

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 15 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400266

研究課題名(和文)高マッハ数衝撃波の多次元構造中における大振幅電磁場擾乱励起と電子加速機構の解明

研究課題名(英文) Electron accelerations associated with magnetic turbulence in high-Mach-number collision-less shocks

研究代表者

松本 洋介 (Matsumoto, Yosuke)

千葉大学・大学院理学研究科・特任准教授

研究者番号：20397475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマ粒子シミュレーションをスーパーコンピュータ「京」上で実施し、多次元高マッハ数衝撃波構造を明らかにした。衝撃波前方領域では電子スケールの静電不安定、遷移領域においてはイオンスケールの磁気乱流が高強度で卓越することが明らかになった。特に高いマッハ数の条件の下では( $M \sim 40$ )、遷移領域における自発的乱流リコネクションが電子加速及び加熱に重要であることが明らかになった(Matsumoto et al., Science, 2015)。3次元計算においては、遷移領域における磁気乱流との相互作用による、統計的ドリフト加速が電子をより高エネルギーまで加速させることが新たに明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We have examined multidimensional structures of high-Mach-number shocks by means of ab initio particle-in-cell simulations using the supercomputer K. We found that large-amplitude electrostatic waves at the leading edge and the magnetic turbulence in the transition layer coexist in such a strong-shock structure. In particular, spontaneous turbulent reconnection in the transition layer was found to be important for energizing electrons under sufficiently high Mach number condition (Matsumoto et al., Science, 2015). Recent 3D simulations also revealed a stochastic drift acceleration to be essentially important for producing relativistic electrons.

研究分野：天体プラズマ物理学

キーワード：宇宙線加速 衝撃波 プラズマ PICシミュレーション 乱流リコネクション 大規模数値計算

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙から飛来する非熱的な高エネルギー粒子の起源は、宇宙物理学の大きな謎のひとつとして挙げられる。X線観測による超新星残骸(SNR)衝撃波でのシンクロトロン放射の発見は、衝撃波近傍において電子が超相対論的エネルギーまで加速されていることを強く示唆しており[Koyama et al., 1995]、現在では無衝突衝撃波は高エネルギー粒子の加速源として広く認識されている。粒子加速機構については、衝撃波統計加速(1次フェルミ加速)が標準理論として知られている[Bell, 1987; Blandford & Eichler, 1987]。本理論では、荷電粒子とMHD乱流場とが繰り返し相互作用する必要があることから、運動スケールの大きいイオンに対して効率的に働く一方、回旋半径が極めて小さい熱的電子はMHD波動によって散乱を受けることができないため、統計加速の段階に至るための、前段階加速機構の解明が必要とされている(電子注入問題)。

我々は電子の前段階加速メカニズムとして有力な候補として挙げられている、「電子衝撃波波乗り加速」が有効に働く条件を理論的考察と2次元PICシミュレーションから見出した[Matsumoto et al., ApJ, 2012]。その結果、アルヴェンマッハ数  $M_A > (M/m)^{2/3}$  の条件を導き、より現実的なイオン-電子質量比の下での高マッハ数衝撃波計算の必要性を指摘した。これを踏まえ、非常に高いマッハ数 ( $M_A \sim 45$ ) の下で、大規模2次元PICシミュレーションを行った結果、様々な静電(ブンネマン・イオン音波)及び電磁(イオンワイベル)不安定性が同時に励起されるといった、これまでにない多次元衝撃波構造の描像と、それらに伴った効率的な電子加速を明らかにした[Matsumoto et al., PRL, 2013]。しかし、その計算の大規模さ故に、2次元かつ限られた磁場配位(完全垂直)でしか議論できておらず、磁場配位による依存性、3次元性の影響などの課題が残されたままである。

### 2. 研究の目的

本研究では、以下の順で、3つの達成目標を設定する。

1. 多次元衝撃波構造中での電子の前段階加速過程の解明

2. 高エネルギー粒子に対する散乱体として期待される電磁場励起機構の解明

3. 被加速粒子の衝撃波統計加速機構の実現  
電子の前段階加速機構として有力な候補である「電子衝撃波波乗り加速」の効率は、

上流電子と反射イオンの相互作用から励起される Buneman 不安定の振幅の大きさで左右され、 $M/m$  と  $M_A$  によって特徴づけられる。これまで  $M/m=225$ ,  $M_A \sim 45$  のパラメタでの高効率な電子波乗り加速が実現されることが我々の近年の研究によって確認されている。本課題では、より現実に近い高マッハ数・高

質量比のパラメタ ( $M/m=400$ ,  $M_A \sim 60$ ) に迫って、新しい加速機構の可能性、波乗り加速効率の検証を行うことにより、超新星残骸衝撃波のパラメタ領域 ( $M/m=1836$ ,  $M_A > 100$ ) において重要となりうる前段階加速メカニズムを明らかにすることを目的とする。また、前段階加速による電子注入率(熱的/非熱的粒子の比)の  $M/m$ ,  $M_A$  に対する依存性を明らかにすることを旨とする。

衝撃波統計加速理論で必要とされる散乱体としての電磁場励起機構を明らかにすることは、前段階加速を受けた電子がさらにエネルギーを得ていく過程を理解する上で重要である。電磁場の起源として、イオン温度異方性による不安定性や、衝撃波面でミラー反射した高エネルギー電子と上流プラズマとの相互作用が挙げられる。粒子の反射と波の上流への伝搬を特徴づけるパラメタは、衝撃波角(上流磁場ベクトルと衝撃波法線との角度)  $M_A$ ,  $M/m$  である。本課題では、 $M_A$ ,  $M/m$  を固定 ( $M/m=225$ ,  $M_A \sim 45$ ) し、複数の衝撃波角パラメタの下での2次元PICシミュレーションを行い、衝撃波角に対する電磁場の励起過程・振幅の依存性を明らかにすることを目的とする。

高マッハ数準垂直衝撃波の3次元PIC計算を行い、電子が前段階加速を受け、イオンによる電磁不安定性及び高エネルギー電子自身で立てた波によって更に加速する、というシナリオの実現可能性について検証する。

### 3. 研究の方法

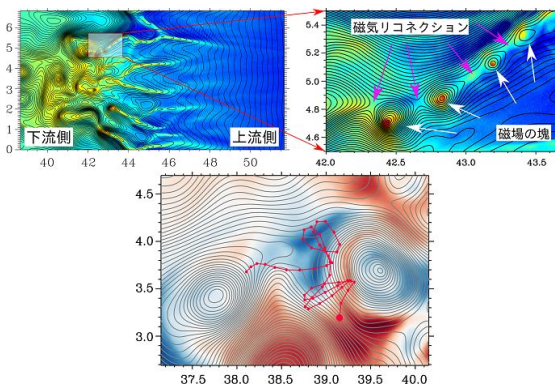
初年度においては、超高マッハ数衝撃波の2次元PIC計算を中心に行った。2次元計算においては、2種類の(準)垂直磁場配位が実現される。面外(out-of-plane)磁場配位で期待される物理過程は、反射イオン軌道の正確な取り扱い及び、反射イオンと上流プラズマとの相互作用による、プラズマ不安定性(イオンワイベル、ブンネマン不安定、図中衝撃波遷移領域)や衝撃波面でのドリフトモードが挙げられる。一方、面内(in-plane)磁場配位では、反射イオンの運動による影響を正確に取り扱えないものの、衝撃波面での磁力線方向のイオンスケールの不安定性や、高エネルギー電子のミラー反射運動の影響の記述が可能になる。以上のように、高マッハ数衝撃波では、磁場に垂直に運動する反射イオンとそれに伴う不安定性( $k \perp B$ )と、磁力線方向の電磁波励起( $k \parallel B$ )が同時に励起されることが期待されるが、2次元計算では同時に扱うことができないため、それぞれに着目した計算を行う必要がある。

2次元計算結果を踏まえてパラメタを慎重に選び、3次元PIC計算の実施を行う。3次元計算を行うことで、磁場に垂直方向の不安定性( $k \perp B$ )と、磁力線方向の電磁波励起( $k \parallel B$ )を同時に扱うことが可能になり、電子の前段階加速～散乱体としての電磁場励起～衝撃波統計加速、までの一連の過程

を追うことを目指した大規模数値計算を実施する。

#### 4. 研究成果

スーパーコンピュータ京を用いた大規模 2 次元 PIC シミュレーションを行うことにより、新しい電子加速メカニズムを発見した。MA ~ 43, M/m=225 の面内磁場の垂直衝撃波の計算を行ったところ、反射イオンがと上流イオンとの相互作用で励起されるイオンワイベル不安定が遷移領域において励起され、磁気乱流が卓越する。今回のような極めて強い衝撃波の下では、磁気乱流中において磁気リコネクションがあちらこちらで頻発し、上流運動エネルギーのエネルギー散逸メカニズムとして重要な役割を果たしていることが明らかになった(下図、上段)。

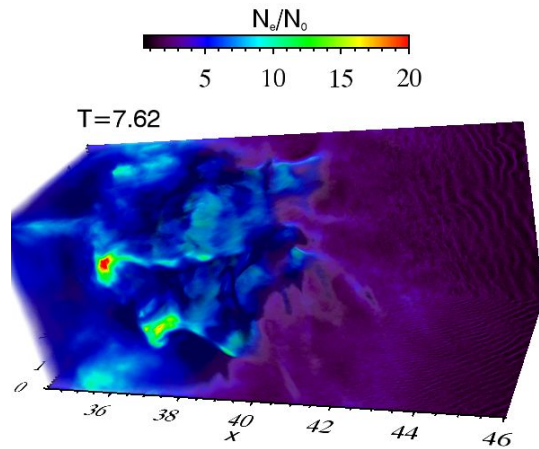


上流の冷たい電子の一部はリコネクション領域を何度も横切り、リコネクション電場やプラズモイド(磁場の塊)と相互作用しながら、徐々に相対論的エネルギーまで加速されることが明らかになった(上図、下段)。

本研究成果は、衝撃波中におけるエネルギー散逸・粒子加速において磁気リコネクションが本質的に重要であることを初めて示した。相対論的電子加速メカニズムへの理解の大きな進展をもたらした結果として、米国科学誌 *Science* に掲載された。

計画の後半では高マッハ数衝撃波の 3 次元 PIC シミュレーションを実施した。使用したパラメータは、MA ~ 21, M/m=64、衝撃波角(波面法線と上流磁場となす角)が 74 と 84 度の準垂直衝撃波である。衝撃波面のスケールは各方向に約 5 倍のイオン慣性長を取っている。使用した「京」の計算資源は 9216 ノード(73,728 コア) 約 100TB のメモリといったかつてないほどの計算規模となった。

右上図はイオンジャイロ周波数で規格化した時刻 T=7.6 での衝撃波の 3 次元構造を電子密度で表している。衝撃波前方(X ~ 46)では反射イオンと上流電子との相互作用で励起される電子スケールのブーネマン不安定が高強度で成長しており、上流電子は衝撃波波乗り加速により初期加速を受ける。遷移領域(38 < X < 44)では、イオンワイベル不安定が成長して、3 次元磁気乱流が高強度に励



起されている様子が得られた。初期加速を受けた電子は乱流磁場によって散乱を受けながら対流電場と反対方向に加速する、ドリフト加速を受ける。散乱により衝撃波近傍に長時間滞在できるため、相対論的エネルギーまで加速されることが明らかになった。このような加速は衝撃波角 74° の計算結果において顕著に見られることが明らかになった。

「京」の大規模な計算機リソースを使うことによって初めて高マッハ数衝撃波の 3 次元描像が明らかになった。その結果、電子スケールからイオンスケールまでのプラズマ不安定性が高強度で励起されており、これらが介在した電子加速メカニズムが明らかになった。本成果は現在、*Physical Review Letters* 誌に投稿中である(2017 年 3 月 31 日現在)。

さらに高エネルギーまで到達するためのメカニズムを探るため、今後も複数のパラメータで検証を行い、宇宙線電子加速メカニズムを明らかにしていく。

#### 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 1 件)

Y. Matsumoto, T. Amano, T. N. Kato, and M. Hoshino (2015), "Stochastic electron acceleration during spontaneous turbulent reconnection in a strong shock wave", *Science*, 347, 974-978, doi:10.1126/science.1260168 (査読あり)

[学会発表](計 16 件)

松本洋介、天野孝伸、加藤恒彦、星野真弘、「高マッハ数衝撃波における電子のサーフィン・ドリフト加速」、日本天文学会年会、九州大学(福岡県・福岡市)、2017 年 3 月 17 日

Y. Matsumoto, T. Amano, T. N. Kato, and M. Hoshino, "Prolonged electron accelerations at a high Mach-number quasi-perpendicular shock", AGU Fall meeting, San Francisco, USA, Dec. 13,

2016

Y. Matsumoto, T. Amano, T. N. Kato, and M. Hoshino, "Three-dimensional structures of high-MA shocks and associated electron accelerations", 6th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasma, Epochal Tsukuba (茨城県・つくば市), Jul. 12, 2016

松本洋介、池谷直樹、「マジック CFL 法を用いた相対論的衝撃波の長時間計算」、日本地球惑星科学連合連合大会 2016 年大会、幕張メッセ(千葉県・千葉市)、2016 年 5 月 24 日

Yosuke Matsumoto, "Stochastic electron acceleration during turbulent reconnection in strong shock waves", EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, Apr. 20, 2016 (invited)

松本洋介、「天体衝撃波における磁気リコネクションの役割」、磁気リコネクション研究の最前線と今後の展望、国立天文台(東京都・三鷹市)、2016 年 3 月 29 日(招待講演)

松本洋介、天野孝伸、加藤恒彦、星野真弘、「高マッハ数衝撃波の 3 次元構造と電子加速」、日本天文学会年会、首都東京大学(東京都・八王子市)、2016 年 3 月 19 日

Y. Matsumoto, T. Amano, T. N. Kato, and M. Hoshino, "Magnetic reconnection in astrophysical shock waves", The US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection, Napa, USA, Mar 11, 2016 (invited)

Yosuke Matsumoto, "Supercomputing for exploring electron accelerations at high-Mach-number collisionless shocks", Workshop on Supernovae and Their Remnants, ISAS (神奈川県・相模原市), Nov 10, 2015 (invited)

松本洋介、天野孝伸、加藤恒彦、星野真弘、「高マッハ数衝撃波の 3 次元構造と電子加速」、日本地球電磁気・地球惑星圏学会講演会、東京大学(東京都・文京区)、2015 年 11 月 3 日

Yosuke Matsumoto, "Supercomputing for exploring electron accelerations in strong shock waves", ISSI team meeting, Bern, Switzerland, Jun 2-5, 2015 (invited)

Yosuke Matsumoto, "Supercomputing for exploring electron accelerations in strong shock waves", The 9th International West Lake Symposium, Hangzhou, China, May 18-21, 2015 (invited)

Yosuke Matsumoto, Takanobu Amano, Tsunehiko Kato, and Masahiro Hoshino,

"Supercomputing for exploring electron accelerations in strong shock waves", The 1st Conference on Laser Energetics, Pacifico Yokohama (神奈川県・横浜市), Apr 24, 2015 (invited)

松本洋介、天野孝伸、加藤恒彦、星野真弘、「高マッハ数衝撃波における磁気リコネクション誘発と電子加速」、日本天文学会年会、大阪大学(大阪府・豊中市)、2015 年 3 月 18 日~3 月 21 日

松本洋介、天野孝伸、加藤恒彦、星野真弘、「高マッハ数衝撃波における磁気リコネクション誘発と電子加速」、日本地球電磁気・地球惑星圏学会講演会、キッセイ文化ホール(長野県・松本市)、2014 年 10 月 31 日-11 月 3 日

Yosuke Matsumoto, "HPC on particle accelerations at collisionless shocks", Workshop "SNe & GRBs 2014", RIKEN (埼玉県・和光市), Aug 25 - 27, 2014 (invited)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松本 洋介 (MATSUMOTO YOSUKE)

千葉大学・大学院理学研究科・特任准教授  
研究者番号：20397475

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

( )