

論文内容の要旨

論文題目 Geomagnetic observations and decadal core dynamics

(地球磁場観測とコアダイナミクス)

氏名 浅利 晴紀

地球の流体コアに起因する主磁場は様々な時間スケールで変動している。およそ1万年以上の時間スケールの変動は、地磁気そのものを維持する地球ダイナモ作用の準定常成分に関連していると考えられ、近年の数値シミュレーションの発展によってそのダイナミクスの理解が進みつつある。一方、数十年スケールの変動に関しては、数値実験による再現はかなり困難であるものの、観測データを直接用いてコアの流れのダイナミクスを調べることが可能である。本研究では、後者の問題をテーマとする。

これまで数十年スケールのコアの研究を行う方法の一つとして、地磁気観測データを用いたインバース問題によるコア表面流(CMB直下におけるコア流体のマンテルに相対的な速度場)の推定が行われてきた。その成果として、近年になってコア表面流の時系列モデルから回転軸方向の角運動量がコアとマンテルの間で交換されていることが示唆されている。しかし、地磁気データから推定されるコア表面流モデルには、観測誤差に伴う不確定性に加えて原理的な任意性の問題が伴うことも知られている。そこで、以下のような疑問が挙げられる。

- コア表面流の不確定性を軽減できるか。
- 力学的コア-マンテル結合メカニズムは何か。
- 観測とコア-マンテル結合を説明する流体コアダイナミクスは何か。

本研究では、観測量(地磁気・LODデータ)に基づいて1を系統的に調べ、それと同時に2と3についての洞察を得ることを目指す。基本的な方針として、1の解決のために2(と3)についての理論的な仮説をコア表面流推定に導入し、結果として得られるモデルの合理性によりそれらの仮説の可否を判断する、という手順をとる。本要旨で用いられる重要なパラメータの表記を表1に示す。

数十年スケールのコアの角運動量変動は、テイラー・プラウドマンの定理により、回転軸を共有する剛体シリンダー一般の回転からなる流体の流れ(図1;この流れは u_G と表記され、コア表面流モデルから求められる)によって担われることが期待される。従って、マントル流体コア系の回転変動を支配する方程式は図2のように与えられる。ここではコア-マントル間の力学的結合メカニズムとして電磁結合と地形結合を考える。前者はローレンツ力を、後者は CMB 地形に働く圧力を起源とするもので、いずれも観測 LOD 変動を説明するトルク(電磁トルク・地形トルク)をマントルに及ぼす有力な候補として考えられている。過去の研究では、コア流体に与えられるトルク γ_{CMB} は u_G のみに依存する軸対称の簡略な形式で扱われていた。本研究では、球面調和関数により展開されたコア表面流 u_H の全てのモードに依存する電磁トルク γ_E と地形トルク γ_T の一般的表現を定式化した。これに基づいて開発されたフォワードコードを用いて、図3、4のようなインバース・フォワード解析を行い、推定されたコア表面流 u_H に伴う γ_E と γ_T の振幅・時間変動性および($\partial u_G / \partial t$ から計算される)慣性トルク γ_I とのバランスを調べる。 γ_E の計算に必要なマントル電気伝導度構造には CMB 直上の均質1層モデル(厚さ 200km; 電気伝導度 500S/m)を、また γ_T の計算に必要な CMB 地形 h には地震波解析から得られたモデル(Boschi & Dziewonski, 2000; $|h| \sim$ 数 km)を採用する。地磁気データには 1842.5-1987.5 年(2.5 年おき)のモデル ufm1 を、LODデータには同じ期間の年平均値を用いる。

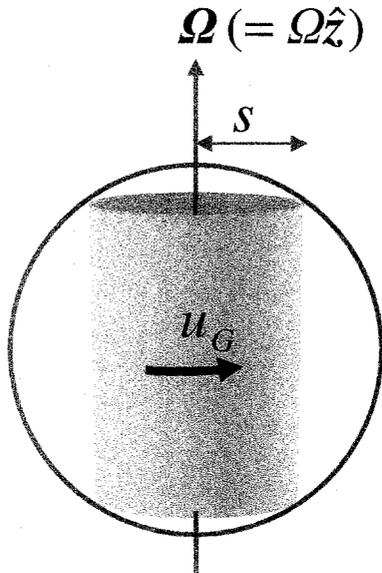


図1.コアの剛体シリンダー一般の回転

表1.表記の一覧

(s, φ, z)	円筒座標系
t	時間
c	コア半径
Ω	マントルの角速度
u_H	コア表面流
u_G	コアシリンダー回転速度
h	CMB地形
Γ	マントルに働くトルク
γ	コアシリンダーに働くトルク

コア流体シリンダー

$$\gamma_I(s, t) = \gamma_{Bs}(s, t) + \gamma_{CMB}(s, t)$$

慣性トルク 内部トルク コア-マントルトルク

マントル

$$\Gamma_I(t) = - \int_0^c \gamma_{CMB}(s, t) ds$$

角運動量保存

$$\Gamma_I(t) + \int_0^c \gamma_I(s, t) ds = 0$$

図2.コア-マントル系の回転に関する方程式系

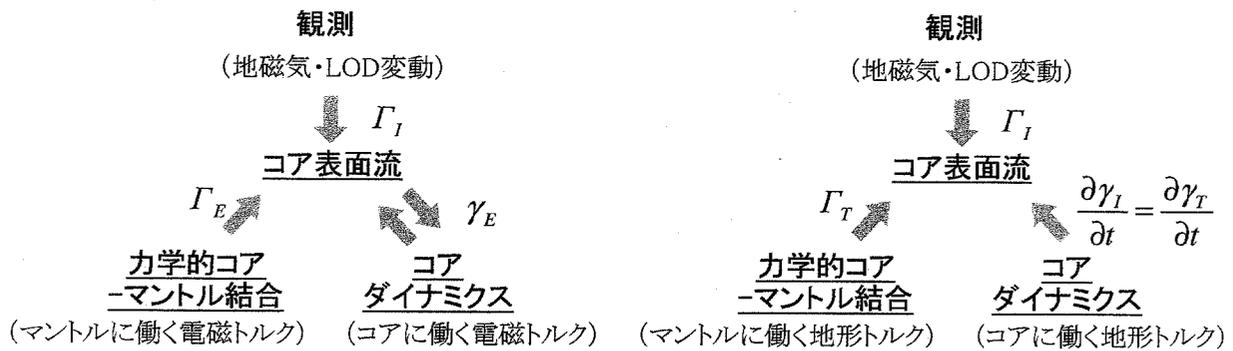


図3.電磁結合を仮定した場合の解析の流れ

図4.地形結合を仮定した場合の解析の流れ

—電磁結合(図3)—

マントルに働く電磁トルク Γ_E と慣性トルク Γ_I によって LOD 変動データを説明するようなコア表面流モデルは得られた。しかし、コアシリンダーに働く電磁トルク γ_E には、慣性トルク γ_I に見られる経年スケールの時間変動がないことがわかった(図5)。実際、 γ_E と γ_I が常に一致するような制約を与えてコア表面流を推定しようとしても、地磁気・LOD 変動を含めた全ての制約を説明するようなコア表面流モデルは得られない。従って経年スケールのコア流体シリンダー回転変動を電磁結合のみによって完全に説明することはできないと言える。

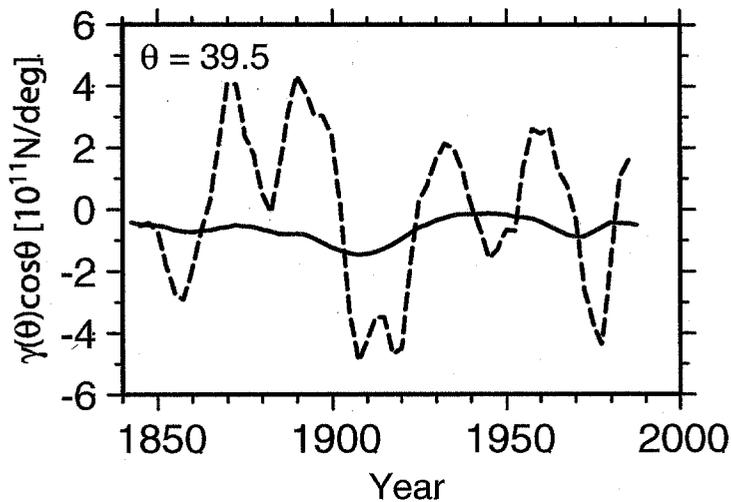


図5. 余緯度 39.5° のコアシリンダーに働く γ_I (破線) と γ_E (赤線) の変動

—地形結合(図4)—

コア流体シリンダーのトルクバランス変動 $\partial\gamma_I / \partial t = \partial\gamma_T / \partial t$ を追加的な制約としてコア表面流モデルを推定したところ、全てのシリンダーについてこれを満たし、かつ地形トルク Γ_T と慣性トルク Γ_I により LOD 変動データを説明するコア表面流モデルが得られた。このような結果が得られたのは、電磁トルク γ_E と比べて地形トルク γ_T がコア表面流 \mathbf{u}_H の変化に対して敏感であるため、新しい制約を追加するのに必要なコア表面流の変化が小さいことによると考えられる。 γ_T を考慮に入れることで、ある与えられた CMB 地形に対して、不確定性の少ないコア表面流モデルが得られることがわかった。

—コアのダイナミクスについて—

以上の結果については、地形トルク γ_T が慣性トルク γ_I の時間変動性を説明するのに必要な大きさのヌルスペースがコア表面流に存在したということだけではなく、コア流体のダイナミクスの観点からも解釈が与えられる。回転流体であるコアでは、境界(CMB)で与えられたトルクに応じてスピナップというメカニズムが働くことで、角運動量が流体全体へと効率的に輸送され、その結果シリンダーとしての回転が加速される。本研究では、地形結合に関しても、CMB 地形の中を流れる緯度成分のコア表面流によって通常の粘性スピナップと同等の解釈が与えられることを提案する。この場合、地形結合によるスピナップ時間は $\tau_T \sim c/(h\Omega) \sim 1$ 年と見積もられる。また電磁結合によるスピナップ時間を見積もると $\tau_E \sim 30$ 年となる。従って、 γ_I の経年スケール変動が γ_E ではなく γ_T によって説明されるという本解析の結果とスピナップのダイナミクスは一貫する。また理論的には、スピナップが完了する時間 τ_T より十分に長い時間スケールでは γ_T は γ_I に対する重要性を失うことが期待される。

以上の内容をまとめると以下ようになる。

- コア流体に働くトルクとコア内部のトルクバランスを制約条件とすることでコア表面流を決定できる。
- 電磁・地形結合は共に LOD 変動を説明できるが、コアシリンダー殻の回転の経年スケール変動を説明できるのは地形結合のみである。
- 結合メカニズムの特徴的な時間スケールはコア流体のスピナップによって解釈できる。