

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14402

研究課題名(和文) 多次元空間におけるイオンサイクロトロン波動粒子相互作用の解明

研究課題名(英文) Study on Ion cyclotron wave particle interaction in multi-dimensional space

研究代表者

小路 真史 (Shoji, Masafumi)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・特任助教

研究者番号：80722082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：内部磁気圏において、数Hz帯の非線形波動放射現象である周波数上昇を伴う電磁イオンサイクロトロン放射は相対論的電子及び高エネルギーイオン分布が大きな影響を与えることが理論的に明らかになりつつあるが、磁気赤道面内で引き起こされる実際の波動・粒子間のエネルギー授受の現場を捉えられていない。実スケールシミュレーションに衛星観測データ解析を組み合わせ、時空間的な非線形波動励起の再現及び励起条件の解析を行なった。また、高エネルギーイオン分布関数の変動にも注目し、電磁イオンサイクロトロン波動の磁気圏プラズマダイナミクスへの貢献を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非線形理論で提唱されるその粒子散乱効率及び成長率は線形的なアプローチよりも遥かに効率が良いERG衛星の重要な観測対象である、電子スケールの波動のコーラス放射に対しても同様のアプローチが可能であるため、国内外から注目されている研究課題である。申請者は国際的なデータ解析チームと、EMIC放射の大規模シミュレーション結果と観測結果との融合解析手法を議論することによって、低周波非線形波動の放射線帯プラズマダイナミクスへの影響についての総合的な理解に貢献できる。

研究成果の概要(英文)：In the inner magnetosphere, a few Hz frequency wave, so-called electromagnetic ion cyclotron emission, with frequency drift causes drastic change of the relativistic electron and highly energetic proton distributions. In-situ energy transfer between the wave and plasma particle which is theoretically suggested has not been detected. We performed real-scale simulations to find the condition of the nonlinear wave generation and spatial and temporal distribution, collaborating with the spacecraft observation analysis. The modulation of the energetic ion distribution function and resulting contribution to the magnetospheric plasma dynamics by the electromagnetic ion cyclotron waves are also studied.

研究分野：宇宙プラズマ物理学

キーワード：波動粒子相互作用 地球磁気圏 プラズマ波動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球磁気圏における最大の未解決問題の一つは、放射線帯と呼ばれる高エネルギープラズマで構成される領域の生成・消失の過程である。MeV を超えるエネルギーを持つ相対論的電子の存在が内部磁気圏において観測されており、またリングカレントに代表される高エネルギーイオンフラックスが磁気嵐時に存在することが知られている。これらの高エネルギー粒子フラックスの生成・消失過程には、プラズマ波動が重要な役割を担っていることが知られている。特に、数 Hz の周波数帯に励起する電磁イオンサイクロトロン(EMIC)波動はリングカレントを構成する高エネルギーイオンに対してサイクロトロン共鳴を起こし、効率の良いエネルギー授受を引き起こす。加えて、EMIC 波動は放射線帯に存在する MeV 以上のエネルギーを持つ相対論的電子を、異常サイクロトロン共鳴によって高効率に散乱を引き起こすことが知られている。この EMIC 波は、低エネルギーの異なるイオン種が存在する場合に、そのイオン種に対応するバンド構造を持ったプラズマ波動分散関係を持つ。

数年前に発見された周波数上昇を伴う電磁イオンサイクロトロン(EMIC ライジングトーン)放射は非線形相互作用を引き起こすため、高エネルギープロトン及び相対論的電子の散乱効率が非常に高く、極域においてオーロラ発光をもたらす上で重要な役割を担うことが明らかになりつつある。これまでに、イオンの運動方程式及びマクスウェル方程式を交互に解き進める大規模シミュレーション(イオン・ハイブリッドシミュレーション)によって、周波数上昇を伴う EMIC 放射とイオンの非線形相互作用の再現を行ってきた。また、EMIC ライジングトーン放射の発生メカニズムを明らかにし、数十 keV に及び高エネルギープロトンの散乱を非常に効率よく行えることを明らかにした。しかしながら、周波数変動を引き起こす粒子捕捉の強弱を決定する条件は理論的に定かではない。また、これらのシミュレーション解析により先行した非線形波動成長の様子や他の成長プロセスと比べてどの程度支配的に起きているか、相互作用の結果によるイオン・電子の分布関数の変化の観測は行われていない。また、地上からの磁場計測による、これまでにパル放射を初めとした様々な EMIC 波が周波数変動を伴うスペクトルが観測されているが、その生成過程は未解明である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、スーパーコンピュータを利用した大規模計算によって、及び内部磁気圏衛星観測データを使用することで非線形 EMIC 放射による非線形波動粒子相互作用を再現、内部磁気圏プラズマ環境へのインパクトを多角的に明らかにすることである。2016 年 12 月に日本から打ち上げられたあらせ衛星は電磁場・プラズマ粒子データを観測しており、シミュレーションとの比較も容易に行える。あらせ衛星は電磁場と幅広いエネルギー帯のプラズマ観測器を備えており、豊富な衛星データの解析に加えて、大規模シミュレーションによる第一原理に沿った理論的なアプローチから得られる知見を組み合わせ、様々な角度から現象を理解することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、従来開発を進めている実スケールハイブリッドシミュレーションコードを使用する。ハイブリッドコードにおいて、電子は慣性を無視した流体として扱い、イオンを粒子として取り扱う。内部磁気圏の磁気赤道域における現象を詳細に解析するために、沿磁力線方向の一次元コードを開発した。内部では磁気赤道領域を模擬した非一様磁場を導入している。シミュレーション両端は解放境界とし、粒子はシミュレーション空間内部でミラー運動している。さらに、CLUSTER 衛星で観測された波動より重イオン密度比を見積もり、またリアルスケールの時空間パラメータをしようすることで、観測結果と比較しやすいシミュレーション結果を得られるようにしている。初期状態として、温度異方性を持った高エネルギープロトンを空間に配置し、この自由エネルギーによって EMIC 波を励起させ、非線形成長によって EMIC ライジングトーン・フォーリングトーン放射を再現する。また、シミュレーションコードは MPI による領域分割法により、内部の粒子モーメント計算ループは OpenMP によりスレッド並列化されている。

また、THEMIS 衛星に搭載されている電磁場観測機器及び粒子観測器、あらせ衛星に搭載されている電場観測器 PWE/EFD と磁場観測器 MGF、低エネルギーイオン観測器 LEP-i のデータを使用し、実際の磁気圏の各領域における非線形な波動粒子相互作用の解析を行ない、シミュレーション結果との比較を行うことで多次的に非線形相互作用が起きる現場の様子を理解する。

4. 研究成果

スーパーコンピュータによるハイブリッドシミュレーションによって実スケールパラメータで周波数上昇を伴いながら強く成長する EMIC 放射が再現され、同時に粒子の分布関数中に形成される非正常な穴(プロトンホール)とその発展の様子が明らかとなった。また、非線形成長を引き起こす要因として、プロトンホール形成によって励起する 2 種類の共鳴電流の時空間発展の様子が明らかとなった。この非線形相互作用を、EMIC 波の電磁場と粒子の速度の位相差情報から直接計測する手法を、シミュレーションデータを元に開発した。粒子の 3 次元分布関数の情報と、波動の電磁場データから、位相角を計算し、その角度に対して粒子分布をソートすることによりプロトンホールの存在を示す。さらに、波動電磁場ベクトルと粒子速度ベクトルの内積から、

二種の共鳴電流に対応する量を計算し、波動のスペクトルと振幅成長の様子を比較することで、理論的なシナリオの検証を行う。本手法を実際の衛星データに適用し、THEMIS 衛星のデータから非線形相互作用の実証を試みた。そのデータからプロトンホールに対応するイオンの位相角分布の歪み、エネルギー授受を示す電場とイオン速度の内積、及び周波数変化を示す磁場とイオン速度の内積を波動励起イベント中の短い時間内で得ることが可能となった。図 1 に、実際に観測された EMIC 波動とシミュレーションの結果の比較を示す。上二枚のパネルは EMIC 波動のスペクトル及び振幅を示し、実測・シミュレーション共に非線形成長と周波数上昇を示している。そのタイミングで、下 2 つの共鳴電流に対応する量が、理論的に示唆されている方向に振れていることがわかり、直接的にエネルギーの流れや理論的に示唆されている共鳴電流の寄与によって、振幅の増大や周波数が上昇していることを明らかにした。この手法は、あらせ衛星での適応が検討されており、種々の EMIC 波動に対する統計的な解析が期待できる。

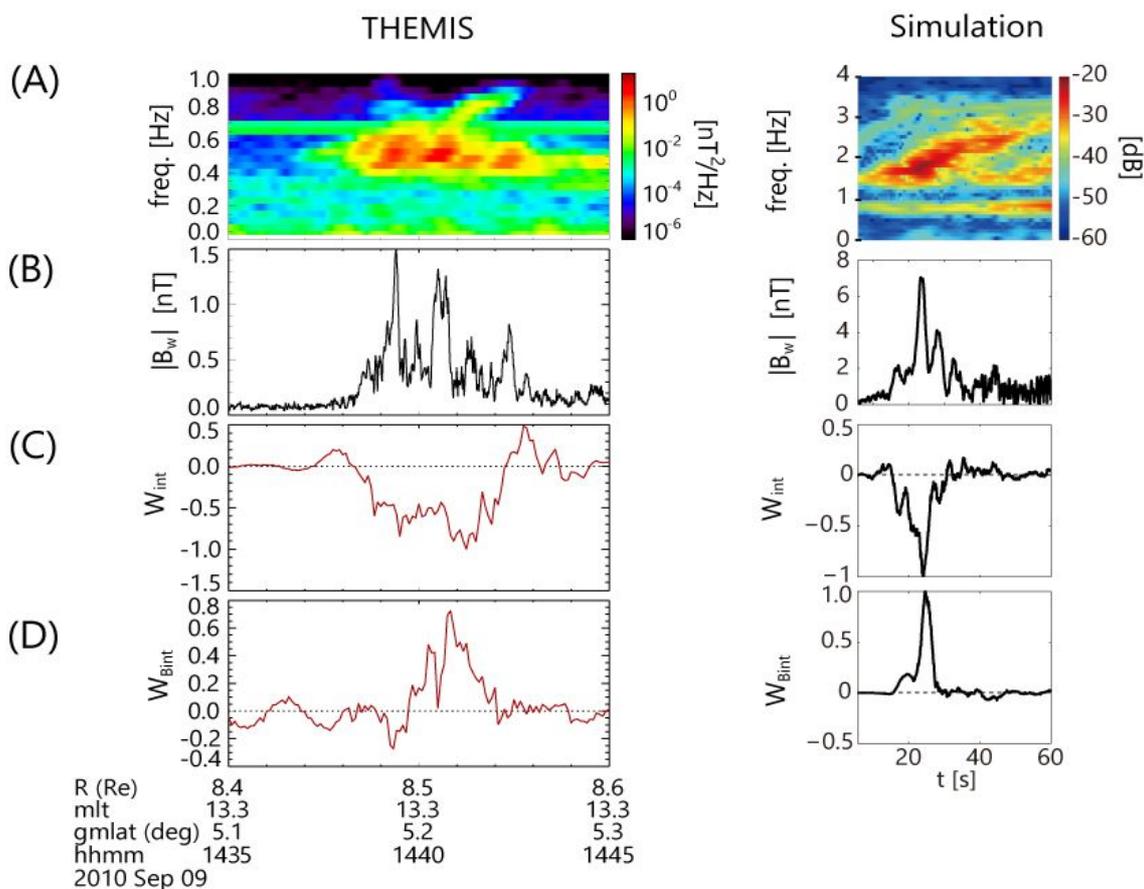


図 1 THEMIS 衛星データ(左)と A-KDK によるシミュレーションデータ(右)による、EMIC 波動と高エネルギーイオンによる非線形相互作用の直接計測結果。(A)は波動のスペクトル(B)は波動の振幅、(C)は波の成長に直接関わる量であり、負であれば粒子のエネルギーから波が成長していることを示す。(D)は波の周波数変化に直接関わる量であり、正であれば周波数が上昇することを示す。

リアルスケール・ハイブリッドシミュレーションにより、Shoji and Omura [2013]などで示されているように、実際の衛星観測と比較可能な EMIC ライズングトーン放射が再現されている。さらに、Shoji and Omura [2017]では EMIC フォーリングトーン放射が、他のバンドの EMIC 波による低エネルギーイオン加熱の影響により空間的に歪められた特殊な環境で、励起する様子が再現されている。また、内部磁気圏においてあらせ衛星が同様の EMIC ライズングトーン・フォーリングトーン放射の観測に成功している[Shoji et al., 2018]。これらの周波数変動を伴う EMIC 波動が非線形波動粒子相互作用によって励起する様子をシミュレーション・観測の両面から解析を行う。あらせ衛星が観測した電磁場データを用いて波動粒子相関解析(WPIA)を行った。イオン三次元分布関数及び電磁場ベクトルデータを用いてその位相差を求め、非線形共鳴電流に対応する量の計算を行った。結果、あらせ衛星で観測されたライズングトーン放射・フォーリングトーン放射の励起過程における共鳴電流の特徴が、同エネルギー帯のプロトン粒子と異なる周波数の波の間で見られた。さらに、粒子の位相空間での分布の時間変化を捉え、理論的に示唆される様な共鳴電流の形成に関連する粒子分布の変化を見つけることができた。また、フォーリン

グトーン放射を再現したシミュレーションおよび、フォーリングトーン放射があらせ衛星で観測されたイベントにおいて、イオンが垂直方向に加熱される様子が見つかった。特に、WPIA による $E \cdot V$ のエネルギー・時間ダイアグラムの解析により、実際にどのエネルギー帯のイオンの加熱に寄与しているかを観測面からも明らかにした。図2にシミュレーションによるイオン加熱を示す。加熱される方向が、観測と非常によく一致していることを示し、さらに重イオンの方が選択的に効率よく加熱されている。観測との比較研究により、加熱メカニズムが詳細に明らかになることが期待される。

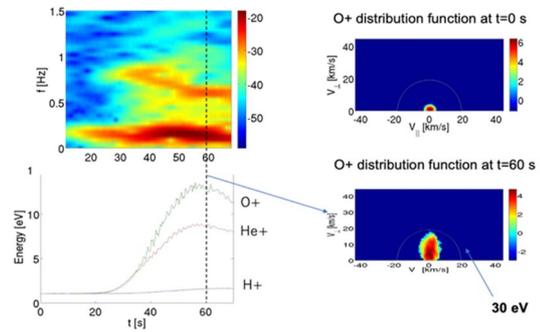


図 2: EMIC フォーリングトーン再現シミュレーションによる重イオン加熱

内部磁気圏においてあらせ衛星が同様の EMIC ライジングトーンを観測した。それぞれのデータにおいて、EMIC 波動が非線形成長に伴う周波数変動を解析した。特に周波数上昇を伴う EMIC 波の電磁場波形に対して、非線形信号解析処理として用いられる Hilbert-Huang Transform (HHT) と呼ばれる瞬時周波数解析手法を適用した [Shoji et al., 2018]。図3左にあらせ衛星データ解析結果を、右にシミュレーションデータ解析結果をそれぞれ示す。この手法によって得られた瞬時周波数および瞬時振幅の変化が、理論的に示唆される周波数変動率と一致していることが示された。また、Shoji and Omura [2013] で理論的に示唆した通り、サブパケットが存在する時間範囲において EMIC 波動の周波数が変化している様子が見られる。さらに、フーリエ変換によるスペクトル解析では見えない、速く詳細な周波数変化が捉えられている。同様の早い変化は、シミュレーション結果にも見られる。また、その早い周波数変化から、著者らは EMIC 波の励起に貢献しているプロトン粒子の位相空間での運動・分布の偏りを明らかにした。位相空間中の分布の偏りが動くことにより、一時的な周波数上昇・降下が起きることを示した。また、この分布の不均一は、シミュレーション中でも同様に確認される。従来の非線形理論では無視されている波動中の微細な変化の存在およびその効果をあらせ衛星データ・シミュレーションから初めて示した。

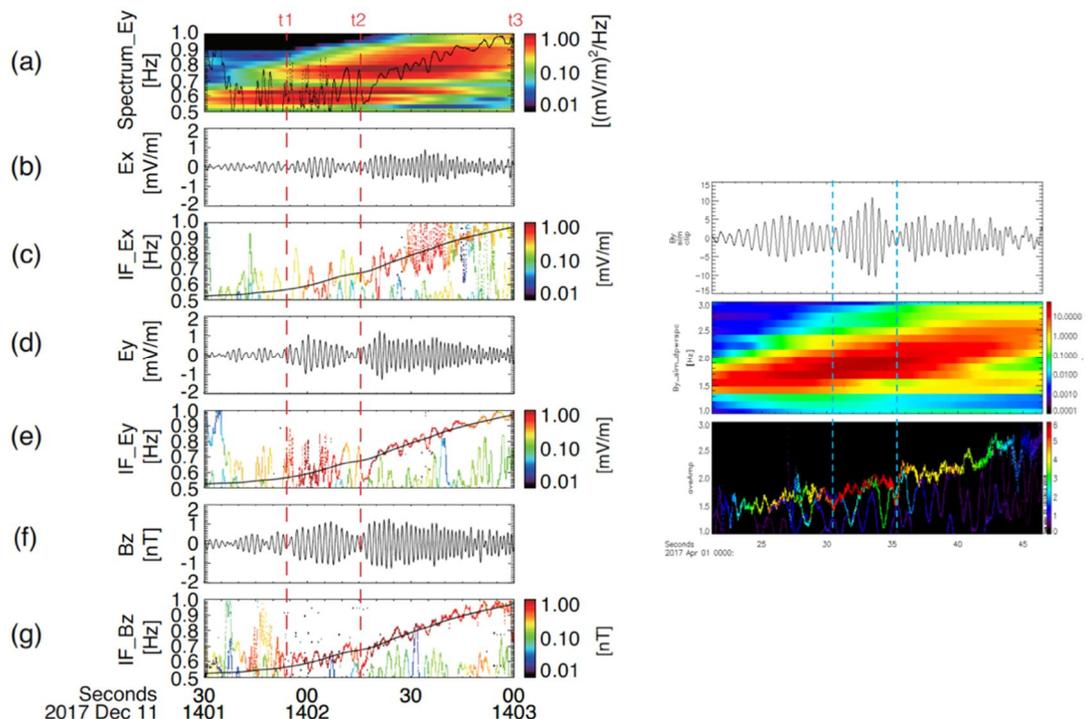


図 3: (左) あらせ衛星の電磁場データから計算した FFT ダイナミックスペクトルと波形、および HHT 瞬時周波数 (右) シミュレーション磁場データから計算した波形、FFT ダイナミックスペクトルおよび HHT 瞬時周波数

以上のように、シミュレーション、衛星観測データ解析あるいはその融合的な研究によって様々な観点から非線形波動粒子相互作用に関する研究を行なった。単点衛星では観測できない空間的な広がり、理想的な状態における波動励起の再現とその時の条件の特定をシミュレーションで行い、さらに観測データ解析のための新しい手法を、シミュレーションを用いることで開発・適用し、従来の解析手法では見えない波動の性質を特定することができた。引き続きシミュレ

シオン開発を続け、多次元空間における粒子散乱・加熱の様子を解析し、磁気圏全体にどの程度プラズマ波動現象が寄与しているかを今回開発した解析手法を用いながら調査し、ジオスペースプラズマ環境の理解に貢献する。

<引用文献>

1. Shoji, M., and Y. Omura, Triggering Process of Electromagnetic Ion Cyclotron Rising Tone Emissions in the Inner Magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 116, A05212, 2013.
2. Shoji, M., Y. Miyoshi, Y. Katoh, K. Keika, V. Angelopoulos, S. Kasahara, K. Asamura, S. Nakamura, and Y. Omura, Ion hole formation and nonlinear generation of electromagnetic ion cyclotron waves: THEMIS observations, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 8730-8738, 2017.
3. Shoji, M. and Y. Omura, Nonlinear generation mechanism of EMIC falling tone emissions, *J. Geophys. Res.* 122, 2017.
4. Shoji, M., Y. Miyoshi, Y. Omura, L.M., Kistler, Y., Kasaba, S. Matsuda, Y. Kasahara, A. Matsuoka, R. Nomura, K. Ishisaka, A. Kumamoto, F. Tsuchiya S. Yagitani, M. Teramoto, K. Asamura, T. Takashima I. Shinohara, Instantaneous frequency analysis on nonlinear EMIC emissions: Arase observation. *Geophys. Res. Lett.*, 45, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shoji Masafumi, Miyoshi Yoshizumi, Omura Yoshiharu, Kistler Lynn M., Kasaba Yasumasa, Matsuda Shoya, Kasahara Yoshiya, Matsuoka Ayako, Nomura Reiko, Ishisaka Keigo, Kumamoto Atsushi, Tsuchiya Fuminori, Yagitani Satoshi, Teramoto Mariko, Asamura Kazushi, Takashima Takeshi, Shinohara Iku	4. 巻 45
2. 論文標題 Instantaneous Frequency Analysis on Nonlinear EMIC Emissions: Arase Observation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 13,199 ~ 13,205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1029/2018GL079765	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

1. 著者名 Kitamura N., Kitahara M., Shoji M., Miyoshi Y., Hasegawa H., Nakamura S., Katoh Y., Saito Y., Yokota S., Gershman D. J., Vinas A. F., Giles B. L., Moore T. E., Paterson W. R., Pollock C. J., Russell C. T., Strangeway R. J., Fuselier S. A., Burch J. L.	4. 巻 361
2. 論文標題 Direct measurements of two-way wave-particle energy transfer in a collisionless space plasma	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1000 ~ 1003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.aap8730	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

1. 著者名 Shoji Masafumi, Miyoshi Yoshizumi, Katoh Yuto, Keika Kunihiro, Angelopoulos Vassilis, Kasahara Satoshi, Asamura Kazushi, Nakamura Satoko, Omura Yoshiharu	4. 巻 44
2. 論文標題 Ion hole formation and nonlinear generation of electromagnetic ion cyclotron waves: THEMIS observations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 8730 ~ 8738
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL074254	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

1. 著者名 Shoji Masafumi, Omura Yoshiharu	4. 巻 122
2. 論文標題 Nonlinear Generation Mechanism of EMIC Falling Tone Emissions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Space Physics	6. 最初と最後の頁 9924 ~ 9933
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017JA023883	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13件(うち招待講演 4件/うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Masafumi Shoji, Yoshizumi Miyoshi, Yuto Katoh, Kunihiro Keika, Vassilis Angelopoulos, Satoshi Kasahara, Kazushi Asamura, Satoko Nakamura, and Yoshiharu Omura
2. 発表標題 Nonlinear EMIC wave particle interaction analysis by THEMIS observation
3. 学会等名 The 3rd PSTEP International Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masafumi Shoji, Yoshizumi Miyoshi, Yuto Katoh, Kunihiro Keika, Vassilis Angelopoulos, Satoshi Kasahara, Kazushi Asamura, Satoko Nakamura, and Yoshiharu Omura
2. 発表標題 Ion hole formation and nonlinear wave generation of EMIC wave: THEMIS observation
3. 学会等名 JpGU Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masafumi Shoji, Yoshizumi Miyoshi, Yoshiharu Omura, Yasumasa Kasaba, Keigo Ishisaka, Shoya Matsuda, Yoshiya Kasahara, Satoshi Yagitani, Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Reiko Nomura, Takeshi Takashima, and Iku Shinohara
2. 発表標題 Instantaneous frequency analysis on nonlinear EMIC emissions: Arase observation
3. 学会等名 AT-RASC (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masafumi Shoji, Yoshiharu Omura
2. 発表標題 Hybrid Simulations of Nonlinear Interactions Between EMIC Waves and Plasmas in the Magnetosphere
3. 学会等名 ISSS13 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Masafumi Shoji, Yoshizumi Miyoshi, Yuto Kato, Kunihiro Keika, Vassilis Angelopoulos, Satoshi Kasahara, Kazushi Asamura, Satoko Nakamura, and Yoshiharu Omura
2 . 発表標題 Ion hole formation and nonlinear wave generation of EMIC wave: THEMIS observation
3 . 学会等名 CLUSTER-THEMIS workshop (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Masafumi Shoji, Yoshizumi Miyoshi, Yoshiharu Omura, Yasumasa Kasaba, Keigo Ishisaka, Shoya Matsuda, Yoshiya Kasahara, Satoshi Yagitani, Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Reiko Nomura, Takeshi Takashima, and Iku Shinohara
2 . 発表標題 Instantaneous frequency analysis on nonlinear EMIC emissions: Arase observation
3 . 学会等名 AGU fall meeting (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Masafumi Shoji, Yoshizumi Miyoshi, Yoshiharu Omura, Yasumasa Kasaba, Keigo Ishisaka, Shoya Matsuda, Yoshiya Kasahara, Satoshi Yagitani, Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Takeshi Takashima, and Iku Shinohara
2 . 発表標題 Instantaneous Frequency Analysis on Nonlinear EMIC Emissions: Arase Observation
3 . 学会等名 AGU fall meeting (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Masafumi Shoji, Yoshizumi Miyoshi, Yoshiharu Omura, Yasumasa Kasaba, Keigo Ishisaka, Shoya Matsuda, Yoshiya Kasahara, Satoshi Yagitani, Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Takeshi Takashima, and Iku Shinohara
2 . 発表標題 Instantaneous Frequency Analysis on Nonlinear EMIC Emissions: Arase Observation
3 . 学会等名 SGEPSS fall meeting
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Masafumi Shoji and Yoshiharu Omura
2 . 発表標題 Nonlinear generation mechanism of EMIC falling tone emissions
3 . 学会等名 URSI GASS (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Masafumi Shoji and Yoshiharu Omura
2 . 発表標題 Nonlinear generation mechanism of EMIC falling tone emissions
3 . 学会等名 JpGU (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Masafumi Shoji, Yoshizumi Miyoshi, Yoshiharu Omura, Yasumasa Kasaba, Keigo Ishisaka, Shoya Matsuda, Yoshiya Kasahara, Satoshi Yagitani, Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Reiko Nomura, Takeshi Takashima, and Iku Shinohara
2 . 発表標題 Instantaneous frequency analysis on nonlinear EMIC emissions: Arase observation
3 . 学会等名 JpGU (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Shoji, Y. Miyoshi, L. M. Kistler, K. Asamura, Y. Kasaba, S. Matsuda, Y. Kasahara, A. Matsuoka, M. Teramoto, T. Takashima, and I. Shinohara
2 . 発表標題 Direct detection of nonlinear generation process of electromagnetic ion cyclotron emissions observed by the Arase spacecraft
3 . 学会等名 URSI-JRSM (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Shoji, Y. Miyoshi, L. M. Kistler, K. Asamura, Y. Kasaba, S. Matsuda, Y. Kasahara, A. Matsuoka, M. Teramoto, T. Takashima, and I. Shinohara
2. 発表標題 Direct detection of nonlinear generation process of electromagnetic ion cyclotron emissions observed by the Arase spacecraft
3. 学会等名 AGU fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----