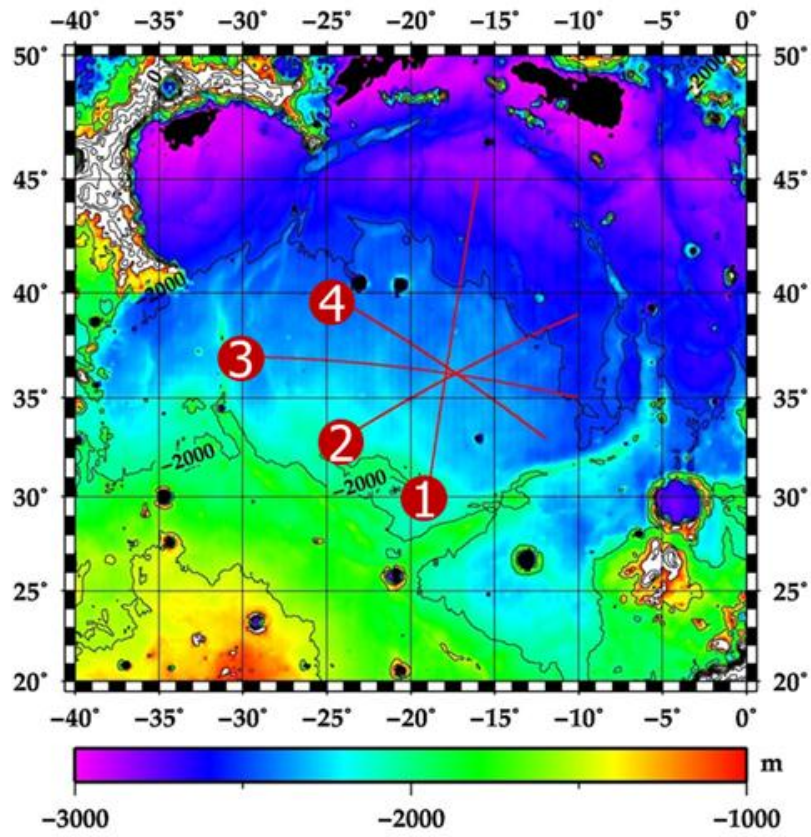
3.

Fig.28 1. Mare Humorum の高度プロファイルの経路①,②,

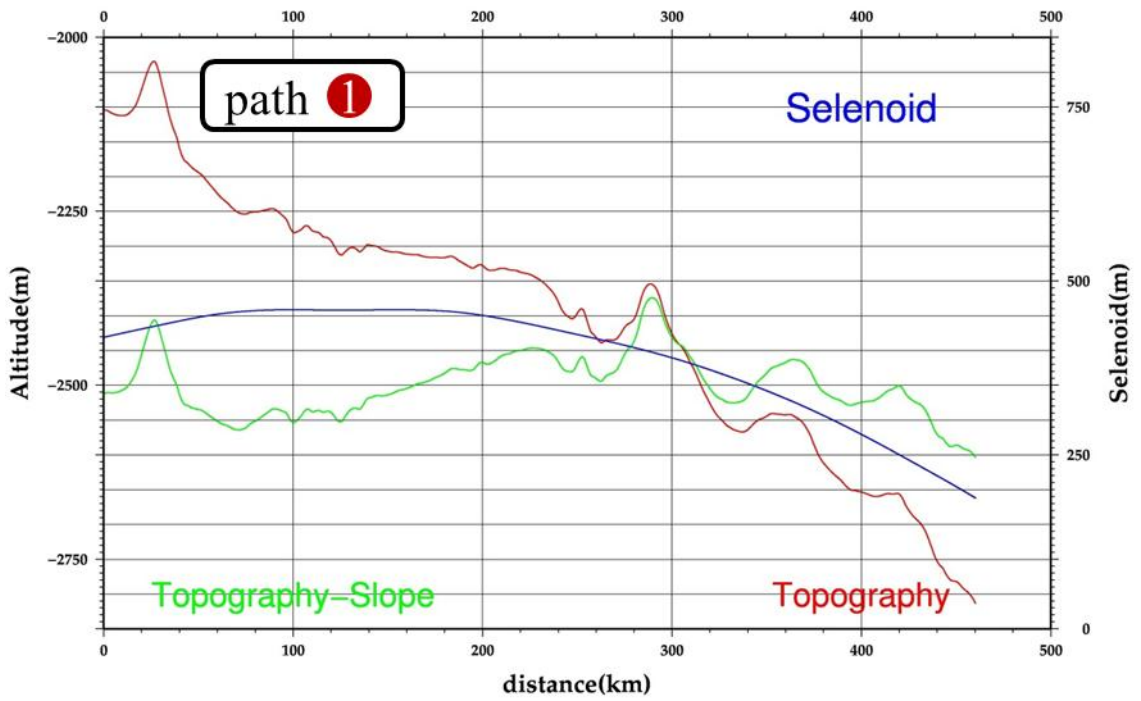
2. 高度プロファイルのグラフ(経路①),

3. 高度プロファイルのグラフ(経路②)

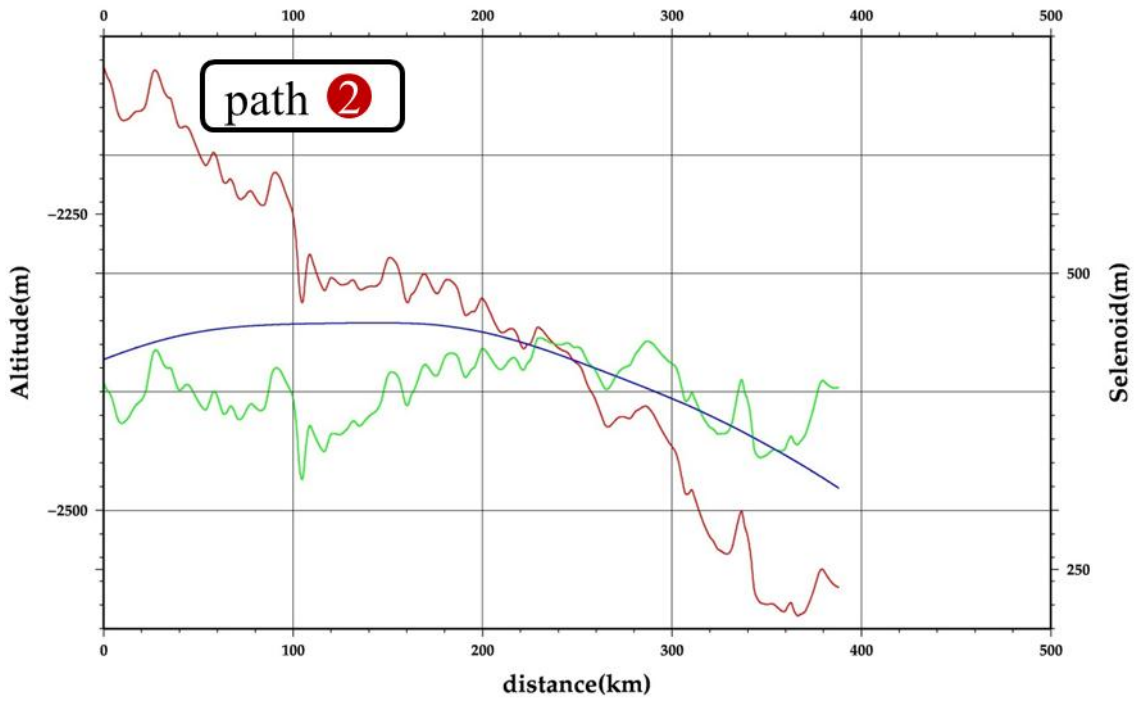
グラフは、セレノイドの高度プロファイル(青), 地形の高度プロファイル(赤), 地形の高度プロファイルから全体的な傾きを取り除いたグラフ(緑).



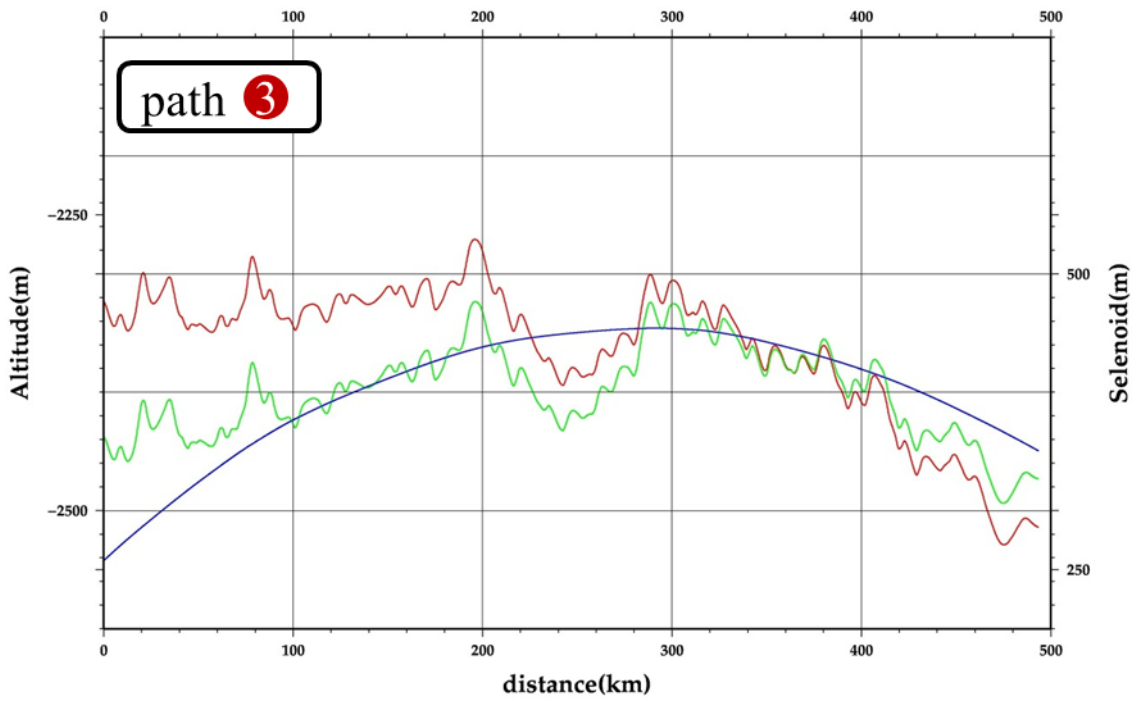
1.



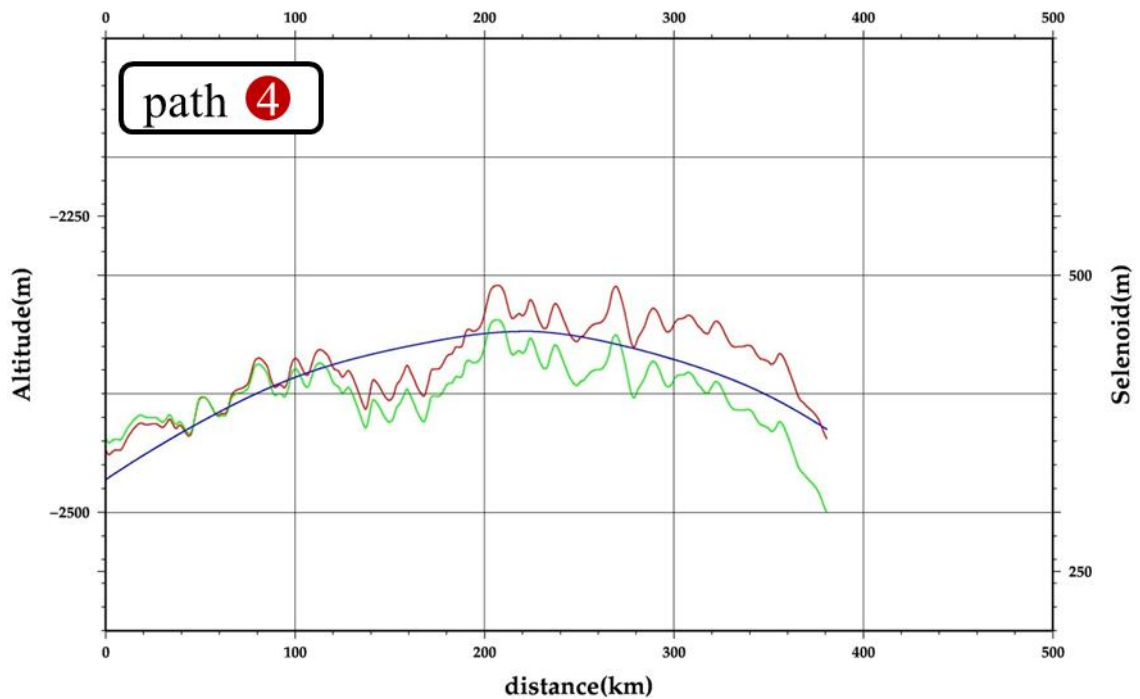
2.



3.



4.

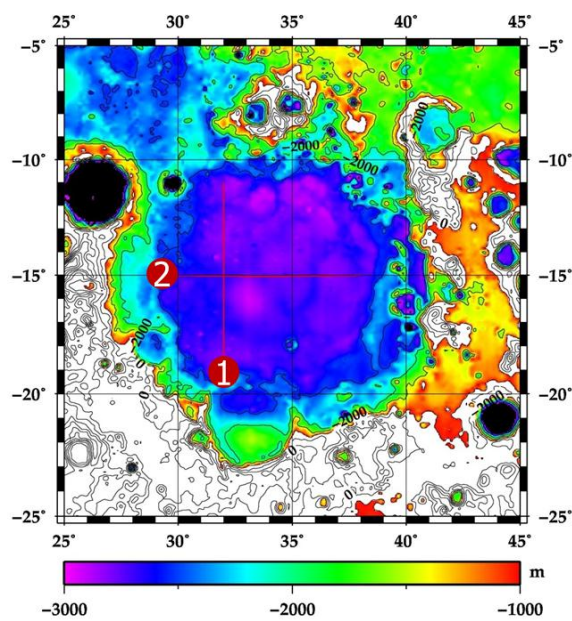


5.

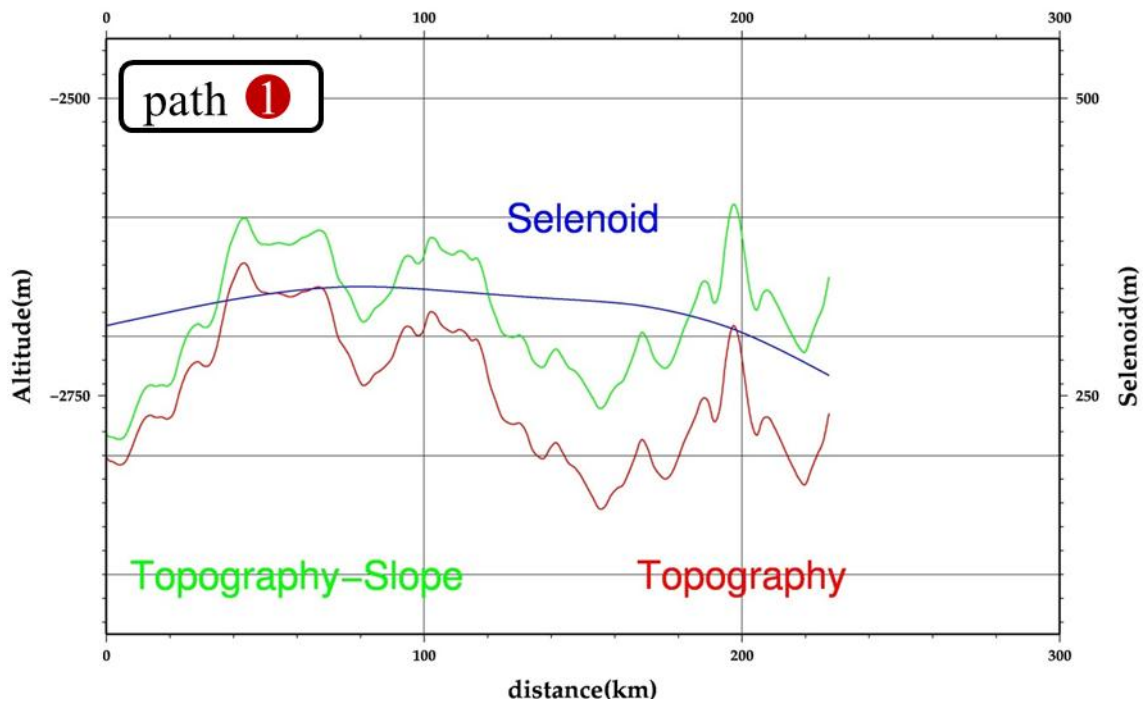
Fig.29 1. Mare Imbrium の高度プロファイルの経路①,②,③,④

2. 高度プロファイルのグラフ(経路①),
3. 高度プロファイルのグラフ(経路②)
4. 高度プロファイルのグラフ(経路③)
5. 高度プロファイルのグラフ(経路④)

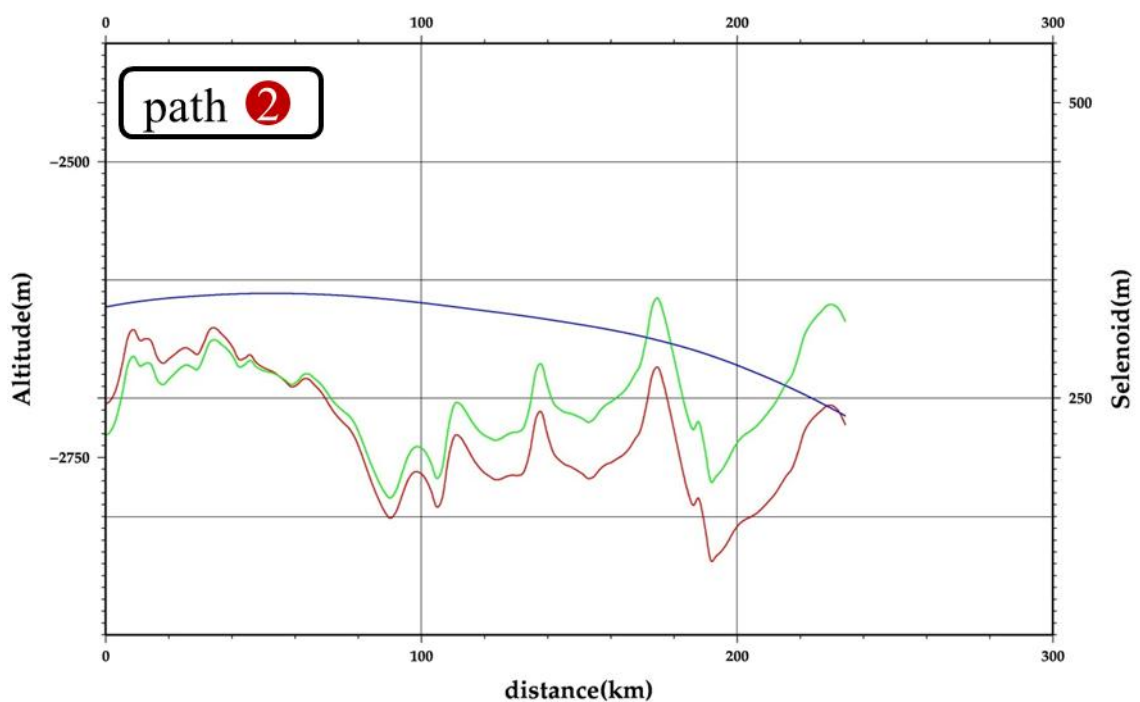
グラフは、セレノイドの高度プロファイル(青), 地形の高度プロファイル(赤), 地形の高度プロファイルから全体的な傾きを取り除いたグラフ(緑).



1.



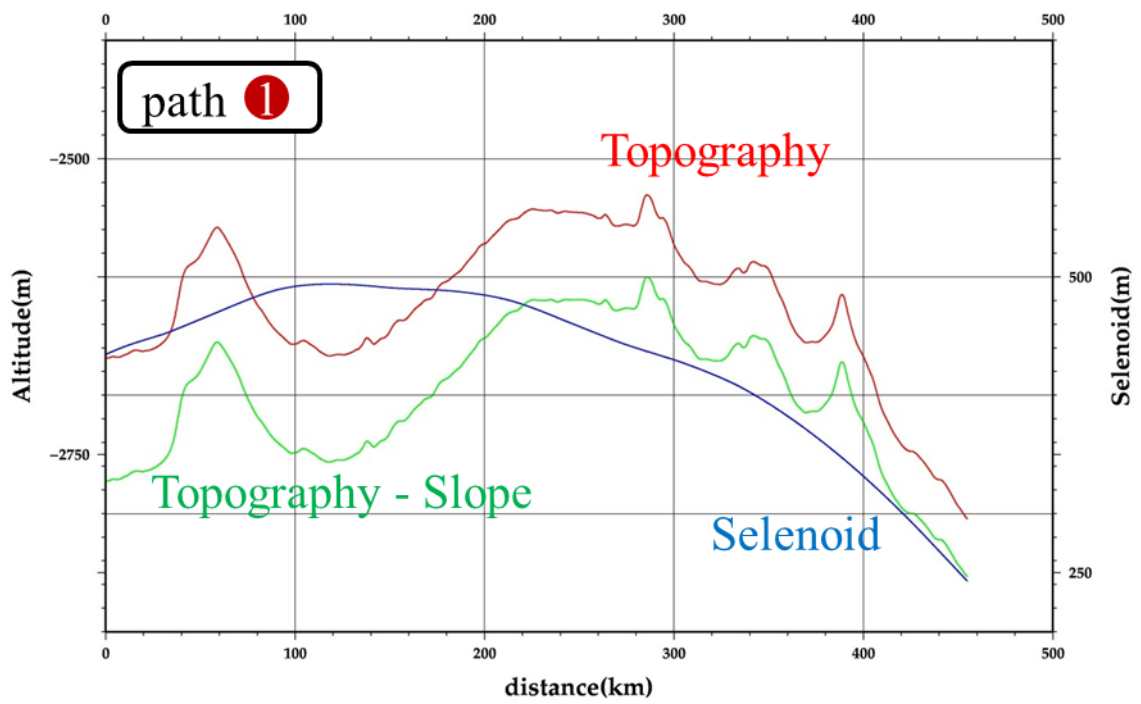
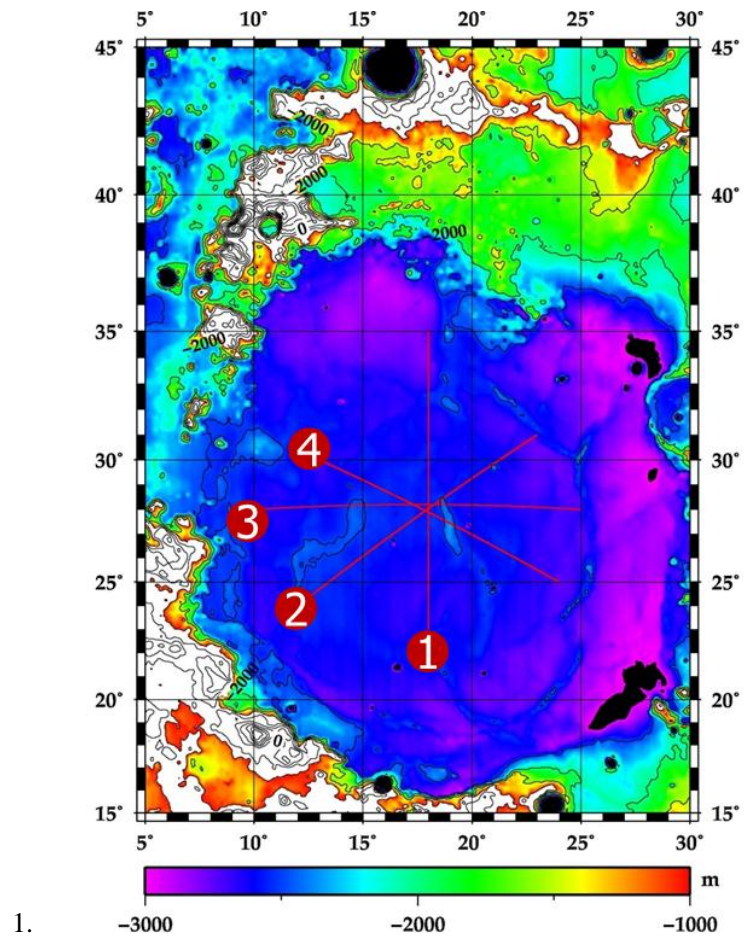
2.



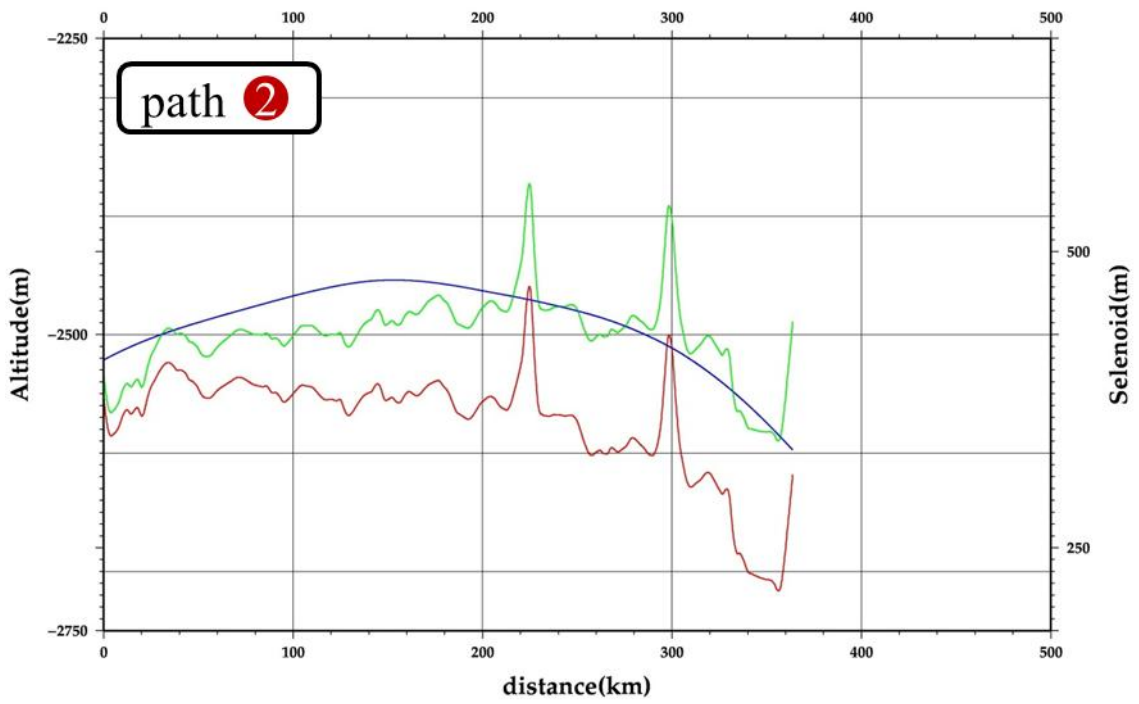
3.

Fig.30 1. Mare Nectaris の高度プロファイルの経路①,②,  
 2. 高度プロファイルのグラフ(経路①),  
 3. 高度プロファイルのグラフ(経路②)

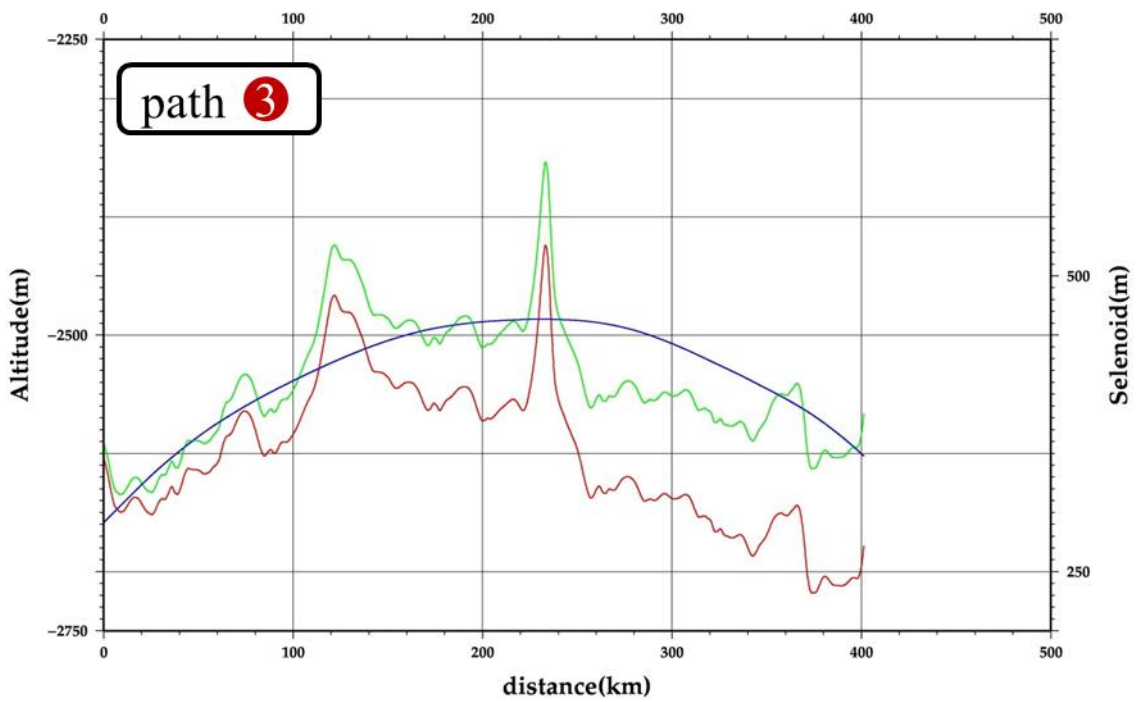
グラフは、セレノイドの高度プロファイル(青), 地形の高度プロファイル(赤), 地形の高度プロファイルから全体的な傾きを取り除いたグラフ(緑).



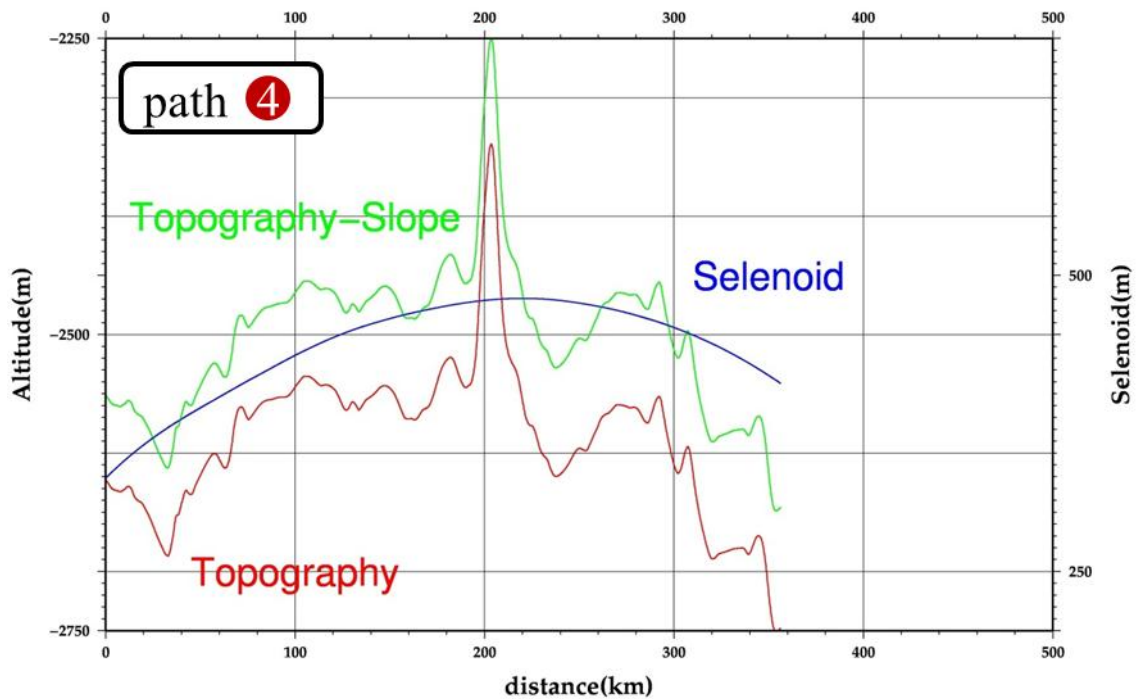
2.



3.



4.



5.

Fig.31 1. Mare Serenitatis の高度プロファイルの経路①,②,③,④

2. 高度プロファイルのグラフ(経路①),
3. 高度プロファイルのグラフ(経路②)
4. 高度プロファイルのグラフ(経路③)
5. 高度プロファイルのグラフ(経路④)

グラフは、セレノイドの高度プロファイル(青), 地形の高度プロファイル(赤), 地形の高度プロファイルから全体的な傾きを取り除いたグラフ(緑).

Table.2

Basin	RMS[m]
Humorum	25.5
Imbrium	29.4
Serenitatis	32.7
Crisium	44.8
Nectaris	45.5

マスコン盆地内の玄武岩溶岩表面が、セレノイドのバルジを保存しているかどうかを評価する。具体的な方法として、同一経路の地形の盛り上がり(緑グラフ)とセレノイドの盛り上がり(青グラフ)の残差の二乗平均平方根(RMS)の値を用い、盆地ごとに評価した(Table.2)。本研究では、セレノイドのバルジの大きさは 200[m]~300[m]程度(Fig.6; § 2.1)であることから、RMS の値がその 1/10 程度である Imbrium、Serenitatis、Humorum の 3 つのマスコン盆地



では、玄武岩溶岩の表面地形はセレノイドと同等のバルジを示していると判断した。これはこの三つの月の海が過去のセレノイドの情報を保存している可能性を示唆している。

## 4.2 月の海から古セレノイドを復元する

過去のセレノイドの情報を保存している可能性が示された Imbrium、Serenitatis、Humorum の3つのマスコン盆地から、過去の2次のセレノイドの情報を抽出することを試みた。

### 4.2.1 古セレノイド復元の手法

2次のセレノイドの形状は‘高さ’をもって表現されるが、局地的な真球に対する傾斜という情報に変換して表現することができる(Fig.32)。翻ってそれら3つのマスコン盆地の溶岩地形からその全体的な傾斜を求めると、そこから過去の2次のセレノイドの情報であると考えられる。

地形全体を代表する傾斜を求める手段として、

1. 溶岩地形全体を包括しうる1つないし2つ以上の四角形の範囲を決定する。
2. 最小二乗法を用い、それら四角形内の地形に対し最もよく合う近似平面を求める。
3. 真球面の水平に対する、1つないし複数の四角形の平面の傾斜により、その溶岩地形全体を代表する傾斜を求める。

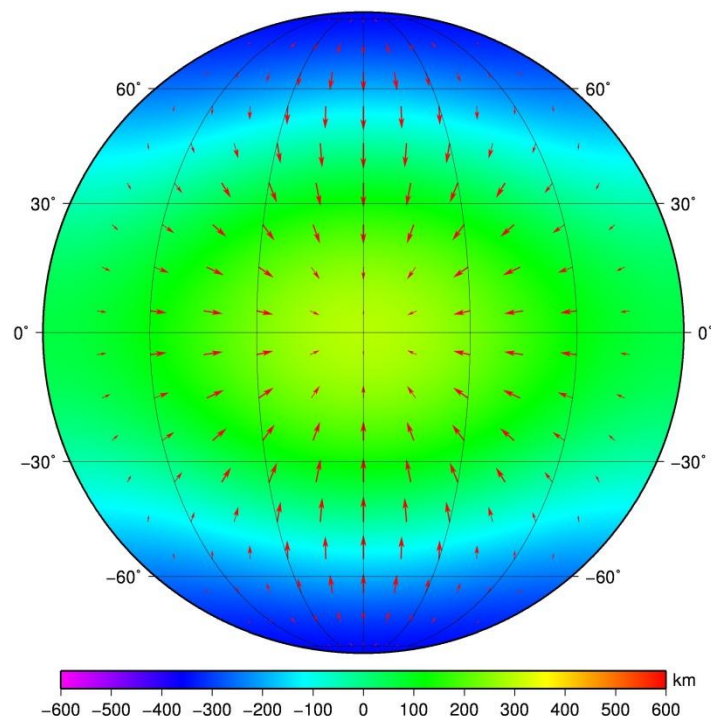
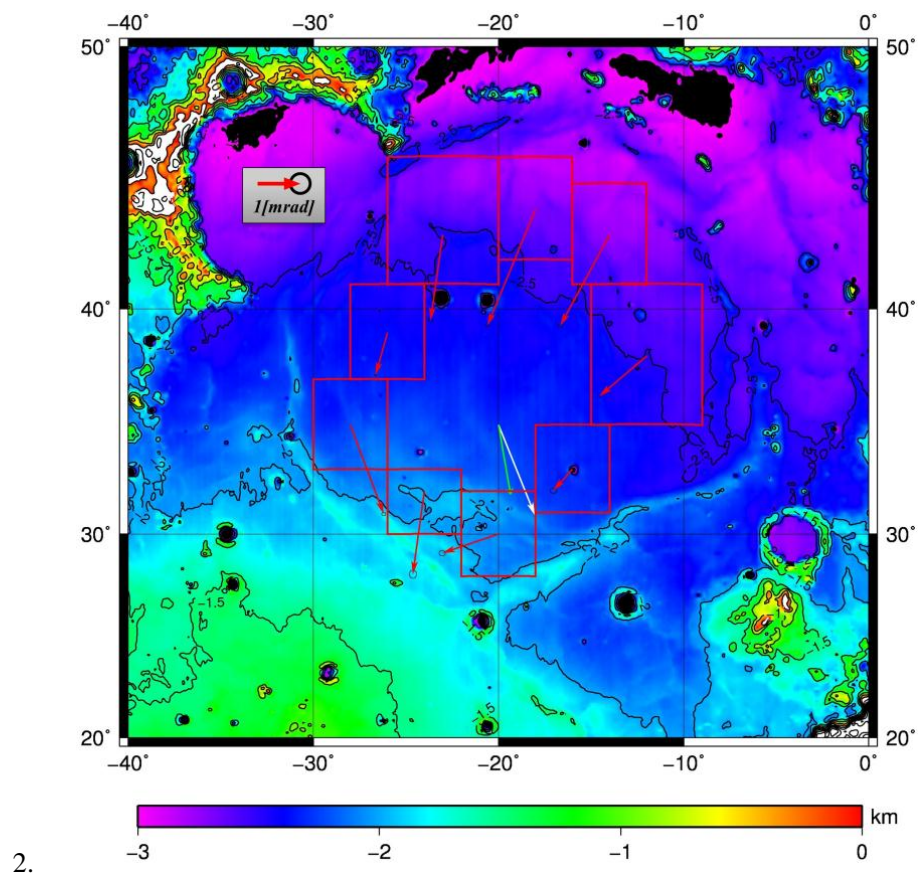
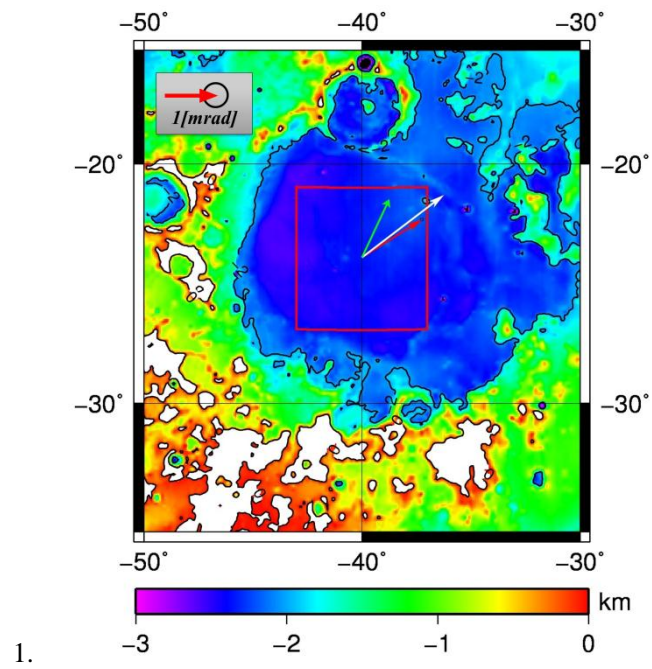
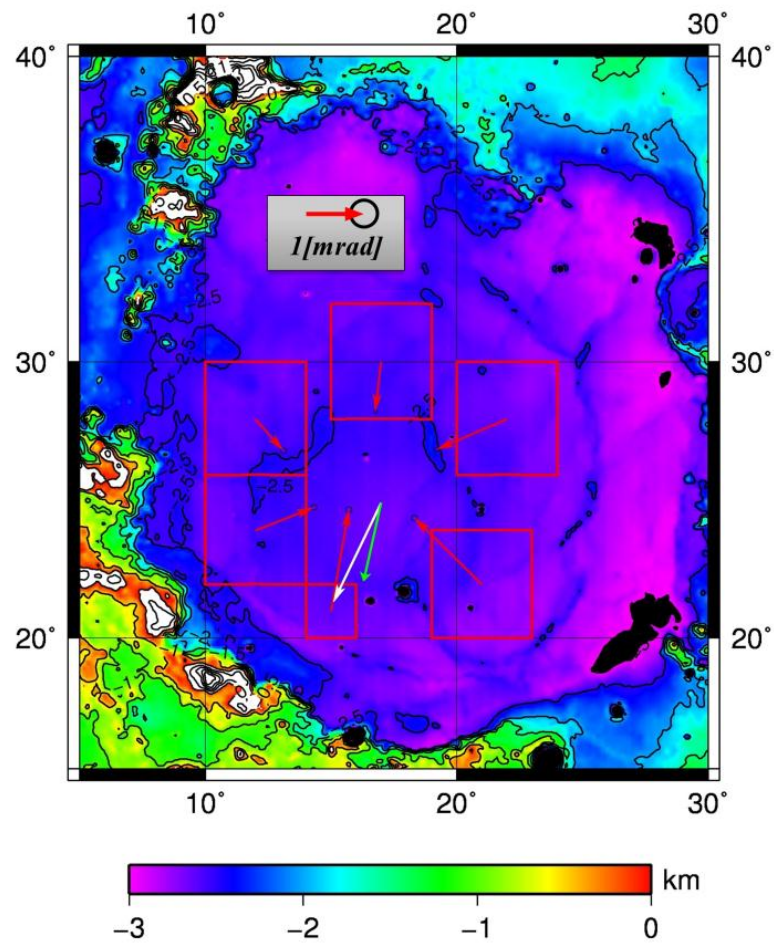


Fig.32 現在の2次のセレノイド(背景)とその高度の凹凸を傾斜に変換して表現した図(矢印).矢印は方向が高くなる方向を、長さが勾配の大きさを示している。





3.

Fig.33 Mare Humorum(1.)、Mare Imbrium(2.)、Mare Serenitatis(3.)の表面地形から、地形全体の傾斜を求める過程.

四角形(赤)：地形の近似平面を取った範囲,

矢印(赤)：真球面に対する地形の近似平面の傾斜(観測値),

矢印(白)：同期自転衛星の平衡な2次のセレノイドの傾斜(計算値),

矢印(緑)：現在の2次のセレノイドの傾斜(計算値).

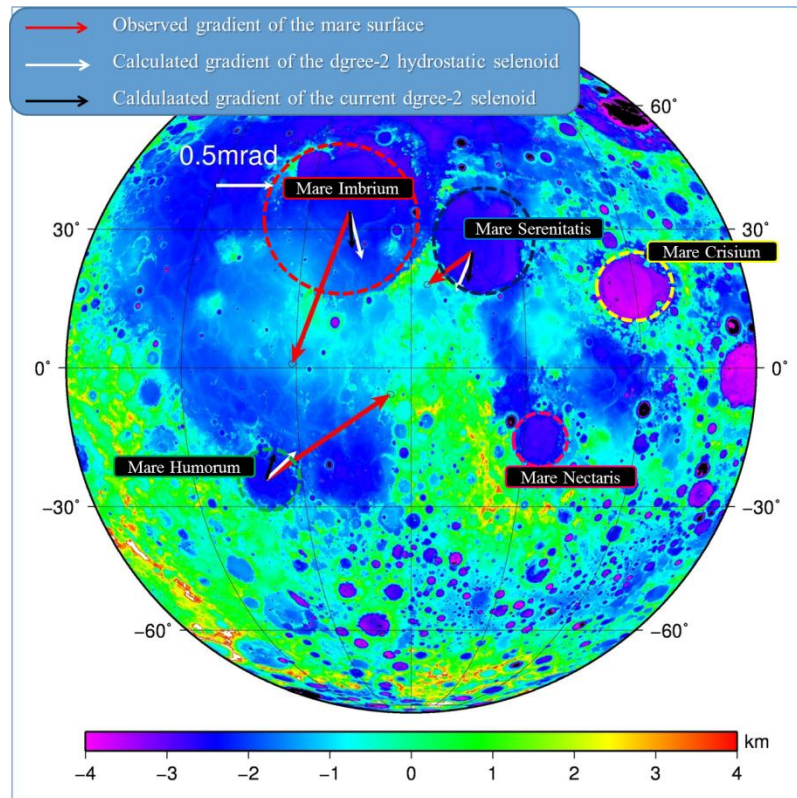


Fig.34 矢印(赤)：真球面に対する地形の近似平面の傾斜(観測値),  
 矢印(白)：同期自転衛星の平衡な2次のセレノイドの傾斜(計算値),  
 矢印(黒)：現在の2次のセレノイドの傾斜(計算値).

#### 4.2.2 復元された古セレノイドについての考察

それぞれの溶岩地形の傾斜と、現在のセレノイドの2次の形状の持つ傾斜、同期自転運動をしている天体の月にとって理想的な  $j_2/c_2^2$  比を持った2次の形状の持つ傾斜を比較し、それによって溶岩地形が形成された当時の月のセレノイドの2次の形状、ひいては当時の月の軌道運動の推察を試みる。

Mare Serenitatis、Mare Humorum では、求められた地形全体の傾斜と理想的な  $j_2/c_2^2$  比を持った2次の形状を持つ傾斜とよく似た方向を示すことがわかった(Fig.34)。これはこの2つの地形が形成された当時、月は現在と同様に同期自転運動をしており、且つその当時の遠心力ポテンシャルと潮汐ポテンシャルを保存していたことを示唆することができる。

しかしながら Mare Imbrium では、溶岩地形は南西方向への傾斜を示しているが、理想的な傾斜は南南東方向を示している。このことはこの溶岩地形が冷え固まった当時の2次のセレノイドの情報が、何かしら後天的な原因によって変化した可能性が考えられる。異なる手法によりこの後天的な変化の存在の可能性を示し、その変化を差し引いて復元した傾斜が南南東方向を示すことができれば、当時の月の同期自転運動を示唆することができる。次章ではそのために sinuous rille という地形から、そのことを示す試みを紹介する。

## 5 溶岩の流動方向を用いた古セレノイドの復元

本章では、地形カメラ(TC)によって観測された地形データを用い、sinuous rille というより局地的な地形から過去のセレノイドの情報を復元する試みを紹介する。

### 5.1 sinuous rille の概要

Sinuous rille とは噴出した玄武岩溶岩流の熱浸食によって形成された溝もしくは窪地である。溶岩流という液体が流れた痕跡であるため、地球上の河川が高地から低地に向かって流れていくことと同様に、重力ポテンシャルの低い方向へと流れていくはずである。したがって sinuous rille の地形は、玄武岩溶岩流が流れた当時のセレノイドの情報を保存していると考えられる。

多くの sinuous rille は現在のセレノイドに対して下降方向へ流れている。しかしながら、中村良介により非常に興味深い sinuous rille が発見されている(pers. Comm.)。Imbrium 盆地から北東に位置する Rimae Plato は、現在のセレノイドに対して上昇方向へと流れているように見える(Fig.38)。これは現在と過去のセレノイドの相違を示唆している可能性がある。

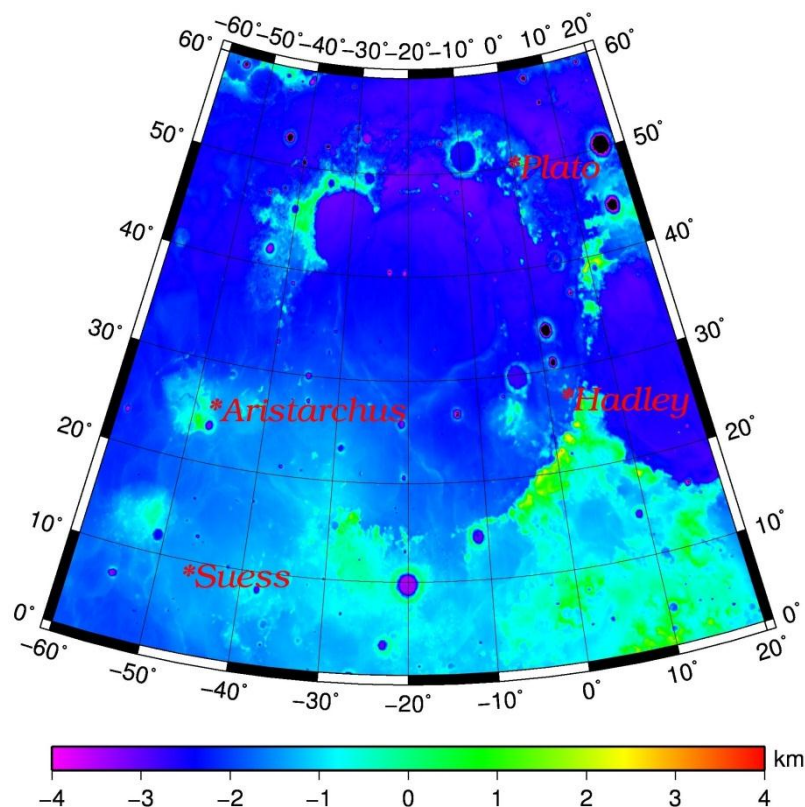
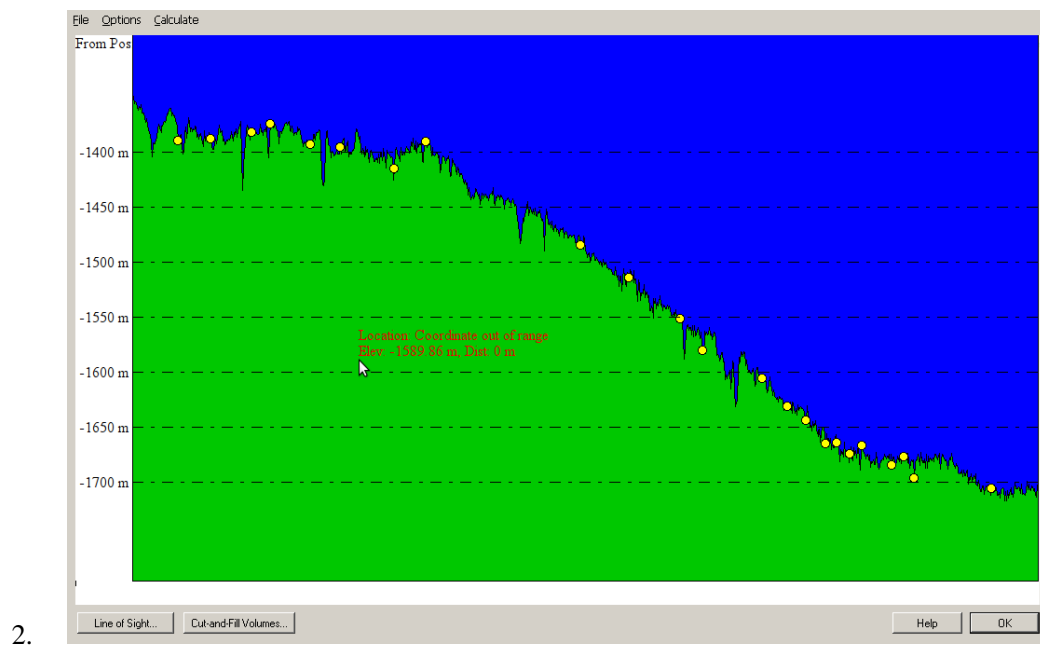
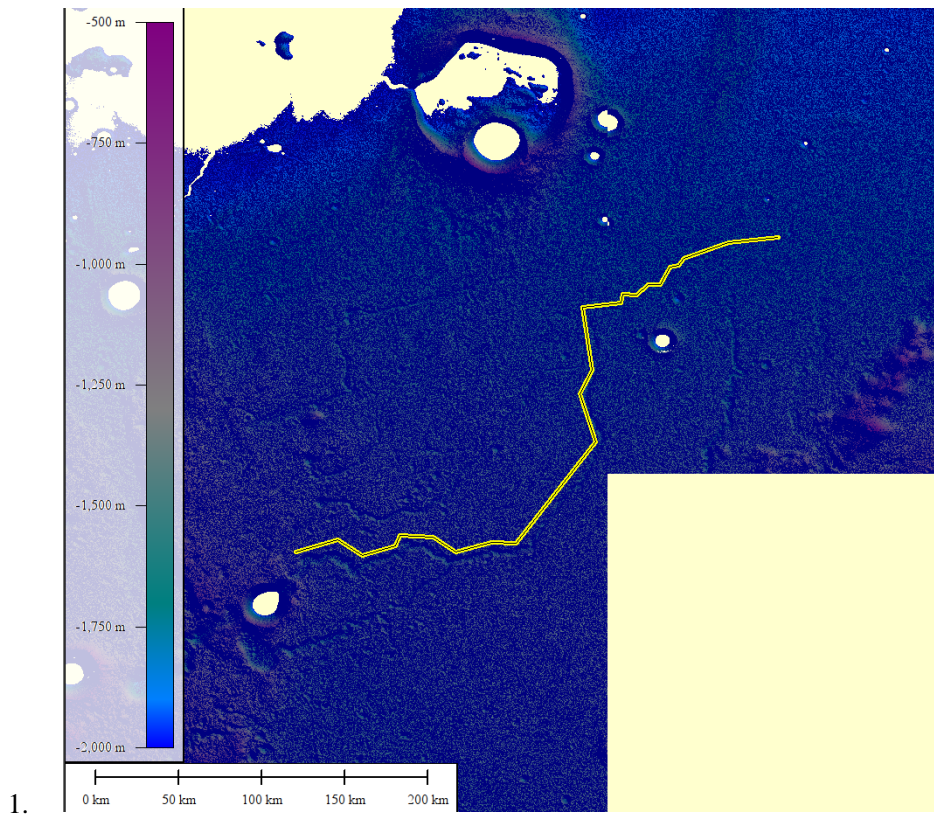
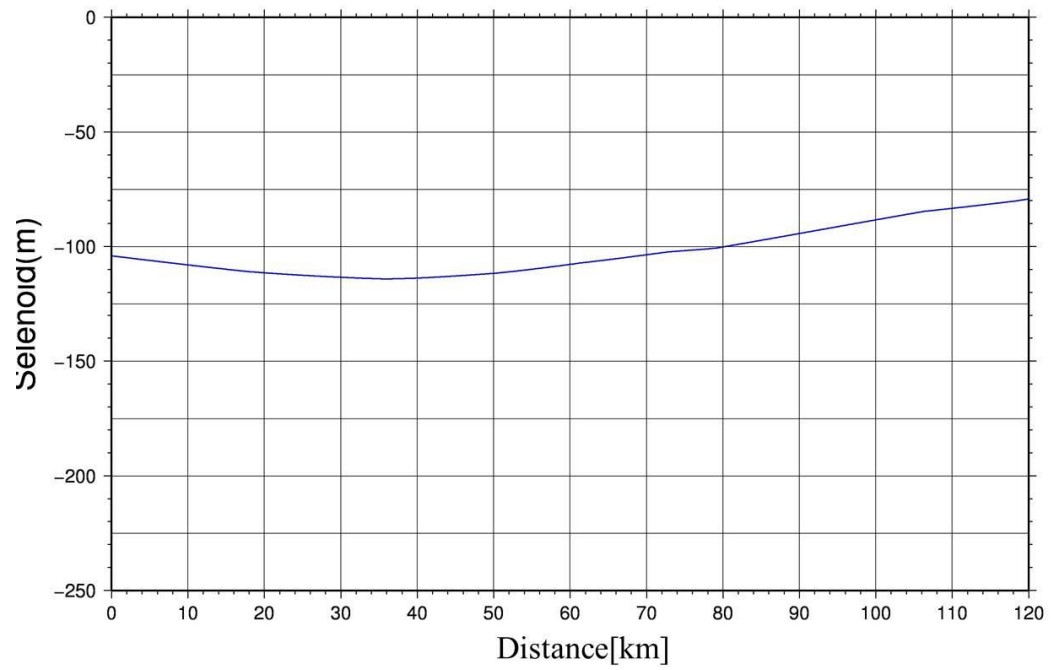


Fig.35 Mare Imbrium 周辺の sinuous rille の位置情報

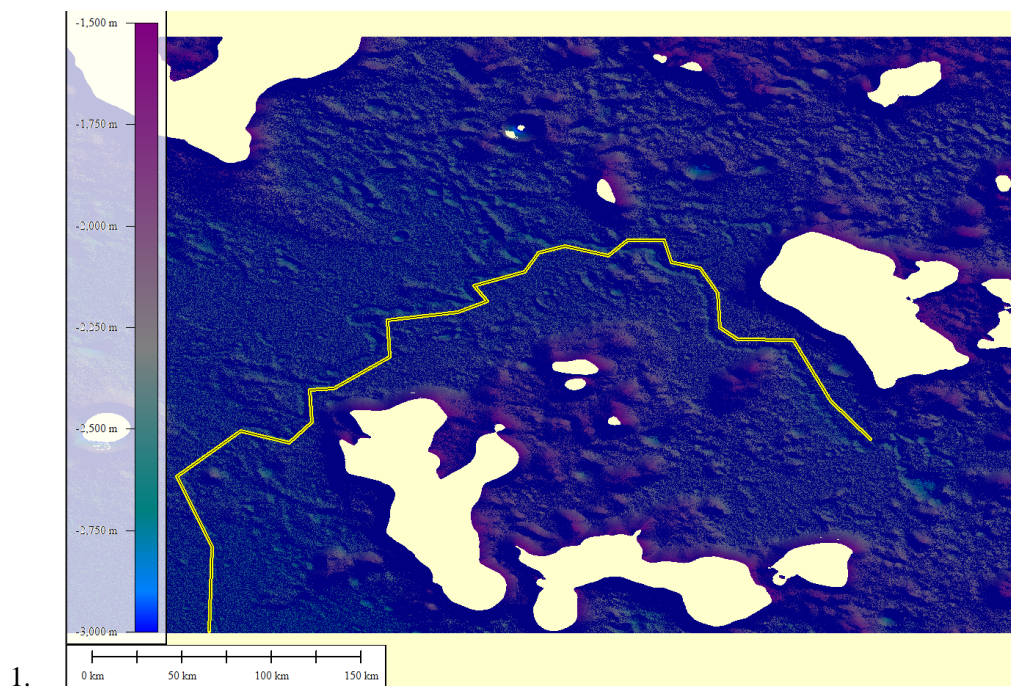




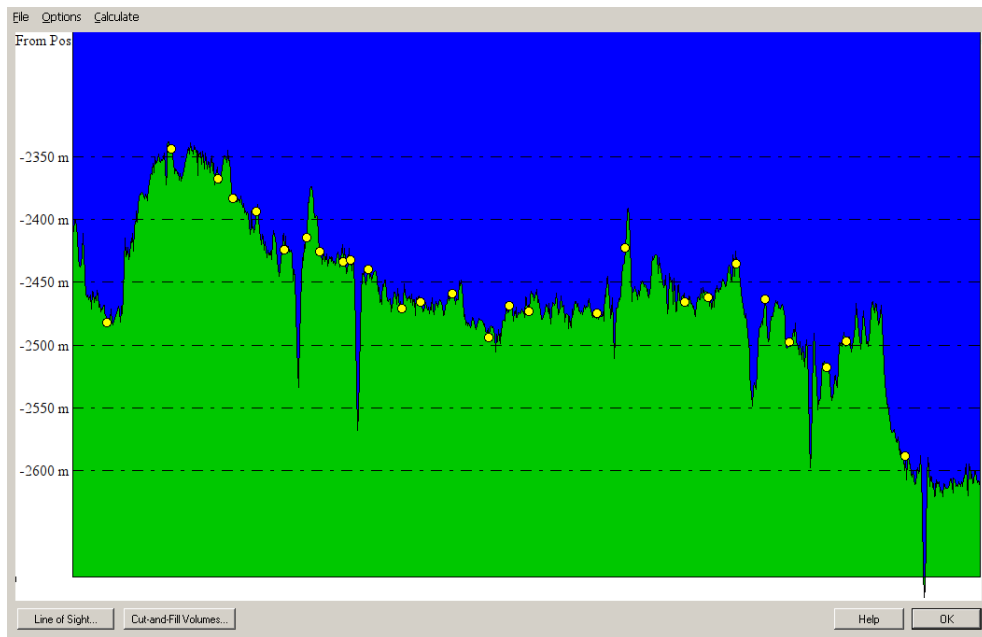
3.

Fig.36 Rima Aristarchus に沿ったプロファイル.

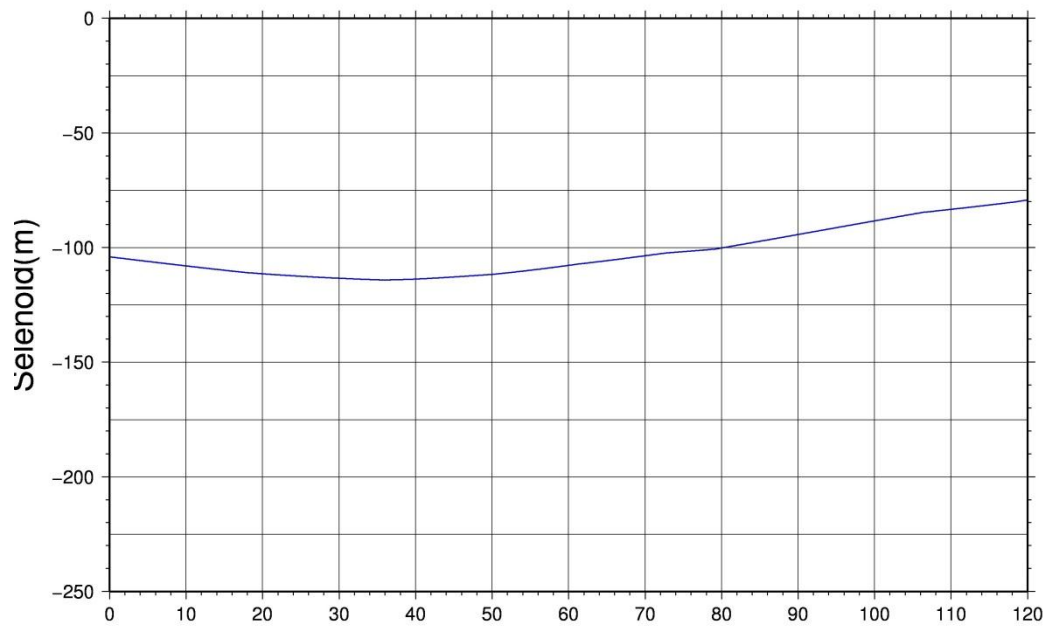
1. 径路図,
2. 地形高度のプロファイル図,
3. セレノイド高のプロファイル図



1.



2.

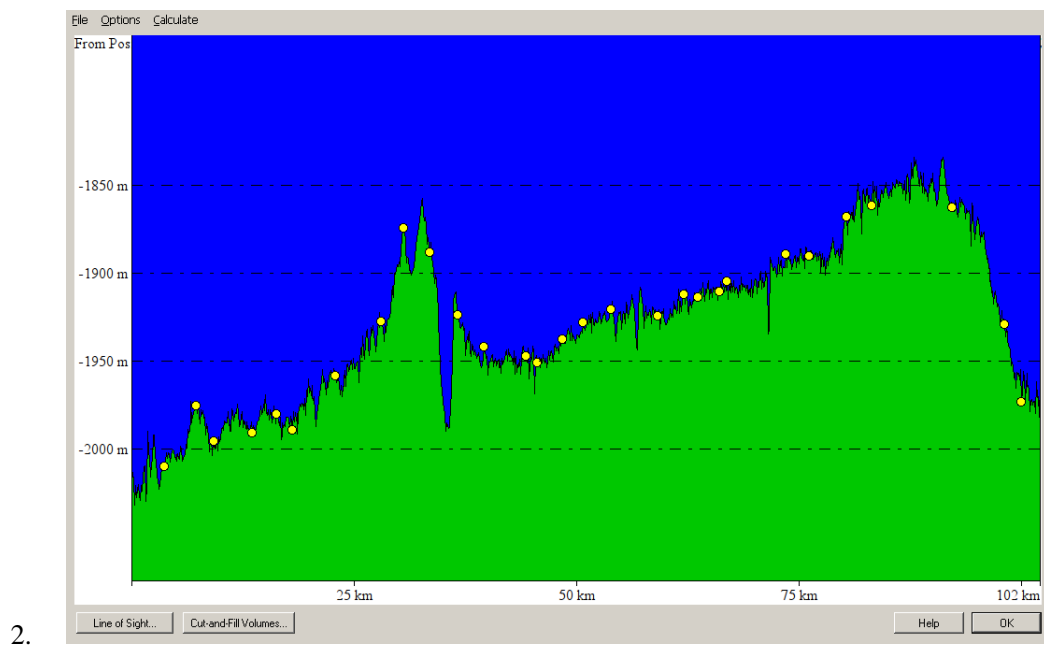
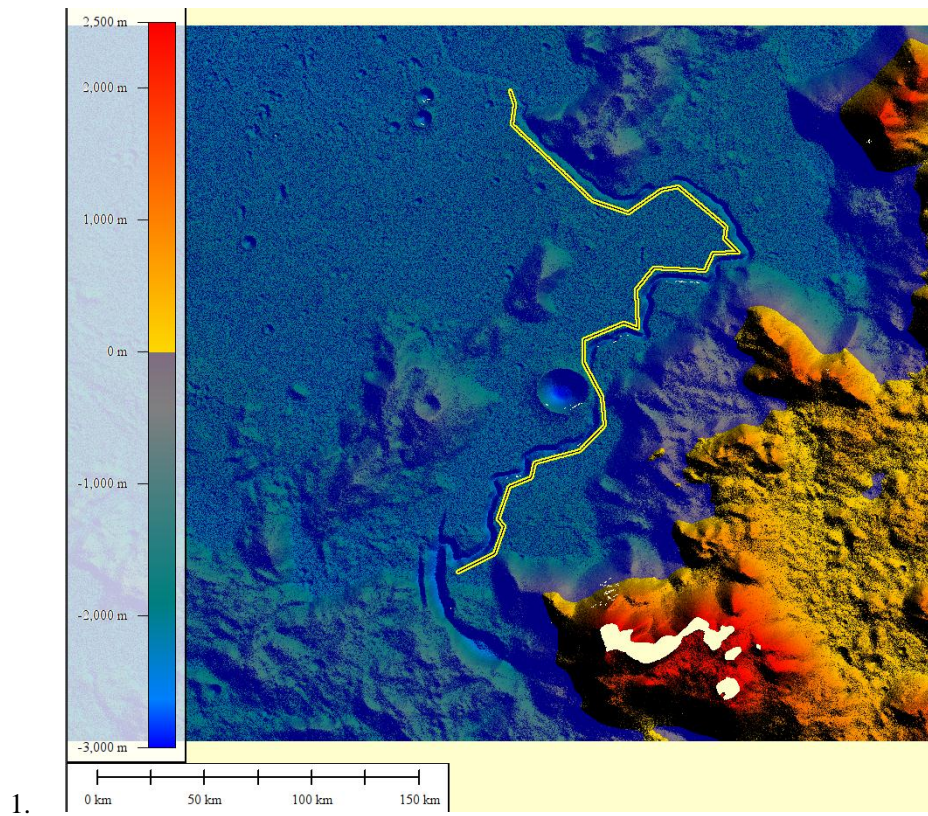


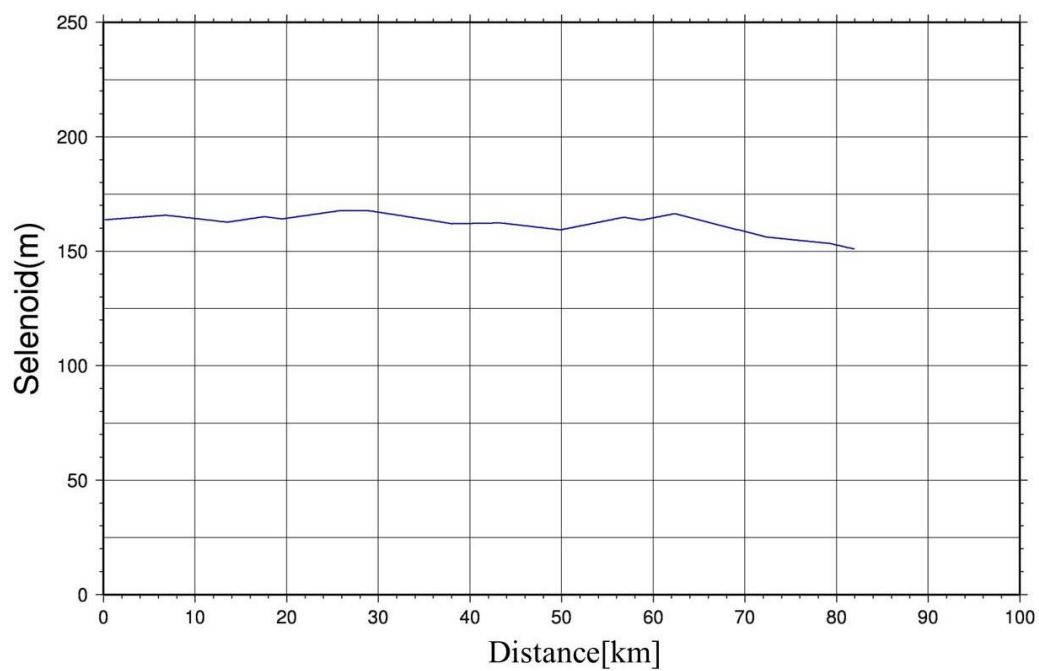
3.

Fig.37 Rimae Plato に沿ったプロファイル.

1. 径路図,
2. 地形高度のプロファイル図,
3. セレノイド高のプロファイル図



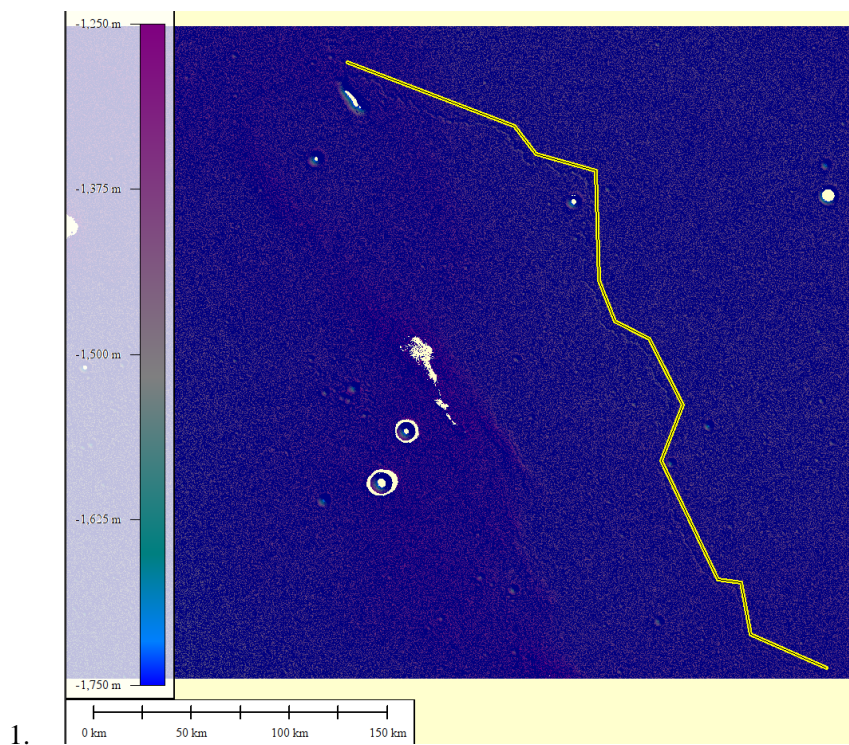


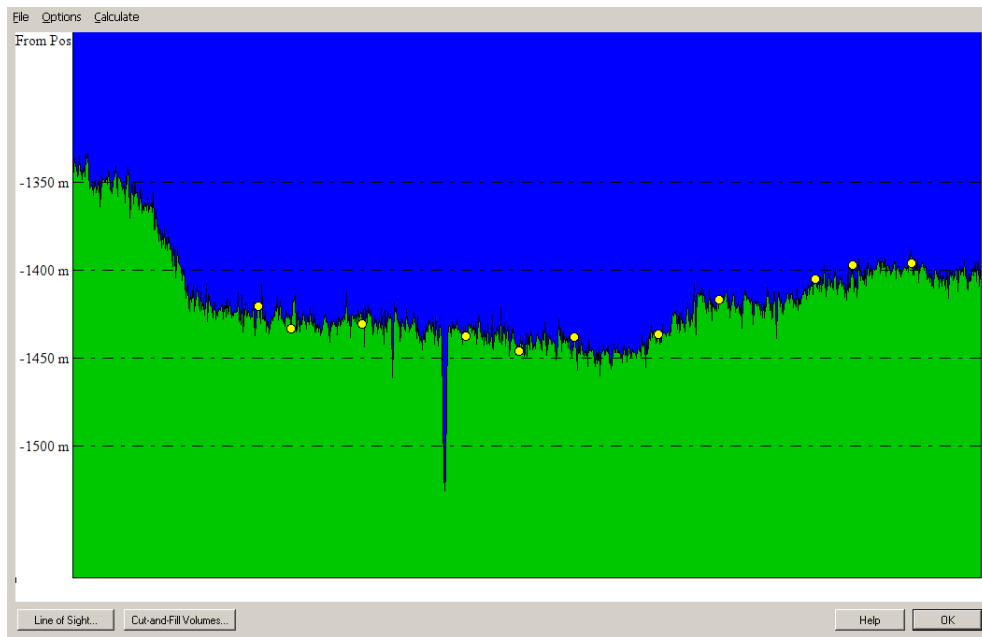


3.

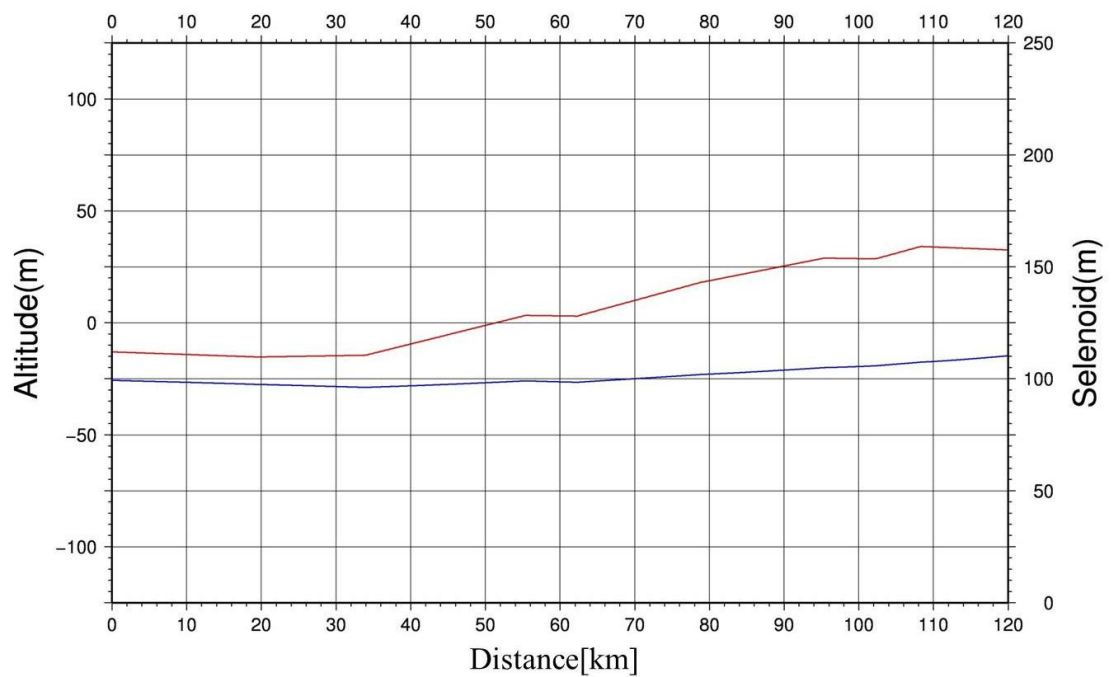
Fig.38 Rima Hadley に沿ったプロファイル.

1. 径路図,
2. 地形高度のプロファイル図,
3. セレノイド高のプロファイル図





2.



3.

Fig.39 Rima Suess に沿ったプロファイル.

1. 径路図,
2. 地形高度のプロファイル図,
3. 現在のセレノイド高(青)と Mare Imbrium 周辺が同期自転衛星の平衡な 2 次のセレノイドと同じ傾斜を持つと仮定した場合の相対的なセレノイド高(赤)のプロファイル図

## 5.2 sinuous rille の流動方向に関する考察

多くの sinuous rille が Mare Imbrium 周辺に存在しており(Fig.35)、その大部分は Rimae Aristarchus(Fig.36)と同じように、セレノイド(青いグラフ)に対して低い方向へ向かって流れている。しかしながらいくつかの sinuous rille は、Rimae Plato を含めて、現在のセレノイドに対して上昇方向へと流れている(Fig.37~Fig.39)。

その中でも、本研究において特に興味深いケースが Rima Suess である(Fig.39)。Rima Suess は Mare Imbrium の南西方向に位置し、その流動方向は、流動の後半部分において、現在のセレノイド(青いグラフ)に対して上昇方向へと流れている。ここで、Mare Imbrium 周辺の領域の地形が同期自転衛星の平衡な 2 次のセレノイドと同じ傾斜を持っている場合を仮定した。その場合、仮定された地形に対して現在のセレノイド高は相対的な高さが変動するため、その変動を反映した相対的なセレノイドの高さのプロファイルを想定した(赤いグラフ)。その変動後のセレノイド高(赤いグラフ)と流動方向の地形プロファイルを比較すると、下降流動をしているように見えることが確認された。このことは Rima Suess の形成当時、Mare Imbrium 周辺の領域の地形が、同期自転衛星の平衡状態の 2 次のセレノイドと似た傾斜を持っていた可能性を示唆している。また、Mare Imbrium が形成後に傾斜変動を起こした証拠の一つとなる可能性と言い換えることもできる。

いくつかの sinuous rille は Rima Suess と同じような流動を示しているかもしれないが、そうでないものもある。本研究ではそこまで至らなかったが、Mare Imbrium の勾配の統計的なシナリオを得るためには、これらの sinuous rilles の流動方向を継続的に探索し続けていくしかないだろう。

## 6 まとめ

カウラ則を用いて示された月の 2 次の重力場係数と軌道運動との有意性に基づき、二つの測地学的アプローチを用いて過去のセレノイドを局地的に復元する試みを行い、地球-月力学系の進化の議論を目指した。

一つ目の方法として、レーザ高度計(LALT)による地形データ(Araki, et al., 2009)と月重力モデル(SGM100h, Matsumoto et al., 2010)を用い、マスコン盆地内の溶岩表面とセレノイドの形状を比較した。月の海の表面が実際に過去のセレノイドを記憶しているかの評価を行い、Mare Imbrium、Mare Serenitatis、Mare Humorum の三つの月の海表面地形において、月重力モデルから求められたセレノイドと同程度の凸型の膨らみを確認することができた。このことは、この三つの地形が古セレノイドの情報を現在も保存している可能性を示唆している。

三つのマスコン盆地内のセレノイドは、凸型の膨らみに加えて、平均的な月地殻表面に対して全体的な傾きを示した。Mare Serenitatis、Mare Humorum の平面的な傾斜は静水圧平衡状態の 2 次の形状( $J_2 : C_{22} = 10:3$ )と支持する方向を示し、月の過去の同期自転運動を示唆する古セレノイドの情報を復元した。一方で Mare Imbrium は南西方向の異常な傾斜を示した。

二つ目の方法として、この結果を検証するために、地形カメラ(TC)による地形データを利用した sinuous rille の流動方向の調査を行った。Mare Imbrium 付近にある Rima Suess の流動方向は現在のセレノイドに対して上昇方向へと流れている。しかしながらこの上昇流動は、Mare Imbrium 周辺の平面的な傾斜に対して、静水圧平衡状態の 2 次の形状を支持する方向を向くように地形データに勾配のバイアスを与えると、下降流動になる。このことは Rima Suess の形成当時、Mare Imbrium 周辺の領域の地形が、同期自転衛星の平衡状態の 2 次のセレノイドと似た傾斜を持っていた可能性を示唆している。

これら二つのアプローチによる結果は、マスコン盆地が形成された当時の 2 次のセレノイドの形状が同期自転衛星の静水圧平衡状態にあった可能性を提示することができた。

## 7 謝辞

この論文を完成させるにあたり、多くの方々のご協力を得られたことをお礼申し上げます。まず指導教官の日置幸介教授(宇宙測地学研究室)には本当にお世話になりました。研究におけるテーマの提供を始め、論文の紹介・解説、解析手法の指導など、あらゆる面でのご指導に労力と時間を割いてくださったことを心より感謝したいと思います。ありがとうございました。また、同研究室の古屋正人教授、固体系ゼミでお世話になった小山順二教授、蓬田清教授、勝俣啓准教授、吉澤和範准教授、山田卓二助教にも、お礼申し上げます。そして、実務・精神の両面で、研究室での快適な活動を提供してくださった本研究室に在籍されている学生の皆様にもたいへんお世話になりました。ありがとうございました。

なお、本研究にて利用されている SELENE のデータは、「かぐや(SELENE)データアーカイブ」より提供されており、その著作権は宇宙航空研究開発機構(JAXA)および SELENE プロジェクトへ協力された研究機関が有しています。

## 8 参考文献

- Araki, H., S. Tazawa, H. Noda, Y. Ishihara, S. Goossens, S. Sasaki, N. Kawano, I. Kamiya, H. Otake, J. Oberst and C.K. Shum, 2009, Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry, *Science*, 323, 897-900, doi:10.1126/science.1164146.
- Bills, B.G., and F.G.Lemoine, 1995.Gravitational and topographic isotropy of the Earth, Moon, Mars, and Venus, *J. Geophys. Res.*, 100, 26,27526,295,
- Ćuk, M., 2010,Lunar Shape Does Not Record a Past Eccentric Orbit, *Icarus*, doi: 10.1016/j.icarus.2010.08.027
- Frank D. Stacey and Paul M.Davis, 2008, *Physics of the Earth*, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, pp521
- Garrick-Bethell, I., Wisdom, J., Zuber, M. T., 2006. Evidence for a Past High-Eccentricity Lunar Orbit, *Science*, 313, 652-655
- Goldreich, P., Toomre, A., 1969. Some remarks on polar wandering., *Journal of Geophysical Research* 74, 2555-2567.
- 日置幸介(2010) : 地球内部物理学講義ノート  
[http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/pdf/Phys\\_inter.pdf](http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/pdf/Phys_inter.pdf)
- Honda, C., Fujimura, A., 2005, Formation Process of Lunar Sinuous Rilles by Thermal Erosion of Basaltic Lava Flow, 36<sup>th</sup> Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 14-18, 2005, in League City, Texas, abstract no.1562
- Innanen, K., 2006. Solving Laplace's Lunar Puzzle, *Science*, 313, 622-623
- International Astronomical Union, USGS Astrogeology Science Center, 1964, 1985, *Gazetteer of Planetary Nomenclature*,  
<http://planetarynames.wr.usgs.gov/>
- Kaula, W. M., 1963, The investigation of the gravitational fields of the moon and planets with artificial satellites, *Adv. Space Sci. Technol.*, 5,210-230.
- Lambeck, K. and Pullan, S., 1980. The lunar fossil bulge hypothesis revisited. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 22:29-35
- Lefttz, M., Legros, H., 1993. Some remarks on the non-hydrostatic form of the Moon, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 76, 317-327
- Matsumoto, K., et al., 2010, An improved lunar gravity field model from SELENE and historical tracking data:Revealing the farside gravity features, *J. Geophys. Res.*, 115, E06007, doi:10.1029/2009JE003499.
- Namiki, N., T. Iwata, K. Matsumoto, H. Hanada, H. Noda, S. Goossens, M. Ogawa, N. Kawano, K. Asari, S. Tsuruta, Y. Ishihara, Q. Liu, F. Kikuchi, T. Ishikawa, S. Sasaki, C. Aoshima, K. Kurosawa, S. Sugita, 2009, Farside Gravity of theMoon from Four-Way Doppler

Measurements of SELENE(Kaguya), *Science*, 323, 900-905

- 並木則行・杉田精司・石原吉明・野田寛大・佐々木晶・岩田隆浩・花田英夫・荒木博志・黒澤耕介・松村瑞秀・横山聖典・鎌田俊一・久保公央・森 朝子・佐藤麻里 (2009), 月衝突盆地補償メカニズムの比較研究, 測地学会誌, 第55巻, 第2号, 291-305
- 日本測地学会 (2004), CD-ROM テキスト「測地学」web版,  
<http://www.soc.nii.ac.jp/geod-soc/web-text/index.html>
- Sagitov M.U., B. Bodri, V. S. Nazarenko, Kh. G. Tadzhdinov, 1986, *Lunar Gravimetry*. Academic Press, pp298
- Tsutomu Murase and Alexander R. McBirney, 1970, *Viscosity of Lunar Lavas*, *Science*, 167, 1491-1493
- 田澤誠一・荒木博志・野田寛大・石原吉明・坪川恒也・河野宣之・浅利一善・右田恵美子・佐々木晶・加瀬貞二・村田 茂・國森裕生・大嶽久志 (2009), かぐや (SELENE) 搭載レーザ高度計による観測, 測地学会誌, 第55巻, 第2号, 179-193
- 宇宙航空研究開発機構(JAXA), 2007, 周回衛星「かぐや(SELENE)」,  
<http://www.selene.jaxa/>
- Williams, K. K., and M. T. Zuber, 1996, Re-evaluation of mare thicknesses bases on lunar crater depth-diameter relationships, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 27th*, 1441- 1442.
- Williams, K.K., and M.T. Zuber, 1998, Measurement and analysis of lunar basin depths from Clementine altimetry, *Icarus*, 131, 107-122