

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 30 日 現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21244071

研究課題名（和文）地球ダイナモのエネルギー散逸量の決定

研究課題名（英文）Determination of the energy dissipation in the Geodynamo

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・地球内部ダイナミクス領域・チームリーダー

研究者番号：90011709

研究成果の概要（和文）：液体金属を用いた熱対流実験と数値シミュレーションを行い、レーリー数、外部磁場及び対流槽の回転速度によって、対流の様相がどのように変化するかを調べ、ダイナモ作用の原動力である地球中心核内の対流運動の活発さやエネルギー散逸量と、地表で観測可能な地球磁場とその変動との関係を見出した。本実験により外部磁場とレーリー数のある範囲内で熱対流パターンの不規則かつ自発的な逆転現象が発見されたことは、地球磁場の逆転の起源を解明する上で重要な進展である。

研究成果の概要（英文）：Laboratory experiments on the turbulent thermal convection of a liquid metal under ambient magnetic fields with various intensities were carried out. Consulting with the observed variations of the geomagnetic field and the results of geodynamo simulations, we tried to infer the turbulent state and the energy dissipation in the Earth's core. In the experiments, we found spontaneous reversals of the flow patterns of thermal convections within a certain range of the intensity of the magnetic fields and the Rayleigh numbers, which might be important to understand the origin of the geomagnetic field reversals.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	15,100,000	4,530,000	19,630,000
2010年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
2011年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
総計	34,100,000	10,230,000	44,330,000

研究分野：固体地球物理学

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、地球流体核、ダイナモ作用、磁場変動観測、室内実験、数値シミュレーション、乱流

1. 研究開始当初の背景

地球磁場の起源は昔から地球科学上の最も大きな謎の一つであった。地球磁場が地球中心部にある流体核中でダイナモ作用によって生成・維持されている事は20世紀中頃から

考えられ、それを立証するための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過去の磁場の変動が調べられてきた。この地球磁場の起源に関わる研究での画期的な進展は、1990年代半ば以降、ダイナモ方

程式を直接数値計算する MHD ダイナモシミュレーションが行われるようになった事である (Kageyama et al,1999,Glatzmeier and Roberts,1995,Kuang and Bloxam,1997)。これらのダイナモモデルは、地球磁場の特徴である双極子磁場の卓越する磁場を実現し、さらに地磁気の逆転も再現しているモデルも多く、ダイナモシミュレーションによって実際に地球のコアの環境で自発的に磁場が生成維持されることが実証できたということが出来る。しかし、地球コアの粘性が極めて低いために、粘性力と地球の自転によるコリオリ力の比をあらわすエクマン数等、シミュレーションに用いられる物性パラメーターは、実際のコアとはかけ離れたものであり、ダイナモシミュレーションで示される状況が、実際の地球で起こっている現象を表わしているかどうかについては、疑問視されていた。本研究の研究分担者である陰山、宮腰らによって、従来より一桁以上エクマン数の小さい ($\sim 10^{-7}$) ダイナモモデルが発表された (Kageyama et al, 2008)。このモデルで得られたコア内の速度場と磁場は従来のエクマン数の大きなダイナモモデルとは大きく異り、非定常なシート状の動径方向の流れが活発に磁場を生成・維持しているものである。このモデルの示す流れ場は、本研究の研究分担者である隅田らが行なった回転の速い系での熱対流実験 (Sumita and Olsen, 2000) によっても実現されている。これらの結果は、実際の地球のように、粘性力が小さく回転によるコリオリ力が卓越した場で働く地球ダイナモが、これまでのダイナモシミュレーションで得られたモデルとは全く違ったものである可能性を示唆する。このため、本研究の開始された当初において、地球磁場の起源の解明のためには、地表で観測可能な量とダイナモ作用の原動力である熱対流運動との関係を明らかにし、それを用いて実際の地球中心核内の活動や状態を知ることが、是非必要とされた。

2. 研究の目的

本研究では、地球ダイナモの原動力であるコアの対流運動の活発さやエネルギー散逸量と、ダイナモ作用によって生成される磁場およびその変動との関係を見だし、実際の地球磁場変動の解析から、コア中で地球磁場の生成・維持に働いているダイナモ作用の実態を明らかにすることを目的とする。そのために、磁場と回転の効果を取り入れて、流体運動の振る舞いを調べる液体金属を用いた室内実験を行い、さらに実験結果検証のための数値シミュレーション及び地球ダイナモの数値シミュレーションを実施する。これらの液体金属を用いた室内実験と数値シミュレーションにより、地球ダイナモの活動度と磁場変動との間の関係を見出し、地球ダイナモの動力

源を特定すると共に、地球の熱進化過程についての重要な制約条件を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究課題では、上記目的を達成するために、伝導性の高い液体金属を用いた熱対流の室内実験と、実験結果の検証のための数値シミュレーションを緊密に連携して実施する。さらに実際の地球磁場変動とコア内の流体運動及びダイナモ作用に使われているエネルギーと、地表で観測可能な磁場の空間分布と時間変動とを結びつけるために、室内実験の成果を取り入れた MHD ダイナモシミュレーションを行なっている。

(1) 室内実験では、融点の低い金属ガリウムを媒体として用いて、広いレイリー数の範囲で乱流熱対流の実験を行なった。特に不透明な液体金属の対流パターンの変動を、超音波流速分布計速法により実測し、対流パターンとその時間変動を可視化できるようにしたことが、本研究の特徴の一つとなっている。本研究では対流槽内での流速分布の計測に加えて、温度測定を行うことによって、対流の無い静止状態から、2次元定常対流、2次元非定常対流、3次元対流、乱流という対流様式の移り変わりを、レイリー数、外部磁場、さらには回転速度をパラメータとして詳細に精査する実験を行った。外部磁場を対流層に加えるためには、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。また回転の効果を調べるための回転流体実験では、温度制御用の水や電力の供給、また計測器出力の取り出しを考慮した大型非磁性の回転装置を設計・製作した。

(2) 対流実験結果の再現・検証のために、実験と同じ構成で、熱対流の数値シミュレーションを実施した。実験結果を再現しその物理メカニズムを明らかにするために、重要な役割を果たす。

(3) さらに、それらを実際の地球の磁場変動と結びつけるために地球ダイナモの数値シミュレーションを実施している。

4. 研究成果

(1) 金属ガリウムを用いた液体金属の熱対流の室内実験については、2種類の容器で実験を行った。縦長の容器 (50mm [D] x 200mm [L] x 50mm [H]) による実験では、レイリー数と外部印可磁場に対するパラメータスタディーを実施し、安定な2次元ロール状対流から、2次元ロールの短周期振動、3次元対流、さらには非定常な乱流対流に至る全遷移過程を超音波流速計と温度測定の結果から明らかにすることが出来た。これにより、乱流状態で見ら

れる大規模流が、臨界レイリー数近傍で生じる2次元ロール対流の振動不安定から連続的に遷移したものであることを見出した。また、水平方向に向けた外部印可磁場による効果は、磁場方向に伸びた2次元ロール構造を安定化させ、振動不安定が生じるレイリー数を増加させること、不安定で生じた振動数や振動振幅については、印可磁場に依存せず、主にレイリー数だけの関数となっていることが分かった。

さらに図1左に示すような正方形の容器(200mm[D] x 200mm[L] x 50mm[H])を用いた実験においては、縦長容器の場合と同様に、二次元ロール対流(図1右に示す)から3次元不規則対流に移り変わる境界近傍で、2次元ロール対流が、対流セルの循環時間程度の時間スケールを持つ短周期振動を起こすことと、その振幅が境界に近づくに従って、増加することが分かった。

また、正方形の容器だけに見られる現象として、より高い磁場、低いレイリー数の範囲で、2次元ロール構造の長周期の変動と対流パターンが自発的、不規則に逆転する逆転現象が発見された。逆転は不規則に発生し、ポアソン過程にほぼ従うと考えられる。またこの逆転の平均の逆転間隔は、対流運動が層内を1周する時間に比べて20-30倍長い。この逆転現象の統計的な性質は、地球磁場の逆転と似通っている。この逆転現象の発見を含めて、これまでの熱対流実験の結果は、Physical Review 誌に3編の論文として公表した。

大型の回転台に実験装置を載せたコリオリ力の効く系での熱対流については、回転対流のパターンのレイリー数・テイラー数・プラントル数への依存性に関する豊富なデータを取得することができた。回転速度を上げる(高テイラー数)と水平のロール構造は消失し、縦方向の渦が主体となる。テイラー数とともに渦のスケールが小さくなることが確かめられた。

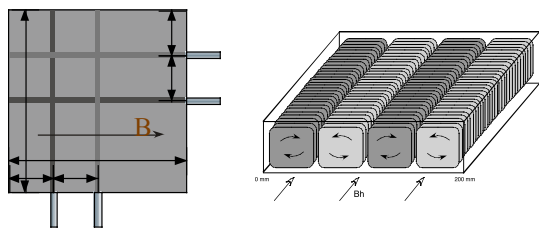


図1 (左) 金属熱対流の実験装置。磁場Bに直交する2側線(UV1,UV2)、及び磁場方向の2側線(UV3,UV4)で流速の測定を行っている。(右) 安定な2次元ロール構造

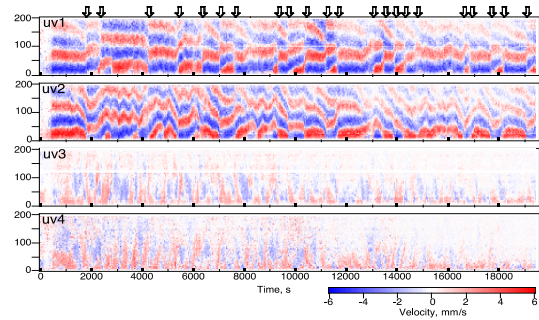


図2 4方向(図1左に示す)の流速の時間変化。対流運動が磁場方向に伸びた4ロールの対流が卓越していることと、不規則な時間間隔で流れ場の逆転が自発的に発生することを示す。

(2) 対流実験と同じ配置を持つ系での数値シミュレーションについては、外部磁場が対流に与える影響を調べるために水平方向に強い外部磁場をかけたときの対流の数値シミュレーションを実施し、実験結果と同様な磁場方向に軸を持つロール状の対流セルが形成されることを示し、その対流パターンが外部磁場の強さによって変調を受ける効果を確認した。

さらに、実験に対応する系の高解像度・長時間の数値シミュレーションによって、実験結果と同様に、流れ場の反転現象を再現することに成功した。この現象をさらに精査することによって、逆転のメカニズムの解明に寄与することが期待できる。

また回転が対流に与える影響を調べるために、エクマン数が $10E-6$ 程度の高速回転下での熱対流の数値シミュレーションを実施し、螺旋状の流線を持ち、回転軸方向に細長く伸びた対流胞構造の形成を確認した。

(3) 地球コアを想定したダイナモシミュレーションでは、これまでで最も低エクマン数の地球ダイナモを、地球シミュレータを利用した数値シミュレーションで実現し、ダイナモ作用を起こす流速場として、これまで見つかっていなかった新しい2重対流構造(シート状流と帯状流)を発見した。また同じく大規模ダイナモシミュレーションにより、コア-マントル境界での熱境界条件がダイナモ作用によって生成維持される磁場に大きく影響することを見出した。特に熱流量一定の境界条件が地球磁場に似た構造を持つことを示した。

また、新しい地球ダイナモシミュレーション研究として、地球自転速度がダイナモ作用に与える影響を調べるためのシミュレーションコードを完成させ、2万年および200年周期の自転速度変動を持つダイナモのシミュレーションを実施した。結果は変動周期が長いほど、またエクマン数が小さい程、大きな磁場変動が得られるという重要な結果を得た。

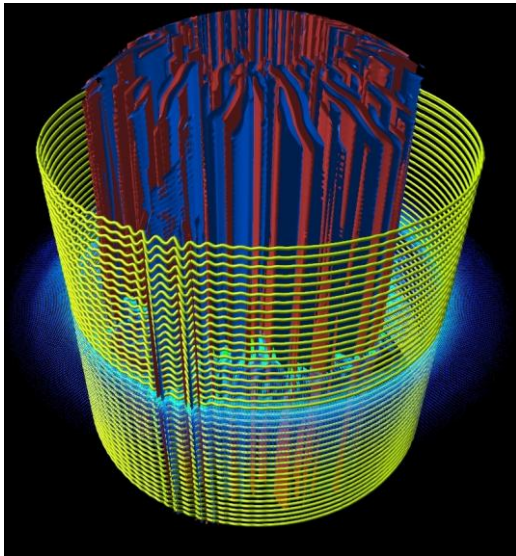


図3 低粘性、高レイリー数のダイナモモデルの計算結果。外核内で、内核に近い領域は、短波長で、動径方向の流れ成分が支配的なシート状流が形成される。一方、マントルに近い領域では、経度方向の成分が支配的な流れが形成されるという、2重対流構造が表れることを発見した。

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 28 件)

① T. Miyagoshi, A. Kageyama, & T. Sato, Formation of sheet plumes, current coils, and helical magnetic fields in a spherical magnetohydrodynamic dynamo, *Physics of Plasmas*, 査読有, 18, 2011, 072901-1-10, doi:10.1063/1.3603822

② T. Yanagisawa, Y. Yamagishi, Y. Hamano, Y. Tasaka, & Y. Takeda, Spontaneous flow reversals in Rayleigh - Benard convection of a liquid metal, *Physical Review E*, 査読有, 83, 2011, 036307-1-6

③ I. Sumita & Y. Ota, 2011, Experiments on buoyancy-driven crack around the brittle-ductile transition, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 査読有, 304, 337-346, doi:10.1016/j.epsl.2011.01.032

④ S. Kitamura, & I. Sumita, 2011, Experiments on a turbulent plume: shape

analyses, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 116, B03208, doi:10.1029/2010JB007633

⑤ T. Yanagisawa, Y. Yamagishi, Y. Hamano, Y. Tasaka, K. Yano, J. Takahashi, & Y. Takeda, Detailed investigation of thermal convection in a liquid metal under a horizontal magnetic field: suppression of oscillatory flow observed by velocity profiles, *Physical Review E*, 査読有, 82, 2010, 056306-, 2010.

⑥ T. Yanagisawa, Y. Yamagishi, Y. Hamano, Y. Tasaka, M. Yoshida, K. Yano, & Yasushi Takeda, Structure of large-scale flows and their oscillation in the thermal convection of liquid gallium, *Physical Review E*, 査読有, 82, 016320-, 2010.

⑦ T. Miyagoshi, A. Kageyama, & Tetsuya Sato, Zonal flow formation in the Earth's core, *Nature*, 査読有, Vol. 463, pp. 793-796, 2010

⑧ T. Kobayashi, A. Namiki, & I. Sumita, 2010, Excitation of airwaves caused by bubble bursting in a cylindrical conduit: Experiments and a model, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 115, B10201, doi:10.1029/2009JB006828.

⑨ A. Sakuraba, & P. H. Roberts, Generation of a strong magnetic field using uniform heat flux at the surface of the core, *Nature Geosci.* 査読有, 2, 802-805, 2009.

⑩ N. Ohno, & A. Kageyama, 2009, Visualization of Spherical Data by Yin-Yang Grid, *Comput. Phys. Comm.*, 査読有, vol. 180, pp. 1534--1538

⑪ N. Higashi, & I. Sumita, 2009, Experiments on granular rheology: effects of particle size and fluid viscosity, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 114, B04413, doi.10.1029/2008JB005999.

[学会発表] (計 51 件)

① I. Sumita, Y. Shibano, Y. Ota, & A. Namiki, Exploring ascent mechanisms of geofluids using laboratory experiments, *Geofluids-2 symposium*, March 19, 2012, Misasa, Tottori, Japan (invited)

② A. Sakuraba, Numerical simulations of geomagnetic field variations: from jerks

to superchrons, American Geophysical Union Fall Meeting (招待講演), 2011年12月7日, San Francisco, USA

③ T. Yanagisawa, T. Miyagoshi, Y. Yamagishi, Y. Hamano, A. Sakuraba, Y. Tasaka, & Y. Takeda, Organized flow structures of turbulent thermal convection in a liquid metal: oscillations and random reversals of flow pattern, American Geophysical Union 2011 Fall Meeting, San Francisco, 2011.12.6, San Francisco, USA

④ A. Namiki, Y. Shibano, & I. Sumita, Experiments on Upward Migration of a Liquid-Rich Layer in a Granular Medium: Implications for Slab Fluid, AGU 2011 Fall Meeting 2011.12.6, San Francisco, USA.

⑤ I. Sumita, & Y. Ota, Experiments on buoyancy-driven crack around the brittle-ductile transition, AGU 2011 Fall Meeting, 2011.12.6, San Francisco, USA.

⑥ A. Sakuraba, Numerical simulations of short-timescale geomagnetic field variations, IUGG General Assembly, 2011年7月2日, Melbourne, Australia

⑦ 柳澤 孝寿, 山岸 保子, 浜野 洋三, 櫻庭 中, 田坂 裕司, 武田 靖, 液体金属の磁気対流に見られる準周期的な流れ場の逆転, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第128回総会・講演会, 2010.11.03., 沖縄県市町村自治会館

⑧ 陰山 聡, 古田 敦哉, 液体金属熱対流のシミュレーションと可視化, 2010年10月31日 地球電磁気・地球惑星圏学会(SGEPSS) 第128回総会 沖縄県市町村自治会館

⑨ A. Sakuraba (invited), Characteristics of low-viscosity models for planetary dynamos, American Geophysical Union Fall Meeting, 2009.12.17, San Francisco, USA

⑩ I. Sumita, & N. Higashi, Experiments on granular rheology: effects of particle size and fluid viscosity, 2009 AGU Fall meeting, 2009.12.17, San Francisco, USA.

⑪ A. Sakuraba, Large-scale flow and magnetic field structures in a low-viscosity geodynamo model: Effect of thermal boundary condition, International Association of Geomagnetism and Aeronomy (11th Scientific Assembly), 2009年8月24

日, Sopron, Hungary.

〔図書〕 (計1件)

① A. Sakuraba and P. H. Roberts, Springer, On thermal driving of the geodynamo in "The Earth's magnetic interior", Eds. E. Petrovsky, E. Herrero-Bervera, T. Harinarayana, D. Ivers), 2011, pp. 117-129

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・地球内部ダイナミクス領域・チームリーダー

研究者番号: 90011709

(2) 研究分担者

陰山 聡 (KAGEYAMA AKIRA)

神戸大学・大学院システム情報学研究所・教授

研究者番号: 20260052

宮腰 剛広 (MIYAGOSHI TAKEHIRO)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・研究員

研究者番号: 60435807

柳澤 孝寿 (YANAGISAWA TAKATOSHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・主任研究員

研究者番号: 20359186

田坂 裕司 (TASAKA YUJI)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 00419946

隅田 育郎 (SUMITA IKURO)

金沢大学・自然システム学系・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

(3) 連携研究者

武田 靖 (TAKEDA YASUSHI)

北海道大学・大学院工学研究員・名誉教授

研究者番号: 90108481