

ILOM (Insitu Lunar Orientation Measurements) 計画

国立天文台・水沢観測所・RISE推進室

花田英夫

一月面小型望遠鏡による月回転観測と位置天文観測計画に関する提案

ILOM計画の概要

月面小型望遠鏡による月回転観測と位置天文観測 (ILOM: In-situ Lunar Orientation Measurement) 計画では、月面に設置する位置天文観測用望遠鏡 (写真天頂筒:PZTまたはアストロラープ) で多数の星の位置を1年以上にわたって観測し、望遠鏡の視野内の星の位置の予測値とのずれが月の回轉變動 (自転軸の傾きと自転速度の変化) や潮汐によっておこるので、ここから逆に月の回轉變動と潮汐を求める。月の回轉變動は物理ひょう動と呼ばれる。

ILOM計画では、月の物理ひょう動の観測精度を画期的に上げることによって、月の内部構造や物性、とくに中心部の物質が何であるか、それが溶けているかどうかを通して起源と進化を解明しようとするものである。そのために、個々の星に対してCCDの複数のピクセルに記録された星像の中心位置を1ミリ秒角 (1mas) 以下の精度で決定し、それらの星の一年以上にわたる軌跡を解析することによって月の物理ひょう動各成分の振幅や位相をこれまでの月レーザ測距 (LLR) より一桁以上高精度に推定する。月回転の高精度観測は月の科学にとって重要であるばかりでなく、将来の月面からの超高精度位置天文観測を行う場合の座標系を確立する上でも不可欠の観測である。

ILOM計画の背景と科学目標

これまで月の内部構造に関する重要な情報は、おもに月の回轉變動の観測から得られてきた。例えば、1) 物理ひょう動から得られる力学的扁平率と重力場の低次項から慣性モーメントを求め、金属核の存在を示す、2) 自転速度のカッシニ状態からの進みを内部の消散で説明し、流体核の存在を示唆する、3) 自由ひょう動の励起源を内部の消散で説明し、流体核の存在を示唆する、4) 物理ひょう動の消散項を内部での消散で説明し、流体核の存在を示唆する等である。

このうち、LLR の観測から物理秤動の成分に消散項が検出されたことについては、消散メカニズムとして下部マントルの固体摩擦による消散と、マントル-流体核間の摩擦による消散が考えられ、前者は周波数に依存し後者は周波数に依存しないという仮定のもとに、周期の異なる消散項を統一的に説明するためには後者の消散が必要であり、これが流体核存在の根拠であった (Williams, 2001)。しかし、消散項の振幅は高々数ミリ秒角程度であり、LLRの観測だけでは結論づけるのは困難である。

上記のように、最近の解析結果の中に金属核、流体核の存在を示唆するものが多く、これらの存否は月の起源・熱史を解明する上で決定的な制約条件となる。最近では、海の玄武岩が月の表側にほぼ集中して存在することに代表される月の二分性(dichotomy)が、流体核からのホットプルームの時期と方向性で説明できる説 (Zhong et al., 2000)、ホットプルームの上昇が、月に一時期存在したかもしれないダイナモ作用のエネルギー源と核内の熱対流を説明できる説 (Stegman et al., 2003) 等が提唱されている。

月面観測の必要性

月惑星の回転変動の観測には、その星を周回する衛星からの観測、地球からの観測、月惑星表面でのその場観測が考えられるが、これまでの回転変動の観測はもっぱら地球からのレーザ測距 (LLR) で行われ、地球回転、公転の影響、観測日の偏在、反射鏡の位置の不確定等の影響で、上記のような観測精度ぎりぎりの現象については、LLRの観測結果だけでは結論を出せない現状である。LLR以外にもVLBI等が考えられるが、地球回転や月の公転の影響と大気の揺らぎの影響を避けることができず、精度の向上に限界がある。また、周回衛星から観測しようとすると、地球のGPSのように多数の周回衛星と地上観測局の組み合わせが必要であり、月面での観測以上に実現は困難である。したがって、LLRの精度を一桁以上向上させるには月面での観測以外に考えられない。

また、月面での位置天文観測から月の物理ひょう動を高精度に観測することによって、LLRの他の観測量の分離が良くなり、例えば月の公転の観測精度が飛躍的に向上することが期待される。これによって相対論の検証にも貢献できる。

月の中心核付近の深部構造を推定する手段は他に地震学的手法等があるが、地震学的手法は構造を推定するのには有効であるが、中心核の密度や状態を推定するのには有効ではないので、新しい方法による月の回転変動の観測との組み合わせが不可欠である。

月面には空気がないことから揺らぎによる精度の限界が無く、また、基盤の安定性の観点でも、風等による常時振動が無く、大きな月震も無いことから、精密観測で画期的な精度を達成するのに理想的な場所である。月面に小型望遠鏡を設置することにより、月回転の未解決な重要な問題を解決できるとともに、月の潮汐変形が初めて観測でき、これも月の進化の解明に重要な情報である月のマントルの粘弾性的性質が明らかになる。さらに、月面望遠鏡の技術を発展させていくことにより、画期的な高精度の位置天文観測、画期的な高分解能の干渉計観測にも道を開くことができる。

月面小型望遠鏡の概要

目標精度1ミリ秒角を達成するために、口径20cm、焦点距離を2mの望遠鏡を考えると、1秒角が焦点面で約10 μ mに相当するので、焦点面上で1/100 μ m=10nmの読みとり精度が必要となる。1辺10 μ mのピクセルを用いる場合には1ピクセルの1/1,000の読みとり精度が必要である。ピクセル以下どこまで読みとり分解能を上げられるかの限界は飽和電荷量によって制限され、実験的に求めていく必要がある。また、口径20cmの望遠鏡で観測できる星の等級は $m_v=14.3$ 以下となり、1°×1°の視野内に約440個ある。観測限界等級は口径、積分時間等によるので、同じ限界等級を保ちながら口径をさらに小さくできる可能性はある。

月面小型望遠鏡では、可動部分を最小限にし、望遠鏡の安定性を追求することによって1masの星像の位置決定精度を目指す。これは、月回転の観測精度にして、LLRの約1桁高精度に相当する。そのために、軟着陸とともに、熱制御、固定方法の技術、さらに、長期観測のための越夜の技術が必要である。また、高精度実現のための星像中心位置高精度測定のための技術は現在1/300ピクセルまで達成されており、さらに高精度化の開発を行う。望遠鏡の方向は固定されても、月回転によってある大円近傍の星のサーベイが可能であるので、同時に高精度の位置天文観測も実現できる。また、さらにその先の月面観測に備え、表面、内部の温度環境の変化、振動、傾斜、ダ

ストの浮遊等の月面の環境調査を同時に行う必要がある。月回転の観測は、将来の超高精度位置天文観測を行う場合の座標系の基準を決めるものであり、月面探査の早い段階で行うのが効果的である。

観測方式と着陸点の検討

望遠鏡観測を行う場所、すなわち着陸点を選定する場合に、期待される観測精度がもっとも重要であるが、その他に温度等の環境、電力供給の可能性、着陸の確実性等の観点も考慮する必要がある。

観測精度の観点では、天頂方向の星を観測する場合には、高緯度ほど自転軸の傾きに対して感度が高くなり、自転速度方向の変化に対しては感度が低くなる。一方、水平方向の星を観測する場合には、この関係が逆になる。月回転の観測では、自転軸の傾き2成分と自転軸の回りの回転変化1成分の合計3成分を同等の精度で観測するのが最も効率的である。天頂方向のみの観測では、3成分を観測するために中緯度に設置する必要があるが、各成分の精度は極あるいは赤道に設置した場合に比べて少し劣る。したがって、最高精度を達成するためには、天頂方向と水平方向を同時に観測し、極あるいは赤道に設置するのが理想的である。

温度環境の観点では、望遠鏡観測に限らず、一般的に温度変化が大きい低緯度地域は精密観測には適さない。月面望遠鏡では鏡筒の傾斜や変形の影響を受けにくい方式を採用するが、それでも温度変化が少ない場所に設置すべきである。

電力供給の観点では、月の一日の長さが約1ヶ月と長いので、夜の間の電力供給が非常に困難である。原子力等の特殊な電池を使用できれば、1年以上の長期観測の可能性もでてくるが、太陽光エネルギーから電力を供給する場合には、常時日照が得られる場所を求める以外に良い方法はない。

着陸の確実性の観点では、表側の低緯度地域が実績もあり、平坦な場所が多いので適地である。

以上の観点をまとめると、着陸の確実性を除くと、望遠鏡観測では極域、しかも永久日照域が最適である。着陸の確実性については、今後の技術開発に期待する。

プロジェクトの規模

本計画は SELENE 以降の次期月探査計画の中の観測計画の一つという位置づけで検討を進めている。月面小型望遠鏡ミッション自体は小型規模を目指すか、全体計画としては H-IIA 相当の打ち上げによる着陸機、電力供給等を含むので大型計画である。