

# 月の基準座標系に関する現状の国際規定

## Technical Specification on Contemporary Lunar Reference System

浅里幸起 齋藤雅行

Koki Asari Masayuki Saito

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構  
Japan Space Systems, General Incorporated Foundation

### 1. まえがき

ISO/TC 20/SC 14 委員会において、月の基準座標系に関する技術仕様書を作成し、発行するプロジェクトが進行している。国際連合の GNSS 国際委員会 ICG-18 に参加して、国際的な擦り合わせを行った。その結果を報告する。月の PNT については、国際的には NASA/ESA/JAXA が協力して作成している LunaNet<sup>1/</sup>が標準文書として認知されている。

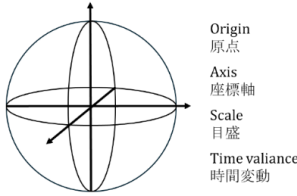
### 2. 座標系の規定

座標系を定めるためには、図1に掲げるように、その定義 (definition) と実現 (realization) が規定する必要がある。

定義は、図1左に示すように、原点 (origin)、座標軸 (axis)、目盛 (scale)、時間変動 (time valiance) を規定するものである。しかし、これらを定義しても、実際に原点や座標軸を目で見たり、手で触れたりして認識することはできない。

そこで、前記の定義に基づいて、実際に設置された基準点 (reference point) とその座標値のリストが、座標系の実現 (realization) と呼ばれるものとなる。これらが座標系の実体といえる。

定義 : Definition



実現 : Realization

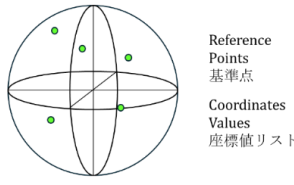


図1 座標系の定義と実現

現在月面上で使える基準点は、着陸船が残したレーザーリトロフレクターであり、過去のアポロやルナ計画で残されたものである。現在新しい着陸船が増えているが、基準点として使えるようになるには時間を要す見通しである。

### 3. ME系とPA系

月の基準座標系に関する現状の規定には ME (Mean Earth) 系と PA (Principle Axis) 系がある。

ME 系は、月の回転運動に基づき規定され、Z 軸は月の平均自転軸と一致し、月の子午線は地球重心方向の平均経度となっている。つまり、地球から見た正面が月の経度が0度の方向である。

ME 系は、今まで月の科学研究や地図作製で広く採用されてきた。従って、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という特長がある。

一方、PA 系は慣性モーメントの算出値に基づき、慣性主軸に沿って構成した座標系である。次に詳しく説明する。

### 4. PA系の論理

PA 系は NASA ジェット推進研究所 (JPL) で考案された月の座標系である。これは新しい考え方で工学的に興味深いので掘り下げて記述することにする。

3次元の物体は慣性モーメントテンソルを対角化し、慣性主軸 (PA) を求めることができる。そして慣性モーメントが最大の軸をZ軸とし、慣性モーメントが最小の軸をX軸に設定する。この時、興味深いことに X 軸は地球の重力の方向を向くことが示される。

月と地球の相互作用によって発生する潮汐ポテンシャルエネルギー  $U$  は、月の自転と地球の相対位置に依存する。このエネルギーはルジャンドル多項式を用いて式(6)のように表すことができる。

$$U = -\frac{GM_e M_m R_m^2}{r^3} \left\{ \frac{1}{2} (3 \cos^2 \theta - 1) \right\} \quad (6)$$

ここで、 $G$ : 万有引力定数、 $M_e$ : 地球の質量、 $M_m$ : 月の質量、 $R_m$ : 月の半径、 $r$ : 月と地球の距離、 $\theta$ : 最小慣性モーメント主軸と地球方向との角度である。

月がエネルギーを最小化するには、ポテンシャルエネルギー  $U$  を最小化する必要がある。エネルギーを  $\theta$  で式(7)のように微分して、その極小点を求める。

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = \frac{GM_e M_m R_m^2}{r^3} 3 \cos \theta \sin \theta \quad (7)$$

この式が 0 になる条件は次のとおりである。

$$3 \cos \theta \sin \theta = 0, \quad \sin 2\theta = 0 \quad (8)$$

$$\therefore \theta = 0 \text{ または } \theta = \pi \quad (9)$$

となり地球の方向を示す解 ( $\theta = 0$ ) が得られる。

### 5. あとがき

国際連合の GNSS 国際委員会 ICG-18 に参加して、国際的擦り合わせを行った結果としては、国際標準ではなく ISO の技術仕様書として作成し、ME 系及び PA 系を掲げる計画を立案した。最終的な国際標準は、Surveying Authorities によって規定される見通しである。本件について日本国内において諸賢の助言を求める次第である。

### 参考文献

/1/ NASA, LNIS: LunaNet Interoperability Specification, Accessed on 2024-10-17, <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/lunanet-interoperability-specification/>