

2次元 MHD シミュレーションを用いた Kelvin-Helmholtz 渦の 合体成長過程に関する研究

A study of the coalescence process of Kelvin-Helmholtz vortices with 2D-MHD simulation

要 旨

太陽風プラズマと磁気圏プラズマの間に速度勾配層が存在する地球磁気圏界面では、流体不安定である Kelvin-Helmholtz (KH) 不安定が励起されると考えられている。近年ではジオテイル衛星やクラスター衛星の観測によって地球磁気圏境界で実際に KH 不安定による渦とみられる構造が確認されている。KH 不安定による大規模な渦構造は北向き惑星空間磁場時に太陽風プラズマを磁気圏内に脇腹から輸送する重要なプロセスのひとつとして考えられている。MHD の線形理論より KH 渦の最大成長波長は初期速度勾配層の厚さの 8 倍程度であると考えられてきた (Miura and Pritchett, 1982)。ところが実際の観測で得られる KH 渦の波長は数 Re と理論に比べ大きなものばかりであり (e.g. Hasegawa et al., 2004), このような大規模渦の形成過程は未だ解決されていない。人工衛星による観測では捉えきれない巨大な KH 渦がどのように発展するのかを数値シミュレーションで調べることは、磁気圏脇腹からの太陽風プラズマの輸送を検証する上で重要である。

本研究では、境界に沿って連続的に発生する多数の渦同士の合体過程が実際に観測されるような大規模渦を形成することが可能かどうかを調べるために、まずは周期境界系において圧力バランスを崩すことで生み出される有限個の渦の合体の 2 次元 MHD シミュレーションを行い、Boxsize によって合体過程に変化が生じるかを調べた。その結果、境界に沿った方向の距離が最大成長波長の 4 倍よりも大きくなると渦が横方向に伸びた形になり、それまで極めて速いスピードで進んでいた渦の合体の進行が遅くなることがわかった。これは初期擾乱で与えた高圧の成長に限界が存在するため、又渦の巻き上がる勢いに限界が生じたためと考えられる。最初の高圧の増分の限界は 0.5 で、合体が進むとその限界は上がるが、計算領域や計算時間に関わらず上限値は 0.7 であることが分かった。この上限値は渦の縦横比が上限をもつことと対応している。

次に、より現実的な設定として非周期系で渦が順々に流れながら成長する計算を行った。結果、周期系と同じく高圧の成長には上限が存在し、最初の限界が 0.5 で計算全体の上限値が 0.7 と同じであった。この上限値は存在することにより非周期系においても巨大渦が急速に発達することではなく、最大成長波長の数倍程度の渦が長い距離の間で生じ続けることがわかった。この結果は実際の観測の結果を支持するものと考えられる。

Abstract

The Kelvin-Helmholtz instability (KHI) is a hydrodynamic instability excited by the velocity boundary such as the planet's magnetospheric boundary, which exists between the stagnant magnetospheric plasma and the solar wind plasma. Indeed, at the Earth's low-latitude magnetospheric boundary, in-situ spacecraft observations have shown the existence of MHD-scale vortex-like flow patterns which are believed to be produced by the non-linear development of the KHI. These results strongly indicate that the KH vortex plays an important role in the local entry of the solar wind plasma across the Earth's flank magnetopause.

However, wavelengths of the observed vortices tend to be considerably longer than the predicted one by the linear theory. While the large-scale development mechanism of the KH vortex is still under debate, the coalescence process of vortices has been one of the most important candidates.

In this study, to understand the large-scale coalescence process of vortices, I performed two-dimensional MHD simulations of the vortex coalescence in the large simulation box with both periodic and open boundaries. As a result, I found the upper limits in the growth of the total pressure and in the aspect ratio of vortices. The limits are associated with slowing of the coalescence process.

I carried out simulation in different system sizes with periodic boundary. When the simulation box size was four times the wave length of the fast growing mode, high pressure which was made by initial perturbation reached a limit for the first time. The limit value didn't change whenever the box size becomes larger. I carried out in the largest simulation box in this study with open boundary. I found that there was the same upper limit as the case in the periodic boundary. For this upper limit, even in the open boundary case, vortices couldn't become larger in a shorter period of time than expected. Instead, vortices which wavelength was several times the predicted one by the linear theory could remain for a long time. In addition to this, I noted whether the coalescence process of vortices can produce large-scale vortices as observed at the Earth's magnetospheric boundary.