

月地球圏の時系及び座標系基準の 進展と国際動向

2025年1月23日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

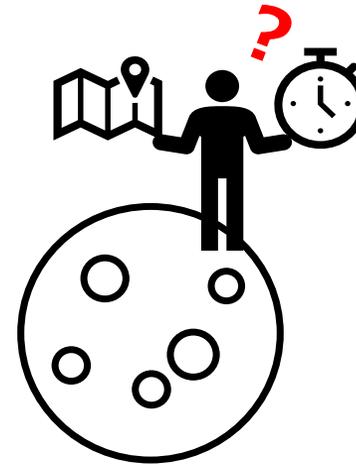
国際宇宙探査センター

岡本 すす菜



- 座標系：ある場所の位置を、座標で表すための決まりのこと
例) 北緯35度、東経140度
- 時系：時刻を表すための決まりのこと

地球では定まっているが、月では定まっていない！



⇒ 月面活動の活発化のため、国際的にこれらを定めていく流れがある₂

The background of the slide is a space scene. On the left, a large, detailed view of the Moon's surface is visible, showing numerous craters and a dark, cratered landscape. In the center, the Earth is shown as a blue and white sphere, partially illuminated. To the right, a smaller, reddish-brown sphere representing Mars is visible. The background is a dark, starry space with a faint, reddish-brown nebula or galaxy structure visible in the upper right quadrant.

月の座標系

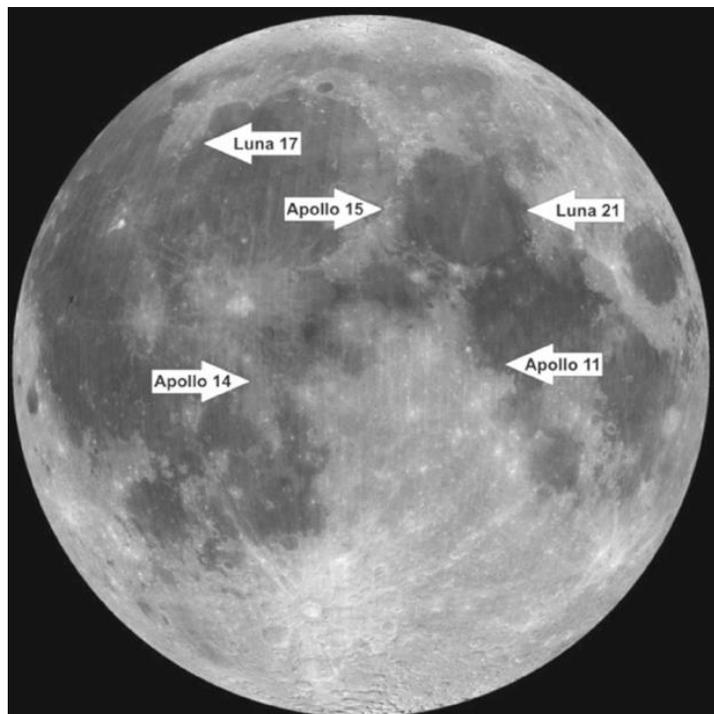
現在、月には複数の座標系が考えられている。

よく使われるものに、NASAのJPL (Jet Propulsion Laboratory)が公開している、PA系(Principal Axis)とME系(Mean Earth)がある。

そして、この2つには約850mの違いがある。

つまり、間違えると月面着陸機が**クレーターに落ちかねない！！**

各ミッションで計測装置を設置した位置 [1]



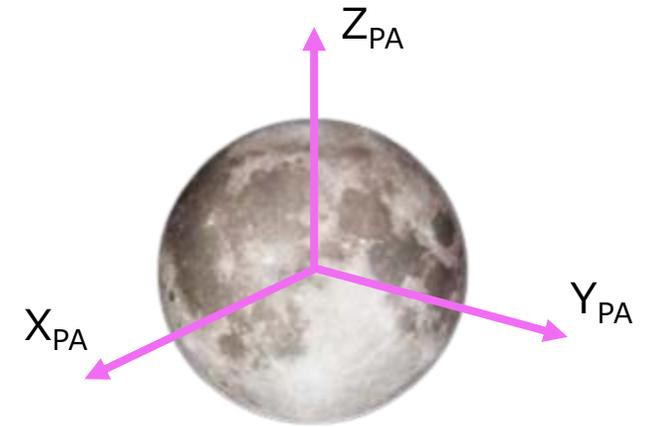
各地点のPAとMEにおける座標位置 [2]

| Retroreflectors | DE440 PA Frame (m) | DE421 MER Frame (m) |
|-----------------|---|---|
| Apollo 11 | 1591967.049 690698.573 21004.461 | 1591747.649 691222.200 20398.110 |
| Apollo 14 | 1652689.369 -520998.431 -109729.869 | 1652818.682 -520454.587 -110361.165 |
| Apollo 15 | 1554678.104 98094.498 765005.863 | 1554937.504 98604.886 764412.810 |
| Lunokhod 2 | 1339363.598 801870.995 756359.260 | 1339388.213 802310.527 755849.393 |
| Lunokhod 1 | 1114291.452 -781299.273 1076059.049 | 1114958.865 -780934.127 1075632.692 |

524 mの差

PA系 (Principal Axis System)

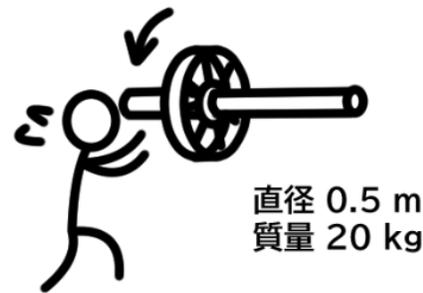
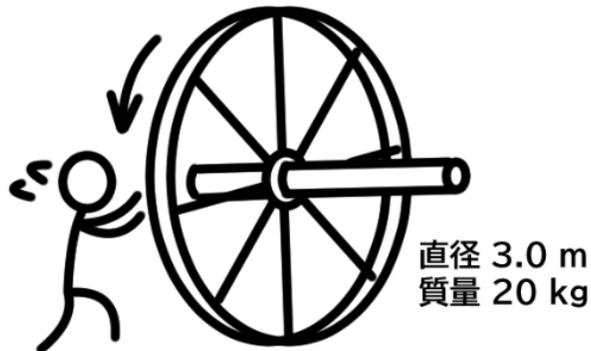
- X軸：慣性モーメントが最小になる方向
- Z軸：慣性モーメントが最大になる方向
- Y軸：上記2つを満たすよう右手系で定める



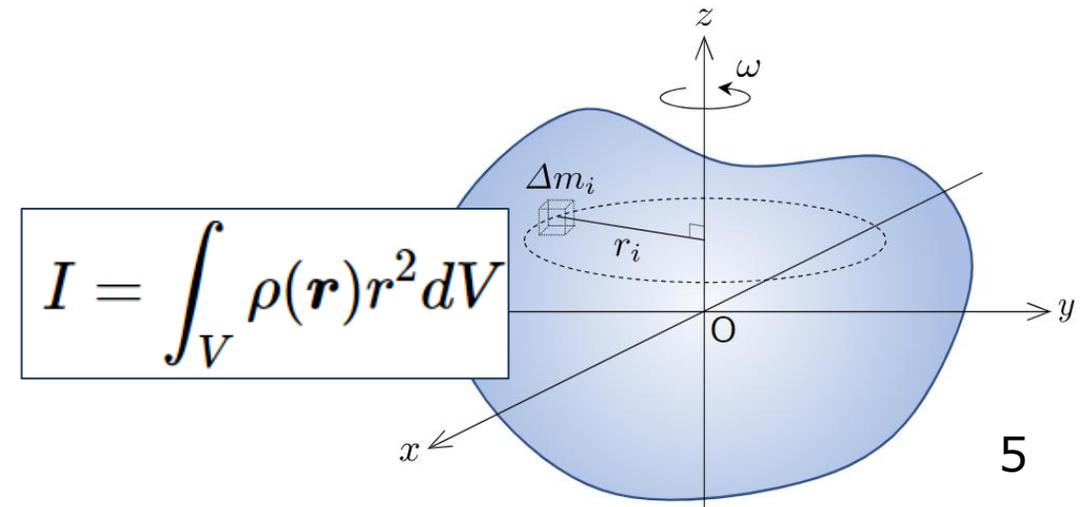
慣性モーメント

止まっている物体の回転しにくさを表す値。

物体の回転しにくさ [3]



慣性モーメントの式 [4]

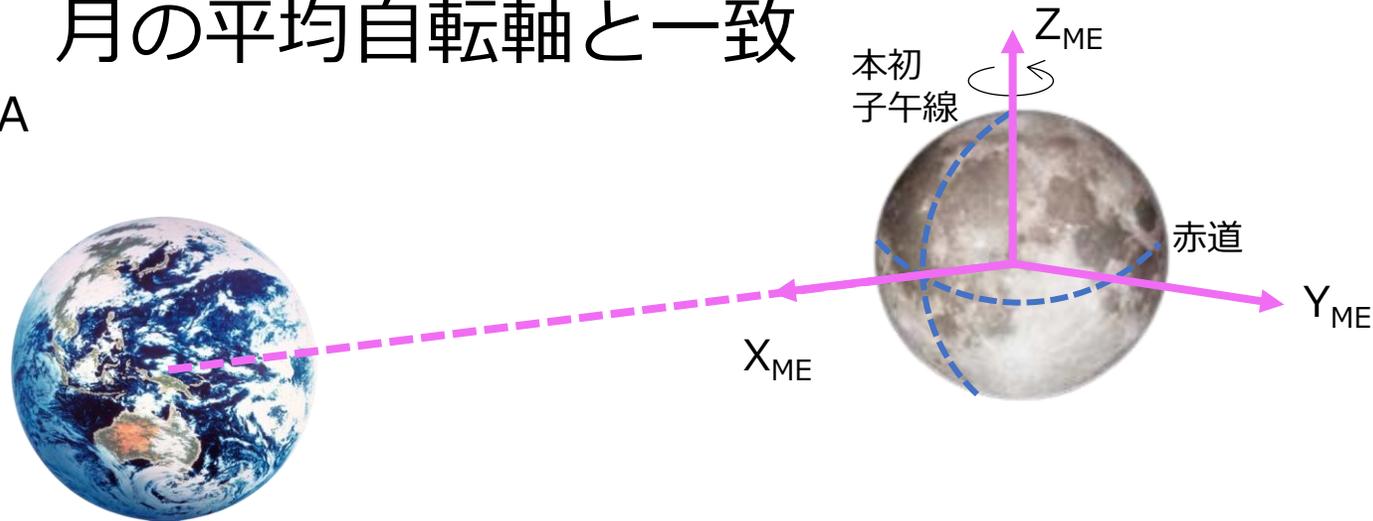


ME系 (Mean Earth / Polar Axis System)

本初子午線: 地球質量中心方向の平均経度と一致

Z軸: 月の平均自転軸と一致

地球の画像©JAXA

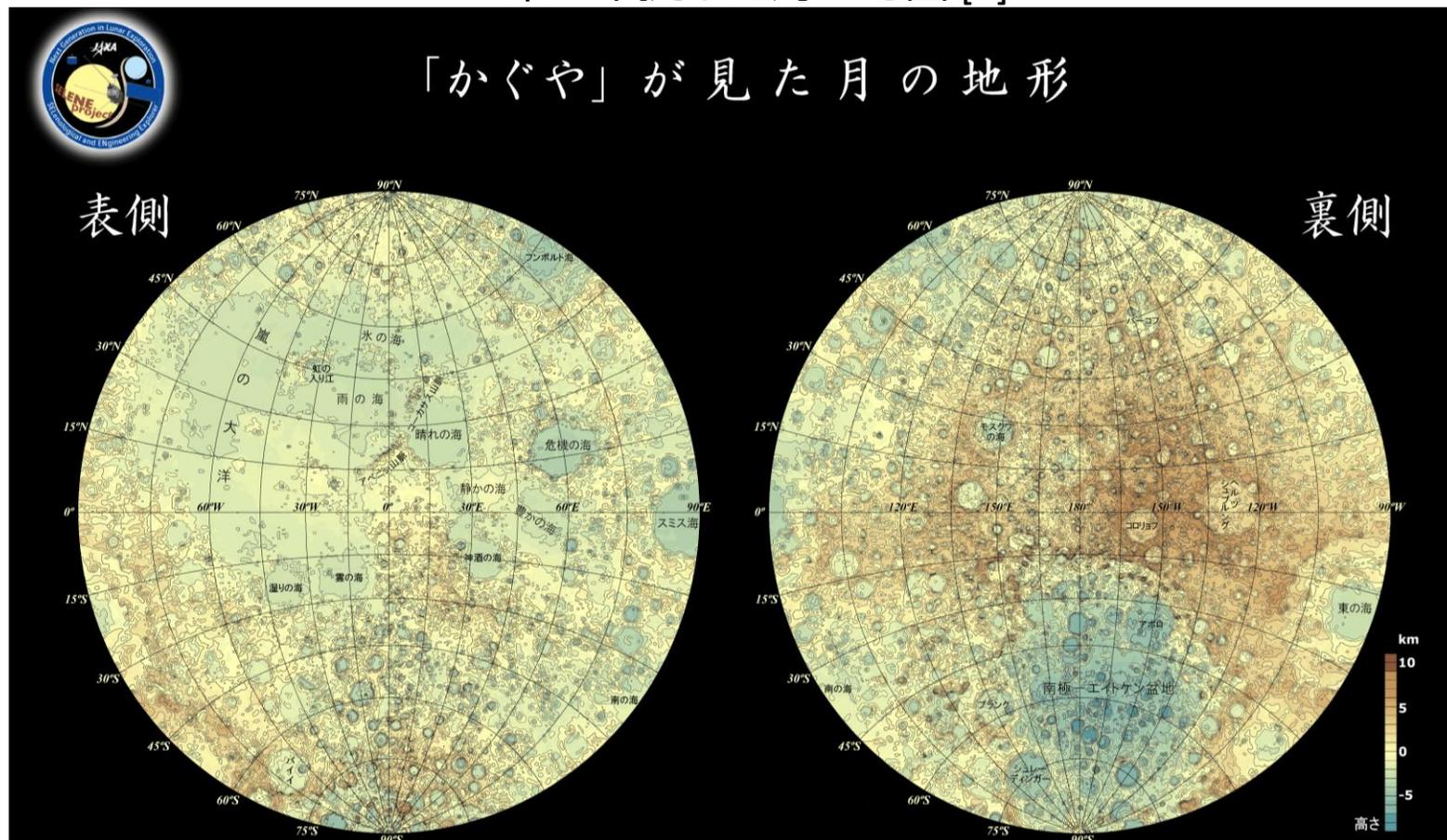


元々は、IAU（国際天文学連合）が定めた方法で求めていたが、約150mの誤差が生じる。よって、JPLの天体暦を使って求めたPA系から座標変換する方法が推奨される。

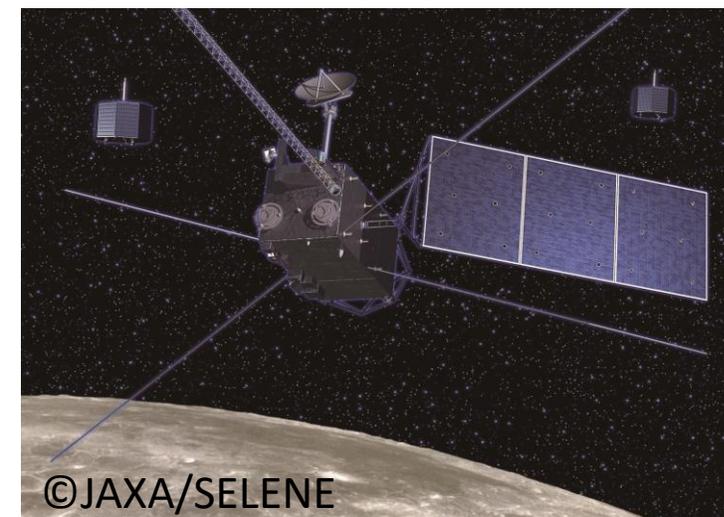
$$D_{PA}^{ME} = R_1(-0.285'') R_2(-78.580'') R_3(-67.573'') \quad R_2(\eta) = \begin{pmatrix} c_\eta & 0 & -s_\eta \\ 0 & 1 & 0 \\ s_\eta & 0 & c_\eta \end{pmatrix}$$

今まで、月の科学的研究や地図作製で広く採用されてきた。
 よって、既存の月の地図やデータセットと、一貫性や互換性が確保
 しやすい。

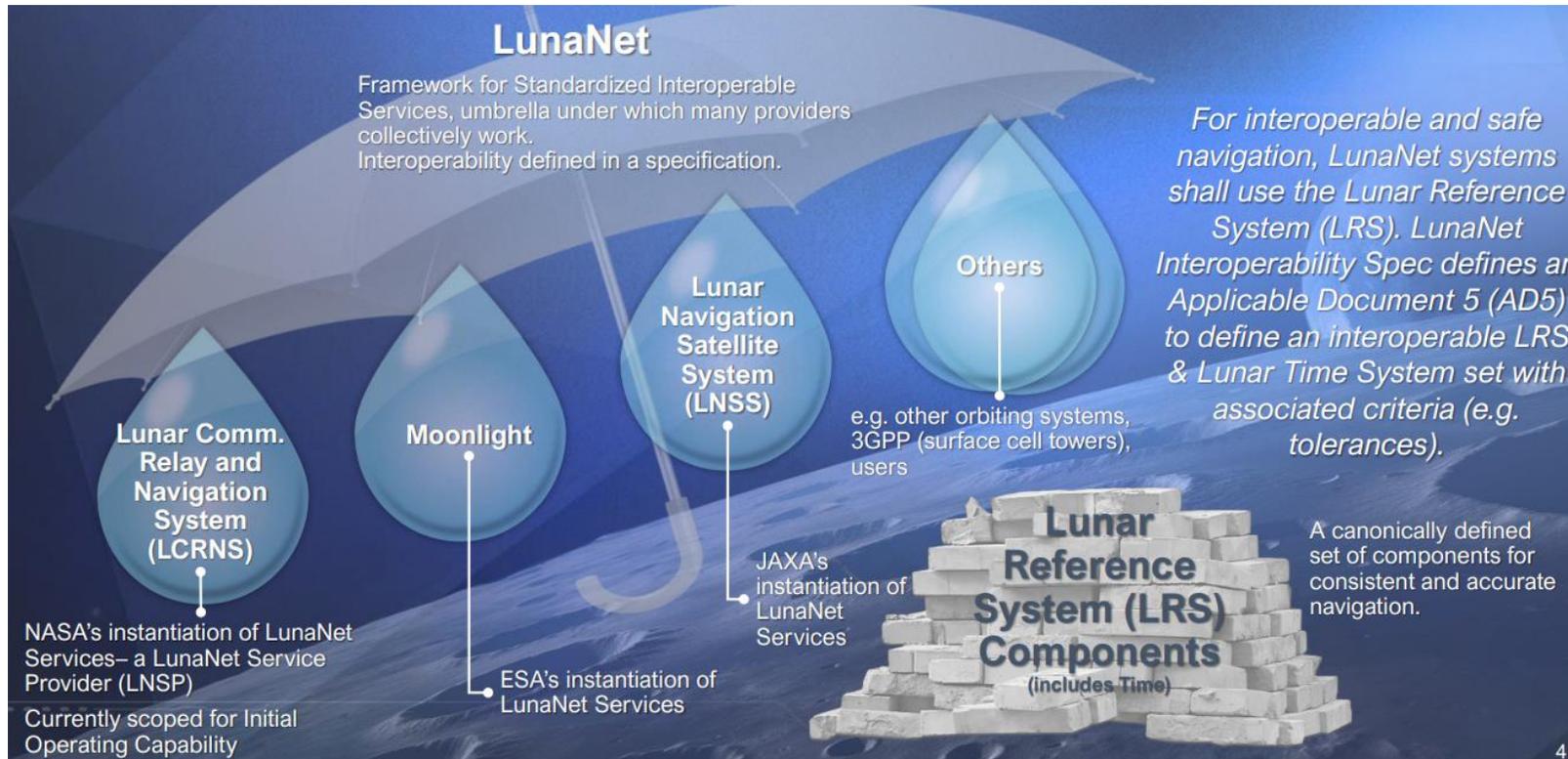
ME系に準拠した月の地図 [5]



衛星SELENE (通称：かぐや)



- NASA, ESA, JAXAの3者で、**LNIS** (LunaNet Interoperability Specification)という**標準化文書**を作成中。
- LNISの適用文書AD5には、**LunaNet**で使用できる**月座標系と時系の相互互換性を記載予定**。





- LNIS PNTチームは、誤差を考慮し、測位においてはPA系を推奨。
- 使用中の座標系を明記したうえで、ME系とPA系を併用していく方針が有力。
- SLIMの運用実績から、実運用でもこの方法で問題ないと考えられる。



©JAXA/タカランドミール/三ノグループ/同志社大学

2024年12月、ホワイトハウスから以下の指示があった。

「2026年12月末まで
月の座標系の標準化を実施
するための戦略を提出する」

この際に、**国際協力**の下で、
今までの知見を用いながら
標準化を進めることを求めている。

ホワイトハウスからの指示文書 [7]



EXECUTIVE OFFICE OF THE PRESIDENT
OFFICE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY POLICY
WASHINGTON, D.C. 20502

December 18, 2024

MEMORANDUM FOR DEPARTMENTS AND AGENCIES PARTICIPATING IN THE WHITE HOUSE CISELUNAR TECHNOLOGY STRATEGY INTERAGENCY WORKING GROUP

FROM: 
Arati Prabhakar, Assistant to the President for Science and Technology and Director, White House Office of Science and Technology Policy

SUBJECT: Policy on Standardization of Lunar Reference Systems in Support of the National Cislunar Science & Technology Strategy

This memorandum outlines the Biden-Harris Administration's policy on the establishment of reference systems at the Moon to advance the *National Cislunar Science & Technology Strategy*.¹ The Office of Science and Technology Policy (OSTP) advises federal departments and agencies to align their planning and policies with this memorandum.

The Moon represents the first step in human exploration of the solar system. This approach to reference systems at the Moon will serve as a template for other celestial bodies. Reference systems provide a definition by which position and direction can be expressed. Operations in Cislunar space² require multiple reference systems and transformations between each. This essential set of reference systems and transformations should be fully defined in international standards and include:

1. A body-fixed reference system centered at the Moon,
2. An inertial reference system centered at the Moon,
3. Transformations between the lunar body-fixed and inertial reference systems (i.e., orientation parameters and ephemerides), and
4. Traceability to Earth's body-fixed and inertial reference systems.

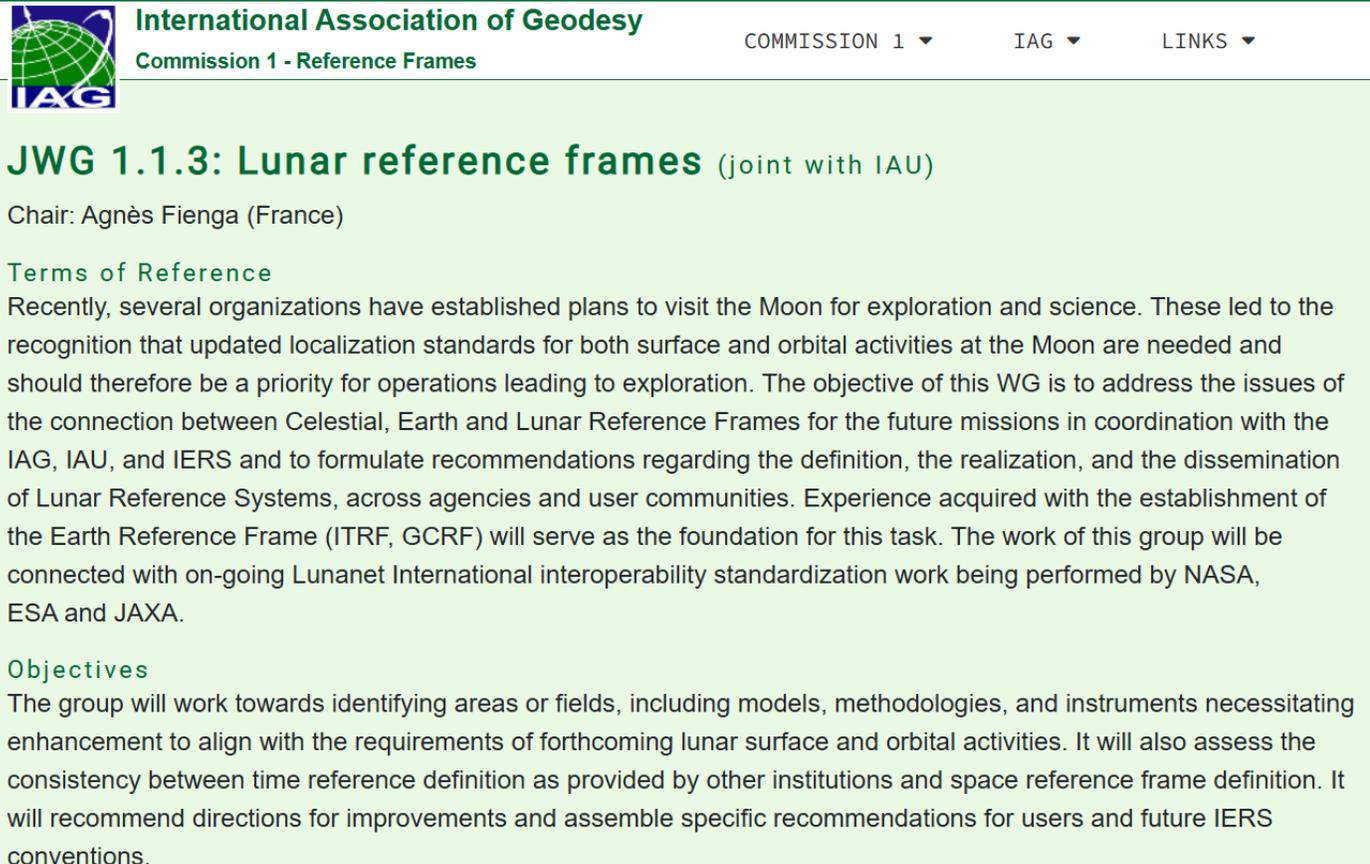
A shared understanding of reference systems at the Moon is essential for safe navigation, scientific discovery, and commercial activity, just as it is at Earth. Space situational awareness, for example, relies on the ability to unambiguously describe the positions of all crewed and uncrewed vehicles, regardless of operator. Scientific investigations may require spatial alignment of data from multiple instruments or the ability to clearly communicate a site of interest to astronauts.

Lunar navigation relies on a diverse array of measurements, including lunar surface landmarks, radio navigation signals, and the arrangement of stars. Without standard reference systems, uncertainties in the

¹ National Science and Technology Council, 2022, "National Cislunar Science and Technology Strategy," <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/11/11-2022-NSTC-National-Cislunar-ST-Strategy.pdf>

² For the purposes of this document, Cislunar space is defined as the three-dimensional volume of space beyond Earth's geosynchronous orbit that is mainly under the gravitation influence of the Earth and/or the Moon. Cislunar space includes the Earth-Moon Lagrange point regions, trajectories utilizing those regions, and the Lunar surface.

- IAG (International Association of Geodesy)やIAU (International Astronomical Union)といった**国際団体での検討**が進んでいく予定。
- IAGでは、複数のテーマに対し**WGの活動**が開始。



International Association of Geodesy
Commission 1 - Reference Frames

COMMISSION 1 ▾ IAG ▾ LINKS ▾

JWG 1.1.3: Lunar reference frames (joint with IAU)

Chair: Agnès Fienga (France)

Terms of Reference
Recently, several organizations have established plans to visit the Moon for exploration and science. These led to the recognition that updated localization standards for both surface and orbital activities at the Moon are needed and should therefore be a priority for operations leading to exploration. The objective of this WG is to address the issues of the connection between Celestial, Earth and Lunar Reference Frames for the future missions in coordination with the IAG, IAU, and IERS and to formulate recommendations regarding the definition, the realization, and the dissemination of Lunar Reference Systems, across agencies and user communities. Experience acquired with the establishment of the Earth Reference Frame (ITRF, GCRF) will serve as the foundation for this task. The work of this group will be connected with on-going Lunanet International interoperability standardization work being performed by NASA, ESA and JAXA.

Objectives
The group will work towards identifying areas or fields, including models, methodologies, and instruments necessitating enhancement to align with the requirements of forthcoming lunar surface and orbital activities. It will also assess the consistency between time reference definition as provided by other institutions and space reference frame definition. It will recommend directions for improvements and assemble specific recommendations for users and future IERS conventions.

1. PA and ME statement
2. Accuracy of the lunar reference frames
3. Interoperability / compatibility between Lunar and Earth frames

The background of the image is a deep space scene. On the left, a large, grey, cratered moon is partially visible. In the center, the Earth is shown as a blue and white sphere. To the right, a smaller, reddish-brown planet is visible. The Milky Way galaxy is faintly visible in the background. The title '月の時系' is centered over the Earth.

月の時系

月の時系は定まっていない。

2024年4月、ホワイトハウスからNASAへ以下の指示があった。

「2024年12月末まで
月標準時の検討を行う

2026年12月末まで
月の時刻の標準化を実施
するための戦略を提出する」

ホワイトハウスからの指示文書 [9]



EXECUTIVE OFFICE OF THE PRESIDENT
OFFICE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY POLICY
WASHINGTON, D.C. 20502

April 2, 2024

MEMORANDUM FOR DEPARTMENTS AND AGENCIES PARTICIPATING IN THE WHITE HOUSE CISLUNAR TECHNOLOGY STRATEGY INTERAGENCY WORKING GROUP

FROM: Arati Prabhakar, Assistant to the President for Science and Technology and Director, Office of Science and Technology Policy

Arati Prabhakar

SUBJECT: Policy on Celestial Time Standardization in Support of the National Cislunar Science and Technology (S&T) Strategy

This memorandum outlines the Biden-Harris Administration's policy to establish time standards at and around celestial bodies other than Earth to advance the National Cislunar S&T Strategy.¹ OSTP directs federal departments and agencies to align their planning and policies with this memorandum.

The approach to establish time standards consists of the definition, development, and implementation of a distinct reference time at each celestial body and its surrounding space environment. Each new time standard developed will include the following features:

1. *Traceability* to Coordinated Universal Time (UTC);²
2. *Accuracy* sufficient to support precision navigation and science;
3. *Resilience* to loss of contact with Earth; and
4. *Scalability* to space environments beyond the Earth-Moon system

Federal agencies will develop celestial time standardization with an initial focus on the lunar surface and missions operating in Cislunar space, with sufficient traceability to support missions to other celestial bodies.

NASA will, in coordination with the Departments of Commerce, Defense, State, and Transportation, provide a finalized strategy to the Executive Office of the President to implement lunar timing standardization no later than December 31, 2026. NASA will also include consideration of Coordinated Lunar Time (LTC), as described in this memorandum, as part of its annual Moon-to-Mars Architecture Concept Review cycle no later than December 31, 2024. These tasks will be supported and informed by the National Cislunar S&T sub-Interagency Working Group, co-led by NASA and the National Space Council, and focused on Objective 4 of the National Cislunar S&T Strategy:



現在提案されている月の時系は複数ある。

| | LTC (Coordinated Lunar Time) | TCL (Lunar-centric Coordinate Time) |
|-------------|--|--|
| 対応する地球の時系 | UTC (Coordinated Universal Time) | TCG (Geocentric Coordinate Time) |
| 提案者 | NASA | ミズーリ大学など |
| この時系を用いる座標系 | ILRS (International Lunar Reference System) | LCRS (Lunar Celestial Reference System) |



- 地球重心に空間座標の原点を持つ座標時のこと。
- 時間と空間を一緒に扱う。
- 重心を原点に持つため、重力場の影響を受けない。

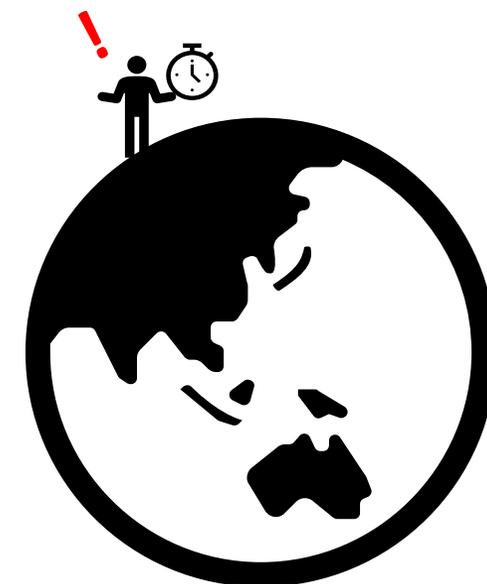


⇒ 地球重心では時刻を測定できないため、日常利用に向いていない理論的な値。



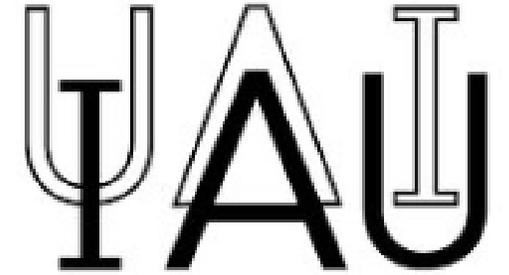
- 原子時と天文時を合わせた実用的な時系。
- 重力場の影響を受ける。

| | 原子時系 | 天文時系 |
|------|---|--|
| 1925 | | UT0 平均運動する仮定の平均太陽から1秒を求める、本初子午線における時系 |
| 1960 | | UT1 UT0に対して、観測された極運動の影響を修正した時系 |
| 1967 | TAI 「セシウム133原子の基底状態の2つの超微細準位間の遷移に対応する放射の9,192,631,770周期の継続時間」を、1秒(SI秒)とする時系 | |
| 1972 | | UTC 原子時のSI秒を1秒とし、地球の自転に基づくUT1との時刻差が0.9秒以内になるよう、閏秒を導入した時系 |





2024年8月、IAU(国際天文学連合)は、
月における標準時を確立するために協力することを
を目的として、2つの決議を承認した。



1. LCRS (Lunar Celestial Reference System) と
TCL (Lunar Coordinate Time) の確立
2. 国際協定による月標準時の確立

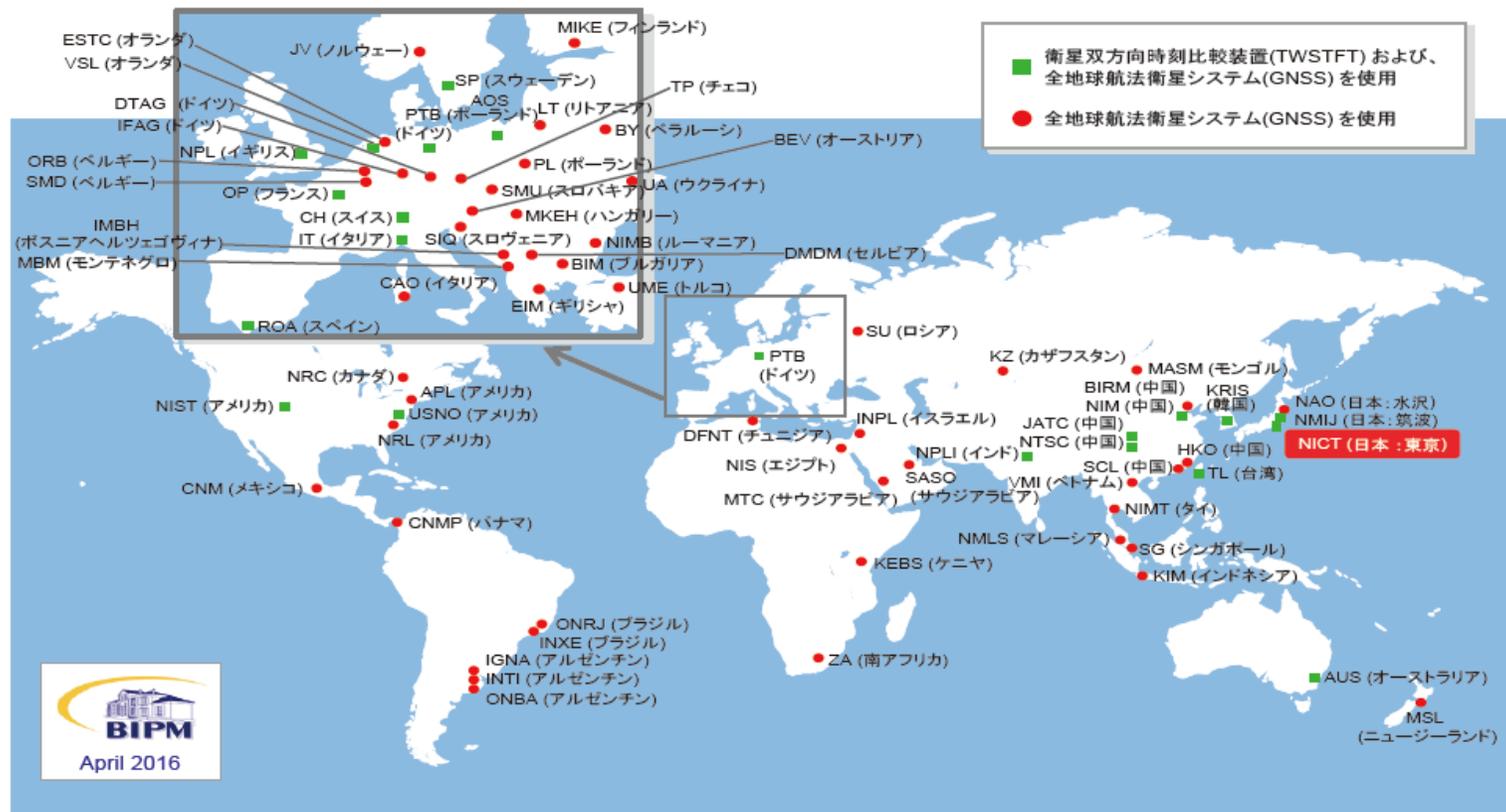
それぞれの決議では、TCGおよびUTCに対応する月の時系を検討
する必要がある。

⇒月の時系は現在まさに検討されている。

地球上では、世界中に設置した原子時計と衛星システムを利用してUTCを設定している。

国際原子時構築のための国際時刻比較参加機関

水素メーザとセシウム原子時計 [13]



⇒ 今後、月面への設置・管理（越夜を含む）を考えていく必要がある 18



- アメリカ

NASAは将来的に**月面に原子時計**を置く意思を表明している。

- ヨーロッパ

MoonLightや、Argonautの着陸機に**原子時計を搭載**予定。

- 日本

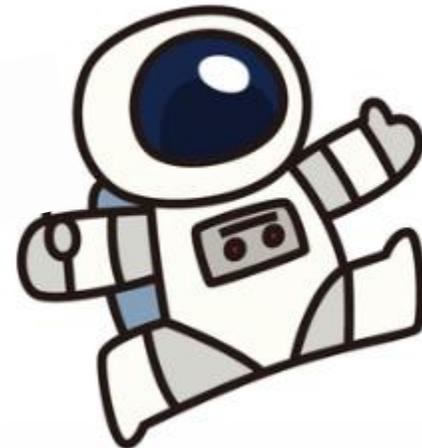
2028年度打ち上げ目標で検討を進めている、**LNSSの実証ミッションの一環**として、月測位の受信機を月面に設置する予定。この受信機に**原子時計**を具備する可能性あり。

また、本ミッションの衛星にも**原子時計**を具備する可能性あり。



- 現在、月の座標系と時系に関する国際的な取り決めはない。
- 今後、ローバーや宇宙飛行士など月面活動が活発になると、**利用しやすく高精度な位置決定**は必要不可欠である。
- そのため、標準座標と標準時を定めていく**国際的な動き**がある。
- 座標系については、使用中の座標系を明記したうえで、ME系とPA系を併用していく方針が有力。
- 時系については、UTCへのトレーサビリティが重要視されている。

ご清聴ありがとうございました





- [1] Jürgen Müller, Thomas W. Murphy Jr., Ulrich Schreiber, Peter J. Shelus, Jean-Marie Torre, James G. Williams, Dale H. Boggs, Sebastien Bouquillon, Adrien Bourgoïn, Franz Hofmann, 2019, “Lunar Laser Ranging: a tool for general relativity, lunar geophysics and Earth science”
- [2] Park, R.S; Folkner, W.M.; Williams, J.G.; Boggs, D.H., 2021, “The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441”
- [3] <https://www.sg.dendai.ac.jp/s1g-energy/contents/blog/inertia/inertia.html>
- [4] https://w3e.kanazawa-it.ac.jp/math/physics/category/mechanics/rigidbody_mechanics/rotational_motion/henkan-tex.cgi?target=/math/physics/category/mechanics/rigidbody_mechanics/rotational_motion/moment_of_inertia.html
- [5] <https://www.gsi.go.jp/chirijoho/chirijoho41003.html>
- [6] Cheryl Gramling, 2023, “LunaNet: Interoperability for Lunar PNT”
- [7] <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2024/12/Lunar-Reference-System-Policy.pdf>
- [8] <https://com1.iag-aig.org/sub-commission-11>
- [9] <https://www.iau.org/>
- [10] <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2024/04/02/white-house-office-of-science-and-technology-policy-releases-celestial-time-standardization-policy/>
- [11] William M. Folkner, James G. Williams, Dale H. Boggs, Ryan S. Park, and Petr Kuchynka, 2014, “The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431”
- [12] Pratap Misra, Per Enge, 日本航海学会 GPS研究会誌, 2001, “精説 GPS基本概念・測位原理・信号と受信機”
- [13] https://www.nict.go.jp/pamphlet/TS_j-panf.pdf
- [14] <https://www.ac-illust.com/>