

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：82110  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23760819  
 研究課題名（和文） 燃焼プラズマでのトムソン散乱計測システムに応用できるその場相対較正法の実証  
 研究課題名（英文） Demonstration of an in-situ relative calibration method of Thomson scattering diagnostics for burning plasmas.  
 研究代表者  
 東條 寛（TOJO HIROSHI）  
 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・任期付研究員  
 研究者番号：80549212

### 研究成果の概要（和文）：

プラズマ中の電子温度、密度を計測するトムソン散乱計測で、使用する光学部品に波長依存性を含んだ透過率（効率）変化が起きたとしても、透過率が未知のまま電子温度を計測できる手法の有効性を実験にて世界で初めて示した。相対的な透過率も、実験装置周辺にて直接較正せずに求められることも明らかにした。当初の研究目的に加え、シミュレーションによる計測精度評価をすることで、厳しい放射線環境を有する燃焼プラズマ装置においても広いパラメータ領域で本手法が有用であることを示した。

### 研究成果の概要（英文）：

Thomson scattering diagnostics provide electron temperature and density in the plasma. It is found that electron temperature can be measured even if changes in transmissivities (efficiencies) of the optical components are unknown. The relative transmissivities are also obtained using the electron temperature without any direct calibrations. In addition to the initial aims of this study, simulations of the measurement accuracy clarify that this method is effective even in severe radiation circumstances generated by burning plasma experiments.

### 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	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：プラズマ計測

#### 1. 研究開始当初の背景

ITER や国内のサテライトトカマク装置 JT-60SA が建設期に入り、高い放射線強度（中性子、 $\alpha$ 線）に耐えうる燃焼プラズマ計測手法の開発研究に対する需要は高まっている。そのような装置では、実験期間中装置本体に近づくことはできず、遠隔操作による較正等のメンテナンスが必須である。プラズマ中の電子温度・密度を計測するにはトムソン散乱計測が広く用いられている。計測レーザーを入射し、プラズマ中に生じるトムソン散乱光

を計測するために集光光学系が必要になる。しかし使用するレンズ、ミラー、光ファイバーの透過率は実験後だけでなく実験中においても中性子、 $\alpha$ 線の照射量、環境温度に応じて変化することが照射試験により明らかになってきた。また、耐放射線性素材の光学部品を使用した場合でも、短波長領域（700 nm 以下）の透過率変化は無視できない場合が多く、電子温度の誤評価を招く重大な懸念事項となっている。プラズマの電子温度を高精度で計測することは、性能評価のためだけにな

く、プラズマの加熱実験の検証やプラズマ制御、不安定性に関する研究にも使用され、不可欠である。よって、上記の問題点を解決できる新たな手法が求められていた。

研究代表者は散乱光スペクトルの散乱角依存性に注目することで、上記の透過率変化にとらわれない電子温度の同定と透過率の波長依存性を補正する相対校正の手法を以下のように新たに考案した。計測レーザーをプラズマに入射した後ミラーで反射させ、もう一度プラズマ中に同じ光路で入射させるダブルパス散乱システムを採用し、合計2回の散乱光スペクトルを分光器（ポリクロメータ）で分離して計測する。集光光学系から見た散乱角は1回目（第一パス）を $\theta_1$ とすると2回目（第二パス）は $\theta_2 = \dots$ となり、散乱光のスペクトル波形はそれぞれ異なり、分光チャンネルでの信号量比は電子温度にのみ依存する。この性質を利用し、2つの独立な測定で電子温度を決定でき、決定した電子温度と散乱角から決まるスペクトル波形と計測したスペクトルを比較することで（相対的な）透過率を未知数として求めることが可能となる。

また、上述のようにこの手法で利用する信号比は、散乱光スペクトルの形状に依存する事から、電子温度の精度は電子温度自体や散乱角に大きく依存する。本手法の真の目的である燃焼プラズマ実験での実証のために、それらのパラメータが精度に与える影響を理論的に検証することも重要な課題である。特に高性能なプラズマ装置では電子温度が1 keVを超えるような計測が要求される。また、計測精度に影響のある散乱角は、装置のジオメトリによることから、本手法が有効となる限界値を調べる必要がある。更に、電磁波による加熱を伴う実験や、プラズマ中の磁場の非対称性が強い特殊な場合、電子温度の磁場方向に対する非等方性を生じ易い。その場合、電子温度の等方性を仮定している本手法が有効でなくなる。この問題点を解決することも必要となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、前項に示した手法を原理的に実証するための実験だけでなく、将来、放射線環境が厳しい高性能プラズマ装置での実証を行うことを想定したシミュレーションによる精度評価を行うことを目的として追加した。具体的には以下の項目を明らかにする。

- ・トムソン散乱計測を備えた実験装置にて、ダブルパス散乱計測を行い、通常的手法で計測された電子温度と本手法で計測した電子温度（校正された光学系の透過率情報は用いない）がどの程度一致するかを評価する。
- ・本手法により求めた相対透過率が、装置周

辺で標準光源を用いて直接校正されている相対透過率と一致していることを確認する。

- ・本手法の精度の散乱角や電子温度に対する依存性を実験で評価する。

- ・高性能なプラズマ（高電子温度）を想定したシミュレーションを行い、精度の電子温度や散乱角依存性について評価する。

- ・電子温度に非等方性が存在する場合を想定したシミュレーションを行い、本手法が有効となるパラメータ領域を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) 実証実験

原理的な実証実験は、東京大学柏キャンパスにあるTST-2球状トカマク装置にて行った。YAGレーザー（1.6 J）を図1のように赤道面上トロイダル接線方向に入射させ、出射後にミラーを設置することで反射させ、ダブルパス散乱システムとした。分光器は分光チャンネル数が合計6のポリクロメータを使用し、プラズマ中心付近（大半径  $R \sim 0.38$  m）の空間一点のみの計測を行った。分光器の検出器はAPD(Avalanche Photo Diode)と信号増幅器の時間応答が十分早い（10 ns）ものを使用しているため、往復するレーザーによる2回の散乱光を分離して計測することができる。散乱角は $\theta_1 = 124.3^\circ$ 、 $\theta_2 = 55.7^\circ$ である。電子温度は最大400 eV程度、電子密度は最大で $\sim 10^{19} [\text{m}^{-3}]$ のオーダーとなる。

相対透過率を本手法にて求める場合、その妥当性を評価するために、予め標準光源（スペクトル波形が既知）を用いた相対校正を行っておく必要がある。標準光源を計測範囲（もしくはその光学的共役な場所）に設置し、集光機にて光を集光し、分光器で出力される信号を取得した。この信号量から光源のスペクトルの寄与を除いた量は、各分光チャンネル透過率の波長についての積分量を示している。本手法で求める相対透過率と比較する時

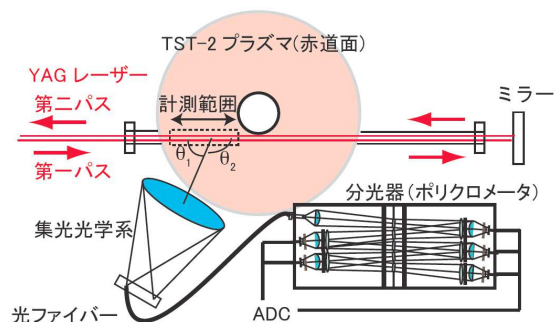


図1 TST-2 球状トカマク装置におけるダブルパス散乱システムの概要

は、それらを波長で積分した後に比較する必要がある。

#### (2) 高性能プラズマ計測のための理論検討

計測精度のシミュレーションは、以下に示す方針で行った。まず、計測レーザーのエネルギー、レーザー光軸上の散乱長、集光光学系、散乱光の伝送に利用する光ファイバー、分光器の効率（透過率）等を仮定し、実験で得られる理想的な信号量を算出した。また検出器におけるショットノイズやプラズマからの背景光を考慮した誤差の程度を見積もった。ここで、具体的な数値はJT-60SAトムソン散乱計測のパラメータを利用した。上記の誤差の範囲内の信号量を乱数として理想的な信号量に加えることで、複数の模擬された計測信号量を用意した。各々のケースについて信号量比を算出し、電子温度を求め、統計的な精度評価を行う。研究代表者は電子温度と散乱角を変化させて系統的に精度評価を行った。

電子温度に非等方性がある場合、どのように本手法が適応できるかも検討した。磁場に対し平行成分と垂直成分の電子温度の両方を未知変数として、上記と同様に透過率とは独立に求められることを新たに発案した（ただし、複数の分光チャンネルで計測した信号比を利用することが必須である）。シミュレーションでは、様々な2つの電子温度パターンを仮定しそれぞれのケースについて電子温度の精度評価を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 実証実験における成果

TST-2 装置のダブルパス散乱システムにより、信号比を計測した結果を図2に示す。ある放電 (SN76483) において、1回のレーザーパルスで往復させた場合についての計測結果である。計測で得られた信号比は三角で示している。緑の線は理論的に計算した信号比で、最小二乗法によって求めた電子温度 ( $T_{e,c} = 183 \pm 28$  eV) のものである。信号比の誤差は長波長側 (CH1-CH3) で特に大きいのが、計測感度のある波長幅が狭く十分な信号比が検出されなかったことに起因する。信号比を利用せず、透過率情報を利用し電子温度 ( $T_e$ ) を求めると、 $175 \pm 15$  eV となり (第一パスで算出)、2種類の電子温度が同等になっていることが分かった。この手法が他の電子温度領域についても有効であるかを確認するために、複数のプラズマ放電について上記2種類の電子温度の比較を行った。結果を図3に示す。このデータでは、 $\langle |T_{e,c} - T_e| / T_e \rangle = 3.7\%$  となり、両者ともよく一致していることを明らかにした。また、赤色のデータは使用する分光チャンネル数を3つのみにして計測した結果である。次に、電子温度精度の散乱角依存性

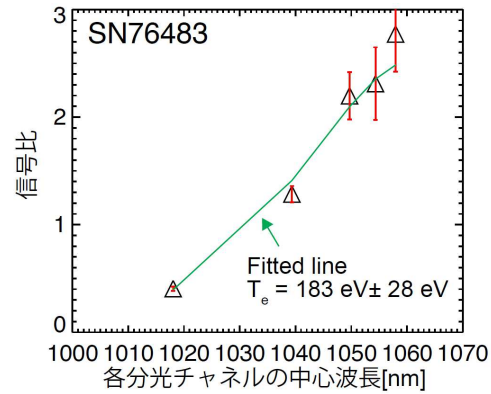


図2 各分光チャンネルにおける計測信号比 (三角) と最小二乗法により求めた電子温度での信号比 (緑の線は 183 eV を示す)

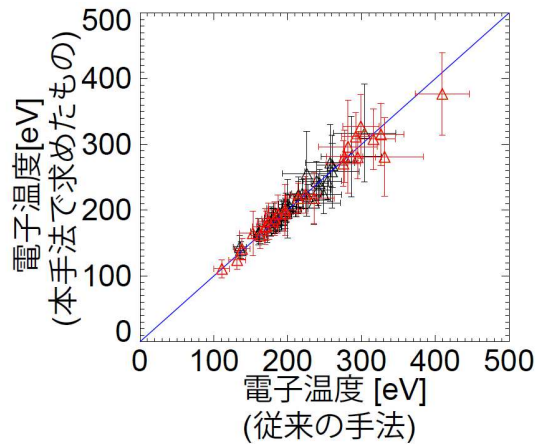


図3 本手法で求めた電子温度と従来の手法で計測した電子温度の比較

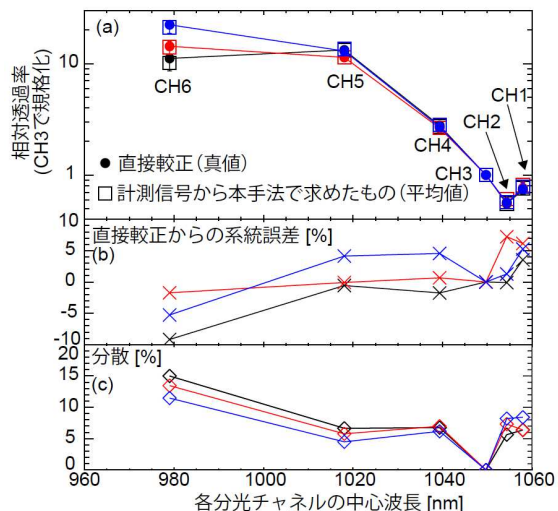


図4 (a) 直接較正と本手法で求めた相対透過率 (波長について積分されたもの) の比較。(b) 直接較正結果を真値とした時の、本手法での系統誤差 (c) 本手法の結果の分散



を確認するために、散乱角が異なる場合についても本手法を試行した。散乱角が約 109 度の場合、散乱光スペクトル波形の影響で、電子温度の計測誤差がプラズマ中心計測に比べ数倍程度上昇することが分かった。これは、第一パスと第二パスの散乱光スペクトルの波形が散乱角に類似してしまうことに起因するものである。

次に、求めた電子温度を基に、相対透過率を計算し、直接校正した結果と比較した。その結果を図 4 に示す。青、黒、赤の 3 種類のデータがあるが、黒と赤は分光器内に透過率が既知のフィルターを挿入し、透過率変化を故意に起こしたものである。どのケースでも分光チャンネルの CH1 から CH5 までは 5% 以内の系統誤差に抑えることが出来、よい一致が見られる。ただし、CH6 については、TST-2 の電子温度領域では十分な信号が得られなかったことと、計測波長領域が広く、各分光チャンネルで透過率が一定であるという仮定と現実の透過率スペクトル波形との不一致により精度が悪化したと考えられる。

以上の実証実験により、ダブルパス散乱計測で計 2 回の散乱光が計測できれば、透過率情報にとらわれず電子温度が決定でき、相対的な透過率も装置に近づかずに計測データから求めることが可能であることを明らかにした。ただし、散乱角が 90° に近づくと電子温度の精度が悪化する点と、短波長側で計測波長領域が広い分光チャンネルの相対透過率精度が良好でない点に注意する必要があることが分かった。

## (2) 高性能プラズマ計測のための理論的検討の成果

前項では低電子温度 (400 eV 以下) に対し実験にて、本手法の有効性が示せたが、高性能なプラズマ装置を想定し、高電子温度領域を含めた電子温度の精度をシミュレーションにて評価した。JT-60SA トムソン散乱計測を例に本手法を用いた場合の電子温度の相対誤差を図 5 に示す。全ての電子温度領域 (0.1 - 30 keV) で精度は 10% 以下となった。また従来の手法で電子温度を求める場合と同等の精度であることも明らかにした。散乱角依存性についての評価も行った。上記のシミュレーションで散乱角のみを変化させ、同様に精度評価した結果、図 6 のように  $\theta_1 = 105^\circ$  程度 (第一パスが前方散乱の場合は、 $75^\circ$  程度) を変曲点とし誤差が顕著に変化することが分かり、TST-2 装置における実験データの傾向と定性的に一致する結果を得た。

電子温度に非等方性を伴う場合について、様々な電子温度領域で、精度評価を行った。結果を図 7 に示す。横軸、縦軸は 2 つの真値の電子温度である。左図が垂直方向 ( $T_{e\perp}$ )、右図が水平方向 ( $T_{e\parallel}$ ) の電子温度の相対誤差を

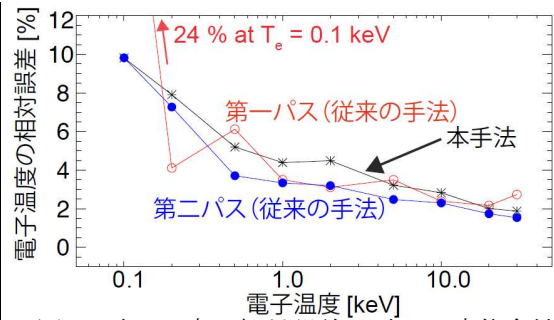


図 5 電子温度の相対誤差の電子温度依存性 (黒：本手法、赤：第一パス ( $\theta_1 = 125.4^\circ$ )、青：第二パス ( $\theta_2 = 54.6^\circ$ ))

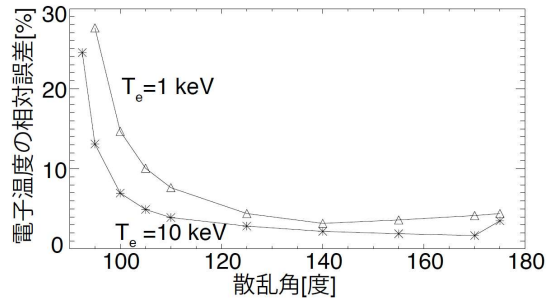


図 6 電子温度の相対誤差の散乱角依存性 ( $T_e = 1$  keV, 10 keV の場合)

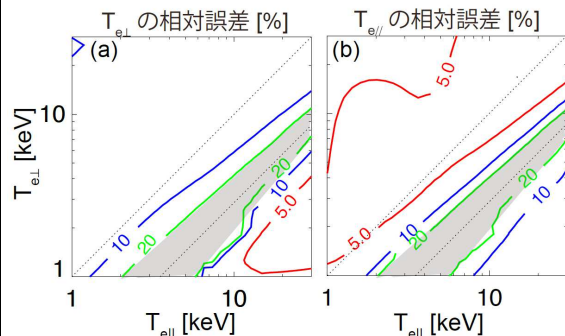


図 7 磁場の方向に対し (a) 垂直と (b) 水平方向成分の電子温度の相対誤差

示している。大半の領域について精度が 10% 程度以下となり、精度よく 2 つの電子温度が計測できることを明らかにした。しかし非等方性が強いある領域 ( $T_{e\perp} \sim T_{e\parallel}/3.4$ ) は相対誤差が 20% 以上の領域を示しており計測に困難を生じる (図中の薄黒い領域)。これは、第一パスと第二パスの散乱光スペクトルの波形が類似しており、ほとんど全ての分光チャンネルで一定の信号比を出力してしまうことに起因するものである。

以上のシミュレーションによる検討の結果として、本手法が広いパラメータ領域で有効であることが明らかになった。具体的には、散乱角が  $105^\circ$  以上 (第一パスが  $75^\circ$  以下) が必要で、通常の 1 回のレーザーパルスを利用した場合と同程度の精度が保てる。電子温度に非等方性が伴う場合であっても、2 種類の電子温度が強い非等方性を有する一部の

場合を除き、本手法で計測可能であることを明らかにした。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

(1) H. Tojo, A. Ejiri, J. Hiratsuka, T. Yamaguchi, Y. Takase, K. Itami, T. Hatae, "First measurement of electron temperature from signal ratios in a double-pass Thomson scattering system," Review of Scientific Instruments **83**023507 (2012). doi:10.1063/1.3685612 (査読あり)

(2) H. Tojo, T. Hatae, K. Itami, "Principle of an in-situ relative calibration method using a double-pass beam for Thomson scattering diagnostics," Journal of Instrumentation **7** C05004 (2012). doi:10.1088/1748-0221/7/05/C05004 (査読あり)

(3) H. Tojo, A. Ejiri, J. Hiratsuka, T. Yamaguchi, T. Takase, K. Itami, T. Hatae, "Demonstration of in-situ relative calibration method for a Thomson scattering diagnostic on TST-2," Journal of Instrumentation **7**, P04005 (2012). doi:10.1088/1748-0221/7/04/P04005 (査読あり)

(4) H. Tojo, T. Hatae, E. Yatsuka, K. Itami, "Anisotropic electron temperature measurements without knowing the spectral transmissivity for a JT-60SA Thomson scattering diagnostic," Review of Scientific Instruments **83** 10E346 (2012). doi:10.1063/1.4745214 (査読あり)

[学会発表] (計4件)

(1) H. Tojo, A. Ejiri, J. Hiratsuka, T. Yamaguchi, Y. Takase and K. Itami, "Principle of an in-situ relative calibration method for Thomson scattering diagnostics," 15th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics, 04-3, Jeju, Korea, 9 - 13 Oct. (2011).

(2) H. Tojo, T. Hatae, and K. Itami, "Demonstration of an in-situ relative calibration method for a Thomson scattering diagnostics on TST-2," 21st International Toki conference, P2-47, Toki, Japan, 28 Nov. - 1 Dec. (2011).  
口頭発表

(3) H. Tojo, T. Hatae, K. Itami, "Robustness of  $T_e$  measurement using double-pass beam for a JT-60SA Thomson scattering diagnostic," 19th Topical

Conference High Temperature Plasma Diagnostics, Monterey, CA, USA, 6-10 May (2012).

(4) H. Tojo, T. Hatae, T. Sakuma, T. Hamano, K. Itami, A. Ejiri, J. Hiratsuka, T. Yamaguchi, Y. Takase, "Development of a Thomson scattering diagnostic design for JT-60SA," , The 9th Australia-Japan workshop on plasma diagnostics, Naka, Japan, Dec. 3-6 (2012).

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

東條寛 (TOJO HIROSHI)

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・任期付研究員

研究者番号：80549212

(2) 研究協力者

高瀬雄一 (TAKASE YUICHI)

東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：70292828

江尻晶 (EJIRI AKIRA)

東京大学大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：30249966