

論文内容の要旨

論文題目

Analysis of Tokamak Plasmas with High Self-Driven Current

高自発電流をもつトカマクプラズマの解析

氏名 増田 鉄也

1. 序論

核融合炉を実現する装置として、トカマクが最も有力であるが、従来のトカマクオペレーションでは、プラズマ電流 (I_p) を駆動するためにオーミック加熱 (OH) コイルを用いており、プラズマの定常維持のために多くの非誘導電流駆動装置を必要としていた。発電を目的とした核融合炉にトカマクを用いるためには、経済的な観点から小型化・高効率化が必要となるので、OH コイルや非誘導電流駆動装置の削減または除去が求められる[1]。ブートストラップ電流 (I_{BS}) は、トーラス系固有の粒子軌道と密度・圧力勾配により自発的にプラズマ中に流れる電流である。ブートストラップ電流のプラズマ電流中の割合 $f_{BS} = I_{BS}/I_p$ が大きくなれば非誘導電流駆動装置の大幅な削減が可能となる。最近、東大グループが日本原子力研究開発機構の JT-60U トカマクで行った実験[2]は、OH コイルの使用をプラズマ立ち上げ時のみに限定し、トロイダル磁場に垂直方向およびプラズマ電流に対し反対方向の中性粒子ビーム入射 (NBI) のみを用いてプラズマを維持するもので、世界で初めてほぼ $f_{BS} = 100\%$ の状態が実現された。今後はこのような状態を長時間維持することが課題となっているが、これを実現するためには、ブートストラップ電流の増加を制御することが条件となるため、 $f_{BS} > 100\%$ を精度良く実証する必要がある。しかし、 I_{BS} は直接計測することができないので、通常、 I_p から各電流を差し引いた残りを I_{BS} として求められている。 f_{BS} の精度を向上させるためには、 I_p や I_{BS} の空間分布を高精度で決定する必要がある。プラズマ内部磁場分布および密度・圧力分布の空間微分および時間微分を正確に求める必要がある。本研究の第一の目的は、 f_{BS} を精度よく求めるための解析手法を確立することである。さらに、対象となるプラズマにおいて $f_{BS} > 100\%$ であるかどうかを十分な信頼度で判断することを第二の目的としている。

2. 動的シュタルク効果偏光計

動的シュタルク効果 (MSE) 偏光計は、速度 v で入射された中性重水素原子がローレンツ電場 $E_L = v \times B$ を感じることを利用する。ビーム原子から放射される D_α 線はローレンツ電場に対して平行、垂直方向に偏光した π 成分、 σ 成分に分けられる。偏光角の空間分布を測定することにより、ローレンツ電場 E_L の向き、したがって磁場のピッチ角の空間分布を導出できる。これよりプラズマ内部の電流分布や誘導電場分布がわかるので、本研究では最も重要な計測である。

3. 解析手法

トカマクでは、プラズマを磁場によって閉じ込めており、その実験解析は、プラズマ中の力のつりあい（平衡）を求めることから始まる。平衡計算に使われるのは、各コイルに流れる電流、真空容器壁付近で測定された磁束および磁場の分布、MSE 偏光角分布である。この平衡をポロイダル磁束関数 Ψ を使って表した式が、Grad-Shafranov 方程式である。

$$R \frac{\partial}{\partial R} \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = -\mu_0 R^2 p'(\psi) - F(\psi) F'(\psi)$$

R は大半径、 p は圧力分布、 F は電流の流れ関数で $F \equiv R B_\phi$ と表され、 $'$ は ψ での微分を表す。この式を自由境界平衡コード MEUDAS で解き、平衡状態を再構築する[3]。本研究では、MSE データを極力反映させた平衡を再構築するよう注意を払った。SLICE コードにより温度・密度分布などの測定データを MEUDAS で得た平衡磁気面上に体積平均規格化小半径 ρ （プラズマ中心で0、境界で1と規格化したもの）の関数としてマッピングする。軌道追跡モンテカルロ (OFMC) コード[4]は、NBI 加熱により生成される高速イオンの軌道計算を行い、高エネルギー粒子の熱化を計算するプログラムである。温度・密度・ Z_{eff} （有効イオン電荷）分布、各 NBI の電圧や入射パワー、プラズマ平衡を入力とし、イオン分布関数、NBI 突き抜けパワー、トロイダル磁場リップル損失、軌道損失、荷電交換損失、NBI による駆動電流密度分布などが計算される。TOPICS コードでは MEUDAS、SLICE、OFMC で得られた結果を用いて中性子生成数と有効電荷数 Z_{eff} の計算を行い[5]、計測された中性子生成数と合うよう Z_{eff} の絶対値を求める。ACCOMME はプラズマ平衡解析と電流駆動解析を繰り返して、駆動電流の空間分布と平衡配位を無矛盾に解くコードであり[6]、NB 駆動電流、誘導駆動 (OH) 電流、ブートストラップ電流を計算する。但し OH 電流は MSE 計測より導出されたプラズマ中の周回電圧分布を用いて再計算される。ファラデーの誘導方程式の面積分より

$$\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \Psi$$

が得られる。従って周回電圧の空間分布は MEUDAS で得られたポロイダル磁束 Ψ の時間微分として得られる (図1)。ACCOMME により計算された OH 電流密度分布を J_{OH} 、ACCOMME で得られた空間一様の周回電圧を V_0 、補正された OH 電流密度分布を J_{OHR} 、補正周回電圧を $V_{\text{LOOP}}(\rho)$ とすると、

$$J_{\text{OHR}} = J_{\text{OH}} \frac{V_{\text{LOOP}}(\rho)}{V_0}$$

により、補正 OH 電流が求まる。本研究では、計測された全電流 I_{total} から ACCOMME で算出された NB 駆動電流 I_{BD} と補正 OH 電流 I_{OH} を差し引くことで、ブートストラップ電流 I_{BS} を得ている。

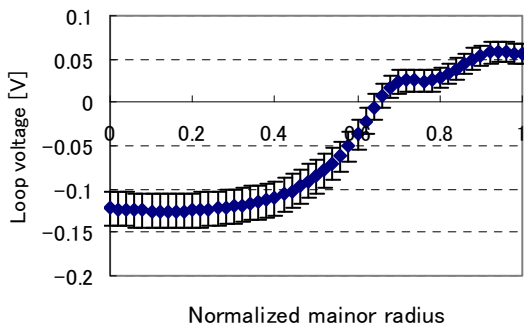


図1. ポロイダル磁束の時間微分として得られた周回電圧の空間分布

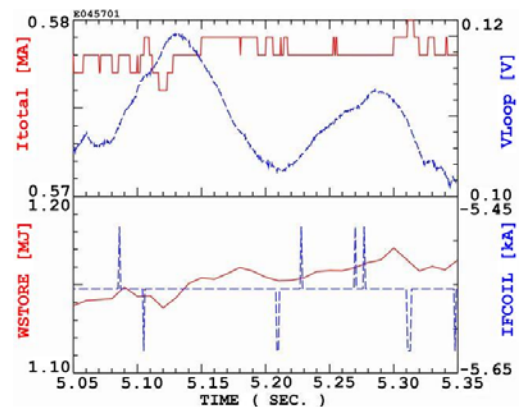


図2. 解析に用いた時間帯波形 (E045701)。(a) 全電流[MA] と周回電圧[V] (b) 蓄積エネルギー[MJ] とF コイル (OH) 電流[kA]

4. 解析結果

上記の手法でショットナンバーE045701 (図 2) の 5.10 秒での解析を行い、得られた各電流分布をプロットしたものが、図 3 である。その面積分値は $I_{total}=0.567[MA]$ 、 $I_{BD}=-0.029[MA]$ 、 $I_{OH}=-0.216[MA]$ となる。OH 電流の誤差は $-0.282 \leq I_{OH} \leq -0.150[MA]$ であり、これによる BS 電流の誤差は $0.747 \leq I_{BS} \leq 0.878[MA]$ となる。BD、OH 共に負であるので全電流における BS 電流の割合 (f_{BS})は $132 \leq f_{BS} \leq 155\%$ となった。ここでの誤差範囲は、周回電圧を最小二乗法で求める際に発生した標準誤差によるものである。

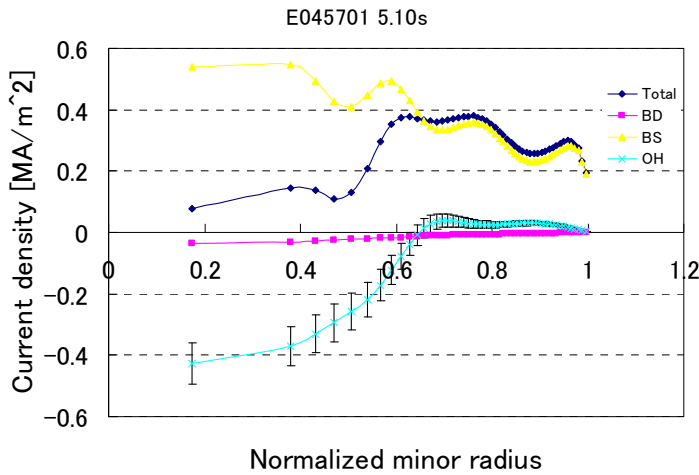


図 3. 平衡から得た全電流密度分布と、ACCOMME で算出された BD 電流密度分布、補正を行った OH 電流密度分布、全電流から各電流を差し引いて得られた BS 電流密度分布。誤差棒は周回電圧算出時の誤差。(E045701、5.10 秒)

5. 電流ホール解析

上記の解析結果を見ると、プラズマ中心部分に大きな BS 電流と OH 電流が存在している。JT-60U では、プラズマ中心にほとんど電流の流れない電流ホールが存在することが報告されている [7]。また、本研究で解析対象とした実験においても MSE データにより電流ホールの存在が確認されている。そこで、MSE データおよび各計測データを用いて電流ホールの位置を割り出し、これを上記の解析結果に反映させた。MSE 偏光角は、 $\pm 0.2^\circ$ の誤差が見積もられており [8]、この誤差の範囲内で電流がゼロとなる領域を割り出す (図 4)。

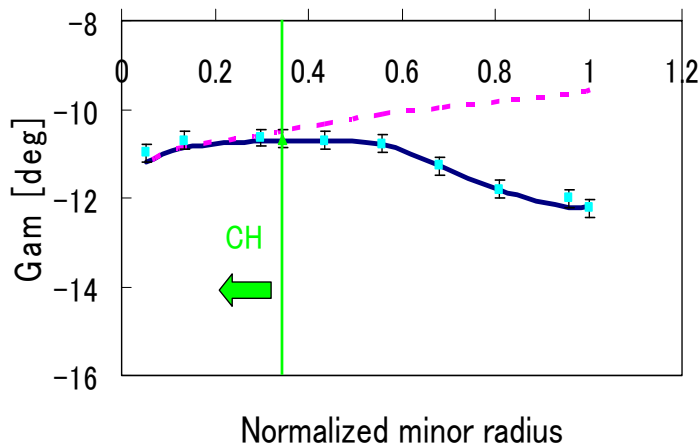


図 4. MSE データと平衡。点は MSE 計測データ、太線は平衡計算の結果、点線は真空時のポロイダル磁場を表す。電流が存在すると点線から MSE 計測データが離れる。MSE 計測データの $\pm 0.2^\circ$ の範囲で電流の無い位置を割り出す。

この電流ホールの位置にあわせて各計測データに解析コード SLICE でフィッティングを行う。電流ホールが存在する位置では、各計測点は平坦になることが知られており [7]、本解析においてもこれを反映させる (図 5)。図 4 より割り出された電流ホールは規格化小半径 $\rho=0.35$ 付近より内側に存在しており、図 5 ではその部分が平坦になるようフィッティングを行い、一連の解析コードにより解析を行った。この解析により算出された各電流分布に対し、電流ホールを割り出す。

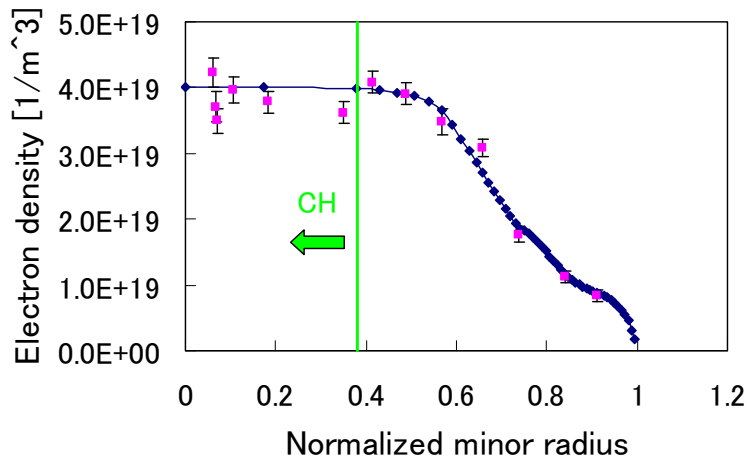


図5. 電子密度へのフィッティング。図4で割り出した電流ホール位置で平坦になるようにフィッティングを行う。

図4より、電流ホールはプラズマ中心から $\rho=0.35$ 付近に存在し、そこから $\rho=0.558$ までは緩やかなラインとなり、その後急峻なラインを描いていることが分かる。これを表す電流ホールをコードによる解析結果に反映させた (図6)。

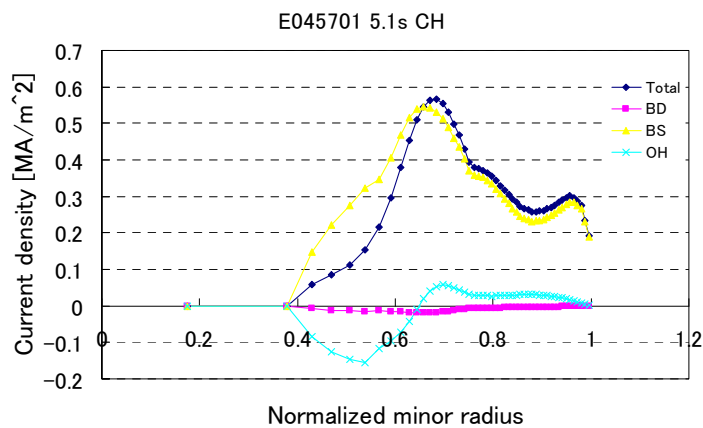


図6. プラズマ中心から規格化小半径 $\rho=0.35$ を電流ホールとした。この時、プラズマ中心部に存在していた電流は、電流ホール外側へ押し出された形になっている。

各電流の面積分値は、全電流 $I_{total}=0.567$ MA、BD 電流 $I_{BD}=-0.016$ MA、OH 電流 $I_{OH}=-0.019$ MA、BS 電流 $I_{BS}=0.602$ MA となる。この時、 $f_{BS}=1.06$ となり、 $f_{BS} \geq 100\%$ が示された。

参考文献

- [1] S. Nishio, K. Tobita, S. Konishi et al., Proc. 19th IAEA Fusion Energy Conf. FT/P1-21 (Lyon, 2002).
- [2] Y. Takase, S. Ide, Y. Kamada et al., 21st IAEA Fusion Energy Conference (Chengdu), EX/1-4 (2006).
- [3] トカマク平衡コード MEUDAS のモジュール解説, 日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部, 鈴木 昌栄・林 伸彦・松本 太郎・小関 隆久
- [4] K. Tani et al., Journal of Phys. Soc. Jpn. **50**, 1726 (1981).
- [5] H. Shirai et al., J. Phys. Soc. Jpn. **64**, 4209 (1995).
- [6] K. Tani, M. Azumi and R. S. Devoto, Journal of Computational Physics **98**, 332 (1992).
- [7] T. Fujita et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 245001 (2001).
- [8] T. Fujita, H. Kubo, T. Sugie, N. Isei, and K. Ushigusa, Fusion Eng. Des. **34-35**, 289 (1997).