

無衝突プラズマに対する MHD 方程式の完結モデル

A closure model of magnetohydrodynamic equations for collisionless plasmas

渡邊 智彦[1]

Tomo-Hiko Watanabe[1]

[1] 核融合研

[1] NIFS

<http://www.tcsc.nifs.ac.jp/~tomo>

ほぼ無衝突と考えられる高温プラズマの巨視的な振る舞いを記述するための方程式として、理想磁気流体(MHD)方程式があるが、局所平衡が成立しないため方程式系を閉じさせるには、いわゆる「モーメント・クローザー」問題を扱わなければならない。磁力線方向への熱流束を0と仮定したCGL(Chew-Goldberger-Low)モデルでは、温度異方性によるミラー不安定性の閾値がVlasov方程式による解析結果の1/6になってしまうという問題が古くから指摘されている。また、この問題は、地球磁気圏シース領域における温度異方性を考える上でも注目されている。CGLモデルにおける難点を解決するために、Kulsrudは圧力テンソルの2成分(p_{\perp} , p_{\parallel})を一種のドリフト運動論方程式の2次モーメントにより直接与えるという方法を提案した[1]。Kulsrudの方法では、流体方程式と運動論方程式が共に、Vlasov方程式に(1/e)オーダリングとジャイロ平均を課すことで導出され、両者が連立させて解かれる。ここではこれを運動論的MHD方程式と呼ぶ。

Kulsrudの方法は厳密であるが、得られた方程式は複雑であり、非線形シミュレーションを行うのも困難であるため、何らかの完結モデルが望まれる。そこで本研究では、イオン温度勾配モード乱流のために考案された無散逸完結モデル[2]に基づいて、運動論的MHD方程式に対する以下のような完結モデルを導出した。

$$q_{\perp} + p_{\perp} U_z$$

$$= a_{\parallel} C_{\perp} p_{\perp} + p_{\parallel 0} C_{U1} U_x$$

$$q_{\parallel} + 3p_{\parallel} U_z$$

$$= a_{\parallel} C_{\parallel} p_{\parallel} + p_{\parallel 0} C_{U2} U_x .$$

ここで、 C_{\perp} 、 C_{\parallel} 、 C_{U1} そして C_{U2} は実数で、運動論的MHD方程式から求められる熱流束(q_{\perp} , q_{\parallel})と圧力(p_{\perp} , p_{\parallel})の関係式、および線形分散関係式、の2つの条件を満足するように決められる(添え字の1は揺動成分を示す)。この完結モデルを、上述の運動論方程式の2次モーメントから得られる(p_{\perp} , p_{\parallel})の時間発展方程式の中の(q_{\perp} , q_{\parallel})に適用することで、不安定モードに対する時間反転対称性を保ち、かつ、運動論的解析と一致した線形分散関係(とそれにより与えられる不安定性の閾値)を再現する流体方程式系が得られた。

[1] R.M.Kulsrud, Handbook of Plasma Physics, vol.1, Chapt.1.4, (1983).

[2] H.Sugama, T.-H.Watanabe, and W.Horton, Phys. Plasmas, vol.8, 2617 (2001).

付記：本研究は、洲鎌英雄博士(核融合研)およびW.Horton教授(U.Texas, IFS)との共同研究によってなされた。