

レーザープラズマのための波長広帯域高分解能分光システムの開発

1810395 竹内 楓

主任指導教員：米田 仁紀 指導教員：米田 仁紀

1. はじめに

レーザー加工において、レーザーパラメータと加工状態の研究が進められている。このうちの一つの計測対象として、レーザープラズマの計測がある。レーザー照射直後、そのエネルギーにより固体がプラズマ化し、数 ns で固体表面上数十 μm 程度に広がっていく。また、この小さな領域において、温度、密度がプラズマ中で大きく異なるという特徴を持っている。[1]プラズマにはレーザー照射時の内部エネルギーの伝達に関する情報を持っている。さらにプラズマ自体も、臨界密度と呼ばれる密度でレーザー吸収を起こすので、プラズマを計測することで、どの程度の吸収が起こり、それが加工状態へどう影響を与えるのかを調べることができる。このレーザープラズマを観測する一つの方法として、発光分光分析法がある。しかし、現行の方法では、広帯域のスペクトルデータを一度の計測で測定することは難しい。そこで、本研究では、波長 1 次元かつ空間 1 次元の分光データを取得可能で、かつ波長広帯域、高分解能の分光器を作成する。これにより、レーザー固体相互作用解明のためのデータの蓄積が可能となる。具体的には、測定対象をレーザー照射部分の物体表面とし、比較的小さな対象を観測可能な、波長範囲が 400 から 700nm、波長分解能が $\Delta\lambda = 0.5\text{nm}$ かつ、空間範囲が 2mm、空間分解能が $\Delta x = 50\mu\text{m}$ の 2 次元データが取得可能で、かつ 30Hz でデータ蓄積が可能な分光システムの作成を目指した。

2. 原理

2.1 分光と粒子の関係

分光とは、分光素子を介して光を波長(色)ごとに分けることをいう。粒子は、それぞれ固有のエネルギー準位を持つ。励起状態にある原子の電子がより低いエネルギー準位へ遷移する時、そのエネルギー準位差分のエネルギーを放出し、分光すると線スペクトルとして検出される。このエネルギーは波長に逆比例しているため、分光を用いて線スペクトルを調べることで、エネルギー準位差が分かり、そこから原子(分子、イオン)の同定が可能になる。また、線スペクトルのほかに、連続スペクトルから温度の測定が可能であり、また、線スペクトルの広がりから電子密度を測定することができる。

2.2. 回折格子と分解能

回折格子とは、一定の間隔 d mm で凹凸やのこぎり状の溝が刻まれている素子であり、入射角 θ_i で入射した

波長 λ の光の出射角 θ_o は以下のように表される。

$$d(\sin \theta_i + \sin \theta_o) = m\lambda \quad (1)$$

この式より、同じ入射角でも波長によって出射角が異なるので、光を分光することができる。

幅 a のスリットを垂直に通った光が、ある距離にある面内のある角度 θ に作る光の強度分布は、 $\sin \theta \sim \theta$ の近似を用いて以下のように表せる。

$$I(\theta) = I_0 \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi a \theta}{\lambda}\right)}{\frac{\pi a \theta}{\lambda}} \right|^2 \quad (2)$$

よって、スリット幅を狭くすることで出射される光の幅 R は広がる。

また、 N 本/mm の回折格子に、刻線に対して垂直に幅 R の光を入射させたとき、回折 1 次光を用いたときの波長分解能の理論値は以下の式で計算できる。

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = RN \quad (3)$$

これより、分解能を上げるためには、スリット幅 a を狭く、刻線密度 N を上げる必要がある。ただし、 N を増加すると式(1)より同じ波長範囲でも出射角の広がりが大きくなってしまうので、400~700nm の範囲のスペクトルを見ることを踏まえて刻線密度は 300 本/mm のものを選択した。

2.3 作成する分光システムの課題

波長広帯域の分解を実現するために、回折光をプリズムキューブ(下図 1)で 3 つに分離し、3 つのカメラを利用して同時に分光データを取得した。また空間分解のために、小さな測定対象を拡大してスリットに入射をさせる必要がある。そのために超作動距離対物レンズを使用した。また、高分解能に対する課題としては、色収差と非点収差があげられる。色収差は波長によって同じ集光レンズを使用してもピントの合う距離が変化するという現象で、非点収差とは、縦方向と横方向でピントの合う位置が変化してしまうことで、これらにより区間分解と波長分解の両立が困難になってしまっている。この対策として、カメラや集光レンズを傾けることで最小限に抑えた。また、3 つのカメラの波長域を少し重ねることで一方の収差が生じている波長域を他方の波長域でカバーをするという方法をとることで、広帯域で高波長分解、高空間分解を実現した。

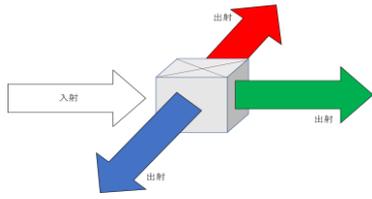


図1 プリズムキューブによる入射光の分光

3.実験装置の作成

作成した装置を以下に示す。

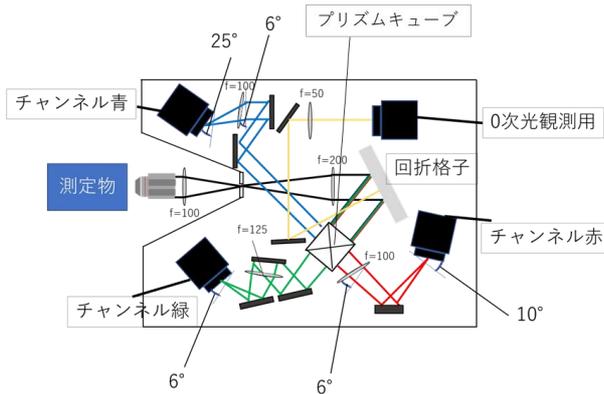


図2 作成した分光装置

装置は持ち運びを想定し、30cm×60cmの基板の上に作成した。そのため、いくつかミラーを用いて光路を調節し、プリズムキューブから出た光をそれぞれのカメラに入射させている。また、強度についてのダイナミックレンジ確保のため、分光器全体を段ボールで覆い、かつ遮光カーテンを上からかぶせている。スペクトルの強度分布画像はImageJを用いて行っており、縦軸の単位は画像ごとに任意単位となっている。また、ピント調節のため分光用のカメラとは別にもう一つ、0次光を観察できるカメラを作成し、入射スリットを可変スリットにすることで、スリットを広げて0次光の観察が可能となり、容易に対象にピントを合わせることを可能にした。

3.1 波長校正および分解能評価

波長校正及び波長分解能は水銀ランプを用いて行った。スペクトルの広がり以下のローレンツ関数で近似し、半値全幅を波長分解能とした。

$$I(\lambda) = \frac{a * \gamma}{\gamma^2 + (\lambda - c)^2} + d \quad (4)$$

ここで、フィッティングに使用した変数は a, γ, c, d で、この時半値全幅は 2γ と表される。

3.2 空間分解能評価

空間分解能の評価にはシートメッシュを張り付けたLEDを用いて行った。メッシュ間の強度分布を以下の2つの関数で近似し、シートメッシュの間隔から相対的に分解能を計算した。メッシュの境界部分の10-90

立ち上がりの大きさを空間分解能としている。

$$f_{左}(x) = a * \frac{1}{\exp\left(\frac{x-b}{c}\right) + 1} + d \quad (5)$$

$$f_{右}(x) = a' * \left(1 - \frac{1}{\exp\left(\frac{x-b'}{c'}\right) + 1}\right) + d' \quad (6)$$

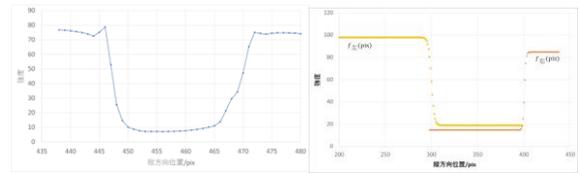


図3 1つのチャンネルで取得したメッシュ間強度分布(左)と上記2関数による再現(右)

表2 分光システムの性能

| 種類(目標) | チャンネル青 | チャンネル緑 | チャンネル赤 |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| 波長範囲 (300nm~700nm) | 360nm~500nm | 480nm~580nm | 570nm~720nm |
| 波長分解能 (0.5nm) | 0.570nm | 0.406nm | 0.293nm |
| 空間範囲 (1~2mm) | (2.16mm) | 2.16mm | (2.16mm) |
| 空間分解能 (50μm) | 47μm | 29μm | 21μm |

時間分解(カメラ性能) 30Hz

3.3 強度校正及び温度校正

今回は3つのカメラをまたがって1つのスペクトル画像を作成する。そのため、カメラの個体差の影響もあり、そのままの取得データでは強度が不均一なものとなっているため、スペクトル分布図としては不適切であると考えられる。そこで、3000Kまで測定可能な放射温度計を用いて熱放射の温度を測定、それと同時に分光器で画像を取得し、相対的に温度の補正を行った。温度Tの熱放射の波長分布は以下のプランクの黒体放射の式で表される。

$$I(\lambda, T) = \frac{A}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1 \right)} \quad (7)$$

ここで、Aは任意の定数である。

よって、放射温度計によって測定した温度でこの式をプロットしたものと、取得データから、相対温度補正を行った。

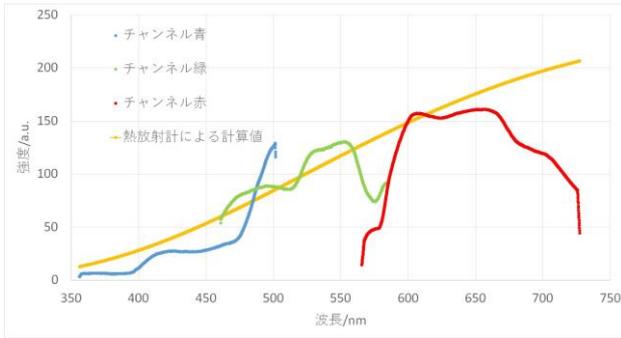


図4 熱放射の測定結果及び計算値

また、この補正を用いてある分光データを補正した。その補正前後のスペクトルを以下に示す。

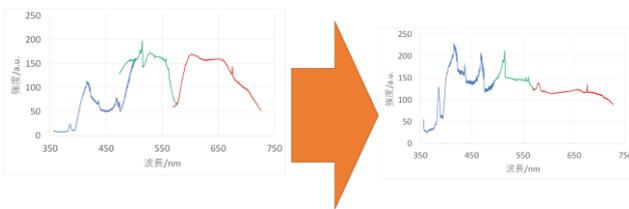


図5 あるスペクトルデータの補正前(左)と補正後(右)

これを見ると、補正前に比べて補正後の方が連続スペクトルが滑らかに表現されており、またカメラ間のつなぎ目部分もなめらかに繋がっていることから、補正によって3つのカメラから得たスペクトルから、一つの広帯域なスペクトルデータにすることができる。

4. アーク放電のテスト観測

作成した分光器を用いてシャーペンの芯の両端をワニ口クリップで挟み、電流を流してアーク放電を起こしてその時のスペクトルを観察した。これは微小領域で生じる発光を再現できるため、実際のレーザープラズマのモデル実験として採用している。

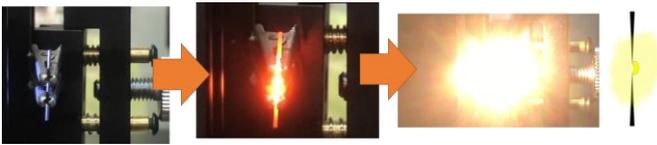


図6 シャーペンの芯を用いたアーク放電過程の遷移

4.1 時間分解

時間分解の結果の一部を以下に示す。

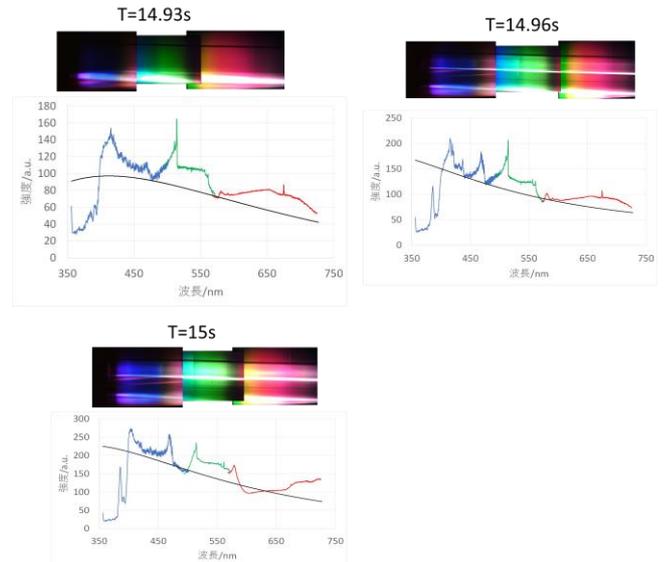


図7 時間遷移の取得データとその強度スペクトル

多数の C2 スペクトルが観測された。ここで、 $T=15s$ が観測中一番発光が確認された部分であり、そこからの相対時間で各時間を表した。この分解は時間分解能の限界で分解されている。この結果から、30Hzの時間分解スペクトルの取得が可能であったことが分かる。また、各時間のスペクトルを見ると、ベースラインの形が変化していることが分かるので、ベースラインを式(7)で近似し、その時の温度を求めた。図6にあるもの以外でも求めた結果を以下にまとめた。

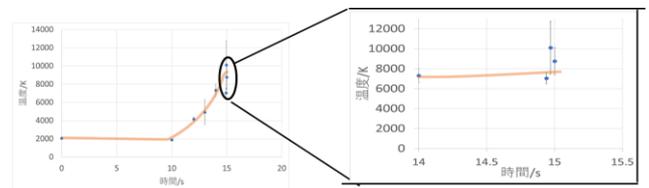


図7 各時間における温度変化

時間の経過とともに温度が上昇していることが分かる。 $T=15s$ 付近で少し停滞しているのは、エネルギーが原子等の励起に使用された元と考える。

4.2 空間分解

先ほど観測した $T=15s$ における位置別のスペクトルの取得をした。以下のようにクリップ間の炭素棒を $50\mu m$ で分け、それぞれの場所でスペクトルを取得した。

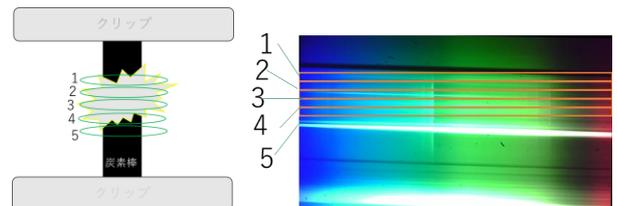


図8 位置の設定とチャンネル緑の取得データにおける設定位置

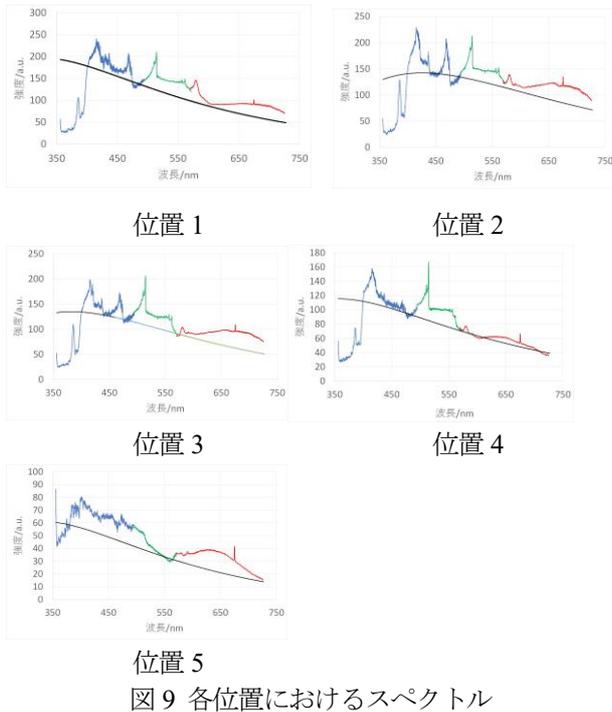


図 9 各位置におけるスペクトル

まず、時間分解の時と同様にベースラインをプランクの放射式のフィッティングによる温度計測の結果を以下に示す。

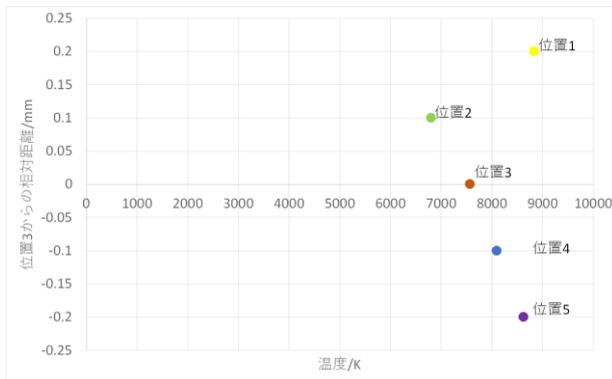


図 12 位置別の温度計算結果

アーク放電の起こった部分よりも、その上下部分の方が短波長寄りにピークが存在している。これは、アーク放電が起こっている部分はシャーペンの芯はなく、アークのみの光が分光されているのに対し、その上下部分ではシャーペンの芯が存在し、その熱放射によるスペクトルが、アーク放電によるものと積分されたようなスペクトルになっているのではないかと考える。

次に、線スペクトルの強度が各場所で変化していることから、以下の3つの線において、位置別の強度分布を求めた。

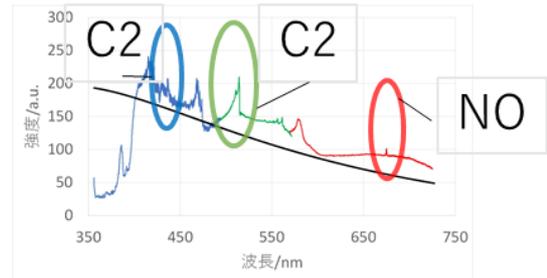


図 13 選択した線スペクトルとその推定発光元素

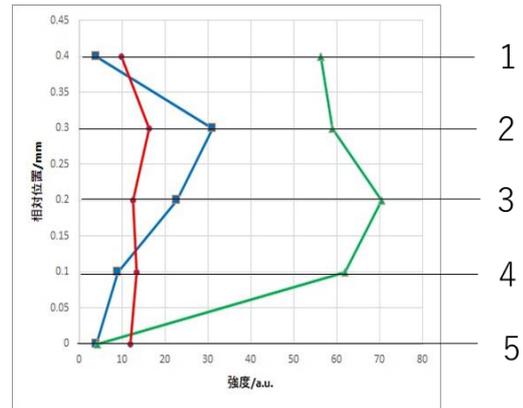


図 14 それぞれの位置別線強度分布

これより、赤のNO線は位置により強度の変化はなく、青のC2線は上の部分で強度が高く、緑のC2線は下の部分で強度が高いという結果になった。今後はこのようにスペクトルを時空間分解し、レーザープラズマのスペクトル解析などを行いたいと考えている。

5.考察とまとめ

広帯域で波長高分解能の分光器を作成した。波長帯域は360nmから720nmとなり、可視域はおおよそカバーすることができた。分解能は、現時点では波長分解能約0.5nm程度、空間分解能は20から60μm程度、時間分解能は30Hzとなっている。

また、シャーペンの芯を用いたアーク放電のモデル実験では、2原子炭素のスペクトルの観測、および強度校正による広帯域連続スペクトルの確認ができた。今後は、空間分解能をよりよく改善していきたいと考えている。そして、改良した分光器を用いて実際にCWレーザーを固体に照射したときに生じるレーザープラズマの分光計測を行い、さらなるスペクトルの解析、パラメータによるスペクトル変化のデータを取得していきたい。

参考文献

- [1] はじめてみよう!高エネルギー密度プラズマ計測、重森啓介、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター、J. Plasma Fusion Res. Vol92, No3(2016) 218-220
- [2] アブレーションプラズマとその応用、電気学会レーザーアブレーションとその産業応用調査専門委員会 編、コロナ社(1999年)