

令和元年5月29日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04056

研究課題名(和文) プラズマ波動の網羅的観測による内部磁気圏物理の研究

研究課題名(英文) Study on the inner magnetosphere based on comprehensive observation of plasma waves

研究代表者

笠原 禎也 (Kasahara, Yoshiya)

金沢大学・総合メディア基盤センター・教授

研究者番号：50243051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：(1)内部磁気圏衛星あらせ搭載のプラズマ波動・電場観測器(PWE)を用いて、地球内部磁気圏におけるプラズマ波動-粒子相互作用を的確にその場(in situ)観測するために、電磁界波形の精密測定法と、重要な物理現象に関わる波形データを選別し、地上伝送する観測・運用手法を確立した。(2)内部磁気圏内のグローバルな波動の励起・伝搬機構と、プラズマ環境を定量的に評価するために、PWEデータから種々のプラズマ波動の到来方向の推定に成功するとともに、Van Allen Probesや地上観測網と同時協調観測を実施し、波動と極域の脈動オーロラの対応関係や、同一波源から伝搬するプラズマ波動の同定に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球内部磁気圏の放射線帯は、数Hz～数十kHz帯にわたるプラズマ波群と、eV～MeV帯にわたる荷電粒子の相互作用によってダイナミックに生成・消滅を繰り返し、宇宙飛行士の被ばく、人工衛星の故障、降下電子による電離層擾乱(無線通信やGPS信号への影響)等、人類の活動に多大な影響を及ぼす。当該研究は、あらせ衛星搭載のプラズマ波動観測器(PWE)を用いて、これらの物理機構に深く関わるプラズマ波を選択的に選んで精密測定する観測技術を確立した点、地上観測網や他衛星との同時観測によって、波動の励起源や伝搬通路をグローバルにとらえる観測に成功した点で、学術的に大変重要である。

研究成果の概要(英文)：We established an intelligent measurement system for the plasma wave experiment (PWE) on board the Arase satellite. We demonstrated that electric and magnetic fields are precisely derived after appropriate calibration. We also established a data selection procedure to capture important waveform data which are closely related to the wave-particle interaction in the inner magnetosphere.

We successfully applied direction finding analysis to various kinds of plasma waves in order to quantitatively evaluate the generation and propagation mechanism of the waves. We also performed collaborative observations with ground-based networks as well as the other satellites such as Van Allen Probes, and succeeded in identifying the one-to-one relationship between chorus waves and pulsating auroras and the plasma waves propagating from the same wave source.

研究分野：電波情報工学

キーワード：宇宙プラズマ プラズマ波動 地球磁気圏・電離圏 計測工学 超高層物理学 自然現象観測・予測

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

1. 研究開始当初の背景

地球近傍の内部磁気圏と呼ばれる宇宙空間では、多様な時間・空間スケールで多様なエネルギースケール現象が同時並行に発生し、その物理過程にプラズマ波動が大きく関与していることが近年の研究で明らかにされつつある。特に、相対論的高エネルギー粒子が大量に蓄積される地球内部磁気圏の放射線帯では、数 Hz ~ 十数 kHz 帯にわたるプラズマ波群と、eV ~ MeV 帯にわたる荷電粒子の相互作用によってダイナミックに生成・消滅を繰り返している。生成される高エネルギー粒子は、宇宙飛行士の被ばく、人工衛星の故障、降下電子による電離層擾乱(無線通信や GPS 信号への影響)等、人類の活動に多大な影響を及ぼすため、内部磁気圏で生じる物理過程の解明は、宇宙の利用・開発を促進し、その将来を切り開く上で必須の課題である。

この支配メカニズムを明らかにするには、その物理素過程であるプラズマ波動 - 粒子相互作用を的確にとらえる観測手段と、得られた観測データから磁気圏内のグローバルな「物質と場」のエネルギー収支と伝搬を定量評価できるスキームの獲得が必須である。このような背景のもと、日本の内部磁気圏探査衛星「あらせ (ERG)」が、平成 28 年度に打ち上げを控えており、我々が開発した本衛星搭載のプラズマ波動観測器 (Plasma Wave Experiment; 以下、PWE) に対して、上記条件を満たす網羅的な観測・データ処理スキームの創出と、内部磁気圏の高エネルギー過程におけるプラズマ波動の役割を明らかにすることが強く期待されていた。

2. 研究の目的

内部磁気圏内における代表的なプラズマ波動には、ホイスラーモードの Chorus・プラズマ圏ヒス・磁気音波(MSW)、イオンモードの電磁イオンサイクロトロン波 (EMIC) などがあり、各々が様々なエネルギー帯の電子・イオンと複雑な相互作用を起こす。たとえば、Chorus は磁気嵐回復相に流入する keV レンジのリングカレント電子をエネルギー源として発生するが、近年、この波が放射線帯電子の加速要因であるとともに、極域の脈動オーロラを発生させる電子降下にも寄与することが明らかになった。一方、EMIC は磁気赤道付近のリングカレントイオンの温度異方性がエネルギー源で、放射線帯電子の消失に大きく寄与するとされている。このように国内外で、ヨーロッパの Cluster、アメリカの Van Allen Probes、日本のあけぼの等を利用して精力的な研究が進められていたが、波動の物理的役割とその定量的な評価はまだ道半ばである。この問題に対し、本研究課題では、以下の 4 つの目標を掲げた。

- あらせ衛星が創出する科学成果を極大化するためのプラズマ波動のオンボード・地上処理および解析体制を整備する。
- 波動の伝搬ベクトル、ポインティングフラックスの解析手法を確立し、波動の発生領域の空間・時間分布の特定とエネルギー分布の定量的な評価を可能とする。
- 波動の理論的な伝搬通路を求める「レイトレイシング法」を駆使して、観測されたプラズマ波の伝搬特性を明らかにし、波動の伝搬特性をもとに領域の空間構造や、波の伝搬途上におけるモード変換過程の理解につなげる。
- 磁気圏構造変動とプラズマ輸送の鍵を握る「磁気圏の DC 電場・低周波波動」の精密な測定手法を確立し、励起・伝搬過程の理解につなげる。

3. 研究の方法

あらせ衛星搭載の PWE は日本初の試みとして、機上でのスペクトルマトリクス演算や、ターゲットとする波動 - 粒子相互作用のイベントを自律的に検知して生観測データをダンプするイベントトリガモードなどの、多くの新規観測機能を有している。そこで、あらせ打ち上げ

年度にあたる本研究課題初年度(平成28年度)は、衛星打ち上げ直後からプラズマ波動観測器の観測を最大限に活用可能とする体制を整え、プラズマ波動-粒子相互作用の現場を的確にとらえる観測スキームと、磁気圏内におけるグローバルな「物質と場」のエネルギー収支を定量評価可能な解析スキームを確立することを第一の目標に掲げた。

あらせ衛星は平成28年12月に無事に打ち上げに成功し、平成29年3月末より定常観測を開始した。あらせ衛星の定常観測移行を受け、平成29年度以降は、観測データの品質評価とデータ較正法の検討、さらに地上観測網やVan Allen Probes衛星などと連携したChorusやEMICなど各種プラズマ波動の同時多点観測の実施、波動の伝搬方向推定法の開発に注力した。

本研究課題で取り組んだ具体的な研究内容とその方法を以下に示す。

(1) あらせ衛星によるプラズマ波動観測データの地上解析フローの整備

PWEは、容量が比較的小さいスペクトル等を24時間連続観測データ(以下、常時データ)として地上伝送し、容量が大きい生の電磁界波形データ(以下、バーストデータ)は、機上データレコーダに一旦蓄積し、重要イベントだけを選別・地上伝送する。成果の極大化のために、常時データを迅速にチェックし、重要なバーストデータを選別・地上伝送する地上解析フローを整備する。

(2) PWEのオンボードデータ処理機能の開発・評価と、最適な運用体制の確立

重要なプラズマ波動を確実に捉えるために、PWEのオンボードデータ処理アルゴリズムの十分な検証を行うとともに、打ち上げ直後の初期観測結果から迅速に最適な観測モードを決定し、安定した定常運用を行える体制を整える。データの評価に基づいて、最適な観測パラメータの確立を早急に行うとともに、必要に応じて機上ソフトの改良により、科学成果を最大にする観測機能の向上をめざす。

(3) 電磁界センサの絶対強度・位相較正

PWEデータの科学利用には、電界・磁界とも衛星打ち上げ後に実測データによる絶対較正の確立が必須で、特にアンテナインピーダンス・実効長がプラズマ環境・測定周波数の関数となる電界センサの較正は不可欠である。加えて、電界センサと磁界センサ間の位相差とサンプルデータの時刻同期の較正も重要である。これらのデータ較正作業を、初期観測データをもとに実施し、信頼度の高い科学解析を実現する。

(4) スペクトルマトリクスを用いた波動の伝搬パラメータ解析システムの整備

波動の伝搬ベクトルや群速度等の算出には、電磁界信号の自己および相互相関を表すスペクトルマトリクスが用いられる。あらせ衛星では、機上生成するスペクトルマトリクスと、バーストデータから地上で生成するスペクトルマトリクスの2つが利用できるが、両データから求めた伝搬パラメータを定量的に比較・評価し、波動の伝搬特性を精密に導出する解析システムを整備する。

(5) PWEで観測したDC電場からVLF帯に至る各種プラズマ波動の解析

(1)~(4)までに実施した観測・解析体制をベースに、幅広い帯域にわたる各種プラズマ波動の観測・解析を行う。さらに、Van Allen ProbesやPWINGをはじめとする地上観測網と連携して、高率的なバースト観測を実施し、種々のプラズマ波動および波動-粒子相互作用に基づくプラ

ズマ物理現象の同時多点観測を行い、内部磁気圏のグローバルな物理機構の解明を目指す。

4. 研究成果

当該研究課題において得られた主な研究成果は以下のとおりである。

(1) 電磁界センサの絶対強度・位相較正のための地上実験および評価

アンテナインピーダンス・実効長がプラズマ環境・測定周波数の関数となる電界センサを精密に較正するために、軌道上において短時間で周波数特性データを取得できるソフトウェア較正機能を PWE 機上処理ソフトウェアに実装し、その動作試験と取得データから較正用パラメータが正しく取得できることを確認した。さらに、衛星軌道上で取得した電磁界の波動観測データに、前述の較正パラメータを適用して電磁界センサの絶対強度・位相較正を行い、換算後の電・磁界強度および位相が、科学解析できるクオリティのデータとして取得できていることを実証した。また、波形較正用パラメータのプラズマ環境依存性を得るために、軌道上で定期的に較正運用を実施し、その特性を統計的に解析した。

(2) プラズマ波動観測データの評価・解析のためのデータパイプラインシステムの確立

PWE は、データ容量が比較的小さいスペクトルデータ等を、常時観測データとして先に地上伝送し、科学的に重要なイベント判別に利用する。一方、生の電磁界波形データは生成レートが過大なため、機上のデータレコーダに蓄積後、イベント判別で重要と判断したデータのみを地上伝送する。観測成果の極大化のために、常時データを迅速にチェックし、重要イベントに関わる波形データを選別・地上伝送する解析・運用支援体制を整備した。さらに波形データから高精細なスペクトルマトリクスを求め、Chorus や雷ホイスラ波の伝搬特性を、個々のエレメント単位で詳細に解析した。

(3) スペクトルマトリクスを用いた波動の伝搬パラメータ解析

波動の伝搬ベクトルや群速度等の算出には、電磁界信号の自己および相互相関を表すスペクトルマトリクスが用いられる。あらせ衛星は、機上生成するスペクトルマトリクスと、バーストデータから地上で生成するスペクトルマトリクスの 2 つが利用できるが、両データ共に Chorus をはじめ VLF 帯のプラズマ波の伝搬解析に利用できることを実証した。

(4) 内部磁気圏内における DC 電場・低周波波動・Chorus 等の自然波動の特性解析

放射線帯電子の生成や極域の脈動オーロラと関わりが深い Chorus 波動を重点的に観測し、地上観測網とも連携して、Chorus の励起・伝搬過程について解析を行った。また、DC および低周波電場観測データを較正し、DC 電場の変動や、低周波波動の波形・スペクトル解析が可能な物理量変換データを整備した。グローバルな構造変動に関わる DC 電場や、イオンモードの低周波波動であるイオンサイクロトロン (EMIC) 波の解析を行った。EMIC 波については、スペクトルの特徴に基づき、Structured EMIC と Unstructured EMIC に分類し、それぞれの空間分布を明らかにした。

(5) 複数衛星・地上観測網との多点同時観測データの解析

PWING などの地上観測網や Van Allen Probes などの磁気圏衛星とあらせ衛星による同時多点観測を実施した。これまでに地上観測網とは 2500 回以上、Van Allen Probes 衛星とは 300 回以

上の同時協調観測を実施し、Chorus 波動と脈動オーロラの 1 対 1 対応の関係を明らかにしたほか、同一波源から伝搬する Chorus 波動や雷ホイスラ波を、Van Allen Probes とあらせ衛星で同定することに成功した。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 31 件(すべて査読有))

1. M. Ozaki, Y. Miyoshi, K. Shiokawa, K. Hosokawa, S. Oyama, R. Kataoka, Y. Ebihara, Y. Ogawa, Y. Kasahara, S. Yagitani, Y. Kasaba, 他 17 名, Visualization of rapid electron precipitation via chorus element wave-particle interactions, Nature Communications, 10(257), doi:10.1038/s41467-018-07996-z, 2019.
2. M. Shoji, Y. Miyoshi, Y. Omura, L. M. Kistler, Y. Kasaba, S. Matsuda, Y. Kasahara, 他 10 名, Instantaneous frequency analysis on nonlinear EMIC emissions: Arase observation, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2018GL079765, 2018.
3. A. Hirai, 他 18 名 (Y. Kasaba は 4 番目, Y. Kasahara は 14 番目), Temporal and spatial correspondence of Pc1/EMIC waves and relativistic electron precipitations observed with ground-based multi-instruments on 27 March 2017, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2018GL080126, 2018.
4. M. Ozaki, K. Shiokawa, Y. Miyoshi, K. Hosokawa, S. Oyama, S. Yagitani, Y. Kasahara, Y. Kasaba, 他 22 名, Microscopic observations of pulsating aurora associated with chorus element structures: coordinated Arase satellite-PWING observations, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2018GL079812, 2018.
5. K. Hashimoto, A. Kumamoto, F. Tsuchiya, Y. Kasahara, and A. Matsuoka, Hectometric line spectra detected by the Arase (ERG) satellite, Geophys. Res. Lett., 45, doi:10.1029/2018GL080133, 2018.
6. S. Matsuda, Y. Kasahara, Y. Miyoshi, R. Nomura, M. Shoji, A. Matsuoka, Y. Kasaba, 他 3 名, Spatial distribution of fine-structured and unstructured EMIC waves observed by the Arase satellite, Geophys. Res. Lett., 45, doi:10.1029/2018GL080109, 2018.
7. M. Nose, A. Matsuoka, A. Kumamoto, Y. Kasahara, 他 17 名, Longitudinal structure of oxygen torus in the inner magnetosphere: simultaneous observations by Arase and Van Allen Probe A, Geophys. Res. Lett., 45, doi:10.1029/2018GL080122, 2018.
8. Y. Kazama, H. Kojima, Y. Miyoshi, Y. Kasahara, 他 16 名 (Y. Kasaba は 14 番目), Density depletions associated with enhancements of electron cyclotron harmonic emissions: an ERG observation, Geophys. Res. Lett., 45, doi:10.1029/2018GL080117, 2018.
9. S. Kurita, Y. Miyoshi, S. Kasahara, S. Yokota, Y. Kasahara, 他 4 名, Deformation of electron pitch angle distributions caused by upper-band chorus observed by the Arase satellite, Geophys. Res. Lett., 45, doi:10.1029/2018GL079104, 2018.
10. K. Takahashi, 他 14 名 (Y. Kasaba は 5 番目, Y. Kasahara は 6 番目), Impulsively excited nightside ultralow frequency waves simultaneously observed on and off the magnetic equator, Geophys. Res. Lett., 45, doi:10.1029/2018GL078731, 2018.
11. Y. Kasahara, Y. Kasaba, 他 15 名, The Plasma Wave Experiment (PWE) on board the Arase (ERG) Satellite, Earth, Planets and Space, 70:86, doi:10.1186/s40623-018-0842-4, 2018.
12. A. Kumamoto, F. Tsuchiya, Y. Kasahara, Y. Kasaba, 他 11 名, High Frequency Analyzer (HFA) of Plasma Wave Experiment (PWE) onboard the Arase spacecraft, Earth, Planets and Space, 70:82, doi:10.1186/s40623-018-0854-0, 2018.
13. M. Hikishima, H. Kojima, Y. Katoh, Y. Kasahara, 他 10 名, Data processing in software-type wave-particle interaction analyzer on board the Arase satellite, Earth, Planets and Space, 70:80, doi:10.1186/s40623-018-0856-y, 2018.
14. M. Ozaki, S. Yagitani, Y. Kasahara, H. Kojima, Y. Kasaba, 他 6 名, Magnetic search coil (MSC) of plasma wave experiment (PWE) aboard the Arase (ERG) satellite, Earth, Planets and Space, 70:76, doi:10.1186/s40623-018-0837-1, 2018.
15. S. Matsuda, Y. Kasahara, H. Kojima, Y. Kasaba, 他 12 名, Onboard software of plasma wave experiment aboard Arase: instrument management and signal processing of waveform capture/onboard frequency analyzer, Earth, Planets and Space, 70:75, doi:10.1186/s40623-018-0838-0, 2018.
16. S. Kasahara, Y. Miyoshi, S. Yokota, T. Mitani, Y. Kasahara, 他 10 名, Electron scattering by chorus waves generating pulsating auroras, Nature, doi:10.1038/nature25505, 2018.
17. Y. Kasaba, K. Ishisaka, Y. Kasahara, 他 17 名, Wire probe antenna (WPT) and electric field detector (EFD) of plasma wave experiment (PWE) aboard Arase: specifications and initial evaluation results, Earth, Planets and Space, 69:174, doi:10.1186/s40623-017-0760-x, 2017.
18. 田中 裕士, 後藤 由貴, 笠原 禎也, 南保 英孝, あけぼの衛星の大規模データセットを用いた自然波動の分類に関する研究, 電子情報通信学会論文誌, J101-D(1),

doi:10.14923/transinfj.2017JDP7050, 2017.

19. Y. Miyoshi, Y. Kasaba, 他 19 名 (Y. Kasahara は 13 番目) , Geospace exploration project: Arase (ERG), IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series, 869, 012095, doi:10.1088/1742-6596/869/1/012095, (4pages), 2017.
20. I Made Agus Dwi Suarjaya, Y. Kasahara, and Y. Goto, Statistical study on propagation characteristics of Omega signals (VLF) in magnetosphere detected by the Akebono satellite, Earth, Planets and Space, 69:100, doi:10.1186/s40623-017-0684-5, (14pages), 2017.
21. I Made Agus Dwi Suarjaya, Y. Kasahara, and Y. Goto, Automatic detection of Omega signals captured by the Poynting flux analyzer (PFX) on board the Akebono satellite, Int. J. Advanced Computer Sci. and Applications, doi:10.14569/IJACSA.2016.071009, 7(10), 67-74, 2016.
22. Y. Goto, K. Uda, Y. Kasahara, and K. Hashimoto, Calibration method of wave polarization data obtained by KAGUYA/WFC, Radio Science, doi:10.1002/2015RS005927, 51(9), 1579-1586, 2016.

〔学会発表〕(計 175 件 (うち招待講演 35 件、国際学会 96 件))

1. 笠原 禎也, あらせプラズマ波動観測から探るプラズマ圏のサイエンス, 大阪電気通信大学エレクトロニクス基礎研究所ワークショップ「あらせ衛星が拓く宇宙プラズマ研究」, 2019. (招待講演)
2. Y. Kasahara, S. Matsuda, Y. Kasaba, 他 10 名, Highlights from plasma wave observation by Arase (ERG), Joint Astrophysics/Space Physics Seminar, University of Iowa, 2019. (Invited)
3. Y. Kasahara, S. Matsuda, Y. Kasaba, 他 10 名, Highlights from plasma wave observation by Arase (ERG), Space Physics Seminar, University of Minnesota, 2019. (Invited)
4. 笠原 禎也, あらせ PWE 観測データからの伝搬ベクトル解析の原理, 「プラズマ圏の観測とモデリング」, 「ジオスペースにおけるプラズマ波動研究集会」合同研究集会, 2018. (招待講演)
5. 笠原 禎也, 科学衛星による VLF/ELF 波動観測, シンポジウム「VLF 波動研究 50 年の歩み」, 2018. (招待講演)
6. 笠原 禎也, 「あらせ」搭載波動計測器の特色と初期成果, PLASMA2017 シンポジウム, 2017. (招待講演)
7. Y. Kasaba, Y. Kasahara, 他 15 名, Initial status and results of plasma wave and radio observations by the Arase satellite, International Workshop on Solar, Heliospheric and Magnetospheric Radioastronomy: The legacy of Jean-Louis Steinberg, 2017. (Invited)
8. Y. Kasahara, Y. Kasaba, 他 13 名, Plasma wave experiment (PWE) on board the ARASE (ERG) satellite, The 3rd ERG Mission Science Workshop, 2017. (Invited)
9. Y. Kasahara, Y. Kasaba, 他 13 名, Initial report of the plasma wave experiment (PWE) onboard the ARASE (ERG) satellite, Proc. 32nd International Union of Radio Science General Assembly (URSI-GA), 2017. (Invited)
10. Y. Kasahara, Y. Kasaba, 他 16 名, Plasma wave experiment (PWE) on board the Arase (ERG) satellite ~ specification and initial observation report, 14th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), 2017. (Invited)
11. 笠原 禎也, あらせがとらえた宇宙のさえずり, 電磁波工学研究の進歩に関する公開シンポジウム, 2017. (招待講演)
12. 笠原 禎也, 笠羽 康正, 他 9 名, ERG・プラズマ波動・電場観測器 (PWE) のデータ解析, ERG ミッションのための新しいデータ解析手法・解析ツールに関する研究会, 名古屋大学, 2016. (チュートリアル講演)
13. 笠原 禎也, 松田 昇也, 笠羽 康正, 他 7 名, ERG/PWE による EMIC 観測, ERG 衛星観測に向けた EMIC 波動および関連現象に関する研究集会, 宇宙科学研究所, 2016 (招待講演)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 笠羽 康正

ローマ字氏名: (KASABA Yasumasa)

所属研究機関名: 東北大学

部局名: 大学院理学研究科

職名: 教授

研究者番号 (8 桁): 10295529

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。