

# CMB 付近における急激な磁場変動の地球回転への効果

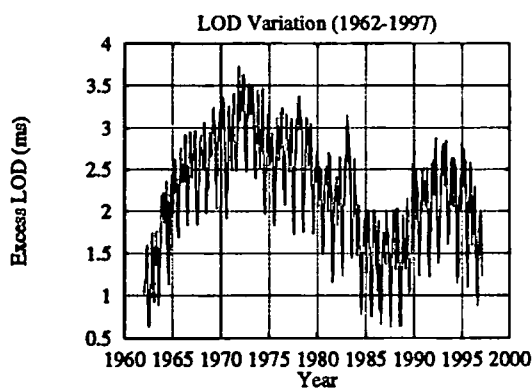
長尾大道 家森俊彦 (京都大学理学研究科)

## Effects on the Earth's Rotation by Abrupt Changes of the Geomagnetic Field near the Core-Mantle Boundary

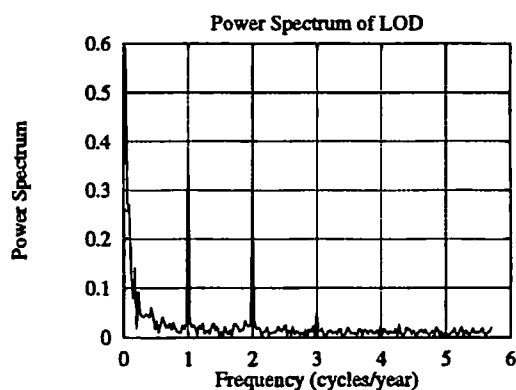
H. Nagao, T. Iyemori (Graduate School of Science, Kyoto University)

### 1 序

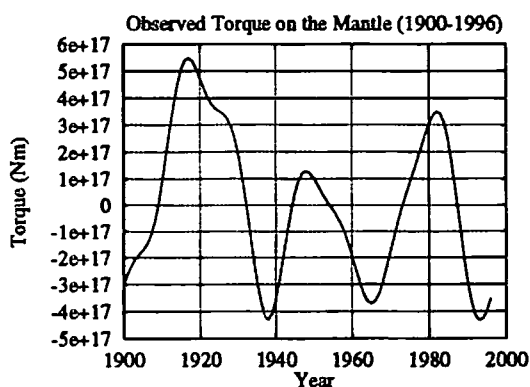
地球の自転角速度が時間変化していることは、第 1 図のように LOD (length-of-day) の観測で、かなり以前から分かっている。第 2 図は LOD のパワースペクトルをとったものであるが、1 年周期および半年周期の成分が卓越していることがよく分かる。これは大気と地殻との間の角運動量交換によることが、これまでの研究でほぼはっきりとしている。



第 1 図 LOD の時系列データ。



第 2 図 LOD のパワースペクトル。



第 3 図 LOD の数年～数十年変動から予想されるマントルに働くトルク。

LOD はさらに長い周期成分も持っており、その中でも有名なものに、100 年間で 2.4ms の割合で LOD が長くなるという、海洋潮汐による永年減速がある。しかしながら、LOD の数年～数十

年変動成分は地球外部の要因では説明できず、地球内部で外核とマントルが角運動量を交換する核-マントル結合 (core-mantle coupling) によるものと考えられている (例えば Lambeck [1980])。core-mantle coupling によってマントルが自転軸方向に受けるトルクの大きさは  $10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$  を越えない程度である (第 3 図)。core-mantle coupling のメカニズムについては、現在のところ粘性結合 (例えば Rochester [1984])、重力結合 (例えば Jault et al. [1991])、地形結合 (例えば Hide [1995])、電磁結合の 4 つの仮説があり、後者の 2 つが有力であるが、外核内の流体の粘性、core-mantle boundary (CMB) の地形、下部マントルの電気伝導度分布など、地球内部に関する物理量に不確定なものが多く、実際にどのメカニズムが支配的であるかは結論が出ていない。本研究においては、電磁結合による core-mantle coupling に主眼を置く。電磁結合による core-mantle coupling の理論については、次節で述べるが、このメカニズムはマントルが有限の電気伝導度を持つことが必要である。マントルの電気伝導度分布については、これまでも様々な研究がなされており、最近では本蔵ら [1997] が、電気伝導度が深さとともに急激に増大するような傾向は見られず、最下部でも高々  $10 \text{S/m}$  程度という結論を得ている。この程度の電気伝導度では、マントルにはたらくトルクを電磁結合による core-mantle coupling で説明するのは困難である。しかし最近、地震波の速度分布から、マントル最下部には D" 層と呼ばれる非常に不均質な層が存在していると予想されている。D" 層の成因についても、沈み込んだプレートの墓場であるという説 (例えば Fukao et al. [1994])、外核の流体金属と下部マントルのシリケートの化学反応で生じた一種のスラグ層であるという説 (例えば Jeanloz et al. [1990])、外核の流体金属が貫入したという説 (例えば Knittle et al. [1991]) など諸説あるが、いずれにせよ非常に高い電気伝導度を持っていることが期待されている。これまでになされた電磁結合による core-mantle coupling の研究は、マントルの電気伝導度分布が半径方向に依存する場合のみであった。しかしこれは D" 層の不均一性を考えれば、これはモデルとして不十分である。これまでに横方向の不均一性が考慮されなかったのは、地球内部起源の磁場に関するデータが地上磁場のみであり、地球内部の磁場を求めるためには inversion に頼らざるを得ないが、磁場の誘導方程式を解析的に解くことが困難となるためである。そこで本研究では、マントル最下部における電気伝導度が横方向に不均一な場合について、CMB 付近における磁場変動がマントルに与えるトルクを forward modelling によって計算し、均一モデルの場合と比較した。

## 2 核-マントル電磁結合

電磁結合による core-mantle coupling については、これまでに様々な研究がなされている (例えば Bullard [1950]、Stix et al. [1984]、Buffett [1992]、Love et al. [1994]、Stewart et al. [1995]、Holme [1998])。

マントルが有限の電気伝導度を持つと仮定すると、コア起源の磁場  $B$  の時間変化 (地磁気永年変化) によってマントル内に誘導電流が流れる。その電流密度を  $J$  とすれば、マントルには

Lorentz 力によるトルク

$$\Gamma = \int_M \mathbf{r} \times (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV \quad (1)$$

がはたらく。ただし、 $\mathbf{r}$  は地球中心からの位置ベクトルであり、 $\int_M \dots dV$  はマントル全体で積分することを表す。なお、地球の自転角速度の変化に関するものは (1) 式の  $z$  成分

$$\Gamma_z = \dot{\mathbf{z}} \cdot \int_M \mathbf{r} \times (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV \quad (2)$$

である。ただし、 $\dot{\mathbf{z}}$  は、地球の自転軸方向の単位ベクトルである。Ampère の法則

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (3)$$

を用いて (2) 式の  $\mathbf{J}$  を消去すれば、

$$\Gamma_z = \frac{\dot{\mathbf{z}}}{\mu_0} \cdot \int_M \mathbf{r} \times \{(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}\} dV \quad (4)$$

ここで、 $\mu_0$  は自由空間における透磁率である。

さて、マントル内の磁場に関しては誘導方程式が成り立つが、ここでは拡散項のみ考え、

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times (\eta \nabla \times \mathbf{B}) \quad (5)$$

ただし、 $\eta (= 1/\mu_0 \sigma)$  は、マントルの磁気拡散係数である。原理的には (5) 式を、適当な初期条件・境界条件の下で解いて磁場  $\mathbf{B}$  を求め、(4) 式に代入すれば、マントルが受けるトルク  $\Gamma_z$  が得られる。

実際の計算では、簡単のため、磁場  $\mathbf{B}$  は時間的に変化しない基本場  $\mathbf{B}_0$  と擾乱場  $\mathbf{B}_1$  とに分離する。

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1 \quad (6)$$

ここで基本場  $\mathbf{B}_0$  はポテンシャル場で与えられるものとする。

$$\mathbf{B}_0 = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (7)$$

ただし、 $a$  は地球半径、 $g_n^m$  および  $h_n^m$  は gauss 係数、 $P_n^m$  は Schmidt 規格化された Legendre 陪関数である。また、擾乱場  $\mathbf{B}_1$  はベクトルポテンシャル

$$\mathbf{B}_1 = \nabla \times (T\mathbf{r}) + \nabla \times \nabla \times (S\mathbf{r}) \quad (8)$$

で与える。(8) 式の第 1 項はトロイダル場、第 2 項はポロイダル場に相当する。ただし、 $T = T(\mathbf{r}, t)$ 、 $S = S(\mathbf{r}, t)$  はスカラー関数であり、球関数を用いて

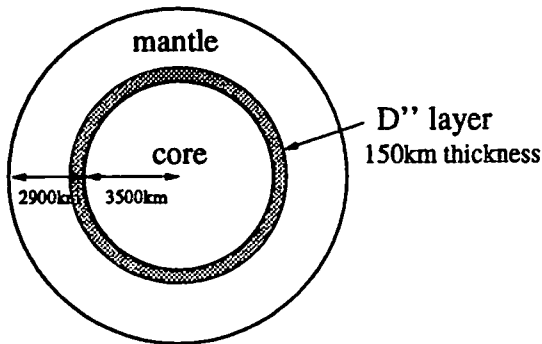
$$T(\mathbf{r}, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (t_n^{mc}(r, t) \cos m\phi + t_n^{ms}(r, t) \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (9)$$

$$S(\mathbf{r}, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (s_n^{mc}(r, t) \cos m\phi + s_n^{ms}(r, t) \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta) \quad (10)$$

と展開することができる。

### 3 計算

計算に用いた地球内部のプロフィールを第4図に、D''層の電気伝導度モデルを第1表に示す。なお、D''層以外のマントル領域は絶縁体であるとする。

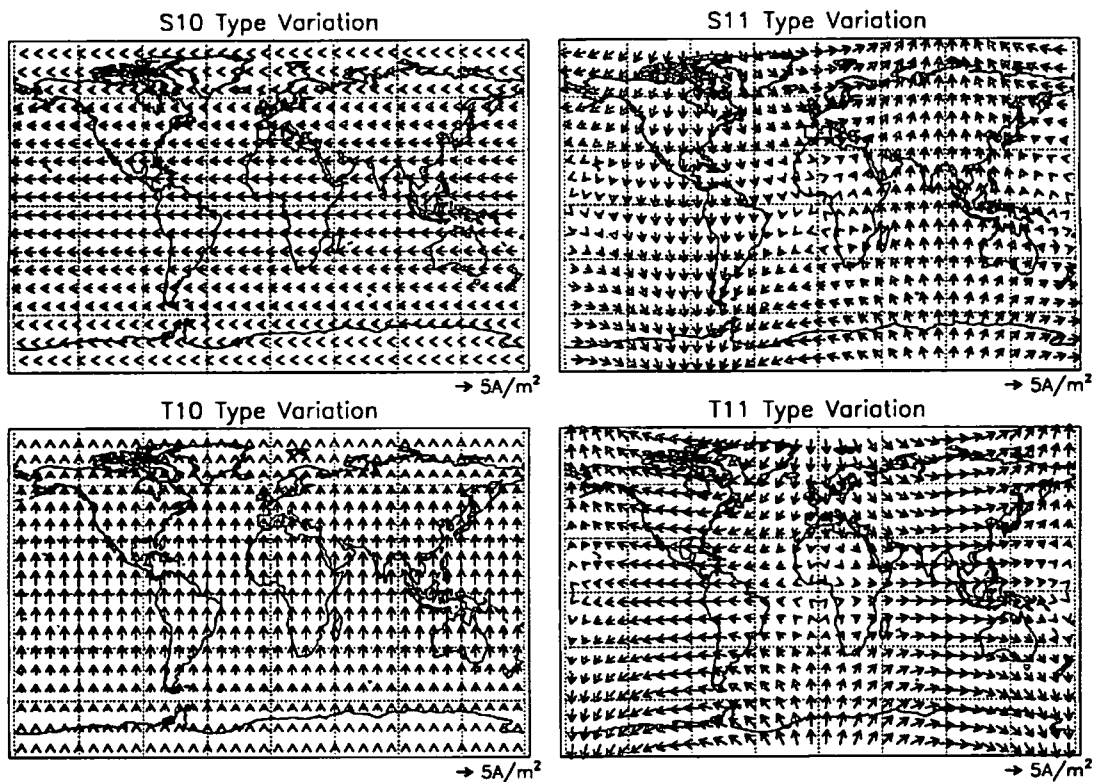


モデル	電気伝導度分布 (S/m)
東西不均一	$3000 + 2500 \sin \phi$
南北不均一	$3000 + 2500 \sin \theta$
均一	3000

第4図 計算に用いた地球内部モデル。

第1表 計算に用いたD''層の電気伝導度モデル。

D''層がどのように不均一であるかについては、まだまだ分かっていないことが多い。地震波の速度分布の観測によれば、球関数の(2,2)成分が卓越しているという報告 (Obayashi et al. [1997]) もあるが、地震波の速度と電気伝導度の間に相関関係があるかどうかは分からない。



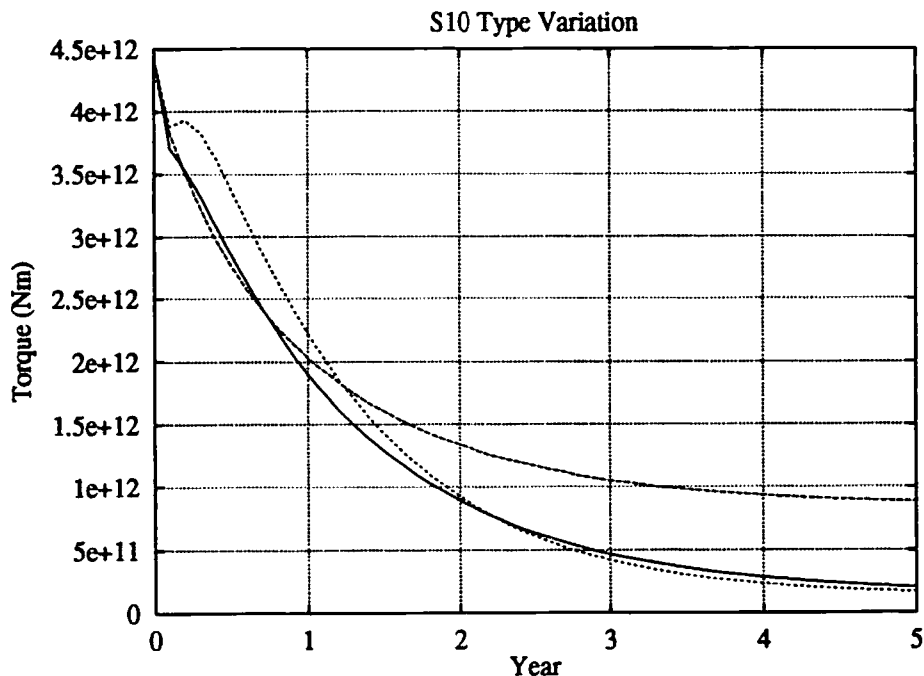
第5図 CMB付近に磁場変動を与えたときに流れる電流系(均一モデルの場合)。

本研究では、第1表にあるように、東西不均一モデル、南北不均一モデル、そして比較のため、均一モデルを用いて計算を行なった。また、磁場の基本場  $B_0$  としては、IGRF95 の2次の項までを与え、コア起源の磁場変動  $B_1$  としては、 $S_1^0$  型、 $S_1^1$  型、 $T_1^0$  型、および  $T_1^1$  型のものを与えた。ただし、磁場変動の大きさは  $100\text{nT}$  ( $s_n^{mc} = 100\text{nT}$  あるいは  $t_n^{mc} = 100\text{nT}$ 、 $s_n^{ms} = s_n^{ms} = 0\text{nT}$ ) とした。これらの磁場変動は、第5図に示すような電流系がCMB付近で流れることに相当する。

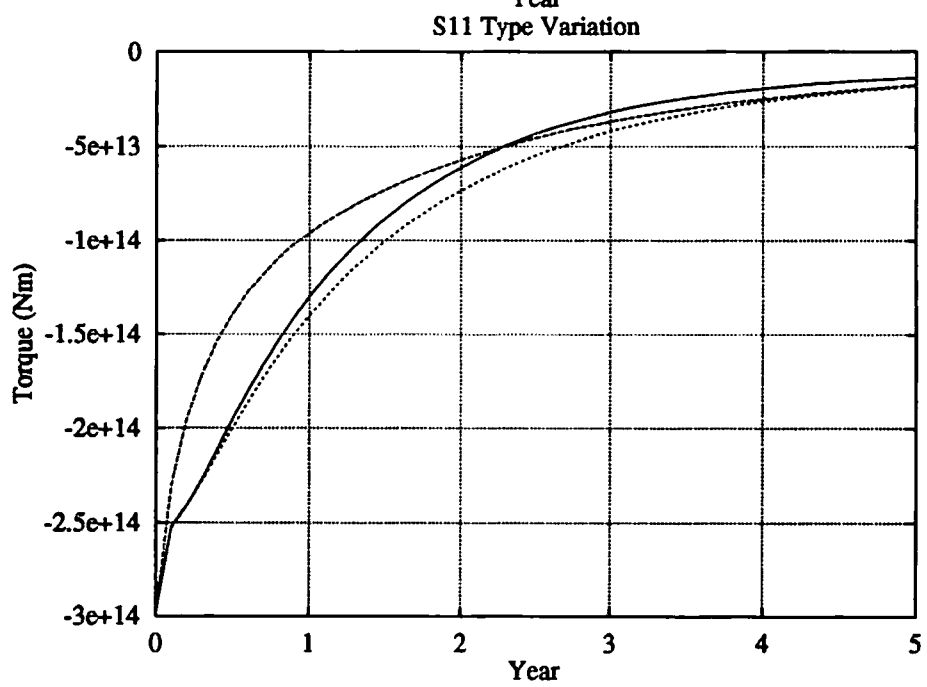
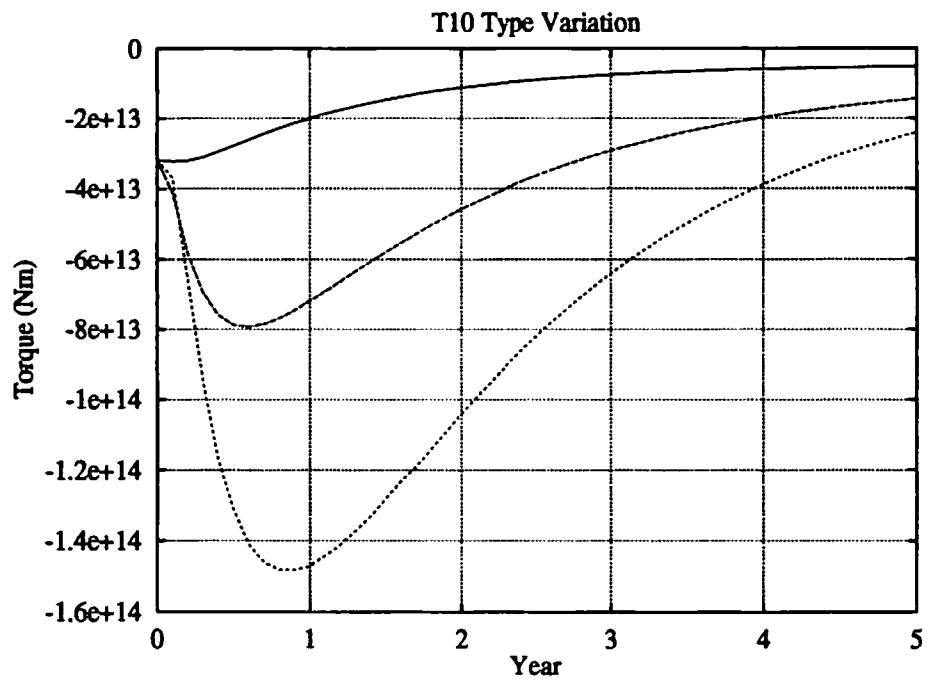
#### 4 計算結果と考察

マントルにはたらくトルクの計算結果を、磁場変動のモード別に第6図に示した。

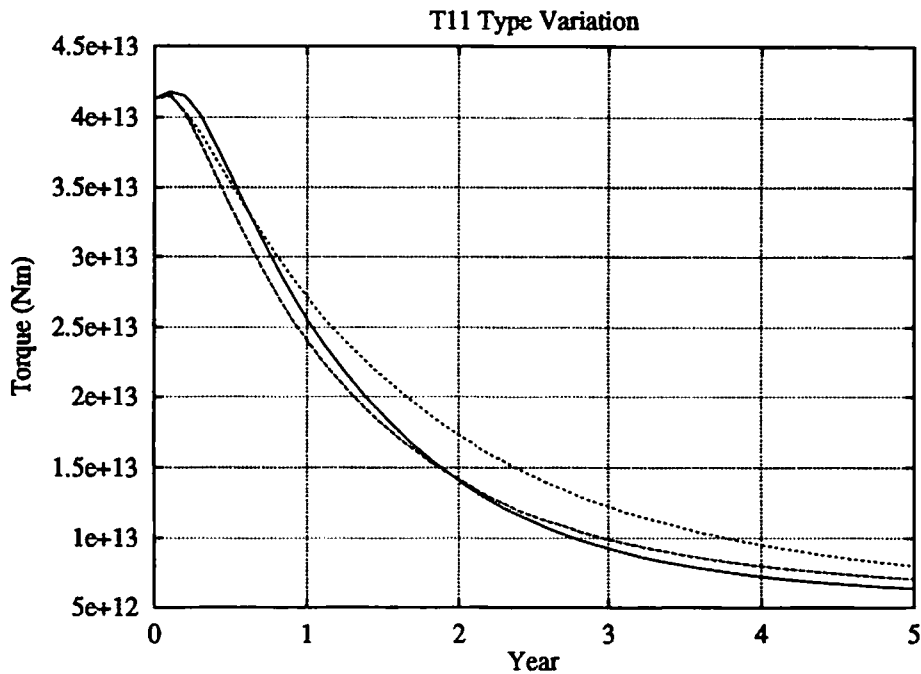
特に  $T_1^0$  型の磁場変動を与えた場合には、マントルに働くトルクは電気伝導度モデルによる差がはっきりと現れ、最大でおよそ6倍にも達している。どの磁場変動モードに差が現れるかは電気伝導度モデルの与え方にもよるが、いずれにせよ、電気伝導度の不均一性がマントルに働くトルクの大きさにも影響を与えることが示された。マントルに働くトルクの大きさのオーダーが、全体的に実際のものよりも3~4程度小さいが、これは磁場変動の与え方によるものであり、電気伝導度モデルによる差はやはり現れるものと思われる。なお、本研究では電気伝導度の不均一性を  $10^2$  程度としてモデルを与え、差分スキームにより、マントルに働くトルクを計算したが、実際のD''層は相当に不均一であると考えられており、電気伝導度がさらに大きな不均一性を持つことは十分に予想される。この場合には数値計算が発散しないように工夫を加える必要があるが、小山ら [1998] はIDMを用いた手法を開発している。



第6図 マントルに働くトルクの計算結果。実線が均一モデル、破線が東西不均一モデル、点線が南北不均一モデルを表す。



第 6 図 (続き)



第 6 図 (続き)

## 5 結論

D” 層に相当する電気伝導度分布が不均質な層をマントル最下部に与え、電磁結合による core-mantle coupling の理論により、コア起源の磁場変動がマントルに与えるトルクを計算し、均一モデルの場合と比較した。その結果、我々は、電磁結合による core-mantle coupling においては、電気伝導度分布の横方向の不均一性が無視できないことを示した。

## 謝辞

本論文を作成するにあたり、国立天文台地球回転研究系水沢観測センターの内藤勲夫先生から LOD のデータを頂きました。また、東京大学地震研究所の小山崇夫君からは、有益な議論および情報を頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。

## References

- Buffett, B. A., Constraints on magnetic energy and mantle conductivity from the forced nutations of the Earth, *J. Geophys. Res.*, **97**, 19581–19597, 1992
- Bullard, E. C., C. Freeman, H. Gellman, and J. Nixon, The westward drift of the Earth's magnetic field, *Phil. Trans. R. Soc. Lond., A*, **243**, 61–92, 1950

- Fukao, Y., S. Maruyama, M. Obayashi, and H. Inoue, Geologic implication of the whole mantle P-wave tomography, *J. Geol. Soc. Japan*, **100**, 4–23, 1994
- Hide, R., The topographic torque on a bounding surface of a rotating gravitating fluid and the excitation by core motions of decadal fluctuations in the Earth's rotation, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 961–964, 1995
- Holme, R., Electromagnetic core-mantle coupling—I. Explaining decadal changes in the length of day, *Geophys. J. Int.*, **132**, 167–180, 1998
- Knittle, E., and R. Jeanloz, Earth's core-mantle boundary: Results of experiments at high pressures and high temperatures, *Science*, **251**, 1438–1443, 1991
- Jault, D., and J. L. LeMouél, Exchange of angular momentum between the core and the mantle, *J. Geomag. Geoelectr.*, **43**, 111–129, 1991
- Jeanloz, R., The nature of the Earth's core, *Ann. Rev. Earth planet. Sci.*, **18**, 357–386, 1990
- Lambeck, K., The earth's variable rotation: Geophysical causes and consequences, *Cambridge Univ. Press, London*, 1980
- Love, J. J., and J. Bloxham, Electromagnetic coupling and the toroidal magnetic field at the core-mantle boundary, *Geophys. J. Int.*, **117**, 235–256, 1994
- Obayashi, M., and Y. Fukao, P and PcP travel time tomography for the core-mantle boundary, *J. Geophys. Res.*, **102**, 17825–17841, 1997
- Rochester, M. G., Causes of fluctuation in the rotation of the Earth, *Phil. Trans. R. Soc. Lond., A*, **313**, 95–105, 1984
- Stewart, D. N., F. H. Busse, K. A. Whaler, and D. Gubbins, Geomagnetism, Earth rotation and the electrical conductivity of the lower mantle, *Phys. Earth Planet. Int.*, **92**, 199–214, 1995
- Stix, M., and P. H. Roberts, Time-dependent electromagnetic core-mantle coupling, *Phys. Earth Planet. Int.*, **36**, 49–60, 1984
- 本蔵義守, 松島政貴, マントル電気伝導度標準モデルについて, 地球惑星科学関連学会, 1997
- 小山崇夫, 歌田久司, マントル電気伝導度の地球内部起源電磁場変動におよぼす影響, CA 研究会 論文集, 1997
- 小山崇夫, 歌田久司, D" layer の不均質が地球内部起源電磁場変動におよぼす影響, 地球惑星科学 関連学会, 1998