

水中レーザーピーニングによる衝撃波現象に関する研究

Study on Shock Wave Phenomena by Laser Peening in Water

○渡辺圭子(東北大流体研), 鳥飼宏之(東北大流体研), 佐宗章弘(東北大流体研),
佐野雄二(東芝), 向井成彦(東芝)

Keiko Watanabe*, Hiroyuki Torikai*, Akihiro Sasoh*, Yuji Sano**, Naruhiko Mukai**

*Shock Wave Research Center, Institute of Fluid Science, Tohoku University

2-1-1, Katahira, Aoba, Sendai 980-8577, Japan

**Power and Industrial Systems Research and Development Center, Toshiba Corporation

8, Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama 235-8523, Japan

Laser shock processing of material confined in water was developed for improving the residual surface stress of metal components. The process changes the stress field from tensile to compressive by means of impulsive pressure, which is produced by laser ablation on a metal surface. In the process, shock waves are generated not only in liquid medium but also in solid medium. In the present study, the shock waves in liquid medium (water) are visualized by using shadowgraph technique, and shock speeds in water and in solid medium (SUS304, thickness:10mm) are discussed.

1. はじめに

金属材料表面に圧縮の残留応力を発生させることができるピーニング技術は、自動車、航空機用部品、化学プラント等の疲労強度向上及び応力腐食割れ防止に有効であり、実用化されている。そのうち、レーザーピーニングは、パルス状レーザーの金属材料表面への直接照射によって生じる高圧のレーザー誘起プラズマと、それに伴い発生する衝撃波を利用して材料表面に圧縮の残留応力層を形成し、応力改善を行う技術である¹⁾。通常、レーザーピーニングは液体媒質中で行われる。これは液体媒質中の方が気体媒質に比べ、アブレーションにより生じるプラズマの膨張を妨げる閉じ込め効果が高く、レーザーのエネルギーを効率よく固体材料への撃力へと変換することができるためである。このレーザーピーニング現象における、撃力形成の詳細なメカニズムは未だ明らかにされておらず、より効率的にレーザーピーニングを行うためには検討すべき点が多く残されている。

そこで、本研究ではレーザーピーニングを水中で行い、その時に形成される衝撃波についてシャドウグラフ法を用いて検討を加えた。

2. 供試材と実験装置の構成

供試材には原子炉の構造材料として使用されている、304系オーステナイトステンレス鋼(SUS304)を使用した。なお、20%の冷間圧延を施すことにより、高速中性子の照射による硬度上昇を模擬した。試験片の大きさは、40mm×60mm、厚さ:10mmの板状とした。

本実験で用いた実験装置の構成を Fig.1 に、レーザーの照射条件を表1に示す。レーザー発振器には、Nd:YAGレーザーを使用し、出力光(近赤外、波長:1.06μm)を水中透過性の高い第2高調波(緑色、波長:532nm)に変換して使用した。レーザー光は反射ミラーによって伝送され、レンズおよび光学ウィンドを介して水槽内の試験片表面に集光され、照射される。また、衝撃波の伝播過程をシャドウグラフ法によって可視化した。光源にはキセノンフラッシュランプを使用し、ハイスピードカ

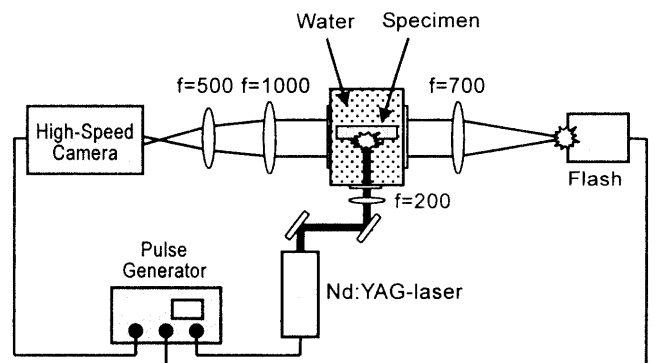


Fig.1 Schematic illustration of the layout for shadowgraph.

Table.1 Laser irradiation conditions.

Laser system	Nd:YAG-laser
Wavelength	532nm
Energy	100-200mJ
Pulse duration	7ns in FWHM
Spot size	φ 1mm
Energy density	128-255kJ/m ²
Peak power density	1.8-3.6GW/cm ²

メラ(NAC製:ULTRA8)で撮影を行った。フレーム間隔は2μsまたは200μs、露光時間は20nsまたは50nsとした。

3. 実験結果

3.1. 水中の衝撃波伝播速度

Fig.2は衝撃波のシャドウグラフ写真である。球状に広がる第一衝撃波が発生した後、試験片内部を透過して裏面から第一透過波が、さらに裏面での反射波が再び試験片内部を通過して表面から第二波となって出てくる。これらが数回繰り返され、Fig.3のような衝撃波の縞が形成される。第一衝撃波以外はほぼ平面となっている。

Fig.4 は, Fig.2 より衝撃波の伝播時間と距離をプロットしたものである. その傾きから衝撃波の伝播速度を求めると Table.2 となり, どの波もほぼ水中の音速 (約 1485m/s, 21℃) とほぼ等しくなり, 音速を超えるような衝撃波は発生していない.

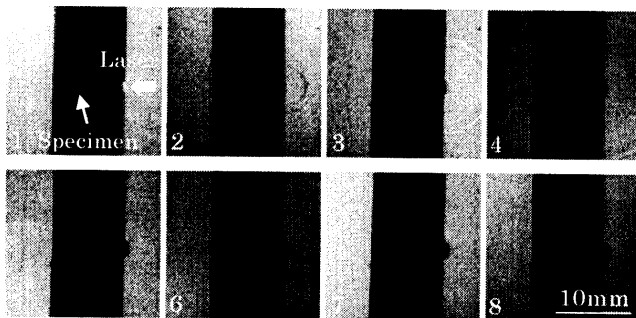


Fig.2 Typical sequential shadowgraphs of shock wave in water (Frame interval = $2\mu\text{s}$, Exposure time = 20ns).

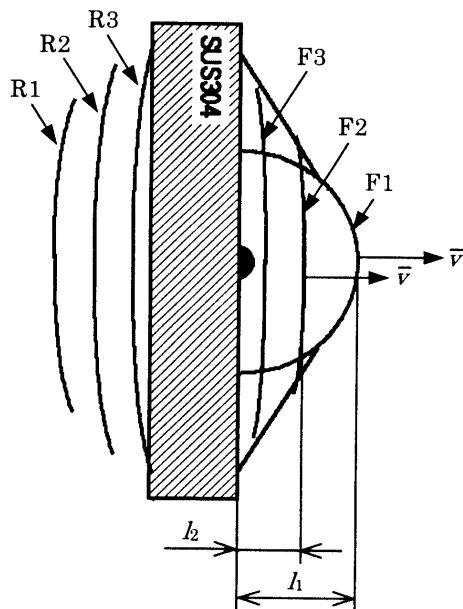


Fig.3 Illustration of propagating of shock wave.

3.2. 固体中の衝撃波伝播速度

レーザー照射による SUS304 表面のアブレーションにより, Fig.3 のように球状衝撃波(F1)が発生する. 一方, 衝撃波は固体中にも伝播し, 裏面での反射により再び SUS304 表面から液中へ波(F2) が透過する. 最初の透過波の表面からの伝播距離を l_1 , 裏面で反射して液中へ出てきた波の表面からの伝播距離を l_2 , 水中での伝播速度実測値を平均したものを $\bar{v}$ とすると, 試験片 SUS304 (厚さ 10mm) 中の衝撃波伝播速度の平均値 $\bar{U}_s$ は (1) 式で近似できる.

$$\bar{U}_s = \frac{10 \times 2 \times \bar{v}}{l_1 - l_2} \quad (1)$$

この結果, SUS 中の衝撃波の伝播速度 $\bar{U}_s$ は約 5300m/s となり, SUS 中の音速より少し遅いが, 有意差

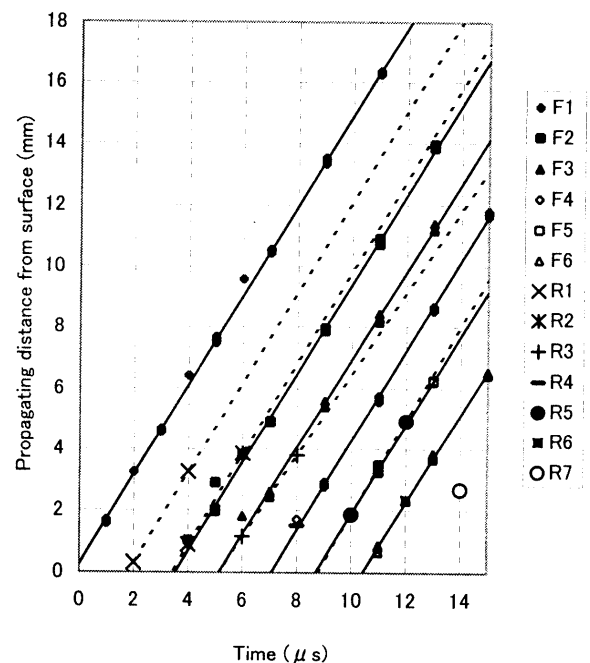


Fig.4 Relation between propagating distance of each shock wave and time.

Table.2 Shock speed in water (m/s).

F:Front surface, R:Rear surface

Front surface	F1	F2	F3	F4	F5	F6
	1466	1458	1431	1423	1452	1493
Rear surface	R1	R2	R3	R4	R5	
	1472	1487	1325	—	1525	

はないといえる.

4. おわりに

本研究では, レーザーピーニングを水中で行い, 形成される衝撃波をシャドウグラフ法を用いて可視化することにより, SUS304 試験片に垂直にレーザーを照射した場合の衝撃波現象について検討した. その結果, 水中と固体中の衝撃波はほぼ音速で伝播することが確認できた. 今後, レーザー照射角度や試験片厚さを変えることにより衝撃波現象の相違を観察し, さらなる検討を重ねる.

引用文献

- 1) Y.Sano, N.Mukai, K.Okazaki, and M.Obata : Nucl. Instr. Meth. B 121(1997)432.
- 2) 林卓夫, 田中吉之助 他 : 衝撃工学 (日刊工業新聞社, 1998)207.