

無衝突プラズマ中の運動論的不安定性に伴う **粒子の加熱・加速の研究**

Particle acceleration and heating associated with kinetic instabilities in collisionless plasmas

研究代表者：天野 孝伸 (東京大学大学院理学系研究科)

研究分担者：寺境 太樹 (東京大学大学院理学系研究科)
担当：計算機実験実施・データ解析

研究分担者：Wang Ruolin (東京大学大学院理学系研究科)
担当：計算機実験実施・データ解析

研究分担者：神田 芽生 (東京大学大学院理学系研究科)
担当：計算機実験実施・データ解析

研究目的 (Research Objective):

宇宙空間プラズマ中の無衝突衝撃波のダイナミクスはプラズマ波動と荷電粒子の極度に非線形な相互作用に支配されている。波動の時空間スケールは多岐にわたり、広いエネルギー帯の荷電粒子の加熱・加速に重要な役割を果たす。高エネルギー粒子は電磁流体波動との相互作用により衝撃波前後を拡散しながら往復運動することでさらなる加速を受け、ベキ型のエネルギースペクトルを持つ宇宙線が形成される。低エネルギー粒子はより高周波・短波長の運動論スケールの波動によって加熱されると同時に、一部の粒子が中間エネルギーに加速され、高エネルギー宇宙線の種となると考えられている。これらの加熱・加速に重要な役割を果たす波動はそれぞれのスケールで異なる運動論的不安定性によって励起される。したがって、ミクロからマクロに至るまで、多スケールのプラズマ運動論的不安定性の励起過程およびその非線形発展を理解することが本研究の大きな目的である。

計算手法 (Computational Aspects):

プラズマ中の電子・イオンをいずれも粒子として運動論的に扱う Particle-In-Cell (PIC) 法を用いて 1 次元および 2 次元の無衝突衝撃波の数値シミュレーションを実施した。

計算コード自体は 3 次元で、SIMD 化ライブラリを用いたベクトル化および MPI + OpenMP のハイブリッド並列化がなされている。MPI 並列化は領域分割によっているが、粒子数に応じて動的に分割領域を変動させる動的負荷分散が実装されており、大きな密度不均衡が生じる無衝突衝撃波の大規模計算においても高い並列化効率が達成できている。

研究成果（Accomplishments）：

地球バウショック相当のパラメータ（Alfven Mach 数： $M_A = 5$ ，衝撃波磁場配位角： $\theta_{Bn} = 80^\circ$ ）で 2 次元 Particle-In-Cell（PIC）シミュレーションを実施し，衝撃波遷移層では磁力線にほぼ平行方向に伝播する電磁波が形成していることが確認された（図 1）．図から分かるように，磁力線に垂直方向には非常に狭い範囲に局在化している．波動の性質をより詳細に調べるために，局所平面近似した波形モデルでフィッティングすることで波長や伝播方向などを調べた．その結果，周波数は局所的な電子サイクロトロン周波数の数 10% 程度であること，伝播方向はほぼ背景の磁力線に平行・反平行で，冷たいプラズマのホイッスラー波の分散関係とよい一致を示すことが分かった．これは人工衛星で観測される高周波ホイッスラー波の性質と良く一致する．また，観測ではホイッスラー波がバースト的な波束として観測されることが知られているが，数値シミュレーション結果はこれが磁力線垂直方向に局在化した波動であることを示唆している．これまでの解析で波動の性質および観測との整合性については理解が進んだが，波動の励起機構の同定は今後の課題である．

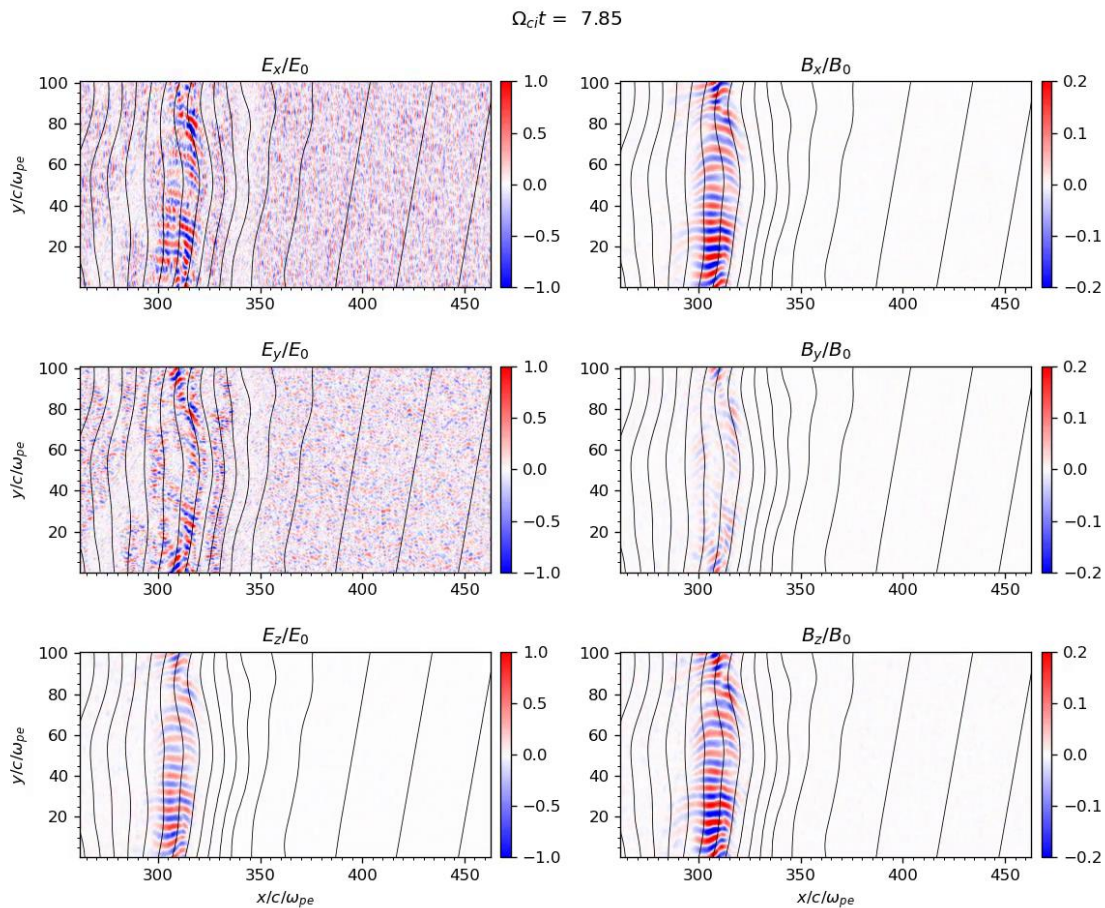


Fig.1 数値シミュレーションで再現された磁力線に平行方向に伝播するホイッスラー波．カラーは時間方向にフィルタをかけた電磁場の揺らぎ成分を示す．黒い実線は磁力線を表す．

公表状況 (Publications) :

(口頭)

1. Amano, T., Kitamura, N., Generation of coherent quasi-parallel whistler waves at Earth's bow shock, 第 158 回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会, 神戸大学, 2025 年 11 月
2. Amano, T., Shock acceleration of nonthermal electrons in the heliosphere and beyond, Joint Cluster-Plasma Observatory Workshop, Paris, Oct. 23, 2025