

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 31 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560191

研究課題名（和文）

BSO結晶を用いた実時間ホログラフィ干渉法による超音波サウンドインテンシティ測定

研究課題名（英文）

Measurements of sound intensity of ultrasonic waves by the real-time holographic interferometry with BSO single crystal

研究代表者

久田 重善 (HISADA SHIGEYOSHI)

関西大学・システム理工学部・専任講師

研究者番号：90098111

研究成果の概要（和文）：

珪酸ビスマス結晶を記録材料とした実時間ホログラフィ干渉法を用いて超音波放射音場を 50ns のパルスレーザ光で瞬間的に記録し、光路長変化より台形近似、アーベル変換、CT 手法を用いて超音波の音圧瞬時値分布を求めた。さらに超音波の位相を変化させた音圧分布より位相シフト法、ヒルベルト変換法により超音波の音圧振幅と位相分布を求め、それにサウンドインテンシティ法を適用して超音波のベクトル成分毎(進行方向とその直交方向)の強度分布を得ることができた。本手法は従来、困難であった超音波の放射音場の測定(音圧瞬時値、音圧振幅分布、放射強度分布)が可能であることを示すことができた。

研究成果の概要（英文）：

Ultrasonic sound fields are instantaneously recorded by using real time holographic interferometry with the recording material of bismuth silicon oxide single crystal in 50ns pulsed laser radiation. Sound pressure instantaneous value distributions of the ultrasonic wave are obtained by analyzed optical path length change with trapezoidal approximation, Abel inversion or CT technique. Sound pressure amplitude and phase distribution of the ultrasonic wave are obtained by phase shift method or Hilbert transform, and it is possible to calculate the intensity distributions of two vector components (direction of propagation and the orthogonal direction) of ultrasonic waves by the application of sound intensity method. Though the measurement of ultrasonic sound field is difficult until now, the measurements (sound pressure instantaneous value, sound pressure amplitude distribution and intensity distribution of ultrasonic wave) become possible by this technique.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：音響、光計測、超音波、ホログラフィ干渉法、可視化測定法、珪酸ビスマス、音圧、サウンドインテンシティ

1. 研究開始当初の背景

現在、超音波は工業、医療分野、計測分野等、多岐にわたって非常に有用に利用されている。にもかかわらず、超音波そのものの音圧値や強度値を測定する方法は、かなり限定されている。ハイドロフォン、光回折法等が一般的であるが、point by point の測定であり、音圧分布を測定しようとする、測定系を走査させなければならない。一方、超音波を可視化する光学的手法として、シュリーレン法や光弾性法があるが、定量化が難しく、超音波の音圧を分布値として測定する方法は、ほとんどないといってもよい。そのため、超音波振動子の性能データは波形やそのスペクトルといった時間領域のデータが中心で、普通、空間的な放射特性が示されることはない。

さらに超音波強度値は、音圧と粒子速度の積を時間平均したベクトル量であり、その分布測定について今まで報告されたことはないのが現状である。

2. 研究の目的

超音波の放射音場に対して、音圧瞬時値、音圧振幅や位相、さらにサウンドインテンシティを分布値の形で得ることができる超音波測定法の開発を目的とする。サウンドインテンシティの測定に至るまでには、まず音圧分布を測定しなければならない。実時間ホログラフィ干渉法による高速度記録技術を確立し、超音波の音圧瞬時値分布測定を行う。そしてその分布値から音圧振幅分布と位相分布を抽出する方法の開発を行う。この分布データを元に、可聴音領域で行われているサウンドインテンシティ法の原理を超音波領域に適用する手法を検討し、サウンドインテンシティ分布値(音響パワー分布)の測定を実現する。

3. 研究の方法

(1) 測定の原理

水槽内に発した超音波の音圧によって音場内の水の屈折率が変化する。その音場に直交して観測レーザー光を透過させると、水の屈折率変化でレーザー光の光路長が変化する。超音波発振前の状態をホログラムに記録しておき、超音波発振と同期してパルス化したレーザー光を瞬間的に照射して、超音波音場の実時間ホログラフィ干渉縞を CCD カメラで撮影する。得られた干渉縞画像からフーリエ変換法による干渉縞解析により光路長変化 $\Delta\phi_L$ を得る。光路長変化と音圧の関係は次式で示される。

$$\left(\frac{dn}{dp}\right) \int_0^L \Delta p(x, y, z) dy = \frac{\Delta\phi_L(x, z)}{2\pi} \cdot \lambda_L \quad (1)$$

λ_L : レーザ波長

$\Delta p(x, y, z)$: 静圧からの圧力変化(音圧 p)

dn/dp : 水の圧力による屈折率変化率
($=1.47 \times 10^{-10} [1/\text{Pa}] 20^\circ\text{C}$)

① 局所音圧瞬時値の解析

積分値である光路長変化から局所音圧変化を求めるために次のような方法を用いた。

(a) 振動子の前に置いた矩形開口により音圧が積分方向に台形状に分布していると仮定して、以下のように台形の半値幅 L と水の圧力変化に対する屈折率変化率(実験値)を用いて局所音圧分布を算出する。

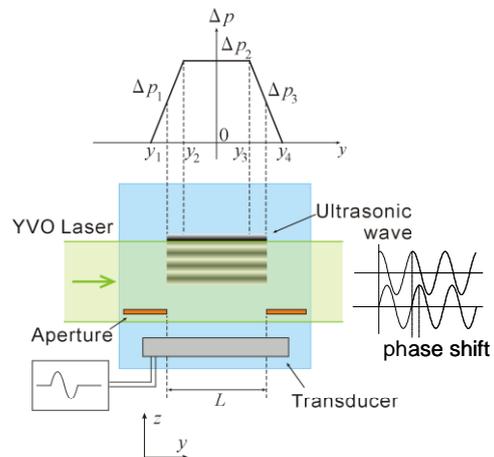


Fig.1 Assumption of rectangular sound pressure distribution

$$\Delta p(x, y, z) = \frac{F(x, z) \cdot \lambda_L}{L} \left(\frac{dn}{dp}\right)^{-1} \quad (2)$$

$$L = (y_3 - y_2) + (y_2 - y_1)/2 + (y_4 - y_3)/2$$

(b) 円形開口を置くことにより音圧が軸対称分布している場合、光路長変化としての投影データから CT 手法を用いて局所音圧変化を計算する。

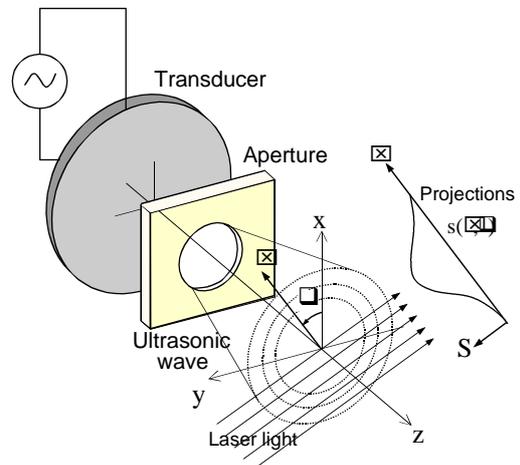


Fig.2 Analysis by CT method of axial symmetric sound pressure distribution

$s(\xi, \theta)$ は、 $z = z_i$ での角度 θ 方向の光路長変化(投影データ)で、その ξ に関する 1 次元フーリエ変換を $S(f, \theta)$ とする。Shepp-Logan filter によるフィルタ補正逆投影法を用いて、局所音圧変化は次式で求めることができる。

$$\Delta p(x, y) = \left(\frac{dp}{dn} \right) \frac{1}{\Delta \xi} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} \{S(f, \theta) |H|\} \exp(i2\pi f \xi) df d\theta \quad (3)$$

ここで、フィルタ関数は

$$|H| = \begin{cases} |f| \frac{\sin(\pi f \Delta \xi)}{\pi f \Delta \xi} & (-f_N < f \leq f_N) \\ 0 & (f \leq -f_N, f_N < f) \end{cases} \quad (4)$$

$$f_N = 1/(2\Delta \xi)$$

② 音圧振幅・位相分布の計算

次に超音波の音圧振幅・位相を求めるために超音波の位相を変化させた音場の記録を行い、位相シフト法を適用する。 p_0 :背景ノイズ音圧 A :音圧振幅 ϕ :音圧位相 δ :位相変調として超音波の音圧分布を次式のように表す。

$$p(x, z) = p_0(x, z) + A(x, z) \cos\{\phi(x, z) + \delta\} \quad (5)$$

位相変調を $\delta_1 = -180^\circ$ $\delta_2 = -90^\circ$ $\delta_3 = 0^\circ$ $\delta_4 = 90^\circ$ $\delta_5 = 180^\circ$ として、それぞれ音圧分布 $P_1 \sim P_5$ が得られ、次式より音圧の振幅分布、位相分布が求められる。

$$A(x, z) = \frac{1}{4} \sqrt{4(P_2 - P_4)^2 + (2P_3 - P_5 - P_1)^2} \quad (6)$$

$$\phi(x, z) = \tan^{-1} \frac{2(P_2 - P_4)}{2P_3 - P_5 - P_1} \quad (7)$$

また、音圧振幅・位相を求めるのに別の方法としてヒルベルト変換も用いる。この場合、超音波位相の $0, \pi$ の音圧データの差より背景レベルを除去し、それをヒルベルト変換する。

H:ヒルベルト変換演算子

$$r(x, z) = 2A(x, z) \cos\{\phi(x, z)\} \quad (8)$$

$$i(x, z) = H\{r(x, z)\} \quad (9)$$

ヒルベルト変換の結果、次式より音圧の振幅分布、位相分布が求められる。

$$A(x, z) = \frac{1}{2} \sqrt{r(x, z)^2 + i(x, z)^2} \quad (10)$$

$$\phi(x, z) = \tan^{-1} \frac{i(x, z)}{r(x, z)} \quad (11)$$

③ 超音波強度(サウンドインテンシティ)の計算

次に、超音波強度(サウンドインテンシティ)は、音圧を $p(t)$ 、粒子速度を $u(t)$ とすると、その積の時間平均として定義される。

可聴音域で用いられているサウンドインテンシティ法では、 r 方向成分の強度 I_r を Δr 近接した 2 点の音圧の差から粒子速度を算出し、近似的に次式のように求める。

$$I_r = \overline{p(t)u(t)} \approx \frac{1}{\rho \Delta r} \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} \int_{-\infty}^t [p_1(\tau) - p_2(\tau)] d\tau$$

ρ :媒質密度 (12)

正弦波の場合

$$I_r = \frac{A_1 A_2}{2\rho \omega \Delta r} \sin(\phi_1 - \phi_2) \quad (13)$$

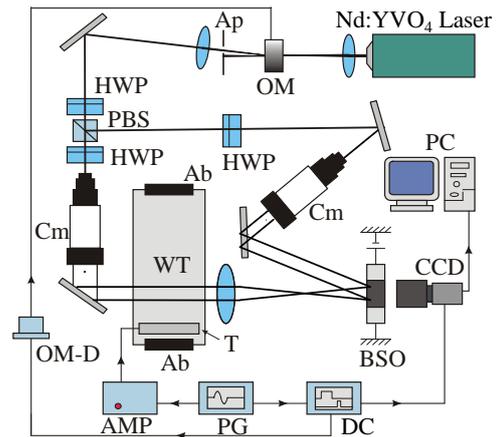
ω :超音波角周波数

$\phi_1 - \phi_2$:2点間の超音波の位相差

実時間ホログラフィ干渉法による本手法では超音波音圧振幅・位相分布が得られるので、隣り合う 2 点の測定値を用いて、超音波進行方向とそれに直交する方向の強度分布(サウンドインテンシティ)を求めることができる。

(2) 実験方法

Fig.3 に珪酸ビスマス($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$)をホログラム記録材料に用いた実時間ホログラフィ干渉光学系を示す。



OM :Optical modulator OM-D :Optical modulator driver
BSO : $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ single crystal DC: Delay Circuit
PBS :Polarization beam splitter PG :Pulse generator
HWP :Half wave plate Cm :Collimator T:Transducer
WT :Water tank Ap :Aperture Ab :Absorber

Fig.3 Experimental setup

Nd:YVO₄ レーザ(波長 532nm)からの光を二分し、光誘起屈折性結晶である珪酸ビスマス単結晶 Bi₁₂SiO₂₀ (BSO) に 10kV/cm の電圧を印加して、まず水の静止状態のホログラムを記録する。(露光時間 1sec) 次に物体光側のミラーを微小角傾けて、基準ホログラフィ干渉縞を発生させる。次いで超音波に同期した信号を光変調器 OM に送り 50nsec のレーザパルス光を照射させ、超音波音場(500kHz 波長 3mm)を透過した光波と静止時記録ホログラムの再生光波を瞬間的に発生させる。その2つの光波の干渉により、超音波音圧による光路長変化のホログラフィ干渉縞が生成され、CCD カメラに高速度記録する。得られた干渉縞画像は、フーリエ変換縞解析を行い、光路長変化分布画像を求める。3.(1)①項の解析により、局所瞬時値音圧分布を算出する。OM のパルスのタイミングをずらすことによって -180°、-90°、0°、90°、180° 超音波位相のシフトされた画像を記録し、それぞれ同様に縞解析を行い、その結果に対して、3.(1)②項の解析を用いて、位相シフト法あるいはヒルベルト変換法により超音波の音圧振幅・位相分布を算出する。さらに得られた音圧振幅分布と位相分布を 3.(1)③項のサウンドインテンシティ法により、超音波進行方向とそれに直交する方向の強度分布(サウンドインテンシティ)を求める。

4. 研究成果

(1) 矩形開口

径 32mm の超音波振動子に周波数 500kHz、印加電圧 1.7Vp-p の正弦波信号をアンプを介して加え、振動子前面においた 20mm 口の矩形開口から右方向に放射される超音波音場をホログラフィ干渉法で捉えた干渉縞画像が Fig.4 である。Fig.5 は 3.(1)①項の解析によって求められた超音波の音圧瞬時値の分布で、超音波の位相を -180° ~ 180° まで 90° 毎シフトした音圧分布値を示す。Fig.6 はこの各位

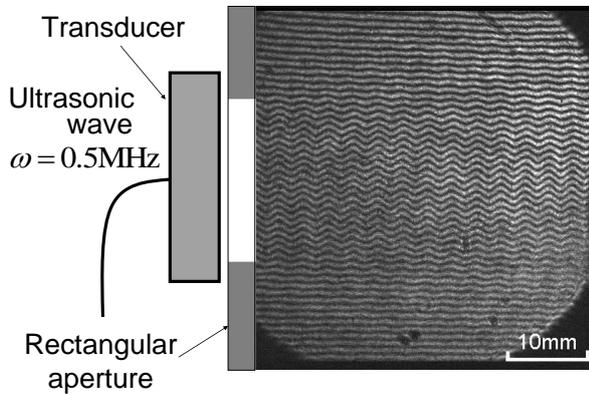


Fig.4 Holographic interference fringes $\phi = 0^\circ$ (Rectangular aperture)

相の音圧瞬時値より 3.(1)②項の位相シフト法によって算出した音圧振幅と位相分布である。

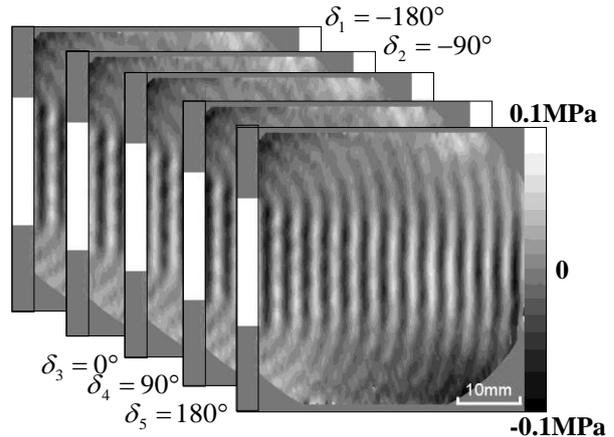


Fig.5 Distribution of sound pressure at δ 1-5 phase

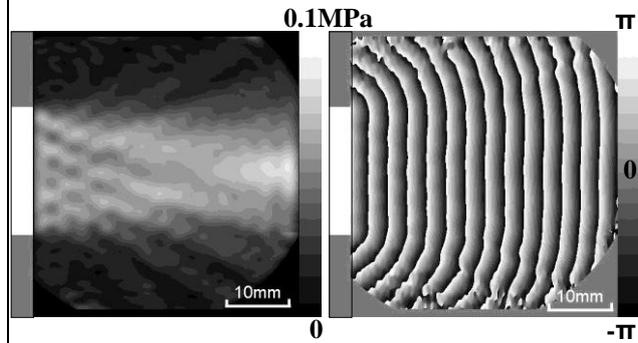


Fig.6 Distribution of sound pressure amplitude and phase

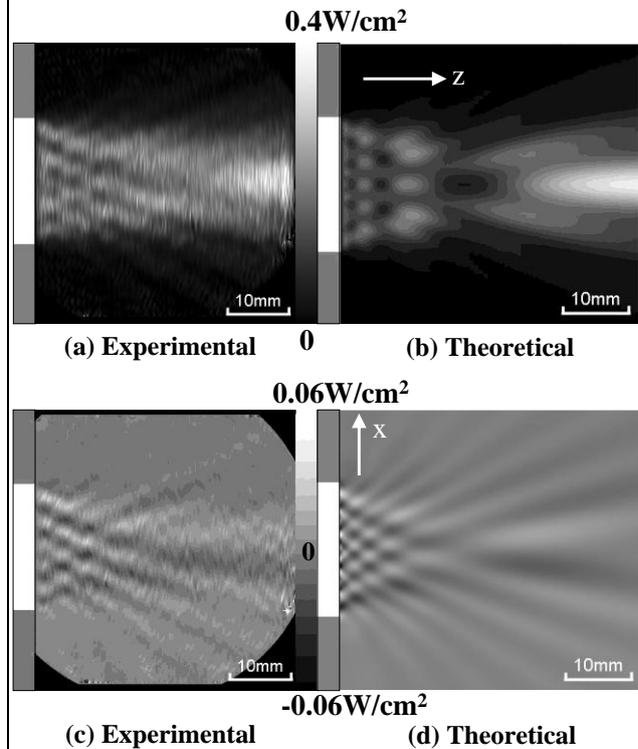


Fig.7 Distribution of sound intensity of the z and x directions (Rectangular aperture)

Fig.7 に 3.(1)③項に示したサウンドインテンシティ法による計算で求めた音場中央面での超音波進行方向($\rightarrow z$)とその直交方向($\uparrow x$)の強度分布をグレイスケールで示す。(a)、(b)は進行方向の強度分布でそれぞれ測定値と理論値を示す。(c)、(d)は進行方向に直角な方向の測定値強度分布と理論分布で、負号は $-x$ 方向を示す。得られた結果は、 z 方向 x 方向とも理論値計算で得られた強度分布と良い一致を示した。

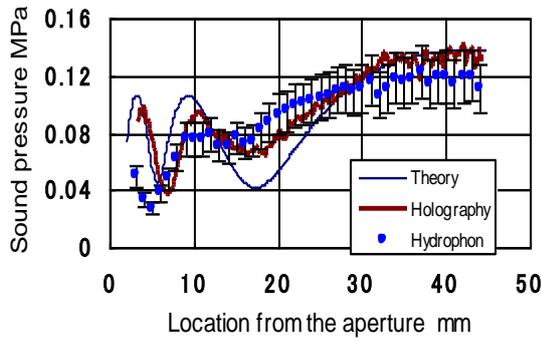


Fig.8 Holographic measured value, hydrophone measured value and theoretical value of the sound pressure amplitude on center axis.

Fig.8 は、開口中心の超音波進行方向(z 方向)軸上の超音波音圧振幅についてホログラフィ干渉法による測定値、ハイドロフォンによる測定値、および理論値を示したもので、本手法による結果とハイドロフォンの測定値とは、振動子直前を除いてハイドロフォンの測定誤差 $\pm 15\%$ の範囲でほぼ一致している。

(2) 円形開口

半径 10mm の円形開口を 4.(1)項と同様に径 32mm の超音波振動子の前に置き、周波数 500kHz、印加電圧 1.0Vp-p の正弦波信号を加えたときの音場をホログラフィ干渉法で捉えた。Fig.9 に干渉縞画像を示す。Fig.10(a)はフーリエ変換縞解析による光路長変化を示し、(b)は軸対称分布の投影データである(a)の分

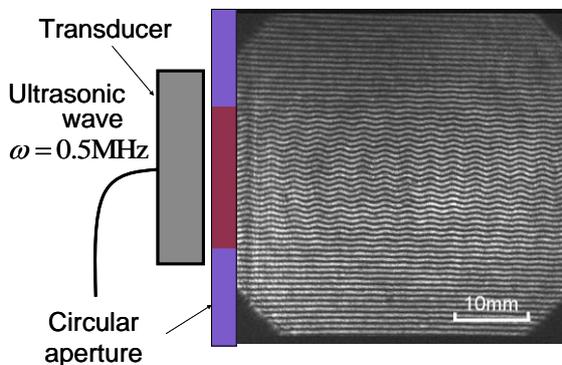


Fig.9 Holographic interference fringes $\phi = -90^\circ$ (Circular aperture)

布をフィルタ補正逆投影法による CT 解析を用い、中心軸面での局所音圧瞬時値分布を求めたものである。Fig. 11 は超音波位相をシフトさせて得た 5 枚の局所音圧瞬時値分布より

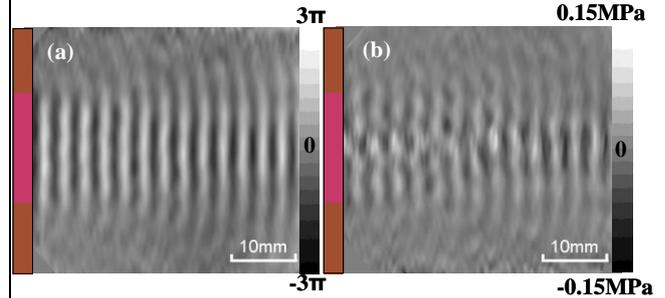


Fig.10 (a)Distribution of optical path length at ultrasonic wave phase -90deg . (b)Reconstruction of sound pressure with filtered backprojection

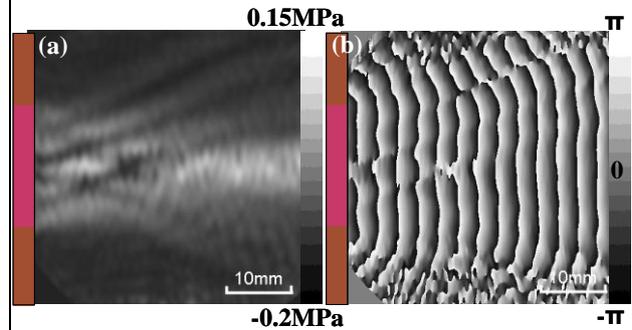
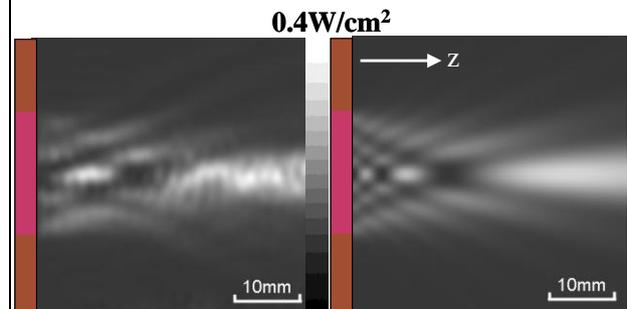
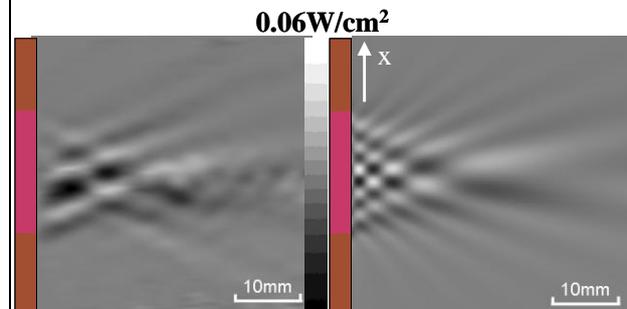


Fig.11 Distribution of sound pressure amplitude(a) and phase (b) of sound field from circular aperture



(a) Experimental $0.4\text{W}/\text{cm}^2$ (b) Theoretical $-0.1\text{W}/\text{cm}^2$



(c) Experimental $0.06\text{W}/\text{cm}^2$ (d) Theoretical $-0.06\text{W}/\text{cm}^2$

Fig.12 Distribution of sound intensity of the z and x directions (Circular aperture)

計算した音圧振幅と位相の分布である。

Fig.12 は 3.(1)③項のサウンドインテンシティ法による計算を行い、中心軸面での超音波進行方向($\rightarrow z$)とその直交方向($\uparrow x$)の強度分布をグレイスケールで示したものである。(a)、(b)に進行方向強度分布の測定値と理論値を示す。(c)、(d)は進行方向に直角な方向の測定値と理論値の強度分布で、負号は $-x$ 方向を示す。各強度ベクトル成分の値と放射パターンの実験値は、ノイズの重畳とやや分解能に欠けるが、理論の予測をよく表している。

(3) まとめ

実時間ホログラフィ干渉法を用いて超音波放射音場を50nsのパルスレーザー光で瞬間的に記録し、超音波の位相をずらせた音圧分布値を得た。その分布値から位相シフト法を用いて、超音波の音圧振幅と位相分布を求めた。さらにサウンドインテンシティ法を適用して、超音波の進行方向とそれに直交する方向の強度分布を計算した。得られた実験値の分布は、理論値の予測する分布とよい一致を示した。

- ① 光誘起屈折性結晶BSOを用いた高速度ホログラフィ干渉法の技術を開発した。
- ② 実時間ホログラフィ干渉法を用いて水中超音波の音圧瞬時値分布の測定が実現できた。超音波パルスの音圧分布とその伝搬も捉えることが可能になった。
- ③ 超音波の位相の異なる音圧瞬時値分布を求め、位相シフト法あるいはヒルベルト変換法を用いて音圧振幅分布と初期位相分布測定を可能にした。位相シフト法、ヒルベルト変換法は干渉縞解析で干渉縞の位相を抽出する手法であるが、ここでは、新たな応用として超音波の音圧の振幅と位相の算出に用いた。
- ④ 超音波領域においてサウンドインテンシティ法を適用し超音波の放射強度分布測定を実現した。CT手法を用いた軸対称音場の3次元的な解析については、誤差の蓄積、実用性の点で、研究の余地が残るが、従来、超音波の放射特性を測定する方法が非常に限定されている現状において、本手法が超音波の放射分布測定法のひとつとなりうることを示すことができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

- ① 久田重善、実時間ホログラフィ干渉法による水中超音波の放射音場の測定、**Optics & Photonics Japan 2011**、2011.11.29、大阪大学コンベンションセンター
- ② 久田重善、実時間ホログラフィ干渉法による水中超音波サウンドインテンシティ測定、**Optics & Photonics Japan 2010**、2010.11.08、中央大学駿河台記念館
- ③ 久田重善 他、ホログラフィ干渉法による超音波振動子の放射音圧場の測定、**Optics & Photonics Japan 2009**、2009.11.26、朱鷺メッセ：新潟コンベンションセンター

[その他]

ホームページ等

<http://www2.ipcku.kansai-u.ac.jp/~t751841>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久田 重善 (HISADA SHIGEYOSHI)
関西大学・システム理工学部・専任講師
研究者番号：90098111

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：