

令和 2 年 5 月 9 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05671

研究課題名（和文）グランドミニマムの太陽圏磁場構造と宇宙線変調の研究

研究課題名（英文）Heliospheric structure and cosmic ray modulation during grand minimum

研究代表者

片岡 龍峰（Ryuhō, Kataoka）

国立極地研究所・研究教育系・准教授

研究者番号：90462671

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、グランドミニマムなどの極端に低い太陽活動時における特異な太陽風の活動や太陽圏磁場構造が、地球へ到来する銀河宇宙線スペクトルの変調に及ぼす影響と、そのメカニズムを解明することを目的とするものである。太陽風の磁気流体シミュレーションと、宇宙線の確率微分方程式シミュレーションを結合させるハイブリッドシミュレーションは、研究計画開始時のテクニカルな達成目標であったが、それぞれのシミュレーションでの重大な課題が研究計画中に明らかとなって基礎研究が進んだ。また、研究期間中に発生した予想外の宇宙天気イベントに関して、国際宇宙ステーションや航空機での被ばく量予測に関する研究成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マウンダー極小期の定量的な物理解明には至っていない。しかしながら、研究期間中に発生した予想外の宇宙天気イベントに着目し、幾つかの応用科学的な研究成果が得られた。いずれも、今後の高度な宇宙利用に宇宙天気予報の発展に資するものとして、社会的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to elucidate the effect of peculiar solar wind activity and heliospheric structure on the modulation of the galactic cosmic ray spectrum that reaches the earth and its mechanism during extremely low solar activity such as grand minimum. The hybrid simulation, which combines the magnetohydrodynamic simulation of the solar wind and the stochastic differential equation simulation of cosmic rays, was a technical goal at the beginning of the research plan, but significant issues in each simulation became clear, and basic research has advanced. In addition, regarding the unexpected space weather event that occurred during the research period, the research results on the prediction of exposure dose at the International Space Station and aircraft were obtained.

研究分野：宇宙空間物理学

キーワード：銀河宇宙線 太陽圏 グランドミニマム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽活動 11 年周期のサイクル 24 の極大期(2014 年)を過ぎ、極小期に向かう中で、サイクル 22、23、24 と次第に太陽の極磁場が弱体化していることから、非常に弱い太陽活動、特に黒点が長期的に出現しないグランドミニマム時の太陽圏の全体像を理解することは、理学的にも、宇宙天気予報の応用科学的にもホットな研究対象であった。また、宇宙線生成核種を用いた研究成果として、17 世紀のグランドミニマムであるマウンダー極小期の太陽活動極小期に銀河宇宙線フラックスのスパイク的な増加が確認されていたが、その増加量は非常に大きく、標準的な宇宙線ドリフトモデルで説明が困難なため、重要な研究課題の一つであった。

2. 研究の目的

本研究は、グランドミニマムなどの極端に低い太陽活動時における特異な太陽風の活動や太陽圏磁場構造が、地球へ到来する銀河宇宙線スペクトルの変調に及ぼす影響と、そのメカニズムを解明することを目的とする。

3. 研究の方法

既存のシミュレーション手法では定量的な再現が難しい、マウンダー極小期における宇宙線のスパイク的な急増に注目し、時間発展する精緻な太陽圏磁場構造を宇宙線変調シミュレーションに初めて組み込むことによって定量的な再現を試みる。本研究により、これまで観測されてきた観測データを再現する物理モデルのみならず、今後の極端な宇宙環境変動にも適応できる、予測性の高い精緻な太陽圏磁場・銀河宇宙線変調の物理モデルを獲得する。

4. 研究成果

太陽風の磁気流体シミュレーションと、宇宙線の確率微分方程式シミュレーションを結合させるハイブリッドシミュレーションは、研究計画開始時のテクニカルな達成目標であったが、それぞれのシミュレーションでの重大な課題が研究計画中に明らかとなって基礎研究が進み、成果が得られた。また、研究期間中に発生した予想外の宇宙天気イベントに関して、国際宇宙ステーションや航空機での被ばく量予測に関する研究成果が得られた。

MHD シミュレーションに基づいた非定常で動的な太陽圏の数値モデルを開発した(Matsumoto et al., 2019)。太陽表面の磁場の観測に基づいた太陽風モデルを内部の境界条件として与えた。この太陽風モデルは塩田らによって開発され、宇宙天気システム SUNANOO (Shiota et al., 2014)で運用の実績がある。SUNANOO は陰陽格子を用いているため、角度方向の解像度が距離に比例して悪くなり、外部太陽圏までは精度よく太陽風の流れを再現することができなかった。そこで本研究では直行格子の適合格子細分化法(AMR 法)を用いることによって、外部太陽圏においても太陽圏電流シートの解像度を高めることに成功した(図 1 参照)。本モデルは太陽から距離 100 au までの太陽圏の広がりを計算することに成功した。

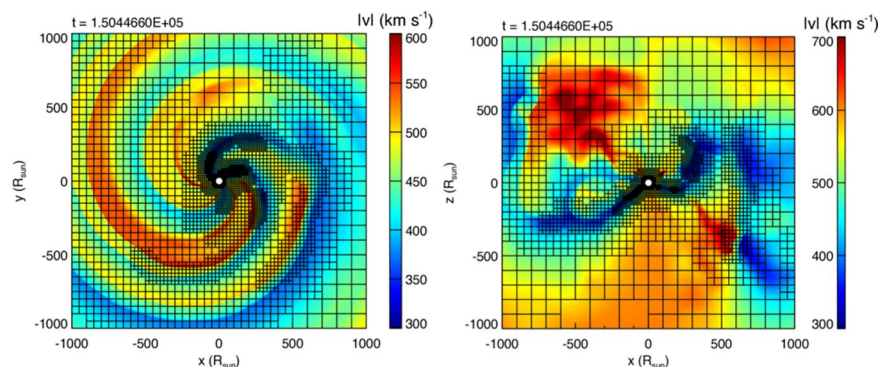


図 1 本研究で開発した動的で非定常な太陽圏モデル。色は赤道面上(左)と子午面上(右)の太陽風の速さを示している。格子は AMR ブロックを示し、ひとつのブロックに 83 個のセルが含まれる。

確率微分方程式(SDE)を用いた宇宙線輸送シミュレーションに MHD シミュレーションで得た太陽圏背景場を導入した MHD-SDE ハイブリッドシミュレーションの基礎モデルが完成した。図 2 に 2018 年 9 月 30 日の太陽圏背景場を考慮して銀河宇宙線陽子および反陽子の軌跡を算出した結果を示す。太陽圏磁場による銀河宇宙線のドリフト運動により、宇宙線変調には宇宙線の電荷(q)と太陽圏磁場の極性(A)に応じた荷電依存性が生じることが知られている。MHD-SDE ハイブリッドシ

シミュレーションで得られた銀河宇宙線の軌跡にも顕著な荷電依存性を確認することができ、 $qA > 0$ の正極性（銀河宇宙線陽子）の場合には太陽圏極領域を短時間で伝播するのに対し、 $qA < 0$ の負極性（銀河宇宙線反陽子）の場合には太陽圏内を長時間彷徨う結果が得られた。これらの結果はこれまでに知られていた宇宙線変調の荷電依存性に矛盾しない。さらに本シミュレーションでは、太陽圏内における宇宙線伝播の様子に顕著な南北非対称性があることも確認できた。これは従来の宇宙線変調に関する数値シミュレーションでは確認できなかった結果であり、MHD シミュレーションで得た太陽圏背景場を導入することで、南北非対称性を持つ実際の太陽圏環境を模擬できた成果と考えられる。

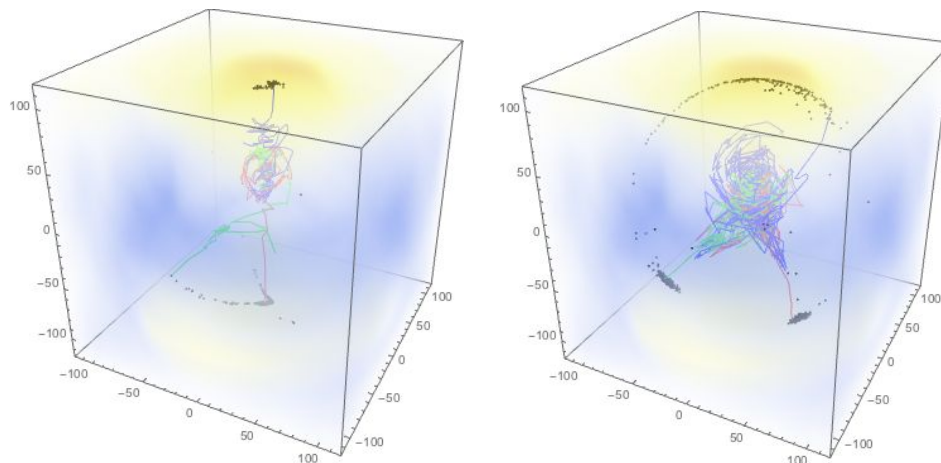


図2 本研究で開発した MHD-SDE ハイブリッドシミュレーションで得た銀河宇宙線陽子(左図)および銀河宇宙線反陽子(右図)の太陽圏内における軌跡(赤、青、緑の3例)。背景色は太陽風速度を示し、低緯度領域には低速太陽風(水色)、高緯度領域には高速太陽風(黄色)が広がる。

このほか、太陽活動が弱体化する研究期間中に発生した予想外の宇宙天気イベントに着目し、応用科学的な研究成果も得られた。ひとつは、太陽放射線による航空機における被ばく量の解析結果(Kataoka et al., 2018)であり、もう一つは放射線電子降下による国際宇宙ステーションにおける被ばく量の解析結果である(Ueno et al., 2019)。

< 引用文献 >

Ueno H., S. Nakahira, R. Kataoka, et al. (2019), Radiation dose during relativistic electron precipitation events at the International Space Station, *Space Weather*, 17, <https://doi.org/10.1029/2019SW002280>.

Matsumoto, T., D. Shiota, R. Kataoka, H. Miyahara, and S. Miyake (2019), A dynamical model of the heliosphere with the Adaptive Mesh Refinement, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1225, 012008, [doi:10.1088/1742-6596/1225/1/012008](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1225/1/012008).

Kataoka, R., Sato, T, S. Miyake, D. Shiota, and Y. Kubo (2018), Radiation Dose Nowcast for the Ground Level Enhancement on 10-11 September 2017, *Space Weather*, 16, <https://doi.org/10.1029/2018SW001874>.

Shiota, D., R. Kataoka, Y. Miyoshi, T. Hara, C. Tao, K. Masunaga, Y. Futaana, and N. Terada (2014), Inner heliosphere MHD modeling system applicable to space weather forecasting for the other planets, *Space Weather*, 12, 187-204, [doi:10.1002/2013SW000989](https://doi.org/10.1002/2013SW000989).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kataoka Ryuho, Sato Tatsuhiko, Miyake Shoko, Shiota Daikou, Kubo Yuki	4. 巻 16
2. 論文標題 Radiation Dose Nowcast for the Ground Level Enhancement on 10-11 September 2017	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Space Weather	6. 最初と最後の頁 917 ~ 923
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018SW001874	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sato Tatsuhiko, Kataoka Ryuho, Shiota Daikou, Kubo Yuki, Ishii Mamoru, Yasuda Hiroshi, Miyake Shoko, Park In Chun, Miyoshi Yoshizumi	4. 巻 16
2. 論文標題 Real Time and Automatic Analysis Program for WASAVIES - Warning System for Aviation Exposure to Solar Energetic Particles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Space Weather	6. 最初と最後の頁 924 ~ 936
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018SW001873	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sato Tatsuhiko, Kataoka Ryuho, Shiota Daikou, Kubo Yuki, Ishii Mamoru, Yasuda Hiroshi, Miyake Shoko, Miyoshi Yoshizumi, Ueno Haruka, Nagamatsu Aiko	4. 巻 9
2. 論文標題 Nowcast and forecast of galactic cosmic ray (GCR) and solar energetic particle (SEP) fluxes in magnetosphere and ionosphere: Extension of WASAVIES to Earth orbit	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Space Weather and Space Climate	6. 最初と最後の頁 A9 ~ A9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/swsc/2019006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsumoto Tomoaki, Miyoshi Takahiro, Takasao Shinsuke	4. 巻 874
2. 論文標題 A New HLLD Riemann Solver with Boris Correction for Reducing Alfven Speed	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 37
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab05cb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ueno, H., Nakahira, S., Kataoka, R., Asaoka, Y., Torii, S., Ozawa, S., et al	4. 巻 17
2. 論文標題 Radiation dose during relativistic electron precipitation events at the International Space Station	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Space Weather	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019SW002280	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Tomooki Matsumoto, Daikou Shiota, Ryuho Kataoka, Hiroko Miyahara, Shoko Miyake
2. 発表標題 A Dynamical Model of the Heliosphere with the Adaptive Mesh Refinement
3. 学会等名 ASTRONUM2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Miyake, T. Matsumoto, R. Kataoka, T. Sato, D. Shiota, H. Miyahara, S. Imada, and H. Ueno
2. 発表標題 Cosmic Ray Modulation During Extremely Weak Solar Cycle
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kataoka, R., T. Sato, S. Miyake, D. Shiota, and Y. Kubo
2. 発表標題 Radiation Dose During the Ground Level Enhancement on 10 September 2017
3. 学会等名 AOGS 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 片岡龍峰, 佐藤達彦, 三宅晶子, 塩田大幸, 久保勇樹
2. 発表標題 2017年9月10-11日の太陽プロトン現象と航空機高度での被ばく
3. 学会等名 天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片岡龍峰, 佐藤達彦, 三宅晶子, 塩田大幸, 久保勇樹
2. 発表標題 Radiation dose nowcast for the ground level enhancement on 10-11 September 2017,
3. 学会等名 第144回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会 (2018年 秋学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 片岡龍峰, 佐藤達彦, 三宅晶子
2. 発表標題 Radiation dose during the ground level enhancement on 10 September 2017
3. 学会等名 第8回極域科学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三宅晶子, 片岡龍峰, 佐藤達彦
2. 発表標題 Cosmic ray modulation and radiation dose of aircrews during the solar cycle 24/25
3. 学会等名 第142回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 Kataoka, R., T. Sato, S. Miyake
2 . 発表標題 Radiation dose nowcast during the ground level enhancement on 10 September 2017
3 . 学会等名 ISAR5, Tokyo (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Miyake, S., R. Kataoka, T. Sato
2 . 発表標題 Cosmic ray modulation and radiation dose of aircrews during the coming solar cycle
3 . 学会等名 JpGU-AGU joint meeting 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Miyake, S., R. Kataoka, T. Sato, S. Imada, H. Miyahara, D. Shiota, T. Matsumoto, H. Ueno
2 . 発表標題 Cosmic ray modulation and radiation dose of aircrews during possible grand minimum
3 . 学会等名 2017 AGU Fall meeting
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 松本 倫明, 塩田 大幸, 片岡 龍峰, 宮原 ひろ子, 三宅 晶子
2 . 発表標題 Current status of a dynamical model of the heliosphere with the adaptive mesh refinement
3 . 学会等名 JpGU-AGU joint meeting 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Miyake, S., T. Matsumoto, R. Kataoka, T. Sato, D. Shiota, H. Miyahara, S. Imada, and H. Ueno
2. 発表標題 Hybrid Simulation for the Solar Modulation of the Galactic Cosmic Rays During Recent Solar Cycle
3. 学会等名 AGU Fall 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 片岡龍峰	4. 発行年 2018年
2. 出版社 NHK出版	5. 総ページ数 162
3. 書名 太陽フレアと宇宙災害	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三宅 晶子 (Miyake Shoko) (00613027)	茨城工業高等専門学校・国際創造工学科・准教授 (52101)	
研究分担者	松本 倫明 (Tomoaki Matsumoto) (60308004)	法政大学・人間環境学部・教授 (32675)	