

レーザーピーニングで誘起される 水中圧力波に対する金属板厚の影響

渡辺圭子*†, 佐野雄二**††, 向井成彦**, 鳥飼宏之***, 佐宗章弘*

*東北大学流体科学研究所 〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1

† corresponding author: kei@nana.ifs.tohoku.ac.jp

**株式会社東芝 〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉田町8

†† corresponding author: yuji.sano@toshiba.co.jp

***独立行政法人産業技術総合研究所 〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-1

e-mail: torikai-h@aist.go.jp

2004年5月10日 受付 2004年9月15日 受理

要旨

QスイッチNd:YAGレーザーの第2高調波(波長; 532nm, パルス幅; 7ns)を, 水中に設置したSUS304試験板に照射し, 水中を伝播する圧力波の挙動をシャドウグラフ法によって可視化するとともに, 圧力測定を行った。試験板の厚さは0.1mm, 1mm, 10mmとし, レーザーエネルギーは49~470mJとした。レーザーの照射により試験板の表面には高圧のアブレーションプラズマが発生し, その結果としてプラズマが直接駆動する波(プラスト波), 試験板の板厚方向に伝播する波が水中に誘起する波(透過波), 試験板表面に沿う方向に伝播する波が水中に誘起する波(漏洩波)の3種類の波が水中を伝播した。プラスト波の性質は板厚に依存せず, 他2種類の圧力波の挙動は板厚によって変化した。板厚1mmおよび10mmにおいて, 透過波が繰り返し発生するのが観測され, その発生周期は板厚の2倍をSUS304の縦波の伝播速度で除した値と一致した。また, 板厚が厚い場合, 試験板表面に沿って伝播する縦波とレイリー波または横波による漏洩波が形成され, 板厚が十分薄い場合は, ラム波による漏洩波が観測された。レイリー波または横波による漏洩波は, レーザー光照射径と同程度の幅を持って観測された。

1. 緒言

金属材料の表層に圧縮の残留応力を形成するピーニング技術は, 材料の疲労強度の向上および応力腐食割れの防止に有効であり, 自動車, 航空機, 化学プラント等で活用されている。レーザーを使用したピーニング(レーザーピーニング)は, 高出力のパルスレーザーを金属材料の表面へ直接照射したときに生じる高圧のアブレーションプラズマを利用して, 圧縮の残留応力層を形成する技術であり¹⁾, 通常液体媒質中で行われる^{2)~7)}。これは, 液体媒質は気体媒質に比べて衝撃インピーダンスが高く, 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いため, レーザーのエネルギーを効果的に固体材料へのインパルスへと変換することができるためである。

レーザーピーニングにおいて発生する圧力波の挙動は複雑であるが, それを系統だって調べることににより, 材料中に形成される残留応力の予測⁷⁾や, 材料の非破壊検査⁸⁾などに応用できる可能性がある。

本報では, 異なる板厚の試験板にレーザーパルスを照射し, シャドウグラフ法による可視化と圧力測定を行うことにより, レーザーピーニングにおいて水中に誘起される様々な圧力波の伝播挙動を調べた。

2. 実験方法

実験装置の構成をFig. 1に示す。レーザー発振器にはQスイッチNd:YAGレーザーを使用し, 出力光を水中透過性の高い第2高調波(波長; 532nm, パルス幅(FWHM); 7ns)に変換して用いた。2枚の反射ミラー, レンズおよび光学窓を介してレーザー光を水槽内に導入し, 水中に設置した80mm×80mmの試験板(304系オーステナイトステンレス鋼(SUS304))の表面に集光径 1.1 ± 0.1 mmで照射した。試験板の板厚は0.1mm, 1mm, 10mmの3通りとし, レーザーエネルギーは49~470mJとした。

レーザーの照射によって水中に形成される圧力波の挙動を調べるため, その伝播過程をシャドウグラフ法によって

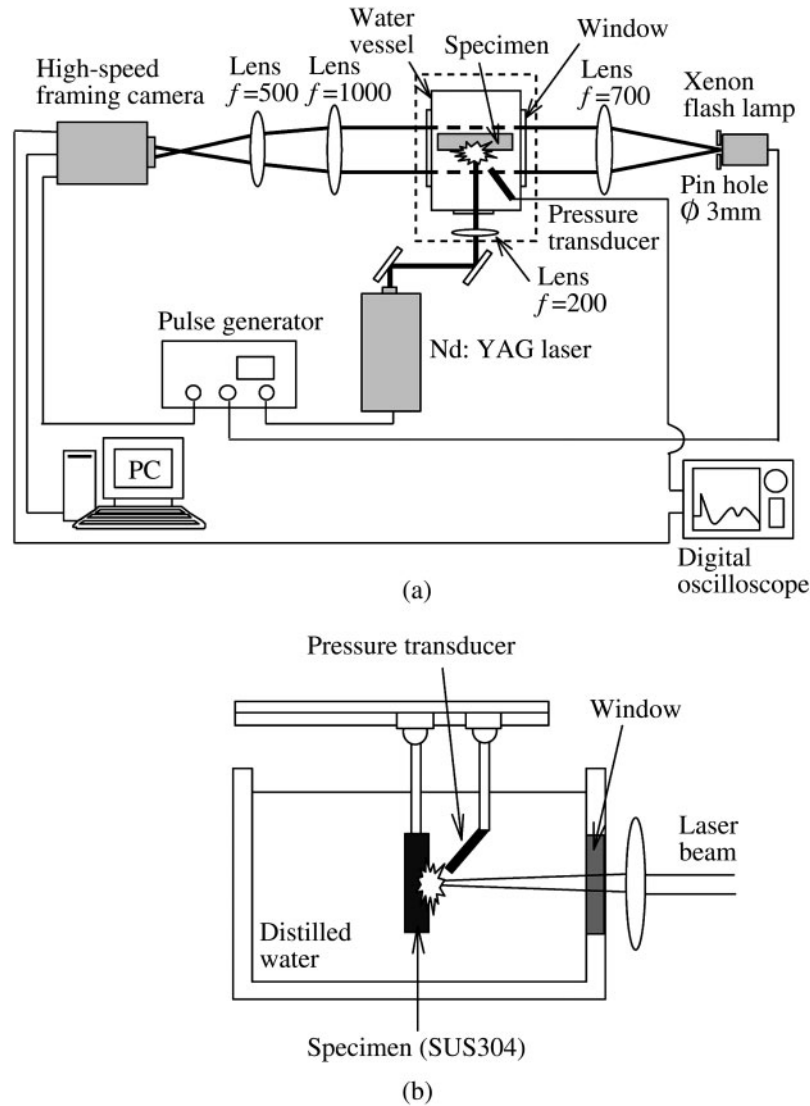


Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup.
(a) whole system, f ; focal length, length unit; mm, (b) side view of test section.

可視化した。光源にはキセノンフラッシュランプ (Adapt Electronics製, 最大エネルギー; 375J, 露光時間; $50\ \mu\text{s}$) を使用し, フレーミング高速度カメラ (ULTRA8: DRS Technologies製) で撮影した。

圧力測定には, 圧電式マイクロ圧力変換器 (Platte Needle Gauge: Müller製, 立ち上がり時間; 50ns, 感度; $1 \times 10^{-8}\ \text{VPa}^{-1}$, 最大圧力; 200MPa) を使用し, 出力をデジタルオシロスコープ (DL1740: 横河電機製, サンプルレート: $500\ \text{MSs}^{-1}$) に記録した。圧力変換器は測定対象とする各波の波面とほぼ垂直に交わるように実験のつど配置した。その位置はレーザー照射中心を原点 O として (x, y) で表し, レーザー照射方向とのなす角 α を Fig. 2 のように定義した。試験板裏側での圧力測定では, 裏面を原点 O' とする x' 軸を定義した。

3. 実験結果および考察

3.1 板厚による波の挙動

各試験片厚さにおいて, レーザーを照射したときのシャドウグラフ連続写真および圧力履歴 (圧力変換器の出力) を

Fig. 3 に示す。 t はレーザーパルス照射から経過した時間を表す。ここで, レーザーのパルスエネルギーは $200 \pm 5\ \text{mJ}$, 集光径 $1.1 \pm 0.1\ \text{mm}$ (フルエンス; $21.7 \pm 4.4\ \text{Jcm}^{-2}$) である。圧力履歴は, レーザー照射側 (以降「表側」と呼ぶ) で測定したものを示し, 各板厚とも圧力変換器を同位置 ($x=8.8\ \text{mm}$, $y=4.5\ \text{mm}$, $\alpha=27^\circ$) に設置した。

水中で観察される圧力波は, 半球状ブラスト波 (B), 試験板中を伝播した圧力波が試験板の裏面および表面で反射するときに裏側および表側の水中へ透過する波 (T), 試験板表面 (レーザー照射面および裏面) に沿って伝播する波が水中に誘起する波 (漏洩波, L) の3種類である。以降, 便宜上, 観察された波をそれぞれ「ブラスト波」, 「透過波」および「漏洩波」と呼ぶ。以下で, 各圧力波の挙動について検討する。

3.1.1 ブラスト波 (B)

ブラスト波は, 試験板表面で発生したアブレーションプラズマの急激な膨張によって水中に駆動される波である。 Fig. 3 に示すとおり, ブラスト波は試験板の板厚によらずほぼ水の音速で伝播し, 半球状の波面を形成する。また,

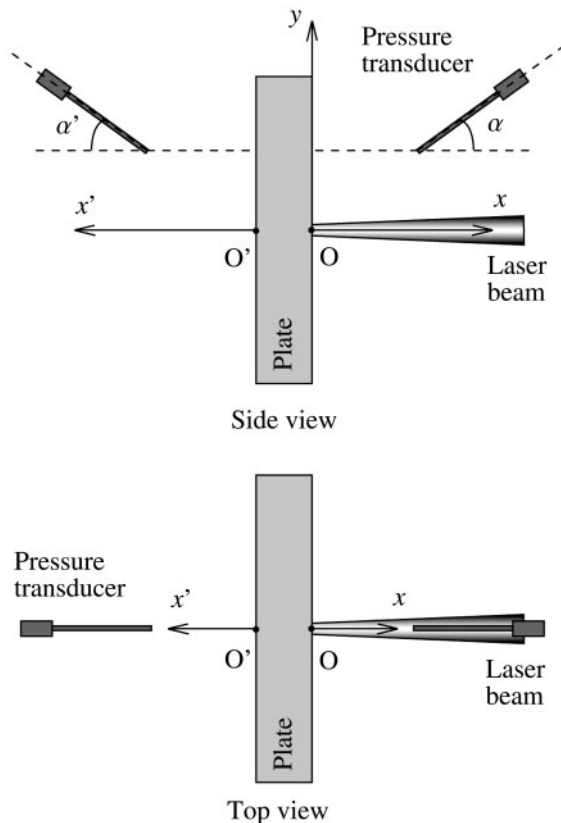


Fig. 2 Definition of position and orientation of pressure transducers.

プラスト波のピーク圧力も板厚に依存せず、いずれも約10MPaを示した。

本実験ではレーザーの集光径は 1.1 ± 0.1 mmであり、プラスト波の駆動源となるアブレーションプラズマの大きさも同程度である³⁾。そのため、プラスト波がレーザーの集光径と比較して長い距離を水中で伝播した後は、プラスト波の駆動源形状を点源とみなすことができ、波面はほぼ半球状となり、ほぼ水の音速で伝播する。また、アブレーションは照射するレーザーのパルス幅(7ns)と同程度の時間内で起きる現象であり、プラズマが高い圧力に保持される時間はレーザーのパルス幅の2倍程度と考えられている³⁾。一方、試験板表面で発生した圧力波が試験板中を縦波として伝播し、裏面で反射した後、表面に達するまでの時間は、最も薄い試験板(0.1mm)の場合で約34nsである。このように、プラズマによりプラスト波が駆動される時間に比べ、試験板内部に駆動された圧力波が試験板を往復し、再び表面に到達するまでの時間の方が長いことから、アブレーションによって水中に駆動されるプラスト波の形状およびその直後の圧力は、板厚に影響されない。

3.1.2 透過波(T)

透過波は、試験板中を伝播した圧力波が試験板の裏面および表面で反射するとき、裏側および表側の水中へ透過する波であり、ここではそれぞれ裏面透過波(T_r)、表面透過

波(T_f)と呼ぶ。試験板の裏側($y=0$ mm, $\alpha'=0^\circ$)で測定した裏面透過波の圧力履歴、およびレーザー照射3.36 μ s後のシャドウグラフ画像をFig. 4に示す。圧力変換器の x' 軸方向設置位置は、 $x'=2$ mm(板厚;10mm)または $x'=3$ mm(板厚;1mm, 0.1mm)とした。ここで、パルスエネルギーは 200 ± 5 mJ(フルエンス; 21.7 ± 4.4 Jcm⁻²)である。

板厚が薄い場合(0.1mm)、試験板の表側に形成される半球状プラスト波とほぼ同形状の裏面透過波が裏側にも形成された(Fig. 3(c)およびFig. 4(c)の T_r)。それに対して、板厚が厚い場合、水と試験板(SUS304)の音速の違いが透過波の形状に顕著に影響する。そのため、透過波の形状は半球を試験板表面法線方向に圧縮したような歪んだ形状となり、特に板厚10mmでは平面に近い裏面透過波(Fig. 4(a)の T_r)および表面透過波(Fig. 3(a)の T_f)が観測されている。

板厚1mmおよび10mmでは裏面透過波による複数の圧力ピークが一定の周期(0.34 μ sおよび3.4 μ s)で観測された。板厚と圧力ピークの周期から試験板中を伝播する圧力波の速度を求めると、約5800ms⁻¹となり、SUS304を伝播する縦波の速度(5770ms⁻¹)⁹⁾とよく一致した。一方、前述のように、板厚0.1mmの試験板を縦波が往復する時間は34nsであり、圧力変換器の立ち上がり時間(50ns)より短いため、板が厚いときに観測されたような圧力ピークの繰り返しは観測できない。なお、板厚1mmおよび10mmの圧力ピークと比較して、板厚0.1mmの圧力ピークは高く、持続時間が長く観測されているが、34nsの周期で繰り返し伝播してくる裏面透過波が重なり合うことによって、持続時間が長くなったものと解釈できる。

板厚が集光径に比べて無視できない大きさである場合、試験板内を縦波が伝播する過程で集光領域境界から発生する膨張波によって圧力が低下し、それに伴って透過波背後の圧力も低下する。さらに、板厚は以下のような影響を及ぼす。200mJのレーザーパルスを1.1mmに集光して水中の試験板(SUS304)に照射すると、圧力約2GPaのアブレーションプラズマが発生する³⁾。この圧力は、SUS304の降伏応力をはるかに上回るため、試験板表面に誘起された圧力波は、SUS304を塑性変形させることによってエネルギーを失いながら板厚方向に伝播する。一パルスの照射によってSUS304が塑性変形を受ける深さは0.3~0.4mm程度である⁷⁾。従って、板厚1mmおよび10mmの試験板にレーザーを照射した場合、塑性変形によってエネルギーを失った圧力波が水中に透過するのに対して、板厚0.1mmの場合は、SUS304の降伏応力を超える圧力波が裏面に達し、より高い圧力の裏面透過波が水中に誘起されると考えられる。

また、3.1.1項で述べたように、プラスト波波面到着直後の圧力波形は板厚の影響を受けないが、波形のテール部分は、板厚が0.1mmおよび1mmの場合、表面透過波到達時間がプラスト波圧力持続時間中であるので、板厚の影響を受ける。従って、板厚1mmではプラスト波圧力波形のテール部分に、表面透過波の圧力信号が確認できる(Fig. 3(b))。一方、板厚0.1mmにおいても一定の周期(34ns)で繰り返し表面透過波が発生するが、プラスト波圧力が持続している間の減衰が大きく、板厚10mmの波形(Fig. 3(a))と似た波形になる(Fig. 3(c))。

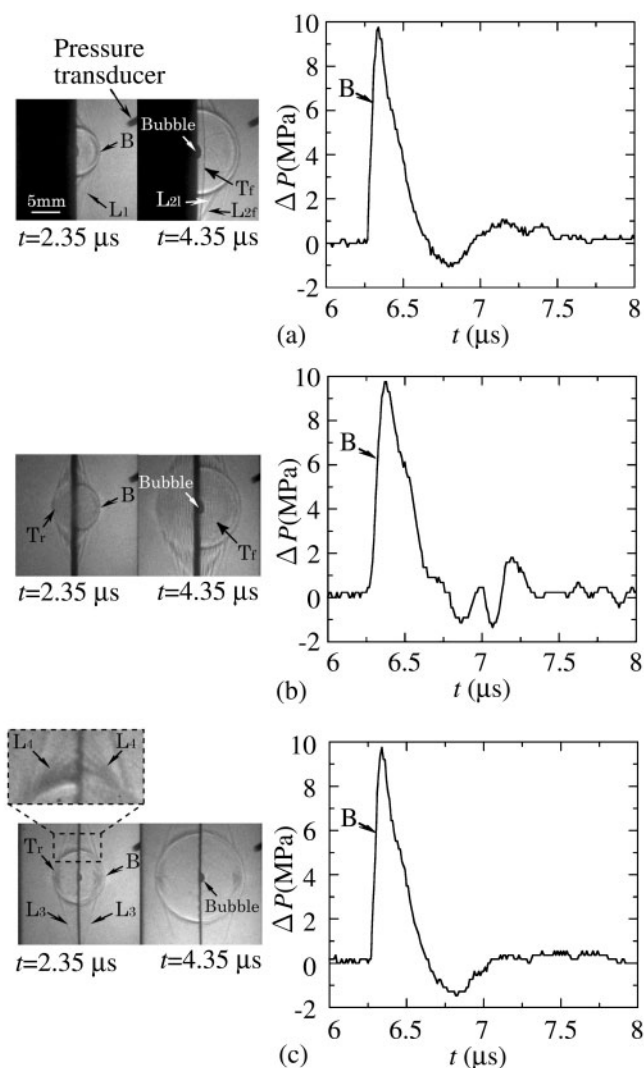


Fig. 3 Shadowgraph images (exposure time; 20 ns) and pressure histories measured on front side ($x=8.8$ mm, $y=4.5$ mm, $\alpha=27$ degrees). The plate thickness; (a) 10 mm, (b) 1 mm, (c) 0.1 mm. The spot diameter of laser irradiation is 1.1 ± 0.1 mm. B; hemispherical blast wave, T_r and T_f ; transmitted waves on rear-side and front-side, respectively, L_1 - L_4 ; leaky waves produced in water by waves propagating along the plate surface.

3.1.3 漏洩波 (L)

漏洩波は、試験板の表面を伝播する波のエネルギーが水中に漏洩することによって生じる波であり、その伝播方向は、試験板表面を伝播する波の速度と水の音速によって決定される。また、漏洩波は、試験板中のいわゆる縦波、横波によってのみ誘起されるのではなく、試験板材料の力学的性質と幾何形状に依存する様々な表面波によっても誘起される⁸⁾¹⁰⁾¹¹⁾。ここでは、Fig. 3の可視化画像のように、試験板表面を伝播する波の漏洩波 ($L_1 \sim L_4$) が観察された。

板厚が厚い場合 (10 mm)、漏洩波 L_1 , L_{2f} および L_{2r} が観察された。漏洩波 L_1 は、可視化画像より計算した SUS304 と L_1 の接触点の伝播速度が 5800 ms^{-1} となり、SUS304 中を伝

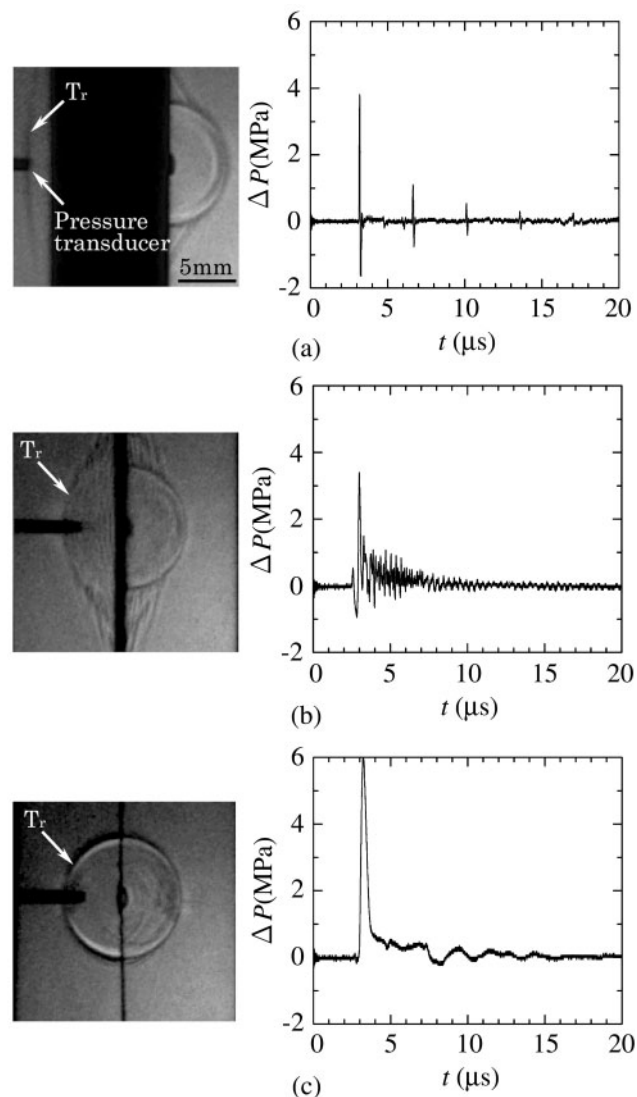


Fig. 4 Shadowgraph images ($t=3.36 \mu\text{s}$, exposure time; 20 ns) and pressure histories measured on rear-side ($y=0$ mm, $\alpha'=0$ degree). The plate thickness (the position of the pressure transducer along x' -axis); (a) 10 mm (2 mm), (b) 1 mm (3 mm), (c) 0.1 mm (3 mm). The spot diameter of laser irradiation is 1.1 ± 0.1 mm.

播する縦波の速度 (5770 ms^{-1})⁹⁾ とほぼ一致するので、縦波による漏洩波である。漏洩波 L_{2f} と L_{2r} については、漏洩波と試験板表面とのなす角は共に 30° であり、同じ波によって誘起された幅を持った漏洩波であると考えられる。そこで、集光径の影響を調べるため、集光径を $0.6 \pm 0.1 \text{ mm}$, $1.1 \pm 0.1 \text{ mm}$, $3.3 \pm 0.1 \text{ mm}$ に変化させて可視化した。その結果を Fig. 5(a), (b), (c) にそれぞれ示す。画像より、集光径が大きくなるにつれ漏洩波 L_{2f} , L_{2r} の間隔およびプラスト波 B の板面方向 (y 軸方向) の幅は広がった。これは、プラズマ駆動源の領域が大きくなり、波の発生源が幅を持つので、それによる波の重ね合わせが起こることによるものである。また、板厚 10 mm の試験板にレーザーを照射したときのシャ

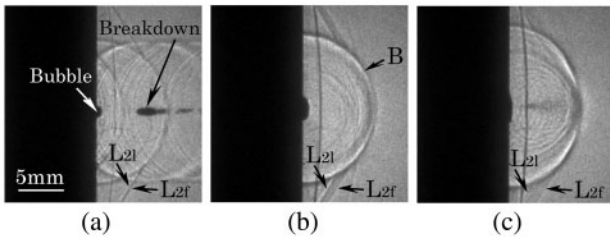


Fig. 5 Shadowgraph images ($t=4.46\mu\text{s}$, exposure time; 20 ns). The spot diameter of laser irradiation; (a) 0.6 ± 0.1 mm, (b) 1.1 ± 0.1 mm, (c) 3.3 ± 0.1 mm. The plate thickness is 10 mm.

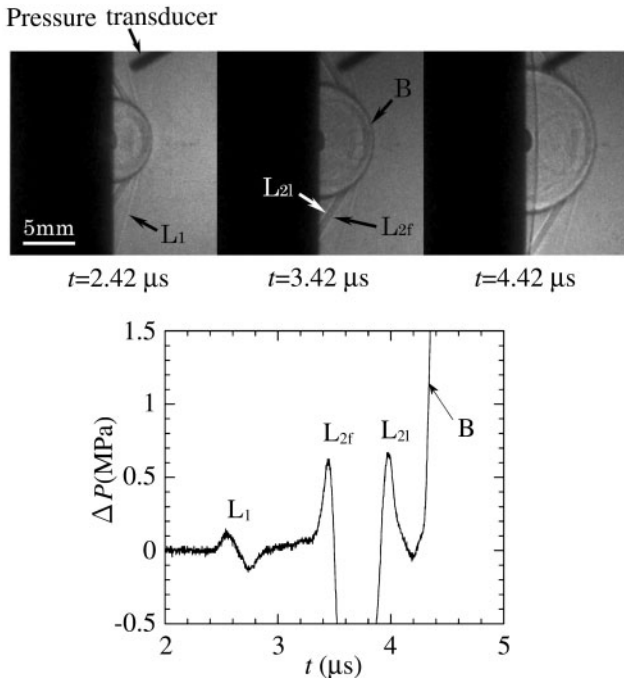


Fig. 6 Shadowgraph images (exposure time; 20 ns) and pressure history measured at $x=1.8$ mm, $y=7.2$ mm, $\alpha=27$ degrees. The plate thickness is 10 mm, and the spot diameter of laser irradiation is 1.1 ± 0.1 mm. B; hemispherical blast wave, L_1 ; leaky wave produced in water by longitudinal wave propagating along the plate surface, L_{2f} and L_{2l} ; leaky waves produced in water by Rayleigh or transverse wave propagating along the plate surface.

ドングラフ連続写真と漏洩波に着目した圧力履歴をFig. 6に示す。ここで、パルスエネルギーは 200 ± 5 mJ (フルエンス; 21.7 ± 4.4 J cm⁻²) で、圧力変換器設置位置は $x=1.8$ mm, $y=7.2$ mm, $\alpha=27^\circ$ である。 L_{2f} , L_{2l} は、共に 0.7 MPa のピーク圧力を示し、 L_1 と比較して数倍の圧力を示した。これらのことより、両漏洩波は同じ波によって誘起された波であるといえる。ここで、SUS304 中を伝播する横波の速度は

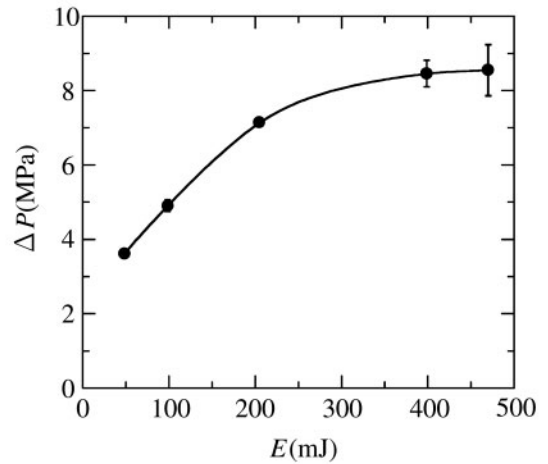


Fig. 7 Peak pressure of hemispherical blast wave (experimental data) and data-fitted curve. The plate thickness is 10 mm, and the spot diameter of laser irradiation is 1.1 ± 0.1 mm.

3120ms^{-1} ⁹⁾, また、レイリー波 (表面波) の速度は横波伝播速度の 0.93 倍; 2900ms^{-1} である。画像から計算した漏洩波 L_2 の伝播速度は約 3000ms^{-1} であるが、レイリー波と横波の速度差が小さいこと、また、画像からの速度計算誤差を考慮すると、それらの影響を別個に評価するのは困難であり、本結果からは L_2 を誘起した波はレイリー波または横波であるとしかえない。

板厚が十分薄い場合 (0.1 mm), 試験板の表面を伝播する波は波長分散性をもつラム波 (板波) となる⁸⁾¹⁰⁾。ラム波の振動モードには対称モード (Sモード) と反転対称モード (Aモード) があり、それぞれに高次のモードが存在する。本実験条件の場合、それらの 0 次モードである S_0 モードラム波および A_0 モードラム波の伝播速度は、それぞれ 5200ms^{-1} および 1800ms^{-1} となり¹²⁾¹³⁾, Fig. 3(c) 中の L_3 と L_4 に対応する。

板厚 1 mm では透過波が狭い間隔で発生、伝播するため、漏洩波を明確に観測することは困難であった (Fig. 3(b))。

3.2 レーザーエネルギーによるプラスト波のピーク圧力変化

試験板上のレーザー集光径を 1.1 ± 0.1 mm (一定) とし、レーザーのパルスエネルギーを 49 mJ から 470 mJ まで変化させ、プラスト波のピーク圧力 (ΔP) を測定した結果を Fig. 7 に示す。横軸は、レーザーのパルスエネルギー (E) である。ここで、圧力変換器の位置は $x=9.2$ mm, $y=4.6$ mm, $\alpha=27^\circ$ とした。レーザーのエネルギーが約 200 mJ までは、 ΔP は E の $1/2$ 乗にほぼ比例するが、それ以上の高エネルギー領域ではその指数が小さくなり、実験値のばらつきも拡大した。高エネルギー領域では、Fig. 5(a) のように水中の光路上でレーザーが部分的にブレイクダウンを起こす。それによるレーザーエネルギーの吸収または散乱により、試験板に到達するレーザーエネルギーの一部が失われたためと考えられる。

4. 結言

レーザーピーニングにより水中に発生する波の挙動について、主にSUS304試験板の板厚および照射するレーザーのパルスエネルギーをパラメータとして実験的な検討を行った。その結果、試験板のレーザー照射面側に発生するブラスト波の挙動は板厚に影響されないが、透過波、漏洩波の挙動は板厚によって異なることを示し、その詳細を明らかにした。これらの波の挙動は、水中および試験板を伝播する波の速度の関係によって説明できる。

レーザーエネルギーが比較的小さい領域では、ブラスト波の圧力は、レーザーエネルギーの1/2乗にほぼ比例する。この結果を利用することにより、ブラスト波圧力の情報から、レーザーピーニングの効果を確認することが可能と考えられる。また、透過波からは縦波の伝播速度および板厚の情報が、漏洩波からは表面の情報が得られるため、レーザー照射によって水中に発生する波の挙動を把握することにより、板厚計測や表面き裂の検出など、構造物の診断技術への応用が考えられる。

文 献

- 1) R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux, and J. Virmont, *J. Appl. Phys.*, 68, 775 (1990).
- 2) P. Peyre, and R. Fabbro, *Opt. Quantum Electron.*, 27, 1212 (1995).
- 3) Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki and M. Obata, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 121, 432 (1997).
- 4) L. Berthe, R. Fabbro, P. Peyre, L. Tollier, and E. Bartnicki, *J. Appl. Phys.*, 82, 2826 (1997).
- 5) P. Peyre, L. Berthe, X. Scherpereel, R. Fabbro, and E. Bartnicki, *J. Appl. Phys.*, 84, 5985 (1998).
- 6) L. Berthe, R. Fabbro, P. Peyre, and E. Bartnicki, *J. Appl. Phys.*, 85, 7552 (1999).
- 7) 佐野雄二, 依田正樹, 向井成彦, 小畑稔, 菅野真紀, 嶋誠之, *日本原子力学会誌*, 42, 567 (2000).
- 8) 川嶋紘一郎, *日本機械学会論文集 (A編)*, 67, 370 (2001).
- 9) S.P. Marsh, "LASL shock Hugoniot data", p. 212 (1980), University of California Press.
- 10) 超音波便覧編集委員会 編, 「超音波便覧」, p. 378 (1999), 丸善.
- 11) 日本材料科学会 編, 「先端材料シリーズ 超音波と材料」, p. 118 (1992), 裳華房.
- 12) 物理学辞典編集委員会 編, 「物理学辞典」, p. 2162 (1984), 培風館.
- 13) P. Voinovich and A. Merlen, *Shock Waves*, 13, 421 (2003).

Influence of metal plate thickness on underwater pressure waves induced by laser peening

Keiko Watanabe^{*†}, Yuji Sano^{**††}, Naruhiko Mukai^{**},
Hiroyuki Torikai^{***}, and Akihiro Sasoh^{*}

Behavior of pressure waves generated due to a laser ablation of a metal plate in water has been investigated with shadowgraph technique and measurement of their pressure histories. A second harmonic radiation of a Q-switched Nd:YAG laser (wavelength; 532 nm, pulse duration (FWHM); 7 ns) was focused onto a water-immersed plate made of type 304 stainless steel (SUS304). The plate thickness was 0.1 mm, 1 mm and 10 mm, and the laser energy was varied from 49 to 470 mJ. High-pressure ablation plasma was generated on the plate surface by the laser irradiation, and three types of pressure waves, i.e., blast wave, transmitted wave and leaky wave, were visualized. The blast wave, which was directly driven in water by expansion of the high-pressure plasma, propagated as an-almost-hemispherical wave without being influenced by the plate thickness. Behavior of other waves was influenced by the thickness. In case of 1-mm and 10-mm-thick plates, the transmitted waves were emitted as a result of transmission of pressure waves repeatedly propagating between the plate surfaces. Their frequency was consistent with a round travel period through the plate thickness. For the thick plate, the leaky waves, which were caused by longitudinal and Rayleigh or transverse waves propagating along the plate surface, were observed. Especially, leaky wave produced by Rayleigh or transverse wave had a width approximately the same as a spot diameter of the laser irradiation. For the sufficiently thin plate, the leaky waves produced by lamb waves propagating along the plate surface were observed.

^{*}Institute of Fluid Science, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, JAPAN

[†]corresponding author: kei@nana.ifs.tohoku.ac.jp

^{**}Toshiba Corporation, 8 Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama, Kanagawa 235-8523, JAPAN

^{††}corresponding author: yuji.sano@toshiba.co.jp

^{***}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 16-1 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8569, JAPAN
e-mail: torikai-h@aist.go.jp