

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540439

研究課題名（和文） 多点衛星観測データを用いた宇宙プラズマ磁気流体乱流の高次統計解析

研究課題名（英文） Analysis methods of higher order statistics using MHD turbulence data obtained by multiple spacecraft

## 研究代表者

羽田 亨 (HADA TOHRU)

九州大学・大学院総合理工学研究院・教授

研究者番号：30218490

## 研究成果の概要（和文）：

宇宙プラズマ中には普遍的に磁気流体乱流（MHD乱流）が観測されるが、これらはしばしば非常に大振幅であり、波動間の非線形相互作用が盛んに行われていることを示唆している。これらの解析のためのデータは人工衛星により取得することが必要であるが、地上の気象観測等の場合と異なり、観測点（人工衛星の数）は極めて少ない。カポンの方法として知られる波数決定法を応用し、少数のデータ列からMHD乱流に関するできるだけ多くの情報を引き出すための、高次統計解析の方法を開発した。精度、雑音に対する脆弱性などについて、いくつかの手法の比較検討を行った。

## 研究成果の概要（英文）：

Magnetohydrodynamic (MHD) turbulence in space plasma is often found to have very large amplitude, suggesting that nonlinear wave-wave interaction is in progress. In order to examine such turbulence using multiple spacecraft data, methods of evaluating higher order statistics using a small number of data points are developed, based on the so-called Capon's method that is usually used for the determination of the wave number spectrum.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：超高層物理学

キーワード：太陽風、惑星間空間、プラズマ波動、非線形波動、多点衛星観測

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙プラズマはプラズマ波動の宝庫であるが、特に磁気流体（MHD）波動と呼ばれる低周波の波動は、振幅が非常に大きくなり

得るため（波動による磁場の変動成分と背景磁場とが同程度あるいはそれ以上）、波動と波動の間の非線形相互作用が盛んに起こっているはずであり、これは衛星観測により十分に検証可能である。このことは宇宙プラズ

マの観点からもまた非線形波動の観点からも非常に重要かつ興味深い研究対象である。つまり宇宙空間は、(1)「波動の非線形過程を人工衛星データの中に「見る」ことができる」、理想的なプラズマの実験室となっている。

しかし、実際に人工衛星データを用いて宇宙プラズマ中に起きている現象を解析しようとする、2つの大きな問題点が存在している。初めの点は、過去の多くの場合人工衛星は1機のみでの観測であったため、現象の時間変化と空間変化が区別できなかつた。この欠点を克服するため、アメリカの ISEE、ヨーロッパの CLUSTER、また日本も参画する Cross-Scale など、複数衛星を編隊飛行させて時間空間分離を行うことが試みられている。ところが、複数衛星といえどもその数は決して多くはないため(2機、4機、10機程度)、(2)「複数の衛星からのデータを如何に組み合わせ、最大限に情報を引き出すか」が非常に重要な問題となる。この点で宇宙プラズマ業界は他の分野(海洋、地震波など)に遅れをとっている。しかしこれは逆に言えば、既存の知識の応用と宇宙プラズマへの適化により、これまで(例えば現在 CLUSTER 衛星で行われているもの)よりもずっと多くの有益な情報を得られる、ということでもある。

人工衛星データを用いる問題点のもう一つは、MHD波動・乱流の解析を行う場合、磁場のデータに比べてプラズマのデータが、時間分解能、統計誤差の両方においてかなり劣っている、という点である。このため、これまで MHD 乱流に関する大多数の研究は、磁場データのみを用いて行われてきたと言っても過言ではないであろう。一方、近年の衛星観測技術の発展に伴い、プラズマデータの質が飛躍的に向上していることも事実である。これをふまえると、(3)「磁場とプラズマ両方のデータを用いて、まったく新しい解析を行う」ことができると期待される。この具体的な応用として、波動の分散関係を任意の時刻において求める(つまり時間に対するフーリエ変換が要らない)方法などが既知である。このような解析をする際に本質的に重要なのは、磁場だけでなくプラズマのデータも提供され、つまりインプットの情報量が増えただけではなく、対象としている物理系がどのようなものかを理解(あるいは仮定)して解析を行うことにより、初めて意味のある結果が得られる、ということである。これも逆に言えば、結果が期待通りか否かを検討することにより、対象とする物理系の本質的性質がどのようなものなのかを議論できることになる。2. 研究の目的

### 3. 研究の方法

背景の項目で述べた点をふまえ、以下について研究を行う。

(1) 宇宙プラズマ中のMHD乱流中を人工衛星が多点観測を行った場合、データ解析によって波動に関するどのような非線形現象が見えてくるはずか、主として理論および計算機実験により検討する。具体的には、MHD波動のパラメトリック不安定性に伴う2次オーダーの磁場ゆらぎとプラズマ揺らぎの関連づけ、磁場およびプラズマ量の高次統計(ヴォルテラモデル、バイコヒーレンスなど)、波動間の位相相関解析、さらに波動による補足粒子・非補足粒子と波動の磁場ゆらぎとの関連について研究する。

(2) 海面に浮かべた複数のブイから海面波の統計を議論する、あるいは複数観測点で得られた地震波データを用いてできるだけ高精度で震源決定を行うなど、多点観測データの解析手法は多くの分野で開発・整備されている。一方、宇宙プラズマ波動の解析のために用いられている手法は、例えば CLUSTER 衛星では最尤法と呼ばれる古い方法であり、これよりも高精度・高分解能の手法を検討することは、現在計画中の SCOPE ミッションを考えても急務である。つまり、複数衛星により得られたデータから最大限の情報を高精度で取り出す方法を開発する。特に、主として線形予測法を磁場データに適用し、さらに磁場が互いに関連した3成分からなること、発散=0となることを取り入れた方法についてまず検討する予定である。

(3) これまで主として磁場データのみが用いられて行われてきたMHD波動・乱流の研究において、もしもプラズマのマクロ量、さらにはプラズマ分布関数までもが手に入るようになったら、どのような解析ができるか、上の1.および2.の目標との関連を考慮しつつ、様々な可能性について考える。具体的には、最近我々が開発した、波動の分散関係を瞬時に求める方法を多点衛星データに適用する方法の開発である。

### 4. 研究成果

例えば地上での気象データを統計解析する場合と異なり、宇宙での観測の最大のネックは、観測点の数が極めて少ないことであることは、先に述べたとおりである。一方、最近になって、宇宙プラズマ環境のよりよい理解のために、編隊観測の重要性が認識されつつあり、単機観測から2機(一方向の空間と時間の分離が可能)、4機(3次元空間と時間の分離が可能)、そしてさらに多くの編隊観測が提案されつつある。また、複数衛星によ

る観測は、原理的に複数の波動モードの分離が可能であることも意味し、したがって複数モードの相互作用の検出の可能性につながる。これらの点をふまえ、N点の観測点（N機編隊、ただしNは大きい数ではない）によりどのような統計解析、特に高次統計解析が可能か、を理論および数値計算により検討した。研究にあたっては、実際の人工衛星データおよび数値シミュレーションにより得られたデータを活用した。具体的な研究成果の概要は以下の通りである。

(1) 複数衛星により得られたデータの処理に関し、データの定常性の判定、データ補間など、いくつかの具体的な点についてデータ処理の手法を開発し、その有効性を議論した。この項目に関しては、少数データポイントによる高次統計解析として、特に新しい方法を開発したわけではないが、既存のデータ補完および欠損データの処理法が有効であることを確認した。

(2) カポンの方法として知られる波数決定法を、波動間相互作用を特徴づける高次相関解析に応用する手法を開発した。

例えば2つの有限振幅波動が相互作用し、3番目の波動を生成している状況を考えよう。考えている系が線形系であれば、このようなことは起こりえないが、宇宙プラズマは本質的に非線形系であるため（いくつか例を挙げれば、流体の移流項、ローレンツ力、相対論効果など）、有限振幅の波動は非線形相互作用（自己相互作用、2波相互作用、3波相互作用など）を起こす。高次相関の一つとして相互スペクトルを以下のように定義する：

$$C(\omega, \omega', k, k') = \langle b_1(\omega, k) b_2(\omega', k') b_3(\omega'', k'') \rangle$$

ここで $b_1, b_2, b_3$ はそれぞれの波の振幅、 $\langle \rangle$ はアンサンブル平均である。もしも角周波数 $\omega, \omega', \omega''$ 、また波数 $k, k', k''$ の間に何の関係もなければ、アンサンブル平均により相互スペクトルはゼロになる。一方、これらの波の一つが他の2つの波の相互作用により生まれたものであれば、共鳴条件

$$\omega + \omega' = \omega'', \quad k + k' = k''$$

が成り立つため、相互スペクトルは有限の値をとる。相互スペクトルを各波動の自己スペクトルを用いて規格化したものが相互コヒーレンスである。

上で、角周波数についての解析は、データ数が非常に多い時系列データの解析であり、困難はない。一方、波数についての解析は、データ数が人工衛星の数で決まるため、非常に

少なく、たとえばフーリエ変換と同様の手法により波数を評価しようとしても、有為な結果はえられない。

このため、Caponの方法として以下の方法が良く用いられる：使用するデータをいくつかの時系列サブセット（添字は省略）にわけ、それを

$$\mathbf{B}(t) = (B_1(t), \dots, B_n(t))$$

とする。ここに $n$ は観測点の数である。この時間ドメインのフーリエ変換を

$$\mathbf{B}(\omega) = (B_1(\omega), \dots, B_n(\omega))$$

とする。このサブセットについてのアンサンブル平均

$$R(\omega) = \langle \mathbf{B}(\omega) \cdot \mathbf{B}^*(\omega) \rangle$$

を定義する。また、各観測点（人工衛星の位置）を $\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_n$ として、位相ベクトル

$$\mathbf{H}(\mathbf{k}) = (\exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_1), \dots, \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_n))$$

を定義する。これを用いてCaponの重みベクトル

$$\mathbf{W}(\omega) = \mathbf{R}^{-1}(\omega) \mathbf{H}(\mathbf{k}) / \mathbf{H}^*(\mathbf{k}) \mathbf{R}^{-1}(\omega) \mathbf{H}(\mathbf{k})$$

を定義し、これによりスペクトル

$$b(\omega, \mathbf{k}) = \mathbf{W}^*(\omega, \mathbf{k}) \cdot \mathbf{B}(\omega)$$

を求める。図1にこの方法(Capon)による波数推定とフーリエ変換(BF)による比較を示す。

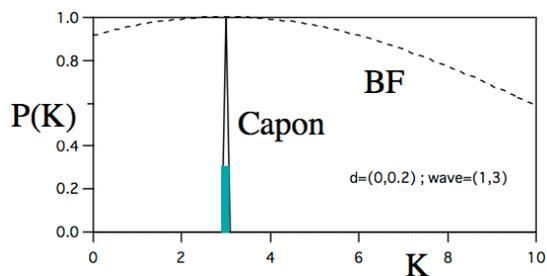


図1：Capon法とBF法（フーリエ変換）による波数推定の比較

相互スペクトルの計算の際、時間ドメインでは通常のフーリエ変換、空間ドメインではフーリエ変換のかわりに上で定義したCaponの重みベクトルをもちいることにより、精度のよい相互スペクトルが定義できる。これを

用いて、実際の人工衛星データの解析および計算機シミュレーションにより得られたデータの解析を行い、波動間相互作用がある場合には、これを有為に検出できることを確認した。また、相互スペクトルおよび相互コヒーレンスの精度、ノイズの影響、さらに乱流中に存在する卓越する波動モードの数との関連について検討を行った。

図2に地球磁気圏衝撃波上流域での Cluster 衛星（4機編隊）により得られたデータから評価した相互スペクトルを示す（Narita et al., 2008 より）。使用したのは背景磁場に対して垂直な磁場成分と電子密度データであり、2つのアルフヴェン波（垂直磁場の変動を伴う）と音波（密度変動を伴う）が非線形結合することを利用している。

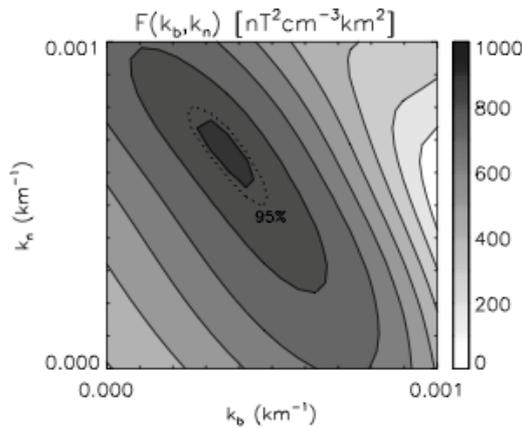


図2：磁気圏衝撃波上流域でのクラスター衛星データを用いて評価した相互スペクトル

(3) クラスタ衛星(4点観測)など、観測点の数が比較的少数の場合と、近い将来計画されている数10地点以上の多点観測の場合とでは、波数決定、高次統計解析のいずれにおいても、有効な手法が異なることを見いだした。これに関しても、精度、雑音に対する脆弱性などの観点から、手法の比較検討を行った。

図3に、特に Capon の方法(上図)と MEM (最大エントロピー法、下図)法による波数推定の比較例をあげる。図の横軸は波数、縦軸は波動のパワー、図中の数字は観測点の数である。観測点数が少数の場合には Capon 法が優れていることがわかる。観測点数が多くなると MEM 法でも波動モードの分離が可能となる。

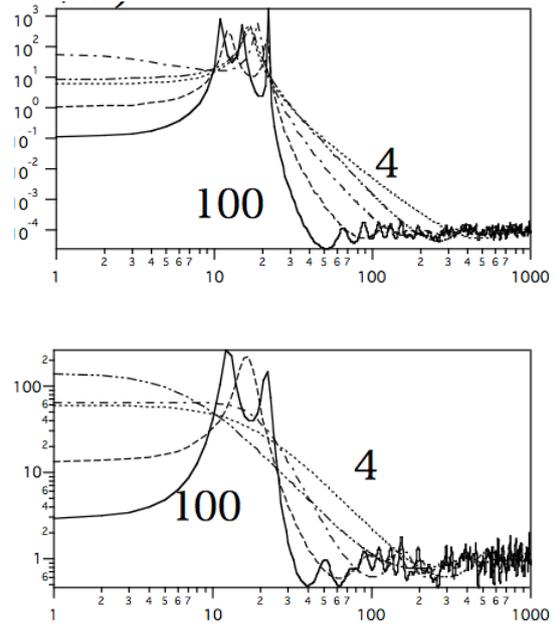


図3：Capon 法と MEM 法による波数推定の比較

## 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15件)

- ① Y. Nariyuki, T. Hada, K. Tsubouchi, Heating and acceleration of ions in nonresonant Alfvénic turbulence, Phys. Plasmas, 査読有, Vol.17, No.7, 2010, pp. 072301-072301-5
- ② K. Meziane, A. Hamza, M. Wilber, M. Lee, C. Mazelle, E. Lucek, T. Hada, A. Markowitch: "Effect of shock normal orientation fluctuations on field-aligned beam distributions" The Cluster Active Archive, ed. by H. Laakso, M. Taylor, and C. Escoubet, 査読有, Springer. 2010, pp. 349-362
- ③ F. A. Asenjo, V. Munoz, J. A. Valdivia, T. Hada, Circularly polarized wave propagation in magnetofluid dynamics for relativistic electron-positron plasmas, Phys. Plasmas, 査読有, Vol.16, No.12, 2009, 122108-122108-5
- ④ Y. Nariyuki, T. Hada, K. Tsubouchi: "Parametric instabilities of circularly polarized Alfvén waves in plasmas with beam protons" J. Geophys. Res, 査読有, Vol.114, No.A7, 2009,

doi:A07102

- ⑤ S. Shinohara, T. Hada, et al (8authors): "Development of high-density helicon plasma sources and their applications" Physics of Plasmas, 査読有, Vol.16, No. 5, 2009, 057104(10)
- ⑥ A. Felipe, V. Munoz, J. Valdivia, T. Hada: "Circularly polarized wave propagation in magnetofluid dynamics for relativistic electron-positron plasmas" Physics of Plasmas, 査読有, Vol.16, No.12, 2009, doi:122108(5)
- ⑦ F. Otsuka, T. Hada: "Cross-field diffusion of cosmic rays in two-dimensional magnetic field turbulence models" The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 697, No. 1, 2009, 886-899
- ⑧ S. Matsukiyo, T. Hada: "Relativistic particle acceleration in developing Alfvén turbulence" The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 692 No. 2, 2009, 1004-1012
- ⑨ G. Sanchez-Arriaga, T. Hada, Y. Nariyuki: "Truncation model in the triple-degenerate derivative nonlinear Schroedinger equation" Physics of Plasmas, 査読有, Vol.16, No. 4, 2009, 042303(9)
- ⑩ G. Sanchez-Arriaga, T. Hada, Y. Nariyuki: "The truncation model of the derivative nonlinear Schroedinger equation" Physics of Plasmas, 査読有, Vol.16, No.4, 2009, 042302(8)
- ⑪ D. Koga, A. Chian, T. Hada, E. Rempel: "Experimental evidence of phase coherence of magnetohydrodynamic turbulence in the solar wind : GEOTAIL satellite data" Phil. Trans. Royal Soc. A, 査読有, Vol. 366, No. 1864, 2008, 447-457
- ⑫ Y. Nariyuki, S. Matsukiyo, T. Hada: "Parametric instabilities of large-amplitude parallel propagating Alfvén waves : 2D PIC simulation" New Journal of Physics, 査読有, Vol.10 No. 8, 2008, doi:083004
- ⑬ Y. Nariyuki, T. Hada, K. Tsubouchi: "On nonlinear evolution of Alfvénic turbulence in low beta plasmas" Physics of Plasmas, 査読有, Vol.15, No.10, 2008, 114502-114502-4
- ⑭ Y. Kuramitsu, T. Hada: "Nonadiabatic interaction between a charged particle and an MHD pulse" Nonlinear Processes in Geophysics, 査読有, Vol.15, No. 2, 2008, 265-273
- ⑮ Y. Narita, K. Glassmeier, P. Decreau, T. Hada, Y. Nariyuki: "Evaluation of bispectrum in the wave number domain based on multi-spacecraft measurements" Annales Geophysics, 査読有, Vol.26, No.11, 2008, 3389-3393
- [学会発表] (計 11 件)
- ① T. Hada, Y. Nariyuki, Y. Narita: "Nonlinear interactions of foreshock MHD waves: a tutorial review", The 9th International School for Space Simulations. (20090703). St. Quentin en Yvelines, France
- ② T. Hada: "Diffusive shock acceleration of cosmic rays with non-Gaussian transport" The 8th International Nonlinear Wave Workshop. (20100303). La Jolla 市, アメリカ合衆国
- ③ T. Hada: "Nonlinear magnetohydrodynamic waves in the earth's foreshock region" International Gifu Workshop on Wave Turbulence. (20090326). 岐阜市
- ④ T. Hada: "Foreshock wave turbulence", ISSI workshop on shock acceleration using strong turbulence methods. (20090304). Bern, Switzerland
- ⑤ 神代天, 羽田亨, 成行泰裕, 梅田隆行: "準平行伝播 Alfvén 波の自己変調不安定性のヴラソフシミュレーション" 地球磁気圏・地球惑星圏学会総会. (20081011). 仙台市
- ⑥ Y. Nariyuki, T. Hada, K. Tsubouchi: "Parametric instabilities of incoherent Alfvén waves in the solar wind" AOGS 2008 Annual General Meeting. (20080620). 釜山市(大韓民国)
- ⑦ T. Hada, Y. Nariyuki: "Effects of dissipation in parametric processes of

Alfven waves" AOGS 2008 Annual General Meeting. (20080620). 釜山市(大韓民国)

- ⑧ T. Kumashiro, T. Hada, Y. Nariyuki, T. Umeda: "Vlasov simulation of finite amplitude magnetohydrodynamic waves in the solar wind : Parametric instability of Alfven waves" 日本地球惑星科学連合 2008 大会. (20080529). 幕張市
- ⑨ T. Hada, Y. Nariyuki: "Effects of dissipation in parametric processes of Alfven waves" 日本地球惑星科学連合 2008 大会. (20080530). 幕張市
- ⑩ Y. Nariyuki, T. Hada, K. Tsubouchi: "Parametric instabilities of coherent and incoherent Alfven waves" Seventh International Workshop on Nonlinear Waves and Turbulence in Space Plasmas. (20080424). Beaulieu 市(フランス)
- ⑪ T. Hada, Y. Nariyuki, Y. Narita: "Bi-spectrum analysis of MHD turbulence using multi-spacecraft data" International Congress on Plasma Physics 2008. (20080911). 福岡市国際会議場

[その他]

ホームページ等

なし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

羽田 亨 (HADA TOHRU)  
九州大学・大学院総合理工学研究院・教授  
研究者番号：30218490

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし