特集「物理探査ミッションで知る月の内部構造と進化」

重力ポテンシャルの観測によるコア密度の制約

花田英夫[1]

1. はじめに

惑星（または衛星）の近くを飛ぶ人工衛星の軌道の乱れを調べることによって，その惑星の内部の構造を調べることができることは，以前から言われていたことであるが，最近では，惑星にコアがあるかどうか，さらに，そのコアは鉄などの金属でできているかどうかについて知るための有力な手段として注目されている．ここでは，人工衛星の軌道の乱れから求まる重力場を用いて，コアの密度を求める方法，最近の情勢，今後の計画等について述べる．

2. 重力場の低次の係数と密度構造の関係

惑星の重力場は，通常，球面調和関数に展開され，各次数のストークス係数（C_{nm}とS_{nm}）を用いて，重力場の分布が表される．次数の高い係数ほど，波長の短い重力場の乱れを表し，次数が低くなるほど惑星全体におよぶ重力場の特徴を反映する．とくに，2次のストークス係数C_{20}，C_{22}は惑星内部の密度分布やコアの密度を推定する上で重要な量である．惑星内部の密度分布は，直接には自転軸のまわりの慣性モーメントの大きさに反映される．半径Rで質量Mの球の軸のまわりの慣性モーメントをCとすると，例えば，内部が均質な球では，$C/MR^2=0.4$となり，それより小さければ，中心付近に質量がより集中していることになる．しかし，慣性モーメントを直接測定することが困難であるために，重力場の低次の係数や，惑星の回転の乱れ等を測定して，間接的に慣性モーメントを求めている．

惑星の3つの主軸のまわりの慣性モーメントをA，B，C（$A<B<C$）とすると，C_{20}やC_{22}との間に

$$C_{20}=\frac{1}{MR^2}\left(\frac{A+B}{2}-C\right) \quad (1)$$

$$C_{22}=\frac{1}{4MR^2}\left(B-A\right) \quad (2)$$

のような関係がある．この2式だけからでは個々の慣性モーメントは求められないので，別の観測や仮定が必要になる．その一つとして，自転による遠心力や潮汐力が支配的な惑星では，静水圧平衡が成り立つ回転流体で近似することができる．その場合には，C_{20}は扁平率fと$m=\omega^2R_e^3/GM$（ただし，ωは自転角速度，R_eは赤道半径，Gは万有引力定数）を用いて，

$$C_{20}=-2f(1-f/2)/3+m(1-3m/2-2f/7)/3, \quad (3)$$

$$f=5m[1+(5/2-15C/4MR_e)^2], \quad (4)$$

と近似することができる[1]．また，この場合にはC_{20}とC_{22}は独立ではなくなってしまうので，どちらかの値を観測で求めて，静水圧平衡の仮定をして，慣性モーメントCを求めるという手順になる．

一方，月のように自転周期が27.3日と非常にゆ

1 国立天文台・地球回転研究系

っくり回転している天体では，静水圧平衡で近似できないので，(3)（4）式は使えない．そこで，別の観測が必要になる．地球の場合には，空間に対する自転軸の変動である章動や，形状軸に対する自転軸の変動である極運動を観測することによって，慣性モーメントに関する情報が得られるが，月の場合には，章動や極運動に相当する物理秤動の振幅を調べる必要がある．

月の物理秤動の振幅を観測することによって，月の力学的扁平率，$\beta=(C-A)/B$，$\gamma=(B-A)/C$が求められる[2]．また，力学的扁平率と重力場の2次のストークス係数との間には，

$$C/MR^2=4C_{22}/\gamma \qquad (5)$$

$$\frac{C}{MR^2}=\frac{2C_{20}(1+\beta)}{\gamma-2\beta-\beta\gamma} \qquad (6)$$

の関係があるので，これらを用いて慣性モーメントCを求めることができる．

慣性モーメントCが求まったとしても，コアの密度を推定するために使用できる測地学的観測量は，他に，天体観測から決められる，惑星のGMと惑星の半径Rのみである．GMとRは平均密度$\bar{\rho}$に集約される．したがって，惑星を最も単純なコアとマントルの2層構造モデルで近似するとしても，独立な未知量として，コア密度ρ_c，マントル密度ρ_mとコア半径r_cと3つあるので，二つの関係式，

$$\bar{\rho}=(r_c/R)^3(\rho_c-\rho_m)+\rho_m \qquad (7)$$

$$C/MR^2=2[\rho_m/\bar{\rho}+(1-\rho_m/\bar{\rho})(r_c/R)^2]/5 \qquad (8)$$

から，ρ_c，ρ_m，r_cを一義的に求めることはできない．

3．木星の衛星にも金属コアがある

2年ほど前に，ガリレオ探査機から送られる搬送波のドプラーシフトから軌道の乱れを計算し，木星の衛星イオに金属コアがあるのではないかという説が発表された[3]．また，最近では，同種のデータを用いて，木星のさらに外側の衛星カリストにも，金属と岩石のコアがあるらしいという説が発表された[4]．両者とも，静水圧平衡を仮定して，重力場の2次のストークス係数から慣性モーメントCを求め，その値と平均密度を制約条件としてコアの密度を推定したものである．計算に用いられた観測値は，イオの場合には，$C/MR^2=0.378\pm0.008$と$\bar{\rho}=3{,}529.4\pm1.3$kg/m^3，カリストの場合には，$C/MR^2=0.359\pm0.005$と$\bar{\rho}=1830$kg/m^{3}であるイオの場合には，マントルとして3,270kg/m^{3}の密度を与えると，全体の半分以上の半径を占める密度5,150kg/m^{3}の鉄と硫化鉄のコアが存在しないと慣性モーメントを説明できない．このマントル密度はイオの平均密度に近いので，推定された密度は，コア密度の下限と考えられる．カリストの場合には，マントルとしてρ_m<1,100kg/m^{3}の氷を仮定すれば，密度3,500kg/m^{3}の金属と岩石のコアが全体の1/4以下の半径を占めることが，慣性モーメントの制約条件から示された．

4．月にも金属コアがあるか

木星の衛星に金属コアがあることがかなり確かなのに対して，地球に最も近い月に金属コアがあるかないか未だにわからないというのは不思議に思われるかもしれない．月の慣性モーメントは，低次の重力場や秤動の観測から比較的高精度に求められているが，(5)（6）式に示したように，二通りの求め方がある．C_{20}，C_{22}とβから求めた平均慣性モーメントは，$I=(A+B+C)/3=0.39281\pm0.00013$であるが，$C_{20}$，$C_{22}$と$\gamma$から求めたそれは$I=0.38942\pm0.00027$と両者は約1%異なる[5]．実際には，高精度に求められていないといった方がよ

いのかもしれない．その原因として，(5)(6)式は剛体に対して成り立つ式であるので，弾性体の影響が現れているのかもしれないし，月の物理秤動の振幅が，月レーザ測距（LLR）という，地球からの視線方向の変化しか検出できない方法で決められてきたので[6]，秤動振幅の値に系統誤差が含まれているのかもしれない．また，月の重力場の2次のストークス係数の精度が，秤動の振幅の精度に比べて2桁近く悪いということも問題である．C_{20}とC_{22}の値に系統誤差が含まれていれば，これも二通りの方法で求めた平均慣性モーメントの値が異なることの原因となり得る．したがって，重力場の2次のストークス係数の精度を高めることは，慣性モーメントの精度を高めるばかりでなく，慣性モーメントの系統誤差の有無の検証にもなる．パラメータの選び方による慣性モーメントの差から，月の弾性的性質を議論するためには，まず，そのもととなる，物理秤動の振幅と，重力場の2次のストークス係数の値の系統誤差の有無をはっきりとさせておくことが必要である．

月の場合には，慣性モーメントが約0.39と，イオの0.38やカリストの0.36に比べて大きく，より0.4に近いことから，コアがあったとしても月の半径に比べて小さいということも，コアの存否判定を困難にしている原因の一つである．それでも月震観測から推定されたコアの半径を450kmと仮定すると，平均密度と慣性モーメントを満たすコアの密度は7,500kg/m^{3}となり，金属コアの存在が示唆される[5]．すでに述べたように，観測量は，慣性モーメントと平均密度の2個であり，月を2層構造モデルで近似すると，未知量はρ_c，ρ_mとr_cの3個であるので，1義的には決まらないが，どれか一つの未知量がほかの観測から求まりさえすれば，他の二つの未知量は自動的に決まる．たとえば，コア半径が月震の観測から決められたとすると，慣性モーメントと平均密度の制約を満たすコア密度は大きな拘束力を持つ値となる．二つの観測量とも月全体を積分した量であるので，表層の密度構造が不確定であっても，マントル全体を現実の月と等価の均質な層で置き換えることができるのである．

表層から深い方へ向かって順次密度を確定していこうとすると，表層の密度の不確定が慣性モーメントに大きく影響するので，表層の密度をかなり正確に推定していかないと，コアまでたどりつかない恐れがある．現実には，表層の密度構造が複雑であるために，コア密度の推定に耐える表層の密度構造の推定は不可能であろう．しかし，もう一つのアプローチが可能である．それは，上に述べたように，平均密度，慣性モーメント，コア半径を観測から求めて，コア密度を推定する方法である．それによって，その外側のマントルの平均密度も決めることができる．いわば，表層からとは逆に，中心部から表層に向かって密度を推定していく方法といってもよいかもしれない．

5. おわりに

1970年代のアポロ計画によって月に関して多くのデータが得られ，その後のデータ解析によって，月に関しての知識はかなり深まった．しかし，月の起源という本質的な問題はまだ明らかにされていない．その鍵を解くために，新たな月探査の計画が進行中である．Lunar-A[7]による月震観測によって，コアの大きさが明らかになることが期待されている．一方，SELENE計画の中では，重力場の低次の係数を今までよりも1桁以上高精度に求めることを計画している[8]．これらの観測を通して，月のコアの存在，コアの組成に対して，より厳しい制約条件を与えることが期待できる．

参考文献

[1] Jeffreys, H. 1970: The Earth (5th. Edn.), Cambridge Univ. Press, 420.

[2] Eckhardt, E. H. 1981: Theory of libration of the Moon, Moon, Planets, 25, 3-49.

[3] Anderson, J. D., Sjogren, W. L. and Schubert, G., 1996: Galilleo gravity results and the internal structure of Io, Science 272, 709-712.

[4] Anderson, J. D., Schubert, G., Jacobson, A., Lau, E. L., Moore, W. B. and Sjogren, W. L., 1998: Distribution of rock, metals, and ices in Callisto, Science 280, 1573-1576.

[5] Bills, B and Rubincam, D. P. 1995: Constraints on density models from radial moments: applications to Earth, Moon, and Mars, J. Geophys. Res., 100, 26,305-26,315.

[6] Dickey, J. O., Bender, P. L., Faller, J. E., Newhall, X. X., Ricklefs, R. L., Ries, J. G., Shelus, P. J., Veillet, C., Whipple, A. L., Wiant, J. R., Williams, J. G. and Yoder, C. F. 1994: Lunar laser ranging: a continuing legacy of the Apollo program, Science, 265, 482-490.

[7] Mizutani, H. 1995: Lunar interior exploration by Japanese Lunar penetrator mission, J. Phys. Earth, 43, 657-670.

[8] Hanada, H., Kawano, N., Ooe, M., Heki, K., Araki, H. and Tsubokawa, T. 1997: Observation system in radio interferometry for selenodesy (RISE), International Association of Geodesy Symposia, 117, 507-514.