

令和元年6月4日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05565

研究課題名(和文) あけぼのPWS観測データを中心とした太陽・宇宙環境の長期変動

研究課題名(英文) Study of long-term variation of Solar and Space Environment based on the Akebono PWS data

研究代表者

小原 隆博(OBARA, TAKAHIRO)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：50194626

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：磁気圏観測衛星「あけぼの」の長期観測データ及び関連データに基づいて、太陽風速度や太陽風磁場のセクター構造に関する新しい長期変動の知見を得た。また、磁気嵐時の磁気圏波動と放射線電子の同時観測から、放射線電子の消失過程を明らかにした。研究は、波動粒子相互作用に展開され、放射線電子加速の素過程についての知見を得た。一方、太陽フレア発生に伴い出現する特徴的な電波現象を解析し、磁気流体波動と高エネルギー粒子が同時発生することを明らかにした。CME衝撃により加速された放射線粒子の磁気圏への侵入過程について調査した結果、新しいタイプの太陽放射線の加速が、太陽活動極大期に出現する事実を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工衛星は、宇宙放射線粒子の増加により、しばしば故障する。本研究は、宇宙放射線粒子の長期変動を明らかにするとともに、地球放射線帯外帯電子が高速太陽風及び特定の太陽風セクター構造時に、異常増加する事を確認した。一方、太陽放射線粒子の長期観測データから、CMEショック域での放射線粒子の新しい増加機構を見出した。これらの知見は、人工衛星制作時の設計基準や、宇宙天気予報に資する成果となる。

研究成果の概要(英文)：Based on the observations by the Akebono as well as other satellites and ground based instruments, we have identified a long-term variations of the Sun and space environment. Increase of radiation belt electrons has been controlled by the solar wind velocity and solar wind sector structure. Studies have been expanded to find the evidences of radiation electron losses by the very low plasma waves in the magnetosphere. Detail physics of wave-particle interaction have been made both in the solar corona and magnetosphere. Penetration of solar energetic particles into the magnetosphere was identified, and new type of generation of solar energetic particle in the vicinity of the CME shock region has been found which mainly occurs during the solar activity maximum.

研究分野：太陽圏物理学

キーワード：あけぼの衛星 太陽放射線 放射線帯 磁気圏プラズマ波動 長期変動 宇宙環境

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

オーロラ観測衛星「あけぼの」が打ち上げられた1989年当時、代表申請者は文部省宇宙科学研究所にて、あけぼの衛星運用の現場を担当していた。1989年～1991年にかけて、太陽活動は極大期にあり、大規模な太陽フレアが頻繁に発生していた。太陽フレアで放出されたCME(コロナ質量放出)は、地球磁気圏に衝突し、磁気嵐を発生させ、極域には大規模なオーロラ現象が起こっていた。

当時の知見では、磁気嵐によって放射線帯が活性化することは判明していなかったが、1990年代の後半になり、磁気嵐の回復相で放射線帯 MeV 電子が異常に増加する事が、観測的に確認された。この事実に気が付いた背景に、あけぼの衛星に搭載されたメモリーが、磁気嵐時にビットエラーを頻繁に起こしていたことがあげられる。

磁気嵐の原因となる太陽フレアの識別は、あけぼの衛星でも容易であった。あけぼの衛星に搭載されたプラズマ波動計測装置(PWS)は、太陽フレアによって生成されたCME(コロナ質量放出)による太陽電波を観測していた。この太陽電波は、タイプ II 型電波と呼ばれ、あけぼの衛星は、この電波を明瞭に観測していた。「太陽フレア CME 磁気嵐→オーロラ活動の活発化 放射線帯 MeV 電子の異常増加」というシナリオの原型を、経験的に掴んでいた事になる。

### 2. 研究の目的

本研究の神髄は、ソースである太陽の活動状態(極大期、極小期、上昇期、下降期)において、放射線帯電子変動に差異があるかどうかを、検証する事にある。

本研究のもう一つの目的は、「太陽フレア CME 磁気嵐→オーロラ活動の活発化 放射線帯 MeV 電子の異常増加」という一連流れの中で、i) CME 磁気嵐、ii) 磁気嵐 オーロラ活動の活発化、iii) オーロラ活動の活発化 放射線 MeV 電子の異常増加といった各要素間の結合の基礎物理を、深く理解する事である。

### 3. 研究の方法

あけぼの衛星は、1989年2月の打ち上げから2015年4月の運用停止まで、26年2月の長きに渡って、オーロラ電波やプラズマ波動を計測して来た。プラズマ波動計測装置(PWS)のクオリティーは、26年間を経ても劣化は認められず、2周期以上の太陽活動サイクルにわたって、高いクオリティーで継続的に観測した。

あけぼの衛星の観測データを軸に、関連する衛星および地上観測データを組み合わせて、放射線帯電子の長期変動と、各現象における素過程を明らかにする。

### 4. 研究成果

初年度は、プラズマ波動観測データ(PWS データ・ISAS DRATS 経由で公開)からデータベースを構築し、イベントを識別した。それらを用いて、i) 太陽電波、ii) 磁気嵐に固有のプラズマ波動現象、iii) オーロラ電波 の発生状況を把握した。

i) 太陽フレアに伴って発生する電子ビームの有無(Type III 型電波の解析)、フレア発生後のフレアループからの特殊な電磁放射(Type IV 型電波の解析)

ii) 内部磁気圏(プラズマ圏、放射線帯)に発生する静電波動の発生機構、ホイッスラーモード低周波プラズマ波動の出現特性、放射線帯 MeV 電子変動と波動の関係、プラズマ圏粒子の宇宙空間への流出、

iii) オーロラに伴う電波の地上と衛星による同時観測、オーロラ電波の発生域の能動観測に関する研究を行い、学会で発表するとともに、論文として出版した。

2年次は、初年度に引き続き、プラズマ波動観測データ(PWS データ・ISAS DRATS 経由で公開)から各種波動イベントを識別し、i) 太陽電波、ii) 磁気嵐に固有のプラズマ波動現象、iii) オーロラ電波 の発生状況を把握するとともに、東北大惑星プラズマ・大気研究センターが所有する、太陽電波望遠鏡の観測データについて、衛星観測データと対応を取る形で整理し、地上観測のデータベースとして構築した。また、理論計算を進めるべく、波動発生シミュレーションコードを開発した。以上の取り組みから、以下のような具体的な成果を得た。

i) 太陽電波については、太陽電波の発生領域の同定、電波発生機構の検証を行ったが、太陽フレア発生後のフレアループからの特殊な電磁放射(Type IV 型電波の解析による)の発生機構が明らかになった事が主たる成果である。特に、構造に由来する微細構造の研究は、新しい発見であった。

ii) 内部磁気圏(プラズマ圏、放射線帯)においては、放射線帯電子変動に焦点を当て、静電波動の発生機構、ホイッスラーモード低周波プラズマ波動の出現特性、放射線帯 MeV 電子変動と波動の関係に関する研究を進めた。

iii) オーロラ電波発生機構については、オーロラに伴う電波の地上と衛星による同時観測、オーロラ電波の発生域の能動観測を行い、それらの研究は新規人工衛星搭載機器開発に反映さ

れた。結果を学会では発表すると共に、学術論文として出版した。

3年次は、初年次、2年次に引き続き、各種波動イベントを識別するとともに、初年次、2年次で抽出した特徴が、太陽活動状況で、如何に変質するかを識別する事を、最大の目標とした。特に、放射線帯の長期変動における新知見を見出す事に注力する事とした。3年次の結果を、以下にまとめる。

i) 太陽活動の各フェーズにおいて発生する磁気圏擾乱は違いがあり、この違いによって、放射線電子増加に差異が認められた。具体的には、人工衛星に計測装置を搭載し、「放射線帯高エネルギー電子」の観測結果から、季節変動・長期変動を明らかにした。

ii) オーロラ活動に伴う地磁気擾乱と低周波プラズマ波動の発生が、放射線帯電子の消失(大気への降下)に大きく寄与している「新知見」が得られた。詳述すると、北米・北欧に独自に展開したユニークな低周波電波観測ネットワークを使用し、宇宙空間中の電磁場による散乱により、放射線帯の閉じ込めが破れて中層大気に降り注ぎ、大気を電離させている様子を明らかにした。また、統計的な処理から、太陽活動が活発な時期、磁気嵐の頻発時に、低周波プラズマ波動による消失の頻度が高い事実が認められた。

iii) 太陽電波については、地上からの高分解電波観測に基づき、太陽嵐(フレア等)の発生に伴い出現する特徴的な電波現象を解析し、太陽嵐出現時には磁気流体波動と高エネルギー粒子が同時発生することを明らかにした。

また、成果は公表していないが、太陽放射線粒子の長期変動についても研究を展開し、人工衛星の観測データから、CMEショック域での放射線粒子の新しい増加機構を見出した

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 17 件)

1. 小原他, 太陽活動下降期における静止軌道 MeV 電子の長期変動, 宇宙航空研究開発機構特別資料, JAXA-SP-18-009, 1-4, 2019 ( 査読無し )  
<https://repository.exst.jaxa.jp/dspace/handle/a-is/908343>
2. Tsuchiya, F., A. Hirai, T. Obara et al., Energetic Electron Precipitation Associated With Pulsating Aurora Observed by VLF Radio Propagation During the Recovery Phase of a Substorm on 27 March 2017, GRL, 10.1029/2018GL080222, 2018 ( 査読あり )
3. Hirai, A., F. Tsuchiya, T. Obara et al., Temporal and Spatial Correspondence of Pc1/EMIC Waves and Relativistic Electron Precipitations Observed With Ground-Based Multi-Instruments on 27 March 2017, GRL, 10.1029/2018GL080126, 2018 ( 査読あり )
4. Kumamoto, A., Y. Katoh, T. Obara et al., High Frequency Analyzer (HFA) of Plasma Wave Experiment (PWE) onboard the Arase spacecraft, EPS, 10.1186/s40623-018-0854-0, 2018 ( 査読あり )
5. Kaneda, K., H. Misawa, T. Obara et al., Detection of Propagating Fast Sausage Waves through Detailed Analysis of a Zebra-pattern Fine Structure in a Solar Radio Burst, The Astrophysical Journal, 10.3847/2041-8213/aab2a5, 2018 ( 査読あり )
6. Katoh, Y. et al., Dependence of generation of whistler-mode chorus emissions on the temperature anisotropy and density of energetic electrons in the Earth's inner magnetosphere, 10.1002/2017JA024801, 2018 ( 査読あり )
7. Kaneda, K., H. Misawa, T. Obara et al., Polarization Characteristics of Zebra Pattern in Type IV Solar Radio Bursts., The Astrophysical Journal, 10.3847/1538-4357/aa74c1, 2017 ( 査読あり )

[学会発表](計 14 件)

1. Obara, T., H. Matsumoto, K. Koga, T. Nagatsuma, Variation of relativistic electron flux at geostationary orbit during solar activity declining phase, 第15回宇宙環境シンポジウム, 2018.10
2. Obara Takahiro, Electron acceleration and loss responsible for the formation of new radiation belt during big magnetic storm, JpGU2017, 2017.5

3. Katoh, Y. and Y. Omura, Simulation study of the nonlinear processes of whistler-mode chorus generation in the Earth's inner magnetosphere, AGU Chapman Conference, 2017.12
4. Kumamoto, A., Y. Katoh, and T. Obara, Akebono (EXOS-D) sounder data archive for studies of the ionosphere and plasmasphere, AGU Fall Meeting , 2017.12

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：熊本 篤志

ローマ字氏名：Kumamoto Atsushi

所属研究機関名：東北大学

部局名：理学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁)：00302076

研究分担者氏名：加藤 雄人

ローマ字氏名：Katoh Yuto

所属研究機関名：東北大学

部局名：理学研究科

職名：教授

研究者番号(8桁)：60378982

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。