

7. 不可逆過程の熱力学からみたTaylorの緩和状態

古 沢 健 志

トーラス型核融合装置の一種である逆転磁場ピンチ (RFP) は、プラズマの自発的な緩和現象を利用した磁場閉じ込め装置であり、その緩和状態は "Taylor State" と呼ばれている。プラズマを電磁流体として取り扱えば、この緩和現象は磁場の拡散方程式

$$\partial B / \partial t = \nabla \times (v \times B) + \nabla \times [(\eta / \mu_0) \nabla \times B] \quad (1)$$

と、ローレンツ力を含むナビエ-ストークスの式などで表せる。しかしこの方程式系は非線形性と散逸性を同時に含み非常に複雑なので、その解析は極めて困難である。Taylor¹⁾ は完全導体壁中にある「微少な」電気抵抗を持つプラズマ中ではその非線形性によって磁気ヘリシティ

$$K = \int A \cdot B \, dv \quad (2)$$

が近似的に保存量となると考え、緩和状態は磁気ヘリシティ一定という拘束条件の下での磁場のエネルギー最小の状態となることを示した。しかし彼の用いた原理 (ヘルムホルツの自由エネルギー最小) は、RFP のように配位を維持するために系外からエネルギーを入れて散逸を補なうことで定常状態を保つ系には適用できない。そこで本研究ではこのような系に適用される不可逆過程の熱力学を用いてこの現象を解明しようと試みた。固体

の導体のようにオームの法則が線形 ($v = 0$) の場合、磁場は課せられた拘束条件のもとでのエントロピー生成 (ジュール熱) 最小の定常状態に緩和する。しかしプラズマの場合には (1) の非線形項 (右辺第一項) があるためにそれが妨げられる。そこで磁気ヘリシティ一定という拘束条件の下でのエントロピー生成 (ジュール熱) 最小の状態を求めてみた。得られた定常状態は Taylor の求めた緩和状態を一般化した形になっており、その欠点のいくつかを補なう特徴 (有限の圧力勾配を支え、境界条件を満たし、抵抗の空間依存性にも影響される。) を持っていることが示せた。

1) J. B. Taylor: Phys. Rev. Lett. 33, 1139 (1974)

2) P. Kirby: Phys. Fluids, 31, 625 (1988)

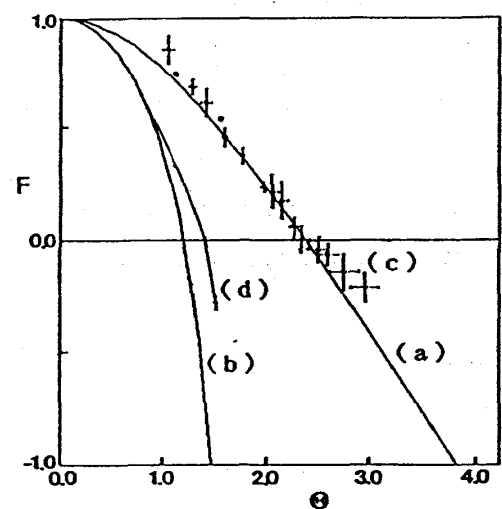


図1. $F-\theta$ グラフ。 (a) は抵抗が一定の場合のエントロピー生成最小の状態、(b) は Taylor によるベッセル関数モデルである。 (c) (d) は Kirby によるシミュレーションの結果であり、(c) は抵抗を一定とした場合、(d) は抵抗が壁の近くで急に大きくなるとした場合である。