

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月 1日現在

機関番号：82636

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21740353

研究課題名（和文）ホイッスラー乱流の非線形発展およびプラズマ粒子へのエネルギー変換過程

研究課題名（英文）Nonlinear development of whistler turbulence and energy transfer mechanism to plasma particles

研究代表者

齊藤 慎司 (SAITO SHINJI)

（独）情報通信研究機構・電磁波計測研究所・

宇宙環境インフォマティクス研究室・専攻研究員

研究者番号：60528165

研究成果の概要（和文）：

本研究ではプラズマ運動論効果を含めているプラズマ粒子シミュレーションコードを用いることによって、ホイッスラー乱流の非線形発展およびそれによる電子へのエネルギー変換過程について調べた。電子 β (β_e) に対する非線形物理、特に乱流のエネルギーカスケードおよび電子加熱の変化に注目し、 β_e の値によってホイッスラー乱流の波数スペクトルおよび電子へのエネルギー変換の異方性が変わることを示した。

研究成果の概要（英文）：

We have investigated nonlinear development of whistler turbulence and its energy conversion mechanism into electron kinetic energy, using plasma particle-in-cell simulations including kinetic effects. Especially, we focus on plasma beta dependence of the whistler turbulence, and found that the plasma beta has an important role to change characteristics of electron heating and wavenumber spectrum of whistler turbulence.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・超高層物理学

キーワード：太陽風プラズマ、プラズマ乱流、ホイッスラー乱流、粒子シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

太陽風中のプラズマ波動はさまざまなスケールのものが入り交じり、乱流状態を形成している。この中では波動同士が非線形的に相互作用し、異なるスケールの波動間でエネルギーの交換が行われている。これにより太陽活動によって生じる低周波の波動エネルギーがより高周波の波動エネルギーへ分配され、特徴的なエネルギースペクトルを形成

する。図1に示されるように、太陽風中の磁場のエネルギースペクトルは低周波域の「慣性領域」と高周波域の「散逸/分散域」に分けられる。前者のスペクトルは周波数の約 $-5/3$ 乗に比例する傾向にあり、後者の領域ではより急勾配のエネルギースペクトル ($\propto f^a$; $a < -5/3$) を示すことが観測されている。この傾きの変化の原因はプラズマ波動と粒子の相互作用による波のエネルギーの“散逸”に

よるものなのか、あるいはこの領域では散逸しにくい波動の“分散”によるものなのか、現状まだ明確になっておらず、小スケールでの乱流研究の分野において世界的に注目されている重要な課題である。近年さまざまな観測および数値シミュレーションがなされており、現状では散逸/分散域のスペクトルの

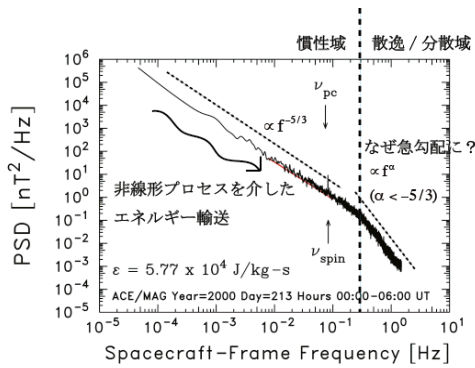


図 1

引用元:
Smith et al. *Astrophys. J.*, 645: L85-L88, 2006

図 1: 太陽風中に見られる磁場摂動のエネルギースペクトル

特徴を説明し得る波動の有効な候補として、運動論的アルフェン波とホイッスラー波が考えられている。観測においては、前者の特徴を持つ波の存在が示唆されており、数値シミュレーションにおいても運動論的アルフェン波が急勾配のエネルギースペクトルを形成することが示されている。しかしその一方、ホイッスラー波の特徴を示す観測結果も存在し、また電子磁気流体(EMHD)近似を用いたシミュレーションにおいても、ホイッスラー波が急勾配のスペクトル($\alpha = -7/3$)を形成することが示されている。このようにこれまで小スケール乱流について研究が進められてきているが、どちらの波がどういった条件で支配的になるのかということや、散逸/分散域の特性、プラズマ粒子へのエネルギー変換過程についてなど、まだよく理解されていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究代表者はこれまで主にホイッスラー乱流に焦点を当て、プラズマ粒子シミュレーションを用いてホイッスラー波の非線形発展を調べることに関わってきた。これまでの研究によって得られた重要な結果として、波数上のエネルギースペクトル異方性、異方性の乱流振幅依存性、背景磁場に対する電子加熱の異方性、が挙げられる。本研究では太陽風中の小スケール乱流域にホイッスラー乱流が存在した場合にどのようなエネルギー変換プロセスが働くのかをより詳細に検証することを目的とし、太陽からの距離など

で変化する電子 β (β_e : 電子の熱エネルギーと磁場エネルギーの比に相当) によってどのようなエネルギー変換の違いが現れるのかに注目している。特に非線形発展に伴う波動スペクトルおよび電子加熱の異方性が電子 β_e によってどう変化するのかに注目し、非線形発展の β_e 依存性について研究を行う。

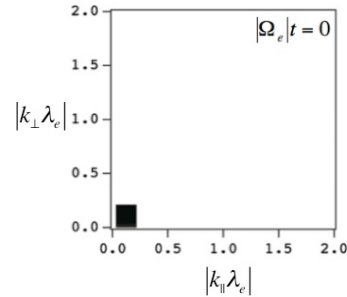


図 2: 初期条件として与えたホイッスラー波動に対する磁場摂動の波数スペクトル。位相は一樣乱流より与え、異なる伝搬方向および波数を有した 42 モードを含む。

3. 研究の方法

本研究では二次元プラズマ粒子シミュレーションを用い、ホイッスラー乱流の非線形発展および電子へのエネルギー変換過程について調べた。プラズマ粒子シミュレーションはプラズマを構成する荷電粒子の運動方程式を解くことによって、プラズマの運動論的性質を記述する。これにより磁気流体的には再現出来ない運動論的性質を含んだ非線形現象を再現することが出来る。

シミュレーションのボックスサイズは約 $100 \lambda_e \times 100 \lambda_e$ とし、空間の境界条件として周期境界条件を採用した。ここで λ_e は電子慣性長を示しており、シミュレーショングリッドサイズの 10 倍としている。グリッドセル当たりの電子-プロトン対の数は 64 とし、全体で約 10^8 個のプラズマ粒子 (電子およびプロトン) を扱っている。

一樣な背景磁場 B_0 中に、有限の温度を仮定した一樣プラズマを与え、初期条件としてランダムな位相を持たせたホイッスラー波動を配置した。与えられたホイッスラー波動の波数スペクトルを図 2 に示す。全体で 42 モードを与え初期の状態において波動振幅は一樣とする。ホイッスラー乱流発展の基本的性質の研究に加え、背景磁場強度を変えることで β_e を変化させ、波数スペクトルの非線形発展およびそれに伴う電子へのエネルギー変換がどのように変化するかということに注目し研究を行った。

4. 研究成果

(1) ホイッスラー乱流波数スペクトル

図 3 は $\beta_e = 0.01$ とした時の磁場摂動に対す

る波数スペクトルの時間発展を示している。

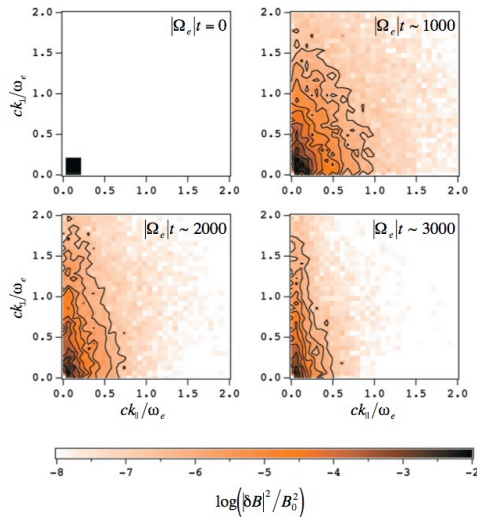


図3: 磁場摂動に対する波数スペクトルのコンタープロット。値は磁場の摂動エネルギーと背景磁場エネルギーの比を \log で表している。

初期で長波長側にのみ与えられたホイッスラー波動は、波動同士の相互作用によりフォワードカスケードを引き起こす。これにより小さいスケールへ波動エネルギーが輸送され、幅広い波数スペクトルが形成される。この広がり方は磁場に対して垂直方向の波数側（縦軸）へ優位に生じ、波数スペクトルの異方性を示している。

図4は垂直方向の波数スペクトルを示す。波長が電子慣性長付近において、スペクトルは k_{\perp}^{-4} に比例する性質を示し、そのインデックスは -4 となる。これは近年太陽風乱流観測で得られている運動論的スケールでのスペクトルの特徴と一致しており、太陽風乱流中のホイッスラー乱流の寄与を示唆している。地球近傍での太陽風中の β_e は 1 に近い値を持っており、本シミュレーションでのパラメータと異なるが、フォワードカスケードにより十分なエネルギーが散逸領域へ供給されていることを仮定すると、 -4 のインデックスを持つ比較的急勾配なスペクトルが形成されることが推測される。

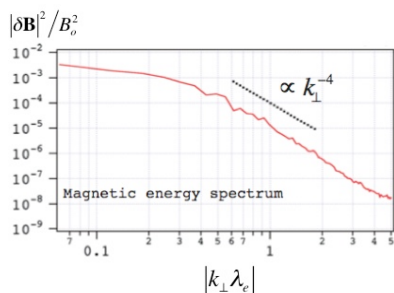


図4: シミュレーション後半で計算された垂直方向の波数スペクトル。

(2) ホイッスラー乱流発展の β_e 依存性

図4は波数スペクトルの異方性を評価する値である $\tan^2 \theta_B$ の時間発展について3つの β_e 値について示している。それぞれの β_e

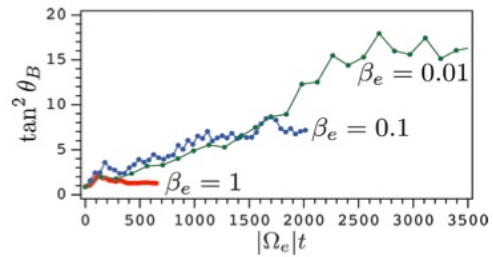


図5: 異なる β_e 値において、波数スペクトルの異方性を示す値 ($\tan^2 \theta_B$) の時間発展

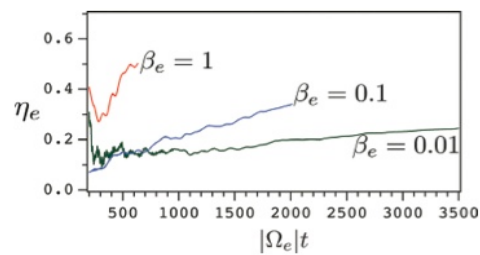


図6: 電子の垂直方向エネルギーの変化量 (ΔE_{\perp}) と電子の平行方向エネルギーの変化量 (ΔE_{\parallel}) の比 ($\eta_e = \Delta E_{\perp} / \Delta E_{\parallel}$)

で波数スペクトル異方性の変化がほぼ飽和するまで計算を行っている。これより、より高 β_e であるほど飽和する時間が短く、さらに異方性が小さくなる傾向にあることがわかる。この異方性の変化が電子加熱の異方性の変化を引き起こす。線形理論において、平行伝搬するホイッスラー波動はサイクロトロン共鳴を介して磁場に対して垂直方向の電子エネルギーを増加させる傾向にある。一方、背景磁場に対して斜めに伝搬するホイッスラー波動はランダウ共鳴を介して電子を平行方向に散乱し加熱する傾向にある。ホイッスラー乱流が図3のような波数スペクトルの異方性を示す場合は、斜め伝搬の成分が卓越していることから、電子は磁場に対して平行方向に優位な加熱を引き起こされる。

図6は電子の垂直方向エネルギー変化量 (ΔE_{\perp}) と電子の平行方向エネルギー変化量 (ΔE_{\parallel}) の比 ($\eta_e = \Delta E_{\perp} / \Delta E_{\parallel}$) を表している。この値が 1 になる時に等方的な加熱を意味する。低 β_e においては図5で示されるように波数スペクトルの異方性が大きくなるため、電子の平行加熱が卓越しより小さな値を示す。 β_e が大きくなると波数スペクトルの異方性小さくなる傾向にあるため、電子加熱もより等方的になるという結果が得られた。

本研究では二次元の粒子シミュレーション

ンを用いて、ホイッスラー乱流の非線形発展およびそれによるプラズマ加熱機構について研究を行った。これより、ホイッスラー乱流は背景磁場に対して斜め伝搬成分が卓越したフォワードカスケードを起こす傾向が見いだされ、またこれは β_e に依存することがわかった。傾向としては β_e が大きくなるとより等方的な波数スペクトルの発展を見せることがわかった。この非線形発展に伴い、電子加熱が生じ、波数スペクトルの異方性を原因として、電子加熱の異方性が現れることがわかった。これはホイッスラー乱流を介して波動が電子を加熱する場合、磁場に対して平行方向加熱が卓越することを示している。そしてこの傾向は高 β_e においてより等方的な加熱を引き起こすことを示唆している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① S. Saito and S. P. Gary, Beta dependence of electron heating in decaying whistler turbulence: Particle-In-Cell simulations, Physics of Plasmas, 査読有, Vol.19, 2012, 012312-1 - 012312-5.
- ② Y. Narita, S. P. Gary, S. Saito, K. -H. Glassmeier, and U. Motschmann, Dispersion relation analysis of solar wind turbulence, Geophysical Research Letters, 査読有, Vol.38, 2011, L05101-1 - L05101-4.
- ③ S. Saito, S. P. Gary, Y. Narita, Wavenumber spectrum of whistler turbulence: Particle-In-Cell simulations, Physics of Plasmas, 査読有, Vol.17, 2010, 122316-1 - 122316-7.
- ④ S. P. Gary, S. Saito, and Y. Narita, Whistler turbulence wavenumber anisotropies: Particle-In-Cell simulations, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol.716, 2010, 1332 - 1335

[学会発表] (計8件)

- ① S. Saito and S. P. Gary, Beta dependence of electron heating by whistler turbulence, American Geophysical Union Fall Meeting, 2011年12月9日, Moscone Convention Center, San Francisco, USA
- ② S. Saito and S. P. Gary, Beta dependence of electron heating on

whistler turbulence, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2011年11月3日, 兵庫県 神戸大学

- ③ S. Saito and S. P. Gary, Whistler turbulence in high beta plasma: Particle-In-Cell simulation, XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science, 2011年8月16日, Lutfi Kırdar Convention and Exhibition Centre, Istanbul, Turkey
- ④ S. Saito, S. P. Gary, and Y. Narita, Magnetic wavenumber spectrum of whistler turbulence- Particle-In-Cell simulation, American Geophysical Union, 2010年12月15日, Moscone Convention Center, San Francisco, USA.
- ⑤ S. Saito, ホイッスラー乱流による陽子垂直加熱について, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2010年11月1日, 沖縄県 沖縄県市町村自治会館
- ⑥ S. Saito, S. P. Gary, and Y. Narita, Whistler turbulence in electron scales: Particle-in-cell simulations, Asia-Pacific Radio Science Conference, 2010年9月24日, 富山県 富山国際会議場
- ⑦ S. Saito, S. P. Gary, and Y. Narita, Magnetic energy spectrum of whistler turbulence: Particle-In-Cell simulation, 日本地球惑星科学連合大会, 2010年5月25日, 千葉県 幕張メッセ
- ⑧ S. Saito and S. P. Gary, 太陽風中の小スケール乱流研究, STE シミュレーション研究会/宇宙プラズマ波動研究会 合同研究集会, 2009年10月28日, 宮城県 仙台市戦災復興記念館

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齊藤 慎司 (SAITO SHINJI)

(独) 情報通信研究機構・電磁波計測研究所・宇宙環境インフォマティクス研究室・専攻研究員

研究者番号: 60528165

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: