

トカマクにおけるヘリカルコア形成機構としての内部キンクモード  
**Internal kink mode as a mechanism of helical core formation in tokamaks**

河越俊平, 石澤明宏, 中村祐司, 相羽信行<sup>A</sup>  
 S. Kawagoe, A. Ishizawa, Y. Nakamura, N. Aiba<sup>A</sup>

京大エネ科 量研<sup>A</sup>  
**Grad. Sch. of Energy Science, Kyoto Univ., <sup>A</sup>QST**

近年、ITERのハイブリッドシナリオを模擬したDIII-DやJT-60Uにおける実験で図1に示すような磁気軸近傍がヘリカル状(トロイダルモード数 $n=1$ およびポロイダルモード数 $m=1$ )に変形する平衡状態が観測される。これはヘリカルコアと呼ばれ、注目が集まっている。理論的には、ヘリカルコアはMHD平衡方程式の分岐平衡解(軸対称解と非軸対称解)の非軸対称解として理解されている。W.A.Cooperら[1]によると $n=1$ の内部キンクモードとの関係が示唆されており、その出現条件は安全係数 $q$ 分布が磁気軸近くで非常に平坦か逆シアかつその極小値 $q_{min}$ が1付近であること、さらにプラズマ境界における $q$ 値が3~4以下、 $\beta$ 値がある程度高い場合であるとしている。また、ヘリカルコアの出現条件およびその振幅はプラズマ断面形状に強く依存することが示されている[2]。しかしヘリカルコアの形成機構は未解明である。

本研究でいくつかのポロイダル断面形状(楕円度 $\kappa$ 、三角度 $\delta$ の組み合わせ)および $q$ 分布の極小値 $q_{min}$ に対して平均ベータ3%、アスペクト比 $A=3$ のプラズマを解析する。2次元MHD平衡計算コードMEUDASを用いてヘリカルコアが現れるとされる磁気軸近くで平坦な逆シアの $q$ 分布(図2左)のプラズマに対して軸対称平衡計算を行った。そして、その軸対称平衡に対する線形不安定性解析をMINERVAで行って、内部キンクモードの線形成長率を評価した。さらに、3次元平衡計算をVMECを行い、軸対称平衡と同じ $q$ と圧力分布を持つ非軸対称平衡のヘリカル変位を評価した。

図2は、ポロイダル断面が $\kappa=1.0, \delta=0$ の場合の $q_{min}$ を変化させたとき(左)の、内部キンクモードの成長率と、ヘリカル変位の $q_{min}$ 依存性(右)を示す。ヘリカル変位と線形成長率は $q=1$ 近傍で最大となる。そして、ヘリカル変位の分布は線形成長率の分布と同様に $q_{min}$ に対して裾をひく構造が見られ、ヘリカル変位と線形成長率は定性的に一致することがわかる。また、ヘリカル変位に対し内部キンクモードの線形成長率が閾値を持つことがわかる。更に各 $q_{min}$ をパラメータとして、線形成長率を横軸にヘリカル変位を縦軸にプロットしたものを図3に示す。

ヘリカル変位の線形成長率に対する閾値は $0.005[v_A/R_0]$ で、ヘリカル変位は内部キンクモードの線形成長率に比例して増大することがわかる。また、 $q_{min} > 1$ と $q_{min} < 1$ では線形成長率に対するヘリカル変位の依存性の差から、形成機構が異なることが推測される。

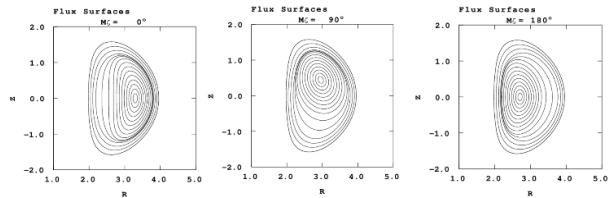


図1: ヘリカルコアの磁気面 ( $\kappa=1.6, \delta=0.344$ )。左からトロイダル角 $\zeta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 。

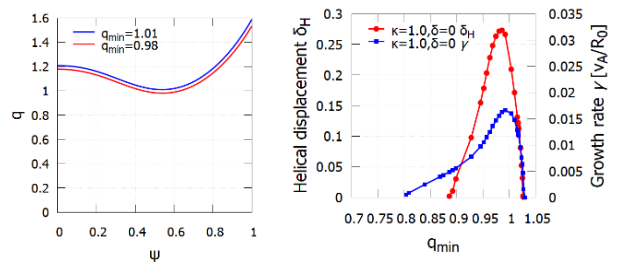


図2:  $q_{min}$ を変えた $q$ 分布の例(左)と線形成長率 $\gamma$ とヘリカル変位 $\delta H$ の $q_{min}$ 依存性(右)

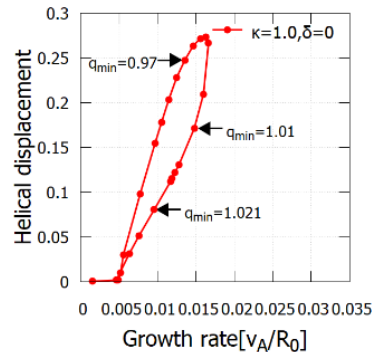


図3:  $q_{min}$ をパラメータとしたのヘリカル変位の内部キンクモードの線形成長率依存性

- [1] W.A. Cooper et al, Phys. Rev. Lett. 105, 035003 (2010)  
 [2] Y. Nakamura et al, Phys. Plasmas 27, 092509 (2020).