

「乱流」磁気リコネクションと、太陽プラズマ爆発現象

横山 央明 (東京大学 理学系研究科)

利用カテゴリ XT4B・SX9A

フレア・バーストなどの天体爆発現象のエネルギー解放では、磁気リコネクションが最も重要な物理機構のひとつと考えられている。特に太陽フレアでは、観測的な証拠が多数みつかり、その重要性が確立した。太陽コロナのような大磁気 Reynolds 数 ($\approx 10^{13}$ = 拡散時間/Alfven 時間) 環境では、フレアループのサイズと拡散領域のサイズとの比が極端に大きい(7桁以上)。したがってその中間では、磁気流体乱流的な構造が発達していると考えられる。この乱流による、リコネクションへの影響を調べている。磁気流体 3 次元有限拡散(磁気拡散・粘性・熱伝導)シミュレーションによって調べる。初期条件は、反平行磁場+ガイド縦磁場とする。一様抵抗(あるいは異常磁場)のもとでの時間発展を調べるが、初期擾乱として短時間だけ、最大振幅 50%の空間ランダム抵抗を与える。

これに縦磁場をいれた計算を実施した結果で、電流シートの乱流構造がより 3 次元的(厚み方向に渦を巻くよう)になることがわかった(図 1)。これは縦磁場をいれることで、複数の共鳴面で、磁気拡散流体不安定(テアリング不安定)の固有関数が有限振幅をもつため、そこで磁気島が生成され、3 次元的に互い違いに分布する個所でリコネクションを相互に増幅する機構が起こったからである(反平行の場合は、対称面だけに磁場シアが存在するのと対照的)。2010 年度は、この機構が、背景拡散の強さや境界条件の影響をどう受けるか調べた。

図 2 は、背景磁気拡散の強さを変えた結果である、いずれの場合も、シミュレーションの最終段階においてエネルギー解放率の増大がみられた。このことから、上に述べた縦磁場による拡散増幅効果が、背景拡散率の強さによらず効くということがわかった。この増幅効果は基本的には(非拡散的な)動的な機構によるとの説明を裏付けると考えられる。

図 3 は、境界条件を変えた結果である。先にこの実験の背景を説明する。典型例(図 1)の計算では、領域のすべての壁面で周期境界を課した。複数の共鳴面が存在して、そこに振幅が集中する固有関数が現れる、というのはこの(電流シートの境界での 2 方向)周期条件のもとでの現象であると説明した。このような 2 方向同時に周期的になる状況は、現実の太陽では考えにくい。そこで境界条件を変えたのが今回の実験である。具体的には電流シート 4 辺のうち 2 辺の密度を数桁大きくして慣性を大きくし、実質的な固定端境界条件にした。これは太陽においては、磁気ループ両端に相当するような状況を模している。結果(図 3)をみると、新たな実験のリコネクション率は、元の典型例よりも多少小さくなっているが、それでも増幅効果がみられた。実際物理量の空間分布を調べると典型例と同じく立体的な乱流的構造が発展していることがわかった。すなわち、共鳴効果はこの場合でも有効であるということがわかった。

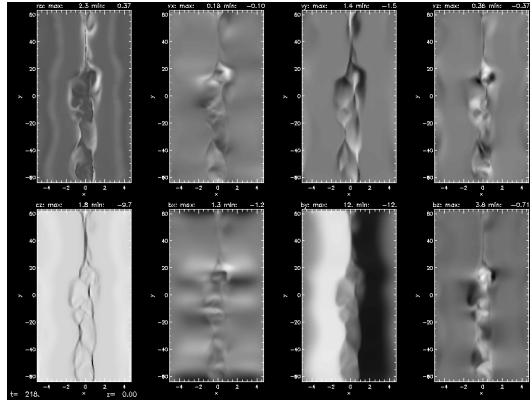


図 1: 典型例の結果。上段左から右へ密度 ρ 、速度 V_x 、 V_y 、 V_z 。下段左から電流密度 J_z 、磁場 B_x 、 B_y 、 B_z の $z = 0$ 面内分布。初期には $x = 0$ に電流シートを置き、紙面に垂直な磁場 B_z (強度は B_y の 10%) を一様にかけてある。

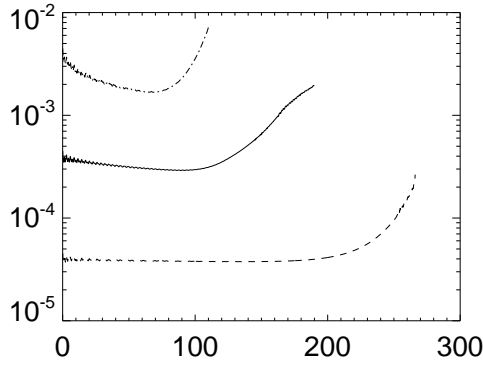


図 2: リコネクション率 (箱全体の磁気エネルギー減少率を、初期磁場強度と電流シート厚み Alfvén 波横断時間で規格化したもの) を、時間の関数として示した。一番上の線から順に、背景磁気拡散率 $\eta/(C_A\delta) = 10^{-1}$ 、 10^{-2} 、 10^{-3} の結果。 C_A は初期磁場の Alfvén 速度、 δ は初期電流シート厚み。時間の単位は δ/C_s で $C_s \approx 0.3C_A$ は初期音速。

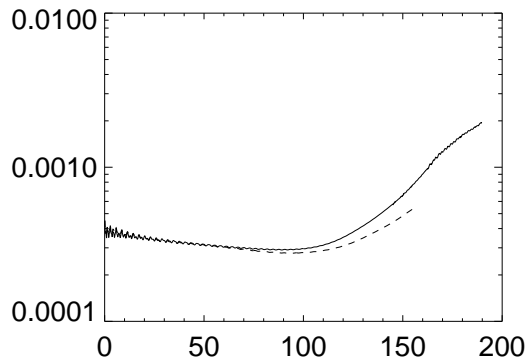


図 3: 実線は典型例 (図 1) で周期境界の結果、破線は境界付近に固定端を置いた結果。横軸・縦軸は図 2 と同じ。