

平成 22 年 5 月 7 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20740136

研究課題名 (和文) 粒子シミュレーションによる無衝突衝撃波のダイナミクスと粒子加速の研究

研究課題名 (英文) Study of collisionless shocks and non-thermal particle acceleration by using particle-in-cell simulation

研究代表者

加藤 恒彦 (KATO TSUNEHIKO)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員

研究者番号：90413955

研究成果の概要 (和文)：宇宙の超新星残骸などに見られる、電子・陽子プラズマ中の無衝突衝撃波の形成過程を、運動論的な電磁粒子シミュレーションを用いて研究した。その結果、プラズマ中に背景磁場が無い場合には、ワイベル不安定性が散逸を担う衝撃波が形成されることが示され、背景磁場がある場合は、磁場が弱くなるに従ってワイベル不安定性が作る磁場が重要となり、上流にフィラメント状構造、下流に乱流的磁場が作られることがわかった。

研究成果の概要 (英文)：We investigated non-relativistic collisionless shocks in electron-ion plasmas which are driven, for example, around supernova remnants by using kinetic PIC simulations. It was shown that in unmagnetized plasmas a certain kind of collisionless shock in which the Weibel instability provides the effective dissipation mechanism for the collisionless shock is formed. On the other hand, in weakly magnetized plasmas, it was shown that the magnetic fields generated by the Weibel instability also becomes important and lead to the generation of filamentary structures in the upstream region and of tangle magnetic fields in the downstream region.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：プラズマ、衝撃波、粒子加速、不安定性、磁場生成、宇宙物理学、レーザー実験

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間の体積の多くの部分は無衝突プラズマと呼ばれる荷電粒子間のクーロン衝突がほとんど起きないプラズマで満たされている。宇宙空間で超新星爆発などの爆発的

な現象が起きると、このような無衝突プラズマ中に衝撃波が発生する。これは無衝突衝撃波と呼ばれ、その名の通り、その散逸は粒子間の衝突ではなく電磁場の変動を伴った運動論的な集団現象により担われるものであ

る。

近年のX線による観測により、超新星残骸の衝撃波で電子が非常に高エネルギー（約 10^{14} eV）にまで加速されていることがそのシンクロトン放射の検出により明らかになり、このことは同時に地球に降り注ぐ宇宙線の起源が超新星残骸の衝撃波であることの間接的な証拠であると考えられている。また同様なX線観測によりこのような衝撃波の周辺で磁場が100倍近くも増幅されていることも示唆されている。このように、無衝突衝撃波は、その形成機構のみならず、粒子加速や磁場生成という観点からも宇宙物理学的に重要な現象である。

無衝突衝撃波の形成過程は、無衝突プラズマ中の非常に複雑な運動論的非線形現象であり、理論的には主に背景磁場がある場合について電磁粒子シミュレーションやハイブリッドシミュレーションと呼ばれるシミュレーションにより研究されてきた。しかし、超新星残骸の衝撃波のようにマッハ数の非常に大きな衝撃波に関しては研究はまだ発展途上であり、その物理過程は十分には理解されていない。一方、長い間、背景磁場が無い場合には無衝突衝撃波は形成されないと考えられてきたが、近年、背景磁場を持たない電子・陽子プラズマ中にも、ワイベル不安定性というプラズマ中の不安定性が衝撃波の散逸機構を担う、「不安定性駆動型」という新しい種類の無衝突衝撃波が形成されることが研究代表者らによる2次元の電磁粒子シミュレーションにより示された。この不安定性は1次元シミュレーションでは取り扱えないため、多次元のシミュレーションという点が本質的であった。このような種類の衝撃波は、背景磁場が無いか非常に弱い場合には、電子・陽子プラズマにおいても形成される可能性がある。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、超新星残骸の衝撃波を念頭に置いて、マッハ数が100程度の電子・陽子プラズマ中の非相対論的な無衝突衝撃波（衝撃波の速度は秒速数千キロから数万キロ）の形成過程、およびそこで起きると考えられる粒子加速や磁場生成の過程を、運動論的な観点から明らかにすることである。背景磁場の強さが衝撃波の構造に大きく影響を与えると考えられるので、背景磁場が無い場合と、ある場合の両方について調べる。

3. 研究の方法

無衝突衝撃波は、無衝突プラズマ中に形成される衝撃波であり、荷電粒子と電磁場の集団的現象が重要となる現象である。そのため、粒子と電磁場との相互作用や粒子の分布関数などを運動論的にきちんと取り扱うこと

ができる電磁粒子シミュレーション（PICシミュレーションとも呼ばれる）を主軸として研究を行った。

4. 研究成果

平成20年度には、まず大阪大学に導入されたスーパーコンピュータSX9用の電磁粒子プラズマシミュレーションコードの開発および最適化を行った。そしてそのコードを用いて、主に背景磁場が無い場合の電子・陽子プラズマ中の非相対論的な無衝突衝撃波の大規模2次元シミュレーションを行った。

背景磁場が無い場合の計算では、陽子と電子の質量比を数十から数百程度、衝撃波の速度を秒速数万キロ程度で様々に変えた場合についてシミュレーションを行い、いずれの場合もワイベル不安定性が発生して強い磁場を作り、それが散逸を担って無衝突衝撃波が形成されることを示した（図1を参照）。この結果は、宇宙にはこのような種類の「不安定性駆動型」の衝撃波が存在していることを示したという点で重要である。また、このような衝撃波の遷移層の幅は、ワイベル不安定性により作られる電流フィラメントの合体の過程で決まることや、それが衝撃波の速度やシミュレーションで使用した陽子・電子質量比にはあまりよらず陽子の慣性長の約100倍程度になることなどがわかった。なお、これらのシミュレーションでは、効率的な粒子加速は見られなかった。この研究の主な内容は、Astrophysical Journal誌に掲載されたほか、国際会議で1件の招待講演を行った。

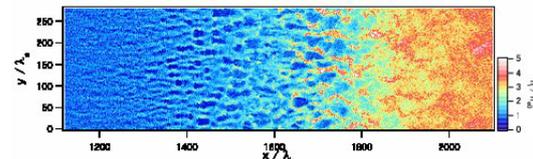


図1：背景磁場が無い場合の無衝突衝撃波の2次元シミュレーション。色は陽子の数密度を表す。

平成21年度には、開発した電磁粒子シミュレーションコードを用いて、主に垂直な背景磁場がある場合の無衝突衝撃波の形成過程のシミュレーションを行った。また、関連して、電子と陽子の温度に差がある場合に形成される静電衝撃波についてもシミュレーションを行った。

背景磁場がある場合のシミュレーションでは、磁場の強さを超新星残骸の場合に相当する非常に弱い値に取り、計算を行った（図2を参照）。その結果、衝撃波の遷移層内で、圧縮された背景磁場に匹敵する強さの磁場がワイベル型不安定性により作られ、それにより粒子が等方的に散乱され、下流の粒子の速度分布はほぼ等方的になることがわかった。

下流の電子と陽子のエネルギー分布はそれぞれほぼマクスウェル分布となり、Power-law的な粒子加速は見られなかった。また、下流の電子と陽子の温度は異なり、電子温度は陽子温度の約40%であった。ただし、この比の値はシミュレーションで使った陽子と電子の質量比 (30) に依存すると考えられ、今後より現実に近い質量比でのシミュレーションが望まれる。衝撃波の上流および下流ではワイベル型不安定性により電流フィラメントが多数作られ、上流ではフィラメント状の密度構造が、下流ではこのフィラメントにより乱れた磁場が作られることも明らかになった。また、この弱い背景磁場がある場合の無衝突衝撃波形成過程は、レーザー実験においても実験可能なパラメータであることを示した。この研究については、国際会議に於いて2件の招待講演をしたほか、論文を *Astrophysical Journal* 誌に投稿中である。

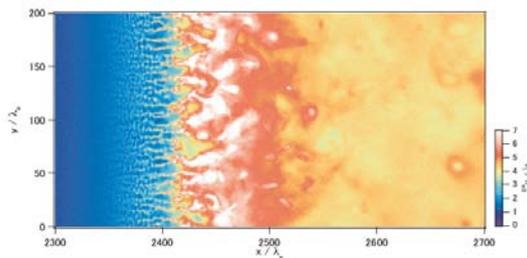


図2：弱い背景磁場がある場合の無衝突衝撃波の2次元シミュレーション。色は陽子の数密度を表す。

静電衝撃波に関するシミュレーションでは、現実的な質量比 1836 と、超新星残骸の衝撃波の速度に近い秒速 3000 キロの流速を用いて計算した。その結果、初期の電子・陽子温度比が9程度の場合、静電衝撃波上流で静電イオン-イオン不安定性が発達し、それによる陽子密度の揺らぎにより最終的には衝撃波自体が破壊されることがわかった。また同時にワイベル型不安定性も成長し、長時間の後にはワイベル不安定性駆動型の衝撃波が形成される可能性を示した。この研究に関する論文は *Physics of Plasmas* 誌に掲載された。

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 Tsunehiko N. Kato and Hideaki Takabe, “Electrostatic and electromagnetic instabilities associated with electrostatic shocks: two-dimensional parti-

cle-in-cell simulation”, *Physics of Plasmas*, 査読あり, 17, 2010, 032114 (1-9)

- ② 加藤恒彦、高部英明、「弱い背景磁場のある電子・イオンプラズマ中の非相対論的な無衝突衝撃波の2次元PICシミュレーション」、大阪大学サイバーメディアセンター計算機利用ニュース、査読なし、5、2009、3-6
- ③ Hideaki Takabe, Tsunehiko N. Kato et al. (47人中2番目), “High-Mach number collisionless shock and photo-ionized non-LTE plasma for laboratory astrophysics with intense lasers”, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 査読あり, 50, 2008, 124057(15pp)
- ④ Tsunehiko N. Kato and Hideaki Takabe, “Nonrelativistic Collisionless Shocks in Unmagnetized Electron-Ion Plasmas”, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読あり, 681, 2008, L93-L96

[学会発表] (計19件)

- ① 加藤恒彦、高部英明、「レーザー宇宙物理：弱い背景磁場中の非相対論的無衝突衝撃波」、日本天文学会2010年春季年会、2010年3月26日、広島大学東広島キャンパス (広島県東広島市)
- ② Tsunehiko N. Kato, Hideaki Takabe, “Non-relativistic collisionless shocks in unmagnetized and weakly magnetized plasmas”, 8th International Conference on High Energy Density Laboratory Astrophysics (HEDLA2010), 2010年3月15日, California Institute of Technology Pasadena, California, USA
- ③ Tsunehiko Kato, “Problems caused by the shape factor of particle: Numerical Cherenkov Radiation” (**Invited**), PIC Code Comparison Workshop, 2010年3月9日, Niels Bohr International Academy (Copenhagen, Denmark)

- ④ Tsunehiko Kato, Hideaki Takabe, “Nonrelativistic Collisionless Shocks in Weakly Magnetized Electron-Ion Plasmas: Two-Dimensional PIC Simulation”, Exploring Supernova Remnants and Pulsar Wind Nebulae in X-rays: before and after ASTRO-H, 2010年2月18日-19日, ISAS/JAXA(神奈川県相模原市)
- ⑤ 加藤恒彦、「弱い背景磁場中の非相対論的無衝突衝撃波」、第22回理論懇シンポジウム「2010年代の理論天文学」、2009年12月20日-22日、名古屋大学 野依記念学術交流館（愛知県名古屋市）
- ⑥ 加藤恒彦、「弱い背景磁場中の非相対論的衝撃波」、高エネルギー宇宙物理学研究会、2009年11月28日、国民宿舎みやじま杜の宿（広島県廿日市市）
- ⑦ Tsunehiko N. Kato, “Non-relativistic Collisionless Shocks in Unmagnetized and Weakly Magnetized Electron-Ion Plasmas” (**Invited**), 5th Korean Astrophysics Workshop, Shock Waves, Turbulence, and Particle Acceleration, 2009年11月19日, POSTECH (Pohang, Korea)
- ⑧ 加藤恒彦、「SX9を用いた無衝突衝撃波の大規模粒子シミュレーション」、大阪大学サイバーメディアセンター平成21年度スーパーコンピュータシンポジウム、2009年10月8日、大阪大学理工学図書館（大阪府吹田市）
- ⑨ Tsunehiko N. Kato, “Non-Relativistic Collisionless Shocks in Unmagnetized and Weakly Magnetized Electron-Ion Plasma” (**Invited**), Nonlinear Processes in Astrophysical Plasmas: Particle Acceleration, Magnetic Field Amplification, and Radiation Signatures, 2009年10月2日, Kavli Institute for Theoretical Physics (UCSB, Santa Barbara, California, USA)
- ⑩ Tsunehiko N. Kato, Hideaki Takabe, “Non-relativistic Collisionless Shocks in Electron-ion Plasmas”, 2009 International Conference on Laboratory Astrophysics, 2009年7月18日, Silk Road Dunhuang hotel(Dunhuang, Gansu, China)
- ⑪ 加藤恒彦、蔵満康浩、坂和洋一、高部英明、「電子・陽子プラズマ中の非相対論的無衝突衝撃波」、日本物理学会第64回年次大会、2009年3月29日、立教大学池袋キャンパス（東京都豊島区）
- ⑫ 加藤恒彦、坂和洋一、高部英明、「背景磁場のある電子・イオンプラズマ中の非相対論的無衝突衝撃波」、日本天文学会2009年春季年会、2009年3月27日、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス（大阪府堺市）
- ⑬ 加藤恒彦、「非相対論的な無衝突衝撃波における背景磁場の影響について」、第21回理論懇シンポジウム「理論天文学の将来」、2008年12月15-17日、国立天文台（東京都三鷹市）
- ⑭ 加藤恒彦、「無衝突衝撃波とWeibel不安定性」、科研費特定領域研究「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」第2回領域シンポジウム、2008年11月29日、国立天文台（東京都三鷹市）
- ⑮ 加藤恒彦、「無衝突衝撃波のPICシミュレーション」、高エネルギー宇宙物理学研究会、2008年11月16日、宮津ロイヤルホテル（京都府宮津市）
- ⑯ 加藤恒彦、蔵満康浩、坂和洋一、高部英明、「背景磁場の無い電子・イオンプラズマ中の非相対論的無衝突衝撃波」、

研究者番号：

日本天文学会2008年秋季年会、2008年9月12日、岡山理科大学（岡山県岡山市）

- ⑰ 加藤恒彦、「PIC 法による無衝突衝撃波のシミュレーションと “Numerical Cherenkov Radiation” について」(招待講演)、先駆的科学計算に関するフォーラム2008～天文科学～、2008年7月21日、九州大学情報基盤研究開発センター（福岡県福岡市）
- ⑱ Tsunehiko N. Kato, “Nonrelativistic Collisionless Shocks in Unmagnetized Electron-ion Plasmas” (Invited), 2008 2nd Laboratory, Space, and Astrophysical Plasma Workshop, 2008年6月22日, POSTECH (Pohang, Korea)
- ⑲ Tsunehiko N. Kato, Yasuhiro Kuramitsu, Youichi Sakawa, and Hideaki Takabe, “Non-relativistic Collisionless shocks in unmagnetized electron-ion plasmas”, American Physical Society, April meeting 2008年4月12日, Hyatt Regency St.Louis Riverfront (St.Louis, Missouri, USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 恒彦 (KATO TSUNEHIKO)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員
研究者番号：90413955

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()