

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18540488  
 研究課題名（和文） 非線形磁気音波の伝播と粒子加速の3次元粒子シミュレーション  
 研究課題名（英文） Three dimensional particle simulations of nonlinear magnetosonic waves and particle acceleration  
 研究代表者  
 樋田 美栄子 (TOIDA MIEKO)  
 名古屋大学・大学院理学研究科・助教  
 研究者番号：00273219

研究成果の概要：3次元相対論的電磁粒子コードの開発し、それを用いて非線形磁気音波と粒子加速に関する大規模シミュレーション研究を開始した。そして、多種類のイオンを含むプラズマ中の非線形磁気音波の伝播とイオンの加速について、イオンの組成の効果を明らかにした。さらに、円筒状の波面を持つ衝撃波についてシミュレーションを行い、衝撃波による電子の捕捉と加速における衝撃波面の曲率の効果を解明した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	630,000	4,130,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ物理

## 1. 研究開始当初の背景

衝突による散逸がほとんど効かない無衝突プラズマ中で衝撃波がいかに形成されるかはプラズマ物理の重要な課題である。そして衝撃波によるプラズマの加速・加熱は、宇宙と核融合の両方の分野で注目されており、理論・シミュレーション、室内実験、衛星観測等によって、多くの研究が行われている。その中でも特に、粒子運動とプラズマの集団運動を自己無撞着に解く粒子シミュレーションは、衝撃波の伝播と構造形成、粒子加速といった一連の非線形現象を解明するため

の最も有力な手法であり、それを用いてこれまで、非線形磁気音波による様々な粒子加速現象が示されてきた。これら従来のシミュレーション研究の多くは、空間1次元のコードによるものであり、衝撃波の多次元構造や被加速粒子による不安定性等の効果などを取り扱うことが出来なかった。しかし、最新鋭のスーパーコンピュータの性能を最大限活かすようなコードを開発すれば、衝撃波に関する物理的意義のある多次元粒子シミュレーション研究が可能になりつつあった。

## 2. 研究の目的

3次元相対論的電磁粒子コードを開発し、それを用いて非線形磁気音波の伝播と粒子加速についての大規模粒子シミュレーション研究を開始する。衝撃波の構造形成とエネルギー輸送における多次元効果について新たな知見を得ることを、研究の目的とする。特に、被加速粒子による不安定性や衝撃波面の曲率の効果を明らかにすることを目指す。また、宇宙も核融合のプラズマも多種類のイオンを含むが、それらのイオン組成が異なることに注目し、非線形磁気音波の伝播とイオン加速におけるイオン組成の効果を解明する。

## 3. 研究の方法

多次元の相対論的電磁粒子シミュレーションを、スーパーコンピュータで実行する。以下、シミュレーションコードの概要を記す。

### (1) シミュレーションモデル

イオンと電子を共に粒子として扱う。それら粒子の相対論的運動方程式とMaxwell方程式を連立して解く。無衝突衝撃波においては電子も本質的な役割を果たすので、電子・イオンともにドリフト近似などは行わない。また、速度は3次元とするが、空間は2あるいは3次元とする。

### (2) コードの高速化

シミュレーションの実行には、核融合科学研究所と名古屋大学の最新鋭のスーパーコンピュータを利用する。いずれも共有・分散メモリ型の並列計算機であるため、コードの並列化が必要である。MPIとOpenMPを用いて、並列計算を行う。

## 4. 研究成果

### (1) シミュレーションコードの開発

多次元（速度は3次元、空間は2あるいは3次元）の相対論的電磁粒子コードを作成し、並列計算による高速化とスーパーコンピュータに対する最適化を行い、実行効率の高いシミュレーションコードを完成させた。また、データ解析や可視化の手法についても開発し、大規模シミュレーションを用いた非線形磁気音波の伝播と粒子加速についての研究を開始した。

### (2) 磁気音波におけるイオン組成の効果

核融合と宇宙のプラズマは共に多種類のイオンを含んでいる。しかし、それらのイオ

ンの密度比やサイクロトロン周波数の比は異なる。本研究では、非線形磁気音波におけるイオン組成の効果を理論とシミュレーションで調べた。

2種類のイオンを含むプラズマ中の磁気音波には、低周波と高周波の2種類のモードが存在する[M. Toida and Y. Ohsawa: J. Phys. Soc. Jpn. **63**, 573 (1994)]。低周波モードの共鳴周波数 $\omega_{\pm}$ と高周波モードのカットオフ周波数 $\omega_{+0}$ はイオンの組成に依存し、 $\Delta_{\omega} = (\omega_{+0} - \omega_{\pm}) / \omega_{+0}$ の値は2つのイオンの電荷密度が等しい時に最大となることが分かった。また、低周波モードの非線形の振る舞いはKdV方程式で記述されるが、そのKdV方程式が有効であるのは、低周波モードの非線形パルスの振幅 $\varepsilon$ が $\varepsilon < 2\Delta_{\omega}$ の範囲であることを理論的に示した。これは、 $\varepsilon > 2\Delta_{\omega}$ となると、低周波モードと高周波モードの非線形カップリングが起こることを予測する。次に、電磁粒子シミュレーションを用いて、長波長の低周波モードの擾乱の非線形発展を、様々なイオン密度比やサイクロトロン周波数比を持つプラズマについて調べ、この理論予測が正しいことを確かめた。特に、低周波モードの非線形パルスの振幅 $\varepsilon$ が $2\Delta_{\omega}$ を超えると、その非線形パルスから高周波モードの非線形パルスが生成されることを示した。

### (3) 衝撃波加速におけるイオン組成の効果

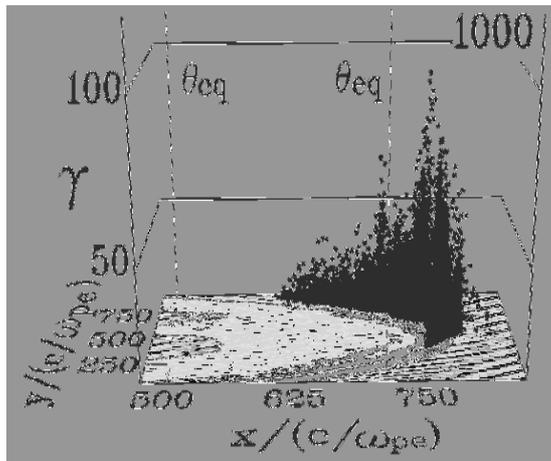
上記2)の研究を発展させ、 $\Delta_{\omega}$ よりもずっと大きい振幅の衝撃波の構造形成とイオンの加速を、3次元粒子シミュレーションで調べた。 $\Delta_{\omega}$ が小さいプラズマでは、高周波モードの衝撃波が形成されイオンを加速するが、 $\Delta_{\omega}$ が大きいプラズマでは高周波モードと低周波モードの両方の衝撃波が形成され、それらがイオンの加速に寄与することを明らかにした。さらに後者の場合は、低周波モードの存在が、重イオンの加速を促進することを示した。

また、以前の研究[M. Toida and Y. Ohsawa: Solar Physics **171**, 161 (1997)]で1次元粒子シミュレーションを用いて、主成分が軽イオン、副成分が重イオンのプラズマでは、衝撃波中の縦電場が軽イオンを加速し、横電場が重イオンを加速することが示されていた。加速イオンは2流体不安定性などを引き起こしうるが、それらの不安定性は1次元系では扱えない。本研究の3次元シミュレーションで、不安定性が起こる状況下においても、イオンの加速が起こることを実証した。

(4) 斜め衝撃波による電子の加速と捕捉における波面の曲率の効果

磁場に対して斜めに伝播する衝撃波は、一部の電子を捕捉し超相対論的エネルギーに加速することが、理論と1次元粒子シミュレーションで示されている[N. Bessho and Y. Ohsawa: Phys. Plasmas **6** (1999) 3076]。この研究を拡張し、衝撃波面の効果を2次元粒子シミュレーションで調べ、円柱状の波面の衝撃波においても電子の捕捉と超相対論的な加速が起こることを実証した。さらに、波面に曲率があると、平面波の場合とは違って、捕捉粒子の大部分が高エネルギーのまま波面から解放されることを示した。そしてこの解放は、波面の法線と外部磁場とのなす角が粒子軌道に沿って変化することによって引き起こされることを解明した。

下図は、シミュレーション結果であり、底面には磁場の等高線を、黒点は高エネルギー粒子の分布であり、垂直軸はローレンツ因子 $\gamma$ を示す。波面付近で $\gamma \sim 100$ の超相対論的電子が生成されているのに加え、いくつかの粒子が高エネルギーのまま衝撃波上流へと解放されている。



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7件)

- 1) Mieko Toida, Ryohei Honma and Yukiharu Ohsawa: "Repeated Interactions of Thermal Ions with an Oblique Shock Wave," to be published in Journal of Plasma and Fusion Research (2009) 査読有.

- 2) Mieko Toida, Hiroyuki Higashino and Yukiharu Ohsawa: "Parametric Studies of High- and Low-Frequency Magnetosonic Waves and Ion Acceleration in Two-Ion-Species Plasmas," to be published in Journal of Plasma and Fusion Research (2009) 査読有.
- 3) Mieko Toida, Hiroyuki Higashino and Yukiharu Ohsawa: "Effect of ion composition on ion acceleration by magnetosonic shock waves," Physics of Plasmas, Vol. 15, No.9 (2008) 092305 (10pages) 査読有.
- 4) Mieko Toida, Masayuki Ueno and Yukiharu Ohsawa: "Detrapping of energetic electrons from curved shock front", Journal of Physical Society of Japan, Vol.77, No.8, (2008) 084501 (5pages) 査読有.
- 5) Mieko Toida, Hiroyuki Higashino and Yukiharu Ohsawa: "Effect of ion composition on magnetosonic waves," Journal of Physical Society of Japan, Vol. 76, No.10 (2007) 104502 (6pages) 査読有.
- 6) Mieko Toida, Takashi Yoshiya, and Yukiharu Ohsawa: "Damping of Magnetohydrodynamic Disturbances in Multi-Ion-Species Plasmas," Physics of Plasmas, Vol. 13 (2006) 042302 (8pages) 査読有.
- 7) Mieko Toida, and Yukiharu Ohsawa: "Multi-Ion-Species Effects on Low-Frequency Electromagnetic Fluctuations and Energy Transport," J. Plasma Physics, Vol. 72, part6 (2006) pp.895-899 査読有.

[学会発表] (計 23 件)

- 1) 斜め衝撃波中の加速電子による電磁場形成とその効果  
樋田美栄子、式井建太  
日本物理学会  
2009年 3月29日 立教大学
- 2) 磁気音波衝撃波による粒子加速に対するイオン組成の効果  
樋田美栄子、東野浩之、大澤幸治  
プラズマ科学シンポジウム 2009  
2009年2月2日-4日 名古屋大学

- 3) 衝撃波による粒子加速についての多次元粒子シミュレーション  
樋田美栄子  
 第2回シミュレーション科学シンポジウム 2008年 9月25日  
 多治見市産業文化センター
- 4) 斜め衝撃波による熱的イオンの多段加速  
樋田美栄子、本間亮平、大澤幸治：  
 日本物理学会  
 2008年9月23日 岩手大学
- 5) Parametric Studies of High- and Low-Frequency Magnetosonic Waves and Ion Acceleration in Two-Ion-Species Plasmas  
Mieko Toida, Hiroyuki Higashino, and Yukiharu Ohsawa,  
 14<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics 2008,  
 8 September 2008, Hakata, Japan
- 6) Repeated Interactions of Thermal Ions with an Oblique Shock Wave  
Mieko Toida, Ryohei Honma, and Yukiharu Ohsawa,  
 14<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics 2008,  
 9 September 2008, Hakata, Japan
- 7) 非線形磁気音波によるイオン加速における低周波モードの効果  
樋田美栄子、東野浩之、大澤幸治  
 日本物理学会  
 2008年 3月23日 近畿大学
- 8) 衝撃波中の強電磁場による粒子加速 II  
樋田美栄子  
 「シミュレーション科学共同研究会」  
 2008年2月6日 核融合科学研究所
- 9) プラズマ中のエネルギー輸送と粒子加速  
樋田美栄子  
 名古屋大学理学部 物理学教室講演会  
 2007年12月3日 名古屋大学
- 10) Effect of ion composition on magnetosonic waves,  
Mieko Toida, Hiyoruki Higashino and Yukiharu Ohsawa, The 49th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics (American Physical Society), USA, 13 Nov. 2007 Orlando, Florida,.
- 11) Simulation studies of electron acceleration by an oblique shock wave with a curved front,  
Mieko Toida, Masayuki Ueno, and Yukiharu Ohsawa,  
 20th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas,  
 USA, 11 Oct.. 2007, Austin Texas.
- 12) 斜め衝撃波による電子の加速と捕捉・解放  
樋田美栄子、上野雅之、大澤幸治  
 日本天文学会秋季年会  
 2007年9月26日 岐阜大学
- 13) 衝撃波によるイオン加速に対する波面の曲率の効果：シミュレーション  
 本間亮平、樋田美栄子、大澤幸治  
 日本物理学会  
 2007年9月23日 北海道大学
- 14) 衝撃波によるイオン加速に対する波面の曲率の効果：理論  
樋田美栄子、本間亮平、大澤幸治  
 日本物理学会  
 2007年 9月23日 北海道大学
- 15) 非線形磁気音波におけるイオン組成の効果  
樋田美栄子、東野浩之、大澤幸治  
 プラズマ科学のフロンティア 2007  
 2007年8月2日 核融合科学研究所
- 16) 斜め衝撃波による電子の加速と捕捉・解放  
樋田美栄子  
 名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 宇宙ブロック研究発表会  
 2007年4月3日 名古屋大学
- 17) 非線形磁気音波とイオン加速における組成の効果  
樋田美栄子、東野浩之、大澤幸治  
 日本物理学会  
 2007年 3月19日 鹿児島大学
- 18) 衝撃波中の強電磁場による粒子加速  
樋田美栄子  
 「プラズマ・核融合研究における High Performance Computing ワークショップ」NIFS 共同研究「大型シミュレーション研究会」  
 2007年1月23日 核融合科学研究所
- 19) 曲がった波面を持つ衝撃波による電子の加速  
樋田美栄子、上野雅之、大澤幸治  
 プラズマ・核融合学会 第23回年会  
 2006年11月30日 筑波大学
- 20) 無衝突衝撃波によるプラズマ加熱：イオン組成に対する依存性  
樋田美栄子、東野浩之、大澤幸治  
 プラズマ・核融合学会 第23回年会  
 2006年11月28日 筑波大学
- 21) 非線形磁気音波と粒子加速のシミュレーション  
樋田美栄子  
 「重力多体系・プラズマ系における連結

階層シミュレーション研究」および  
「自然界と実験室のプラズマ研究の交  
流」研究会

2006年11月21日 メルパルク名古屋

- 22) 斜め衝撃波中の捕捉電子の多次元効果  
による解放

上野雅之、樋田美栄子、大澤幸治

日本物理学会

2006年9月23日 千葉大学

- 23) 多種イオンプラズマ中の低周波電磁揺  
動とプラズマ加熱

樋田美栄子、吉谷嵩志、大澤幸治

日本地球惑星科学連合

2006年5月14日 幕張国際会議場

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

樋田 美栄子 (TOIDA MIEKO)

名古屋大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：00273219

### (2) 研究協力者

名古屋大学・大学院理学研究科・大学院生

吉谷嵩志、上野雅之、東野浩之、

本間亮平、式井建太