

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20945

研究課題名（和文）ジオスペース可視化への挑戦：ジオスペースX線撮像シミュレーション

研究課題名（英文）Challenge of Visualizing Geospace: Geospace X-ray Imaging Simulation

研究代表者

三好 由純（Miyoshi, Yoshizumi）

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：10377781

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、太陽風と地球磁気圏の相互作用によるジオスペースの可視化を目的として、磁気圏グローバルMHDシミュレーションとジオコロナモデルとを組み合わせ、軟X線放射の計算を行った。シミュレーションの結果、磁気昼側磁気圏シース領域やカusp領域の可視化が可能である、太陽風のプラズマベータの状況に応じて昼側での磁気再結合の可視化の可能性が示され、太陽風のプラズマベータの状況に応じて、昼側での磁気再結合の可視化の可能性が示されるとともに、X線放射の季節依存性の存在を明らかにした。これにより、将来の人工衛星によるジオスペース観測戦略に重要な示唆が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は、磁気圏グローバルMHDシミュレーションとジオコロナモデルを組み合わせ、軟X線放射の計算により、ジオスペースの可視化が可能であることを実証した点である。特に、昼側磁気圏シース領域やカusp領域のX線放射を詳細に解析し、磁気再結合の可視化の可能性とX線放射の季節依存性を明らかにした。これらの成果が将来の人工衛星によるジオスペース観測戦略の立案に貢献するとともに、太陽風磁気圏相互作用及び宇宙天気予報の理解に寄与することが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to visualize the geospace through the interaction between the solar wind and Geocorona, by combining global MHD simulations of the magnetosphere with a geocorona model to calculate soft X-ray emissions. The simulation results demonstrated the feasibility of visualizing the dayside magnetosheath and cusp regions. It revealed the potential for visualizing magnetic reconnection on the dayside depending on the solar wind plasma beta conditions, as well as the existence of seasonal dependence in X-ray emissions.

研究分野：磁気圏物理学

キーワード：ジオスペース可視化 X線 太陽風磁気圏相互作用 シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

太陽風と地球磁気圏の相互作用は、様々な宇宙天気現象を引き起こし、地磁気嵐やオーロラ、さらには通信障害や電力網の破壊など、人間活動に直接影響を及ぼすことが知られている。従来、ジオスペース研究は主に「その場」観測に依存してきた。人工衛星や地上の観測装置を用いて局所的なデータを収集し、それをもとにジオスペース内の現象の解析が行われてきた。しかし、この方法ではジオスペース全体の動態を一度に把握することは難しく、特に広範囲にわたるプラズマの動きや磁場構造の変化を詳細に観測することが困難であった。

近年、太陽風中の多価酸素イオンが地球の外圏大気であるジオコロナと電荷交換反応を起こし、その際に放射される軟 X 線が発見された。この発見をもとに、ジオスペース全体を X 線で可視化する新たな手段として注目されるようになった。X 線は高い透過性を持ち、ジオスペース全体のプラズマ分布や磁場構造を一度に観測することが可能であり、従来の「その場」観測を補完するものとして期待されている。

このような背景から、本研究は磁気圏グローバル MHD(磁気流体力学)シミュレーションとジオコロナのモデルを組み合わせることで、ジオスペース全体の軟 X 線放射を計算し、ジオスペースの広範囲な可視化を実現する可能性を検討したものである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、太陽風と地球磁気圏の相互作用を X 線観測を通して可視化し、磁気圏の形状変化やプラズマダイナミクスを高精度で把握する可能性を検討することである。具体的には、以下の三つの目標を掲げている。

a) ジオスペース全体の可視化

ジオスペース全体のプラズマ分布や磁場構造を詳細に観測するため、磁気圏グローバル MHD シミュレーションとジオコロナモデルを組み合わせた軟 X 線放射の計算を行う。この手法により、従来の「その場」観測では困難であったジオスペース全体の形状とダイナミクスを可視化し、広範囲に及ぶ領域の解析が可能になることが期待される。

b) 昼側磁気圏シース領域および磁気再結合の詳細解析

昼側磁気圏シース領域や磁気再結合領域での X 線放射を詳細に解析し、これらの領域で発生するプラズマダイナミクスや磁気再結合のプロセスを明らかにする。特に、太陽風のプラズマベータ値に依存する X 線放射の変動を調査し、昼側磁気圏での磁気再結合の可能性を検討する。

c) 将来の人工衛星観測戦略への応用

シミュレーション結果をもとに、将来の人工衛星によるジオスペース観測戦略を立案する。特に、昼側磁気圏シース領域や磁気再結合領域での X 線放射の季節依存性を考慮し、最適な観測時期や観測位置を提案することを目指す。

3. 研究の方法

本研究は、太陽風と地球磁場の相互作用によるジオスペースの軟 X 線放射をシミュレーションすることで、磁気圏の形状とダイナミクス可視化の可能性を検討することを目的としている。研究の方法は次のとおりである。

1. シミュレーション環境とモデルの設定

本研究では、公開 MHD(磁気流体力学)コードである CANS+を使用して地球磁気圏のグローバルシミュレーションを実施した。シミュレーションはデカルト座標系を使用し、内部境界条件は半径 4 地球半径(RE)の球面表面で設定されている。シミュレーション領域は、X 軸方向に-30RE から 85.6RE、Y および Z 軸方向に-38.3RE から+38.3RE までをカバーし、合計 592×355×355 の計算セルを持つ領域となっている。また、境界条件となる太陽風プラズマと惑星間磁場(IMF)は、 $X=-30Re$ の Y-Z 平面に境界条件として設定されている。

2. 電荷交換反応による軟 X 線放射の計算

本研究では、ジオコロナと O^{7+} との電荷交換反応における軟 X 線放射の強度を計算するために、MHD シミュレーションからプラズマ密度、熱速度、およびバルク速度を導出し、またジオコロナの経験モデル(Cravens et al., 2001)から数密度を導出することで計算を行った。

4. 研究成果

a). ジオスペース全体の可視化の可能性の検討

磁気圏グローバル MHD シミュレーションとジオコロナモデルを組み合わせた軟 X 線放射計算により、昼側磁気圏の可視化が可能である可能性が示された(図 1)。さらに、太陽風の速度、密度、温度、磁場強度などのパラメータを変化させ、時間とともに変化するジオスペースのダイナミクスを詳細な解析を実施した。

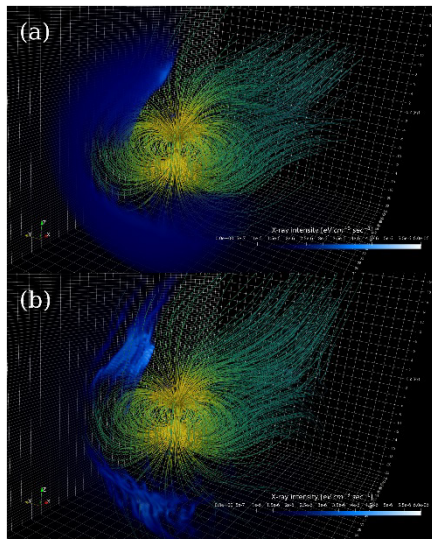


図 1: シミュレーションにもとづくジオスペース軟 X 線放射。青い色が X 線放射を表し、それ以外の色は磁力線を示す。(a)通常の太陽風 ($\beta=5.0$)、(b)プラズマ β が低いとき ($\beta=0.1$) (Matsumoto and Miyoshi, 2022)。

b). 昼側磁気圏シース領域およびリコネクション領域の詳細解析

昼側磁気圏シース領域や磁気再結合領域での X 線放射を詳細に解析した。特に、太陽風のプラズマベータ値に応じた X 線放射の変動を調査し、昼側磁気圏で発生する磁気再結合に伴う X 線放射の変化を明らかにした。具体的には、シミュレーション結果により、昼側磁気圏シース領域での強い X 線放射が確認された。また、磁気再結合領域では、太陽風のプラズマベータ値が低い場合に強い X 線放射が観測され、磁気再結合に伴う高速プラズマ流を X 線で可視化できる可能性を指摘した。これらの結果は、Geophysical Research Letters 誌に報告を行った(Matsumoto and Miyoshi, 2022)。

c). X 線放射の季節依存性の解明

黄道面に対する磁場の軸の変化、すなわち季節の違いによる昼側磁気圏からの軟 X 線放射の変化の検討を行った。その結果、夏至や冬至付近ではカusp領域からの X 線放射が強く、春分や秋分ではそれほど強くないことが示された。この季節依存性の発見は、将来の人工衛星観測における最適な観測時期を決定するための重要な情報となることが期待される。

d). 将来の人工衛星観測戦略への応用

シミュレーション結果をもとに、将来の人工衛星によるジオスペース観測戦略の議論を行った。特に、昼側磁気圏シース領域や磁気再結合領域での X 線放射の最適な観測時期や観測位置、またカuspを観測する際の最適な季節についての検討を行った。具体的には、昼側磁気圏での観測を行う際に、夏至や冬至の時期に重点を置くことで、強い X 線放射を観測しやすくなることが示された。これにより、軟 X 線放射を観測する人工衛星の設計やミッション計画に反映され、効果的かつ効率的な観測を実現するための基盤となることが期待される。

e). 学術的意義と社会的意義

本研究の学術的意義は、これまで「その場」観測が主流であった磁気圏物理学に対して、ジオスペースの広範囲な可視化を実現できる手段の可能性を定量的に検討し、プラズマ分布や磁場構造の詳細な解析を可能であることを示した点にある。これにより、ジオスペース内の物理現象、特に、磁気再結合やプラズマダイナミクスのメカニズムに関する新たな知見が得られることが予想される。また、社会的意義としては、これらの成果が宇宙天気予報の精度向上に寄与することが期待される。たとえば、CME(コロナ質量放出)到来時の軟 X 線の変化を観測することで、太陽風の動圧変化による磁気圏の形状変化が可視化され、その結果、どのくらいの電流が昼側磁気圏に流れているかといった知見が向上すれば、磁気嵐開始に関する予測精度の向上につながることを期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Matsumoto Yosuke, Miyoshi Yoshizumi	4. 巻 49
2. 論文標題 Soft X Ray Imaging of Magnetopause Reconnection Outflows Under Low Plasma Beta Solar Wind Conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2022GL101037
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2022GL101037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ezoe Yuichiro, Funase Ryu, Nagata Harunori, Miyoshi Yoshizumi, Nakajima Hiroshi, Mitsuishi Ikuyuki, Ishikawa Kumi, Kawabata Yosuke, Nakajima Shintaro, Kamps Landon, Numazawa Masaki, Yoneyama Tomokage, Hagino Kouichi, Matsumoto Yosuke, Hosokawa Keisuke, Kasahara Satoshi	4. 巻 12181
2. 論文標題 GEO-X (GEOSpace x-ray imager)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 SPIE	6. 最初と最後の頁 1218124
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2629107	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 Ezoe Yuichiro, Funase Ryu, Nagata Harunori, Miyoshi Yoshizumi, et al.	4. 巻 11444
2. 論文標題 GEO-X (GEOSpace x-ray imager)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SPIE	6. 最初と最後の頁 1144428
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2560780	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yosuke Matsumoto and Yoshizumi Miyoshi
2. 発表標題 Numerical modeling of soft X-ray emission around the magnetosphere under various solar wind conditions
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三好 由純、松本 洋介、江副 祐一郎
2. 発表標題 Soft-X ray emissions from Geospace: Possible science objectives of GEO-X
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本洋介、三好由純
2. 発表標題 GEO-Xミッションに向けた磁気圏グローバルMHDシミュレーションモデルの開発
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔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	松本 洋介 (Matsumoto Yosuke) (20397475)	千葉大学・大学院理学研究院・特任准教授 (12501)	
研究 分担者	江副 祐一郎 (Ezoe Yuichiro) (90462663)	東京都立大学・理学研究科・准教授 (22604)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------