

電磁波が駆動する静電波不安定性の計算機シミュレーション

Computer simulation of electrostatic wave instabilities driven by electromagnetic waves

研究代表者：栗田 怜（京都大学生存圏研究所）

研究分担者：吉田 永遠（京都大学大学院工学研究科電気工学専攻）

担当：データ解析・不安定性の数値シミュレーション

謝 怡凱（京都大学大学生存圏研究所）

担当：テスト粒子計算シミュレーション

研究目的 (Research Objective):

地球周辺の宇宙環境では、様々な電磁波・静電波がプラズマの不安定性により自発的に励起されている。これらの波動は、波動粒子相互作用によりプラズマを加速・消失させることが知られており、地球周辺においては、電磁波モードであるホイッスラーモード波動と電子の間の相互作用が特に注目されている。科学衛星の観測によって、ホイッスラーモード波動のうち、特定の周波数領域に出現するコーラスと呼ばれる波動に伴って、静電波が出現することが報告されている。この現象において、静電波は、コーラスの波形の特定の位相に出現することがわかっている。この現象は、コーラスとランダウ共鳴した電子が、コーラスの静電波成分の特定の位相に捕捉され、コーラスの位相速度と同じ速さの電子ビームとなった結果、背景電子と電子ビームによる bump-on-tail 不安定性により静電波が励起するというモデルで解釈されている。この静電波の不安定性や非線形発展過程は、数値シミュレーションによる再現が試みられているが、全容の解明には至っていない。近年、あらせ衛星が取得した観測データの解析により、コーラスの周波数や伝搬角といった特徴と、静電波の性質の関係が明らかになってきており、静電波の不安定性・非線形発展過程に関する研究の糸口が垣間見えている。また、先行研究で提案されたモデルでは説明が難しい場合があることが判明し、新しいモデルを検討・提案する必要がある。

本研究課題においては、あらせ衛星の観測結果で明らかになったホイッスラーモード波動の性質をもとに数値シミュレーションを行うことで、ホイッスラーモード波動と電子の相互作用とそれに付随して発生する静電波の不安定性・非線形発展の詳細を明らかにすることを目指す。

計算手法 (Computational Aspects):

コーラスに伴って静電波が出現する現象を理解するにあたり、まずは大規模なテスト粒子計算シミュレーションによって、コーラス波動の電磁場によって、電子の空間分布や速度分布がどのように変化するかを調べ、その分布をもとにして、静電波を励起できる条件が設定されうるかを調査する。この調査結果をもとにして、全粒子型電磁粒子シミュレーションコード KEMPO の 2 次元バージョンを用いて、ホイッスラーモ

ード波動を励起させたのちに静電波が出現する条件を調べ、その際の電子分布関数の変化や静電波の非線形発展に関して明らかにしていく。

研究成果（Accomplishments）：

本年度は、あらせ衛星で観測された波形データの解析から、コーラス波動によって励起される静電波の特性に関する解析と、テスト粒子計算コードの準備をおこなった。

あらせ衛星の観測データから、コーラス波動に伴って出現する静電波は2つのパターンに分類され、コーラス波動の特定の位相に静電波が埋め込まれたような波形を示すもの（Type1）と、Type1とは異なり、コーラスの位相とは無関係に継続して出現するもの（Type2）が存在することが明らかになった。また、Type1は電子サイクロトロン周波数の0.5倍以下の lower-band chorus に付随して出現する傾向がある一方、Type2の静電波は電子サイクロトロン周波数の0.5以上に波動強度をもつ upper-band chorus とともに観測される事例が大半であることが明らかになった。

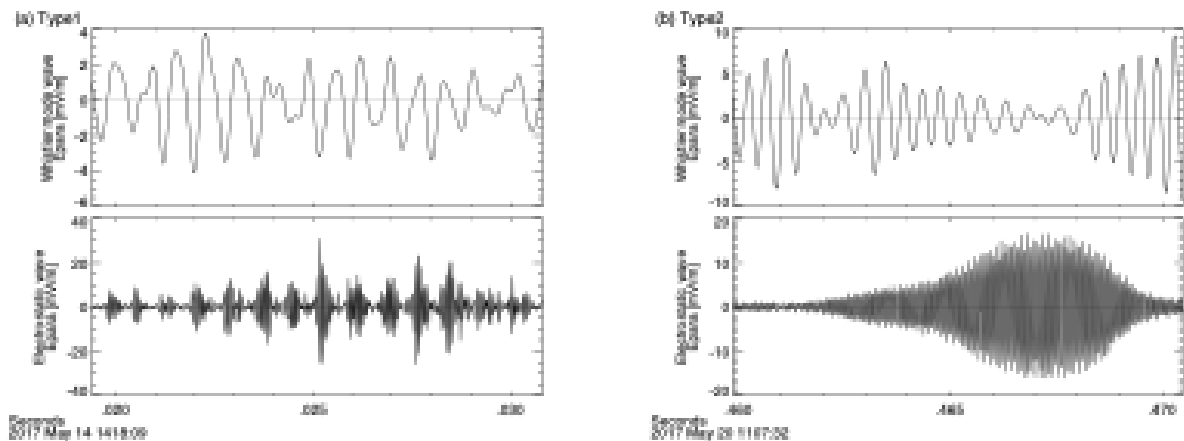


図 1. あらせ衛星で観測されるコーラス波動に伴い出現する静電波の観測例。上段がコーラス波動の電界波形、下段が静電波の電界波形を示す。コーラス波動の特定の位相で現れる Type1(左側)と、コーラス波動の位相とは無関係に出現する Type2(右側)に分類できる。

ホイッスラーモード波動は、電子サイクロトロン周波数の0.5倍を境に群速度と位相速度の大小関係が異なり、0.5倍以下では群速度が位相速度よりも速く、0.5倍以上では群速度が位相速度よりも遅い性質をもつ。この性質に注目して、コーラス波動の振幅が一定以上よりも大きい場合に静電波が出現すると仮定し、波の伝搬方向に対して1次元の電界波形のモデルを構築した。このモデルでは、コーラス波動の波束がガウス関数の形状をしており、コーラスの電界強度があるしきい値よりも大きい場合、ガウス関数の形状をもつ静電波の振幅がある一定の割合で増加する。lower-band chorus の場合には、位相の変化に対して波のエネルギーが速く通過することで、静電波はコーラス波動の限られた位相にのみ出現する。一方、upper-band chorus の場合には、波のエネルギーの通過するのに対して位相が早く変化し、空間的に広い領域で静電波が継続的に出現することが明らかになった。簡易的なモデルではあるが、観測された波形をよく再現する結果が得られ、コーラス波動のエネルギーが通過する速さ

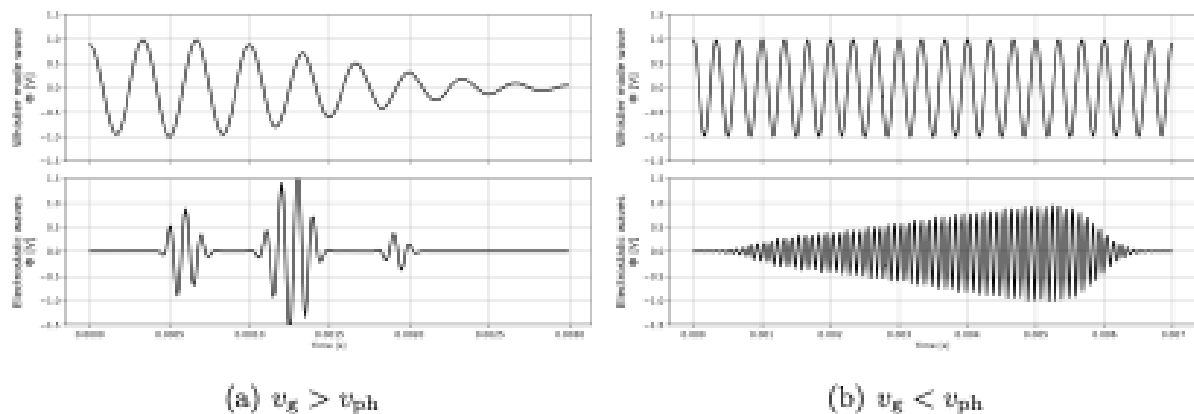


図 2. コーラス波動に伴い出現する静電波を模擬したモデル波形。上段がコーラス波動、下段が静電波の電位を示す。群速度と位相速度の大小関係により、観測される波形の形状が異なることが示された。

に対するコーラス波動の位相の変化の早さが、観測される静電波の波形に影響を与える可能性があることを強く示唆するものである。

今後は、テスト粒子計算コードを用いて電子の空間分布や速度分布の変化を明らかにし、静電波についての不安定性解析をおこなったのち、全粒子型電磁シミュレーションコード KEMPO の 2 次元バージョンを用いてホイッスラーモード波動を自発的に励起させ、静電波励起に至る過程を self-consistent に再現し、さらなる解析を進める予定である。

公表状況 (Publications) :

(ポスター)

1. 吉田永遠、栗田怜 他、Characteristics of whistler-mode waves that generate electrostatic emissions observed by the Arase satellite、地球電磁気・地球惑星圏学会 2025 年秋季大会、神戸、2025 年 11 月
- 2.

(口頭)

1. 吉田永遠、栗田怜 他、Statistical Results on Electrostatic Waves Driven by Whistler-Mode Waves、第 24 回 ERG サイエンス会議、名古屋、2026 年 3 月
2. 吉田永遠、栗田怜 他、Characteristics of Whistler-Mode Waves That Excite Electrostatic Waves Observed by the Arase Satellite, URSI-JRSM 2026, 東京、2026 年 3 月