

高温用超音波トランステューサ水中特性試験

(研究報告書)

2000年7月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

2000年7月

高温用超音波トランステューサ水中特性試験

(研究報告書)

中山 王克^{*} 林田 均^{*}

要 旨

液体金属ナトリウムの熱流動現象を定量的に把握するために、液体金属ナトリウム中の流速分布を超音波により計測する技術の開発を進めている。これまで、ナトリウム中試験を行って、その適用性を評価するとともに課題を整理した。これを受け、センサ特性や計測アルゴリズムの最適化を図ることを目的とした水中及びナトリウム中試験を計画しており、これらの試験に供試する高温用超音波トランステューサを試作した。

本報告は、試作した高温用超音波トランステューサの単体特性の計測結果をまとめたものであり、試験により得られた主な知見は以下の通りである。

- (1) 散乱超音波による流速分布計測手法において特性支配因子となる音圧分布特性を把握した。また、超音波トランステューサによって生成される液中の音圧分布の予測式や近距離音場限界距離を計測データから導出した。
- (2) 超音波トランステューサの周波数帯域が、散乱波の周波数シフト計測を行うのに十分であることを確認した。また、距離方向計測範囲や散乱波の周波数シフト計測を行うのに必要な送受信回路の距離方向信号增幅仕様を導出した。
- (3) 散乱波の周波数シフト計測システムの計測精度評価を行う上で必要な超音波トランステューサ単体に起因する空間分解能を推定した。

* 大洗工学センター 要素技術開発部 原子炉工学グループ

An Under-Water Experiment on the Acoustic Characteristic of High Temperature Ultrasonic Transducers

Oukatsu Nakayama^{a)} Hitoshi Hayashida^{a)}

Abstract

We have been developing an Ultrasound Doppler Velocimetry technique (UDV), in order to apply thermo-hydraulic measurement in sodium. A feasibility study had been conducted to identify development subjects of sensor and signal processing. Thus, high temperature ultrasonic transducers were manufactured to use in water and sodium tests, which will be scheduled to optimize an algorism of signal processing and to improve the characteristic of the transducer.

In this report, we described the results of an experiment on the acoustic characteristic of transducer in water.

The results are as follows :

- (1) The ultrasound beam profile of the transducer relating to the characteristic of velocity profile measurement using scattering ultrasound wave was obtained. The estimation of ultrasound beam profile in liquid and an ultrasound near-field region were introduced from these experimental data.
- (2) It was confirmed that the frequency's spectrum of transducers are adequate for the design requirement of flow velocity range. The specifications of a transmitter and receiver for a transducer were identified, such as the amplitude gain for scattered ultrasound signal and the frequency resolution for Doppler sift signal.
- (3) The spatial resolution of the ultrasound beam was estimated to evaluate the accuracy of flow profile measurement on UDV system.

^{a)} Reactor Engineering Group, Advanced Technology Division, OEC, JNC

目 次

1. 緒言	1
2. 試験項目	2
3. 試験装置	4
4. 試験方法	6
4.1. 試験装置構成	6
4.2. 計測方法	7
5. 試験結果	10
6. 考察	12
6.1. 解析理論	12
6.2. 解析パラメーターと解析方法	14
6.3. 解析値と試験値の比較評価	15
6.4. 試作トランスデューサの計測特性評価	17
7. 結言	21
謝辞	22
参考文献	23

表リスト

表 3.1 超音波トランステューサの仕様	2 4
表 4.1.1 超音波トランステューサ特性試験の条件	2 5
表 4.2.1 XY 方向の移動距離とデータの計測点数	2 5
表 5.1 超音波ビーム半値幅、指向角及び近距離音場限界距離の計測結果	2 6
表 5.2 超音波トランステューサの水中感度特性	2 6
表 5.3 超音波トランステューサのダンピング特性と 中心周波数、バンド幅の計測結果	2 7
表 6.2.1 音響解析パラメーター	2 8
表 6.3.1 軸距離減衰曲線定数 α 、近距離音場限界距離、 指向角及び臨界角の解析値	2 8
表 6.4 流速分布計測における個々のトランステューサの仮定した空間分解能 と周波数特性から換算された計測できる最大流速値	2 9

図リスト

図 1.1 超音波パルスによる流速分布計測法	3 0
図 1.2 高温 PZT 超音波トランステューサの製作図	3 1
図 1.3 ニオブ酸リチウム(LiNbO ₃)超音波トランステューサの製作図	3 2
図 2.1 超音波ビームの音圧分布	3 3
図 2.2 超音波ビームの音圧分布における方向と音圧の関数	3 3
図 3.1 試験装置と全体の構成	3 4
図 4.2.1 超音波ビームプロファイルの計測法	3 5
図 4.2.2 RF 信号の PEAK 値の検出法	3 5
図 4.2.3 送信波形	3 6
図 4.2.4 超音波ビームの半値幅の計測法	3 7
図 4.2.5 超音波ビームの指向角の計測法	3 7
図 4.2.6 超音波トランステューサのダンピング特性の計測法	3 8
図 4.2.7 超音波トランステューサの中心周波数、バンド幅の計測法	3 8
図 5.1(a) 常温 PZT_A のビームプロファイル	3 9
図 5.1(b) 常温 PZT_B のビームプロファイル	4 1
図 5.1(c) 高温 PZT のビームプロファイル	4 3
図 5.1(d) 高温 LI_A のビームプロファイル	4 5
図 5.1(e) 高温 LI_B のビームプロファイル	4 7
図 5.3(a) 常温 PZT_A の RF 波形	4 9
図 5.3(b) 常温 PZT_B の RF 波形	4 9
図 5.3(c) 高温 PZT の RF 波形	4 9
図 5.3(d) 高温 LI_A の RF 波形	4 9
図 5.3(e) 高温 LI_B の RF 波形	4 9

図 5.4(a) 常温 PZT_A の RF 周波数分布	5 0
図 5.4(b) 常温 PZT_B の RF 周波数分布	5 0
図 5.4(c) 高温 PZT の RF 周波数分布	5 0
図 5.4(d) 高温 LI_A の RF 周波数分布	5 0
図 5.4(e) 高温 LI_B の RF 周波数分布	5 0
図 6.1.1 理論音圧分布の計算方法	5 1
図 6.1.2 水中における超音波の減衰定数 β の周波数及び温度依存性	5 1
図 6.3.1(a) 常温 PZT_A のビームプロファイル(解析値)	5 3
図 6.3.1(b) 常温 PZT_B のビームプロファイル(解析値)	5 5
図 6.3.1(c) 高温 PZT のビームプロファイル(解析値)	5 7
図 6.3.1(d) 高温 LI_A のビームプロファイル(解析値)	5 9
図 6.3.1(e) 高温 LI_B のビームプロファイル(解析値)	6 1
図 6.3.2(a) 中心軸上の音圧分布の解析値と実験値(常温 PZT_A)	6 3
図 6.3.2(b) 中心軸 23mm におけるX方向の音圧分布の 解析値と実験値(常温 PZT_A)	6 3
図 6.3.2(c) 中心軸 100mm におけるX方向の音圧分布の 解析値と実験値(常温 PZT_A)	6 3
図 6.3.3(a) 中心軸上の音圧分布の解析値と実験値(常温 PZT_B)	6 4
図 6.3.3(b) 中心軸 23mm におけるX方向の音圧分布の 解析値と実験値(常温 PZT_B)	6 4
図 6.3.3(c) 中心軸 100mm におけるX方向の音圧分布の 解析値と実験値(常温 PZT_B)	6 4
図 6.3.4(a) 中心軸上の音圧分布の解析値と実験値(高温 PZT)	6 5
図 6.3.4(b) 中心軸 23mm におけるX方向の音圧分布の 解析値と実験値(高温 PZT)	6 5
図 6.3.4(c) 中心軸 100mm におけるX方向の音圧分布の 解析値と実験値(高温 PZT)	6 5
図 6.3.5(a) 中心軸上の音圧分布の解析値と実験値(高温 LI_A)	6 6
図 6.3.5(b) 中心軸 33mm におけるX方向の音圧分布の 解析値と実験値(高温 LI_A)	6 6
図 6.3.5(c) 中心軸 100mm におけるX方向の音圧分布の 解析値と実験値(高温 LI_A)	6 6
図 6.3.6(a) 中心軸上の音圧分布の解析値と実験値(高温 LI_B)	6 7
図 6.3.6(b) 中心軸 33mm におけるX方向の音圧分布の 解析値と実験値(高温 LI_B)	6 7
図 6.3.6(c) 中心軸 100mm におけるX方向の音圧分布の 解析値と実験値(高温 LI_B)	6 7

1. 緒言

液体金属ナトリウムの熱流動現象を定量的に把握するためには、温度分布計測の他、流速分布の計測が必要である。原子炉工学グループでは液体金属ナトリウム中の流速分布を計測するために超音波の適用を検討している。その方法は流体中で被測定対象場に超音波を伝播させ、反射された超音波信号の周波数が流体の流速によって変化し、その周波数のシフト量から流体の流速を計算する、いわゆるドップラー効果を利用したものである。また、照射される超音波には連続した超音波を利用するものとパルス信号を利用するものがあり、原子炉工学グループではパルス信号を利用した流速分布計測方法の開発を進めている¹⁾(図1.1)。

これまで、既存技術(高温探傷用に開発した技術を応用)の超音波トランスデューサを用いたナトリウム中の流速分布測定試験を行い、その適用性を確認している。しかし、計測された信号の感度やS/N比が不十分であり、流速値で信頼性のあるデータが得られておらず、これら課題の解決を図るべく、センサや信号処理等の要素を含めて開発を行っている。

そこで、センサ特性や計測アルゴリズムの最適化を図るために水中及びナトリウム中試験に供するために、新たに高温用超音波トランスデューサを試作した。図1.2と図1.3にそれぞれ試作した高温用PZTトランスデューサ(以下高温PZTと略す)と高温用ニオブ酸リチウムトランスデューサ(以下高温LIと略す)の製作図を示す。個々のトランスデューサの最高使用温度は230°Cと500°Cである。本報告は、今後予定されている水中とナトリウム中流速分布試験における評価に必要な高温用トランスデューサの特性を水中で計測した結果についてまとめた。

2. 試験項目

本試験では、参照用に水中で流速分布測定に実績のある IMASONIC 社の常温用 PZT トランスデューサ（以下常温 PZT と略す）を用いて、新たに製作した高温用トランスデューサに関して超音波ビームプロファイル、超音波の波形及び周波数特性を水中で計測した。以下に試験項目を示す。

(1)超音波ビームプロファイル^{②)}

超音波ビームプロファイルは、ある媒質中に超音波トランスデューサから放射された音圧分布のことである。本試験では、二次元（XY 方向）の超音波ビームプロファイルを計測した。以下に超音波ビームプロファイルで計測される項目を示す。

①ビーム幅と指向角

散乱波による流速計測は対象測定領域へ照射される超音波のビームが出来るだけ細いことが望ましい。しかし、実際には振動子は有限の径を持つので超音波ビームは有限の幅を持っている。この場合、計測する対象領域に照射される超音波の有効体積の大きさは測定誤差となるので、ビームの広がり程度（ビームの幅と指向角）を実験的に把握する必要がある。本試験で用いたビームの幅と指向角の計測方法は 4 章の計測方法の中で示す。

②軸距離感度特性

軸距離感度特性は振動子のヘッド面に垂直な方向（Y 方向）における中心軸上の距離音圧のことである。散乱信号から周波数シフトを検出するためには信号処理系の入力としてある程度の強度を持つ信号が必要であり、本試験では個々の超音波トランスデューサの軸距離感度特性を計測した。

③軸距離減衰特性

上記の軸距離音圧分布において、その音圧分布の最大値で規格した音圧分布のことを軸距離減衰特性という。超音波が媒質中を伝播する際に、その超音波ビームが広がるための拡散損失のほかに、媒質の内部摩擦及び組織境界における散乱のために、所定の方向に進む超音波の強さ（中心軸に垂直な単位面積を単位時間に通過するエネルギー）が減衰する。流速分布計測の信号処理においては軸距離増幅度を決める必要があり、本試験では、軸距離減衰特性を計測した。

④近距離音場限界距離

音源の振動面の寸法が音波の波長と同程度以上の大きさの場合には、音源付近の音

場に強弱の縞を生ずる。この範囲を近距離音場といふ。これに対して音源から充分離れた音場を遠距離音場といふ。また、それらの境界となる所は近距離音場限界距離と定義されている。散乱波計測においては音圧分布が出来るだけ均一であることが必要条件であり、遠距離音場の範囲を実験的に明らかにするために、本試験では近距離音場限界距離を調べた。

⑤サイドローブ（副軸）

超音波トランスデューサからは一定の方向に強く超音波が放射される。これを指向特性といふ。これを中心軸上の音圧を1として、注目する方向にその方向の強さを表してみると図2.1のようになる。また、図2.2に示すように方向と音圧関数で表すと主軸（main lobe）の脇に他のふくらみが生じ、これを副軸（side lobe）といふ。これが大きいと流速分布計測の場合照射される超音波ビーム方向に対して異なった方向から散乱波を計測することがあり、計測誤差となるので、本試験では主軸に対して副軸の大きさを調べた。

(2)超音波の波形と周波数特性²⁾

超音波トランスデューサから放射された超音波の波形と周波数特性について調べた。以下に超音波の波形と周波数特性で計測される項目を示す。

①ダンピング特性

散乱された微小な信号のスペクトルシフトを取り扱うこと及び計測位置同定と距離（時間）分解能の確保には、超音波トランスデューサの高ダンピング効果（パルスなどの信号を入力した後の残響を抑える効果）が必要となる。実際の超音波トランスデューサでは残響が存在し、過度の残響は誤差を生じさせる恐れがあるので、本試験では超音波の波形と周波数スペクトルを計測し超音波トランスデューサのダンピング特性を調べた。本試験で用いたダンピング特性の計測方法は4章の計測方法の中で示す。

②周波数特性

散乱源に入射する超音波は計測原理上で出来るだけ単スペクトルであることが望ましいのに対して、受信信号のスペクトルはドップラーシフト周波数をフィルタリングしないような周波数スペクトル分布が要求される。本試験においては、一個の超音波素子で送受信する場合を考えて超音波トランスデューサの周波数スペクトル特性を調べた。周波数スペクトルにおける中心周波数及びバンド幅（周波数分布の幅）の計測方法は4章の計測方法の中で示す。

3. 試験装置

超音波トランスデューサ特性の計測試験に用いた試験装置は、超音波発生装置、超音波トランスデューサ、計測試験体、計測システムから構成されている。以下に、各試験装置の仕様を示す。

(1)超音波発生装置

今回は 4 MHz の周波数をもつ超音波を発生させるために、Met·Flow 社の UVP (超音波流速分布測定装置) を用いた。

(2)超音波トランスデューサ

本試験では、高温用トランスデューサと常温用トランスデューサを用いた。高温用トランスデューサは同様に設計された二つの高温 LI (以下にそれぞれ高温 LI_A、高温 LI_B と呼ぶ)、高温 PZT が含まれる。常温用トランスデューサは同様に設計された二つの常温 PZT (以下にそれぞれ常温 PZT_A、常温 PZT_B と呼ぶ) がある。なお、表 3.1 に今回の試験で用いた超音波トランスデューサの設計値と圧電素子の物性値を示す。

(3)計測試験体 (反射体、水槽)

図 3.1 に計測試験体を示す。深さが 300mm の水槽の底辺に径 10mm のステンレス棒を図のように置き、その棒に対して垂直にトランスデューサを設置し、ステンレス棒で反射され超音波エコー信号を計測した。また、トランスデューサを XY パルスマニピュレーターで固定し、図のように水平と垂直方向 (XY 面) に対して走査ができるようにした。

(4)計測システム

本試験で用いた超音波計測システムは図 3.1 に示しているように、以下の装置で構成されている。

- ① 超音波の特性を計測する装置として Krautkramer Branson 社の UTA-5 (トランスデューサアナライザー) を用いた。UTA-5 は超音波 RF 信号 (トランスデューサによって受信された超音波信号) の増幅、RF 信号の PEAK 値 (最大値) の検出、RF 信号の出力、RF_GATE (RF 信号に対して Gate 信号をかける) などの機能がある。
- ② UTA-5 から出力された RF 信号の波形を計測するためにオシロスコープを用いた。

- ③ RF 信号の周波数スペクトルを計測するためにスペクトルアナライザーを用いた。
- ④ ピームプロファイルを測定するために Date-Logger を用いて UTA-5 から出力された RF 信号の PEAK 値を記録した。

4. 試験方法

超音波トランスデューサ特性試験の試験装置構成と計測方法について以下に示す。

4.1 試験装置構成

図 3.1 に試験装置の構成を示す。UVP から発生した 4MHz の超音波パルスを UVP の Tx 端子から UTA-5 の External Tx 端子に入力した。その超音波パルスは UTA-5 の内部を通して、UTA-5 の Tx 端子に繋いたトランスデューサに出力した。UTA-5 の RF 端子からオシロスコープの CH1 端子に RF 信号（トランスデューサの受信信号）を出力した。RF 信号の PEAK 値の検出と周波数スペクトルを計測するために UTA-5 の内部から発生する Gate 信号を RF 信号にかけた。ここでは、RF 信号に Gate をかけるために UTA-5 の Gate 端子からオシロスコープの CH2 に Gate 信号を出力し、オシロスコープで信号を観察しながら RF 信号が Gate 信号に含まれるように、Gate 信号の Width (幅) と Delay (遅れ) を調整した。したがって、Gate がかけられた RF 信号の周波数特性を計測するために、UTA-5 の Gate·RF 端子からスペクトルアナライザーの RF·IN 端子に繋いた。また、Gate がかけられた RF 信号に対して UTA-5 でその PEAK 値を検出し、その PEAK 値を UTA-5 の PEAK 端子から Data·Logger に出力することによって RF 信号の PEAK 値の記録を行った。さらに、UVP で発生したトリガー信号をそれぞれ UTA-5、オシロスコープ、スペクトルアナライザーに入力することによって各装置の同期を取った。トリガー信号の発生周期は超音波パルスの繰り返し周期によって設定されている。なお、UTA-5 の RF 信号の増幅上限を越えないように個々のトランスデューサに対して RF 信号の Gain を設定した。個々のトランスデューサ特性計測条件を表 4.1.1 に示す。

一方、本試験では XY マニピュレーターが走査している間に二次元平面に対する時系列を得るために、マニピュレーターの Y 方向の励磁パルス電圧を RF 信号の PEAK 値と同時に Data·Logger に出力した。それによって、X 方向と Y 方向にマニピュレーターが励磁される時間の原点が分かり、Data·Logger で得られた一連のデータをそれぞれ Y 方向のデータと X 方向データに分解ができ、二次元のビームプロファイルデータを取得した。

4.2 計測方法

(1)超音波ビームプロファイル²⁾

超音波ビームプロファイルの計測は透過法と反射法がある。透過法は送信トランスデューサから放射された超音波を受信トランスデューサで計測する方法で、反射法は送受信兼用のトランスデューサで超音波を送信し、反射体から反射された超音波を受信する方法である。本試験では後者の反射法を用いた。図 4.2.1 に本試験で用いた超音波ビームプロファイルの計測方法を示す。トランスデューサヘッド面の中心に垂直な XY 平面上の二次元音圧分布を測定するために、XY パルスマニピュレーターに固定された超音波トランスデューサを X 方向に 0.1mm 間隔で移動させ、Y 方向に 10mm 間隔で移動させた（表 4.2.1）。それぞれの計測点では、超音波トランスデューサは直径 10mm ステンレス棒からのエコーを受信し、受信信号（RF 信号）の PEAK 値を音圧とした。また、ステンレス棒の上端から垂直距離が 203mm となるトランスデューサヘッド面の位置を音圧分布の座標の原点とした。なお、PEAK 値の検出は RF 信号に Gate をかけることによって行った（図 4.2.2）。また、ステンレス棒への最接近垂直距離は 3mm とした。

一方、トランスデューサの超音波送信に用いた信号は 128V (Peak to Peak) で 4MHz を持つ 3 周期のサイン波である（図 4.2.3）。

以下はビームプロファイルによる計測項目を示す。

①ビーム幅と指向角

上記で計測された二次元ビームプロファイルにおいて、図 4.2.4 に示したように X 方向の距離音圧分布（PEAK 値分布）の半値幅をビームの幅とした。また、その時の指向角は図 4.2.5 のように定義し、下記の式 4.2.1 を用いて指向角を算出した。

$$\theta_0 = 2 \times \tan^{-1}(W_0 / 2L_0) \quad \text{式(4.2.1)}$$

W_0 : 半値幅 L_0 : 水中距離 θ_0 : 指向角

②軸距離感度特性

本試験では、ステンレス棒に対してトランスデューサが完全に垂直に設置することができないこととトランスデューサの圧電素子がヘッド面に対して傾いている可能性があるため、得られたビームプロファイルが傾いている可能性がある。したがって、軸距離感度を得るのには、ビームプロファイルにおける二次元の音圧分布から横方向（X 方向）の音圧分布（PEAK 値分布）の最大値を取り、中心軸の音圧とした。

③軸距離減衰特性

ビームプロファイルにおける二次元の音圧分布からそれぞれの横方向(X方向)の音圧分布(PEAK値分布)の最大値をとり、中心軸上の音圧分布とした。本試験では、その音圧分布の最大値で規格したものを軸距離減衰特性とした。

④近距離音場限界距離

本試験では、③で得られた軸距離減衰特性において、その音圧分布の最大値に対応した距離を近距離音場限界距離とした。

⑤サイドロープ(副軸)

本試験では、サイドロープを含めた二次元超音波ビームプロファイルを計測した。

(2)超音波の波形と周波数特性²⁾

本試験では、ステンレス棒から50mmの水中距離に設置されたトランステューサで受信したエコー信号(RF信号)の波形をオシロスコープで計測するとともに、そのRF信号にGateをかけ、スペクトルアナライザーで周波数特性を測定した。以下に超音波の波形と周波数スペクトルにおける計測項目を示す。

①ダンピング特性

超音波素子のダンピング特性を評価するために、本試験では、得られたRF信号の波形において振幅の最大値の1/10(-20dB)まで減衰したときのパルス長さを計測した(図4.2.6)。

②周波数特性(中心周波数、バンド幅)²⁾

図4.2.7で示したように、GateがかけられたRF信号の周波数分布をスペクトルアナライザーで測定した。その周波数分布において、ピーク値から-6dBポイントにおける周波数f₁とf₂の間の中心値f_cを中心周波数とした。実際の計算式が以下に示す。

$$f_c = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad \text{式(4.2.2)}$$

f₁, f₂: ピーク値から-6dBポイントにおける周波数 f_c: 中心周波数

また、上記の周波数分布において、ピーク値から-6dBのポイント間の幅を中心周波数で割ったものをバンド幅とした。バンド幅は以下の式4.2.3から計算される。

$$BW(\%) = \frac{f_2 - f_1}{f_c} \times 100 \quad \text{式(4.2.3)}$$

f_1, f_2 : ピーク値から-6dB ポイントにおける周波数

f_c : 中心周波数 $BW(\%)$: バンド幅

5. 試験結果

以下に超音波トランスデューサ特性試験で得られた結果を示す。

(1)超音波ビームプロファイル

図 5.1(a)～図 5.1(e)に個々の超音波トランスデューサのビームプロファイルを示す。X軸はX方向におけるトランスデューサの中心を原点とした 20mm 幅を持つ距離を示し、Y軸はステンレス棒から Y 方向に 203mm 離れているトランスデューサのヘッド平面の中心を原点とした 3mm から 203mm までの距離を示している。これらの図で、同じ仕様で製作されたトランスデューサ（常温 PZT_A と常温 PZT_B、高温 LI_A と高温 LI_B）から放射された超音波ビームの傾きに違いが生じたのは、超音波トランスデューサがステンレス棒に対して完全に垂直に設置されていなかったためと考えられる。また、個々のビームプロファイルを見ると、常温 PZT のビームプロファイルの方は、中心軸に対して対称性がよい音圧分布になっていた。トランスデューサヘッドの近距離付近では、主軸の脇に対称性のよいサイドロープが観測されていた。それに対して、高温 PZT と高温 LI のビームプロファイルでは、常温 PZT のビームプロファイルで見られるようなよい対称性がなく、主軸の脇に僅かなサイドロープが観測されているものと片側だけサイドロープが観測されているものがある。今回製作した高温用トランスデューサ（高温 PZT、高温 LI）のビームプロファイルにおける非対称性の原因は、トランスデューサが完全に軸中心対称に製作されていなかった可能性が考えられる。なお、RF信号が計測された時、それぞれ異なった Gain で増幅されていたが、トランスデューサの感度などを比較するために RF 信号を同じ 0dB Gain に換算し、個々のトランスデューサで得られた RF 信号の最大値で規格化することによってビームプロファイルを作成した。以下はビームプロファイルで得られた結果を示す。

表 5.1 にトランスデューサのヘッド平面の中心から離れた水中 103mm で計測されたビーム半值幅、指向角及び近距離音場限界距離（考察 6.3 の(1)超音波ビームプロファイルについての所で用いた軸距離減衰特性から計算された）を示す。高温 PZT のビーム半值幅と指向角が常温 PZT の 0.8 倍で、高温 LI のビーム半值幅と指向角が常温 PZT の 0.7 倍であることがわかった。近距離音場限界距離に関しては、高温 PZT が常温 PZT の 0.8 倍で、高温 LI が常温 PZT の 1.7 倍である。表 5.2 にトランスデューサのヘッド平面の中心から離れた水中 103mm で計測された軸距離感度特性を示す。高温 PZT は常温 PZT の 1 / 12 倍の感度をもち、高温 LI は常温 PZT の 1 / 28 倍の感度を持つことが分かった。また、軸距離減衰特性に関しては 6 章の考察の中で示す。なお、上記結果の比較評価においては、それぞれ高温 LI_A と高温 LI_B で計測された値を平均化した値を用いた。同様に常温 PZT_A と

常温 PZT_B に関してもその平均値を用いた。

(2)超音波の波形と周波数特性

図 5.3(a)～図 5.3(e)と図 5.4(a)～図 5.4(e)に超音波トランスデューサから 50mm に設置されたステンレス棒によって反射されたエコーの波形と周波数分布を示す。これにより個々のトランスデューサのダンピング特性と中心周波数、バンド幅を求めた(表 5.8)。ダンピング特性に関しては、高温 LI が常温 PZT の 2 倍の残響を持つことがわかった。逆に高温 LI のバンド幅は常温 PZT のバンド幅の半分になっていた。また、高温 PZT に関しては常温 PZT の 1.5 倍の残響を持つことがわかつた。なお、上記結果の比較評価においては、それぞれ高温 LI_A と高温 LI_B で計測された値を平均化した値を用いた。同様に常温 PZT_A と常温 PZT_B に関してもその平均値を用いた。

6. 考察

前記の水中試験結果に対して音圧分布解析を行い試験値と比較評価した。水中試験で用いた超音波トランスデューサの音源の振動をモデル化し、その振動による超音波の音圧分布を解析的に求めた。以下にその解析理論、解析手法及びその評価結果を示す。さらに、試作トランスデューサの計測特性についても評価する。

6.1 解析理論

① 音圧分布解析理論

今回の試験で用いた超音波トランスデューサの振動はピストン振動に近いため、ピストン振動子から放射された音圧分布の解析値を図 6.1.1 のように求めた³⁾。図 6.1.1 の円板の面が U_0 の速度でピストン運動（面が同一に動く）をしているとした。円板の微小部分から球面波が出ていると考え、空間の任意の一点 $P(R, \theta)$ 点に達する音波を円板全面について集めあわすと音波の強さを計算できる。音圧の計算結果は下式になる。

$$p(R, \theta) = \rho c U_0 \times \sin\left[\frac{ka}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{R}{a}\right)^2} - \frac{R}{a} \right\}\right] \times \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \times \sin(\omega t - kR) \quad \text{式(6.1.1)}$$

$p(R, \theta)$: $P(R, \theta)$ 点の音圧 ρ : 媒質比重 c : 媒質中の速度

U_0 : 円板の面の初期速度 k : 波数 a : 円板の半径 J_1 : ベッセル関数

ω : 角振動数 R : 原点から P 点までの距離 θ : 中心軸から P 点まで角度

である。ここで式 6.1.1 の $\sin(\omega t - kR)$ は時間的に $-1 \sim +1$ の間で変化するものであり、音圧を考える場合にはこの係数項を考えればよい。この係数項は音圧の最大値であるから p_m と表し、以下の計算結果を検討するときは p_m を使用することにする。

$$p_m(R, \theta) = \rho c U_0 \times \sin\left[\frac{ka}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{R}{a}\right)^2} - \frac{R}{a} \right\}\right] \times \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad \text{式(6.1.2)}$$

p_m : 音圧の最大値

特に中心軸上の $\theta=0$ の場合は

$$p(x) = \rho c U_0 \times \sin\left[\frac{ka}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{x}{a}\right)^2} - \frac{x}{a} \right\}\right] \times \sin(\omega t - kx) \quad \text{式(6.1.3)}$$

x : 中心軸上における P 点の距離

である。式 6.1.3 においても、 $\sin(\omega t - kx)$ の係数項を前記式 6.1.2 のように p'_m と置く。

$$p'_m(x) = \rho c U_0 \times \sin\left[\frac{ka}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{x}{a}\right)^2} - \frac{x}{a} \right\}\right] \quad \text{式(6.1.4)}$$

p'_m : 音圧の最大値

式 6.1.4 において x が大きい遠距離の時、 $k = 2\pi/\lambda$ を入れ近似的に下式になる。

$$\begin{aligned} p'_m(x) &\approx \rho c U_0 \sin\left(1.57 \frac{a^2}{\lambda x}\right) \\ &\approx \rho c U_0 \left(1.57 \frac{a^2}{\lambda x}\right) \end{aligned} \quad \text{式(6.1.5)}$$

λ : 波長

式 6.1.5 から分かるように、振動子の中心軸上の音圧は、遠距離音場では振動子面積に比例し、距離 x に反比例している。また、以下のように

$$\alpha = 1.57 \frac{a^2}{\lambda} \quad \text{式(6.1.6)}$$

と置く。 α は軸距離減衰曲線定数であり、超音波が媒質中を伝播する際に、その波頭面が広がるための拡散損失によって生じる軸距離減衰の度合いを表す。

また、拡散損失のほかに、媒質の内部摩擦及び組織境界における散乱のために、所定の方向に進む超音波のエネルギーが減衰する。一般に音波が媒質中を x 方向に伝播する場合においての内部摩擦による減衰する模様は次式で表される。

$$p''_m(x) = \rho c U_0 \times 10^{\left(-\frac{\beta \cdot x}{10}\right)} \quad \text{式(6.1.7)}$$

p''_m : 音圧の最大値 ρ : 媒質比重 c : 媒質中の速度

U_0 : 円板の面の初期速度 β : 内部摩擦による減衰定数

したがって、実際の遠距離における軸上音圧分布は式 6.1.5 と式 6.1.7 から次式で表される。

$$p'''_m(x) \approx \rho c U_0 \left(\alpha \cdot \frac{1}{x}\right) \times 10^{\left(-\frac{\beta \cdot x}{10}\right)} \quad \text{式(6.1.8)}$$

p'''_m : 音圧の最大値

ここで内部摩擦による減衰定数 β については、Fox と Reck の試験結果によると、 β/f^2 の値が 100kHz～10MHz の範囲内で周波数 f によらずほとんど一定である³⁾。

図 6.1.2 に水の減衰定数の温度依存性を示す。この図から、水温 12°Cで 4MHz の超音波という今回の試験条件では、内部摩擦による減衰定数は

$$\beta = 528 \times 10^{-6}/\text{mm} \quad \text{式(6.1.9)}$$

である。音源に対して 203mm での減衰は式 6.1.7 により 2%であり、203mm 内での内部摩擦による減衰は無視できる。

②指向角と近距離音場限界距離

式 6.1.2 を用いて指向角 θ 、式 6.1.4 を用いて近距離音場限界距離 x_0 について理論的に表した。

・指向角 θ と近距離音場限界距離 x_0 は文献 3)によるとそれぞれ

$$\theta = 2 \times \sin^{-1}(0.71 \frac{\lambda}{2a}) \quad \text{式(6.1.10)}$$

$$x_0 = \frac{a^2}{\lambda} \quad \text{式(6.1.11)}$$

で求められる。

③臨界角

光学で見られる屈折率の大きい媒質から屈折率の小さい媒質へ入射したとき、入射角がある角度より大きくなった場合、境界面で全反射が生じるような現象が音に関しても見られる。本試験では、トランスデューサヘッド面から放射された超音波がステンレス棒で反射され、再びトランスデューサによって受信される臨界角を次式で求めた。

$$\theta_1 = 2 \times \sin^{-1}\left(\frac{c}{v_1}\right) \quad \text{式(6.1.12)}$$

c : 水中音速 v_1 : ダイヤフラムの音速(縦波の場合) θ_1 : 臨界角

6.2 解析パラメータと解析方法

今回の解析では、個々の超音波トランスデューサにおける解析パラメータを表 6.2.1 のように設定した。この場合、モデル化されたピストン振動半径の大きさ a は実験値のビームプロファイルに解析値のビームプロファイルを最小 2 乗法⁴⁾で近似し、逆算して求めたものである。また、式 6.1.2 及び式 6.1.4 を用いて二次元音圧分布と軸距離音圧分布を計算した。なお、それらの式において、 $\rho c U_0$ を p_0 とし、計算された音圧分布を p_0 で規格化した。

6.3 解析値と試験値の比較評価

(1)超音波ビームプロファイルについて

ピストン振動音圧分布の解析結果を図 6.3.1(a)～図 6.3.1(e)に示す。横軸は X 方向の距離、縦軸は Y 方向の距離を表している。実験値(図 5.1(a)～図 5.1(e))では、計測する時に、トランスデューサが多少傾いていた可能性があり、ビームの方向が解析値と幾らか違っていた。

音圧分布の解析値と実験値を比較するために、個々のビームプロファイルにおける中心軸方向(Y 方向)と X 方向の音圧分布を検討した(図 6.3.2(a～c)～図 6.3.6(a～c))。その結果、中心軸方向(Y 方向)の音圧分布(軸距離音圧分布)に関しては実験値と解析値がほぼ一致していることがわかった(図 6.3.2(a)～図 6.3.6(a))。それに対して、図 6.3.2(b)～図 6.3.6(b)では常温 PZT、高温 PZT の近距離音場 23mm における X 方向の音圧分布と高温 LJ の近距離音場 33mm における X 方向の音圧分布に関しては主極音圧分布の実験値と解析値がほぼ一致しているが、サイドロープ(副極)に関しては実験値の方が大きくなっていた。

上記で示されている中心軸方向(Y 方向)の距離音圧分布の試験値はその最大値で規格化されているため、個々の超音波トランスデューサの軸距離減衰特性を表している。また、軸距離音圧分布の試験値と解析値がほぼ一致していることから、軸距離減衰曲線定数 α を式 6.1.6 で解析的に求めた。

表 6.3.1 に軸距離減衰曲線定数 α 、近距離音場限界距離、指向角及び臨界角の解析値を示す。近距離音場限界距離の解析値と表 5.1 の実験値がほぼ一致しているのに対して指向角の解析値は実験値より大きくなり、図 6.3.2(c)～図 6.3.6(c)で示されたように遠距離音場における X 方向の音圧分布の試験値が解析値より狭くなった。また、本試験では臨界角を計測していないが、解析で得られた臨界角を見ると、ビームの指向角に対して十分大きい。したがって、臨界角の範囲中では、ビームプロファイルを十分計測できた。

(2)超音波トランスデューサの感度及びダンピング特性について

表3.1は個々の超音波トランスデューサ圧電素子の物性値を示す。送受信の感度を表す圧電率と圧電歪定数はそれぞれ以下の式(6.3.1)と式(6.3.2)で計算される³⁾。

圧電率 d は電圧をかけたときに生じる歪の目安を表し、

$$d = k \sqrt{\frac{\varepsilon^T s^E}{4\pi}} \quad \text{式(6.3.1)}$$

圧電歪定数 g は応力を加えたときに生じる開放電圧の目安を表し、

$$g = k \sqrt{\frac{4\pi \cdot s^E}{\varepsilon^T}} \quad \text{式(6.3.2)}$$

k : 結合係数 s^E : 弾性コンプライアンス ε^T : 比誘電率

で求められる。

圧電率 d に関しては常温 PZT が高温 LI の 26 倍で、圧電歪定数 g に関しては常温 PZT と高温 LI がほぼ同様な値を持つ。圧電率と圧電歪定数で表される感度に対して送受信が一つのトランスデューサで行なわれた本試験の感度評価結果はほぼ同様な傾向を示している。

一方、共振曲線の尖鋭度を表す機械的 Q 値に関しては高温 LI が常温 PZT、高温 PZT の方より桁違いに大きいが、本試験で計測された超音波のバンド幅には圧電素子、ダイヤフラム、パッキング材などによる全体の振動が含まれているため、高温 LI の圧電素子の機械的 Q 値によって生じる大きな残響がそのパッキング材やダイヤフラムによって抑えられている。しかし、高温 LI では、常温 PZT で使われている有効なパッキング材が使用できないため、常温 PZT ほどのダンピング効果がない。

6.4 試作トランスデューサの計測特性評価

本試験では試作したトランスデューサについて単体の特性を測定した。これらの結果を基に、本節では、今後、トランスデューサを信号処理回路等と組み合わせて計測システムとして特性試験に供する上で必要な要件について評価した。

評価項目は、次の3点を挙げた。一つ目は、トランスデューサによって生成される液中の音圧分布を簡易的に予測するために、測定データを使って、設計式の補正係数を求めておく。これにより、実音場（音圧分布）の推定を行う。二つ目は、トランスデューサと組み合わせて使用する送受信回路の条件設定について、トランスデューサとの整合を図るために、周波数帯域や距離減衰特性等の送受信回路仕様を整理しておく。三つ目は、計測システムの計測精度評価を行う上で必要なトランスデューサに起因する精度要因を明らかにするために、トランスデューサ単体での空間分解能を推定しておく。

また、これらの評価項目は、今後実施予定の流速分布計測特性評価試験において、試験条件設定の適正化にも不可欠な情報となるため、この観点も含めて評価しておく。

(1) 設計評価

①指向角

設計式6.1.10及び測定式4.2.1から試作した各トランスデューサの設計式の補正係数 γ

（＝測定値／設計値）を求めた。

$$\gamma = \frac{\theta}{\theta_0}$$

式(6.4.1)

θ (deg) : 指向角の測定値 θ_0 (deg) : 指向角の設計値

さらに、指向角 θ_1 (deg)の評価式（ナトリウム中の推定式）は次の通りである。

$$\theta_1 = \gamma \times 2 \sin^{-1} \left(0.71 \frac{\lambda}{2a} \right) \quad \text{式(6.4.2)}$$

a : ピストン振動の半径 λ : ナトリウム中の波長

水中で計測された指向角、各トランスデューサの設計補正係数の値 γ 及びナトリウム中で推定される指向角を以下に示す。ただし、ナトリウム中の温度は 500°C、音速は 2,300m/s、超音波周波数は 4MHzとした。

	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
水中指向角(測定値)	3.0 度	2.7 度	2.5 度
補正係数 γ	0.51	0.66	0.61
Na中指向角(推定値)	4.8 度	4.3 度	4.1 度

②近距離音場限界距離

実測値の近距離音場限界距離によって示される水中不感(測定不可)領域及び式 6.1.6 から推定されるナトリウム中の不感領域を以下に示す。ただし、ナトリウム中の温度は 500°C、音速は 2,300m/s、超音波周波数は 4MHz とした。

	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
水中距離(測定値)	17.0mm	35.3mm	35.8mm
Na 中距離(推定値)	10.7mm	22.3mm	22.6mm

③ビーム軸上の距離減衰特性

各トランステューサの水中遠距離音場におけるビーム軸上の距離減衰特性(完全反射 1 スキップ)の実験近似式を以下に示す。ただし、近距離音場限界距離から 203mm までの近似式とする。

高温 PZT	$Y = 2.2 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 - 1.3 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 + 2.9 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 - 2.9 \cdot 10^{-1} \cdot x + 1.3$
高温 LI_A	$Y = -1.0 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 2.2 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 + 3.2 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 1.2 \cdot 10^{-1} \cdot x + 1.1$
高温 LI_B	$Y = -3.6 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 + 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 - 1.7 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1.0$

x : トランステューサヘッドから計測位置までの距離

Y : 音圧

(2)送受信回路との整合要件評価

①周波数帯域と要求ドップラーシフト範囲との関係

本試験で計測された水中における超音波の周波数特性から各トランステューサの周波数帯域測定結果と要求計測範囲との関係を以下に示す。ここでは、周波数分布のピーク値から 6dB に下がった所の周波数をそれぞれ上限周波数と下限周波数とする。

	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
中心周波数 f_0	4.4MHz	3.9MHz	3.9MHz
下限周波数 $f_l(-6\text{dB})$	3.1MHz	3.1MHz	3.1MHz
上限周波数 $f_h(-6\text{dB})$	5.7MHz	4.7MHz	4.7MHz
要求計測範囲(最大流速 10m/s)	±0.059MHz	±0.052MHz	±0.052MHz

本試験で計測された個々のトランスデューサの周波数特性(バンド幅)は流速計測において発生するドップラー周波数の範囲を十分カバーしていることが分かった。

②ビーム軸上の距離方向計測範囲

本水中試験におけるビーム軸上の距離減衰特性測定結果から、S/N>0dBを満足する計測範囲(距離、長さ)を以下に示す。

	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
有効計測距離	250mm	500mm	450mm
近距離音場限界距離	17.0mm	35.3mm	35.8mm

③ビーム軸上の距離方向減衰信号増幅利得

前記(1)(3)から求めた水中におけるビーム軸上の距離方向減衰特性に対応して必要な受信信号増幅利得を実験式として以下に示す。

高温 PZT	$Y = 2.4 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 - 7.6 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 - 9.8 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 + 2.3 \cdot x - 2.6$
高温 LI_A	$Y = 2.9 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 - 1.1 \cdot 10^{-2} \cdot x^3 + 1.1 \cdot 10^{-1} \cdot x^2 + 6.8 \cdot 10^{-1} \cdot x - 7.3 \cdot 10^{-1}$
高温 LI_B	$Y = 3.1 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 - 1.5 \cdot 10^{-2} \cdot x^3 + 2.3 \cdot 10^{-1} \cdot x^2 - 3.5 \cdot 10^{-1} \cdot x + 1.1 \cdot 10^{-1}$

x : トランスデューサヘッドから計測位置までの距離

Y : 増幅度 (Gain)

(3)計測誤差推定

①距離(時間)方向誤差

各トランスデューサのダンピング特性測定結果から、受信されたエコーのピーク値から 20dB に下がった所で定義される距離(時間)方向の不感領域(時間幅)を水中及びナトリウム中について以下で整理する。ただし、ナトリウム中の温度は 500°C、音速は 2,300m/s、超音波周波数は 4MHz とした。

	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
不感時間(測定値)	1.9×10^3 ns	2.9×10^3 ns	2.3×10^3 ns
水中距離(測定値)	2.9mm	4.4mm	3.5mm
Na 中距離(推定値)	4.4mm	6.7mm	5.3mm

②ビーム径方向誤差

以下に各トランスデューサのビーム半値幅で定義されるビーム径方向の誤差幅(距離)を水中及びナトリウム中について示す。ただし、ナトリウム中の温度は 500°C、音速は 2,300m/s、超音波周波数は 4MHz とした。

	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
水中距離誤差 (測定値)	5.4mm	4.8mm	4.4mm
Na 中距離誤差 (推定値)	10.5mm	6.8mm	6.4mm

③空間分可能(誤差体積)

上記②及び③から、水中及びナトリウム中の計測対象領域における誤差体積(空間分解能)は以下のとおりである。ただし、ナトリウム中の温度は 500°C、音速は 2,300m/s、超音波周波数は 4MHz とした。

	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
水中誤差体積 (測定値)	66.4mm ³	79.6 mm ³	53.2 mm ³
Na 中誤差体積 (推定値)	381mm ³	243mm ³	171mm ³

ここで算出した空間分解能は、ダンピング特性測定結果の受信された残響エコーがピークから 20dB 下がるまでの時間に相当する距離と、6dB 下がる位置で定義したビーム半値幅という計測系に対して非常に厳しい前提条件の下に計算されたものである。これらの定義により求められた空間分解能(誤差体積)は、信号処理能力を過小に考えた場合なので通常想定されるより大きな値となり、現実には 1 衍程度小さい値となるが、今後実施する試験の条件設定や信号処理系の仕様を設定する上での制約条件として整理しておく。

7. 結言

本試験及び解析の結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 本試験で計測された個々の超音波トランスデューサの音圧分布と音圧分布の解析結果を比較したところ、中心軸方向の音圧分布はほぼ一致しており、散乱波の周波数シフト計測に必要な音圧分布条件を満足していることを確認した。また、超音波トランスデューサによって生成される液中の音圧分布を、簡易的に予測するのに必要な設計式の補正係数や近距離音場限界距離を計測データから導出することができ、これらによる実音場（音圧分布）の推定が可能になった。
- (2) 本試験により各超音波トランスデューサの周波数帯域が、散乱波の周波数シフト計測を行うのに十分であることを確認した。また、試験により得られた距離減衰特性を基に、距離方向計測範囲や散乱波の周波数シフト計測を行うのに必要な送受信回路の距離方向信号増幅仕様を導出した。
- (3) 試験結果を基に、散乱波の周波数シフト計測システムの計測精度評価を行う上で必要な超音波トランスデューサ単体に起因する空間分解能を推定した。

これらは、今後実施予定の流速分布計測評価試験の評価を行う上で重要な知見となる。

謝辞

本試験の検討及び評価に際しご指導頂いた原子炉工学グループの荒邦章サブリーダ、
に深謝いたします。

本試験におけるデータの処理と解析に多大なご協力を頂いた原子力システム株式会
社の大和田康雄氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) Yasushi Takeda , Velocity Profile Measurement by Ultrasonic Doppler Method , Experimental Thermal and Fluid Science , Vol.10 , P444-P453 , 1995 .
- 2) 日本学術振興会製鋼第 19 委員会 , 超音波探傷法 , 日刊工業 , P20-P93 , 1980.
- 3) 実吉 純一 他 , 超音波技術便覧 , 日刊工業 , P25-P27,P319-P394 , 1987.
- 4) J.C.ミラー (村上正康 訳) , 統計学の基礎 , P234-P235 , 培風館 , 1995.

表 3.1 超音波トランスデューサの仕様

超音波 TDX	常温 PZT_A	常温 PZT_B	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
最高使用温度	60 °C	60 °C	230 °C	500 °C	500 °C
圧電素子	PZT	PZT	PZT-C2	LiNbO ₃ (Y36cut)	LiNbO ₃ (Y36cut)
電極の半径	3mm 以下	3mm 以下	4mm 以下	3mm	3mm
ダイヤフラム の半径	3mm	3mm	4mm	7mm	7mm
比誘電率 ϵ^T	2000	2000	1600	69	69
弾性コンプレ イアンス(S ^E)	18	18	16	3	3
圧電率(d) m/V(10 ⁻¹²)	374	374	289	14	14
圧電歪定数(g) Vm/N(10 ⁻³)	24.8	24.8	26.1	38	38
結合係数 (%)	71	71	53	51	51
機械的 Q	75	75	500	10 ⁶	10 ⁶

* 超音波 TDX : 超音波トランスデューサ

常温 PZT_A、常温 PZT_B: 同様に設計された常温用 PZT トランスデューサ(常温 PZT)

高温 LI_A、高温 LI_B: 同様に設計された高温用ニオブ酸リチウムトランスデューサ(高
温 LI)

表 4.1.1 超音波トランステューサ特性試験の条件

超音波 TDX	常温 PZT_A	常温 PZT_B	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
試験の水温	12°C	12°C	12°C	12°C	12°C
水中音速	1452.1m/s	1452.1m/s	1452.1m/s	1452.1m/s	1452.1m/s
送信電圧	128V	128V	128V	128V	128V
送信周波数	4MHz	4MHz	4MHz	4MHz	4MHz
送信波形	サイン波 3 周期				
RF 信号のゲイン	-7dB	-7dB	15dB	25dB	25dB
Y 方向における 最初の計測点	3mm	3mm	3mm	3mm	3mm

表 4.2.1 XY 方向の移動距離とデータの計測点数

	移動距離	データの計測点数
X 方向	20mm	201 点
Y 方向	200mm	21 点

表 5.1 超音波ビーム半値幅、指向角及び近距離音場限界距離の計測結果

超音波 TDX	常温 PZT_A	常温 PZT_B	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
半値幅	6.35mm	6.98mm	5.4mm	4.76mm	4.44mm
半値幅の平均値	6.7mm		5.4mm	4.6mm	
指向角	3.50 度	3.89 度	3.0 度	2.7 度	2.5 度
指向角の平均値	3.7 度		3.0 度	2.6 度	
近距離音場 限界距離	22.0mm	23.0mm	17.0mm	35.3mm	35.8mm
近距離音場限界 距離の平均値	21.0mm		17.0mm	35.6mm	

表 5.2 超音波トランスデューサの水中感度特性

超音波 TDX	常温 PZT_A	常温 PZT_B	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
水中感度特性 (無次元化さ れた音圧 P)	1.58×10^{-1}	1.68×10^{-1}	1.3×10^{-2}	5.56×10^{-3}	6.06×10^{-3}
水中感度特性 の平均値	1.6×10^{-1}		1.3×10^{-2}	5.8×10^{-3}	
常温 PZT の感度 を 1 とした時の 相対感度値	1		1 / 12	1 / 28	
常温 PZT の感度 を基準にした時 のデシベル表示	0dB		-22dB	-29dB	

表 5.3 超音波トランステューサのダンピング特性と中心周波数、バンド幅の計測結果

超音波 TDX	常温 PZT_A	常温 PZT_B	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
ダンピング特性 (-20dB Length)	1.2×10^3 ns	1.3×10^3 ns	1.9×10^3 ns	2.9×10^3 ns	2.3×10^3 ns
ダンピング特性 の平均値		1.25×10^3 ns	1.9×10^3 ns		2.6×10^3 ns
中心周波数	3.9MHz	4.1MHz	4.4MHz	3.9MHz	3.9MHz
中心周波数の 平均値		4.0MHz	4.4MHz		3.9MHz
バンド幅	79.2%	78.0%	59.1%	43.0%	42.0%
バンド幅の 平均値		78.6%	59.1%		42.5%

表 6.2.1 音響解析パラメーター

超音波 TDX	常温 PZT_A	常温 PZT_B	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
モデル半径	2.8mm	2.8mm	2.4mm	3.5mm	3.5mm
水中音速	1452.1m/s	1452.1m/s	1452.1m/s	1452.1m/s	1452.1m/s
周波数	4MHz	4MHz	4MHz	4MHz	4MHz
Y 方向距離	203mm	203mm	203mm	203mm	203mm
X 方向幅	20mm	20mm	20mm	20mm	20mm

表 6.3.1 軸距離減衰曲線定数 α 、近距離音場限界距離、指向角及び臨界角の解析値

超音波 TDX	常温 PZT_A	常温 PZT_B	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
軸距離減衰曲線定数 α	66.9mm	67.8mm	54.1mm	112.2mm	113.4mm
軸距離減衰曲線定数 α の平均値	67.4mm		54.1mm	112.8mm	
近距離音場限界距離	21.3mm	21.6mm	17.2mm	35.7mm	36.1mm
近距離音場限界距離の平均値	21.5mm		17.2mm	35.9mm	
指向角	5.3 度	5.3 度	5.9 度	4.1 度	4.08 度
指向角の平均値	5.3 度		5.9 度	4.1 度	
臨界角	45.8 度	45.8 度	29.9 度	28.1 度	28.1 度

表.6.4 流速分布計測における個々のトランステューサの仮定した空間分解能と周波数特性から換算された計測できる最大流速値
 (ただし、媒質中の音速を 1500m / s とする)

超音波 TDX	常温 PZT_A	常温 PZT_B	高温 PZT	高温 LI_A	高温 LI_B
基本周波数	4MHz	4MHz	4MHz	4MHz	4MHz
仮定した 空間分解能	1.8mm	1.9mm	2.8mm	4.3mm	3.4mm
計測できる 最大流速値	~600m/s	~600m/s	~450m/s	~300m/s	~300m/s

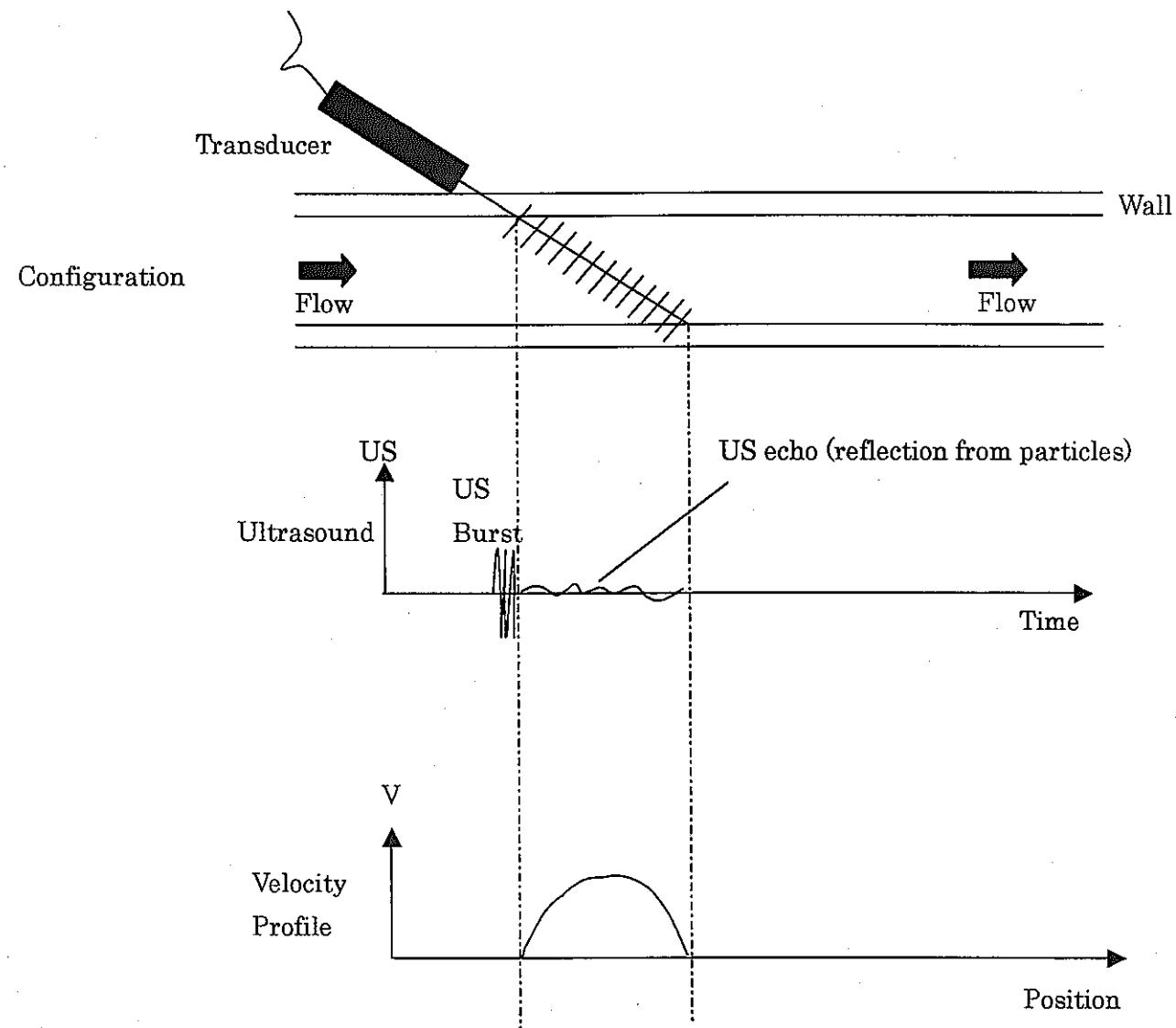


図 1.1 超音波パルスによる流速分布計測法

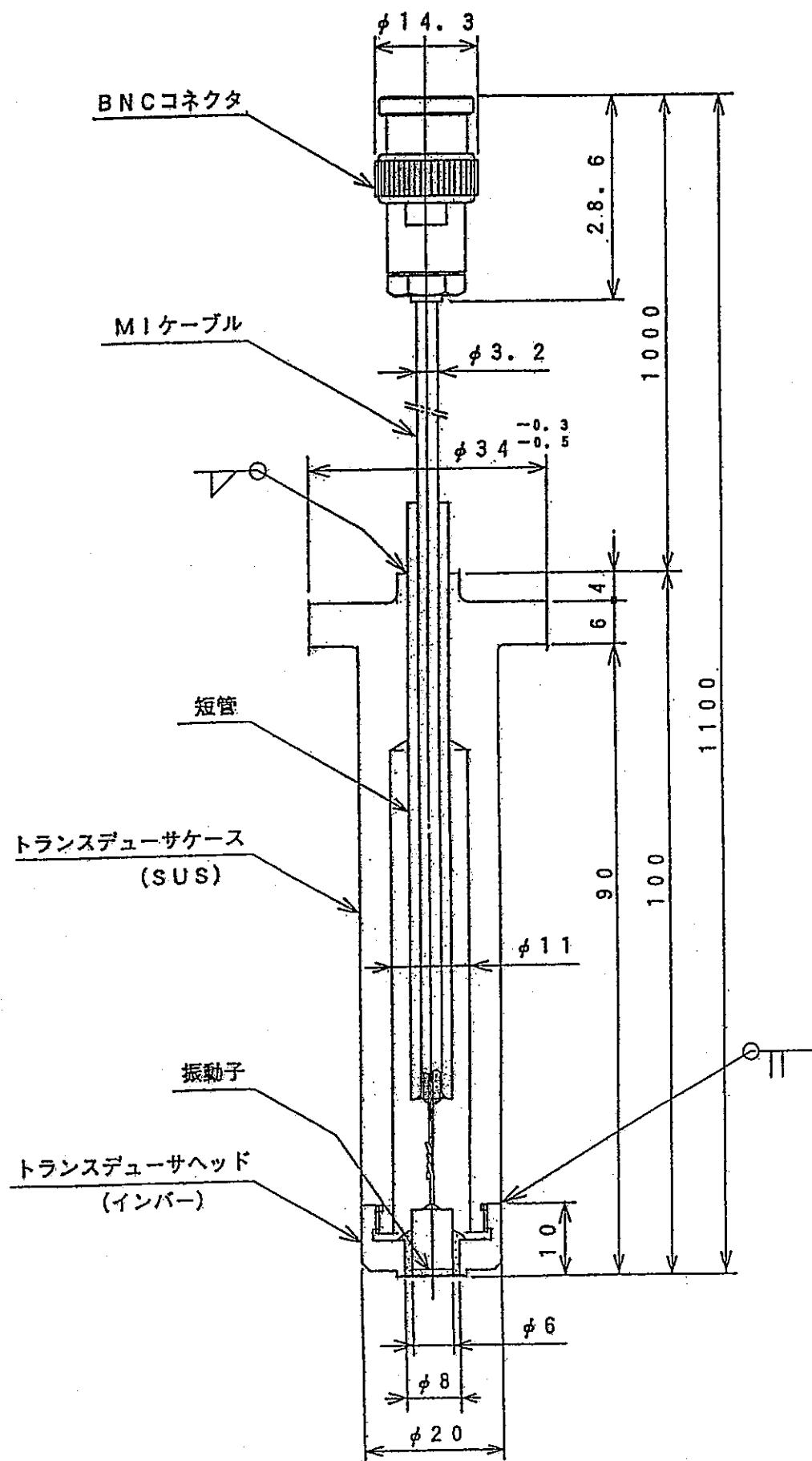
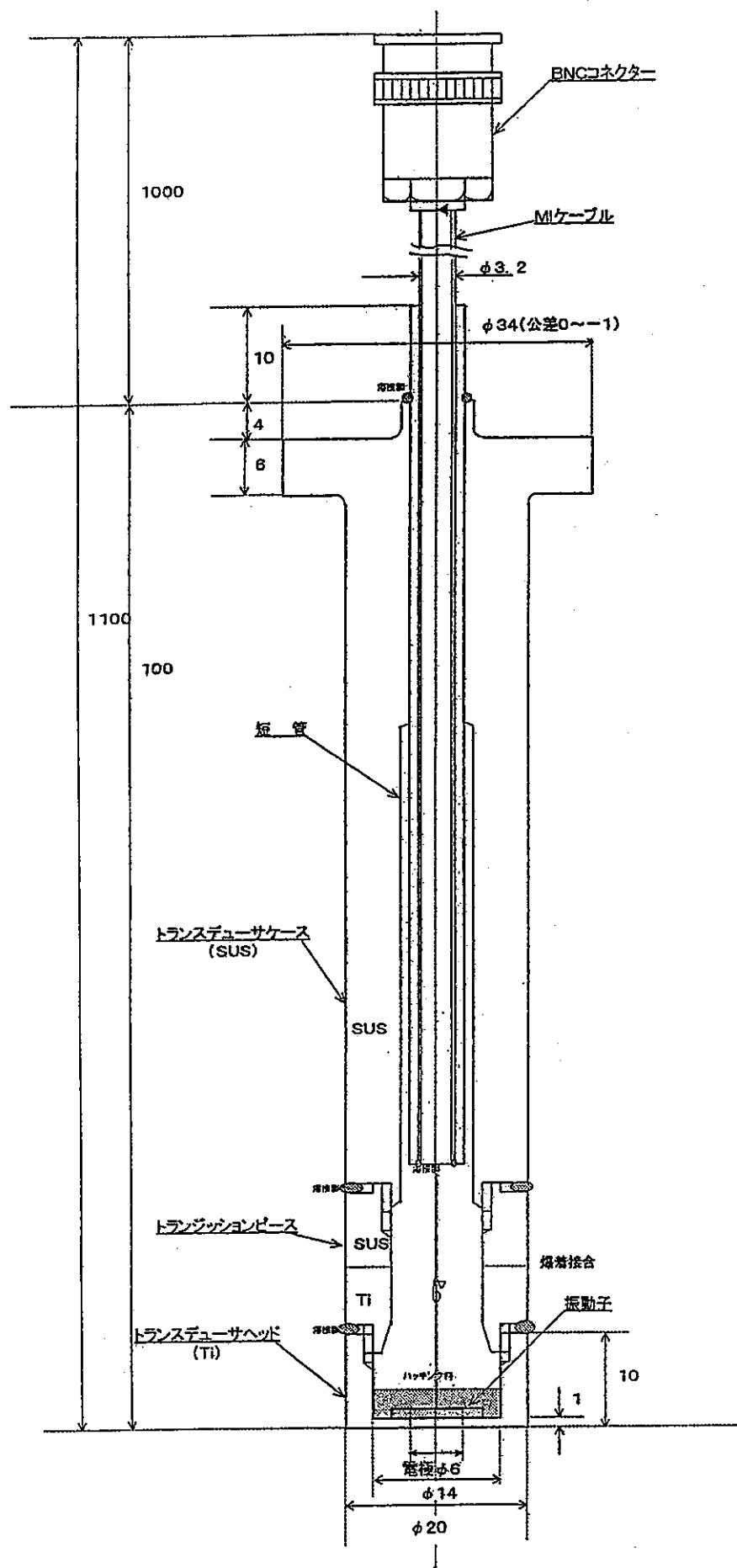


図 1.2 高温 PZT 超音波トランステューサの製作図

図 1.3 ニオブ酸リチウム(LiNbO_3) 超音波トランジューサの製作図

超音波トランステューサ

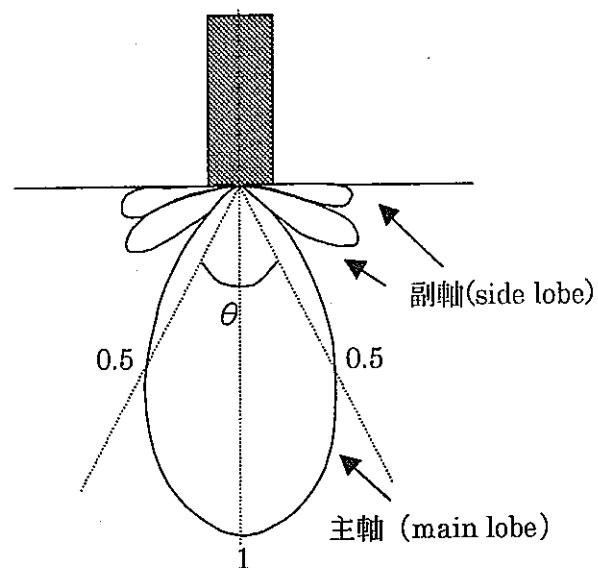


図 2.1 超音波ビームの音圧分布
(中心軸の音圧を1とし、同じ距離で注目する
方向にその方向の音圧を表したもの)

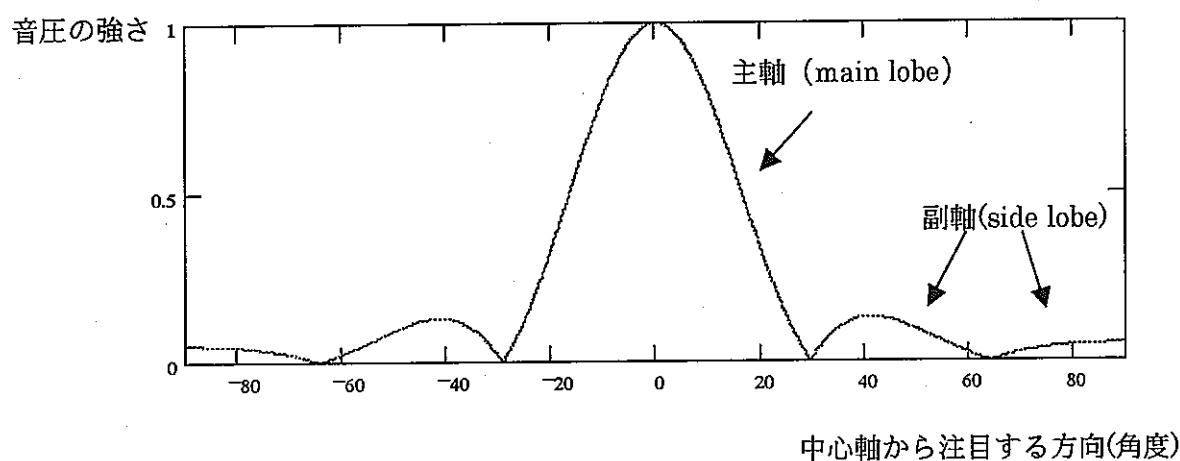


図 2.2 超音波ビームの音圧分布における方向と音圧の関数

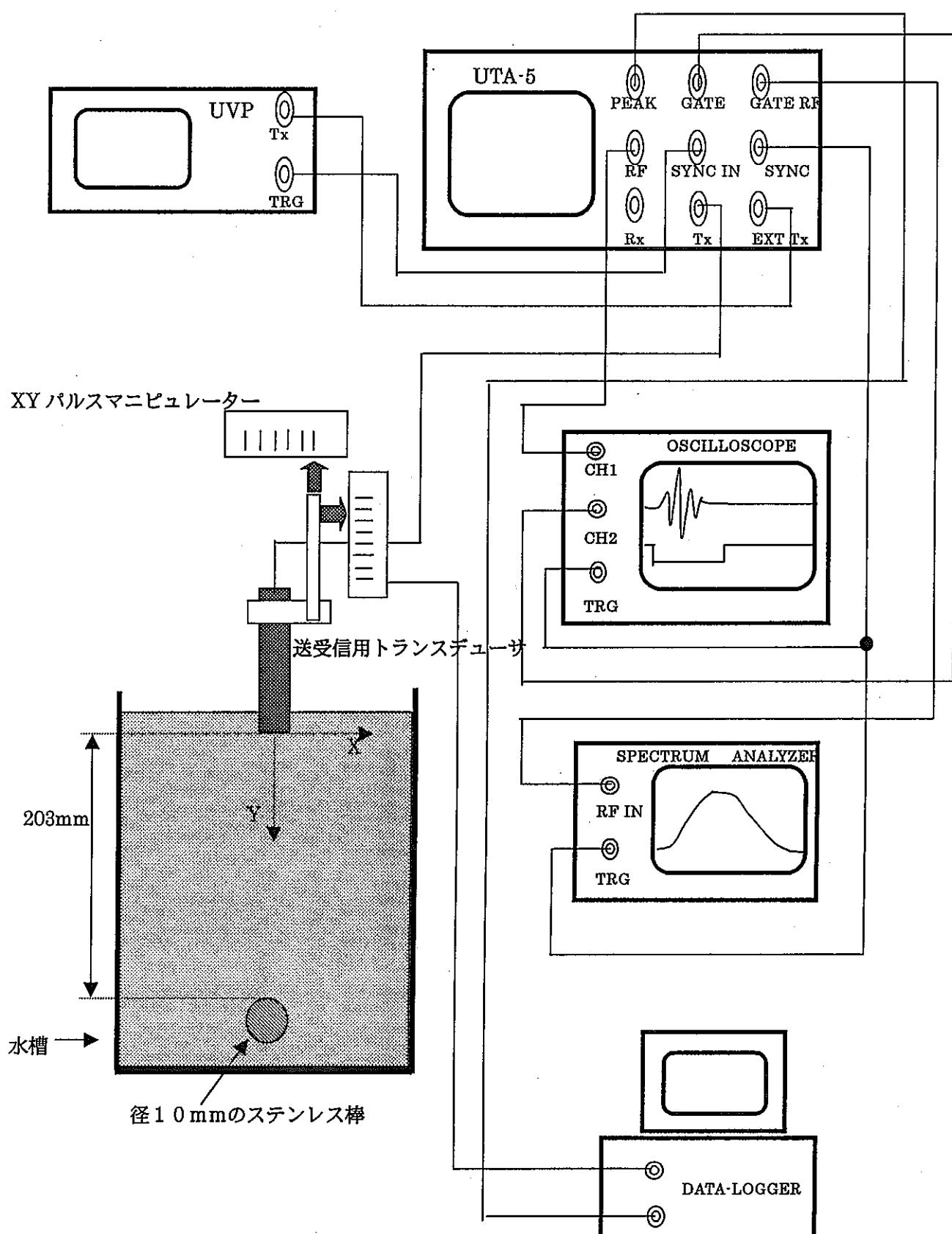


図 3.1 試験装置と全体の構成

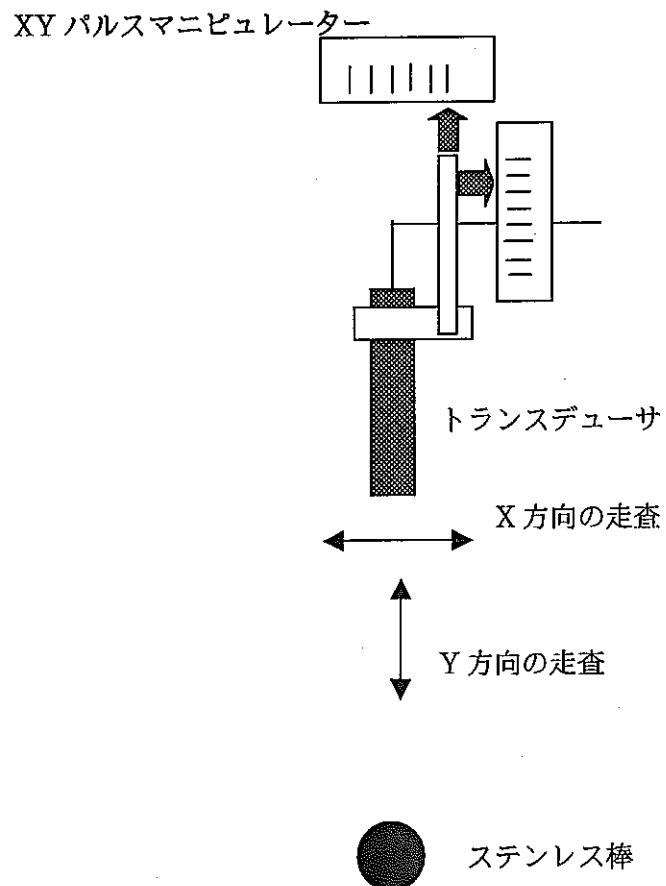


図 4.2.1 超音波ビームプロファイルの計測法

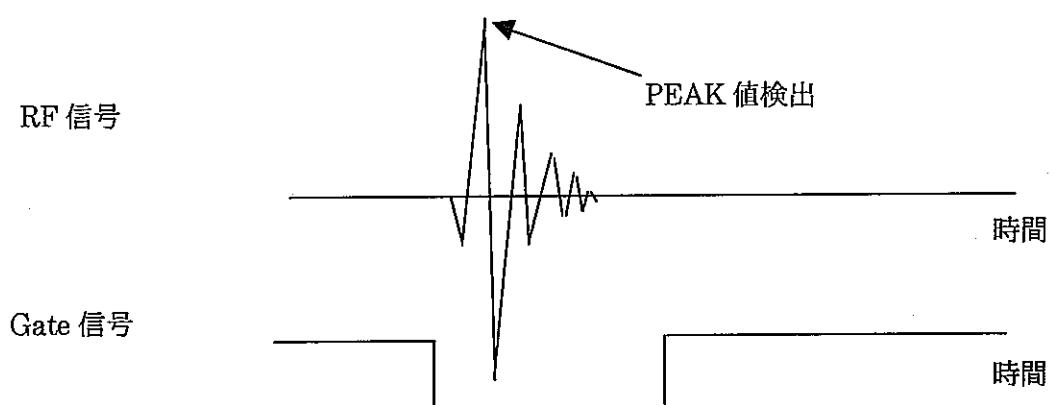


図 4.2.2 RF 信号の PEAK 値の検出法

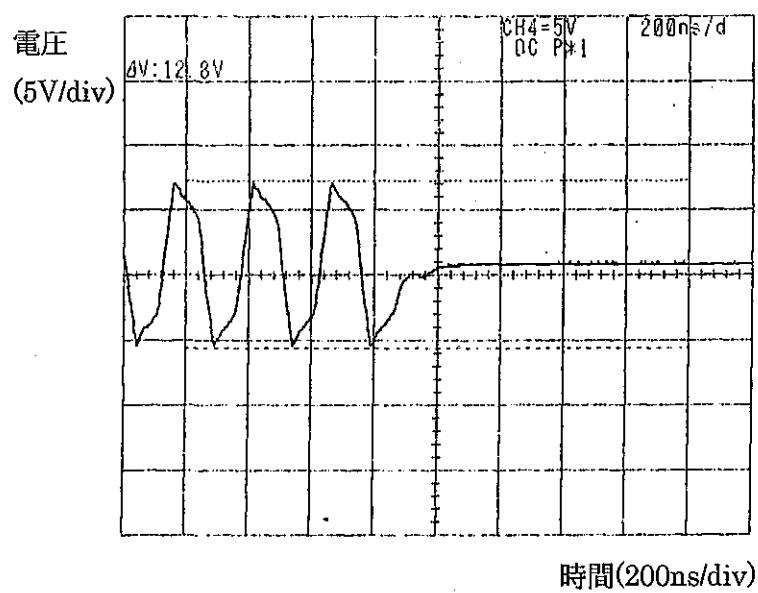
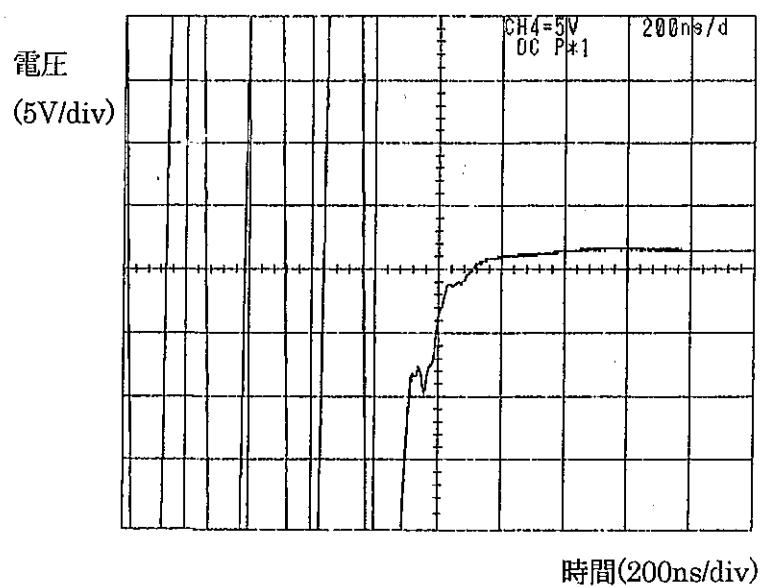


図 4.2.3 送信波形
(上は実際の送信波形、下は減衰比 1/10 の高圧プローブで計測された波形)

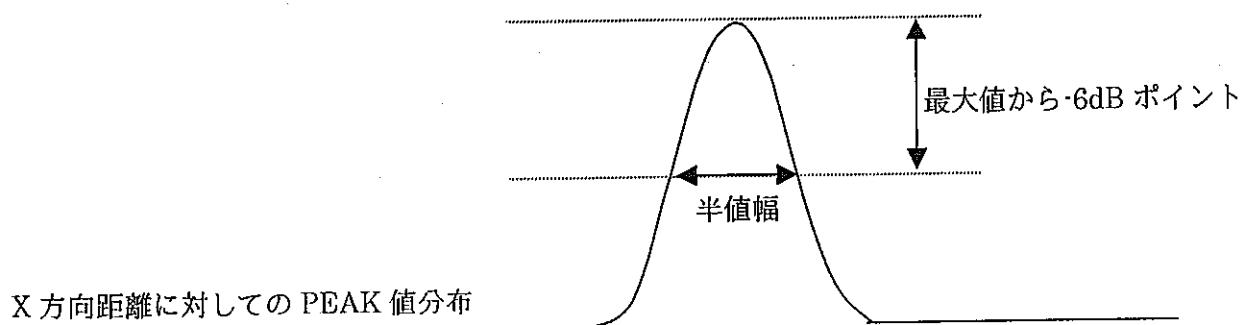


図 4.2.4 超音波ビームの半値幅の計測法

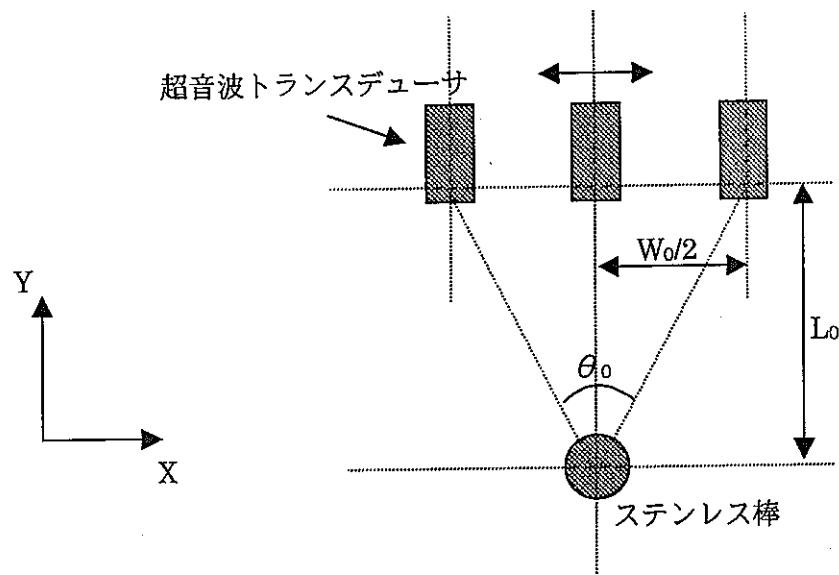


図 4.2.5 超音波ビームの指向角の計測法

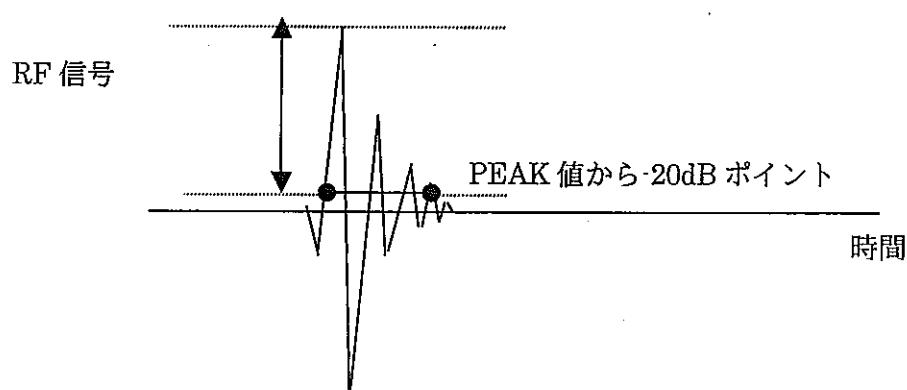


図 4.2.6 超音波トランスデューサーのダンピング特性の計測法

RF 信号の周波数スペクトル

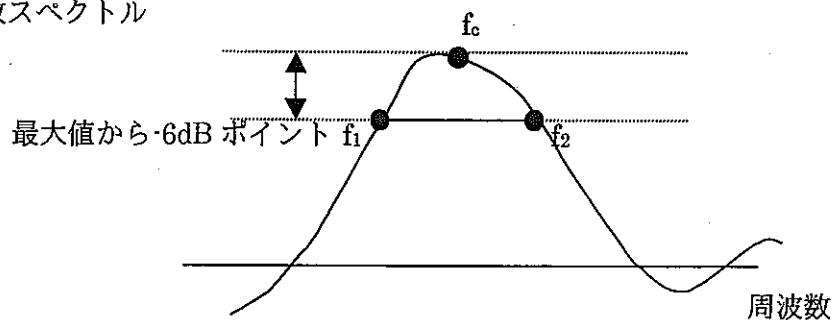


図 4.2.7 超音波トランスデューサーの中心周波数、バンド幅の計測法

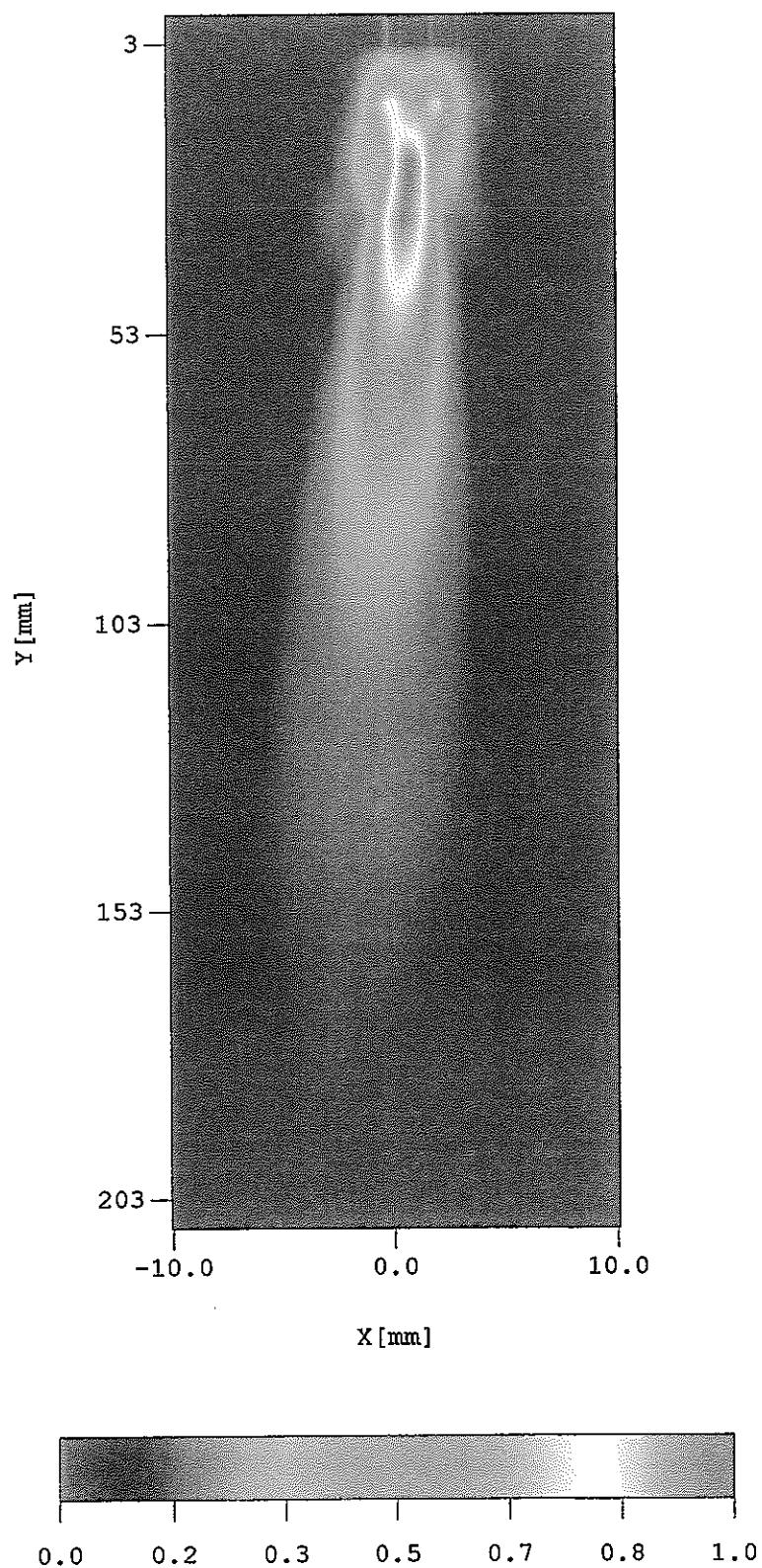


図 5.1(a) 常温 PZT_A のビームプロファイル

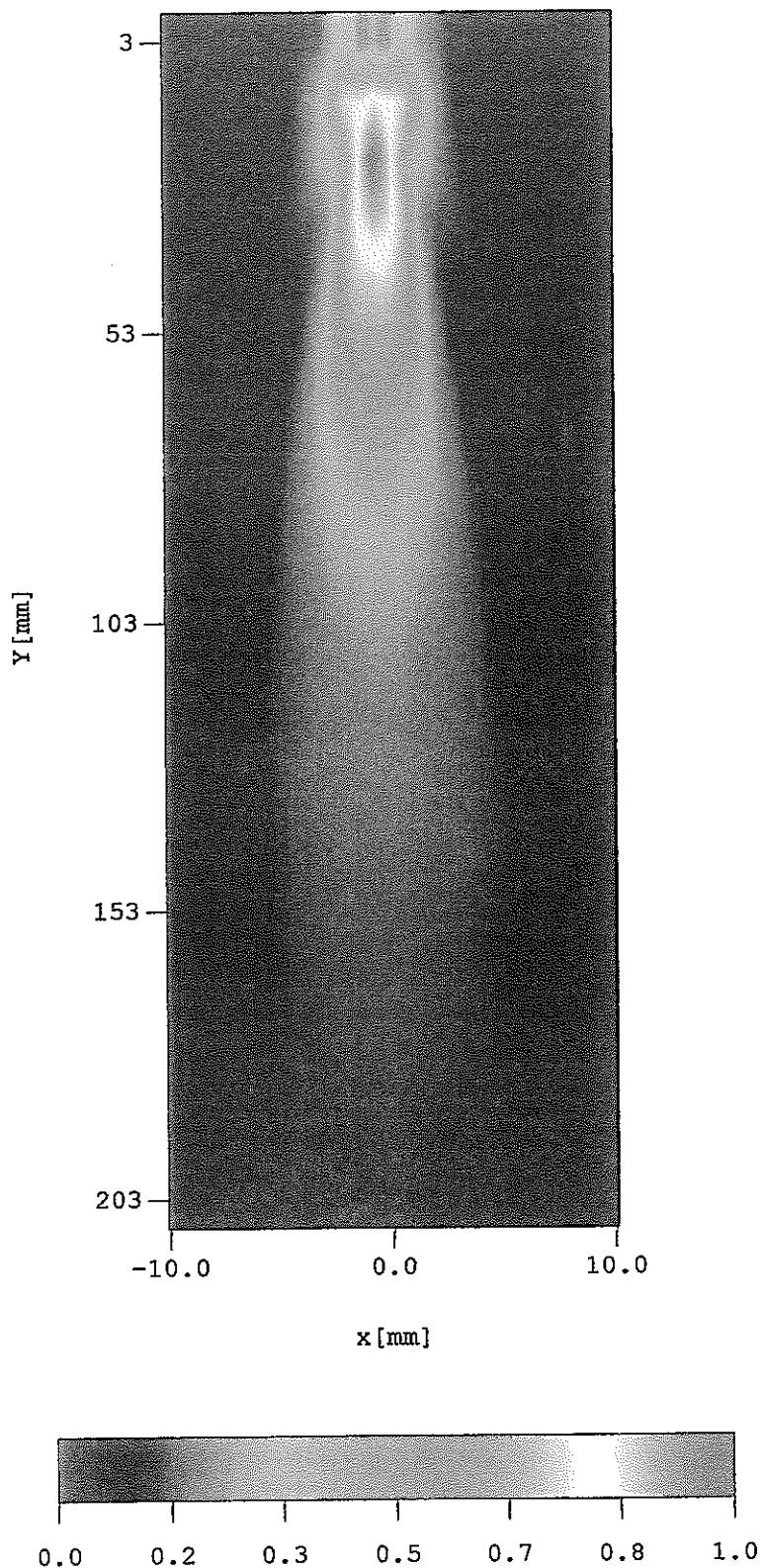


図 5.1(b) 常温 PZT_B のビームプロファイル

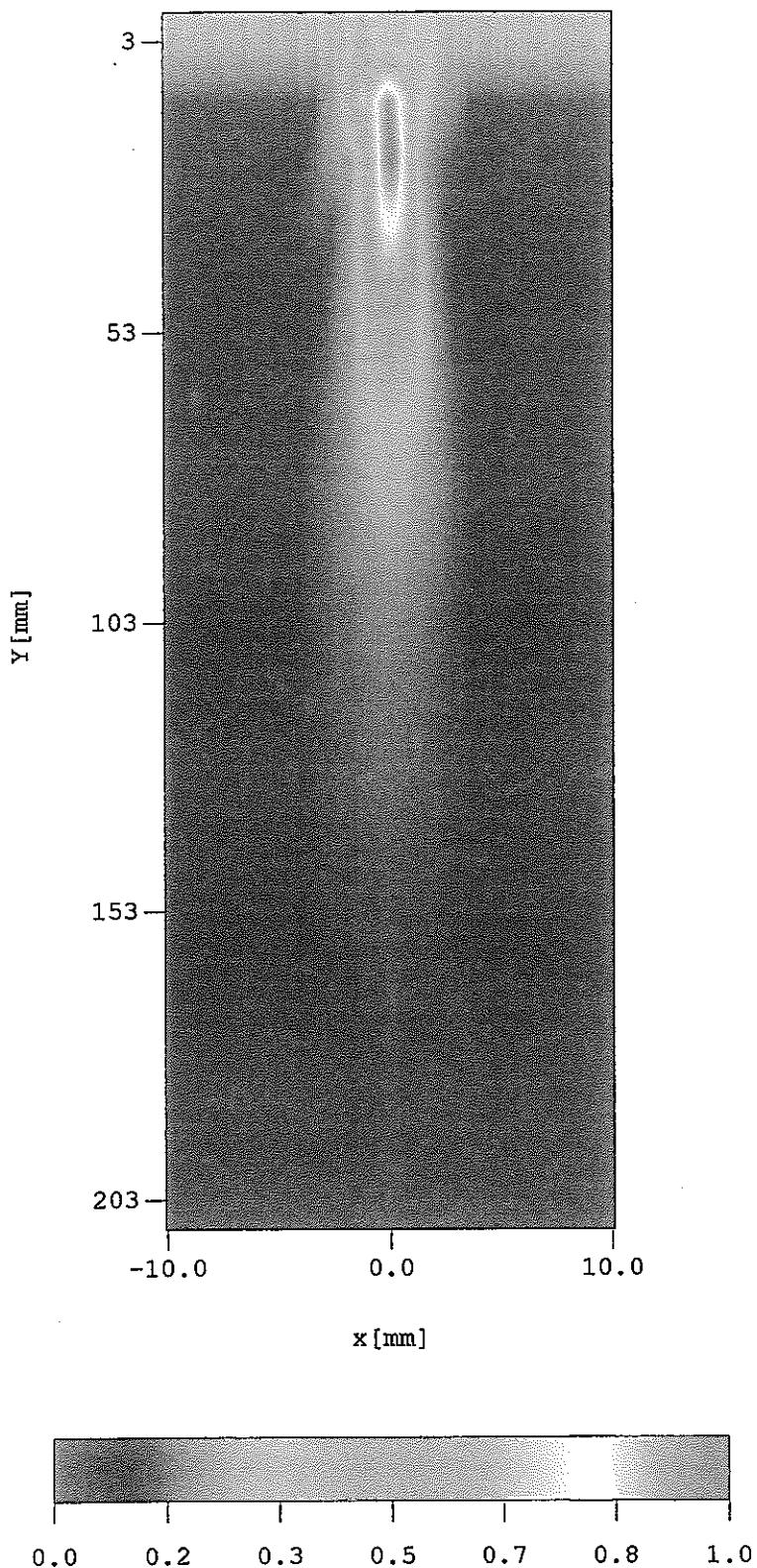


図 5.1(c) 高温 PZT のビームプロファイル

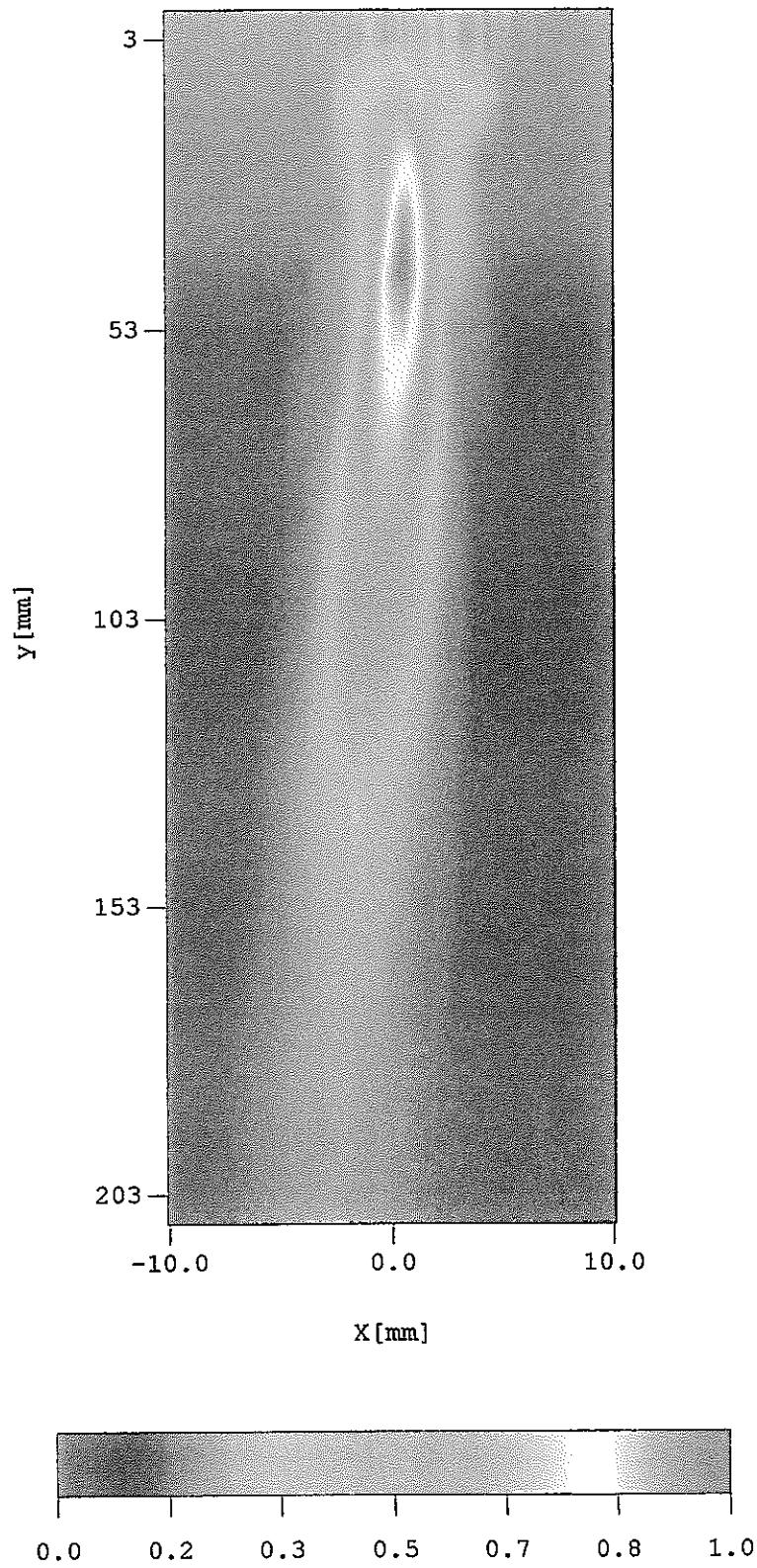
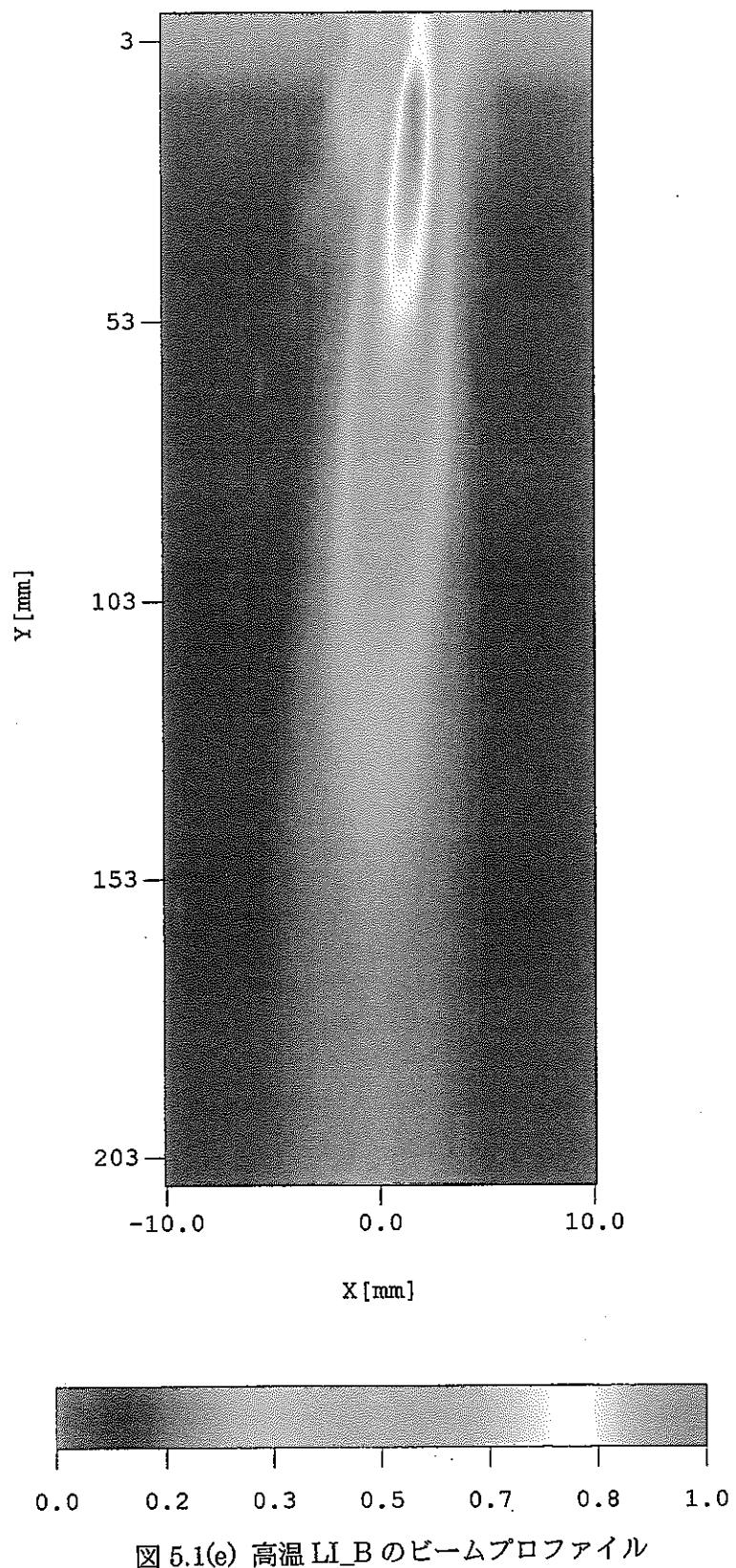


図 5.1(d) 高温 LI_A のビームプロファイル



電圧

(200mV/div)

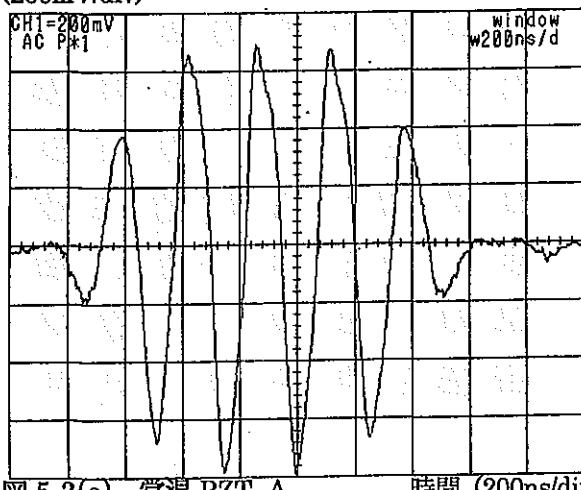


図 5.3(a) 常温 PZT_A

の RF 波形

電圧

(500mV/div)

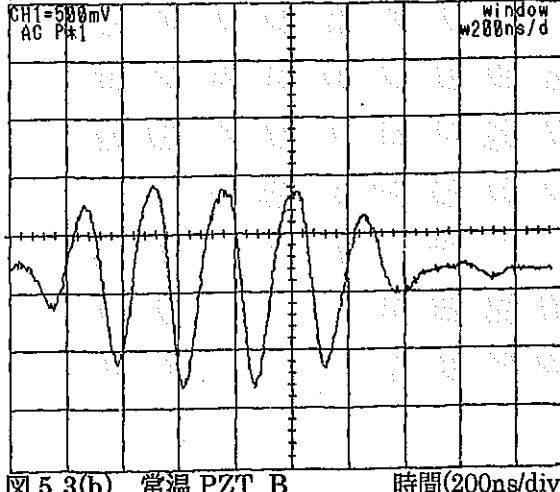


図 5.3(b) 常温 PZT_B

の RF 波形

電圧

(200mV/div)

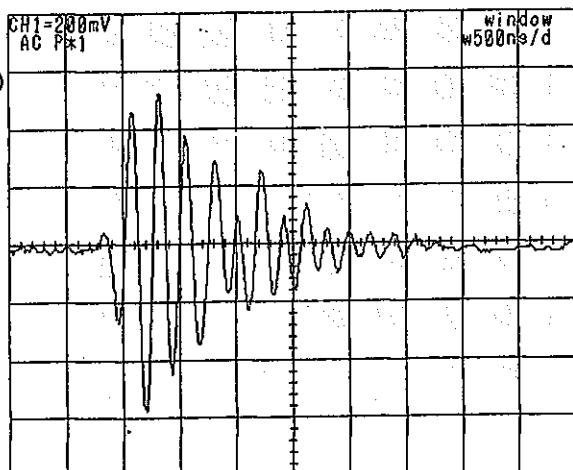


図 5.3(c) 高温 PZT

の RF 波形

電圧

(200mV/div)

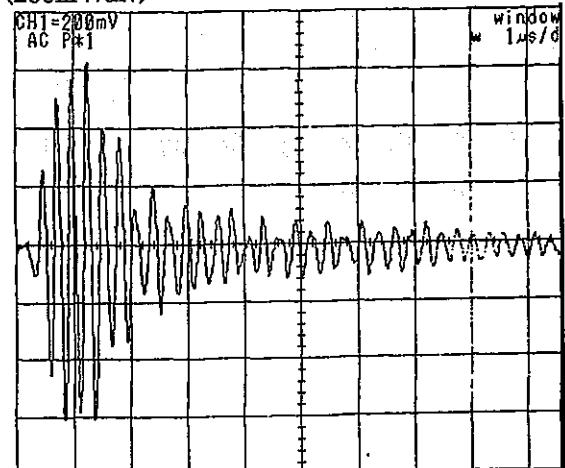


図 5.3(d) 高温 LI_A

の RF 波形

電圧

(200mV/div)

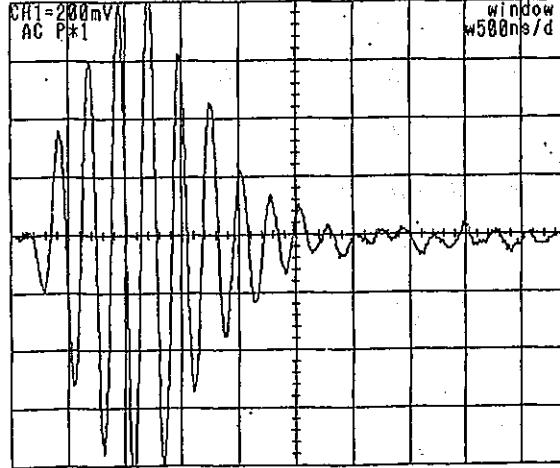


図 5.3(e) 高温 LI_B

の RF 波形

10dB/div (ATT 10dB)



図 5.4(a) 常温 PZT_A の RF 周波数分布
(START 1MHz STOP 6MHz)

10dB/div (ATT 10dB)

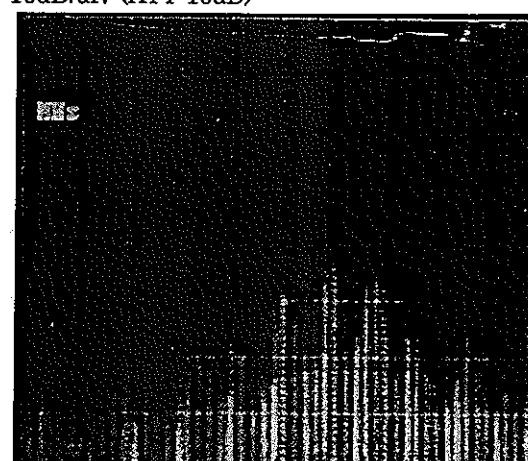


図 5.4(b) 常温 PZT_B の RF 周波数分布
(START 1MHz STOP 6MHz)

10dB/div
(ATT 10dB)

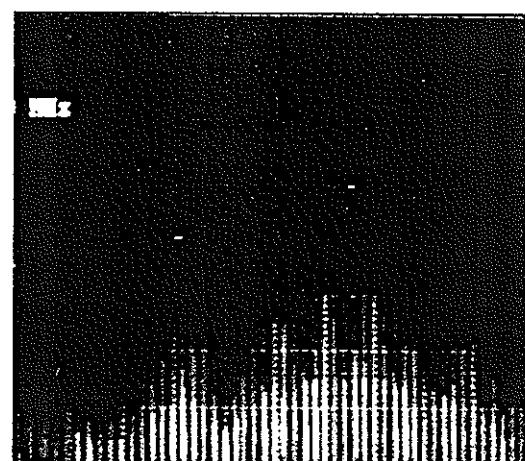


図 5.4(c) 高温 PZT の RF 周波数分布
(START 1MHz STOP 6MHz)

10dB/div
(ATT 10dB)

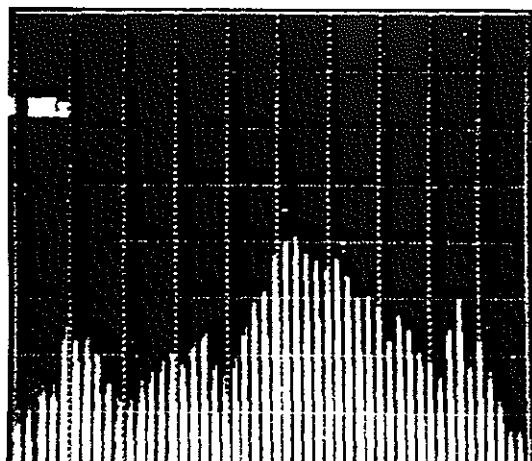


図 5.4(d) 高温 LI_A の RF 周波数分布
(START 1MHz STOP 6MHz)

10dB/div
(ATT 10dB)

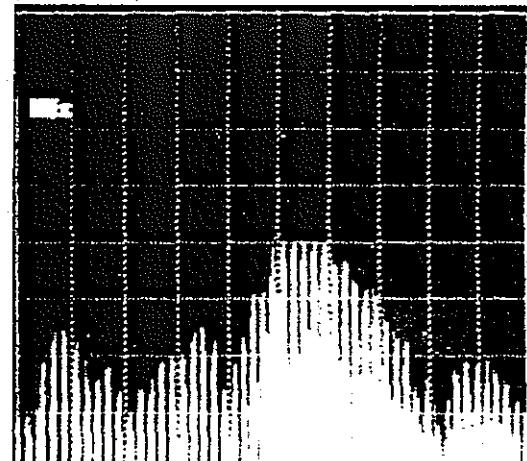


図 5.4(e) 高温 LI_B の RF 周波数分布
(START 1MHz STOP 6MHz)

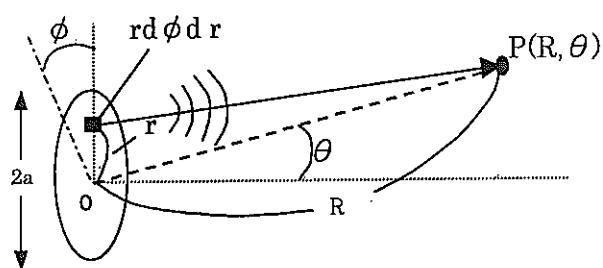


図 6.1.1 理論音圧分布の計算法

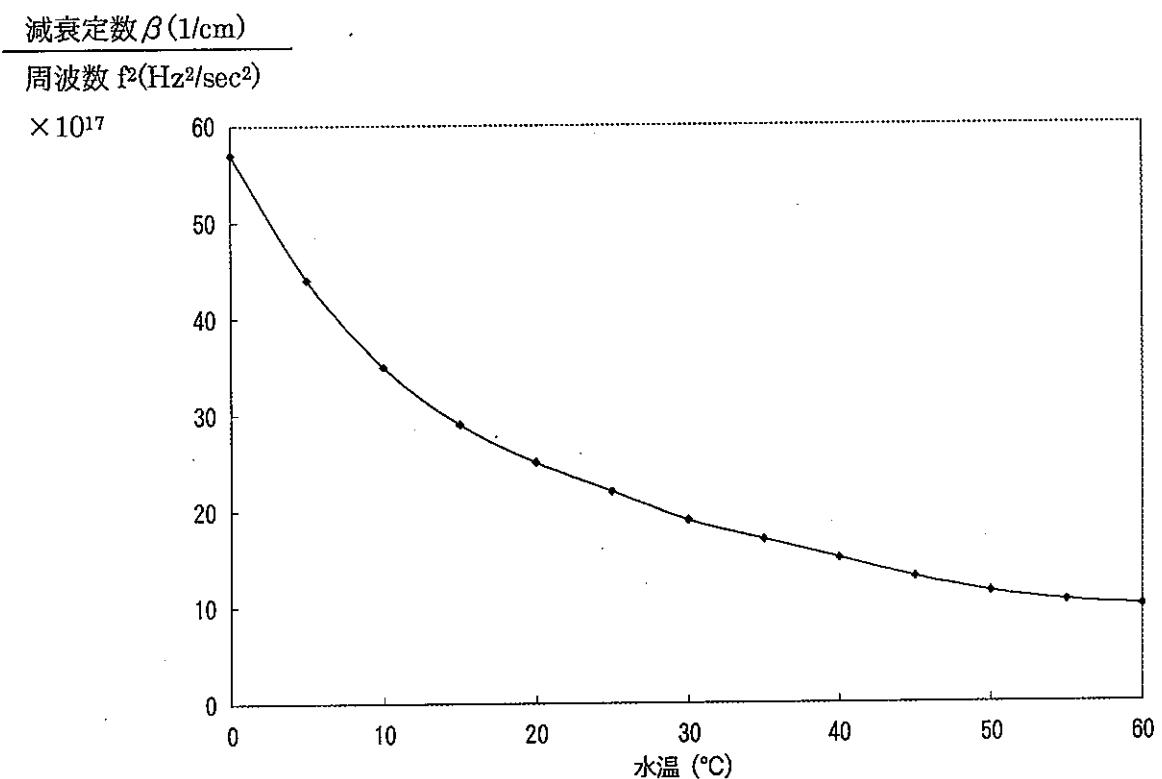


図6.1.2 水中における超音波の減衰定数 β と温度依存性
(Fox & Reck の試験結果³⁾)

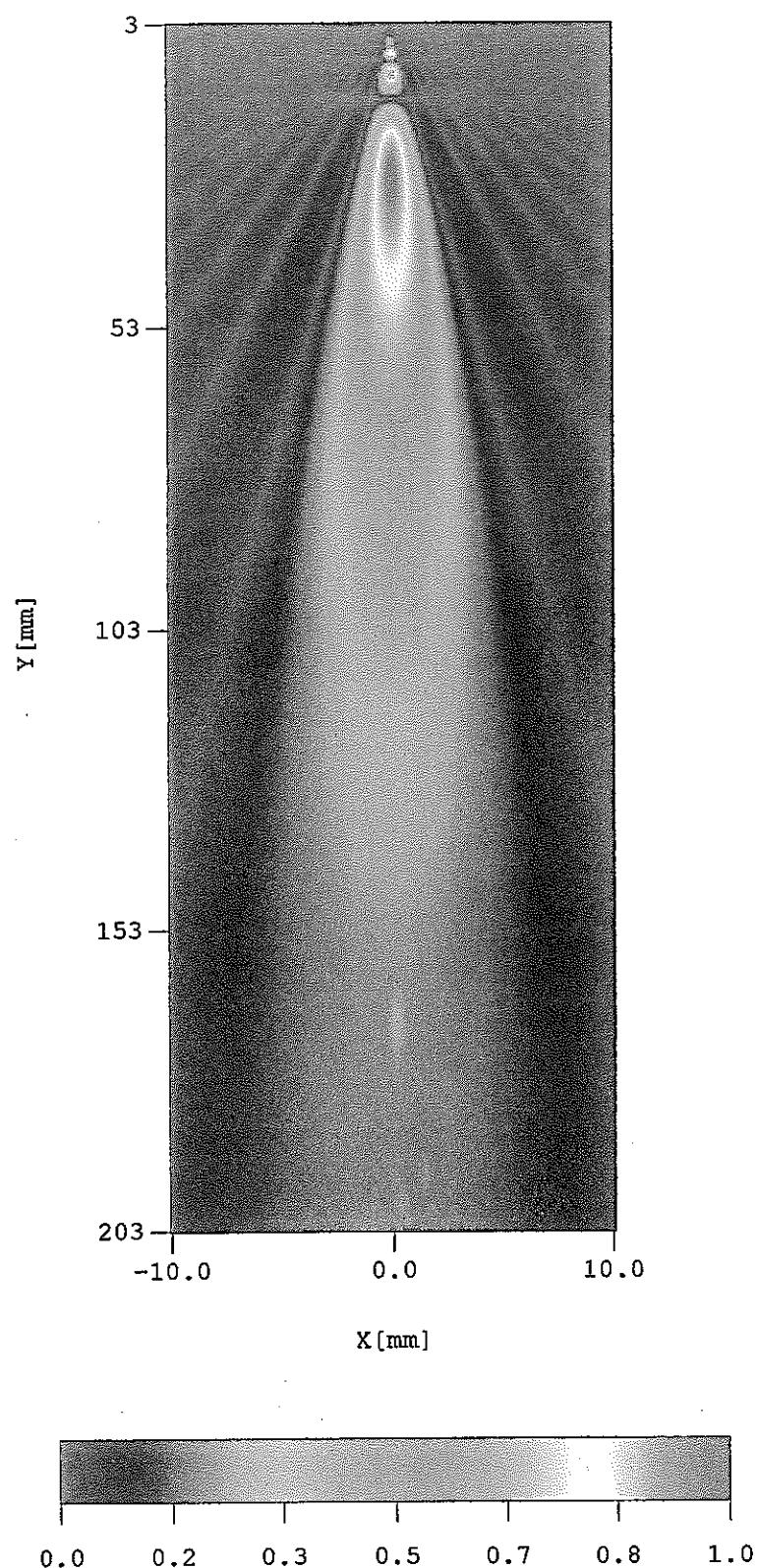


図 6.3.1(a) 常温 PZT_A のビームプロファイル(解析値)

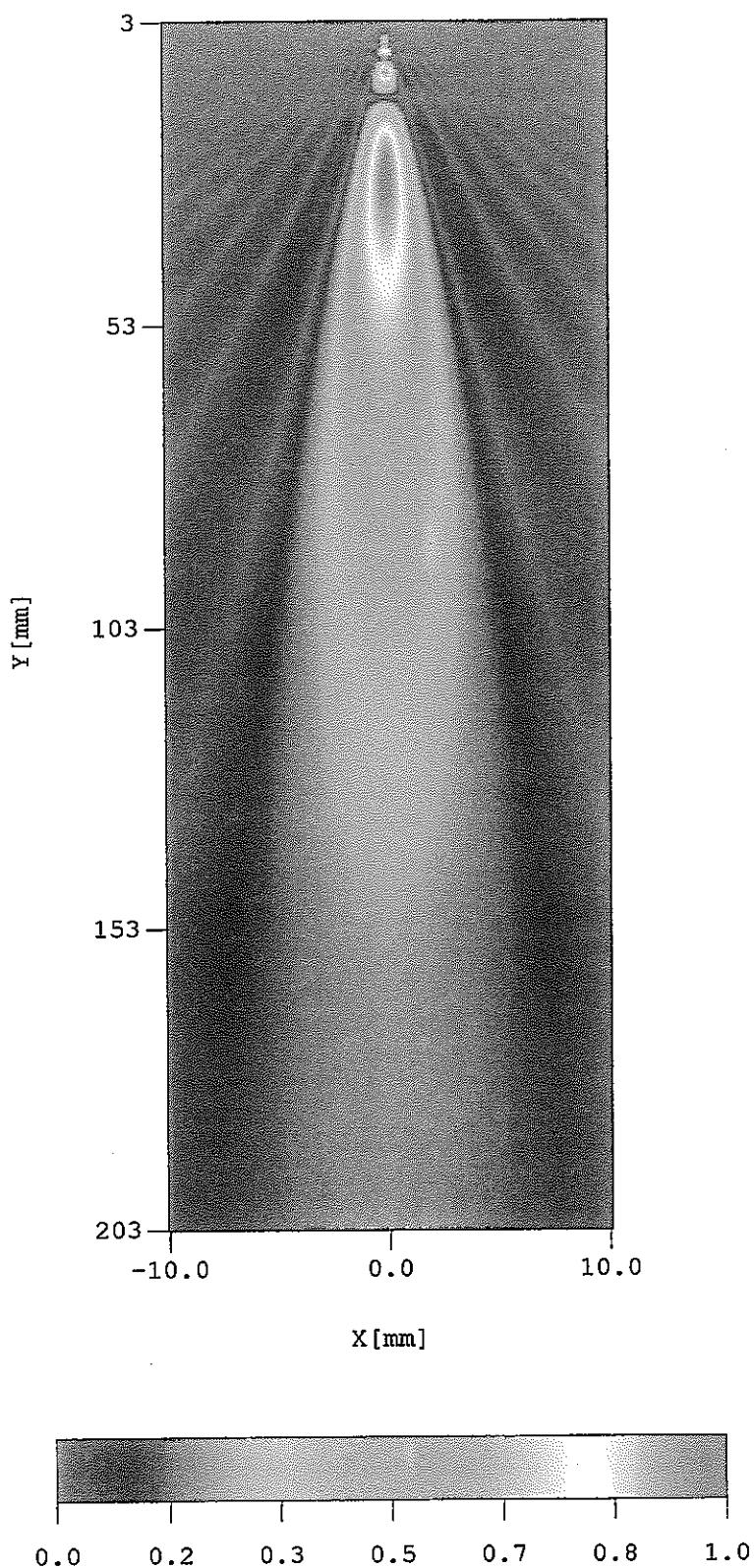


図 6.3.1(b) 常温 PZT_B のビームプロファイル(解析値)

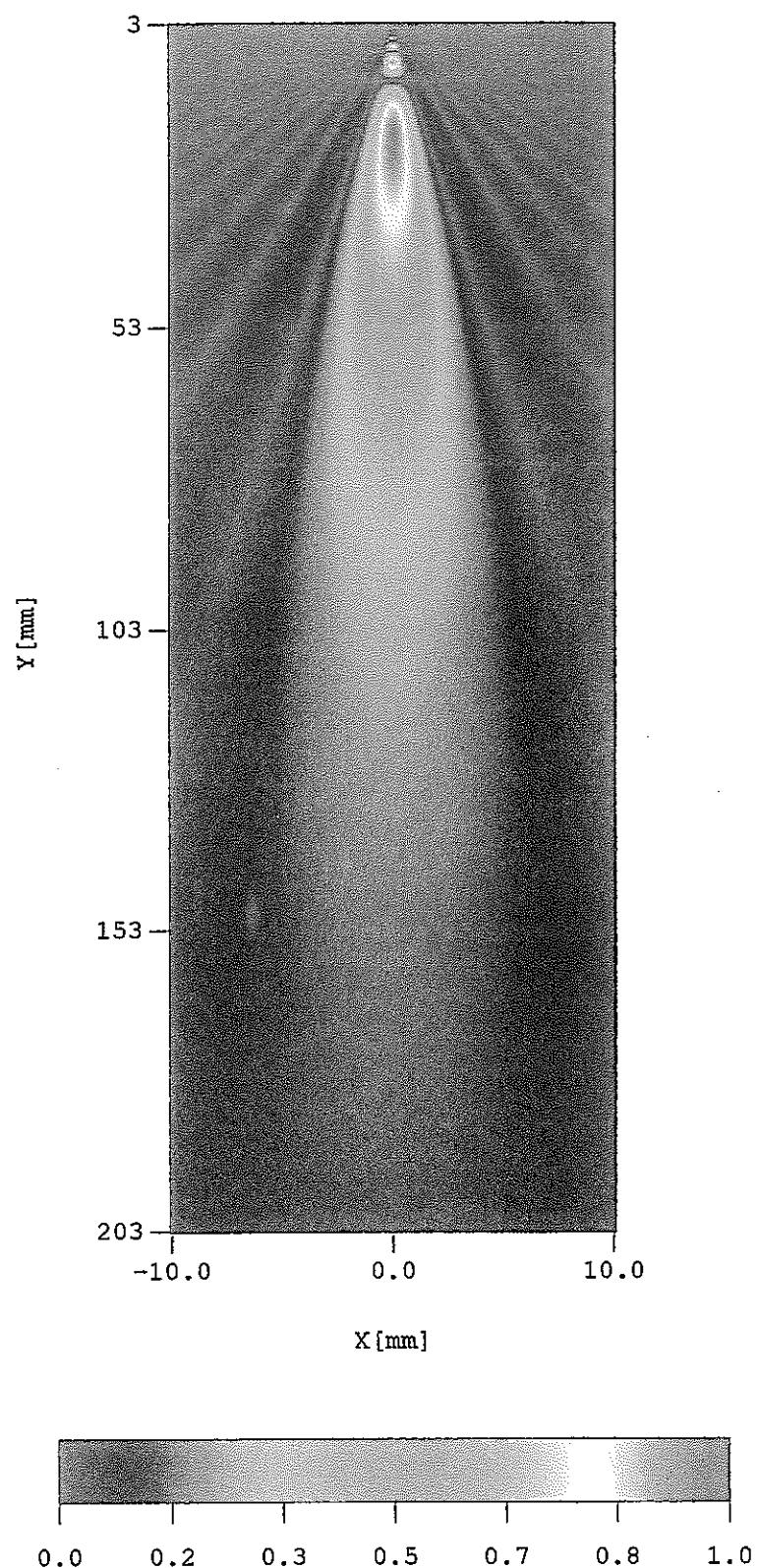


図 6.3.1(c) 高温 PZT のビームプロファイル(解析値)

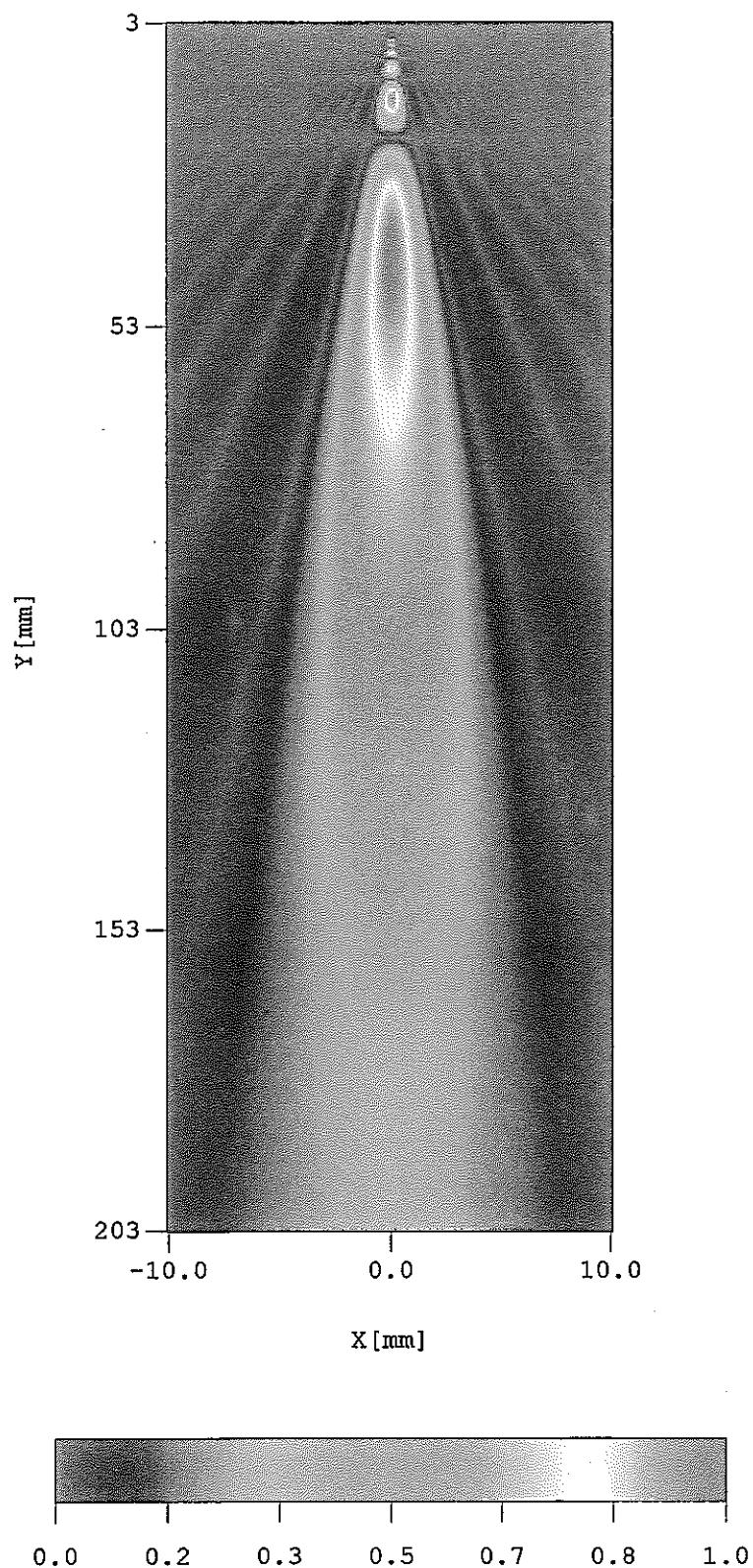


図 6.3.1(d) 高温 LI_A のビームプロファイル(解析値)

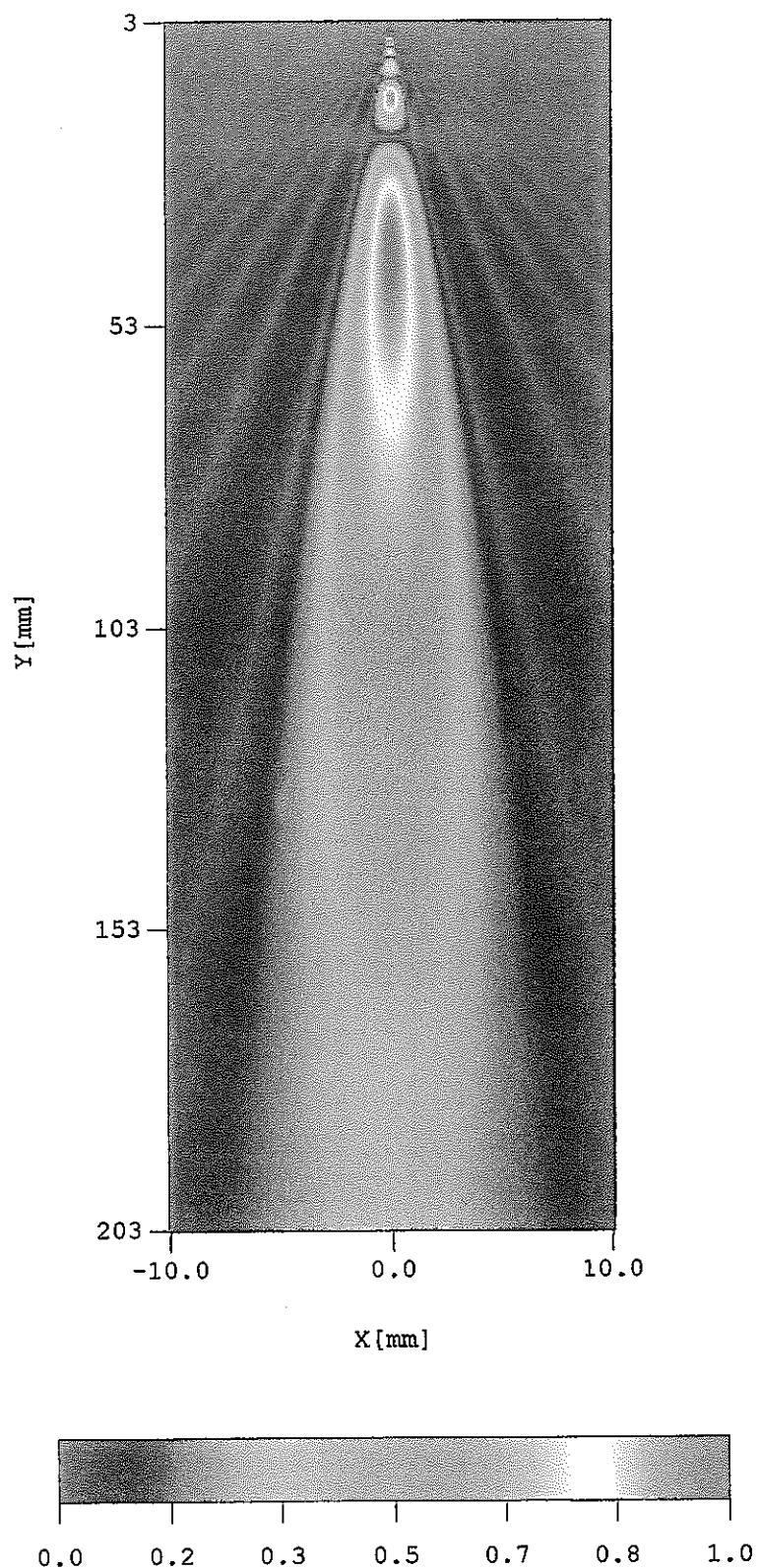


図 6.3.1(e) 高温 LI_B のビームプロファイル(解析値)

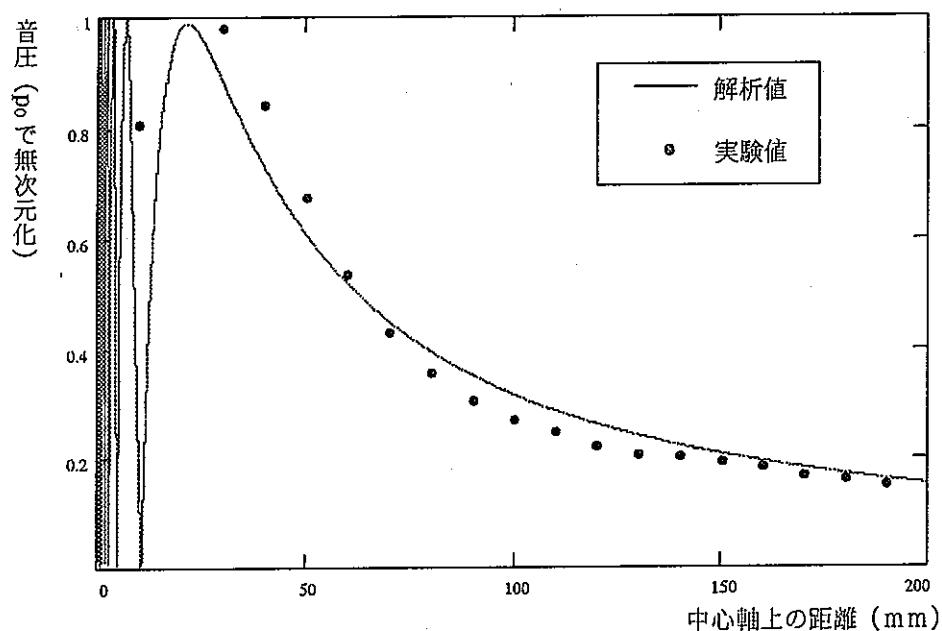


図 6.3.2(a) 中心軸上の音圧分布の解析値と実験値 (常温 PZT_A)

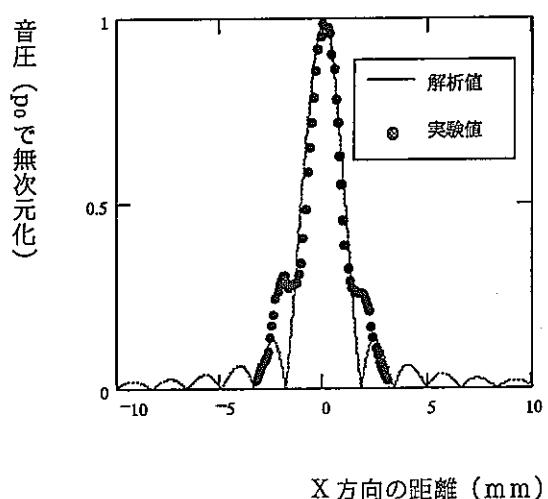


図 6.3.2(b) 中心軸 23mm における X 方向の音圧分布の解析値と実験値 (常温 PZT_A)

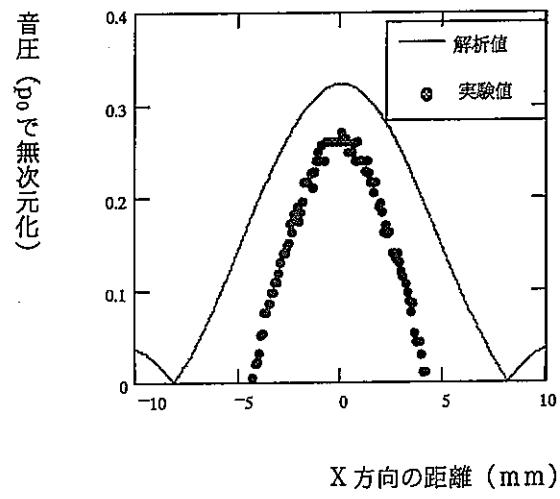


図 6.3.2(c) 中心軸 103mm における X 方向の音圧分布の解析値と実験値 (常温 PZT_A)

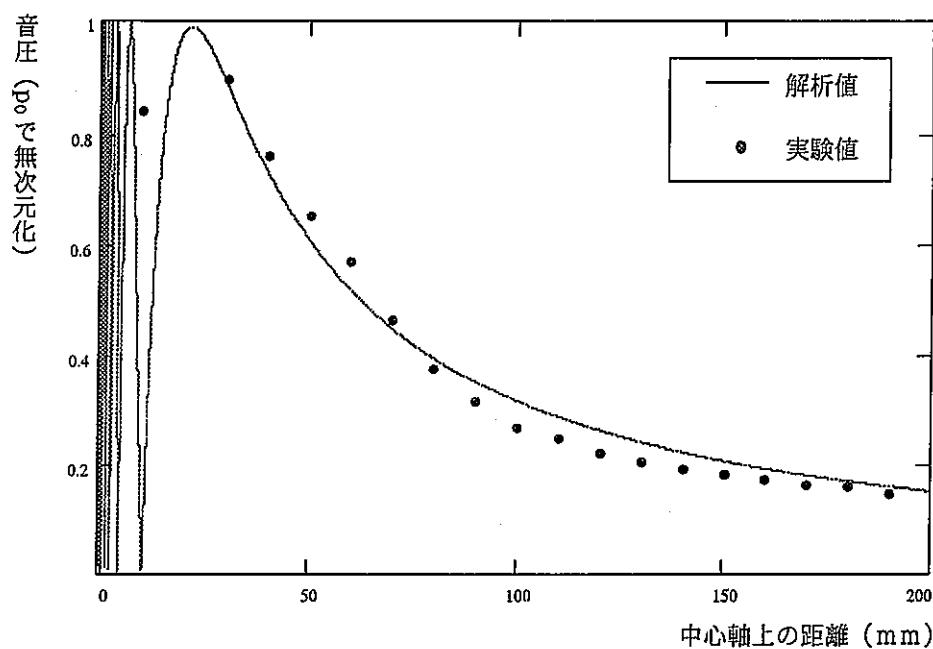


図 6.3.3(a) 中心軸上の音圧分布の解析値と実験値 (常温 PZT_B)

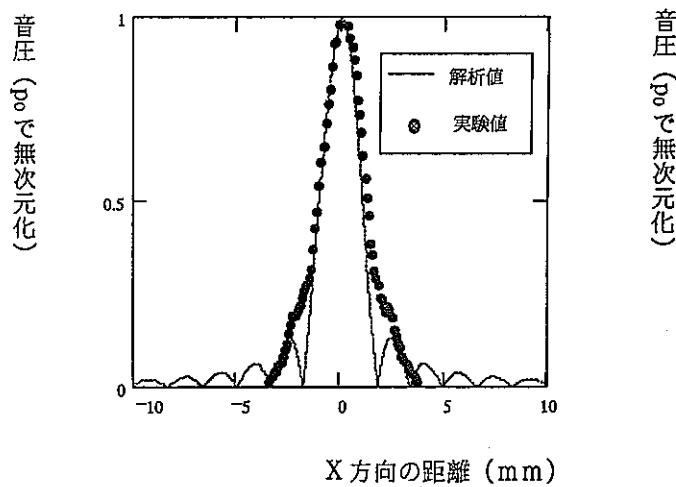


図 6.3.3(b) 中心軸 23mm における X 方向の音圧分布の解析値と実験値 (常温 PZT_B)

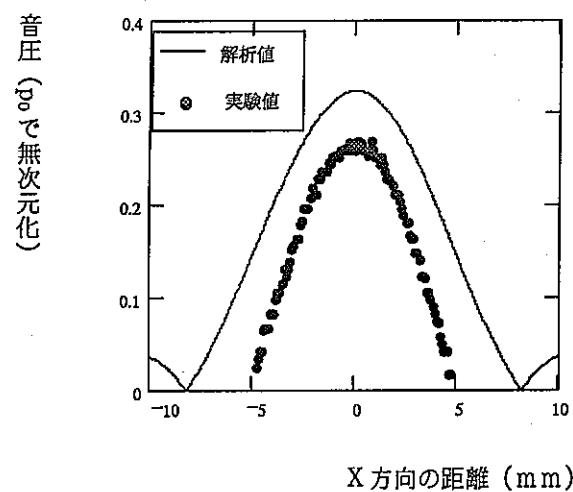


図 6.3.3(c) 中心軸 103mm における X 方向の音圧分布の解析値と実験値 (常温 PZT_B)

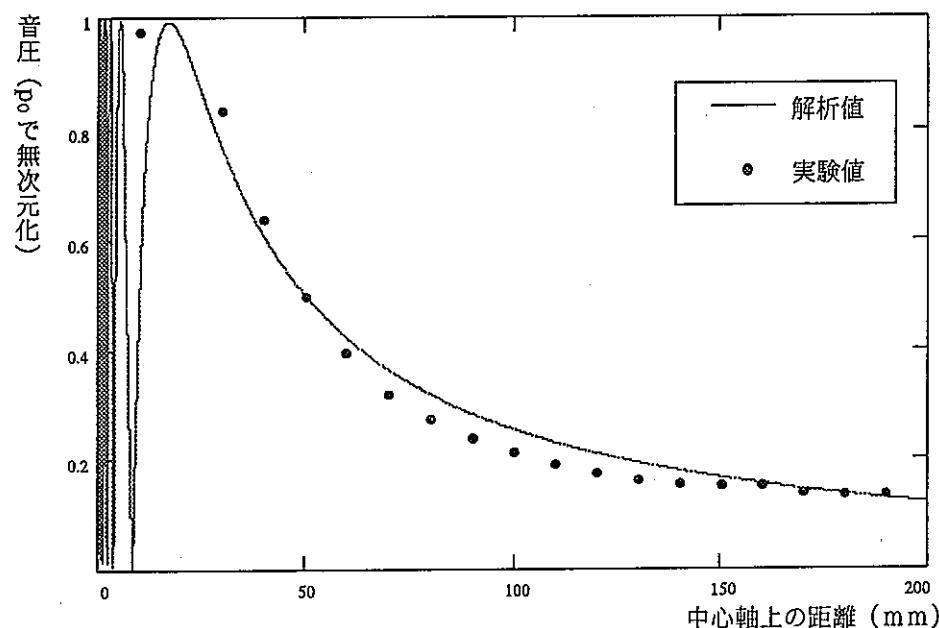


図 6.3.4(a) 中心軸上の音圧分布の解析値と実験値(高温 PZT)

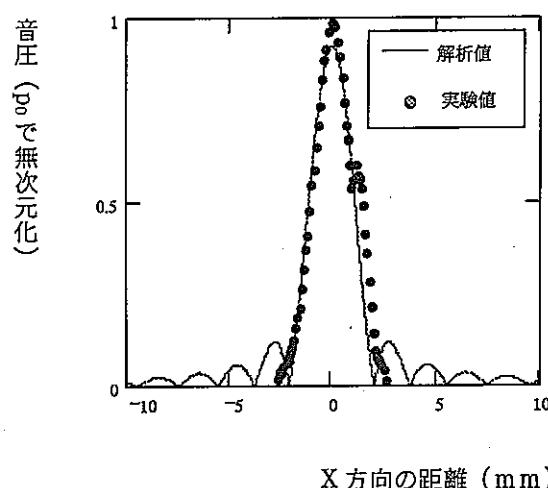


図 6.3.4(b) 中心軸 23mm における X 方向の音圧分布の解析値と実験値(高温 PZT)

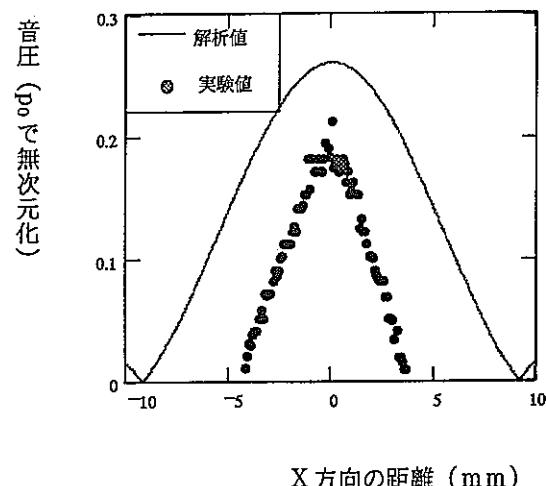


図 6.3.4(c) 中心軸 103mm における X 方向の音圧分布の解析値と実験値(高温 PZT)

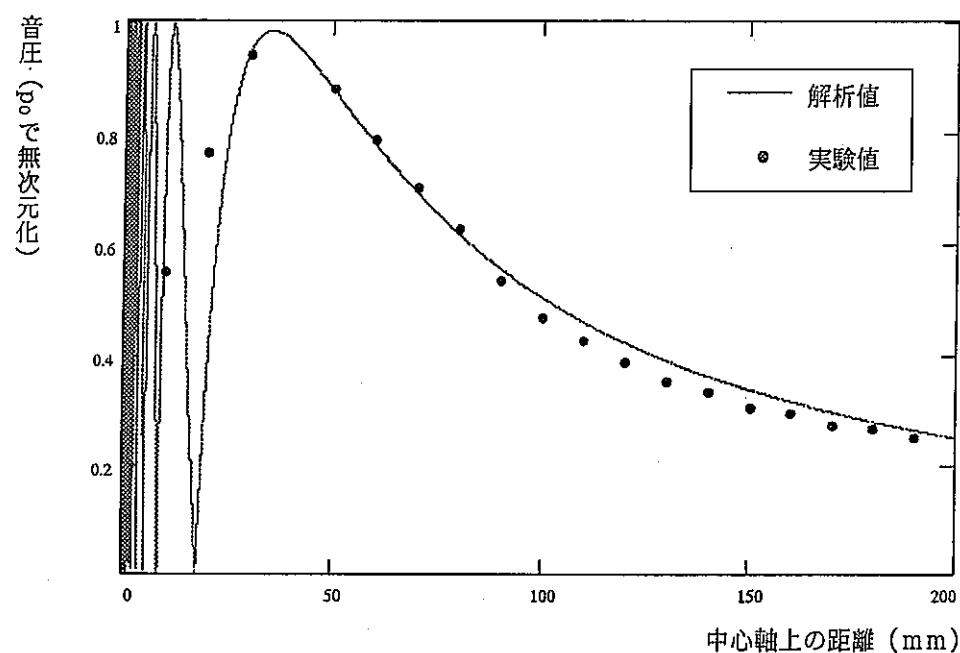


図 6.3.5(a) 中心軸上の音圧分布の解析値と実験値(高温 LI_A)

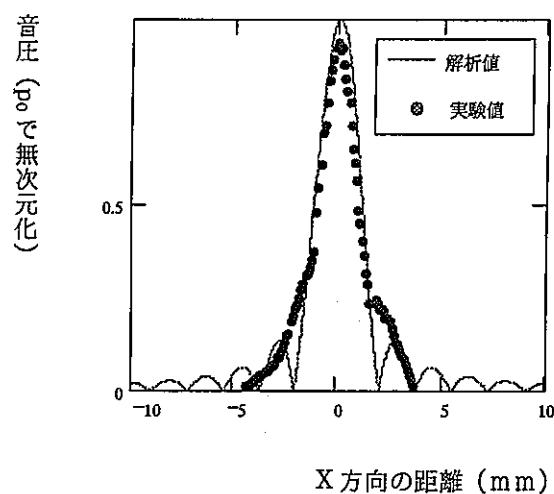


図 6.3.5(b) 中心軸 33mm における X 方向の音圧分布の解析値と実験値 (高温 LI_A)

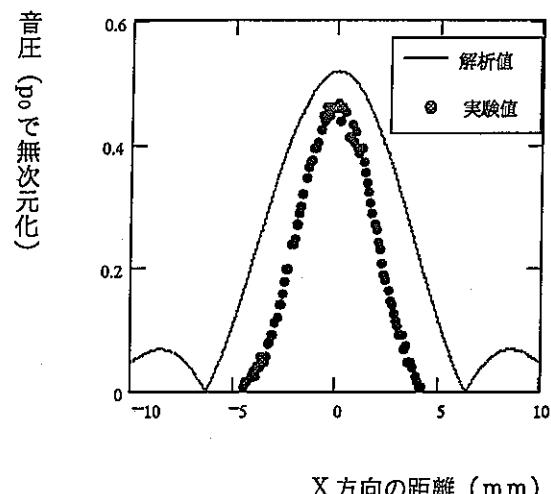


図 6.3.5(c) 中心軸 103mm における X 方向の音圧分布の解析値と実験値 (高温 LI_A)

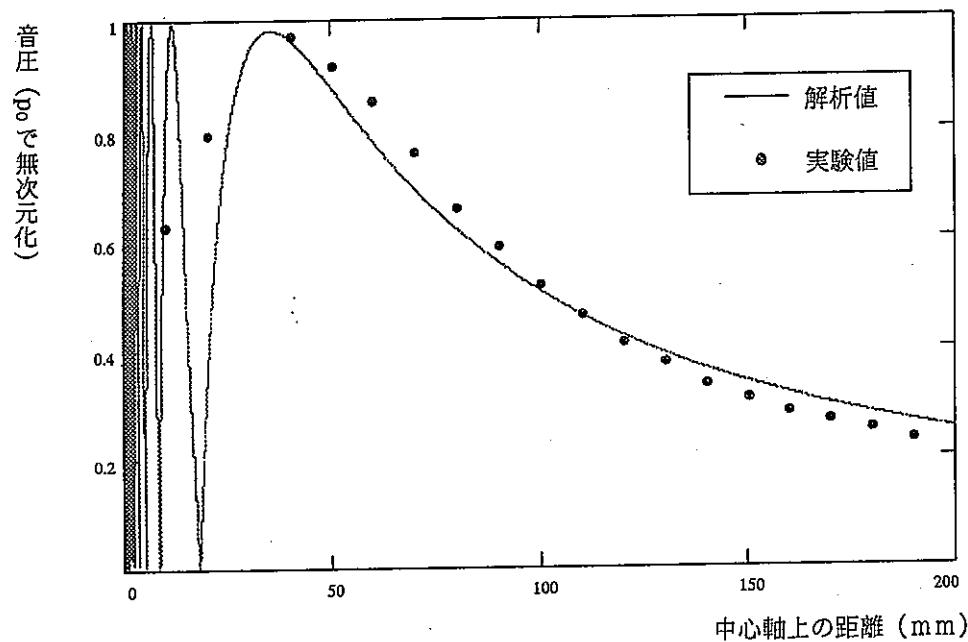


図 6.3.6(a) 中心軸上の音圧分布の解析値と実験値(高温 LI_B)

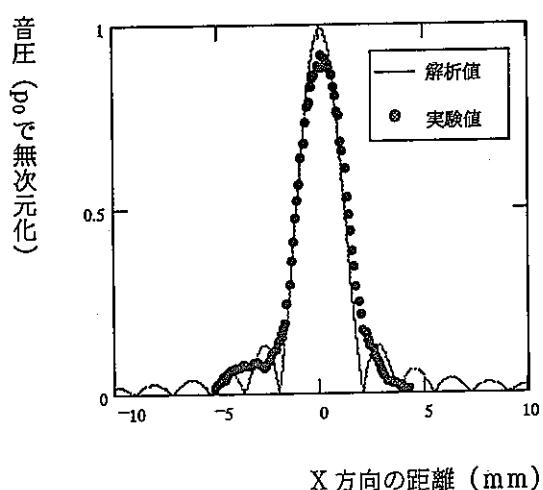


図 6.3.6(b) 中心軸 33mm における X 方向の音圧分布の解析値と実験値 (高温 LI_B)

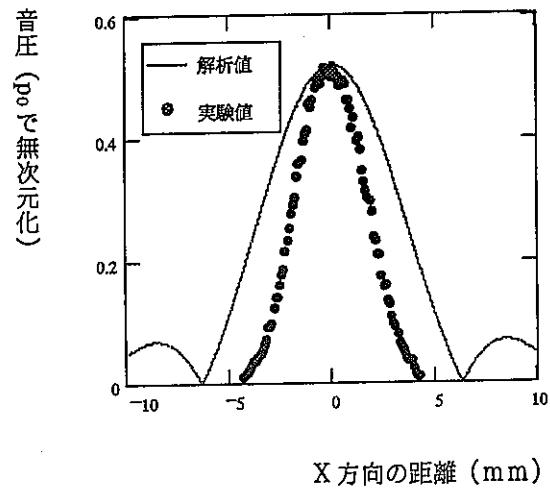


図 6.3.6(c) 中心軸 103mm における X 方向の音圧分布の解析値と実験値 (高温 LI_B)