

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03891

研究課題名(和文)非平衡関係式を用いた無衝突プラズマ乱流におけるエネルギー散逸の定量化

研究課題名(英文)Quantification of energy dissipation in collisionless plasma turbulence via nonequilibrium relations

研究代表者

成行 泰裕 (NARIYUKI, Yasuhiro)

富山大学・学術研究部教育学系・准教授

研究者番号：50510294

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、確率モデル(粗視化モデル)の観点から宇宙空間プラズマなどの無衝突プラズマにおける乱流のエネルギー散逸の解明に取り組んだ。先行研究で得られていた太陽風磁気流体乱流のパラメータ(クロスヘリシティ・残留エネルギー)間の関係式を粗視化モデルで再現し、粗視化モデル中のエネルギー散逸とそれらのパラメータを直接対応させた。また、低周波極限(磁気流体極限)の非平衡定常状態において、揺らぎに対して成立する関係式に現れる有効温度を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

磁気流体乱流中のクロスヘリシティ・残留エネルギー間の関係式とエネルギー散逸を関係づける最小モデルが得られたが、これは惑星間空間のグローバルな発展も含めた磁気流体乱流のモデル化に新しい視点を与えるものである。また、これまでの無衝突プラズマ乱流中の波動粒子相互作用・エネルギー散逸の研究では揺らぎに関する関係式は重要視されていなかったが、今後は本研究の成果が基礎となって人工衛星による「その場」観測と組み合わせたエネルギー散逸分布のパラメータの推定の進展等が期待される。

研究成果の概要(英文)：In the present study, energy dissipation in turbulence of collisionless plasmas such as space plasma is discussed from the point of view of a stochastic model (coarse-grained model). Energy dissipation in the stochastic model is directly connected to macro variables in magnetohydrodynamic turbulence such as the cross-helicity and residual energy. Effective temperature in the non-equilibrium steady state of the low-frequency limit is also shown.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：無衝突プラズマ 磁気流体乱流 粗視化モデル 太陽風

1. 研究開始当初の背景

粒子間のクーロン衝突が非常に稀な無衝突プラズマにおいては、確率的な揺動力を含む中間スケールのモデル(粗視化モデル)は敬遠される傾向にあった。しかしながら、近年の宇宙プラズマの観測研究(人工衛星による「その場」観測)の進展から、無衝突プラズマが従来考えられていたよりも「衝突的」であり、小スケール擾乱においては線形応答理論で記述される熱ノイズとしての解釈が可能な場合もあることが分かってきた。

多数の要素が構成する系の挙動を理解しようとするとき、個々の要素の微視的な挙動と系の平均的な巨視的な挙動を自己無撞着に解くことが望ましいが、現実的には難しい場合が多い。そのため、微視的・巨視的スケールの中間スケールに着目した、ランジュバン方程式などの確率モデル(粗視化モデル)が多く、の科学研究分野で用いられている。実際、確率的な揺動力を含む粗視化モデルは、多体系を扱う多くの分野で成果を挙げており、非平衡統計物理の発展においても欠かせない道具になっている。

2. 研究の目的

上記のような背景の下、無衝突プラズマ中の磁気流体乱流の現象論にも新しい視点が求められる。本研究では、上記のような背景を踏まえ、微視的スケールと巨視的スケールの中間スケールを記述する確率モデル(粗視化モデル)を用いて、宇宙空間プラズマのような粒子同士の衝突が非常に稀なプラズマ(無衝突プラズマ)における乱流のエネルギー散逸の解明に取り組んだ。具体的には、非平衡過程でも成立する関係式(非平衡関係式)と数値シミュレーションを用いて、摩擦係数などの粗視化モデルのパラメータとエネルギー散逸・クロスヘリシティー・残留エネルギーなどの巨視的スケール乱流(磁気流体乱流)の特徴との関係を明らかにすることを目的とし、研究を行った。

3. 研究の方法

本研究では、統計的定常状態の磁気流体乱流とランダム力・摩擦力によって駆動されるテスト粒子の運動を議論する。具体的には、理論解析により粗視化モデル(確率微分方程式)の導入・理論解析、および数値計算を行う。数値計算には、太陽風磁気乱流の模擬データ(人工データ)の生成も含まれる。

4. 研究成果

本研究では、確率モデル(粗視化モデル)を用いた宇宙空間プラズマにおける乱流のエネルギー散逸の解明に取り組み、以下のような結果を得た：

- (1) 太陽風磁気流体乱流中で観測される有限のクロスヘリシティー・残留エネルギーと乱流中のエネルギー散逸との関係は、まだ十分に理解されていない。本研究では、ローレンツ力を含むランジュバン系から出発し、アルヴェン状態(非平衡アルヴェン状態)に対する低周波極限(磁気流体極限)が、過減衰ランジュバン系における非平衡な定常状態(steady state)に対応することを示した。この場合の非平衡アルヴェン状態とは、摩擦・ノイズが無い極限でアルヴェン波解(図 1)に一致する非平衡定常状態を指している。この過減衰ランジュバン系における非平衡アルヴェン状態において、過去に磁気流体乱流モデル[Tu+Marsch, 1993]を用いて提唱されたクロスヘリシティーと残留エネルギーの関係式が成立することを示した。規格化されたクロスヘリシティーと残留エネルギーの関係式はランジュバン系のパラメータ(摩擦係数)で直接与えられるため、非平衡アルヴェン状態中のエネルギー散逸もクロスヘリシティー・残留エネルギーの関係式と直接対応付けられることになる。なお、この系におけるエネルギー散逸は残留エネルギーが $-1/3$ (磁気エネルギーが運動エネルギーの2倍)で最大になる。このエネルギー比が2倍になる状態は以前から太陽風乱流中の広い範囲で観測されていること[e.g., Tu+March, 1995; and references therein]、同様の定常性は非一様な磁気流体乱

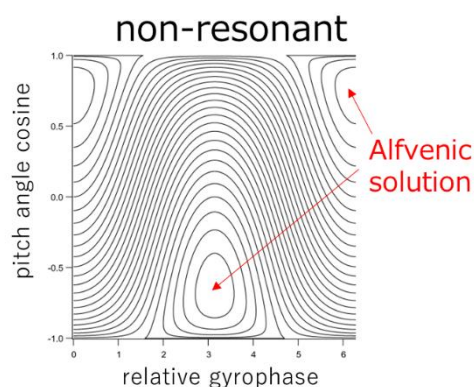


図 1 非共鳴なアルヴェン波が存在する場合のピッチ角余弦-相対ジャイロ角平面の保存量(Terasawa et al, 1986; Kuramitsu+Krasnoselskikh, 2005)。赤い矢印は散逸が無い系のアルヴェン波解を示している。

流モデルからも示唆されていること[Yokoi+Hamba, 2007]より、今後の興味深い研究課題であるといえる。また、先行研究で得られているクロスヘリシティー・残留エネルギーの径方向依存性より、摩擦係数の径方向依存性を与える経験式を求めた。これと磁場擾乱振幅の径方向依存性とを合わせると、ランジュバン系におけるエネルギー散逸の径方向依存性も経験式として与えることができる。

- (2) 次に、粗視化モデルを異方性を含む形に拡張した。具体的には、温度、摩擦係数、および電磁場が無い場合の平均流に相当するパラメータを、方向ごとに与えた。拡張して得られた表式を用いて、擾乱磁場が無い場合に先行研究で求められた速度相関が導出されることを確認した。また、粗視化モデルに対応した Fokker-Planck 方程式より、低周波・等方温度の極限で Maxwell 分布が定常状態として得られることを確認した。この電磁場が無い場合の平均流に相当するパラメータを含むランジュバン系を波動静止系で記述することにより、磁場振幅一定の円偏波を与えた場合は平行方向の運動を非平衡統計力学の研究で良く用いられる周期ポテンシャルを含むランジュバン系と同様の形で表せることを示した。すなわち、エネルギー散逸に関する関係式も、先行研究同様の形で示すことができる。また、背景磁場に対し平行方向の粒子運動が擾乱振幅に依存する拡散係数を持つブラウン運動となることを示した。準線形的なピッチ角拡散には振幅依存性があることから、宇宙線の平行拡散[e.g., Hasselmann+Wibberenz, 1970]にも振幅依存性が生じることが知られている。異なるモデル化から似た傾向の依存性が得られたことは、モデルの妥当性を評価する上で重要な知見になる。また、この過減衰ランジュバン系の非平衡定常状態(非平衡アルヴェン状態)において、揺らぎに対して成立する関係式に現れる有効温度(図2)を示した。有効温度の表式が得られたことで、無衝突プラズマ乱流中の粒子加熱の素過程である波動粒子相互作用を統計的に扱う際に、非平衡定常状態の揺らぎに対する関係式を用いたアプローチが可能になる。このことは、衛星観測データから太陽風乱流のようにバンド幅が大きい乱流中の粒子加熱(乱流のエネルギー散逸)を定量的に議論するための足掛かりになる可能性があり、今後の検討が期待される。また、ランジュバン系を乗法的ノイズを含む系に拡張することで、磁気流体乱流が無い場合に宇宙プラズマの非熱的成分を含む分布として良く用いられるカッパ分布を定常分布として持つ系を得ることができるが、その場合も乗法ノイズの係数でランジュバン系のパラメータを修正する形で平均のエネルギー散逸を与えることができる。(1)の最後に述べたように、クロスヘリシティー・残留エネルギーなどの衛星観測から径方向依存性が与えられている量から、これらのパラメータの径方向依存性を与える経験式を求めることができる。

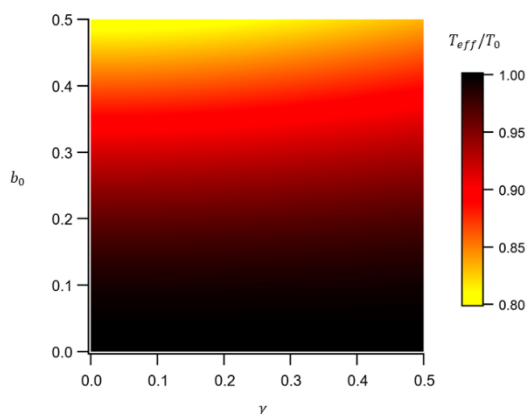


図2 有効温度の摩擦係数(横軸)および磁場擾乱振幅(縦軸)の依存性。ただし、各量は背景磁場強度で規格化されている。有効温度は磁場擾乱が無い場合の温度(ランジュバン系の熱浴の温度)との比で表している。

- (3) (1)(2)で得られた非平衡定常状態の関係式について、理論解析では取り扱えない範囲について数値的に検証した。太陽風磁気流体乱流では、大振幅擾乱であっても磁場全体の強度(磁場振幅)が一定に近い場合が頻繁に現れるが、磁場振幅一定の仮定はそれを模擬したものである。一方で、例えば波数空間で平行方向に卓越した成分(スラブモード)と垂直方向に卓越した成分(2次元モード)を単純に重ね合わせた場合は磁場振幅の変動が現れるが、実際の太陽風においても磁場振幅の変動が大きい場合がある。スラブモード・2次元モードを模擬した乱流場における平行拡散を過減衰ランジュバン系の直接数値計算から求めたところ、磁場振幅の変動がかなり大きい場合でも、理論的に求めた拡散係数が予測する値とよく一致していることが分かった。これは、十分な統計的を取ることで空間的な磁場強度の非一様性の影響が抑えられるため、平均的な磁場強度が重要なパラメータとして効いてくることを示唆している。エネルギー散逸に関しては磁場強度の変化が大きいほど理論からのずれが大きくなる傾向がある一方で、有効温度を用いた揺動散逸関係で見ると理論式からのずれがあまり大きくならなかった。このことは、圧縮性等の磁気流体乱流の性質が多様であっても、波動粒子相互作用の分布の形状は共通の重要な要素であることを示唆していると考えられる。また、2次元モードのカットオフ波数が大きくなるほど、理論モデルからのずれも大きくなることが確認された。太陽風の膨張効果を入れた場合も、有効温度を用いた揺動散逸関係で見ると理論式からのずれは小さくなる傾向が確認された。ただし、膨張効果に関しては背景場のモデル化に不定性が多いため、本モデルの範囲を超えた検討が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nariyuki Yasuhiro	4. 巻 6
2. 論文標題 Low-frequency Alfvén waves and parametric instabilities in fluid and kinetic plasmas	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Reviews of Modern Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41614-022-00085-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nariyuki Y.	4. 巻 11
2. 論文標題 A non-equilibrium Alfvénic state of the Langevin system for single particles reproduces the linear relation between the cross helicity and the residual energy in the solar wind	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 55005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0049849	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nariyuki Y.	4. 巻 13
2. 論文標題 An overdamped Langevin approach to parallel diffusion and energy dissipation in the presence of low-frequency circularly polarized electromagnetic waves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 75201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0153347	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yasuhiro Nariyuki
2. 発表標題 On stochastic and kinematic modeling of Alfvénic states in the solar wind plasma
3. 学会等名 6th Asia Pacific Conference on Plasma Physics（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成行 泰裕
2. 発表標題 一定磁場強度を持つ非単色アルヴェン波中の位相相関とエネルギー散逸
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 成行 泰裕
2. 発表標題 On the relationship between the cross-helicity and the residual energy in the solar wind MHD turbulence: A phenomenological approach
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成行 泰裕
2. 発表標題 太陽風中の非平衡アルヴェン状態における残留エネルギーとエントロピー生成の関係
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成行 泰裕
2. 発表標題 低周波アルヴェン乱流におけるエネルギー散逸の確率モデル
3. 学会等名 一般社団法人 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 成行 泰裕
2. 発表標題 非平衡アルヴェン状態を用いた太陽風擾乱のモデル化
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhiro Nariyuki
2. 発表標題 On non-equilibrium Alfvénic fluctuations in the solar wind
3. 学会等名 International Conference on High Energy Density Sciences (HEDS2021) HEDS-10-04 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhiro Nariyuki
2. 発表標題 The minimal model for non-equilibrium Alfvénic states of solar wind ions
3. 学会等名 Chapman Conference on Advances in Understanding Alfvén Waves in the Sun and the Heliosphere (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

https://researchmap.jp/Yasu_Nariyuki

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------