

論文内容の要旨

論文題目 レーザの飛行時間と往復反射を用いた
トムソン散乱計測システムの開発

氏名 住川 隆

本研究では核融合プラズマの代表的な電子温度・密度計測手法であるトムソン散乱計測法にレーザー光の飛行時間差と往復反射を利用する工夫を施すことにより、低コストの2次元電子温度・密度計測システムを開発した。

トムソン散乱とはプラズマ中の荷電粒子が入射電磁波（レーザー）を散乱させる現象であり、プラズマ中を無秩序に運動する多数の電子から放射されるトムソン散乱スペクトルを計測すると、そのドップラー拡がり幅から電子温度が、絶対光量から電子密度が算出される。トムソン散乱計測は現在最も信頼できるプラズマ電子温度・密度計測手法として核融合プラズマ研究に重要な役割を果たしている。

トムソン散乱計測が初めてその地位を築いた出来事は、核融合開発の初期段階における英国 Culham 研究所チームによる旧ソ連の T-3 トカマクの電子温度計測である。1968 年に開催された IAEA 国際会議において T-3 トカマク装置で電子温度 1keV が達成されたという報告がなされた。当時はヘリカル系や逆磁場ピンチ（RFP）、シーターピンチ、ミラーなどの不安定性に悪戦苦闘していた時代であり、どの装置でも電子温度は 100eV 程度であったのでその報告は大いに注目を集めたが、用いられた電子温度算出手法が反磁性磁束からの推定であったため、最初は欧米の研究者からは認められていなかった。そこで T-3 トカマクの高電子温度の裏付けをとるために Culham

研究所チームが行った当時最新の電子温度計測方法がトムソン散乱法であったのである。この計測によりトカマク配位の優位性が確認されたのと同時にトムソン散乱計測が代表的な電子温度・密度計測手法であることが広く知られるようになった。

トムソン散乱法を用いて本研究室ではプラズマ合体装置 TS-4 (Tokyo University Spherical Torus 4) を用いて 1. プラズマ合体時に起こる磁気リコネクション現象の電子加熱効果の検証、2. 球状トカマク (ST) の熱圧力分布の確認を行うことを計画した。1. の磁気リコネクション現象とは、プラズマ合体時などに本来つなぎ変わることはない反平行な磁力線が接近する場合、アンペアの法則に従った電流シートが発生し、このシート内での局所的な電気抵抗による磁場拡散のため、つなぎ変わる現象である。磁気リコネクションはプラズマ加熱効果を有することが知られているが、電子とイオン各粒子についての加熱機構や加熱場所については未だ完全には解明されていない。本研究室では可視光トモグラフィ法による 2 次元イオン温度計測が既に行われており、その結果イオンは磁気リコネクション時にアウトフロー領域で大きく加熱されることが確認されている。本研究で開発するトムソン散乱計測装置は残る電子について 2 次元温度分布計測により加熱領域を特定し、電子とイオンを合わせた加熱機構の解明の手がかりを得ることを目指す。本研究室が提案するプラズマ合体による 2. の ST プラズマ立ち上げ法の利点は高 β な ST プラズマの生成が可能な点にある。 β はプラズマ熱圧力と磁気圧の比率であるので、プラズマ熱圧力を算出する必要がある。プラズマ熱圧力 p は $p=n_e k_B(T_e+T_i)$ と表されるように密度と温度の積である。ここで k_B はボルツマン定数、 n_e は電子密度、 T_e 、 T_i はそれぞれ電子温度、イオン温度である。本研究ではプラズマの密度と温度を直接計測しプラズマ熱圧力を算出することを目指す。ところでイオン温度 T_i については先述した 2 次元可視光トモグラフィ法により 2 次元空間分布計測に成功しているので、残る電子密度 n_e と電子温度 T_e の 2 次元分布を計測することができればプラズマ熱圧力 p の 2 次元空間分布を求めることができる。また、 $\beta=p/(B^2/\mu_0)$ と表される β の分子部分のプラズマ熱圧力、分母部分の磁気圧力部分の両者とも直接計測が可能になるので、これまでよりも精度の高い β 値の算出が期待される。

以上の理由で本研究室において電子温度・密度の 2 次元空間分布計測は有益であるのだが、これを従来のトムソン散乱計測システムで行うと問題点が生じる。1 つはプラズマ中に入射するレーザービーム経路上の 1 次元分布計測しか可能ではないことである。2 つ目は多点計測を行う場合、1 計測点につき 1 台のポリクロメーター (分光装置の一種) と 1 本の光ファイバーが必要であるので大変高価であり広大な設置スペースも必要とする大型計測システムになってしまうことである。潤沢な資金と広大な実験スペースを兼ね備えた大研究所では 100 計測点以上の 1 次元トムソン散乱計測を上の方法で行っているが、大学レベルでの研究では困難である。

本研究では以上の従来のトムソン散乱計測の問題点を 2 つの工夫を施すことによりクリアした。1 つ目の工夫はレーザー光の複数回反射を用いることによりプラズマの r - z 平面をレーザービームによってカバーさせることである。具体的にはレーザー光を装置外のミラー反射によりビーム経路を折り返すことで TS-4 装置 $z=-65, 0, 65$ [mm] の入射/出射ポートを通して計 3 回入射させる。計測点数は z 方向に 3 行と r 方向に 4 列の計 $3 \times 4=12$ 点である。しかしこの 12 点を計測するために光ファイバーとポリクロメーターを 12 セット用意するとなると予算と設置スペース上構築困難になる。そこで 2 つ目の工夫としてレーザー光の飛行時間差 (LIDAR 法) を用いて必要な光ファイバーとポリクロメーターの数を低減させた。12 点の計測点のうち同一 r の 3 計測点は同一の光ファイバーとオシロスコープで計測し、レーザー光がその計測点座標に到達する時刻の差異を利用して 3 計測点からの信号を分離した。3 計測点の信号は信号の時間幅の都合上 50ns 以上の時間差が必要であったので、計測点間のレーザービーム経路長は 15m として飛行時間差を稼

いでいる。以上の2つの工夫により比較的安価な空間2次元トムソン散乱計測システムの開発が可能となった。

本トムソン散乱計測システムは主にレーザー、対プラズマ集光レンズシステム、散乱光伝送用光ファイバーバンドル、ポリクロメーター（分光装置）で構成されている。レーザーはTS-4装置でのプラズマ背景光の強度が小さい波長域にあるNd:YAGパルスレーザーの基本波（1064nm）を使用した。レーザー光は前述のようにTS-4装置外に同一 r 計測点毎に約15mの飛行時間差用レーザー経て3回入射される。対プラズマ集光レンズは微弱なトムソン散乱光を極力多く集めるために、同一 r の3計測点を同一レンズで対応させることによりレンズ径を大幅に大きくし、 $\phi 80\text{mm}$ を実現した。立体角は 20msr であり、他の研究所のトムソン散乱計測システムのものとは比べても遜色ない。光ファイバーバンドルは、プラズマ中の計測点において $\phi 15\text{mm}$ の径で焦点を結ばせるため集光レンズ側のファイバー端部の断面積はラグランジュ・ヘルムホルツ不変量を用いた議論より $\phi 3.2\text{mm}$ 必要になった。 $\phi 3.2\text{mm}$ を実現させるために $\phi 0.63\text{mm}$ のシングル光ファイバーを19本束ねた光ファイバーバンドルとした。この1計測点に対応する光ファイバーバンドルと同一 r の他の2計測点に対応した光ファイバーバンドルとを更に束ね1台のポリクロメーターに入力して分光を行った。ポリクロメーターは光ファイバーバンドルにより伝送されたトムソン散乱光を4種類の異なる透過波長域を持つ干渉フィルターにより分光しアバランシェ・フォトダイオード（APD）で検出する装置である。TS-4装置によるプラズマの電子温度は20-200eVであると予想されていたので、比較的低温のプラズマによるトムソン散乱スペクトルが効率よく計測できるように4種の干渉フィルターの透過波長域を設計した。

以上のトムソン散乱計測システムを構築し、レーザー光の飛行時間差と往復反射を用いたトムソン散乱計測法の原理実証を2段階に分けて行った。原理実証の第1段階としてレーザーの飛行時間差（TOF）がTS-4装置に適用可能か否かを比較的計測容易な大気ラマン散乱を用いて検証した。同一 r の3計測点のラマン散乱光信号が設計通り50nsの時間遅れをもって計測されたので第1段階の原理実証が達成された。第2段階として単一計測点におけるトムソン散乱計測、電子温度・密度算出を試みた。光量の伝送効率の最適化の末、これにも成功したので、第1,2段階合わせて本計測システムの原理実証が完了した。つまりこの同一 r の3計測点の計測システムを r 方向に並べることによりトムソン散乱計測の2次元化が可能であることが示された。

総合的な結論として、トムソン散乱計測を経済的に空間2次元に拡張する方法はこれまで無かったが、それを実現する手法の1つとしてレーザー光の飛行時間差と往復回反射を利用した2次元化手法を提案し、実際に開発して原理実証を成功させた。このことはプラズマ計測分野において先駆的である。更に今回の原理実証をもとに今後の大型装置への適用を提案することができた。大型装置のトムソン散乱計測システムの多くは1次元の多点計測であるので本研究が提案する計測手法を取り入れることにより大幅な開発コストの削減と計測の2次元化につながる可能性が大きい。