

地球バウショックにおける電子加速：計算機実験とMMS衛星観測による研究
 Electron acceleration at Earth's bow shock: PIC simulation and MMS observation

松清修一、大塚史子（九州大学）
 岡光夫(UC Berkeley)，梅田隆行（名古屋大学）

研究背景・目的

2015年に打ち上げられたMMS衛星は従来と比べ圧倒的な高時間分解能を誇り、地球バウショックにおける非熱的電子の加速メカニズム解明へ向け期待が高まっている。図1はMMS衛星が取得した地球バウショックの観測結果である(Oka et al. [1])。この観測イベントは、衝撃波角(衝撃波法線方向と上流磁場のなす角) $\Theta_{BN}=84$ 度、アルフヴェンマッハ数 $M_A=11$ の準垂直衝撃波である。左側が衝撃波上流、右側が衝撃波下流であり、衝撃波遷移層近傍において非熱的電子が上流側へ飛び出した電子バーストが確認できる(電子エネルギー分布のピンクで囲った箇所)。これは非熱的電子が衝撃波遷移層の狭い領域で生成されたことを示唆する。本研究では、MMS衛星データと直接比較することを念頭に、準垂直衝撃波のフル粒子シミュレーションを行い、衝撃波加速への電子注入から加速に至る過程を理解する。

研究方法

本研究では多数の荷電粒子(イオン・電子)の運動と電磁場の時空間発展を第一原理的に解くフル粒子シミュレーションを行い、準垂直衝撃波($\Theta_{BN}>45$ 度)を再現する。衝撃波の生成には1次元のインジェクション法を用い、衝撃波法線(x)方向にのみ物理量が依存するとする。背景磁場はx-z面内に取り、x軸からの角度を $\Theta_{BN}=70$ 度とする。準垂直衝撃波では、イオン・電子の一部が共に反射するが、反射イオンは磁場に巻きつき下流に押し流される。一方、磁場旋回半径が小さい反射電子は上流磁場に沿って遠方まで背走するビーム電子となる。衝撃波上流境界においてビーム電子による非物理的影響が無視できるように、衝撃波法線1次元方向に十分な計算領域($L=40\rho_i$)を確保した計算を行う。ここに、 ρ_i は入射イオンの磁場旋回半径である。また、高解像度のMMS衛星と比較するために、イオン電子間質量比は十分大きい値(625)を用いる。衝撃波のマッハ数 $M_A=7.1$ 、プラズマベータ値(=プラズマの熱的圧力と磁気圧の比) $=0.3$ 、イオン/電子温度比 $=1$ 、電子プラズマ/サイクロトロン周波数比 $=10$ とした。総超粒子数は $\sim 10^8$ 、時間ステップ数は 6×10^6 とした。利用した計算資源はノード数32、総コア数896、総メモリ量20GBであり、実計算時間は16日程度である。

研究結果・考察

図2は $\Omega_i t=22.4$ における計算結果のスナップショットであり、図1のMMS観測と同様な形式で描写している。ここに、時間tはイオンサイクロトロン周波数、 Ω_i の逆数で規格化している。磁場は $x=31\rho_i$ で $|B|=1.4$ まで急激に大きくなり、バルク速度は減少、粒子の密度・温度は共に上昇しており、衝撃波が形成されたことが確認できる(a-e)。なお、パネル(b)のバルク速度は、衝撃波静止系での速度をアルフヴェン速度で規格化しており、上流バルク速度は M_A に対応する。また、パネル(c)(d)の縦軸は、衝撃波静止系で評価した粒子エネルギーを入射イオンのバルクエネルギー

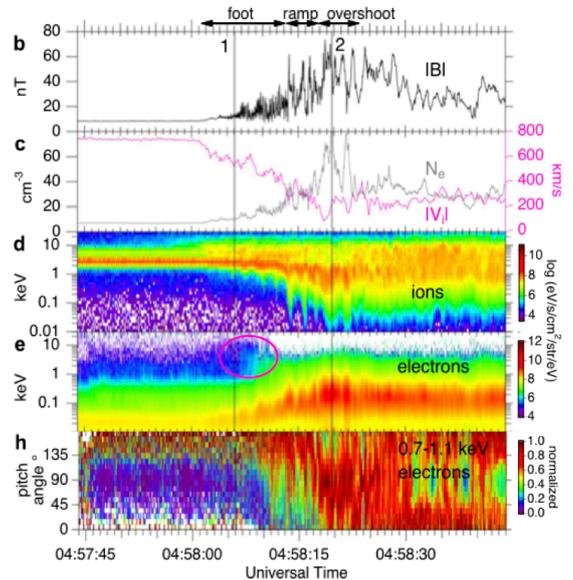


図1. MMS観測結果($M_A=11$, $\Theta_{BN}=84$ 度, Oka et al. [1])
 (b) 磁場強度, (c) 電子密度とバルク速度, (d, e) イオン・電子のエネルギー分布, (h) 非熱的電子のピッチ角分布 (各時間の密度で規格化)

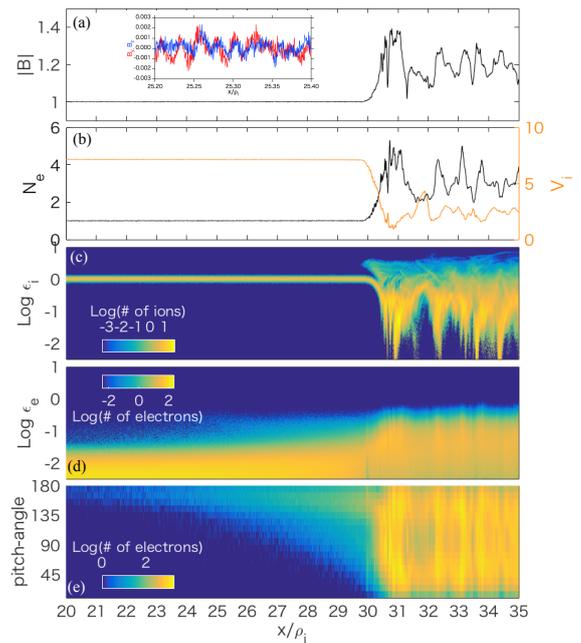


図2. 計算結果($M_A=7.1$, $\Theta_{BN}=70$ 度, $\Omega_i t=22.4$)
 (a) 磁場強度, (b) 電子密度とバルク速度, (c, d) イオン・電子エネルギー分布, (e) 非熱的電子のピッチ角分布

で規格化した値を対数スケールで示す。衝撃波上流では、 ϵ_i の平均が1に対し、 ϵ_e は質量比だけ小さい。

衝撃波遷移層 ($30\rho_i < x < 31\rho_i$) で $\epsilon_i > 1$ の反射イオンが存在し、これが磁場のフット領域を形成する。熱的電子よりエネルギーが高い反射電子は、 $x=24\rho_i$ を超えて存在している。この非熱的電子はMMS観測の電子バーストと定性的に同様と考えられるが、シミュレーションの方が上流遠方まで到達している。パネル(e)にこの非熱的電子 ($\epsilon_e > 0.06$) のピッチ角分布を示す。ここで、ピッチ角はプラズマ静止系における粒子の速度ベクトルと局所的な磁場のなす角である。上流遠方 ($x < 24\rho_i$) では、ピッチ角は180度に近く、プラズマに対して背走するビーム電子であることを示す。衝撃波へ近づくにつれピッチ角が広域化しており、上流電磁波動による散乱を示唆する。パネル(a)には変動磁場成分 (B_y , B_z) を併記している。背景磁場に対して変動磁場の振幅は0.2%と微小であるが、波数 $20\Omega_e/c$ (波長にして $0.025\rho_i$) のホイッスラー波動が励起されていると考えられる。また、下流磁場の第1と第2オーバーシュート (増幅磁場) に挟まれる領域に対応し、ピッチ角90度近傍の粒子カウント数が減少したホールが確認できる。これは、磁気ミラー効果によって、電子が増幅磁場の間を往復運動していることを示唆する。この衝撃波下流に現れる電子ホールはMMS観測・図1(h)にも存在する。

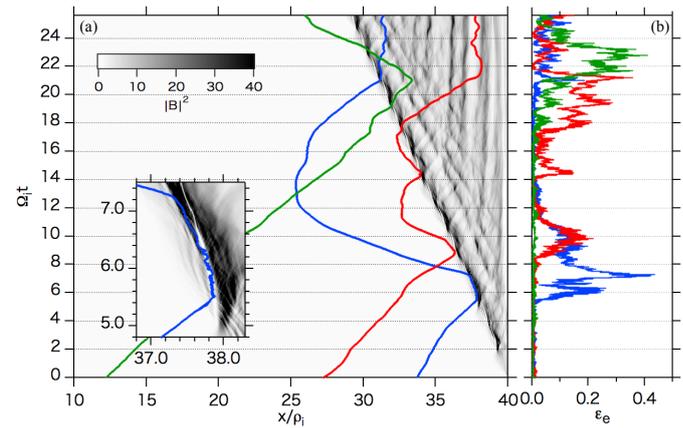


図3. (a)非熱的電子の軌道と(b)その運動エネルギーの時間発展

図3に特徴的な振る舞いをする非熱的電子の軌道 (x - t 空間) と、対応する電子エネルギーの時間発展を示す。背景のイメージは磁場エネルギー $|B|^2$ を示し、衝撃波面の増幅磁場が $\Omega_i t \sim 2$ の周期で出現しており、衝撃波リフォメーションが確認できる。赤・青で示した粒子は、この強い磁場が衝撃波面に出現する時に反射しており、衝撃波リフォメーションと連動して、反射電子がバースト的に生成されることを示唆する。これがMMS衛星で観測される電子バーストに対応すると考えられ、衝撃波加速への種粒子になる可能性がある。また、青の電子が衝撃波面で反射するところを拡大した図では、フィラメント状の磁場の溝に電子がしばらく捕捉された後、上流へ背走している。赤・青のビーム電子は衝撃波上流でピッチ角散乱され、再び下流へ流される。赤の粒子は、下流で直線運動している間に加速している。最終的に赤・青の粒子は下流の増幅磁場に挟まれており、これらが電子ホールを形成する粒子と考えられる。また、緑の粒子のように衝撃波下流へ流された後、再び上流へ電子ビームとして抜け出す粒子も存在する。

まとめ

準垂直衝撃波を全粒子シミュレーションで再現し、MMS観測 (Oka et al. [1]) と類似する結果 (衝撃波上流の電子バーストや衝撃波下流の電子ホール) を得た。非熱的電子の軌道解析により、衝撃波リフォメーションに連動した電子ビームの生成、上流波動によるピッチ角散乱などが電子加速に寄与している可能性を指摘した。今後は詳細な波動解析を行うとともに、観測と同じイオン電子間質量比1836を用いる計算も検討する。

引用文献

[1] Oka et al., Electron scattering by high-frequency whistler waves at Earth's bow shock, *Astrophys. J. Lett.*, 842, L11 (7pp) 2017

成果発表

1. F. Otsuka, S. Matsukiyo, and T. Hada, PIC simulation of a quasi-parallel collisionless shock: Interaction between upstream waves and backstreaming ions, *High Energy Density Physics Journal, Elsevier*, 33, 100709 (10pp) 2019
2. Oka, M., F. Otsuka, S. Matsukiyo, その他14名, Electron scattering by low-frequency whistler waves at Earth's bow shock, *Astrophys. J.*, 886:53 (11pp) 2019
3. Oka, M., F. Otsuka, S. Matsukiyo, その他14名, Electron scattering by low-frequency whistler waves at Earth's bow shock, AGU fall meeting, San Francisco, Dec. 2019
4. 大塚史子, 岡光夫, 松清修一, 斜め伝搬ホイッスラー波動による電子のピッチ角拡散過程, 地球電磁気・地球惑星圏学会第146回講演会, 熊本, 2019年10月
5. 大塚史子, 岡光夫, 松清修一, 準垂直衝撃波における電子加速の1次元PICシミュレーション」日本地球惑星科学連合2019年大会, 千葉, 2019年5月