

大規模シミュレーションプロジェクト

成果報告書 (VPP5000)

島田 延枝

(学術振興会・科学技術特別研究員)

@通信総合研究所・電磁波計測部門・シミュレータグループ
計算機使用時所属：学術振興会・特別研究員@東京大学理学部)

1. イントロダクション

宇宙プラズマ衝撃波において、高温、高エネルギー電子に伴った電磁放射などが見出されることが知られて久しく、これらは、遙か彼方の天体や宇宙プラズマのダイナミクスを知る上で貴重な情報源となっている。また、惑星前面のバウショック、太陽表面活動に伴う衝撃波や惑星間空間衝撃波、超新星爆発に伴う衝撃波、活動銀河核から放出されるジェット先端の衝撃波等でみられる、衝撃波の散逸過程における高エネルギー粒子生成過程（ショック加速・ショック加熱）自体、様々な天体でおこる物理現象の理解に欠かせないものとなっている。直接観測ができる地球近傍宇宙空間においては、イオンの運動がマクロな衝撃波構造を決めているとして、アメリカの人工衛星 ISEE 時代から衛星観測とハイブリッドシミュレーションを組み合わせた研究が盛んに行われ、数々の成功を収めてきた。しかし、マクロな衝撃波構造を決めているイオンのエネルギーがどのように電子にカスケードしていくのか、電子は場を介してどのようにエネルギーを得ているのか、については未解明な点が多い。実際電子は衝撃波面のバルクフローのエネルギーが大きい程、またプラズマベータが小さくなる程、質量比から単純に想像されるよりも、ずっと大きな衝撃波散逸を担っている。これはこの時、本研究でも明らかにされたように衝撃波面（遷移層）中で起こるフリーエネルギー解放過程—主に入射イオンと反射イオンとの間の2流体不安定性—が流体的な強い不安定性になるからである。電子のエネルギーダイナミクスを考える上で、マイクロプラズマ不安定性が重要な役割を担っており、過去には、Papadopoulos (1988) らが初めて高マッハ数衝撃波面でマイクロプラズマ不安定性を考慮して電子のエネルギー上昇を議論したが、重要であるはずの電子の力学的振る舞いそのものは、解析的にも、その後行われてきた

シミュレーションによっても、マクロな流体量として扱われたために不完全な点も多い。

宇宙空間プラズマは基本的に無衝突プラズマであり、イオンと電子のエネルギー、運動量のやり取りには電磁波動が介在し、電子－電磁場－イオンの複合体をセルフコンステントに解く必要がある。電子加熱、加速を明らかにする為には、まず電子スケールでの衝撃波の振舞いそのものを理解することが必須である。加えて、衝撃波はそれ自体非線形性を強く含むため、解析的アプローチには限りがあり、スーパーコンピュータによるシミュレーションが有効となる。シミュレーション結果データを用いることで、観測的には捉えることのできない電子スケール（時間、空間の両方で）での衝撃波遷移層の発展・伝播を粒子性をもった電子やイオンの動きとしてとらえることができるので、衝撃波エネルギーの散逸機構を具体的に見ることができる。電子分布構造で目立つものとして、2流体不安定性の非線形発展の結果生じたコヒーレントな大振幅静電場構造（電子速度空間上ではよく *phase hole* として見られる）を通して効率よくエネルギーのやり取りをしていることがあり、これは本稿の中心的トピックでもある。

地球近傍スペースプラズマにおける *phase hole* 等の非線形発展は近年観測によっても研究が進んでいる。GEOTAIL は磁気圏尾部などで (Matsumoto et al., GRL 1994 等)、WIND は bow shock で (Bale et al., GRL 1998 等)、FAST はオーロラ領域で (Muschietti et al., GRL 1999 等) それらを観測している。また、衝撃波面の静電波動非線形発展は、高エネルギー電子生成機構としても着目を浴びている (Dieckman et al., Astron. Astrophys. 2000 : Shimada & Hoshino ApJL 2000 : Hoshino Prog. Theoretical phys. 2001)。

2. 衝撃波プロファイルのプラズマパラメタ依存性

本研究では、イオン（陽子）と電子を共に超粒子として扱い（particle-in-cell 法）、グリッドサイズを電子デバイ長程度、時間ステップを電子プラズマ振動時間の数百分の一程度にとり、大量の粒子を追跡する（1グリッド当り *unperturbed* 領域で 400 個）ことで、電子－電磁波動場－イオンダイナミクスをセルフコンシステントに解き、数がオーダーで少ない非熱的粒子形成過程まで追うことに成功した。ここで取り上げるシミュレーション結果は、全て次元（ x ）垂直衝撃波（磁場方向は z ）で、電子プラズマ振動数／電子のジャイレーション振動数の比（ ω_{pe}/Ω_{ge} ）は特に断らない場合 20 である。また、陽子と電子の質量比は 20 である。この質量比は現実の値に比べかなり小さいが、質量比が 100 の場合の計算結果と比べても、不安定性発展の様子は同じ

であるので、スケールの違いなどはあるものの、基本的物理は追えていると信じていることができる。まず電子スケールを考慮した時どのような場の変化があるのかを見てみたい。図 1 はマッハ数 1.1 の時の磁場 (B_z 、左) と電場の x 成分 (E_x 、右) の x 軸に対する時間変化図である。衝撃波面 (B_z 図中の点線) は右下から左上に向かって伝播している。タイムステップは約 $4.0 T_{pe}$ (プラズマ振動時間)、これは今のパラメタだと $2 T_{ge}$ (電子ジャイレーション時間) に相当する。上段、下段はそれぞれプラズマベータ (プラズマ圧/磁気圧) が 0.1 (cold)、0.5 (hot) の場合を示している。衝撃波面の形 (磁場や電場のプロファイル) はサイクリックに steepening をおこしながら、短時間のうちに様相を変化させている。

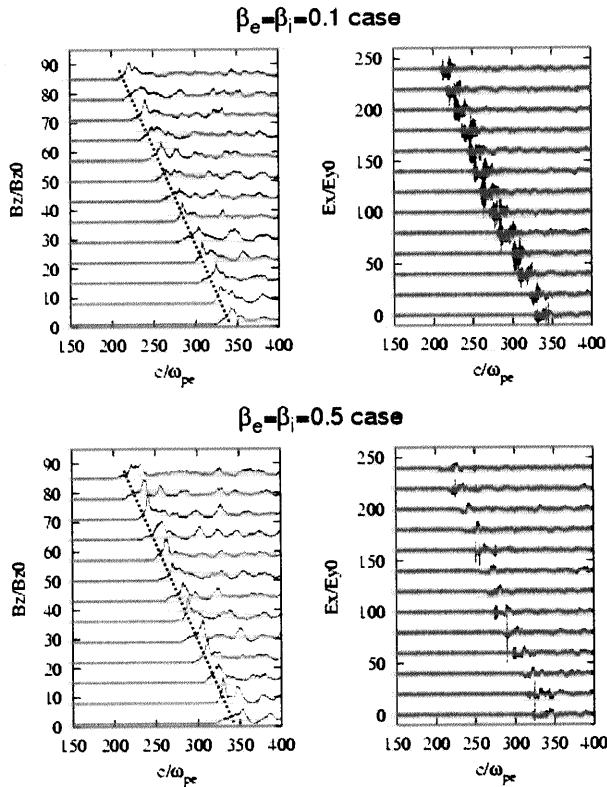


図 1

これは反射イオンが上流にのびていくに伴い、衝撃波面の傾きは緩くなると同時にそこで不安定性を起こしながら (衝撃波面上流部を) 熱化、下流化してゆく。そして、この下流化した部分は高密度、強磁場になっているため、磁気音波のスピードが速く、衝撃波上流側に steepening が起こる、という現象の反映である。今までイオンジャイロ周期程度でこの steepening から steepening へのサイクルが起こることは知られていたが、本研究では電子のダイナミクスを陽

に解くことで、電子－イオンカップリングによる 2 流体不安定性が、今まで考えられたよりも素早く加熱、即ち下流化を起こし、このサイクルが短くなる－電子加熱・加速の頻度が上がる－ことを見出した。

同じマッハ数でも、ベータが大きい場合 (0.5) と小さい場合 (0.1) では衝撃波面で励起される静電場の様相がかなり異なる。ベータが大きい場合は、電子が反射イオンに出会って減速された後、入射イオンとの実効的速度差は大きくなれず (熱速度の広がりが大きいため)、反射イオンとの間のみで不安定性が起きるため不安定性がゆっくり成長し、スポラディックにコヒーレントな大振幅静電場 (電子 phase hole) がみられ、ベータが小さくなると入射イオンとの間でも強い不安定性が励起される為、遷移層中での電場擾乱は激しく複雑である (次章参照)。このことは衝撃波によって生じる電子エネルギースペクトルにも反映され、一般にベータが小さい場合には、加熱が大きく非熱的電子が目立たず、ベータが大きい場合には、上記の理由により phase hole が安定に存在しやすいため、これによるトラッピング電子の一部が加速を受け非熱的電子が目立つ結果となっている。

上流のプラズマパラメタとして、プラズマベータ、マッハ数 (Ma) が重要であることが知られていたが、電子のダイナミクスまで考慮することで、phase hole のダイナミクスを決めるパラメタという意味で ω_{pe}/Ω_{ce} の比も重要であることが分かった。

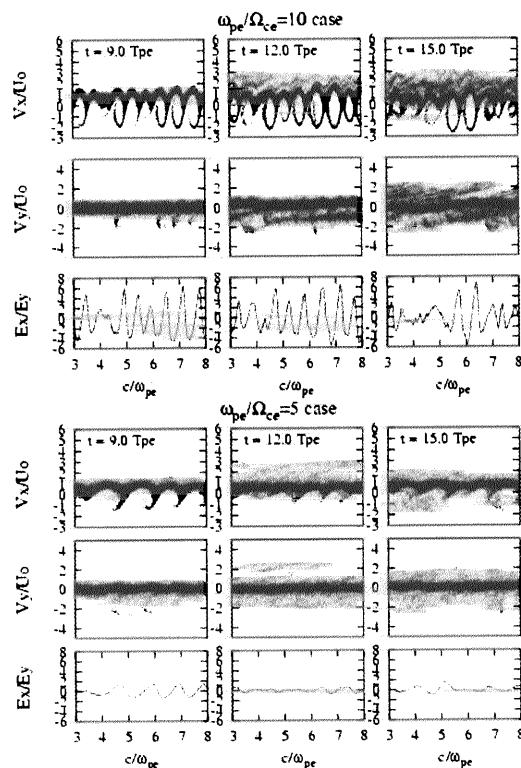


図 2

図2は周期系シミュレーションで $Ma=5$ 、ベータ $=0.1$ の衝撃波遷移層を模倣した結果を示している。上段は $\omega_{pe}/\Omega_{ge}=10$ 、下段は5の場合の電子速度のx成分 (V_x) y成分 (V_y)、そして E_x を示している。比が5の場合は、10の場合と異なり hole が形成されていない。これは、ポテンシャルのトラッピング力よりもローレンツ力の方が勝つためであり、この場合速度空間での広がり (加熱・加速) はあまり見られない。

3. どのような不安定性が起こっているのか？

図1の衝撃波遷移層中で見られた大振幅静電波に対応する粒子の速度空間分布を見てみたい。図3に図1上段 (低ベータ) 下から5番目の衝撃波プロファイルの遷移層拡大図を示す。

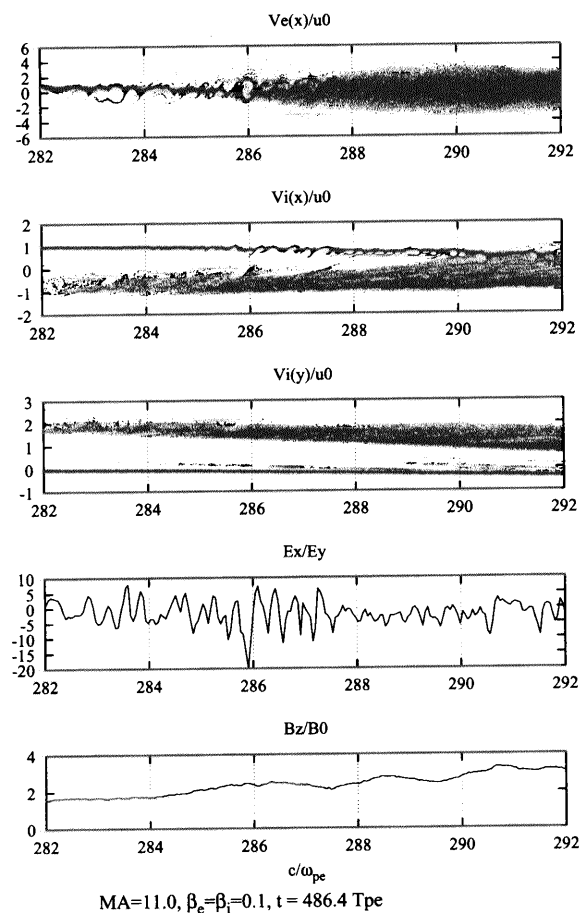


図 3

上から電子速度の x 成分 (V_{ex})、イオン速度の x 、 y 成分 (V_{ix}, V_{iy} 、 E_x 、そして B_z の x 分布が描かれている。電子はまず反射イオン (V_{ix} の下部、 V_{iy} の上部に見られる diffuse な部分) との速度差によるフリーエネルギーを、2 流体不安定性の一種であるブンネマン不安定性 (不安定性 I) によって解消しようとし、生じたポテンシャルによって幾らかの電子がトラップされ始める。図 3 の V_{ex} 分布で、上流側 (左端) に見えている渦群=phase hole がこれである。この過程の初期に電子フローは急激に減速し、今度は入射イオンとの間にも速度差が生じて (イオンは慣性が大きい為、まだ殆ど減速されていない)、やはり 2 流体不安定性が励起 (不安定性 I I) される。図 3 の V_{ex} 分布で、 $x > 284$ に見られる上向きのひげのような構造が、この不安定性によるものである。この様に、衝撃波遷移層中では不安定性 I が速度空間上で負の向きの速度拡散を引き起こし、不安定性 I I が正の向きの速度拡散をおこす、という効率のよい双方向への電子加速・加熱が素早く起こっている (勿論反作用として、イオンプラズマ振動時間程度たつと反射イオン、入射イオン分布も擾乱を受ける)。この場合、コヒーレントな電場構造はあまり見られず、電子も全体として加熱を受け非熱的成分形成も僅かである。今の例は、マッハ数が大きく、ベータが小さい場合であったが、逆にマッハ数が小さい、又はベータが大きい場合は不安定性 I が主に励起されることになる。この場合、成長率としては不安定性 I I の方が大きい (入射イオンは高密度な為)、出来るポテンシャルはドリフト速度の大きい不安定性 I I の方が大きくなる為である。また、不安定性 I I のみが卓越する衝撃波面の方が、コヒーレントな電場構造が保たれ、それによる非熱的電子生成も際立ってくる (次章参照)。電子散逸にドミナントなブンネマン不安定性 (不安定性 I) による電場構造は、10 数プラズマ振動時間の間に成長し消失する非常に素早い応答であり、伝播角に対する分散関係の依存はあまり無い。他に考えられる不安定性 (modified two-stream instability 等) はブンネマン不安定性に比べ成長率が数十倍遅く、不安定性が成長している間に電子が高温になる領域に入って減衰してしまうであろう。

4. 電子ホールと電子エネルギー変化

電子フローと反射イオンフローの間で励起される 2 流体不安定性は、非線形発展の結果電子をトラップし速度空間で穴のあいた渦構造 (phase hole) を形成する。トラップされた電子は motional electric field (E_y) と反対方向にドリフトすることでエネルギーを得ながら phase mixing を起こすことで加熱される。また電子ホールは同様に、瞬時に高エネルギー電子を生成することもできる。図 4 は電子ホールのダイナミクスを示し、上から電子の V_x , V_y , 電場 E_x , 電子

のエネルギーの時間変化を表している（左から右へ 10.8 Tpe～15.4 Tpe）。赤い点は、ホールに共鳴して、トラップされながら（Vx 図で渦構造を時計回りに回っている） $-E_y$ 方向へドリフトし（Vy 図）、数プラズマ振動時間の間に 100 倍近いエネルギーを得て、ホールからデトラップされる。ショックサーフィンによる加速のようなことが、局所的ホールの大振幅静電波動によって起きているといえる。

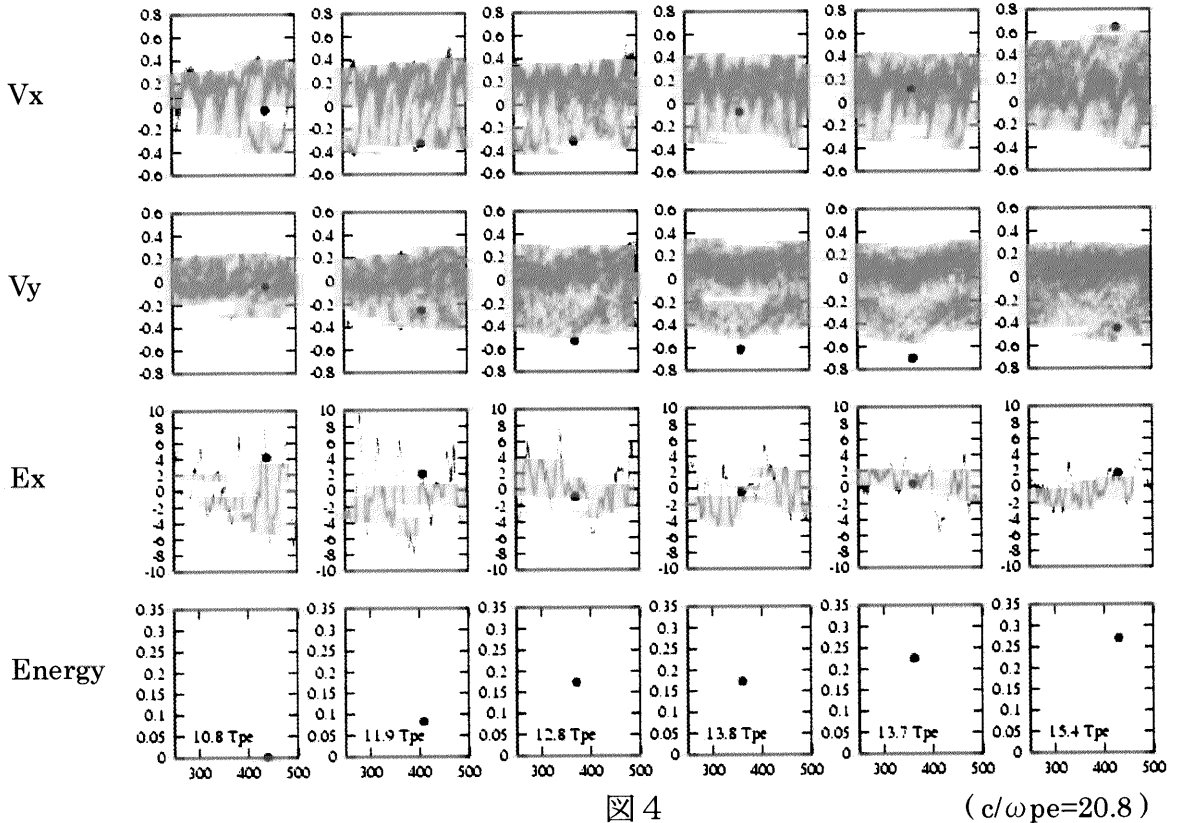


図 4

($c/\omega_{pe}=20.8$)

5. 今後の課題

- ・ 現実の質量比へのスケーリングの問題。
- ・ スポラディックに形成されるブンネマン不安定性による静電ポテンシャルの最大値と飽和値の見積もり。
- ・ 斜め衝撃波、多次元の場合への拡張。

☆ 本稿に関連する参考文献 ☆

Shimada, N. and M. Hoshino,

Strong electron acceleration at high mach number shock waves: simulation study of electron dynamics,
ApJL, 543, L67-L71, 2000.

Hoshino, M.,
Nonthermal particle acceleration in shock front region:
``Shock surfing accelerations",
Prog. Theoretical Physics Suppl., 143, 149-181, 2001.

Hoshino, M. and N. Shimada
Nonthermal electrons at high mach number shocks: electron shock surfing acceleration,
in press in ApJ 2002.

Shimada, N. and M. Hoshino,
An implication of coupling between electron dynamics and macro-shock structure,
準備中 ApJ 2002 の予定