



### 2.3 黒体輻射と輸送

黒体輻射と輻射によるエネルギー輸送について説明しておく。

プランクの熱輻射の式[3]より、ある温度で平衡状態の時の輻射の強度  $I_{\nu}$  は以下ようになる。

$$I_{\nu} = \frac{c}{4\pi} U(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

それぞれの温度の曲線は交わることはなく温度が高いほうがどの周波数においても強度が強くなる。そのため、明るい点光源を得ようとした場合には、とにかくスポットの温度を高い温度にすることが重要である。

ここで輻射によるエネルギー輸送について説明する。輻射による輸送は次に示す radiation transport equation[3]によって記述される。

$$\frac{1}{c} \left( \frac{\partial I_{\nu}}{\partial t} + c\Omega \cdot \nabla I_{\nu} \right) = \kappa_{\nu}' (I_{\nu} - I_{\nu}')$$

$$\kappa_{\nu}' = \left( 1 - e^{-h\nu/kT} \right) \kappa_{\nu}$$

であり、 $\kappa_{\nu}$  はオパシティである。

真空中で行うと輻射による熱伝導が支配的になるため、加熱に対する発光強度の効率が上がる。

ところで、シュテファンボルツマンの法則より、 $I = \sigma T^4$  である。つまり、熱伝導 ( $q = \lambda \nabla T$ ) は温度  $T$  に比例するのに対し、輻射による熱輸送は温度  $T$  の 4 乗に比例するのである。つまり、温度を上げれば上げるほど、輻射が支配的になることを示している。

レーザーのレイリー長が約  $1 \sim 10 \mu\text{m}$  であることから考えて、ターゲットの形状は厚さ  $10 \mu\text{m}$  の膜状のものがよいと考えられた。

Radiation transport equation をシート状の媒質に適用する。上の微分方程式において平衡状態を仮定して、

$$\frac{\partial I_{\nu}}{\partial t} = 0 \text{ とする。}$$

$$I_{\nu}(s) = I_{\nu 0} \exp \left[ - \int_{-s_0}^s \kappa_{\nu} ds'' \right]$$

$$= \int_{s_0}^s \kappa_{\nu}' I_{\nu} \exp \left[ - \int_{s'}^s \kappa_{\nu}' ds'' \right] ds'$$

$$I_{\nu}(\theta) = \int_0^d \cos\theta I_{\nu} e^{-\frac{\kappa_{\nu} x}{\cos\theta}} \kappa_{\nu} \cos\theta dx$$

$$= I_{\nu} \left( 1 - e^{-\frac{\kappa_{\nu} d}{\cos\theta}} \right)$$

ここで、 $\kappa_{\nu} d \gg 1$  とすると

$$I_{\nu}(\theta) \approx I_{\nu} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

となり、黒体輻射に近似できる。

オパシティが十分大きい場合、つまり光学的に十分厚いとみなせる場合には、その部分の輻射は熱平衡状態であるとみなせるため、黒体輻射に近似して考えることができる。

VUV の領域でピークを取るために必要な温度は  $15000\text{K} \sim 20000\text{K}$  である。

この温度を得るために必要なレーザースポットを見積もってみる。

まず、プラズマの密度は固体と同じ程度もしくはそれ以下の値しか取らないので、 $n = 5 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$  とする。

すると、約  $20000\text{K}$  でのエネルギー密度は、

$$\frac{1}{2} nkT = \frac{1}{2} \times 5 \times 10^{28} \times 2 \times 1.6 \times 10^{-19}$$

$$= 8 \times 10^9 \text{ J/m}^3$$

加熱される領域を  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  の立方体と仮定すると、

エネルギーは、 $8 \mu\text{J}$  となる。

加熱中に体積が時間とともに膨張してしまう。その体積膨張する量が加熱する体積に比べて十分小さくしなければならないとする。

オイル中の音速をおよそ  $1000\text{m/s}$  と考えて、体積が膨張する時間を計算すると、

$$10 \mu\text{m} / 1000 \text{ m/s} = 10 \text{ ns}$$

以上のことから、パルス幅が  $10\text{ns}$  で、パルスのエネルギーが  $8 \mu\text{J}$  のレーザーならば可能であると見積られる。

この程度のレーザースポットならば、十分実現可能である。また、マイクロチップレーザーでも可能なため、十分小型化が見込まれる。

本来ならば、オパシティ的な見積もりも必要である。しかし、シリコンオイルに関しては、まだ、十分なデータが存在しない。まずは、スペクトルのデータをそろえる必要がある。

### 3 装置の作成

#### 3.1 装置の概略

ノズルから液膜を噴射し、そこにレーザーを照射する。液体は回収され、ポンプで循環され、またノズルから噴射される。

この装置を作る上で、クリアすべき課題として以下のようなことが考えられる。

- ・ 光学的に滑らかで時間的に安定な液膜を生成できるノズルが必要
- ・ ノズルの目詰まりを防ぐため、ダストフリーな循環系の構築が必要

ノズルについては、次節にて述べる。

レーザーを照射したときに炭素によるごみが発生してしまう。その炭素のごみや、その他のほこりなどのごみを除去するために、MILLIPORE のメンブレンフィルターを用いた。フィルターの孔径は  $10 \mu\text{m}$  のものを使用した。

また、フィルターのコンダクタンスの変化によって、ポンプの圧力が変わり、液膜のパラメータが変化するのを避けるため、ノズル用のポンプと、フィルター用のポンプを分けることとした。

ポンプはチューブポンプを用いることとした。チューブポンプは、弾性のあるチューブの一点をローラーで押し潰し、ローラーをそのまま移動させてチューブ内部の液体を押し出すことで駆動する。これならば、原理的に真空中でも液体を循環させることが可能である。

使用後のフィルターを見ると、黒くなっていることが確認された。これは、炭素の汚れが除去できていることを示している。

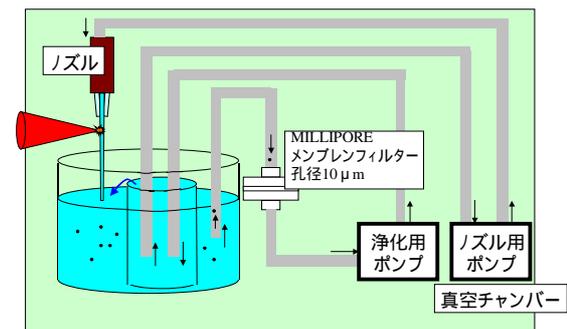


Fig.2 装置の概略

### 3.2 ノズルの試作

表面反射による損失、および時間的な揺らぎをなくすために、生成される液膜が薄くて、表面が光学的に滑らかで、時間的にも安定であるようなノズルを作ること为目标として、ノズルの試作を行った。

方法は、まず、ガラスの板を2枚用意し、間に22 $\mu\text{m}$ のTiのホイルを挟む。このとき、ホイルを複数枚ずらしながら挟むことで、テーパ状の構造を作る。これは、ノズル先端での抵抗を減らし、流量を増やすためである。次に、側面を接着剤で固める。その後、ホイルを引き抜く。これを銅管に接着剤でくっつけることでノズルを作った。上記の作業に加えて、ノズルの先端を研磨して平らにすると、よりきれいなノズルを作ることができる。(Fig.3)

液膜の評価を行うために、干渉計を用いた。

実際に必要なのは、レーザーのスポットサイズ程度、つまり大きく見積っても100 $\mu\text{m}$ 程度であればよい、Fig.4を見ると干渉縞が確認できるので、その程度の範囲は光学的に滑らかであると考えることができる。次に時間的な安定性についても、1分間ほど連続的に撮影してみたところ干渉縞の変化が全く見られなかった。そのため十分安定であると考えらる。Fig.4

現在はノズルの先端の幅は50 $\mu\text{m}$ が限界である。今後改善する余地はあると思われるが、今後は市販のジェットノズルを用いることも考える必要がある。

作ったノズルを用いて、シリコンオイルの粘性の影響についてテストを行った。

粘性が大きくなると、ノズルでの抵抗が大きくなるため、オイルが流れるかどうか、十分な勢いが保てるかどうか液膜が発生できるかどうか確かめる必要があるからである。

信越シリコン製のジメチルシリコンオイル KF96-10csとKF96-100csについてテストしてみた。

KF96-100csでは50 $\mu\text{m}$ のノズルで液膜を形成することができなかった。KF96-10csでは、50 $\mu\text{m}$ の場合でも、きれいに液膜を発生させることができた。Table.2にまとめておく。

ポンプの圧力は約6atm、ノズルの500 $\mu\text{m}$ 以下の幅になっている部分の長さは約7mm、ノズルの横幅は4.5mm

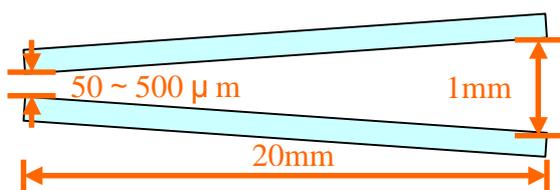


Fig.3 ノズルのパラメータ

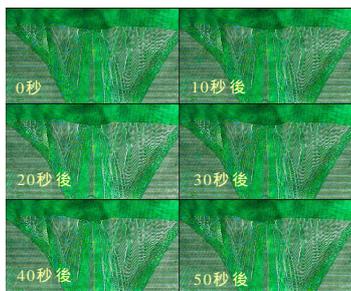


Fig.4 液膜の評価

	動粘度 ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	蒸気圧(室温)	ノズルの先端の幅		
			500 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
KF96-100cs	100	$10^{-3}$ torr 以下			x
KF96-10cs	10	$10^{-5}$ torr 以下			

Table.2 粘性の影響

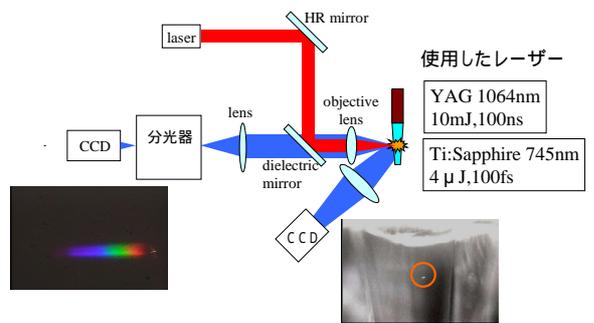


Fig.5 温度の測定

### 3.3 温度の測定

Fig.5のような光学系を作り、実際にレーザーを照射したとき、どれくらいの温度になるのかを調べた。

まず、レーザーが誘電体多層膜ミラーで反射されて、対物レンズで液膜に集光し、液膜を発光させる。発光点から出た光はまた同じ対物レンズを通して平行光線になり、誘電体多層膜ミラーを透過して、分光器に入るようになっている。

レーザーのスポットの様子は斜めからCCDカメラで撮影した。

以下に示す2種類のレーザーで実験を行った。

YAGレーザー、パルス幅100ns,10mJ

Ti:Sapphireレーザー、パルス幅100fs,10mJ

スペクトルのピークの波長を調べるために波長校正のされた分光器を用いたが、スペクトルの形を観測するためには、同時に広い帯域を見る必要があったため、分光器に代えてプリズムを使用しての観測も行った。

#### 3.3.1 スポットサイズ

撮影した画像から、発光する点の大きさを見積もってみた。

斜めから映像を撮っているため横方向についてはスポットが歪んでしまっている。そのため、縦方向の大きさについてスポットサイズの見積もった。(Fig.6)

発光点の大きさを見積もると、およそ直径20 $\mu\text{m}$ であることがわかった。スポットサイズは10 $\mu\text{m}$ 以下を目標としていたが、それよりも大きくなってしまった。

それは、液膜の厚さが50 $\mu\text{m}$ と最初の予定10 $\mu\text{m}$ よりも厚いせいである。

使用したレンズの焦点距離は7.32mm、ビーム幅を6mmとすると、液膜の表面でのスポットのサイズは20 $\mu\text{m}$ 程度となる。よって上のスポットサイズは妥当であるといえる。

発光点の大きさを小さくするためには液膜を薄くする必要があることが、実験から確かめられた。

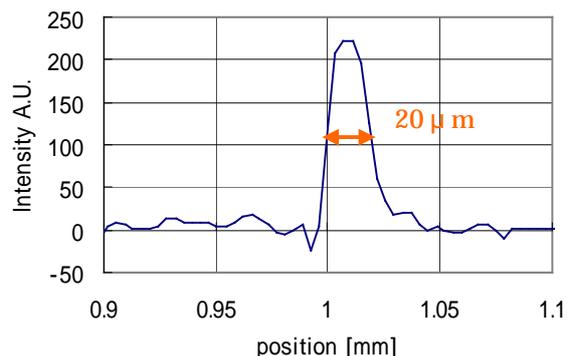


Fig.6 スポットサイズの見積もり

### 3.3.2 スペクトル

得られたスペクトルをレーザーごとに比較してみる。

#### YAG レーザー100ns の場合

非常に弱くではあるが、発光を確認した。しかし、狭い帯域でしか得られず、黒体輻射のスペクトルであるとは、見なせないものであった。黒体輻射ならば、もっと広いスペクトル幅となるはずである。そのため、温度を見積もることはできなかった。

発光点の色は肉眼ではオレンジ色に見えた。

スペクトルのデータを Fig. 7 に示す。

899nm にピークのあるスペクトルがあるのが確認された。

#### Ti:Sapphire レーザー100fs の場合

Ti:Sapphire の場合には YAG の場合よりも明るく、白い発光を確認できた。

黒体輻射とのマッチングを行うと、8500K と見積られた。(Fig. 8)

そもそも、パルス幅が 100ns の場合と 100fs の場合では、はじめに起こる吸収の仕方が違う。

100ns の場合には、1 光子によるバンド間遷移が起こる。

超短パルスレーザーの場合には、はじめに、多光子での吸収が起こるため、はじめに起こる吸収の確率そのものが違う。

原子がイオン化されると、今度は逆制動輻射過程による吸収が起こる。これは自由電子密度に比例するため、相対的に超短パルスの方が吸収率が高くなる。

YAG の場合に白い発光が得られなかった原因が、吸収率にあると考え、液膜を透過したレーザーのパワーを調べて吸収率を求めてみた (Fig. 9)。

シリコンオイル KF96 100cs の屈折率は  $n=1.399$ 、

パワーの反射率は、 $|R|^2 = 0.0277$

液膜と空気との界面は 2 つあるので 2 倍して、約 5.5% によって吸収量は 2.5% 程度と見積もられる。

パルスエネルギーは 10mJ だから、吸収量は、250  $\mu$ J、この量は一見最初に見積ったレーザースペック 8  $\mu$ J よりも大きいように見える。しかし、パルス幅が 100ns であるため、体積は約 1000 倍に膨張すると考えられるので、エネルギー密度は  $2.5 \times 10^8 \text{ J/m}^3$  となり全然足りてない。

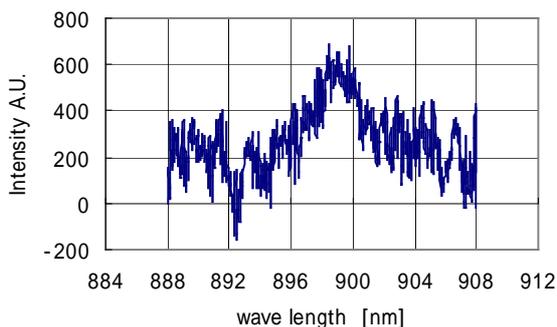


Fig.7 発光点のスペクトル (YAG の場合)

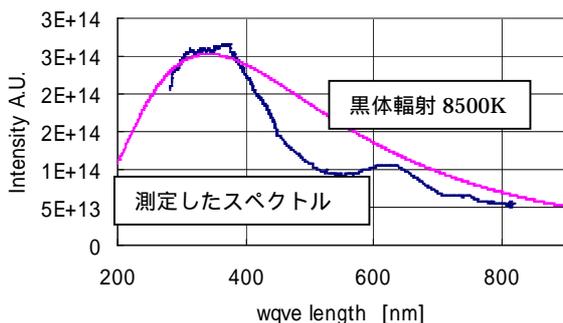


Fig.8 発光点のスペクトル (Ti:Sapphire の場合)

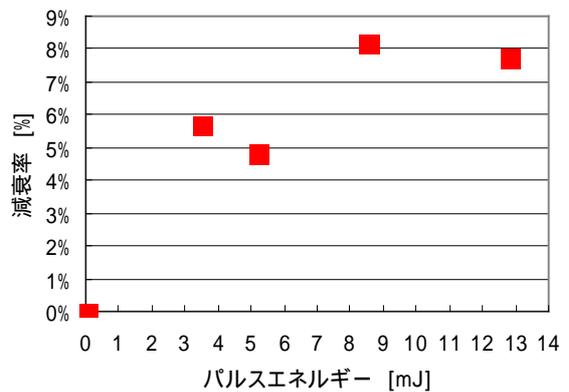


Fig.9 YAG の吸収率

## 4 まとめ

### 4.1 本研究の成果

厚さ 50  $\mu$ m で表面が滑らかで時間的にも安定な液膜を出すことができるノズルを作った。

フィルタを用いることで、安定的に液膜を生成できるノズルシステムを作ることができた。

100fs の Ti:Sapphire レーザーの場合には、白い発光を確認できた。しかし、100ns の YAG レーザーの場合には、黒体輻射の発光を確認できなかった。発光が得られなかった理由として、まず、吸収率が 2.5% と低いこと、また、パルス幅が長いと、加熱中に体積が膨張してしまい結果的に温度が低くなってしまっていることなどが考えられる。

装置の小型化のためには、超短パルスレーザーを使うわけにはいかない。マイクロチップレーザーで可能な程度のスペックと考えると数十  $\mu$ J で、10ns くらいのスペックで発光させなければならない。そのためには、今回用いたパルス幅 100ns の YAG レーザーのようなパルス幅の長いレーザーで発光強度を上げることが課題である。

### 4.2 今後の展望

YAG の場合、吸収率は 2.5% 程度と非常に低い値である。それは、シリコンオイルが透明な媒質であるためである。そこで、混ぜものをすることで、吸収率を上げることが考えられる。

パルスエネルギーが数十 mJ のレーザーで 20000K の目標を達成しようと思った場合、吸収率を上げることはなんとしても必要である。

他にはノズルを変えることが考えられる。現在は、液膜の厚さは 50  $\mu$ m である。これを 10  $\mu$ m まで薄くすれば、加熱される体積が小さくなるため、より強度が上がる事が考えられる。

また、別の可能性として、ターゲットの形を液滴にすることが考えられる。液滴界面で屈折が起こり、ちょうどレンズのようなことが起こって、より集光強度を高められる可能性がある。

簡単にではあるが、試しに液滴を出すノズルを作り、レーザーを照射してみた。その結果、YAG レーザーの場合でも白い発光を確認できた。液滴の大きさは直径 2mm くらいである。このままでは液滴の大きさが大きすぎて、点光源としては使えない。もっと小さい液滴を作ることができれば、うまくいく可能性は大いにある。



Fig.10 液滴の発光

### 参考文献

- [1] 米田 仁紀, プラズマ・核融合学会誌 Vol. 79, p.226 (2003)
- [2] 遠藤 彰, プラズマ・核融合学会誌 Vol. 79, p.240 (2003)
- [3] Yu. P. Raizer, Ya B. Zeldovich, Physics of shock waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena (1966)