

## 次期月探査計画SELENE-2での 月レーザー測距

野田寛大(NAOJ水沢)  
月光検討会

thanks to:

渡部潤一(三鷹)、高遠徳尚、大屋真(ハワイ)、沖田喜一(岡山)  
J. Williams, H. Hemmati, K. Wilson, S. Turyshev (JPL) の各氏

1

## 「月光検討会」主な参加者

佐々木晶 花田英夫 荒木博志 田澤誠一  
原田雄司 野田寛大(NAOJ水沢RISE)  
片山真人(NAOJ三鷹) 國森裕生(NICT)  
大坪俊通(一橋大) 沖田喜一(NAOJ岡山)

(+メーカ適宜参加)

LLR PI 野田寛大 サブPI 國森裕生

2

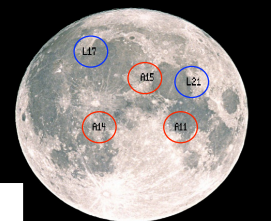
## 要旨

- SELENE-2(2016): 秤動による誤差が少ない逆反射板を搭載し月着陸、月の内部構造制約
- レーザ地上局は世界で3局+α、減少傾向、日本は実績がない
- 国内で実施する場合、岡山(西播磨)?
- レーザアップリンクでAO利用(オプション)

3

## Lunar Laser Ranging

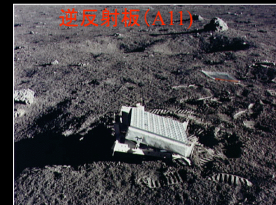
Laser Ranges between observatories on the Earth and retroreflectors on the Moon started by Apollo in 1969 and continue to the present



4 reflectors are ranged:  
Apollo 11, 14 & 15 sites  
Lunakhod 2 Rover



LLR attained the accuracy of less than 3cm with observations for longer than 25 years.



## 月レーザー測距 現状

- 惑星暦(DE421等)の構築・月内部構造推定(JPL) 相対論検証
- 40年間の観測、精度の向上(数10cm→1cm) 次頁
- A15地点が8割、L21は数%
- 逆反射板の経年劣化(L21、dustまたは熱変形?) (J. Williams, 私信)
- アパッチポイント3.5mで観測開始(2005~)、最高精度(最高光子数)
- 予算の都合でMcDonald局が来年終了、APO+OCAのみに (J. Williams, 私信)

5

## Appendix B. Measurement Residual Plots

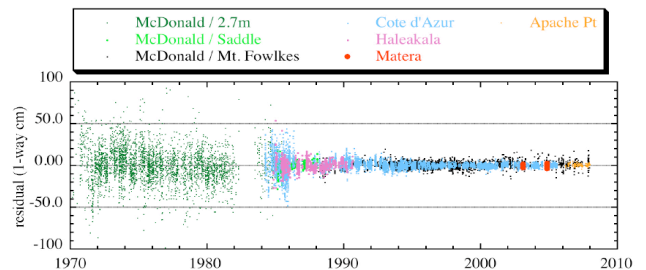


Figure B-1: Lunar laser ranging residuals.

(Folkner et al., 2008 memo IOM)

6

## 月レーザー測距 現状

- 惑星暦 (DE421等) の構築・月内部構造推定 (JPL) 相対論検証
- 40年間の観測、精度の向上 (数10cm→1cm)
- A15地点が8割、L21は数%
- 逆反射板の経年劣化 (L21, dustまたは熱変形?) (J. Williams, 私信)
- アパッチポイント3.5mで観測開始 (2005~)、最高精度 (最高光子数)
- 予算の都合でMcDonald局が来年終了、APO+OCAのみに (J. Williams, 私信)

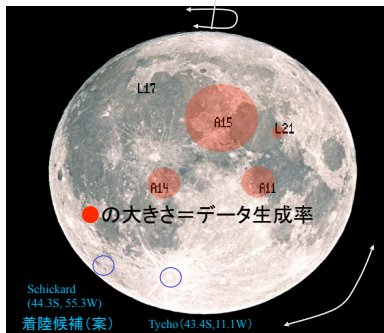
7

## SELENE-2 LLRの新しい点

- Apollo, Lunokhodから遠い地点に設置
- 反射板を単一鏡にすることにより測距の高精度化
- 国内にLLR可能な地上局を設置
- (オプション) アップリンクに補償光学  
→光子数を稼いで測距精度向上  
→光通信実証

8

## 物理秤動の消散項→核半径、状態



$\Delta\tau$  (206) =  $-1.0 \pm 1.6$   
 $\Delta\tau$  (365) =  $4.1 \pm 1.8$   
 $\Delta\tau$  (1095) =  $-26.7 \pm 5.9$   
 経度 (回転) 方向 [mas]

$\Delta I\sigma$  (27.6) =  $7.5 \pm 1.0$   
 $\Delta I\sigma$  (cnst) =  $-264 \pm 5.0$   
 緯度方向 [mas]

i) 既存板 (A15など) から離して設置、ii) 単一鏡により測距精度向上

図文を参照

A15地点の2000km南 (45°S)  
 1mas = 1cm (視線方向距離の差分)

9

## 反射板の検討状況 CCRのアレイ化によるパルス拡がり

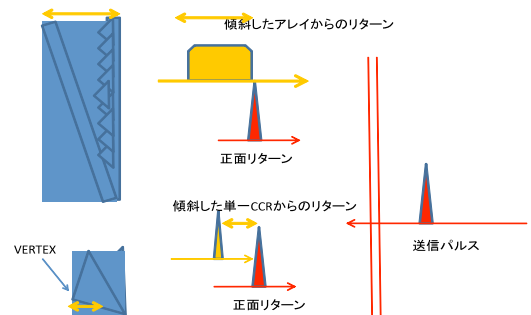


図 アレイ化CCRと単一CCRの正面および斜め入射の場合のリターンパルスの性質 (イメージ図)

10

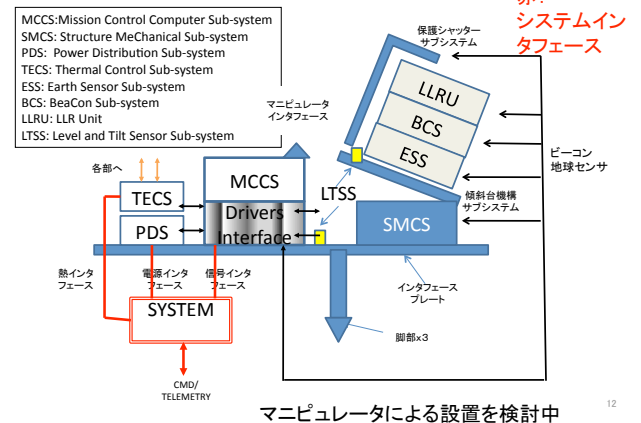
## 反射板の検討状況

Type	宇宙実績	利点	欠点	写真
プリズムアレイ型	Apollo計画ほか。	実績がある。日本製でAstro-Gの設計がある。	月の秤動による誤差が避けられない。アレイ個数が増えると質量、面積が増大	
プリズム単一要素型	-	反射パルスが広がらないため測距精度が高い。一個でも同じ質量のアレイよりリターンが大きい。	熱、重力により面積度、角度屈折率一様性が大型で保てるか製造上の限界。	
中空一大口径単一要素型	ADEOS-RIS (右図)	同上に加えて、さらに質量対反射能力有利。周年軌道で実績がある。	同上。	

トレードオフ実施中

11

## サブシステム構成 (案)



マンニピュラータによる設置を検討中

12

## 問題点: 地上局をどうするか

理想:

1. 高晴天率
2. 大気揺らぎ小
3. より大きい望遠鏡
4. 高レーザ出力
5. インフラ有
6. 南半球がより良い(既存局は北半球、可視時間)

...が、そもそも観測局がなくなると困る(APO+OCA)

13

## 既存局パラメタ

局、 標高m	望遠鏡 [m]	パワー	パルス幅	送光波長[nm]、繰返 周期[Hz]	受光部
McDonald (米) 2006m	0.76	1500mJ	200ps	532 Nd:YAG 10Hz	MCP
OCA (仏) 1323m	1.5	200mJ	300ps	532 Nd:YAG 10Hz	APD
APOLLO (米) 2788m	3.5	115mJ	<100ps	532 Nd:YAG 20Hz	APD array
Matera (伊) 536.9m	1.5				
Wetzell (独) 6 65m	0.75	180mJ	50ps	532 Nd:YAG 10Hz	APD, MCP

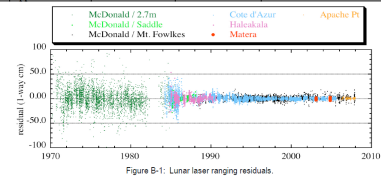


Figure B-1: Lunar laser ranging residuals.

14

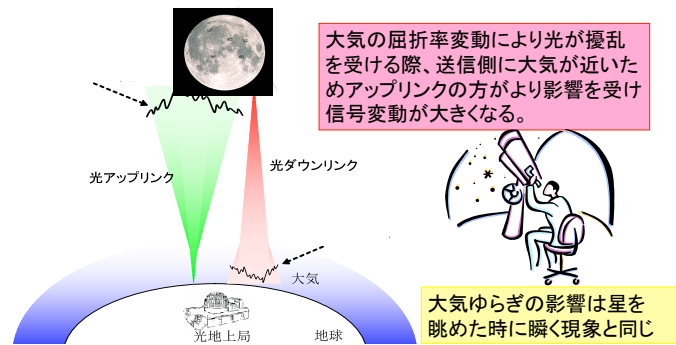
## 問題点: 地上局をどうするか

- 理想: 高晴天率、大気揺らぎ小、より大きい望遠鏡、高レーザ出力、南半球がより良い(可視時間)、インフラ有
  - 現実解は?
1. 海外の既存局(APO)におまかせ (観測中止時?)
  2. 国外の望遠鏡に外付け (ハワイ、南米)
  3. 国内の " (岡山、西はりま)
  4. 望遠鏡新設、建物は既存@岡山(太陽クーデ跡地)
  5. 建物から新設@岡山
  6. 観測所自体を新設@どこか

... 現在 情報を収集中です

15

## AOの必要性: アップリンクとダウンリンクへの大気揺らぎの影響



Starfire Optical RangeでAOを使った実験あり(Wilson et al., 1997)

16

TDA Progress Report 42-131

## Results of the Compensated Earth-Moon-Earth Retroreflector Laser Link (CEMERLL) Experiment

K. E. Wilson  
Communications Systems and Research Section  
P. R. Leatherman, R. Cleis, J. Spinhirne, and R. G. Fugate  
Air Force Laboratory, Kirtland Air Force Base, New Mexico

Adaptive optics techniques can be used to realize a robust low bit-error-rate link by mitigating the atmosphere-induced signal fades in optical communications links between ground-based transmitters and deep-space probes. Phase I of the Compensated Earth-Moon-Earth Retroreflector Laser Link (CEMERLL) experiment demonstrated the first propagation of an atmosphere-compensated laser beam to the lunar retroreflectors. A 1.06- $\mu\text{m}$  Nd:YAG laser beam was propagated through the full aperture of the 1.5-m telescope at the Starfire Optical Range (SOR), Kirtland Air Force Base, New Mexico, to the Apollo 15 retroreflector array at Hadley Rille. Laser guide-star adaptive optics were used to compensate turbulence-induced aberrations across the transmitter's 1.5-m aperture. A 3.5-m telescope, also located at the SOR, was used as a receiver for detecting the return signals. JPL-supplied Chebyshev polynomials of the retroreflector locations were used to develop tracking algorithms for the telescopes. At times we observed in excess of 100 photons returned from a single pulse when the outgoing beam from the 1.5-m telescope was corrected by the adaptive optics system. No returns were detected when the outgoing beam was uncompensated. The experiment was conducted from March through September 1994, during the first or last quarter of the Moon.

1 $\mu\text{m}$ レーザのRayleigh散乱光を使ってAOを掛ける試験を実施

17

## まとめ

- 次期月探査SELENE-2計画(2016頃): 秤動による誤差が少ない逆反射板を搭載
- 地上局は世界で3局+ $\alpha$ 、減少傾向、かつ日本は実績がない
- 国内で実施する場合、岡山か西はりま?
- レーザアップリンクにAO利用(オプション検討)
- いろいろと調査中
- ご意見・参加希望は [noda@miz.nao.ac.jp](mailto:noda@miz.nao.ac.jp)まで

18