

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

大塚史子, 松清修一 (九州大学)

岡光夫(UC Berkeley), 梅田隆行 (名古屋大学)

概要

本研究は、従来と比べ圧倒的な高時間分解能を誇るMMS衛星との比較に耐える高精度の衝撃波シミュレーションを行い、MMS衛星で得られる電子分布関数や電磁場微細構造を計算データと直接比較することで、地球バウショックにおける電子加速機構を解明することを目的としている。これまでに準垂直衝撃波を1次元全粒子シミュレーションで再現し、MMS観測(Oka et al. (2017, 2019))と類似する結果(衝撃波遷移層前面の電子バーストや衝撃波下流の高エネルギー電子ピッチ角分布に現れるホールなど)を得ている。今年度は遷移層前面の電子バーストに着目し、前年度に得られたデータを詳しく解析し、MMS衛星観測との関連を議論した。また、バースト電子の加速機構を明らかにするため、前年度と同様のパラメータセットに対して再計算を行い、バースト電子の軌道データを取得し、その解析を行った。利用した計算資源は、ノード数16、総コア数768、総メモリ量20GB程度であり、実計算時間7日程度である。計算パラメータは、衝撃波のマッハ数 $M_A=7.1$ 、衝撃波角(衝撃波法線方向と上流磁場のなす角) $\Theta_{BN}=70$ 度、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、イオン電子間質量比=625、電子プラズマ/サイクロトロン周波数比=10である。総超粒子数は $\sim 10^8$ 、時間ステップ数は $4.5 \times 10^6$ である。また、今後解析予定の計算(上記パラメータで衝撃波角のみ変更、 $\Theta_{BN}=80$ 度)も実施した。

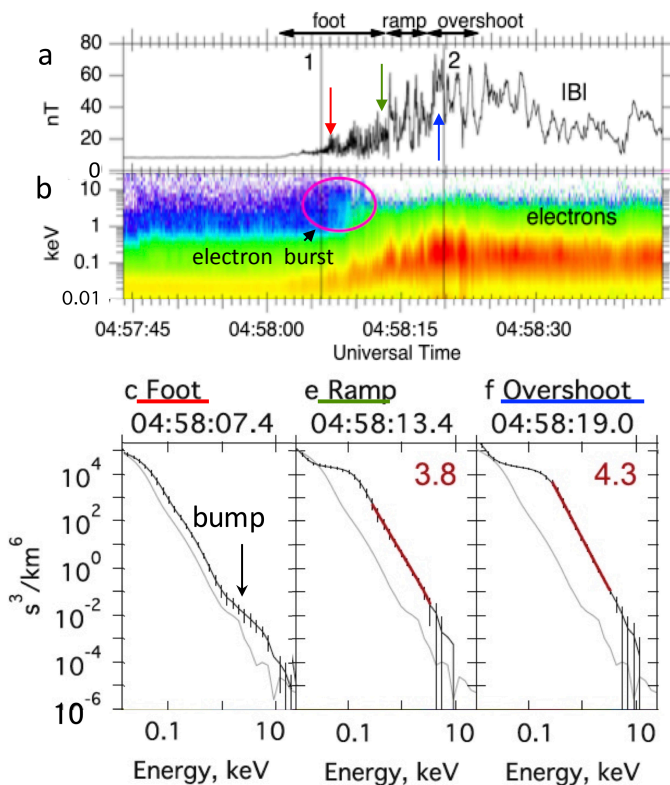


図1. MMS観測結果( $M_A=11$ ,  $\Theta_{BN}=84$ 度, Oka et al. [1, 2])

(a) 磁場強度 (b) 電子のエネルギー分布, (c,e,f) 衝撃波遷移層における電子のエネルギースペクトル

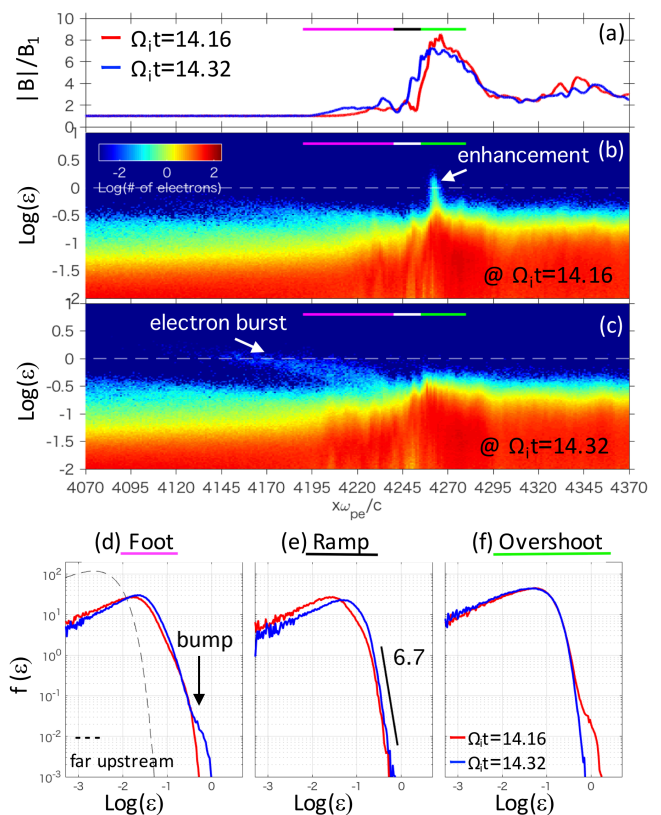


図2. (a)磁場強度と(b,c)電子エネルギースペクトルの空間分布. エネルギー $\epsilon$ はイオンバルクエネルギーで規格化されている. (d-f) フット, ランプ, オーバーシュートにおける電子エネルギースペクトル. 対応する領域はマゼンダ, 白, 緑でそれぞれ(a-c)に示す.

## 成果内容

図1はMMS衛星による観測結果(Oka et al. (2017, 2019))である。衝撃波遷移層のフット領域で電子バースト(ピンクで囲った箇所)が確認でき、我々の数値計算でも同様な電子バースト(図2(c)  $\Omega_{it}=14.32$ )が確認できる。この電子バーストが起きる前(図2(b)  $\Omega_{it}=14.16$ )、オーバーシュートの狭い領域でイオンバルクエネルギー以上( $\epsilon > 1$ )の高エネルギー電子が生成されている。これら電子が衝撃波リフォーメーションによる磁場減少に伴い、上流へバースト電子として放出される。バースト電子が生成されるとき、フット領域の電子エネルギースペクトルにおいてbumpが観測されており、計算でも再現できている(図2(d))。しかし、電子エネルギースペクトルのベキ指数(図2(e))は、MMS観測の示す値より大きく、ベキを成すエネルギー帯も狭く、ベキ型のエネルギースペクトルを形成するような加速が起きているとは言い難い。今後は、超粒子の数を増やし、さらに長時間計算する等で、1次元計算においてもベキ型のエネルギースペクトルが形成されるか検討する。また、1次元系の制約が直接観測で得られているベキ型のエネルギースペクトルを再現できない一因とも考えられ、次年度は計算モデルを2次元へ拡張することも検討する。

バースト電子の加速過程をより詳しく解析するために、同様のパラメータセットに対して再計算し、バースト電子の軌道を取得し解析した結果が図3である。バースト電子の生成過程として2パターン存在することを見出した。上段の電子はオーバーシュートの強い磁場で反射されるときに、衝撃波接線方向(y方向)にドリフトし、対流電場によって加速されると考えられる。これは、いわゆる衝撃波ドリフト加速(SDA)と考えて良い。SDA過程に入る前に垂直方向に予備加速しており、この加速メカニズムは検証する必要がある。一方、下段の電子は磁場オーバーシュートが形成されつつある遷移層内部の狭い磁場構造に捕捉されている間に、y方向に行き来しながら、SDAによって複数回加速されているように見える。最終的にバースト電子として上流へ逃げるときの運動エネルギーは、上段の通常のSDAよりも約2倍大きい。詳しい加速メカニズムは解析中であるが、磁場増幅に伴い垂直方向の運動エネルギーを獲得するベータトロン加速が働いている可能性もある。今後、成果は第37回宇宙線国際会議で発表するとともに、論文としてまとめる予定である。

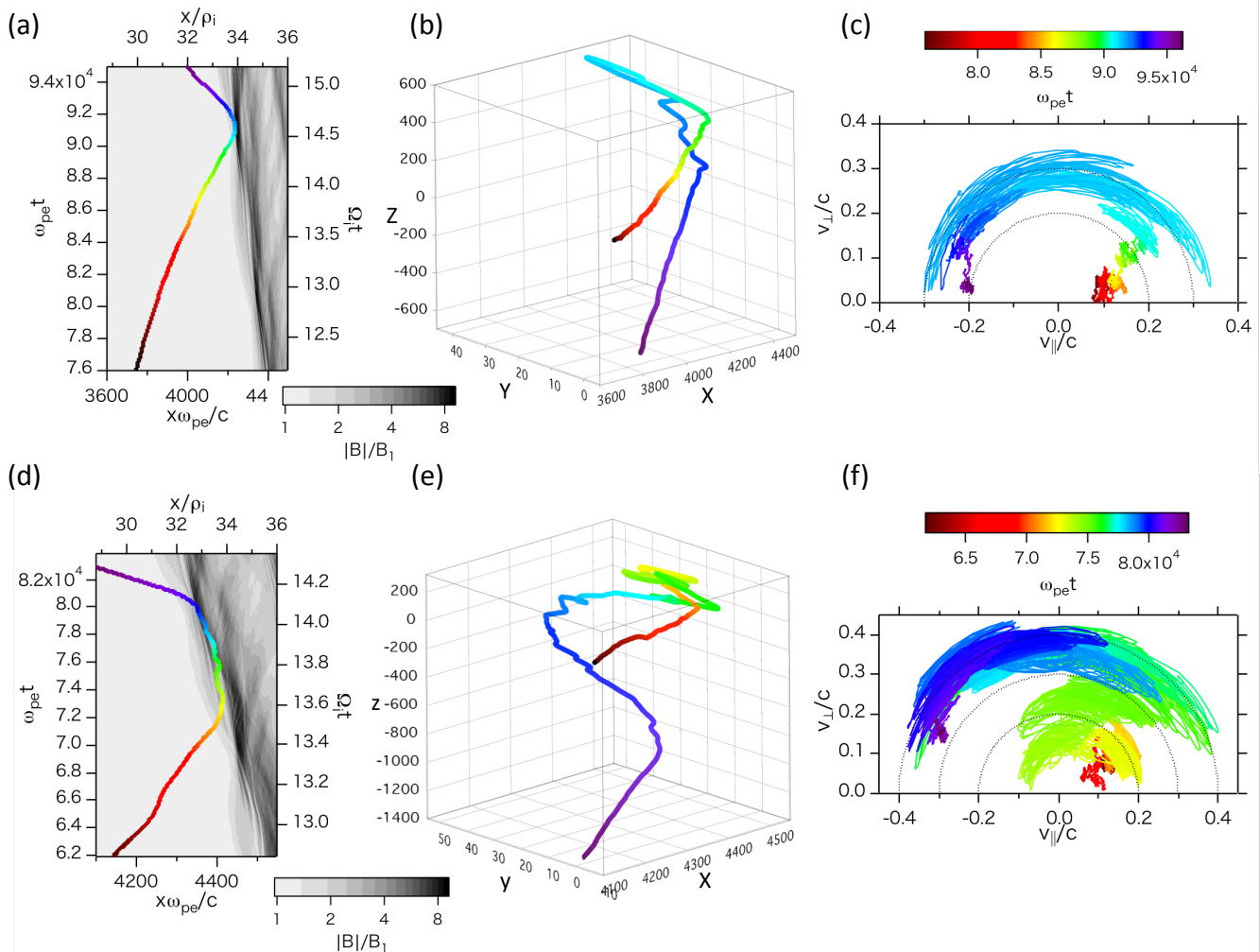


図3. (上段)いわゆる衝撃波ドリフト加速(SDA)により加速したと考えられる電子(下段) 衝撃波遷移層の狭い磁場構造に捕捉されつつSDAによって複数回加速されたと考えられる電子(a,d)空間(x)と時間(t)における電子軌道(b,e)案内中心速度から得られる3次元電子軌道, (c, f) 衝撃波静止系での速度空間における電子軌道( $v_{\parallel}$ , 上流磁力線に平行方向の速度,  $v_{\perp}$ , 上流磁力線に垂直方向の速度)

## 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
- [2] Oka et al., Electron scattering by low-frequency whistler waves at Earth's bow shock, *Astrophys. J.*, 886:53 (11pp) 2019

## 成果発表

1. F. Otsuka, Oka, M., S. Matsukiyo, 「PIC simulation of electron acceleration at quasi-perpendicular collisionless shock: Application to Earth's bow shock」 日本地球惑星科学連合2020年大会, オンライン, 2020年5月
2. Oka, M., F. Otsuka, Matsukiyo, Phan Tai, The MMS team 「Electron Scattering and Acceleration by Whistler Waves at Collisionless Shocks」 日本地球惑星科学連合2020年大会, オンライン, 2020年5月, invited
3. F. Otsuka, Oka, M., S. Matsukiyo, 「Stochastic acceleration of electrons at collisionless quasi-perpendicular shocks: PIC simulation」 AAPPs-DPP2020, remote e-conference, 2020年10月, invited
4. 大塚史子, 岡光夫, 松清修一, 「Electron Scattering and Acceleration at quasi-perpendicular shock: Comparison between PIC simulation and MMS observation」 地球電磁気・地球惑星圏学会第146回講演会, オンライン, 2020年11月
5. 大塚史子, 松清修一, 岡光夫, 「準垂直衝撃波における電子加速: PICシミュレーションとMMS衛星観測の比較」, 令和2年度ISEE合同研究集会「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」, 「惑星間空間プラズマにおける波動現象」および太陽圏・宇宙線関連の共同研究成果報告会, オンライン, 2021年2月