

# レーザ誘起蛍光法によるレーザ加工時の ブルームのインプロセス計測

慶応義塾大学 理工学部 電気工学科

助教授 神成文彦

(平成3年度奨励研究助成 AF-91033)

## 1. 研究の背景

高強度パルスレーザを固体表面に集光した際に表面から飛散するアブレーション・ブルームは、高分子材料のアブレーション機構の解明、セラミックス、金属のレーザスパッタリングによる超伝導薄膜作成プロセス等の診断において活発に研究されている。

一方、レーザによる加工はCO<sub>2</sub>レーザによる切断、穴あけのほかにも、焼き入れ、合金化、マーキング等の表面改質加工も含めて広く実用化されている。しかし、その加工プロセスの制御に関しては、加工後の試料形状、加工速度から経験的に得られたレーザ強度、ガス流量をコントロールしているにすぎない。レーザが次世代加工の加工用具として動くためには、インテリジェント化された上位システムとの間で、加工の途中においてインプロセス制御することが必要である。このときに外部から診断できるパラメー

タとしては、光による表面反射、発光、音、温度、音響波等があるが、いずれのパラメータについても加工後の試料の物性、すなわち表面組成、熱伝導性、電気伝導性、硬度、表面粗さ等との相関をきちんと抑えるためのデータの蓄積が必要である。

本研究の目的は、高分子、金属等のパルスレーザ加工時に発生するブルームをインプロセス測定してその特性を実時間で調べるためのレーザ誘起蛍光診断法の技術確立することにある。

## 2. 研究成果の概要

### 2.1 高分子材料アブレーション・ブルームのレーザ・シャドウグラフ測定

シャドウグラフ法を用いたレーザ・アブレーション・ブルーム観測の実験配置を図1に示す。アブレーションに用

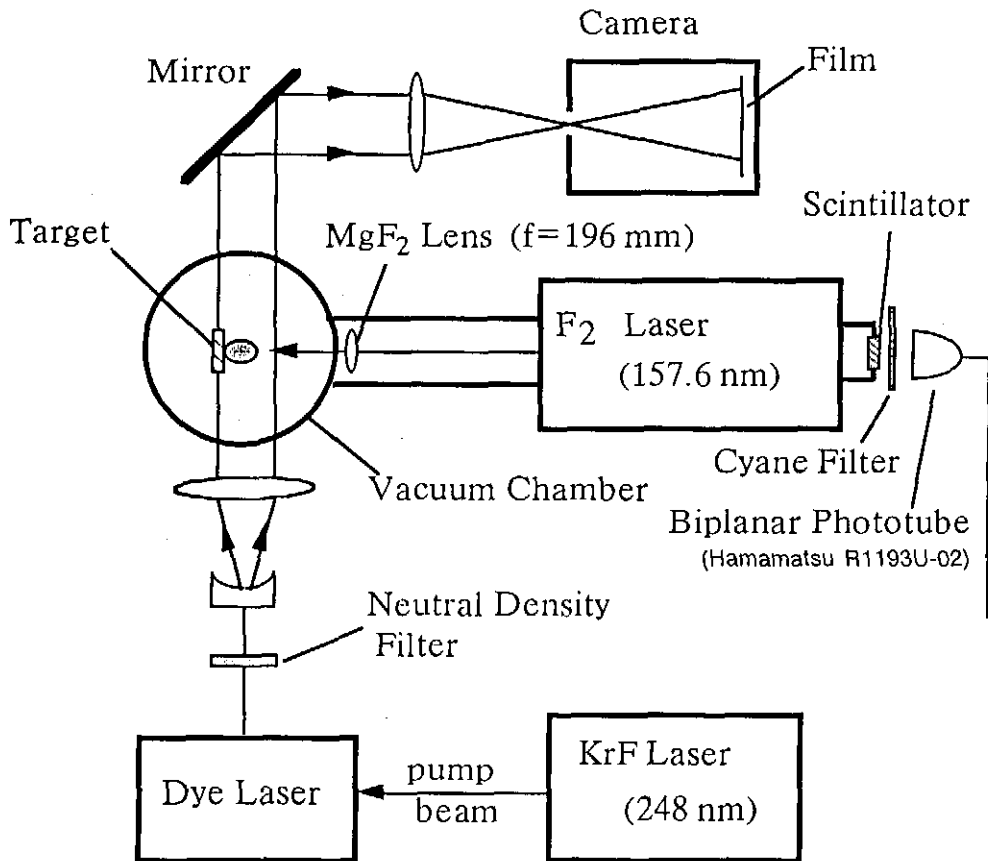


図1 F<sub>2</sub>レーザ・アブレーション実験及びレーザ・シャドウグラフ測定の実験セットアップ

いたF<sub>2</sub>レーザーは、波長157nmの真空紫外域の光源であり、光子エネルギーが7.8eVと高いためにテフロン材料のような結合エネルギーの高い試料もアブレーション加工可能なことが我々によって報告されている。F<sub>2</sub>レーザーは酸素分子の吸収を受けるため、アブレーション加工は真空排気後N<sub>2</sub>ガスで満たした容器内において行なった。また、レーザー光路も真空排気した。F<sub>2</sub>レーザーの集光には焦点距離196mmのMgF<sub>2</sub>レンズを用い、レーザー照射強度はレーザー装置の全反射鏡からの透過光を測定して見積った。実験においては、試料表面は焦点よりも後方に配置したため、F<sub>2</sub>レーザーの照射面積は0.02cm<sup>2</sup>である。集光レンズ透過後のレーザー出力は、通常約5mJであり、したがって照射強度は約500mJ/cm<sup>2</sup>である。実験においては、レーザー装置自体の出力を充電電圧

等で変化させて行なった。シャドウグラフ法に用いた光源は、KrFレーザー励起色素（ローダミン6G）レーザーである。斜入射回折格子を用いた共振器により波長可変であるが、シャドウグラフ法においてはその要求がないため、色素の中心波長～590nmで用いた。色素レーザーは、NDフィルタによって減光された後、平凸レンズ（f = 600mm）、平凹レンズ（f = -20mm）によって30倍に拡大して加工セルに導入し、ブルームを通過した後、焦点距離90mmのレンズでピンホール（0.4mm）に集光し背景光を除去しPolaroid667フィルムでシャドウグラフを撮影した。

テフロンを用いた実験結果について述べる。図2に得られたシャドウグラフの時間変化を示す。F<sub>2</sub>レーザー照射後約40μsまでは衝撃波が観測され、一方、次第にブルームが

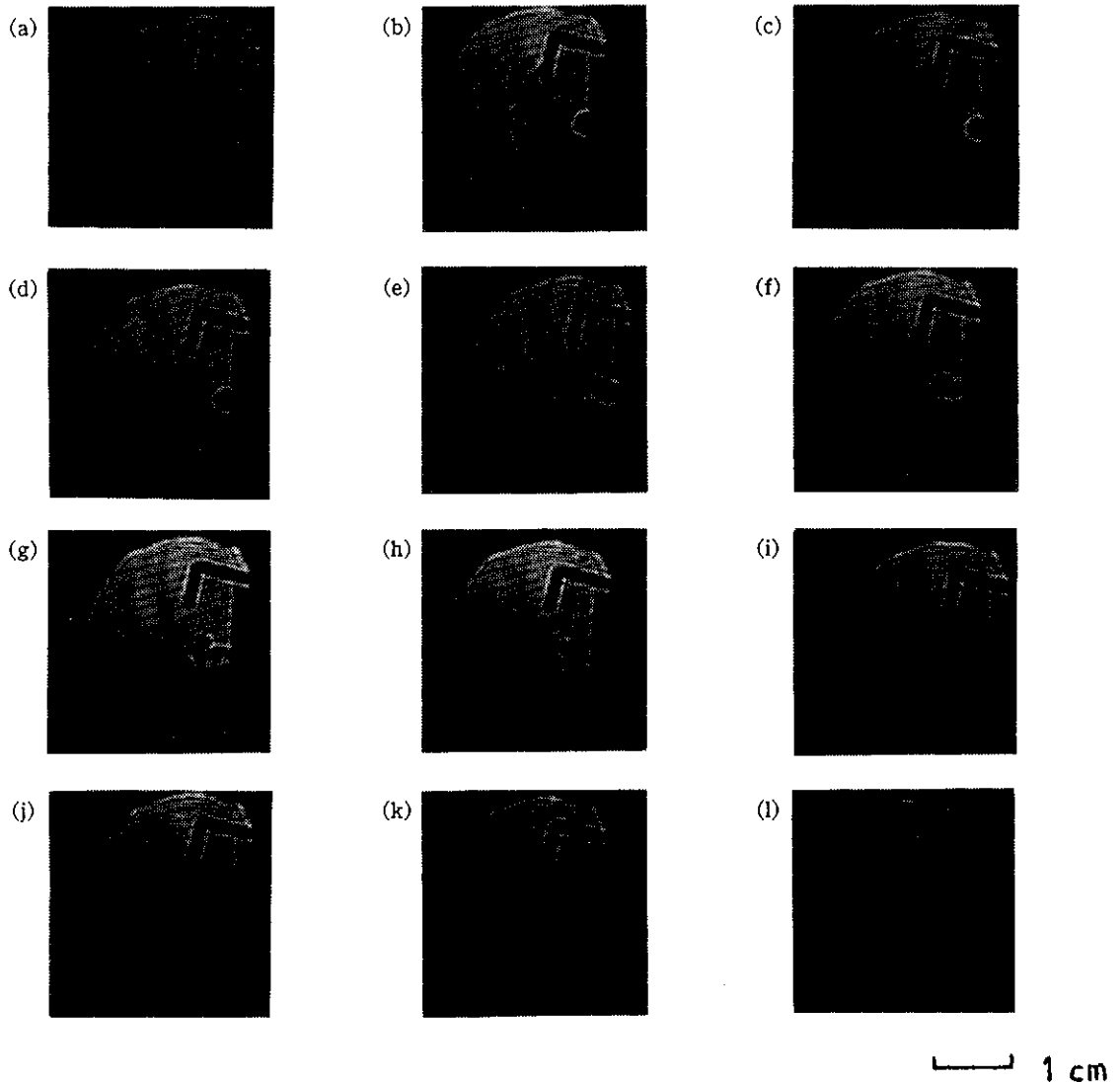


図2 テフロンのアブレーション時のブルーム形状の時間推移  
(写真中のL字状の影はスケーリングのためのものである。)

表面から飛び出している様子がわかる。図3は、照射後25~28 μsの衝撃波速度のレーザ照射エネルギー依存性をまとめた結果である。330~470m/sの範囲で照射エネルギーの増加に従って衝撃波速度の僅かな上昇がみられる。その傾きは0.16 (m/s) / (mJ/cm<sup>2</sup>)であった。図4にプルーム先端の位置の時間推移を示す。500mJ/cm<sup>2</sup>程度の照射強度においては、プルームは試料表面から離れることなく吹き出し続けることがわかり、他の有機材料とは異なった特性を示している。図5には、レーザ照射後27 μsでの衝撃波とプルームの速度のN<sub>2</sub>ガス依存性を示す。衝撃波は圧力に強くは依存しないがプルームは圧力減少による飛び出し速度の増加が測定された同様の実験は、PET (polyethylene terephthalate)、ポリイミドについても行なった。

理想的な点爆発においては、衝撃波の半径Rは、比熱に依存する定数k、エネルギーE<sub>0</sub>、気体密度ρ<sub>0</sub>、時間tに対して $R = k (E_0 / \rho_0)^{1/5} t^{2/5}$

で記述される。しかし、本実験のレーザ照射エネルギー範囲においては、時間の項はtに比例した関係が得られた。一方、プルームについてはレーザ照射エネルギーの増加や雰囲気ガスの圧力低下による飛び出し速度の増加が衝撃波よりも敏感に作用しており、その移動距離に関しては時間tについてほぼt<sup>2/5</sup>に比例した結果となった。

## 2. 2 金属アブレーション・プルームの誘起蛍光計測

実験配置は、色素レーザによって誘起された蛍光を測定するための分光器を加工セルに直結した以外は、シャドウグラフ法と同じである。Alについては、波長394.4nmの3<sup>3</sup>P<sub>1/2</sub>-4<sup>2</sup>S遷移を色素レーザで励起したときの4<sup>2</sup>S-3<sup>2</sup>P<sub>3/2</sub>波長396.2nmを観測した。またCuにおいては、Cu基底準

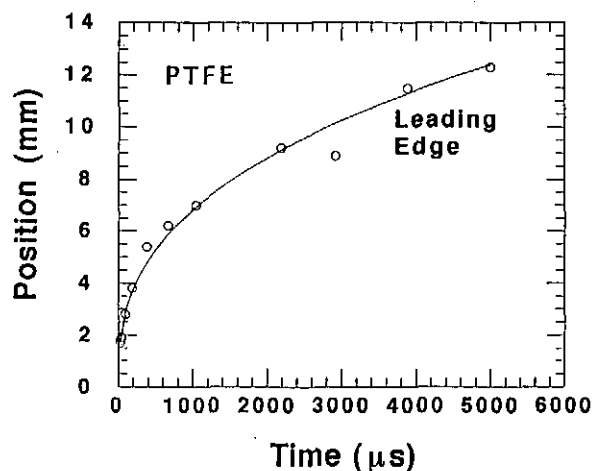


図4 テフロンのアブレーション時のプルーム先端の位置の推移 (レーザ照射エネルギーは、~500mJ/cm<sup>2</sup>)

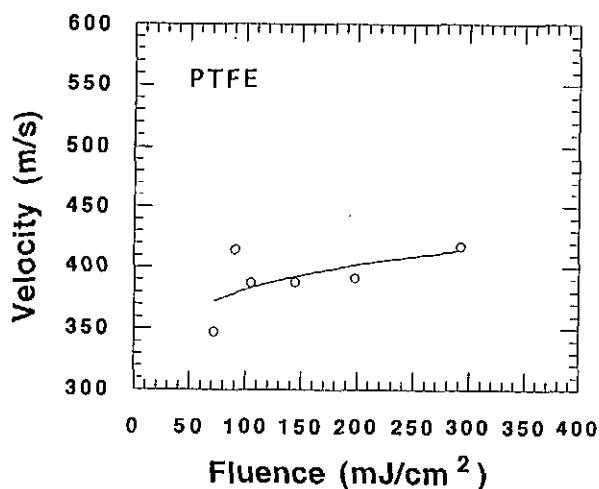


図3 テフロンのアブレーション時の衝撃波速度のレーザ照射エネルギー依存性 (測定時間はF<sub>2</sub>レーザ照射後27 μs)

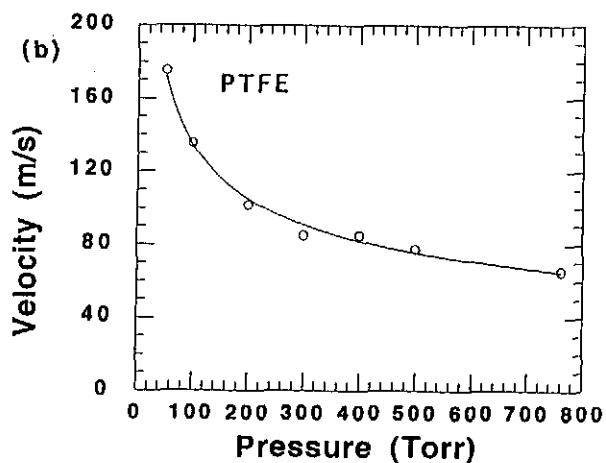
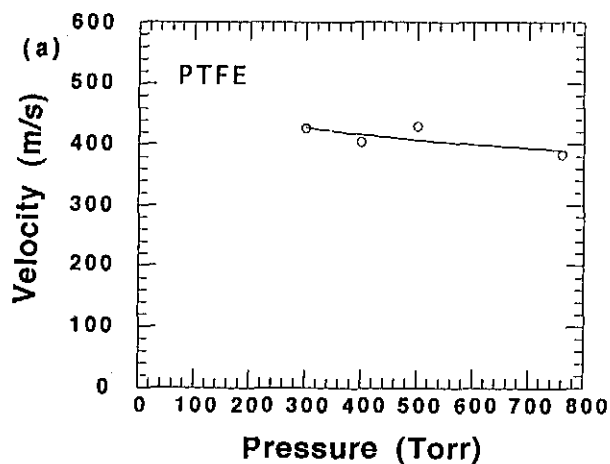


図5 テフロンのアブレーション時の衝撃波速度 (a) とプルーム進展速度 (b) の雰囲気ガス圧力依存性 (レーザ照射エネルギーは、~500mJ/cm<sup>2</sup>、測定時間はF<sub>2</sub>レーザ照射後27 μs)

位を $4D_{1/2}^0-2S_{1/2}$  (22.6nm)、 $Cu^+$ を $^3P_2^0-^3D_3$  (224.7nm)、 $Cu_2$ を $B^1P_u-X^1S^+$  (460.7nm) によって測定した。本実験では、アブレーション用の $F_2$ レーザー強度が十分には強くなかったため、照射強度の変化による各蛍光遷移強度の変化を詳しく測定するには到らなかったが、色素レーザーの入射位置、時間を制御することで空間及び時間分解のブルーム構成粒子観測が可能であることがわかった。銅については、表面においてスパークが鮮明になると $Cu^+$ の蛍光が飛躍的に増大し、一方 $Cu_2$ 、 $Cu^0$ の蛍光は減少した。こういった蛍光の変化が加工後の表面状態と明確に相関関係を有していれば、加工のその場制御に発展できるものと思われる。また、酸化物超伝導薄膜や磁性体薄膜のレーザーアブレーション

による作成においても、イオン種、分子、クラスターの分布を本手法によって観測することによって膜質を最適化するためのレーザー照射強度、雰囲気ガス、レーザー波長を決定することができよう。

### 3. おわりに

空間・時間分解可能な、色素レーザーをプローブとして用いた手法により固体のレーザー加工時のブルームのその場計測を行なった。レーザー照射強度による蛍光強度、ブルーム形状の変化が測定できたことより、今後これらと加工後の試料特性間の相関を明確にすることによって加工をリアルタイムで制御できるものと思われる。