

トムソン散乱のための高分解分光システムの開発

米田研究室 池田珠実

1. 序論

トムソン散乱は、プラズマなどにおいて電子の速度分布関数を直接計測したり、高密度プラズマ中においては、電子が作る集団現象（例えばプラズマ波など）の情報をレーザーの散乱スペクトルで計測することができる。これらは、電子密度、電子温度などの情報につながるために、多くのプラズマ現象や高温現象において期待されている診断手法である。その一方で、温度が低い場合には、基本波からの波長シフト量が電子速度に比例するために小さくなるために、基本波の散乱に紛れて計測できない、集団現象を評価するにも必要とされる波長分解能が不足して評価できないなどの課題もあった。特に、最近レーザー産業応用として注目されているレーザー加工のレーザーと物質の相互作用領域では、温度が数 1000 度程度であるために、分解能などが厳しい状況にあった。

そこで、本研究では、単一周波数レーザーを光源として用い、基本波の狭線幅化を行うとともに、大型の分光器を凹面大型回折格子で構成し、高い波長分解能でトムソン散乱スペクトルを計測する装置を開発することを目的としている。

2. 分光器作成

回折格子としては、曲率半径 13.3 m、格子定数 600 本/mm、矩形開口 120 x 240 mm のものを使用し、焦点距離 6.65 m の分光光学系を設置した。構成した分光器の分解能を測定するために、有効共振器長 1 mm 弱の内部波長変換型半導体励起固体レーザーと、リング共振器で単一周波数の半導体レーザー励起固体レーザーからの緑色の発振光を分光器内にいれ、そのスペクトルを観測した。入射点を固定し、スペクトル面を決定するために、凹面回折格子の焦点付近で CCD カメラを前後させた。

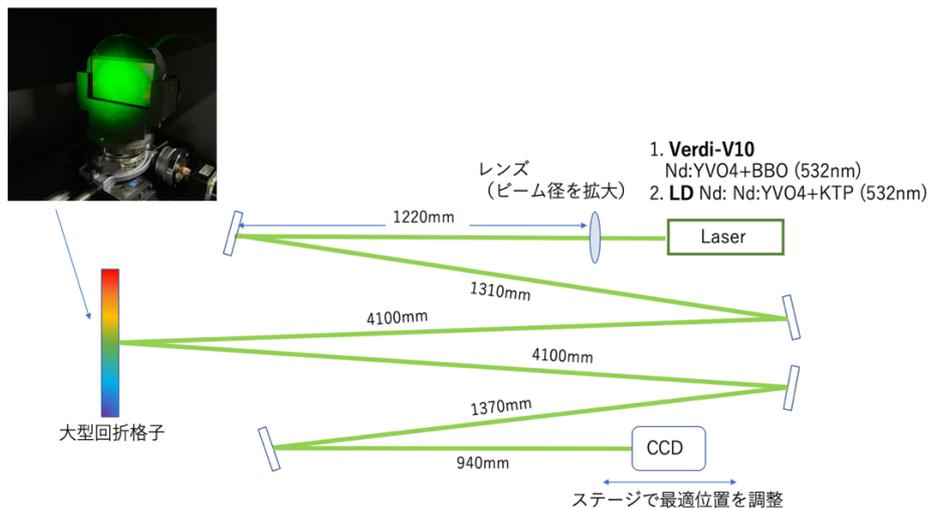


図 1 装置構成の概略図

入射光として短い共振器長のグリーンレーザーのスペクトルを観測し、縦モードの 1 つの線幅を狭く観測できるように分光器を設定した。カメラ上のスペクトル分解能を決定した。

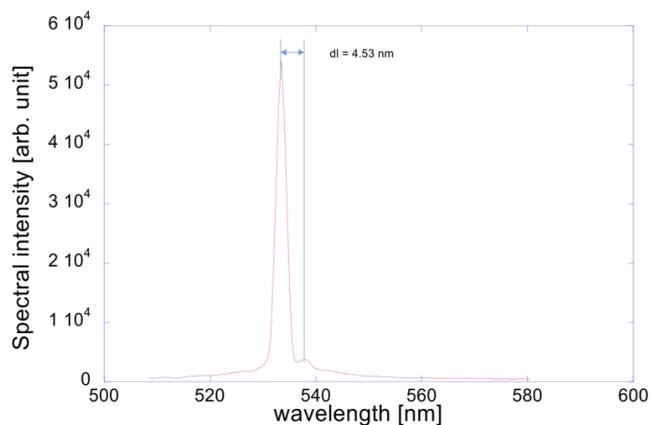


図2 スペクトル間隔の解析グラフ

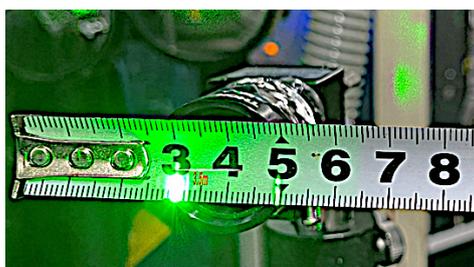


図3 分光器検出面の横ずれ

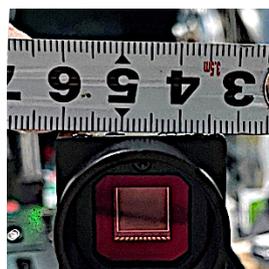


図4 カメラの撮像サイズ

$$\frac{4.53 \text{ nm}}{19 \text{ mm}} \times \frac{8.5 \text{ mm}}{1280 \text{ pixel}} = 1.58 \text{ pm/pixel}$$

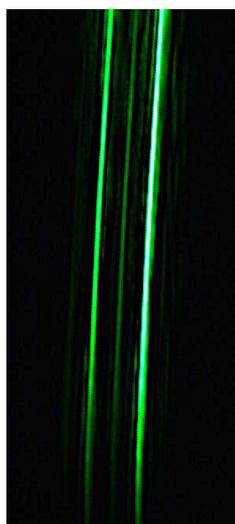


図5 縦モードのスペクトル像

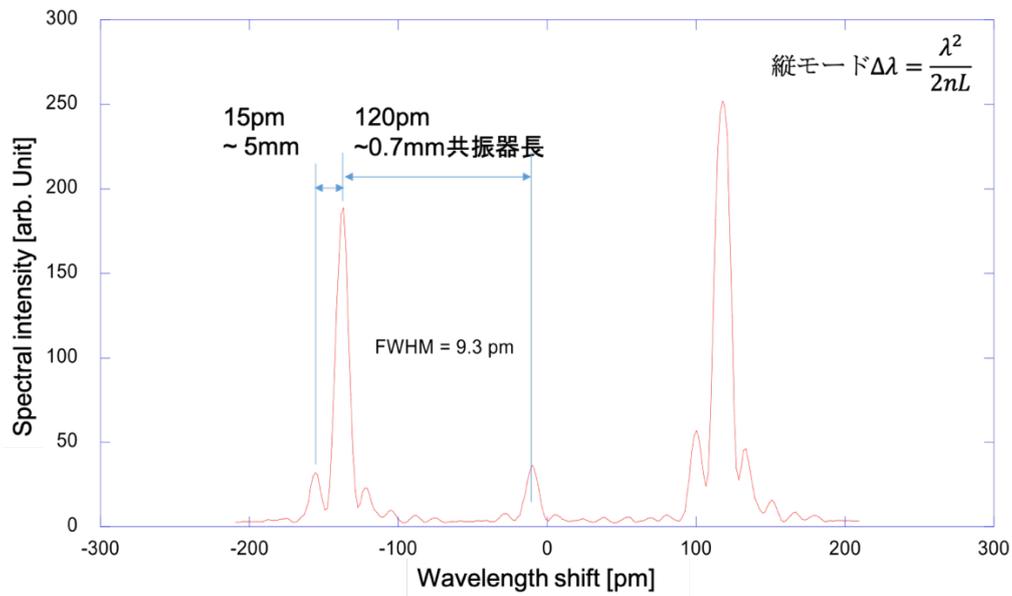


図 6 縦モードのスペクトルの解析グラフ

縦モードのスペクトルを観測し、解析した。以上より、内部波長変換型半導体励起固体レーザーでは、縦モード間隔に当たる 120 pm 間隔と半値幅が 9.3 pm のスペクトル構造を持つものが観測された。一方、単一周波数レーザーの場合、孤立した 1 本のスペクトルが、やはり 9 pm の半値幅で観測されていた。

3. アークプラズマ観測

ノイズを低減するために、冷却型 CCD カメラを導入した。散乱光強度が弱いため、アーク溶接による発光を分光器内に導かないように囲いを設置した。レーザー出力 6 W、アーク溶接を 21 A で行い、特徴的なシフトされたスペクトルを観測した。

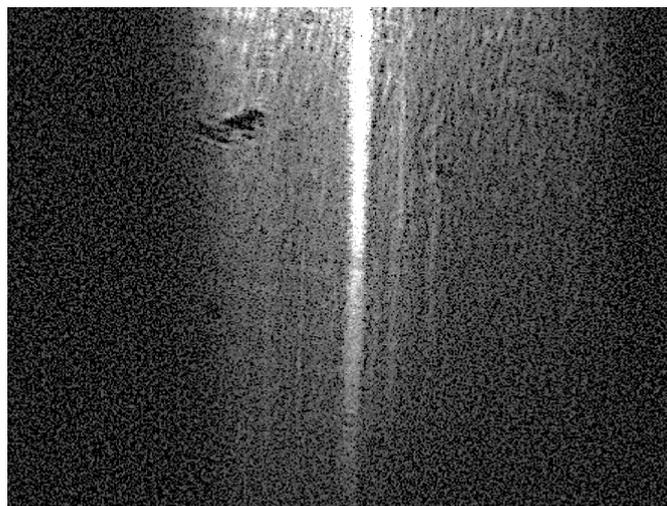


図 7 2 本等間隔でシフトしたスペクトル像

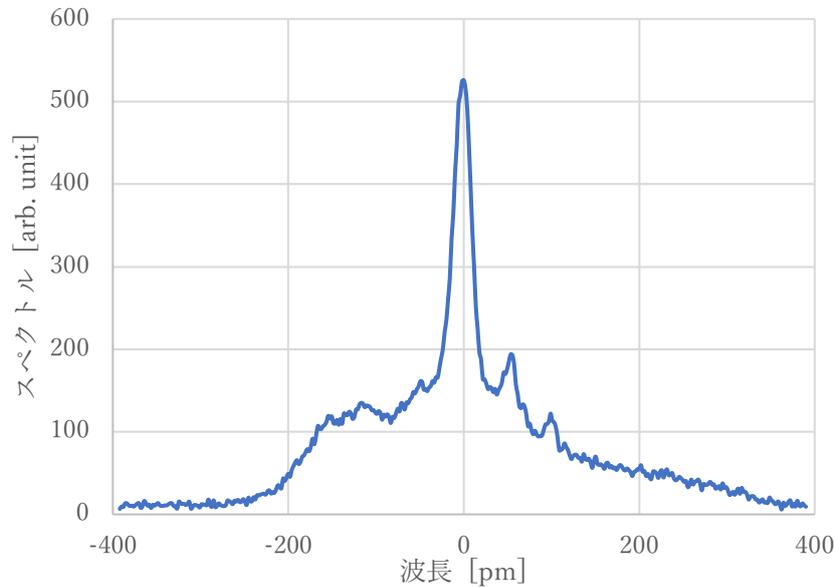


図8 二本等間隔でシフトしたスペクトルの解析グラフ

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda_0} - \frac{hc}{(\lambda_0 + \Delta\lambda)} = hc \frac{\Delta\lambda}{(\lambda_0 + \Delta\lambda)\lambda_0} = \hbar\omega_p = \hbar \left(\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2}$$

上式より、基本波の波長を $\lambda_0 = 532 \text{ nm}$ 、波長シフトを 55 pm とすると、エネルギーシフトは 0.242 meV と求められた。電子プラズマ波とすると、対応する電子密度は $4.26 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ と計算できた。空気の分子の密度は $2.69 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ なので、電離度は 1.6×10^{-6} と求まった。

4. 結論

この研究では、 9.3 pm の高波長分解トムソン散乱計測システム構築を達成した。実際にアークプラズマを観測して、内部の非弾性散乱スペクトルの取得に成功した。単一波長レーザーと大型分光器による高波長分解トムソン散乱計測は、有効であるとわかった。背景光が厳しい条件では、さらなる工夫が必要だとわかった。

今後は、時間分解計測をより高い時間分解で行うために、信号のS/N比の改善、像結合系の改善による信号強度の増大を行いたい。差分計測、ロックイン計測などプローブ光の吸収が起きる場合には、プローブ光の短波長化へ向かう必要がある。

参考文献

- [1] 富田健太郎 内野喜一郎, レーザートムソン散乱による大気圧プラズマの電子密度・電子温度計測, J. Plasma Fusion Res, 93(5), pp. 232–235 (2017)
- [2] 瀬名正男, 回折格子とマウティング, 分光研究, 17(2), pp. 53–60 (1968)
- [3] Midori Shimauchi, Tokiwa Miura and Hiroshi Takuma, Absorption Lines of Vibrationally Excited O2 and HF in ArF Laser Spectrum