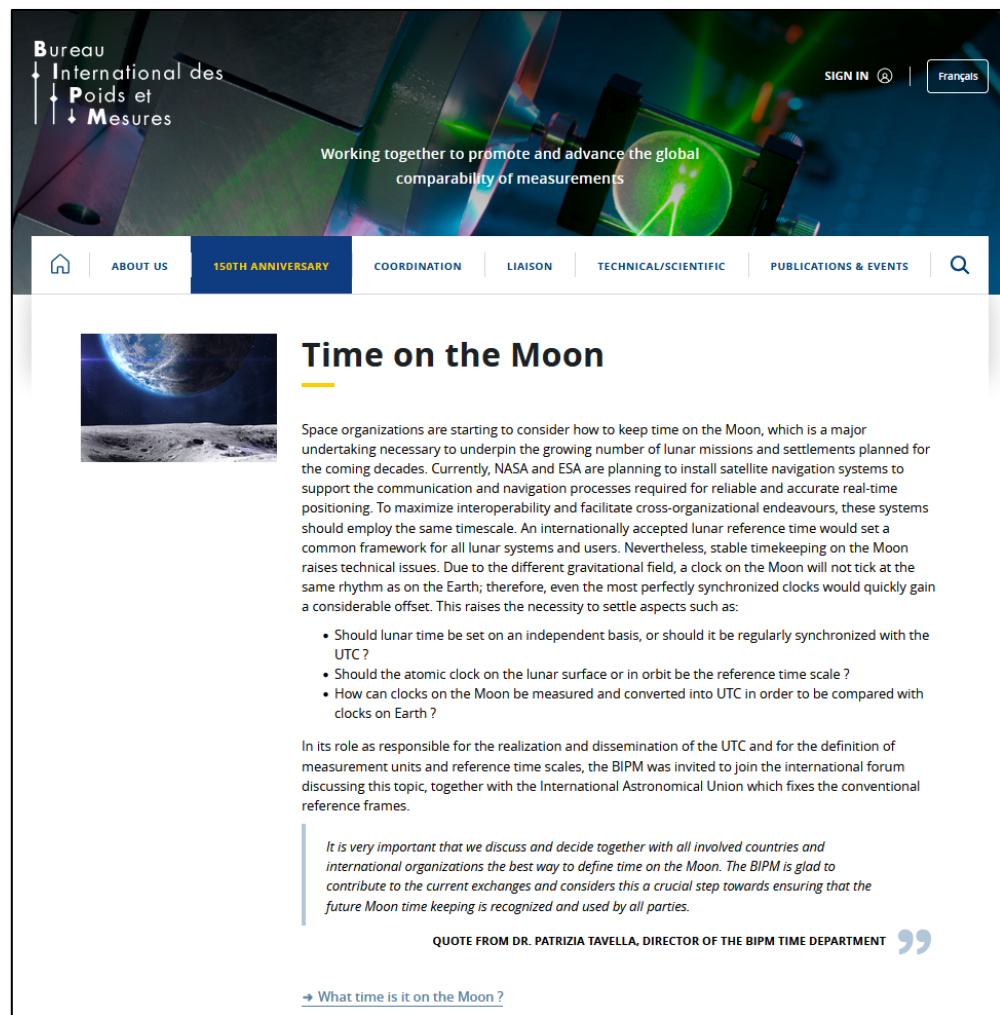


月時系の3つの候補について

関戸 衛、井戸哲也：時空標準研究室

竹内央：JAXA/宇宙科学研究所

BIPMへの期待・BIPMの関心



- 現在、**NASA と ESA は、衛星ナビゲーション システム**を導入する計画を立てています。
- **相互運用性**を最大限に高め、組織間の取り組みを促進するために、これらの**システムは同じ時間スケールを採用する必要があります。**
- ただし、重力場が異なるため、月の時計は地球と同じリズムで刻みません。したがって、最も完璧に同期された時計でさえ、すぐにかんがりのずれが生じます。
- **UTC の実現と普及、および計測単位と基準時間スケールの定義を担当する BIPM は、従来の基準フレームを定める国際天文学連合とともに、このトピックを議論する国際フォーラムに参加するよう招待されました。**
- 「月における時間の定義方法について、関係各国および国際機関と共に議論し、決定することが非常に重要です。*BIPM*は、この課題に貢献できることを嬉しく思っており、これは将来の月における時間計測がすべての関係者に認識され、利用されることを確実にするための重要な一歩であると考えています。」

<https://www.bipm.org/en/-/2023-05-22-moon-time>

2024年IAU（国際天文学連合）総会決議：

Resolution on the establishment of a coordinated lunar time standard by international agreement

Considering

1. that the time coordinate of a reference system is designated by a coordinate time, which in the terminology of General Relativity, is not given by any real clock,
2. that increased robotic and human activity on the Moon in the near future requires a practical lunar reference time scale, internationally recognized, and that is suitable as the basis for scientific measurements there,
3. 3. that Coordinated Universal Time (UTC), as established by the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) based on international collaboration and coordination, has been a successful worldwide reference time scale for operational systems in the near-Earth environment,

Recommends

1. the relationships between the possible versions of a lunar reference time scale and other time scales, in particular a lunar coordinate time and UTC, are pursued in collaborative agreement among the relevant international organizations.

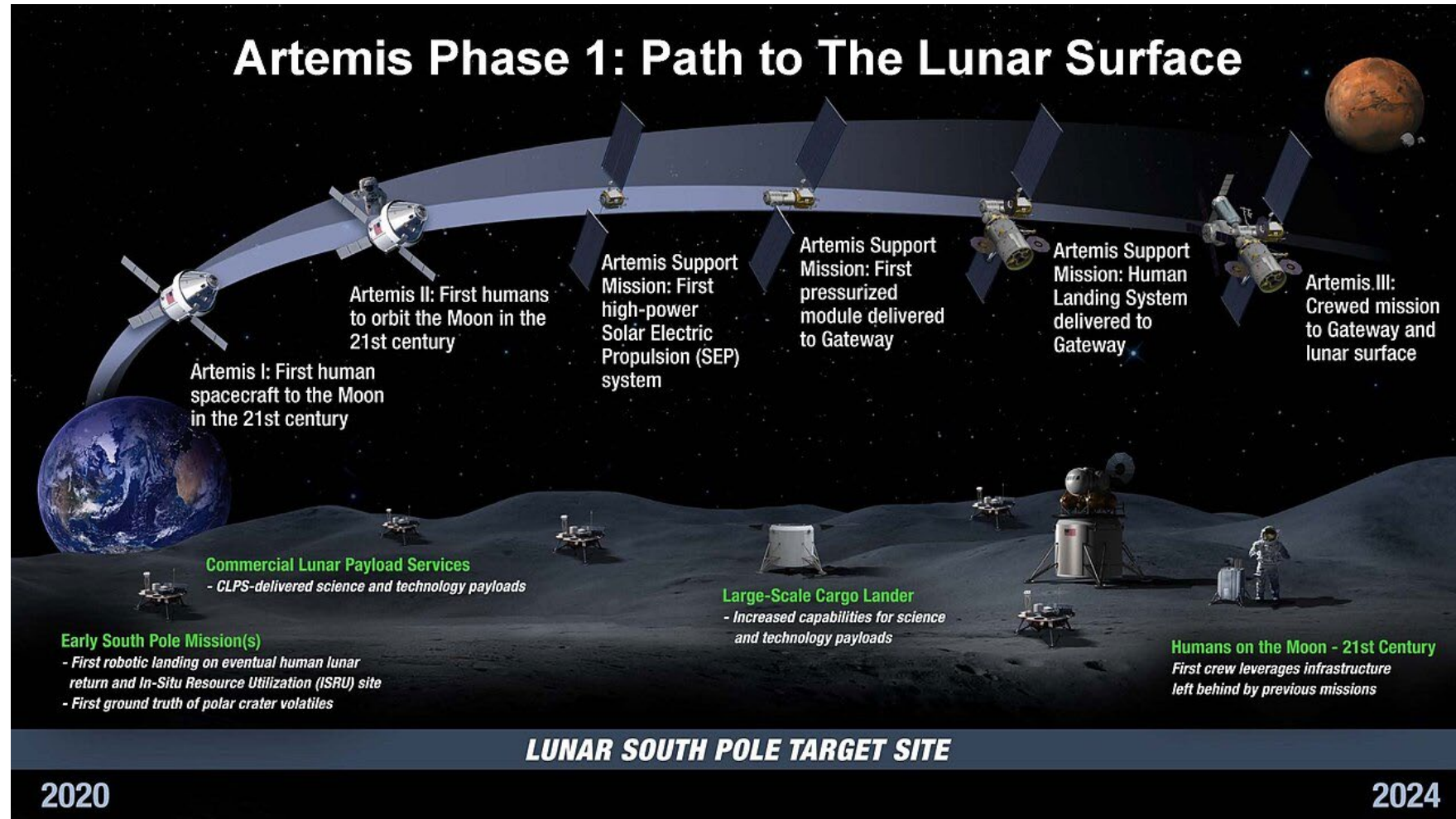
以下のことを考慮して

1. 基準システムの時間座標は、一般相対性理論の用語では、実際の時計によって与えられない座標時間によって指定されること、
 2. 近い将来、月面でのロボット活動および人間活動の増加により、国際的に承認された、月における科学的測定の基礎として適切な実用的な月基準時間スケールが必要であること、
 3. 国際協力と調整に基づき国際度量衡局（BIPM）によって確立された協定世界時（UTC）は、地球近傍環境における運用システムのための世界的な基準時間スケールとして成功を収めていること
1. 月基準時間スケールの可能なバージョンと他の時間スケール、特に月座標時間とUTCとの関係について、関係国際機関間の協力的合意に基づいて検討することを勧告する。

米国アルテミス計画

米国アルテミス計画

1. Artemis I(2022) : 月周回軌道探査機を投入し地球に帰還する。
2. Artemis II(2026): 4名の宇宙飛行士が乗った探査機が月の周辺まで行き、地球に帰還する。
3. Artemis III(2027): 宇宙飛行士が月に降り立ち、活動後地球に帰還する。
-
7. Artemis VII(2032): 5度目の有人月着陸。月面住居可能な乗り物
8. Artemis VIII(2033): 月面への基地建設開始
-
10. Artemis X(2035): 月面への長期滞在



諸国の月探査計画、Lunar Gatewayなど

Lunar Gateway: 米国アルテミス計画の一部として、CSA（カナダ）、ESA、JAXA、MBRSC（Mohammed Bin Rashid Space Centre：ドバイ）が協力して建設する月周回軌道上の通信ハブ。2027年ころから打ち上げが始まる予定。

Lunar Net: ESA, NASAが協力し、月と地球のデータリンクを供給するほか、軌道決定や月面のナビゲーションも提供する。

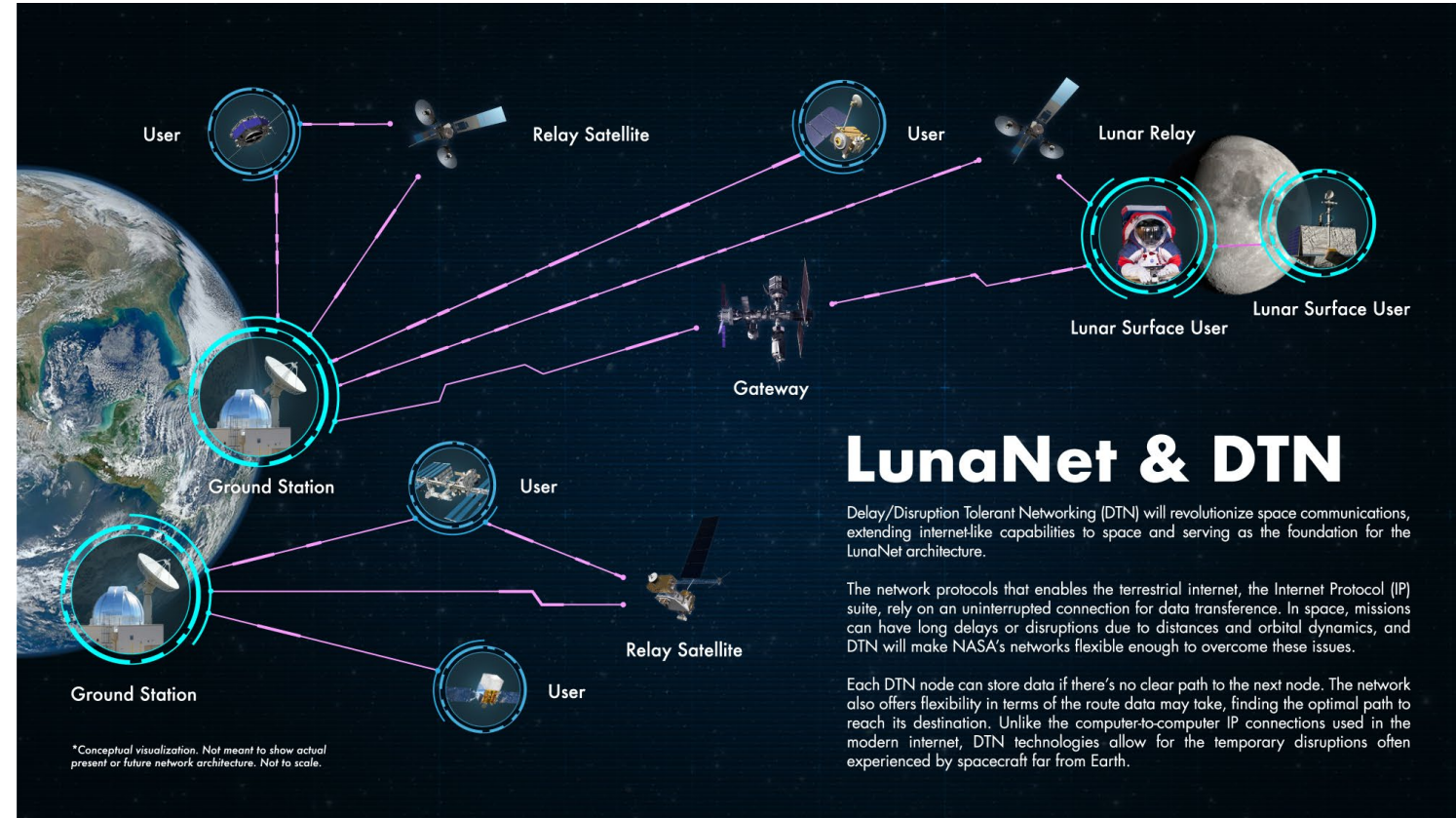
欧州：Moonlight initiative：5基の月周回衛星を使った月周辺のナビゲーションシステム

中国：嫦娥計画(Chang'e program)：軌道周回、着陸、サンプルリターン(2020) など

インド：無人月面探査機チャンドラヤーン3号着陸成功(2023)。2040年までに友人月面探査を計画

日本：アルテミス計画への参加。与圧月面ローバの開発など

...

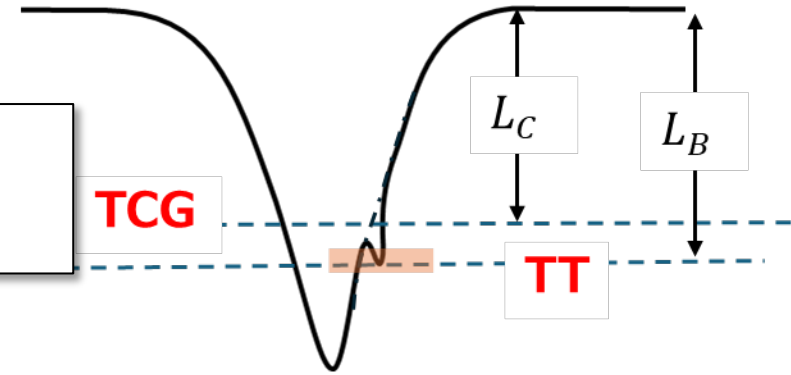


出典Wikipediaより

https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/Moonlight

地球の時系

$$\frac{dT_{CG}}{dT_T} \approx 1 + 6.969290134 \times 10^{-10}$$



地球周辺の時系

TT (Terrestrial Time): ジオイド(*)上の時系。TCGをジオイドの重力ポテンシャル+自転速度分だけスケールリングした、地球中心に対して静止した**座標時**。TAI (国際原子時 Temps Atomique International) : TTの実現値。UTC (協定世界時 Coordinated Universal Time)

TCG (Geocentric Coordinate Time): 地球中心に対して静止した (地球の重力の影響がない) 時計の**座標時**

座標系と座標時

地球中心天球基準座標系:**GCRS** (Geocentric Celestial Reference System) ⇔ 対応する座標時は**TCG**

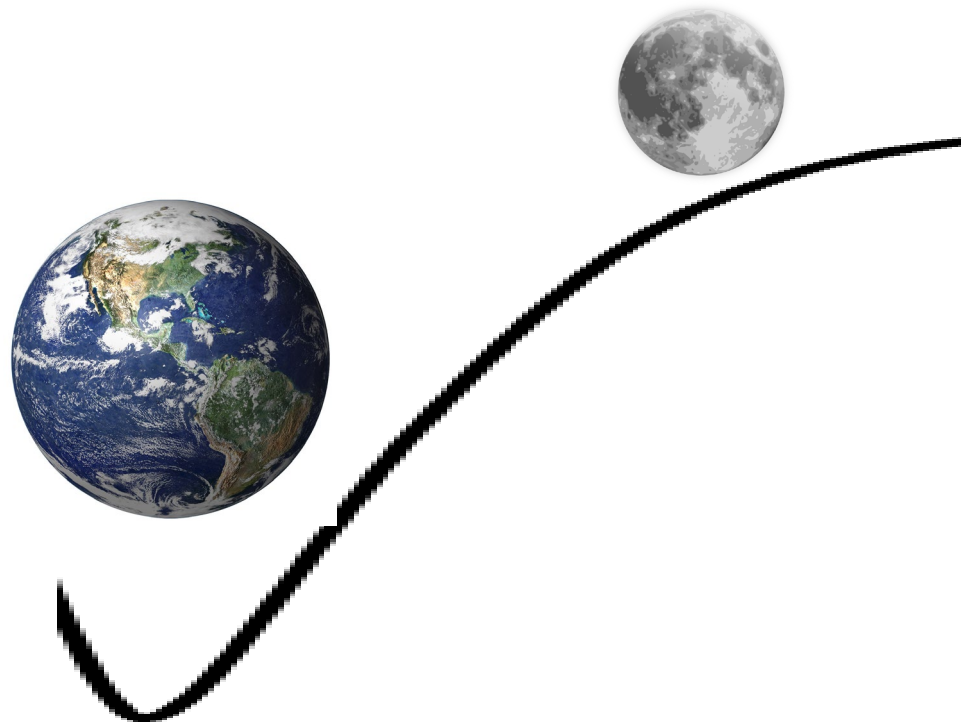
太陽系重心天球基準座標系:**BCRS** (Barycentric Celestial Reference System) ⇔ 対応する座標時は**TCB** (Barycentric Coordinate Time) または **TDB** (Barycentric Dynamical Time)

$$\frac{dT_{CB}}{dT_{DB}} \approx 1 + 1.550519768 \times 10^{-8}$$

IERS Conventions 2010より

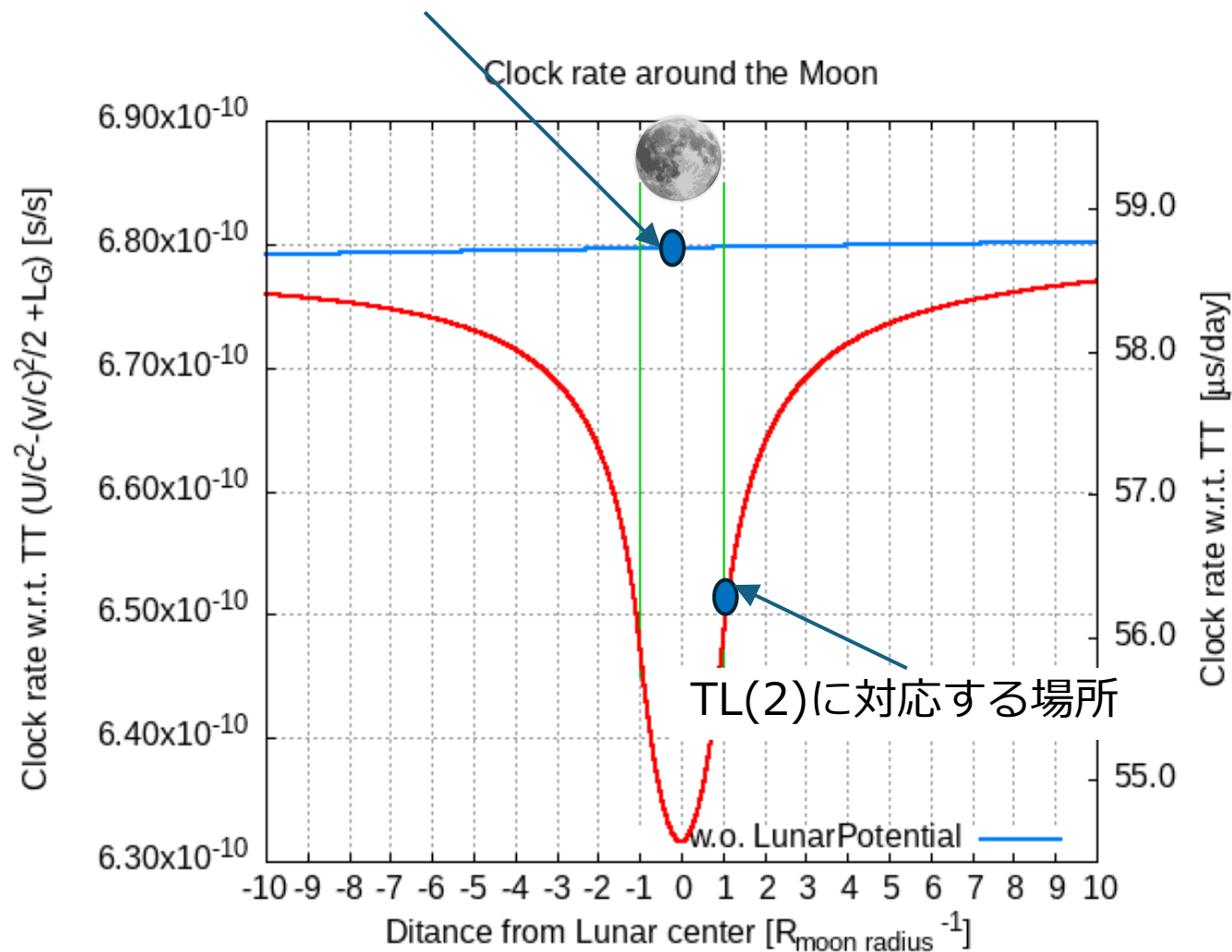
「地球の時系」と月の時系

$$\frac{d\tau}{dt} = 1 - \frac{GM_{Earth}}{rc^2} - \frac{1}{2} \frac{V^2}{c^2}$$

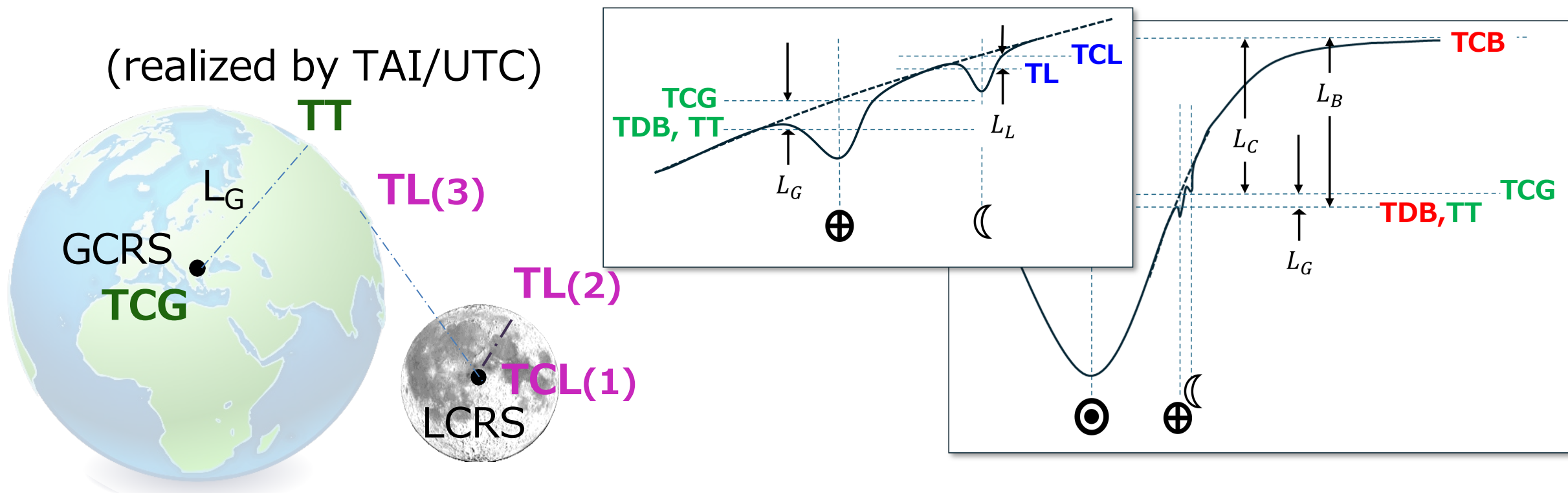


1. 月では、UTCより58.7 μ s/day早く進む
2. 地球―月距離は4.2万km（約12%）程度変動するため、時計の歩度も変動する。

TCL(Lunarcentric Coordinate Time)に対応する場所



提案されている3つの月標準時系候補



- (1) TCLをつかう。=> TTとは 6.7×10^{-10} ($58\mu\text{s/day} \sim 1\text{秒/50年}$) のレートがある。
- (2) TCLを 3×10^{-11} 程度 (月面の標準ポテンシャル) スケーリングして使う。月面上に置いた時計の歩度=> TTとは 6.5×10^{-10} ($56\mu\text{s/day} \sim 1\text{秒/50年}$) のレート
- (3) TTとの差が周期項のみとなるようにスケール調整した時系を使う。=>地球TTと同じ歩度。月面に置いた時計は 6.4×10^{-10} 程度 調整しなければならない。

長所・短所、これまでに把握している意見など

1) TCL (月中心時系) :

- 理想的な時計を月表面に持ち込んだ場合、レート差 $2\mu\text{s}/d = 2.3 \times 10^{-11}\text{s/s}$ が生じる。
- TCL-TTの (地球上の時間に対する) レート $58\mu\text{s}/d = 6.7 \times 10^{-10}\text{s/s}$ (1 秒/ 5 0 年)がある。
- IAG,IAUで定義が進んでおり、ESAは国際機関の推奨として使用の意向
- 長さや質量定数のスケーリング (新規の計量テンソル) 導入不要

2) TL (月の基準表面) :

- TL-TTの (地球上の時間に対する) レート $56\mu\text{s}/d = 6.5 \times 10^{-10}\text{s/s}$ (1 秒/ 5 0 年)がある。
- NASAが推奨の意向
- 新しいスケーリング定数 $L_L = 3 \times 10^{-11}$ を導入のため質量パラメータGMや長さが $(1-L_L)$ 倍異なる座標系となる。

3) TL* (TTと同じレート) :

- 新しいスケーリング定数 $L_L^* = 6.7 \times 10^{-10}$ を導入のため質量パラメータGMや長さが $(1-L_L^*)$ 倍異なる座標系となる

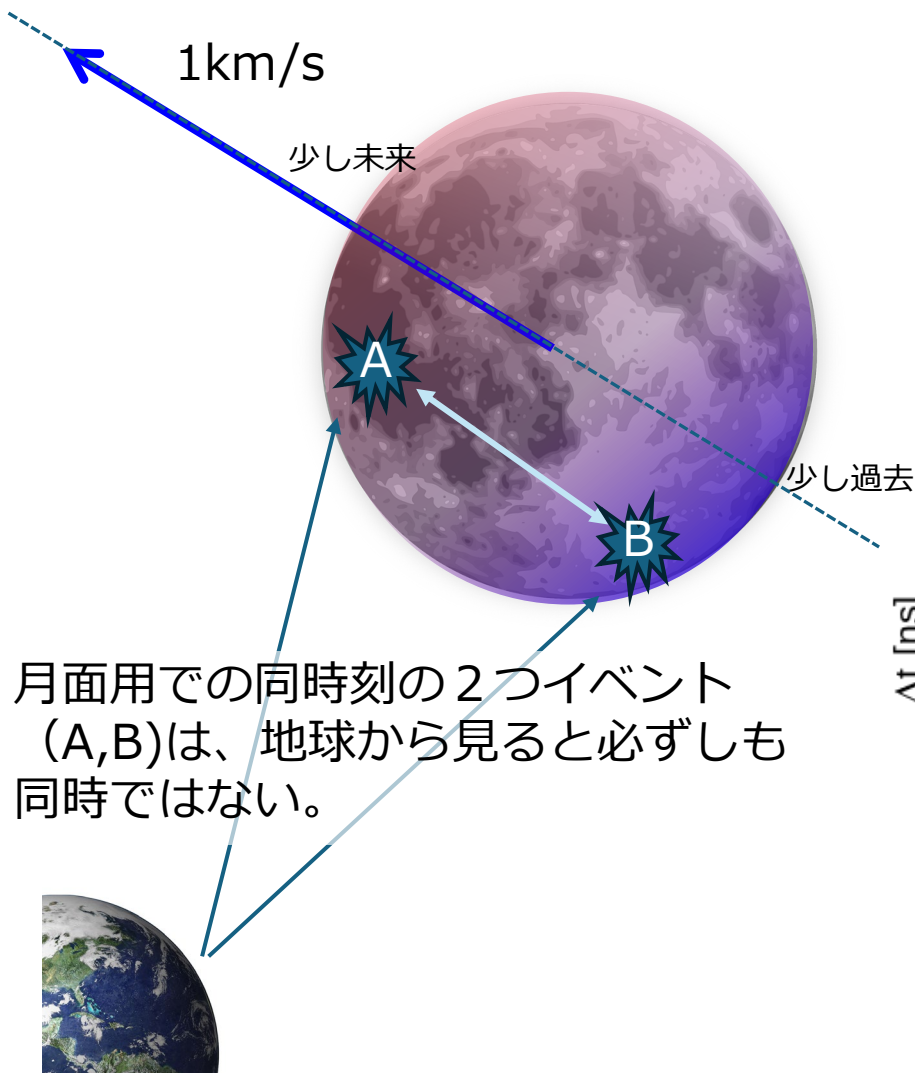
• その他の意見

- ns 精度で地球 (UTC)と時刻同期する場合、いずれのOptionの場合も、同期には空間座標の指定 (相対論的 4 D座標変換) が必要。
- 現在計画中の月周回衛星プロジェクトは当面地球のGNSS衛星信号を受けて軌道決定など行うことを想定

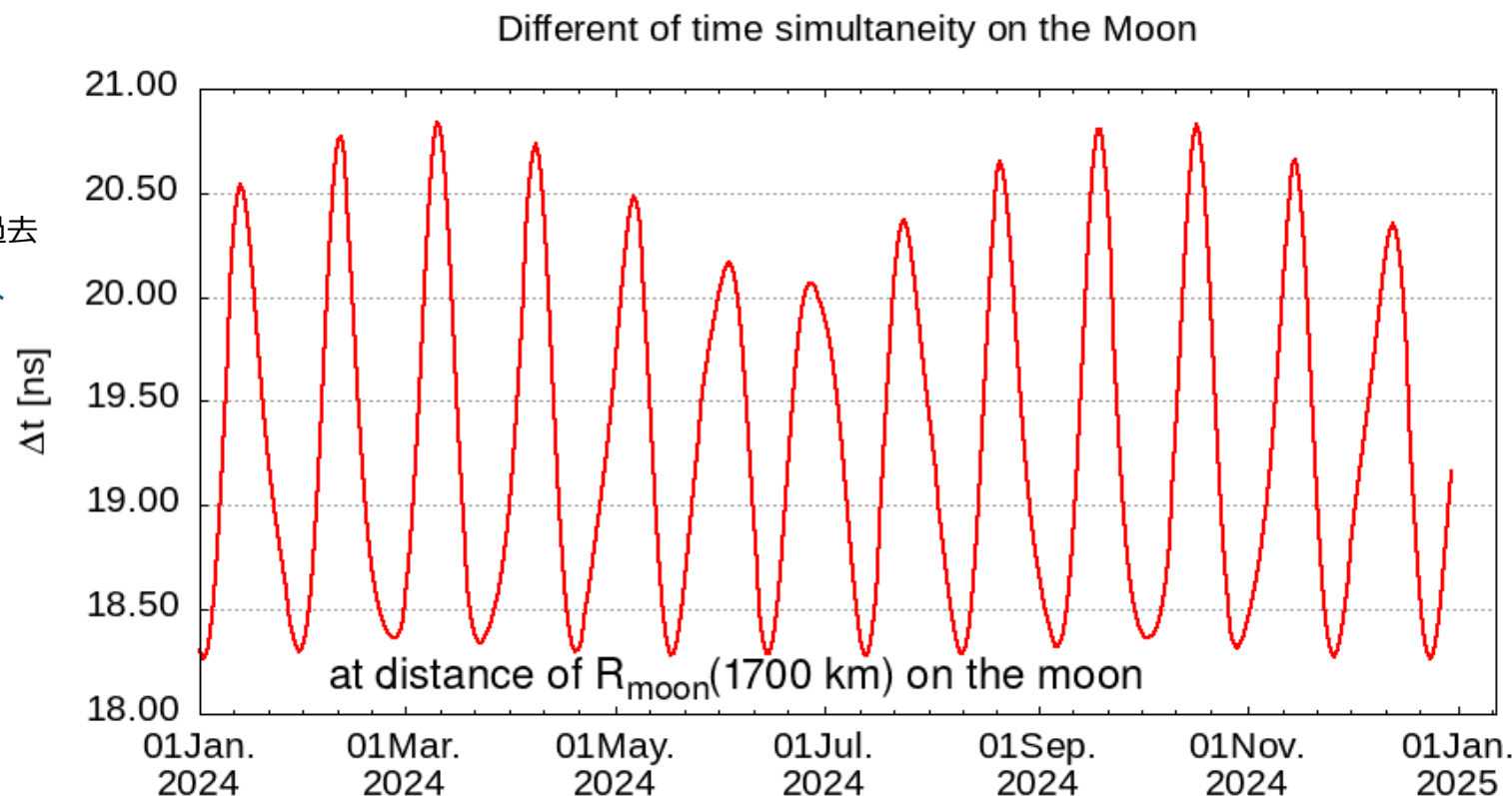
同時性の問題

場所によって同時刻が異なる。
どの選択肢の場合でも。

$$\Delta t = \frac{\vec{v} \cdot \vec{x}}{c^2}$$



月面上で、**月の半径程度離れた地点間の場合**、地球で同時刻な事象が**20ns**程度違う。その差は、毎月**2ns**程度変化する。



月時系について：月・惑星・宇宙開発専門家の意見募集

月周回衛星を利用した地球のGNSSに類似した位置・時間・ナビゲーションのシステム構築の計画が、各国の宇宙機関で計画され進められている。その際に使用する国際的に共通な月時系を定義する必要があり、BIPM (国際度量衡局) CCTF (時間周波数諮問委員会) として、地球のTT, UTCと将来のトレーサビリティも考慮した推奨時系を決めたい。そこで、宇宙機関、測地、天文分野方々に科学観測・宇宙開発の観点から、望ましい月時系についての意見を伺いたい。

月時系についてのアンケート

Question) 将来の人類の宇宙観測の観点、またはあなたのこれまでのGNSS観測・測量などの経験に基づいて、お答えください。月時系の3つの選択肢のうちのどれか1つを推薦・棄却する理由（利点、または制約）はありますか？ そのほか、自由なご意見をお寄せください。

回答：

宛先： Pascale Defraigne (p.defraigne@oma.be) 関戸衛(sekido@nict.go.jp)

締め切り： 11月14日（金）

3つの時系の違いについて「わかりにくい」、「説明してほしい」などご要望ありましたら説明の機会を検討しますので関戸（sekido@nict.go.jp）までご連絡ください。ご理解いただき、アンケートに回答をお寄せいただきますようお願いいたします。

BIPM Lunar Time Workshopのご案内

<https://www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/wg/cctf-tgmt/2025-11-18>

月時系に関してご意見・興味のある方はどなたでもご参加いただけます。日本時間の遅い時間帯ですが、奮ってご参加ください。

日時：18 Nov. 2025 13-15 UTC (22-24 JST)

場所：Online

Registration link: <https://bipm-org.zoom.us/meeting/register/GGlYzklwRqmOmuDU25PR3g>

補足資料

月時系について：現在提案されている月標準時系の候補

現在、月周辺の標準時系として3つの候補が提案されています。

1. TCL^{注1)}(Lunar Coordinate Time：月の重心に静止した時計の座標時)を使う。
2. TL (Lunar Time:月表面の標準ポテンシャル面を基準とした座標時)を使う。
TLはTCLを 3×10^{-11} 程度スケーリングして定義される。
3. 地球上のUTC(座標時TT)と同じレートに調整した時系TL*を使用する。TL*はTCLを 6.4×10^{-10} 程度スケーリングして定義される。

参考資料：

https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/research/LunarTime/Survey_and_Invitation_LTWorkshop.pdf

(英文意見募集)

<https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/ivstdc/siryou/2025/LunarTime/LunarTimeOptn-j3.pdf>

(日本語説明資料)

<https://arxiv.org/abs/2507.21597>

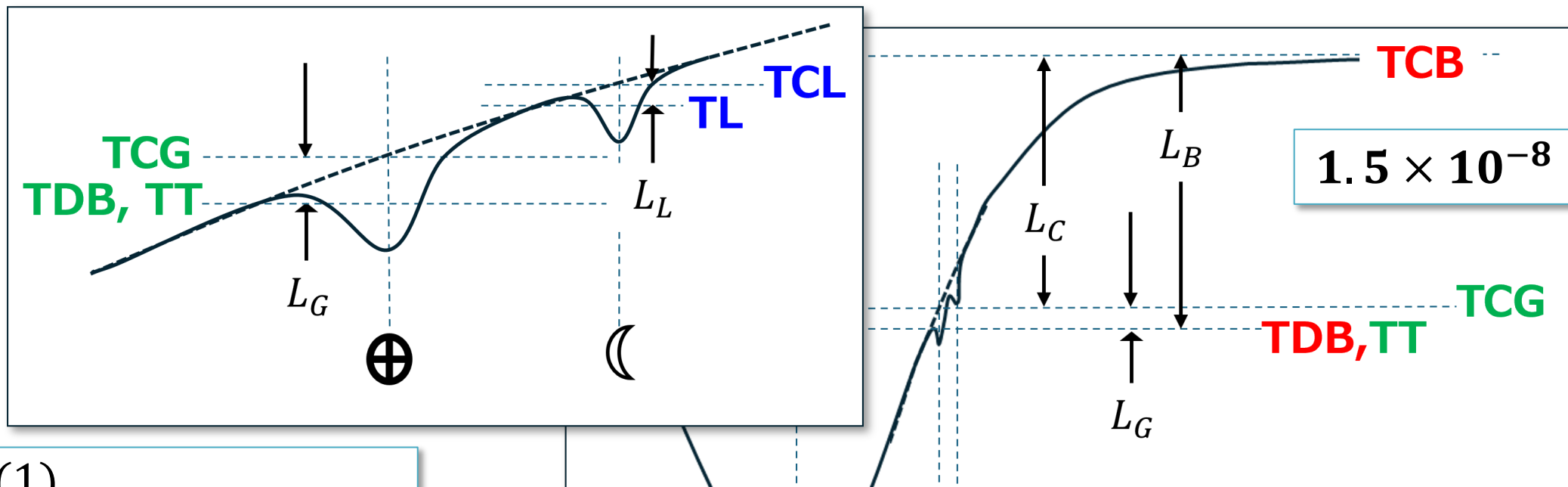
(説明論文 原稿)

https://www2.nict.go.jp/sts/stmg/ivstdc/siryou/2025/LunarTime/LunarTime202510_Domestic.pdf

(本資料)

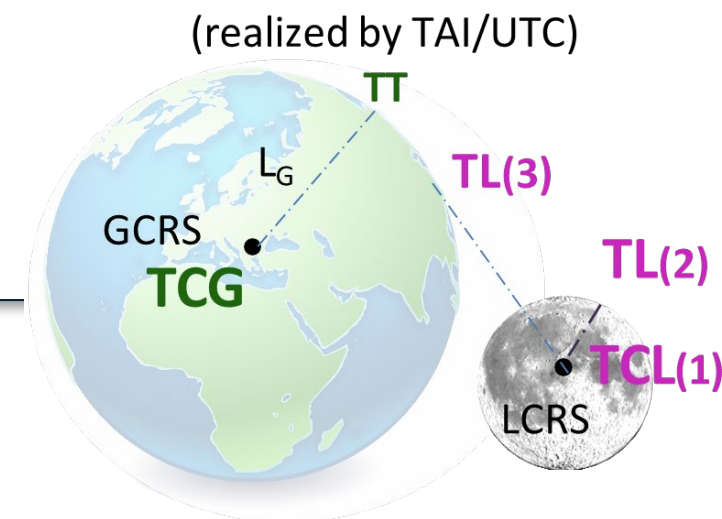
注1)TCL(Lunar Coordinate Time):2024IAU総会決議参照 <https://www.iau.org/Iau/Iau/Publications/List-of-Resolutions.aspx>

提案されている月標準時系候補

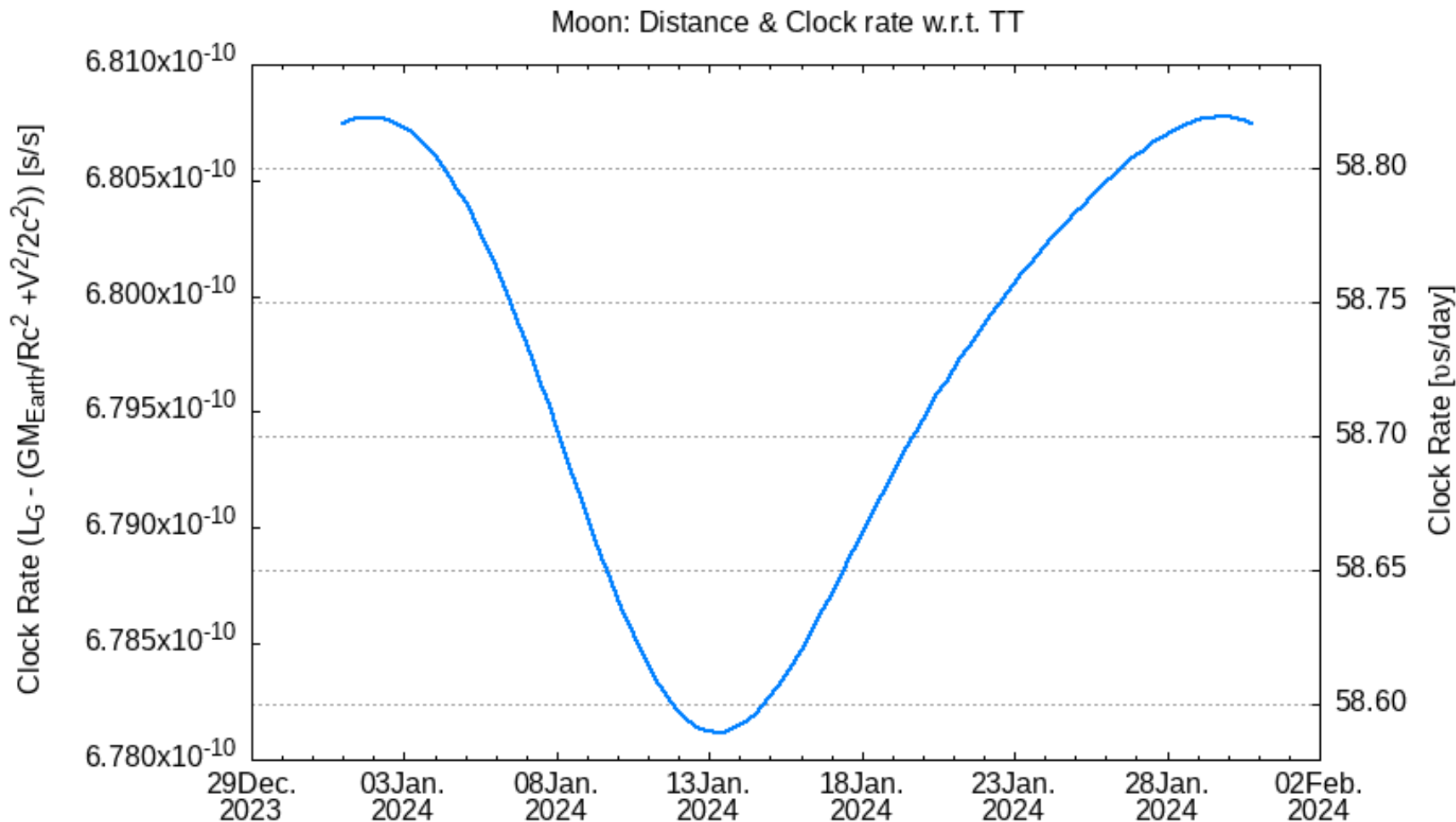


$$\frac{dTCL(1)}{dT} = 6.7 \times 10^{-10}$$

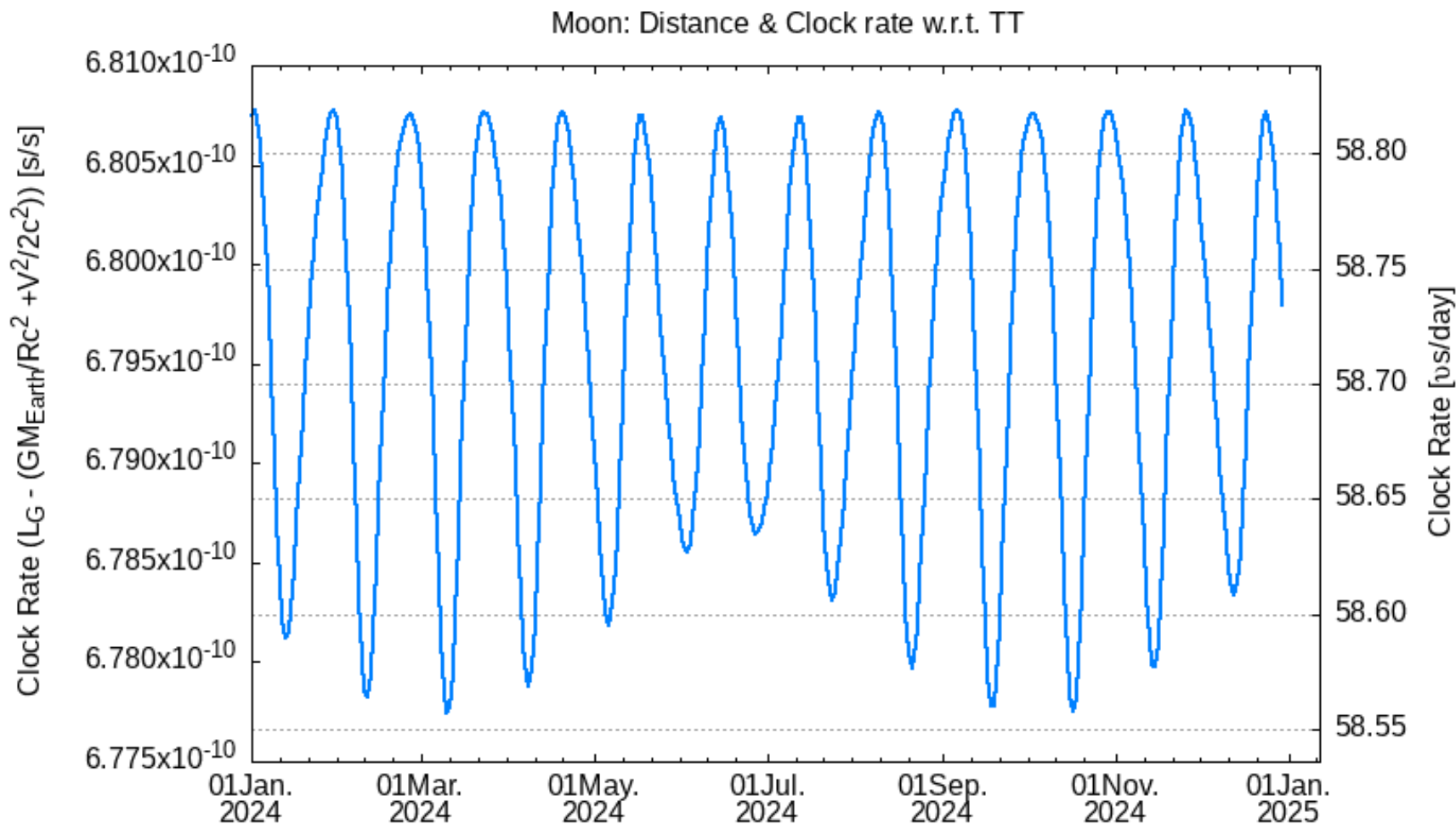
$$\frac{dTCL}{dT} = 3.1 \times 10^{-11}$$



地球一月の距離は変化するので (TCL - TT)
のスケールも変化する (1 か月)。



地球一月の距離は変化するので (TCL - TT)
のスケールも変化する (1年)



座標系と座標時

太陽系重心天球基準座標系:**BCRS**(Barycentric Celestial Reference System)

⇔対応する座標時は**TCB**: Barycentric Coordinate Time

または **TDB**:Barycentric Dynamical Time(JPL 惑星暦)

地球中心天球基準座標系:**GCRS**(Geocentric Celestial Refence System)

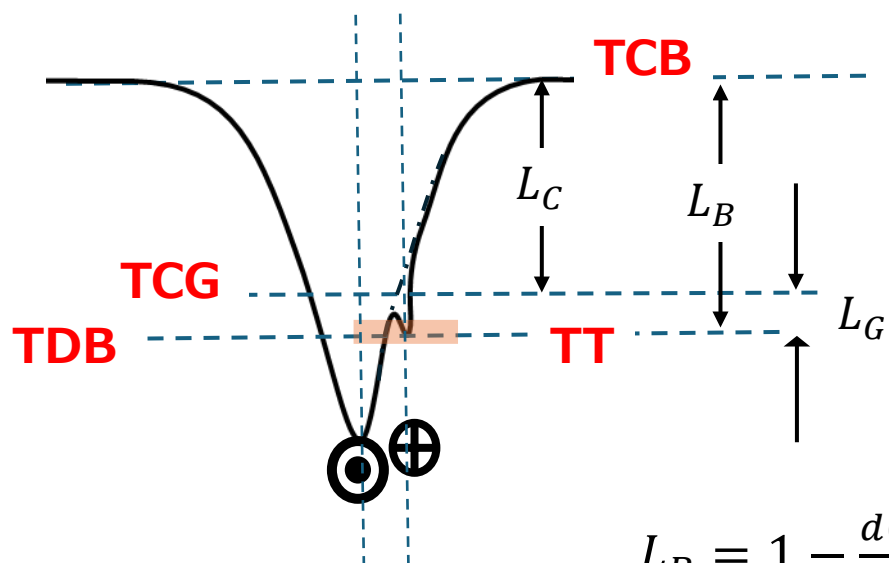
⇔対応する座標時は**TCG**: Geocentric Coordinate Time

地球周辺の時系

TT (Terrestrial Time): ジオイド (*) 上の時系。

TAI (国際原子時Temps Atomique International) :TTの実現値。

UTC (協定世界時Coordinated Universal Time)



⇐太陽・地球の重力ポテンシャル
とスケーリングファクタの関係を
示す模式図

$$L_B = 1 - \frac{d(TDB)}{d(TCB)} = 1.550519768 \times 10^{-8}$$

$$L_G = 1 - \frac{d(TT)}{d(TCG)} = 6.969290134 \times 10^{-10}$$

2.1 スケーリング

ポストガリレイ計量テンソルは以下のように与えられます。

$$\begin{aligned} g_{00} &= -1 + 2\frac{U}{c^2} + O(c^{-4}) \\ g_{0k} &= O(c^{-3}) \\ g_{mn} &= \delta_{mn}(1 + 2\gamma\frac{U}{c^2}) + O(c^{-4}) \end{aligned} \quad (1)$$

スケールファクター

$$l = 1 + L \quad (2)$$

でスケーリングされた無限小の4次元のイベント間の線素は以下のようにあらわされます。

$$\begin{aligned} ds^2 &= l^2(g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu) \\ &= l^2 \left[-\left(1 - 2\frac{U}{c^2}\right) c^2 dT^2 + \left(1 + 2\gamma\frac{U}{c^2}\right) \sum_{i=1}^3 dX^{i2} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

ここで G は重力定数で、 $U = \sum_j \frac{GM_j}{R_j}$ は対象となる位置における重力ポテンシャルを J (=重力源) に対して総和を取ったものです。この世界線に沿って動く点の固有時 τ は

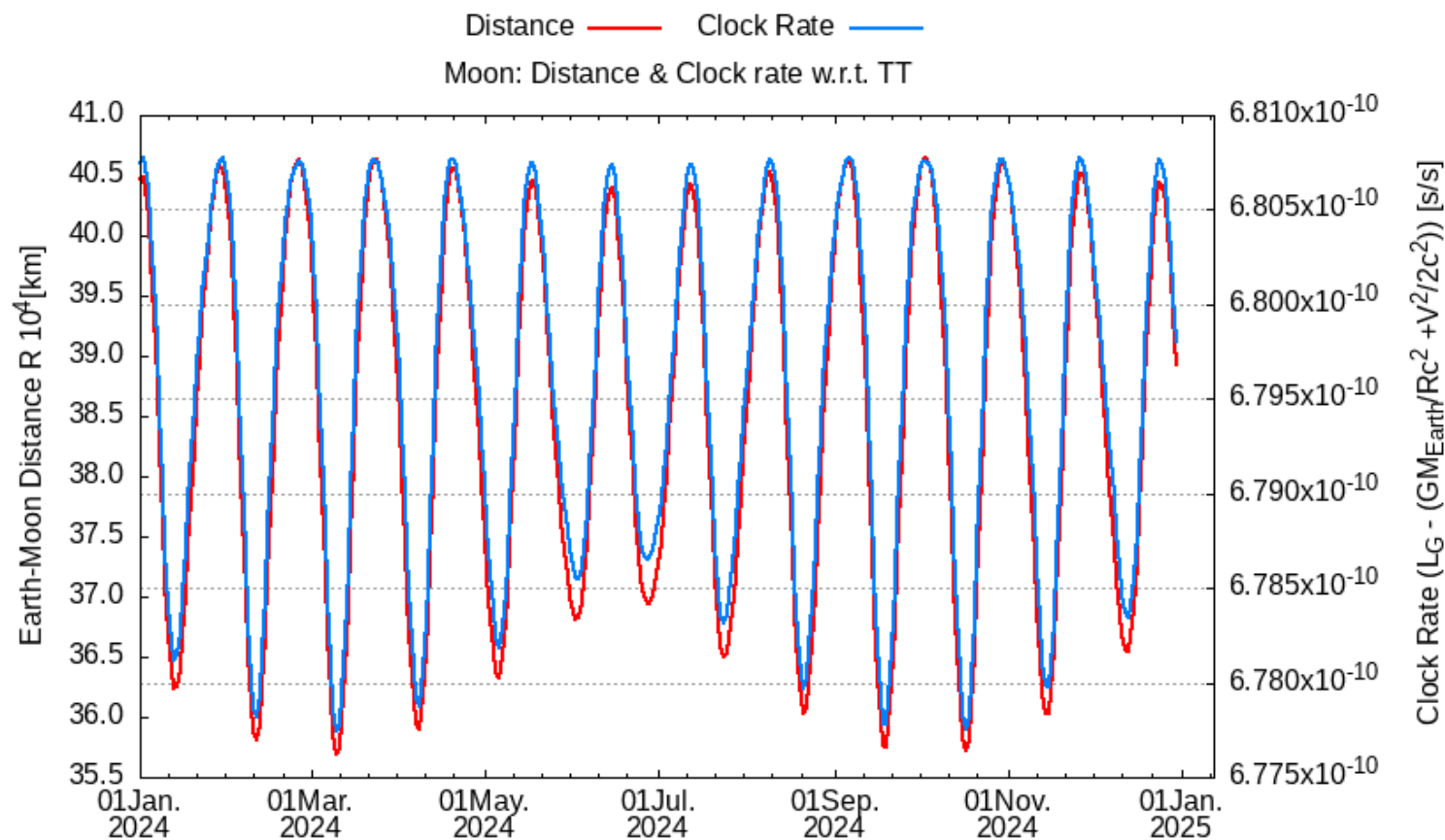
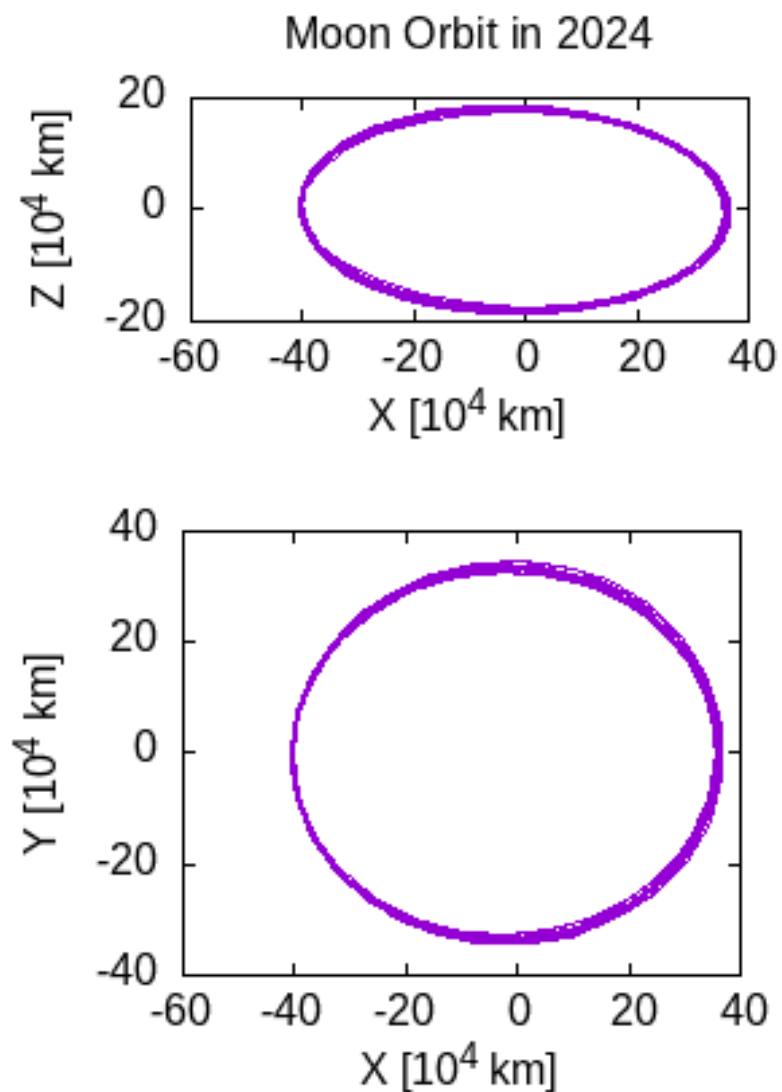
$$d\tau = -\frac{ds}{c} \quad (4)$$

であり、式(2)と(4)を(3)に代入して $1/c^2$ のオーダーまで残すと、座標時と固有時のレート差は

$$\frac{d\tau}{dT} = 1 - \frac{U}{c^2} - \frac{V^2}{2c^2} + L, \quad (5)$$

となります。ここで V は、興味の対象となる点の座標速度です。興味の対象となる点がジオイド上であれば τ は TT であり、スケールファクター (L) を適当に選ぶことで、座標時 T と平均的に同じレート(スケール)にすることができます。

地球に対する月の相対運動 (DE406)



日本の計画

<https://insidegnss.com/arkedge-space-selected-by-jaxa-to-lead-lunar-navigation-system-development/>

出典： ArkEdgeSpace 社のHPより

<https://arkedgespace.com/projects/lunar-infrastructure>

月測位実証衛星 (初号機)

- 月圏でのGNSS※3受信に基づく軌道／時刻決定と オンボード時刻同期の実証
- 月航法信号の評価
- 衛星の仕様
 - サイズ： 50 cm x 50 cm x 50 cm
 - 重さ：約 100 kg
- 2028 ～2029年に打ち上げ予定



Global Navigation Satellite Systems
 Engineering, Policy, and Design

GPS

Galileo

GLONASS

BeiDou

RNSS/SBAS

Menu

[Home](#)
[Applications](#)
[Columnists](#)
[Insider](#)
[Subscribe](#)
[Custom Content](#)
[Become an Advertiser](#)



White Rabbit Z16

- Sub-Nanosecond Time Transfer
- Metro Area Network Distances & Beyond
- 14 Optical Timing Ports

[Learn more](#)



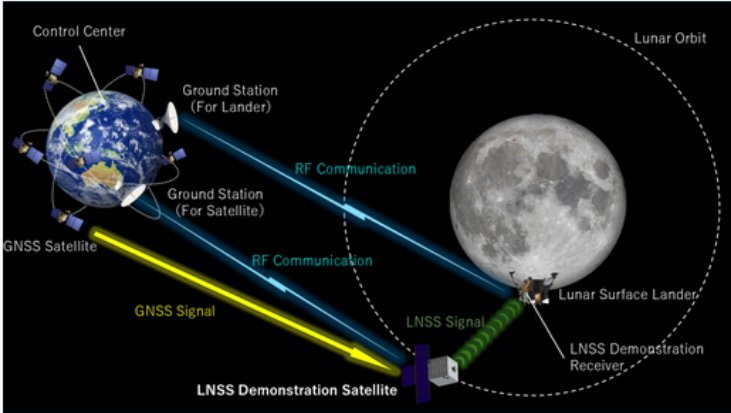
ArkEdge Space Selected by JAXA to Lead Lunar Navigation System Development

December 4, 2024

By Inside GNSS







LNSS Demonstration Mission Configuration. Image: ArkEdge Space.

ArkEdge Space Inc., a Japanese space start-up based in Tokyo, has been selected by the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) under its Space Strategy Fund to lead the development of advanced lunar navigation technology.

ArkEdge Space will utilize its expertise in the planning and design to mass production and operation of micro-satellite constellations to lead the development of a next-generation Lunar Navigation Satellite System (LNSS), a vital component to the International "LunaNet" initiative, driven by NASA (National Aeronautics and Space Administration), ESA (European Space Agency) and JAXA. LunaNet seeks to establish essential infrastructure to support sustainable lunar exploration and foster growth of the lunar economy. See recent LunaNet coverage in *Inside GNSS* [here](#) and access the *Inside GNSS* [webinar on LunaNet](#).

This program, supported by up to 5 billion yen (US\$32.5 million) over four years, tasks ArkEdge Space with developing a 100 kg class micro-satellite, developing crucial technology including the:



Driving GNSS resilience
Read about the latest in GNSS resilience and security technologies—from APNT to OSNMA.
Download Velocity 2024 for free now!



GEODNET
THE WORLD'S LARGEST RTK NETWORK.



Trimble APX RTX™ [Learn More](#)



Inertial Labs
HIGH-PERFORMANCE NAVIGATION
GRADE INERTIAL MEASUREMENT UNITS