

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 7 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23340042

研究課題名(和文) 太陽磁場生成機構とそのダイナミクスの解明

研究課題名(英文) Research of generation mechanisms and dynamics of solar magnetic fields

研究代表者

横山 央明 (YOKOYAMA, Takaaki)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00311184

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：太陽の対流層内部の磁気熱対流と差動自転について、独自開発したシミュレーション=コードで、星全球計算を実施した。音速抑制法と、理研「京」をもちいた、世界最高解像度計算により、対流層中層付近での乱流構造が表面からの影響をうけて、小スケールが卓越していること、この流れにともなって強い磁場が増幅されており、いわゆる局所的ダイナモ機構がはたしていること、がわかった。さらに、太陽差動自転の「表面勾配層」の実現に成功し、乱流と子午面循環流とによる角運動量輸送の拮抗できることを明らかにした。そして、乱流によって生じる磁場が、乱流そのものに揺り返しを与え、結果として熱輸送に大きく影響することがわかった。

研究成果の概要(英文)：We studied the generation mechanisms and the dynamics of the solar magnetic fields by means of the numerical simulations. By the computations with our own code including the reduced-speed-of-sound technique on the RIKEN ``K''-system, we succeeded to obtain a new knowledge on the global-scale solar magnetic convection in the solar interior. The small-scale downflows generated in the near-surface layer penetrate into deeper layers and excite small-scale turbulence. A small-scale dynamo action is generated there. We also clarify the mechanisms to maintain the near surface shear layer in the sun, which was a remained puzzle of the solar rotation profile. It is maintained by the balance between the transports of angular momentum by the turbulence and the meridional circulation. In addition to these, we found that there is a strong feed-back from the magnetic field generated by the small-scale dynamo by the turbulence toward the large-scale thermal transport.

研究分野：天文学

キーワード：天文 太陽物理学 プラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

「ようこう」「ひので」など衛星望遠鏡による観測成果をふまえ、研究開始時までの20年で太陽物理学は大きく進歩していた。太陽物理学の重要な課題のうち、「太陽大気爆発現象フレア・コロナ質量放出」が磁気リコネクション機構であることが明かされ、「コロナ加熱」は、活動領域（黒点付近の強磁場領域）の磁気ループ足元のナノフレア説を支持する観測が集められつつあった。これらの成果は、天体高エネルギー解放現象におけるリコネクションの適用を広くしたこと、高温ガス加熱の機構として波動やリコネクションによるモデルを新たな選択肢として提出したことなど、天体プラズマ物理学に大きな影響を与えた。

残された重要な課題は「太陽磁場の起源」の理解であり、そのメカニズムとしての「ダイナモ」の研究と考えられていた。磁場の生成維持についての理解は、先に述べた太陽大気活動現象のエネルギー源の根本を探ること、究極にはその初期条件・境界条件を探ることにあたる。また研究開始当時、SOHO 衛星による日震学研究での太陽内部探査、Kepler 衛星などによる星震学研究の隆盛、スパコン理研「京」開発にみられるような大規模計算の可能性、外国勢による新モデル・計算法の提案などにより、ダイナモ研究を推し進める動機・手段・方法論そのどれもについて機運が高まってきていた。

太陽ダイナモでは、星の自転運動と熱対流乱流運動とから、磁場を増幅・維持するというのが大雑把な理解である。観測的な制限としては、表面黒点磁場や一般磁場の変動、特に11年活動周期や緯度分布、表面対流運動や大規模流れ、日震学から知られる内部角運動量分布や温度分布があり、これらをすべて満たすモデルの構築が求められる。いまのところ、観測をすべていっぺんに再現するモデルは世界的に存在せず、個別の要素を積み上げていく段階にある。

## 2. 研究の目的

太陽ダイナモ研究で必要とされる具体的な実現目標は次のようなものが挙げられる。(1) 対流層内部の磁気熱対流と差動自転を、自己調和的に説明するモデルの構築。(2) (差動自転により引き延ばされる) トロイダル磁束管の生成・浮上過程。(3) 熱対流により駆動される乱流輸送の検証と定量化。たとえば、粘性拡散・磁場増幅（いわゆる  $\alpha$  効果）・角運動量輸送（ $\Lambda$  効果）などがこれに当たる。(4) 表面磁場ダイナミクスの研究。とくに、表面近くでの放射と熱対流との相互作用の解明。本研究では、これらの項目について大規模数値シミュレーションにより実現し、その物理を明らかにすることを目的に設定した。

項目(1)については、研究開始当時、自己調和的なモデルは存在せず、先行研究において

は計算境界で強制的に熱や角速度の条件を固定することで実現しているのが実情であった。物理的には、対流層底部の対流安定層に子午面循環流が侵入することで作られるエントロピーの緯度勾配が駆動していると信じられているが、この両者を同時に正しく解くシミュレーションを本研究では実現し、これを実証することを目指した。

項目(2)については、光球磁場の観測から太陽内部の磁束が間欠的構造、すなわち磁束管となって浮上してくることがわかっている。しかしその形成は実はあきらかにならなかった。直接ダイナモ機構で磁束管として増幅している可能性と、シート状に増幅した磁束が磁気浮力不安定で磁束管を形成する可能性が提案されていた。これを明らかにするためには磁束管の浮上過程の履歴をその出発点である対流層の底までたどる必要があった。これをシミュレーションで実現することをめざした。

項目(3)については、乱流サブグリッドモデルを、局所的なモデルで明らかにするというアプローチである。デカルト座標による非常に高解像度な局所モデルで、低拡散（高 Reynolds 数）環境をつくり、回転や成層効果をいれたシミュレーションを実施して乱流輸送係数の実測を行う。また全球ダイナモモデルへのサブグリッドモデルとしての適用を考えて、グローバルパラメータ（平均磁場や速度シア）に対する依存性も調べたいと考えた。また、観測と比較するうえでダイナモに関連する太陽大気活動現象の研究も平行して進めることも目指した。

## 3. 研究の方法

本研究では、大規模数値シミュレーションにより太陽内部熱対流とダイナモ作用を実現することを目指した。まずは、音速抑制法という私たちのグループ独自の新しいアプローチに基づいてシミュレーションコードを開発した。そのコードを用いて（磁場なしの）対流層内部自転の差動自転のシミュレーションを行った。また、ダイナモで生成されるはずの磁束管浮上を新コードで調べた。さらには、磁場を入れた星全球ダイナモ計算を実施した。乱流輸送を定量化してサブグリッドモデルについても研究した。放射磁気流体力学の新しいコードの開発を並行して行い、太陽表面熱対流についても研究をおこなった。

## 4. 研究成果

## 主要な成果

「2. 研究の目的」の節で述べた、具体的実施目標の項目についての成果をそれぞれ述べる。

(1) 対流層内部の磁気熱対流と差動自転  
乱流構造を星全体で解像するために、大規模な並列計算で性能を発揮できる新しいシミュレーション=コードの開発を行った。音速抑制法という新たなアプローチを用いた、ダ

イナモへの応用には知る限り前例がない計算法である。その成果は [Hotta et al., 2012a] として出版した。この独自開発したシミュレーション=コードで、(自転なしの) 星全球磁気熱対流計算を実施した。音速抑制法と、理研「京」計算機をもちいた、世界最高解像度かつ星表面付近を含んだ計算により、これまでにない知見をえることに成功した。具体的には、対流層中層付近での乱流構造が表面からの熱対流の影響をうけて、小スケールが卓越していること、この小スケール流れにともなう強い磁場が増幅されており、いわゆる局所的ダイナモ機構がはたしていること、を初めて明らかにした [Hotta et al., 2014]。次に、星全球熱対流計算を「回転あり、磁場なし」で実施した。特に、太陽差動自転のうち未解明であった「表面勾配層」の実現に挑戦し、成功するとともにその物理が、乱流と平均流(子午面循環流)とによる角運動量輸送の拮抗できることを明らかにした [Hotta et al., 2015a]。

(2) 磁束管の浮上過程  
対流層底からの浮上の際に起こる「磁束管爆発」と呼ばれる現象の 3 次元シミュレーションを実施して、ダイナモで生成される平均磁場から、黒点で必要とされる磁束管生成についてその空間スケールに制限を与えた [Hotta et al., 2012b]、さらに解適合格子コードを開発し、その能力をフルに生かして磁束管のねじれ獲得機構の研究などを実施した [Hotta and Yokoyama, 2012]。降着円盤と類似な角運動量輸送機構が磁束管の浮上ねじれ回転でも起きており、ポロイダル成分(ねじれ成分)の獲得に重要な役割を果たしていることがわかった。並行して、表面付近での磁束浮上過程について 3 次元シミュレーションを実施した [Toriumi and Yokoyama, 2011, 2012, 2013]。これらのシミュレーションの結果から予言された水平表面流という前兆現象について、観測的に発見した [Toriumi et al., 2012]。さらにこの前兆現象について、多数のイベントを調べて統計的に調査した。その結果、表面より下での、浮上磁束管について情報を得ることができることを示した [Toriumi et al., 2014]。また日震学的手法を用いて磁束管浮上過程を太陽内部で時間発展的にとらえることに初めて成功した [Toriumi et al., 2013]。

(3) 熱対流により駆動される乱流輸送乱流拡散率を定量化することを目指して [Hotta et al., 2012c]。熱対流乱流シミュレーションを局所的な環境で実施して従来知られた理論が概ね成り立つことを示すとともに、その限界を明らかにした。さらに、これまでに実施してきた星全球計算のうちの空間一部を切り出して、極めて高い空間分解能でシミュレーションを実施して、熱対流磁気乱流により熱拡散輸送について調べた。結果として、乱流によって生じる磁場が、乱流流れそのものに強く揺り返しを与え、結果と

して平均的な熱輸送に大きく影響することがわかった。これは計算解像度をあげることにより詳細な乱流構造が明らかになるとともに、発生する磁場のエネルギーが無視し得ないほど強くなることを示している [Hotta et al., 2015b]。

#### (4) 表面磁場ダイナミクス

表面付近での磁気熱対流を明らかにするために新たに放射輸送効果を取り入れた磁気流体コードを開発し、超粒状斑現象の研究を実施した(飯島陽久 2013 東京大学修士論文)。このコードを用いて、太陽対流層から上層大気コロナまでを結合することに成功し、スピキュールと呼ばれるジェット現象を再現することに成功した [Iijima and Yokoyama, 2015]。太陽コロナ観測データ解析についても進めた [Matsui et al., 2012]。

#### 得られた成果の位置づけとインパクト

「(1) 対流層内部の磁気熱対流と差動自転」と「(3) 熱対流により駆動される乱流輸送」については、音速抑制法という独自アプローチと、理研「京」コンピュータの資源とを有効に利用したことで、世界最高解像度の星内部磁気熱対流計算を実施することができた。そのことで初めて明らかになった、局所小スケールダイナモが、熱対流乱流の抑制を通じて、星全域大スケールダイナモに影響を強く及ぼしているというスケール間相互作用の重要性を世界に先駆けて示したことである。世界的にも大きなインパクトを与えたと自負しており、このことの継続研究では Science 誌で成果を報告することができるまでに発展した。

「(2) 磁束管の浮上過程」については、対流層底面での素過程(磁束管爆発・磁束管のねじれ成分獲得)を複数明らかにすることで貢献した。この過程については現在もひろく研究が続けられており、決定打にまでは至らないものの物理的な素過程に重要な成果を示したと考えている。

「(4) 表面磁場ダイナミクス」については、対流層表面付近での、放射輸送過程と磁気熱対流を同時に取り扱うコードを独自に開発し、低散逸計算性能において世界の他のグループを凌駕しうるコードを作ることができた。結果、スピキュールという太陽表面ジェット現象につき、初めて観測を満足いくレベルで実現することに成功した。この成果は国際会議などでも直接高く評価されており、太陽表面大気の磁場ダイナミクスについての研究にインパクトを与えられたと考えている。

#### 今後の展望

この研究で得られた成果をさらに発展させ、次に挑むべき課題は、星全球ダイナモによる磁気周期変動の実現であろう。世界的には周期変動を実現したグループが現れ始めているが、実は数値的に収束しておらず、解像度

を上げると結果が変わることが知られている。その原因はおそらく、我々がこの研究で得た乱流散逸効果が適切に取り入れられていないためであることが推測される。今後、この効果を以下にモデル化するかとこのところが焦点のひとつになると考えている。さらには周期的変動の先には、Maunder 極小期など不規則な活動度変動を明らかにする課題が残る。

表面磁場ダイナミクスについては、現在策定中の磁気太陽観測衛星 SOLAR-C の主要課題のひとつであるコロナ彩層加熱の解明に向け、光球・彩層・コロナ結合系のより詳細かつ定量的なモデル化が必要とされる。そのためには現有の輻射磁気流体コードにさらに、非局所熱力学平衡 (non-LTE) 効果を取り入れたより複雑な実装が必要とされる。技術的に挑戦的な課題であるだけでなく、非平衡電離・励起や放射散乱などが伴うプラズマ物理学・天体物理学的にも非常におもしろい科学的最前線である。

#### 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 18 件)

- ① H. Hotta, M. Rempel, T. Yokoyama, Y. Iida, and Y. Fan. Numerical calculation of convection with reduced speed of sound technique. *A&A*, 539:A30, March 2012a. doi: 10.1051/0004-6361/201118268.
- ② H. Hotta, M. Rempel, and T. Yokoyama. High-resolution Calculations of the Solar Global Convection with the Reduced Speed of Sound Technique. I. The Structure of the Convection and the Magnetic Field without the Rotation. *ApJ*, 786:24, May 2014. doi: 10.1088/0004-637X/786/1/24.
- ③ H. Hotta, M. Rempel, and T. Yokoyama. High-resolution Calculation of the Solar Global Convection with the Reduced Speed of Sound Technique. II. Near Surface Shear Layer with the Rotation. *ApJ*, 798:51, January 2015a. doi:10.1088/0004-637X/798/1/51.
- ④ S. Toriumi and T. Yokoyama. Numerical Experiments on the Two-step Emergence of Twisted Magnetic Flux Tubes in the Sun. *ApJ*, 735:126, July 2011. doi: 10.1088/0004-637X/735/2/126.
- ⑤ S. Toriumi and T. Yokoyama. Large-scale 3D MHD simulation on the solar flux emergence and the small-scale dynamic features in an active region. *A&A*, 539:A22, March 2012. doi:10.1051/0004-6361/201118009.
- ⑥ S. Toriumi and T. Yokoyama. Three-dimensional magnetohydrodynamic simulation of the solar magnetic flux emergence. Parametric study on the horizontal divergent flow. *A&A*, 553:A55, May 2013. doi: 10.1051/0004-6361/201321098.
- ⑦ H. Hotta, M. Rempel, and T. Yokoyama. Magnetic Field Intensification by the Three-dimensional "Explosion" Process. *ApJ*, 759:L24, November 2012b. doi: 10.1088/2041-8205/759/1/L24.
- ⑧ H. Hotta and T. Yokoyama. Generation of twist on magnetic ux tubes at the base of the so-lar convection zone. *A&A*, 548:A74, December 2012. doi: 10.1051/0004-6361/201220108.
- ⑨ S. Toriumi, K. Hayashi, and T. Yokoyama. Detection of the Horizontal Divergent Flow Prior to the Solar Flux Emergence. *ApJ*, 751:154, June 2012. doi: 10.1088/0004-637X/751/2/154.
- ⑩ S. Toriumi, S. Ilonidis, T. Sekii, and T. Yokoyama. Probing the Shallow Convection Zone: Rising Motion of Subsurface Magnetic Fields in the So-lar Active Region. *ApJ*, 770:L11, June 2013. doi: 10.1088/2041-8205/770/1/L11.
- ⑪ S. Toriumi, K. Hayashi, and T. Yokoyama. Statistical Analysis of the Horizontal Divergent Flow in Emerging Solar Active Regions. *ApJ*, 794:19, October 2014. doi: 10.1088/0004-637X/794/1/19.
- ⑫ H. Hotta, Y. Iida, and T. Yokoyama. Estimation of Turbulent Diffusivity with Direct Numerical Simulation of Stellar Convection. *ApJ*, 751:L9, May 2012c. doi: 10.1088/2041-8205/751/1/L9.
- ⑬ H. Hotta, M. Rempel, and T. Yokoyama. Efficient Small-scale Dynamo in the Solar Convection Zone. *ApJ*, 803:42, April 2015b. doi:10.1088/0004-637X/803/1/42.
- ⑭ H. Iijima and T. Yokoyama. Effect of Coronal Temperature on the Scale of Solar Chromospheric Jets. *ApJ*, 812:L30, October 2015. doi:10.1088/2041-8205/812/2/L30.
- ⑮ Y. Matsui, T. Yokoyama, N. Kitagawa, and S. Imada. Multi-wavelength Spectroscopic Observation of Extreme-ultraviolet Jet in AR 10960. *ApJ*, 759:15, November 2012. doi:10.1088/0004-637X/759/1/15.

[学会発表] (計 36 件)

- ① 金子岳史、横山央明、Keppens、放射凝

- 縮により形成されるプロミネンスの温度-密度間の冪乗則、日本天文学会年会、2015年03月20日、大阪大学（大阪府豊中市）
- ② 飯島陽久、横山央明、簡易輻射冷却を用いた局所熱力学平衡 MHD 太陽対流大気結合モデルの構築、日本天文学会年会、2015年03月20日、大阪大学（大阪府豊中市）
- ③ Hotta, H.、High resolution calculations of solar global convection and dynamo、Sunspot formation: theory, simulations and observations、2015年03月09日、ストックホルム（スウェーデン）
- ④ 堀田英之、M. Rempel、横山央明、太陽対流層での効率的な小スケールダイナモとエネルギー輸送、PLASMA 2014、2014年11月18日、朱鷺メッセ（新潟県新潟市）
- ⑤ 横山央明、「ひので」による理解の到達点、研究集会「スペース太陽物理学の将来展望」、2014年10月20日、宇宙研（神奈川県相模原市）
- ⑥ 堀田英之、M. Rempel、横山央明、対流層内部の小スケール磁場の流れ場への非常に強い揺り返しの発見、日本天文学会年会、2014年09月12日、山形大学（山形県山形市）
- ⑦ Yokoyama, T.、Hotta, H.、Rempel, M.、Numerical Simulations of Convection and Dynamo in the Solar Interior、AOGS annual meeting、2014年07月31日、ロイトン札幌ホテル（北海道札幌市）
- ⑧ Yokoyama, T.、Solar Jets as a Manifestation of Magnetic Reconnection、AOGS annual meeting、2014年07月28日、ロイトン札幌ホテル（北海道札幌市）
- ⑨ 横山央明、太陽内部と表層の磁気活動 { ダイナモ・磁束浮上・コロナ彩層ダイナミクス、GEMSIS-ALL ミーティング、2014年06月30日、名古屋大学（愛知県名古屋市）
- ⑩ 堀田英之、横山央明、M. Rempel、大規模数値計算による太陽表面角速度勾配層の実現、日本天文学会年会、2014年03月22日、国際基督教大学（東京都三鷹市）
- ⑪ 堀田英之、横山央明、M. Rempel、大規模数値計算で明らかにする太陽対流層内部のローカルダイナモ、日本天文学会年会、2014年03月20日、国際基督教大学（東京都三鷹市）
- ⑫ 北川直優、EIS によって観測された活動領域外縁からの上昇流（活動領域アウトフロー）、太陽研連シンポジウム、2014年02月19日、京都大学（京都府京都市）
- ⑬ Toriumi, S.、Where Does the Flare Energy Come from? Flux Emergence and Formation of Flaring Active Regions、ISSI meeting on are、2014年02月26日、ベルン（スイス）
- ⑭ Yokoyama, T.、Convection and Magnetic Field in the Solar Interior、Symposium on Planetary Science、2014年02月20日、東北大学（宮城県仙台市）
- ⑮ 堀田英之、大規模数値計算による表面勾配層維持過程の解明、太陽研連シンポジウム、2014年02月19日、京都大学（京都府京都市）
- ⑯ 鳥海森、太陽の浮上磁場に関する数値的・観測的研究、太陽研連シンポジウム、2014年02月18日、京都大学（京都府京都市）
- ⑰ Hotta, H.、Rempel, M.、Yokoyama, T.、Numerical simulations of multi-scale solar global convection、AGU fall meeting、2013年12月11日、サンフランシスコ（アメリカ）
- ⑱ Toriumi, S.、Observations and Modelings of the Solar Flux Emergence、Hinode Science Meeting 7、2013年11月12日、世界文化センター（岐阜県高山市）
- ⑲ Hotta, H.、Current status of understanding about solar global convection、Hinode Science Meeting 7、2013年11月12日、世界文化センター（岐阜県高山市）
- ⑳ 鳥海森、林啓志、横山央明、太陽の磁束浮上領域に見られる水平発散流の統計的研究、日本天文学会年会、2013年09月11日、東北大学（宮城県仙台市）
- 21 横山央明、磁気熱不安定性の太陽大気への適用についての検討、日本天文学会年会、2013年09月12日、東北大学（宮城県仙台市）
- 22 飯島陽久、横山央明、3次元輻射磁気流体計算による磁気ネットワーク生成過程の研究、日本天文学会年会、2013年09月11日、東北大学（宮城県仙台市）
- 23 堀田英之、横山央明、M. Rempel、太陽の差動回転シミュレーションで知る天体乱流の取り扱い、日本天文学会年会、2013年09月10日、東北大学（宮城県仙台市）
- 24 Yokoyama, T.、Convections and Dynamos in the Solar Interior、3rd East-Asian School and Work-shop on Laboratory, Space Astrophysical Plasmas、2013年07月10日、代々木オリンピックセンター（東京都渋谷区）
- 25 Hotta, H.、Yokoyama, T.、Connection between the mean-field solar dynamo model and the self-consistent global convection model、AOGS annual meeting、2013年06月28日、ブリスベン（オーストラリア）

[図書] (計 1 件)

- ① Hotta, H.、Springer、Thermal Convection, Magnetic Field, and Differential Rotation in Solar-type Stars、2015、81

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

横山 央明 (YOKOYAMA, Takaaki)  
東京大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：00311184

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

鳥海森 (TORIUMI, Shin)  
堀田英之 (HOTTA, Hideyuki)  
飯島陽久 (IIJIMA, Haruhisa)  
金子岳史 (KANEKO, Takafumi)  
王燦洋 (WANG, Shuoyang)  
松井悠起 (MATSUI, Yuki)  
北川直優 (KITAGAWA, Naomasa)