D201

熱弾性効果によるレーザ誘起水中衝撃波の発生

蛭ヶ谷 潤* (埼玉大院), 平原 裕行 (埼玉大), 嶺 祐太 (埼玉大院)

Underwater Shock Wave by Thermoelastic Effect with Laser Irradiation

Jun HIRUGAYA, Hiroyuki HIRAHARA, and Yuta MINE

ABSTRACT

A laser induced underwater shock wave was observed with shadowgraphic technique. The shock wave due to thermoelastic effect was induced on a metallic thin film surface installed in the water tank satisfied distilled water by laser irradiation. In this paper, the underwater shock wave was introduced in a relatively low intensity energy region. Shadowgraphic images were acquired within $1\mu\text{s}$ from laser irradiation. The shock Mach number was measured from the shadowgraphic images. The speed of sound in water was estimated from Tait equation of state in liquid. Experimental Mach number was less than 1 because of the existence of micro bubble in water.

Keywords: Thermoelastic effect, Underwater shock wave

1. 緒論

近年、レーザを利用して、エネルギーを局所的に集中させて様々な状態の変化を起こさせる試みが多数報告されている。高エネルギーのレーザを照射した場合には、アブレーション、電離、熔融などの状態変化が生じるが、本研究は、熱弾性効果を利用した波動の生成について調査を行ったものである。本研究は、流体に非定常的な変動を発生させることのできる衝撃波を流体の駆動源として利用することを目的としている。本研究の対象とするレーザ誘起水中衝撃波は、金属薄膜にパルスレーザを集光することで起こる熱弾性効果により誘起されるものである²⁾。金属薄膜へのレーザ照射によりレーザ光の一部は材料に吸収され、金属表面は急加熱される。レーザ発光中に加熱された金属表面は熱膨張し、液体媒質に引張応力が作用する。発光終了後に液体媒質に向かって圧縮応力が作用するため、金属表面に接した液体媒質が押される。また熱蒸発による希薄領域が形成される。圧縮応力による弾性変形が液体に伝播することで圧縮波が形成され、これが衝撃波として伝播する。

本研究ではレーザ誘起水中衝撃波による流れ場操作開発の基礎的研究として、金属薄膜で発生する衝撃波について、その衝撃波発生初期(レーザ照射後 $1\mu\text{s}$ 以内)をシャドウグラフ法により可視化し、衝撃波伝播速度および現象について考察した。

2. 実験

Fig.1 に実験装置の概略を示す。用いた金属薄膜は Al で、ガラス材 BK7 に厚さ 150nm で真空蒸着されている。衝撃波発生用レーザとして、Nd:YAG レーザ(New Wave Research 製 SOLOIII, $\lambda=532\text{nm}$, 発光時間 $t_d=5\text{ns}$)を用いた。衝撃波

発生用レーザのスポット径を 1mm に固定し、照射レーザ強度を $60\sim 250\text{GW/m}^2$ に変化させ実験を行った。実験条件の詳細を Table1 に示す。可視化光源用レーザとして Nd:YAG レーザ(Quantel 社製, $\lambda=532\text{nm}$, $t_d=7\text{ns}$)を用い、シャドウグラフ画像は CMOS カメラ(IDT 社製, XS-5)で取得した。フォトダイオードを用いて衝撃波発生用レーザと可視化光源用レーザの発光タイミングを合わせ、タイミングコントローラによりタイミング制御を行った。

Fig.1 Experimental setup.

Table 1 Experimental condition.

Target	$E_0 \mu\text{J}$	$I_0 \text{GW/m}^2$	$\lambda \text{ nm}$	$\phi \text{ mm}$	t_{ns}
Al	250	60	532	1	5
	500	130			
	1000	250			

3. 結果と考察

Fig.2 にシャドウグラフ法により得られた可視化画像を示す。照射レーザ強度 $I_0=130\text{GW/m}^2$ における衝撃波伝播の様子である。画像は衝撃波画像から背景画像を引くことで、画像の質を向上させている。

Fig. 2 Shadowgraphic images ($I_0=130\text{GW/m}^2$).

可視化画像より各時刻 t での衝撃波波面位置 R_s を読み取った。Fig.3 に t と R_s の関係を示す。 R_s を時間微分することで衝撃波マッハ数 M_s を求めた。 Fig.4 に算出したマッハ数を示す。

Fig. 3 Locus of underwater shock wave.

Fig. 4 Estimated Mach number.

水中音速の導出には、式(1)に示すTait Equation を用いた。

$$p = p(\rho) = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (1)$$

式(1)から音速を求めると式(2)のようになる。

$$a^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = \frac{\gamma}{\rho} (p + B) \quad (2)$$

媒質を水とした場合、 $\gamma=7.15$, $B=304[\text{MPa}]$ である。

Fig.4 から衝撃波発生初期ではマッハ数は1以上であるが、300ns以降ではマッハ数が1以下にまで減衰している。原因として、水中に混在する微細なバブルの影響が挙げられる。一般に気液二相流における音速は、液体または気体における単一流体中での音速よりもかなり低くなることが知られている^③。気泡と液体の相対運動を無視し、平衡状態での気泡流

中の音速は式(3)で表わされる^④。

$$a^2 = \left[\frac{(1-\beta)^2}{a_l^2} + \frac{\beta^2}{a_g^2} + \frac{\rho_l \beta (1-\beta)}{p} \right]^{-1} \quad (3)$$

添字の l , g は液体、気体を表わす。 β はボイド率で、気液混合体に占める気体の割合である。 Fig.5 に気泡流におけるボイド率 β と音速の関係を示す。液体中にどれほどの微小気泡が含まれるかは不明確であるが、この微小気泡の影響で音速が急激に下がると考えるのが妥当であろう。

Fig. 5 Speed of sound in bubbly flow.

4. 結論

本研究では水中に設置した金属薄膜にレーザを照射することによる熱弾性効果で、レーザ誘起水中衝撃波が発生・伝播することをシャドウグラフ法による可視化計測で確認した。計測されたマッハ数は0.87程度に急速に漸近する。計測されたマッハ数が1以下となるのは、水中に存在する微細な気泡の存在によるものと考えられる。

参考文献

- 1) 高山和喜編『衝撃波ハンドブック、シュプリンガーフェアラーク東京株式会社(1995)
- 2) Seung H. Ko, et al :Laser induced plane acoustic wave generation, propagation, and interaction with rigid structures in water, J.Appl.Phys, 104, 073104(2008)
- 3) 日本混相流学会編『混相流ハンドブック、朝倉書店(2004)
- 4) L. van Wijngaarden :One-dimensional flow of liquids containing small gas bubbles, Ann. Rev. Fluid Mech., 4, 369-396(1972)