

平成 21 年 5 月 13 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007-2008

課題番号：19560830

研究課題名（和文）反射計を用いた Thomson 散乱計測装置による密度計測のための絶対較正方法の開発

研究課題名（英文）Development of Absolute Density Calibration for Thomson Scattering measurement by Micro Wave Reflectometry

研究代表者 南 貴司 (Takashi Minami)

核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教

研究者番号 40260046

研究成果の概要：

トムソン散乱計測法は核融合のための高温プラズマの基本的な計測である。この計測はプラズマの物理的特性を特徴付ける基本的なパラメータ、電子温度と電子密度のプラズマ内部の分布を計測できるという点で重要である。本研究は、このトムソン散乱計測のために必用や密度較正のために従来とは異なるマイクロ波反射計を用いた方法を開発した。この方法はプラズマ実験を行いながら同時に較正できるという利点がある。同時にベイズ推定法を用いた解析法の開発も行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	102,000	4,420,000

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：トムソン散乱計測装置、絶対密度較正、マイクロ波反射計、ベイズ推定法

1. 研究開始当初の背景

トムソン散乱計測装置は磁場閉じ込め核融合装置にとって必要不可欠な電子密度分布及び電子温度分布の情報を得られる基本的な計測装置である。トムソン散乱による電子密度計測ためには、密度の絶対値を較正はかせない。

従来行われてきたガス散乱法は、確立された較正手法であるがプラズマ容器に大気圧レベルまでガスを充填する必用があるため実験中は較正を行うことができないという欠点がある。なぜなら、実際トムソン散乱計測

装置を運用するにあたっては、様々な要因により較正值が徐々に変化し実験中であっても密度較正が必要となる場合があるからである。

しかし、プラズマ実験を行いながら密度較正を行うために、これまでのところ確立した手法はないのが現状である。したがってプラズマ実験と併行して実施可能な新しい較正方法を探求することは重要な研究課題である。この研究課題は国内、国際含めて、まだ深く研究が行われている状況ではなく、プラズマ実験を行いながら密度較正する手法は未だ

確立されるに至っていない。したがって重要な研究課題であり、その成果は高温プラズマ輸送の現象の基盤となる密度と温度に関する情報が得られるトムソン散乱計測技術の発展に大きく寄与することが期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的はマイクロ波反射計を用いてトムソン散乱計の密度の絶対較正を行う、つまり *in situ* な絶対密度較正の手法を開発することである。

トムソン散乱計測による電子温度計測の場合、測定するのはトムソン散乱光のスペクトルであるので正確な電子温度をえるためには、散乱光が、その一部でも分光器に到達すれば電子温度を求めることができる。これに対して電子密度計測は総散乱光量を測定するため、レーザービームパスのずれ、レーザーのビームプロファイル、集光系のミスアライメント、分光器の特性、検出器の感度など変化が大きな測定精度劣化の大きな原因となる。そこで反射計を用いてプラズマ実験を行いながらトムソン散乱の密度較正を行う手法を開発する。

反射計による密度較正はトムソン散乱計測による密度計測と反射計による密度計測を同時にプラズマ中の同地点に対して行うことによって行う。(Fig.1 参照)トムソン散乱の較正值 C^T は全スペクトル散乱光の計測値 S と電子密度 n_e の間に $S=C^T n_e$ の関係があるので、反射計によって密度 n_e を計測すれば較正值を求めることが可能である。

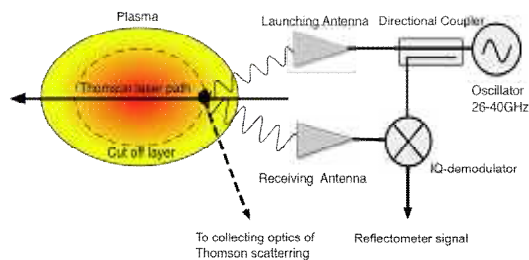


FIG. 1. (Color online) Conceptual diagram of Thomson density calibration by microwave reflectometry.

マイクロ波反射計は遠赤外電磁波やマイクロ波を使った干渉計による密度計測に比べて磁場構造を仮定することなしに密度の絶対値を測定することができるという特徴がある。一方、測定誤差は干渉計に比べて大きい。しかし、トムソン散乱計測装置の較正のために用いた場合、測定データを積算することによって較正值の測定誤差を減らすことができる。本研究では、新しくベイズ推定を用いたデータ解析手法を開発し、より少ないデータ積算数で十分な較正值の測定精度が

得ることが可能になることを目指した。

3. 研究の方法

(1) 反射計の仕様の検討と設計

較正対象のトムソン散乱装置は核融合科学研究所のLHD Nd:YAG Thomson散乱計測装置をターゲットに検討を行った。較正用の反射計なのでトムソン散乱計測装置のレーザービームパスの近くに取り付けられていることが望ましい。離れた場所に設置されている反射計に対しては、プラズマの値(圧力)に依存する磁気面形状の仮定をしなければ同位置における測定値の比較ができない

設計に留意したことはLHD Nd:YAG Thomson散乱計測装置に取り付け可能な構造をもつこと。その場合、本来のThomson散乱計測装置の測定性能を阻害しない構造をもつこと。LHDの実験パラメータ,生成プラズマ密度領域に対して較正データ取得に最適な入射波の発振周波数をもつ反射計であることである。

(2) ベイズ推定法を用いた解析手法の開発

反射計の検討と同時に解析手法の開発を行った。反射計の測定に含まれる誤差を効率的に低減するために、ベイズ推定法に基づいた解析について検討を行った。ベイズ推定法は従来の確率的な手法とは異なり、あらかじめ確率分布がわかっていなくても、事象が起こる確率分布を求めることが可能である。単純な平均に比べて少ないデータ取得数で十分な較正值が得られることを目標とした。

(3) 密度較正のための反射計の製作と性能評価

反射計による密度較正法の原理実証のためにLHD装置のトムソン散乱計測装置のための反射計の製作を行った。LHD装置にとりつけるための架台の設計製作し設置を行った。反射計がトムソン散乱計測装置の設置スペースに取り付け可能なように架台は真空ゲートバルブに直接設置可能な形式とした。FM型反射計の組み立てを行い反射計の性能を確認するために反射板をターゲットとして用いてテストを行った。その結果ターゲットの位置に相当した信号をえることができ反射計として基本性能を有することを確認した。

4. 研究成果

(1) マイクロ波反射計を使った密度較正
マイクロ波反射計には様々な方式が存在するが最も単純なFM型反射計はコンパクトに装置

全体を構成することができるのでLHD装置のトムソン散乱計測装置にも十分取り付け可能である。Figure 1. に示したようにFM型反射計は発振器、二つのアンテナ、ミキサ、検出器、方向性結合器、導波管、データ取得装置からなる。

FM型反射計はプラズマ中のカットオフ層からの反射波を計測する。従って反射計から計測できるのはカットオフ層の位置である。カットオフ層から反射されてきた波と入射した波の位相差を測定することにより以下の式を使ってカットオフ層の位置 r_c を求めることができる。

$$r_c(\omega) = a - \frac{c}{\pi} \int_0^\omega \frac{d\phi}{d\omega' (\omega^2 - \omega'^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

ここで ω は入射波の周波数、 c は光速、 a は最外殻磁気面の位置である。

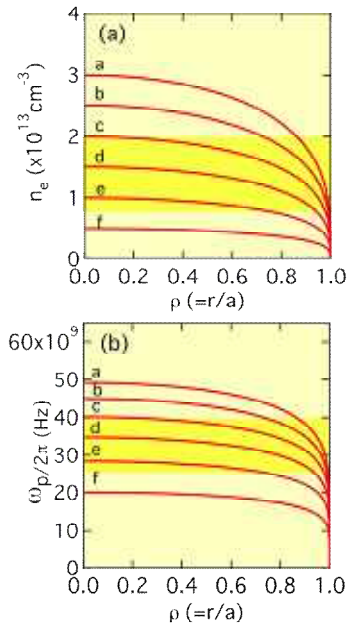


FIG. 2. (Color online) Estimation of the plasma frequency profiles (b) with corresponding density profiles (a). The profile shape is assumed as the typical LHD one. The central electron density $n_e(0)$ is swept from 0.5×10^{13} to $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (a) at intervals of $0.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. The yellow zone shows the frequency range from 26 to 40 GHz, and the corresponding cutoff density.

Figure 2は典型的なLHDプラズマに対する、カットオフ周波数の計算結果である。密度分布はFig.2(a)のようなパラボリック分布を仮定した。中心密度の値を $0.5 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ から $3 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ まで変えて値をプロットした。その結果LHD装置に適用する場合入射波の周波数を26GHzから40GHzの間で掃引すれば較正可能となった。このときプラズマの密度揺動を避けるために10-20 μ 秒の速さで掃引することが必要になる。

カットオフ層の正確な位置を求めるには0-26GHzまでの位相差のデータが必要になる。そのために、まず $3 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ プラズマを使ってプラズマ周辺部の較正を行う。このとき、0-26GHzの(1)式の被積分関数の値は0とみなす

ことができるので、0-26GHzまでの位相差のデータは必要ない。この後に密度を $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度まで下げて較正を行う。このとき周辺部は較正できているので、トムソンのデータを使って0-26GHzまでの位相差のデータを見積もることが可能である。

プラズマ中心部までのトムソン散乱計測装置のチャンネルを較正するためには反射計は密度勾配が負の領域は測定できないため、ピークした分布をもつプラズマを生成する必要がある。これまでのLHD装置の密度計測結果を検討するとLHDプラズマの磁気軸が内側に寄った磁場配位で実験することによって、プラズマ分布をピークさせることが可能であると考えられる。

以上の検討を行った結果、反射計として、もっとも簡単な構造をもったFM反射計で十分なトムソン散乱計測装置の較正が行えることがわかった。

(2) ベイズ推定法を用いた密度較正のための解析法

ベイズ推定法の基本方程式は以下の式で表される。

$$P(x|d) = \frac{P(d|x)P(x)}{P(d)}, \quad (2)$$

ここで $P(x)$ は事前確率、 $P(x|d)$ は事後確率、 $P(d|x)$ は現象 d が起こったときに x が起こる条件確率、 $P(d)$ は尤度と呼ばれる規格化因子で以下のように定義される。

$$P(d) = \int_{-\infty}^{\infty} P(d|x)P(x)dx. \quad (3)$$

ここで、トムソン散乱の較正を行う目的に適用するために $p(x)$ はガウス型の確率分布であると仮定する。較正係数が x である確率分布は以下の式で与えられる。

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}w_{\text{prior}}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x - C_{\text{prior}}^f}{w_{\text{prior}}}\right)^2\right\}, \quad (4)$$

ここで C_{prior}^f は一回の反射計による計測を行う前の較正值の値で w_{prior} は、その誤差である。 C_{prior}^f 、および w_{prior} の初期値は従来のガス散乱法によって求めても良いし、何らかの見積もりであってもよい。この値は反射計計測によって、より正しい値に変更される。反射計に計測による較正值は以下の式より求めることができる。

$$d = \frac{n_e^{\text{ref}}}{S}, \quad (5)$$

ここで n_e^{ref} は反射計計測によって求められた密度であり S はトムソン散乱光の絶対量である。同様に誤差 w_d も以下の式よりもとめる事ができる。

$$w_d = \left| \frac{\partial n_e^{\text{ref}}}{S} \right| + \left| \frac{n_e^{\text{ref}} \partial S}{S^2} \right|, \quad (6)$$

ここで n_e^{ref} , S はそれぞれの測定誤差を表す。

条件確率 $P(d|x)$ もガウス型確率分布であると仮定すると以下の式で表すことができる。

$$P(d|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}w_d} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-d}{w_d}\right)^2\right\}. \quad (7)$$

以上の式により事後確率をもとめることができるので、次式を用いることにより反射計の計測一回行った場合の密度の較正値の改善値及び、その誤差をもとめることができる。

$$C_{\text{posterior}}^T = \int_0^{\infty} xP(x|d)dx, \quad (8)$$

$$w_{\text{posterior}} = \sqrt{\int_0^{\infty} x^2P(x|d)dx - (C_{\text{posterior}}^T)^2}. \quad (9)$$

この手順により反射計による計測を行うことによって較正値は計測前の値より、より真値に近づく。従って、前の事後確率を新しい事前確率として使うことによって、さらに反射計の計測を繰り返せば、その度に逐次的により真値に近い較正値を求めていくことが可能である。また、反射計の計測頻度より十分遅い時間スケールで較正値は変化していくと考えられるので、プラズマ実験を行いながら得られる常に精度の高い較正値を使ってトムソン散乱計測の解析を行うことが可能になる。

この手法の効果を確かめるためにモンテカルロ法の手法を用いてシミュレーションを行った。Figure 3 はシミュレーションの結果である。まず反射計の計測結果を乱数によって生成した。ワーストケースを仮定して反射計による計測データが大きく散乱した場合を想定している。この場合較正値の真値は 12 であると仮定している。

Fig 3(b) は横軸が反射計計測を行った回数で縦軸が、そのときの求められた較正値の値である。赤丸がベイズ推定法を用いた場合を表しており、20 回程度の計測で、ほぼ真値に近い値 12.1 ± 1 が得られている。Fig. 3(c)、は得られた較正値の誤差の大きさを示している。反射計による計測を繰り返すことによって誤差は急速に減少し得られた値は真値に近づく。しかも一度真値に到達すると、その後は値が真値の近くで安定する傾向があり突然大きな誤差を含む反射計のデータがあっても較正値の値が真値から離れることはない。

比較のために Fig.3(b) に青 で単純に反射計の計測値を平均した場合の得られた較正値を

しめした。単純平均法では徐々に真値に近づいていき十分な精度の較正値が得られるまでに 50 回程度の計測が必用なことを示している。

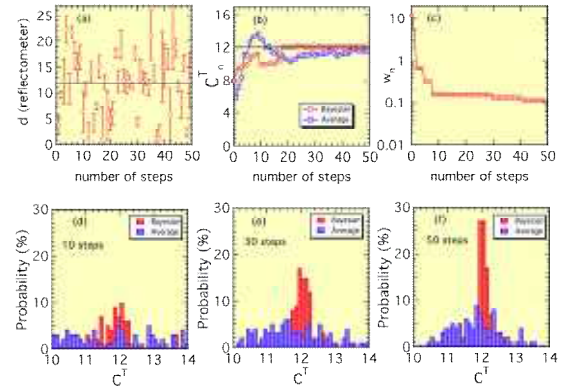


FIG. 3. (Color online) Monte Carlo simulation of Thomson density calibration by microwave reflectometry. (a) Simulation of estimated calibration factors of simultaneous measurement of the reflectometer and the Thomson scattering from the random function based on the Gaussian distribution. (b) Estimated calibration factors C^T (red) from the calibration factors of all using Eq. (8) after a step. Calibration factors that are derived from the average method (blue) are also shown in the same graph. (c) Standard deviation (w , error bar) of C^T . (d) Probability histogram of simulated calibration factor (red) after ten steps. Simulations to repeat 10 times. Probability histogram using average method is also shown (blue). (e) Probability histogram after 30 steps. (f) Probability histogram after 50 steps.

以上の結果は乱数によって生成した反射計の計測値の値に依存している。そこで、この影響を評価するために同様の計算を 100 回繰り返し、10 回目での値、30 回目での 50 回目での値をそれぞれヒストグラムによって Fig.3(d)(e)(f)に示した。ベイズ推定法を用いた場合 (赤) 10 回の反射計による計測だけでも、50%以上の場合において真値に比べて 5%以内の誤差を含むだけの値が得られており 50 回の計測を繰り返した場合は 85%以上の場合において 2%以内の誤差に収まっている。一方単純な平均法を用いた場合 (青) は 2%以内の誤差に収まった場合は 25%以下の場合しかない。

以上の結果より、ベイズ推定法を用いれば、反射計による密度計測のデータに大きな誤差が含まれていても、トムソン散乱計測装置の較正は可能であることがわかった。

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2件)

(1) Takashi Minami, et.al. "Proposal of *in situ* density calibration for Thomson scattering measurement by microwave reflectometry", Review of science instruments, 査読有、79 (2008) 10F110-1-4

(2) Takashi Minami, et.al. "Characteristics of high density edge transport barrier with reheat mode on CHS", Journal of Physics: Conference Series 査読有、123 (2008), 012006-1-6

〔学会発表〕(計7件)

(1) Takashi Minami, "Development of in-situ Density Calibration for Thomson Scattering Measurement by Microwave Reflectometry on LHD", 18th International Toki Conference, 2008.12.4, 土岐市(岐阜)

(2) 南 貴司, "Thomson 散乱計測の密度較正のための反射計計測", 第23回プラズマ核融合学会年会, 2008.12.4, 宇都宮(栃木)

(3) Takashi Minami, "Simultaneous Realization of High Density Edge Transport Barrier and Improved L-mode on CHS", 22nd IAEA Fusion Energy Conference", 2008.10.14, ジュネーブ(スイス)

(4) Takashi Minami, "Proposal of in situ density calibration for Thomson scattering measurement by microwave reflectometry", 17th International High Temperature Plasma Diagnostics Conference, 2008.5.14, アルバカーキ(アメリカ)

(5) 南 貴司, "Thomson 散乱計測装置によるプラズマ密度計測のための反射計を用いた絶対較正方法の提案", 第63回日本物理学会, 2008.3.26, 近畿大学(大阪)

(6) 南 貴司, "Power Threshold for L-H Transition of High Density Edge Transport Barrier with Reheat Mode on CHS", 11th IAEA Technical Meeting on H-mode Physics and Transport Barriers, 2007.9.26, つくば国際会議場(茨城)

(7) 南 貴司, "Proposal of *in situ* Density Calibration for Thomson Scattering Measurement by Microwave Reflectometry", 13th International symposium on laser-aided plasma diagnostic, 2007.9.19, ひだホテルプラザ(岐阜)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

南 貴司 (Takashi Minami)

核融合科学研究所大型ヘリカル研究部・助教
研究者番号 40260046