

## 宇宙プラズマ中の電磁サイクロトロン波による電子加速散乱機構の実証的研究

Analyses and Verification of Particle Acceleration and  
Scattering by Electromagnetic Cyclotron Waves in Space Plasmas

課題番号：17H06140

大村 善治 (OMURA, YOSHIHARU)

京都大学・生存圏研究所・教授



### 研究の概要

理論・シミュレーションから予測されている電磁サイクロトロン波（コーラス波, EMIC 波）の特性と電子加速散乱機構を、複数衛星による波動と粒子の観測データから実証すると同時に、その素過程の宇宙空間の異なる領域における普遍性を検証する。新しい物理的知見を活かして次期プラズマ計測器の基礎開発を行う。

研究分野：超高層物理学

キーワード：磁気圏、宇宙天体プラズマ、プラズマ波動、放射線帯、プラズマ計測

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙空間は、プラズマという電離気体で満たされており、その中には様々な電磁波動が存在している。その中でも電磁サイクロトロン波は、電磁界が磁力線の周りに回転する螺旋構造をもっており、高エネルギーの電子とサイクロトロン共鳴することが出来る。磁気嵐等の磁場の擾乱を受けて、地球内部磁気圏に磁気圏尾部から数 10keV の電子が注入されると電磁サイクロトロン波の中でも周波数が大きく変動するコーラス波動が励起されて、共鳴電子を極めて効率良く数 MeV の相対論的エネルギーにまで加速し、地球を取り巻く放射線帯の形成に寄与していると考えられている。

### 2. 研究の目的

本研究では、理論・シミュレーションから予測される電磁サイクロトロン波の特性と電子加速散乱機構を、複数衛星による波動と粒子の観測データから実証すると同時に、その素過程の宇宙空間の異なる領域における普遍性を検証する。新しい物理的知見を活かして次期プラズマ計測器の基礎開発を行う。

### 3. 研究の方法

ERG 衛星および Van Allen Probes 衛星の波動データを用いて、非線形波動成長理論に基づいて周波数変動を伴うコーラス波動および EMIC ライジングトーン放射のモデルを作成する。これらの波動モデルを用いて多数の粒子の軌道を計算する。電子のエネルギーと赤道ピッチ角を変数とする分布関数を数値

グリーン関数のデータベースを作成する。

4 機の編隊飛行をする MMS 衛星によるプラズマ波動および粒子の観測によって、空間的に螺旋構造をもつ電磁サイクロトロン波を検出し、その時空間の解析から波の伝搬方向、成長、減衰の詳細な変動を検出する。

異なる経度・緯度に広がる多点での観測を衛星で実現するには、その観測装置が「小さい」、「軽い」、「省電力」であることが特に重要である。プラズマ波動観測器はその回路全体を一つの半導体チップ内に実現する研究を進める。

### 4. これまでの成果

波動のモデルとしてコーラス波が経度方向に局在しているグローバルモデルを作り、放射線帯電子の東西方向へのドリフトを含めたグリーン関数を計算し、放射線帯電子のグローバルな分布関数の時間発展を追跡し、放射線帯の形成過程をリアルに再現することに成功した (Kubota and Omura, JGR, 2018)。さらに、数値グリーン関数法による放射線帯のモデリングにおいて、新たに斜め伝搬するコーラス放射の効果を含めて放射線帯形成過程を調べた。平行伝搬のみの場合に比べてより効率的に加速が起こることがわかった (Hsieh et al., JGR, 2020)。

EMIC 波によって共鳴補足された電子が、低いピッチ角において急速に磁力線方向のロスコーンの中にピッチ角散乱される機構を新たに見出し、理論的に解析した。EMIC 波が経度方向に局在する現実的なグローバルモデルを作り、その中で多くの放射線帯電子の

軌道を追跡することで、放射線帯の一部が失われてそれが数分周期でそのエコーが観測されることを見出した (Kubota and Omura, JGR, 2017)。これは、Van Allen Probes 衛星による観測によっても検証することができた (Nakamura et al., JGR, 2019)。放射線帯の電子が周波数変動する EMIC 波で 1 分間当たり数パーセントの割合で極域大気に落ち込むという劇的な現象がシミュレーションと観測で確認されたものであり、実用的な応用も考慮すると極めて重要な成果である。

ERG 衛星のデータ解析および地上で観測されるオーロラ発光の原因となる地球大気へ降り込む数 10 keV の高エネルギー電子を磁気圏内で観測し、電子散乱の原因と考えられていたコーラス波動との対応を世界で初めて直接的に実証した (Kasahara et al., Nature, 2018; Ozaki, Nature Communications, 2019)。

MMS 衛星のイオンの超高時間分解能観測を中心に用いて、電磁イオンサイクロトロン波動とイオン間のエネルギー輸送について直接計測し、電磁イオンサイクロトロン波動を介して水素イオンからヘリウムイオンにエネルギーが輸送されるという過程を観測に基づいて実証し、宇宙空間においてサイクロトロン波を介したエネルギー輸送の重要性を実証的に示した。また、非線形波動成長理論から予測される電磁イオンホールの詳細観測に成功し、非線形波動成長理論の妥当性、重要性が示された。

地球のバウショックの観測データからコヒーレントな電磁サイクロトロン波を解析し、波動が予想以上に微細な空間構造を持つことが分かった。また電磁サイクロトロン波との共鳴によるピッチ角散乱を組み込んだ衝撃波における電子加速理論を提唱し (Katou & Amano, ApJ, 2019)、MMS 衛星による観測データを用いてこれを観測的に実証した (Amano et al., PRL, 2020)。この理論はバウショックのみならず天体衝撃波へも応用することが可能であり、電磁サイクロトロン波を介した電子加速が地球磁気圏のみならず、より広範な宇宙プラズマ現象において重要であることが明らかになった。

超小型の粒子観測器を実現するために必要となる「カスプ型小型低エネルギー電子分析器」を考案して搭載可能なセンサーを設計した。また、粒子検出部の超小型化を実現する検出回路の超小型化にも取り組み、1 チャンネル分を 1mm<sup>2</sup> 以下に収めることに成功した。また、5mm 角チップ内に収め、観測周波数をダイナミックに変更しながら動作可能な新型のプラズマ波動観測器の実現にも成功した。

## 5. 今後の計画

電磁サイクロトロン波との非線形相互作用

用の効果を取り入れた電子分布関数の数値グリーン関数データベースを整備し、グローバル MHD シミュレーションによる波動発生領域の推定とともに、世界中の放射線帯モデリングの研究グループと共同して数値グリーン関数法を普及させる。

ERG, MME, Van Allen Probes 衛星のさらなるデータ解析を通じて、斜め伝搬する電磁サイクロトロン波と粒子の位相関係、その波動の非線形性と電子散乱の関係性といった普遍性、特にそのパラメータ依存性に着目して研究を進める

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- Amano, T., Katou, T., Kitamura, N., Oka, M., Matsumoto, Y., Hoshino, M., Saito, Y., et al., Observational evidence for stochastic shock drift acceleration of electrons at the Earth's bow shock, *Physical Review Letters*, 124, 065101(1-6), 2020.
- Omura, Y., Hsieh, Y.-K., Foster, J. C., Erickson, P. J., Kletzing, C. A., & Baker, D. N., Cyclotron acceleration of relativistic electrons through Landau resonance with obliquely propagating whistler-mode chorus emissions, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 2795–2810, 2019.
- Kasahara, S., Miyoshi, Y., Yokota, S., Mitani, T., Kasahara, Y., Matsuda, S., Kumamoto, A., Matsuoka, A., Kazama, Y., Frey, H.U., Ngelopoulos, V.A., Kurita, S., Keika, K., Seki, K., Shinohara, I., Pulsating aurora from electron scattering by chorus waves, *Nature*, 554, 337-340, 2018.
- Kitamura, N., Kitahara, M., Shoji, M., Miyoshi, Y., Hasegawa, H., Nakamura, S., Katoh, Y., Saito, Y. et al., Direct measurements of two-way wave-particle energy transfer in a collisionless space plasma, *Science*, 361(6406), 1000-1003, 2018.
- ◆ 2019 年 10 月 大村善治, 国際宇宙航行アカデミー (IAA) 会員 (基礎科学)
- ◆ 2018 年 11 月 天野孝伸, アジア太平洋物理学会連合プラズマ物理部門 (AAPPS-DPP) 若手研究者賞 (40 歳以下)
- ◆ 2018 年 11 月 北村成寿, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 大林奨励賞
- ◆ 2018 年 5 月 銭谷誠司, 地球電磁気・地球惑星圏学会 (SGEPSS) 田中館賞
- ◆ 2017 年 8 月 大村善治, 国際電波科学連合 (URSI) アップルトン賞

## 7. ホームページ等

<http://pcwave.rish.kyoto-u.ac.jp/>