

## 測月計画における月面周波数標準の可能性

周波数標準課 細川瑞彦, 今江理人

### 1. 序

SELENE計画では月探査機の2003年打ち上げを目指しており、そのなかのRISE計画においては相対VLBI、ドップラートラッキング、レーザー高度計などの精密計測技術にを用いた月の測地が実施される予定である。

この月探査計画ではさらに2005年のSELENE2打ち上げの検討も始まっているが、その際に、月面に高精度周波数標準を設置することによって月の測地、科学探査にどれくらい大きなインパクトがあるかを検討し、SELENE2のミッションに月面周波数標準設置を加える意義と可能性について検討する。

### 2. 現状

RISEは国立天文台を中心とした月測地計画。NASDA, ISASを中心とする月探査、SELENE計画の一環として進められている。RISE計画において2003年打ち上げの探査機に搭載予定で開発が進められているのは、相対VLBI用電波源、レーザー高度計の開発、リレー衛星の三つが柱である。

現在知りうる月の暦、月の形状と秤動では数十mの位置誤差が見積られる。これを高精度化し、月の起源、進化を探り、天体暦や基準座標系の高精度化とそこから広がる科学の諸分野に役立てよう、というのがRISE計画である。

#### 1) RISE機器の観測シナリオ

右の四段階が計画されている。

- a) 着陸機の位置決定
- b) リレー衛星の精密追跡による低次重力場の推定
- c) 初の月裏側のドブラー観測
- d) レーザー高度計による月の形状と重力異常の測定

#### 2) RISEによる月の科学

現状で柱となっているものは右のようなものである。

- a) 月のコアの密度から月の起源を探る
- b) 重力異常の力学と歴史から月の進化を辿る
- c) 月の2分性と月の初期進化
- d) その他

SELENE 2号機の議論が、既に始まっている。現在はSELENE1号機に携わっている人たちの一部だけのごく内輪の議論が行われている段階であるが、2005(+ )年頃、H-II(A)ロケットで打ち上げる、月着陸又は月周回を基本ミッションとする。具体的なミッション候補として、

- ・ ISASによるペネトレータ
- ・ NASDAによるローバ
- ・ NAOによる月面小型望遠鏡

を、うまく融合させることが検討され、昨今の宇宙開発を取り巻く厳しい状況の打開のため、より興味深いミッションアイデアを探している。まもなく1月22、23日に水沢で行われる惑星重力研究会でも議論が広げられよう。本格的には今年4月か5月に開催されるシンポジウムで広くアイデアが公募され、議論が始められる予定である。CRLはSELENE1号機ではやや乗り遅れた感があるが、SELENE 2に関しては今から考え始めれば決して遅くない。

### 3. 本論：月面に周波数標準が置かれたら何が出来るか？

先に挙げたようにSELENE 2号機の計画が考え始められているが、CRLの周波数標準、時空計測のポテンシャルを活かすのに、一つには月面に周波数標準器を複数設置することと、その周波数標準器を活用した探査計画が一つの有望な方向であるように考えられる。では、月面に周波数標準が複数個設置されたらばいったい何が出来るのか？ 思いつくところを列挙してみる。

#### ・VLBI

一般のVLBI、あるいはその精度をあげた相対VLBIも、基本は地上の2点での時間差測定であり、感度は視線に垂直、横方向の変化にある。奥行き方向の距離変化にはあまり感度はない。逆VLBIは月面上の2点の同期電波源を地上の一点で受けて月面での時間差、距離を求めようというものであり、逆に月面での電波源同士の相対的な奥行き方向に感度がある。逆VLBIは月より遠い惑星などの地球からの精密測地には必須となるが、月面に周波数標準を設置すれば初実験、検証実験を行うのに最適（火星の前に）。  
相対-相対VLBI - 同期電波源の確認と実証のための大きな柱  
月面2点、地上2点、4基線同時観測、どのような利点と可能性があるか。  
地上で周波数標準を持たない局でもVLBIが可能になる？

月面の電波源は相対VLBIにどのような役に立つか、と考えると、レファレンスとして広い範囲をカバーできる、という特徴が見いだせる（白道の歳差により赤緯 $\pm 25$ 度の全てを18.6年周期でカバー）。この目的のためには電波源が周波数標準器を備えて他のものと同期している、という必要性はないが。  
月は恒星に対して平均一日12度、2時間に1度程度の位置変化

月軌道VLBIの可能性 可搬局程度の、2m級アンテナでも月に設置できれば、一挙に月-地球間の38万km基線のVLBIが可能になるか？ UVカバレッジと30日の周期の問題は？

#### ・測距

時刻比較による距離決定

LLRを上回る精度（0.1nsで3cm）、減衰は1/距離<sup>2</sup>ですむ。（LLRは1/距離<sup>4</sup>）  
時刻比較に関してはETS-VIIIにて今江、木内を中心に従来の精度を超えた比較技術を開発予定！  
双方向でできれば、積分時間次第でmmオーダーの測距を達成する可能性もある。  
月面上の送受信施設（アンテナ口径、送信電力等）の制約を考慮する必要あり。

ドップラートラッキング

12桁以上（14桁？）の精度でのトラッキング、mm/sec以下の速度変動の検出  
対象として、地球、あるいは月周回衛星、その他探査機  
遠距離ドップラートラッキングと周波数安定度の関係（戻ってくる時間に発射時と不変）

月の距離、位置の精密測定は科学目的がいまのところ主眼となっている。月の測地、暦、座標の高精度化など、またノルトベット効果、強い等価原理の実証など、時空の物理も挙げられよう。  
実用目的などでの利点は何か？

#### ・時刻、周波数供給用として

静止軌道周波数標準より優れている点はあるか？  
安定した軌道を持つ月の上での時刻、周波数標準という利点はある。  
38万km程度（静止軌道の10倍以上）離れるので、地上への供給は、単純には100倍程度のeirpが必要になり、アンテナ口径を大きくするか送信電力をkWオーダーで出す必要がある。  
月は、常時見えるのは、地球の半分程度の範囲からのみ。日に一度の時刻比較用？  
地上へのサービスとなるとGEO+ 程度のところからがせいぜい？

#### ・原子標準の可能性

・衛星搭載水素メーザーを軟着陸させ、活用することができれば高安定度の標準が利用できる。

#### ・高精度化の可能性

原子泉方式では確度、安定度とも打ち上げ、落下時間に比例する。つまり同じ大きさなら（ルート6）倍確度、安定度が向上することになる。地球近傍の宇宙ステーション上より地球の重力ポテンシャルの影響が格段に小さいことは、確度評価上、好ましいとも考えられる。また、大きな原子泉の組立も、低重力、高真空の月面では容易になることが期待される。一方、軟着陸後の調整なども必要になると思われるため、その先の”月面基地”あたりでのテーマとなるのではない。

#### 4. まとめ

月面に高精度周波数標準が出来た場合の可能性を中心に、思いつくままを列挙してみた。VLBI、時刻比較、時刻と周波数の供給、などのテーマ、衛星搭載水素メーザーの活躍の場とならないか、ということなどが思い浮かぶ。科学目的と実用目的の両面から、また技術開発の興味から、など様々な観点から検討を進めていくことが必要になろう。現時点から考え始めて春のシンポジウムに臨めば、十分に先んじた計画を練ることが可能であると思われる。