

極超音速流 MHD シミュレーションにおける数値的不安定性について

三好 隆博 [1]; 草野 完也 [2]

[1] 広大院・理・物理; [2] 地球シミュレータセンター

On numerical instabilities in MHD simulations for hypersonic flows

Takahiro Miyoshi[1]; Kanya Kusano[2]

[1] Grad. Sch. Sci., Hiroshima Univ.; [2] ESC/JAMSTEC

Strong shocks caused by supersonic plasma flows, which are one of the most basic processes in space plasmas, are universally observed. Therefore, shock capturing solvers that suppress unphysical numerical oscillations have been actively developed and widely applied to space MHD simulations. However, in recent years, it has been found that, at *hypersonic* shock waves, multi-dimensional numerical instabilities appear in high-resolution shock capturing solvers for hydrodynamics (HD). On the other hand, for MHD, even basics of such numerical instabilities have not been studied at all. Therefore, in this study, numerical tests of the numerical instabilities at the hypersonic MHD shocks are performed using typical high-resolution shock capturing solvers for MHD. Moreover, a robust MHD solver that can suppress the numerical instabilities is newly proposed.

First, we perform Quirk's test (Quirk, 1999) for MHD using the Roe solver (Brio and Wu, 1988), the HLL and the HLLD solvers (Miyoshi and Kusano, 2005). The numerical instabilities are observed in the high-resolutions shock capturing solvers, the Roe and the HLLD solvers, as well as for HD when the initial magnetic field is perpendicular to the wave vector of the numerical instability. On the other hand, it is found that the numerical instabilities are relatively stabilized when the magnetic field is parallel to the magnetic field. The numerical instabilities are not observed in the HLL solver that is a typical low-resolution shock capturing solver.

We can infer from the results of the numerical tests that the numerical instabilities may be suppressed when supplemental numerical viscosities for tangential components of the momentum are added. Therefore, we propose a new multi-state HLL-type approximate Riemann solver, HLLD⁻ solver, in which the tangential velocities are assumed to be constant in the Riemann fan. It is confirmed that the HLLD⁻ solver effectively suppresses the numerical instabilities of Quirk's tests for HD and MHD. In addition, a numerical test of hypersonic flows-conducting sphere interaction is performed, and the applicability of the HLLD⁻ solver to magnetospheric MHD simulations will be discussed in this report.

宇宙プラズマにおける基礎的な物理過程として、超音速流に伴う衝撃波形成が普遍的に観測される。それ故、非物理的振動を回避し衝撃波を数値的に再現する衝撃波捕獲法が活発に開発され、宇宙空間・天体プラズマ MHD シミュレーションに応用されてきた。しかし、近年、中性流体に対する高解像衝撃波捕獲法では、極超音速流（マッハ数 5 程度以上の流れ）中で形成される衝撃波面において顕著な多次元数値的不安定性が出現することが明らかになってきた。一方、MHD に対しては、極超音速衝撃波における数値的不安定性に関する基礎的研究は全く行われていない。そこで本研究では、極超音速 MHD 流れにおける数値的不安定性に関する基礎的な数値実験を行い、不安定性の発生条件を議論する。また、新たにロバストな MHD 衝撃波捕獲法を提案する。

極超音速衝撃波における数値的不安定性に関する標準的テストである Quirk テスト (Quirk, 1999) を MHD に拡張し、Roe 法 (Brio and Wu, 1988)、HLL 法及び HLLD 法 (Miyoshi and Kusano, 2005) に対して数値実験を行った。高解像衝撃波捕獲法である Roe 法及び HLLD 法では、数値的不安定性の波数ベクトルに対して垂直方向磁場が与えられた場合においても、中性流体と同様の数値的不安定性が観測された。一方、波数ベクトルに対して平行方向磁場は、数値的不安定性に対する安定化効果として寄与することが見出された。低解像な数値解法である HLL 法では、何れの場合においても数値的不安定性が生じなかった。

数値実験結果に対する考察から、極超音速流における数値的不安定性の安定化機構には、運動量の接線方向成分に対する数値粘性が重要であると予想した。予想に基づき、リーマンファン内で接線方向速度を一定とする新たな多状態 HLL 型近似リーマン解法、HLLD⁻ 法を提案した。中性流体及び MHD に対する Quirk テストから、HLLD⁻ 法が数値的不安定性を効果的に抑制することを確認した。さらに、本報告では極超音速流導体球相互作用系に関する数値実験を行い、磁気圏 MHD シミュレーションに対する HLLD⁻ 法の有効性について議論する。