

論文内容の要旨

論文題目 Bifurcation of the Radial Electric Field Structure
Induced by an Externally Imposed Potential in
Tokamak Plasmas

(トカマクプラズマにおける外部印加ポテンシャル
による径電場構造分岐)

氏名 糟谷直宏

トカマクプラズマは非線形応答を有し、Hモード[1]に代表される改善閉じ込めなどの様々な分岐現象を示す[2]。改善閉じ込めにおいて径電場の急峻な構造形成が重要な役割を果たしていることは広く知られており、その構造形成機構の理解は重要な課題である。トカマクにおいて、電極を用いてプラズマ周辺部に電圧を印加すること（電極バイアス）により、自発的Hモード遷移と同様に改善閉じ込めが得られる。これは制御可能な改善閉じ込め達成方法として広く用いられている。本研究はこの電極バイアスという外部駆動力が存在する場合の径電場構造形成機構の理解を目的とする。トカマク型実験装置 TEXTOR のバイアス実験では、遷移前後で空間的に一様な径電場分布から局所的なピークを有する分布への急激な変化、電極の電圧電流特性における正負バイアス非対称性、径電場ピーク位置の外側への片寄り等の観測がなされている[3]。この特徴的な実験結果を説明するためにモデルを構成し、プラズマの非線形応答がもたらす構造形成とその構造間遷移機構、そして自発遷移と電極バイアスによる遷移の関係を明らかにした。

径電場を決定するモデルは、電荷保存則から導かれる径方向電流の釣り合いが基本となる

$$\frac{\partial}{\partial t} E_r = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_{\perp}} (J_{\text{visc}} + J_r + J_{\text{orbit}} - J_{\text{ext}})$$

径方向電流成分としてはシア粘性による電流 J_{visc} 、局所電流 J_r 、軌道損失電流 J_{orbit} 、電極から流れ込む電流 J_{ext} を考える。シア粘性による電流は異常輸送の寄与として径電場の二階微分に比例する形で取り入れる。局所電流はトカマク磁場構造中の新古典輸送過程から生じる径方向電流により与えられる。軌道損失電流は荷電粒子が有限軌道幅を持つことによる外部への直接損失から生じる。局所電流と軌道損失電流は径電場に関して非線形な依存性を持つ。ここでは両者をあわせて非線形応答関数と呼ぶ。この非線形な応答が径電場構造分岐に重要な役割を果たす。

局所電流 J_r の非線形性に注目して径電場構造を解析する。定常状態において方程式を解くと、同一の境界条件から、空間的に一様な径電場分布とともに、局所的なピークを持つ孤立波解が複数個得られる (図 1)。複数解はここではじめて見つけられた。解の個数は電極間の距離によって定まる。径電場を積分することにより電極間の電圧 V と電極電流 I の関係が求められる。実際に取りられる V 、 I の値は電極が構成する外部回路の方程式も満たす必要がある。定常解には安定な領域と不安定な領域があり、その境界点が 1 つの状態から他の状態へ遷移する臨界点を与える (図 2)。臨界点でのモードの安定性解析とそのモードの時間発展解析から遷移時にどの解が選択的に形成されるか (遷移選択則) がわかる。空間的に一様な解からひとつのピークを持つ解もしくは別の空間的に一様な解への遷移が起こることが示された。また、印加電圧増加時と減少時のヒステリシスが電圧電流特性から予想される。

実験結果をより正確に説明するためにさらに研究を展開した。径電場構造形成に寄与する要素はいくつも存在し、それら相互の関係を探ることで、径電場構造分岐の特性を捉えることができる。両極性径電場はバイアスをかけないときに自発的に生じる径電場で、圧力勾配に依存することよりプラズマ自体の持つ駆動力を表す制御パラメータとして扱うことができる。この両極性径電場を考慮することで正負バイアス非対称性が説明される。また、軌道損失もプラズマ端部での輸送に寄与する。軌道損失を

含めた解析はHモードへの自発的遷移を研究するという点で重要である。新古典輸送 (J_r) と軌道損失 (J_{orbit}) というふたつの機構の競合から、圧力勾配をパラメータとした自発遷移への電極バイアスの効果がわかる。正バイアス時には新古典輸送項がもたらす特徴が強く現れ、多くの孤立波解が存在し得る。それに対して、負バイアス時には電場に関する径電流の複雑な非線形応答の影響が現れる。また、圧力勾配が大きくなると負バイアス時には遷移が起こらない。この特徴は両極性径電場（自発）とバイアス電圧（外部）という2つの駆動源をパラメータとした相図に表れる（図3）。複素要素の競合からもたらされる複雑な非線形応答は、さらに多くの解への分岐をもたらす。

径電場構造の空間非対称性についても考察を行った。ここで、空間非対称性を与える要因として、プラズマパラメータの空間分布と軌道損失項の空間変化を考慮する。両者の空間非一様性が非線形応答関数を通じて同様な寄与をする。径電場構造は対称性を破る項に敏感に反応し、プラズマパラメータの空間分布を考慮した場合、ピーク位置は正（負）バイアス時では勾配の強い（弱い）領域に引き寄せられる（図4）。ピークの移動量はパラメータの曲率に対数的な依存性を示す。そして、ひとつ山構造のピーク位置が、空間非対称項により多数山構造のピーク位置に現れる。そのため径電場空間構造の測定から粘性係数に関する重要な情報が得られる。

遷移の選択則から径電場にはひとつ山構造が選択的に形成されるが、複数の電極を用い、かつ印加電圧を遷移点近傍で増加させることにより複数山構造を形成できることがわかった。これはより幅の広い、径電場勾配が大きい領域を達成できることを意味し、閉じ込めの更なる改善に応用できる。

解析は実験結果をよく再現しており、さらに実験で未確認な特性についても言及した。改善閉じ込め状態における径電場構造形成機構の理解に確かな進展を与えたといえる。

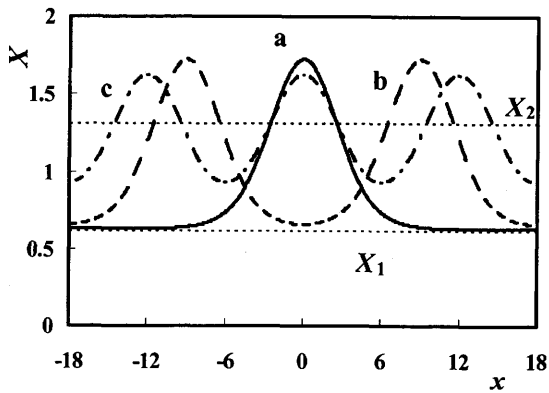


図 1 : 電極-リミタ間の径電場(X)空間分布。 X_1 , X_2 が空間的に一様な解、a, b, cがそれぞれピーク個数が1~3の孤立波解。 $x = \pm 18$ がそれぞれ電極、リミタ位置に対応。

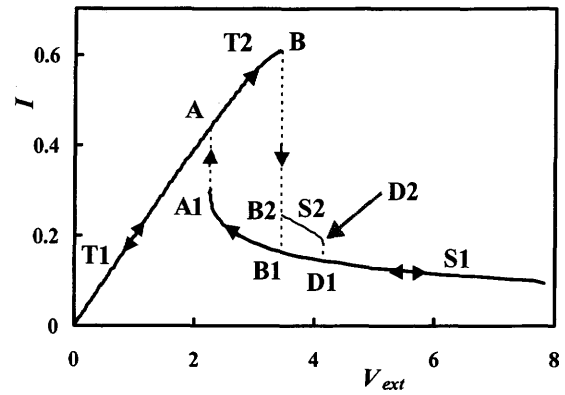


図 2 : 電極印加電圧 V_{ext} と電極電流 I の関係。点 B において空間一様解(T2)から1つ山の孤立波解(S1)へ遷移する。

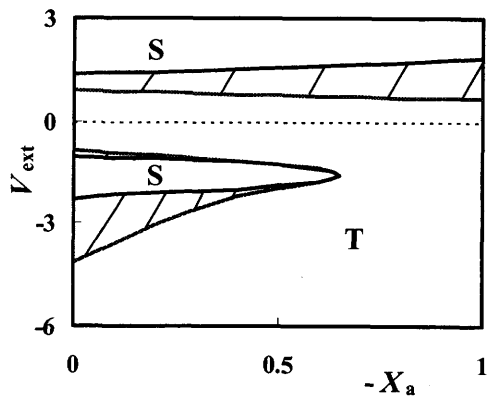


図 3 : 両極性径電場 X_a とバイアス電圧 V_{ext} をパラメータとした相図。S、T はそれぞれ孤立波解、空間一様解が存在する領域を表す。斜線部は両解が存在可能な領域で、ヒステリシスに対応。

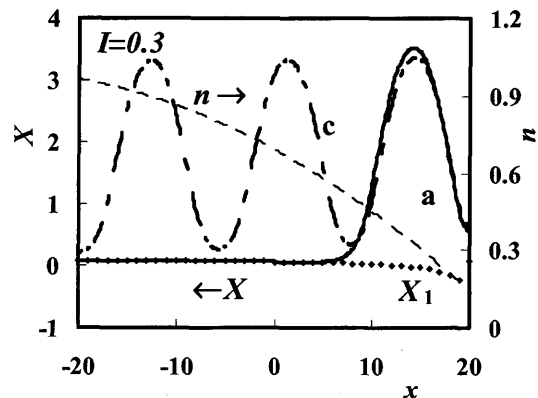


図 4 : 非一様密度(n)分布(破線)を考慮した場合の径電場(X)空間分布。ひとつ山構造(a)のピークが3山構造(c)のピーク位置にシフトしている。 $x = \pm 20$ がそれぞれ電極、リミタ位置に対応。

- [1] F. Wagner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **49** (1982) 1408.
 [2] S.-I. Itoh and K. Itoh, Phys. Rev. Lett. **60** (1988) 2276.
 [3] R. R. Weynants *et al.*, Nucl. Fusion **32** (1992) 837.