

月面での測位に向けた 月の座標系と時系の概要

2024年7月24日

宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

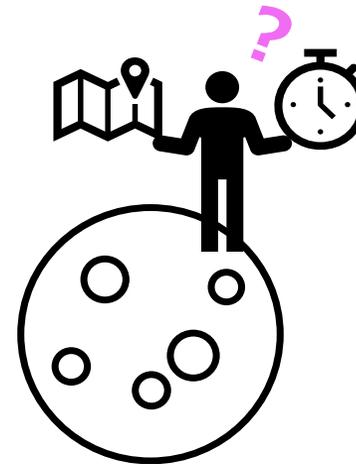
国際宇宙探査センター

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 grey, cratered texture. In the center, the Earth is shown as a blue and white sphere, partially illuminated. To the right, Mars is visible as a smaller, reddish-brown sphere. 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

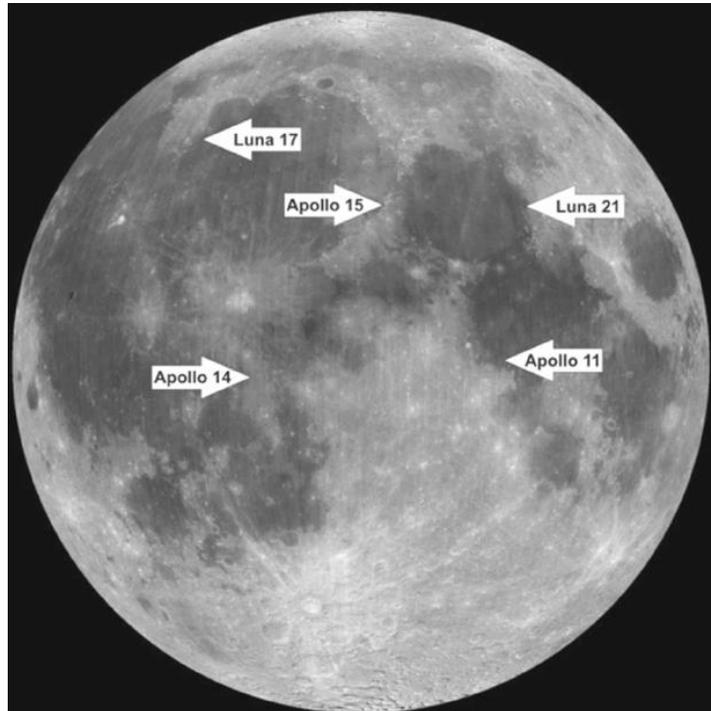
現在、月には複数の座標系が考えられている。

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]

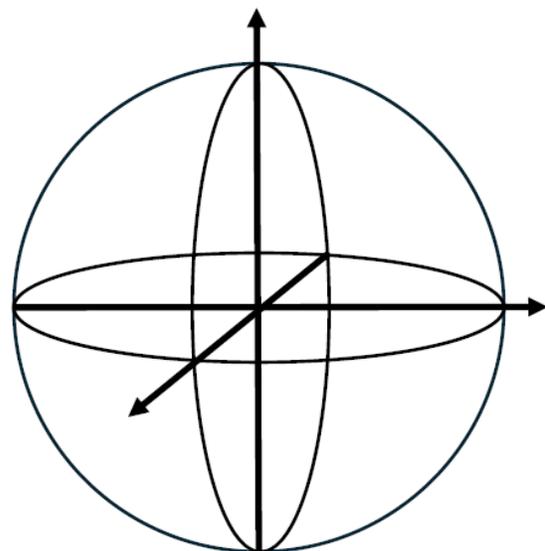


各地点のPAとMEにおける座標位置 [2]

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

定義と実現という2つのプロセスによって、構築される。
 定義は天体の物理的特性を考慮して定められる。
 実現にはリトロリフレクターが用いられる。

定義 : Definition



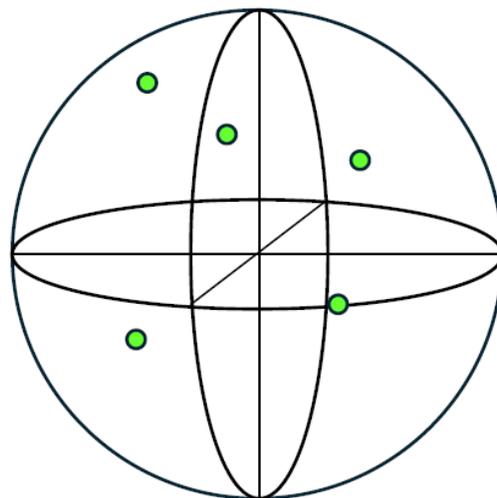
Origin
原点

Axis
座標軸

Scale
目盛

Time valiance
時間変動

実現 : Realization



Reference
Points
基準点

Coordinates
Values
座標値リスト

月面に設置する
レーザー反射器

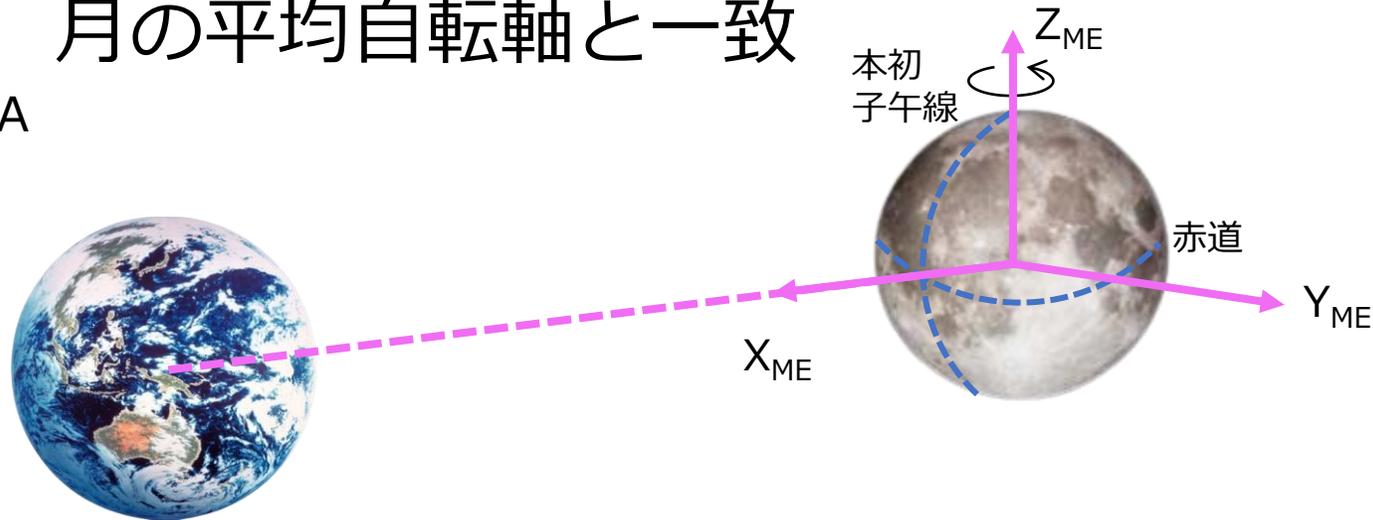


ME系 (Mean Earth / Polar Axis System)

本初子午線: 地球重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

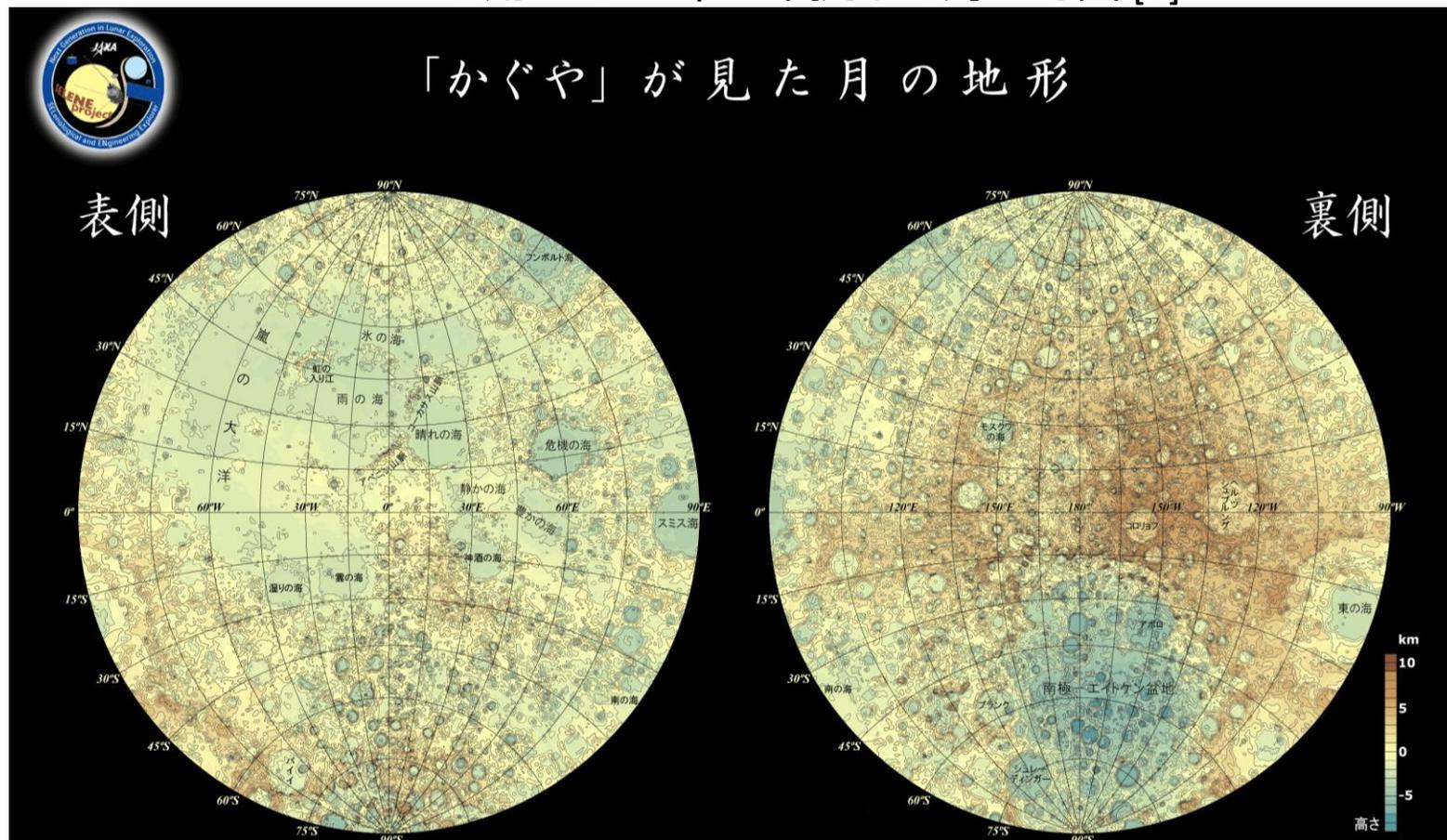


元々は、IAU（国際天文学連合）が定めた方法で求めていたが、約150mの誤差が生じる。よって、JPLの天体暦を使って求めたPA系から座標変換する方法が推奨される。

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

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。

DE421を用いたME系に準拠した月の地図 [3]

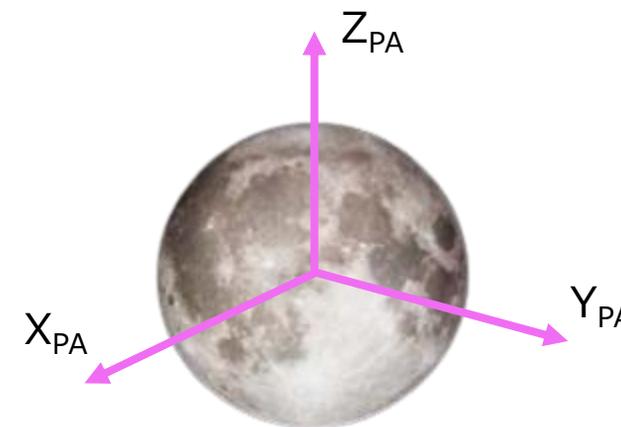


衛星SELENE (通称：かぐや)



PA系 (Principal Axis System)

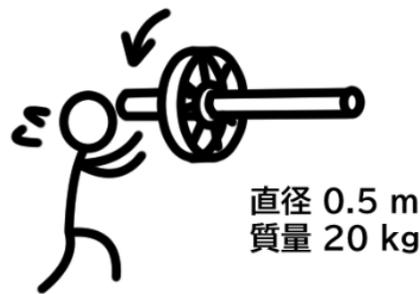
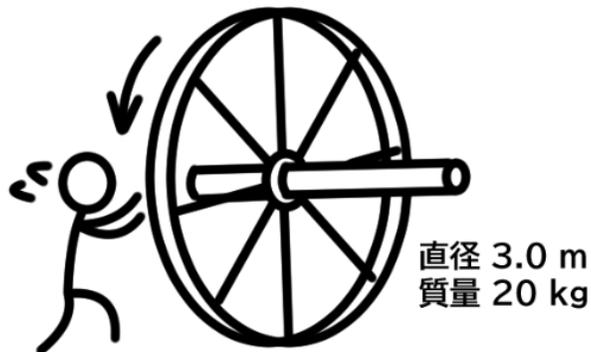
- X軸：慣性モーメントが最小になる方向
- Z軸：慣性モーメントが最大になる方向
- Y軸：上記2つを満たすよう右手系で定める



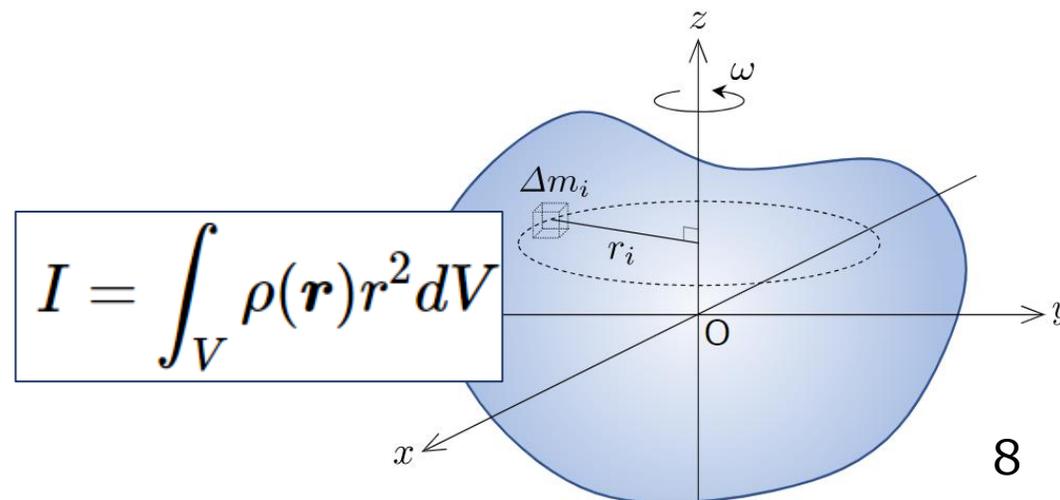
慣性モーメント

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 [5]

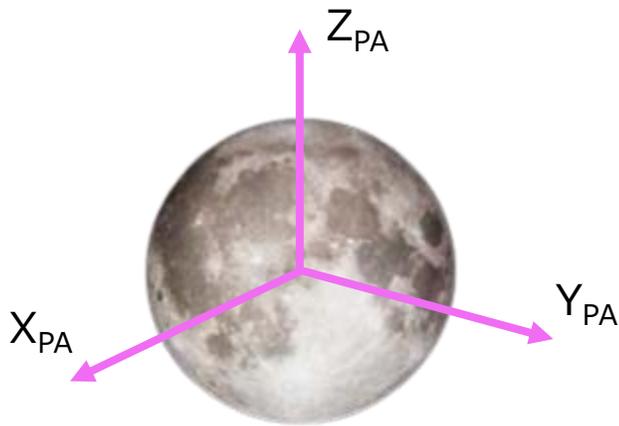


慣性モーメントの式 [6]





- 慣性行列は対角行列になる。
- X軸とZ軸周りの回転では、回転軸が微小量だけ元の軸からずれても、回転軸の揺動が微小量に保たれる。



$$I = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix}$$

$(I_z > I_y > I_x)$

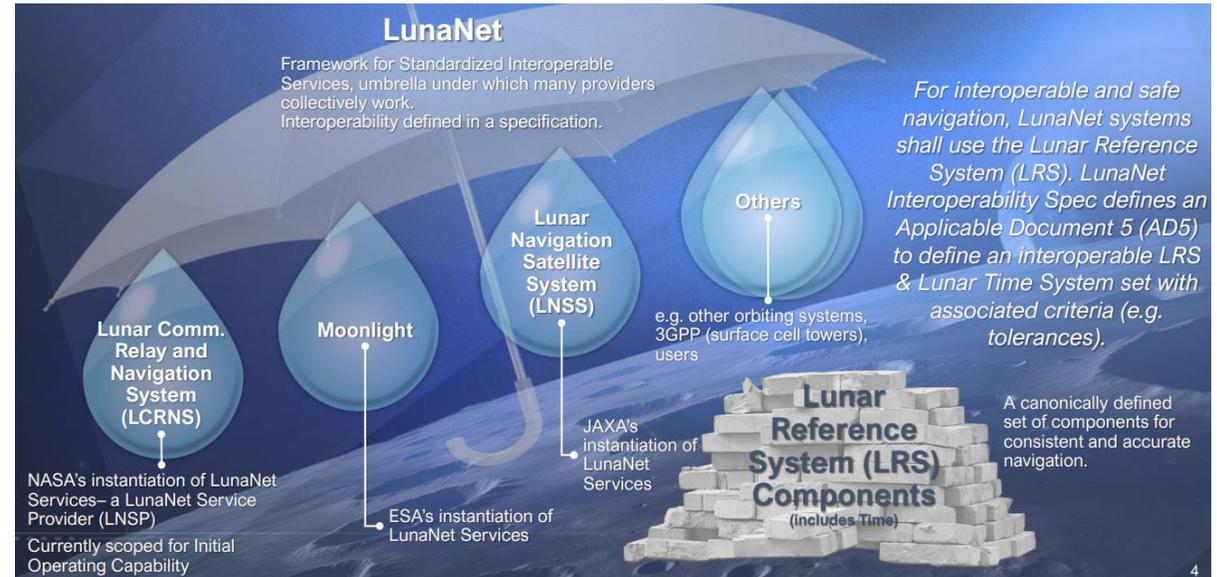


Time=2070000

- PA系は地球位置に左右されない月固有の座標系である。
このため、月の物理特性に沿った座標系を必要とする、重力場の決定やLLR (Lunar Laser Ranging)などの動的研究に向いている。

- LNIS (LunaNet Interoperability Specification) という標準化文書を作成中。
- NASA、ESAに加えJAXAも参加。
- LNISの適用文書AD5で、LunaNetで使用する月座標系と時系が整備される予定。
- LNIS PNTチームはPA系を推奨。

LunaNetの概要 [10]



	ME系	PA系
最新版	2008年発表のDE421	2020年発表のDE440
RSS誤差	メートルスケール	サブメートルスケール

The background of the image is a deep space scene. On the left, a large, detailed view of the Moon's surface is visible, showing numerous craters and lunar maria. 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 filled with a dense field of stars and the faint, colorful glow of the Milky Way galaxy.

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 [11]



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、主に以下の2つである。

	TCL (Lunar-centric Coordinate Time)	LTC (Coordinated Lunar Time)
対応する地球の時系	TCG (Geocentric Coordinate Time)	UTC (Coordinated Universal Time)



- 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。

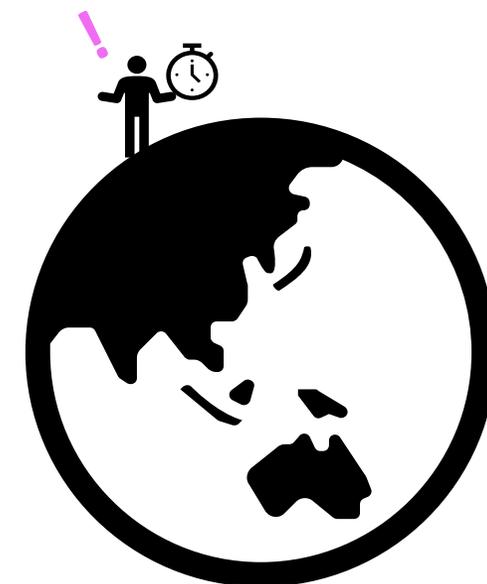


⇒ 地球重心では時刻を測定できないため、日常利用に向いていない理論的な値。



- 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。

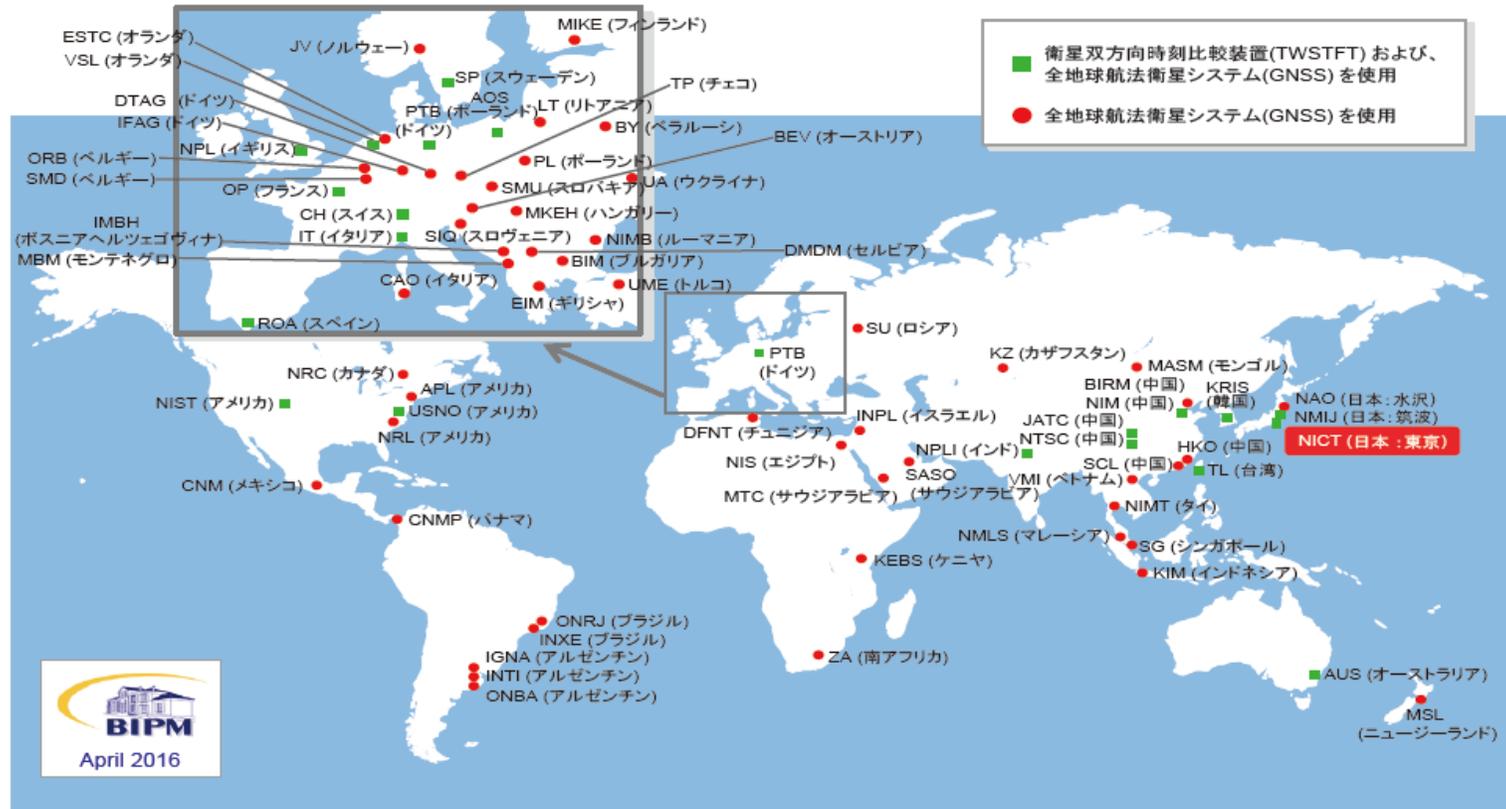
	原子時系	天文時系
1925		UT0 平均運動する仮想の平均太陽から1秒を求める、本初子午線における時系
1960		UT1 UT0に対して、観測された極運動の影響を修正した時系
1967	TAI 「セシウム133原子の基底状態の2つの超微細準位間の遷移に対応する放射の9,192,631,770周期の継続時間」を、1秒(SI秒)とする時系	
1972		UTC 原子時のSI秒を1秒とし、地球の自転に基づくUT1との時刻差が0.9秒以内になるよう、閏秒を導入した時系



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 16

• アメリカ

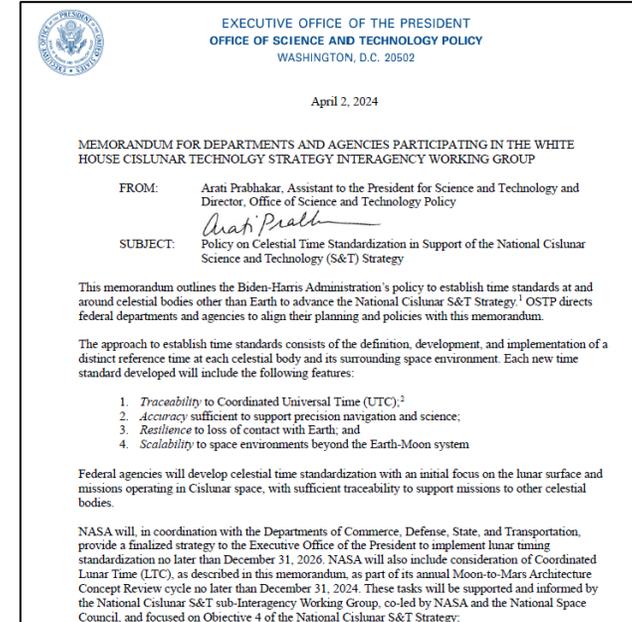
ホワイトハウスの文書に「地球上で多数の原子時計によって地上時間が設定されるように、月面上でも**原子時計の集合体**によって月時間が設定されるかもしれない。」と記載あり。

• 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**を具備する可能性もあり、この場合は原子時計が月時間の実測に貢献するものと考えられる。

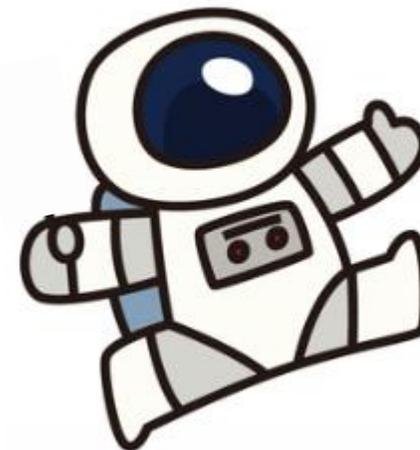
ホワイトハウスからの指示文書 [11]





- 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、月面でローバーや宇宙飛行士が活躍していく上で、高精度の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。
- 月に測時システムを構築することも、今後の課題である。

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.gsi.go.jp/chirijoho/chirijoho41003.html>
- [4] Young-Joo, Donghun Lee, Young-Rok Kim, Jonghee, Jae-ik Park, SeungBum Hong, Sang-Ryool Lee, 2021, “Practical Algorithms on Lunar Reference Frame Transformations for Korea Pathfinder Lunar Orbiter Flight Operation”
- [5] <https://www.sg.dendai.ac.jp/s1g-energy/contents/blog/inertia/inertia.html>
- [6] 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
- [7] <https://www.sky-engin.jp/MBDynTutorial/chap09/chap09.html>
- [8] <https://youtu.be/KLJi7K2Kq0Y>
- [9] William M. Folkner, James G. Williams, Dale H. Boggs, Ryan S. Park, and Petr Kuchynka, 2014, “The Planetary and Lunar Ephemerides DE430 and DE431”
- [10] Cheryl Gramling, 2023, “LunaNet: Interoperability for Lunar PNT”
- [11] <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2024/04/02/white-house-office-of-science-and-technology-policy-releases-celestial-time-standardization-policy/>
- [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/>