



2. 高速カメラの直接的な利用例(2)

三瓶明希夫, 永田正義¹⁾, 西野信博²⁾

京都工芸繊維大学大学院工学科学研究科, ¹⁾兵庫県立大学大学院工学研究科, ²⁾広島大学大学院工学研究科

(原稿受付日: 2010年7月14日)

高速カメラの実験装置での使用例や使用方法について, 7月号に収まらなかった残りの部分 (RELAX, NSTX, HIST, Heliotron J, QUEST) を概説する. カメラの利用は本解説の装置以外にも様々なところで使用されているので, 学会等で注意していただければ結構見つかるだろう. 技術の進歩は著しく, また, 読者の方々の多くのアイデアから新しい計測手法が生み出されることを期待しつつこの章を終えたい.

Keywords:

fast camera, peripheral plasma, plasma diagnostics, magnetic confinement device, C-MOS, Plasma Gun

2.1 逆磁場ピンチ (RFP) 装置RELAXにおける高速カメラ計測

本節では低アスペクト比 ($A=2$) の逆磁場ピンチ (RFP) 装置 RELAX [1] における高速カメラ計測の結果を紹介する. RFP は磁場閉じ込め方式の一種であり, プラズマ中を流れる電流が閉じ込め磁場を作る. RFP 磁場配位の特徴は, 安全係数 q の分布が磁気軸上で最大値 ($\sim 1.5 a/R$) をとり, 周辺部に向かって単調に減少してプラズマの端では $q < 0$ となることである. このような q 分布においてはプラズマ中心領域で $m=1$ のモード有理面が近接して存在するので, これらのモードの非線形相互作用に由来する磁気カオスによる閉じ込め劣化が問題とされてきたが, 最近の MHD 不安定性のフィードバック制御技術の開発および制御アルゴリズム研究の進展により, 自発的に, または外部からの駆動によって, 単一共鳴モードが成長してプラズマ内部の磁気面がヘリカルに変形した RFP 配位に遷移する現象が見出された [2]. イタリアの RFX-mod 装置では, 中心付近に共鳴面をもつ単一のテアリングモードに伴って成長する磁気島内の磁気面が自己修復されて電子温度, 電子密度が上昇することが観測され, エネルギー閉じ込めの改善およびヘリカル輸送障壁の形成が確認されている.

RFP のアスペクト比を小さくすると軸上の q が上昇する. アスペクト比が 2 の RELAX の場合, $q(0) < 0.33$ であれば最も内側のモード共鳴面 ($q=1/4$) の位置は $r/a \sim 0.4$ となって磁気軸から離れるため, 単一磁気島が成長してヘリカル変形が生じやすくなると考えられる. 従来までに, 内部の磁場分布計測によって, RELAX における低アスペクト比プラズマの巨視的なヘリカル変形が示され [2], 光学的手法による内部構造の観測が求められていた. その一つの手段として, 広島大西野氏との共同研究により, RELAX に高速カメラ計測を適用し, 可視光構造を撮影した [3]. 図 1 (a) に高速カメラの設置図を示す. カメラ

の視線は接線方向であり, 点線内が計測系の視野である. 高速カメラには nac image technology 社製の "MEMRE-CAM fxK4" を使用しており, 撮影速度 80,000 [frames/second] で撮影を行った. RELAX のプラズマ放電時間は 2 ms 程度であり, 一回の放電に対して約 160 枚のスナップショットが得られる.

磁場揺動スペクトルが準単一ヘリシティ (QSH) のそれに近い場合に, 図 1 (b) のような可視光のヘリカル構造が観測された. RELAX では充填ガスに水素を用いているが, 干渉フィルタを介した画像計測の結果から, この構造は $H\alpha$ 線の発光に因るものであることも明らかとなった. このヘリカル構造とその径方向の位置は, 平衡再構成結果から予測される $q=1/4$ の有理面の位置にほぼ一致し, ヘリカルピッチも磁力線のピッチと一致する (図 1 (c)). また,

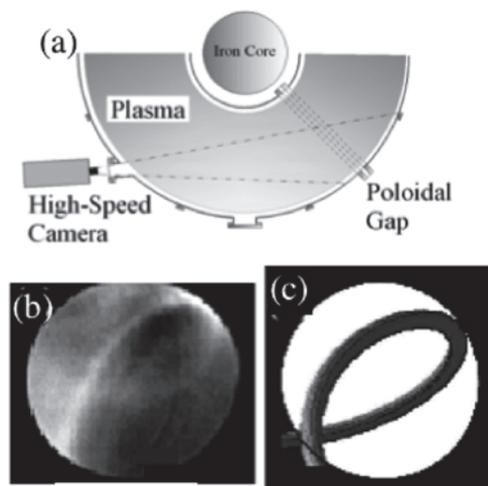


図 1 (a) RELAX と高速カメラ設置概念図. (b) RELAX で観測された可視光ヘリカル構造. (c) $m=1/n=4$ モード有理面上のヘリカル構造の模式図 (文献 [4] より転載).

2. Typical Usage of Fast Cameras as High-Speed Video Camera (2)

SANPEI Akio, NAGATA Masayoshi and NISHINO Nobuhiro

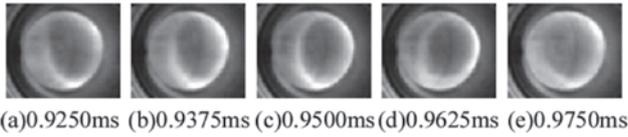


図2 ヘリカル構造のトロイダル回転.

このヘリカル構造の時間変化の様子を図2に示す。ヘリカル構造を保ったまま、トロイダル方向に10 kHz程度で回転していることが解る。同時に行っている分光計測の結果により、ヘリカル可視光構造が存在する時間帯ではH α 線の強度が上昇していることがわかっている。これは壁からのリサイクリング中性粒子の増加を示唆しており、この現象によって共鳴面付近の中性粒子密度が増加するために、電子温度および電子密度のヘリカル構造が可視化されたと考えられる。

高速カメラで撮影された可視光ヘリカル構造は電子密度、電子温度の構造を反映した発光が観測されたものと考えている。現在、電子温度・電子密度のヘリカル構造の時間発展を直接計測するために、軟X線ピンホールカメラと高速カメラを組み合わせた軟X線2次元画像の時間発展計測システムの開発を進めている。(三瓶明希夫)

2.2 磁化同軸プラズマガン実験における高速カメラ計測

磁化同軸プラズマガン (Magnetized Coaxial Plasma Gun: MCPG) は、スフェロマック/球状トーラス (ST) のヘリシティ入射電流駆動実験、コンパクトトロイダル入射による燃料粒子補給実験、磁気リコネクション基礎物理実験、天体宇宙プラズマ現象の実験室内実験、そして最近では、ダイバータ材料のELMs模擬用パルス高熱負荷試験に用いられている。これらの研究内容については、本誌小特集「ITER時代における大学の革新的閉じ込め概念研究のあり方」[5]、また、講座「高速プラズマ流と衝撃波の研究事始め、5.5節」[6]において詳しく解説されている。本講座のテーマ「高速カメラを使用したプラズマ計測例」についてはその中でも一部紹介されているので併せて参考にして頂きたい。MCPG利用によるプラズマ流と磁場との相互作用が創り出す複雑なMHD現象の探求には、高速カメラは不可欠な観測ツールとして非常に多く用いられている。この関連の実験では比較的低温で高密度の磁化プラズマを対象とするため、高速カメラのピーク感度である可視領域からの光が強く、プラズマ全体の巨視的なダイナミクスを捉えやすいのが特徴である。しかし、一方、現象の時間応答が早い場合、 μ 秒オーダーの時間分解能がカメラやデータ収集系に要求される。本節では、プリンストン大学プラズマ物理研究所のNSTX装置および兵庫県立大のHIST装置における同軸ヘリシティ入射 (Coaxial Helicity Injection: CHI) 実験[7, 8]、および高速プラズモイド生成に用いられるMCPG[9]内部のプラズマ回転の高速カメラの観測例を紹介する。

(1) NSTXにおける観測例

球状トーラスは低アスペクト比であるため、中心ソレノ

イドコイルを用いない初期電流の立ち上げ (スタートアップ) と定常電流駆動の実現が重要課題である。そのためNSTX装置では非誘導電流駆動法の一つの有効な手段として、CHI法が試験されている。50 MWのDC電源を用いた初期のCHI実験[10]では、長時間の電流駆動を達成しているが、その維持過程で十分な磁気面が形成されていないとの議論があった。そこで、スタートアップ時のみに絞ったTransient-CHI法が提案、試験され、実験では高速カメラ計測が平衡配位形成の検証に重要な役割を果たした[7]。図3にCHIの模式図を示す。高速カメラ (Vision Research, MICRO-II, 1万8千フレーム/秒) を用いたプラズマ生成過程の観測結果を図4に示す。80万ファイバ数を持つ高分解バンドル光ファイバを通して見た観測視野は真空容器内部のほぼ全領域をカバーしている。装置下のダイバータ部でガスパフを行い、18 GHz, 10 kWのマイクロ波で予備電離を行った後、ダイバータ電極間に2 kV以下の電圧を印加し、50 mFのコンデンサーで放電を行う。初期放電開始後、りんご形状のプラズマが $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ のローレンツ力によって噴出する様子がカメラ画像上 ($t=7.2$ ms, 8 ms) でうまく捉えられている。この噴出過程においてダイバータコイルが作る磁力線が引き伸ばされ、同時にXポイント付近で磁気リコネクションが発生し、閉じたポロイダル磁束が形成される ($t=8.4$ ms, 9 ms)。入射ガン電流 (~ 2 kA) は $t=10$ msではほぼゼロになると、プラズマは自己抵抗によって減衰していく。この減衰過程のカメラ画像 ($t=10$ ms, 11 ms) はfish eye imageのトーラス配位を見事に表現している。画像上のプラズマコア部分では周辺部に比べて光の強度が弱くなっており、平衡計算結果と併せて閉じた磁束面構造が形成されているものと考えられる。また、上部の絶縁ギャップの箇所では放電が起きるとその部分が強く光り、電流増幅率 (入射電流に対するプラズマ電流の割合でこのショットでは約40倍) の低下が高速カメラ計測によって明らかにされた。最近その対策が講じられた結果、最大200 kAのプラズマ電流の立ち上げとその後のオーミックとのカップリング駆動によって高性能なSTプラズマ生成に成功している[11]。NSTXではCHI実験の他にも、広島大の西野氏による高速カメラを用いたプラズマ周辺領域の

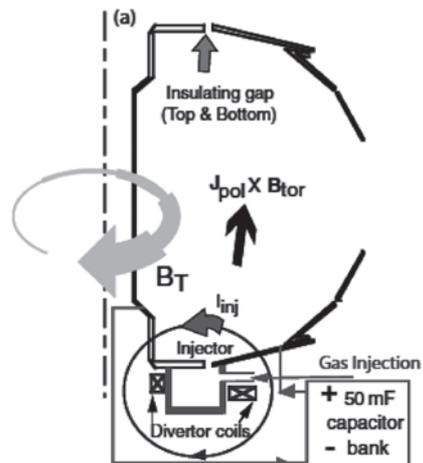


図3 NSTX装置におけるCHI模式図[6].

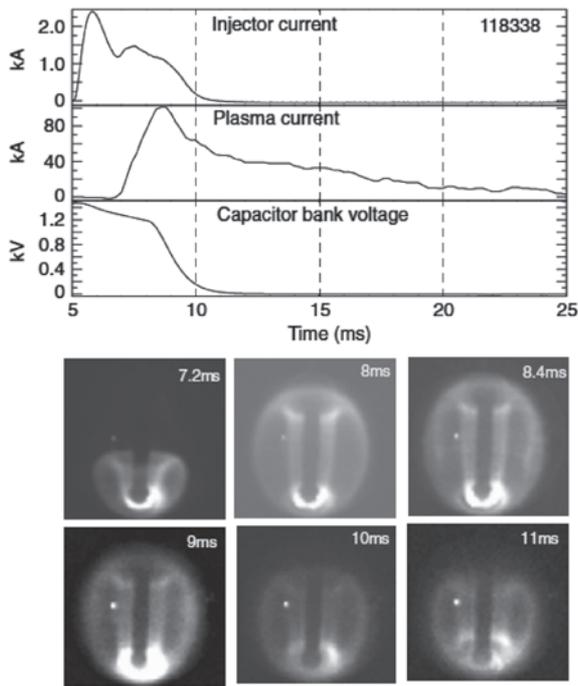


図4 Transient-CHIによるスタートアップ実験，上図は入射電流，プラズマ電流，電極間電圧の時間変化，下図は高速カメラによる全体像[6]．

ELM 挙動の観測が実施されている [12]．これらは日米協力事業による成果であり，R. Raman 氏と L. Roquemore 氏（高速カメラ担当）への謝辞を追記しておきたい．

(2) HIST における観測例

HIST 装置では MCPG を用いた CHI 方式を実施している．高速カメラ計測の設置図を 図 5 に示す．プラズマ固定境界であるフラックスコンサーバの観測穴に近接させた魚眼レンズ (F 値 2.5, 焦点距離 1.53 mm) を先端に取り付けたイメージバンドル光ファイバ (ファイバ径 11 mm, 長さ 4 m, 開口数 0.2 : 日本原子力研究開発機構から借用) を用いて，高速カメラへプラズマ像を導いている．デモ機を借りて観測に用いたカメラは最大で 20 万フレーム / 秒の撮影が可能で nac image technology 社製の MEMRECAM GX-1 である．本製品はカラーモデルで ISO 5000 の高感度 CMOS センサを搭載しており，低照度下の撮影においても鮮明な高速撮影が可能である．観測視野は MCPG のプラズマ噴出

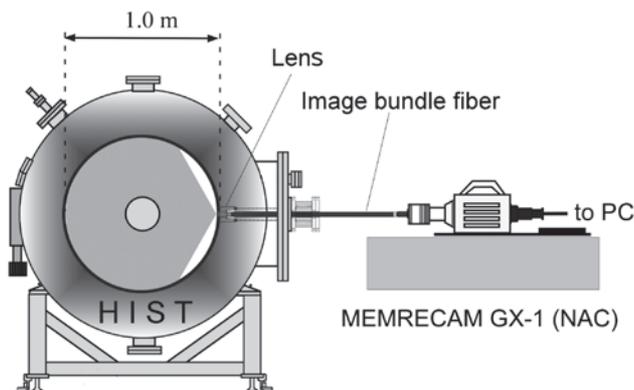


図5 HIST における高速カメラ設置図．

口を含めたほぼ全域をカバーしている．この実験では，ST 配位プラズマ生成後，外部トロイダル磁場を急速に反転させることにより反転 ST 配位と呼ばれるユニークな緩和配位へ遷移する過程を調べた [13]．高速カメラの撮影速度は 2 万フレーム / 秒で，その観測結果を 図 6 に示す．図下の平衡計算の磁場配位が示すように，ガン入り口付近で非反転領域が存在する．強く光っているカメラ画像の領域からその存在を確認することができる．反転 ST 配位の形成過程では，ガン出口とは反対側の位置（画像では右端）からプラズマ電流の方向が逆転し始めることが磁場計測等からわかっており，画像からも予測することができる．

(3) MCPG 内部の観測例

最近，100 万フレーム / 秒の超高速撮影ができる島津製作所の Hyper Vision HPV シリーズの高速カメラをデモ機として借りることができた．そのカメラを用いて，MCPG 内部のプラズマと不純物挙動を観測したのでここで紹介する．従来のカメラは，撮影速度を上げるに従って解像度が低下したが，Hyper Vision はセンサー部の CCD 内に蓄積と転送を行うメモリ領域を持っており，全ての速度において常に 10 ビット，312 × 260 ピクセルの解像度で撮影が行えるのが大きな特徴である．しかし，全フレーム数 (100 枚) は固定であるので，長時間放電の撮影には適さない．実験は，1 ~ 8 μs/frame で高速撮影を行った．タングステン材料への重水素プラズマ照射実験 [9] に用いた MCPG とカメラの概略配置図，および計測結果を 図 7 に示す．図の中心にモリブデンコーティングされた内部電極先端部がある．MCPG で作られる重水素プラズマは，スフェロマック磁場構造をもっており，電極間に印加された電場 E と外部パイアスコイルが作る磁場 B との $E \times B$ によって (図 7 では反時計方向に) 高速回転している．図の 2 次元画像から渦構造が鮮明に形成されていることがわかる．また，全体画像の中に点々と光る部分が確認できる．これは電極放電によって電極先端部が溶融し，金属粒子またはイオンがダストとして飛散し，回転プラズマ流に混入しながら発光しているものと考えられる．この金属ダストの強い発光の時間

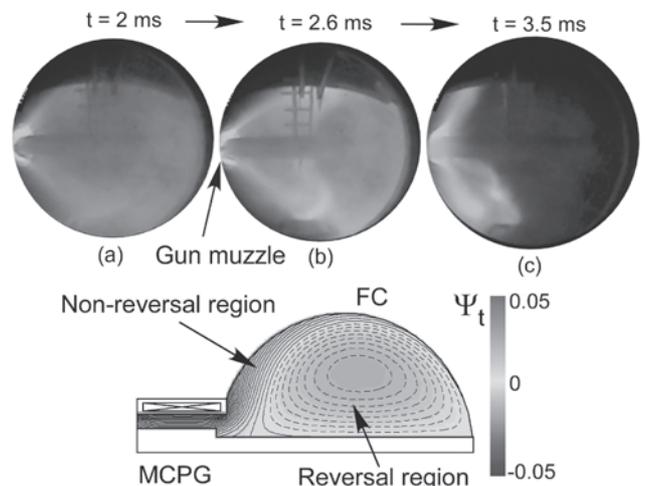


図6 高速カメラで撮影した反転 ST 緩和配位の形成過程 (上図) と平衡計算結果 (下図)．

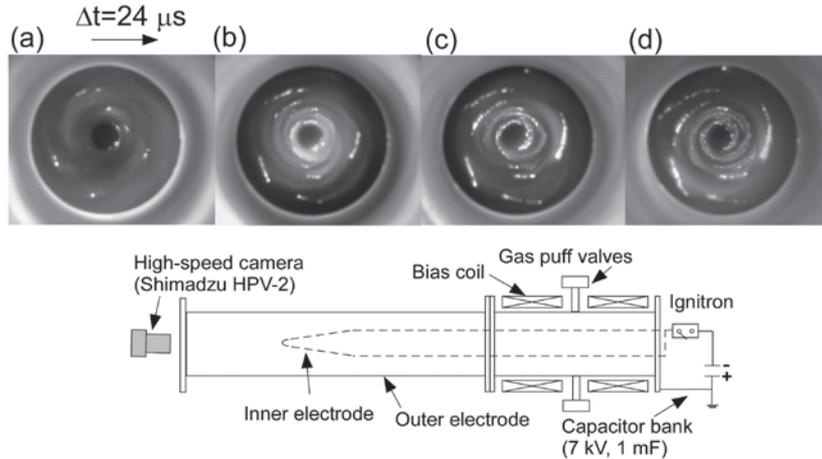


図7 上図：プラズマ回転と金属ダストの発光のカメラ画像 下図：MCPG 構造と高速カメラ配置図。

変化をよく見ると円周方向にしたいに長く伸びてくること
 がわかる。超高速撮影によってプラズマ回転速度に比べて
 この金属ダストのドリフトはかなりゆっくりしていること
 がわかった。このプラズマ回転渦構造の珍しい現象は高速
 カメラ計測によって初めて観測できた良い例である。

(永田正義)

2.3 京都大学における高速カメラを用いた Heliotron J プラズマ計測

京都大学エネルギー理工学研究所の立体磁気軸ヘリオト
 ロン実験装置 Heliotron J[14, 15]における高速カメラを用
 いたプラズマの計測は、平成12年から報告者（広島大学、
 西野）と京都大学の共同研究から始まり、平成16年からは
 双方向型共同研究として行われている。Heliotron Jは、
 $L=1$ ヘリカル磁場で ∇B を小さくとることで粒子の閉じ
 込め性能が期待でき、また、トロイダル磁場の大きさを変
 えることによりバンピーネスを変更できるなど、多彩な磁
 場配位が可能である。これら種々の磁場配位でのプラズマ
 の周辺部における揺動を計測し、揺動の物理に関する情報
 を得ることで、プラズマのエネルギー閉じ込め性能をより
 良くすることを可能とするはずである。このことは核融合
 プラズマ実現に向けての重要なステップである。本研究で
 使用したカメラは Photron の ULTIMA-SE, FASTCAM
 SA1.1 (SA5), Nac Image Technology の FX K4 (K5) など
 である。本節では、これまでに計測された現象で代表的な
 ものを取り上げて簡単に紹介したい。

(1) 炭素リミタ上の揺動[16]

図8左は、Heliotron Jの平面図とリミタ、カメラの位置
 を示す。また、そのポロイダル断面図を右側に示す。高速
 カメラは、真上から半球状の炭素リミタを見ている。途中、
 ハーフミラーによってアレイでの分光測定を同時に行って
 いる。図8右にあるように、水平ポートからは、中速カメ
 ラが横方向から同じリミタを見るようにしている。この二
 つのカメラから見たリミタ付近の発光を図9に示す。この
 撮影ではどちらのカメラにも光学フィルタはつけていな
 い。横(図9右)から見ると、およそ1cm程度の厚さで光
 の放射が強い領域があることがわかった。また、上から見

た図(図9左)からはL-modeからH-modeに移る直後
 から数msの間で低周波数の揺動が見られた。リミタ上
 には静電プローブがあり、イオン飽和電流を測定している。
 図9で左で光っている2点(画素数が64×64と少ないの
 で、多少ぼやけている)がプローブのチップである。ECH
 放電で、きれいなL-H遷移プラズマを測定したときのこの
 点での光の揺動と、イオン飽和電流、線平均電子密度、お
 よび、ECEの信号を図10に示す。明らかにすべての信号の
 揺動が同期していることがわかる。スペクトルを調べると
 この信号は5-6kHzにピークを持つ低周波であることが
 わかった。この時のリミタを上から見ている高速カメラの
 画像を、各画素の時間データにそれぞれ時間依存FFTをか
 けて、ピーク周波数に近い成分を抜き出して表したものが
 図11である。Heliotron Jは環状プラズマであるから、図11
 の明るい放射領域の動きは、回転運動と認識できる。また、
 イオン飽和電流が同期していることから、比較的高い密度
 か温度(あるいは両方)の領域が光っているとも判断でき
 る。したがって、プラズマの回転運動か周辺部の波動か
 のどちらかを見ていることになる。電子密度やECEの信号
 から考えて電子密度・温度の変動を測定していることから、
 上記の推察は正しいと思われる。もし、この回転として、
 回転の原因が径電場による $E \times B$ ドリフトであるなら、
 径電場 E_r は負となることを付記しておく。Heliotron Jでは、
 この種の低周波揺動がはっきり見られる場合と見られない
 場合があり、この揺動の原因は明らかではない。

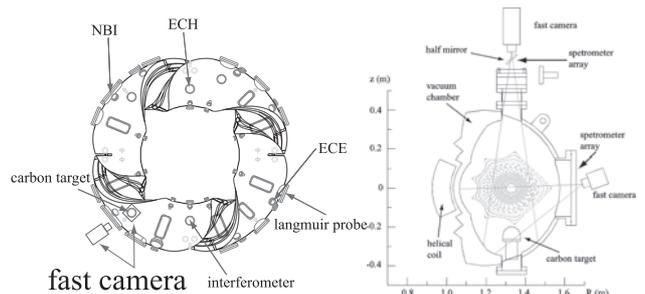


図8 Heliotron Jの平面図と高速カメラの位置、および、高速カ
 メラのポートにおけるポロイダル断面図。

(2) フィラメント状の揺動[16]

前節での高速カメラは、最高速が 40500 FPS であったため、詳細な揺動計測は困難であった。そこで、より高性能のカメラの Nac image technology 社の FX K-4 (後に K-5 に改造) を使用して、揺動計測を行ったのが本実験である。このシリーズのプラズマでは最高速度 105000 FPS、光学フィルタなしで撮影できた。図12にカメラの位置を、図13に水平ポートからの撮影画像を示す。イメージガイドを使用し、上下左右をあわせていないが、画像中のプローブは下から上方向に向いている。この静電プローブは可動式で、カメラと同じトロイダルセクションの下のポートを使用している。また、同じ場所に超音速ガスパフも用意された。この実験で、Heliotron J プラズマで、磁力線に沿って光る筋上のフィラメント状の揺動が始めて確認された。フィラメント状の揺動はガスパフがなくとも確認できる

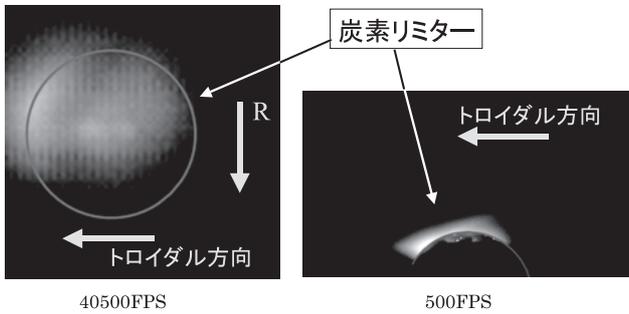


図9 二つの高速カメラから見たリミタ付近の画像。上から見たリミタ付近の発光 (円がリミタ端)。横から見たリミタ付近の発光 (円がリミタ端)。

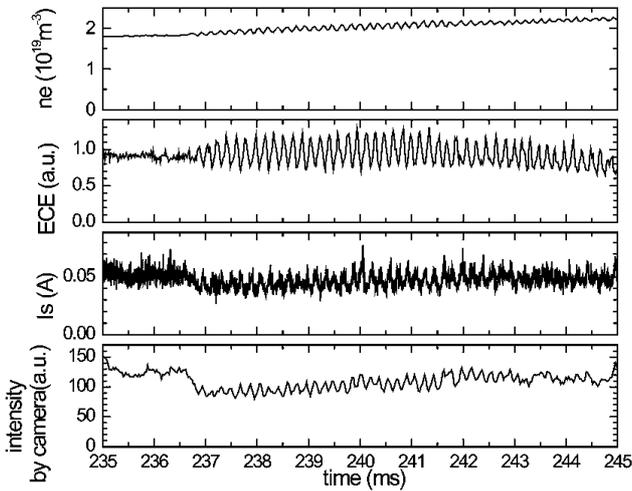


図10 電子密度、ECE、イオン飽和電流、プローブ位置での画素データ。周波数解析の結果、すべての信号に5~6 kHzのピークがあった。

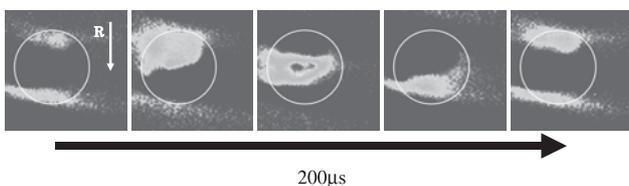


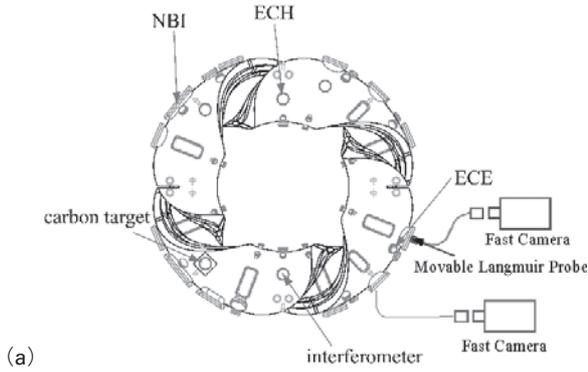
図11 5.7 kHz成分の強度表示。各画素データに時間依存FFTを使用した。白丸はリミタ端。

が、ガスパフがあるとプラズマが明るくなり、見やすくなる。また、ガスパフがある状態では、フィラメントが細くなっているように見える。この詳細構造 (Fine Structure) がガスパフ時になぜ起こるのかは現時点では不明であるが、西野による揺動モデル[18]ではフィラメント状揺動の原因を磁力線方向の不均一加熱・冷却を原因としており、現象論的には矛盾はない。もともとこのフィラメント状揺動は、Tokamak/ST 磁場配位で発見され、磁力線方向に沿ったほぼ2次元構造で、磁場に垂直方向におよそランダムに移動することが計測されている[19]。それゆえ、エネルギー閉じ込め性能に影響を及ぼしている信じられている。おそらく、ヘリカル磁場配位でのそれも同じ物理機構であると考えられており、環状磁場配位における普遍的な揺動であろう。また、GAMMA 10のように開放端磁場配位でも似たような構造が現れる場合があり、磁場中のプラズマの普遍的な乱流状態であるかもしれない。これらの物理的の解明は今後の進展に期待したい。

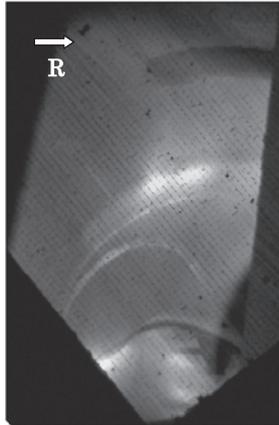
(3) L-H 遷移現象[20]

接続ポートを使用した高速カメラ測定のほうが、明るい放射領域の回転 (おそらくプラズマの回転) などのはっきりわかるであろうと考え、行ったのが本測定である。撮影に使用したカメラは、前節の FX K5 と FASTCAM SA1.1 (後 SA5 に改造) である。一般的なトカマクだと L-H 遷移時にプラズマ回転が逆になる ($E_r \times B_t$ の符号が逆。すなわち、L-mode では正の径電場 $E_r > 0$ で、H-mode だと、負の径電場 $E_r < 0$ となっている) ことが知られている。そこで、ヘリカル磁場配位である Heliotron J の L-H 遷移時にはどのようなことが起こるかを調べることは興味深い。図12に撮影に使用したカメラの位置と接続ポートからとったプラズマの画像を示す。特徴的な低周波揺動の周波数は、このショットでは8-9 kHzであったので、各画素のデータに時間依存FFTを使用し、その周波数の成分の位相をカラーで表示したのが図14である。フィラメント状揺動が L-mode, H-mode で磁場に垂直方向に移動し、また、L-H 遷移時に止まることが判明した。画像中のポートの大きさなどを考慮すると、揺動の移動速度は H-mode で、1-2 km/s で、L-mode ではその半分程度と荒く評価される。もし、この揺動の移動が径電場による $E_r \times B$ のプラズマ回転によるとすると、H-mode では、 $E_r = -2$ kV/m 程度で、L-mode で、 $E_r = +1$ kV/m と概算された。この値は、Heliotron J での静電プローブによる従来の計測結果と矛盾しない。それゆえ、ヘリカル磁場においても H-mode は Tokamak/ST 磁場配位と同様な物理機構で起こるものと推定される。

また、H-mode になる前のプラズマ画像を詳細に見てみると、揺動の回転方向がほとんどの時間 L-mode の方向であるが、たまに回転が止まったり、あるいは、短い時間 (< 1 ms) の間 H-mode の方向に回転する様子が見られる時間帯があった。この状態は、Heliotron J において Phase I [21] と命名されている状態であることが更なる調査でわかった。Phase I の特徴は、H-mode のように急激な密度上昇はなく、反磁性信号による閉じ込めエネルギーも時間的にゆっくり上昇するのが特徴である。現時点では He-



(a)



(b)

図12 高速カメラ計測に使用した水平ポートと接続ポートの位置と接続ポートからの画像。
(a) 高速カメラの位置, (b) 接続ポートからのプラズマ画像。画像は上下を合わせるために回転してある。

liotron JのH-modeでは密度の制御ができず、プラズマが放射崩壊する場合が多い。このPhase Iでは、ガスパフによる密度制御が可能な場合も多く、放射崩壊しない高エネルギー閉じ込めのプラズマを実現する可能性もある。

2.4 九州大学における高速カメラを用いたQUESTプラズマ計測

九州大学応用力学研究所高温プラズマ力学研究センター(現)のST装置であるQUEST[22]での高速カメラを用いたプラズマ計測を行っている。本研究は、平成16年双方向型共同研究として、当初 Triam 1 Mでの高速カメラによるプラズマ計測であったが、双方向型共同研究の新規展開と弾力的運用により、九州大学に定常プラズマをめざすST装置 QUEST が製作され、高速カメラによる QUEST プラズマ計測となったものである。本節では、QUESTでの高速カメラ(Nac Image Technology, FX K5, Photron FAST-CAM SA5)の内、K5での最近の計測結果を紹介する。

(1) OH+RFでのSTプラズマ生成[23]

図15にQUESTの平面図と高速カメラ、静電プローブの位置を示す。高速カメラは可動式の静電プローブの先端に見えるように通常は位置しており、ある程度圧力の高いプラズマの部分に静電プローブが接すると、明るく見える。このため、プローブ位置での光量とイオン飽和電流などとの比較が可能となり、カメラの画像に対する理解が深まる。これは、前述の Heliotron Jと同じ手法である。RFのみ

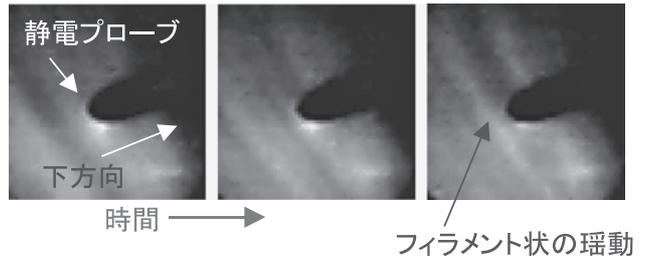


図13 フィラメント状の揺動。

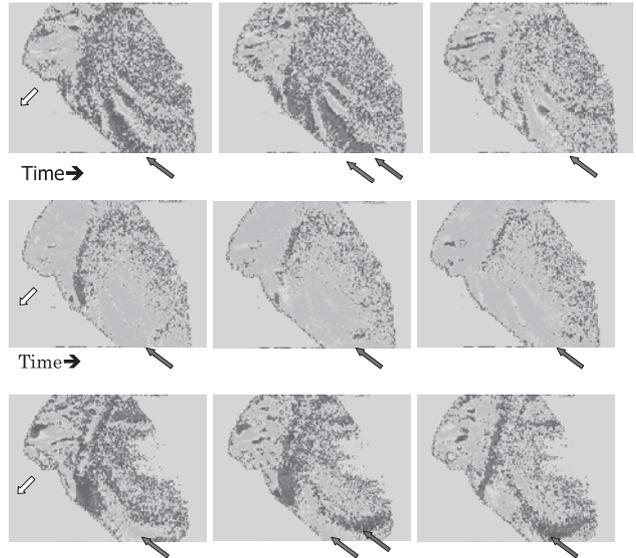


図14 2次元位相図の表示による揺動の挙動。

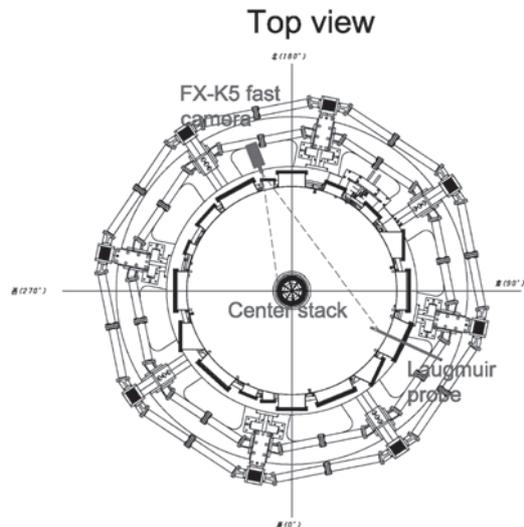


図15 QUESTの平面図とカメラの配置。通常は、カメラと静電プローブは同時計測しており、Heliotron Jと同様な計測システムである。

の電流駆動は磁場の調整などが必要で、最初の段階ではプラズマ電流が立ち上がりやすいオーミック放電を併用してSTプラズマ形成を試みた。図16にプラズマ電流が~50 kAまで立ち上がったプラズマでの電流立ち上がりの時間帯の画像の例を示す。撮影速度は、20000 FPSである。画像はポートのエッジで丸く画像がケラれており、中央に上下に

立っているように見える柱がセンタースタックである。時間進展は右向きで、よく見ると、画面上側の両側（丸で示している）の領域に真ん中が少し暗い部分を認識できる。これが、プラズマ電流によって、磁気面が形成されている部分であることは磁気計測からも確認できた。また、センタースタックを包むような縦長楕円形の光の領域は、センタースタック内にあるオーミックコイルに電流を流すためにできる磁気面の形状とおおよそ一致する。また、磁気プローブとこの画像を含めた情報で磁気面形状を再現する手法も開発された[24]。この磁気面は、オーミックコイルの電流が小さくなると消える。図16の状態からさらに時間進展すると、窓枠いっぱい以上までSTプラズマが広がるため、全体が光るように見えるのみとなる。残念ながら、ケラレによりプラズマ端を見えるまでの画角が取れていない。また、閉磁気面の領域の外側には開磁気面での明るい放射領域も見える。これら閉磁気面での揺動と開磁気面での揺動（次節参照）との比較は、揺動研究上重要と思われる。この研究は図子教授らにより精力的に進められている。

(2) フィラメント状の揺動[25, 26]

RFでの電流駆動プラズマなどの実験をするために、最初の段階では単純トーラス磁場配位にECH (2.45 GHz, <50 kW) をかけて予備電離プラズマの実験を行っていた。その際に、フィラメント状の揺動が見つかった。プラズマ電流がほとんど、あるいは、まったくない単純トーラス磁場に関わらず従来の環状磁場配位で発見されているような磁力線に沿った形の揺動で、垂直磁場を変えると、磁力線の向きに傾く様子が撮影された(図17参照)。これらの揺動はECH共鳴層のプラズマから発生し、トーラス外側に向かって移動する様子が画像から捉えられている。画像データと複数の静電プローブを使った電場計測などから、プラズマ生成部から離れたフィラメント状の揺動は $E \times B$ のドリフトで移動し、その速さは大半径の場所にもよるが凡そ1-2 km/sと考えられている。今後、この単純トーラス磁場配位のフィラメント状の揺動とプラズマ電流によって閉じた環状磁場配位での揺動との比較検討が計画されており、大変興味深い。(西野信博)



図16 STプラズマ形成時の画像。丸で示した部分から環状プラズマが形成されている。

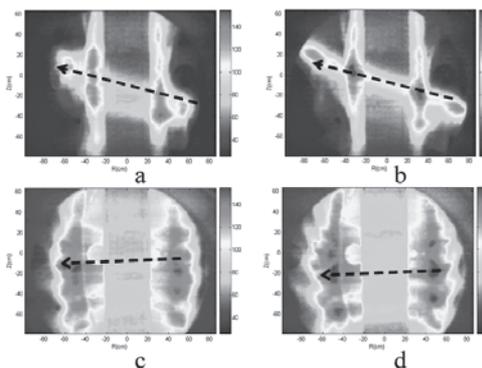


図17 フィラメント状の揺動。

a: 0.6596 s, b: 0.6597 s ($B_t = 365$ G, $B_z \sim 100$ G)
c: 0.4750 s, d: 0.4751 s ($B_t = 500$ G, $B_z \sim -28$ G)

参考文献

- [1] S. Masamune *et al.*, *Proc. IAEA Fusion Conference*, EX/7-1Rb (2008)
- [2] R. Lorenzini *et al.*, *Nature Phys.* **5**, 570 (2009).
- [3] K. Oki *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **77**, 075005 (2008).
- [4] T. Onchi *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **3**, 005 (2008).
- [5] 永田正義:「小特集:ITER時代における大学の革新的閉じ込め概念研究のあり方, 2.2章」*プラズマ・核融合学会誌* **84**, 760 (2008).
- [6] 永田正義:「講座:高速プラズマ流と衝撃波の研究事始め, 5.5章」*プラズマ・核融合学会誌* **83**, 491 (2007).
- [7] R. Raman *et al.*, *Nucl. Fusion* **47**, 792 (2007).
- [8] M. Nagata *et al.*, *Phys. Plasmas* **10**, 2932 (2003).
- [9] Y. Kikuchi *et al.*, *IEEE Transactions on Plasma Science* **38**, 232 (2010).
- [10] M. Nagata *et al.*, *Plasma Fusion Res.* **2**, 0035 (2007).
- [11] R. Raman *et al.*, *Phys. Rev. Letts.* **104**, 095003 (2010).
- [12] N. Nishino *et al.*, *IEEJ trans. FM* **125**, 1 (2005).
- [13] M. Nagata *et al.*, *Phys. Rev. Letts.* **90**, 225001 (2003).
- [14] T. Obiki *et al.*, *Nucl. Fusion* **41**, 833 (2001).
- [15] F. Sano *et al.*, *J. Plasma Fusion Res. SERIES* **3**, 26 (2000).
- [16] N. Nishino *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **337**, 1073 (2005)
- [17] N. Nishino *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **363**, 628 (2007)
- [18] N. Nishino, *Nucl. Fusion* **46**, S658 (2006)
- [19] S.J. Zweben *et al.*, *Nucl. Fusion* **44**, 134 (2004).
- [20] N. Nishino *et al.*, *J. Nucl. Mater.* **390**, 432 (2009)
- [21] F. Sano *et al.*, *Nucl. Fusion* **45**, 1557 (2005).
- [22] K. Sato *et al.*, *Proc. Joint Meeting of the 4th IAEA Technical Meeting on Spherical Tori and the 14th International Workshop on Spherical Torus*, Frascati, Italy, October 7-10, 2008.
- [23] O. Mitarai *et al.*, *Special Issue of the Journal of Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JPFR Series)* Accepted, Oct. 2009
- [24] M. Ishiguro *et al.*, *to be published in Plasma Fusion Res. Special Issue.*
- [25] H.Q. Liu *et al.*, *ITC-19 Plasma and Fusion Research Special Issue (to be published).*
- [26] H.Q. Liu *et al.*, *the 7th APFA/APPTC Special Issue (JPFR Series) (to be published).*