

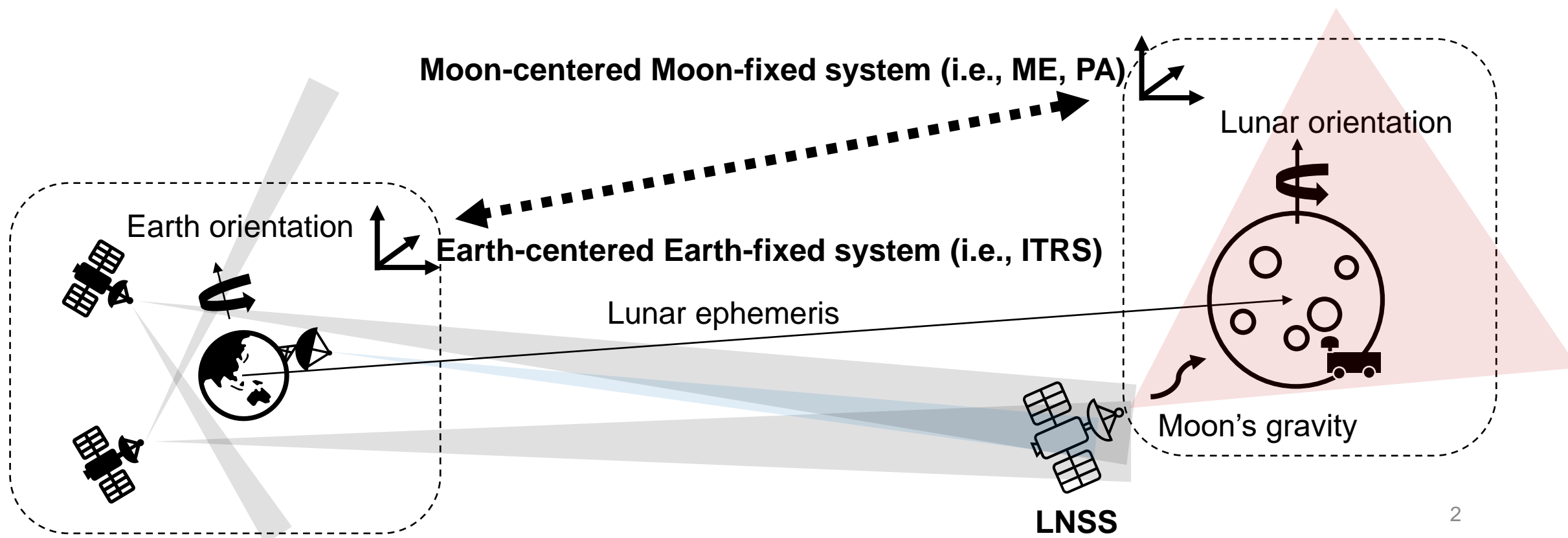
Lunar Navigation Satellite System (LNSS)と月の基準座標系

Kyohei Akiyama, JAXA

10th May 2023

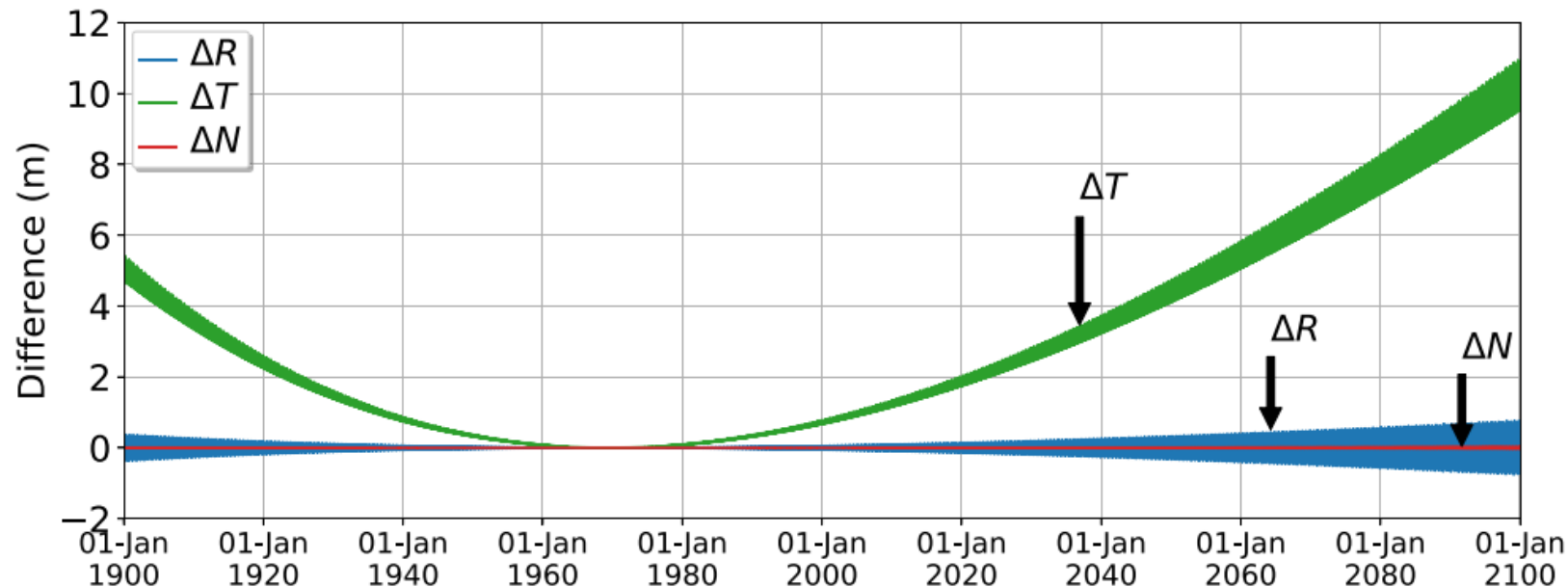
LNSS Orbit Determination and Time Synchronization(ODTS)

- LNSS衛星の位置を計測するための観測量はECEF(Earth-centered Earth-fixed)系
- 月面ユーザが必要なLNSS衛星の位置はMCMF(Moon-centered Moon-fixed)系
- Earth orientation, Lunar orientation, Lunar ephemerisのモデル誤差の影響を受ける



JPL's Lunar ephemeris (DE4xx)

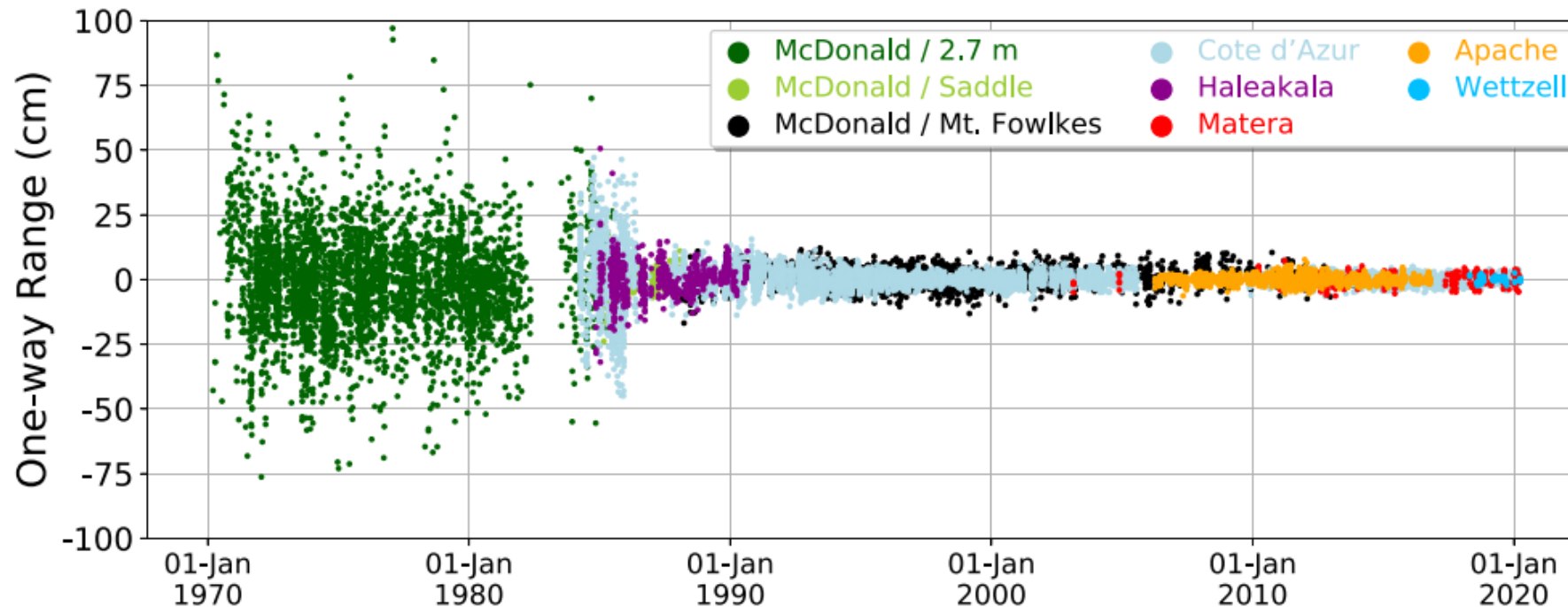
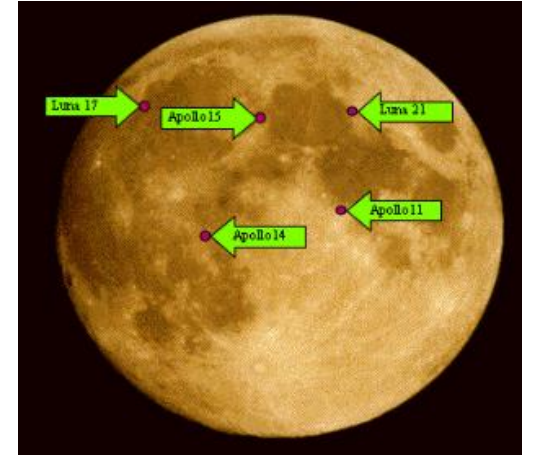
- JPLの公開する月及び惑星の軌道暦。最新バージョンはDE440と441。月のlibration angleも格納。
- 地球-月系の軌道にはたらく太陽輻射圧(solar radiation pressure)や測地的な歳差運動(geodetic precession)の影響が追加されている。
- DE440とDE441は同じデータセットを使用しているが、DE441は月の液体コアと固体マントルの間に減衰がないと仮定しており長期間の伝播が可能。今世紀中の期間の精度はDE440の方が高い。
- DE440とDE441の差異（下図）。バージョンによって数メートルの差異が生じる。



Park et al., 2021

JPL's Lunar ephemeris (DE4xx)

- 月のエフェメリスはLunar laser ranging(LLR)により計測される。
- 月面に設置されたretroreflectorは5か所 (Apolloが3か所, Lunokhod roverが2か所)
- LLRが可能な地球局は現在は4局 (3局は欧州, 1局は米国)
- LLRの1way residuals (下記) は近年は1.3 cm (RMS)まで改善している



© ILRS website

Park et al., 2021

Moon-fixed frame

- JPLのDEシリーズでは以下の二つの座標系が定義されている。

(1) Mean Earth/Polar Axis (ME) system

+Z軸が月の平均的な自転軸（北極）の向きと一致、本初子午線には平均的な地球方向が含まれる。

(2) Principal Axes (PA) system

月の主軸 (principal axes) に基づいて定義された座標系。慣性座標系 (ICRF) とPA間の変換は、DEシリーズに含まれる月のlibration angle (ϕ , θ , ψ) を用いて計算できる。

$$\mathbf{r}_I = \mathcal{R}_z(-\phi_m) \mathcal{R}_x(-\theta_m) \mathcal{R}_z(-\psi_m) \mathbf{r}_{PA}.$$

- 月の地図(lunar cartographic products)は、DE421のMERを基準として定義されているものがほとんど。そのため、DE440のPA \leftrightarrow DE421のMER間の座標変換行列(定数)が有用。

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{\text{MER,DE421}} &= \mathcal{R}_x(-0''.2785) \mathcal{R}_y(-78''.6944) \\ &\quad \times \mathcal{R}_z(-67''.8526) \mathbf{r}_{\text{PA,DE440}}. \end{aligned}$$

Ephemeris precision in the future (Laurenti et al., 2022)

- 異なる二つのDE軌道暦 (DE421とDE440) で計算した月面上位置を過去(a)と将来(b)の期間で比較。
- DE440の月固定座標系(MER)の確度 (と呼んでよい?) はサブメートル?

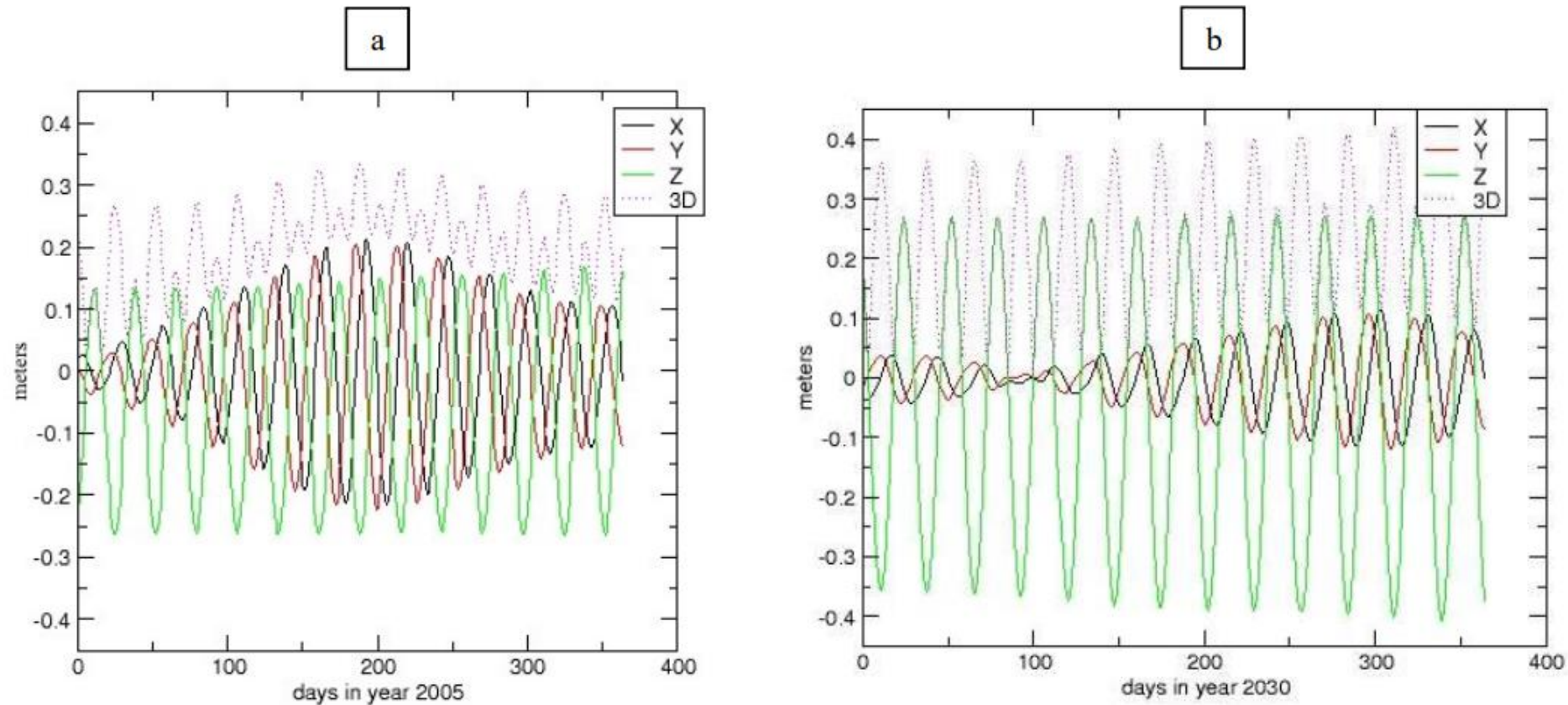
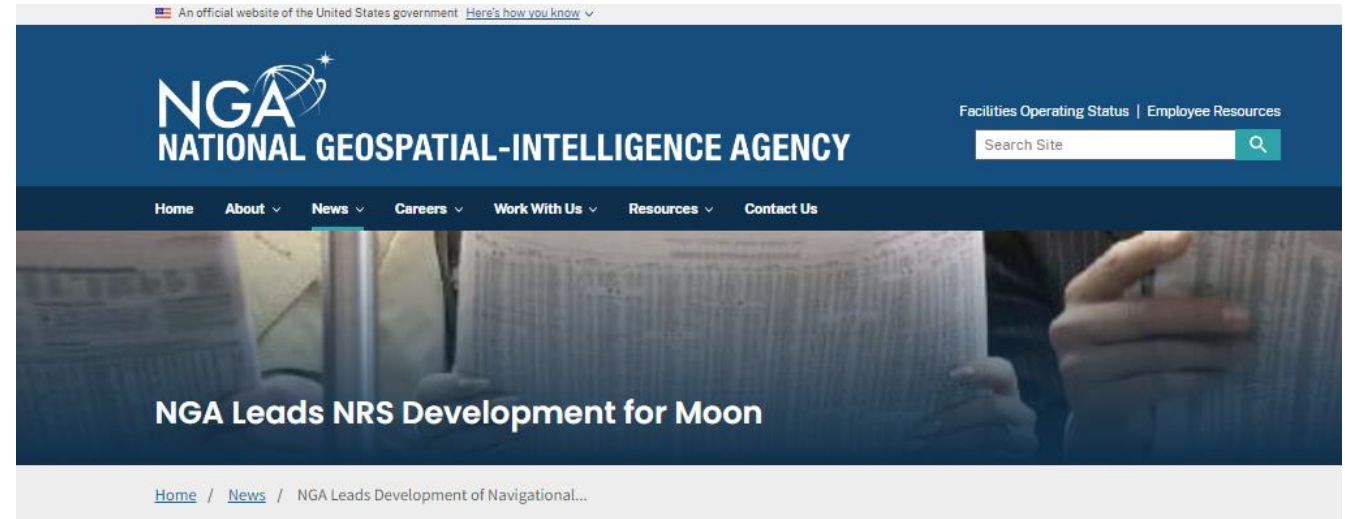


Figure 5 - Difference of MER coordinates realized through the DE421 and DE440 in the year 2005 (a) and 2030 (b)

NGA Leads NRS Development for Moon (Mar. 13, 2023)

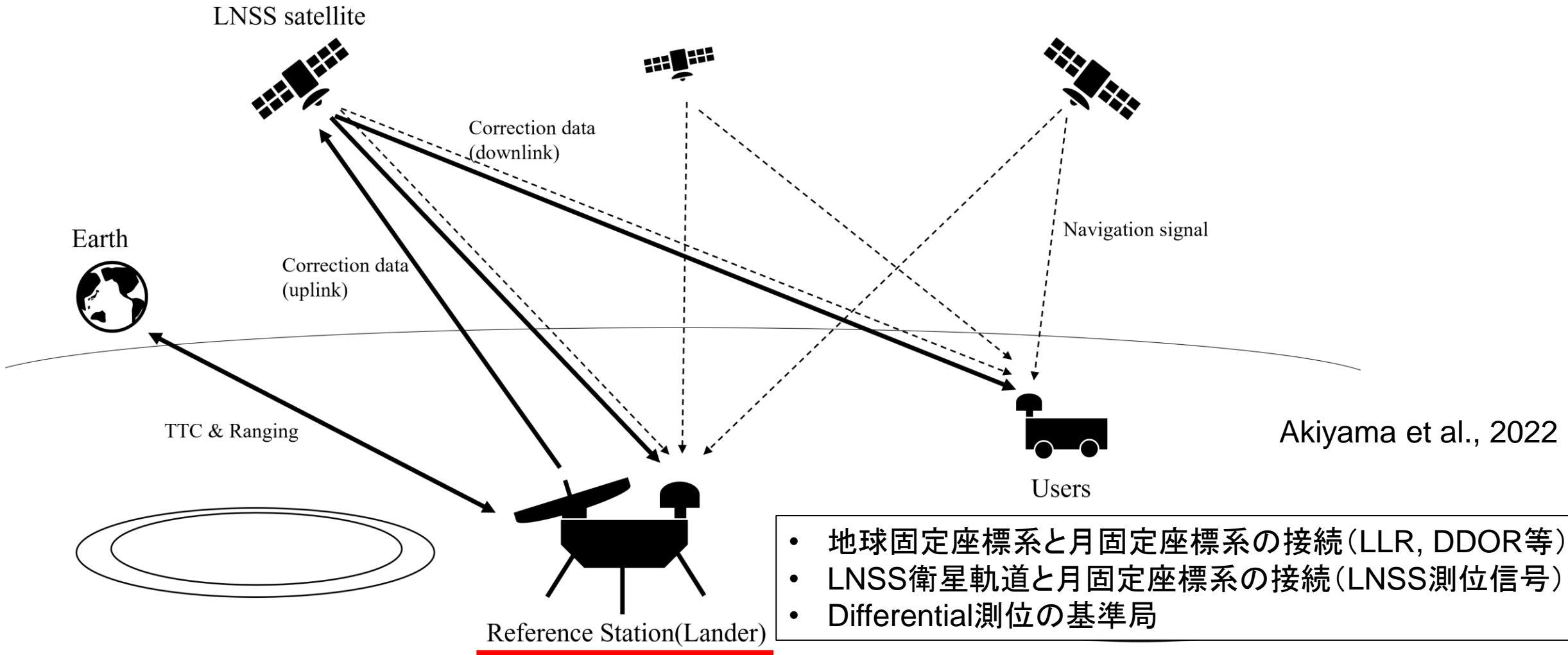
- Working with NASA, the U.S. Geological Survey, U.S. Space Force, U.S. Space Command and other agencies and universities, NGA is planning for and creating a **new and complete Lunar Reference System** designed to provide the precision and accuracy necessary for future lunar navigation.
- “The biggest challenge we have is **getting the data**,” Garner said.
- **Like WGS 84, “the Lunar Reference System will be a public utility that NGA provides for use by all,”** Garner said.



NGA Leads Development of Navigational Reference System for the Moon

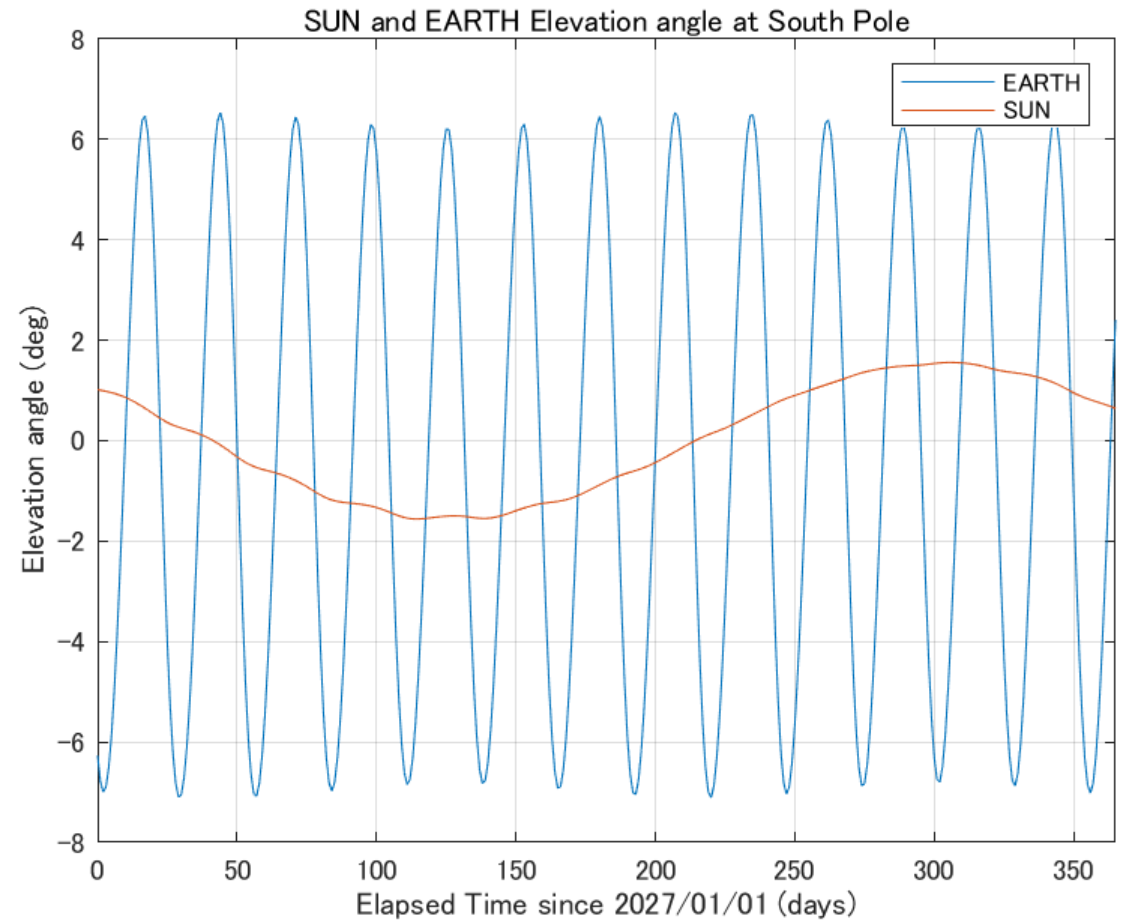


より高精度な測位基盤を実現するために



課題

- 電力（日照条件）
 - 月の南極域（高度0 km）における太陽高度は年間を通じて ± 1.54 度。
 - Shackletonクレータやその近傍の高度2000mの領域では、太陽の可視時間が90%を超える領域もある(Glaser, 2018)。
- 機器の寿命
 - 基準局には長い耐用年数が求められる。
 - LNSS信号受信機、送信機（to 月面ユーザ or LNSS衛星）及びそれらの機器の動作に必要なSAP/Battery、熱制御機器。
 - Laser ranging用のreflector以外の機器は定期的な交換（月面の有人活動拠点付近への設置）が必須か。



Sun and Earth's Elevation Angle (wrt. MOON_PA, from DE421)