

## 球状トカマクQUESTのIPN配位における遠方スクレイ プオフ層の熱流束とプラズマ流

恩地, 拓己  
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/1660017>

---

出版情報：九州大学応用力学研究所所報. 149, pp. 47-50, 2015-09. 九州大学応用力学研究所  
バージョン：  
権利関係：



# 球状トカマク QUEST の IPN 配位における 遠方スクレイプオフ層の熱流束とプラズマ流

恩地 拓己<sup>\*1</sup>

(2015 年 8 月 31 日受理)

## Observation of heat flux and plasma flow in the far scrape-off layer of the IPN configuration in QUEST

Takumi ONCHI

E-mail of corresponding author: onchi@triham.kyushu-u.ac.jp

### Abstract

Heat flux and plasma flow in the far scrape off layer (far-SOL) are examined in the inboard poloidal null (IPN) configuration on the spherical tokamak QUEST. High heat flux ( $> 1 \text{ MW/m}^2$ ) and super-sonic flow ( $M > 1$ ) in far-SOL arise in current ramp-up phase. They are suppressed after closed flux surface is generated. In quasi-steady state with plasma current  $I_p \approx 20 \text{ kA}$ , sawtooth-like oscillation of  $I_p$  with 20 Hz occurs spontaneously. Heat flux and subsonic plasma flow in far-SOL are well correlated to the  $I_p$ -oscillation. Limit-cycle characteristic on the  $M$ - $I_p$  diagram indicates that there is a close relationship between core and far-SOL in the IPN configuration.

**Keywords:** Spherical Tokamak, Scrape off layer, Heat flux, Plasma flow

## 1. 緒言

球状トカマクの非誘導電流駆動法に電子サイクロトロン波 (Electron Cyclotron Wave, ECW) を利用したものがある<sup>1,2)</sup>. トーラスの低磁場側領域における捕捉粒子の閉じ込めを利用したプラズマ電流立ち上げの場合, 強い垂直磁場と高いミラー比を擁する開磁気面配位に対して高周波パワーを入力する. この時バナナチップの高さが真空容器内に納まれば, 高エネルギー捕捉電子は配位中に閉じ込められる. 捕捉粒子のトロイダルプリセッションによって初期電流が生み出され, のちに閉磁気面が形成される. このとき高エネルギー捕捉粒子の寄与によって高いポロイダルベータ値  $\beta_p = 2\mu_0 \langle p \rangle / \langle B_p \rangle^2$  が達成され, ヌル点 (強磁場側) やセバトロクスが自発的に形成される. この配位は IPN (Inboard Poloidal field Null) 配位と呼ばれ, 球状トカマク装置 QUEST で研究が進展している<sup>3,4)</sup>.

近年 QUEST の IPN 配位における遠方スクレイプオフ層 (遠方 SOL, Scrape off layer) の熱流束とプラズマ流を, (熱電対とラングミュアプローブの) ハイブリッドプローブを用いて計測した<sup>5,6)</sup>. プラズマ電流立ち上げ時には高い熱流束と超音速プラズマ流が同時に存在する. この熱流束は最外殻

磁気面からはみ出した高エネルギー電子が担っている. また超音速流はポロイダルとトロイダルの両方向に現れ, 互いに相関し合っている. 次に準定常状態では振動 (20 Hz) によってプラズマ電流波形が鋸歯状になるが, 遠方 SOL の熱流束とプラズマ流もこの振動に応答しながら時間変化する. プラズマ電流減少フェーズでは高エネルギー電子に起因する熱の流れとバルク粒子の輸送が促進される. プラズマ流の変化は電流の急減少よりも早く起き, マッハ数とプラズマ電流の関係はリミットサイクル特性を持つ. この関係は遠方 SOL 流が IPN 配位における電流振動を支えるために重要な役割を果たしている事を示唆している.

本報告書では, 次章でハイブリッドプローブについて説明する. 次の第 3 章で実験結果を, 電流立ち上げ時と準定常状態に分けて紹介する.

## 2. ハイブリッドプローブ

QUEST の遠方 SOL 領域では, 低温のバルクプラズマと共存する高エネルギー電子が熱流を担うため, 通常の静電プローブでは正味の熱流束を計測することが難しい. そこで熱電対による温度測定を利用した熱流束計測法が役に立つ. 熱流束を求めるには, 熱電対でプローブヘッド地点の温度

<sup>\*1</sup> 九州大学応用力学研究所

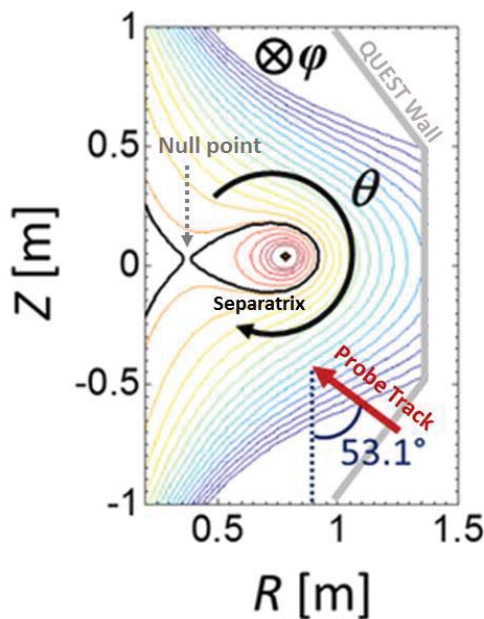


Fig. 1 Cross-section of QUEST presenting location of the hybrid probe in magnetic flux of IPN configuration. Plasma current flows in the positive toroidal direction,  $\phi$ . Poloidal magnetic field is generated in the positive azimuthal direction,  $\theta$ .

を測定し、その温度の時間変化を数式モデル(文献 5 を参照)に代入する。本研究では 4 本のサイド熱電対プローブを利用して四方向の熱流束分布を同時計測した。

一方で熱電対はステンレス(SS316)シース(プラズマが作るシースではなく、プローブの鞘)で囲まれており、そのシースにバイアス電圧を印加すればラングミュアプローブとして利用することができる。ペアになる 2 つのプローブを使えばマッハプローブになる。QUEST の遠方 SOL は磁場強度が 0.01 T 以下で電子密度が  $n_e < 10^{16} \text{ m}^{-3}$  であり、マッハプローブのデータ解析に弱磁場モデルを使った<sup>7)</sup>。本研究では 4 本のサイドプローブで二方向のマッハ数を計測してプラズマ流観測を行った。

図 1 のように QUEST の遠方 SOL にハイブリッドプローブを設置して計測を行った。モーター式の駆動機を備えているためプローブヘッドの位置を変えた分布計測ができる。可動領域は大半径方向  $750 \leq R \leq 1250 \text{ mm}$  (高さ方向  $-690 \leq Z \leq -310 \text{ mm}$ ) の範囲である。また圧縮空気による高速駆動機能により、さらに 200 mm の挿入が可能である。また方位角方向にも駆動機構があり、再現性の良いプラズマを生成して計測すれば、熱流束とプラズマ流の詳細な方位角分布を観測することができる。

### 3. QUEST の遠方 SOL における熱流束とプラズマ流

#### 3.1 プラズマ電流立ち上がり時の高熱流束と超音速

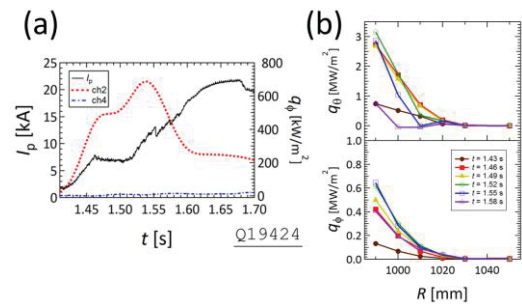


Fig. 2 (a) Time evolutions of plasma current  $I_p$  and toroidal heat flux  $q_\phi$  measured by hybrid probe. Probe ch2 (ch4) measures electron (ion) drift side. The probe location is at  $R = 990 \text{ mm}$ . (b) Radial profiles of poloidal and toroidal heat flux.

#### プラズマ流

図 2(a)にプラズマ電流と熱流束  $q_\phi$  の時間変化を示す。ch2 と ch4 はトロイダル方向の電子ドリフト側とイオンドリフト側になる。波形から明らかなように  $q_{\phi, \text{ch2}} \gg q_{\phi, \text{ch4}}$  であり、電子ドリフト側に熱流束が集中している。この熱流束はプラズマ電流が立ち上がるにつれて抑制される。図 2(b)は熱流束の径方向分布である。 $R \approx 1020 \text{ mm}$  付近より内側で急勾配が現れており、熱流の構造がこの辺りで大きく変化していることが示唆される。 $R = 990 \text{ mm}$  では一時的だが  $q_{\text{ext}} \approx 3 \text{ MW/m}^2$  の高熱流束が観測された。この時のプラズマ加熱は ECH のみでイオン温度は低く、またこの付近のバルク電子温度は  $T_e < 20 \text{ eV}$  であることから、熱源は高エネルギー電子以外には考えられない。IPN 配位は高いミラー比を有するため、低磁場側開閉磁気面における高エネルギー捕捉(バナナ)粒子の閉じ込めが良く、プラズマ電流はその歳差運動によって流れる。よって QUEST の遠方 SOL では高エネルギー捕捉電子が熱流束を担っていると考えられる。

一方、プラズマ流も電流立ち上がり時に特徴的である。図

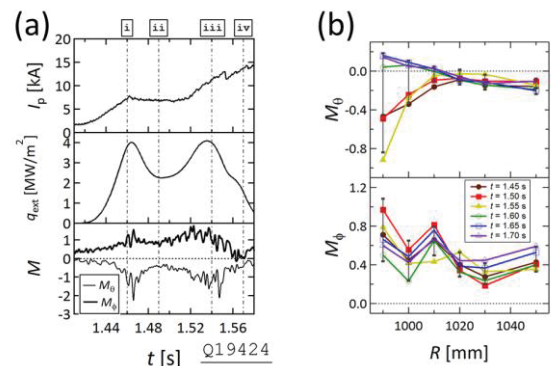


Fig. 3 (a) Waveforms of  $I_p$ , heat flux  $q_{\text{ext}}$  in poloidal direction, and Mach numbers  $M$  in the current start-up phase. Probe location is at  $R = 990 \text{ mm}$ . (b) Radial profiles of poloidal and toroidal Mach numbers.

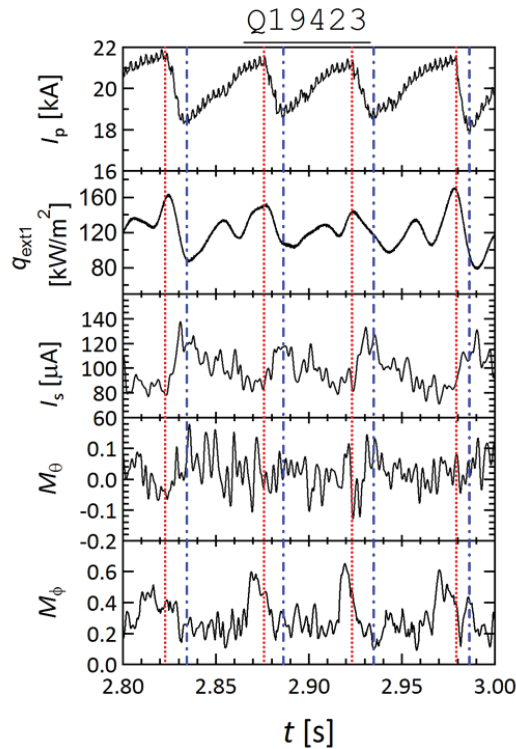


Fig.4 Plasma current, poloidal heat flux, ion saturation current, and Mach numbers. Red dotted line and blue dashed-dotted line present a peak and a local-minimum of  $I_p$ , respectively. The probe location is at  $R = 1000$  mm.

3(a)に  $R = 990$  mm でのマッハ数の時間変化を示す。ポロイダルマッハ数  $M_\theta > 2$ 、トロイダルマッハ数  $M_\phi > 1.5$  が観測され、電流立ち上がり時に遠方 SOL 領域に超音速流が存在することがわかった。波形からポロイダル流とトロイダル流は強く相関していることがわかる。同時計測したポロイダル熱流束  $q_{ext}$  とマッハ数の時間変化にも相関があり、高エネルギー電子の振舞と流れの関係が示唆される。図 3(b)はマッハ数の径方向分布である。 $R = 1020$  mm 付近から内側にマッハ数の急勾配が存在することがわかる。プラズマ電流の立ち上がりと共に  $R = 1010$  mm より内側でポロイダルマッハ数の符号の変化する。よって観測領域でフローシアが観測されたことになる。また電流立ち上がり後半ではマッハ数の絶対値は小さくなる。この傾向は熱流束の抑制にも見られる。高熱流束と超音速流の抑制は閉磁気面の形成と同じ時間帯に起きている。

### 3.2 プラズマ電流の鋸歯状振動と遠方 SOL の応答

プラズマ電流が立ち上がり、準定常状態に達すると鋸歯状振動が起きる。図 4 にプラズマ電流の波形を示す。 $I_p \approx 18.5$  kA から約 3 kA 増加するが、約 45 ms 後に急減少が起きて 5 ms 程度で極小値を取る。この電流増減の繰り返し周波数は  $f \sim 20$  Hz で、電流値がおおよそ保たれる限りこの現象も準定常的に続く。遠方 SOL でもこの

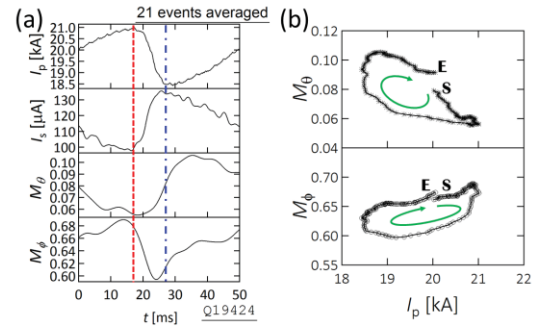


Fig. 5 (a) Conditionally-averaged data, where the time window duration is 50 ms. (b)  $M-I_p$  diagram. “S” and “E” represent “start” and “end” of a cycle, respectively.

振動に応答してパラメータの変化が起きる。図 4 ではポロイダル熱流束  $q_{ext}$  の最大・最少のタイミングは  $I_p$  のそれらとほぼ同期している。一方イオン飽和電流  $I_s$  は電流ピーク時に小さく、電流急減少直後にピークを持つ傾向にある。バルクプラズマに起因する熱流束の式  $q_s = \gamma T_e I_s$  より、また  $T_e \approx 5$  eV を仮定すると、 $q_{ext}$  と  $q_s$  では振舞が大きく異なることになる。 $I_p$  が小さい場合にポロイダル磁場  $B_\theta$  も小さくなるが、通常トカマクの場合その時に粒子・熱輸送が高まることで SOL 領域の熱流束も増加する。しかし、QUEST の IPN 配位においては熱流束は高エネルギー電子によるものが支配的であり、準定常状態に置いても遠方 SOL の熱分布を決めている。よって  $B_\theta$  が高い(低い)ときに正味の熱流束  $q_{total}$  が高く(低く)なることが起こりうる。

また遠方 SOL におけるプラズマ流もプラズマ電流振動に対して特徴的に振る舞う。図 4 に示すのはポロイダル及びトロイダル方向のマッハ数の時間変化である。ポロイダルマッハ数  $M_\theta$  は元々小さいためにその変化は波形からは判断しにくい、確かな応答が存在する(後述)。一方トロイダルマッハ数  $M_\phi$  はその応答が時間変化から分かりやすい。 $M_\phi$  のピークは明確に図 4 の点線(電流ピーク時を表す)よりも先に現れ、電流ピーク時は  $M_\phi$  は減少フェーズに入っている。このように  $M_\phi$  の増減は電流ピークと急減少よりも前の段階に起きていることが観測された。

一回のプラズマ電流振動を一サンプルとして切り出すことで、データから多数のサンプルを得ることができる。条件付き平均(Conditional average)処理をすれば、振動に対するパラメータの応答パターンを平滑化して見ることができる。図 5 に  $I_p$ ,  $R = 990$  mm で測定した  $I_s$ ,  $M_\theta$ ,  $M_\phi$  を条件付き平均した波形を示す。 $I_s$  は低  $I_p$  フェーズで増加し、 $I_p$  の増加と共に減少する。 $I_s$  の時間変化パターンは、本研究の計測領域  $990 \leq R \leq 1050$  mm では変わらない。 $I_s$  の絶対値は内側(低  $R$ )で高く、低  $I_p$  (低  $B_\theta$ )時に径方向への粒子損失が促進され则认为ら

れる。また  $M_\theta$  と  $M_\phi$  も  $I_p$  振動に対して明確な応答があることが分かる。図 5(b) のように  $M$ - $I_p$  ダイアグラムを描くとより特徴が反映される。ダイアグラムは”S”から”E”へと輪を描くリミットサイクル性を有する。この  $R$  位置では、 $M_\theta$  は一振動で平均値から約 $\pm 25\%$ 、 $M_\phi$  は $\pm 7.5\%$ 変化している。 $M_\phi$  で特に顕著だが、 $M$  の変化は  $I_p$  の変化よりも早い。例えば  $M_\phi$  が”S”から始まって  $I_p$  が 21 kA 時に  $M_\phi$  が変化し始める。また電流が減少して  $I_p \approx 18.5$  kA の時、 $M_\phi$  が先に上昇し始め、その後に  $I_p$  の増加が見られる。 $R < 1000$  mm の領域では  $I_p$  よりも早くマッハ数に変化が生じる。即ちコアプラズマよりも早く変化する遠方 SOL プラズマ流が存在すると考えられる。プラズマコアと遠方 SOL には密接な関連性があり、遠方 SOL におけるプラズマ流はプラズマ電流振動を支えるための重要な役割を果たしていると考えられる。

## 謝辞

本研究は九州大学応用力学研究所で図子秀樹先生のご指導のもと行いました。得られた成果は、着想、実験、解析、考察に至る全てにおいて図子先生の広く深い知識と柔軟な発想の賜物です。議論させて頂いたり、コメントを頂いたりする度に、非常に多くのことを考えさせられ、物事の深みを味合わせて頂きました。その経験は何物にも代えがたいものであり、大変有難いことでした。

また花田和明先生、出射浩先生をはじめ、QUEST 装置に関わる全ての研究者、技術職員、事務補佐員、学生の方々に感謝致します。特に博士後期課程コースの Kishore Mishra さんとは多くの議論を交わし、幾度も助けて頂きました。

## 参考文献

- 1) T. Maekawa, Y. Terumichi, H. Tanaka, M. Uchida, T. Yoshinaga, S. Yamaguchi, H. Igami, M. Konno, K. Katsuura, K. Hayashi, Y. Abe, J. Yamada, S. Maebara, and T. Imai, Formation of spherical tokamak equilibria by ECH in the LATE device, Nucl. Fusion 45, 1439-1445, 2005
- 2) M. Ishiguro, K. Hanada, H. Liu, H. Zushi, K. Nakamura, A. Fujisawa, H. Idei, Y. Nagashima, M. Hasegawa, S. Tashima, Y. Takase, Y. Kishimoto, O. Mitarai, S. Kawasaki, H. Nakashima, and A. Higashijima, Non-inductive current start-up assisted by energetic electrons in Q-shu University experiment with steady-state spherical tokamak, Phys. Plasmas 19, 062508, 2012
- 3) S. Tashima, H. Zushi, M. Isobe, K. Hanada, H. Idei, K.

- Nakamura, A. Fujisawa, K. Matsuoka, M. Hasegawa, Y. Nagashima, S. Okamura, S. Banerjee, S. Kawasaki, H. Nakashima, and A. Higashijima, Role of energetic electrons during current ramp-up and production of high poloidal beta plasma in non-inductive current drive on QUEST, Nucl. Fusion 54, 023010, 2014
- 4) K. Mishra, H. Zushi, H. Idei, M. Hasegawa, T. Onchi, S. Tashima, S. Banerjee, H. Hanada, H. Togashi, T. Yamaguchi, A. Ejiri, Y. Takase, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, A. Kuzmin, and QUEST team, Self organization of high  $\beta_p$  plasma equilibrium with an inboard poloidal magnetic field null in QUEST, Nucl. Fusion 55, 083009, 2015
- 5) T. Onchi, H. Zushi, K. Mishra, Y. Mahira, K. Nagaoka, K. Hanada, H. Idei, M. Hasegawa, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, K. Matsuoka, S. Tashima, S. Banerjee, A. Kuzmin, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, and O. Watanabe, Heat flux and plasma flow in the far scrape-off layer of the inboard poloidal field null configuration in QUEST, Physics of Plasmas 22, 082513, 2015
- 6) T. Onchi, Y. Mahira, K. Nagaoka, S. Tashima, S. Banerjee, K. Mishra, H. Idei, K. Hanada, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, K. Matsuoka, A. Kuzmin, O. Watanabe, S. Kawasaki, H. Nakashima, and A. Higashijima, Observation of heat flux and plasma flow in scrape off layer in QUEST, J. Nucl. Mater. 463, 428-431, 2015
- 7) T. Shikama, S. Kado, A. Okamoto, S. Kajita, and S. Tanaka, Practical formula for Mach number probe diagnostics in weakly magnetized plasmas, Phys. Plasmas 12, 044504, 2005.