

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：若手研究（A）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18686076
 研究課題名（和文） 先進ドップラー反射計を用いた周辺部輸送障壁における径電場分布計測法の開発
 研究課題名（英文） Development of radial electric field measurement at edge transport barrier using advanced Doppler reflectometer
 研究代表者
 大山 直幸（OYAMA NAOYUKI）
 独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究副主幹
 研究者番号：80354596

研究成果の概要：2 台の高速掃引型シンセサイザを用いた先進ドップラー反射計を開発し、径電場分布計測と密度揺動径方向相関計測に適用した。径電場分布計測では、電場形成と密接に繋がっているプラズマ回転を変化させた時の径電場分布の変化を観測した。また、密度揺動の相関計測では、内部輸送障壁に電子サイクロトロン共鳴加熱を行った際、イオン温度分布の急峻な勾配が劣化する場合に密度揺動の長距離相関長が増加することを初めて明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2007 年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2008 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	11,700,000	3,510,000	15,210,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ閉じ込め、安定性、反射計、ELM、輸送障壁、径電場

1. 研究開始当初の背景

プラズマの閉じ込め性能改善に重要な輸送障壁の形成には、プラズマ中に形成される径電場分布構造とそれによる乱流の抑制が重要と考えられていた。また、改善閉じ込めモード（Hモード）プラズマ周辺部に形成される輸送障壁で観測される ELM (Edge Localized Mode) と呼ばれる周期的な崩壊現象の特性は、径電場構造と関係している可能性が指摘されていた。密度揺動と輸送の関係を理解し、プラズマ性能を更に向上するために重要なこれらの研究を進展させるためには、1cm 程度の空間分解能を持ち、数 100ms で径方向分布を評価できる径電場分布計測法の開発が

必要であった。

2. 研究の目的

本研究の遂行に必要な性能を持つ新しい径電場構造測定法の開発を行い、それを用いて輸送障壁や ELM 特性の研究を進展させることが本研究の目的である。具体的には、以下の 2 項目が本研究の目的である。

- (1) 2 台の高速掃引型の発振器を同期させつつ入射周波数を変化することが可能な、先進ドップラー反射計システムによる密度揺動の伝播速度分布計測法を確立する。
- (2) 反磁性ドリフトによるポロイダル方向の位相速度は径電場により生じる $E \times B$ ドリフ

トより遅いと考えられるため、測定された密度揺動の回転速度分布を基に径電場が評価できる。この径電場分布をもとに、輸送障壁やELM特性と径電場構造の関係を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、世界で初めて2台の同期シンセサイザを用いたドップラー反射計を考案し、電子密度揺動空間分布計測に必要な性能を持つことを確認した。

次に、JT-60Uにおける密度揺動計測に適用し、ドップラーシフトした電子密度揺動が観測できることを確認した。そして、プラズマ中の電磁波伝播と反射を光線追跡コードで評価し、密度揺動のドップラーシフトから径電場分布を評価する手法を確立した。プラズマ中の径電場分布と密接に結びついているプラズマのトロイダル回転を変化することにより径電場分布を動的に変化させ、ドップラー反射計で評価した径電場分布が対応することを確認した。

開発したドップラー反射計を周波数固定型の反射計と組み合わせることにより密度揺動相関の径方向分布が評価できることに着目し、当初の研究目的を発展させ、輸送障壁性能と密度揺動特性の関連性を相関型反射計により評価した。

4. 研究成果

(1) 先進ドップラー反射計の開発

入射周波数を時間的に階段状に変化させることでプラズマ中の密度揺動の回転速度分布や相関分布を計測するため、数GHzの帯域を1ms以下で掃引できる高速掃引型発振器が必要である。JT-60U装置に適用するドップラー反射計はQバンド(33-50GHz)の電磁波が必要であるが、市販されている電圧制御発振器にはQバンド全域をカバーしているものはない。そこで、Xバンド(8-12.5GHz)の電磁波を4乗倍器によりQバンドに変換することにした。増幅器を内蔵したアクティブ

マルチプライヤーを用いることで、周波数をQバンドに変換すると同時に、計測に必要な出力(+16dBm程度)を得ることができた。

4乗倍器の入力にあたるXバンド発振器の周波数安定性(位相ノイズ)は計測精度と直結しているため、位相同期回路(PLL)と電圧制御発振器を用いたPLLシンセサイザを開発した。周波数変更の指令から700 μ s以下で設定周波数にロックすることができ、設計目標を達成した。また、PLLの分周比のプログラムはRS-232C通信を用いて外部制御できるようになっており、測定対象のプラズマに最適な入射周波数ステップに遠隔で設定することも可能である。

密度揺動の回転方向を求めるためには、プラズマからの反射波をヘテロダイン検波する必要がある。1台の発振器からの電磁波を分岐し、アップコンバーターを用いて局部発振波(L0)を生成する手法もあるが、本研究では基準発振器を共通化した2台のシンセサイザを同期することでL0を作ることにした。独立した発振器を用意することにより、複数の増幅器を用いることなくQバンド帯のダブルバランストミキサの安定動作に必要なL0出力(+10dBm程度)を得ることができ、増幅器によるノイズを低減することができた。

図1に先進ドップラー反射計の概念図を示す。2台のシンセサイザ間には32MHzの周波数差があり、乗倍後の128MHzがシステムの中間周波数(IF)になっている。プラズマから反射してきた信号波と基準用の参照波それぞれのIF信号は、電気/光変換器により光信号に変換され、光ファイバでシールドルームに伝送され、クオドラチュア型位相検出器で検波される。検波された信号は最大20MHzのサンプリング速度を持ち、ハードディスクの容量まで連続的にデータを保存できるデジタイザで長時間計測される。

本計測システムを第8回国際反射計ワークショップで発表した結果、同期シンセサイザを用いた先進的なアイデアが高く評価された。

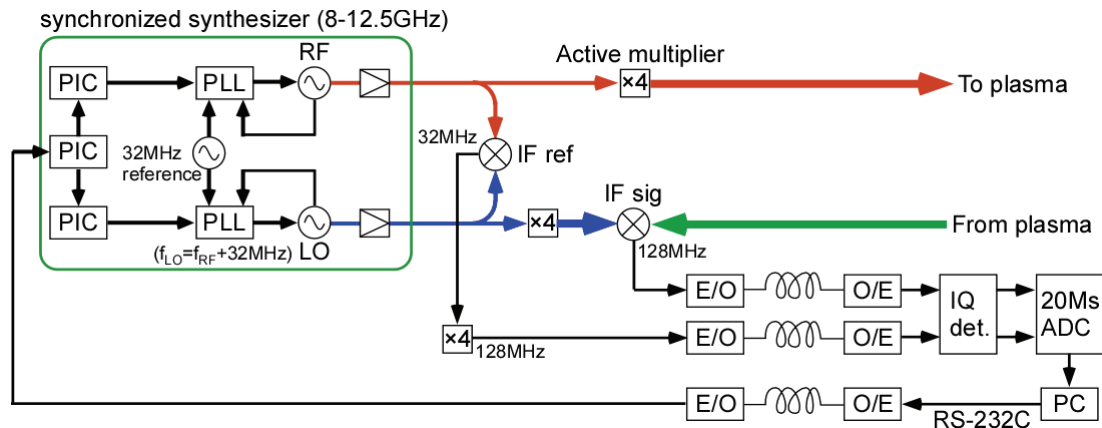


図1 先進ドップラー反射計の概念図

(2) 密度揺動計測と径電場構造の解析

プラズマの等密度面に対しわずかに斜めに電磁波が入射した場合、ブラッグ条件 ($k_r = -2k_0N$, k_r は密度揺動の波数, k_0 は真空中における入射波の波数, N は反射点における屈折率) を満たす散乱波のみが同じ軌跡をたどって受信用アンテナに到達する。これがドップラー反射計の原理である。実際に JT-60U 装置でドップラー反射計による密度揺動計測を行った際の配置と光線追跡の結果を図 2 に示す。入射波は赤線で示す軌跡にしたがってプラズマ中を伝播するため、散乱されない電磁波は反射層により反射され、アンテナには到達しない。反射層近傍で k_r という波数を持つ密度揺動に散乱された電磁波だけが青線に沿って受信用アンテナに戻っていく。このとき、ヘテロダイン検波された電磁波は密度揺動によるドップラーシフトを受ける。一般的にプラズマ中の密度揺動は磁力線に並行方向の波数 ($k_{||}$) よりも垂直方向の波数 (k_{\perp}) の方がかなり大きいいため、ドップラーシフト量は密度揺動が磁力線に垂直に回転する速度 (u_{\perp}) を用いて $2\pi f_D \sim u_{\perp} k_{\perp}$ で表すことができる。

実験的に観測されるのは密度揺動の周波数スペクトルであり、図 3 に示すようにガウシアン分布でフィッティングすることによりドップラーシフト周波数 (f_D) を決定する。図 2 に示すアンテナとプラズマの位置関係で計測を行った場合、電子反磁性ドリフト方向に回転する密度揺動は負の周波数として観測される。

実験的に求めた f_D と光線追跡とブラッグ条件から求めた k_{\perp} を用いて u_{\perp} が求まる。ここで反磁性ドリフトの位相速度が小さいと仮定すると、 u_{\perp} は主に $E \times B$ 回転速度で決まることになるので、反射点における全磁場 (B_{total}) を用いて $E_r = u_{\perp} B_{total}$ から径電場を評価することができる。

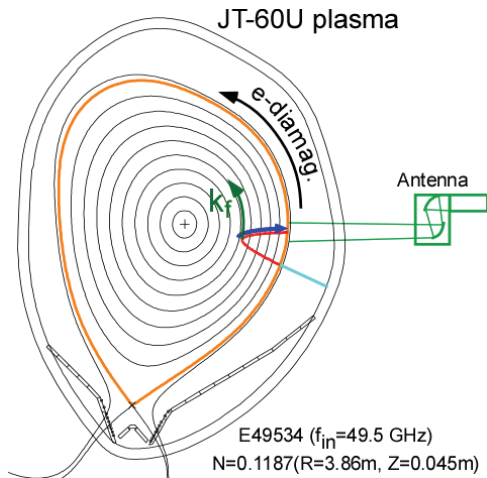


図 2 JT-60U におけるドップラー反射計計測の例。入射周波数 49.5GHz における光線追跡結果。

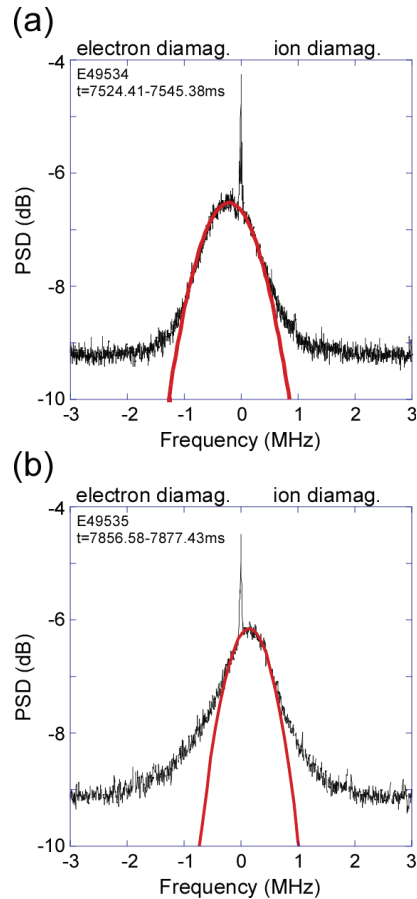


図 3 プラズマ電流と (a) 逆方向、(b) 同方向に回転するプラズマで観測された密度揺動の周波数スペクトル。

この手法による径電場評価法の妥当性を検証するため、プラズマ中の径電場分布と密接に結びついているプラズマのトロイダル回転を変化することにより径電場分布を動的に変化させ、密度揺動のドップラーシフトの方向を確認した。図 3 (a) に示すように、プラズマ電流と逆方向に回転しているプラズマでは、負のドップラーシフトが観測された。次に、トロイダル回転をプラズマ電流と同方向にすると、図 3 (b) に示すように正のドップラーシフトが観測された。このように、径電場の正負に応じて観測されるドップラーシフトの方向が変化することが確認できた。

時間的に入射周波数を掃引しているため、一連の周波数解析を各入射周波数に対して行うことにより径電場の空間分布を評価することが可能である。図 4 にプラズマのトロイダル回転速度分布と径電場分布の比較を示す。プラズマ電流と同方向に回転しているプラズマでは、炭素不純物イオンからの発光を用いた荷電交換再結合分光をもとに評価した径電場分布とよく一致しており、ドップラー反射計を用いた径電場分布計測手法を確立することができた。

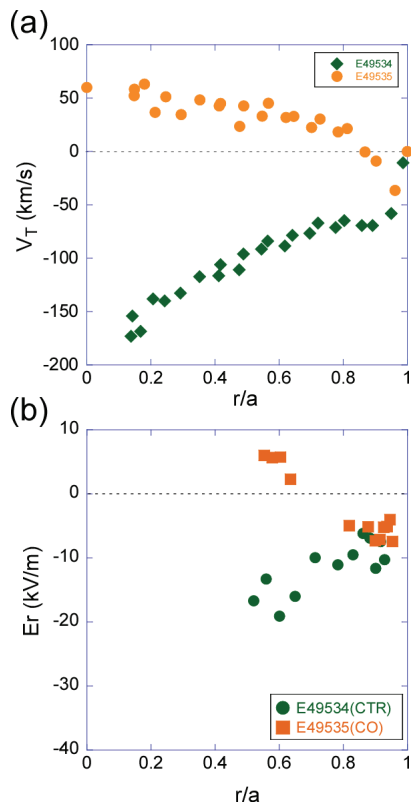


図4 (a)トロイダル回転速度分布。(b)ドップラー反射計で評価した径電場分布

(3) 相関型反射計による密度揺動計測

本研究で開発したドップラー反射計システムは、短時間で入射周波数を掃引できるとともに、その周波数ステップを自由に制御することができる特長を持っている。そこで、同時に使用することが可能な周波数固定型反射計の入射周波数近傍だけでドップラー反射計システムの周波数を掃引することにより、電子密度揺動の径方向相関の評価が可能であることに着目し、内部輸送障壁における密度揺動計測を行った。

実験結果の一例を図5に示す。電子サイクロトロン共鳴加熱をプラズマ中心部に行った際、内部輸送障壁が劣化する場合には、図5(a)に示すように10cm程度離れている2点でも密度揺動の相関が高くなることを初めて明らかにした。一方、内部輸送障壁が劣化しない場合は、図5(b)に示すように径方向相関に大きな変化は観測されない。これらの研究成果は、第22回IAEA核融合エネルギー会議で発表するとともに、Nuclear Fusion誌に掲載が決定している。(雑誌論文①)

密度揺動の径方向相関は、プラズマ中の輸送と密接に関連している乱流の特性を表している。本研究により径方向相関長を評価することが可能になったので、乱流スペクトルの変化でイオン熱輸送の増加が説明できる

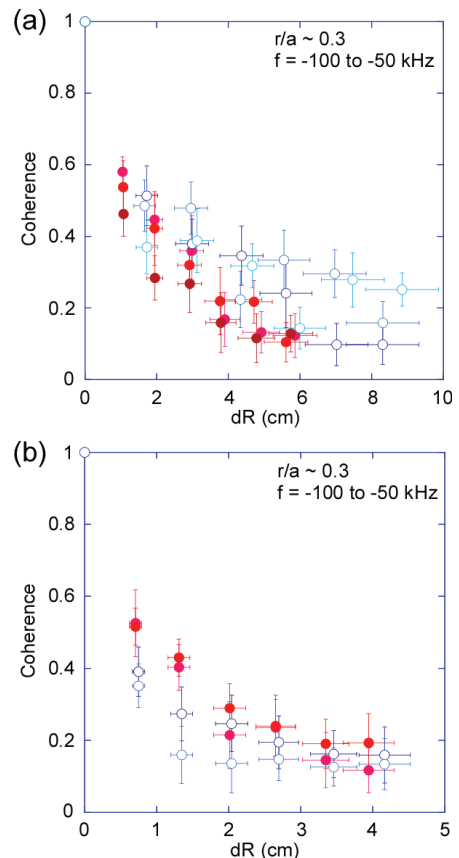


図5 内部輸送障壁が(a)劣化する場合、(b)変化しない場合、の電子密度揺動の径方向相関の比較。白抜き点が電子サイクロトロン共鳴加熱中。

かどうか、研究を進展させることが可能になった。

(4) プラズマ回転とプラズマ性能やELM特性の関係

(2)に示したように、プラズマのトロイダル回転を変化させるとプラズマの径電場を変化させることが可能である。一方、プラズマの径電場分布は、プラズマの輸送や閉じ込め性能と関連していることが示唆されている。そこで、プラズマのトロイダル回転とELM特性の関係を調べた結果、grassy ELMと呼ばれる振幅の小さなELMは、プラズマのトロイダル回転がプラズマ電流と逆方向に大きくなると周波数が高くなる(振幅が小さくなる)ことを明らかにした。(雑誌論文⑤③)また、トロイダル回転がプラズマ電流方向の時に電子温度分布に現れる内部輸送障壁の性能が向上することを発見し、プラズマ性能の向上に繋がった。(雑誌論文④)これらの研究成果が評価され、平成20年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞した。一連の研究をさらに進展させ、プラズマ周辺部の密度揺動を減少させることでプラズマ性能を向上させることに成功した。(雑誌論文②)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① H. Takenaga, N. Oyama, H. Urano, 他15名, Characteristics of Internal Transport Barrier under Reactor Relevant Condition in JT-60U Weak Shear Plasmas, Nuclear Fusion, 49, 075012 (11p), 2009, 査読有
- ② N. Oyama, A. Isayama, G. Matsunaga, 他7名, Long-pulse hybrid scenario development in JT-60U, Nuclear Fusion, 49, 065026 (10p), 2009, 査読有
- ③ N. Oyama, Progress and issues in understanding the physics of ELM dynamics, ELM mitigation, and ELM control, Journal of Physics: Conference Series, 123, 012002 (17p), 2008, 査読有
- ④ N. Oyama, A. Isayama, T. Suzuki, 他15名, Improved performance in long-pulse ELMy H-mode plasmas with internal transport barrier in JT-60U, Nuclear Fusion, 47, 689-697, 2007, 査読有
- ⑤ N. Oyama, Y. Kamada, A. Isayama, 他6名, ELM frequency dependence on toroidal rotation in the grassy ELM regime in JT-60U, Plasma Physics and Controlled Fusion, 49, 249-259, 2007, 査読有

[学会発表] (計3件)

- ① 大山直幸、JT-60Uにおけるドップラー反射計を用いた密度揺動計測、プラズマ・核融合学会 第25回年会、2008年12月3日、栃木県総合文化センター
- ② 大山直幸、ドップラー反射計の開発とJT-60Uにおける密度揺動計測、プラズマ・核融合学会 第24回年会、2007年11月29日、イーグレ姫路
- ③ N. Oyama, Doppler reflectometer system using synchronized broadband synthesizers for JT-60U, 8th International Reflectometer Workshop, 2007年5月4日, St.-Petersburg, Russia

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大山 直幸 (OYAMA NAOYUKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究副主幹

研究者番号：80354596