

無衝突衝撃波遷移層における微視的不安定性の多次元実パラメータ計算

九州大学総理工

松清修一

宇宙における衝撃波は高効率のエネルギー変換器の役割を担う。星が一生の最後に大爆発を起こして華々しく飛散する際には、爆風が衝撃波（超新星残骸衝撃波）として星間空間を伝わる。太陽表面の爆発は、同じく衝撃波を形成して地球磁気圏を飲み込み、磁気嵐などを巻き起こしながら各種人工衛星や宇宙飛行士を多大な危険にさらす。このようなとき、衝撃波近傍では上流の流れのエネルギーがさまざまなエネルギーに変換されている。その一部は下流の熱エネルギーへと散逸するが、一部は大振幅波動や高エネルギーの非熱的粒子を生成するのに消費され、これが宇宙線や太陽高エネルギー粒子の起源になると考えられている。しかしながら、衝撃波におけるエネルギー変換機構は未だによく分かっておらず、それゆえに宇宙天気予報は困難で、宇宙線の加速機構はその発見以来100年以上の間未解明のままである。

複雑なエネルギー変換過程を紐解く鍵となるのは、多スケールにわたって発現するプラズマの波動粒子相互作用である。衝撃波近傍では、慣性の大きく異なる電子とイオンが、大振幅波動を介して互いの運動に影響を与えつつ、衝撃波の非定常な多次元構造を支えていると考えられている。近年、計算機性能の向上により多くのシミュレーション研究が行われ、衝撃波の多スケール物理の理解が進んでいるが、計算結果が現実の衛星観測データを説明し得るかという基本的な問いに答えるのは依然として難しい状況にある。限られた計算機資源のもとでは、無衝突プラズマの第一原理シミュレーションと呼ばれるフル粒子計算で、宇宙での実パラメータを用いて衝撃波の多次元構造を再現することができていないためである。本研究では、衝撃波における多スケール物理過程を解く鍵を握る遷移層に着目し、その一部だけを取り出す代わりに、実パラメータでの多次元フル粒子計算を行って、遷移層で励起される微視的不安定性を極めて高精度に再現し、そこでの局所的な粒子加速過程を含めた波動粒子相互作用を理解することを目的とする。25年度は、磁化プラズマパラメータ（電子プラズマ周波数と電子サイクロトロン周波数の比の二乗）以外の、イオン・電子質量比やプラズマベータ値などの各種パラメータを実パラメータとした計算を行った。

遷移層の中でも、フットと呼ばれる領域ではさまざまな微視的不安定性が励起され、大振幅波動を介したプラズマの加熱や加速が積極的に起こることが知られている。ここではこのフットの一部を取り出して局所近似を適用した2次元周期境界フル粒子計算を行った。フット領域は入射イオンと電子、反射イオンから成る3成分プラズマとしてモデル化できる。平均的な衝撃波面（計算領域外）を $y-z$ 面と仮定し、入射および反射イオンの流れの方向を、それぞれ x 方向、 $-x$ 方向とする。計算空間は $x-y$ 面とし、面内に背景磁場を取る。シミュレーション系は電子の静止系とする。まず、先行研究の追試を行い、マッハ数 ~ 5.4 、イオン反射率25%、上流プラズマベータ値0.1、イオン電子質量比1836、磁化プラズマパラメータ4の計算を行った。磁化プラズマパラメータは、通常の太陽風では 10^{3-4} のオーダーである。この場合、電子サイクロトロン・ドリフト不安定性（ECDI）、変形2流体不安定性（MTSI）をはじめとした複数の微視的不安定性が励起され、最終的にMTSIが支配的になることが確認された。上流プラズマベータ値を0.4、磁化プラズマパラメータを25と現実的な値に近づけたところ、ECDIが弱まり、MTSIが相対的に強くなることが分かった。またこのとき、磁場揺動と電場揺動のエネルギーを比べると、相対的に磁場揺動が支配的となることが分かった。最近、磁化プラズマパラメータを100（イオン電子質量比=400）としてECDIにのみ着目した数値実験が行われているが、結果の妥当性は吟味されるべきである。