C111

レーザー誘起マイクロ衝撃波の可視化計測

藤浪 賢[○](埼玉大院), 平原 裕行(埼玉大院), 川橋 正昭(埼玉大院)

Visualization of the Laser Induced Micro Shock Wave

Masaru FUJINAMI, Hiroyuki HIRAHARA and Masaaki KAWAHASHI

ABSTRACT

A micro laser induced shock wave in a small region was observed by shadowgraph technique. The shock wave was produced on a metal surface when the metal was irradiated by a pulse laser. Titanium and SUS304 was used as the target. The laser used for the irradiation was $\lambda=532\text{nm}$ in wavelength and its irradiation intensity, I_0 was changed from 630 to 7690GW/m^2 . The flow visualization was carried out by using a laser shadow graphic technique. The shock mach number was calculated from these images. We obtained the shock wave energy conversion coefficient, which is based on Taylor's self-similar analysis. The experimental results showed that the coefficient was 0.08 to 0.2 for the relatively low irradiation intensity.

Keywords: Micro shock wave, Laser abrasion, Shadow graphic analysis

1. 緒論

流体中や操作単位に対して高エネルギーの状態を生成することは、非常に重要な技術である。流体中に高エネルギーの領域を瞬間的に生成する技術としては衝撃波を利用することが有効であり、近年、様々な領域において応用が広がっている。衝撃波を誘起するための方法の一つにレーザーを集光する方法がある。高出力のパルスレーザーを集光した場合には非常に高いエネルギー密度を得ることができる^{1,2)}。この種の応用としては、レーザーショックピーニング、レーザープラズマスラストなどがある。これによれば、非常に小さな領域に高密度のエネルギーを集中させ、これによって発生した衝撃波を利用して流体にエネルギーを輸送することができる。レーザーの集光ターゲットとしては、対象とする流体そのものの場合のほか、金属や高分子材料などが用いられている。

本研究の目的は、様々な領域、操作対象に対して、容易にアクセス可能なマイクロ衝撃波発生装置を開発することである。これにより、微小領域の流体制御、分子操作、生体への応用などが、周囲への汚染を行うことなく可能となるであろう^{4,5)}。本研究での衝撃波の発生方法は、金属のアブレーションを利用したものであり、効率よくレーザーのエネルギーを衝撃波に転換することができる。今回の実験での主たる目的は、より低いエネルギーレベルでの衝撃波の発生限界を確認することである。レーザーを照射した場合の擾乱の発生には、被照射物質のプラズマ化のみではなく、流体自身の励起も関連し複雑となるが、今回の実験では、金属のプラズマ化を利用

した衝撃波の発生のみを計測対象とする。実験では、プラズマ化を可視化計測によって確認し、それによって発生する衝撃波の伝播速度を計測する。爆風と同様にほぼ自己相似解に即して減衰する。測定された衝撃波の伝播速度によって、Taylorの自己相似側を適用して衝撃波背後の流体に加えられたエネルギーを推定し、レーザーの照射エネルギーに対して衝撃波発生に転換されたエネルギーの割合を求めて、本手法の基礎データと基本的な設計指針の一つを求めたのでここに報告する。

2. 実験装置

Fig.1に実験装置概略を示す。衝撃波を発生させるためのレーザーには、Nd:YAGレーザー(NewWave社, Solo III, $I_0<50\text{mJ}$, $\lambda=532\text{nm}$, $\Delta t=5\text{ns}$)を使用した。今回用いた金属は2種類で、TiおよびSUS304である。試験片の大きさはいずれも $50\times 25\text{mm}$ 、厚さ 0.3mm である。レーザーの集光スポット径は $\phi=1\text{mm}$ とし、集光には $f=100\text{mm}$

Fig. 1 Experimental setup

Table 1 Electromagnetic properties of target metal

		SUS304	Ti
Conductivity	σ S/m	9.90E+06	1.80E+06
Permittivity	ϵ_0 F/m	8.85E-12	8.85E-12
Permeability	μ H/m	1.26E-06	1.26E-06
Extinction coefficient	α	5.42E+07	6.33E+07
Absorption coefficient	β	0.34	0.37
Skin depth	δ nm	18.4	15.8

の平凸レンズを用いた。実験での照射エネルギー密度は $I_0=630\sim7690\text{GW/m}^2$ の範囲で変化させた。

衝撃波の可視化はシャドウグラフ法により行う。可視化光源は Nd:YAG レーザー(NewWave 社, SoloIII)を使用し、画像は CMOS カメラ(IDT 社, XS-5)により取得した。

Table 1 に用いた金属の電磁気学的な物性を示した。

3. 実験結果および考察

Fig.2 は衝撃波の可視化写真を示す。撮影時刻は $t=0.25\text{ }\mu\text{s}$ 、入射エネルギーは $I_0=1270\text{GW/m}^2$ である。

Fig.2(a)は Ti, (b)は SUS304 の場合を示す。一連の可視化写真から求めた衝撃波面位置を Fig.3 に示す。Fig.3(a)は水平方向, (b)は垂直方向に伝播する衝撃波波面の位置の時間的な変化を示したものである。撮影倍率が大きいため、衝撃波の波面を正確に決定するのは困難であるが、光が衝撃波によって回折を受け暗部の領域の先端を波面として計測した。レーザーの強度の分布はガウス分布を持つものと考えられ、発生直後の衝撃波面はその強度分布に影響を受けると考えられる。衝撃波の水平方向と垂直方向の伝播速度には当然のことながら若干の違いが見られる。これらの衝撃波の伝播位置の実験点を近似曲線で表し、その勾配から衝撃波マッハ数を求めた。実験時の室温差から生じる誤差は、基準音速で無次元化することによって補正を行っている。得られたマッハ数から、Taylor の自己相似解に基づき衝撃波変換効率 $\eta_{bw}(=E_{bw}/I_0)$ を求めることができる。ここに、 E_{bw} は、下の式によって求められる自己相似解に基づいて算出される、気体のエネルギーである。

$$Us = \frac{2}{\theta+3} \left(\frac{\gamma(\theta+3)^2}{4J_0} \frac{E_{bw}}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{\theta+3}} t^{\frac{\theta+1}{\theta+3}}$$

I_0 は、レーザーの照射エネルギーである。衝撃波は平面波($\theta=0$)として扱っている。Fig.4 に入射エネルギーに対する衝撃波変換効率を示す。 $I_0=7690\text{GW/m}^2$ の結果は、以前に行った実験結果で、比較的高エネルギーでの実験結果である。今回の結果は、 $I_0<2000\text{GW/m}^2$ に見られる実験点である。 η_{bw} の値は、金属の光吸収を考慮すると相当に大きな値を持つと言える。また、低いエネルギー密度での値は、大きなばらつきを見せている。これは、エネルギー密度が下がるにつれて、エネルギーの転換に空間的な非一様性が発生するためであると現段階では考えている。

Fig. 2 Shadowgraphic images. (a)Ti, (b)SUS304, $t=0.25\text{ }\mu\text{s}$, $I_0=1270\text{GW/m}^2$

Fig. 3 Shock propagation, (a)Horizontal distance, (b)Vertical distance

Fig. 4 Energy conversion coefficient

参考文献

- 1) Marcus, S., Lowder, J.E., Mooney, D.L.: Large-Spot Thermal Coupling of CO₂ Laser Irradiation to Metallic Surface, Journal of Applied Physics, Vol.47, No.7 (1976), pp.2966-2968.
- 2) Nielsen, P.E.: High-Intensity Laser-Matter Coupling in a Vacuum, Journal of Applied Physics, Vol.50, No.6, (1979), pp.3938-3943.
- 3) Hauer, M., Funk, D.J., Lippert, T., Aokauna, W.: Time Resolved Study of the Laser Ablation Induced Shockwave, Thin Solid Films, Vol.453-454, (2004), pp.584-588.
- 4) Fujinami, M., Hirahara, H., Kawahashi, M.: Velocity Measurement of Induced Flow by Laser Shock Peening, Proceedings of the 12th ISFV, (2006) 51.3.
- 5) Hirahara, H., Fujinami, M., Kawahashi, M.: Velocity Measurement of Induced Flow by a Laser Focusing Shock Wave, J. of Thermal Science, Vol. 15, No. 1, (2006), pp.48-53.