

# 流体核共鳴とその観測

佐藤 忠 弘\*

## 1. はじめに

地球は第 1 近似として、赤道半径が約 6378 km, 極半径が約 6357 km, 扁平率が約 1/298 の回転楕円体として表わすことができる。その内部構造は主として地震波速度が急変する所を境として大きく 3 つの層に分けられている。モホ不連続面と呼ばれる所を境にそれより表層部が地殻、その面から下約 3000 km までがマントル、そこから中心部までが核である。地球の内部構造についての知識、特にマントル以浅については地震観測網の整備や地震波伝播理論の高精度化により、層構造のみならず、水平方向も含めた 3 次元的構造が P 波速度で 10 m/sec 程度の分解能で議論されるようになってきている。また岩石の密度や相転移と言った物性についても高压実験技術の進歩により、マントル下部での圧力に相当する  $10^6$  bar とする高压下での実験が可能となりつつある。

このように、マントルについてはその弾性的性質や物性について相当詳しく調べられてきているが、それに較べ核についてはまだまだ不明な点が多い。核は流体核と固体内核からできていることが地震波の伝播から知られているが、例えば流体核の粘性 1 つを取り上げても現在の所その推定値に  $10^{13}$  もの開きがある。1 つの原因としては、核がマントルと言う厚い層に覆われているため、核での流体の運動を直接反映する磁場の変化にしても、それを地上での磁場の観測から知るには 10 年以上の時間がかかることも挙げられる。

回転楕円体的形状をした流体核を持つ地球に特有の現象として自由コア章動とそれによる流体核共鳴がある。自由コア章動の固有周期や流体核共鳴の振幅や位相の周波数特性については理論的に詳しく調べられていたが、量的に小さいこともあり観測からおさえることが難しかった。しかし、最近 VLBI (超長基線電波干渉計) による章動観測や超伝導重力計や歪計による潮汐観測で流体核共鳴の周波数特性や減衰が観測されるようになってきた。この現象が核の運動に敏感なことから、核の性質を知るための有用なプローブの 1 つになるものとして注目されている。

## 2. 章動と潮汐

月、太陽が地球に及ぼす引力は、その大部分が地球重

\* 緯度観測所 Tadahiro Sato: Core-Mantle Resonance—Theory and Observation—

心に働く力として地球の公転運動を維持するために使われているが、地球が大きさを持っているため、地球の各部分による力の差が地球の変形や章動(強制章動)の原因となるもので、起潮力と呼ばれている。

起潮力ポテンシャルを  $U$ , 地球表面での重力を  $g$ , 余緯度を  $\theta$  とすると地球潮汐による半径方向, 余緯度方向, 経度方向の変位, およびポテンシャルの変化は各々  $hU/g$ ,  $(l/g) \cdot \partial U / \partial \theta$ ,  $(l/g \sin \theta) \cdot \partial U / \partial \theta$  と  $kU$  のように表わすことができる。ここで  $h$ ,  $k$  と  $l$  は各々ラブ数, 志田数と呼ばれるもので、これらは地球内部での弾性定数(剛性率や密度など)の分布の仕方により決まる(以後ラブ数と記す)。重力, 歪等の潮汐変化の大きさもラブ数の組合せで表わすことができる。例えば 2 次の潮汐ポテンシャルに対する重力潮汐の大きさは  $(1+k-3/2 \cdot h) \partial U / \partial r$  で与えられる。 $(1+k-3/2 \cdot h)$  は重力潮汐ファクターと呼ばれている。

竹内(1950)は自重力を持った非回転地球での潮汐を記述する方程式を作り、ブレンの地球モデルについてその方程式の数値積分を実行しラブ数を求めた。竹内はまた核の剛性率の大きさに対するラブ数の変化についても計算し、それがマントルの 1/100 以上になると観測値から大きくはずれてくることから核の流体性を潮汐理論の方からも裏づけた。竹内が求めたラブ数は  $h=0.587 \sim 0.610$ ,  $k=0.281 \sim 0.290$ ,  $l=0.068 \sim 0.082$  で、これらはウォールが最近の地球モデル 1066A について求めた値  $h_0=0.609$ ,  $k_0=0.302$ ,  $l_0=0.085$  と較べても良く一致している。これからも分るように弾性体地球についてのラブ数のモデル依存性は小さいが、回転する地球では、ラブ数は流体核の運動に非常に敏感なものになる。

章動は、地球の赤道部の張り出しに働く起潮力によるトルク的作用で、地球の形状軸(最大慣性能率軸)が空間に対し味噌スリ運動のようにその方向を変える現象である。章動の角速度を  $n$ , 振幅を  $\xi$  とすると、自転軸の地球に対する動き(ウオップル)の振幅  $\bar{m}$  とは  $\bar{m} = -\frac{n}{\Omega} \xi$  の関係がある。

## 3. 自由コア章動

流体核は流体であるためマントルとは独立な運動を行うことができる。地震、彗星の衝突、海洋による荷重変化等、何らかの原因でマントルの回転軸と流体核の回転

軸にズレが生じたとする。この回転軸のズレに伴ない流体核の回転による遠心力分布も変化する。このとき流体核とマントルとの境界面 (CMB) が地球の外形と同様に扁平な形をしているため、流体が CMB を押す力がマントルの形状軸に対し非対称的に分布する。この非対称な力は起潮力が章動を起したように、形状軸を流体核の回転軸に合せようとするトルクを発生する (慣性結合トルク)。CMB を通してマントルも受けたトルクと逆向きのトルクを流体核に及ぼすため流体核の自転軸とマントルの形状軸とが全角運動量軸のまわりを自転とは逆向きの回転を始める。この様に流体核の自転軸とマントルの形状軸が傾くとこにより生ずる章動は、外力による強制章動とは区別され自由コア章動 (FCN) と呼ばれている。

#### 4. 流体核共鳴と消散結合

回転楕円体状に成層する弾性地球の章動や潮汐変形についてはジェフreesやモロデンスキーにより 1950 年代から理論的研究がなされ、FCN の固有周期が 1 恒星日付近 (章動周期で表わすと約 500 日) にあること、このため流体核が日周潮汐力に対し動かされやすい性質を持っていることがわかってきた。

この問題について、最近 2 つの理論的研究がなされた。1 つは笹尾、大久保、斉藤 (SOS 1980) によるもので、もう 1 つはウォール (1981) による研究である。ウォールの数値計算の結果は VLBI 等の観測結果を整約する際の章動と潮汐の世界的な標準モデルになっている。SOS の場合、章動やラプ数の解析的な表式を与えていること、また CMB での摩擦力によるトルク (消散結合トルク) も評価できる式になっていることから、観測結果を解釈する上で有用である。

SOS によると、変形地球でのマントルと流体核のウォッブル  $\bar{m}$  と  $\bar{m}_f$  は下の式で与えられる。

$$\bar{m} = \left(1 + \frac{\chi}{e} \frac{n}{\Omega}\right) \bar{m}_R + \frac{A_f}{A} + \frac{n}{\Omega - n} \bar{m}_f,$$

$$\bar{m}_f = \frac{A}{A_m} \frac{\Omega - n}{n - \bar{n}_0} \left(1 - \frac{\gamma}{e} + \frac{\gamma - \chi}{e} \frac{n}{\Omega}\right) \bar{m}_R$$

ここで  $\bar{m}_R$  は剛体地球の章動である。 $\bar{\cdot}$  は複素数を意味しており、その実数部はグリニッチ方向への、虚数部はそれと 90° 東方向への軸の傾きを表わしている。 $e$  は地球の力学的扁平率、 $A_f$ 、 $A_m$ 、 $A$  は各々核、マントル、地球全体の赤道軸のまわりでの慣性能率である。 $\chi$  と  $\gamma$  は変形による慣性乗積の変化に関係した係数である。 $n$  と  $\bar{n}_0$  は各々強制章動と FCN の角周波数である。 $\bar{m}_f$  の式に見るように  $n$  が  $\bar{n}_0$  に近づくにつれその振幅係数が急速に大きくなり、これにともないマントルの章動  $\bar{m}$  も共鳴的な周波数特性を示すようになる。この現象は流体核共鳴と呼ばれている。

FCN の角周波数 ( $\bar{n}_0$ ) が複素数になっているのは、この自由振動の周期が系に働く摩擦により変ることを表している。現在の所、核の粘性と磁場が摩擦力の原因の有な候補と考えられている。これらは章動の運動エネルギーを熱に変えて拡散させるため消散結合力と呼ばれる。それには慣性結合に同期した成分と 90° 位相の異なる成分があり、前者は FCN の周期に、後者は減衰に関係している。SOS によると消散結合がある場合の FCN の角周波数の実数部 (周期成分) と虚数部 (非同期成分) は各々

$$\text{同期成分} = -\Omega - \frac{A}{A_m} (e_f - \beta) - \alpha'_2,$$

$$\text{非同期成分} = \alpha_2$$

で与えられる。 $e_f$  は CMB の力学的扁平率、 $\beta$  は流体核の変形効果を表わす係数、 $\alpha'_2$ 、 $\alpha_2$  が摩擦の効果を表わしている。 $\alpha_2$  は減衰係数と呼ばれる量で減衰時間の逆数に対応する。

非回転地球でのラプ数を  $h_0$ 、 $k_0$ 、 $l_0$  とすると、回転地球では流体核の動圧変化による変形が付加され、ラプ数は

$$\bar{h} = h_0 + \bar{h}_1 [\bar{m}_f / \bar{\phi}], \quad \bar{k} = k_0 + \bar{k}_1 [\bar{m}_f / \bar{\phi}],$$

$$\bar{l} = l_0 + \bar{l}_1 [\bar{m}_f / \bar{\phi}]$$

のようになる。 $\bar{\phi}$  は潮汐ポテンシャルの係数である。章動と同様潮汐も  $\bar{m}_f$  の影響を受け日周潮では共鳴的なふるまいをする。

表 1 は 18.6 年周と年周章動について SOS によるワングモデルでの章動振幅、ウォールによる 1066A モデルでの値、また剛体地球での木下 (1977) による値を比較したものである。表から、章動振幅の大部分は剛体モデル、即ち地球の形と密度分布で説明できることがわかる。一方、流体核を含むモデルでの章動の逆行成分の振幅が、剛体モデルから大きくはずれている。これはこの成分がマントルの弾性や流体核の影響を受けやすいことを示している。

#### 5. 観 測

章動や潮汐の位相を調べることで、減衰係数  $\alpha_2$  を求

表 1 章動振幅の理論値 (単位: 1/1000 秒角)

	木下 (1977) 剛体	SOS (1980) ワング	ウォール (1981) 1066A
章動周期 (日)			
6798.4 順行	-1176.75	-1180.51	-1180.45
逆行	-8051.05	-8021.50	-8022.05
365.3 順行	25.01	25.70	25.65
逆行	-24.91	-30.78	-31.05

表 2 章動, 潮汐の観測に必要な精度

	角 度	重 力	歪
主要成分	0.1 秒角	1 $\mu$ Gal	$10^{-9}$
FCN	0.01	0.1	$10^{-10}$
消散結合	0.001	0.01	$10^{-11}$

めることができる。  $\alpha_2$  の理論式と観測値とから、減衰に関与している流体核の粘性や CMB での磁気力の上限值を見積ることができる。

光学天文観測で得られた緯度変化から章動を分離する試みが多くの人達によってなされてきた。それらの結果は観測された章動振幅が剛体地球で予想される振幅より大きいこと、またその振幅の周期による変化が流体核を持った地球の章動理論から予想されるものに良く合っていることを示していた。しかし観測誤差が大きいこともあり、FCN の周期や消散結合の大きさを観測からおさえるのは容易ではなかった。表 2 は章動や潮汐の観測から章動の主要成分、流体核共鳴の影響、また消散結合の影響を推定するために必要とされる観測精度を示したものである。この表で  $\mu$ Gal は測地学で良く使われる重力の単位  $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/sec}^2$  の  $10^{-6}$  倍である。歪の大きさは 2 点間の距離の変化率で表わしてある。

観測が表 2 に示すような小さな現象をとらえ始めたのはここ数年來のことである。VLBI については本誌でも多くの方が解説しておられるので超伝導重力計と歪計について少し説明したい。重力潮汐の観測には従来、高精度のパネ秤りであるスプリング式重力計が使われてきたが、主として地面の傾斜による重力計の感度変化、温度変化によるスプリングの長さ変化、気圧による擾乱等が観測を乱し、 $0.1 \mu\text{Gal}$  以下の精度での潮汐観測をすることが難しかった。超伝導重力計は重力変化を錘りの位置変化として計る重力計で、その点から言えば従来の重力計と原理的には同じであるが、錘りが起伝導電流で作られる磁気力で浮上させられている点に違いがある。この磁気力は原理的には  $10^{11} \sim 10^{12}$  の超高安定性を持っていると言われている。従来のスプリング式重力計が約  $50 \sim 100 \mu\text{Gal}/\text{月}$  のドリフトを示していたのに対しこの重力計は年率で  $5 \sim 10 \mu\text{Gal}$  と非常に小さなドリフトにおさまっている。ドリフトは、もしそれが直線であればあまり問題とはならないが、実際のドリフトは広い周波数帯域に分布するスペクトル成分を持っており、これが潮汐成分にもかぶるため潮汐観測の誤差を大きくする 1 つの原因にもなっていた。これに対し超伝導重力計のドリフトは直線的でかつ小さいことから計器のダイナミックレンジも広くとることができ、主要分潮では 80 dB 以上の S/N 比での観測が可能で、この重力計の出現で

$0.001 \mu\text{Gal}$  を問題にできる信頼度での潮汐観測ができるようになった。

歪計として一般的なのは 2 点間の距離変化から地面の歪を測るタイプの計器である。長さの基準として石英管や、周波数を安定化したレーザの波長が使われる。歪計は温度や岩盤の安定性を考慮し、岩盤に掘られたトンネルの中に設置される。地上からのかぶりが 60 m 以上あるとそこでの温度変化は年間で  $0.05^\circ\text{C}$  以下になる。歪計による観測の問題点としては、この種の観測が局所的な擾乱の影響を受け易いことがあげられる。擾乱としては海洋潮汐の荷重による 2 次的な潮汐歪、地形が平らでないことによる歪の乱れ、岩盤内での弾性定数の変化、そして気温、気圧の変化による歪の変化等がある。これらを 1 つ 1 つ評価し、補正することで観測値からグローバルな潮汐変化の影響が分離されてくる。

図 1 は例として、江刺地球潮汐観測施設に設置されている歪計により得られた日周潮汐での振幅の変化をプロットしたもので、横軸は角周波数 (度/時) を縦軸は歪潮汐の振幅係数を目盛ってある。図中、丸印が観測値で縦棒は観測誤差の大きさを表わしている。なお図の曲線はウォールによる 1066A 地球モデルでのラプ数を使って計算した理論的な振幅係数で、図に見るように、観測値が理論から予想される FCN の影響による日周潮での周波数変化をよくとらえていることがわかる。

表 3 は SOS の理論式を使い、観測から推定される FCN の固有周期と減衰時間を比較したもので、グインらのは 1980 年から 1984 年にかけて得られた VLBI による基線長データ 235 個を使った章動解析から求めた値、グッドカインドとツーンらの値は各々アメリカと西ドイツでの超伝導重力計により、また佐藤のは歪計 3 成分による潮汐観測結果から求めたものである。表に見るように各々の観測結果は相当にバラついてはいるが、比較的精度の良い VLBI と超伝導重力計による FCN の固有周期が 430 日前後の値で揃っているのが注目される。

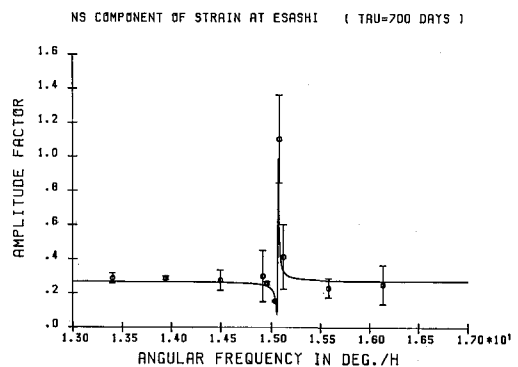


図 1 潮汐歪における流体核共鳴効果

表 3 FCN の観測値

	グイン等 (1985)	グッドカインド (1983)	佐藤 (1984)	ツーン等 (1985)	単 位
観 測	VLBI	超伝導重力計	歪 計	超伝導重力計	
解 析 区 間 長	53	18	48	33	月
成 分	年周章動	$P_1, K_1, \phi_1, \phi_1$	$P_1, K_1$	$P_1, K_1, \phi_1, \phi_1$	
FCN 固有周期	$434.6 \pm 1.9$	477	—	$431.2 \pm 3.1$	日
減 衰 時 間	$7000 \pm 3500$	160~450	$700 \pm 300$	$900 \pm 100$	日
粘 性 率	0.65	36	5	3	$m^2/sec$
磁 場 $B_r$	$3.4 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$9.5 \times 10^{-3}$	$Wb/m^2$
電気伝導率 $\sigma$	$1.5 \times 10^3$	$3.8 \times 10^4$	$1.5 \times 10^4$	$1.1 \times 10^4$	$\Omega^{-1}m^{-1}$

この値は SOS やウォールの非消散地球での理論値に較べ約 30 日短い。グイン等はその原因として CMB での扁平率が静水力学平衡値より約 6%，赤道半径にして約 500 m 程大きいと考へた。彼らは VLBI による FCN の減衰時間が約 7000 日と長いと、 $\alpha_2$  や  $\alpha_2'$  の周期への寄与は小さいと考へ原因を  $e_r$  に求めた。一方、潮汐から求められた減衰時間は VLBI のそれに較べ 1 桁以上小さく、これだと扁平率だけに周期減少の責任をおわせる必要はなく、減衰も含め電磁的な結合力がそれらを定める主要因になっているとも解釈される。章動と潮汐で摩擦力のきき方が異なるのか、観測の誤差なのか今の所判断としない。観測例を増すこと、また観測値の経年変化を調べることが必要である。

表には減衰時間から推定される粘性性と電磁気パラメータの値も載せてある。いずれも、粘性性と電磁気力とのどちらか一方が減衰にきいてると仮定して求めた各々の上限値であるが、粘性性について見ると、表値が 2 桁以内で揃っているのが注目される。前にも述べたように、現在の所、粘性性値には  $10^{18}$  もの開きがあることを考へるとこれらの値は流体核内での粘性率に関連した現象を議論する上で大きな拘束条件になると思われる。

電磁結合の理論式には CMB を横切るポロイダル磁場の強さと下部マントルでの電気伝導度  $\sigma$  の 2 つがパラメータとして入ってくるため、減衰時間だけでは各々の上限値を独立に推定することはできないが、どちらか一方に地球電磁気学で与えられている数値を代入し他方を見積もると、その上限値は磁場の強さ、伝導度のいずれについても 10 倍以上大きい値になる。特に磁場の値については、上限値とは言え大き過ぎる値を示しており、今の所その原因はよくわからない。SOS 理論で使われている簡単な境界層モデルではうまく説明できないことを示しているのかもしれない。

6. おわりに

自由コア章動やその共鳴現象については、理論研究が

先行していたが、観測精度の向上にともないどうやら理論と現実とのズレが見えはじめた段階にあり、今後観測データの集積とともに周期、励起、減衰の 3 つについて理論と実際とがどのように違っているのかがはっきりしてくるであろう。

励起について言えば、つい最近、アメリカの VLBI 観測でそれらしきものをとらえたとの報告がなされている。それによると、強制章動を補正して得られた 433 日周期の年周逆行成分の振幅が 1985 年 9 月以降、突然 0.002 秒角程増大していると言うもので、この時期は 9 月 21 日メキシコ大地震の発生とも符号する。そこで、この地震による励起量の理論的な見積りがなされたが、量的に小さ過ぎ、それでは説明できないことがわかった。極のチャンドラー運動についても、その励起について現在の所地震や気象等考へられる励起源では量的に不足すると言う問題があるが、FCN についても同様な問題がありそうである。

観測精度の向上は、地球回転や潮汐の今まで見えていなかった側面を我々に見せてくれるようになった。それらを解釈する上でも、例えば VLBI と超伝導重力計と言った異なる計測手段を組合せた観測点を地球上に合目的に配し、組織的に観測してゆくことが必要になってきていると言える。

☆ ☆

☆ ☆ ☆