

岡山（光赤外）ユーザーズミーティング
平成22年8月17日, 国立天文台、三鷹

月着陸探査SELENE-2の 月レーザ測距(LLR)計画 [検討状況報告]

荒木博志、RISE月探査プロジェクト

LUNAR LASER RANGING SCIENCE Modified from Gusev 2010

Lunar Laser Ranging Lunar laser ranging (LLR) for 40 year

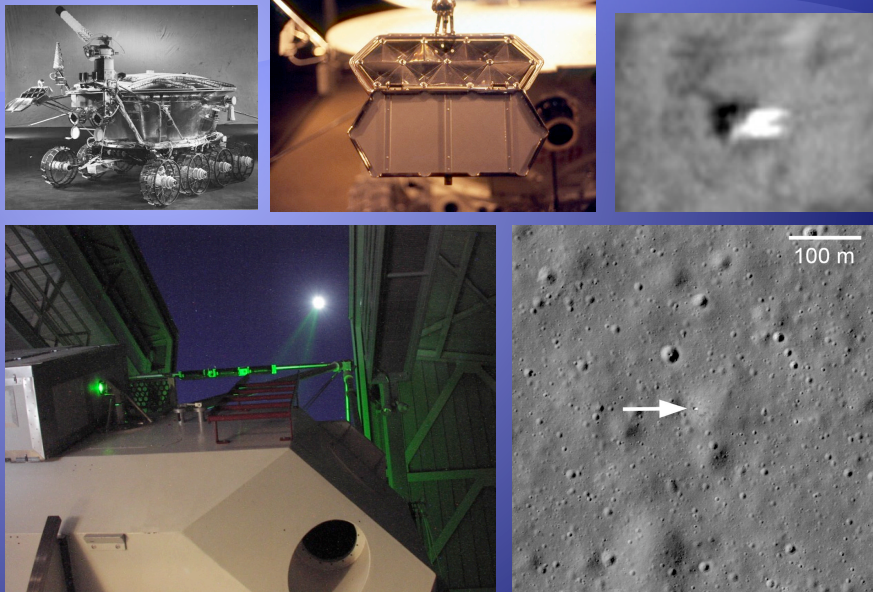
Laser Ranges between observatories on the Earth and retroreflectors on the Moon started by Apollo in 1969 and continue to the present

McDonald 2.7 m

- 5 reflectors are ranged:
 - Apollo 11, 14 & 15 sites
 - Lunokhod 1 & 2 Rover
- Historically LLR conducted primarily from 3 observatories
 - [McDonald \(Texas, USA\)](#)
 - [OCA \(Grasse, France\)](#)
 - Haleakala (Hawaii, USA)
- New LLR stations:
 - [Apache Point \(NM, USA\)](#)
 - Matera (Matera, Italy)
 - South Africa, former OCA LLR equipment

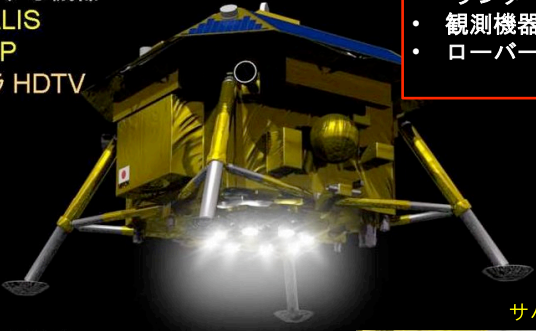
Retro-reflector (A11)

ルナ17号 ルノホート1 の反射光の検出 (2010.04.22)



LLRの3要素

- ◆ 月面反射体： Apollo 11, 14, 15; Luna 17, 21
- ◆ 地上観測施設： NICTのSLR施設(1.5m)
- ◆ 解析ソフトウェア： 野田氏(NAOJ)がJPLで調査中（9月まで）。



着陸機搭載観測機器候補
 ～着陸機上に搭載する機器～

- ・眺望分光カメラ ALIS
- ・統合分析装置 SIP
- ・ハイビジョンカメラ HDTV

SELENE-2 (2016)

- ◆着陸船, ローバー, オービタ
- ・ランダー: ～1000kg
- ・観測機器: ～100kg
- ・ローバー: ～100kg

～月面上に設置する機器～

- ・広帯域地震計 LBSS
- ・表面地殻熱流量観測 HFP
- ・月電磁探査装置 LEMS
- ・逆VLBI用電波源 iVLBI
- ・レーザ測距用リフレクタ LLR
- ・レゴリスダスト計測器(仮称)
- ・月面地盤調査装置 LMS

サバイバルモジュール



月面探査ロボット、地震計設置

・月面設置機器は、ローバーによって設置するか、着陸機のアームで設置するかをトレードオフ中
 ・越冬が必要な機器は、断熱テントを展開して2週間の夜を保温

LLR検討グループ

- 【NAOJ水沢】野田寛大(PI)、荒木博志、
 佐々木晶、田澤誠一、鶴田誠逸、花田英夫、
 松本晃治、P D
- 【NAOJ情セ】片山真人、渡部潤一
- 【NAOJハワイ】高遠徳尚、大屋真
- 【NAOJ岡山】沖田喜一
- 【NICT】國森裕生 (Sub-PI)、細川瑞彦
- 【一橋大】大坪俊通
- 【月光検討会】

LLRのサイエンス

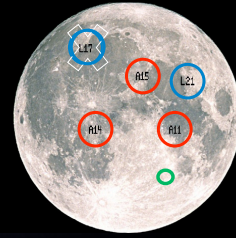
- ◆ 天体力学座標系・月公転運動（暦）
- ◆ 一般相対性理論検証
- ◆ 地球自転、地球潮汐
- ◆ 月自転、月潮汐→月内部構造

◆地上局の整備計画案（既存のSLR局を利用）

- ◆ 計画概要：
NICT小金井のSLR観測局のレーザ出力を強化して既存の LLR反射体からのリターン光を検出・記録を行う。LLR観測が可能であることを実証した段階で、高精度LLR受信システムの開発を行い、LLRの定常観測につなげる。
- ◆ 実験・運用計画：

2010	設計、一部部品準備
2011	製作
2011-13	月面照射試験
2014-15	改良
2016	着陸時確認観測（チェックアウト）

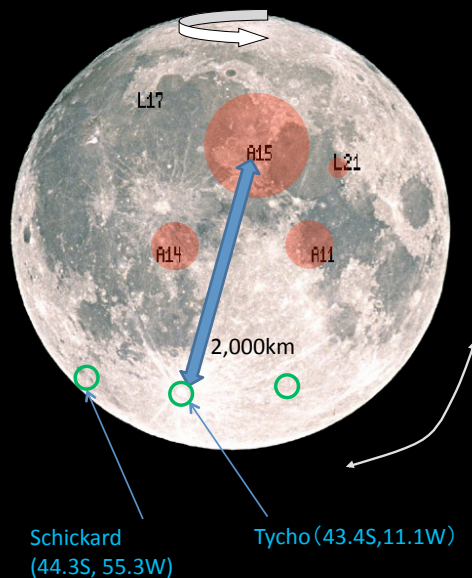
SELENE-2搭載 新規LLR反射体 (CCR)



- ◆ 設置場所：どこに設置すべきか？
- ◆ タイプ：単一素子かアレイか？；プリズムかホローか？
- ◆ 大きさ：アポロ11, 15よりも効率の高いもの
- ◆ 構造：反射体の耐衝撃性、熱変形、重力変形
- ◆ 光学性能：Code-Vによる検討
- ◆ Dihedral Angle Offset：Otsubo *et al.*, 2010

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]

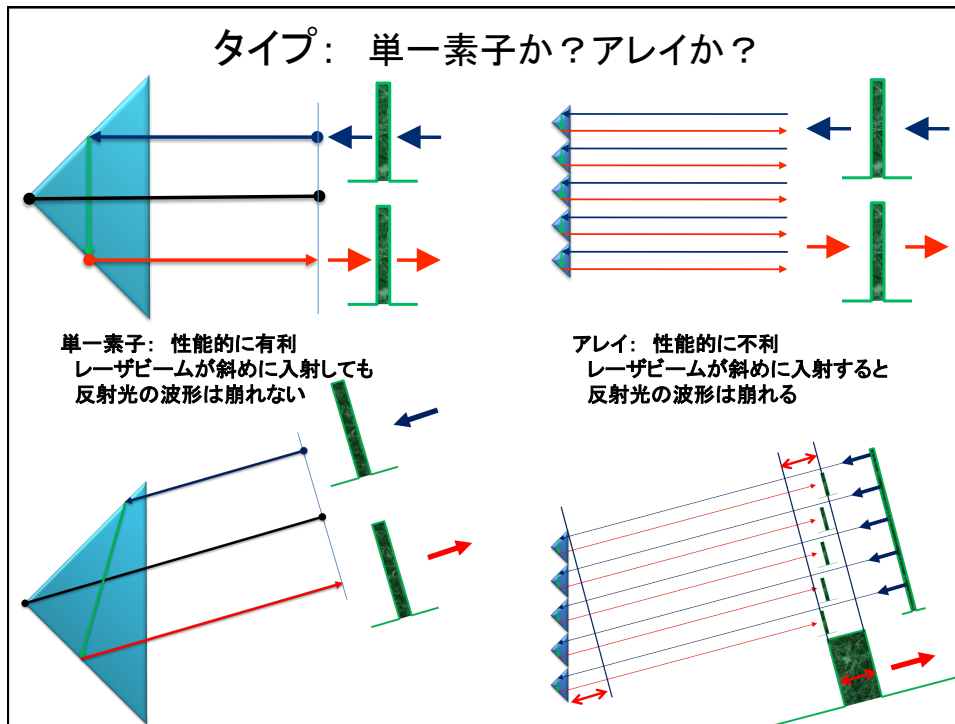
$$\begin{aligned}\Delta\tau (206) &= -1.0 \pm 1.6 \\ \Delta\tau (365) &= 4.1 \pm 1.8 \\ \Delta\tau (1095) &= -26.7 \pm 5.9\end{aligned}$$

緯度方向 [mas]

$$\begin{aligned}\Delta I\sigma (27.6) &= 7.5 \pm 1.0 \\ \Delta I\sigma (\text{cnst}) &= -264 \pm 5.0\end{aligned}$$

(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

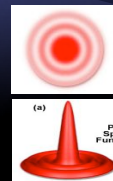


大きさ：アポロ11, 15を上回る反射効率

◆ 光学断面積:

σ_{cc} : Optical Cross Section
 ρ : Reflectivity
 A_{cc} : CCR Aperture Area
 λ : Wavelength
 n : ~ 3 (taking into account Earth-Moon "aberration")
 4 (relative velocity = 0)

$$\sigma_{cc} = \frac{4\pi\rho A_{cc}^n}{\lambda^2}$$



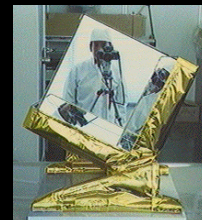
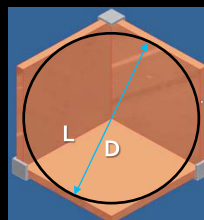
◆ CCR等価断面積

- ◆ A11 アレイ : D=17.64cm
(L=12.5 cm)

$$100 \cdot \sigma_{cc}(D=3.8\text{cm}) = \sigma_{cc}(D=17.64\text{cm})$$

- ◆ A15 アレイ : D=25.44cm
(L=18.0 cm)

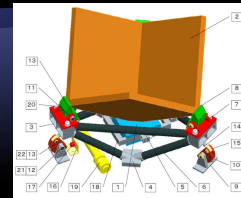
$$300 \cdot \sigma_{cc}(D=3.8\text{cm}) = \sigma_{cc}(D=25.44\text{cm})$$



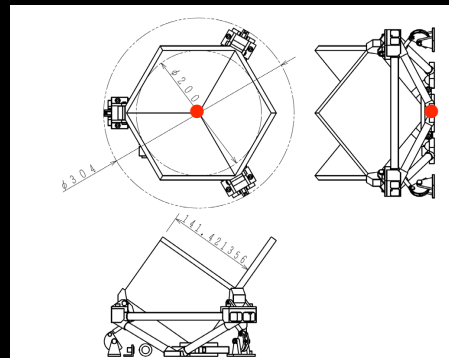
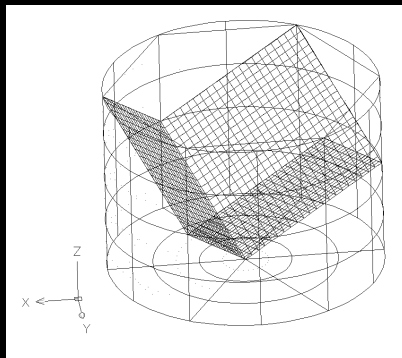
「みどり」搭載のCCR, JAXA

構造

- ◆ CCR周囲をMLIで覆う
- ◆ 支持機構
 - ・ 頂点の一点支持
 - ・ ロンチロックシステム



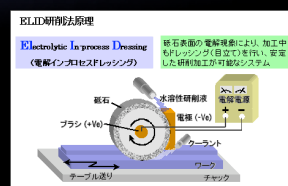
NEC, 2010



CCRの製作方法：「ELIDと電鋳法」

- ◆ **ELID と 電鋳(Electroforming)** : 大森研究室, 理研

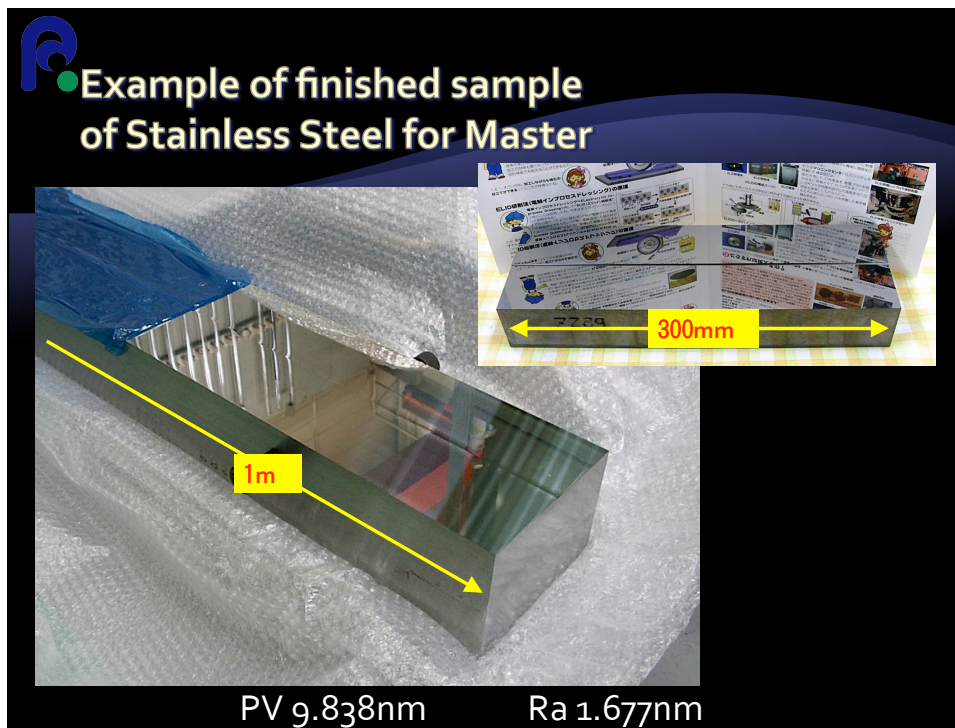
- ・ **ELID (Electrolytic Inprocess Dressing)**
CCRの型を作製するため
工作精度: ± 10 nm以下 が可能



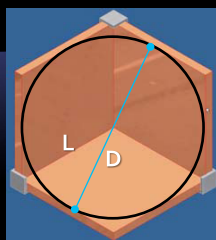
<http://www.jst.go.jp/pr/info/infog6/zu1.html>

- ・ **電鋳法 [電気分解]**
銅製の一体型構造
- ・ 銅の電鋳について検討・試験開始
- ・ 予算のめどが立てば試験製作へ



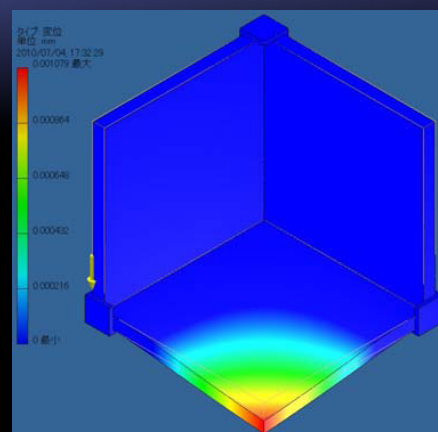


構造： 反射体(CCR)の重力変形



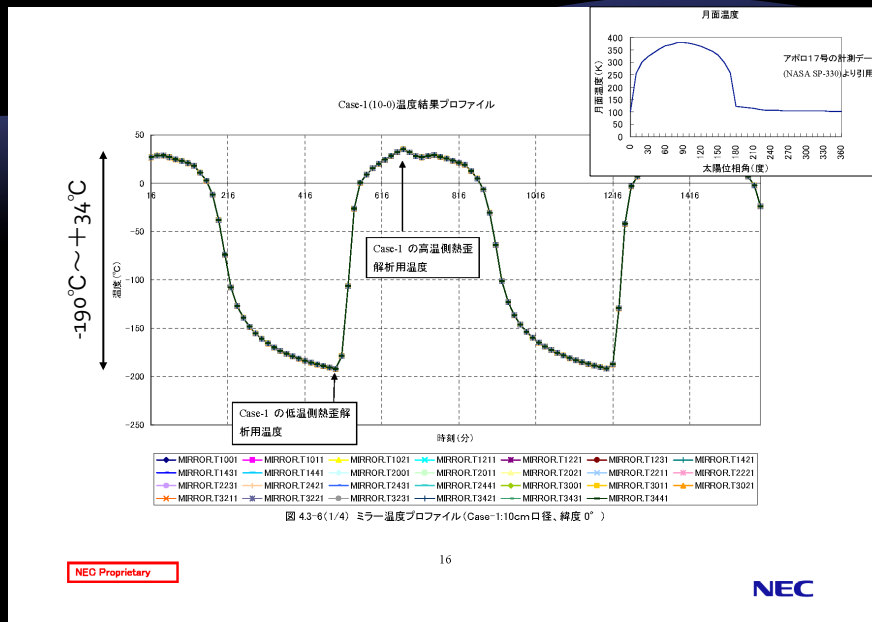
$D=20\text{ cm}$ ($L = 14.14\text{ cm}$),
 $t = 1\text{ cm}$, "Cu"

変形: $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下 (地球重力場)

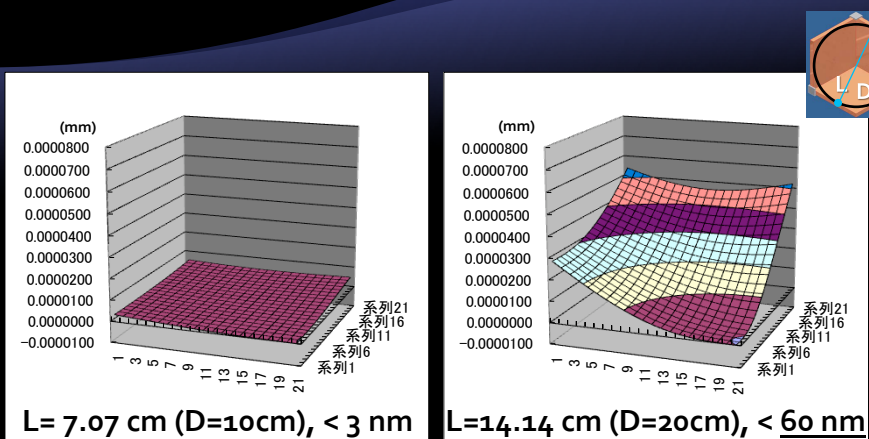


谷口, 2010

構造： 反射体の耐衝撃性、熱変形(1)



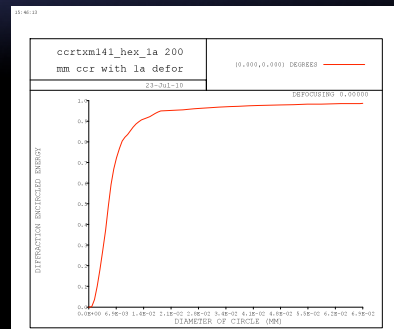
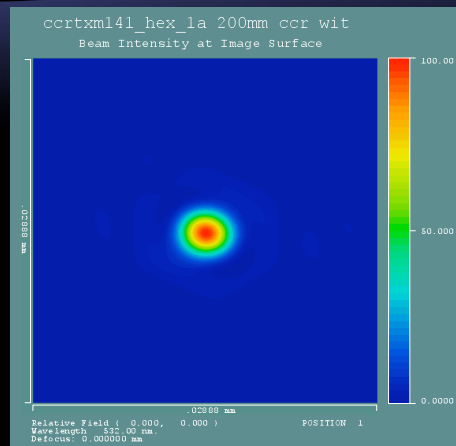
構造： 反射体の耐衝撃性、熱変形(1)



NEC, 2010

光学性能：Code-Vによる

$L=14.14$ cm ($D=20$ cm), < 60 nm



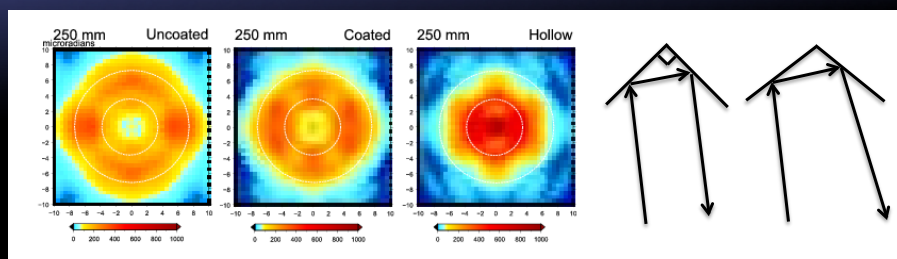
Strehl Ratio : 95.8 %

鹿島, 2010

Dihedral Angle Offset : Otsubo *et al.*, 2010



- Cancellation of Earth-Moon aberration
- Deform the diffraction pattern of the reflected laser beam



0.25" dihedral angle

Dihedral Angle Offset

- Optimal dihedral angle for large retro
 $0.20 - 0.25''$ (prism)
 $0.35''$ (hollow) [~ 300 nm for $L=14$ cm]

まとめ

■ SELENE-2による月面新反射体の検討

- ◆ 設置地点：A15から2000km離れている所, 南半球
 - ◆ 方式：単一素子 and ミラー3面型
 - ◆ サイズ：D=17.64cm (A11) ないし D=25.44cm (A15)
 - ◆ 構造：銅; ELID 及び電鍍法; 一点支持機構,
MLIの覆い, ロンチロックシステム
→変形(D=20cm, t=1cm): 60nm(熱変形), ~100nm?(月重力変形)
 - ◆ 光学性能：熱変形の影響は小さくできる
 - ◆ Dihedral Angle Offset：~300nm (0.35" ホロ一型; D=20cm)
 - ◆ 能動光学：検討中
- 野田氏が現在JPLのWilliams氏のサポートを得て、解析ソフトの調査及び日本への導入を進めている。9月に帰国後1-2年をめどに開発を開始する。
- 地上観測局については、NICT小金井のSLR局（口径1.5m）改修を開始し、LLR観測の実証試験を目指している。