

M10a 磁化プラズマ中の電場とオームの法則、それに磁場凍結

柴崎清登 (太陽物理学研究所)

磁場中の熱的プラズマは磁気モーメントを持ち、外力が働くと頻繁な衝突にもかかわらずドリフト運動をする。外力が電場による場合には $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトと呼ばれ、電荷や質量によらずプラズマ全体が $\mathbf{V} = \mathbf{E} / B \times \mathbf{b}$ (\mathbf{b} は磁場方向の単位ベクトル) の速度で運動するので、電流は流れない。この式を変形すると、 $\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} = \mathbf{0}$ となる。電場は磁場に直交しているとする。一方 MHD においては、電場が働くと電流が流れてオームの法則 $\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})$ が成り立つと考える。ここで σ は電気伝導度で、プラズマ中では無限大とし、電流が有限であるためには $\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} = \mathbf{0}$ である必要がある。電気伝導度が無限大の媒質は完全導体と呼ばれ、内部の磁場の時間変化は電磁誘導による渦電流によって抑えられるので変化できない。よって外部より磁場は侵入できないし、増減することもない。MHD は太陽コロナ中にも適用されるが、実際には磁場は変化しており矛盾する。 $\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B} = \mathbf{0}$ は電気伝導度によらず成り立っているので、電磁誘導の式にこの関係式を代入すると $\partial \mathbf{B} / \partial t = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B})$ となる。この式は流体力学における完全流体の渦度の運動方程式と同じ形をしており、渦は流体といっしょに運動することが知られているので、磁場もプラズマといっしょに運動する (凍結する) ことになる。ベクトル解析におけるヘルムホルツの原理によると、ベクトル場は回転性と発散性のふたつの成分よりなり、それぞれ独立である。上記で議論したのは回転性成分 $\nabla \times \mathbf{E} \neq \mathbf{0}$ である。これに対してスカラーポテンシャルから求められる電場 (空間電荷による) は発散性であり、回転なしである。この電場でも $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトは発生するが、磁場の時間変化は伴わないので磁場凍結はない。太陽フレアのインパルス相は、発散性電場の発生 (空間電荷) による、磁場凍結を伴わない爆発現象 (交換型不安定) であると考えられる。