

# 論文内容の要旨

## Study of equilibrium and instabilities using a Rogowski probe in the TST-2 spherical tokamak (球状トカマク TST-2 におけるロゴスキープローブを用いた 平衡と不安定性の研究)

古井 宏和

### 1. 研究背景

高い環境保全性を有する核融合発電においては、高温高密度プラズマを長時間保持する必要がある。発電炉として最も期待されているのはトカマク型磁場閉じ込め方式である[1]。トカマクの平衡と電磁流体力学的現象を理解するには、電流密度の計測が重要である[2]。例えば、球状トカマクでは、磁場再結合現象の一種である IRE (Internal reconnection event) による急激なプラズマ電流の上昇 ( $I_p$  スパイク) が観測される[3]。IRE によるディスラプションを抑制することが安定な核融合発電炉の実現に重要である。IRE においては、フィラメント状の局所的な構造が生成される[4]。IRE の原因を明確にし、フィラメントの大きさとその担う電流量からプラズマ対向壁へ与える損傷を見積もることができる。

球状トカマク TST-2 ( $R_0 = 0.38$  m,  $a = 0.25$  m,  $B_t = 0.3$  T,  $I_p = 0.1$  MA) [5]では、プラズマエッジ領域における電流密度計測を目的とした小型多層巻きロゴスキーコイルを開発した。本研究では、誘導加熱プラズマにおける電流密度計測の結果を報告する。

### 2. ロゴスキーコイル理論と多層巻きロゴスキーコイル

ロゴスキーコイルは電流計測コイルであり、その形状はトーラス型である。トーラスの穴を電流  $I(t)$  が貫通することでコイルの両端に誘導起電力  $V(t)$  が生じる。 $I(t)$  と  $V(t)$  の関係式は

$$V(t) = \frac{\mu_0 N S}{l} \frac{dI(t)}{dt}$$

で与えられる。 $\mu_0$ ,  $S$ ,  $N$ ,  $l$  はそれぞれ、真空における透磁率、コイル芯断面積、コイル巻き数及びコイル長である。ロゴスキーコイルはアンペールの法則に基づくため、理想的なロゴスキーコイル ( $S$ ,  $N/l$  が一様) は、コイルの外側を通る電流 (外部電流) には感度は無いが、非理想的なロゴスキーコイルは外部電流にも感度をもつ。ロゴスキーコイルをプラズマ内に挿入することによるプラズマへの影響を低減するためにコイルサ

イズの小型化が課題である。また、プラズマ放電中には外部電流（ノイズ源）に相当する数  $\text{kA} \sim 100 \text{kA}$  の TF・PF コイル電流や  $I_p$  がある。一方、小型ロゴスキーコイルの貫通穴を流れる電流（信号源）は、 $10 \text{A}$  程度になる。信号雑音非（SN 比）を向上するためには、小型ながら高精度高巻線密度なコイルを実現する必要があった。本研究では、より線を用いた多層巻法を考案し、小型多層巻ロゴスキーコイルの開発に成功した（Fig. 1）[6]。このロゴスキーコイルには、外部磁場に対する感度が小さい特殊な巻線法が用いている。

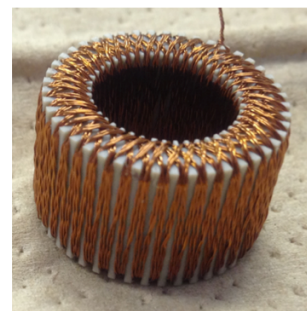


Fig. 1. 小型多層巻ロゴスキーコイル。外径  $21 \text{mm}$ 、内径  $12 \text{mm}$ 、巻き数  $360$ 、厚み  $12 \text{mm}$

### 3. ロゴスキープローブ

開発した多層巻きロゴスキーコイル（2 個）、磁場計測用ピックアップコイル（5 個）、電子温度密度計測用静電プローブ（2 個）を搭載したロゴスキープローブを製作した [7]。ロゴスキープローブは、トカマクの大半径方向  $R$  に移動可能で、電流貫通穴の向きをトロイダル-ポロイダル面で回転可能なことから、電流の流れる向きを含めた分布計測が可能である。ここで、電流貫通穴の向きとトロイダル方向の成す角を  $\theta$  とする。ロゴスキーコイルの SN 比を評価するために、電流貫通穴を閉じた場合と空けた場合で信号を比較し、それぞれ  $5 \text{kA/m}^2$  以下のノイズ信号と  $100 \text{kA/m}^2$  の信号が観測された。以上から SN 比 20 以上を達成した [7]。

ロゴスキーコイル計測では、磁場が穴を貫通する幾何学的条件を満たした時に信号が生じると考えられる。プローブの径方向位置を固定し、プラズマ放電ごとに  $\theta$  を変えながら、電流信号の  $\theta$  依存性を調べた（Fig. 2）。幾何学的条件から求めた曲線とガウス関数でフィッティングした曲線のピークは実験結果のピークと一致するよう調節したところ、実験結果は幾何学的条件から求めた幅より広くなった [8]。この違いは、プローブ表面に形成されたプラズマシース [9] によって生じたと考えた。シースの影響を考慮した電子の軌道を計算し、

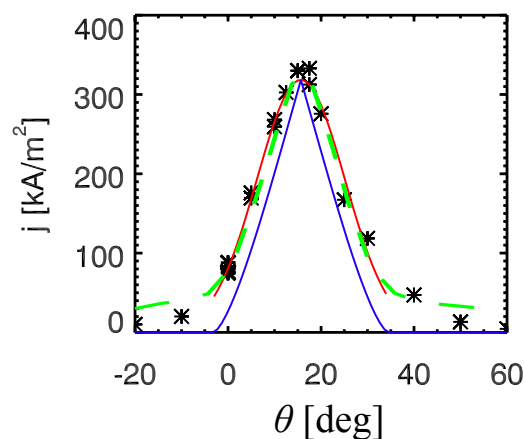


Fig. 2. ロゴスキーコイル信号の  $\theta$  依存性。黒：実験結果、青：幾何学的な条件から求めた曲線、赤：ガウス関数でフィッティングした曲線、緑：シースの影響を考慮した曲線。

各  $\theta$  における電流値を求めた (Fig. 2 緑)。軌道計算から、シース電場  $\mathbf{E}$  による  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  ドリフトの効果で電子の軌道が影響を受け、幾何学的には電流が 0 になる  $\theta$  においても電子が穴を貫通する物理的機構が説明できた。電流のピーク値へのシースの影響を評価したところ、10% 程度影響を受けていることがわかった[10]。

#### 4. 電流密度の径方向分布

$\theta = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$  のケースで電流密度の径方向分布を計測した (Fig. 3)。電流密度は  $R_{LCFS}$  より大きな領域では観測されず、 $R < 550$  mm では実験分布と平衡コード EFIT [11] から計算した分布が一致した。一方で、 $R > 550$  mm では実験結果と計算結果で大きな差が観測された[5]。別の実験条件では、リミターよりも外側の領域でも 100-200 kA/m<sup>2</sup> の電流密度が観測され、トロイダル対称性が成立しない場合がある。このような場合にトロイダル対称性を前提とする平衡コードは適用できない。以上から、ログスキープローブで計測した電流密度を使うことで平衡計算の精度向上が期待できることを実証した。

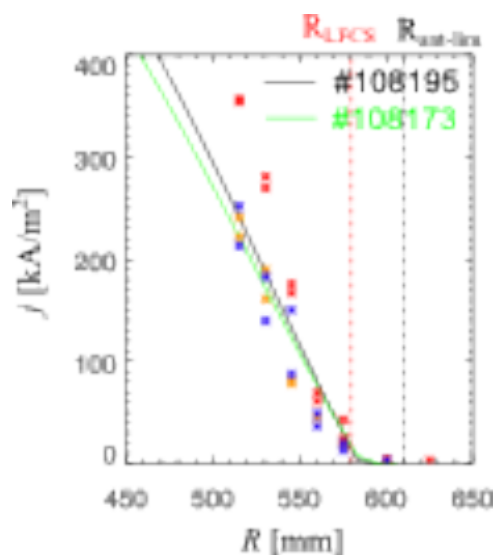


Fig. 3. 電流の径方向分布。橙色点： $\theta = 10^\circ$ ，赤点： $\theta = 15^\circ$ ，青点： $\theta = 20^\circ$ ，黒・緑線：EFIT code から計算した電流密度分布、赤点線：弱磁場側最外殻磁気面の位置  $R_{LCFS}$ 、黒点線：アンテナリミターの位置  $R_{ant-lim}$ 。

#### 5. 電流揺動計測

TST-2 では、IRE 中の  $I_p$  スパイクの前にプラズマエッジ領域の電流・密度と密度の揺動が 0.4 ms 程度前から始まることがわかった (Fig. 4)。その後、電流・密度のプラズマ中心からエッジ領域への輸送、エッジ領域における高周波揺動が成長し減衰した後、 $I_p$  スパイクが生じるという時間関係が明確化された。高速度カメラを用いた実験から、IRE 中のフィラメント状の構造は  $Z$  方向  $R$  方向それぞれ 20 cm, 5 cm 以上であることがわかり (Fig. 5)、IRE 中ではプラズマエッジ領域において 10 MA/m<sup>2</sup> に相当する電流が局所的に流れていることがわかった。

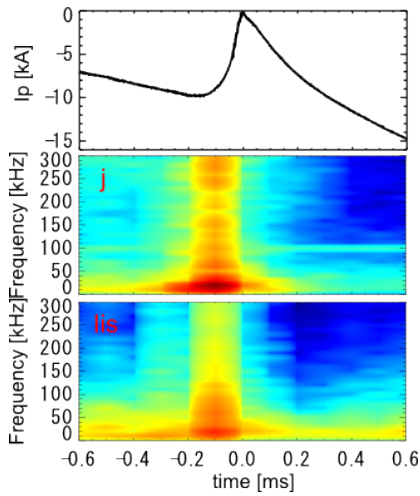


Fig. 4. IRE 中の  $I_p$ , 電流揺動  $j$   
イオン飽和電流  $I_{is}$  の時間関係

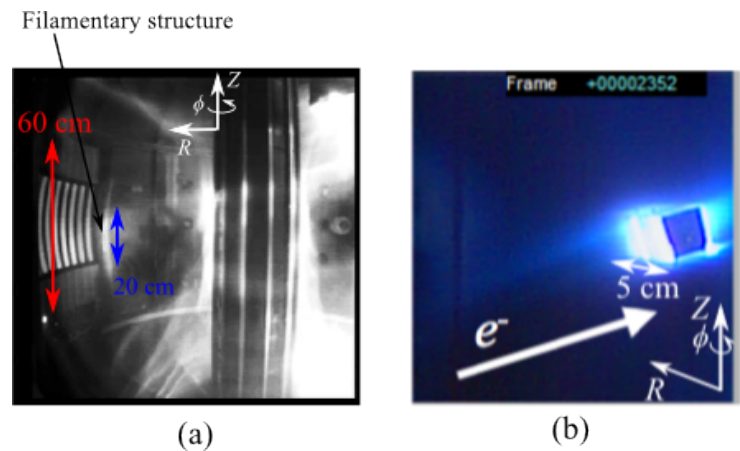


Fig. 5. IRE 中に観測されたフィラメント  
(a) とプローブからの発光 (b)

## 6. 結論

小型多層巻きロゴスキーコイルを開発し、シースの影響を考慮した軌道計算から電子の軌道がシース電場の影響を受けていることを明らかにした。計測した電流密度分布と EFIT code から計算した電流密度分布が一致する場合としない場合があることを明らかにした。IRE 中の  $I_p$  スパイク、電流揺動、密度揺動の時間関係を明確化し、TST-2 における IRE 時のフィラメントの大きさを見積もることができた。

## Acknowledgement

本研究は、日本学術振興会科研費番号 23360409 と 21226021、及び核融合科学研究所との共同研究 NIFSKOAR12 の支援を受けた。

- [1] Jeffrey P Freidberg, Plasma physics and fusion energy. Cambridge university press (2007).
- [2] L. L. Lao, *et al.* Nucl. Fusion **40** 1035 (1990)
- [3] A. Ejiri, *et al.* Nucl. Fusion **43**, 547 (2003).
- [4] T. Hayashi, *et al.* Nucl. Fusion **40**, 3Y (2000)
- [5] Y. Takase, *et al.* Nucl. Fusion **41**, 1543 (2001).
- [6] H. Furui, *et al.* Plasma Fusion Res. **9**, 3402078 (2014).
- [7] H. Furui, *et al.* Rev. Sci. Instrum. **85**, 11D813 (2014).
- [8] H. Furui, *et al.* Rev. Sci. Instrum. **85**, 11F903 (2014).
- [9] R. Chodura, Phys. Fluids **25**, 1628 (1982).
- [10] H. Furui, *et al.* A model of plasma current through a hole to describe the signals of a Rogowski probe 投稿中
- [11] L. L. Lao, *et al.* Nucl. Fusion **25**, 1611 (1985).