

# 月基準座標系と月地形図

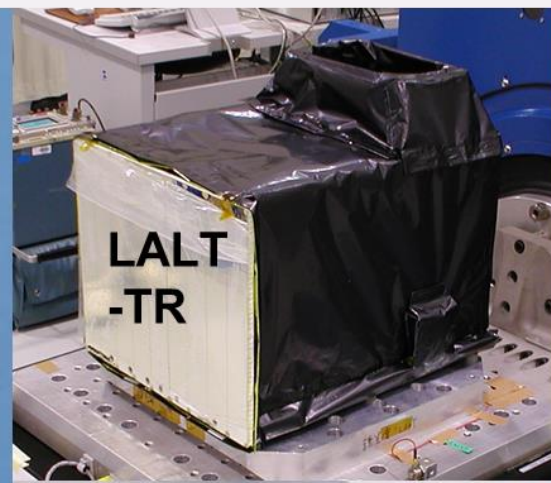
荒木博志（国立天文台 RISE月惑星探査プロジェクト）

- **荒木博志：**

- **国立天文台・RISE月惑星探査検討室（助教）**

- 1989-1995:宇宙科学研究所(現JAXA/ISAS)
  - 修士課程：「ひてん」ダストカウンターMDC(1991)。
  - 博士課程：「LUNAR-A」の月震計開発(1995)。
- 1996-：国立天文台水沢へ
- 1997-：SELENE（かぐや）計画に参加
- 2005-：レーザ高度計(LALT)のPI（3代目）
- 2009-：LLR（月レーザ測距）検討に参加
- 2012-：GALA（ガニメデレーザ高度計）検討
- 2015-：HAYABUSA-2-LIDAR観測検討→表面アルベド解析
- 2018-：MMX-LIDAR(JAXAの火星衛星フォボス探査)
- 2020-：Omni-SLR（超小型SLR装置開発、大坪氏(一橋大)

「かぐや」打上げ  
2007.09.14  
10:31JST



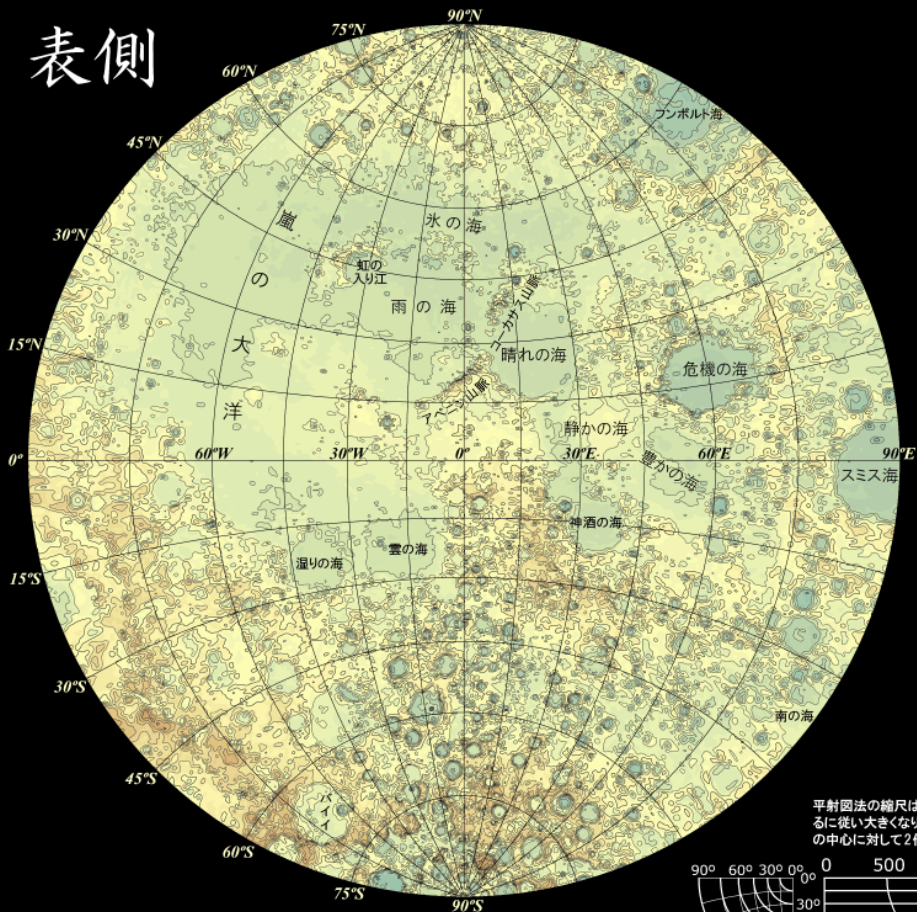
「かぐや」主衛星  
とLALT



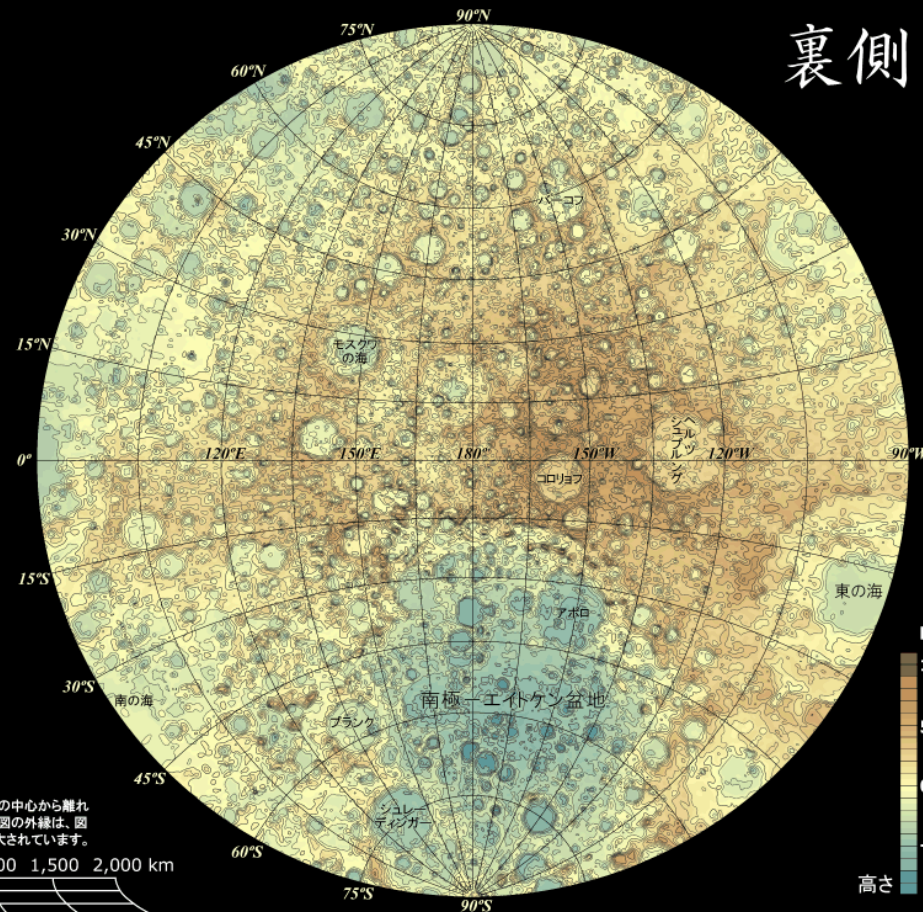


# 「かぐや」が見た月の地形

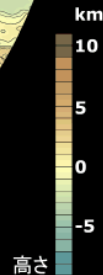
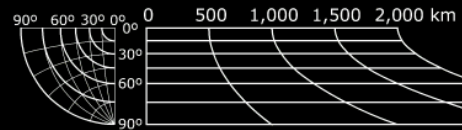
## 表側



## 裏側



平射図法の縮尺は、地図の中心から離れるに従い大きくなります。図の外縁は、図の中心に対して2倍に拡大されています。



この地図は、JAXAの月周回衛星「かぐや(SELENE)」に搭載したレーザ高度計(LALT)の観測精度5mの観測データをもとに作成しました。等高線間隔は1km、高さの基準は重心を中心とする半径1,737.4kmの球です。投影法は平射図法、経度0°は地球から見える月中心を通る子午線です。観測期間は平成20年1月7日~1月20日です。月の表側は玄武岩で覆われた平坦で薄暗い海が比較的多いのにに対し、裏側は大小さまざまなクレータで覆われ尽くされており海はほとんどありません。

また裏側の南半球には、南極-アイトケン盆地と呼ばれる直径約2,500kmもある巨大な衝突盆地があり月面で最も低い地域です。海は円形もしくは楕円形をしているものが多く、衝突盆地の窪みに溶岩が噴出して溜まったものと考えられています。しかし南極-アイトケン盆地は海にはなっていません。これは地殻の厚さや岩石の組成が表側と違うためではないかと考えられています。



LALTのデータ処理・解析 自然科学研究機構 国立天文台  
地形図の作成 国土交通省 国土地理院

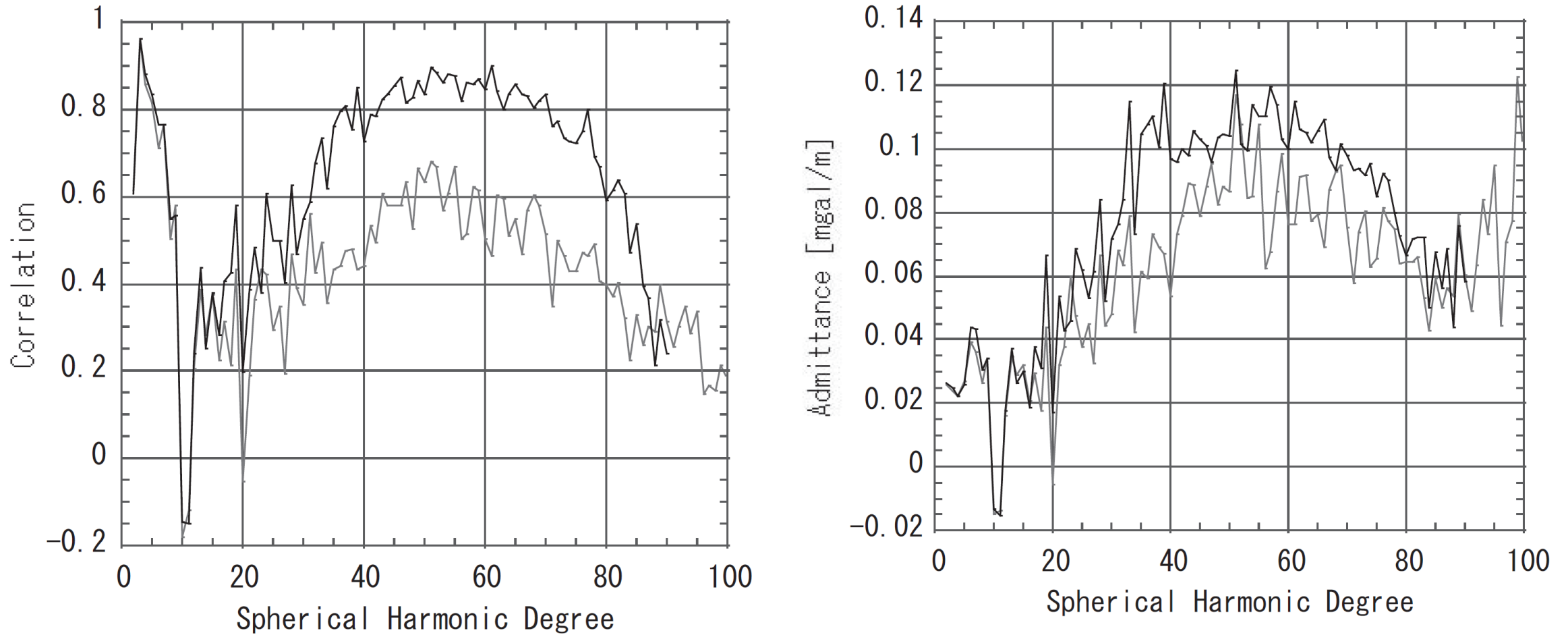
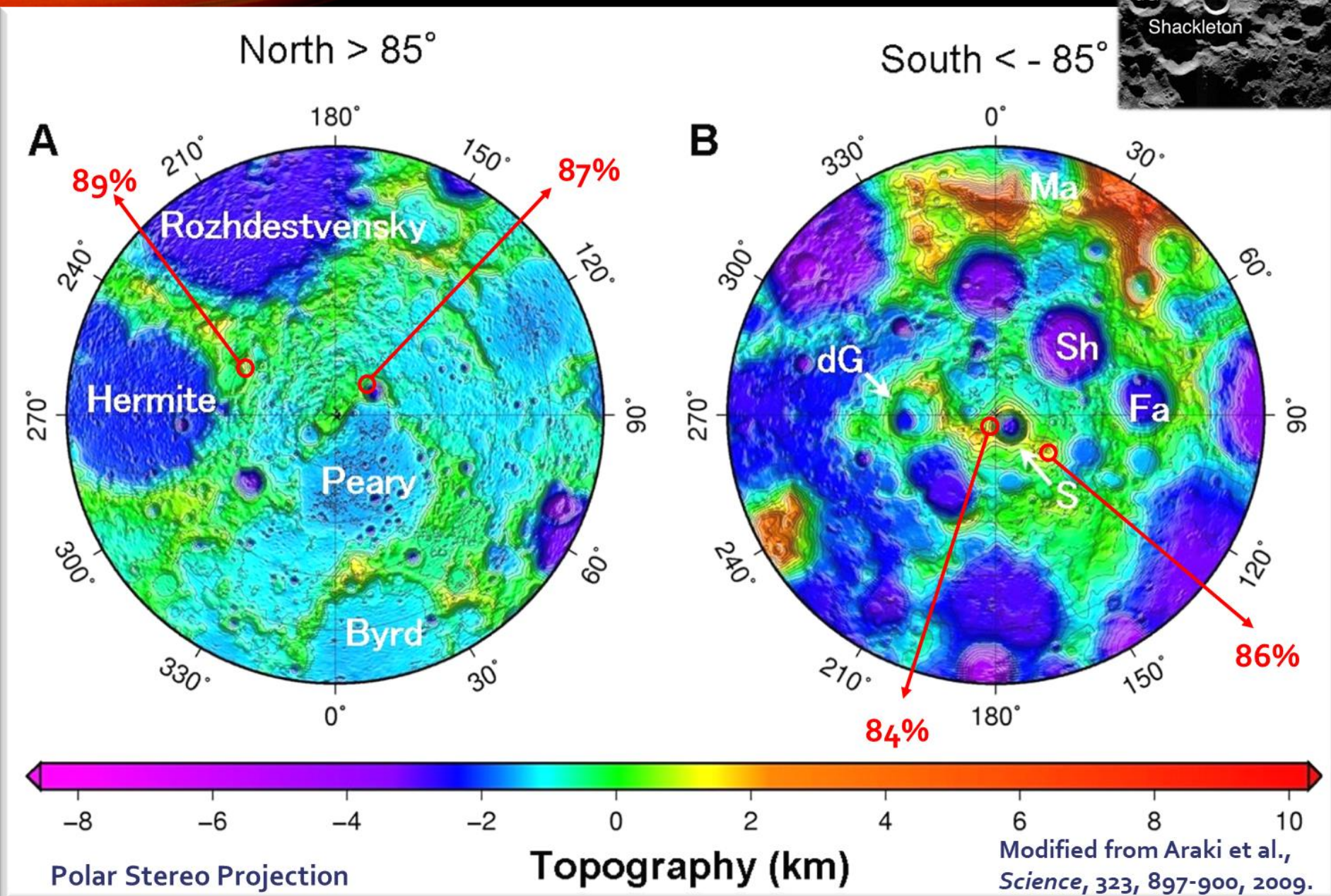
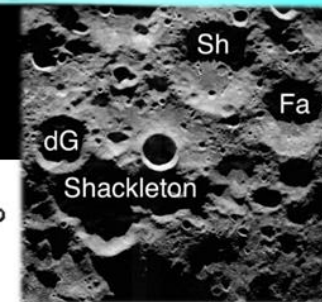


Fig. 5 Correlation (left) and admittance (right) spectra of the lunar radial gravity and topography using SGM90d and STM359\_grid-02 (black) together with the case for LP100K and ULCN 2005 (gray).

# Lunar Polar Topographic Map



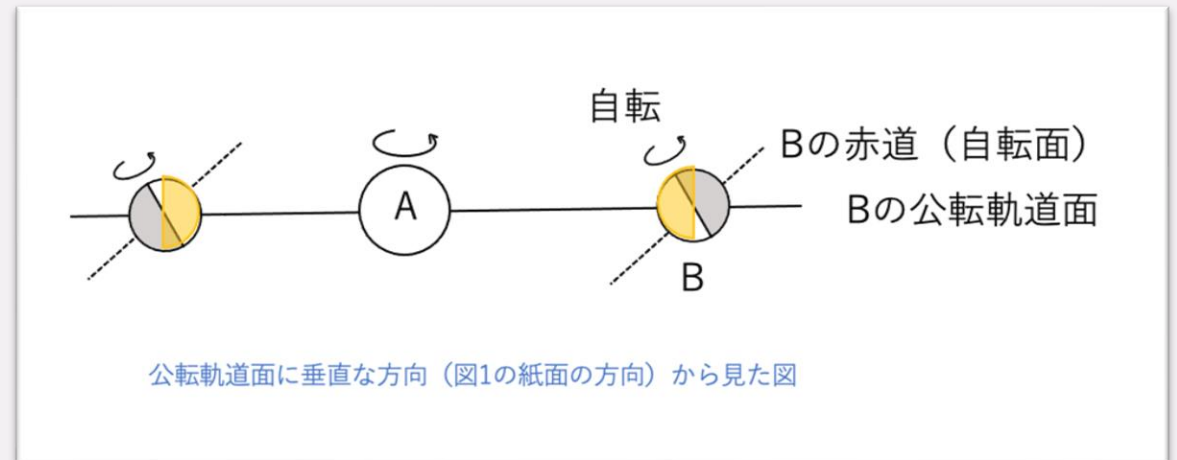
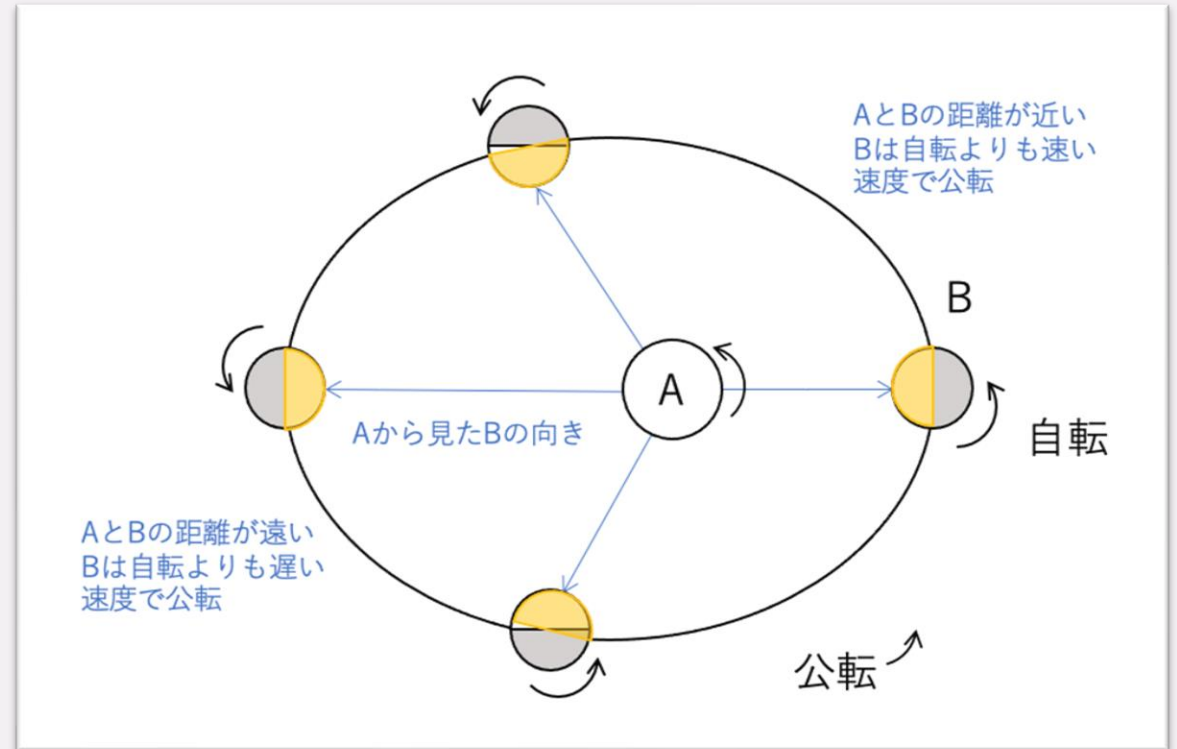
# LALT観測結果

Araki *et al.*, 2009; 荒木他, 2009; Noda *et al.*, 2008; Ishihara *et al.*, 2009; Kobayashi *et al.*, 2009

- 観測総数：約2206万点（リターン率96.9%）
- 月面上のデータ密度： $\leq 0.5^\circ$ （赤道）， $\sim 1/(200\text{m})^2$ （極域）
- 地形データの精度：  
半径方向：4m ( $1\sigma$ )，水平方向：77m ( $1\sigma$ )：「 $\sim 40\text{m}$ 以下：LLR比較」
- 形状・地形：  
最高点：ディリクレ-ジャクソン盆地の南側周壁（+10.75 km）  
最低点：アントニアジクレータ内部（-9.06 km）  
平均半径：1737.15 km  
重心-形状中心：1.93km（東経202.41 deg., 北緯 7.10 deg.）  
極半径：1735.66 km, 赤道半径：1737.90 km  
平坦なスペクトル特性（水平スケール90～180 km）
- 極域の日照率：  
 $\leq 89\%$  for North Polar region  
 $\leq 86\%$  for South Polar region
- 月地殻厚さ：  
最も厚い場所：月面最高点の近傍  
最も薄い場所：モスクワの海
- 月レゴリス：  
レーダサウンダ(LRS)データと比較→レゴリス厚さが「海」で6-7m
- データ公開(JAXA)：2009年11月1日
- データ公開(NAOJ)：2010年7月1日

# はじめに

- 月はいつも同じ顔
- 望遠鏡発明前後から月面スケッチ登場
- 模様（地形）の位置情報が問題になってくる。経緯度線を入りたい。
- 平均地球方向を経度ゼロ、自転軸方向を南北極にする。秤動があってすぐ決められないので観測が必要。
- 秤動 ⇔ 月座標系は裏腹の関係（同じもの）  
→ 秤動を決定できる LLR
- 探査機追跡、高度計測、写真測量は月面各点の位置決定に重要





月はいつも同じ顔を見せている

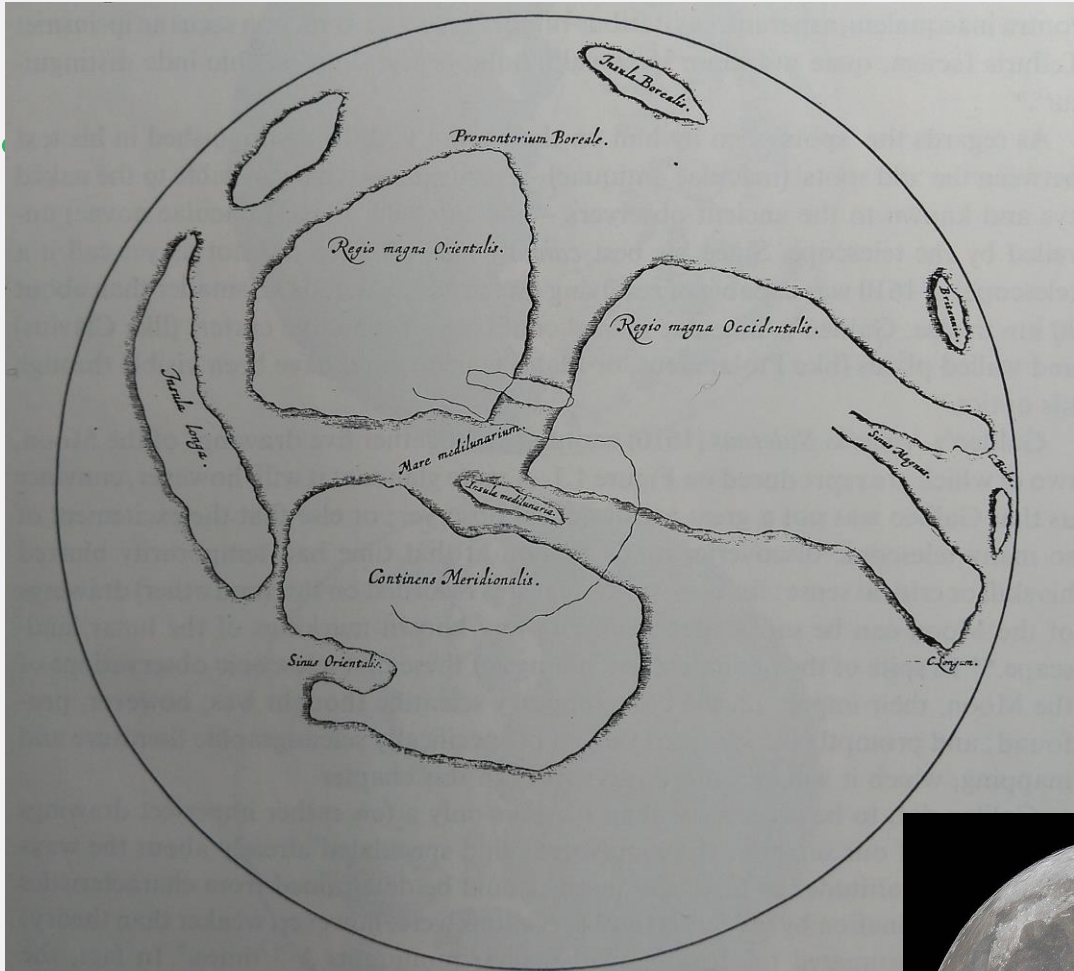


Fig. 1.1. A drawing of the face of the Moon as it appeared to the naked eye, prepared by some time before his death in 1603, and facing p. 137 of his rare tract *De Mundo Nostris* published (posthumously) in 1651 in Amsterdam. The present illustration is reproduced from this book in possession of the Glasgow University Library.

W. Gilbert, 1603



First telescopic map of full Moon prepared by Thomas Harriot in England. Although, according to Harriot (1833), Harriot commenced his observations of the Moon as early as July 1609, it is probably followed the publication of Galileo's *Nuncius*. It is, however, superior to Galileo's drawings (Galileo did not draw full Moon) and contains many features which can be identified today. Note (under No. 39) a feature which appears to be one of the rays of Tycho.

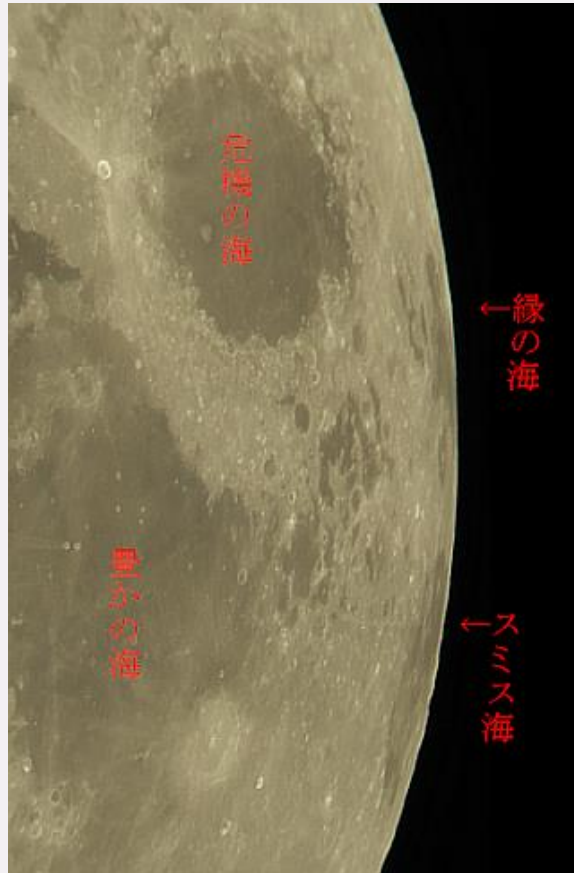
T. Harriot, 1609



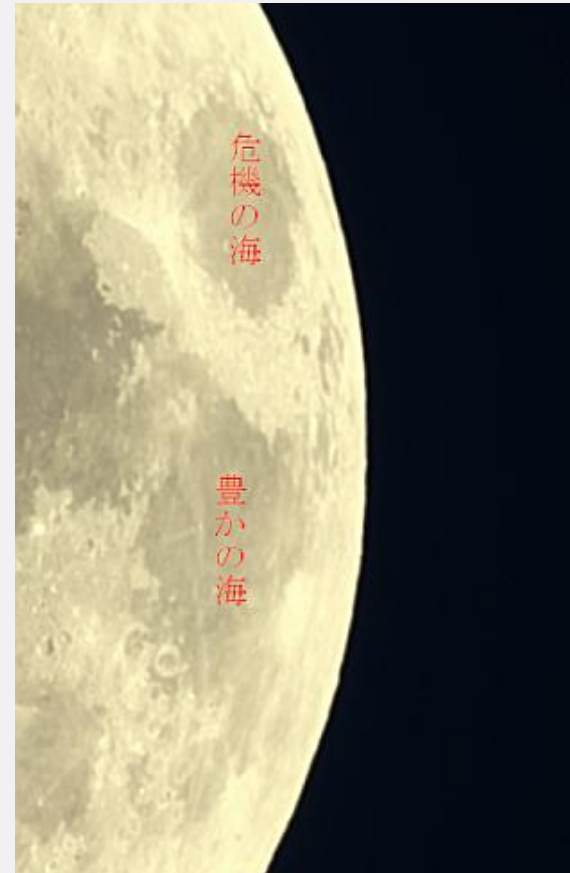
# 月の秤動



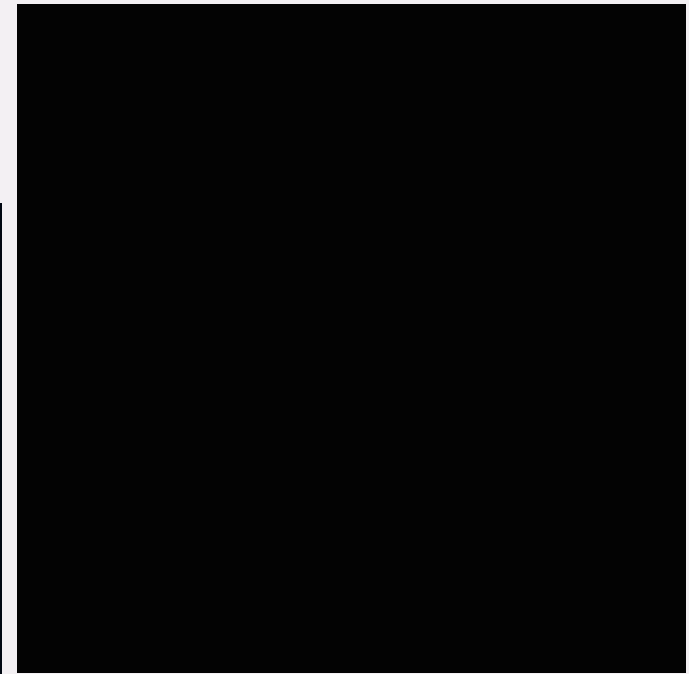
2019年10月5日、月の東端



2019年5月17日、月の東端



2019年1月14日、月の東端

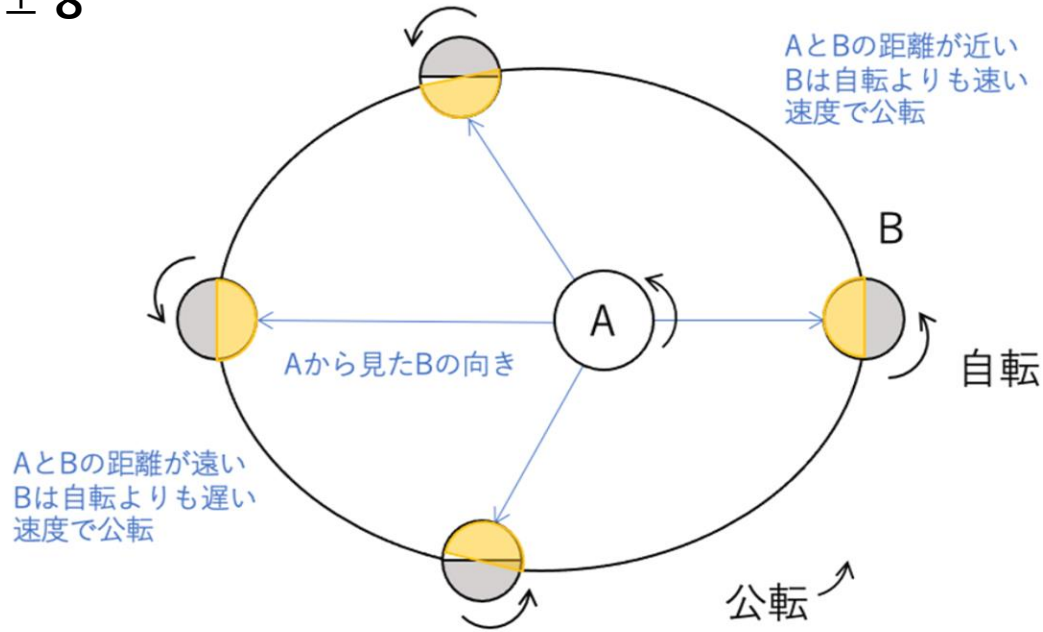


APOD: November 8, 1999 - Lunation (nasa.gov)

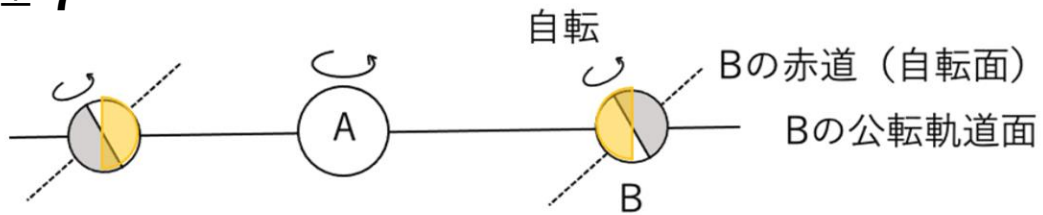


# 幾何秤動(経度秤動[上]、緯度秤動[下])

± 8°



± 7°



公転軌道面に垂直な方向(図1の紙面の方向)から見た図

# 幾何秤動(日周秤動)

± 0.5°

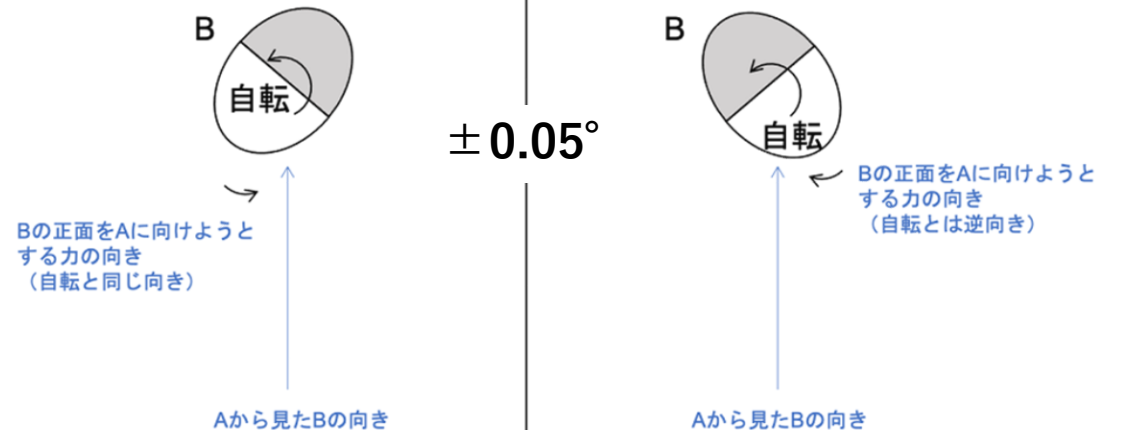


# 物理秤動(強制秤動)

+ 物理秤動  
(自由秤動)

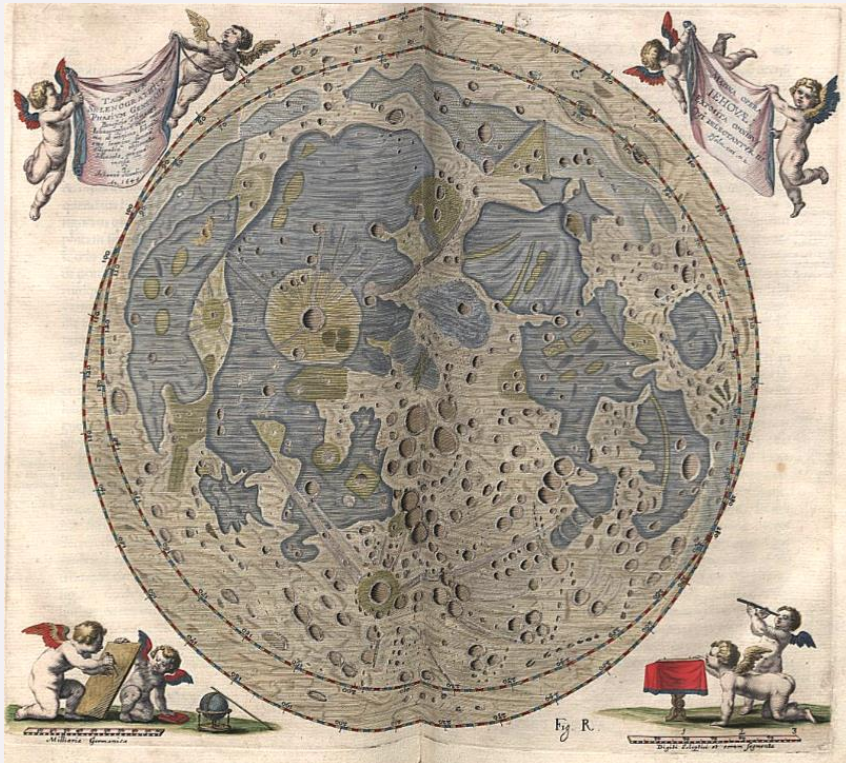
公転角速度 > 自転角速度の場合

公転角速度 < 自転角速度の場合

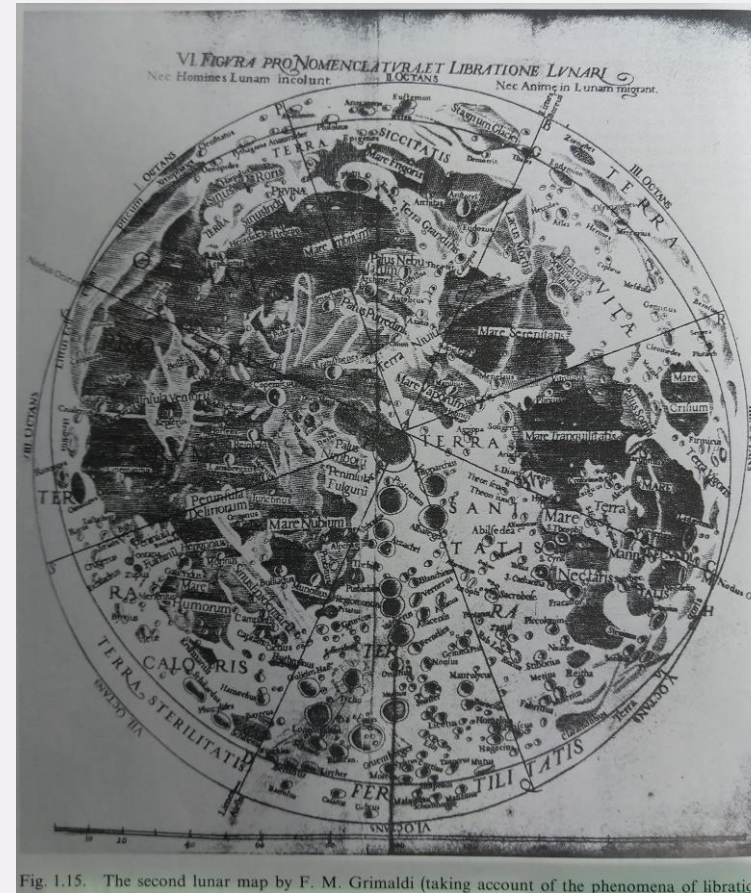


# Brief history of Selenodesy

- 月面観測時の月の秤動（特に幾何秤動）がわかれば良い←月面上の分かりやすい地形（形のきれいなクレーターの中心）の動き（月円盤内の位置）を観測する。

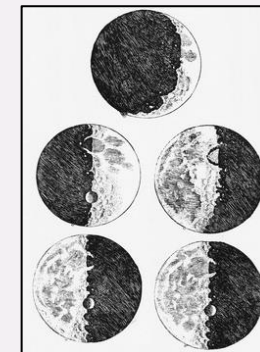


J. Hevelius, 1645



F. M. Grimaldi, 1651

# Brief history of Selenodesy



- Gilbert, Harriot, Galilei : 肉眼、望遠鏡による月面スケッチ(drawing)
- T. Mayer(1723-1762) : マニリウスクレーター的位置観測



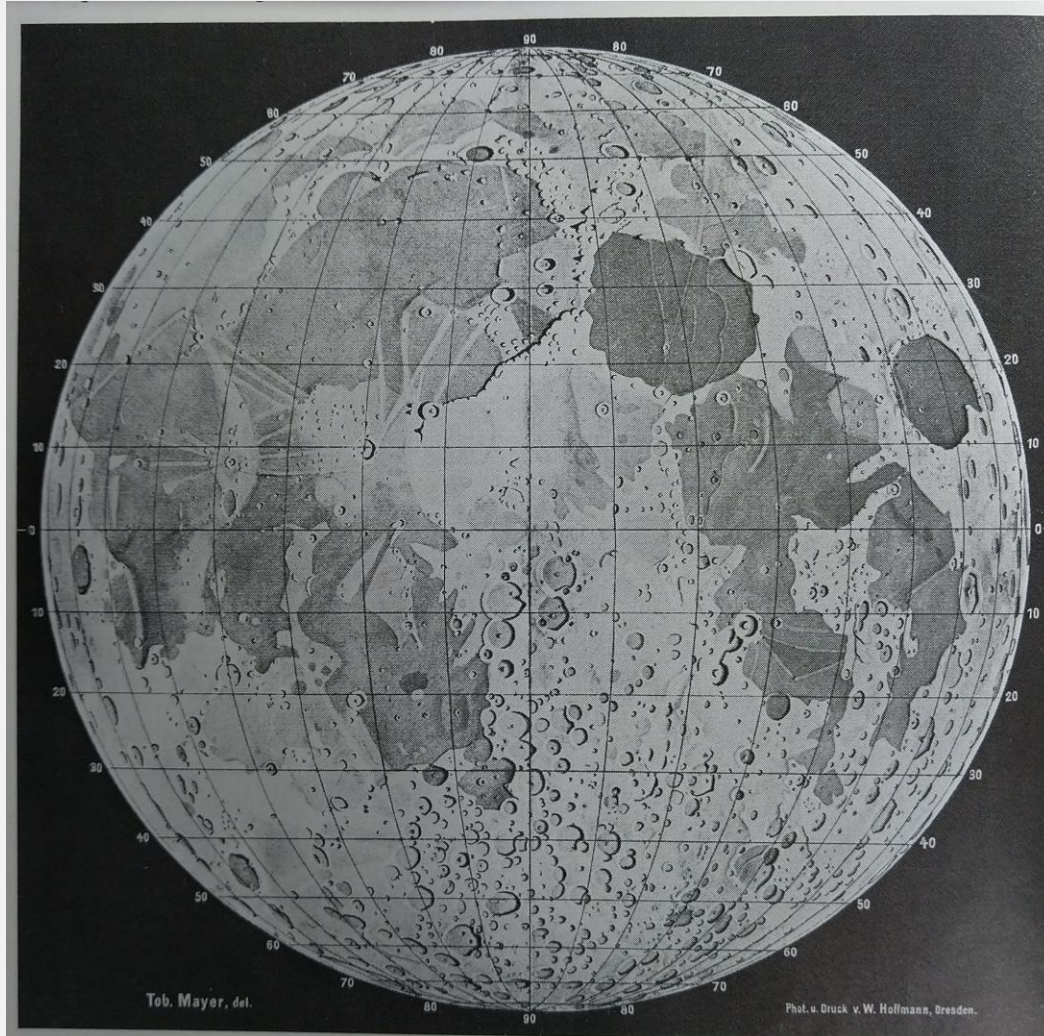
→月の自転軸と黄道面法線の傾きを $1^{\circ} 29'$ と求める。  
月面に経緯度を初めて導入（平均地球方向を経度ゼロ）  
→マニリウスの位置（ $9^{\circ} 2'$ 、 $14^{\circ} 34'$ ）

他に23+65地点の位置測定→地球以外の天体で世界初の  
測地学的ネットワーク

- J. H. Lambert(1728-1777) : 200地点のマイクロメータ測定（望遠鏡の視野内）  
修正正射投影による地形図（精度はMayerに及ばず）
- J. H. Schröter(1745-1816) : *Selenotopographische Fragmente*（詳細部分描写、位置データはMayerによる）
- W. G. Lohrmann(1796-1840) : ファイラーマイクロメータ（79点）、大小月面図出版
- W. Beer(1797-1850) & J. H. Mädler(1794-1874) :  
ファイラーマイクロメータ(106点)、物理秤動決定のため  
メスティングAクレーターのヘリオメータ観測(1834-1836)

# Brief history of Selenodesy

- 特徴点（マニリウス）の月円盤上の位置観測（T. Mayer, 18世紀半ば、下図(左)は1750年）

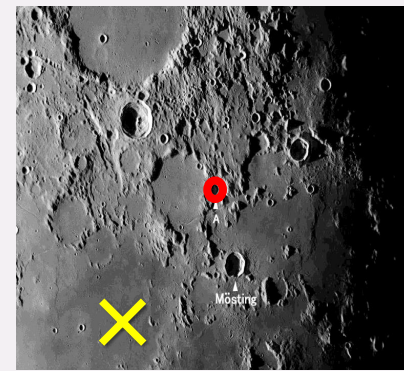


Mapping of the Moon、1974, Kopal&Cardner



[https://ja.m.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Galileo%27s\\_sketches\\_of\\_the\\_moon.png](https://ja.m.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB:Galileo%27s_sketches_of_the_moon.png)

# Brief history of Selenodesy



[http://blog.livedoor.jp/veranda\\_obs/archives/1237211.html](http://blog.livedoor.jp/veranda_obs/archives/1237211.html)

- F. W. Bessel(1784-1846) : メスティング A を測地基準点として用いることを提唱
- Bessel & M. Wichmann : →月の自転軸と黄道面法線の傾きを $1^{\circ} 32' 9''$ と求める。  
月面に経緯度を初めて導入 (平均地球方向を経度ゼロ)
- J. H. Lambert(1728-1777) : 200地点のマイクロメータ測定 (望遠鏡の視野内)  
修正正射投影による地形図 (精度はMayerに及ばず)
- J. H. Schroter(1745-1816) : *Selenotopographische Fragmente* (詳細部分描写、位置データはMayerによる)
- W. G. Lohrmann(1796-1840) : ファイラーマイクロメータ (79点)、大小月面図出版
- W. Beer(1797-1850) &  
J. H. Madler(1794-1874) : ファイラーマイクロメータ(106点)、物理秤動決定のため  
メスティング A クレータのヘリオメータ観測
- J. F. J. Schmidt(1825-84) : 直径194.9cmの大月面図。基準点としてLohrmannと  
Madlerのデータを使う。
- 以後、写真測量の時代へ(メスティングA基準)。J. Frantz(独), S. A. Saunder(英)



# Mösting Aの位置観測

Planetary Mapping, 1994, Greeley & Batson

Table 5.2. *Coordinates of the fundamental lunar point, Mösting A.*

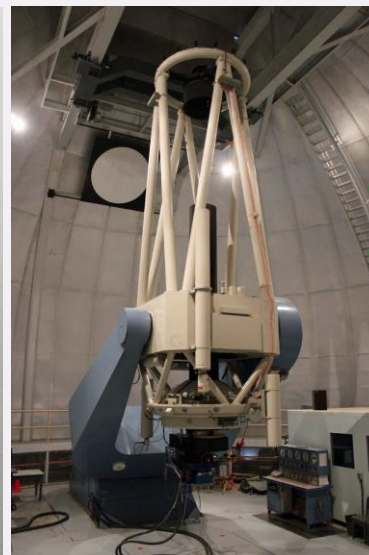
Latitude	Longitude	Radius (km)	Reference
-3°190	-5°172		Franz, 1899
-3.183	-5.172	1,741.770	Hayn, 1904
-3.180	-5.163	1,739.385	Schrutka-Rechtenstamm, 1956
-3.180	-5.164	1,738.733	Koziel, 1967
-3.222	-5.183	1,737.307	Schimerman, 1976 (Apollo)
-3.212	-5.211	1,737.527	Davies et al., 1987

## 地上観測による月面測量（写真測量）

Planetary Mapping, 1994, Greeley & Batson

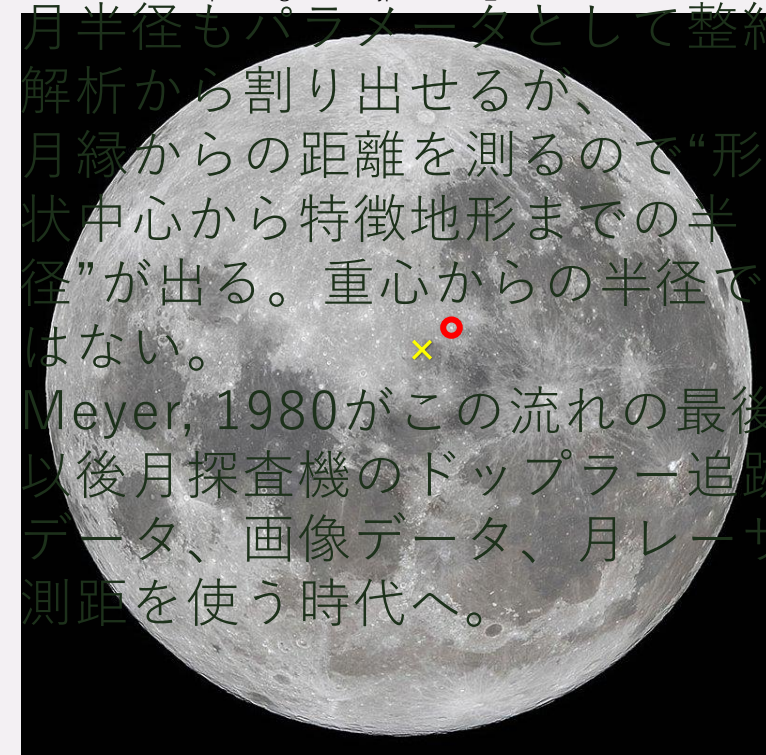
Table 5.1. *Lunar networks derived from telescopic pictures.*

Number of points	Number of pictures	Reference
150	5	Franz, 1901
2,885	6	Saunders, 1911
150	5	Schrutka-Rechtenstamm, 1958
696	5	Baldwin, 1963
256	15	Marchant et al., 1964
196	8	Meyer and Ruffin, 1965
906	120	Mills and Sudbury, 1968
1,355	37	Arthur and Bates, 1968
1,156	10	Meyer, 1980



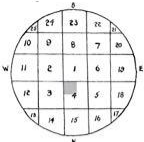
- 20世紀  
写真測量の時代：  
地上望遠鏡による写真測量上の  
特徴地形複数を経位置測定  
(小クレーターなど)  
メスティングAがネットワーク  
の基準

[http://blog.livedoor.jp/veranda\\_obs/archives/1237211.html](http://blog.livedoor.jp/veranda_obs/archives/1237211.html)



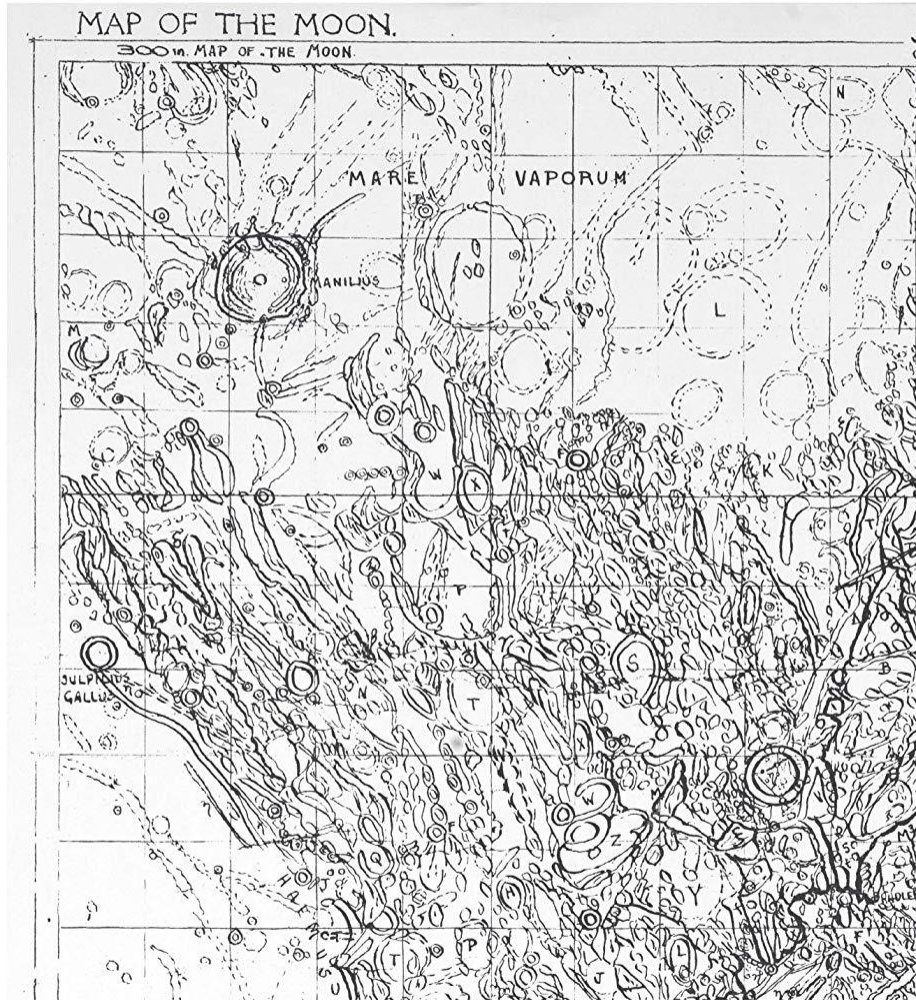
- 月半径もパラメータとして整約  
解析から割り出せるが、  
月縁からの距離を測るので“形  
状中心から特徴地形までの半  
径”が出る。重心からの半径で  
はない。  
Meyer, 1980がこの流れの最後  
以後月探査機のドップラー追跡  
データ、画像データ、月レーザ  
測距を使う時代へ。

# Brief history of Selenodesy



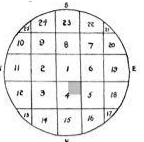
SECTION:  
IV:I

Key-- ⊙ Craterlet, ○ Craterpit, ⊕ Cratercone, ◊ Hillcock, — Clefts, = Ridges, ..... Light Streaks, ⚡ Dark Variable Spots.



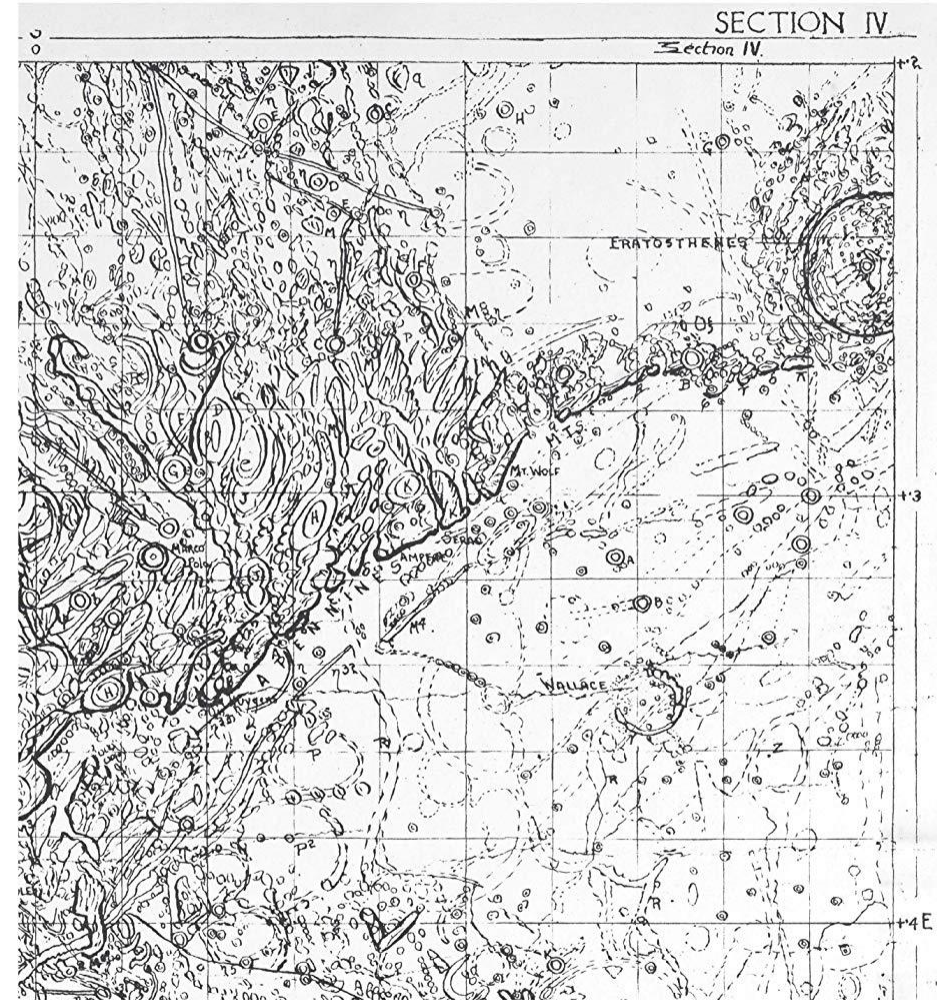
Originates from 7.5m (300 inches) diameter lunar chart by H. P. Wilkins, 1951; Mapping of the Moon 2020.

<https://www.amazon.co.jp/Map-Moon-Hugh-Percy-Wilkins/dp/1906367604>



SECTION:  
IV:II

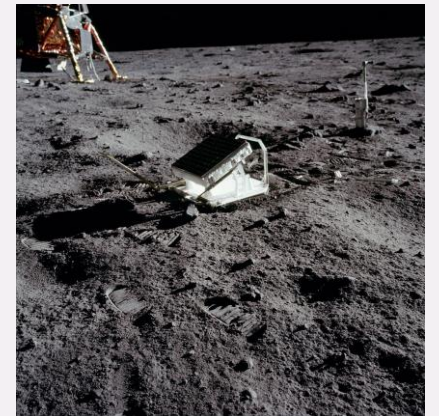
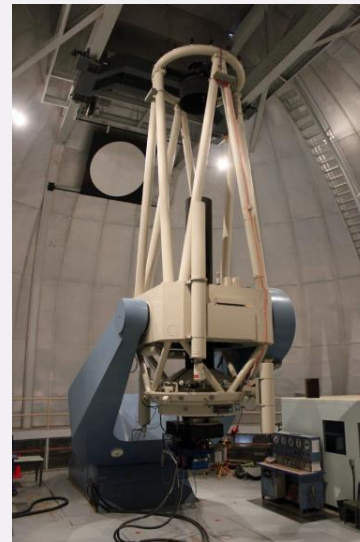
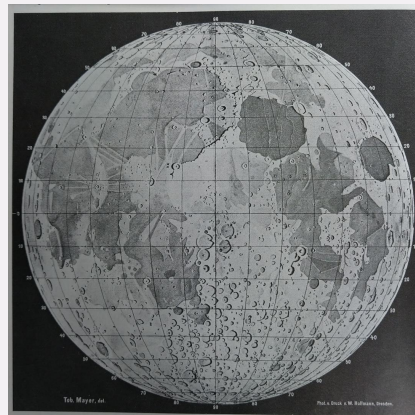
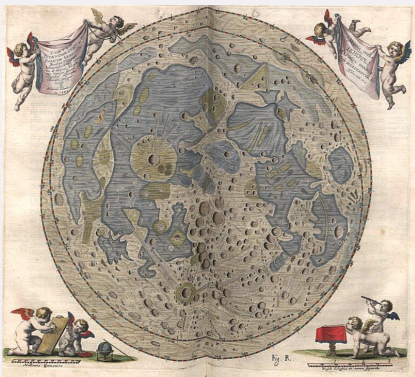
Key-- ⊙ Craterlet, ○ Craterpit, ⊕ Cratercone, ◊ Hillcock, — Clefts, = Ridges, ..... Light Streaks, ⚡ Dark Variable Spots.



Some mountains on the Moon were named after mountains on Earth in the 17th century. Astronomer Johannes Hevelius (1611–87) proposed that the geography of the Moon was similar to the Mediterranean and surrounding lands, and based his lunar names on that region. Some of Hevelius's names are still used: the **Apennines** on this sheet are named after mountains in Italy.

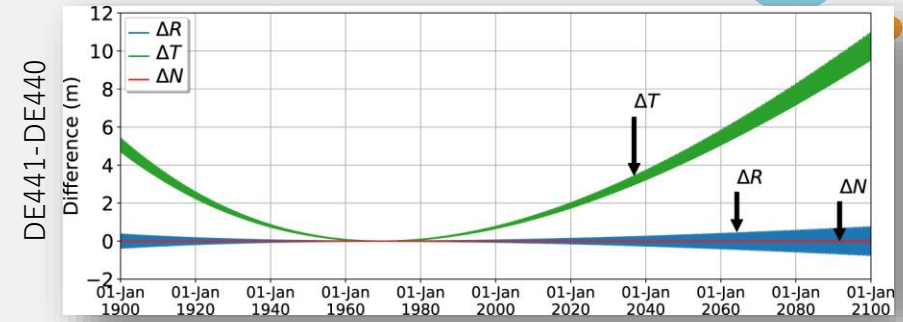
# Brief history of Selenodesy(Summary)

- 16世紀末～17世紀：肉眼→望遠鏡によるスケッチの時代、秤動の認識
- 18世紀～19世紀：マニリウスの位置観測で月経緯度が月面図に(T. Mayer 1750)
- 19世紀～20世紀：メスティングA位置観測(1835~37, Beer & Mädler)、月面図詳細化(～1960年代)、19c.後半から写真技術導入、写真測量による月面ネットワーク(～1980年代)
- 1969年～現在：月レーザ測距導入(LLR)、月惑星暦の高精度化、月探査機からの画像測量/高度計による月地形測量



# 月秤動の現状

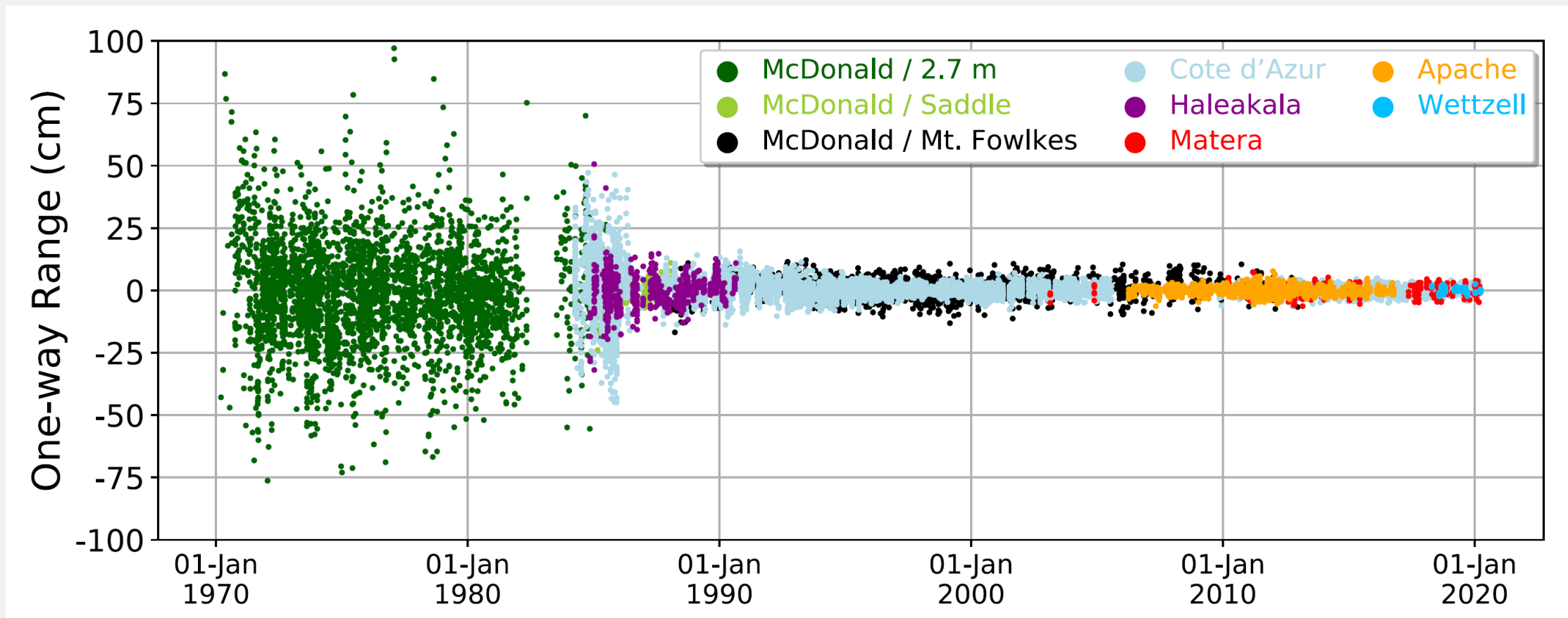
- 現在では月秤動は月レーザ測距(LLR)のデータをもとに暦計算で詳細に求められている。
- 暦内部の秤動精度は数m (下記参照)



- 現在世界で最も使用されているJPLのDE4\*\*暦では、月の秤動は幾何秤動と物理秤動をまとめて太陽系全体の力学系の一部としてLLRデータにフィットするように計算されている。月重力場係数はGrailの結果を使っている。
- 現在はDE440/441(Park et al., 2021)。DE440(for 1550~2650)は月内部のコア-マントルフリクションモデルを仮定しているが、モデルの不完全性を補うため月を弾性体と仮定したDE441(for -13200~17191)もある。軌道残差は2020年代では2~3m (上記グラフ)
- ME(Mean-Earth/mean pole)系とPA(Principal axis)系：
  1. ME系とPA系の差は距離にして約860m。
  2. ME系の方が一般的だが“平均”をどう取るかで不定性が残る (Folkner et al., 2014)。
  3. 変換行列の差：角度残差~0.1”強 (月面上で~1m、下記参照)  
Folkner et al., 2014, [PA(DE430)→ME(DE421)] Rx(-0.295”)Ry(-78.627”)Rz(-63.737”)  
Park et al., 2021, [PA(DE440)→ME(DE421)] Rx(-0.2785”)Ry(-78.6944”)Rz(-63.8526”)
- 以前はIAUのWG(WGCRRE)で太陽系天体の公転&自転運動を取りまとめていたが、最近20年では月については完全にJPLのDE暦に依拠している。(Archinal et al., 2018)

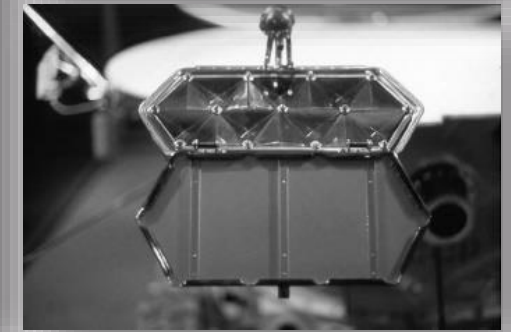
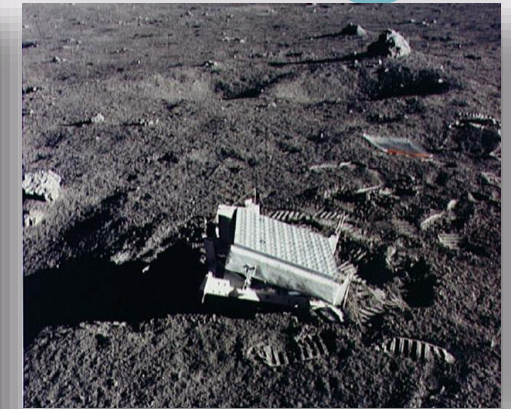
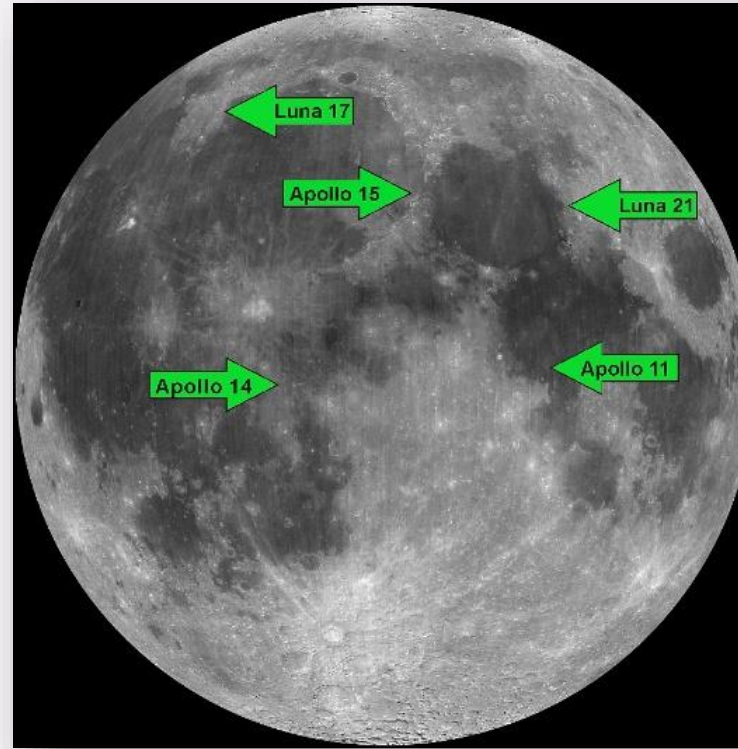
# LLR測距精度

最近ではDE440との残差は1.3cm



# LLR観測の現状

- LLR観測局：McDonald Obs. (米)
  - ★ OCA(CERGA) (仏)
  - ★ APO (米)
  - ★ Matera (伊)
  - ★ Wettzell (独)
  - MeO (South Africa)
  - Lick Obs. Crimea...
- 月面反射板：5カ所
- ダスト付着による反射効率の低下  
1/10~1/100 (満月) @A15 site, Murphy et al., 2010)



**Table 3**  
Observational Data for the Moon and Inner Planets

Body	Classification	Type	Observatory/Spacecraft	Span	Number
Moon	LLR	Range	McDonald 2.7 m	1970–1986	3440
			MLRS/saddle	1985–1989	275
			MRLS/Mt Fowlkes	1988–2014	2870
			Haleakala	1984–1991	694
			Observatoire de la Côte d'Azur	1984–2020	16425
			Matera	2003–2020	248
			Apache Point	2006–2017	2452

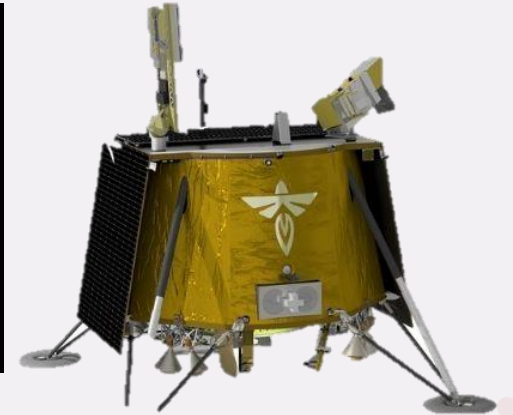
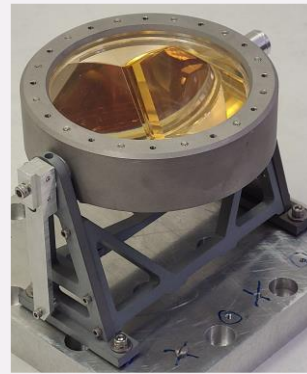
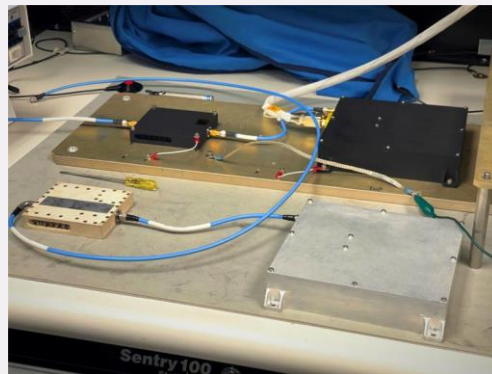
# LLR観測をめぐる最近の動き

- Commercial Lunar Payload Services (CLPS; 商業月面輸送サービス)
- NASAが民間企業に観測機器やローバーなどのペイロードの月への輸送を有償で委ねるサービスである。参加できる企業は米国の企業に限定されている (wikiより)。

## ➤ Dr. D. Currie

[https://www.optica.org/en-us/events/webinar/2023/04\\_april/the\\_birth\\_and\\_future\\_of\\_lunar\\_laser\\_ranging/](https://www.optica.org/en-us/events/webinar/2023/04_april/the_birth_and_future_of_lunar_laser_ranging/)

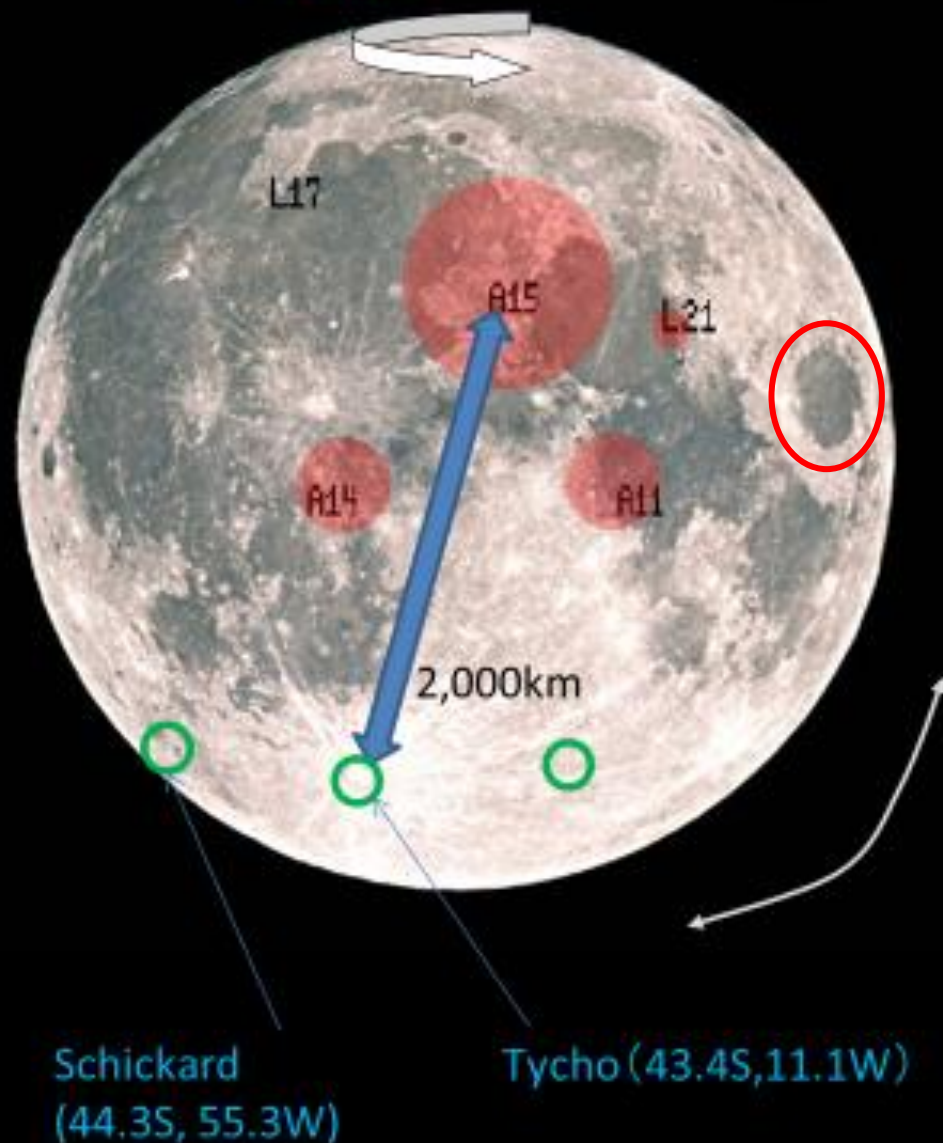
- ✓ Firefly Aerospace社
- ✓ Blue Ghost M1
- ✓ 2024年夏打上予定
- ✓ 危難の海に着陸
- ✓ NGLR-1設置  
(Firefly社納品済み)
- ✓ LuGRE (月面でのGNSS/Galileo受信実験) も同乗



<https://www.satcatalog.com/component/blue-ghost/>

# どこに設置すべきか？

● Area : Data Contribution (~77%)



## 物理秤動の消散項 →核の半径・状態

経度方向 (回転方向) [mas]

$$\Delta\tau (206) = -1.0 \pm 1.6$$

$$\Delta\tau (365) = 4.1 \pm 1.8$$

$$\Delta\tau (1095) = -26.7 \pm 5.9$$

緯度方向 [mas]

$$\Delta\sigma (27.6) = 7.5 \pm 1.0$$

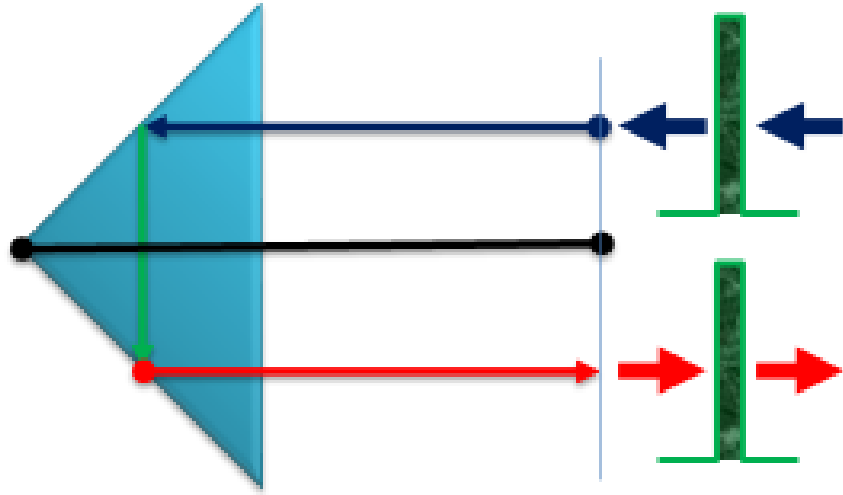
$$\Delta\sigma (\text{cnst}) = -264 \pm 5.0$$

(Williams et al., 2001)

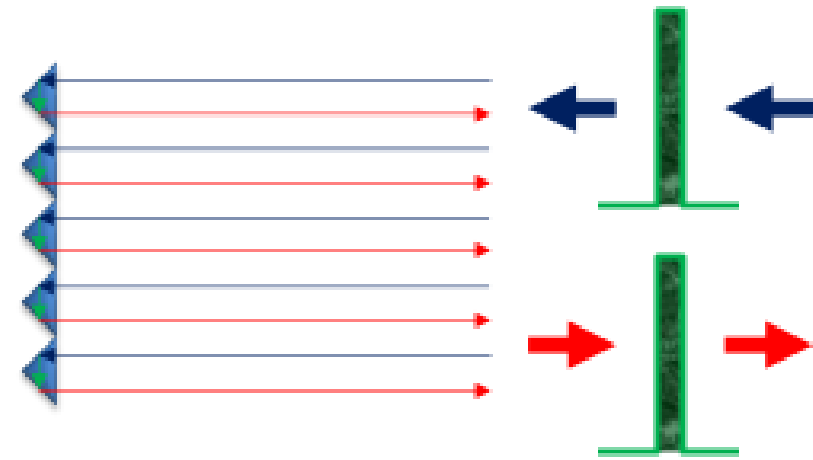
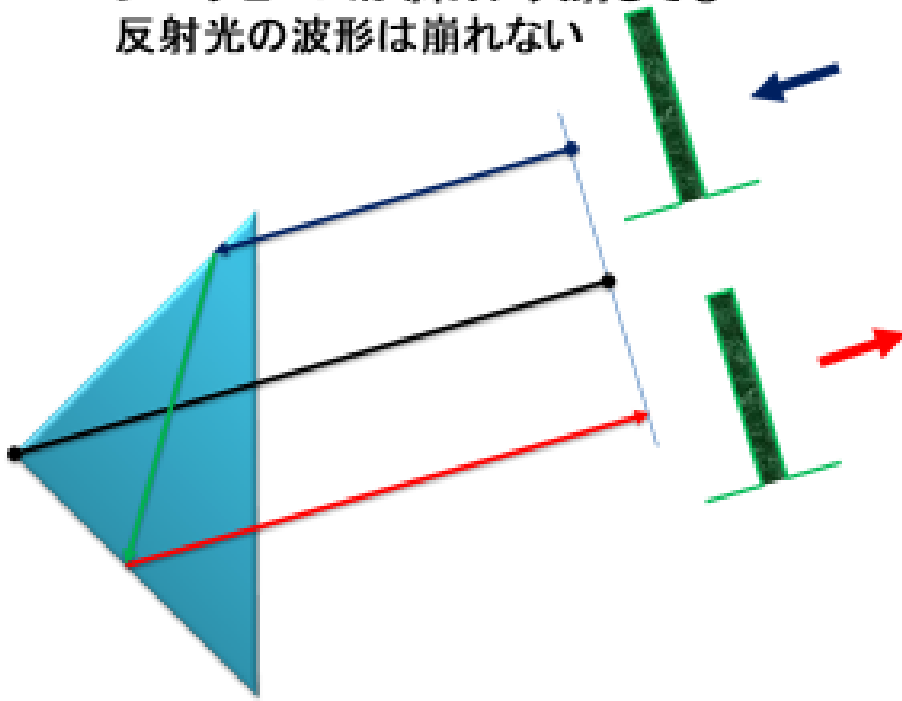
物理秤動決定のため:  
A15からなるべく離れた  
(約2000km)地点



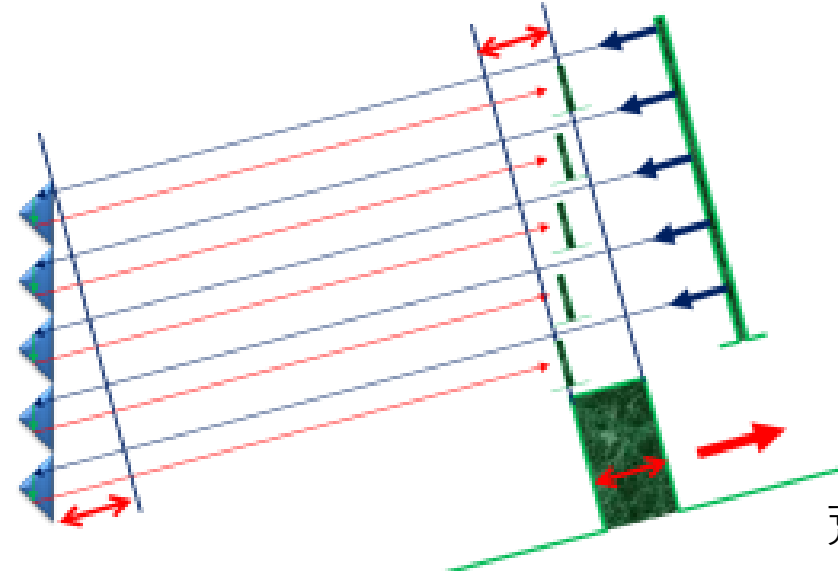
# タイプ： 単一素子か？アレイか？



単一素子： 性能的に有利  
レーザービームが斜めに入射しても  
反射光の波形は崩れない



アレイ： 性能的に不利  
レーザービームが斜めに入射すると  
反射光の波形は崩れる



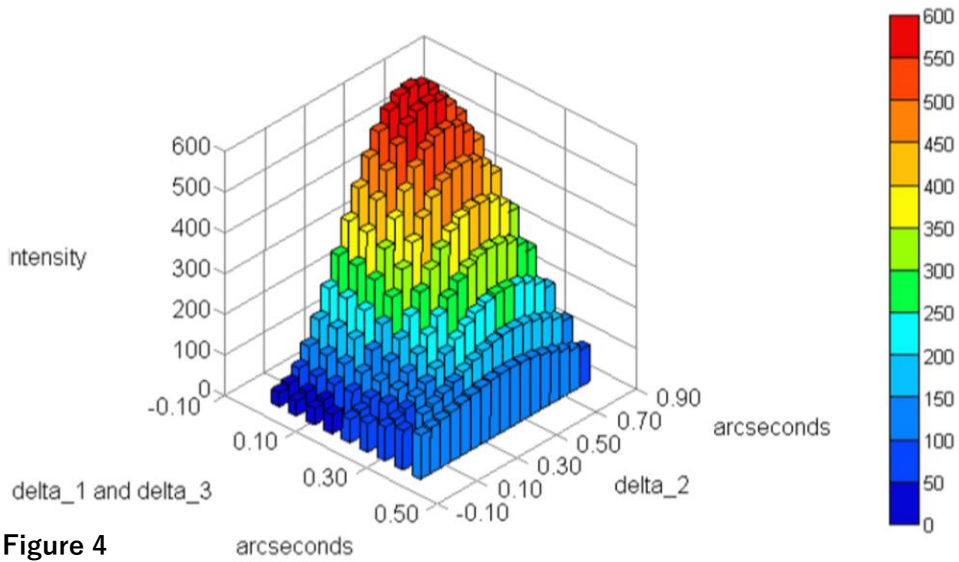
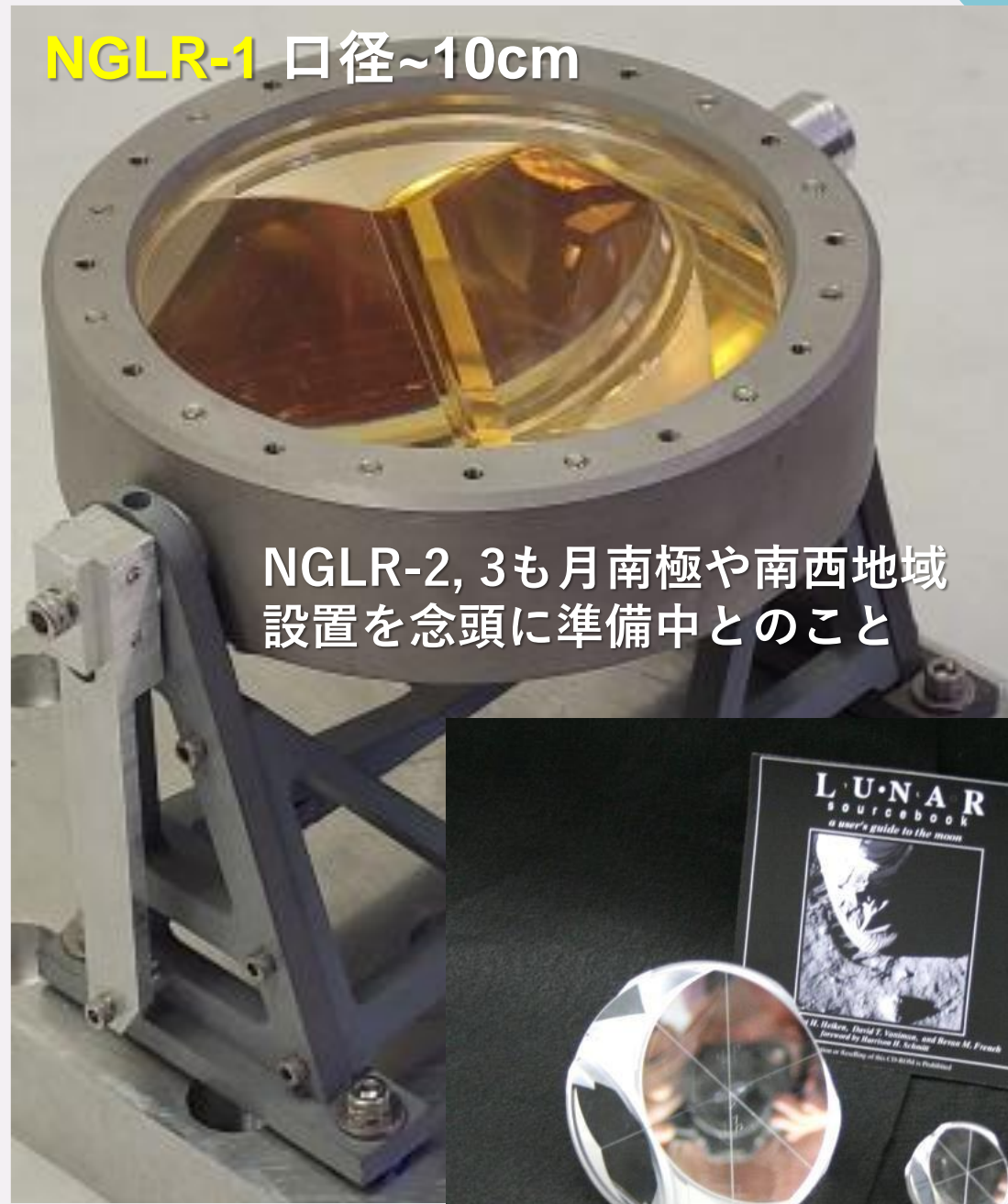


Figure 4

Table 1. Optimized performance of hollow retroreflector and dihedral angle offsets.

Aperture diameter (mm)	Optimum dihedral angle offset (arcseconds)	Optimum intensity ( $\times$ Apollo retroreflector)
60	(0.00, 0.00, 0.00)	12
80	(0.00, 0.25, 0.00)	22
100	(0.00, 0.80, 0.00)	40
120	(0.00, 0.80, 0.00)	88
140	(0.00, 0.75, 0.00)	171
160	(0.00, 0.70, 0.00)	292
180	(0.00, 0.65, 0.00)	436
200	(0.00, 0.65, 0.00)	599
250	(0.00, 0.65, 0.00)	1252

Otsubo et al., 2011



NGLR-2, 3も月南極や南西地域設置を念頭に準備中とのこと

# CCM熱変形検討

CCM: Corner Cube Mirror

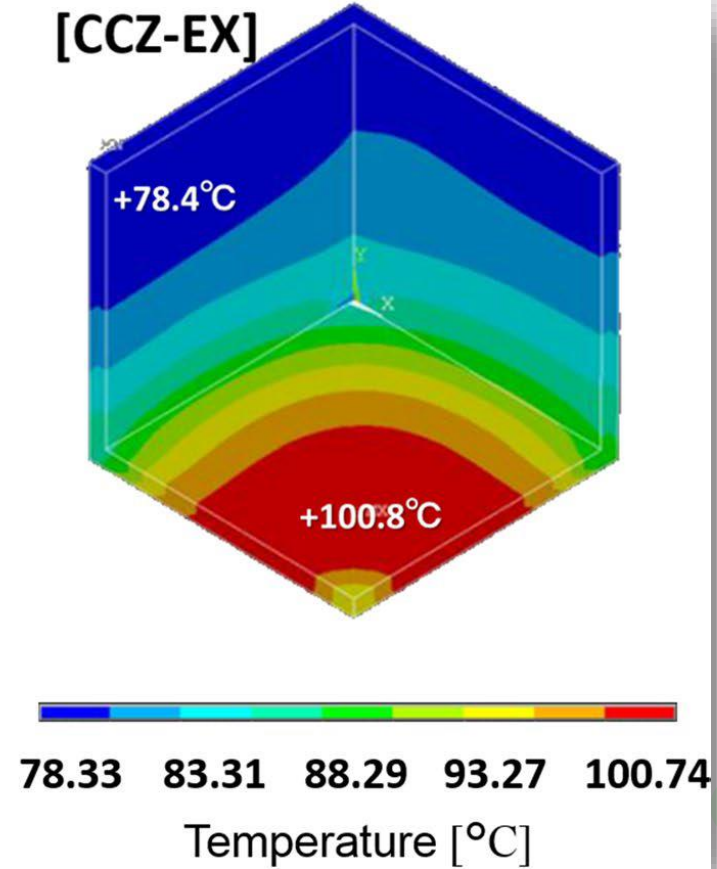
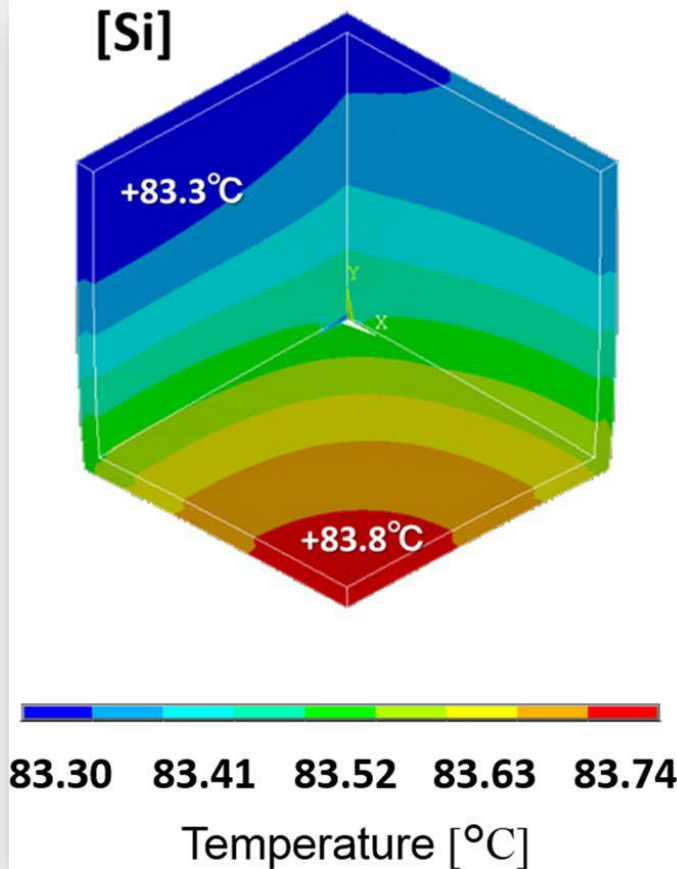
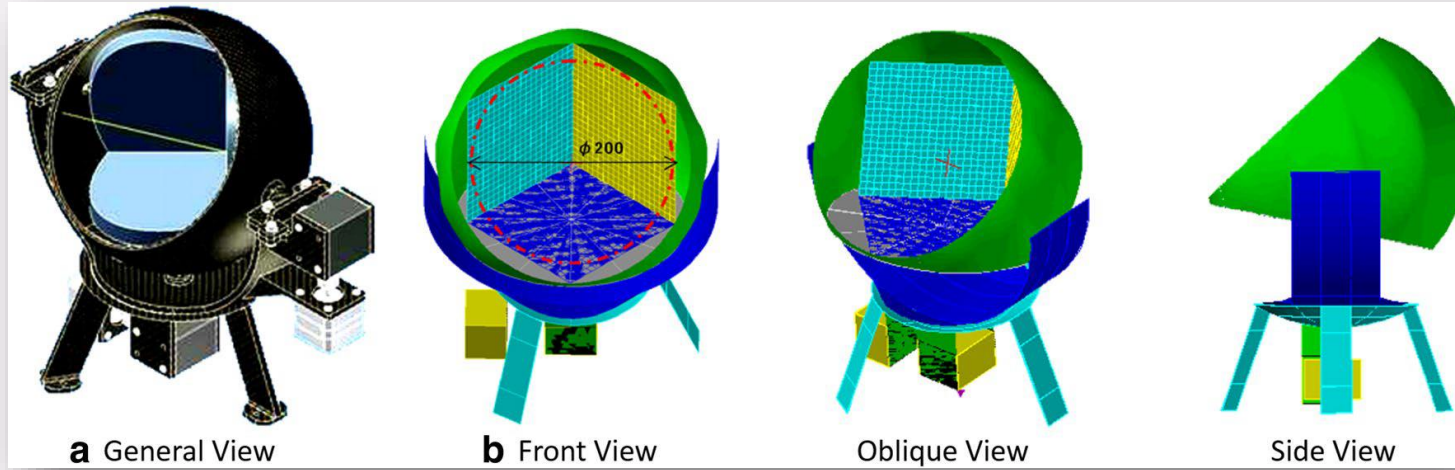
カバー：CFRP

口径：200mm

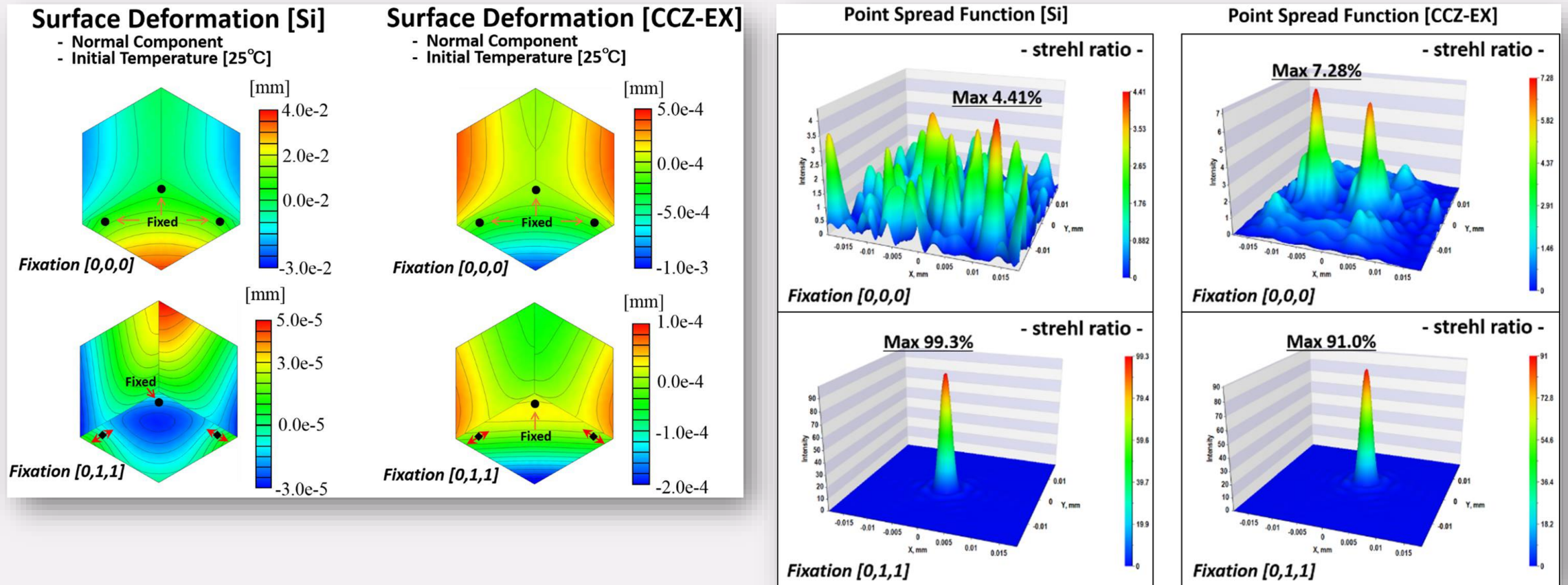
厚さ：10mm

銀コーティング

ティコクレーター内部  
太陽南中時  
Thermal Desktop



# CCMの熱光学的な検討結果

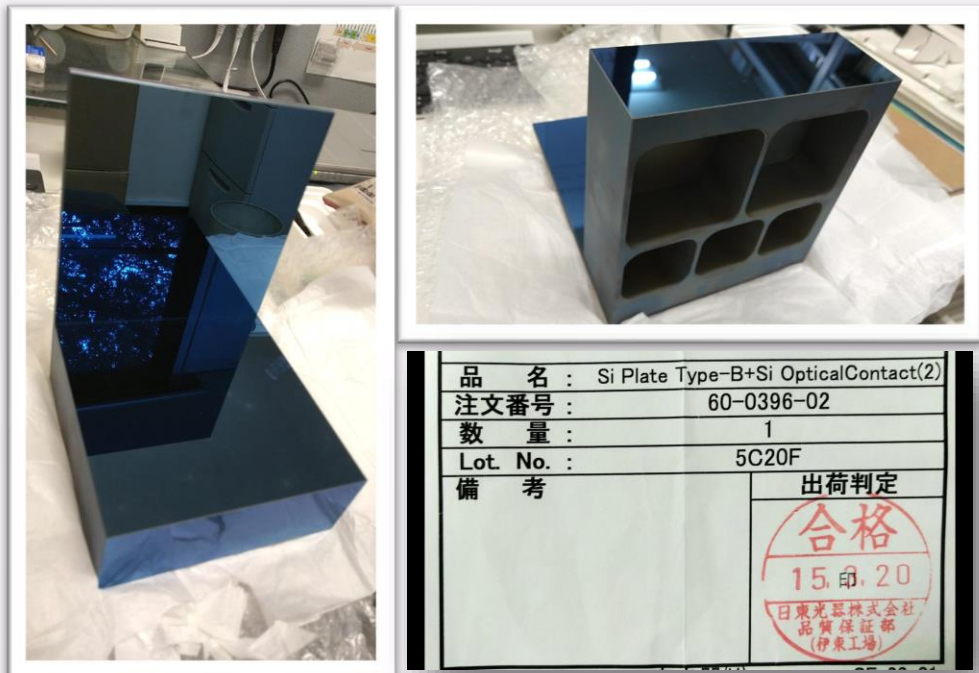


- 口径20cmでも単結晶シリコン(Si)やCCZ-EX® (OHARA)のような極低膨張率ガラスセラミックで作られたCCMは熱制御を施さなくても実用になる
- 成立性は材質にはあまりよらず、できるだけフリーな状態で支えることが重要

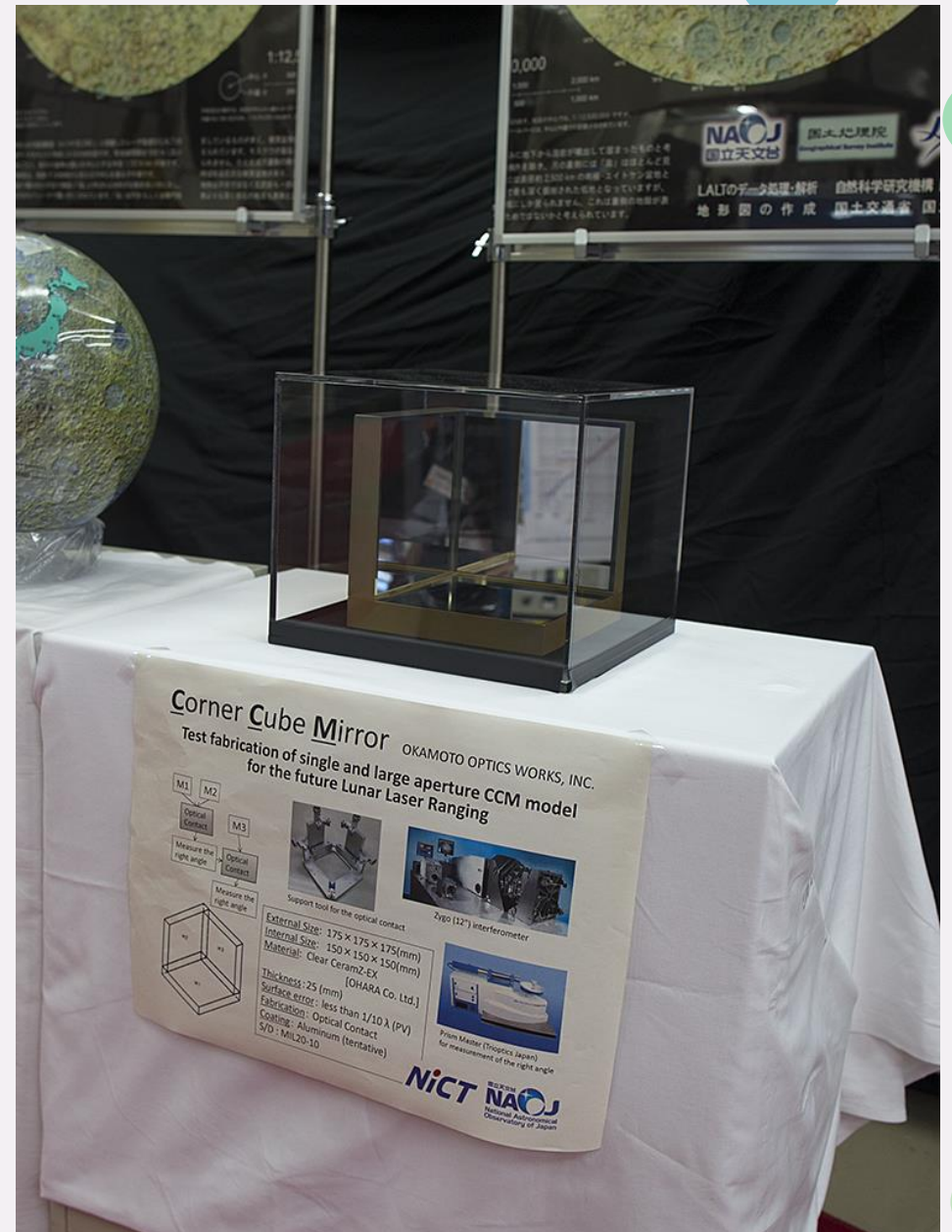
# CCMの製作検討

- 3面張り合わせ (Optical Contact)
  1. (株) オカモトオプティクス→最近技術完成とのこと
  2. 日東光器 (株)
- 3面研磨 Ion Beam Figuring (IBF)
 

瀧野教授(千葉工大)



Si板の光学接着： 日東光器 (株) (2015) 加熱試験で表面が酸化



3面鏡試作 (CCZ-EX) : (株) オカモトオプティクス, 18<sup>th</sup> IWLR (2013)

# 月全面における経緯度情報の精度

- CCRアレイの月面上の経緯度は数メートル以下の精度で決められているとしてよさそうだが、他の地点では？ → 主に軌道誤差による
- LOLAの測距点軌道の精度評価：TC-DTM(KAGUYA)との比較↓  
 (測距点軌道のfit残差：表側7~8m、裏側11~12m、表側の方が良い (軌道精度の反映) )

	Original LOLA frame	New LOLA frame	All available
Distance	[m]	[m]	[m]
Apollo 11	9.10	7.53	6.65
Apollo 14	7.83	7.15	6.63
Lunokhod 2	7.90	9.92	11.27

Table 3. The horizontal distances in meters between the LRRR in the NAC DTM and the observed coordinates through lunar laser ranging.

NAC-DTM内の月面反射板位置データとLLRによる月面反射板の位置の比較  
 A11, 14 : 6~7m    L2 : 11~12m

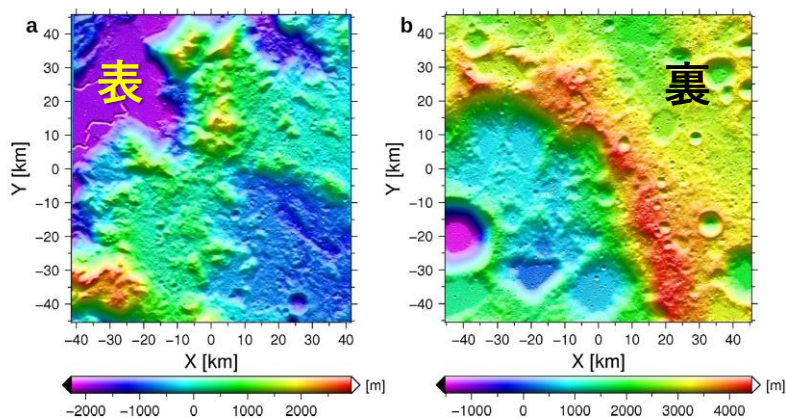
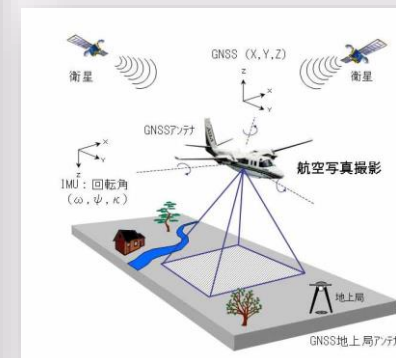


Figure 3. The TC DTMs have a resolution of 10 m/pixel and are shown in local stereographic projection. (a) Near side: DTM is centered at  $4.5^\circ$  longitude and  $25.5^\circ$  latitude with the Apollo 15 landing site in the upper left corner. (b) Far side: DTM is centered at  $181.5^\circ$  longitude and  $-1.5^\circ$  latitude.

	Original LOLA frame	New LOLA frame	All available	
表	TC1	[m]	[m]	
	$\sigma_x$	9.30	7.67	7.83
	$\sigma_y$	6.26	5.96	6.67
	$\sigma_h$	1.08	1.14	1.09
裏	TC2	[m]	[m]	
	$\sigma_x$	13.19	12.89	11.98
	$\sigma_y$	10.88	11.09	10.77
	$\sigma_h$	0.44	0.45	0.50

Table 2. Standard deviations of residual displacements of the original LOLA frame (left), the new LOLA frame (middle) and all available LOLA tracks (right) for the near and far side reference DTMs TC1 and TC2. Values are given in meters in local stereographic map coordinates  $x$ ,  $y$  and height  $h$ .

絶対位置：約10m  
 位置残差：約10m



# まとめ

- 16cから月探査時代に至るまでの月面観測と月測地学の進展について簡単な紹介。
- 月の秤動（幾何秤動、物理秤動）の決定→月面経緯度原点の決定。現在ではLLRデータをベースに月の軌道・自転（太陽系全体の力学の一部）の推算で求められている。精度は数m。
- さらに月面上の任意の地点に経緯度情報を展開するには「探査機 + 高度計測 or 写真測量」が必要。
- 現状ではバイアス成分（絶対位置）、ランダム成分（位置残差）それぞれ10m程度か
- LLR観測は50年の歴史を持つが、今も月面上の反射板の精度改良や新規設置の検討（特に月極域や周辺部）が進められている。

ご清聴  
ありがとうございました

