コンパクトトーラスプラズマ磁気面再構成における n=1モード非軸対称不安定性の影響

学生員 鶴田 繭子* 正員 桂井 誠*

Influence of Non-Axisymmetric n=1 Toroidal Mode Instabilities on Reconstruction Measurements of Magnetic Surfaces for Compact Torus Plasmas

Mayuko Tsuruda*, Student Member, Makoto Katsurai*, Member

The influence of non-axisymmetric instabilities, specifically the n=1 toroidal mode, was studied on the magnetic flux contours that are numerically reconstructed by use of magnetic field profiles measured in Proto-TS-4 device. The device has a cylindrical vacuum vessel with a couple of coaxial magnetized plasma guns at both ends and a magnetic flux conserver with a side axial length of 600mm and a diameter of 940mm. The main measurement system consists of a 2-dimensional magnetic probe array on the poloidal plane(r-z plane) with two components, B_z and B_t (total 84 channel pick-up coils). The B_z field data are used to reconstruct the poloidal magnetic surfaces(Ψ) on the assumption that plasma configuration has axisymmetry. In this study, deformation of the reconstructed flux contours has been studied particularly when the plasma configurations were subjected to a macroscopic instability, specifically n=1 toroidal mode instability. The influence of this component on the reconstructed contours was analytically calculated and the results were qualitatively compared with the contours experimentally observed. Types of n=1 error, namely, shift or tilt, on the reconstructed magnetic surface were also qualitatively discussed.

キーワード:トーラスプラズマ、2D 磁気プローブアレイ、磁気面再構成、n=1 不安定性

Keywords: torus plasma, 2D magnetic probe array, flux contour reconstruction, n=1 instability

1. はじめに

核融合炉心プラズマの研究は国際熱核融合炉計画 (ITER 計画) に代表されるようにこれまでトカマク方式を中心に進められてきた。しかしながら、この方式の採用を前提とするとその建設、特にトロイダルマグネットの建設に大きな費用がかかることが明かになっている $^{(1)}$ 。そこで、このようなトロイダルコイルに巨費を必要としない経済的に競争力のある炉心プラズマとしてコンパクトトーラスと呼ばれる一連の配位群が基礎研究レベルではあるが注目されている。コンパクトトーラスはトカマク配位のように強力な外部トロイダル磁界によって固定されていないため、しばしばトロイダルモード数 n=1 モード不安定性に代表される低次の非軸対称不安定性に見舞われ、その計測と制御が問題となっている $^{(2)}$ $^{(3)}$ 。ここでトロイダルモード数 n とは、不安定性などによるプラズマの変形をトロイダル方向に関

してフーリエ分解したときに得られるモード 次数のことで ある。

筆者らはトーラスプラズマ合体実験装置 TS-3 および TS-4 において、各種コンパクトトーラス具体的には、球形トカマク (ST)、スフェロマク、逆転磁界配位 (FRC)、コンパクト逆磁場ピンチ (コンパクト RFP)、等の単体および合体生成実験を行ってきた $(^4)$ 。 TS-3 および TS-4 装置において様々な計測系のうち特に磁気面計測は、磁気配位の特性を知るための重要な計測の一つである。 TS-3 および TS-4 装置における磁気面計測では、2 成分すなわち中心軸対称方向成分 (z 方向) の磁界成分 B_z および周方向 (トロイダル方向) の磁界成分 B_t について二次元磁気プローブアレイを用いて各点において計測を行い、特にプラズマが軸対称であるという仮定の基に計測された磁場データから磁気面の再構成を行っている。

本研究では、コンパクトトーラスにおいてしばしば現れる低次の非軸対称不安定性、特に主要である n=1 トロイダルモード不安定性を念頭に入れ、こうした非軸対称不安定性に見舞われた場合に、軸対称を仮定して行われる磁気面再構成がどのような変形を受けるかについて数値計算を行

7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

^{*} 東京大学

^{〒 113-8656} 東京都文京区本郷 7-3-1 University of Tokyo

う。そして $\operatorname{Proto-TS-4}$ および $\operatorname{TS-4}$ 装置における磁気面測定実験結果との比較を行い、数値計算結果の適用性について検討する。そして同様の手法による磁気面計測において $\operatorname{n=1}$ モード不安定性が生じ、ここで問題とする磁気面の変形が見受けられる場合の磁気面計測結果の評価について検討を加えることを目的とする。

2. Proto-TS-4 装置と磁気面計測

本研究において主に使用した装置は $\operatorname{Proto-TS-4}$ 装置である $^{(5)}$ 。 $\operatorname{Proto-TS-4}$ 装置は後述の $\operatorname{TS-4}$ 装置の予備実験段階にある装置で、プラズマ生成部として同軸プラズマ銃、プラズマ閉じ込め部としてフラックスコンザーバを備えている。図 $1(a) \sim (c)$ に内部構造を示すように $\operatorname{Proto-TS-4}$ 装置はプラズマ生成部として両端に二つの同軸プラズマ銃 $^{(6)}$ を備えたコンパクトトーラス合体実験装置である。プラズマ閉じ込め部であるフラックスコンザーバ (FC: 磁束保存容器)は八角柱形状 (対角直径 $1000[\operatorname{mm}]$ 、対向板距離 $940[\operatorname{mm}]$ 、水平部の長さ $600[\operatorname{mm}]$)を有しており、厚さ $3[\operatorname{mm}]$ のアルミ製である。厚さ $3[\operatorname{mm}]$ のアルミ板の時定数はおよそ $1000[\mu \operatorname{sec}]$ であり、放電のパルス幅 $(200[\mu \operatorname{sec}])$ に比べて充分長くなるよう設計されている。中心には外径 $10[\operatorname{mm}]$

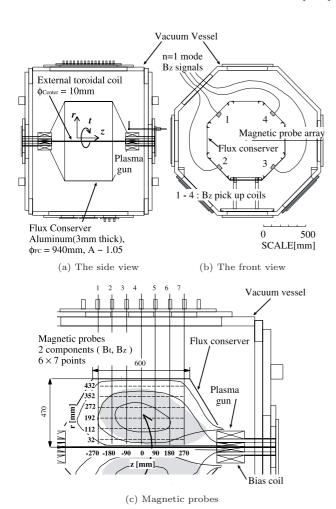


図 1 Proto-TS-4 装置 Fig. 1. Proto-TS-4 device.

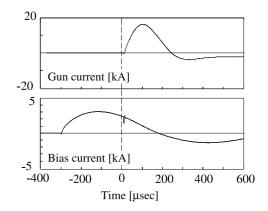


図 2 スフェロマク配位生成時の放電波形 Fig. 2. Discharge time sequence for spheromak

Fig. 2. Discharge time sequence for spheromak production.

のガラス管に挿入された外部トロイダル磁界を印加するための銅線が設置されている。生成されるプラズマのアスペクト比は $A\sim 1.05$ である。こうした形状のため、中心導体が設置されていることにより生じるティルトやシフトに対する安定化効果は、ほとんど期待できないと考えられる $^{(7)}$ 。この外部トロイダル磁界コイルに電流を流すことによってスフェロマク配位の他に球形トカマク、コンパクト RFP の生成が可能である。

図 1(c) に Proto-TS-4 装置における磁気プローブアレイによる磁気測定点を示す。Proto-TS-4 装置では、それぞれ 2 成分 (B_z, B_t) 6 測定点のプローブが 7 本外部より半径方向に挿入されており、合計 84 測定点のデータ処理を同時に行う。ポロイダル磁気面は軸対称を仮定して次式の磁気面関数 Ψ の等高線として再構成される。

$$\Psi(r,z) = \int_{r} 2\pi r B_z(r,z) dr \cdots \cdots (1)$$

また、Proto-TS-4 装置では、トロイダルモード 計測を行っている。図 1(b) に示すようにトロイダルモードを測定するためにトロイダル方向に対称に 4 点、 B_z 磁界測定用のピックアップコイルを設置してある。各ピックアップコイルの設置位置は図 1(b) に示すように軸方向中央 (z=0) にフラックスコンザーバの内壁位置 r=470[mm] である。トロイダルモード 計測用磁気プローブから得られたデータはデジタルフーリエ変換され、データ点 4 のこのシステムでは n=0, n=1 および n=2 モード成分が計測可能である。図 2 にスフェロマク配位生成時に同軸プラズマ銃に流す放電電流波形すなわち、プラズマ銃電流 (同軸電極間放電電流: Gun current)、バイアスコイル電流 (Bias current) を示す。ここでは初期プラズマが生成されるプラズマ銃電流通電時刻を時刻 0 とする。

3. 解析的検討

 $3\cdot 1$ 解析手順 ここではまず、n=1 モード不安定性を付加する前の基となる平衡解の導出について説明する。 平衡計算には軸対称配位を仮定することにより、グラッド・ シャフラノフ方程式に基づく GS コード $^{(8)}$ を用いて配位の 平衡を求めた。軸対称配位を仮定することにより、ポロイダル電流と圧力は磁気面関数 $\Psi(r,z)$ を変数とする関数となる。

ここで $\Delta^* \equiv \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}$ はグラッド・シャフラ ノフ演算子、 j_t はプラズマ電流密度、 $I(\Psi)$ はポロイダル電流関数、 $P(\Psi)$ は圧力関数である。ここではスフェロマク配位を仮定し、外部トロイダル磁界電流 $I_{tfc}=0$ 、また $I(\Psi)=A(1-\gamma\Psi)$ 、 $P(\Psi)=0$ と置く。ここで、A、 γ は定数である。この I と P の条件は理論的なテーラー平衡の条件(固有値 λ 一定、 $\beta=0$)である。GS コードではいくつかの設定値から、まず Ψ の初期値を計算する。そしてそれをもとにプラズマ電流の総和 $I_{pla}=\int j_t dr dz$ を一定値(設定値)に保ちながら γ 、 j_t の算出、それによる Ψ の更新を繰り返し、 Ψ について収束計算を行う。ここでは $I_{pla}=30[{\rm kA}]$ 、計算領域における境界、フラックスコンザーバ ($\Psi=0$) の位置を軸方向 $z=-350[{\rm mm}]$ から $350[{\rm mm}]$ 、半径方向 $r=0[{\rm mm}]$ から $470[{\rm mm}]$ と置いた。図 3 に計算領域の仮定と実際の装置の位置関係を示す。

次に平衡計算より求められた磁気面から次式より B_z 、 B_t を算出する。ここで固有値 λ はポロイダル方向に関する固有値で I から平衡計算より $\lambda=\partial I/\partial\Psi=A\gamma$ として求まる。

$$B_{z}(r,z) = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \Psi(r,z)}{\partial r}$$

$$B_{t}(r,z) = \frac{\lambda \Psi(r,z)}{2\pi r}$$

この求められた磁界分布に代表的な n=1 モードであるシフト不安定性 (横ずれ不安定性) およびティルト不安定性 (傾斜型不安定性) を付加する。ティルトおよびシフトの方向と磁気面の計測面 S(二次元磁気プローブアレイの面) との関係について図 4 の二つの場合を仮定する。図中、トーラス状のプラズマ配位に対し、中抜きの四角が面 S を表わす。

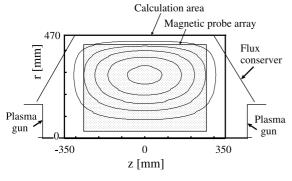


図 3 計算領域の仮定

Fig. 3. Calculation area.

図 4(a) は面 S に対し平行な方向のティルトおよびシフトである。これに対し、図 4(b) は面 S に対し垂直方向のティルトの様子を示している。また、面 S に対し垂直方向のシフトについては、計測誤差としては微少なのでここでは対象としない。

最後にこのシフトおよびティルト効果を付加した磁界分布について式(1)の関係を使って Ψ を求める。

3・2 計測面 S に対し平行なティルトおよびシフト図 4(a) の磁気プローブ計測面に対し平行な方向のティルトおよびシフトの効果を次式 (4) に基いて付加する。ここで Δr はシフトの量、 θ はティルトした角度である (図 5 参照。)。ここでフラックスコンザーバーの効果は簡単化のため無視している。

$$B_z(z,r)_{shift} = B_z(R\cos\theta, -R\sin\theta)$$

$$B_t(z,r)_{shift} = B_t(R\cos\theta, -R\sin\theta)$$

$$R^2 = z^2 + (r-\Delta r)^2$$

計測面に対し平行なティルトおよびシフトの場合、 B_z 、 B_t は n=1 モードが生じているプラズマの磁界分布を正確に表わしているが、この磁界に対して軸対称性を仮定し Ψ を求める過程で Ψ に対して変形が生じる。

図 6 に平衡計算より求めた磁気データに計測面に対し平行方向のティルトおよびシフトを与え、これより式 (1) を使って磁気面の再構成を行う過程を示す。図中矢印でフラックスコンザーバの壁の位置を示す。以下、後図 7、9 についてもフラックスコンザーバの壁を同様に示してある。図 6(a) は、シフトおよびティルトのない場合である。図 6(a).ii. は上記の平衡計算によって求められた Ψ である。図 6(a).ii. は図

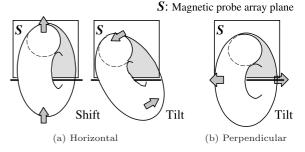


図 4 ティルトおよびシフト方向と計測面に 関する仮定

Fig. 4. Assumption of shift and tilt directions on the measuring plane.

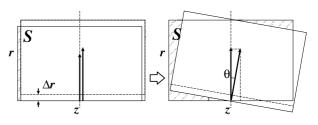


図 5 計測面に対し平行方向のシフトと ティルトの付加

Fig. 5. Addition of the horizontal shift and tilt.

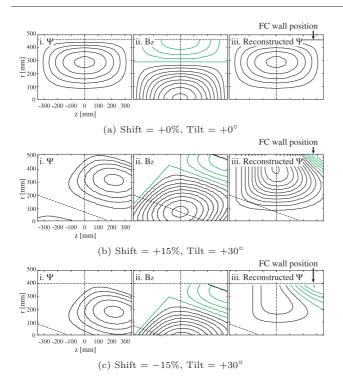


図 6 計測面に対し平行方向の n=1 不安定性を 付加した磁気面の算出の原理

Fig. 6. Calculation of Ψ with n=1 instability (horizontal).

6(a).i. より、式 (3) の関係を使って算出された B_z の等磁気 面である。図 6(a).ii. より、式 (1) の関係を使って Ψ を求め ると図 6(a).iii. が得られる。図 6(a) は、シフトおよびティ ルトのない場合で、当然 i. の平衡計算結果と iii. の式 (1) に よる再構成結果が一致している。ここで、 Ψ 、 B_z が 0 以下 の等高線をそれぞれ緑で表わす。一方、シフトおよびティル トを加えた場合が図 $6(b)(\mathfrak{D})$ トを加えた場合が図 $6(b)(\mathfrak{D})$ トキョント $+30^{\circ}$ ト 図 6(c)(シフト -15%、ティルト $+30^{\circ}$)となる。ここでは 面Sに対して下向きのシフトを負、上向きのシフトを正と し、時計方向のティルトを正としている。またシフトの程 度は図 6(a).i. 導出の計算範囲としている r=470[mm] に対 し、シフトによる変位 $\Delta r[\text{mm}]$ として $(\Delta r/470)$ を % 表 示している。図 6(b).ii.、(c).ii. は、図 6(a).ii. に対し、上記 の定義のよるシフト、ティルトを付加した B_z の等磁気面で ある。これらについて式 (1) の関係を使ってそれぞれ Ψ を 求めると図 6(b).iii.、(c).iii. が得られる。図 6(b).i.、(c).i. は、平衡計算結果である $\Psi(\boxtimes 6(a).i.)$ に対し、 $\boxtimes 6(b).ii.$ 、 (c).ii. の B_z と同様な方法でそれぞれシフト、ティルトを 同時に付加したものである。再構成された Ψ 、図 6(b).iii.、 (c).iii. は図 6(b).i.、(c).i. と比較すると与えられたシフト、 ティルトからは予想されない特徴的な形状を示す。

図 7 に面 S に対して平行方向のティルトおよびシフトが組み合わさった場合も含めて幾つかの場合について図 6 と同様な方法で求めた磁気面再構成の結果を示す。シフトおよびティルトの向き、また Ψ の等高線の色分け等、図 6 にならうものとする。なお、色は式 (3) より求めたトロイダ

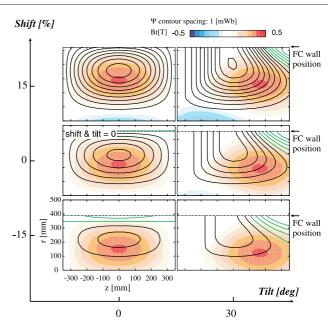


図7 計測面に対し平行方向のティルトおよび シフトの磁気計測への影響

Fig. 7. Influence to magnetic measurement by the horizontal shift and tilt.

ル磁界強度分布を示している。横軸、縦軸が0の地点の磁気面がシフトとティルトのない場合である。図7より、正シフトの場合、 Ψ が実際より大きく計算され、磁束の一部はフラックスコンザーバーを突き抜けるように変形されて復元される。また、内側(半径の小さい領域)に負のトロイダル磁界が生じ、スフェロマク配位の平衡解がもとになっているにも係わらず一見 RFP 配位のように観測されうることが予想される。一方、負シフトの場合には Ψ が実際より小さく計算され、外側(半径の大きい領域)に Ψ が負の領域が存在するかのように見える。また、ティルトがある場合には磁気面形状は左右対称とならず、ティルトの向きによって特徴的な歪みが生じる。

3・3 計測面 S に対し垂直なティルト不安定性 次に図 4(b) 面 S に対し垂直方向のティルトを考える。このとき、図 8 からトロイダル磁界とポロイダル磁界の間で次式 (5) の関係が成り立つ。ここで θ はティルトした角度である。また図 8 より直観的に分るように面 S に対し垂直方向のシフトは構造的変化をもたらさない。

$$B_z(r,z)_{tilt} = B_z(r,z)\cos\theta - B_t(r,z)\sin\theta$$

$$B_t(r,z)_{tilt} = B_t(r,z)\cos\theta + B_z(r,z)\sin\theta$$

$$\cdots (5)$$

式 (5) よりこの場合、 B_z 、 B_t が互いに干渉しあい、磁界信号そのものが誤差を持つことが分る。軸対称性を仮定して B_z より求めらる Ψ も当然誤差を含む。

この関係を与えて磁気面を再構成したものを、図 9 に示す。ここで縦軸 Tilt1 は面 S に対し垂直な方向のティルト、横軸 Tilt2 は図 7 と同じく面 S に対し平行な方向のティルトを表わしている。図 7、9 を比較すると、面 S に対し平行な方向のシフトと面 S に対し垂直な方向のティルトの与え

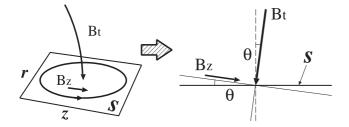


図 8 計測面に対し垂直方向のティルトの付加 Fig. 8. Addition of the perpendicular tilt.

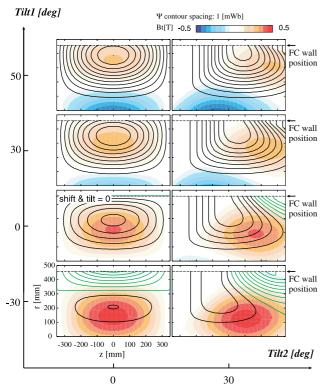


図 9 計測面に対し垂直方向のティルト (Tilt1) と平行方向のティルト (Tilt2)の磁気計測 への影響

Fig. 9. Influence to magnetic measurement by the perpendicular and the horizontal tilts.

る計測誤差は類似の傾向を持つことが分かる。ただし、面Sに対し垂直な方向のティルトの場合には面Sに対し平行方向のシフトの場合と比較して、見かけ上 Ψ が増加する計測誤差に加え、内側のトロイダル磁界が反転し、プラズマ中のトロイダル磁界は逆に減少するような計測誤差が生じる。また Ψ が減少して見える場合はトロイダル磁界は逆に強く正に表われる。

4. 実験結果における n=1 不安定性の推察

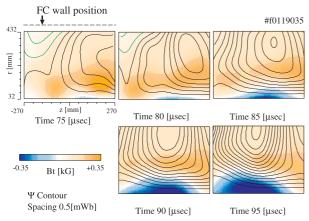
以上、n=1 モード不安定性による磁気面再構成誤差について理論的検討を行った。次にこれを実際実験で得られた再構成磁気面と比較しその適用性について評価を行う。

4·1 磁気面とトロイダルモード計測 前章の解析 を評価するため、実験データとの比較を行う。Proto-TS-4 装置において、n=1 モードが観測される場合の典型的な磁気面の時間発展を図 10(a)、11(a) に 2 例示す。これらは、実際磁気プローブアレイから得られたデータをもとに再構成を行ったものである。また、図 10(b)、11(b) はある時点のトロイダルモードプローブの磁気信号 (横軸プローブ番号は図 1(b) 参照のこと。)、図 10(c)、11(c) は各時間の(b) のデジタルフーリエ解析より得られたトロイダルモード n=1、2 不安定性の時間発展である。

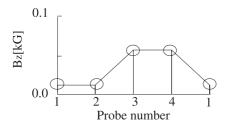
図 10(a) は右方向から同軸ガンによって打ち込まれたプ ラズマがスフェロマク配位に緩和していく様子を示してい る。プラズマが内部に進行してくる時刻 75[µsec] 付近で は装置中央に設置されたトロイダルモードプローブ用ピッ クアップコイルの視野にプラズマが入ってくることにより 図 10(c) において n=0 成分 (直流分) が増加し、n=1 成分 (n=1/n=0) は一旦減少する。フラックスコンザーバ中央ま で進行してきたスフェロマク配位は時間の経過とともに磁 気軸が半径方向に外側にずれ、それに伴ない磁束が増加し ていくという、図7、9の結果に類似する変形を受け始め、 時刻 $90[\mu sec]$ では見かけ完全にフラックスコンザーバ (外 壁の位置 r=470[mm]) の外に磁束が浸み出した状態となっ た (フラックスコンザーバの時定数が $1000[\mu sec]$ であるこ とを考えると $20[\mu sec]$ 程度の時間のうちに磁束がフラック スコンザーバの壁から浸み出すことはありえない。)。図 10(a) と図 10(c) を比較してみると、図 10(a) の再構成磁 気面が n=1 不安定性と予想される変形を受け始めるとそれ に伴い図 10(c) において n=1 モードが増加していくことが 分る。

ここで、発生しているトロイダルモードの種類を図7、9 より推定することを考える。図7、9と比較してみるとこの 場合、磁気面の変形、トロイダル磁界分布の左右非対称性 より図7面Sに対し平行方向の正のティルトおよび、磁束 の増加、内側における B_t の反転といった特徴から図 7 面 S に対し平行方向の正のシフト不安定性、もしくは図9面 S に対し垂直方向の正ティルトが発生していると推測され る。図7面 S に対し平行方向の正のシフト不安定性と図9 面 S に対し垂直方向の正ティルトによる変形については傾 向が似ており、判別は難しいと考えられる。しかしこの場 合、図 10(b) 時刻 $90[\mu sec]$ におけるトロイダルモード磁気 信号をみると図 1(b) の各モードプローブと磁気面計測用プ ローブアレイとの位置関係から、計測面に対し、平行方向 の不安定性であることがわかる。このことより、図10では 図 7 における面 S に対し平行方向の正のティルトおよびシ フト不安定性の両方が生じている場合と推測される。

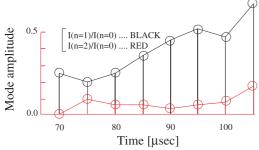
図 11 は、Proto-TS-4 装置の磁気面計測で観測される典型的な変形のもう一つの例である。この例では、中心の外部トロイダル磁界コイルによってプラズマの持つトロイダル磁界と逆向きのトロイダル磁界を印加しており、コンパクトRFP(逆磁界ピンチ)を生成する放電である。これと類似な磁気面変形は外部トロイダル磁界を印加しないスフェロマク配位でも観測されている。図 11(a) では、中心軸に沿って



(a) Time evolution of Ψ contours and $B_{\rm t}$ amplitudes



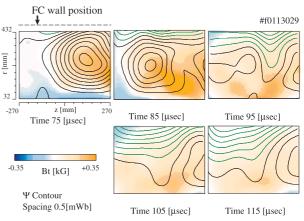
(b) Mode probe signals (90 $[\mu {\rm sec}])$



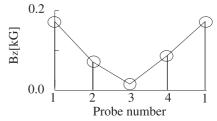
(c) Time evolution of n=1 and n=2 mode amplitudes

図 10 n=1 不安定性の増加に伴なう再構成誤差 (例 1) Fig. 10. Dependence of reconstruction error on n=1 instability (ex. 1).

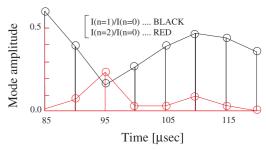
RFP 特有の逆向きトロイダル磁界の印加が確認されている。 まず初めにプラズマが装置中央に進行してくると、図10と 同様の理由で図 11(c) では一旦、n=1 成分 (n=1/n=0) は 減少する。その後図 11(a) では図 11(c) における n=1 モー ドの増加とともに内側の外部コイルによる反転磁界がなく なり、正のトロイダル磁界と置き代わる様子が観測されて いる。また、ポロイダル磁束は減少し、プラズマの外側(外 壁側)で負の磁束が増加する。これらの特徴と図7、9との 比較からこの場合、図7面Sに対し平行方向の負のシフト 不安定性、もしくは図9面Sに対し垂直方向の負のティル トが生じていると考えられる。図7面 S に対し平行方向の ティルトについては明解には分らない。また、図 11(b) 時 刻 $110[\mu sec]$ におけるトロイダルモード 磁気信号をみると 図 1(b) の各モードプローブと磁気面計測用プローブアレイ との位置関係から、計測面に対し、およそななめ 45°方向 の不安定性であることがわかる。よって図7の面Sに対し



(a) Time evolution of Ψ contours and $B_{\rm t}$ amplitudes



(b) Mode probe signals (110 $[\mu {\rm sec}])$



(c) Time evolution of n=1 and n=2 mode amplitudes

図 11 n=1 不安定性の増加に伴なう再構成誤差 (例 2) Fig. 11. Dependence of reconstruction error on

n=1 instability (ex. 2).

平行方向の負のシフト不安定性および図9の面Sに対し垂直方向の負のティルトが両方が生じていると考えられるものの、どちらが支配的であるかは定かではない。

4・2 TS-4 装置における磁気面計測と不安定性 図 12 に現在の TS-4 装置の装置構成を示す $^{(9)}$ 。現在の TS-4 装置は Proto-TS-4 装置と真空容器は同じものの、フラックスコンザーバを取り除き、代りに平衡磁界コイルを設置することにより自由境界でプラズマ生成を行っている。また装置中心にはガラス被覆の銅線の代りに直径 167[mm] と太い中心導体 (外部トロイダル磁界コイル・OH コイル内蔵) が導入されている。これにともない生成されるプラズマは大半径およそ 450[mm]、アスペクト比 A \sim 1.23 と Proto-TS-4 装置と比べ、サイズは大きくなり、低アスペクト比配位には変りはないがアスペクト比はより大きくなっている。プラズマ生成法は Proto-TS-4 の同軸プラズマ銃による電極間放電から電源を変更してフラックスコアによる誘導方式にかわり、比較的低密度、不純物の少ないプラ

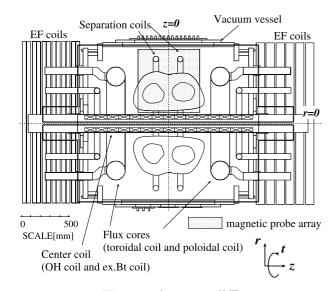


図 12 現在の TS-4 装置 Fig. 12. TS-4 at present.

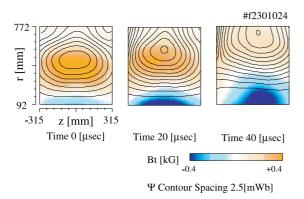


図 13 現在の TS-4 装置における n=1 モードに 対するポロイダル磁気面再構成誤差

Fig. 13. Poloidal magnetic surface reconstructed error by n=1 mode in present setup of TS-4.

ズマ生成が可能である。一方、磁気計測系については、計測点がProto-TS-4 装置の84点 $(6 \times 7 \times 2$ 成分) から140点 $(10 \times 7 \times 2$ 成分) に増設されたことを除けば軸対称性の仮定等、その手法に大きな違いはない。

図 13 は TS-4 装置においてスフェロマク配位を生成したときに表われた典型的な n=1 不安定性の様子である。現在の TS-4 装置と Proto-TS-4 装置とでは装置構成が大きく違うのにも係わらず、n=1 不安定性に対し同様の特徴的な測定誤差を生じていることがわかる。この場合、左右の対称性がよいので図 7 面 S に対し平行方向の正のティルト不安定性に影響は小さく、図 10 と同様、図 7 面 S に対し平行方向の正のシフト不安定性、もしくは図 9 面 S に対し平行方向の正のティルトが発生していると推測される。しかし、現在の TS-4 装置では半径 167[mm] の中心導体が設置されていることを考えるとこの導体を横切ってのプラズマのシフトは不可能である (7) 。このことから、内側の負のトロイダル磁界は面 S に対し平行方向の正のシフト不安定性

で生じているとは考えにくい。加えて内側の B_t の反転が大きく本来の正の B_t が極端に弱く表われる特徴から、図 13 ではおそらく面 S に対し垂直方向の正のティルトが支配的であると判定される。

5. まとめ

シフトおよびティルトに代表される n=1 トロイダルモー ド不安定性を想定した場合、軸対称性に基いた磁気プロー ブデータによる磁気面再構成においてどのような変形が生 じるか理論的検討を行った。これによって磁気プローブア レイ面、すなわち計測面 S に対し平行方向および垂直方向 の n=1 不安定性がある場合、算出される特徴的な磁気面形 状および磁界分布を特定した。この結果を基に Proto-TS-4 装置での実測データとの比較を行った結果、n=1 不安定が 生じる場合には計算により、特定されたいずれかの磁気面 形状の特徴が計測結果に表われることがわかった。また、 磁気面形状の変形から n=1 モード 不安定性の種類の推定を 試みたところ、計測面 S に対し、n=1 モード不安定性がほ ぼ平行または垂直方向に生じている場合には計測面Sに対 し平行方向のティルト不安定性は明解に推定可能であるこ とが分った。ただし、計測面Sに対し平行方向のシフト、 垂直方向のティルト不安定性は磁気面再構成に与える傾向 が類似しているため判別は難しく、多くの場合トロイダル モードプローブの計測結果を総合的に考慮して初めて判別 可能である。計測面 S に対し $\mathrm{n=1}$ モード不安定性が傾い た方向に生じている場合は、いずれかの磁気面形状の特徴 がやはり計測結果に表われるので n=1 モード不安定性が 生じていることは同じく判別可能である。ただし、その種 類の推定は難しい。また、TS-4 装置での結果より、プラズ マ生成条件が異っていたとしても同様な計測系を用いる場 合、n=1 モード不安定性によって同様な磁気面変形が観測 され、その原因追及が可能であることが分った。以上より、 コンパクトトーラス実験の軸対称性を仮定した磁気計測系 において、今回特定された磁気面の変形および磁界分布が 計測される場合、n=1 モード不安定性によって生じる計測 データの解釈についての混乱をある程度軽減することが可 能であると結論される。

最後に実験に協力下さった東京大学助教授小野靖氏に感謝いたします。

(平成14年4月16日受付,平成14年11月21日再受付)

文 献

- (1) ITER Project: Nucl. Fusion, Vol.39, p.2137 (1999)
- (2) D. Brennan and P.K. Browning, et al.: Phys. Plasmas, Vol.6, p.4248 (1999)
- (3) D.-Y. Lee, M.S. Chance, et al.: Phys. Plasmas, Vol.5, p.735 (1998)
- (4) Y. Ono, K. Katayama, A. Yumoto, and M. Katsurai: Fusion Research, Vol.56, p.214 (1986) (in Japanese) 小野 靖・片山弘造・湯本 昭・桂井 誠:核融合研究, **56**, p.214 (1986)
- (5) 鶴田繭子・桂井 誠,他:電気学会研資,PST-00-21 (2000)

- (
 6) N. Amemiya, A. Hayakawa, and M. Katsurai: J. Phys. Japan, Vol.
60, p.2632 (1991)
- (7) 片山弘造・大崎博之・桂井 誠:電学論 A, **104**, p.443 (1984)
- (8) K. Katayama and M.Katsurai: Phys. Fluids, Vol.29, p.1939 (1986)
- (9) M. Tsuruda and M. Katsurai: "Comparative experiments of co- and counter-helicity merging in the compact toroid merging device TS-4", T. IEE Japan, Vol.122-A, No.9, pp.840–848 (2002-9) (in Japanese)

鶴田繭子・小野 靖・桂井 誠:「コンパクトトーラス合体実験装置 TS-4 における同極性および異極性合体の比較実験」, 電学論 A, 122, 9, pp.840-848 (2002-9)

鶴 田 繭 子 (非会員) 1974 年生。1998 年東京大学工学部電



気科卒業。2000年同大学大学院修士課程修了。同年東京大学大学院博士課程に進学。プラズマ・核融合学会。

桂 井 誠 (正員) 1941 年生。1965 年東京大学工学部電子



科卒業。1970年同大学大学院博士課程修了。同年同大学講師、1971年同助教授、1987年教授、現在に至る。主としてプラズマ工学、核融合工学の研究に従事。プラズマ・核融合学会、IEEE 会員。