

令和 5 年 5 月 14 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03948

研究課題名(和文)複数衛星を用いた地磁気脈動指数の導出

研究課題名(英文) The geomagnetic pulsation index derived from the magnetic field data observed by the geospace satellites.

研究代表者

寺本 万里子 (Teramoto, Mariko)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：10614331

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)：地球半径6倍以内の宇宙ジオスペースを観測する複数衛星の磁場データから周期600秒以下の地磁気脈動の活動度を表す地磁気脈動指数を導出し、太陽風動圧や太陽風速度などの太陽風パラメータやオーロラ活動度との比較を行った。2017年から2018年にかけて地磁気の活動が活発になるのは太陽のコロナホール起源の高速太陽風と低速太陽風が相互作用している共回転相互領域が原因であることがわかった。また夜側で地磁気脈動指数が大きくなる要因としてはオーロラ活動が原因であることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工衛星の磁場観測データを用いてジオスペースに引き起こされる地磁気脈動の活動度を定量的に指数化し、使いやすい形にしたことに意義がある。この指数を用いれば、太陽風やオーロラ活動によって引き起こされる地磁気脈動の励起機構を明らかにできることを示した。地磁気脈動は、高エネルギーのプラズマが集まる領域である放射線帯の生成に寄与する側面もあるため、地磁気脈動を指数化したことは宇宙天気分野において意義があるといえる。

研究成果の概要(英文)：We derived the index of geomagnetic pulsations from the magnetic field data observed in the inner magnetosphere by the geospace satellite. This index represents the activities of ultra-low-frequency waves with a period of less than 600 seconds. We compared the derived index with parameters such as solar wind velocity, dynamic pressure, and auroral indices. We found that the increase in wave activities during 2017-2018 is correlated with the co-rotating interaction region (CIR) where high-speed solar wind from coronal holes interacts with slow-speed solar wind. It was found that the enhancement of the index on the nightside is attributed to auroral activity.

研究分野：超高層物理学

キーワード：地磁気脈動 ジオスペース 磁気嵐 放射線帯 地磁気 衛星観測 オーロラ活動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球半径の 6 倍程度以内の領域にある内部磁気圏に見られる地磁気脈動(周期 600 秒以下)は、地球周辺を取り巻く放射線帯のダイナミクスに関係があることが知られている。このような地磁気脈動の動態を把握するために、これまでは全球の多点地上磁場観測網データを用いて、地磁気脈動のスペクトルパワーから、地磁気脈動指数が導出されてきた。また、放射線帯粒子の増減と、地磁気脈動指数の比較研究からは、地磁気脈動指数の増加に対し 1-2 日遅れて放射線帯が増加することが知られており、放射線帯の予測に地磁気脈動指数が有用なパラメータとなることが期待されている。しかし、地上磁場観測で観測される地磁気脈動は、宇宙空間で発生した磁場振動を、高度 100 キロメートル付近に存在する電離圏を介して観測していることから、地上で観測された地磁気脈動には様々な成分が混入している問題点が指摘されている。

近年、米国の RBSP 衛星、THEMIS 衛星など、磁場を観測可能な衛星が内部磁気圏内において複数運用されている。さらに、2016 年 12 月には、JAXA によってあらせ衛星が打ち上げられ、内部磁気圏で空間的な広がりを持つ地磁気脈動を明らかにする絶好の機会が訪れた。

2. 研究の目的

この研究では、あらせ衛星を中心として内部磁気圏の複数衛星観測を用いて、周期 600 秒以下の波動強度を表す地磁気脈動指数を導出することを目的とする。これまで、地磁気脈動指数は、地上磁場観測をもとにしたデータから導出されてきた。しかし、地上で観測される磁場は、地磁気脈動以外の影響も受けるため、これまでの脈動指数が本当に地磁気脈動の活動度を表しているかどうかについては議論が続いていた。そこで本研究では、2016 年に打ちあがった「あらせ」衛星による最新の観測データから、宇宙空間の地磁気脈動のみを抽出する新たなデータベースを構築し、そのデータベースをもとに脈動指数を導出する。導出した脈動指数について、太陽風変動などとの関係性を調べ、この指数が地磁気脈動の代表的な性質を反映していることを検証する。既に地上磁場観測で導出された地磁気脈動指数と比較を行う。

3. 研究の方法

(1) 高速フーリエ変換を利用した衛星観測地磁気脈動指数の導出とデータベースの構築

高速フーリエ変換によって、衛星の磁場観測データからスペクトルパワーを 1 分ごとに計算する。パワースペクトルが地磁気脈動の周波数帯(2-7mHz)で急峻なピークが 20 分間以上継続している場合に、急峻なパワーのピークが始まる時刻・衛星の位置・卓越周波数(f_p)・卓越周波数のパワー(P_p)・振動成分を識別する地磁気脈動自動検出プログラムを用いて、内部磁気圏で観測される地磁気脈動のイベントリストを構築する。上記データベースに収録されている軌道データから衛星が地球半径の 5 倍以上に位置するものを選び出す。選び出されたイベントの卓越周波数とパワーから、衛星観測データを用いた地磁気脈動指数(I_{pc5}^s)の計算を行う。導出は、 $I_{pc5}^s = \sqrt{P_p \times f_p}$ によって計算する。

(2) 地磁気脈動指数と太陽風パラメータとの比較

衛星ごとに導出された地磁気脈動指数と太陽風データベースを用いて太陽風変動との関係を調べ、指数の増減と太陽風との関係が過去の地磁気脈動研究で明らかになった特徴を示すかどうかを検証する。

(3) 地上磁場観測による地磁気脈動指数と衛星観測による地磁気脈動指数の比較

地上磁場観測によって導出された地磁気脈動指数を Web 経由で取得して、本研究で導出された地磁気脈動指数(I_{pc5}^s)と比較を行う。比較することによって、現在広く使われている地上磁場観測による地磁気脈動指数が、磁気圏で実際に引き起こされる地磁気脈動をどれほど反映している指数であるのかを明らかにする。

4. 研究成果

(1) 高速フーリエ変換を利用した衛星観測地磁気脈動指数の導出とデータベースの構築

あらせ衛星が磁場の観測を始めた 2017 年 3 月以降のデータから地磁気脈動指数の導出を行った。研究を進めていく中で、あらせ衛星の磁場データには、衛星のスピンレートの変化に伴う 2-3mHz 程度の定常的なノイズが発生していることが明らかになった。これは研究計画で当初には認識されていなかったノイズであり、本研究を遂行するにあたり大きな影響を及ぼす。そのため、時系列データからノイズの除去を試みるとともに、研究開始当初予定していたよりも高周波側(上限 22mHz まで)を含めた地磁気脈動指数の導出を行い、その有用性について確かめる研究を追加で実施した。その研究成果については「(4)高周波を含めた地磁気脈動指数を用いた研究」

として、本章の末尾に記載している。磁場データからの直接的なノイズの除去については、バンドパスフィルターを用いた除去法、平均化したノイズデータを用いた除去法などを試みたが、有効なノイズ除去法を確立することはできなかった。一方、あらせ衛星のスピンの変化量と磁場データに見られるノイズの大きさを比較したところ、両者に明確な相関関係があることがわかった。この関係により、スピンの変化量から磁場にみられるノイズ量を推定する方法を開発した。これにより限定的ではあるが、当初予定していた 2-7mHz の周波数帯も含めて地磁気脈動指数を導出している。また、米国の RBSP 衛星の磁場データでも同様に地磁気脈動指数を導出した。

(2) 地磁気脈動指数と太陽風パラメータとの比較

あらせ衛星の磁場データより導出した地磁気脈動指数と太陽風速度、太陽風動圧との関係を調べるため 2017 年 3 月から 2018 年 9 月の期間で相互相関係数を導出した。地球半径 5~6 倍の領域での地磁気脈動指数の上昇に対し太陽風動圧の変化は 0.5-1 日早く発生し、その相互相関係数は 0.7 以上と高い相関を示した。一方、太陽風速度の変化は、地磁気指数に対して 0.5-1 日遅れ、相互相関係数は 0.7 以上と高い相関を示すことがわかった。これらの結果からあらせ衛星で観測した地磁気指数の変化は太陽のコロナホール起源(CIR)に関連していることを明らかにした。また、同期間に RBSP 衛星で導出した地磁気脈動指数においても同様の傾向が見られた。

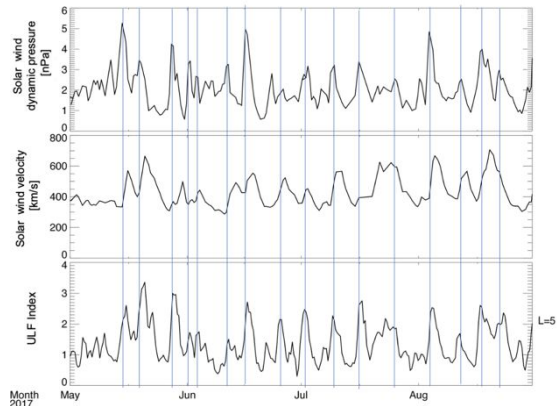


図 1: (上段)太陽風動圧 (中段) 太陽風速度 (下段) 地球半径 5 倍の領域での地磁気脈動指数。太陽風動圧の上昇に応じて脈動指数も上昇している。

(3) 地上磁場観測による地磁気脈動指数と衛星観測による地磁気脈動指数の比較

地上磁場観測によって導出された地磁気脈動指数とあらせ衛星の観測によって導出された地磁気脈動指数との相関を調べた。地上磁場観測による地磁気脈動指数と地球半径 5 倍(6 倍)の位置にいるときに導出された、あらせ衛星の地磁気脈動指数との相関は、0.66(0.56)であり、高い相関を示した(図 2)。一方、衛星観測によって導出された地磁気脈動指数は、地上磁場観測によって導出された地磁気脈動指数では観測されない、数時間単位の微小な変化を示す場合があることがわかった。この結果は、衛星による宇宙空間の地磁気の直接観測が地磁気脈動指数を作る際に有用であることを示している。

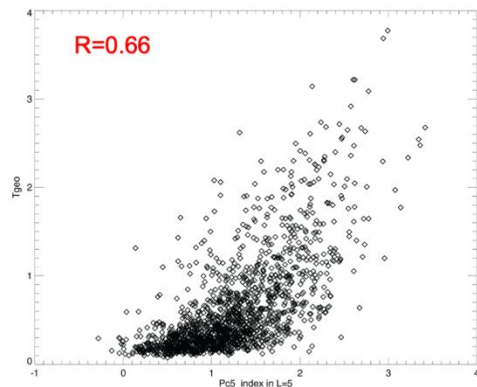


図 2: 地球半径 5 倍の領域での地磁気脈動指数と地上磁場観測による地磁気脈動指数の関係。

(4) 高周波を含めた地磁気脈動指数を用いた研究

研究計画当初には把握していなかった 2-3m Hz のノイズ除去方法を確立するのに時間を要したため、ノイズの影響を受けない高周波(上限 22mHz まで)を含め、地磁気脈動指数の導出を行い、その有用性について確かめる研究を実施した。地磁気脈動指数を用い高周波の波動強度の空間分布を調べたところ、夜側で特に波動強度が大きくなることがわかった。夜側のデータから導出された地磁気脈動指数を、オーロラ活動起源の地磁気脈動の活動度を表す Wp 指数やオーロラ活動指数と比較を行ったところ高い相関を示した。この結果を受け、この地磁気脈動指数は夜側においては、オーロラの活動度を示すための指標となることがわかった。またこの地磁気脈動指数を用いオーロラ起源の地磁気脈動の波動強度の空間分布を調べ、その発生機構を明らかにし論文としてまとめた。

さらに、2018 年 8 月末に起きた磁気嵐の回復相において夜側(磁気地方時 22-02 時)の地磁気脈動指数が大きくなる期間に着目し、地磁気脈動の低エネルギーイオン質量密度の時間発展について調査した。この調査によって、磁気嵐時に地球の大気由来の低エネルギーの酸素イオンが地磁気脈動の周波数に関与した結果、夜側の地磁気脈動指数を大きくすることを明らかにした。

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Teramoto M., Miyoshi Y., Matsuoka A., Kasahara Y., Kumamoto A., Tsuchiya F., Nose M., Imajo S., Shoji M., Nakamura S., Kitahara M., Shinohara I.	4. 巻 127
2. 論文標題 Off Equatorial Pi2 Pulsations Inside and Outside the Plasmopause Observed by the Arase Satellite	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JA029677	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 Yamamoto K., Seki K., Matsuoka A., Imajo S., Teramoto M., Kitahara M., Kasahara Y., Kumamoto A., Tsuchiya F., Shoji M., Nakamura S., Miyoshi Y., Shinohara I.	4. 巻 127
2. 論文標題 A Statistical Study of the Solar Wind Dependence of Multi Harmonic Toroidal ULF Waves Observed by the Arase Satellite	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021JA029840	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 Teramoto M., Hori T., Saito S., Miyoshi Y., Kurita S., Higashio N., Matsuoka A., Kasahara Y., Kasaba Y., Takashima T., Nomura R., Nos? M., Fujimoto A., Tanaka Y. M., Shoji M., Tsugawa Y., Shinohara M., Shinohara I., Blake J. B., Fennell J.F., Claudepierre S.G., Turner D. L., Kletzing C. A., Sormakov D., Troshichev O.	4. 巻 46
2. 論文標題 Remote Detection of Drift Resonance Between Energetic Electrons and Ultralow Frequency Waves: Multisatellite Coordinated Observation by Arase and Van Allen Probes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 11642 ~ 11651
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019GL084379	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 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Teramoto, M., A. Matsuoka, Y. Kasahara, Y. Kasaba, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, S. Matsuda, Y. Miyoshi, M. Nose, T. Nakagawa, S. Imajo, M. Shoji, S. Nakamura, and I. Shinohara
2. 発表標題 Mode-coupling Pi2 pulsations on the off-equatorial plasmopause inferred from the Arase satellite observation
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teramoto, M., Y. Miyoshi, A. Matsuoka, N. Higashio, C. A. Kletzing, T. Takashima, R. Nomura, S. Kurita, S. Imajo, and I. Shinohara
2. 発表標題 Ultra low frequency wave index in the inner magnetosphere derived from Arase and RBSP satellites
3. 学会等名 第148回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会及び講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Miyoshi, Y., S. Kurita, I. Park, T. Mitani, I. Shinohara, S. Kasahara, T. Hori, N. Higashio, S. Imajo, C. W. Jun, A. Matsuoka, Y. Kasahara, S. Matsuda, F. Tsuchiya, A. Kumamoto, M. Shoji, and D. L. Turner
2. 発表標題 Statistical investigation of cross energy coupling during magnetic storms: Arase observations
3. 学会等名 AGU Fall meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺本 万里子、能勢 正仁、松岡 彩子、笠原 禎也、熊本 篤志、土屋 史紀、三好 由純、小路 真史、中村 紗都子、北原 理弘、今城 峻、篠原 育
2. 発表標題 Nightside ion mass density estimated by transient toroidal mode waves observed by the Arase satellite
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺本 万里子、能勢 正仁、松岡 彩子、笠原 禎也、熊本 篤志、土屋 史紀、新堀 淳樹、三好 由純、小路 真史、中村 紗都子、北原 理弘、今城 峻、篠原 育
2. 発表標題 Temporal evolution of nightside plasma mass in the inner magnetosphere during a geomagnetic storm using the Arase measurement
3. 学会等名 第152回 地球電磁気・地球惑星圏学会 総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teramoto, M., M. Nose, A. Matsuoka, Y. Kasahara, K. Asamura, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, A. Shinbori, Y. Miyoshi, M. Shoji, S. Nakamura, M. Kitahara, S. Imajo, I. Shinohara
2. 発表標題 Nightside Ion Mass Density Estimated by Toroidal Mode Waves Observed by the Arase Satellite
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寺本 万里子、松岡 彩子、三好 由純、篠原 育、北村 健太郎
2. 発表標題 Broadband and discrete ULF wave indices in the inner magnetosphere derived from magnetic field observation of the Arase satellite
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ヴァン・アレン帯の電子が加速される場所の特定に成功 https://www.kyutech.ac.jp/whats-new/press/entry-6994.html</p>

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
研究協力者	三好 由純 (Miyoshi Yoshizumi)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	篠原 育 (Shinohara Iku)		
研究協力者	能勢 正仁 (Nose Masahito)		

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		
米国	エアロスペースコーポレーション	アイオワ大学	
ロシア連邦	ロシア北極・南極研究所		