

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：63902

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630474

研究課題名(和文) 勾配および曲率を直読する計測器の開発と空間構造の時間発展の研究

研究課題名(英文) Development of gradient-curvature measurements and study of spatio-temporal structure

研究代表者

徳沢 季彦 (TOKUZAWA, TOKIHIKO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：90311208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：大型ヘリカル装置のプラズマを用いて、高温プラズマの電子温度や電子密度分布の勾配や曲率の時間変化を調べるための低出力ミリ波を用いた計測器を開発した。これら勾配や曲率の変化はプラズマの閉じ込めに影響を与えることが理論的に予見されているが、本計測器を用いて、実際に、これらパラメータの時間的な変動を明らかにした。また、従来から用いられている分布計測器と相互比較を行うことによって、計測器の性能を評価した。

研究成果の概要(英文)：We developed the diagnostics system for measuring the gradient and curvature of the electron temperature and the electron density profiles in high-temperature plasma. Because the gradient and curvature of the plasma are considered to affect the plasma confinement, this measurement is important for the the study of fusion plasma science. We performed the diagnostics in the large helical device (LHD) plasma and have successfully obtained the temporal behavior of these parameter. Comparing with the conventional diagnostics, the characteristics of this technique has been clarified.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：プラズマ計測 ミリ波 勾配 曲率 時空間構造

## 1. 研究開始当初の背景

高温高密度のプラズマを効率よく閉じ込め、核融合発電を実証し、人類の生活に貢献することが、本研究領域の共通するテーマであるが、プラズマの閉じ込めや輸送に関する理解はまだ完全ではない。特に、自発的に発生する乱流などによるプラズマ性能の劣化を検知し、制御抑制することが重要だと考えられているが、まだ、その物理機構の理解が不完全なため達成できていない。核融合プラズマの構造は何によって決まっているのか？という問いの答えが明確でないのである。例えば圧力分布がピークする凸型の構造を持てば、その勾配の強い領域にはこれを平坦化する方向への力が発生し、構造の変化をもたらすはずであるが、**H-mode** と呼ばれる閉じ込め性能のよいプラズマ状態では、この強い勾配をもつ構造が持続することが知られている。そして、この勾配が大きく変化する位置(すなわち変曲点)が時間的に移動していることなども分かっている。また、定常状態に見えるプラズマの内部で、構造の曲率が変動し、正と負の間を遷移している現象なども発見されている。

これらの現象がプラズマの閉じ込め性能にどのように影響を与えているのかを知るためには、その構造の変化を詳細に知る必要がある。そのため、これまで空間測定点を増やして詳細な空間構造を計測するという方向性で開発が行われてきたため、時間分解能が犠牲となり変動を調べるには十分ではない。また勾配やさらに曲率を計測結果から計算で求める場合、元々の計測誤差が蓄積され大きな誤差を生むことから、十分な精度で議論ができないという問題点がある。

研究代表者は、これまでミリ波を用いた反射法による電子密度分布計測を行ってきたが、この手法では、ミリ波の位相変化を計測する。実はこの位相変化量は勾配に依存するものであることに気がついた。つまり勾配は直接測れる(測れている)のである。

## 2. 研究の目的

上記した着想に基づき、核融合プラズマの電子密度および電子温度の空間分布の勾配及び曲率を直接計測するシステムを開発し、大型高温プラズマにおける実験を通して改良を加え、本計画の着想の原理実証を行うことを第一の目的とした。そして、本計測システムによって、プラズマの閉じ込めや輸送に大きな影響を与える勾配や曲率の詳細な時間的変動データを取得し、プラズマ性能に及ぼす空間構造の影響を解明することを目指した。

## 3. 研究の方法

空間分布の勾配と曲率を直接計測すると

いう新しい概念を導入したミリ波計測システムの原理実証を行うため、年度毎に開発のステップを踏んで行くように計画を立てた。

まず、初めに、計測システムを設計し、そのシステムを組み上げた後、テストベンチで動作・特性確認試験を行う。その際、信号レベルの最適化など必要な追加措置が発生するので、適切な処置を行う。そのご、大型ヘリカル装置で生成される高温プラズマ実験に適用することで、プラズマ実験環境における問題点を改善するとともに最適化を施し、原理実証を行う。

さらに、本計測システムを種々のプラズマ実験、特に、空間構造の変動が物理現象理解のカギとなるような実験(例えば、**H-mode** プラズマや **ITB** プラズマなど)に適用し、これまでにない詳細な勾配一曲率情報を基にした空間構造とプラズマ性能との相関に関する新しい知見を得、成果を上げる。

## 4. 研究成果

電子温度に関する勾配や曲率に比例した信号を得るための、計測器システムとして、電子サイクロトロン放射(**ECE**)ラジオメータ(プラズマの電子温度に比例した強度で放射される**ECE**波の周波数が、磁場に依存する特徴を活用し、**ECE**放射信号に周波数弁別をかけることにより、対応する磁場強度位置の電子温度情報(局所情報)を取得することができるというもの)の局発周波数に周波数掃引をかけることによって、直読するシステム(局発波周波数掃引型ヘテロダイナラジオメータ)を設計・製作した。ミリ波システムは、いわゆる**D-band**(110-160 GHz)と呼ばれる周波数帯で構築したが、これは大型ヘリカル装置の磁場強度に最適化している。放射強度がマイクロワットレベルの微弱な**ECE**波を高感度で検出するためヘテロダイナ検波方式を採用し、その局発波の周波数を周期**1ms**で掃引して周波数弁別するシステムとした。この周期を短くすると時間分解能は当然向上するのであるが、ミリ波検出器および電気回路の応答時定数の制限から、あまり短い時間で局発波周波数を変化させると、信号に歪が生じ、空間分解能が減少してしまうことが、テストベンチにおける開発試験で明らかとなったため、最適な値として、**1ms**とした。得られた信号は**ECE**放射強度の空間勾配に比例したものとなっているが、これを電子温度勾配に比例したものとするため、**YAG**レーザーを用いたトムソン散乱計測の結果を用いて校正をする手法を開発した。これにより、**1ms**毎という高時間分解能を持って電子温度勾配および曲率を知る手法を構築した。

次に、電子密度に関する勾配や曲率に比例した信号を得るための、計測器システムとして、ミリ波反射法(プラズマに入射したミリ波、これの周波数を掃引すると、周波数に対応し

た反射層からミリ波が戻ってくるので、この反射信号を受信することで、反射層の位置を知ることができるというもの)をW-band(75-110 GHz)で適用することとした(W-band FM-CW ミリ波反射計)。ここで、ミリ波の偏波は X-mode(異常波モード)とすることで大型ヘリカル装置プラズマの内部情報を取得するように設計した。プラズマへと入射するミリ波の周波数掃引されたプローブ波とプラズマへと入射していない参照波とを混合することで、ビート信号が得られる。このビート信号の周波数変化は、反射層までミリ波が伝搬した時間(遅れ時間)に比例するため、電子密度分布の勾配に比例した値となる。周波数掃引時間を短くした方が、これも時間分解能は向上するが、掃引速度が速すぎると回路の応答が間に合わないため、0.1msの掃引時間とし、この時間で応答できるような増幅器などを開発した。また、この高速な周波数掃引は半導体発振器の動作電圧信号を変動させることで実現させる。密度勾配に比例した信号を得るためには、発振周波数を線形に変化させる必要がある。そのための特性確認試験をテストベンチで実施した後、大型ヘリカル装置に適用した。なお、勾配の直読化のためには、ビート信号の周波数を出力する必要があるため、実時間で周波数解析処理を行うためのFPGA(field-programmable gate array)を利用したデジタル信号処理回路の導入も行った。

大型ヘリカル装置プラズマを対象とした実証試験の結果について以下に記す。

電子温度勾配計測に関しては、まずDC信号が得られた。DC信号は電子温度に比例するECE放射を観測できていることを示し、プラズマ加熱を行った際に、これに追従した時間変化が得られている。ある時間で校正を施した信号は、他の時間においても他の計測結果(トムソン散乱計測)のものと合致しており、本計測手法の実証に成功した。そして、プラズマの追加熱実験やコールドパルス伝搬実験など、動的に熱輸送を調べる実験において、ECE放射スペクトルの空間変化すなわち構造の変化を観測することに成功しており、プラズマ物理、特に非定常な速い応答を調べる上で、本計測手法が有用であることを明らかにした。

電子密度勾配計測に関しては、当初、信号が弱く信号/雑音比が十分ではないことが明らかになったため、伝送経路での損失の改善やアンプの増強などを施した。これにより、燃料水素ペレット入射に伴う高密度プラズマの生成に伴う構造変化のデータを取得することに成功した。しかし、勾配の直読化を行うためにはビート信号の周波数が一つである必要があるが、多重反射の影響で複数周波数が発生してしまうことが明らかとなった。この問題に対応するためには、真の信号との強度差あるいは予測される周波数の推定値を用いて、弁別する方法が考えられる。

また更に約3倍の信号強度が得られる受信光学系を新たに設計・製作し、特性試験を行ったので、今後これを適用することを計画している。

報告書作成現在、上記改良を施した計測システムを、今年度2月から開始した大型ヘリカル装置でのプラズマ計測実験に供して、統計的な信号処理を施すため、現在データの蓄積を行っている。途中経過としては、電子温度勾配計測では、定常的に信号処理が可能な強度の信号が得られおり、プラズマ物理現象を明らかにするための実験解析を進めている。電子密度勾配計測ではH-mode放電などでの応答を調べており、これら両者の計測結果を合わせて、閉じ込め特性との相関について整理した後、成果発表を行うよう準備を進めている所である。

## 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 4件)

- ① T. Tokuzawa, "Turbulence in edge and core transport barriers: new experimental results and modeling", Nuclear Fusion, 査読有, Vol.57, (2017) pp.025001-1-11. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/57/2/025001>
- ② T. Tokuzawa, Y. Takemura, K.W. Watanabe, S. Sakakibara, Y. Narushima, H. Tsuchiya, Y. Nagayama, S. Inagaki, K. Ida, M. Yoshinuma, K. Tanaka, Y. Suzuki, I. Yamada, and the LHD Experiment Group "Distorted magnetic island formation during slowing down to mode locking in helical plasmas" Nuclear Fusion, 査読有, Vol.57 (2017) pp.076003-1-6 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6d26>
- ③ Y. Kogi, T. Higashi, N. Tamura, H. Tsuchiya, D. Kuwahara, Y. Nagayama, A. Mase, K. Takehara and T. Tokuzawa "Observation of electron temperature turbulence with a correlation electron cyclotron emission radiometer on LHD" Journal of Instrumentation, 査読有, Vol. 11, 2016 pp.C01072 <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/11/01/C01072>
- ④ R. Soga, T. Tokuzawa, K.Y. Watanabe, K. Tanaka, I. Yamada, S. Inagaki and N. Kasuya

“Developments of frequency comb microwave reflectometer for the interchange mode observations in LHD plasma”

Journal of Instrumentation, 査読有、  
Vol. 11, February 2016 pp.C02009  
<http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/11/02/C02009>

[学会発表] (計 12 件)

- ① T. Tokuzawa, S. Inagaki, N. Tamura, R. Sakamoto, K. Ida, H. Tsuchiya, A. Ejiri, H. Yamada, K. Y. Watanabe, K. Tanaka, T. Akiyama, and I. Yamada  
7th Asia-Pacific Transport Working Group (APTWG) International Conference @June 5 – 8, 2017 @ Nagoya Univ., Nagoya, Japan (愛知県・名古屋市)  
“Observation of poloidal flow structure” D-O2
- ② T. Tokuzawa, K. Y. Watanabe, S. Inagaki, A. Ejiri, R. Imazawa, N. Oyama, K. Tanaka, K. Ida, H. Tsuchiya and I. Yamada  
13th International Reflectometry Workshop, May 10<sup>th</sup> – 12<sup>th</sup>, 2017 @NFRI HQ, Daejeon, Korea  
“Progress of Frequency Comb Doppler Reflectometer System in LHD and Feasibility Study of Doppler Reflectometer for JT-60SA”
- ③ 徳沢季彦, 武村勇輝, 渡邊清政, 居田克巳, 吉沼幹朗, 榊原悟, 成嶋吉朗, 土屋隼人, 長山好夫, LHD 実験グループ  
第 33 回 プラズマ・核融合学会 年会 @2016.11.29-12.2 東北大学青葉山キャンパス (宮城県・仙台市)  
「LHD におけるロックドモード様不安定性発現時のプラズマ回転速度変化の観測」01aP39
- ④ T. Tokuzawa, Y. Takemura, K.W. Watanabe, S. Sakakibara, Y. Narushima, H. Tsuchiya, Y. Nagayama, S. Inagaki, K. Ida, M. Yoshinuma, K. Tanaka, Y. Suzuki, I. Yamada, and LHD Experiment Group  
26th IAEA Fusion Energy Conference @ Kyoto, Japan 17–22 October 2016  
“Magnetic island formation in locked-like mode in helical plasmas” EX/P8-9
- ⑤ T. Tokuzawa, Y. Takemura, K.W. Watanabe, S. Inagaki, K. Ida, M. Yoshinuma, S. Sakakibara, Y. Narushima, H. Tsuchiya, Y. Nagayama, K. Tanaka, I. Yamada, and LHD Experiment Group  
18th International Congress on Plasma Physics (ICPP 2016) June 27 – July 1, 2016 @Kaohsiung, Taiwan  
“Observation of oscillation of poloidal rotation velocity in LHD” PPM1-14
- ⑥ 徳沢季彦  
RIAM フォーラム 2016 2016 年 6 月 2 日 @九州大学筑紫地区 共通管理棟 3F 大会議室 (福岡県・春日市)  
「マイクロ波計測器から得られる大規模データを用いた乱流プラズマの特性抽出法の開発」招待講演
- ⑦ 竹原啓太, 徳沢季彦, 渡邊清政, LHD 実験グループ  
日本物理学会 第 71 回年次大会 2016 年 3 月 19 日 (土) ~22 日 (火) 東北学院大学 泉キャンパス (宮城県・仙台市)  
「高空間分解 ECE 計測のための LHD 真空容器内に設置する金属レンズアンテナの開発」
- ⑧ 徳沢季彦, 曾我良太, 竹原啓太, 稲垣滋, 小波蔵純子, 吉川正志, 居田克巳, 渡邊清政, 武村勇輝, 土屋隼人, LHD 実験グループ  
日本物理学会 第 71 回年次大会 2016 年 3 月 19 日 (土) ~22 日 (火) 東北学院大学 泉キャンパス (宮城県・仙台市)  
「磁場閉じ込めプラズマの周辺部ポロイダル速度の時空間構造変化の観測」20pAE6
- ⑨ 徳沢季彦, 成嶋吉朗, 武村勇輝, 居田克巳, 吉沼幹朗, 稲垣滋, LHD 実験グループ  
プラズマ・核融合学会・第 32 回年会 @名古屋大学 (愛知県・名古屋市) 11 月 24-27 日, 2015  
「LHD プラズマ周辺部における low-n モードを伴うポロイダル回転速度計測」25aE11P
- ⑩ 曾我良太, 徳沢季彦, 渡邊清政, 榊原悟, 田中謙治, 山田一博, 稲垣滋, LHD 実験グループ  
プラズマ・核融合学会・第 32 回年会 @名古屋大学 (愛知県・名古屋市) 11 月 24-27 日, 2015  
「改良したマイクロ波コム反射計を用いた LHD プラズマにおける交換型不安定性の構造観測」
- ⑪ 曾我良太, 徳沢季彦, 渡邊清政, LHD 研究グループ  
日本物理学会 第 70 回年次大会 2015/3/21-24 @ 早稲田大学 早稲田キャンパス (東京都・新宿区)  
「LHD プラズマにおける交換型不安定性の観測とその構造に関する研究」23pCM-3
- ⑫ T. Tokuzawa, S. Inagaki, A. Ejiri, R. Soga, I. Yamada, S. Kubo, M. Yoshinuma, K. Ida, C. Suzuki, K. Tanaka, T. Akiyama, N. Kasuya, K. Itoh, K. Watanabe, H. Yamada, K.

Kawahata, and LHD EXPERIMENT  
GROUP  
Plasma Conference 2014 in Tokimesse,  
Niigata (新潟県・新潟市) @Nov. 18-21,  
2014  
“Multi-point Measurements for Study  
of Plasma Turbulence in the LHD”

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

徳沢 季彦 (TOKUZAWA, Tokihiko)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授  
研究者番号：90311208

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

近木 祐一郎 (KOGI, Yuichiro)  
福岡工業大学・工学部・教授  
研究者番号：10398109

清水 昭博 (SHIMIZU, Akihiro)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：00390633

(4) 研究協力者

なし