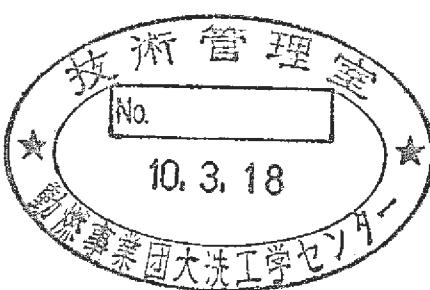


ナトリウム用液面可視化システム及び気泡検出器の開発

—音響シミュレーション、水中基礎試験の画像化特性検討—

1997年5月



動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

ナトリウム用液面可視化システム及び気泡検出器の開発

—音響シミュレーション、水中基礎試験の画像化特性検討—

林田 均*、平林 勝*

要 旨

FBRプラントは1次冷却材中にカバーガスが巻き込まれない様にする必要があり、実証炉以降では原子炉がコンパクト化されるために、その対策が特に重要になる。そのため、設計段階でナトリウム試験により炉容器内等の自由液面の挙動を把握する必要がある。また、実プラントにおいて冷却材中に気泡が混入していないことを確認するために、原子炉容器入口配管にて気泡を計測する技術も安全性向上のために求められる。

そこで超音波を用いてナトリウム液面の挙動を画像化する液面可視化システムと、ナトリウム配管中の気泡を画像化して検出する気泡検出器について、基礎的な画像化特性に関する知見を得るために音響伝播シミュレーションと水中基礎試験を行った。

先ず、最初に超音波を用いて対象を画像化した場合の基本的な特性を調べるために、液面の巻き込み渦モデルについて音響伝播シミュレーションを行った。次に、複数の超音波トランスデューサを同時に送受信し、相互相關法で各トランスデューサと対象物間の伝播時間を求め開口合成法により画像化する計測システムを試作（試作システムは、信号処理能力の制限から、ある一定時間の連続データを取得した後に、オフラインで相互相關及び開口合成処理を行うものとした。）し、ポリスチレンフィルムの棒による押下による模擬液面の変動や水中を浮上する気泡の画像化について水中基礎試験を行った。

その結果、音響シミュレーションでは液面の巻き込み渦モデルを画像化できることが確認でき、水中基礎試験では模擬液面や浮上する気泡の移動に対応した画像を得ることができた。ただし、課題として巻き込み渦の傾斜部の画像がうまく得られない点があり、現状の様に巻き込み渦の下方にのみ超音波トランスデューサを配置する方式に対し、巻き込み渦を取り囲むように側面方向にも受信（あるいは送信）用トランスデューサを配置する方式について検討する必要があると考えている。また、気泡検出については、得られる気泡の画像の大きさ及び形状と、実際の対応について今後定量的な評価が必要となる。

*大洗工学センター 安全工学部 原子炉工学室

The development of liquid surface visualization and void detection system for sodium

- Imaging characteristic examination of sound propagation simulation and underwater basic test -

Hitoshi Hayashida*, Masaru Hirabayashi*

Abstract

On the FBR plant, it is necessary that cover gas would not involve in the primary coolant , and especially the measures is very important in order to compact the reactor on the design of DFBR. Thus the behavior of free liquid surface must be evaluated in sodium pool tests at the design phase. And also from the viewpoint of safety analyses, the void detection system which measure the void in the reactor vessel inlet piping is also developed as a measurement system for confirming that the void has not been entrapped in the coolant.

Then on the liquid surface visualization system which image the behavior of liquid sodium surface and the void detection system which image the detected void using the ultrasonic wave, the sound propagation simulations and the underwater basic tests were carried out to obtain a knowledge on the basic imaging characteristics.

As a first step, the sound propagation simulations were carried out to evaluate the imaging characteristics of the vortex model. As the next step, the measurement system was produced tentatively in order to image the fluctuating liquid surface and the rising void in the underwater basic tests. The signals from some ultrasonic transducers to image them were processed by the cross correlation method and the aperture synthesis method. However the imaging processed in off-line because of the limitation of the signal processing ability.

As the results, it was confirmed that the vortex model could be imaged by the sound propagation simulations. And the fluctuating liquid surface and the rising void could be also imaged by the measurement system in the underwater basic tests. However since the slope of vortex can't be imaged well, the most suitable arrangement of the transducers will be examined to image the slope. And it will be necessary for the measurement system to confirm that the size and shape of void can be imaged accurately.

* Reactor Engineering section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC

目 次

1. 緒言	1
2. 計測手法	2
2.1 概要	2
2.2 相互相関法	2
2.3 開口合成法	3
3. 音響シミュレーション	5
3.1 シミュレーションの手法	5
3.2 シミュレーションモデルと条件	5
3.3 シミュレーションの結果と課題	6
4. 計測システム試作	8
4.1 試作システムの概要	8
4.2 システム構成	8
5. 水中基礎試験	10
5.1 液面可視化	10
5.2 気泡検出	10
6. 結言	12
7. 参考文献	13

図・表リスト

図 1-1. 液面可視化装置の適用概念	1 4
図 1-2. 気泡検出器の適用概念	1 4
図 2-1. 相互相關処理説明図	1 5
図 2-2. 開口合成説明図	1 5
図 3-1. 画像化対象物の断面図	1 6
図 3-2. シミュレーションのセンサ配置	1 6
図 3-3. ケース1のシミュレーション結果	1 7
図 3-4. ケース2のシミュレーション結果	1 8
図 3-5. ケース3のシミュレーション結果	1 9
図 3-6. ケース4のシミュレーション結果	2 0
図 4-1. 試作システムの構成図	2 1
図 5-1. 液面可視化試験の概念図	2 2
図 5-2. 液面可視化の画像処理結果	2 2
図 5-3. 気泡検出試験の概念図	2 3
図 5-4. 気泡検出の画像処理結果	2 3

1. 緒 言

実証炉以降の高速炉においては、一次系機器のポンプや中間熱交換機等の主要な機器を、自由液面を有する容器内に設置し、原子炉容器と各機器間を配管で接続する方法を用いることが考えられている。一般に、炉心へのカバーガスの混入は反応度異常を起こす恐れがあり、自由液面を有する容器が増えることや原子炉がコンパクト化されることから、その可能性について関心が持たれている。

そのため、プラントは、自由液面からカバーガスが冷却材中に巻き込まれて炉心にガスが流入しないように設計することとなるが、設計の妥当性や裕度について試験で確認しておく必要がある。そこで、大型熱流動試験等のナトリウム試験において自由液面からのカバーガス巻き込み挙動を計測する必要があり、そのための手法について開発を進めている。

また、実プラントにおいて、原子炉容器内にカバーガス等の気泡が流入していないことの確認や仮に気泡が流入した場合に早期に検出することが、安全性向上のために求められる。そのため、原子炉容器に流入する配管内を画像化し、配管内を流れる冷却材中の気泡を計測する気泡検出器の開発も行っている。

これら二つの計測手法には、超音波を計測対象に送波し、対象から反射してくる超音波信号を基に対象を画像化する方法を用いて開発を進めており、計測システムの基本的構成は同様なものを考えている。

図1-1～2に、液面可視化及び気泡検出器の適用概念図を示す。

これまでに、液面可視化及び気泡検出器の研究開発では、音響シミュレーションによる本手法の特性検討、システム構成要素の試作及び水中基礎試験による模擬巻き込み渦と気泡の画像化を行っている。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

本報告書では、これまでの結果を基に、計測手法及びシステムの特性を検討し今後の課題の摘出と研究開発の方向を提案した。

2. 計測手法

2.1 概要

自由液面可視化及び気泡検出システムの測定対象は、変動する自由液面のカバーガス巻き込み渦部や、配管内を高速（数m/s）で流れる冷却材中の気泡のために、ある空間領域を時間的に連続に画像化するという高速な処理が要求される。

そのため、静止した対象を画像化する原型炉「もんじゅ」のナトリウム透視装置などとは異なる手法が必要になる。ナトリウム透視装置では、対象物に絞った超音波を照射することで、反射信号の有無により照射方向の対象物の存在を得る方式で、超音波ビームを機械的に走査して画像化対象領域全体の信号を得ている。この方式では、ある領域を画像化するのに、対象物までの超音波の往復時間と、画像化対象領域で送受する回数を乗じた時間（電気的な走査でも測定位置を変えるには、対象物までの超音波の往復を待つ必要がある。また、電気的走査では、画像化対象領域の大きさに応じた非常に多くの超音波トランステューザを必要とする。）を必要とし、変動する対象物を画像化することは困難である。

本計測では、連続波を用いた相互相関法による超音波伝播時間（対象物までの往復時間）の算出と、開口合成法により画像化する手法を用いることで、少数の超音波トランステューザで変動する対象物を含む領域を画像化している。これら手法について、次に概説する。

2.2 相互相関法

通常、超音波を対象物に送波して対象物からの反射波を得ることで対象物の存在を計測するには、超音波の往復伝播時間がかかるので往復伝播時間に応じた周期以上で変動する対象物を正確に捉えることはできない。

そこで、時系列的に白色に変調した連続波を用い、対象物から反射してきた超音波の変調成分と送波した変調成分の相互相関をとることで、往復伝播時間を算出する手法を用いることとする。これによれば、往復伝播時間内での対象物の変動を相互相関算出値により捉えることが原理的に可能になる。

また、連続波を相互相関処理して伝播時間を求める方法では、使用する変調信号と相関の無い一般の雑音は相関処理において除去されるので、単一パルスの対象物への照射による伝播時間計測に比べて、S/Nを大幅に向上させることができる。⁽¹⁾

さらに、複数の送波源をそれぞれ独立した白色信号により変調して同時に送波し、対象物からの反射信号を送波源毎に相互相関処理することで、複数の超音波伝播経路の計測が、単一経路の計測と同じ時間で可能になる。これにより、複数の超音波伝播経路の計測データが得られるので、開口合成法により画像化する場合に解像度を向上させることができる。

次に本計測手法での実際の相互相関処理を概説する。⁽²⁾⁽³⁾送信トランステューザから発信された信号 $x(t)$ が対象物に反射して、受信トランステューザで $y(t)$ という信号として受信される。

$y(t)$ は、 $x(t)$ より伝播時間 τ_0 だけ遅れて減衰し雑音が混入したものになる。すなわち、

$$y(t) = Ax(t - \tau_0) + n(t) \quad [1]$$

A : 減衰率

$n(t)$: 雜音

送信信号 $x(t)$ と受信信号 $y(t)$ の相互相関関数 $\phi_{xy}(\tau)$ を求める

$$\phi_{xy}(\tau) = \overline{x(t - \tau)y(t)} = A \phi_{xx}(\tau - \tau_0) \quad [2]$$

となり、 $\tau = \tau_0$ の時に $\phi_{xy}(\tau)$ は最大となり、逆に相互相関関数 $\phi_{xy}(\tau)$ を最大にする τ から伝播時間 τ_0 が算出できる。

また、時系列的に白色な変調信号としては、疑似ランダム信号であるM系列信号を用いる。そして、実際の相互相関処理は、有限長の離散データを基に行うため以下のようない式で表される。

$$\phi_{xy}(\tau) \doteq \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M-\tau} x(i+j)y(j) \quad [3]$$

図2-1に相互相関処理の説明図を示す。図2-1で送信源A及びBから受信位置までの伝播時間 τ_a 及び τ_b は、それぞれの送信信号と受信信号の相互相関処理により求まる。

2.3 開口合成法

少數の超音波トランステューサを機械的走査無しに使用して、ある空間領域を画像化する手法として開口合成法を使用する。

開口合成法は、複数の送受信点から画像化対象物までの距離情報を測定により得た時に、得られた距離情報を基に対象物を画像として再構成する手法である。¹⁰⁾

これは、位置が既知である一組の送受信用の超音波トランステューサを用い、未知の対象物において超音波が反射して受信用超音波トランステューサで受信された場合に、前述の相互相関法等により超音波の空間伝播時間 τ を測定することができる。この伝播時間 τ は、送信用トランステューサ位置 X から、超音波を反射した対象物位置を経て受信用トランステューサ位置 Y までの超音波伝播によるものである。これを式に表すと次の様になる。

$$c\tau = |X - S_0| + |Y - S_0| \quad [4]$$

c : 媒質中の音速

この式は、XとYを焦点とする3次元空間における回転楕円体を表しており、超音波の反射点である対象物が3次元空間の S_0 曲面上に存在していることが示されている。

実際には、超音波は送信用トランステューサからある指向角を持って送波され、受信用トランステューサの感度も指向角特性を持つため、対象物の存在する可能性がある位置は S_0 曲面上の限られた領域になる（図2-2参照）。

さらに、異なる送信あるいは受信位置の超音波トランステューサによる同様の超音波伝播時間が測定されれば、それに対応した S_0' , S_0'' , $S_0''' \dots$ 曲面が求められる。

真の対象物位置（超音波反射位置）は、 $S_0, S_0', S_0'' \dots$ 曲面の交差する点であり、実際の測定では雑音や誤差によりそれらの交差点は一致しないが、各曲面を画像化空間上に重ねて表示してやれば密度の高い位置が生じ、そこに存在する確率が高いことが分かる。

同様に、異なる超音波反射位置からの信号を基に超音波反射位置毎に $S_{1,2}, \dots, S_{1,2}'' \dots$ 曲面が求まり、それらを画像化空間上に表すことで対象物の3次元形態が画像化される。⁽²⁾⁽⁴⁾

3. 音響シミュレーション

実体系に適用する場合の液面形状の画像化に必要な送受信用の超音波トランステューサの数、配置、超音波放射方向等に対する知見を得るために予備解析を行うために、液面可視化シミュレーションを行い⁽³⁾、その結果の検討と今後の課題を摘出した。

3.1 シミュレーションの手法

液体 (Na) 中で超音波トランステューサからの送信波形を音源として、画像化対象物に反射して受信用の超音波トランステューサへ戻ってくるまでの音響伝播をシミュレーションする手法としては、音源重畠法を用いた。音源重畠法とは、真の音源（送信用の超音波トランステューサ）から画像化対象物を含む境界（反射）点の音響伝播（音圧）の時刻歴（境界音源分布）を計算し、次に境界音源分布から観測点（受信用の超音波トランステューサ）の音圧を各々計算し、受信波形を得る手法である。⁽²⁾

また液面可視化のための画像処理には、開口合成法を用いた。⁽¹⁾⁽²⁾

3.2 シミュレーションモデルと条件

平面上に配置した複数の超音波トランステューサで、ナトリウム液面に発生したガス巻き込み渦の3次元形状の画像表示性能を評価するために、以下に示すモデルと条件でシミュレーションを行った。⁽³⁾

(1) 画像化対象物

液面の巻き込み渦を模擬した画像化対象物の断面図を図3-1に示す。巻き込み渦の中心の深さは4mmの球形状で、直径は36mmの円錐形状である。

(2) 超音波トランステューサの性能および配置

このシミュレーションにおける受信用の超音波トランステューサの特性としては、計算量を低減するために1点で近似し、無指向性とした。また送信用の超音波トランステューサの数は、4個同時に超音波を送信できることが確認されているため、すべてのケースについて4個とした。⁽²⁾

送受信用の超音波トランステューサの各配置は図3-2に示す。

(3) 超音波トランステューサの周波数

超音波トランステューサの周波数としては、計測システムのA/D変換器のサンプリング周波数（例えば20MHz）の整数分の1であることが好ましいことから、周波数は2.5MHz（ケース1）に1.25MHz（ケース2、3、4）を加えて検討することとした。⁽²⁾

(4) 超音波トランステューサと画像化対象物の距離

液面と超音波トランステューサ取り付け面の距離は、500mmとした。

3.3 シミュレーションの結果と課題

水中試験で計画されている受信用の超音波トランステューサの数が16個の場合のシミュレーションの結果から得られた処理画像を図3-3から図3-6に示す。⁽³⁾

図3-3のシミュレーション結果は、受信用の超音波トランステューサの配置を 4×4 のマトリックス配置にし、送信用の超音波トランステューサの周波数を2.5MHzとしたケース1の場合である。液面からの反射エコーが強く、また開口が小さいために画像化対象物の無い領域にノイズのためと考えられる処理画像が確認された。この処理画像より画像化対象物の形状を判断するのは困難である。

図3-4のシミュレーション結果は、送受信用の超音波トランステューサの配置はケース1の場合と同じであるが、周波数を2.5MHzから1.25MHzに変更したケース2の場合である。ケース1のシミュレーション結果の場合とは対照的に液面からの反射エコーが弱く、また開口が小さいために、巻き込み渦の側面上部は画像化できているが、最下端部および側面の画像化はできていない。但し、巻き込み渦の大きさだけを画像化処理の対象とするなら、この方法である程度、巻き込み渦の大きさを判断することが可能であろう。

図3-5のシミュレーション結果は、16個の受信用の超音波トランステューサを直径100mm程度の円形に配置し、周波数は1.25MHzにしたケース3の場合である。ケース1、ケース2の処理画像に比べ、側面および最下端部の処理画像は、不明瞭ではあるが観察可能である。側面と最下端部にノイズの影響による処理画像が確認された。

図3-6のシミュレーション結果は、ケース3の場合の円形の配置をさらに大口径にし、直径200mm程度の円形に配置したケース4の場合である。周波数は、ケース3のシミュレーション結果と同様に1.25MHzである。ケース3のシミュレーション結果に比べ、大口径にすることによって処理画像はやや明瞭になるが、側面と最下端部にノイズの影響による処理画像も確認できた。巻き込み渦の全体像は、ケース1からケース3に比べればモデルの概要に近く、超音波トランステューサの数が16個の場合の中では、最もよい画像が得られたと考えられる。

これらのシミュレーション結果から、液面可視化システムの処理画像の向上に対して以下のようなことが分かった。

- (1) 処理画像のノイズの影響は、送信用の超音波トランステューサの周波数を下げることによってある程度低減することができる（図3-3と図3-4の結果から）。
- (2) 受信用の超音波トランステューサの数が同じ場合、マトリックス配置にするよりも、円形配置にしたほうが処理画像が明瞭である（図3-4と図3-5の結果から）。
- (3) 大口径にする、すなわち開口を大きくとることによって、巻き込み渦の側面の画像を観察できる可能性がある（図3-5と3-6の結果から）。

しかしながら、現状のシステム概念では、巻き込み渦を画像化すると渦の側面において反射した超音波が、受信用の超音波トランステューサの位置に戻らないため、巻き込み渦全体を適切に画像化できないことが分かった。そこで、側面からの超音波の反射を受信するために、受信用の超音波トランステューサを横方向に配置するような三次元的な配置について検討する必要がある

と考えられる。受信用の超音波トランステューザを三次元配置にすることに関しては、実体系の場合、他の機器との構成からある程度制限されると思われるが、超音波の減衰等を考慮し、最適な配置を検討して巻き込み渦を正確に計測し、画像化できるシステムを構築することが必要である。

なお現状では、液面可視化シミュレーションの処理画像の良否は、目視による判断で行っており、そのため処理画像の良否には個人差がある。そこでそれらの判断を統一化するために、処理画像を評価するための評価関数の導入を考える必要がある。

4. 計測システム試作

自由液面及び気泡検出に適用する計測手法を評価するために、計測システムの試作を行った。⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾試作は、特性を水中試験等で評価する上で必要な最小限度の構成とし、超音波トランステューサ、超音波送信部及び受信部、信号処理部、画像処理部等の機能要素で構成されている。図 4-1 に試作したシステムの構成図を示す。

4.1 試作システムの概要

3章の音響シミュレーションを基に、機能を確認するのに最低限の構成として 16 個の超音波トランステューサを用い、互いに独立な M 系列信号で変調した 4 個で同時に送信して 16 個で同時に受信するシステムとした。

また、使用する超音波は、音響シミュレーションより 1.25MHz とし、トランステューサは水中試験に用いるものとした。

さらに、実際のシステムでは液面や気泡を実時間で計測する必要があるが、本試作では機能確認を行うための仕様とし、実時間処理は行わない様にした。これは、実時間で一定時間のデータを取得しておき、処理量の多い相互相関及び開口合成は後に時間をかけてソフトウェアで処理する構成とするものである。これにより高速演算処理が減らせシステムを容易に構築できる。

4.2 システム構成

4.2.1 超音波トランステューサ

超音波トランステューサは水中試験用のもので、本システムの特徴である相互相関法及び開口合成法による実時間画像化（高速で変化する対象物を画像化する。但し、本試作では処理能力の都合により、ある一定時間のデータを実時間で採取してオフラインで処理する。）に必要な最低数として 16 個のトランステューサを用いた。

超音波トランステューサは、水中試験に供するものとし、素子材質は P Z T (チタン酸ジルコニア酸鉛)、共振周波数は 1.25MHz とした。

4.2.2 超音波送信部

超音波送信部は、M 系列信号発生器、D/A 変換器、電力増幅器からなる。M 系列信号発生器は、最大 16kB 長の疑似乱数データをデジタル値で発生させて、それを最高 40M サンプリング / s の 8bitD/A 変換器を通することで、搬送周波数 1.25MHz の M 系列変調信号とする。電力増幅器は、その信号を、超音波トランステューサを駆動するのに十分な値まで増幅する。M 系列信号発生器、D/A 変換器、電力増幅器は送信源の数だけ設けることで独立した M 系列信号で変調された超音波を同時に送波できるようにしている（本試作では 4 組設けた。）。

4.2.3 超音波受信部

超音波受信部は、前置増幅器と A/D 変換器からなる。前置増幅器は、超音波トランステューサで捉えた信号を、後段の回路で処理するのに十分な値まで増幅する。A/D 変換器

は、超音波信号を最高 40M サンプリング／s の 10bitA/D 変換によりデジタル値にする。

実時間処理を行うためには不要だが、本試作では信号処理部及び画像処理部の能力が実時間処理に対して不足するため、一定時間のデータを実時間で取り込み、後にオフラインで信号処理及び画像処理を行う。そのため A/D 変換器には 1 チャンネル当たり 16MB のメモリを組み合わせており、実時間で信号を記録できるようにしている。

受信部を構成する機器は、同時に受信するトランステューザの数に対応させて同一のものを複数設けている（本試作では 16 組設けた。）。

4.2.4 信号処理部

信号処理部は、超音波送信部の M 系列信号と受信信号を相互相關処理し、超音波送信時から対象物に反射して受信部で超音波を受けるまでの伝播時間を算出する。算出は、送信源の数と受信トランステューザの数の乗じた組み合わせについて行うことで、各位置から対象物までの距離（超音波伝播時間）が明らかになる。

相互相關処理は、予め記録しておいたデータを基にオフライン処理するため、処理速度の制限が余りないので、ワークステーションを用いたソフトウェアにより実現した。

4.2.5 画像処理部

画像処理部は、信号処理部で得られた各送受信位置と対象物との距離データ（超音波伝播時間）を基に開口合成処理を行う。開口合成処理により疑似画像化空間に対象物のイメージを作成する。

画像化処理も信号処理と同様にオフラインで処理をするため、ワークステーションを用いたソフトウェアにより実現した。

4.2.6 その他

その他の構成機器として、同一の超音波トランステューザを送信及び受信に使用できるようるために切り替え器を設けている。

また、画像処理部から疑似画像化空間の対象物画像を表示するためのイメージディスプレイを設けている。

5. 水中基礎試験

超音波トランステューザを用いた画像処理システムで、液面可視化および気泡検出の性能を評価するために、巻き込み渦模擬体および気泡発生器を用いて水中基礎試験を行い、その画像処理結果の検討と今後の課題を摘出した。⁽³⁾⁽⁴⁾

5.1 液面可視化

5.1.1 試験方法

試験装置の概念図を図5-1に示す。⁽³⁾ポリスチレンフィルムを直径230mmのリング状の物で固定し、これを水面に張る。中心部に直径18.5mmの球状の先端を有する物体を押し当ててくぼみを作り、このくぼみを巻き込み渦模擬体とした。この模擬体を水中に設置した超音波トランステューザで検出し、画像処理を行う。超音波トランステューザは4×4のマトリックス配置にし、四隅の超音波トランステューザは送受信併用して用いた。超音波トランステューザの周波数は1.25MHzで、巻き込み渦模擬体と超音波トランステューザの距離は約500mmである。くぼみの深さを画像化のフレーム毎に0mmから20mm程度変化させて測定し、合成された三次元画像を表示する。測定間隔は5秒間である。

5.1.2 試験結果と課題

液面可視化の試験結果を図5-2に示す。⁽³⁾巻き込み渦模擬体のくぼみの最下端部の変化は、不明瞭ながら確認することができるが、側面および側面上部は画像化できていない。これは3章のシミュレーション結果からも予測されたことではあるが、巻き込み渦模擬体側面での超音波の正反射により、受信用の超音波トランステューザにその反射波が戻らないためだと考えられる。水中基礎試験では、超音波トランステューザの特性等を理想化して行ったシミュレーション結果よりも、その影響がより顕著に現れている。

これらの対策として、3章で述べたような超音波トランステューザの配置について、音響シミュレーションおよび水中試験を通して検討する必要がある。

5.2 気泡検出

5.2.1 試験方法

試験装置の概念図を図5-3に示す。⁽⁴⁾気泡発生器により水中下部から気泡を発生させ、水中に設置した超音波トランステューザでこれを検出し、画像処理を行う。超音波トランステューザの数は16個で円形配置にし、4個の超音波トランステューザは送受信併用して用いた。超音波トランステューザの周波数は1.25MHzである。処理画像の範囲は、超音波トランステューザから下端470mmで上端500mmである。測定間隔は9msである。

5.2.2 試験結果と課題

気泡検出の試験結果を図 5-4 に示す。⁽⁴⁾処理画像から上昇していく気泡を観察することができた。

この試験での気泡の直径は数 mm 程度であるが、どの程度の直径の気泡を検出できるか、また気泡の大きさまで評価することができるかを検討する必要がある。また実体系では流動するナトリウム中に気泡が存在するため、気泡の速度はこの試験よりも速くなる場合がある。そのような状況の気泡を検出することができるかを、気泡を高速で流動させて水中試験を行い評価する必要がある。

6. 結 言

液面可視化及び気泡検出器の研究開発として、これまでに超音波を用いた計測システムの概念を創出し、音響シミュレーション、システム試作、水中基礎試験を実施している。

これらの結果を基に、計測手法及びシステムの特性を検討し今後の課題の摘出と研究開発の方向を提案した。

先ず、音響伝播シミュレーションでは、得られる画像の特性は余り良くないが巻き込み渦モデルを開口合成法により画像化できることを確認した。次に、複数の超音波トランスデューサを同時に送受信し、相互相関法で各トランスデューサと対象物間の伝播時間を求め開口合成法により画像化する計測システムを試作した。試作システムは、信号処理能力の制限から、ある一定時間の連続データを取得した後に、オフラインで相互相関及び開口合成処理を行うものとした。そして、試作したシステムで、ボリスチレンフィルムの棒による押下による模擬液面の変動や、水中を浮上する気泡の画像化を行った結果、巻き込み渦の傾斜部の画像がうまく得られない等の課題はあるが、模擬液面や浮力により上昇する気泡について移動に対応した画像を得ることができた。

主な課題として、液面可視化において現状のシステムの様に巻き込み渦を渦下方の液中から計測すると、傾斜部の画像化が困難であることが分かった。これは、音響シミュレーションと水中基礎試験の両者の結果からも示され、送波した超音波が巻き込み渦の傾斜部分からは（気液界面で超音波ほぼ全反射するので）下方に反射しないためと考えられる。これに対応するためには、送波した超音波の反射方向（例えば液面と平行な位置など）に受信用トランスデューサを設けて反射波を受けられるようにする必要があり、現状のシステムの様に巻き込み渦の下方にのみ超音波トランスデューサを配置する手法に対し、巻き込み渦を取り囲むように側面方向にも受信（あるいは送信）用トランスデューサを配置する手法を検討する必要があると考えている。

また、気泡検出については、得られる気泡の画像の大きさ及び形状と、実際の対応を定量的に評価する必要がある。さらに、高速で移動する気泡の画像化や、信頼性や保守性から配管の外部に超音波トランスデューサを設置した場合の超音波の配管透過影響についても評価する必要がある。

7. 参考文献

- (1) 佐藤増雄 他：ガス巻き込み拳動等の超音波計測システムの構築, PNC ZJ9164
94-007, (1994)
- (2) 佐藤増雄 他：ガス巻き込み拳動計測システム－基本モジュールの製作－, PJ9164
95-003, (1995)
- (3) 長井敏 他：ガス巻き込み拳動計測システム 画像処理拡張モジュールの製作,
PJ9164 96-010, (1996)
- (4) 唐沢博一 他：水中試験用超音波振動子及び気泡検出プログラムの製作, PJ9164
96-009, (1996)

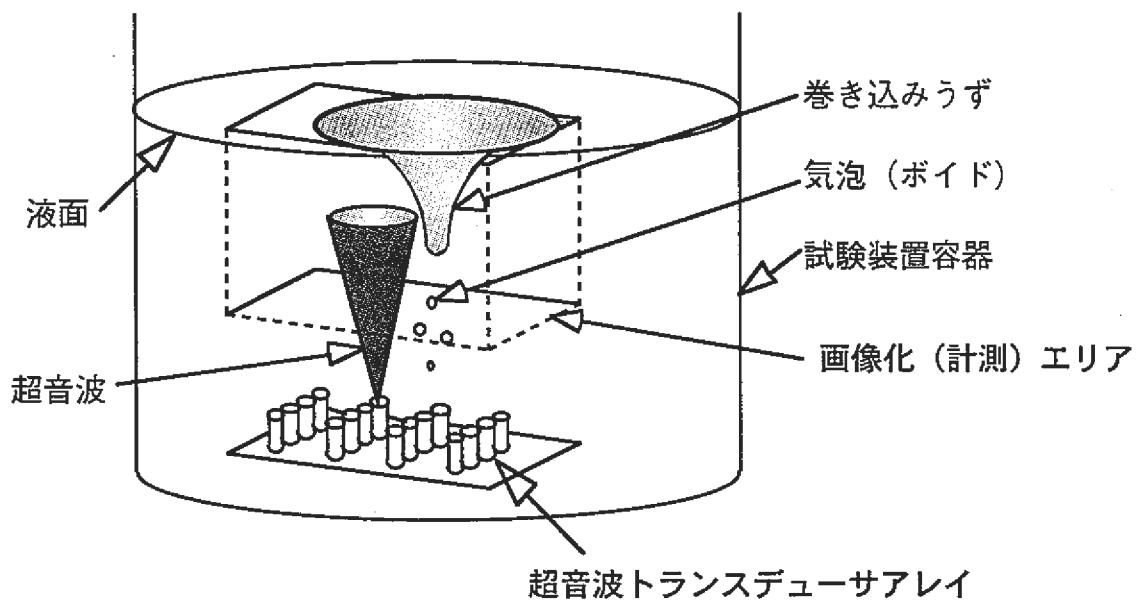


図 1 - 1 液面可視化装置の適用概念

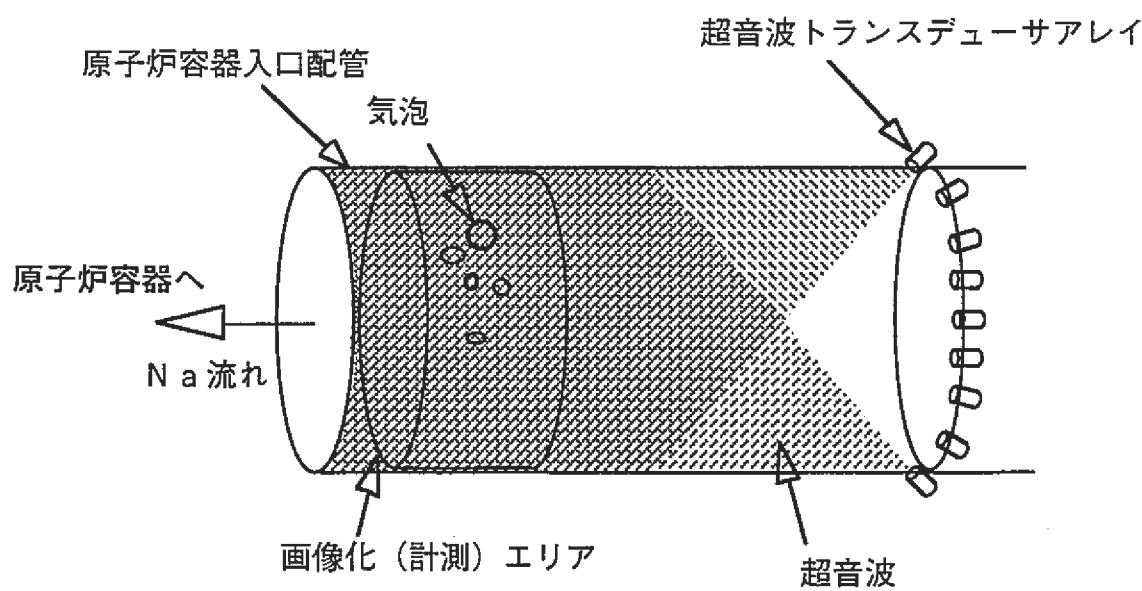


図 1 - 2 気泡検出器の適用概念

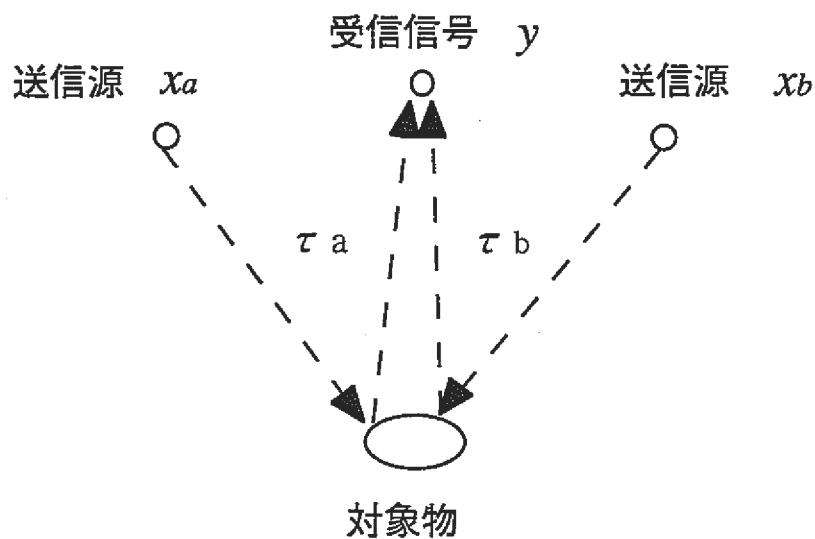
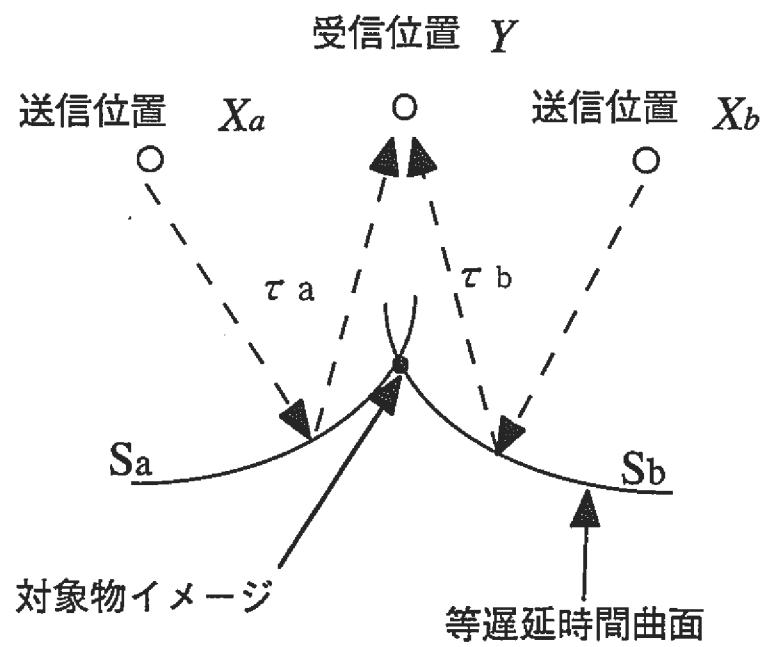


図 2-1 相互相関処理説明図



$$C\tau = |X-S| + |Y-S|$$

図 2-2 開口合成説明図

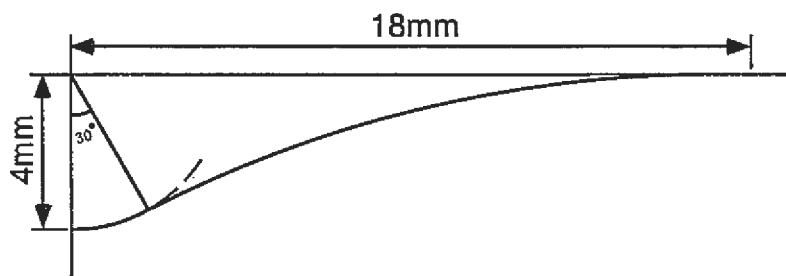
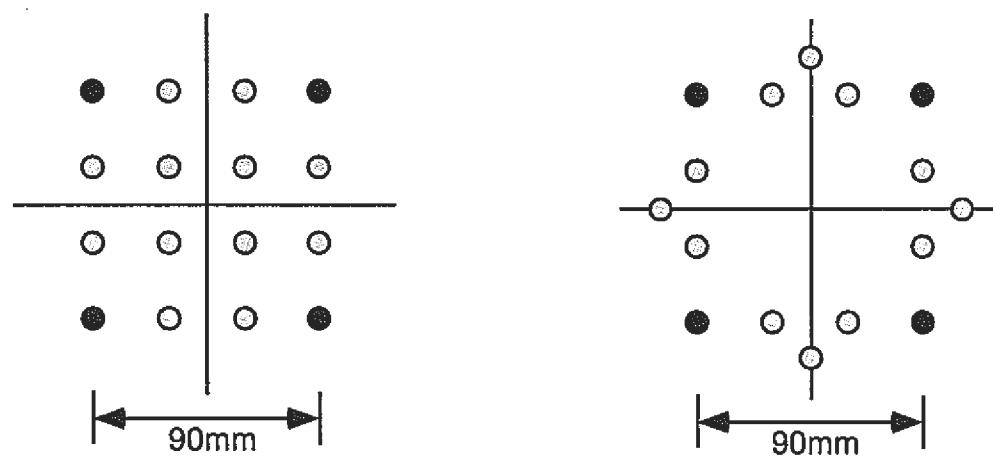
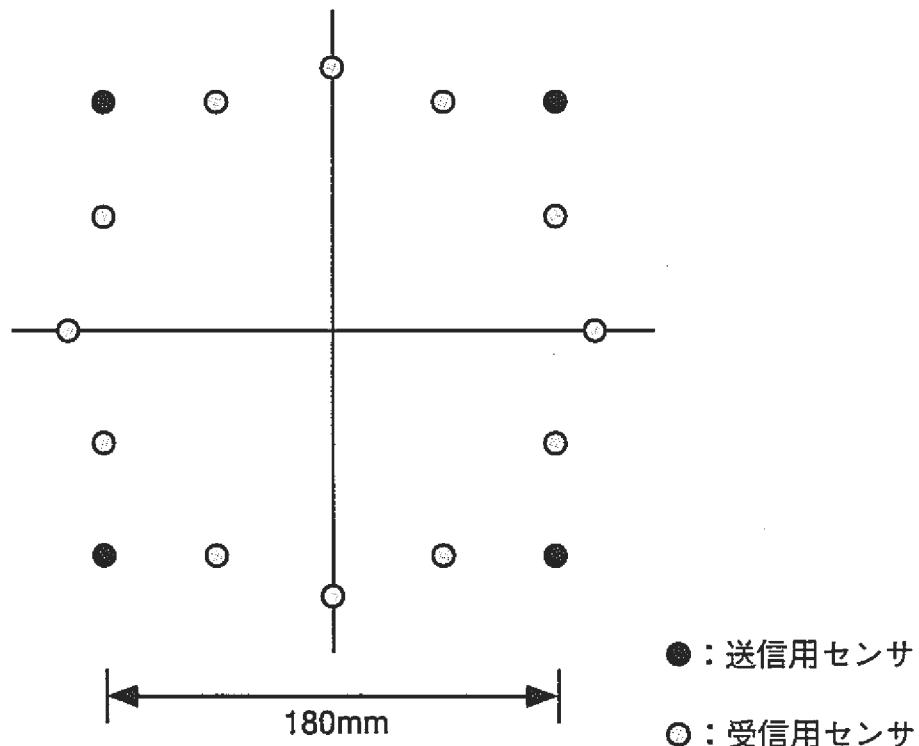


図3-1 画像化対象物の断面図（片側のみ）



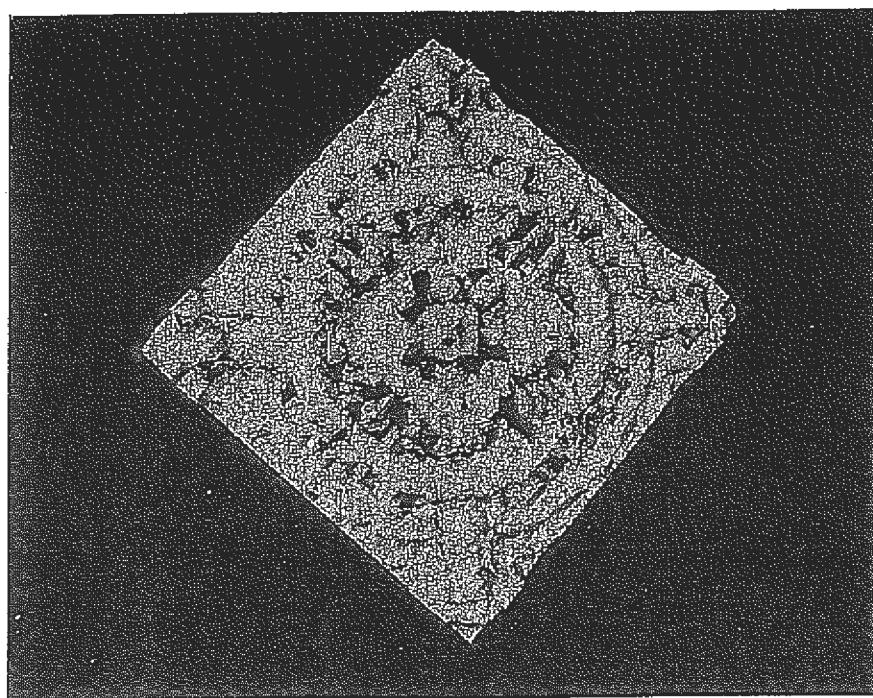
(a) ケース1と2のセンサの配置

(b) ケース3のセンサ

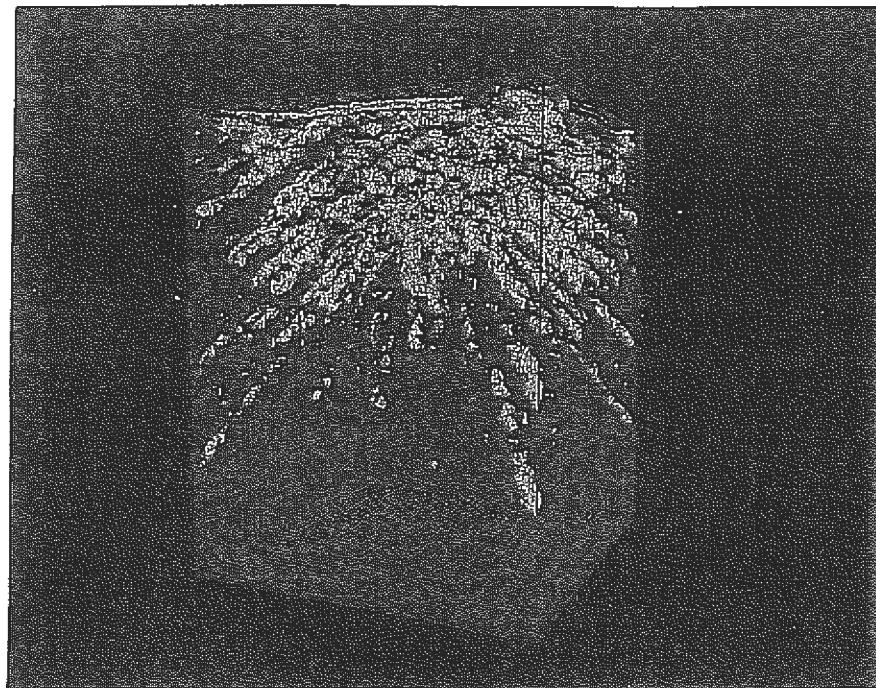


(c) ケース4のセンサ

図3-2 シミュレーションのセンサ配置

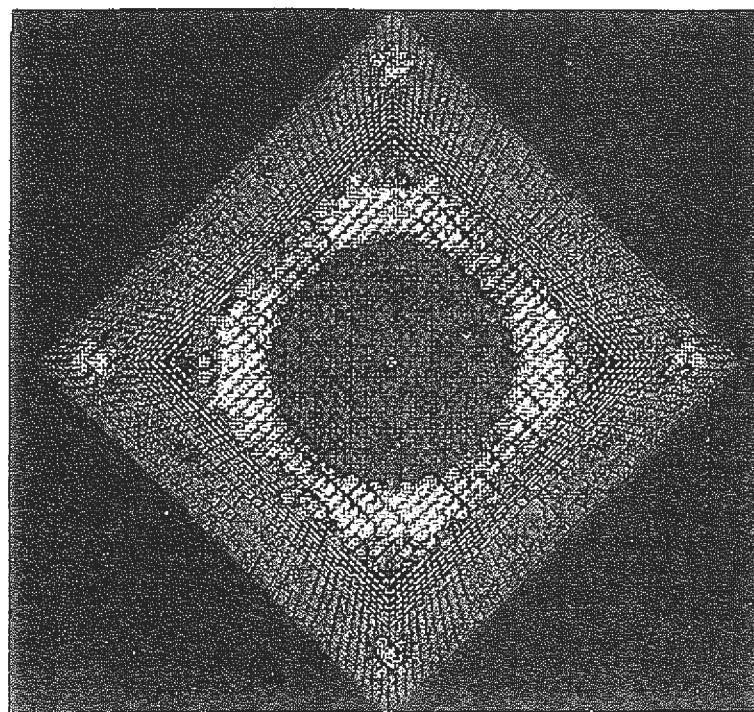


(a) 平面図

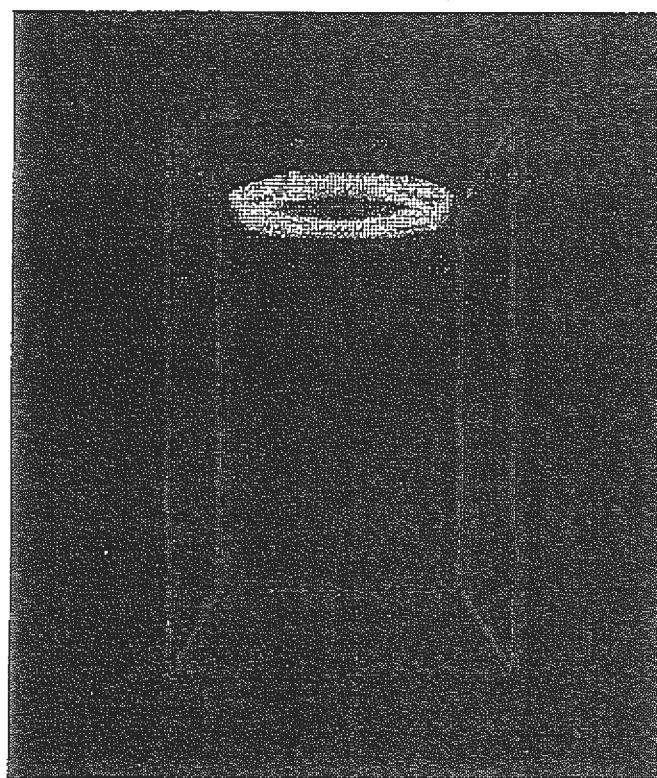


(b) 鳥瞰図

図3-3 ケース1のシミュレーション結果

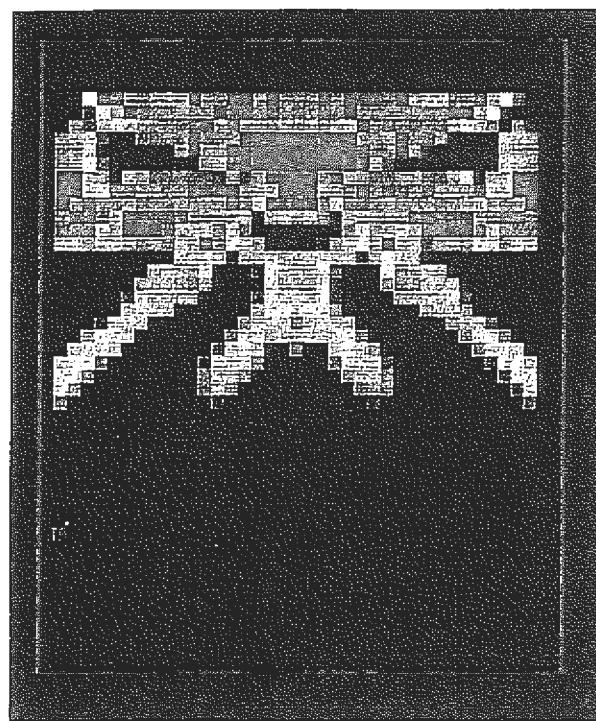


(a) 平面図

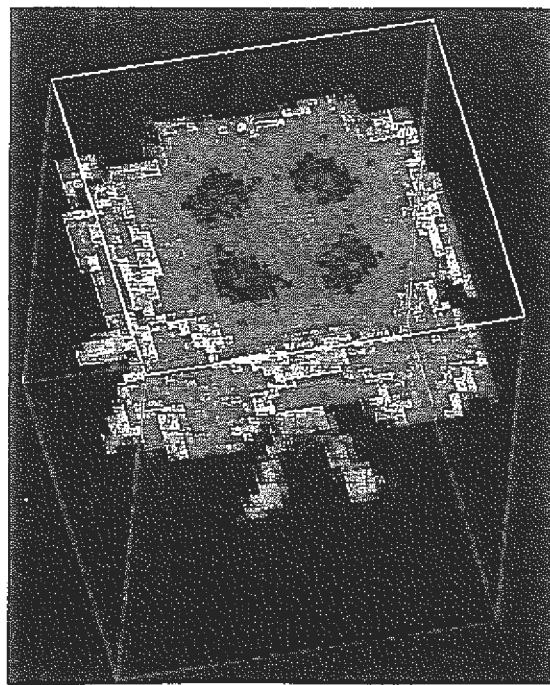


(b) 鳥瞰図

図3-4 ケース2のシミュレーション結果

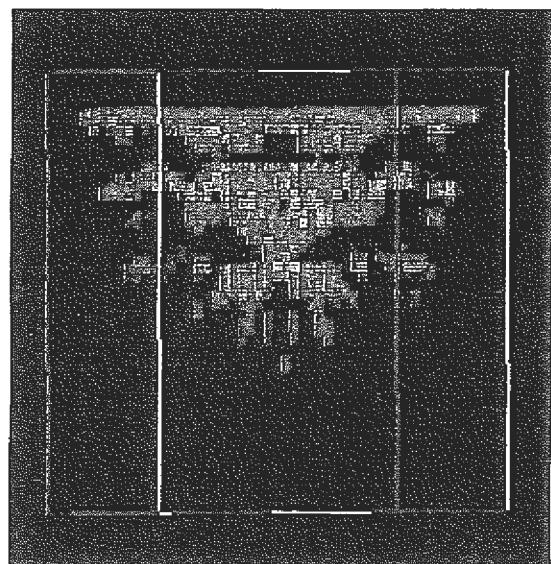


(a) 側面図

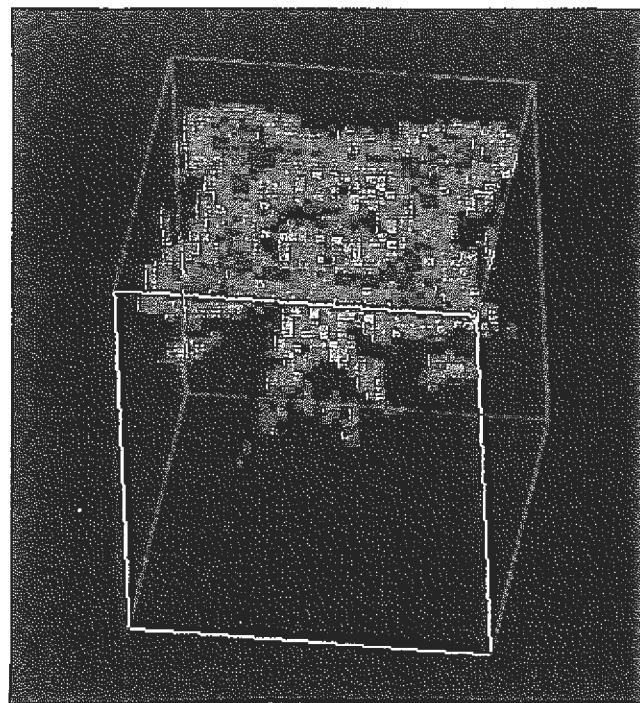


(b) 鳥瞰図

図3-5 ケース3のシミュレーション結果



(a) 側面図



(b) 鳥瞰図

図3-6 ケース4のシミュレーション結果

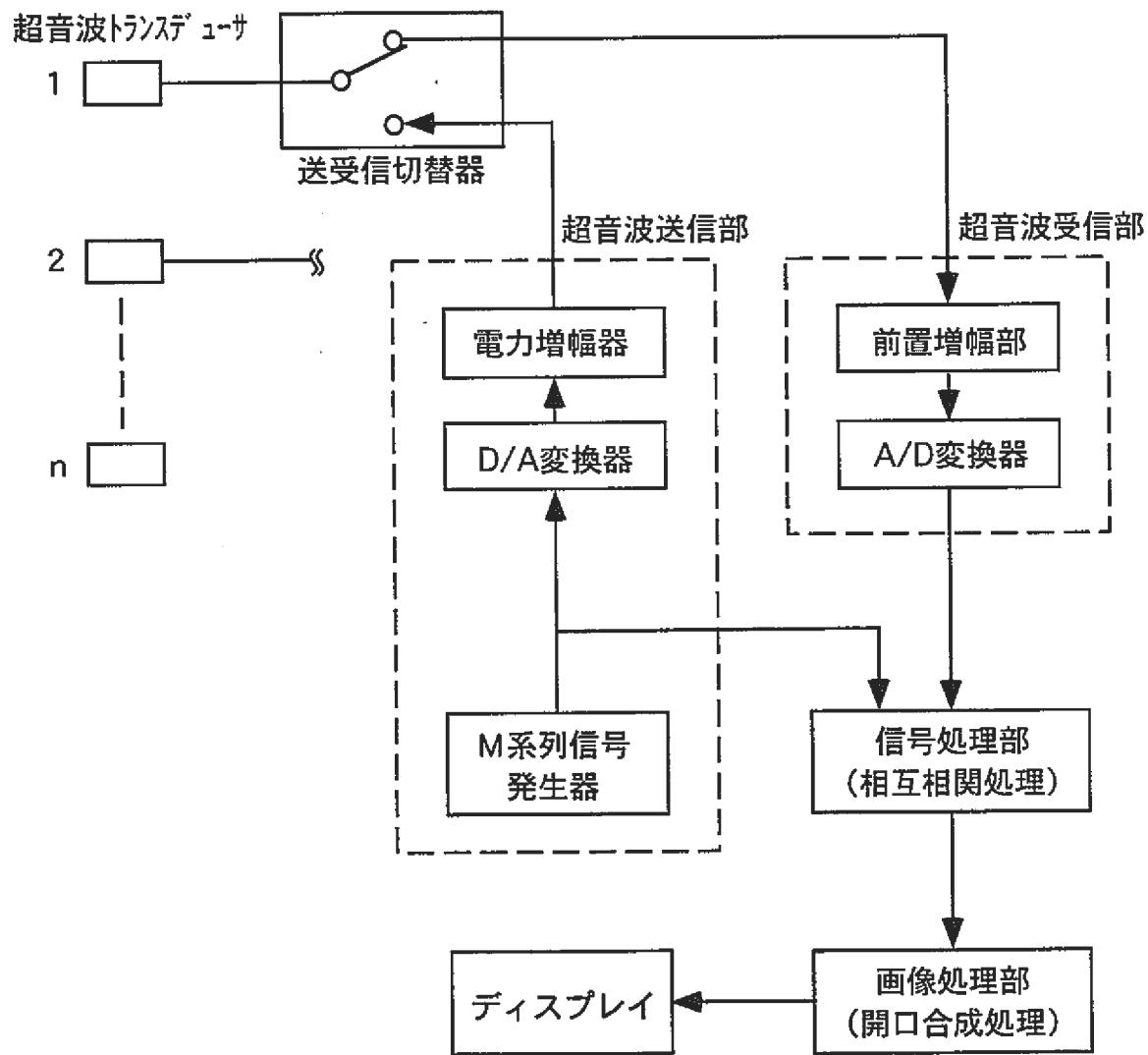


図 4-1 試作システムの構成図

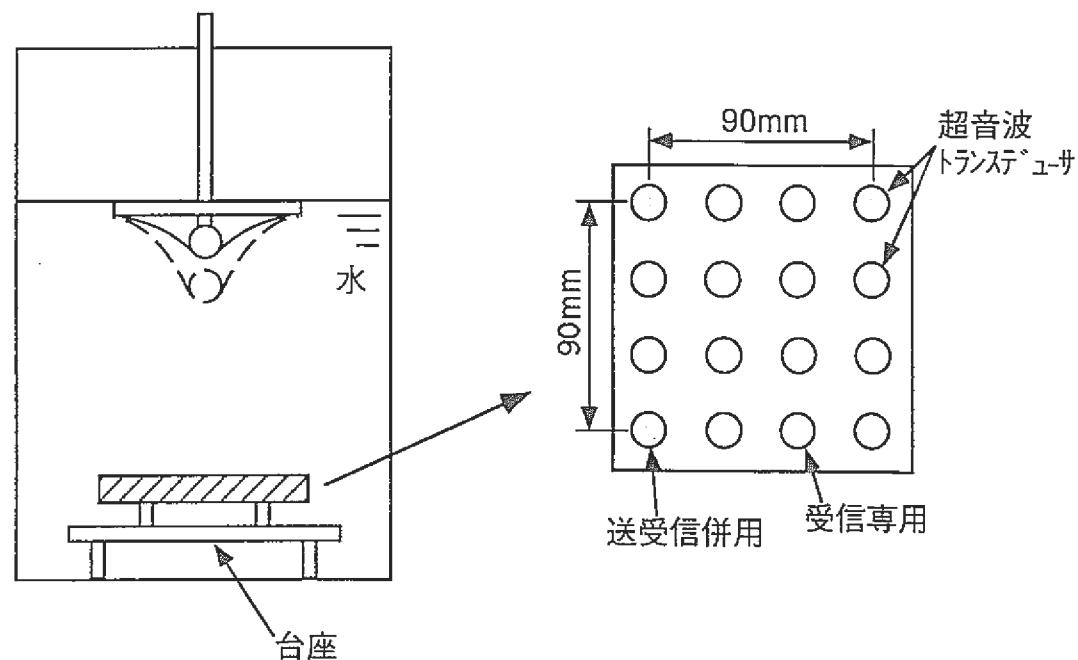


図5-1 液面可視化試験の概念図

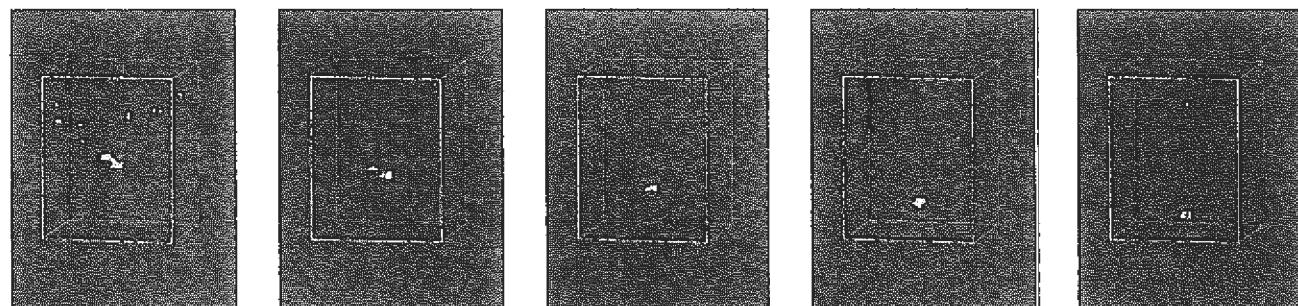
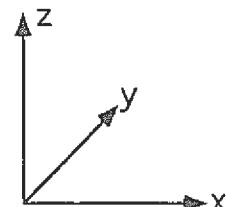


図5-2 液面可視化の画像処理結果
(測定間隔 : 5s)

画像化メッシュ x:1mm、y:1mm、z:0.075mm
画像化範囲 x:-20~20、-20~20、505~535mm



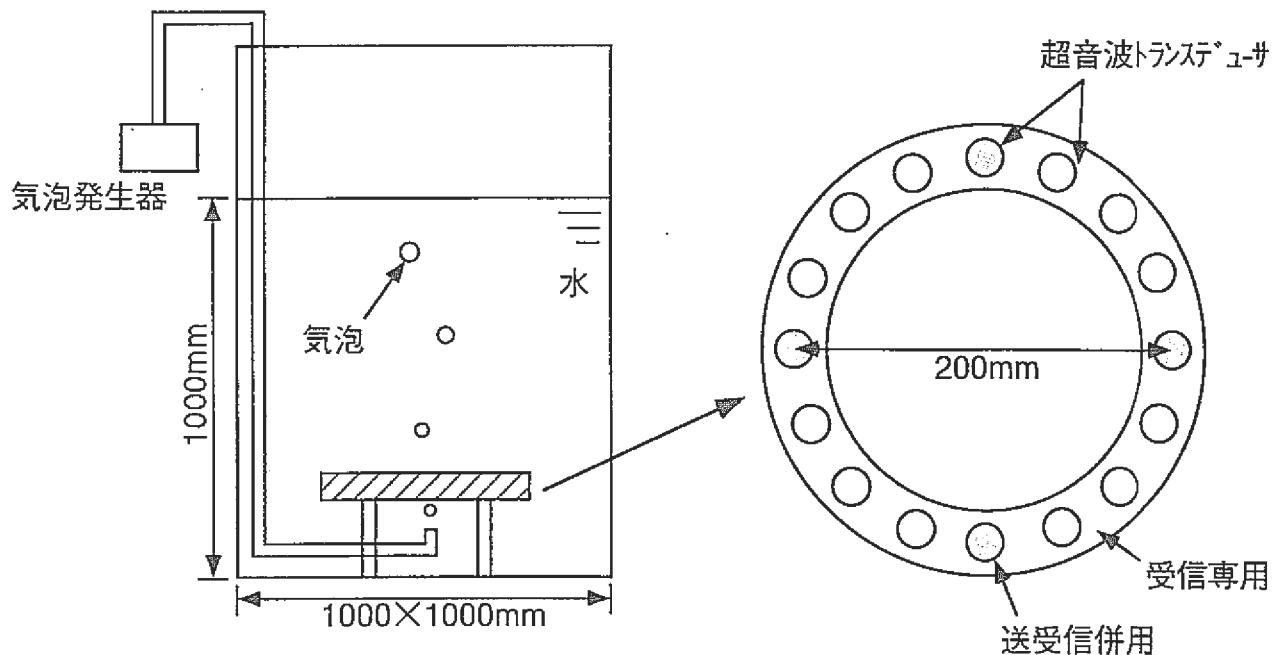


図5-3 気泡検出試験の概念図

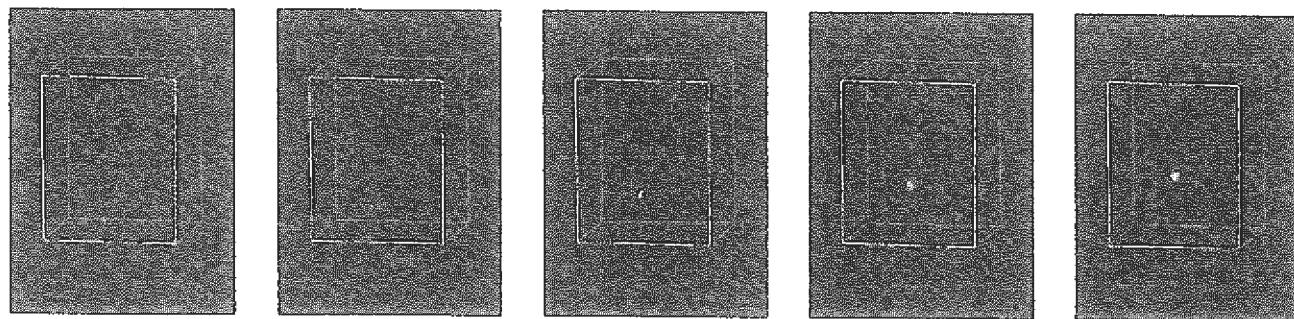


図5-4 気泡検出の画像処理結果

画像化メッシュ $x:1\text{mm}$ 、 $y:1\text{mm}$ 、 $z:0.075\text{mm}$
画像化範囲 $x:-20\sim20$ 、 $-20\sim20$ 、 $470\sim500\text{mm}$

