

平成30年6月7日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17771

研究課題名(和文)地球放射線帯におけるヒス放射の励起および高エネルギー粒子散乱の研究

研究課題名(英文)Study of hiss emissions and particle scattering in the Earth's radiation belt

研究代表者

疋島 充 (HIKISHIMA, Mitsuru)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：50646023

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：地球周辺のプラズマ圏で頻りに観測されるヒス波動について、長年議論されている波動生成過程を特定するために、地球磁気圏モデルを取り入れた粒子シミュレーションを実施した。本研究課題の実施により、波動と粒子の相互作用を経て観測と同様な周波数帯かつ同モードでの波動の励起を実現した。さらに、結果は非線形成長の証拠を有しており、ヒス波動の新たな性質の発見を含め、プラズマ波動物理の理解を与えた。

研究成果の概要(英文)：We have performed a full particle simulation to study the generation mechanism of whistler-mode hiss emissions in the Earth's plasmasphere. In the simulation, hiss emissions with a broad frequency band below the electron gyrofrequency are excited through wave-particle interactions. We found the wave growth process involving a nonlinear wave growth.

研究分野：超高層物理学

キーワード：計算機実験 磁気圏物理 プラズマ波動 波動粒子相互作用

### 1. 研究開始当初の背景

地球周辺には、相対論的エネルギーまでに及ぶプラズマ荷電粒子が捕捉される放射線帯と呼ばれる領域が存在する。放射線帯の粒子フラックスは太陽活動に呼応して急激に出現または消失する特異な変動を見せる。捕捉される高エネルギー粒子は宇宙飛行士への被曝、また衛星に搭載された電子機器の誤作動、帯電破壊など多大な損害を与えることが報告されており、将来の通信・測位などの宇宙インフラの開発に影響を及ぼす。以上の理由より、現在では放射線帯粒子環境の変動を詳細に理解することが磁気圏物理分野の最重要課題に位置付けられている。

放射線帯には多様なプラズマ波動が存在し、波動と粒子の相互作用を介したエネルギー交換過程が存在する。プラズマ波動は広範囲におけるエネルギー帯のプラズマ粒子を加速または大気圏へ消失させることが可能である。よって、放射線帯粒子のダイナミクスを理解するためには、波動の生成から、粒子の散乱を含めた相互作用の詳細な理解が不可欠である。19世紀半ばから衛星により数百Hz付近に広帯域な周波数を有する「ヒス放射」と呼ばれる波動が頻繁に観測されている。ヒス放射は粒子に対して、以下の影響を与えると考えられている。

- ・放射線帯に捕捉される高エネルギー粒子を散乱により大気圏へ消失させる。

- ・長期間に渡り高エネルギー粒子が欠如したスロット領域を形成する。

ヒス放射の観測は数多く報告されているが、ヒス放射の生成機構は半世紀近く不明である。現在の主要な考えは、

- 1) コーラス放射の地球近傍への伝搬により生成。

- 2) その場での波動成長により生成。

の2説である。近年の複数衛星観測により、「狭帯域な周波数帯を有するコーラス放射が地球近傍へ伝搬し、広帯域なヒス放射に変換する」という説2の考えが広く受け入れられている (*Bortnik et al., 2008*)。

### 2. 研究の目的

地球周辺のプラズマ圏と呼ばれる電子密度の濃い領域では、ヒス放射と呼ばれるプラズマ波動が半世紀前から頻繁に観測されているが生成機構は未解明となっている。また、ヒス放射は放射線帯に捕捉される高エネルギー粒子を散乱させ、放射線帯粒子ダイナミクスに大きく影響を及ぼすと考えられている。本研究では、計算機シミュレーションを実施することで、未知なヒス放射生成の物理素過程の解明を目的とする。および、ヒス放射による波動粒子相互作用を介した粒子散乱特性を調査し、放射線帯高エネルギー粒子の散乱プロセスを定量的に解明し、磁気圏物理の新たな理解を構築する。

### 3. 研究の方法

実際の物理素過程をより忠実に描写するために、第一原理に基づく電磁粒子シミュレーションコードを用いてヒス放射の励起を目指す。ヒス放射の波動モードおよび成長に寄与する現実的な粒子を配置しヒス放射の励起環境を構築する。具体的には、(1)ヒス放射の励起において、線形または非線形波動成長のどちらが優位に働いているか特定し、ヒス放射生成の物理素過程を解明する。(2)背景電子密度の変動による励起周波数の依存を調査する。(3)現実的なモデルでヒス放射の励起に取り組み、既存の準線形、非線形波動成長理論および観測との詳細な比較を行うために、実パラメータによるシミュレーションに取り組み。実パラメータでのシミュレーションには膨大な計算機メモリ・計算時間が必要となるが非現実的なスケールではない。放射線帯でのヒス放射と電子の波動-粒子相互作用をより詳細に理解することを目的として実パラメータにおけるヒス放射の生成に挑む。

### 4. 研究成果

本研究ではプラズマ波動の生成素過程を詳細に描写する self-consistent な電磁粒子シミュレーションの手法を介してヒス放射の再現を通し生成素過程の解明を行った。研究を遂行するに当たり、磁気赤道域での波動生成を想定し、地球磁力線に沿った次元空間における不均一磁場モデルを構築し、高エネルギー粒子の相対論運動を取り入れた。かつ波動励起に寄与する温度異方性を有する電子を配置し、加えてヒス放射の観測に基づき、典型となるプラズマパラメータを採用して、プラズマ圏内を想定した電子プラズマ周波数と電子ジャイロ周波数比を用いてプラズマ環境の構築を行った。

種々のパラメータを用いたシミュレーション施行の結果、磁気赤道付近への不安定な温度異方性を持つ数十 keV の電子の注入により、電子ジャイロ周波数の  $1/10$  以下という比較的低い周波数において広帯域なホイスラーモード波動の放射を実現することに成功した。本シミュレーション結果における励起波動の周波数は観測と同様な周波数帯であり、かつ広帯域に励起されることを確認した。これは観測と同様な結果であり、生成機構の特定を強く促進する結果となった。

以上の計算機実験の結果は、衛星観測におけるヒス放射の統計解析ともよく類似する。また生成波動には非線形波動成長を示唆する周波数構造を確認することが出来た。近年の衛星観測によるヒス放射の高時間分解能データより、ヒスの周波数構造が時間による変化を有し、さらに非線形波動成長理論での説明が可能であることが明らかになった。過去の衛星観測、生成理論ではヒス放射は異なるモードでの波動が伝搬することにより存在、またはその場における成長など多くの考

えが存在し現在も広く議論されているが、本シミュレーションによりヒス放射のその場成長を強く示唆することとなり、ヒス放射の生成原因に大きな知見を与えることが出来た。また、近年上げられた日本の地球磁気圏観測衛星 ERG においても多くのヒス放射を観測しており、ヒス放射の取得のために観測およびデータ受信計画の段階から深く参加してきた。最新の観測機器によるデータの取得により波形レベルでのシミュレーション結果との比較が可能となり、本シミュレーション研究の重要性を示すことが出来た。

#### <引用文献>

・Bortnik, J., R. M. Thorne, N. P. Meredith, "The unexpected origin of plasmaspheric hiss from discrete chorus emissions", *Nature*, vol.452, doi:10.1038/nature06741, 2008.

#### 5 . 主な発表論文等

##### [雑誌論文](計6件)

Hikishima, M., H. Kojima, Y. Katoh, Y. Kasahara, S. Kasahara, T. Mitani, N. Higashio, A. Matsuoka, Y. Miyoshi, K. Asamura, T. Takashima, S. Yokota, M. Kitahara and S. Matsuda (2018), Data processing in the Software-type wave-particle interaction analyzer onboard the Arase satellite. *Earth Planets Space*.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0856-y>.

Katoh Y, Kojima H, Hikishima M, Takashima T, Asamura K, Miyoshi Y, Kasahara Y, Kasahara S, Mitani T, Higashio N, Matsuoka A, Ozaki M, Yagitani S, Yokota S, Matsuda S, Kitahara M, Shinohara I (2018), Software-type Wave-Particle Interaction Analyzer on board the Arase satellite. *Earth Planets Space*.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-017-0771-7>.

Matsuda S, Kasahara Y, Kojima H, Kasahara Y, Yagitani S, Ozaki M, Imachi T, Ishisaka K, Kumamoto A, Tsuchiya F, Ota M, Kurita S, Miyoshi Y, Hikishima M, Matsuoka A, Shinohara I (2018), Onboard software of plasma wave experiment aboard Arase: instrument management and signal processing of waveform capture/onboard frequency analyzer. *Earth Planets Space*.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0838-0>.

Takashima T, Ogawa E, Asamura K, Hikishima M (2018) Design of a mission network system using SpaceWire for scientific payloads onboard the Arase spacecraft. *Earth Planets Space*.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0839-z>.

Omura, Y., S. Nakamura, C. A. Kletzing, D. Summers, and M. Hikishima (2015), Nonlinear wave growth theory of coherent hiss emissions in the plasmasphere, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 120, 7642-7657, doi:10.1002/2015JA021520.

Omura, Y., Y. Miyashita, M. Yoshikawa, D. Summers, M. Hikishima, Y. Ebihara, and Y. Kubota (2015), Formation process of relativistic electron flux through interaction with chorus emissions in the Earth's inner magnetosphere, *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 120, 9545-9562, doi:10.1002/2015JA021563.

##### [学会発表](計10件)

Mitsuru Hikishima, Hirotsugu Kojima, Yuto Katoh, Takeshi Takashima, Kazushi Asamura, Yoshizumi Miyoshi, Yoshiya Kasahara, Satoshi Kasahara, Takefumi Mitani, Nana Higashio, Ayako Matsuoka, Iku Shinohara, Software-type Wave-Particle Interaction Analyzer on board the ARASE satellite, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 14th Annual Meeting, Singapore, Aug 6-11, 2017.

H. Kojima, Katoh, Y., M. Hikishima, T. Takashima, K. Asamura, Y. Miyoshi, Y. Kasahara, S. Kasahara, T. Mitani, N. Higashio, A. Matsuoka, I. Shinohara, Software-type Wave Particle Interaction Analyzer (SWPIA) on board the ARASE satellite, Japan Geoscience Union Meeting (JPGU), 2017

Mitsuru Hikishima, Hirotsugu Kojima, Yuto Katoh, Yoshiya Kasahara, Satoshi Kasahara, Takefumi Mitani, Nana Higashio, Ayako Matsuoka, Yoshizumi Miyoshi, Kazushi Asamura, Takeshi Takashima, Shoichiro Yokota, Masahiro Kitahara, Shoya Matsuda, Data processing in the Software-type wave-particle interaction analyzer onboard the ARASE satellite, 第142回地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS), Kyoto, Oct. 15-19, 2017.

北原理弘、加藤雄人、疋島充、笠原禎也、松田昇也、小嶋浩嗣、尾崎光紀、八木谷聡、Accurate calibration of waveform data measured by the Plasma Wave Experiment on board the ARASE satellite 第142回地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS), Kyoto, Oct. 15-19, 2017.

Katoh, Y., H. Kojima, M. Hikishima, T. Takashima, K. Asamura, Y. Miyoshi, Y. Kasahara, S. Kasahara, T. Mitani, N. Higashio, A. Matsuoka, M. Ozaki, S. Yagitani, S. Yokota, S. Matsuda, M. Kitahara, and I. Shinohara, Software-type Wave-Particle Interaction Analyzer on board the ARASE satellite, 第142回地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS), Kyoto, Oct. 15-19, 2017.

Katoh, Y., H. Kojima, M. Hikishima, T. Takashima, K. Asamura, Y. Miyoshi, Y. Kasahara, S. Kasahara, T. Mitani, N. Higashio, A. Matsuoka, M. Ozaki, S. Yagitani, S. Yokota, S. Matsuda, M. Kitahara, and I. Shinohara, Software-type Wave-Particle Interaction Analyzer on board the Arase satellite, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2017, New Orleans, USA, 2017.

北原理弘、加藤雄人、疋島充、笠原禎也、松田昇也、小嶋浩嗣、尾崎光紀、八木谷聡、Accurate calibration of waveform data measured by the Plasma Wave Experiment on board the ARASE satellite, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2017, New Orleans, USA, 2017.

M. Hikishima, H. Kojima, Y. Katoh, T. Takashima, K. Asamura, Y. Kasahara, S. Kasahara, T. Mitani, N. Higashio, Y. Miyoshi, I. Shinohara, Direct measurement of wave-particle interactions by WPIA onboard ERG satellite, International GEMSIS and ASINACTR-G2602 Workshop, Nagoya, March 22-25, 2016.

M. Hikishima, Y. Katoh, H. Kojima, S. Kurita, Processing method of wave data in Wave-Particle Interaction Analyzer onboard ERG satellite, 第140回地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS), Fukuoka, 2016.

M. Hikishima, Y. Katoh, H. Kojima,

Evaluation of a statistical significance by wave data processing in the WPIA, 第138回地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS), Tokyo, 2015.

〔その他〕

アウトリーチ活動情報

NASA/JAXA Hyperwall Presentation, JpGU (Japan Geoscience Union) - AGU (American Geophysical Union) joint meeting 2017, Makuhari, May 20-25, 2017. (高校生向け1部, 海外研究者向け1部)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

疋島 充 (HIKISHIMA, Mitsuru)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号: 50646023