

平成 23 年 5 月 1 日現在

研究種目： 基盤研究(B)
 研究期間： 2007 ～ 2009
 課題番号： 19340180
 研究課題名(和文) 連結階層シミュレーションで探るマルチフィジックス・プラズマダイナミクス
 研究課題名(英文) Multi-physics Plasma Dynamics with Macro-Micro Interlocked Simulations
 研究代表者
 草野 完也 (KUSANO KANYA)
 名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授
 研究者番号： 70183796

研究成果の概要(和文)：複雑な非線形プラズマダイナミクスを異なる階層モデルの連結によって計算する連結階層シミュレーションの基礎アルゴリズムを開発すると共に、太陽フレアやコロナ質量放出などの太陽・宇宙プラズマ現象及び、雲形成過程にこれを応用することで、複雑現象に関する新しいシミュレーション研究の枠組みを進展させた。さらに、連結階層シミュレーションを宇宙天気予報に応用するための研究開発を進めた。

研究成果の概要(英文)：The macro-micro interlocked (MMI) simulation is a new framework of numerical simulation, which is capable to deal with the interaction of multi-scale and multi-physics phenomena. In this study, we have developed the basic algorithm of the MMI simulation, and applied it to solar and space plasmas including solar flare and coronal mass ejection, as well as to the formation of cloud, in order to advance the capability of numerical simulations. In addition, we have developed the study for space weather forecasting with the MMI simulation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2008 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2009 年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
年度			
年度			
総計	12,800,000	3,840,000	16,640,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： プラズマ科学 ・ プラズマ科学

キーワード： プラズマ、シミュレーション、マルチ・フィジックス、マルチ・スケール、太陽、宇宙、雲、宇宙天気

1. 研究開始当初の背景

高速計算機による数値シミュレーションは科学研究と技術開発の方法論に大きな革命をもたらした。特に、強い非線形

性に支配されるプラズマ現象の理解において、数値シミュレーションは今や不可欠かつ普遍的な研究手段として広く認め

られている。

しかし、多種荷電粒子から成るプラズマシステムは様々な階層構造を本来的に形成すると共にその強い非線形性を通して時空間における階層間の相互作用と干渉を可能にする。さらに、プラズマ状態量のダイナミックレンジは極めて大きいため、特に天体プラズマなどでは全く異なる状態が連成した複合システムがしばしば現れる。

こうした階層連関性とシステムの複合性は単に現象を複雑にするのみでなく、素過程としては発現し得ない質的に新しいマルチフィジックス・ダイナミクスを生み出す。それ故、各階層の精密な解析と共に階層間連関を正確に取り扱うことができる新しい計算方法論が、非線形複合システムとしてのプラズマの理解のために不可欠である。連結階層シミュレーション (Macro-Micro Interlocked Simulation) は各階層に適合した計算モデルの連結によってこの要求に効果的に応えることができる次世代のシミュレーション手法である (Sato 2005, J. Physics)。

2. 研究の目的

本研究の目的は、地球シミュレータセンターにおける連結階層シミュレーション研究開発の実績を最大限に活かし、様々なマルチフィジックス・プラズマダイナミクスに対応可能な新たなシミュレーションモデルを開発すると共に、これを使って宇宙・天体プラズマを中心とする歴史的課題の本質的解決を目指すことにある。特に、本研究では以下の課題に関係する具体的問題の解決を目指した。

課題I: Multi-scale ダイナミクス (磁気リコネクションの爆発的発現機構と高エネルギー粒子相互作用)

本研究では collisional 領域から semi-collisional 領域までのテアリングモード非線形ダイナミクスの遷移について高分解シミュレーションによって調べた。同時に MHD-PICT 連結手法を応用することにより、構造の微小化が非MHD領域に達した後に発生する階層連関過程の解明を試みた。さらに、加速粒子におけるマルチ・スケール効果を計算することができるモデルの開発を行い、太陽高エネルギー粒子 (SEP) の発生機構を定量的に理解することを試みた。

課題II: Multi-layer ダイナミクス (完全電離領域と部分電離領域の連結ダイナミクス)

オーロラ領域上空の粒子加速過程を扱う静電粒子モデルとMHDモデルを動的に結合した連結階層オーロラ形成シミュレーションを実現し、電離層フィードバック不安定性 (Sato 1978, JGR) とオーロラ粒子加速の相互作用の解析を実現した。さらに、これらのシミュレーションを拡張し、太陽風相互作用とM-I結合および粒子加速効果を取り込んだ包括的なジオスペースモデルを構築することで、太陽風に対する電離層フィードバック不安定性の非線形応答機構を探る研究を進めた。

課題III: Multi-species ダイナミクス (「動的粒子系」としてのダストプラズマと雲大気)

ダスト粒子の凝縮成長と衝突併合を同時に解くことができるシミュレーションモデルを開発した。また、このアルゴリズムを応用し、大気中のエアロゾルと雲の相互作用について定量的な理解を深めた。

3. 研究の方法

本研究は、地球シミュレータセンター連結階層シミュレーション研究開発プログラムと各大学の研究分担者との相補的かつ密接な協力によって遂行された。研究目的に記した3つの課題領域を担当するグループを組織し、機関横断的な協力の基で研究を進めた。

課題Iでは基礎的なアルゴリズムとスキームの開発を行った。また、新しい非線形近似リーマン解法である「HLLD法」(Miyoshi & Kusano 2005, J. Comp. Phys.)の高精度化を達成した。さらに、MHD-PIC連結アルゴリズムを実際の問題に応用する研究を行った。

課題IIではこれまでに開発した磁気圏電離層結合系に関する連結階層モデルの拡張し、現実のオーロラへ応用した。

課題IIIでは我々が最近発明した超水滴法(特許申請中)を高度化し、現実の雲成長を再現すると共に、その過程におけるイオン効果の解明を試みた。

4. 研究成果

プラズマにおける流体现象と運動論効果を同時に解くことができる連結階層シミュレーションの開発を電磁流体モデルと粒子モデル(PIC法及びハイブリッド法)の結合で開発した。特に、分散関係の異なるモデルを連結した際に発生する数値的問題を克服するために必要な連結フィルタの必要性について議論し、新しい連結法について提案した。また、MHDモデルとハイブリッドモデルの連結を用いた衝撃波粒子加速の研究を進め、現実の惑星間空間衝撃波による太陽高エネルギー粒子の生成と分布を予測することができるモデルの開発に成功した。

さらに、太陽から地球に至る広大な惑星間空間を複数のシミュレーションモデルで連

結計算することにも成功した。この連結モデルの初期条件をひので太陽観測衛星のデータに基づいて与えることにより、太陽面爆発を予測する可能性についても検討し、連結階層シミュレーションの宇宙天気予報への応用性を高めることができた。

一方、プラズマ粒子シミュレーションのPICアルゴリズムを雲モデルに適応し、世界で初めてとなる雲粒子シミュレーションのアルゴリズムを完成し、これを公開した。また、この超水滴雲モデルを熱帯積雲の成長過程に適応し、積雲におけるエアロゾル効果を精密に捉える事ができる新しい雲シミュレーションの可能性を拓いた。

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 31 件)

- ① Shiota, D., Kusano, K., Miyoshi, T., Shibata, K., MHD modeling for Formation Process of Coronal Mass Ejections: Interaction between Ejecting Flux Rope and Ambient Field, The Astrophysical Journal (in press) 査読有
- ② Miyagoshi, T., Kageyama, A., and Sato, T., Zonal flow formation in the Earth's outer core, Nature, vol. 463, pp. 793-796 (2010) 査読有
- ③ Kataoka, R., Ebisuzaki, T., Kusano, K., Shiota, D., Inoue, S., Yamamoto, T. T., Tokumaru, M. Three-dimensional MHD modeling of the solar wind structures associated with 13 December 2006 coronal mass ejection, 2009, Journal of Geophysical Research (Space Physics), 114, 10102 査読有
- ④ Shima, S., Kusano, K., Kawano, A., Sugiyama, T., and Kawahara, S. "The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: A particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model" QUARTERLY JOURNAL OF THE ROYAL METEOROLOGICAL SOCIETY Volume: 135 Issue: 642 Pages: 1307-1320 Part: Part A Published: JUL 2009 査読有

- ⑤ 草野完也「小特集：連結階層モデルによって見えてきたプラズマシミュレーションの新たな展開 1. はじめに」プラズマ・核融合学会誌 (Journal Plasma and Fusion Research) Vol.85, No.9 (2009) 577-579 査読有
- ⑥ 草野完也「雲をめぐる気候変動問題」パリティ 2009年1月号 22-24 査読有
- ⑦ Nishikawa, N., and Kusano, K. "Simulation Study of the Symmetry-Breaking Instability and the Dipole Field Reversal in a Rotating Spherical Shell Dynamo" Phys. Plasmas, Vol.15, 082903 (2008) 査読有
- ⑧ Miyoshi, T., Kusano, K., "Robust and Efficient Riemann Solvers for MHD" ASP Conference Series, Vol. 385, NUMERICAL MODELING OF SPACE PLASMA FLOWS / ASTRONUM-2007, 2008, eds. Nikolai V. Pogorelov, Edouard Audit, and Gary P. Zank, pp.279-284. 査読有
- ⑨ Sugiyama, T., Kusano, K., "Multi-physics Plasma Simulation by the Interlocking of Two Different Hybrid Models" ASP Conference Series, Vol. 385, NUMERICAL MODELING OF SPACE PLASMA FLOWS / ASTRONUM-2007, 2008, eds. Nikolai V. Pogorelov, Edouard Audit, and Gary P. Zank, pp.228-236. 査読有
- ⑩ Shiota D., Kusano K., Miyoshi T., Nishikawa N., Shibata K. A quantitative MHD study of the relation among arcade shearing, flux rope formation, and eruption due to the tearing instability, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-SPACE PHYSICS Volume: 113 Issue: A3 Article Number: A03S05 Published: MAR 15 2008 査読有
- ⑪ 草野完也、大野暢亮、長谷川裕記「特集・現象を見る／オーロラをコンピュータの中で作ろう」数理科学 2008年1月号 査読無
- ⑫ Kusano, K., Hirose, S., Sugiyama, T., Shima, S., Kawano, A., and Hasegawa, H., "Macro-Micro Interlocked Simulation for Multiscale Phenomena" Lecture Notes in Computer Science (Springer Berlin / Heidelberg) Volume 4487/2007, pp. 914-921 査読有
- ⑬ Sugiyama, T., and Kusano, K. "Multi-scale Plasma Simulation by the Interlocking of Magnetohydrodynamic Model and Particle-in-Cell Kinetic Model" JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS Volume: 227 Issue: 2

Pages: 1340-1352 Published: DEC 10 2007 査読有

- ⑭ Kusano, K. "Simulation Study of Transition Process from Long-Lived Sigmoid to Flare Eruption" ASP Conference Series, Vol. CS 369, NEW SOLAR PHYSICS WITH SOLAR-B MISSION, The Sixth Solar-B Science Meeting, 2007, eds. Kazunari Shibata, Shin'ichi Nagata and Takashi Sakurai, pp.469-476. 査読有
- ⑮ Inoue, S., Kusano, K., "Simulation Study of Three-Dimensional and Nonlinear Dynamics of Flux Tube in the Solar Corona" ASP Conference Series, Vol. CS 369, NEW SOLAR PHYSICS WITH SOLAR-B MISSION, the Sixth Solar-B Scientific Meeting, 2007, eds. Kazunari Shibata, Shin'ichi Nagata and Takashi Sakurai, pp.421-424. 査読有
- ⑯ 草野完也「講座：高速プラズマ流と衝撃波の研究事始め、4. 宇宙における高速流と衝撃波研究の最前線、4.2 太陽フレアにおける高速流とスローショック」プラズマ・核融合学会誌 (Journal Plasma and Fusion Research) Vol.83, No.4 (2007) 372-377 査読有
- ⑰ 三好隆博、草野完也「講座：高速プラズマ流と衝撃波の研究事始め、3. 高速プラズマ流を伴う計算機シミュレーションの基礎」プラズマ・核融合学会誌 (Journal Plasma and Fusion Research) Vol.83, No.3 (2007) 228-240 査読有

[学会発表] (計 134 件)

- ① 草野完也、多階層連結現象の理解へ向けたシミュレーションの試み、第7回流体力学会中部支部講演会、2009年10月16日、名古屋大学、招待講演
- ② 草野完也、Data-driven Simulation of Sun-Earth Connection Events, IAU XXVII-GA, JD16, 2009年8月12日、リオデジャネイロ (ブラジル)、招待講演
- ③ 草野完也 Space Weather Modeling of the Solar Terrestrial Connection Event in December 2006: From the Sun to the Interplanetary Space, Space Weather Workshop 2009年4月29日、ボルダー (米国) 招待講演
- ④ 草野完也 The Trigger Mechanism of Magnetic Reconnection in Solar Eruption, 17th Cluster Workshop 2009年5月12日、ウプサラ (スウェーデン) 招待講演
- ⑤ 草野完也 Multi-scale Simulation Study of Solar-Cosmic and Terrestrial

- Environment, Space Climate Symposium 3, 2009年3月20日、サーリセルカ (フィンランド) 招待講演
- ⑥ 草野完也 階層構造と自己組織化 宇宙・太陽・地球環境における非線型ダイナミクス "統計数理研究所 2008年度 共同利用 共同研究集会『乱流の統計理論とその応用』2009年3月9日 統計数理研究所、招待講演
- ⑦ 草野完也 宇宙と地球環境の関係について 一宇宙線は気候を変え得るか? 一 第10回環境放射能研究会 2009年3月5日、高エネルギー研究所、招待講演
- ⑧ 草野完也、連結階層シミュレーションで探る 太陽・宇宙・地球環境システム、プラズマ科学シンポジウム 2009 第26回プラズマプロセッシング研究会 2009年2月4日、名古屋大学、招待講演
- ⑨ 草野完也 宇宙地球環境システムの連結階層モデリング 太陽圏シンポジウム 2009 第3回「地文台によるサイエンス」シンポジウム 2009年1月27日、名古屋大学、招待講演
- ⑩ 陰山 聡、『地球ダイナモの新しいシミュレーションコード開発とその応用』、東京大学情報基盤センター平成20年度公募型プロジェクト報告会「ペタ/エクサスケールコンピューティングへの道2009」、東大小柴ホール(2009.05.11)
- ⑪ Kusano, K. 他11名、Multi-scale Modeling of Solar Terrestrial Environment System, Fifty Years after IGY- Modern Information Technologies and Earth and Solar Sciences, 2008年11月10日, AIST (つくば), 招待講演
- ⑫ Kusano, K., Data-Driven Simulation of Solar Eruption, Workshop on Space Weather Modeling 2008年10月16日, KASI (大田市、韓国) 招待講演
- ⑬ Kusano, K., New Modeling Study to Understand the Impact of Cosmic Ray on Cloud Dynamics, International Symposium of "From Genome to Snowball Earth, Metazoan Evolution and Habitable Planets: Multidisciplinary Relations, 2008年10月2日 科学未来館 (東京) 招待講演
- ⑭ Kusano, K. 他5名、THE PREDICTABILITY OF SOLAR ERUPTION BASED ON DATA-DRIVEN SIMULATION, ICPP2008: International Congress on Plasma Physics 福岡 2008年9月8日
- ⑮ Kusano, K. 他7名、Multi-scale Interlocked Simulation of Solar Eruption, 37th COSPAR Scientific Assembly 2008年7月13日, Montreal, Canada 招待講演
- ⑯ Kusano, K., 他6名、Data-driven Simulation of Solar Flare and CME Initiation, AOGS2008, 2008年6月16日 釜山 (韓国) 招待講演
- ⑰ Kusano, K. 他5名、Data-driven Simulation of Solar Flare and Coronal Mass Ejections, EARTH-SUN SYSTEM EXPLORATION ENERGY COUPLING WITHIN AND BETWEEN PLASMA REGIMES" Kona, Hawaii, USA 2008年1月14日 招待講演
- ⑱ Kusano, K., Inoue, S., Magnetohydrodynamic Relaxation Processes in the Solar Corona, 2007 AGU Fall Meeting 2007年12月14日 招待講演
- ⑲ Kusano, K. 他7名 Macro-Micro Interlocked Simulations for Multiscale-Multiphysics Applications, "APCOM'07-EPMECS XI Third Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics in conjunction with, Eleventh International Conference on the Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science, 2007年12月6日 国立京都国際会館、招待講演
- ⑳ Kusano, K. 他9名、Space Weather Modeling on the Solar Flare Event in December 2006 (1), From the Sun to Interplanetary Space, International, CAWSES Symposium 2007年10月27日 京都大学、招待講演
- 21 Kusano, K. 他8名、Competition and Synergy of Macro- and Micro-scale Physics -Status and Prospects of Macro-Micro Interlocked Simulation- The Joint Conference of 17th International Toki Conference (ITC) on Physics of Flows and Turbulence in Plasmas and 16th International Stellarator/Heliotron Workshop (ISHW) 2007, 2007年10月19日 セラトピア土岐 (土岐市) 基調講演
- [図書] (計2件)
- ① 「現代の天文学」第10巻「太陽」(日本評論社)、草野完也 (分担執筆) 7.2 磁気エネルギーと磁気ヘリシティ pp. 225-231、2009年1月
- ② 阪口秀、草野完也編「階層構造の科学」

宇宙・地球・生命をつなぐ新しい視点、
東大出版会、2008年3月

〔その他〕

報道

- ① 「宇宙天気予報の基礎となる太陽嵐の最新モデリングについて」朝日新聞(2010年3月16日夕刊7面)、京都新聞(同3月16日26面)、産経新聞(同3月16日25面)、中日新聞(同3月16日26面)、日刊工業新聞(同3月16日22面)、毎日新聞(同3月16日3面)、及び読売新聞(同4月5日科学面)
- ② 「磁場データから予測画像を作成—皆既日食はこう見える」日本経済新聞2009年6月27日
- ③ NHKサイエンスZERO 「ここまで見えた知られざる太陽」(2008年4月26日放送)：世界で初めての太陽面爆発に関する連結階層シミュレーションの結果が解説と動画にて紹介された。

アウトリーチ

- ① 陰山 聡 (高校出前授業), 『スーパーコンピュータと計算機シミュレーションの世界』, 兵庫県立小野高校(2009.06.24)
- ② 陰山 聡 (神戸大学附属小中学校授業), 『スーパーコンピュータで方位磁石の謎に迫る』, 神戸大学(2009.11.07)
- ③ 陰山 聡, (高校出前講義)『計算機シミュレーションで地球をさぐる』, 神戸市立科学技術高校(2009.06.16)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

草野 完也 (KUSANO KANYA)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授
研究者番号：70183796

(2) 研究分担者

陰山 聡 (Akira Kageyama)
神戸大学・大学院システム情報学研究科・教授
研究者番号：20260052

三好隆博 (MIYOSHI TAKAHIRO)
広島大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：60335700

佐藤 哲也 (SATO TETSUYA)
兵庫県立大学・教授
研究者番号：80025395

廣瀬重信 (SHIGENOBU HIROSE)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス研究領域・研究員
研究者番号：90266924

杉山徹 (SUGIYAMA TOORU)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス研究領域・研究員
研究者番号：20399570

長谷川裕記 (HASEGAWA HIROKI)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス研究領域・研究員
研究者番号：60390639

島伸一郎 (SHIMA SHIN-ICHIRO)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス研究領域・研究員
研究者番号：70415983

河野明男 (KAWANO AKIO)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス研究領域・研究員
研究者番号：90415985

岸本泰明 (KISHIMOTO YASUAKI)
京都大学・エネルギー科学研究科・教授
研究者番号：10344441

矢木政敏 (YAGI MASATOSHI)
九州大学・応用力学研究所・教授
研究者番号：70274537

石原修 (ISHIHARA OSAMU)
横浜国立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20313463

井上諭 (INOUE SATOSHI)
情報通信研究機構・研究員
研究者番号：50432216