Visualization and measurement of sound pressure distribution of ultrasonic wave by stroboscopic real time holographic interferometry

○学 鈴木 貴博 (関西大・院) 正 久田 重善 (関西大・工)

正 中原 住雄 (関西大・工) 正 藤田 武良 (関西大・工)

Takahiro SUZUKI, Graduate school Kansai University, 3-3-35, Yamatecho Suita, Osaka

Shigeyoshi HISADA, Kansai University

Sumio NAKAHARA, Kansai University

Takeyoshi FUJITA, Kansai University

Key Words: ultrasonic wave, holographic interferometry, BSO single crystal, Abel transform

緒言

現在、超音波の可視化にはシュリーレン法、位相差法などが利用されているが、音圧の定量化には至っていない。又、液中の音圧測定にはハイドロフォンが利用されるが、この方法は局所的な音圧測定であり、走査しない限り音圧分布の把握は困難である。

我々はホログラム記録材料に光誘起屈折性結晶である $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO:珪酸ピスマス) 単結晶を用いた実時間ストロボホログラフィー干渉法によって、非接触で水中における超音波波面 ($f=500\text{kHz}$, $\lambda_s=3\text{mm}$) の可視化と音圧分布の測定を行った。音圧分布は超音波による水の屈折率変化をホログラフィー干渉縞として記録し、これを解析することによって求める。干渉縞の解析にはフーリエ変換法を用いる。今回はまず、平面波の測定結果をハイドロフォン (東レテクノ HY05N2 NPL 検定) による結果と比較し本手法の正当性を検証した。次に音波の挙動測定として円形開口による回折現象及び音響レンズによる収束現象を測定・可視化した。回折・収束現象については音圧分布を軸対称と仮定しアーベル変換法を用い 3 次元の音圧分布を得た。

原理

超音波進行方向を z 軸、レーザ照射方向を y 軸とし、時間 $t=0$ の水中のある点における静圧を $P_0(x,y,z,0)$ 、超音波発振後の時刻 t における圧力を $P(x,y,z,t)$ とする。レーザが透過する水中の光路長変化は次式で表される。

$$\int_0^t \left(\frac{dn}{dp} \right) \Delta p(x,y,z,t) dy = \lambda_L F(x,z,t) \quad \dots (1)$$

$$\Delta p(x,y,z,t) = p(x,y,z,t) - p_0(x,y,z,0)$$

$F(x,z,t)$: 時刻 t における縞次数

L : レーザ光が超音波を横切る距離

λ_L : レーザ波長

dn/dp : 圧力に対する水 (20°C) の屈折率変化の割合

(1) 式において y 軸方向の音圧分布を一様とすれば

$$\Delta p(x,y,z,t) = \frac{\lambda_L \cdot F(x,z,t)}{L} \left(\frac{dp}{dn} \right) \quad \dots (2)$$

時刻 t における干渉パターンからフーリエ変換法により縞次数の分布 $F(x,z,t)$ を求め、(2) 式により超音波音圧分布 $\Delta P(x,y,z,t)$ を求めることが出来る¹⁾。

さらに超音波の回折現象・収束現象について調べる際は

水の圧力変化が z 軸に対して軸対称と仮定する。

x - z 平面に投影される縞次数 $F(x,z,t)$ は軸対称な圧力変化 $\Delta P(r,z,t)$ の積分値として次式で表される。

$$F(x,z,t) = \frac{2}{\lambda_L} \int_x^R \left(\frac{dn}{dp} \right) \frac{\Delta p(r,z,t)}{\sqrt{r^2 - x^2}} r dr \quad \dots (3)$$

アーベル変換を用いて次式に変形し音圧分布を求める。

$$\Delta p(r,z,t) = -\frac{\lambda_L}{\pi} \int_r^R \left\{ \frac{dF(x,z,t)}{dx} \right\} \cdot \frac{dx}{\sqrt{x^2 - r^2}} \left(\frac{dp}{dn} \right) \quad \dots (4)$$

実験装置

Fig.1 Experimental setup

Fig.2 Test object

Fig.1 に実験で用いた光学系、Fig.2 に超音波発振部付近を示す。超音波振動子は PZT、 $\phi=50\text{mm}$ 、 $t=4\text{mm}$ を用いた。

又ホログラム記録材料として用いた BSO 単結晶は電界を印加するだけでホログラム記録が可能で現像・定着処理

が必要であり、記録-再生時の位置の再現性が保証される。

光源には He-Ne レーザ (50mW) を用いた。BSO 単結晶の波長感度により、測定対象が透明物体であれば、He-Ne レーザが光源として十分適用できることが確認されている²⁾。

実験方法

はじめに超音波発振前の基準状態として BSO 単結晶に物体光と参照光を照射しホログラム記録を行う。この時の露光時間は 360sec である。次にホログラムを再生し、物体光のミラーにティルトを加え、基準干渉縞を発生させる。この基準干渉縞を CCD カメラで記録する。次に超音波を発振させその時の干渉縞を移動干渉縞として同様に CCD カメラで記録する。ただし、超音波の静止像をとらえるため超音波発振時は AOM により超音波の周期に同期したストロボ照射を行う。基準干渉縞・移動干渉縞を Fig. 3 に示す。得られた 2 枚の干渉縞画像を 2 次元フーリエ変換法³⁾を用いて解析し、位相検出を行う。この位相から縞次数が得られ、平面波については(2)式、回折・収束については(4)式により音圧分布を得る。

Fig.3 Interferogram (a):before (b):after Application of sound pressure.

実験

まず平面波を測定するため振動子に矩形開口を取り付け、振動子への印加電圧を 10V~45V まで 5V づつ変化させ実験を行い、(2)式により解析し結果を得た。Fig. 4 は振動子印加電圧 25V で水中を進行する平面波の音圧分布を 0 から 256 レベルに表した濃淡画像、Fig. 5 には Fig. 4 A-B 断面での音圧分布のグラフを示す。又測定結果を検証するため本手法と同じ条件でハイドロフォンによる音圧測定を行った。Fig. 6 に本手法による結果とハイドロフォンによる結果を示す。次に回折現象を測定するため振動子に円形開口を取り付け実験を行いアーベル変換により解析し結果を得た。 $\phi 8\text{mm}$ の開口による回折現象を Fig. 7 に示す。さらに収束現象を測定するため振動子に音響レンズを取り付け実験を行い同じくアーベル変換により結果を得た。その結果を Fig. 8 に示す。

Fig.4 Image of the Sound Pressure

結言

BSO 単結晶を用いた実時間ストロボホログラフィー干渉法を超音波の音圧分布測定に適用し、ハイドロフォンによる測定結果と比較した。それらの結果は良い一致を示し

Fig.5 The distribution of sound pressure in A-B cross section

Fig.6 Comparison of the holographic experimental results with the results by the hydrophone

Fig.7 The diffraction wave by circular aperture

Fig.8 The convergence wave by acoustic lens

本手法の正当性が確認できた。さらに本手法を超音波の回折現象および収束現象に適用し、アーベル変換により 3 次元の音圧分布を測定することができた。

本研究の一部は、平成 10,11 年度 文部省科学研究費補助金の援助によって行われた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 吉賀 他 日本機械学会関西支部講演論文集 964-1 (1996) 696
- 2) 中島 他 日本機械学会関西支部講演論文集 954-3 (1995) 43
- 3) M. Takeda et al. J. Opt. Soc. Am 72 (1982) 156