

1. 緒言

筆者らは、既にレーザ照射時に試料表面より発生するブルームの挙動について各種光学的測定結果を述べて来た。^{1),2)}今回はブルーム発生現象及び試料熔融現象について、非常に早い時間分解能での写真観察法による測定結果を述べる。

2. 実験方法

本研究ではFig. 1に示すような光学系配置でブルーム噴流の瞬間シャドウグラフ及びシュリーレン写真撮影を行なった。光源には発光時間40ns以下のパルスルビレーザを用い、カメラ前方にはルビレーザ用干渉フィルタ ($694 \pm 0.5 \text{ nm}$)を装着してブルームからの強い発光の影響を防止した。なお、撮影タイミングは自作のディレイタイマにより、YAGレーザ照射開始後0~10msの範囲でルビレーザを単発々光させて、瞬間静止像を撮影した。また、YAGレーザ照射中の熔融部径の時間変化はFig. 1と同じ光学・制御系を用い、Fig. 2に示すようにルビレーザを試料表面に斜め入射させ、その反射光により熔融池の像を撮影した。

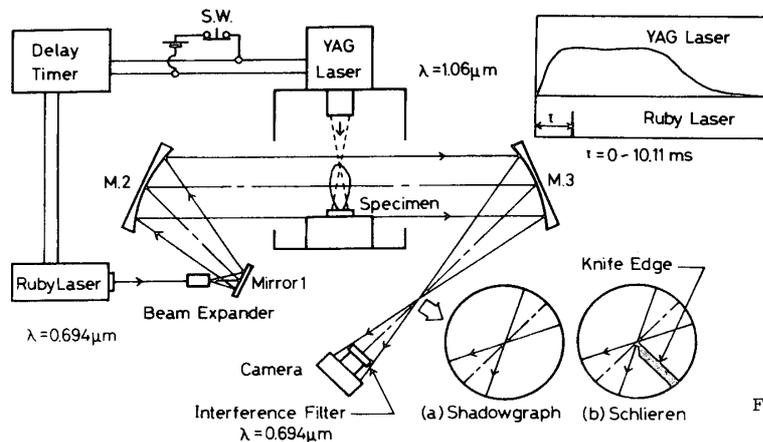


Fig. 1 Optical arrangement of shadowgraph and Schlieren photography for observation of laser plume

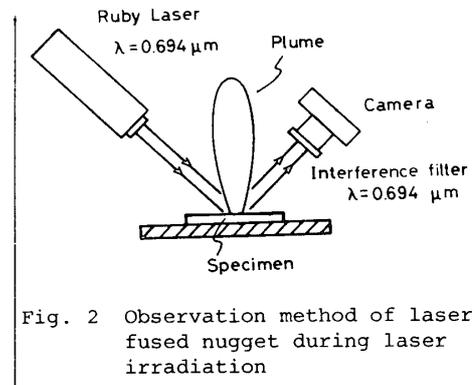


Fig. 2 Observation method of laser fused nugget during laser irradiation

3. レーザブルームの噴流構造

Fig. 3はチタンターゲットの場合のYAGレーザ照射開始後のブルーム発生・伝播状態を示す代表的なシャドウグラフ(上列)及びシュリーレン(下列)像である。写真下部の時間はレーザ照射開始よりの経過時間を示すが、この例のように焦点はずし距離が大きくスパッタリングを伴わないブルーム発生条件では、レーザ照射開始後暫くの遅れ時間を経たあと試料表面は蒸発し始め、蒸気流(ブルーム)は急速に上方へ伝播する。この際、ブルーム伝播とともに先端部は次第に渦輪を形成し松茸状の形を呈することが特徴である。シャドウグラフ写真では中心部に高密度・高濃度のコア状流れが明瞭に認められるが、一方シュリーレン写真には金属蒸気流の周辺にシース状の比較的透明な流れが認められる。分光測定の結果、金属スペクトルはコア部でのみ検出されシース部では原子スペクトル・分子スペクトル共に観察されない事、及び後述の熔融池観察よりコア径はほぼ熔融径に等しい事実より、ブルームは中心部の高密度金属蒸気流とそれに押し退けられ圧縮された周辺気体流の二重構造であることが判明した。さらに、ブルーム先端部の傘状部分では金属蒸気流と周辺気体との混合が生じていることが分かる。

4. スパッタリング発生現象

試料表面に於けるレーザの照射エネルギー密度が高い場合には著しいスパッタリングが生じるが、Fig. 4はこのような場合のシャドウグラフ及びシュリーレン写真を示す。この場合、高エネルギー密度のため蒸発開始は前図の場合よりも早くなるとともにブルーム

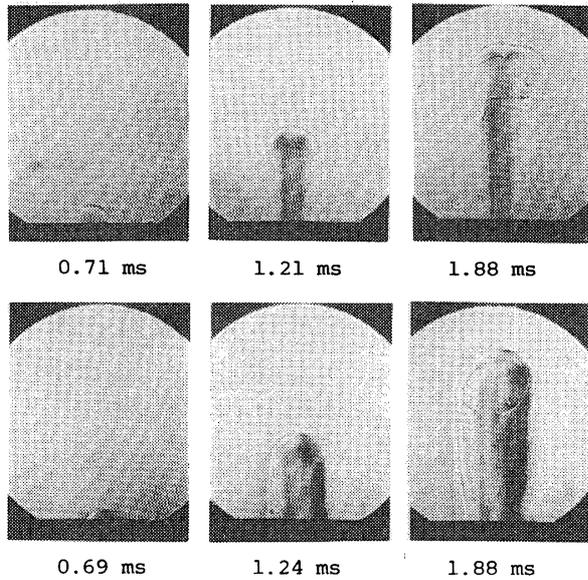


Fig. 3 Shadowgraph (upper) and Schlieren (lower) pictures (25 J/p, $f_d=24$ mm, Ti)

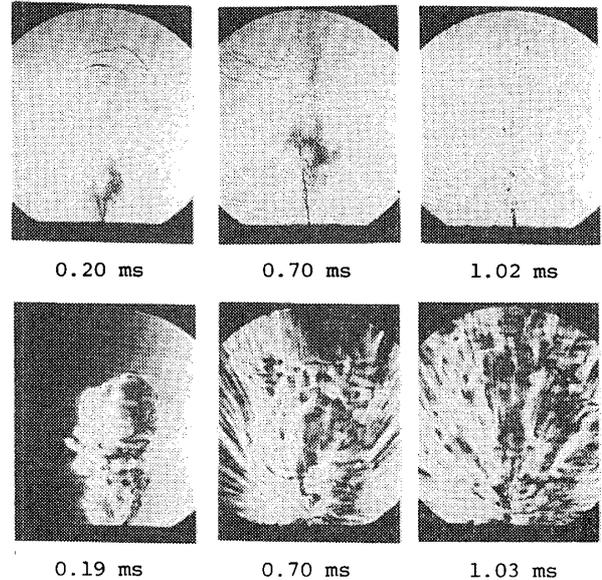


Fig. 4 Shadowgraph (upper) and Schlieren (lower) pictures (36.5 J/p, $f_d=0$ mm, Ti)

伝播速度も高速となって強い乱流状態となる。ここでスパッタ発生に関する最も大きな特徴は、初めブルームのみが発生し暫くの後には溶融池より細い糸状の液柱が噴出しその後微細な粒子に分かれて飛散することである。液柱噴出後はブルームの発生は明瞭でなくなる。また、液柱放出前後から周辺気体は著しく乱れ、シュリーレン法では液柱の挙動は殆ど観察できない。従来、スパッタリングの発生は熱衝撃によって照射後すぐに微細な破片として飛び散るとされていたが、今回の観察によりパルスレーザー照射開始後かなりの時間が経過した後の液柱の発生が原因であることが明らかとなった。

5. レーザ照射溶融部径の時間的变化

Fig. 5は前掲Fig. 2の方法によって計測したチタン試料のレーザー照射溶融部径の時間変化をスパッタが発生する場合と発生しない場合について示す。まずブルームのみが発生する条件では、照射部はある臨界時刻 t_m で溶融温度(1,453 K)に達し、溶融径はM点で示す大きくなる。その後溶融部径は $\log t$ に比例して大きくなるが、B点で蒸発温度(3,235 K)に達してブルーム発生が始まる。しかしブルームが発生すると照射部の溶融部径は若干増えた状態で一定値を採るようになる。これは蒸発により熱伝導を上回る潜熱損失があること及び発生したブルームにより入射エネルギーが有効に試料に到達しなくなる結果と判断される。一方、スパッタが発生する場合の径の変化は2段階になっていることが特徴的である。前半の過程はブルームのみが発生する場合と同じであるが、後半の液柱が吹き出しスパッタが発生している過程では径が著しく増加する。この段階では溶融部に深い穴が開きそこから液体噴出が観察された。従って、径の拡大は高温融体噴出時の対流熱伝達によって生じたものと推定される。

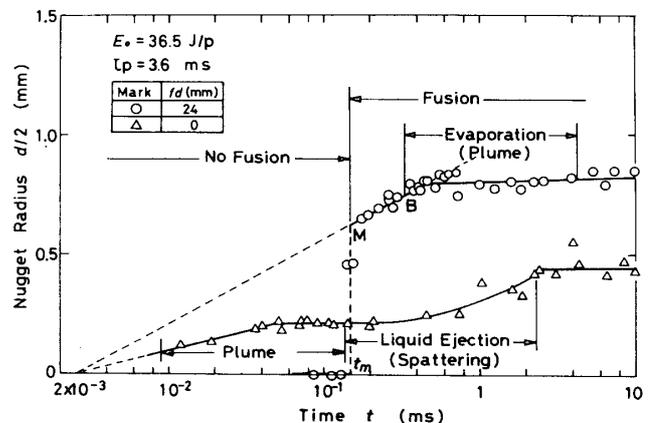


Fig. 5 Change of nugget radius during laser irradiation on Titanium plate

文献

- 1) 本会講概 - 第33集 - p.20-21
- 2) 同上 - 第34集 - p.74-75