

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2006 ～ 2008

課題番号：18204038

研究課題名（和文） 地球流体核の乱流運動を知る

研究課題名（英文） Turbulence in the Earth' s outer core

研究代表者

浜野 洋三（HAMANO YOZO）

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・プログラムディレクター

研究者番号：90011709

研究成果の概要：本研究では、磁場変動の観測、室内実験、及び数値シミュレーションを相互に連携して進めた。磁場変動の観測では、北西太平洋海底の2観測点での長期計測を実現し良質なデータを得た。室内実験では、液体金属の熱対流に水平及び垂直方向の磁場を印加し、磁場強度の増加による対流の様相並びに乱流スペクトルの変化をとらえることに成功した。数値シミュレーションでは、球殻熱対流ダイナモを数多くの設定で実現し詳細な解析を行った。これらを総合することで、地球流体核の乱流状態に関する示唆が得られた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
2007年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2008年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
総計	26,300,000	7,890,000	34,190,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：地球磁場、ダイナモ作用、磁場観測、室内実験、数値シミュレーション、乱流、古地磁気測定、地球流体核

## 1. 研究開始当初の背景

地球磁場の起源を明らかにすることは地球科学の基本的な重要問題である。地球磁場が地球中心部にある流体核でのダイナモ作用によって生成・維持されていることは、20世紀中頃から考えられ、その解明のために様々な研究が続けられてきた。また装置観測や古地磁気学によって地球磁場の挙動が調べられてきた。本研究の特色は、これまでは不可能と考えられていた地球深部の流体核中の乱流運動の実態を、地表で観測可能な磁場の時間変化から明らかにするための新しい方法を見出し、室内実験と数値シミュレーシ

ンによりこの方法を確立して、実際のコアの乱流の様相を明らかにしようとする点にある。このような研究が可能となったのは、地球シミュレータを代表とする高性能の並列計算機によって高分解能のダイナモシミュレーションが行なえるようになったことと、海底堆積物による連続的な相対磁場強度の測定や考古学試料を用いた年代精度の高い古地球磁場強度の測定等の結果が蓄積し、過去の連続的な磁場変動の様子が精度良く分かってくることに加えて、我々のグループによる超音波流速分布計測法の改良によって、液体金属の熱対流運動の測定が可能なまで

流速の測定精度を高められたことが大きく貢献している。乱流の研究では高レイリー数、高レイノルズ数の実験を行なうために液体金属が使われているが、金属が不透明であるために流れ場を直接見ることはできず、温度の時間変化等の測定が用いられているのが通常である。本研究では速度場の測定も同時に行なうことによって、多面的に液体金属中の乱流状態を測定できることが大きな強みである。

## 2. 研究の目的

地球磁場の発生源である流体核(コアの外核)は、その大きさに比して粘性率が極めて小さいため、激しい乱流状態にある。この乱流運動がダイナモ作用によって、地球磁場を生成・維持している。しかし、地表で観測できる長波長の磁場から分かるのはコア内の大スケールの運動だけで、流体核中の乱流の状態を知るために必要となる小スケールの渦の様子は、直接見ることはできない。本研究の目的は、地球磁場変動の観測・解析、液体金属を用いた熱対流の室内実験と、地球ダイナモの数値シミュレーションに基づいて、地表で観測可能な磁場変動の時間スペクトルから、流体核内の乱流スペクトルを特定するための手法を確立し、地球コア内部の乱流運動の状態を復元すると共に、乱流運動によるダイナモ作用の物理を明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

### (1) 磁場変動の観測

実際の地球磁場変動観測のため、フィリピン海プレートの中央部の海底(WP1)に地球電磁気観測所を設ける。従来から稼働している観測点(WP2)とともに、深海底の2地点で長期間の変動観測を実現する。

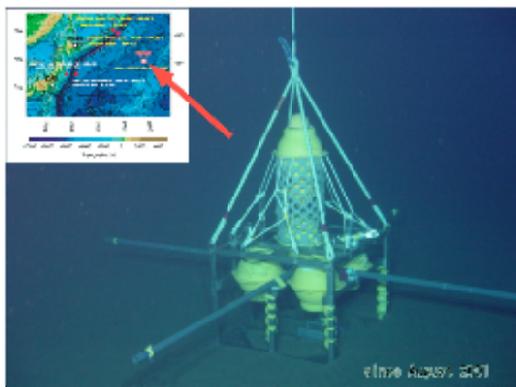


図 1 深海底での電磁気観測

### (2) 室内実験

融点の低い金属ガリウムを用いて、広いレイリー数の範囲で乱流熱対流の実験を行い、

乱流スペクトルのレイリー数依存性を調べる。複数点での温度測定に加えて、超音波流速分布計測法により、対流パターンとその時間変動を可視化するのが本研究の特徴である。乱流が組織化された大規模構造とその振動を詳細にとらえることができる。さらに、ヘルムホルツコイルシステムを構築し、水平および垂直磁場の影響下での熱対流の様相を調べて、対流場の構造と磁場との関係を明らかにする。

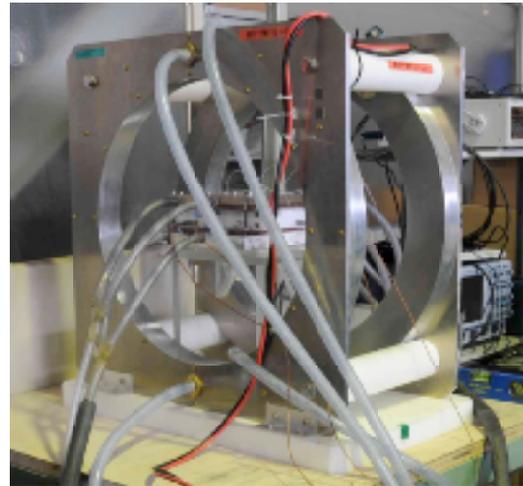


図 2 水平磁場を印加する実験装置

### (3) 数値シミュレーション

数値シミュレーションの目的は、地表で観測される磁場とコア内の乱流運動、ダイナモ作用との相互の関係を明らかにし、室内実験の結果を参照して、そのメカニズムを解明することである。地球シミュレータを利用して、高解像度の計算を実行する。得られる流れ場と磁場の解析から、乱流スペクトルを支配する詳細なメカニズムの解明につなげる。

## 4. 研究成果

### (1) 磁場変動の解析とシミュレーション

コア内の乱流スペクトル(運動エネルギーと磁気エネルギーの波数依存性)を、地表で観測可能な磁場変動の時間スペクトルから推定するため、ダイナモモデルを解析することによりこれらの物理量の関係を詳細に調べた。その結果、双極子磁場強度の時間変動スペクトルと外核表層の運動エネルギーが密接に関係していることを見出し、地球ダイナモについての情報を得ることが出来た。また、内核-外核境界の熱流量をパラメータとして、生成される磁場の安定性、乱流スペクトルとの関係を調べた。内核から外核への熱輸送の割合(Q)が増加することによって、双極子/非双極子比が小さくなり、生成される磁場が不安定になることを見出した。

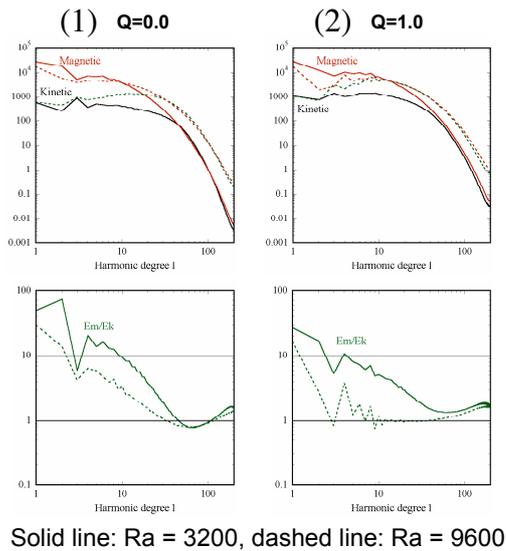


図 3 エネーグースペクトルの例

さらにダイナモシミュレーションでは、コア-マントル境界及び内核-外核境界での熱境界条件（温度一定か熱流量一定か）の違いによって生成される磁場がどのように異なるかを系統的に調べた。等温温度境界では磁場変動に乱れが大きく、不安定な磁場が生成されることが確かめられた。

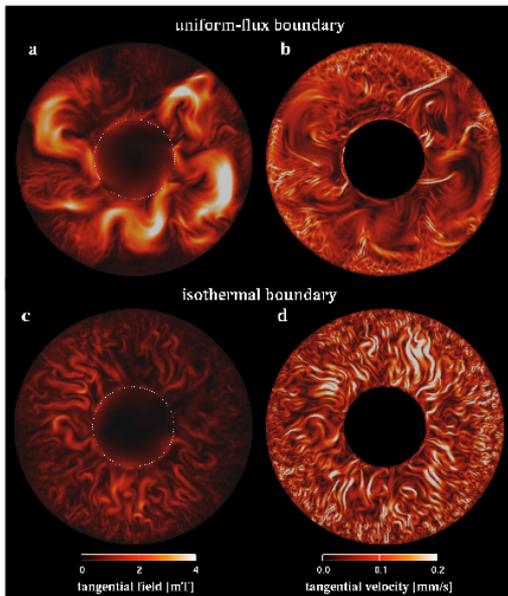


図 4 熱境界条件の違いによる不安定化

(2) 液体金属の熱対流

室内実験での速度分布計測から、組織化された大規模流の特徴が明らかになり、同様の構造が数値シミュレーションでも確かめられた。水平磁場を印加する実験ではその強度を増加するにつれて、「対流が磁場の影響を

受けず乱れが大きい領域」「対流ロール構造が磁場と平行に存在するが構造に長時間変動の見られる領域」「対流構造が二次元的で変動もごく小さい領域」の3つの領域に分けられることを確立した。構造に長時間変動の見られる領域は地球磁場変動の解釈にも重要な示唆を与える。垂直磁場を印加する実験では、磁場強度の増大に伴って対流流速が減少することが確かめられた。これらの結果から対流構造と乱流スペクトルへの磁場の効果を定量的に説明可能なモデルを構築した。

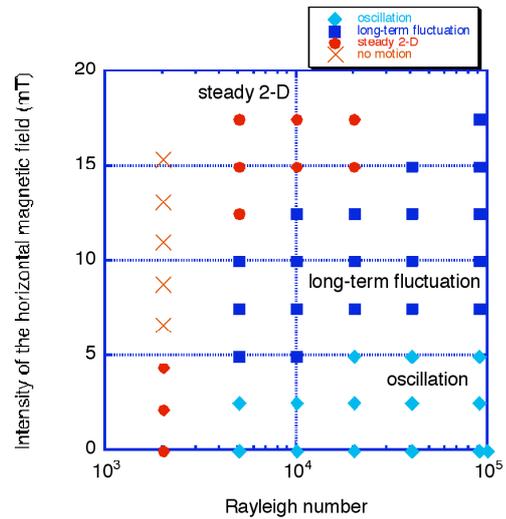


図 5 磁場強度と対流パターン

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

1. Higashi, N., I. Sumita, 2009, Experiments on granular rheology: effects of particle size and fluid viscosity, *J. Geophys. Res.*, 114, B04413. (査読有)
2. Sumita, I., M. Manga, 2008, Suspension rheology under oscillatory shear and its geophysical implications, *Earth Planet Sci. Lett.* 269, 467-476. (査読有)
3. Toh, H., S. Honma, 2008, Mantle upwelling revealed by genetic algorithm inversion of the magnetovariational anomaly around Kyushu island, Japan, *J. Geophys. Res.*, 113, B10103. (査読有)
4. Tasaka, Y., Y. Takeda, T. Yanagisawa, 2008, Ultrasonic visualization of thermal convective motion in a liquid gallium layer, *Flow Meas. Inst.*, 19, 131-137. (査読有)
5. Obayashi, H., Y. Tasaka, S. Kon, Y.

- Takeda, 2008, Velocity vector profile measurement using multiple ultrasonic transducers, *Flow Meas. Inst.*, 19, 189-195. (査読有)
6. Tasaka, Y., K. Yonekura, Y. Takeda, T. Yanagisawa, 2008, Dilatation and pattern formation of cells in internally heated convection, *J. Visualization*, 11, 163-172. (査読有)
  7. 吉原 新, 渋谷 秀敏, 綱川 秀夫, 松島 政貴, 2008, 白亜紀スーパークロンと温室地球-関連性の示唆と古地磁気強度-, *月刊地球*, 30, 378-386. (査読無)
  8. Sakuraba, A., Y. Hamano, 2007, Turbulent structure in Earth's fluid core inferred from time series of geomagnetic dipole moment, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L15308. (査読有)
  9. Oishi, Y., Sakuraba, A., Y. Hamano, 2007, Numerical method for geodynamo simulations based on Fourier expansion in longitude and finite difference in meridional plane, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 164, 208-220. (査読有)
  10. Shao, J-C., Y. Hamano, M. D. Fuller, 2007, Representation of the main geomagnetic field using Maxwell's theory of poles, *Geophys. J. Int.*, 169, 91-99. (査読有)
  11. Oishi, Y., Sakuraba, A., Y. Hamano, 2007, Implementation of the Fourier transform method for geodynamo simulation on the Earth Simulator, *J. Earth Simulator*, 7, 9-15. (査読有)
  12. Toh, H., H. Kanazaki, M. Ichiki, 2007, A regional model of the geomagnetic field over the Pacific Ocean for epoch 2002, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L09308 (査読有)
  13. Matsumoto, N., A. Namiki, I. Sumita, 2006, Influence of a basal thermal anomaly on mantle convection, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 157, 208-222. (査読有)
  14. Toh, H., Y. Hamano, M. Ichiki, 2006, Long-term seafloor geomagnetic station in the northwest Pacific: A possible candidate for a seafloor geomagnetic observatory, *Earth Planets Space*, 58, 697-705. (査読有)
- [学会発表] (計 28 件)
1. Yanagisawa, T., et al., Fluctuation of convection pattern in liquid metal under uniform magnetic field, American Geophysical Union Fall meeting, 2008 年12月18日, Moscone Center, San

- Francisco, USA
2. Toh, H., et al., Electrical structure beneath the back-arc region of southwest Japan: Results from a seafloor magnetotelluric array study, American Geophysical Union Fall meeting, 2008 年12月18日, Moscone Center, San Francisco, USA
  3. Sakuraba, A., Torsional Oscillations in a Numerical Geodynamo Operating in a Regime of Low Ekman and Magnetic Prandtl Numbers, American Geophysical Union Fall meeting, 2008 年 12 月 18 日 , Moscone Center, San Francisco, USA
  4. Takahashi, J., et al., Experimental study of convection cell transition in internally heated layer, 61<sup>th</sup> Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society, 2008年11月25日, San Antonio Convention Center, USA
  5. Yano, K., et al., Experimental investigation on coupling flows between liquid and liquid metal layers, 61<sup>th</sup> Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, American Physical Society, 2008 年 11 月 24 日 , San Antonio Convention Center, USA
  6. Toh, H., The two Seafloor Electromagnetic Stations Operating in the West Philippine Basin and the Northwest Pacific Basin, IGY+50 International Symposium, 2008年11月9日, 産業技術総合研究所 つくばセンター
  7. 藤 浩明, The vertical gradient sounding method revisited, 第124回 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2008年10月10日, 仙台市戦災復興記念館
  8. Yanagisawa, T., et al., Measurement of turbulent thermal convection in liquid metal under uniform magnetic field, 6<sup>th</sup> Int. symposium on Ultrasonic Doppler Method for fluid mechanics & fluid engineering, 2008 年 9 月 10 日 , Czech Technical University in Prague, Czech
  9. Yano, K., et al., Ultrasonic investigation on coupling of flows between liquid and liquid metal layers, 6<sup>th</sup> Int. symposium on Ultrasonic Doppler Method for fluid mechanics & fluid engineering, 2008 年 9 月 10 日 , Czech Technical University in Prague, Czech
  10. Tasaka, Y., et al., Ultrasonic investigation of flow transition in surface switching of rotating fluid, 6<sup>th</sup> Int. symposium on Ultrasonic Doppler Method for fluid mechanics & fluid engineering, 2008 年 9 月 9 日 , Czech

- Technical University in Prague, Czech
11. 高橋 潤平, 他, 内部発熱対流のセル内流動, 日本流体力学会年会, 2008年9月4日, 神戸大学
  12. 藤 浩明, 他, Geoelectrical structure beneath the northwest Pacific - A review, 日本地球惑星科学連合大会, 2008年5月28日, 千葉, 幕張メッセ
  13. 櫻庭 中, 熱対流が駆動するダイナモに対する歳差運動の影響, 日本地球惑星科学連合大会, 2008年5月28日, 千葉, 幕張メッセ
  14. 高橋 潤平, 他, Experimental study of convection cell structure in internally heated layer, 日本地球惑星科学連合大会, 2008年5月27日, 千葉, 幕張メッセ
  15. 矢野 可南子, 他, Experimental study on the coupling of flows between liquid and liquid metal layers, 日本地球惑星科学連合大会, 2008年5月27日, 千葉, 幕張メッセ
  16. 柳澤 孝寿, 他, Characteristics of turbulent thermal convection in liquid metal under uniform magnetic field, 日本地球惑星科学連合大会, 2008年5月27日, 千葉, 幕張メッセ
  17. 澁谷 史, 他, 液体中における粉粒体崩壊の実験, 日本地球惑星科学連合大会, 2008年5月27日, 千葉, 幕張メッセ
  18. 浜野 洋三, 海底電磁場変動の観測に基づく津波モニタリング, 日本地球惑星科学連合大会, 2008年5月26日, 千葉, 幕張メッセ
  19. 北村 翔吾, 他, 乱流ブルームの形状進化: 実験的アプローチ, 日本地球惑星科学連合大会, 2008年5月26日, 千葉, 幕張メッセ
  20. Sakuraba, A., Turbulent structure in the Earth's core inferred from paleomagnetic power spectrum of the dipole moment, The XXIV IUGG General Assembly, 2007年7月4日, Perugia, Italy
  21. Oishi, Y., et al., Geometrical and thermal effects of the inner core on magnetohydrodynamic dynamos, The XXIV IUGG General Assembly, 2007年7月2日, Perugia, Italy
  22. Yanagisawa, T., et al., Turbulent thermal convection in liquid metal and the effect of magnetic field, The XXIV IUGG General Assembly, 2007年7月2日, Perugia, Italy
  23. 浜野 洋三, Toroidal magnetic field in the Earth's core, 日本地球惑星科学連合大会, 2007年5月20日, 千葉, 幕張メッセ
  24. 櫻庭 中, 他, Numerical simulations of liquid gallium thermal convection, 日本地球惑星科学連合大会, 2007年5月20日, 千葉, 幕張メッセ
  25. 大石 裕介, 他, Effect of the heat source distribution in the Earth's core on the stability of geodynamo, 日本地球惑星科学連合大会, 2007年5月20日, 千葉, 幕張メッセ
  26. 吉原 新, 他, Paleomagnetism of Archean igneous rocks from the Pilbara craton, Australia: implications for the Pilbara APWP, 日本地球惑星科学連合大会, 2007年5月20日, 千葉, 幕張メッセ
  27. 田坂 裕司, 他, Experimental study of thermal convection induced by volumetric heat source, 日本地球惑星科学連合大会, 2007年5月20日, 千葉, 幕張メッセ
  28. 柳澤 孝寿, 他, Turbulent thermal convection in liquid metal and the effects of magnetic field, 日本地球惑星科学連合大会, 2007年5月20日, 千葉, 幕張メッセ
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
 

浜野 洋三 (HAMANO YOZO)  
 独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・プログラムディレクター  
 研究者番号: 90011709
  - (2) 研究分担者
 

武田 靖 (TAKEDA YASUSHI)  
 北海道大学・工学系研究院・教授  
 研究者番号: 90108481

隅田 育郎 (SUMITA IKURO)  
 金沢大学・自然科学研究科・准教授  
 研究者番号: 90334747

櫻庭 中 (SAKURABA ATARU)  
 東京大学・大学院理学系研究科・助教  
 研究者番号: 50345261

柳澤 孝寿 (YANAGISAWA TAKATOSHI)  
 独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・研究員  
 研究者番号: 20359186

藤 浩明 (TOH HIROAKI)  
 京都大学・大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター・准教授

研究者番号：40207519

(3)連携研究者

田坂 裕司 (TASAKA YUJI)  
北海道大学・工学系研究院・助教  
研究者番号：00419946

吉原 新 (YOSHIHARA ARATA)  
富山大学・大学院理工学研究部・助教  
研究者番号：50361944