

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1009 Sep. 2001

超音波ホログラフィーによる水中視認技術の開発

白 井 一 洋
吉 江 宗 生
佐 藤 栄 治

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 水中視認技術の現状	4
2.1 光学的な方法	4
2.1 超音波による方法	4
3. 水中映像装置の開発目的とシステムの検討	5
3.1 試作機的设计条件	5
4. ホログラフイーの基本原理解	5
4.1 光によるホログラフイー	5
4.2 音響ホログラフイー	6
5. 試作システムの仕様	6
5.1 試作装置における画像再生法	7
5.2 画像表示方法	13
6. 水槽実験	16
6.1 実験条件	16
6.2 距離方向画像再生実験	16
6.3 同一断面での画像再生実験	17
6.4 同一断面での画像再生実験 (複雑な形状)	18
6.5 平板の画像再生実験	19
6.6 捨て石の画像再生実験	21
6.7 考察	22
7. 結論	25
8. あとがき	25
謝辞	25
参考文献	25

Development of Underwater Imaging Technology Using Acoustic Holography

Kazuhiro SHIRAI*
Muneo YOSHIE*
Eiji SATO**

Synopsis

For port and airport construction works, site work control and quality control are generally conducted through direct measurement or direct visual observation by divers, and visualization using optical underwater TV cameras or ultrasonic instrumentation technology. For improvement of efficiency and accuracy of these works, development of visualization technology applicable in turbid water is required. The visualization technology in turbid water is also an issue to be solved for remote control of underwater construction machines from ships. Underwater TV cameras are generally used as a means to visualize images of underwater objects. However, in areas such as bays, river mouths, and port and harbor construction sites, the range of visibility is extremely short due to high turbidity and low transparency, and these underwater cameras can see only over a short distance. With these requirements, we began developing an apparatus for imaging underwater objects using ultrasonic wave which can propagate even in turbid water. The main result by the water tank experiment is as follows.

- 1.The position of the lamp was able to be displayed by using the prototype.
- 2.The outline of the object was not able to be displayed by the prototype.
- 3.The following is necessary for reducing the change of the reproduction image.
The amplitude of the ultrasonic wave pulse should be kept constant.
It is necessary to use the amplifier with a wide dynamic range.
- 4.The method of obtaining the vertical direction resolution uses the pulse, and when the object is scattered, is effective.

Key Words: acoustic holography ,underwater imaging

*Senior Researcher, Construction and Control systems Department

**Member of Construction Equipment Division, Construction and Control systems Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-445063 Fax : +81-468-440575 e-mail:shirai@phri.go.jp

超音波ホログラフィーによる水中視認技術の開発

白井一洋*
吉江宗生*
佐藤栄治**

要 旨

港湾や海上空港建設の水中部工事においては、施工管理や品質管理は潜水士による直接計測や直接視認あるいは光学式水中テレビカメラによる視認や超音波による計測技術を使用して行われている。これら作業の効率、精度等の一層の向上のため、濁水中での視認技術の開発が期待されている。また、水中施工機械を船上から遠隔操作するために解決すべき課題の1つとして、濁水中での視認技術が上げられる。水中部の視認装置としては、水中テレビカメラが一般的に使用されているが、湾内や河川の流入部、港湾建設工事の現場等では透明度が低く、濁りのために可視距離が極端に短く近距離しか見ることができない。このため、濁水中でも伝搬可能な超音波による水中映像化技術の研究が数多く行われているが、実用化されたものがないのが現状である。

本研究では、超音波による映像化技術実用化のための資料を得ることを目的に、超音波ホログラフィーによる水中映像装置を試作し、水槽実験により水中物体の映像化の可能性、問題点の検討を行った。その結果以下のことが明らかになった。

1. 1個の送波器と複数の受波器から構成される装置で、1回の超音波の送受波で電球の位置を表示することは可能であった。
2. 周波数600kHzの超音波で受波器アレーの面積が25×25cmでは、反射体の輪郭を正確に表示することは出来ない。
3. ホログラム作成位置の僅かな差による再生像の変化を防ぐには以下の2点の対策が必要である。
送波パルスの振幅を安定させる。
反射波が変形しないように受波器アンプのダイナミックレンジを広く取る。
4. トーンバースト波による垂直方向の分解能を得る手法は、パルス幅以上の間隔で物体が配置されている場合は有効であるが、連続的に水深が変化する斜面や、捨て石等に対しては有効ではない。

キーワード：超音波ホログラフィー、水中視認

* 施工・制御技術部 主任研究官

** 施工・制御技術部 施工技術研究室

1. まえがき

港湾や海上空港の建設の海中部工事における安全性の確保、省力化、効率的施工、高精度な施工を実現する目的で、水中工事を機械化するための施工機械（例えば水中バックホー）の開発が進められている。海中工事の機械化施工を実現するために必要な要素技術の一つに、海中の工事状況を監視する装置の開発があげられる。現在、水中の状況を観察するためには水中テレビカメラ等の利用がなされているが、このような光学的方法では浮遊粒子による光の散乱により視界が閉ざされるため、濁った海域での海洋工事に適用することができない。濁水中も透過する超音波による映像化技術は多数の研究がなされているが、水中での使用を目的とした超音波映像装置は実用化されたものがない。

本研究では超音波による映像化技術実用化のための技術開発を目的に、超音波ホログラフィーによる水中映像装置を試作し水槽実験を行った。水槽実験により超音波ホログラフィー技術による水中物体の映像化の可能性、問題点の検討を行った。

2. 水中映像技術の現状

水中における映像技術として現在一般に実用化されているものは、光学的な水中テレビカメラであるが、濁りのために透明度の低い港湾工事の施工現場での使用には適していない。その他、光学的な映像装置としては、照明光の少ない場所でも撮影可能なスーパーハープ管を使用したハープカメラ、ある程度の濁りの中でも視認可能な水中レーザー視認装置が開発されている。しかし、濁りのひどい海域においては、光学的な方法では浮遊粒子により光が反射、散乱され対象物まで届かないため映像を得ることが不可能となる。このため、濁水中でも伝搬可能な超音波による水中映像装置の開発が行われている。

2.1 光学的方法

(1) 水中テレビカメラ

一般的な水中テレビカメラは、陸上で使用されている光学的なテレビカメラを防水容器の中に入れておくものが多く、透明度の良好な場合には十分な効果が得られる。しかし、濁りの激しい海域では、カメラの照明光のため、浮遊粒子による散乱光で浮遊粒子が明るく浮き立ち、また、散乱光がハレーションやゴーストの原因となり画質が低下する。第一港湾建設局による新潟港付近での水中テレビカメラによる観察実績では、透明度2～5mの海

域で、視認距離は1.5～4mという結果を得ている。¹⁾ 水中テレビカメラの中で特に高感度なものとして開発されたスーパーハープ管を使用したハープカメラというテレビカメラがある。これは超高感度なうえにハイビジョンにも使用可能な高解像度を有する撮像管である。通常の水の中テレビカメラの最低被写体照度が約4～10Luxに対し、ハープカメラは約0.02～0.0075Luxとかなりの高感度であり少ない照明光での撮影が可能である。第四港湾建設局で行ったドック内での水中掘削時の濁水中での視認距離確認実験では、濁度7ppmで50cmまで、濁度14ppmで10cmまで視認可能であった。²⁾

(2) 水中レーザー視認装置

水中レーザー視認装置は、第一港湾建設局、港湾技術研究所、石川島播磨重工業によりレーザー光を用いた濁水中での視認を目的に開発された映像システムである。濁水中では、浮遊粒子により照明光が散乱され、被写体からの反射光が散乱光によりマスクされ被写体が見えなくなる。この状態では、照明光源をより強力な光源にしても、また、ハープカメラ等の高感度カメラを使用しても視認性は向上しない。これを解決するためレンジゲート方式と呼ばれる技術を採用した。この原理は、レーザー光をパルス状にして照射し、被写体から反射光が戻ってくるまでの間シャッターを閉じ、散乱光を受けないようにし、反射光が戻ってきた時間だけシャッターを開き受光する。反射光が通過した後は再びシャッターを閉じて散乱光を受けない様にする。この方法により散乱光をなるべく受光しないようにして、被写体の映像を得ることができる。第四港湾建設局で行ったドック内での水中掘削中の視認距離確認実験では、濁度30ppmで40cmまで視認可能であった。²⁾

2.2 超音波による方法

超音波による映像化技術は、光や電波による映像化が困難な環境条件で使用されることが多い。超音波映像技術の適用されている分野は、水中映像、医用映像、非破壊検査映像等があり、環境条件、使用目的等により使用される超音波周波数が異なっている。超音波映像装置の結像方式は音響フォーカス方式、電子フォーカス方式、ホログラフィー方式に分類される。^{3)・4)} 以下に各種方式の特徴について述べる。

(1) 音響フォーカス方式

この方式は光学レンズによる結像と類似の方法で、受波音響信号をアクリル樹脂のような固体やシリコン油のような液体で作られた音響レンズにより結像するものである。光源に相当する送波器から放射される超音波を対

象物に当て、その反射波を音響レンズにより受波器アレー面上に結像させ、受波器各素子からの出力信号を増幅、検波し画面上に表示する。この方式は音波の伝搬とともに結像処理が終了するため、1画面の取得が非常に高速に行われる。⁵⁾

(2) 電子フォーカス方式

この方式は平面配置した送受波器アレーを使用して、遅延または位相補償回路により超音波ビームを形成し、観測領域をこのビームで走査するものである。クロスアレー送受波器は、この方式に分類される。クロスアレー送受波器は、複数の送波器素子、受波器素子をそれぞれ直線状に並べたもの（送波器アレー、受波器アレーと呼ぶ）を直交させて配置したもので、各アレーは扇状の指向性を持ち、海底面でそれぞれの分解面積が重なった部分が装置の分解面積となるようにして狭ビーム化したものである。受波素子からの出力信号を遅延回路を通して合成することにより、受波ビームを走査させ、断面映像を合成する。⁶⁾

(3) ホログラフィー方式

この方式は平面配置した送受波器アレーを使用し、受波素子の出力信号からホログラムを検出し、数値計算により像を再生する。1回の送受信により広範囲の情報を記録する事ができる。⁷⁾

3. 水中映像装置の開発目的とシステムの検討

濁水中の物体を3次元映像としてリアルタイムに捉えることが出来る映像装置は、前述のように各種研究されているものの実用化されたものが無いのが現状である。本研究は、港湾工事での均し作業の機械化施工のための映像化技術として、捨て石面の視認を目的に開発を行うものであり、技術開発目標を次のように定めた。

- ・ 3次元映像を得る。
- ・ リアルタイムな映像を得る。

この技術開発目標を達成する可能性の最も高いものとして、超音波映像技術について検討した結果、以下の理由により超音波ホログラフィー方式を選定し開発に着手した。

音響レンズ方式の場合は、音響レンズの結像作用を利用するために画像信号が直接得られ、リアルタイムな映像が得られる。しかし、超音波撮像管の構造上の問題から、奥行き方向の十分な分解能が得られないこと及び撮像管の感度が十分得られない。

電子フォーカス方式の場合は、3次元的な映像を得るには、送波ビームを形成しスキヤニングして画像データ

を得なければならない。スキヤニングに時間を要し、リアルタイムに映像を得にくい。

ホログラフィー方式の場合は、1回の送受信により3次元的な映像データを得る事が出来るので、移動しながらのデータ取得においても、映像が歪むことがない。また、最近のコンピュータ技術の発達により画像再生のための計算時間が飛躍的に短縮され、画像表示が高速に行えるようになりつつある。

3.1 試作機的设计条件

本装置は水中施工機械（水中バックホー）に搭載し、捨て石面を見ることを目的に開発を行う。現在使用されている水中バックホーの平均的な能力は、以下のようになる。⁹⁾

- ・ 対象物 基礎捨て石 30~300kg/個
- ・ 最大作業半径 8m
- ・ 最大作業水深 -30m
- ・ 均し精度 ±30cm（荒均し）

この条件から、視認装置の設計条件を以下のように決めた。

(1) 視認距離

最大作業半径が8mであるので、視認距離を10mとする。

(2) 水平方向分解能

対象とする捨て石の大きさから石を球体とすると直径30~60cm程度となる。水平方向分解能は距離10mにおいて10cmとする。

(3) 垂直方向分解能

均し精度が±30cm（荒均し）と石の大きさを考慮して垂直方向分解能は10cmとする。

4. ホログラフィーの基本原理

ホログラフィーは1948年にGaborによって光による映像の記録再生方法として発表されて以来、応用研究がなされてきた。ホログラフィー技術は映像の記録と再生の技術であり、ホログラムの記録と映像の再生という2段階の処理を必要とする。光以外の波動、X線、電波、音波などの領域にも同様の原理が当てはまり応用研究が行われている。音響ホログラフィーは1960年代後半ぐらいから出現し、1970年代に研究が盛んに行われた。

4.1 光によるホログラフィー⁸⁾

図-1に示すように物体からの物体光の位相と振幅を感光材料に同時に記録する。この位相と振幅の記録されたものをホログラムと呼んでいる。光波の場合、位相を

直接記録できないためレーザ光を使用して、物体光に参照光をあて、感光材料に干渉縞として記録している。像の再生は図-2 に示すようにホログラムに参照光をあてることによって、位相と振幅が物体光と同じ光波が再生され、物体を置いた位置に映像が再生される。

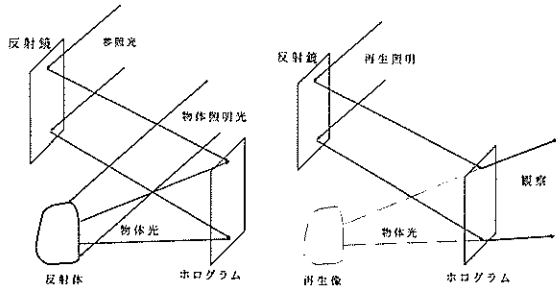


図-1 ホログラムの記録 図-2 像の再生

4.2 音響ホログラフィー

音響ホログラフィーの原理は、光波の場合と同等でありホログラムの記録と映像の再生という2段階の処理を行う。遠方にある物体に超音波を照射し、物体から反射された音波を記録し映像を再生する場合について簡単に記述する。

送受波器の構成は、1個の送波器と多数の受波器から成り、物体に超音波をあて反射波を同時に多数の受波器で記録する。これは、光波のホログラフィーの場合の感光材料に干渉縞として物体光を記録する事に相当する。しかし、光波と異なり超音波の場合、受波器で反射波の位相と振幅を直接記録できるため参照波は必要ない。この各受波器により記録されたものをホログラムと呼んでいる。記録されたホログラムは、物体反射面の各点を点音源の集まりとして放射される球面波を受波器素子を配置した検出面で記録したものと考えられる。記録された個々の球面波は、送波器、反射点、受波器という経路を通過したことによる距離差により位相差が生じる。

映像の再生は、記録されたホログラムを受波器から映像再生面の各点に対して球面波の逆伝搬処理により行う。各受波器から映像化する対象面上の任意の点までの距離を求め、位相回転を計算して、受波器面から任意の点まで超音波が逆戻りした状態に成るように受波された反射波に計算された位相回転を掛けて、ホログラム面全体について加算する。任意の点に反射体が有る場合は同位相となり加算され強め合い、反射体が無い場合には様々な位相で加算され弱め合うことになり、反射体の位置が表示される。この操作は、光波のホログラフィーでホログラムに参照光をあてることに対応する。

5. 試作システムの仕様

本装置は、濁水中の状況を映像として捉えることを目的として開発中のもので、超音波ホログラフィーの手法を用いて像を再生し、奥行き方向の分解能を得るため、トーンバースト波を使用して、1回の超音波の送受波により送受波器からの距離1~10mの範囲を10cm間隔で1mまで10断面の映像を得ることができる。

・装置仕様

- | | |
|-----------|-----------------------|
| 1) 超音波周波数 | 600kHz |
| 2) 撮影距離範囲 | 1~10m |
| 3) 撮影距離 | 1m (10cm×10断面) |
| 4) 送波器 | 1ch |
| 5) 受波器 | 11ch×6+10ch×5 (116ch) |
| 6) 視野角 | 約12° |
| 7) 分解能 | 10cm (奥行き方向) |
| 8) 表示内容 | 正面, 断面 |
| 9) 耐水圧 | 30m以上 |
| 10) 電源 | AC100V |

(1) 受波器の配置

受波器アレーの配置が水平方向分解能を決定するものである。ホログラムからの再生像の分解能は次式で表される。(1)

$$\Delta X = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin(\theta)} \dots \dots \dots (1)$$

ΔX : 水平方向分解能

λ : 超音波の波長

2θ : 物体点からホログラムを見込む角度

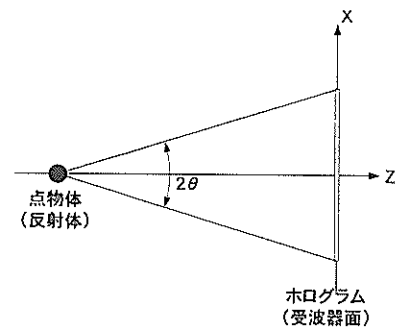


図-3 分解能

周波数600kHzで分解能を10cmとすると上記式からホログラム面(受波器アレー)の幅は25cmとなる。

本装置は図-4に示すように一辺25cmの正方形内に送受波器を配置した。中央に直径φ15mmの送波器を一個、周辺に直径φ7mmの受波器を素子間隔10λ(λ:波長)で、互い違いに配置した。

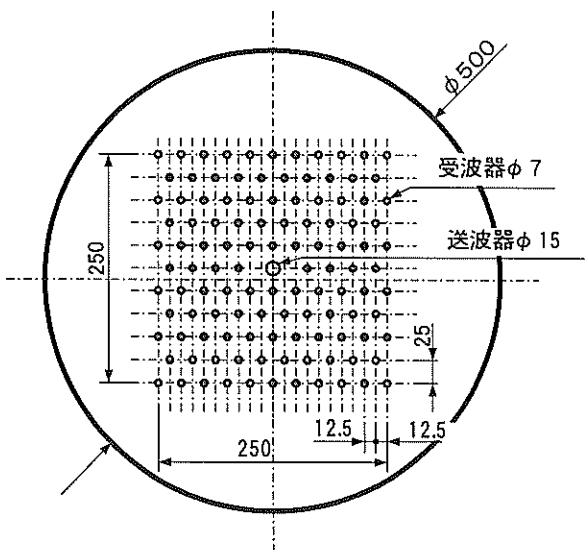


図-4 送受波器の配置

(2) 送波器の指向性

超音波が放射される範囲を確認するため送波器の指向性を測定した。円盤型送波器の指向性は、次式で表される。

$$R = \left| \frac{2J_1(Z)}{Z} \right| \dots \dots \dots (2)$$

$$Z = k \cdot a \cdot \sin(\gamma) \dots \dots \dots (3)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

R : 指向性関数 J_1 : ベッセル関数
 a : 送波器の半径 λ : 波長
 γ : 指向角

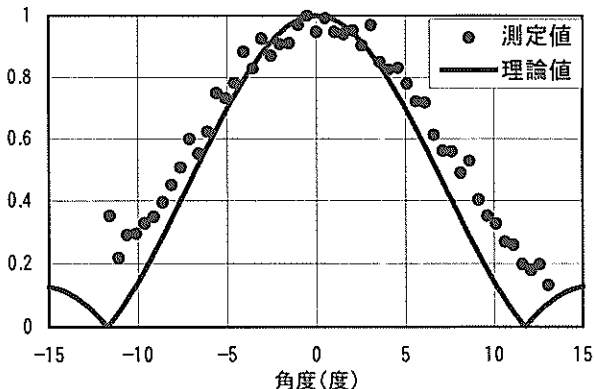


図-5 送波器の指向性

図-5に送波器の指向性を示す。計算値より少し広めの指向性となっているが、ほぼ予定した範囲に超音波が放射されているのが解る。

(3) 試作装置の構成

試作した装置の構成は、図-6に示す様に水中部に設置して超音波を送受波し、時間で区切った断面毎のホログラムデータから2次元断面像を作成する撮像部と、海上で3次元映像を作成表示する制御部からなる。

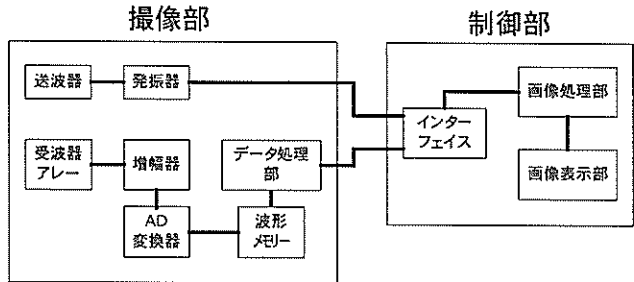


図-6 ブロック図

5. 1試作装置における画像再生法

4. 2節で音響ホログラフィーの概要について述べたが、本章では試作装置の画像再生法について詳細に述べる。

(1) 超音波の送波

超音波ホログラフィーでは距離方向の分解能が期待できないため、パルス超音波(トーンバースト波)を使用して垂直方向の分解能を得ることとした。

垂直方向分解能を10cmとすると、超音波が距離10cmを往復する時間(133 μsec)よりパルス幅を短くする必要がある。本試作機の場合、パルス幅を50 μsecとした。

(2) 反射波の記録(ホログラムの作成)

各受波素子により受波された反射波は、アンプで増幅後、AD変換されメモリーに記録される。AD変換器のサンプリング周波数が高ければ高いほど波形を忠実に再現できるが、波形演算時間が増大することとなる。本装置では1周期で8点のサンプリングを行うものとし、サンプリング周波数を4.8MHzとした。

(3) 直交検出と平均化¹⁰⁾

ホログラム面上の物体波を $H(x, y, t)$ とすると、一般的に

$$H(x, y, t) = \{RP(x, y) + jIP(x, y)\} \cdot e^{-j\omega t} \dots (4)$$

で表される。

(4)式は、複素数であり現実に受波器で測定できる信号ではない。(4)式の実数部が受波器で観測できる信号だとすると、実数部は次式で表される。

$$H(x, y, t)_{real} = B \cdot \cos(\omega t - \theta) \dots \dots \dots (5)$$

ここで

$$B = \sqrt{RP^2(x, y) + IP^2(x, y)} \dots \dots \dots (6)$$

$$\frac{RP(x, y)}{B} = \cos(\theta), \quad \frac{IP(x, y)}{B} = \sin(\theta) \quad \dots (7)$$

(5)式が、実際に受波器により測定される反射体からの反射波となる。

ホログラムからの映像の再生演算には、RP(x, y), IP(x, y)を使用するため、受波器により測定される反射体からの反射波から直交検出と呼ばれる方法でこれらの値を求めなければならない。

送波超音波とある位相差をもつ信号Tをかけ算する。

$$T = E \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad \dots (8)$$

(5)式と(8)式を掛け算すると

$$H \cdot T = B \cdot E \{ \cos(\theta + \varphi) + \cos(2\omega t - \theta) \} / 2 \quad \dots (9)$$

(9)式の $\varphi=0$ としたときの値をRH', $\varphi=\pi/2$ としたときの値をIH'とすれば

$$RH' = \frac{B \cdot E}{2} \{ \cos(\theta) + \cos(2\omega t - \theta) \} \quad \dots (10)$$

$$IH' = \frac{B \cdot E}{2} \{ \sin(\theta) + \sin(2\omega t - \theta) \} \quad \dots (11)$$

ローパスフィルタによって(10), (11)式から $2\omega t$ の成分を除去し、送波超音波と同相成分をRH, 直交成分をIHとし、さらに、 $E=2$ とおけば

$$RH = B \cdot \cos(\theta), \quad IH = B \cdot \sin(\theta) \quad \dots (12)$$

(7)と(12)式より

$$RP(x, y) = RH, \quad IP(x, y) = IH \quad \dots (13)$$

が得られる。ホログラムのRHが実数部, IHが虚数部を表している。

本装置では、16個のサンプリングデータの移動平均によりローパスフィルタとした。サンプリング周波数4.8MHz, 移動平均サンプル数16の場合、振幅が半分になるカットオフ周波数は133kHz程度となる。また、移動平均の範囲は断面表示位置から256アドレス(距離にして水中音速1500m/sの場合片道4cm)とし、移動平均した値を平均処理し(13)式の値として使用した。

(4) 画像再生演算¹¹⁾

超音波ホログラフィでは物体が点の集まりと考え、各点から球面波が放射されこれを記録したものをホログラムと呼んでいる。ホログラム上の各点から球面波を再放

射することにより映像が再生されるものである。

簡単のために1点の点音源によって得られる1次元ホログラムからの画像再生を考える。

音源が点である場合、あるいは球が対照的に膨張収縮の振動をする音源がある場合には、その周囲には球面上に広がる音波が生じる。

この音場は、波動方程式の解として

$$\phi = A \frac{e^{-jkr}}{r} \quad \dots (14)$$

A: 振幅

$k = 2\pi/\lambda$

λ : 波長

r: 音源からの距離

で表される。

ξ 軸上のP点に振幅Aの点音源を置き、X軸上のQ点における複素振幅H(x)は

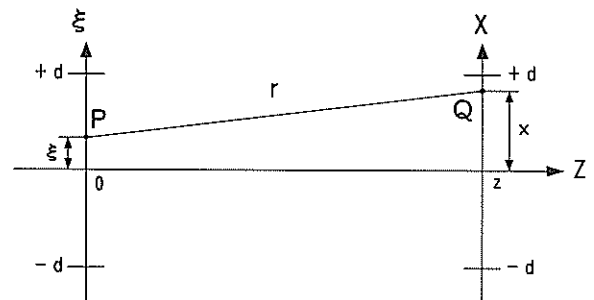


図-7 ホログラムの作成

$$H(x) = A \frac{e^{-jkr}}{r} \quad \dots (15)$$

と表される。

物体面(ξ 軸), ホログラム面(X軸), 再生面(U軸)は、領域 $\pm d$ 内でのみ変化するものとする。

$$r = \sqrt{z^2 + (x - \xi)^2} = z \left\{ 1 + \left(\frac{x - \xi}{z} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad \dots (16)$$

ここで $z \gg d$ である場合、(16)式を2項展開すると

$$r = z + \frac{1}{2z} (x - \xi)^2 - \frac{1}{8z^3} (x - \xi)^4 + \dots \quad \dots (17)$$

rは第2項までで近似できる。フレネル近似と呼ばれる。

$$r = z + \frac{1}{2z} (x - \xi)^2 \quad \dots (18)$$

(18)式を(15)式に代入すると

$$H(x) = A_1 e^{\left\{ -jk \frac{(x-\xi)^2}{2z} \right\}} \dots \dots \dots (19)$$

ここで

$$A_1 = \frac{A}{r} e^{-jkz} \dots \dots \dots (20)$$

(19)式で表される複素振幅H(x)をホログラムと呼んでいる。このホログラムH(x)を振幅透過率と見なして球面波の再放射を行うと点音源が再生される。

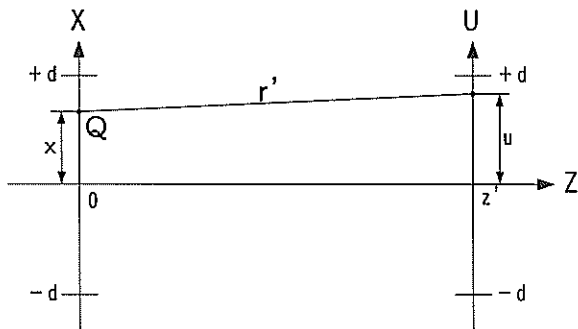


図-8 画像再生

図-8のX軸上の領域±d内の各点からホログラムH(x)を振幅透過率と見なして球面波を再放射した場合、X軸とz'だけ離れたU軸上の複素振幅 R(u)はX軸上の各点からの球面波の合成となる。

$$\begin{aligned} R(u) &= \int_{-d}^d H(x) \frac{1}{r'} e^{-jkr'} dx \\ &= \frac{A_1}{r'} \int_{-d}^d \exp \left\{ -jk \frac{(x-\xi)^2}{2z} \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left[-jk \left\{ z' + \frac{(u-x)^2}{2z'} \right\} \right] dx \\ &= A_2 \int_{-d}^d \exp \left[-jk \left\{ \left(\frac{1}{2z} + \frac{1}{2z'} \right) x^2 - \left(\frac{\xi}{z} + \frac{u}{z'} \right) x \right\} \right] dx \\ &\dots \dots \dots (21) \end{aligned}$$

ただし、

$$A_2 = \frac{A_1}{r'} \exp \left\{ -jk \left(z' + \frac{\xi^2}{2z} + \frac{u^2}{2z'} \right) \right\} \dots \dots (22)$$

ここで、U軸とξ軸が重なるz' = -zのときx²の項は消えて、

$$\begin{aligned} R(u) &= A_2 \int_{-d}^d \exp \left\{ -jk \frac{1}{z} (u-\xi)x \right\} dx \\ &= A_2 \cdot 2d \frac{\sin \alpha d}{\alpha d} \dots \dots \dots (23) \end{aligned}$$

ただし、

$$\alpha = k \frac{1}{z} (u-\xi) \dots \dots \dots (24)$$

ここで、音源の位置でのR(u)_{u=ξ}で(23)式を割ると

$$\frac{R(u)}{R(u)_{u=\xi}} = \frac{\sin(\alpha d)}{\alpha d} \dots \dots \dots (25)$$

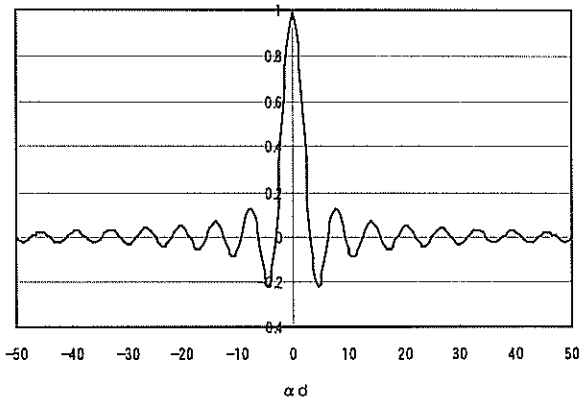


図-9 再生像

(25)式を横軸をαdとしてグラフに表すと、図-9の様になり、αd=0(音源位置)で最大値を示しているが点音源は再生されない。これはホログラム領域を±dで制限したためである。

2次元ホログラムからの像再生処理を考える。図-10に示すようにX-Y平面上のホログラムH(x,y)から距離z離れたV=U平面上の再生画像g(u,v)を求める。

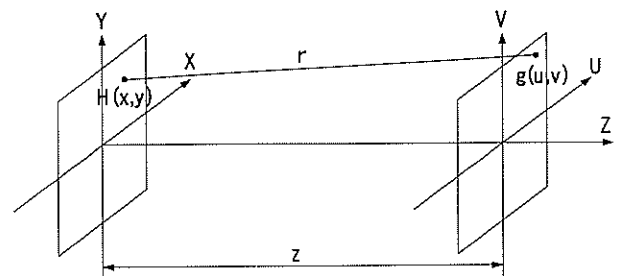


図-10 2次元ホログラムからの像再生
画像再生は(21)式と同様にホログラム面上の各点から

球面波を再放射し、この球面波の合成として再生像が表される。

$$g(u, v) = \int Hf(x, y) p(u - x, v - y) dx dy$$

$$= H(u, v) ** p(u, v) \dots \dots \dots (26)$$

ここで

$$p(u - x, v - y) = \frac{1}{r} e^{-jkr} \dots \dots \dots (27)$$

$$r = \sqrt{z^2 + (u - x)^2 + (v - y)^2} \dots \dots \dots (28)$$

(26)式の**は2次元のコンボリューションである。
P(u, v)は点拡がり関数と呼ばれ球面波の伝搬を示すものであり、線形システム理論のインパルス応答に対応する。

(5)点拡がり関数と画像再生演算¹⁾

(26)式に示すようにホログラムと点拡がり関数のコンボリューションにより再生画像が求まる。ここから、実際の映像装置では、受波器アレイの各素子によってホログラムが求まるので、連続系から離散系に変えて考える。

簡単のために3×3のホログラムのサンプリング点とこれに対応した画像再生点について演算手順を示す。

(a) 正面再生

図-11に示すようにホログラムの正面にホログラムと同じ3×3のマトリックスを再生面とする場合について示す。a₁₁~a₃₃は受波器アレイから得られる反射波のホログラムであり、C₁₁~C₃₃は再生される画像データとなる。

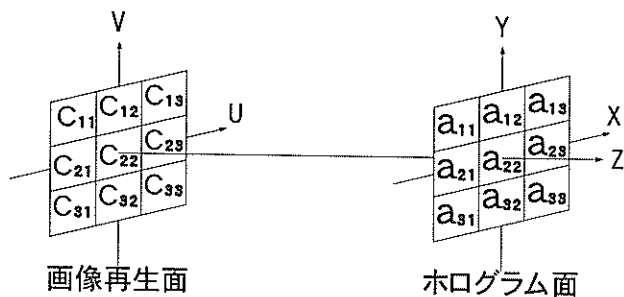


図-11 画像再生面とホログラム面

点拡がり関数 p(u, v)は、図-12に示すようにホログラム面の中心に点音源を置いたときの画像再生面上の複素振幅(ホログラム)をb₁₁~b₅₅の5×5のマトリックス上のデータとして求める。

点拡がり関数は、m×nのホログラムマトリックスに対して、(2m-1)×(2n-1)のマトリックス上

の値を計算しなければならない。

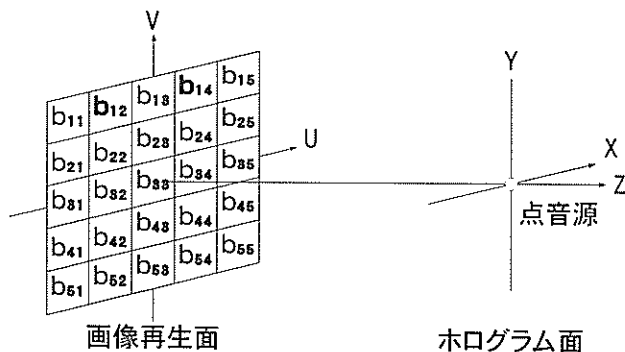


図-12 点拡がり関数

(26)式をそのまま実行して、3×3の画像再生演算を行うと点拡がり関数は、81回計算しなければならないが、この方法では、点拡がり関数は、(27)、(28)式から判るように上下左右が対称であるので中心線を含む1/4の範囲を求めればよいので、9回の計算で済む。

画像再生の演算方法は、ホログラム上の1点のデータa₁₁に対して、この点に点音源を置いた場合に画像再生面上のマトリックスと点拡がり関数のマトリックスの対応する範囲を求め、この点拡がり関数とa₁₁を掛け算して記録しておく。この操作を、ホログラム上の全データ点に対して実施し、最後に画像点に対して全てを加算することにより(26)式の結果を得る。

図-11からa₁₁の正面はC₁₁となるので、a₁₁の位置に点音源を置いた場合のC₁₁~C₃₃に対応する点拡がり関数の範囲は図-4、11に示すように、a₁₁を点音源の位置に移動するとC₁₁は点拡がり関数の中心b₃₃に重ねた位置となりb₃₃~b₅₅となる。これよりa₁₁の再生像の各点への影響を演算すると(29)式となる。

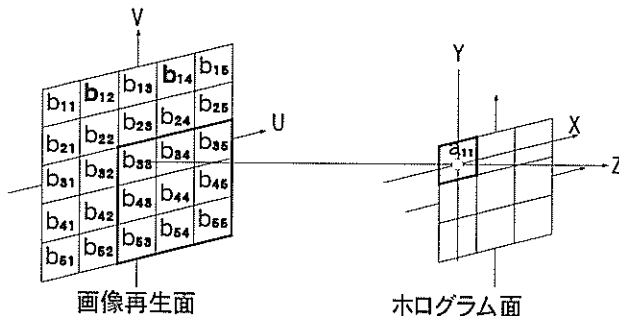


図-13 a₁₁に対する点拡がり関数の範囲

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}_{11} = a_{11} \begin{bmatrix} b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{43} & b_{44} & b_{45} \\ b_{53} & b_{54} & b_{55} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (29)$$

同様にa₁₂について演算すると点拡がり関数の範囲はb₃₂~b₅₄となり(30)式のようなになる。

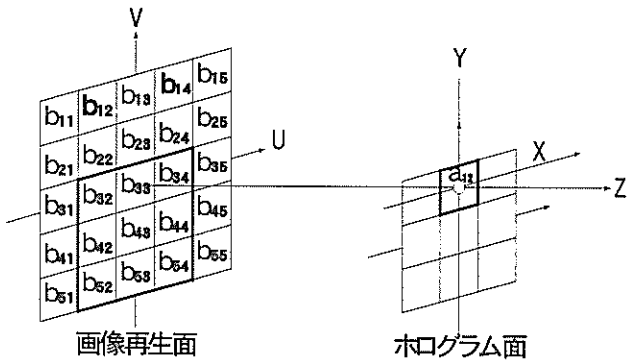


図-14 $a_{1,2}$ に対する点拡がり関数の範囲

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}_{12} = a_{11} \begin{bmatrix} b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{42} & b_{43} & b_{44} \\ b_{52} & b_{53} & b_{54} \end{bmatrix} \dots (30)$$

以下同様の方法で、ホログラム上の各点に対して演算し、その結果を全て加算することにより再生像が(31)式のように得られる。

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{11} + \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{12} + \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{13} + \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{21} + \dots + \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{32} + \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{33} \dots (31)$$

(b) 斜め前方再生

今までの説明では、ホログラムと同じ大きさの面積(受波器アレーの面積)の範囲を画像再生できるが、更に広い範囲を画像再生する方法について述べる。

図-15に示すように画像再生領域をホログラムの正面上方 $C_{41} \sim C_{63}$ とする。

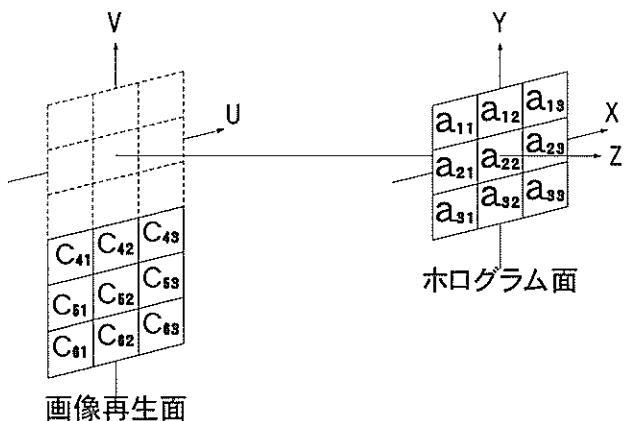


図-15 斜め前方の画像再生領域

この場合の点拡がり関数は、図-16に示すように $b_{41} \sim b_{85}$ の 5×5 のマトリクスとなりこの値を演算しておく。

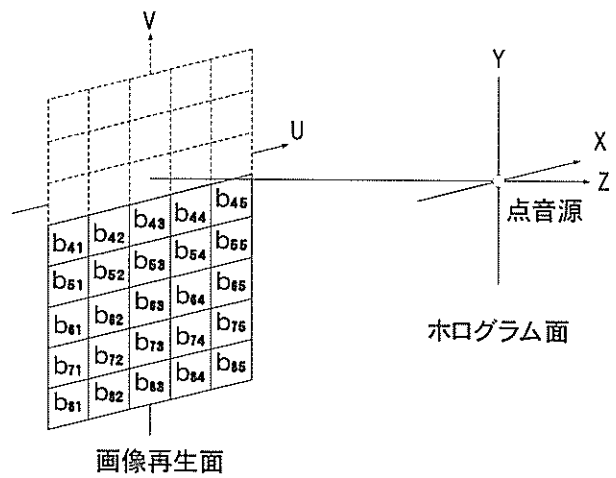


図-16 斜め前方の点拡がり関数

$a_{1,1}$ を点音源の位置に移動した場合の $C_{41} \sim C_{63}$ の相対的に移動する位置は図-17に示すように $b_{63} \sim b_{85}$ 範囲となる。これより $a_{1,1}$ の再生像の各点への影響を演算すると(32)式となる。

$$\begin{bmatrix} C_{41} & C_{42} & C_{43} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} \end{bmatrix}_{11} = a_{11} \begin{bmatrix} b_{63} & b_{64} & b_{65} \\ b_{73} & b_{74} & b_{75} \\ b_{83} & b_{84} & b_{85} \end{bmatrix} \dots (32)$$

同様の方法でホログラム上の各点に対して演算し、その結果を全て加算することにより再生像が(33)式のように得られる。

$$\begin{bmatrix} C_{41} & C_{42} & C_{43} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{11} + \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{12} + \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{13} + \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{21} + \dots + \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{32} + \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}_{33} \dots (33)$$

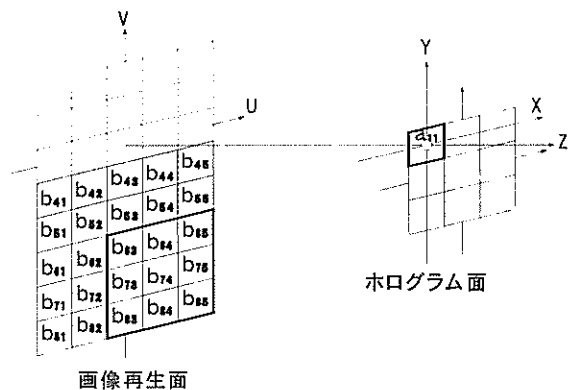


図-17 $a_{1,1}$ に対する点拡がり関数の範囲

(6) 試作機での画像再生演算

ここで、実際に行っている演算方法を整理して示す。図-18に示すような手順で演算を行っているが、①、②はすでに(1)、(2)で説明しているので、④~⑥について実際の演算について説明する。

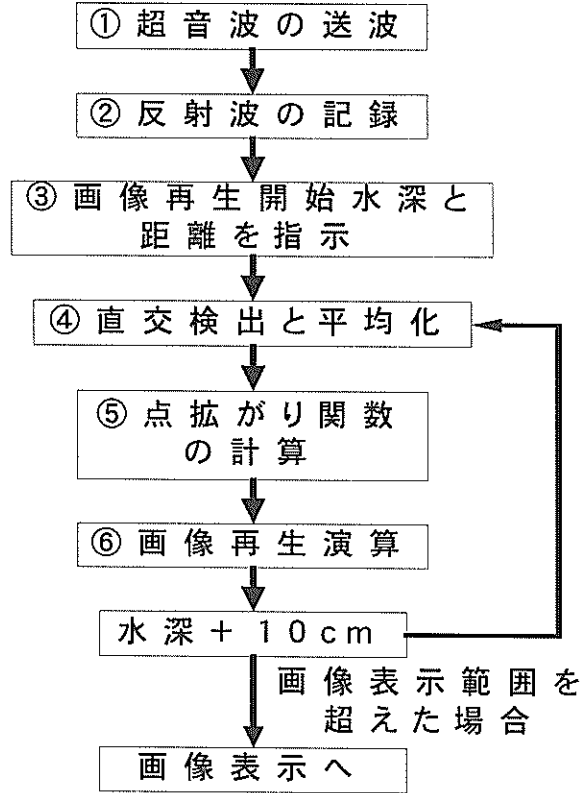


図-18 演算手順

④直交検出と平均化

(13)式のRHは複素振幅の実数部、IHは虚数部を表している。ここで得られたRHとIHは、ホログラムデータとして受波器位置に対応したマトリックスにあてはめて記録する。受波器の位置は、図-19に示すように市松模様に配置されているためドットの間隔がまばらとなる。これを、密にするため12.5mm間隔で画素データを得るため受波器の無い位置には0を代入してホログラムデータとした。

⑤点拡がり関数の計算

画像表示範囲を63×63(ドット間隔12.5mm)とすると図-20に示すように正面再生1枚(①)と斜め前方再生8枚(②~⑨)を行うことになり、これに必要な点拡がり関数のマトリックスは83×83となる。

点拡がり関数は図-21に示すようにホログラム面の中心から画像再生面までの距離zと点拡がり関数のマトリックス上の値(U, V)から(27)、(28)式により求める。原点に音源を置いたときの値であるのでX=0, Y=0である。

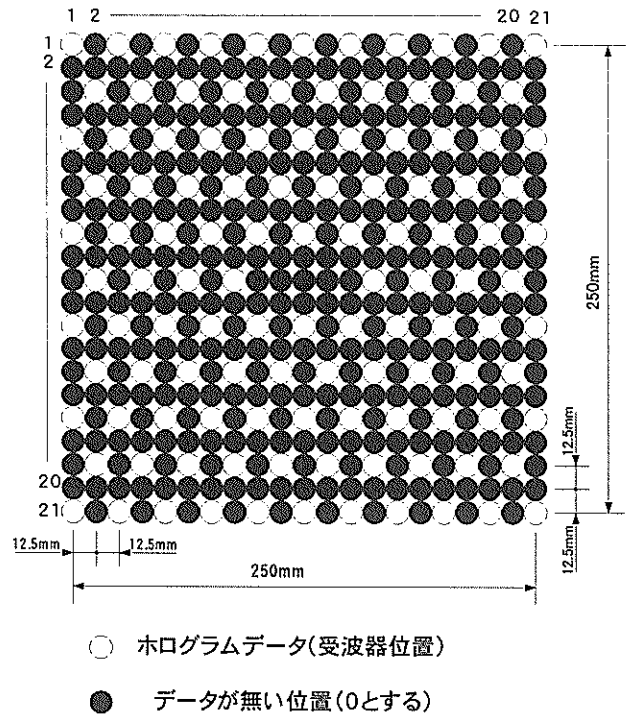


図-19 ホログラムデータの配置

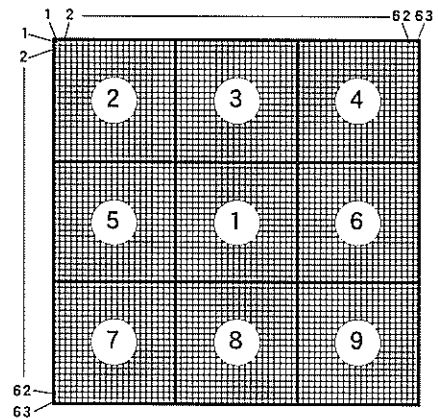


図-20 画像再生マトリックス

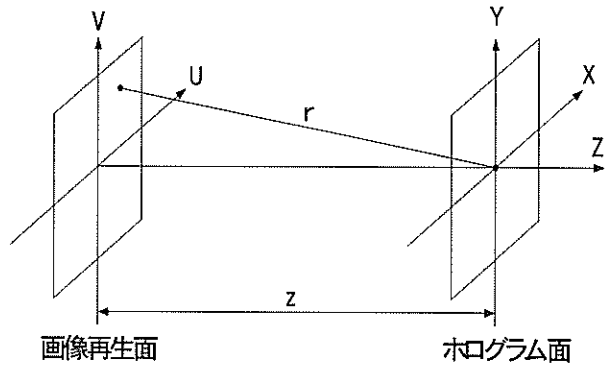


図-21 点拡がり関数の計算

(27)式より

$$b(m, n) = p(U, V) = \frac{1}{r} e^{-jkr}$$

$$= \frac{1}{r} \{ \cos(kr) - j \sin(kr) \} \dots (34)$$

ここで、実数部分は

$$RPb(m, n) = \frac{1}{r} \cos(kr) \dots (35)$$

虚数部は

$$IPb(m, n) = \frac{1}{r} \sin(kr) \dots (36)$$

となる。

$b(m, n)$ の m, n の値と $p(U, V)$ の U, V の値の関係を求める。

ホログラムのデータ間隔を d とすると、図-19から分かるように

$$d = 12.5 \text{mm} \text{である。}$$

図-22から分かるように、点拡がり関数のマトリックスの大きさを $M \times N$ とすると、中心部分のマトリックスの番号は

$$mc = \frac{(M-1)}{2} + 1, nc = \frac{(N-1)}{2} + 1 \dots (37)$$

m, n に対応する U, V の値は次式となる。

$$U = (nc - n) \cdot d, V = (mc - m) \cdot d \dots (38)$$

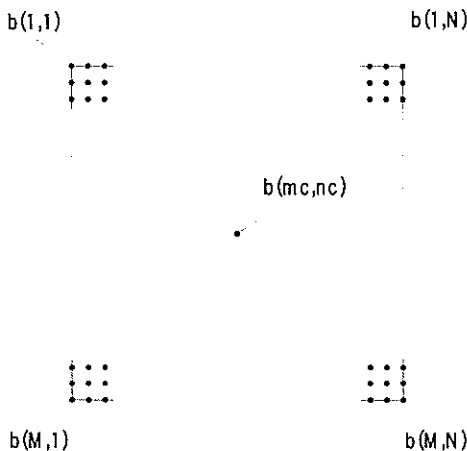


図-22 点拡がり関数の配置

⑥画像再生演算

画像再生演算は(5)画像再生演算と点拡がり関数の所で示したように点拡がり関数とホログラムの積和により求めることが出来るが、複素数であるため実数部、虚数部を別々に計算し、最後に2乗和を求める。ホログラムデータは(4)式で表され、点拡がり関数は(34), (35), (36)であらわされる。ホログラムと、点拡がり関数の積は、

$$H(x, y) \cdot b(m, n) = \{ RP(x, y) + jIP(x, y) \}$$

$$\cdot \{ RPb(m, n) - jIPb(m, n) \} \dots (39)$$

実数部分は

$$RPC(g, h) = \{ RP(x, y) \cdot RPb(m, n) + IP(x, y) \cdot IPb(m, n) \}$$

$$\dots (40)$$

虚数部分は

$$IPC(g, h) = \{ -RP(x, y) \cdot IPb(m, n) + IP(x, y) \cdot RPb(m, n) \}$$

$$\dots (41)$$

となる。

実数部分、虚数部分を正面再生の場合は(31)式、斜め前方再生の場合は(33)式により別々に演算し、その結果を実数部をRPCM(g, h)、虚数部をIPCM(g, h)とすると、求める画像再生マトリックスの値C(g, h)は次式で与えられる。

$$C(g, h) = \sqrt{RPCM(g, h)^2 + IPCM(g, h)^2} \dots (42)$$

となる。

5.2画像表示方法

超音波再生映像データは水深方向10cm間隔で水平断面毎の画像再生マトリックスデータとして与えられる。各数値データは各点の再生像の強度を表している。画像表示は、水平断面毎の表示と3次元の立体表示の2種類を表示できるものとした。

(1) 2次元断面表示

指定水深の水平断面を表示するもので、表示カラーマップの最小値、最大値を指定する。表示は最小値以下の部分を黒、最大値以上の部分を白で着色する。最大値と最小値の中間値の部分は、値に応じて黒から白へ変わるグラデーションで表示される。白い部分が物体の形状を表すことになる。超音波データの場合指向性の関係から物体の輪郭を忠実に捉えるのが困難であるため、域値を指定するよりもグラデーションにより変化する明るさから物体の形状を推定した方が良いからである。

(2) 3次元表示

3次元表示は各水平断面のデータをつなぎ合わせるにより行っている。

図-23に示すように1画素の表示を赤、青、緑に6面を塗り分けた、底面12.5mm×12.5mm、高さ100mmのブロックを表示画面の倍率に合わせてこの比率で縮小したものとした。

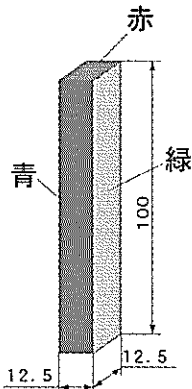


図-23 3次元表示の場合の画素

3次元表示する場合には、閾値を指定しこの値より大きい値を持つ点にブロックを表示する。更に最小値、最大値を指定し、最小値以下の部分を黒、最大値以上の部分を最大輝度で着色し、中間の値の点は値に応じて黒から最大輝度の中間輝度で着色される。この方法であれば、図-24に示すように断面毎の超音波データに従ってブロックを並べるだけで、3次元物体の面の構成や面の向き等を考慮することなく3次元表示が実現できるため高速な3次元画像表示が可能となる。

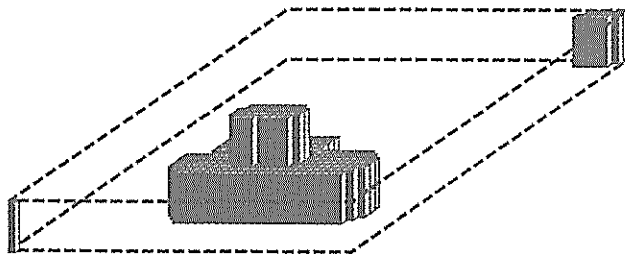


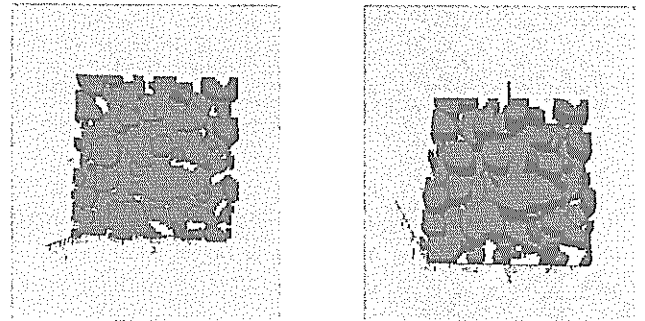
図-24 ブロックによる3次元画像表示

(3) 回転表示

3次元立体表示では画像を連続的に回転させて見ることができ、物体の上下関係や遠近感がつかみ易いようになっている。図-25は、捨て石面上に電球を糸で固定した画像であるが、回転させることにより捨て石面と電球の位置関係が明白になる。

(4) 画像表示用コントロールパネル

図-4、24に示す画像表示用のコントロールパネルにより超音波の送受波、画像再生開始位置、表示範囲等の全ての制御を行うものである。



回転1

回転2



回転3

回転4

図-25 3次元立体表示の回転回転

各部の機能は以下の通りである。

① 撮像部コントロールパネル

超音波の送波、画像再生開始深度、波形データ及び画像データのダウンロード等の撮像部の制御を行う部分である。

② 3次元表示用カラー最小値設定ダイヤル

3次元表示のカラーマップの最小値を指定する。この値以下のブロックは全面黒で表示される。

③ 3次元表示用カラー最大値設定ダイヤル

3次元表示のカラーマップの最大値を指定する。この値以上の数値の点のブロックは赤、緑、青各色の最大輝度で表示される。②と③の中間の値の点は値に応じて黒から最大輝度の中間輝度で表示される。

④ 3次元表示用閾値設定ダイヤル

3次元表示の閾値を指定する。この値より大きな値の点にブロックが表示される。

⑤ 2次元表示用カラー最小値設定ダイヤル

2次元表示のカラーマップの最小値を指定する。この値以下の数値の点は黒で表示される。

⑥ 2次元表示用カラー最大値設定ダイヤル

2次元表示のカラーマップの最大値を指定する。この値以上の数値の点は白で表示される。⑤と⑥の中間の値の点は値に応じて黒から白へ変わるグラデーションで表示される。

⑦ 最新データの3次元表示窓

撮像部から送られてきた最新画像データによる3次元立体像を表示する。

⑧最新データの2次元表示窓

撮像部から送られてきた最新画像データによる2次元断面像を表示する。

⑨ファイルに保存されたデータの3次元表示窓

あらかじめファイルに保存しておいた画像データによる3次元立体像を表示する。

⑩ファイルに保存されたデータの2次元表示窓

あらかじめファイルに保存しておいた画像データによる2次元断面像を表示する。

⑪最新データの2次元断面番号

撮像部から送られてきた最新画像データの何枚目の断面を⑧に表示するかを指定する。

⑫最新データの最大値・最小値の表示撮像部から送られてきた最新画像データの最大値と最小値が表示される。

⑬ファイルに保存されたデータの2次元断面番号

あらかじめファイルに保存しておいた画像データの何枚目の断面を⑩に表示するかを指定する。

⑭ファイルに保存されたデータの最大値・最小値の表示あらかじめファイルに保存しておいた画像データの最大値と最小値が表示される。

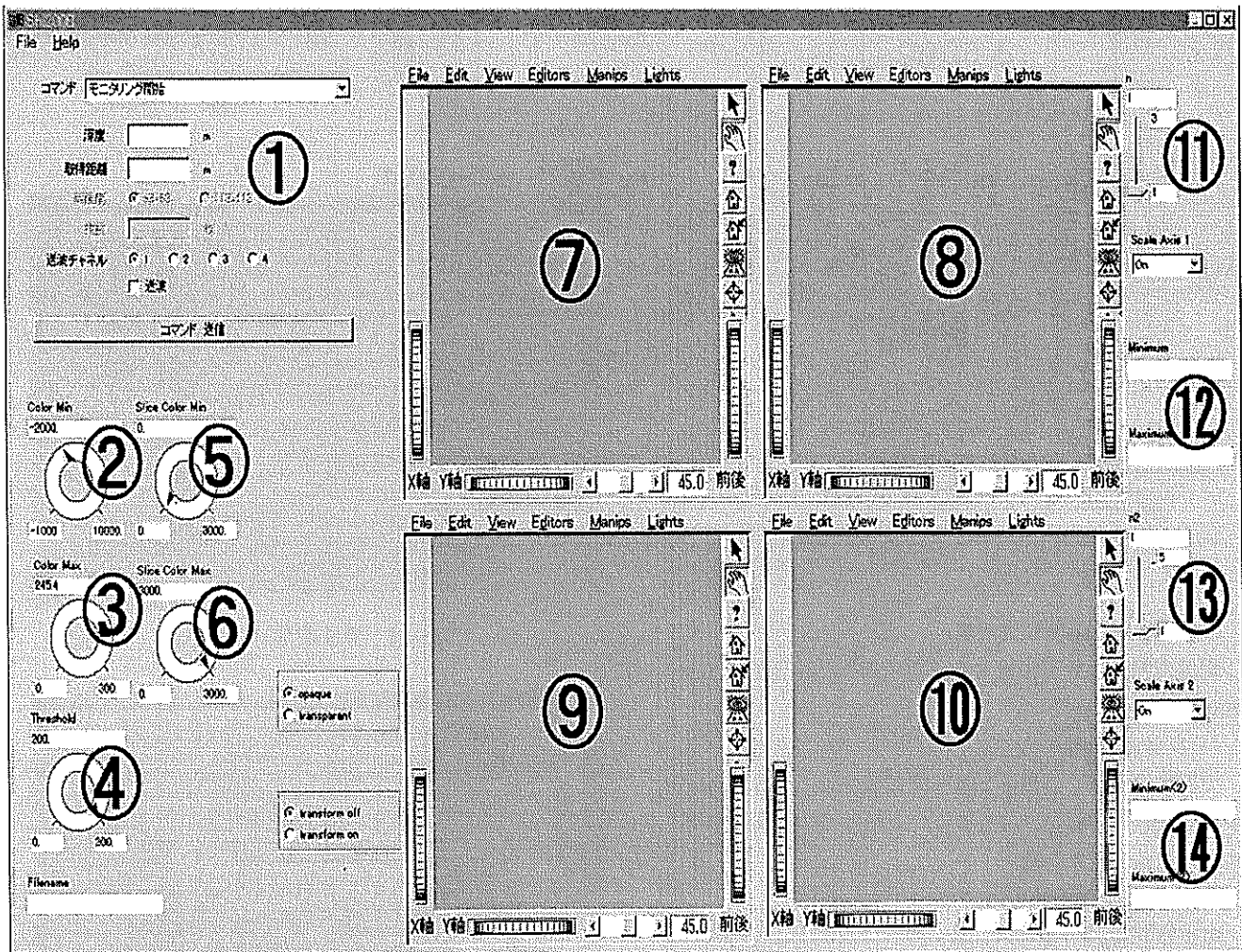


図-26 画像表示用コントロールパネル

6. 水槽実験

本方式の性能を把握するため水槽において、画像表示実験を行った。

6.1 実験条件

水槽は図-27 に示す高さ 10.5m 直径φ5m の鋼製円筒水槽で上部のレール（レール間幅 1.5m）上を走行する台車に撮像部を垂直に固定し反射体の映像化実験を行った。水槽内の水は水道水を使用した。

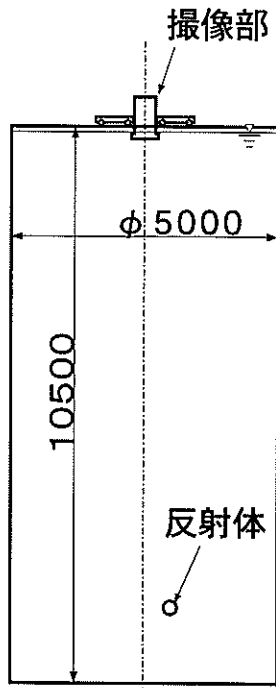


図-27 実験水槽

6.2 距離方向画像再生実験

垂直方向の画像再生能力を確認するため上下方向に反射体を配置して画像再生実験を行った。

(1) 反射体の配置

反射体は電球を使用し、図-28 に示すように 1.75m の水深差を設けて電球A（直径φ130mm）、電球B（直径φ90mm）を糸で固定した。

(2) 受波波形と画像再生結果

図-29 に上部の電球A、図-30 に下部電球Bの 0~20 番目の受波器で受けた波形を示す。0 番目と 10 番目の信号がほぼ 0 と成っているが、撮像部管体のスペースの関係でアンプを付けられなかったため、画像再生の際にはこの部分を 0 として計算した。それぞれ、図の中央の縦線の位置から直交変換を行いホログラムデータを作成し

た。各反射体の水深毎の位置での再生断面像を図-31 に示す。反射体の中心は設定した位置に表示されている。上部電球（電球A）の水深は 5.59m、下部電球（電球B）の水深は 7.37m と測定されているので両者の水深差は 1.78m、図面上の水深差は図-28 から 1.75m であるので 3cm の誤差となった。

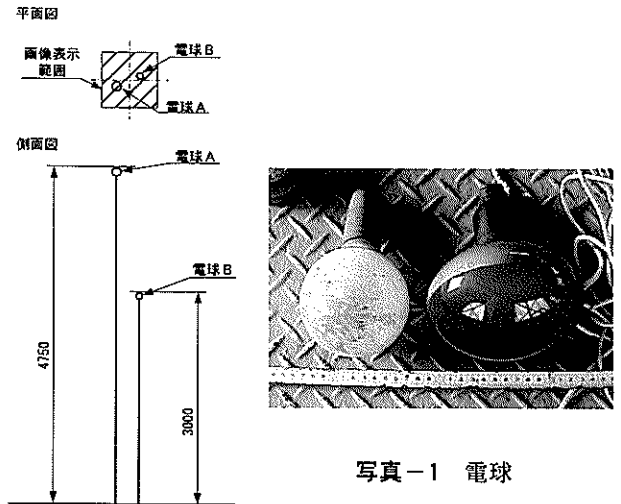


写真-1 電球

図-28 反射体の配置

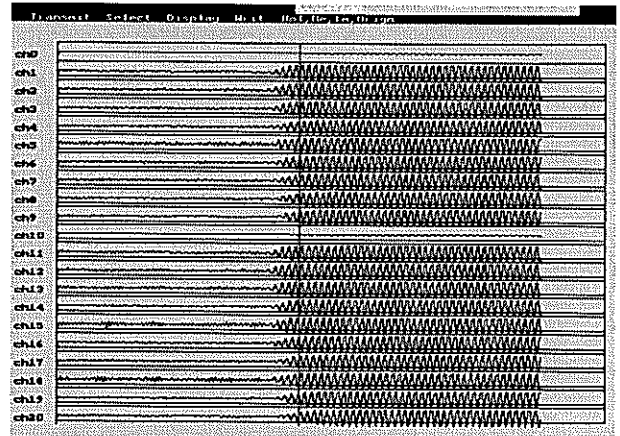


図-29 受波波形（電球A）

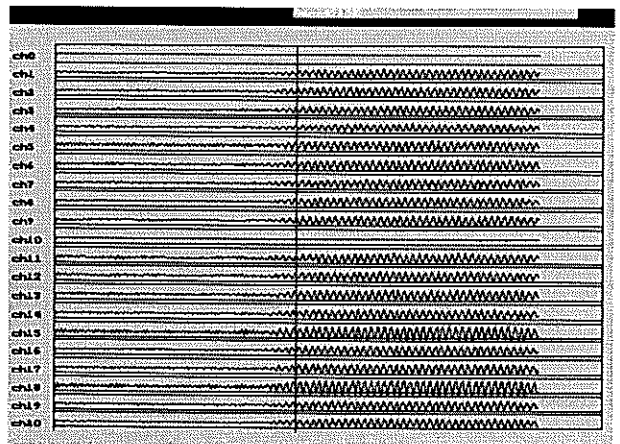
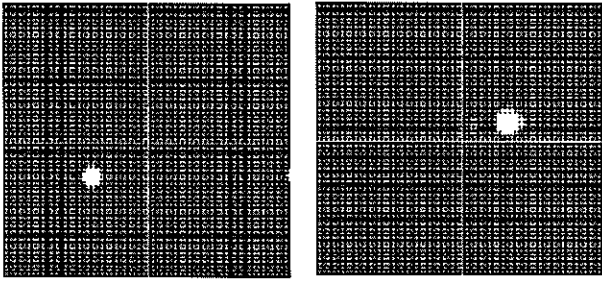


図-30 受波波形（電球B）



電球 A 電球 B
図-31 断面毎の再生像

6.3 同一断面での画像再生実験

水平方向の画像再生能力を確認するため同一平面上に間隔を変えて反射体を配置して画像再生実験を行った。

(1) 反射体の配置

水深 9.5m 付近に電球（直径φ90mm）4個を図-32に示すように配置し画像再生実験を行った。

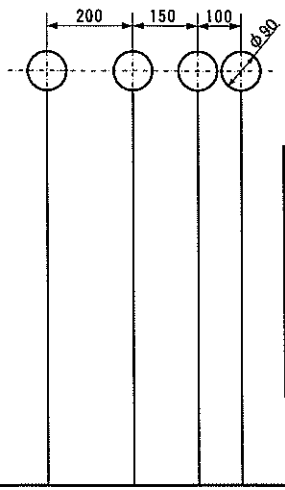


図-32 反射体の配置

(2) 受波波形と画像再生結果

図-33に4個の電球からの0~20番目の受波器で受けた波形を示す。中央の縦線の位置から直交変換を行いホログラムを作成した。距離が9m以上離れているため図-29, 30と比較して信号が微弱になっている。図-34に画像再生結果を示す。反射体の設置位置に映像が再生されているのが分かる。

図-35は図-34に寸法線を記入したものである。単位はmmで表示した。再生像はホログラムと同じドット間隔で得られるので、ドット間隔は12.5mmである。反射体（電球）の設置間隔と再生像の間隔の中心間距離で行うと表-1のようになる。再生像では設置間隔が広めに表示され、最大37.5mmの差となっている。

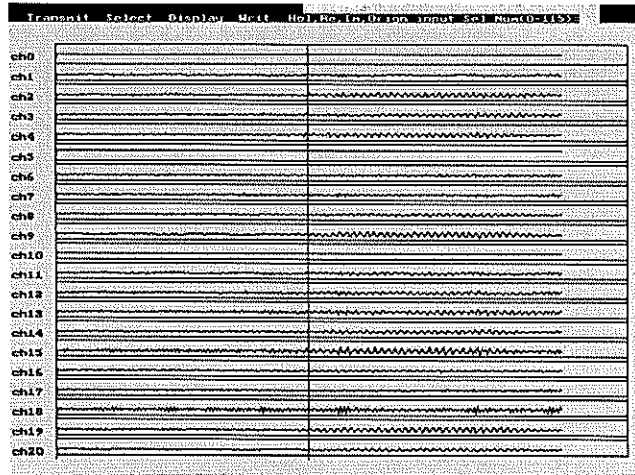


図-33 受波波形

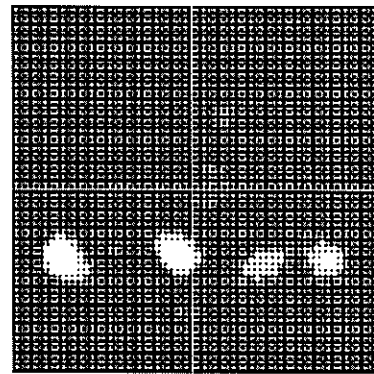


図-34 断面再生像

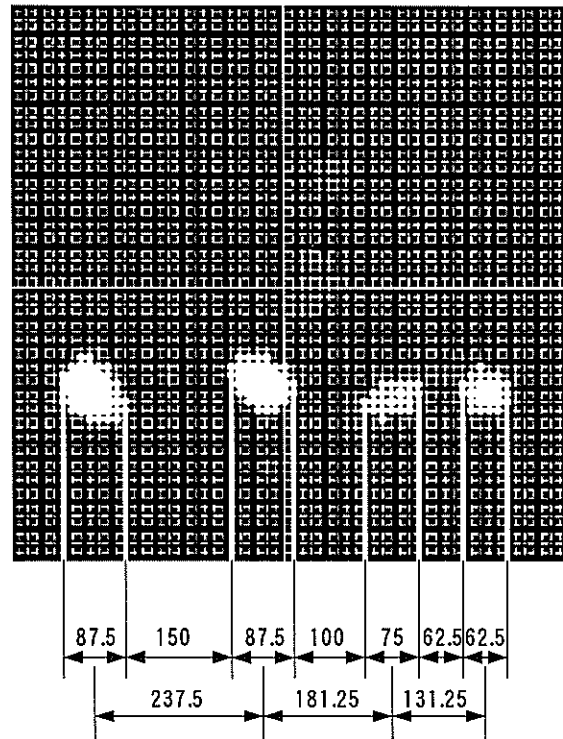


図-35 断面再生像の大きさ

表-1 再生像の寸法誤差 (mm)

設置寸法(a)	200	150	100
再生像寸法(b)	237.5	181.25	131.25
(a)-(b)	-37.5	-31.25	-31.25

6.4 同一断面での画像再生実験 (複雑な形状)

同一断面上で複雑な形状としてアルファベットの「A」の文字を反射体として画像再生実験を行った。

(1) 反射体の配置

水深 9m 付近に図-36 に示すように電球 (直径φ90mm) 13 個を使用してアルファベットの「A」の文字を作成し画像再生実験を行った。

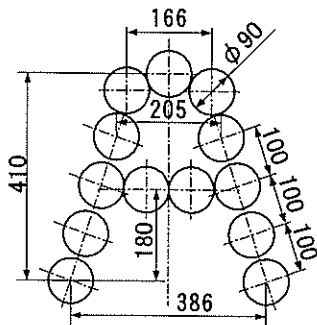


図-36 反射体の配置

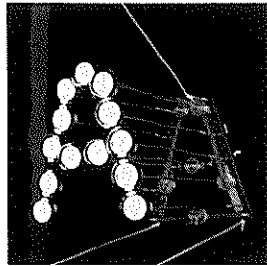


写真-3 電球の配置

(2) 画像再生結果

図-37 に電球からの 0~20 番目の受波器で受けた波形を示す。中央の縦線の位置から直交変換を行いホログラムを作成した。

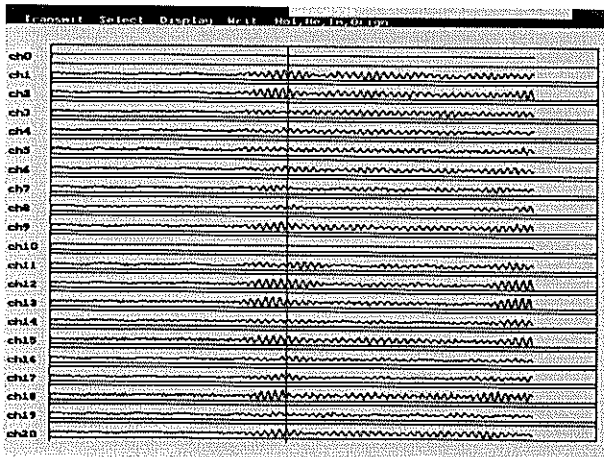


図-37 受波波形

図-38 は再生像である。このままでは映像が鮮明でないで、ある数値を境にそれ以上の数値の点は 1, それ未満の数値の点は 0 として、1 の点を白, 0 の点を黒で表す 2 値化処理を行ったものが、図-39 である。図-40

は、3次元立体表示を行ったものである。明るい部分が再生像の数値の大きい点を表している。反射体の外形寸法と比較を行うと表-2 の様になる。

再生像の方が設置幅が小さく表示され、最大 25mm となっている。また、電球が個々に区別されていない部分や表示されていない部分もある。

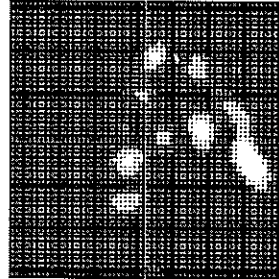


図-38 再生像

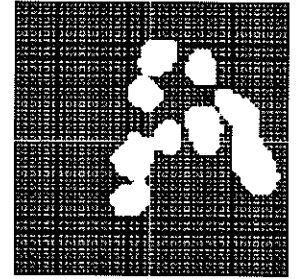


図-39 再生像
(2 値化処理)

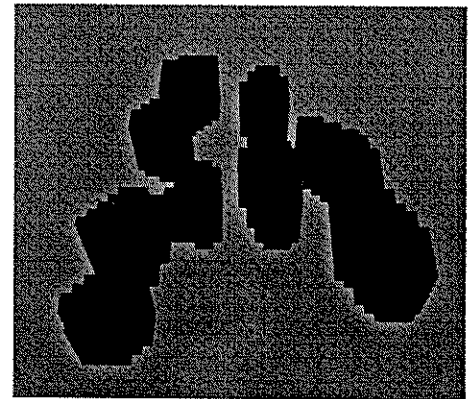


図-40 3次元立体表示

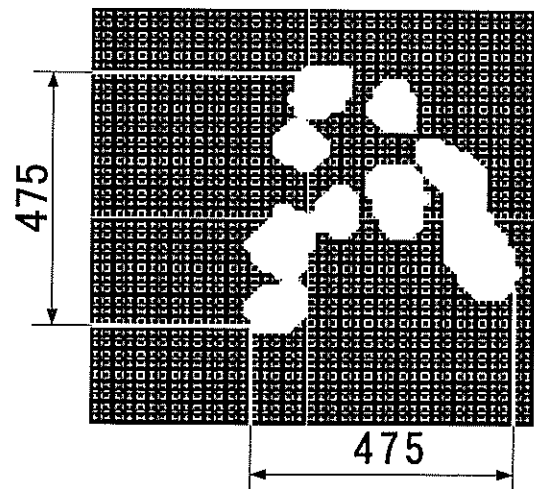


図-41 断面再生像の大きさ

表-2 再生像の寸法誤差 (mm)

	縦	横
設置寸法(a)	500	476
再生像寸法(b)	475	475
(a)-(b)	25	1

6.5 平板の画像再生実験

3種類の正方形平板(1辺10cm, 1辺20cm, 1辺30cm)の映像化実験を行った。反射体は鏡面反射を避けるため、各々の大きさのアクリル板に直径φ2mmの鋼球を表面全体に張ったものを使用した。

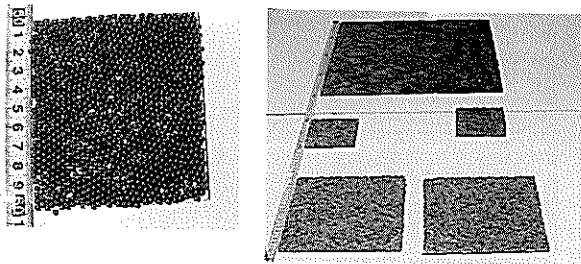


写真-4 正方形板反射体

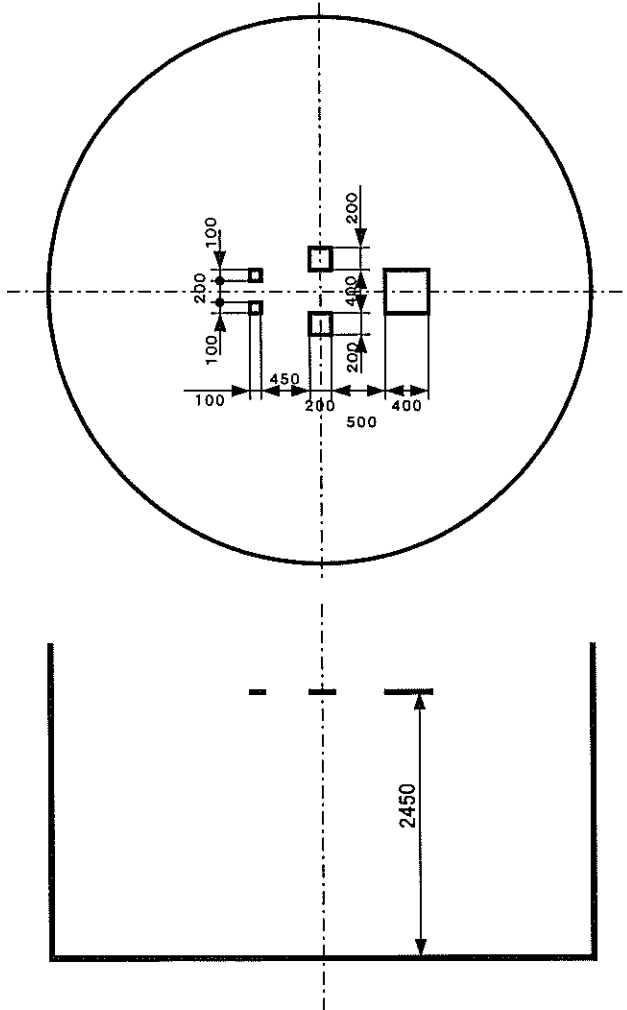


図-42 反射体の配置

(1) 反射体の配置

水深 8m 付近に図-42 に示すように平板を設置し画像再生実験を行った。

(2) 画像再生結果

画像再生は各反射板の直上に撮像部を置き画像再生を行った。

(a) 1辺10cmの平板

図-43に0~20番目の受波器で受けた波形を示す。中央の縦線の位置から直交変換を行いホログラムを作成した。

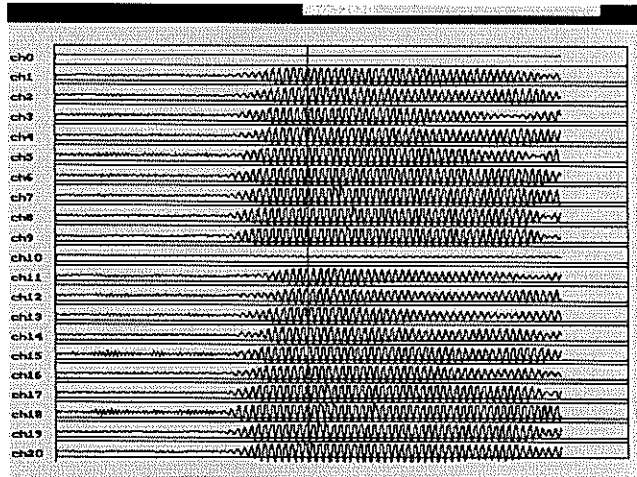


図-43 受波波形

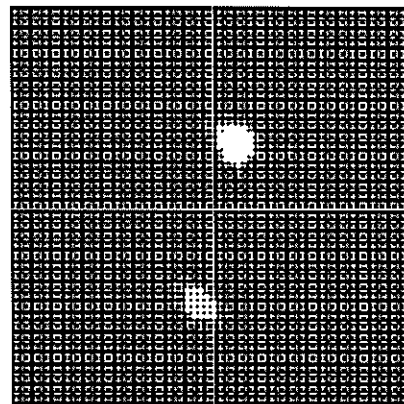


図-44 再生像

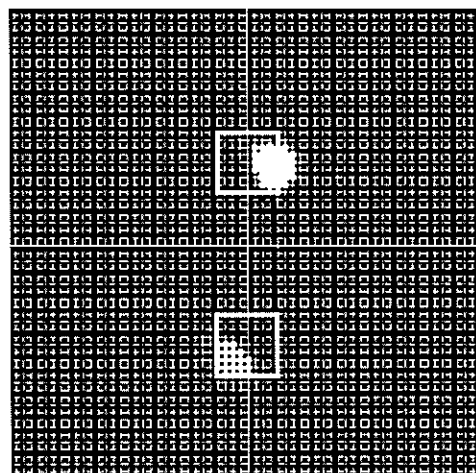


図-45 設置位置と再生像

図-44は平板(10×10cm)の断面像である。設置位置を図-44に記入すると図-45となる。

(b) 1辺20cmの平板

図-46に0~20番目の受波器で受けた波形を示す。中央の縦線の位置から直交変換を行いホログラムを作成した。

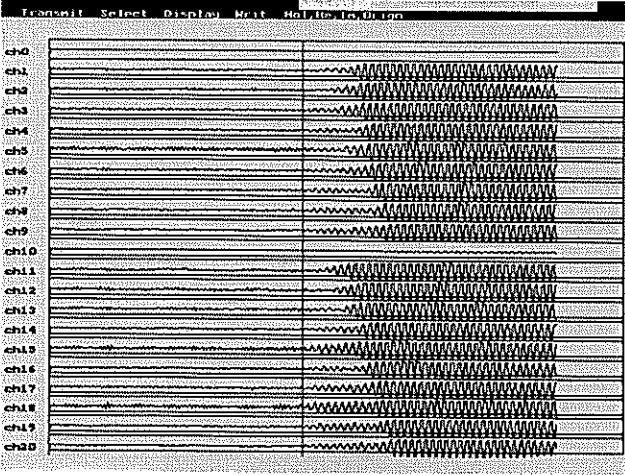


図-46 受波波形

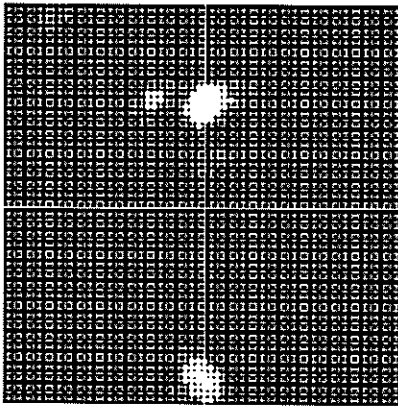


図-47 再生像

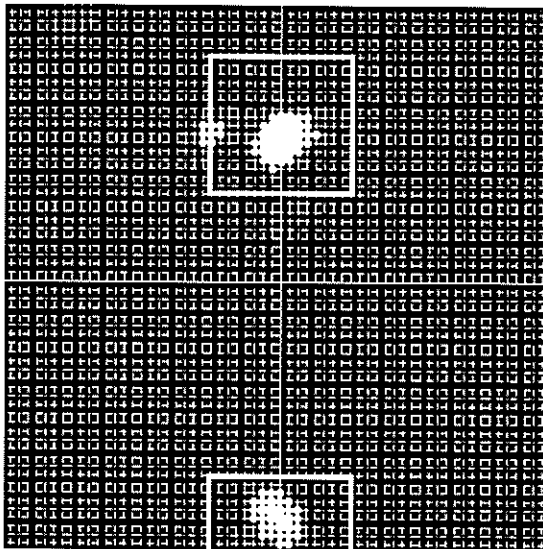


図-48 設置位置と再生像

図-47は平板(20×20cm)の断面像である。設置位置を

図-47に記入すると図-48となる。

(c) 1辺40cmの平板

図-49に0~20番目の受波器で受けた波形を示す。中央の縦線の位置から直交変換を行いホログラムを作成した。

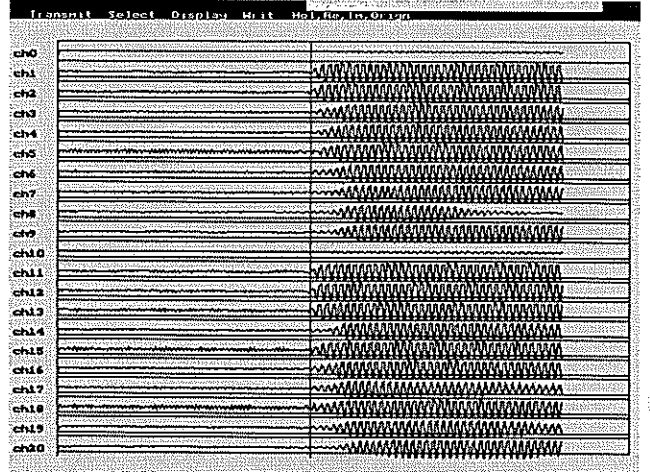


図-49 受波波形

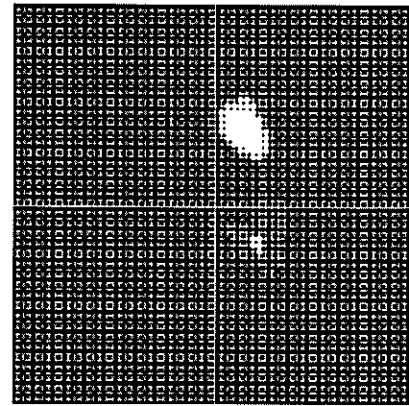


図-50 再生像

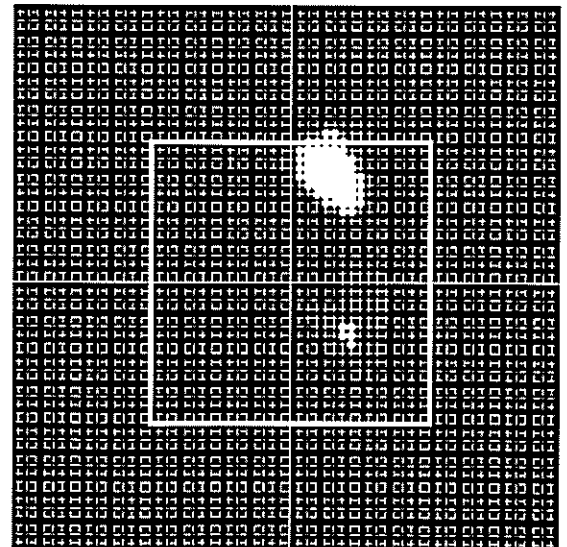


図-51 設置位置と再生像

図-50が平板(40×40cm)の断面像である。設置位置を

図-50 に記入すると図-51 となる。

3種類の全ての平板について、設置した位置に何らかの像が再生されているが、正方形板として認識出来るような像は再生されていない。

6.6 捨て石の画像再生実験

水槽内に捨て石(30~50kg/個)を一層並べ、目印として捨て石面から35cmの位置にボール電球を1個設置し、レーザーレベルにより2cm間隔で測量した値と比較した。

(1) 捨て石面の測量

捨て石面の凹凸の測定は図-52、写真-5に示すように、捨て石の両側に山形鋼を設置し、これに山形鋼を渡して水平方向の座標を求め、高さはレーザーレベルによって水平基準面を作り、重りをつけたメジャーで水平基準面から捨て石面までの高さを測った。測定メッシュは2cmとした。

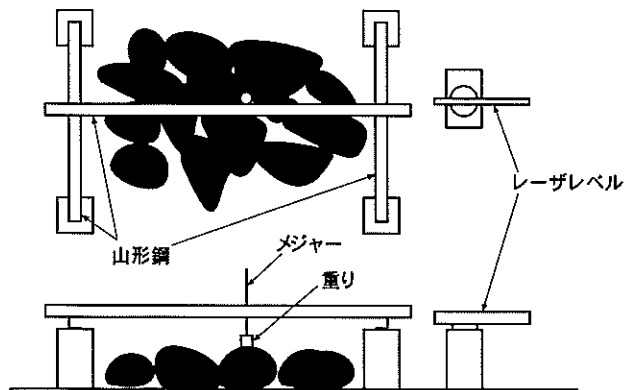


図-52 捨て石面の凹凸の測定

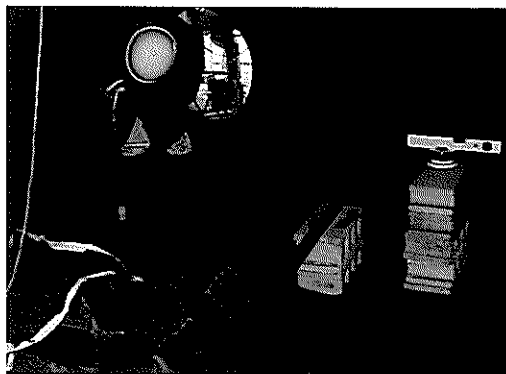


写真-5 測定状況

(2) 測量結果

図-53、写真-6に測量結果および捨て石の状況を示す。捨て石面の高さは水槽底面からの高さとして表した。最大高さは31cmであった。また、図の丸印の位置(横軸-36, 縦軸-S20の交点)が電球を設置した位置となる。

(3) 画像再生結果

図-54に捨て石面の最残部の画像再生結果を示す。図-55は図-53の図-54に対応する測量部分の28cm以上の部分のみを取り出して、図-54を重ね合わせたものである。再生像と測量結果が一致しているのが分かる。

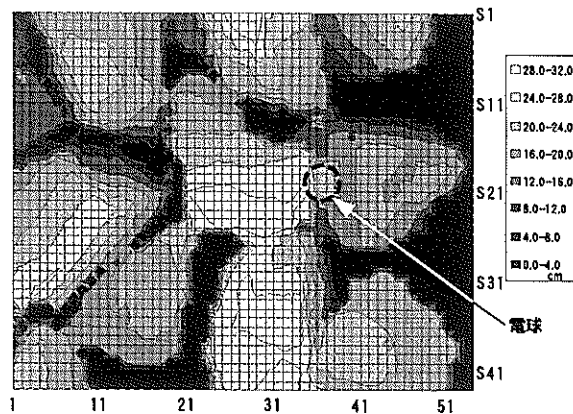


図-53 測量結果

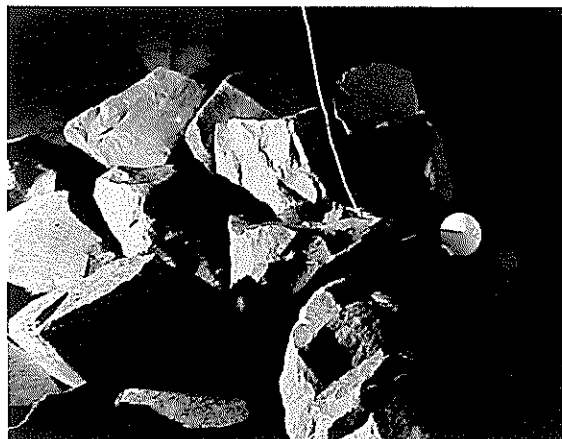


写真-6 捨て石面の状況

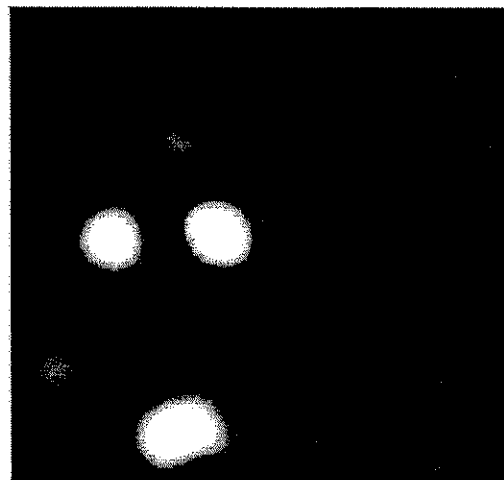


図-54 捨て石面再生像

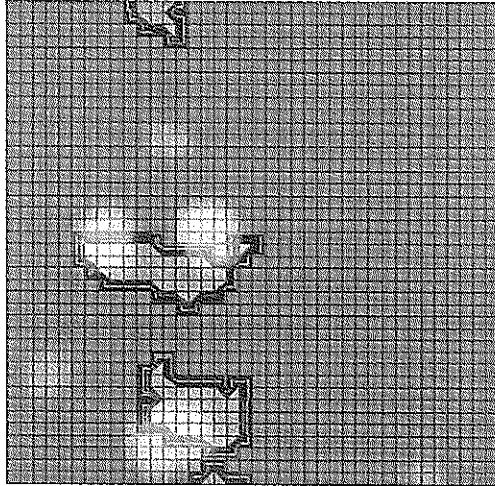


図-55 画像と測量結果の合成

図-56 は図-54 から 10cm 下方の水平面での再生像である。図-57 は図-53 の 22~18cm の部分のみを取り出して、図-56 を重ねたものである。測量結果とほとんど一致していない。

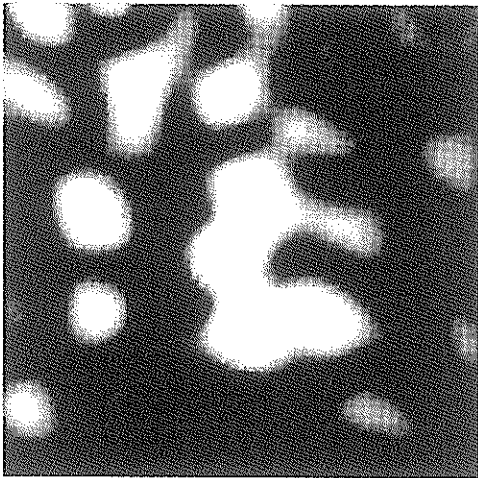


図-56 捨て石面再生像

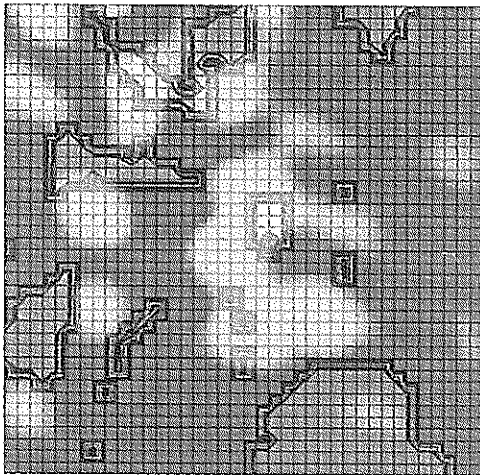


図-57 画像と測量結果の合成

電球の水深位置から深さ方向に 80cm の範囲を 3次元表示したものを図-58 に、測量結果の 3次元表示したものを図-59 に示す。目印として入れた電球は位置を表示しているが、捨て石については 1個 1個の形状を表示していない。

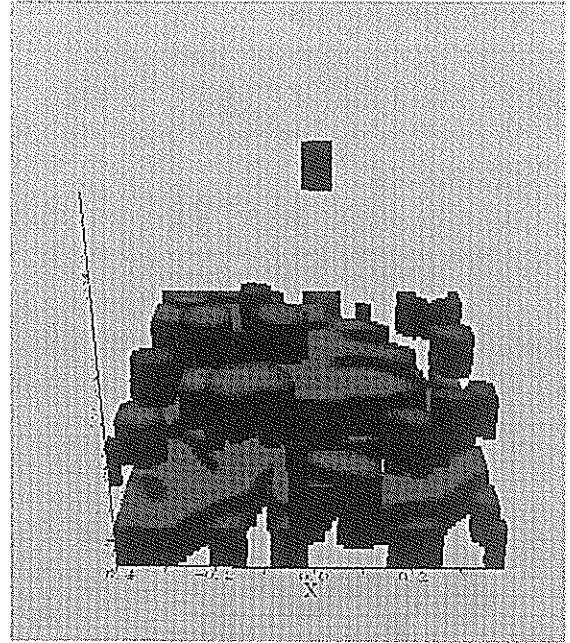


図-58 再生像 (3次元表示)

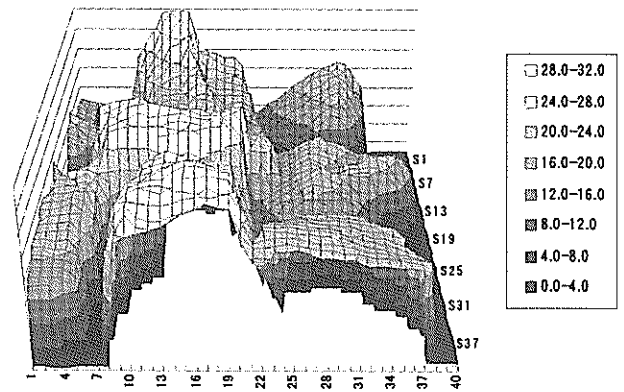


図-59 測量結果の 3次元表示

6.7 考察

(1) 形状の表示

実験に被写体として使用した電球, 正方形板, 捨て石に対して, 輪郭を正確に表示できたものは無かった。この主要な原因としてはホログラムの大きさ (受波器アレーの面積) が考えられる。図-9 に示すようにホログラムの大きさを制限することにより物体の形状は再生されにくくなる。

シミュレーションにより画像表示とホログラムの大きさの関係を検討してみる。9個の点音源から音波が放

射されているときの点音源の再生を行う。図-60に示すように点音源は縦横の間隔が a で配置され、ホログラムのサンプリング間隔(受波器の間隔)も a とする。受波器は面積を持たない点とする。点音源の配置された面は、ホログラム面と平行で距離は z とする。

計算条件は

- ・ 周波数 600kHz (波長 $\lambda = 2.5\text{mm}$)
- ・ ホログラムと点音源の距離 $z = 10\text{m}$
- ・ $a = 5\lambda = 12.5\text{mm}$

ホログラムの大きさを $21 \times 21 \sim 51 \times 51$ まで 10 間隔で変化させて、再生像の変化を見た。

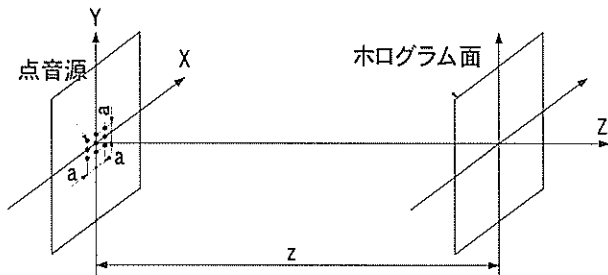


図-60 シミュレーションの条件

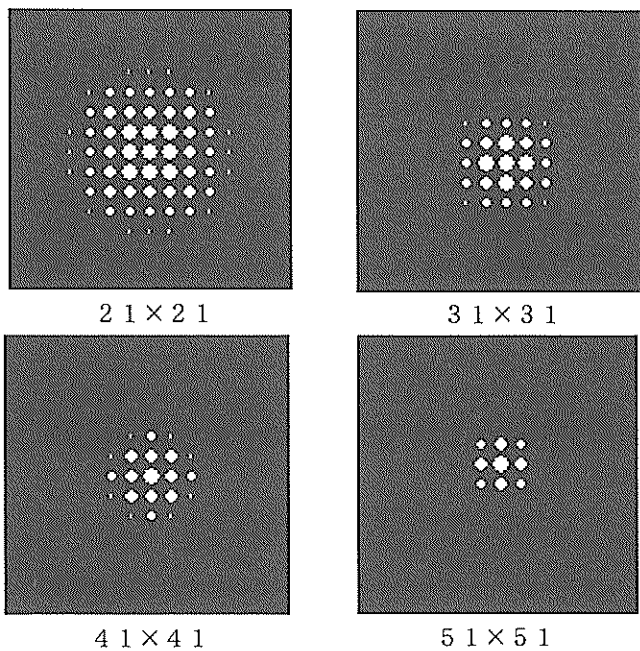


図-61 シミュレーション結果

図-61 は各ホログラムの大きさに対する再生像の計算結果である。白丸の大きさが再生面上の各点の計算結果の強さを表している。丸が大きいほど数値が大きいことになる。9個の点音源を9個の点として再生するには、 51×51 のホログラムのサンプル数が必要となる。しかし、この結果は再生像を全く後処理により補正しないときの結果であり、現実の装置では再生像に対し、ある数値以

下の点は表示しない等の操作を行っているためこれほど大きなホログラムが必要であるかは疑問であるが、ホログラムの大きさが解像度に影響を与えていることは明白である。試作機の場合のホログラムの面積はシミュレーションの 21×21 に相当する。

(2) 中心位置の表示

電球が被写体の場合はほぼ設定位置に再生画像の中心部が表示されている。表-1および表-2に示す様に距離 9m 程度で 40~20mm 程度の誤差であり、被写体の位置を試作機で表示可能である。

正方形板の場合は図-45, 48, 51に示すように、設置した面内に再生像が表示されてはいるものの中心部に表示されているわけではない。

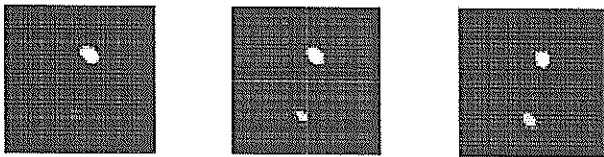
捨て石の場合は図-55に示すように最浅部の再生画像はある程度一致している。

これらの違いは、被写体からの反射波の伝搬の仕方の違いによるものと考えられる。電球の場合は球形であるためどの方向からの入射波に対しても音源方向への反射波は同じものとなる。しかし平板の場合は平板の表面の傾斜角度により音源方向への反射波は異なったものとなる。また、捨て石の場合は図-59から分かるように、最浅部は平面ではなく尖った角の部分となっており、小面積からの反射となっているため、球からの反射に近い反射波が得られていると考えられる。

(3) ホログラム作成開始位置による再生像の形状変化

ホログラムの作成開始位置は波形を観察して、反射波の中の適当な位置を決めてホログラムデータを作成し画像再生演算を行っているが、この位置の微妙な違いにより再生像がかなり違っているのが分かった。図-62は撮像部を固定し、ホログラム作成開始アドレスを(a)は52580アドレス、(b)は52600アドレス、(c)は52620アドレスと変えて画像再生演算を行った、1辺10cmの正方形板の再生像である。ホログラムデータの作成開始位置は図-63の(a),(b),(c)の位置である。アドレス位置は20アドレスずつ増加させている。20アドレスは水深方向の距離に換算すると(水中音速1500m/sの場合)3.125mmである。ホログラムデータの作成方法は4.1節の(3)直交検出と平均化の項で説明したが、キャリア成分を取り除くためローパスフィルターとして16個のサンプリングデータ(16アドレス分)の移動平均を256データの範囲(256アドレスの範囲)にわたって行っている。256アドレスは送波超音波のパルス幅50μsecに相当する長さの時間である。正方形板は同一水深に水平に2枚20cm間隔で置かれているため、(a),(b),(c)どの場合でも2枚の正方形板からの反射波の影響はホログラムデータに含まれ

ているはずであるが、再生像には片方の正方形板だけが再生されている場合がある。この原因としては振幅変動と波形のつぶれが考えられる。ホログラフィーの計算では反射波の振幅は条件が変わらない限り一定となる。しかし、本装置の場合はトーンバースト波を使用しているため反射波の立ち上がりやパルスの最後の部分で振幅が変動している。また、送波器とアンプの関係から送波パルス自体がきれいな方形波とならず振幅変動が見られる。これらの原因により、図-63に見られるように振幅が一定していないのが一つの原因と考えられる。



(a) 52580 (b) 52600 (c) 52620

図-62 ホログラム作成位置と再生像

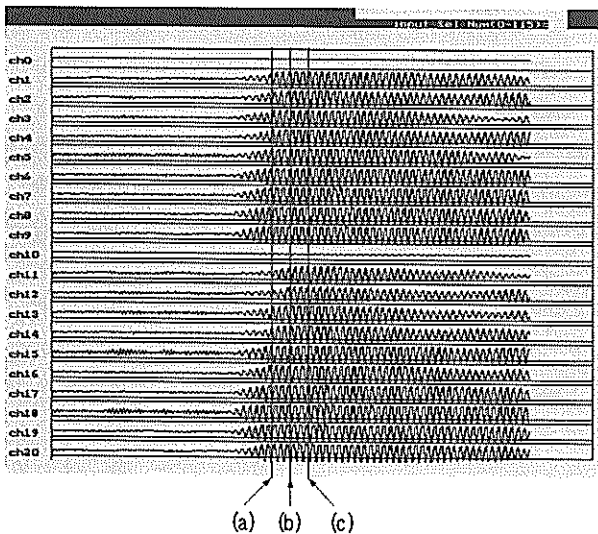


図-63 ホログラム作成開始位置

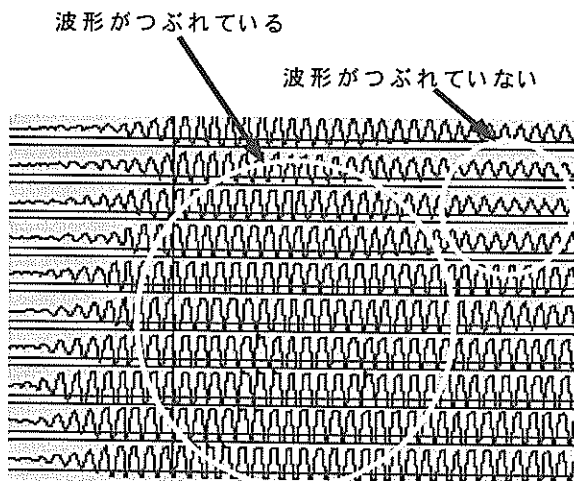


図-64 波形のつぶれ

受波波形のつぶれに関しては、図-64に図-63の一部を拡大したものを示す。この図から分かるように波形がきれいなサイン波になっていないのが分かる。このため直交検出がうまく行われなため、正しい値のホログラムデータが得られない。波形がつぶれる原因は反射波が強くてアンプのダイナミックレンジをオーバーしたためである。

(4) トーンバースト波による垂直方向の画像の分解

超音波ホログラフィーでは垂直方向の分解能がかなり劣るため、本装置ではトーンバースト波により垂直方向の分解能を得ることとした。しかし、この方法では図-65に示す捨て石面上の水中に分離して固定されている電球の場合には有効であるが、連続的に水深が変化する石等の物体や斜面に対しては有効でない事が分かった。

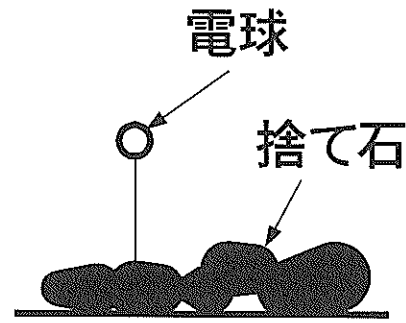


図-65 電球と捨て石

図-66は電球と捨て石からの反射波を示すが、電球からの反射波は完全に捨て石からの反射波と分離されている。しかし、捨て石からの反射波は連続しているため、特定的水深を指定してもその位置での反射波には前後の水深の面からの反射波が重なった信号となっている。このため、図-54~58に示すように電球と捨て石面の最浅部は正しく表示されるが、捨て石個々の形状は再生できない結果となっている。



図-66 電球と捨て石の反射波

7. 結論

濁水中の物体を可視化する目的で超音波ホログラフイーの手法を用いた映像装置を試作し、その有効性を実験により検討した。その結果以下の結論が得られた。

- 1) 1個の送波器と複数の受波器から構成される装置で、1回の超音波の送受波で電球の位置を表示することは可能であった。
- 2) 周波数 600kHz の超音波で受波器アレーの面積が 25×25cm では、反射体の輪郭を正確に表示することは困難であった。
- 3) ホログラム作成位置の僅かな差による再生像の変化を防ぐには以下の2点の対策が必要である。
 - ・ 送波パルスの振幅を安定させる。
 - ・ 反射波が変形しないように受波器アンプのダイナミックレンジを広く取る。
- 4) トーンバースト波による垂直方向の分解能を得る手法は、パルス幅以上の間隔で物体が配置されている場合は有効であるが、連続的に水深が変化する斜面や、捨て石等に対しては有効ではない。
- 5) 3次元表示は各断面の表示点にブロックを書き込む方法で行った。

8. あとがき

本研究は水中物体（捨て石面）をリアルタイムに可視化することを目的に平成8年度から研究開発を開始した。試作機による水槽実験では、電球の位置を表示することは可能であったが、平板については形状を表示することは出来なかった。また、捨て石は最浅部の形状を表示することは出来たが石全体の形状を表示することは出来なかった。物体の形状を忠実に表示するためには深さ方向の分解能の向上等の更なる技術開発が必要である。

超音波ホログラフイーは1回の超音波の送受波で映像を得ることが出来るため有力な可視化技術の1つである。本研究の成果は今後の超音波による水中物体映像化技術開発のための資料として活用できる。

(2001年5月30日)

謝辞

本研究に当たって、ホログラフイーの基礎技術に関して芝浦工業大学の岡田教授に助言を頂いた。また、第二港湾建設局横浜機械整備事務所から捨て石均し施工に関する資料の提供を頂いた。

ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 運輸省第四港湾建設局新潟機械整備事務所：水中テレビ観察実験について－昭和52年度潜水作業船開発試験－，昭和53年2月
- 2) 運輸省第四港湾建設局：平成8年度狭隘航路水中施工ロボット実験調査報告書，平成9年3月
- 3) JERRY L. SUTTON : Underwater Acoustic Imaging, Proc. IEEE, Vol167, No. 4, 1979
- 4) 似鳥一彦：水中視認への応用，テレビジョン学会誌，第35巻，第1号，1981年
- 5) 岡村治男：非球面超音波レンズによる水中映像系の検討，1990年電子通信情報学会春季全国大会，1990年
- 6) 木原純孝，白井一洋：大水深施工検査・海底探査技術の開発（その2）－超音波水中監視装置の開発－，港研資料 NO.0518，1985年3月
- 7) 田村安孝他：Walsh 関数変調波を用いた3次元音響ホログラフイー撮像
- 8) 村田和美：ホログラフイー入門，朝倉書店
- 9) 運輸省第四港湾建設局：平成11年度水中施工ロボット技術開発調査報告書，平成12年3月
- 10) 岡田平治：音響ホログラフイーの原理と応用，建築音響研究委員会資料，日本音響学会，1984年1月
- 11) 岡田平治，柴山乾夫：複素振幅音波ホログラムからの像再生，電子通信学会技報，ED80-50，1980年6月

港湾空港技術研究所資料 No.1009

2001.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.0468(44)5040 URL.http://www.pari.go.jp/

印刷所 株式会社 東京プリント

Copyright © (2001) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この技術資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。