

Direct numerical simulation of three-dimensional, compressible and nonlinear
Magnetohydrodynamics

三浦英昭（核融合研）

MIURA Hideaki

National Institute for Fusion Science

3次元圧縮性・非線形電磁流体力学方程式 (MHD) の直接数値シミュレーションについて述べる。我々はヘリカル型核融合実験装置、特に核融合科学研究所の大型ヘリカル装置“LHD”を念頭に置いて MHD 直接数値シミュレーションコードを開発してきた¹⁾。ヘリカル型装置によるプラズマの磁場閉じ込め実験では初期平衡配位に対する圧力駆動型不安定性が懸念されるが、LHD 実験においては線型不安定な磁場配位においても比較的良好な閉じ込め結果を得られている^{2),3)}。線型解析では不安定で、なおかつ比較的安全な閉じ込めをもたらす物理機構を調べるためには、高精度で信頼性の高いシミュレーションを行う必要がある。しかしヘリカル型は形状が複雑であり、また、圧力駆動型不安定性は短波長ほど成長率が高いため、シミュレーションにおいては非常に高い解像度が要求されなどの困難がつきまとう。ここでは、これらの困難と取り組む我々のシミュレーションコードの特長と主な計算結果を示す。

磁場閉じ込めの MHD シミュレーションでは簡約化方程式を用いる事が多く、それによって多くの有意義な結果が得られている（例えば文献4）を参照）が、簡約化を行ったために生じる制約も多い。ここでは方程式に近似操作を施さず、3次元圧縮性・非線形 MHD 方程式を直接数値的に解く。MHD 方程式を一般曲線座標系の一種であるヘリカル座標系で記述する。トーラスはトロイダル方向に周期的であり、ポロイダル断面は方形であるものとする。このような矩形格子の上で MHD 方程式を離散化する。空間方向の微分は高次精度の差分法を用いて評価し、これを4次精度のルンゲ・クッタ・ジル法で時間発展させる。

図は MHD シミュレーション結果の一例である。緑色の面は圧力の等値面を表し、その断面の一部も同時に表示した。細い線は流線を表す。トロイダル方向にも大きな成分を持った螺旋状の渦運動が内部に現れ、これによってプラズマの圧力が大きくマッシュルーム状の変形を遂げている事がわかる。このようなプラズマの運動は線型解析⁵⁾から期待されていたものであるが、この後プラズマは閉じ込めの決定的な破壊に至る事無く非線形飽和に至る。このようなプラズマの複雑な挙動を調べる上で、我々のシミュレーションコードは極めて有効である。

1) H. Miura, T. Hayashi and T. Sato, Phys. Plasmas **8** (2001) 4870

2) O. Motojima et al., Phys. Plasmas **6** (1999) 1843-1850

3) H. Yamada et al., Plasma Phys. Control. Fusion **43** (2001) A55-A71

4) K. Ichiguchi et al., Nuclear Fusion **43** (2003) 1101-1109.

5) N. Nakajima to appear in J. Plasma Fusion and Res. SER. **6**.

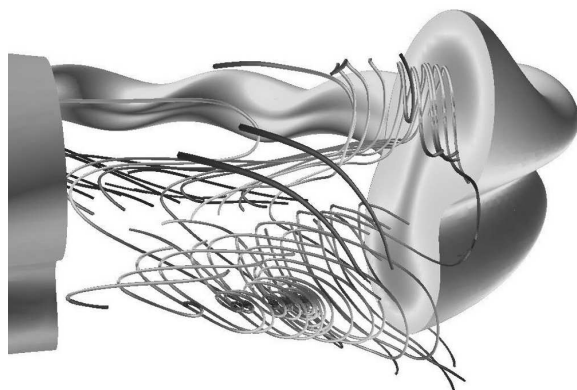


Fig. 1: LHD 中のプラズマ圧力の変形とトロイダル流を含む流れの流線