$\ell = 2, m = 4$ ヘリカル磁場中におけるトカマク
プラズマの位置安定性

桜井桂一, 広倉 寛, 棚橋秀伍

(名古屋大学プラズマ研究所 JIPP T-II 運転保守グループ)

(55年1月25日受理)

Positional Stability of Tokamak Plasma in a $\ell = 2,$
 $m = 4$ Helical Field

K. Sakurai, S. Hirokura and S. Tanahashi

(Received January 25, 1980)

Abstract

The decay index of the external magnetic field of JIPP T-II torus with $\ell = 2, m = 4$ helical windings is investigated. The horizontal displacement of the plasma column is measured as a function of the vertical magnetic field. A following relationship $\delta B_v / \delta \Delta \simeq \epsilon_h B_t / 2\pi R$, where ϵ_h is the rotational transform of the helical field, B_t is the toroidal magnetic field and R is the major radius of the plasma column, is experimentally confirmed. Although the value of the decay index is negative, for example $n \simeq -5$, the plasma column is also positionally stable in the vertical direction. The results suggest that a concept of strong focusing may be applicable.

§1. 序 文

JIPP T-II装置では、昨年(1979年)10月から従来のトカマク装置としての運転に加えてヘリカル磁場を用いた場合のプラズマに関する本格的な実験が開始された。装置の

Institute of Plasma Physics, Nagoya University

パラメータは，トーラスの主半径 $R = 91 \text{ cm}$ ，副半径 $a_L = 17 \text{ cm}$ ，最大トロイダル磁場は $B_t = 3.0 \text{ Wb/m}^2$ ，ヘリカル巻線は極数 $\ell = 2$ ，周期数 $m = 4$ ，ヘリカル磁場の回転変換角は $0.1 \leq \epsilon_h \leq 0.3$ （ただし， $B_t = 1.8 \text{ Wb/m}^2$ ）である。また，抵抗性シェルの時定数は約 5.2 ms である。抵抗加熱を行なう場合の通常の実験においては，ヘリカル磁場中にトカマクプラズマが生成されるものと考え，プラズマ位置のフィードバック制御が行なわれている。

一様な垂直磁場を用いることによってプラズマの平衡を保持するトカマク装置では，プラズマ柱が位置的に安定であるためには外部磁場の減少指数 n ($n \equiv -\frac{r}{B_\perp} \frac{\partial B_\perp}{\partial r}$) が $0 < n \leq 3/2$ の範囲にあることが必要である。この条件は，加速器における弱収斂に対応するものである。⁽¹⁾ 一方，最近になってステラレータ磁場を用いた場合には，プラズマ柱の垂直方向の位置安定性を維持したまま n 値を負にすることが可能であり，高い位置安定性が得られることが報告されている。⁽²⁾

この報告では，ヘリカル磁場が付加された場合のプラズマ柱の位置安定性を調べるために，垂直磁場の大きさを変化させたときのプラズマ柱の変位を測定し，外部磁界の n 値を評価した。その結果， n 値は負の値になることが判明した。

§ 2. 測定方法

最初に，外部磁界の減少指数が n の垂直磁界は， $\Delta \ll R$ の近似のもとで，

$$B_\perp \simeq B_0 \left(1 - \frac{n\Delta}{R} \right) \quad (1)$$

と書くことができ， $\Delta = 0$ においてプラズマ柱の位置的な平衡が成り立っているとすると，

$$B_0 = \frac{\mu_0 I_p}{4\pi R} F, \quad F \equiv \ell n \frac{8R}{a} + \beta_p + \frac{\ell_i - 3}{2}$$

⁽³⁾ である。ここで， R はプラズマ柱の主半径， a はプラズマ柱の副半径， I_p はプラズマ電流， β_p はプラズマのポロイダルベータ値， ℓ_i は単位長さ当りのプラズマ柱の内部インダクタンス， Δ はプラズマ中心からの距離である。

次に，外部磁界の減少指数が n_v の垂直磁界 ∂B_v が加えられたとき，プラズマ柱の変位 $\delta \Delta$ が引き起こされるとすると，

$\ell=2, m=4$ ヘリカル磁場中におけるトカマクプラズマの位置安定性

$$B_0 \left(1 - \frac{n \delta \Delta}{R} \right) + \delta B_v \left(1 - \frac{n_v \delta \Delta}{R} \right) \simeq \frac{\mu_0 I_p}{4 \pi R} \left(1 - \frac{\delta \Delta}{R} \right) F \quad (2)$$

となる。この式を用いると、

$$1 - n \simeq \frac{4 \pi R^2}{\mu_0 I_p F} \left(\frac{\delta \Delta}{\delta B_v} \right)^{-1} \quad (3)$$

が得られ、 $\delta \Delta / \delta B_v$ を測定することによって n の値を求めることができる。

プラズマ柱の変位 Δ は、プラズマ電流によるポロイダル磁場の測定から求めることができ、

$$\Delta = d \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} - \frac{d^2}{2R} \left\{ \ell n \frac{d}{a} - 1 + \left(\Lambda + \frac{1}{2} \right) \left(1 + \frac{a^2}{d^2} \right) \right\}, \quad (4)$$

$$\Lambda \equiv \beta_p + \frac{\ell_i}{2} - 1$$

(3) である。ここで、 d は磁気プローブの副半径、 S_1 および S_2 はそれぞれ外側および内側の磁気プローブに得られるプラズマのポロイダル磁界である。したがって、実験的には、

$$\frac{\delta \Delta}{\delta B_v} \simeq d \delta \left(\frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \right) / \delta B_v \quad (5)$$

を求めることになる。

§ 3. 実験結果

JIPP T-II 装置のプラズマ位置のフィードバック制御系はプラズマ電流に比例した垂直磁場を発生することができるので、制御系の比例係数を変更することによって垂直磁場の大きさを变化させることができる。第1図は、ヘリカル磁場を用いた場合の放電波形の一例を示したものである。 I_p はプラズマ電流、 V_L は周回電圧、 S_1 および S_2 は磁気プローブ信号、 B_v は垂直磁場である。このとき、垂直磁場は $B_v = K I_p$ 、 $K = 1.54 \times 10^{-7} \text{ Wb} / (\text{m}^2 \text{ A})$ である。第2図は、時刻 $t = 0.1 \text{ s}$ において測定した垂直磁場とプラズマ柱の変位

との関係を示したものである。この図について $\delta\Delta/\delta B_v$ を求めると, $\delta\Delta/\delta B_v = -4.8 \text{ (m}^3/\text{wb)}$ となるので, 式(3)を用いて $n \approx -7.5$ が得られる。ただし, $F = 3.38$ とした。

ところで, この実験に用いた $\ell = 2$ のヘリカル磁場においては, プラズマ柱が変位することによって垂直磁場が生じることが理論的に示されており,

$$\frac{\delta B_v}{\delta \Delta} = \frac{\epsilon_h B_t}{R} \quad (6)$$

の関係式が得られている。(1)

そこで, ヘリカル磁場による垂直磁場が式(6)によって与えられると仮定して, 式(2)と同様に垂直磁場 δB_v が加えられたときプラズマ柱の変位 $\delta\Delta$ が引き起こされるとすると,

第1図 放電波形

$$\epsilon_h = 0.09, B_t = 2.24 \text{ Wb/m}^2$$

I_p ; プラズマ電流,

V_L ; 周回電圧,

S_1 ; 外側のプローブ信号,

S_2 ; 内側のプローブ信号,

B_v ; 垂直磁場

第2図 垂直磁場に対するプラズマ柱の変位

$\ell=2, m=4$ ヘリカル磁場中におけるトカマクプラズマの位置安定性

$$B_0 \left(1 - \frac{n_0}{R} \frac{\delta \Delta}{\delta \Delta} \right) + \frac{\epsilon_h B_t}{R} \delta \Delta + \delta B_v \left(1 - \frac{n_v}{R} \frac{\delta \Delta}{\delta \Delta} \right) \simeq \frac{\mu_0 I_p}{4 \pi R} \left(1 - \frac{\delta \Delta}{R} \right) F \quad (7)$$

となる。ここで、 n_0 はプラズマ柱の平衡を保つために加えられた垂直磁場の n 値である。これより、

$$\frac{\delta B_v}{\delta \Delta} \simeq - \left\{ \frac{(1-n_0) \mu_0 I_p F}{4 \pi R^2} + \frac{\epsilon_h B_t}{R} \right\} \quad (8)$$

が得られるが、我々の実験の範囲では括弧内の第1項目は第2項目に比較して十分小さく、近似的に、

$$\frac{\delta B_v}{\delta \Delta} \simeq - \frac{\epsilon_h B_t}{R} \quad (9)$$

である。第3図は、この関係を調べるために実験値と理論値とを比較したものである。両者はよく

第3図 $\epsilon_h B_t / R$ と $\delta B_v / \delta \Delta$ との関係

- $\epsilon_h = 0.14, B_t = 2.24 \text{ Wb/m}$
- $\epsilon_h = 0.09, B_t = 2.24 \text{ Wb/m}$
- △ $\epsilon_h = 0.09, B_t = 1.57 \text{ Wb/m}$
- $\epsilon_h = 0.08, B_t = 1.21 \text{ Wb/m}$

一致することがわかる。

次に, 第4図は, $\epsilon_h B_t / I_p$ に対する n 値の変化を示したものである。ここで, 式(9)の依

第4図 $\epsilon_h B_t / I_p$ と n の関係

- $\epsilon_h = 0.14$, $B_t = 2.24 \text{ Wb/m}^2$
- $\epsilon_h = 0.09$, $B_t = 2.24 \text{ Wb/m}^2$
- △ $\epsilon_h = 0.09$, $B_t = 1.57 \text{ Wb/m}^2$
- $\epsilon_h = 0.08$, $B_t = 1.21 \text{ Wb/m}^2$

存性を用いると式(3)から $1 - n \propto \epsilon_h B_t / I_p$ となるので, 第4図の横軸は $\epsilon_h B_t / I_p$ とした。このようにして, ヘリカル磁場を用いた場合には, n 値は大きな負の値になることが明らかになった。

最後に, 式(3)からわかるように, プラズマ柱の変位は $\delta \Delta \propto \delta B_v / (1 - n)$ とあらわされるので, 垂直磁場が変化した場合のプラズマ柱の変位は $1 / (1 - n)$ に比例する。このことは, プラズマ電流あるいはポロイダルベータ値などのプラズマパラメータが変化して必要な垂直磁場が変化した場合にも同様である。例えば, JIPP T-II 装置においてヘリカル磁場を用いないときには $n \approx 0.8$ であるから $\delta \Delta \propto 5 \delta B_v$ である。一方, ヘリカル磁場を用いて $1 - n \approx 5$ とした場合には $\delta \Delta \propto 0.2 \delta B_v$ である。したがって, ヘリカル磁場を用いた

$\ell=2, m=4$ ヘリカル磁場中におけるトカマクプラズマの位置安定性

ときの、プラズマ柱の位置安定性は、ヘリカル磁場を用いないときに比較して2.5倍にもなる。仮りに、ヘリカル磁場を用いない場合に水平方向の位置安定性が最も高い $n \simeq 0$ の場合と比較しても、その安定性は5倍である。

以上の結果から、 n 値は大きな負の値をとることがわかるが、同時にプラズマ柱は垂直方向にも位置的に安定であり、弱収斂に対する $0 < n < 3/2$ の安定条件は適用できないことがわかる。したがって、ヘリカル磁場を用いたトカマクプラズマでは強収斂の概念が適用されるかもしれない。

§ 4. 結 語

この報告では、ヘリカル磁場中のトカマクプラズマの位置安定性を調べるために、垂直磁場の变化に対するプラズマ柱の変位を測定し、外部磁場の減少指数 n を評価した。その結果、 n は大きな負の値となるが、プラズマ柱は垂直方向にも位置的に安定であることが判明した。また、垂直磁界の変化に対するプラズマ柱の変位は $\delta B_v / \delta \Delta \simeq e_h B_t / R$ に従うことが実験的に確かめられた。

謝 辞

本実験を行なうにあたって有益な助言をいただいた宮本健郎教授、松岡啓介助手、川端一男助手に感謝の意を表します。また、フライホイール電源の運転を担当していただいた富田技官、小野技官、錦見技官に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) S.Yoshikawa, Phys. Fluids 7 (1964) 278.
- (2) H.Ikezi et al., Phys. Fluids 22 (1979) 2009.
- (3) V.S. Mukhovatov and V.D. Shafranov, Nucl. Fusion 11(1971) 605.