



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	電子的参照波を用いた音波ホログラフィ
Author(s)	青木, 由直; Aoki, Yoshinao
Citation	北海道大學工學部研究報告, 65, 69-79
Issue Date	1972-12-16
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41105
Type	departmental bulletin paper
File Information	65_69-80.pdf



電子的参照波を用いた音波ホログラフィ

青 木 由 直*

(昭和47年4月28日受理)

Sound-Wave Holography Using an Electronic Reference

Yoshinao AOKI

Abstract

An experiment on sound-wave holography using an electronic reference was conducted. Sound-wave holograms are constructed with an electronic reference which forms the coherent background wave. The optical reconstruction of images is done using laser light and the reconstructed true and conjugate images are observed. The reconstructed images are compared with those of a Gabor-type hologram constructed with the background sound-wave propagating in air. Sound-wave holograms are constructed for various values of the intensity ratio of the object wave and the electronic reference and the reconstructed images from these holograms are discussed. The effect of the wavelength of the sound-wave to the reconstructed images is also discussed constructing holograms using sound-waves with various frequencies from 10 kHz to 20 kHz. Further, a sound-wave hologram is constructed in an experimental arrangement where the object wave beam has a certain angle against the electronic reference beam in order to separate the reconstructed images from the background illumination in the optical reconstruction process.

1. 緒 言

音波ホログラフィ^{1)~8)}の特色の一つとして、受波器や電子回路を利用して適当な情報処理をおこなうことにより、任意の機能を持つ音波ホログラムの作製や合成が可能であることがあげられる。これは受波器や電子回路が音波の瞬時位相に応答できるため、電子回路系でいろいろな信号を干渉させ、ホログラムを作製することができるためである。たとえば光波領域のホログラフィにおいては自由空間を伝搬させて得ている参照波を電子回路などによりつくり出し、物体波の信号とくわえあわせてホログラムを作製する電子的参照波 (Electronic Reference)^{5)~8)}などが考えられる。本論文ではこの電子的参照波を利用した音波ホログラムの作製とレーザー光を用いた光学的像再生に関する実験をおこない、Gaborのコヒーレント・バックグラウンド・ホログラフィとの比較、物体波と参照波の強度比や音波の周波数の変化と再生像の関係、バックグラウンド光からの再生像の分離などにつき検討し、電子的参照波を用いた音波ホログラフィに関する基礎的研究をおこなった。

* 工学部電子工学科

2. 電子的参照波の原理

電子的参照波は Gabor 型ホログラフィにおいてはバックグラウンド波を、また Leith と Upatnieks の二光束干渉ホログラフィにおいては、参照波に相当するものを電氣的につくり音波ホログラムを作製しようとするもので、ホログラム作製の原理図を図 1 に示す。図 1 において発振器からの電気信号を音波の送波器であるツイータに代えて、物体に音波を照射する。ホログラム面では受波器であるマイクロホンが物体波による音場を走査し測定する。一方発振器から分割された電気信号を位相変換器を通してマイクロホンからの物体波の信号と重ねて加算回路にくわえる。加算回路からの信号を検波、増幅し CRT などを利用して表示し、これをカメラでフィルムに記録して音波ホログラムを得る。ここで図 1 に示すように物体波ビームに対して角度 θ で傾いた参照波を得ようとする場合は、マイクロホンの走査に同期をとって位相変換器で電子的参照波の位相を変化させる。たとえば簡単な場合としてマイクロホンの走査ごとに位相が 180° づつことなる参照波信号がかわるよう位相変換器を調整したとすると、検波器にくわえる信号は丁度式 (1) であらわされる角度でホログラム面に入射してくる平面参照波が存在する場合と同じことになる。

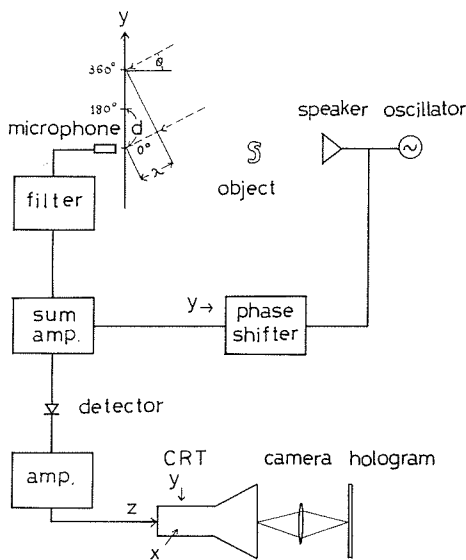


図 1 電子的参照波を用いて音波ホログラムを作製するための実験装置の原理図

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2d} \quad (1)$$

ただし式 (1) において λ は音波の波長、 d は図 1 に示すようにマイクロホンの走査周期である。ここで式 (1) の場合には位相の進み、遅れの情報が無いので角度 θ は正負の値をとり、得られたホログラムからの再生像は真の像、共役像それぞれ 2 個づつの像ができたりするので⁷⁾、それを除こうとすれば位相をもっとこきぎみに変化させてやる必要がある⁸⁾。つまり N 回の走査で 360° の位相変化をもたせるように 1 回の走査ごとに $\alpha = 360/N$ 度の位相変化を与えれば、式 (1) のかわりに次式で与えられる角度の参照波が得られることになり、 $N \geq 3$ であれば位相の進み、遅れの判別ができることになる。

$$\sin \theta = \frac{\alpha}{360} \cdot \frac{\lambda}{d} \quad (2)$$

ここで物体の構造や実験配置などによりマイクロホンが物体波のみを測定してゆくような場合は、電子的参照波は Gabor 型ホログラフィにおけるコヒーレント・バックグラウンド波を形成することになる。このような電子的参照波を用いる利点は、参照波が媒質のじょう乱などを受けず整った波面の参照波が得られること、波面形成のための音波レンズや参照波のための空間などが不必要なこと、増幅器などの調節で物体波に対して任意の強度比をもつ参照波が得られること、位相変換器とマイクロホンの走査の調節でホログラム面に任意の角度から入射する任意の波面の参照波をつくることなどができるとなことがあり、光波ホログラフィでは実現できなかったホログラ

フィ技術が可能である。

3. 実 験

3.1 実 験 装 置

電子的参照波を用いて音波ホログラムを作製するための実験装置ならびに実験配置を図2に示す。図3は物体と実験装置の写真である。本実験では Gabor 型ホログラフィを考え、コヒーレント・バックグラウンドを電気的につくり出す実験をおこなっている。物体としてはボール紙、ベニヤ板で作ったスクリーンに各種の文字を切り抜き、物体波だけが透過してゆくような構造としたものを用いた。図2において低周波発振器からの信号を分割し一方をツイータにこわえ、ツイータからの音波を物体に照射する。他方の電気信号は増幅器を通して前段増幅器を通ってきたマイクロホンからの物体波の信号とともに、抵抗を通して選択増幅器の入力端子にくわえて電子的参照波としている。選択増幅器からの出力信号は検波され、電力増幅器を通して豆ランプにくわえられ、豆ランプによって音場の表示がなされる。さらにこの表示された音場をカメラでフィルムに記録して音波ホログラムを得ている。ここで豆ランプはマイクロホンに固定さ

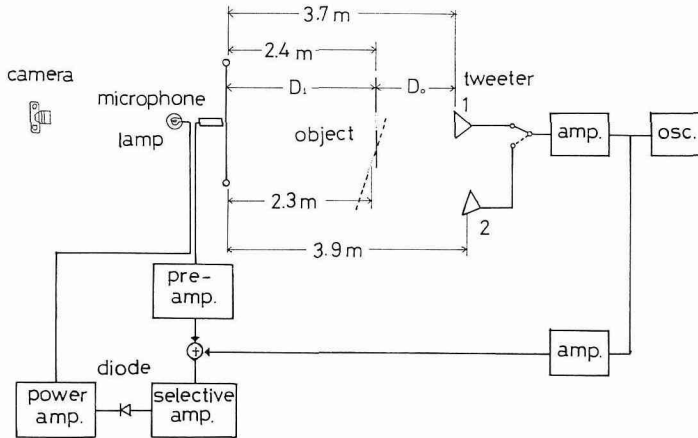


図2 電子的参照波による音波ホログラム作製のための実験配置ブロック図

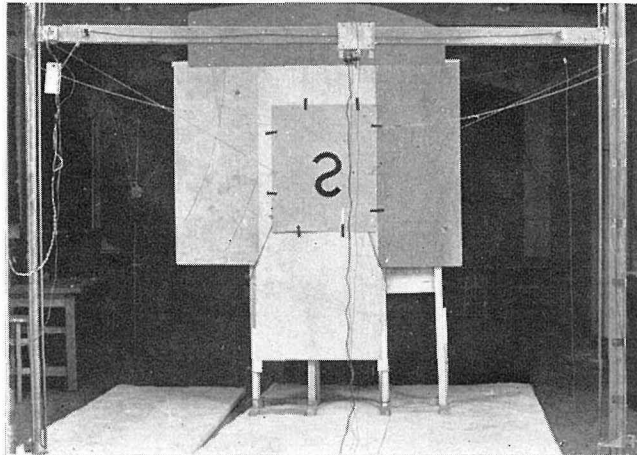


図3 物体と実験装置

れ、マイクロホンの走査は水平、垂直の2個のモーターならびにリレー回路により自動的におこなわれる。カメラを開放にしておく関係上暗室にした室内で実験をおこなったが、室内の反響音や室外からの雑音などの防止については特に考慮をほらわなかった。

3.2 音波ホログラムの作製と像再生

電子的参照波を用いた音波ホログラムの作製にあたって、まず電氣的に信号を干渉させ干渉縞を作る実験として、ツイーターからの波面と電子的参照波によって形成される平面波との干渉縞を作製する実験をおこなった。これは音源のホログラムを作製することであり、音源を点物体とみなせば得られるホログラムは点物体のホログラムであるフレネル・ゾーン・プレートになる。図2においてツイーター1に信号をくわえ、音波の周波数を15 kHzに選んで作製した音源のホログラムを図4に示す。ただしマイクロホンの行ききの走査と帰りの走査で豆ランプの点火する場所がずれてぎざぎざした干渉縞が観察される。

つぎに電子的参照波を用い図3に示されているボール紙のスクリーンに文字Sを切り抜いた物体の音波ホログラムを作製した。ただし音波の周波数は15 kHzに選んだ。得られた音波ホログラムを図5に示す。このホログラムからの像再生にあたっては図6の光学系を用いた。この光学系において、図2で約2 m×2 mのホログラム面の音場を記録して得た図5の音波ホログラ

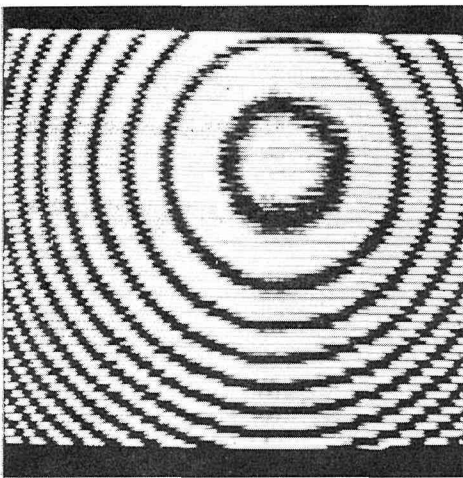


図4 電子的参照波を用いて作製した音源のホログラム

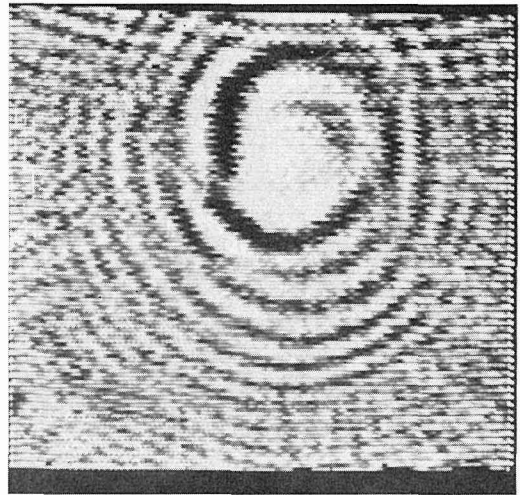


図5 電子的参照波を用いて作製した音波ホログラム物体は図3に示されている文字

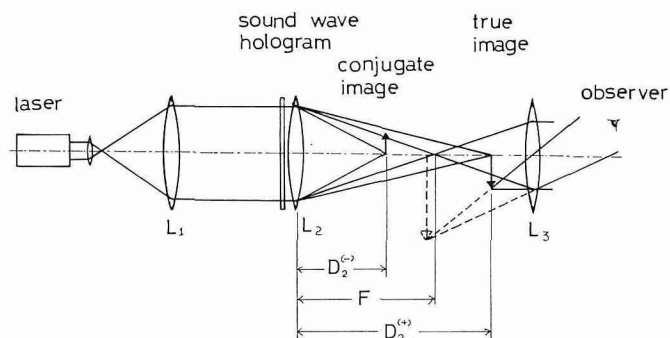


図6 像再生のための光学系

ムを $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 程度の大きさに縮小して平行光線にしたレーザー光 (6328 \AA) を照射して像再生をおこなっている。ホログラムが小さいため再生像も小さくなるので再生像をレンズ L_2 で結像させこれをレンズ L_3 で拡大して観察した。このようにして図 5 から再生された文字 S の共役像と真の像を図 7-(a) および (b) に示す。これらの再生像の大きさ、像面の位置などについては文献 2) で述べている Gabor 型の音波ホログラフィに関するものと同様に説明できるが、これらのことについては次小節において論ずる。

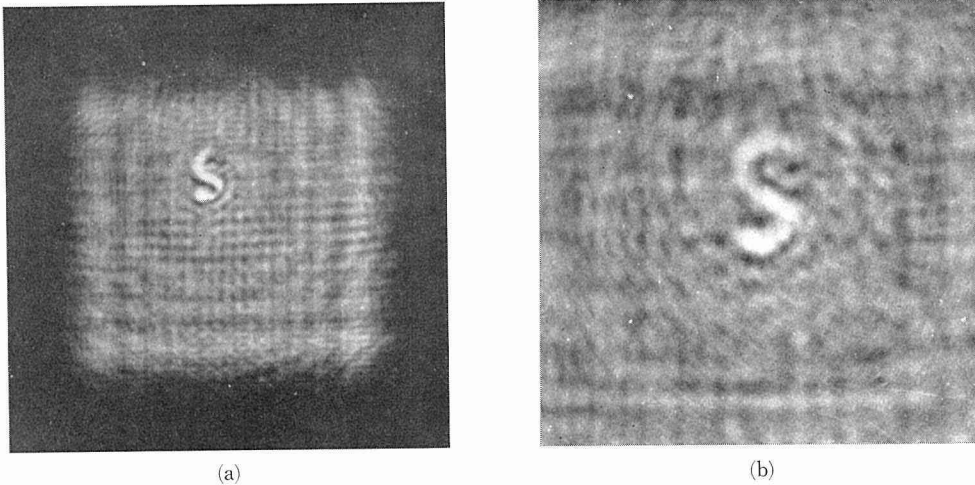


図 7 図 5 のホログラムから再生された共役像 (a) と真の像 (b)

3.3 Gabor 型ホログラフィとの比較

電子的参照波によるホログラフィと Gabor 型ホログラフィの比較、検討のため、Gabor 型ホログラフィによる音波ホログラム^{1)~4)}の作製をおこなった。図 2 において図 3 の切り抜いた文字 S と同じ大きさのアルミニウム板でつくった文字 S を先の物体と同じ場所におき、ツイーター 1 からの 15 kHz の音波をこの物体に照射してホログラムを作製した。得られた Gabor 型の音波ホログラムを図 8 に示す。図 5 と図 8 の音波ホログラムを比べてみると同じ形の物体である

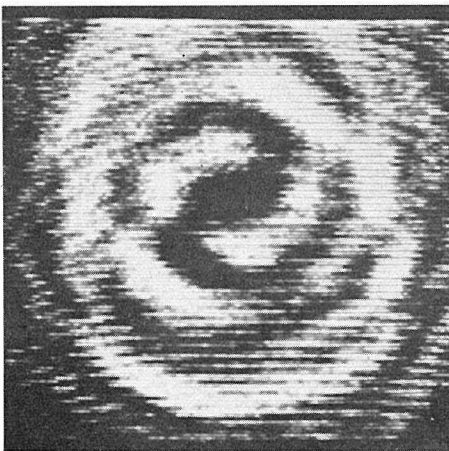


図 8 Gabor 型ホログラフィにおける音波ホログラム。物体は文字 S

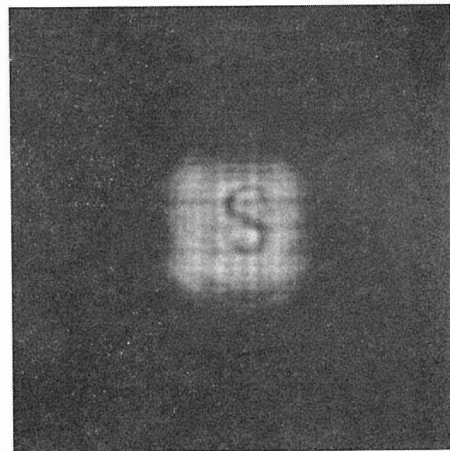


図 9 図 8 のホログラムから再生された共役像

にもかかわらずかなり異なったものとなっている。これは物体の構造により一方が音波をさえぎることによって物体波を形成し、他方は音波を透過させることによって物体波を形成していることや、Gabor型ホログラフィと電子的参照波を用いたホログラフィにおいては、コヒーレント・バックグラウンド波が前者が球面波であるのに後者は平面波になっていることなどによるものと考えられる。

図6の光学系において図8から再生された共役像を図9に示す。物体の構造上図9の再生像は図7の再生像とはコントラストが反転した関係になっているのがわかる。さらに図9の共役像は図7-(a)の共役像よりもレンズ L_2 の焦点面近くにより大きな像として再生されているが、これは文献2)の理論式より説明できる。文献2)の式(8)および(9)より図6の光学系におけるGabor型ホログラムからの共役像および真の像の再生条件はつぎのようになる。

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{D_2^g} \mp \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{D_0}{D_1(D_0+D_1)} n^2 \quad (3)$$

ただし式(3)の複号で負符号は共役像、正符号は真の像に対応しており、 D_0 は図2におけるツウィータから物体までの距離、 D_1 は物体からホログラム面までの距離、 F は図6におけるレンズ L_2 の焦点距離、 D_2^g はホログラムから再生像面までの距離(D_2^g の添字 g はGabor型の意味をつけており、後出の D_2^e の添字 e は電子的参照波によるものを意味している)、 λ_1 は音波の波長、 λ_2 はレーザー光の波長、 n はホログラムの縮小比(長さ)をあらわしている。さらに再生像については文献2)の式(10)より共役像は

$$\phi_e^g = CO^* \left(\frac{(\lambda_1/\lambda_2) D_1(D_0+D_1) + n^2 D_0 F}{nF(D_0+D_1)} x \right) \quad (4)$$

文献2)の式(11)より真の像は

$$\phi_T^g = CO \left(- \frac{(\lambda_1/\lambda_2) D_1(D_0+D_1) - n^2 D_0 F}{nF(D_0+D_1)} x \right) \quad (5)$$

と求まる。ここで式(4)および(5)において ϕ_e^g 、 ϕ_T^g は再生像面での再生像を形成する光の場をあらわし、 C は定数、 $O(x_0)$ (x 座標のみを取り扱っており、 x_0 は物体の座標)は物体をあらわす関数であり、 x は再生像面での座標である。

一方電子的参照波を平面波とすれば、電子的参照波を利用して作製したホログラムに関する像の再生条件、再生像については式(3)、(4)、(5)において $D_0 = \infty$ とおけば求められつぎのようになる。

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{D_2^e} \mp \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{n^2}{D_1} \quad (6)$$

$$\phi_e^e = CO^* \left(\frac{(\lambda_1/\lambda_2) D_1 + n^2 F}{nF} x \right) \quad (7)$$

$$\phi_T^e = CO \left(- \frac{(\lambda_1/\lambda_2) D_1 - n^2 F}{nF} x \right) \quad (8)$$

ここで共役像について考えてみると、式(3)および(6)より $F > D_2^g > D_2^e$ であり、式(4)および(7)より関数 O^* の変数 x の係数は式(4)のものの方が小さな値であるから、Gabor型ホログラムからの再生像の方が電子的参照波によるホログラムからの再生像よりもレンズ L_2 の焦点面に近いところに大きな像となって再生されることが説明できる。一方真の像については式(3)および(6)より $F < D_2^g < D_2^e$ であり、式(5)および(8)より関数 O の変数 x の係数は式(5)のものの方が大きいから、Gabor型ホログラムからの再生像の方が電子的参照波によるホログラムからの再生像よ

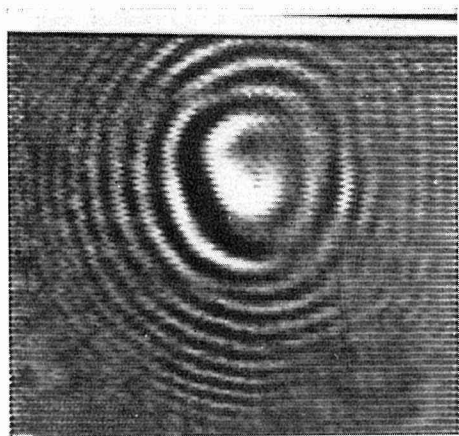
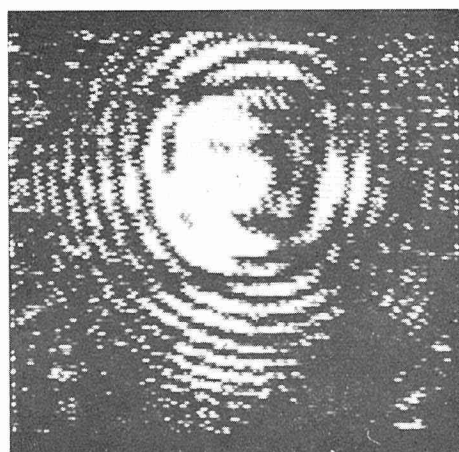
(a) $S/R=1$ (b) $S/R=2$ (c) $S/R=4$

図 10 物体波と電子的参照波の振幅比 S/R を変化させて作製した音波ホログラム。物体は文字 E

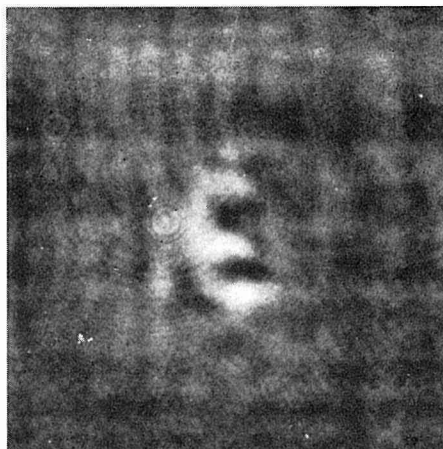
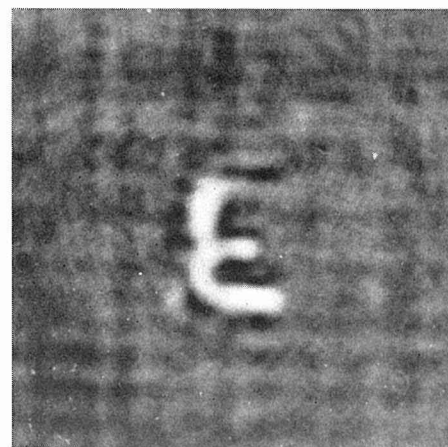
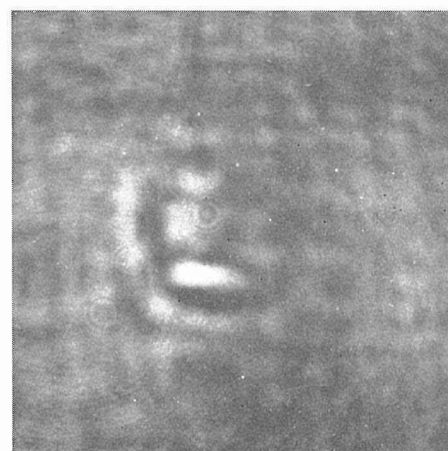
(a) $S/R=1$ (b) $S/R=2$ (c) $S/R=4$

図 11 図 10 のホログラムから再生された真の像

りもレンズ L_2 の焦点面に近いところに小さな像として再生されることになる。これは実験において観察された結果と一致している。

3.4 物体波と参照波の強度比と再生像

電子的参照波を使用する利点の一つに電子回路の調節で物体波に対して任意の強度の参照波を得ることができることがある。これは物体からの反射波や透過波が弱く、Gabor 型ホログラフィでホログラムを作製した場合、弱い物体波が強いバックグラウンド波に消されてしまう場合でもまたはその逆の場合でも、物体波に対して適当なレベルにした電子的参照波をくわえて、得られた干渉信号を増幅して干渉縞のはっきりしたホログラムを作製することが可能なことを意味している。本節では物体波と電子的参照波の強度比(振幅比)を変化させてホログラムを作製し、このホログラムからの再生像につき検討をくわえた。物体は図3に示したものと同一構造で文字はEを用いた。図2においてツウィータ1からの18 kHzの音波をこの物体に照射してホログラムを作製した。物体波対電子的参照波の振幅強度比 S/R としては、図3の物体を取り除いたときのマイクロホンの受ける音波の振幅と電子的参照波の振幅の比をとった。 $S/R=1, 2, 4$ の条件で作製した音波ホログラムを図10-(a), (b), (c)に示す。図10のホログラムより電子的参照波によるバックグラウンド波が強くなるとホログラムのバイアス項が強くなり、干渉縞のコントラストが低下してゆくのがみられる。逆に参照波の強度を弱くしてゆくと干渉縞ができなくなり、物体波のみによる音場が記録されてゆくことになる。ただし図10-(a), (b)のホログラムはフィルムに記録したホログラムを一度反転させたホログラムからの陽画であり、実際の豆ランプの明るさとは反転した関係にあるが、これはなんらかの条件でコントラストが反転した関係にある2枚のホログラムができるため、同じコントラストの再生像を得るために反転をおこなっている。このホログラムのコントラストの反転が何故おこるかについてはまだ説明がつかず今後検討するつもりである。

図10のホログラムから再生された真の像を図11-(a), (b), (c)に示す。図11の再生像をみると $S/R=2$ 程度の振幅強度比のとき最もよい再生像が得られている。

3.5 周波数変化と再生像

本実験で用いられている物体はスクリーンに切り抜かれた各種文字であり、この文字の太さ(約3.5 cm)と使用している音波の波長(10 kHzで約3.4 cm)は同程度の大きさである。よって音波の波長変化の物体波への影響が考えられ、したがってホログラムならびに再生像への影響が考えられる。そこで音波の周波数 f を10 kHzから20 kHzまで変化させて音波ホログラムを作製し、これらのホログラムから像再生をおこなってみた。音波の周波数を $f=10$ kHz, 15 kHz, 20 kHzにえらんで得たホログラムを図12-(a), (b), (c)に示す。ただし物体は図3の文字Sを用いた。図12より音波の周波数が高くなるにつれてホログラムの干渉縞は密ではっきりしたものとなってゆくのわかる。

図12のホログラムから再生された真の像を図13-(a), (b), (c)に示す。図13において周波数により再生像の大きさが異なるのは文献2)のGabor型ホログラフィでの周波数を変化させていった実験の場合と同様に説明できる。つまり真の像については式(6)において s_1 が小さくなれば D_0^2 が大きくなり、式(8)において関数 O の変数 x の係数が小さくなるから、ホログラム作製時の音波の周波数が高くなれば真の像は図6の光学系においてレンズ L_2 の焦点面からより離れたところにより大きな像となって再生されることになる。図13の再生像より文字の太さと音波の波長が同じ大きさ程度でも再生像が得られるのがわかるが、音波の波長が文字の太さより大きくなると図12(a)のホログラムにみられるように、干渉縞が雑音のなかに埋れてしまうようなホログラムになり再生像も得られなくなってしまう。

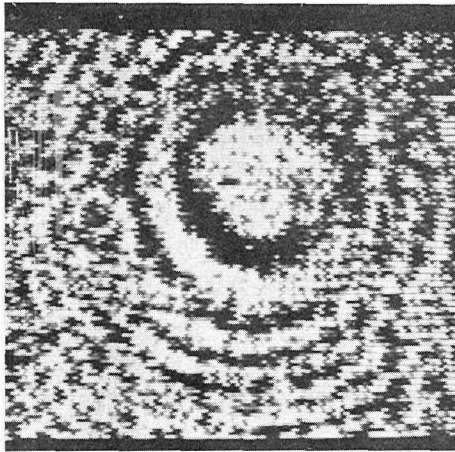
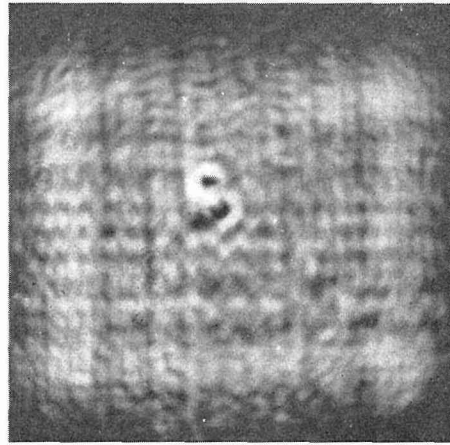
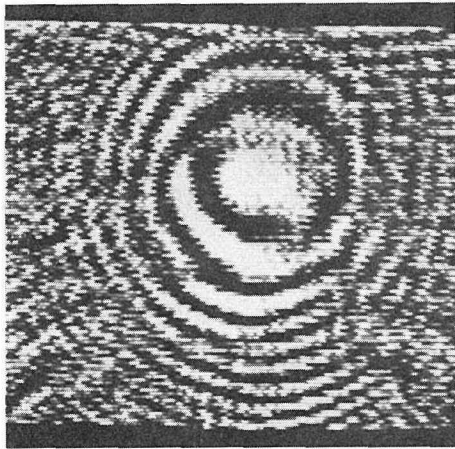
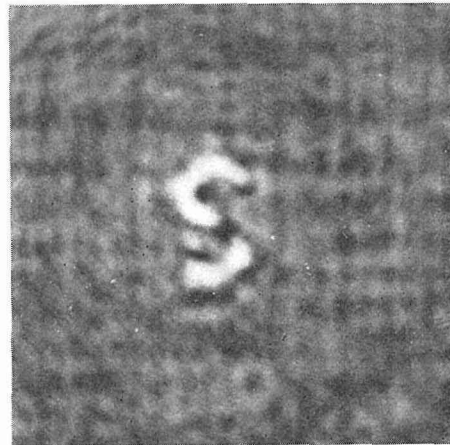
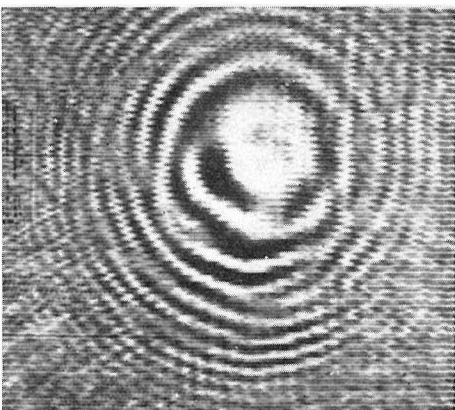
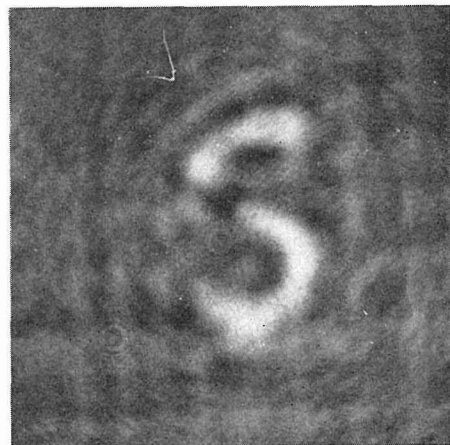
(a) $f=10$ kHz(a) $f=10$ kHz(b) $f=15$ kHz(b) $f=15$ kHz(c) $f=20$ kHz(c) $f=20$ kHz

図 12 音波の周波数 f を変化させて作製した音波ホログラム。物体は文字 S

図 13 図 12 のホログラムから再生された真の像

3.6 バックグラウンド光からの再生像の分離

Gabor 型ホログラフィにおいては、再生像は像再生のための照明バックグラウンド光と重なって再生される。電子の参照波を用いてバックグラウンド波をつくった場合、物体波とバックグラウンド波は別々につくれるので物体波ビームとバックグラウンド波ビームに任意の角度をもたせてホログラムを作製することが可能である。このように物体波ビームとバックグラウンド波ビームに適当な角度をもたせて作ったホログラムにおいては、光学的像再生の過程において像再生のための照明バックグラウンド光から像を分離して再生することが可能となる。このことを実験的に検討してみた。実験では電子の参照波による平面波に対して物体波ビームを傾むけてホログラムを作製することを考え、図2において物体を鎖線で示したようにホログラム面に対して適当な角度をもたせて配置し、ツイータ2からの18 kHzの音波を照射して物体波を得た。ここで用いた物体は文字Xを切り抜いたものである。得られたホログラムを図14に示す。

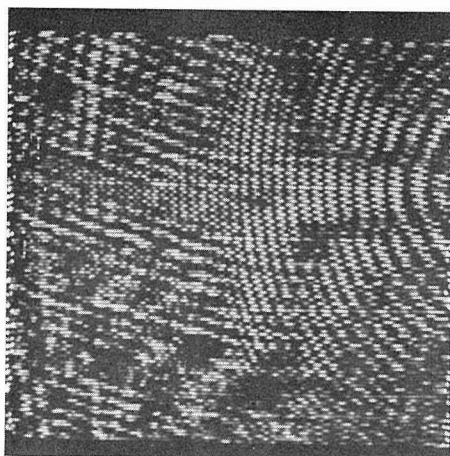


図14 物体波ビームが電子の参照波ビームに対してある角度を持つ配置で作製した音波ホログラム。物体は文字X

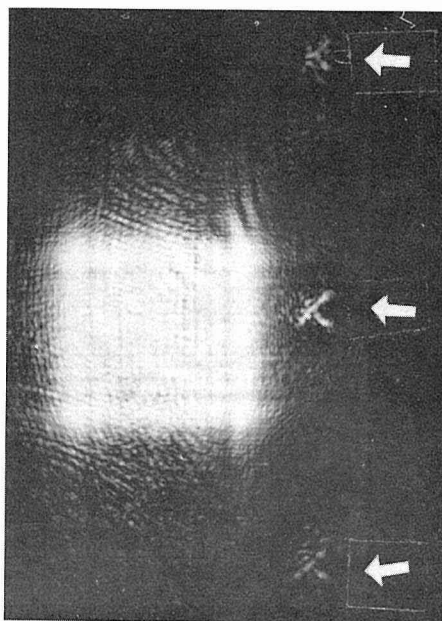


図15 図14のホログラムから再生された共役像

図14のホログラムから再生された共役像を図15に示す。図15から物体Xの像が照明バックグラウンド光から分離されて再生されているのが観察できる。また中心の文字Xの像の上下にできている文字Xの像は、マイクロホン走査(走査周期1.5 cm)によってホログラム面上にあらわれる走査線が光学的像再生の過程で回折格子の役目をしてレーザー光を回折させ、その ± 1 次の回折波によって再生された再生像である。

4. 結 言

音波ホログラム作製にあたって電子回路などにより参照波(コヒーレント・バックグラウンド波)を電氣的に形成してホログラムを作製し、得られたホログラムから光学的像再生をおこなう実験をこころみた。本論文では音波の送受波器や電子回路が波動の瞬時位相にも応答できることから、電子回路系で信号を干渉させホログラムを作製する簡単な実験をおこなっているが、さらに電子回路系で適当な情報処理をおこなえば任意の機能を持つホログラムなどの作製も可能で

あり、音波の送受波器のアレイを利用して実時間で像を再生させることも可能であろう⁹⁾。たとえば音場の測定のために多数の受波器をマトリックス状に配置し、各々の受波器からの信号を適当な位相変換器ならびに増幅器を通して対応する送波器にくわえる。これらの送波器をさらにマトリックス状に配置し、音波で再回折をおこなわせ再生像の波面を形成する方法などが考えられる。ここで受波器のアレイからの信号を検波して瞬時位相の情報をなくしたものを送波器のアレイにくわえればこれは従来のホログラフィ技術を応用していることになり、真の像、共役像の2個の像が得られる。また検波せず瞬時位相の情報も送波器のアレイにくわえれば再生される像は1個であり、従来のレンズを音波の送受波器と電子回路におきかえていることになる。これらのことはレンズ系などの使用による受動的結像法 (Passive Imaging) に対して能動的結像法 (Active Imaging) ともいふべきもので、この分野における技術のこれからの発展が期待される。

文 献

- 1) 青木由直, 吉田則信, 塚本信夫, 鈴木道雄: 応用物理 **36** (1967), 701.
- 2) 青木由直: 応用物理 **37** (1968), 243.
- 3) R. K. Mueller and N. K. Sheridan: Appl. Phys. Letters **9** (1966) 328.
- 4) A. F. Metherell, H. M. A. El-Sum, J. J. Dreher and L. Larmore: Phys. Letters **24 A** (1967) 547; Appl. Phys. Letters **10** (1967) 277.
- 5) K. Rreston, Jr. and J. L. Kreuzer: Appl. Phys. Letters **10** (1967) 150.
- 6) G. A. Massey: Proc. IEEE (Letters) **55** (1967) 1115.
- 7) A. F. Metherell and H. A. El-Sum: Appl. Phys. Letters **11** (1967) 20.
- 8) R. B. MacAnally: Appl. Phys. Letters **11** (1967) 266.
- 9) 青木由直: 応用物理 **37** (1968), 866.