

画像センサとその立体画像計測法の開発を目的とし、水中用小型超音波センサの開発を行った。

立体形状の測定に用いる超音波センサシステムでは、多数のセンサを同時に使用する必要があるため個々の超音波センサの小型化、集積化が必要となる。センサの径を小さくすると、同一周波数において指向角が広がるため球面波に近い送受信波を得るという長所がある反面、感度の低下、素子の出力インピーダンスの増加をもたらすという短所もある。立体形状を測定する手段の一つとして、超音波センサを円周上に配置したリングアレイ超音波センサ¹⁾を用いて対象物を開口合成法により画像表示する際には、超音波センサを対向させて受信する場合に較べて、対象物からの反射波が任意の方位性を持つため受信信号が弱くなる。従って、この方法を用いて3次元画像化をする場合、対象物からの受信波をいかに損失なく増幅・検波され表示部に伝達されるかが画質を決める上で重要である。これらの課題を克服するために今回超音波振動子と受信信号増幅回路を一体化した超音波センサを開発した。

本論文では受信信号増幅回路を内蔵したIC一体化超音波センサが従来法に比べてSN比を向上させ、画像構成に必要な特性が得られるという結果ならびにIC一体化超音波センサを円周上に配置したリングアレイ超音波センサを用いて計測を行った画像表示の例について報告する。

2. 小型超音波センサの試作

(1) 小型超音波センサの構造

超音波センサの仕様としては、超音波の伝搬媒体として人体及び水中の場合を想定し、超音波の送信、受信周波数を1MHzとした。この周波数では、水中の超音波の波長は1.5mmであり、空間分解能は、この波長の約半分程度になる。超音波振動子にはバルク型PZTを用いた。使用したPZTの特性表を表1に示す。

IC一体化超音波センサは超音波受信部(センサ部)とアナログ信号増幅部から成り立っている。最初に小型超音波センサそのものの特性を検討するために、信号増幅回路を内蔵しない小型超音波センサを試作した。

構造は、円筒型ケースの前面に超音波エネルギーを伝搬媒体に効率よく伝えるための音響整合層を設置し、その内側に円盤型PZT振動子を導電性ペーストにより接着している。試作した小型超音波センサの寸法は、ケースの直径Dが12mm、ケースの厚みHが10mm、PZTの直径φが1.5mm、PZTの厚みtが1.0mmである。図1にその構造図を示す。

PZT振動子の振動モードは、結合モードを用いた。ここで結合モードとは径方向、厚さ方向など、二つの振動モードの共振周波数が近いときに相互作用により結合現象が生じるときの振動モードのことである。

表1 PZT 特性表
Characteristics of PZT

K33	0.61
K31	0.28
Kp	0.5
d33(pC/N)	240
d31(pC/N)	110
$g_{33} \times 10^{-3}(\text{Vm/N})$	24
$g_{31} \times 10^{-3}(\text{Vm/N})$	10
Qm	80
ϵ_r	1200
$\tan \delta (\%)$	2.5

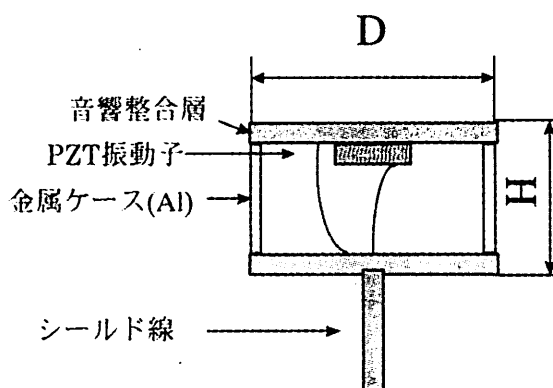


図1 小型超音波センサの構造図

Schematic drawing of an ultrasonic sensor

(2) 音響整合層の作製

伝搬媒体に効率良く超音波エネルギーを伝えるためにはPZT振動子と伝搬媒体との間に、伝搬媒体に適した特性をもつ音響整合層を設ける必要がある。今回試作した小型超音波センサは、伝搬媒体が水であることを考慮した整合層を作製した。

一般に超音波エネルギーの透過率Tは次の式で表される。⁵⁾

$$T = 4 \frac{Z_1}{Z_3} \frac{1 + \tan^2 \theta}{\left(\frac{Z_1}{Z_3} + 1\right)^2 + \left(\frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_2}{Z_3}\right)^2 \tan^2 \theta} \quad (1)$$

$$\theta = 2 \pi \frac{W}{\lambda} \quad (2)$$

ここで Z_1 は PZT 振動子の音響インピーダンス, Z_2 は音響整合層の音響インピーダンス, Z_3 は伝搬媒体の音響インピーダンス, w は整合層の厚さ, λ は整合層内の波長である. $w = \lambda/4$ を式(2)に代入し, これを式(1)に代入すると, 式(1)は次の式のように表される.

$$T = \frac{4Z_1Z_2^2Z_3}{(Z_1Z_3 + Z_2^2)^2} \quad (3)$$

式(3)において, $Z_1Z_3 = Z_2^2$ の時 $T=1$ となる.

このことから $w = \lambda/4$, $Z_2 = \sqrt{Z_1Z_3}$

とすると, T が 100% となることが分かる. 従って伝搬媒体が水の場合, T が 100% となる音響整合層の音響インピーダンスを上記計算方法により求めると

$$Z_2 = 6.7 \times 10^5 \text{ [g/s} \cdot \text{cm}^2]$$

となる.

実際の音響整合層の作製にあたっては, 主材料としてエポキシ樹脂を用い, 音響インピーダンスを大きくするために粒径 $45 \mu\text{m}$ のガラスビーズを混入させて, 音響整合層を作製した. 作製した音響整合層の音速と密度を測定し音響インピーダンスを算出した結果, エポキシ樹脂とガラスビーズの重量比が 1:2 の時, 次の値が得られた.

$$Z_2 \text{ (試作)} = 5.7 \times 10^5 \text{ [g/s} \cdot \text{cm}^2]$$

この試作した音響整合層の超音波エネルギーの透過率 T は, 式(3)より 97% となる. 音響整合層を使用しない場合 T が 9% なので, 試作した音響整合層を使用することにより, 約 10 倍の出力が得られることがわかり, この音響整合層を本センサの音響整合層として用いた.

(3) 小型超音波センサの評価

試作した小型超音波センサのインピーダンス特性は, インピーダンスアナライザ(HP4194A)を用いて測定した. 周波数 1MHz において共振が見られた. また共振モードを結合モードにしたため Q 値を低く押さえることができ, リングング時間すなわち, 共振した振動が収束するまでの時間は $20 \mu\text{sec}$ 以下と短く良好な値を示した.

3. IC 一体化超音波センサの試作

(1) IC 一体化超音波センサの構造

前節で試作した小型超音波センサと, アナログ信号増幅回路により構成された IC 一体化超音波センサの内部構造を図 2 に示す. アルミケース A 内に PZT 超音波振動子があり, 音響整合層に接合されている. この超音波振動子からの出力信号は, プリント基板に実装

されている増幅回路に接続されている. そしてセンサ組立時にアルミケース A と増幅回路はアルミケース B の内部に挿入される. 組立後の IC 一体化超音波センサの外形は, $\phi 12\text{mm} \times 18\text{mm}$ の円筒形である.

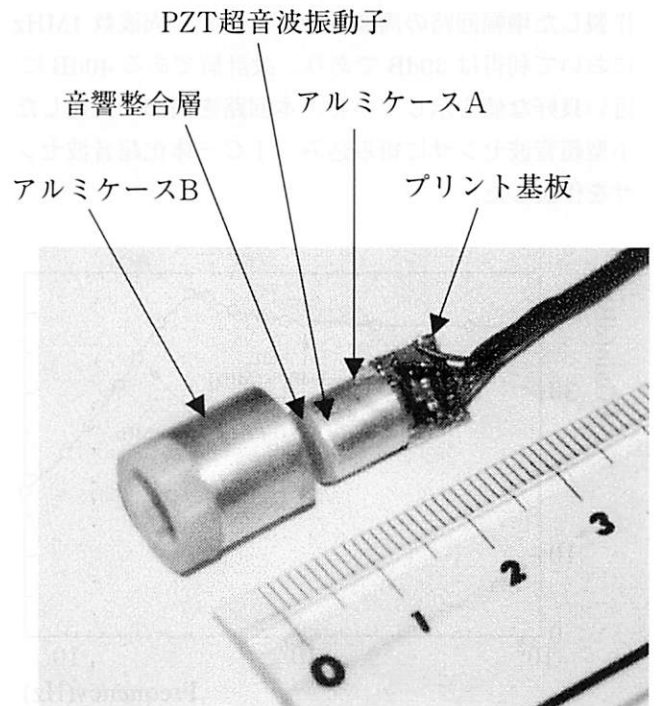


図 2 IC 一体化超音波センサの内部構造
Internal structure of IC combined ultrasonic sensor

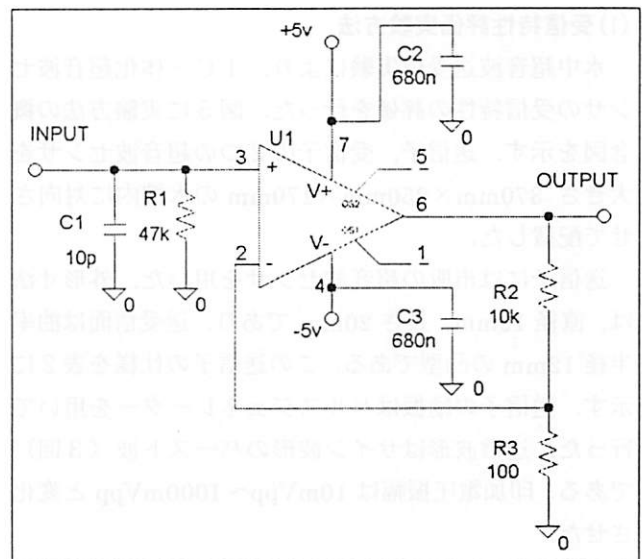


図 3 アナログ信号増幅回路
Analog amplifier circuit

(2)アナログ信号増幅回路

図3にIC一体化超音波センサに内蔵したアナログ信号増幅回路の回路図を示す。オペアンプには、利得帯域幅 $GB=200\text{MHz}$ の JRC 製超広帯域オペアンプ NJM2136V を用いて、非反転増幅回路を構成している。利得はSN比を向上させるためのプリアンプとして回路設計が容易な 40dB (100倍) に設定した。図4に今回作製した増幅回路の周波数特性を示す。周波数 1MHz において利得は 39dB であり、設計値である 40dB に近い良好な値を示している。本回路を前節で記述した小型超音波センサに組み込み、IC一体化超音波センサを作製した。

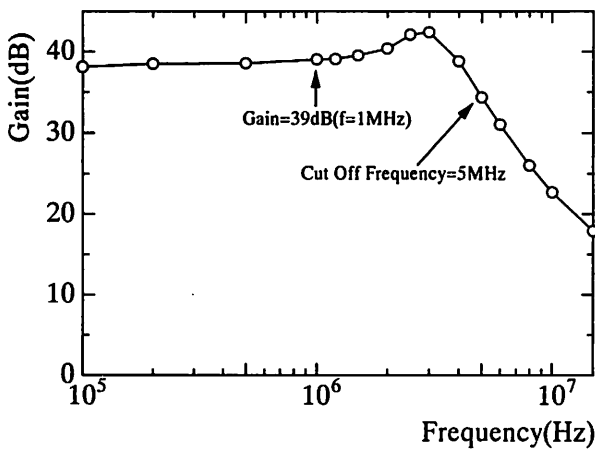


図4 アナログ信号増幅回路の周波数特性
Gain of the amplifier vs. frequency

4. IC一体化超音波センサの特性評価

(1)受信特性評価実験方法

水中超音波送受信実験により、IC一体化超音波センサの受信特性の評価を行った。図5に実験方法の概念図を示す。送信子、受信子の2つの超音波センサを大きさ $370\text{mm} \times 250\text{mm} \times 170\text{mm}$ の水槽内に対向させて配置した。

送信子には市販の超音波センサを用いた。外形寸法は、直径 12mm 、長さ 20mm であり、送受信面は曲率半径 12mm の凸型である。この送信子の仕様を表2に示す。送信子の励振はパルスジェネレーターを用いて行った。送信波形はサイン波形のバースト波 (3回) である。印加電圧振幅は $10\text{mVpp} \sim 1000\text{mVpp}$ と変化させた。

受信子は、送信子から 50mm 離して対向させた。受信子から測定器までの配線長は 1500mm に設定した。受信子には、市販の超音波センサ、今回試作した小型超音波センサ (以下内製センサと呼ぶ) およびIC一

体化超音波センサを用いて受信感度の比較を行った。その出力特性は次の4つの場合について測定を行い、それぞれ比較を行った。

- ① 受信子に市販の超音波センサを用いてその出力電圧をオシロスコープで観察する。
- ② 受信子に市販の超音波センサを用いてその信号出力を超高帯域アンプ(NF製 SA-220F5)により約200倍増幅して、その出力電圧をオシロスコープで観察する。
- ③ 受信子に内製センサを用いてその出力電圧をオシロスコープで観察する。
- ④ 受信子にIC一体化超音波センサを用いてその出力電圧をオシロスコープで観察する。

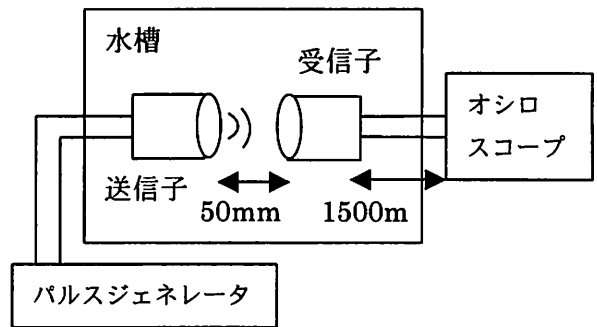


図5 実験装置の概念図

Schematic diagram of the experimental apparatus

表2 送信子の仕様

Specifications of transmitter

中心周波数	$1\text{MHz} \pm 10\%$
音場 (-6dB ビーム幅)	全角 42°
感度	-76dB 以上
静電容量	$880\text{pF} \pm 15\%$

パルサー: UTA-4(エネルギー:1,インピーダンス:100Ω)

反射板: 平板アルミニウム(50mm厚) 水距離: 20mm

(2)受信特性評価実験結果

受信特性評価実験により得られた受信子出力電圧と送信子印加電圧特性の関係を図6に示す。図より明らかなようにIC一体化超音波センサの出力電圧は、内製センサと比較して約100倍、市販センサと比較して約200倍大きいことがわかる。また、市販センサ+アンプの場合と比較するとほぼ同じ出力電圧が得られる。

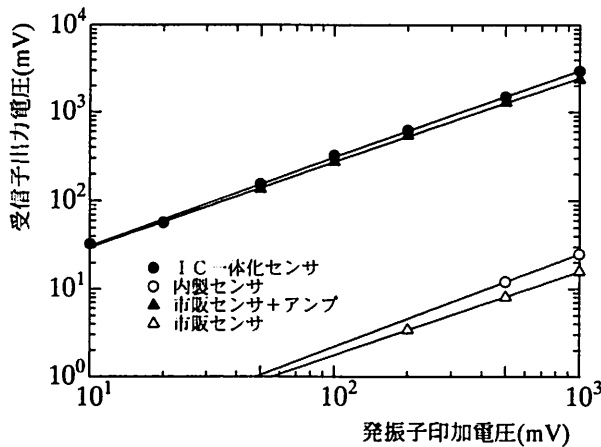


図6 受信子出力電圧と送信子印加電圧の関係

Output voltage from the receiver vs. input voltage to the transmitter

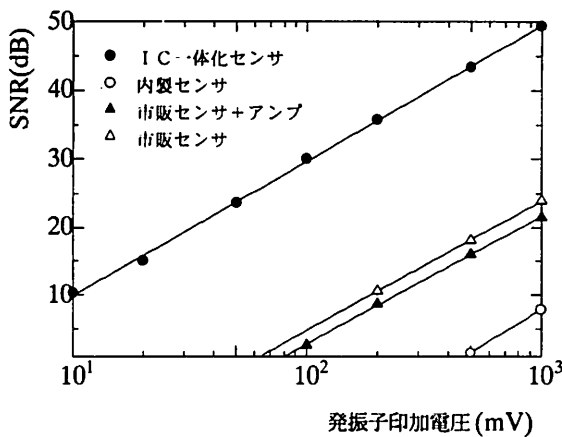


図7 SN比と送信子印加電圧の関係

SNR of the receivers vs. input voltage to the transmitter

このことにより今回試作したIC一体化超音波センサは、外付けアンプなしでも十分大きな受信信号電圧が得られることがわかる。

次に同じ受信特性評価実験により得られた出力のSN比と送信子印加電圧特性の関係を図7に示す。IC一体化超音波センサのSN比は、内製センサと比較すると約40dB程度良いことがわかる。この理由は超音波センサの近傍でかつ静電遮蔽されたアルミケース内でアナログ信号増幅回路によりインピーダンス変換、受信信号電圧の増幅を行うことにより、受信信号の外部測定器までの配線で受ける電磁ノイズの影響を相対的に低減できるためである。

市販センサと市販センサ+アンプを比較すると、SN比でほとんど差が見られない。これはセンサの出力を配線の後段にてアンプで増幅すると、ノイズ電圧も同様に増幅されるため、SN比を向上できないことを

意味している。またIC一体化超音波センサのSN比が、市販センサ、市販センサ+アンプと比較して20dB以上良いことから、今回作製したIC一体化超音波センサのノイズ特性が非常に向上することがわかる。このようにIC一体化超音波センサの特徴には、

- ・外付けアンプなしでも大きな受信信号電圧が得られる。
- ・IC一体化超音波センサは、内製センサと比較してSN比が約40dB程度、市販センサと比較してSN比が20dB以上良い。
- ・微小な超音波の受信が可能。

などの大きな長所を有していることが明らかになった。

従ってIC一体化超音波センサは、市販センサと比較して、同じ受信子印加電圧でより遠くの物体をセンシングすることができる、あるいは同じ距離の物体をセンシングする場合は、受信子印加電圧を小さくできるという特徴を持っている。

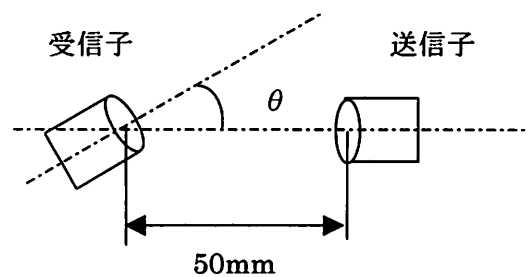


図8 音場計測の概念図

Schematic diagram of the acoustic field measurement

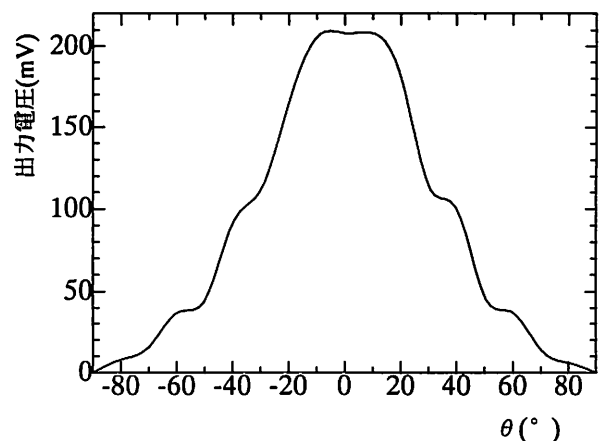


図9 IC一体化超音波センサの指向性特性
Directivity of IC combined ultrasonic sensor

(3) 指向性評価

IC一体化超音波センサの2次元アレイ化を検討するために、音場の2次元プロファイルを計測した。図8に音場計測の概念図を示す。送信子は前記の市販センサを用いた。送信信号は周波数1MHz、サイン波パルス1周期、電圧100mVppである。受信子はIC一体化超音波センサとし、送信子からの距離を50mmに固定し、センサと中心軸との角度 θ を変化させた場合の出力信号のピーク値を測定した。計測したIC一体化超音波センサの指向性特性を図9に示す。図より、指向角は全角60度であることがわかり、アレイセンサとして用いることのできる実用的な指向角の値を得ることができた。

5. リングアレイ超音波センサによる3次元画像化

IC一体化超音波センサの応用例として、リングアレイ超音波センサへの応用を試みた。開口合成法を用いたリングアレイ超音波センサ¹⁴⁾では、一つの送信子から広がりを持つ超音波を送信し、対象物からの反射信号をリング状の複数の受信子で受信する必要がある。開口合成法による3次元画像を再構成するためには複数の受信子全てで反射波を測定する必要があるが、そ

の反射信号が微小であることから従来の超音波センサを用いた場合、反射波の計測が困難であった。この問題を解決するために、今回作製した高感度、高出力のIC一体化超音波センサを用いてリングアレイ超音波センサを作製し、3次元画像の計測を行った。

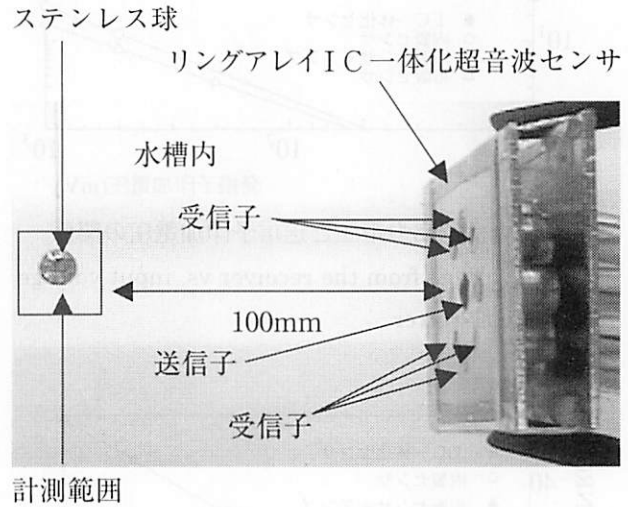


図10 リングアレイIC一体化超音波センサを用いた3次元画像化装置
3-D imaging system using the ring array IC combined ultrasonic sensor

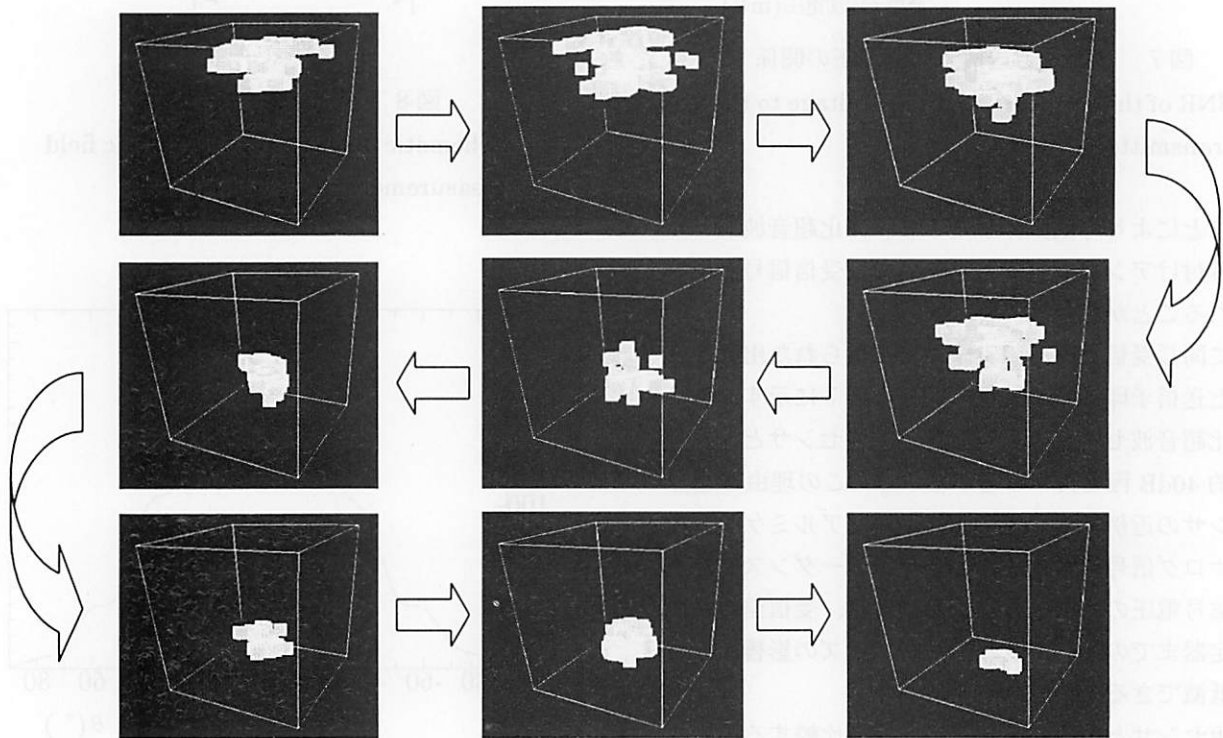


図11 リングアレイIC一体化超音波センサによる3次元画像
3-D images obtained by using ring array IC combined ultrasonic sensor

リングアレイ超音波センサは、各 IC 一体化超音波センサの計測可能領域が十分重なるように考慮し、送信子を中心に半径約 21mm の円周上に、8 個の IC 一体化超音波センサを配置した。図 10 にリングアレイ IC 一体化超音波センサを用いた 3 次元画像化装置を示す。計測対象領域はリングアレイ IC 一体化超音波センサの前方 100mm における 30mm×30mm×30mm の範囲とした。実験はリングアレイ IC 一体化超音波センサを水槽内に固定し、このセンサの計測領域に直径 8mm のステンレス球を落下させ、その画像を毎秒 100 フレームで計測した。そしてセンサからの受信出力電圧を、A/D 変換器、ワークステーションを用いて、開口合成法による信号処理により 3 次元画像を再構成した。得られた画像を図 11 に示す。ステンレス球が水槽に落下した際に生じる水面の乱れが初期画像に捕らえられている。そして時間経過と共に乱れが収まりステンレス球だけの動きを確実に表示されている。

6. まとめ

バルク型 PZT 超音波振動子と音響整合層により構成された小型超音波センサと、アナログ信号増幅回路を一体化した IC 一体化超音波センサを作製した。この IC 一体化超音波センサの受信特性は、IC を内蔵しない内製センサと比較して SN 比が約 40dB 程度、市販センサと比較して SN 比が 20dB 以上良く、高感度、高出力特性が得られることがわかり、微小な超音波の受信が可能であることがわかった。また IC 一体化超

音波センサの応用例として、リングアレイ IC 一体化超音波センサを作製し、従来センサでは感度が低く観測が難しかった水中を動く球の開口合成法による 3 次元画像を表示できることがわかった。今後の課題として、実用化にむけて、画像の高解像度化が必要であるが、現在、高感度センサの開発、アレイ配置位置の検討、信号処理の高度化に取り組んでいる。

謝辞

本研究は大阪府先導的研究「スーパーアイイメージセンサ」プロジェクトの一環として行われた。プロジェクトリーダー濱川圭弘立命館大学教授、特別研究員有田滋博士はじめ研究員諸氏、大阪府研究開発型企業振興財団の関係者各位に感謝する。

参考文献

- 1) H. Tojo, O. Oshiro, K. Chihara, M. Asao: Jpn. J. Appl. Phys., 33, 3162-3165 (1994)
- 2) 大城理, 東條博史, 千原國宏: システム制御情報学会論文誌, 8, 344-349 (1995)
- 3) 南部雅幸, 大城理, 眞溪歩, 千原國宏: 第 40 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 197-198 (1996)
- 4) 眞溪歩, 藤本直登志, 南部雅幸, 近藤敦士, 大城理, 千原國宏, 浅生雅人: 電学論 E, 117, 359-363 (1997)
- 5) 山本美明: 超音波基礎工学, 日刊工業新聞社 (1981)