

信性能を評価する。PZT トランスデューサーは A309S-SU 69008 を用いてトランスデューサーの発振面から 3.0cm 離れた水中で水深 2 cm 程度に超音波伝搬路を設定する。超音波受信強度としては音圧ではな

くプローブの受信波形の波高値  $V_{pp}$  を受信強度とした。スルー送信でのパルサーレーバ装置の設定条件はスルー法、1KHz、 $1\mu J$ 、 $50\Omega$ 、1KHz、100MHz、0dB、54dB、 $180^\circ$  である。

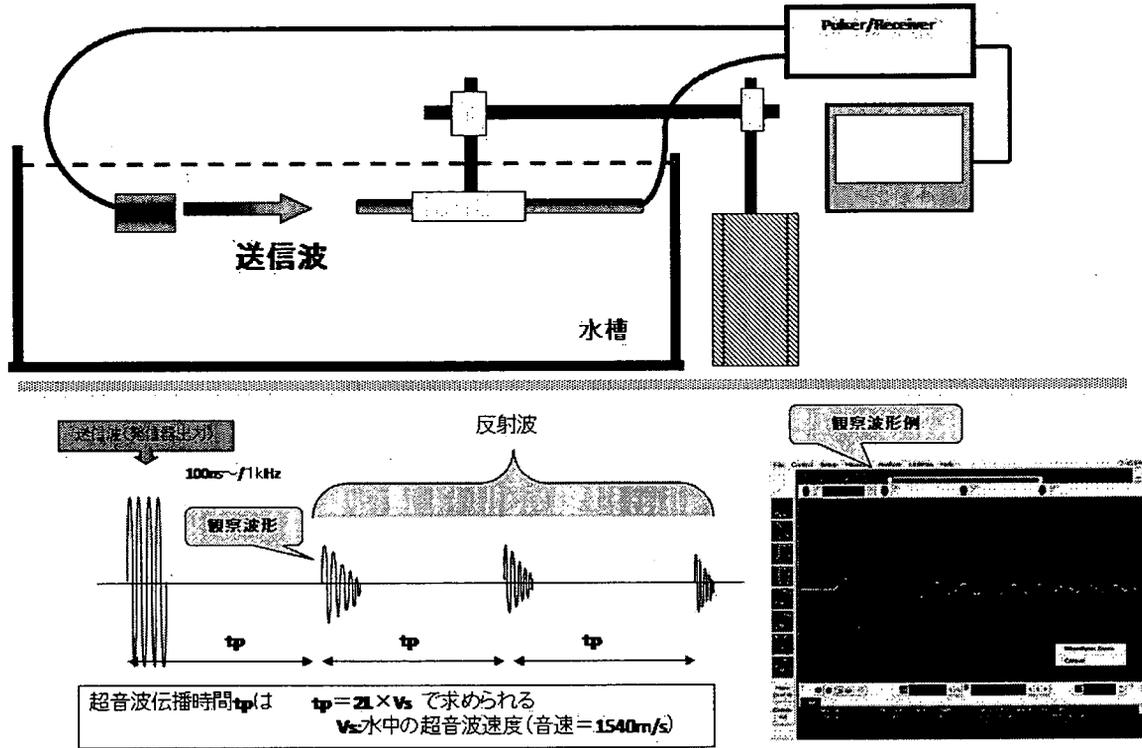
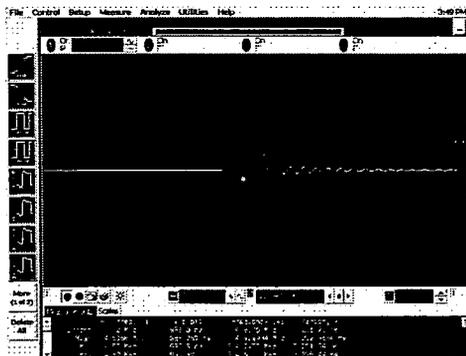


図8 スルー法による超音波観察波形方法

送信側のトランスデューサーのパルスエコー法の波形

使用したトランスデューサー、  
 A309S-SU 5.0/0.5 No.69008



周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 4. 93MHz  
 Peak F 4. 52MHz -6dB High F6. 8MHz -6dB Low F 1. 1MHz Center F 3. 95MHz -6dB Band Width 144%

**④LCR メータによる特性評価**

プローブの超音波パルスエコー法評価において、ほぼ同一条件の設定で製作されたプローブでも、共振周波数や受信感度、反射波形にかなりの差があることがわかった。この原因調査法の一つとして市販の LCR (L : インダクタンス、C : キャパシタンス、R : 抵抗) メータを使ってプローブのインピーダンス測定を行った。今回使用した測定機器は、LCR メータはアディレントテクノロジー社 E4980A、測定用アクセサリ (プローブの BNC コネクタとの接続用治具) に関しては、専用アクセサリに直結して BNC コネクタまでの距離は 10cm とした治具 (アダプタと呼ぶことにする) を使用した。較正は、アダプタだけ取り付けた状態で、オープンおよび、50Ω ショートでの項目測定を行い、プローブ測定値との比較において無視できるレベルの測定項目と注意レベルの項目に分けてプローブ測定結果を考慮した。LCR メータの測定原理に関しては簡単に以下に示した。LCR メータでは各周波数でのインピーダンスを測定し指定された等価回路にてそのときの素子パラメータに換算した測定値を測定器

に表示する。

すなわちインピーダンス Z は一定の周波数の交流に対しては、回路素子が持つ全抵抗として測定される。

$$Z = R + jX$$

ここで、実数部は抵抗 R、虚数部はリアクタンス X、リアクタンス X は  $X = 2 \pi f L$  である。

また Q 係数 (性能ファクタ) は

$$Q = |X| / R$$

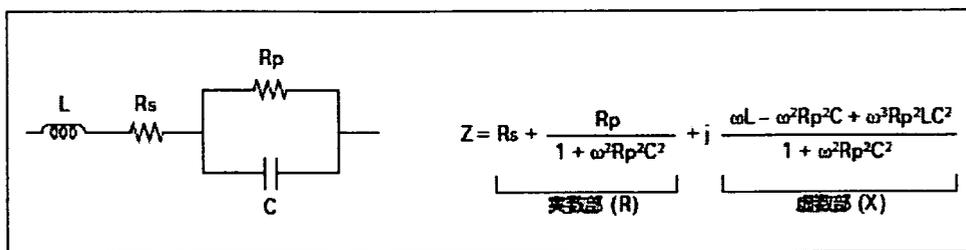
$$Q = 1 / D$$

ここで、D は損失係数 ( $\tan \delta$  との関係あり) である。

またコンダクタンス G は  $G = 1 / R_p$ 、サセプタンス B は  $B = 2 \pi f C$  で表される項目について表示される。

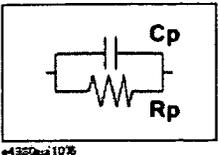
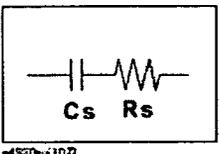
今回のプローブは小容量のキャパシタと考えられるので以下のコンデンサの等価回路

(下図参照) が考えられる。しかし LCR メータでは各回路モードでの等価回路にした場合に換算した  $C_p$ 、 $R_p$ 、 $C_s$ 、 $R_s$  が表示されるので、測定は測定ファンクションを選択しながら行った。



コンデンサの等価回路

直列/並列回路モード

回路モード	測定ファンクション	D, Q, Gの定義
<p>Cp モード</p>  <p>4352nj 1076</p>	<p>Cp-D Cp-Q Cp-G Cp-Rp</p>	$D = \frac{1}{2\pi f C_p R_p} = \frac{1}{Q}$ $G = \frac{1}{R_p}$
<p>Cs モード</p>  <p>4352nj 1077</p>	<p>Cs-D Cs-Q Cs-Rs</p>	$D = 2\pi f C_s R_s = \frac{1}{Q}$

### ⑤同軸ケーブル経由の外来ノイズ

超音響計測において、超音波プローブへの入力信号が微弱な場合のプローブのノイズレベルの大きさの影響は問題となる場合が多い。圧電センサー自身が発生するノイズと外来からのノイズの両方が問題となるが、今回はまず外来ノイズについて、とくに同軸ケーブルに侵入するノイズを調査した。実験は、汎用の同軸ケーブルを使い、その長さを変えることで長さの影響を調査した。両端 BNC コネクタが付いているケーブルの一方は FET アンプにつなぎ他方は開放又は 50Ω 短絡として、同軸ケーブルが高周波アンテナとして働く様子を観察するため、FET アンプの出力をオシロスコープにつなぎ、軟骨厚さに対応した 1 μ sec から 10 μ sec と焦電性が問題となる 100 μ sec から 10 msec の範囲でノイズ電圧の Vpp を測定した。

### ⑥焦電特性の評価

本研究で使用している圧電素子は図 5 に示した通り、圧電性のほかに焦熱にかかわる焦電性がある。検討しているプローブの焦電性が出力信号に影響を与えるかどうか、また測

定の障害になる場合はその防止方法についての検討を行う。

（参考）焦電性は振動子に過渡的な温度変化が加わると、その大きさに比例して素子内部の自発分極の値が変わり電極に取り残された過剰電荷が電極間に挿入された負荷抵抗を通して電流が流れ、負荷抵抗両端の出力電圧をセンサーの出力電圧として測定される。これが焦電電圧として観測される。

具体的にはプローブの焦電性の評価を以下の方法で行なった。

#### i) 黒体炉の赤外線放射による熱検知効果観測

- ①光チョッパー法
- ②光チョッパー法（極低速評価）
- ③マニュアルにより 1 回のみの赤外線 ON-OFF 照射

#### ii) 液相での温度急変による焦電性の観測

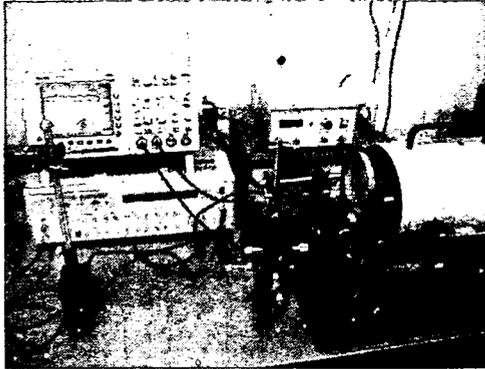
#### i) 黒体炉の赤外線放射による熱検知効果観測

焦電性は黒体放射の炉温度の波長依存性が無いとのことから、黒体炉の温度は焦電性が観測しやすい温度とした。すなわち炉温度が低い場合、過渡温度変化量を大きくできない

ため焦電出力が小さく、Lock-in アンプを通して測定してもノイズの影響が出るためである。また低周波ノイズの影響もあり測定系に十分注意しなければならない。非常に困難な実験系であったためである。またセンサー

表面と黒体炉の間隔を変えることで出力の大きさ  $V_{pp}$  は変わるが、今回一定値での相对比较を実施した。評価に用いたのは P(VdF/TrFE)センサー部の裸サンプルとプローブである。

### 全体の装置写真



黒体炉・・・GRASEBY INFRARED 563  
黒体炉温度コントローラ・・・GRASEBY  
INFRARED Model IR-201  
Light Chopper・・・NF Electronics Instruments  
Model 5584  
Lock-in Amp・・・NF Electronics Instruments  
Model 5610B  
オシロスコープ・・・Tektronix TDS3054B

### Lock-in Amp の条件設定

なお測定での Lock-in Amp の設定は以下の条件で行った。

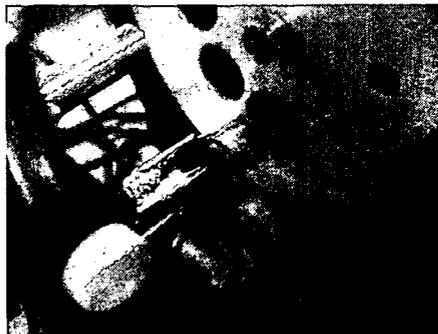
Frequency; 10Hz～ REF; EXT2、  
Sensitivity;  $10\mu\text{V}$  Filter; LPF

### P(VdF/TrFE)フィルムセンサー部裸サンプル 取付け状況

裸サンプルではアクリルパイプに組みつけられた素子からのリードと Lock-in アンプまでの同軸ケーブルの間での静電シールドが

十分でないため特に外部からのノイズの影響が強く、ケーブルの振動だけでも大きく変化することから、焦電電圧出力  $V_{pp}$  が大きく影響が少ない低回転の光チョッパー回転数から測定を始めた。

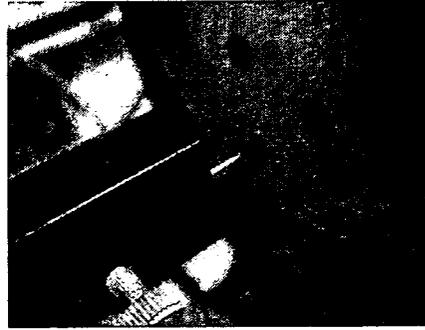
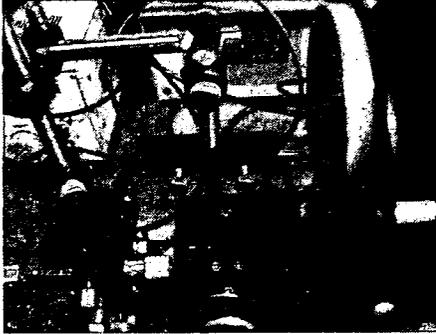
また黒体炉の温度はノイズの影響から S/N 比がとれないため、評価では黒体炉温度を  $800^{\circ}\text{C}$  として測定した。裸サンプルのセンサー表面の位置は黒体炉表面より 7cm に設定した。(以下写真)



### ストレートプローブの取り付け状況

ストレートプローブでは耐ノイズ性もよく、安定した測定が出来たので、黒体炉温

度は500°Cとした。またセンサー表面と黒体炉表面の間隔は10cmとした。



ii) 液相での温度急変による焦電性の観測  
プローブの焦電特性を評価する方法として、赤外線等（黒体炉）による気相でのP(VdF/TrFE)フィルムセンサーの感熱特性を調べる焦電性実験とともに、液相中にプローブ先端を浸漬する方法でセンサーの感熱特性を調べる焦電性実験を行い、この評価方法が有効かを調べることを目的に以下の実験方法をとった。

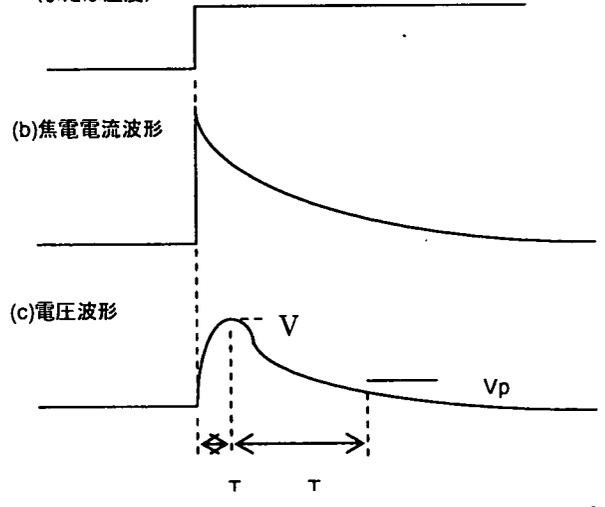
焦電性を調査する方法としては、プローブを室温から温水または氷水に浸漬し急加熱または急冷却によりP(VdF/TrFE)フィルムセンサー内に温度勾配を生じさせる方法を採用した。

この温度勾配により発生するセンサーフィルム両電極間につながるケーブル端子間に、オシロスコープの入力インピーダンス1MΩを挿入しその両端電圧をオシロスコープで

DC 観察した。

測定としてはそのピーク電圧  $V_p$  と  $V_p$  までに到達する時間  $T_p$ 、また  $V_p$  に達した後、熱平衡状態に至るまでの時間のうち、電圧が  $V_p$  の  $1/e$  となるところまでの時間を  $T_e$  として測定した。

(a) 入力赤外線  
(または温度)



### [3] ヒトサンプルを対象にした計測

人工関節置換術の際に入手可能なヒト骨軟骨プラグを対象とした計測を行なった。[2] 実用的プローブの検討で使用している試作プローブを用いて計測し、骨の影響を受けず

に力学特性の計測のための光音響信号が検出可能か、実際に得られた力学特性を病理切片と比較検討した。この際、励起光源は[1] 励起光源の最適化で決定したレーザーを用いた。

（倫理面への配慮）

東海大学では臨床研究審査委員会並びに医  
の倫理委員会を設けており、厳格な審査の上  
に臨床研究を行っている。厚生労働省が定め  
た「臨床研究に関する倫理指針」および「ヒ  
トゲノム・遺伝子解析研究に関する倫理指  
針」を遵守し、研究対象者に対してのインフ  
ォームドコンセント、患者の権利、守秘義務、  
プライバシーの保護に十分に留意している。  
本研究内容に関しては平成17年から臨床  
研究審査委員会の承認の下、東海大学におい  
てヒトサンプルを用いた臨床研究を実施し  
ている。また、動物実験においては、東海大

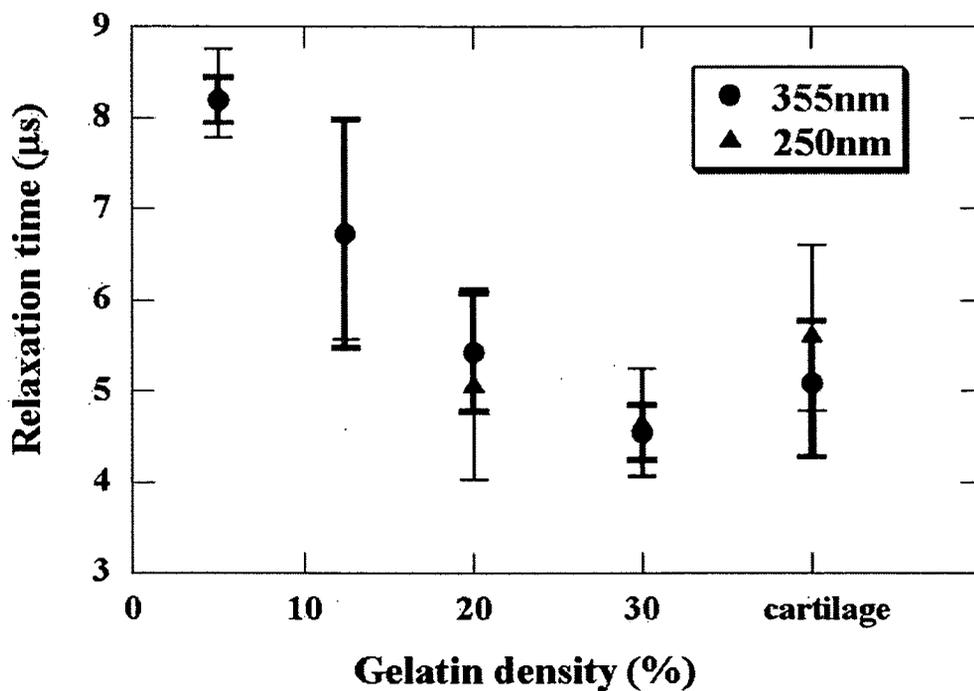
学動物実験委員会並びに防衛医科大学校動  
物実験施設主催の動物実験講習会に本プロ  
ジェクトの動物実験担当研究員は全員受講  
し、動物実験に関する理念：3Rの原則を理  
解し、「動物の愛護及び管理に関する法律」、  
「実験動物の飼育及び保育並びに苦痛の軽  
減に関する基準」、「研究機関等における動物  
実験等の実施に関する基本指針」並びに「動  
物実験の適正な実施に向けたガイドライン」  
を遵守し、動物愛護の精神に基づいた十分な  
配慮がなされている。

### C. 研究結果

#### [1] 励起光源の最適化

濃度を変化させたゼラチンと摘出軟骨を対象に計測した結果を下のグラフに示す。グラフの縦軸は、光音響信号の減衰時間に相当するパラメータである。ここで、減衰時間とは、光音響信号の最大強度から最大強度の  $1/e$  になるまでの時間のことである。研究目的の項図 2 に記載されている音波の減衰時間と同義である。また、同じく研究目的の図 3 内

の光音響法で測定した力学特性 ( $\mu s$ ) と同じパラメータである。得られたパラメータはゼラチンの濃度の変化に伴い変化した。これは、ゼラチンの濃度変化に伴って変化した力学特性を反映したデータが得られていることを示している。また、摘出軟骨の測定結果は、2 波長ではほぼ一致した。図のエラーバーは、標準偏差値である ( $n>5$ )。



ゼラチンと摘出軟骨を対象にした光音響法の測定結果。励起波長（レーザーの波長）が 250nm の場合と 355nm の場合を比較してグラフに示している。

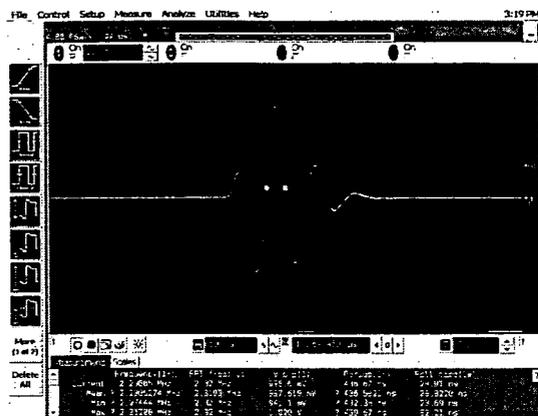
## [2] 実用的プローブの検討

### ①超音波実験系の構築及び動作確認

PZT (セラミック) タイプの市販のトランスデューサーを用いてパルスエコー法 (P/E 法) による超音波周波数特性を測定した結果を以下に示す。

#### トランスデューサー

A306S-SU 2.25/0.5 No.71150、



波形 1

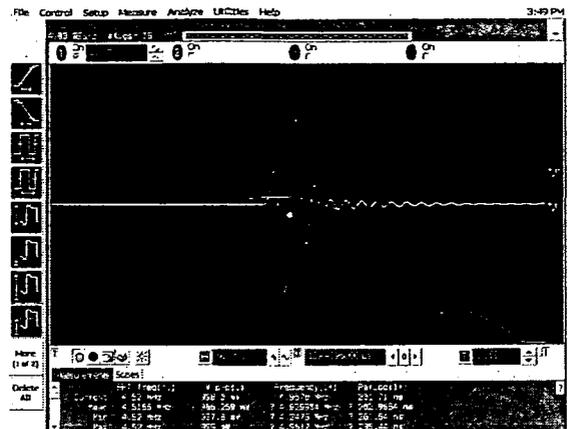
反射波波形・・・200mV/Div. 500nsec/Div.  
 FFT 波形・・・Center5MHz 1MHz/Div  
 周波数特性⇒反射波の周波数自動測定値 2.29MHz  
 FFT Peak F 2.32MHz  
 -6dB High F 3.8MHz -6dB Low F 0.8MHz  
 Center F 2.3MHz  
 -6dB Band Width 130%

今回測定した上記の反射波形 (黄色波形) は位相からも製品説明の波形に類似であり、残響時間も極めて短く良好な波形である。また反射波周波数も 2.29MHz でトランスデューサーの公称周波数の 2.25MHz に近い。

FFT 波形による周波数スペクトル (紫色波形) については-6dB での半値幅が 3MHz(130%)で広帯域になっている。

#### トランスデューサー

A309S-SU 5.0/0.5 No.69008、



波形 2

反射波波形・・・200mV/Div. 200nsec/Div.  
 FFT 波形・・・Center5MHz 1MHz/Div  
 周波数特性⇒反射波の周波数自動測定値 4.93MHz  
 Peak F 4.52MHz  
 -6dB High F 6.8MHz -6dB Low F 1.1MHz  
 Center F 3.95MHz -6dB Band Width 144%

反射波形 (黄色波形) の位相は反転していたが振動子の電極の極性によるもので、測定器での位相を反転 (180度⇒0度) することで他のサンプルと同等に比較することが出来て問題は無い。

反射波形自体に波形崩れなどの大きな問題は無いが残響時間が長い。PZT トランスデューサーでは一般に残響時間が長いのが理由と考えられる。

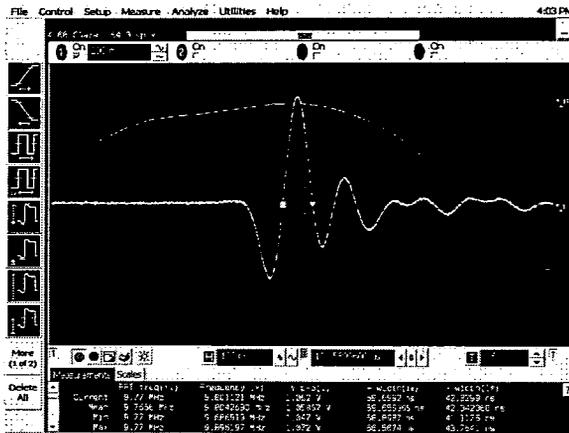
反射波周波数は 4.93MHz でトランスデューサーの公称周波数の 5.0MHz に近い。

FFT 波形による周波数スペクトル (紫色波形) については-6dB での半値幅が 7.7MHz(144%)でやはり広帯域になっているが前期と同じ理由によるものである。

Peak F が 4.52MHz と送信波の周波数からやや低いほうにずれているが、半値幅が広いことによる影響が出ているのではないかと考える。

トランスデューサー

A311S-SU 10/0.5 No.41174 F4”



波形 3

反射波形・・・200mV/Div. 100nsec/Div.  
FFT 波形・・・Center10MHz 2MHz/Div  
周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 9.88MHz  
Peak F 9.76MHz  
-6dB High F 17.5MHz -6dB Low F 0MHz  
Center F 8.8MHz  
-6dB Band Width 198%

上記の反射波形（黄色波形）は残響波形が異形である。これは基本の共振周波数の高調波が重なっているものと思われる。このため残響時間が長い。また反射波の周波数は9.88MHzとトランスデューサーの公称周波数の10MHzにほとんど近い値であった。

FFTによるPeak F（ピーク周波数）は9.76MHzとなっているがFFT波形による周波数スペクトル（紫色波形）が半値幅も広いいため、周波数測定ポイントに差があるものと考えるのが妥当である。これらの測定結果は、繰り返し実験系を組みなおして測定しても変化はなかった。

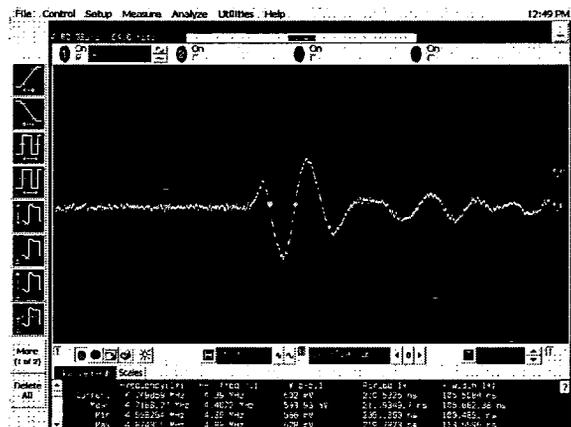
この高調波が重畳されたような波形はトランスデューサーの送信面側が凹面となって超音波をある焦点位置に集中させるタイプのものであることが原因と考えられる。

これを確認するためF4”構造の「A309S-SU 5.0/0.5 No.65702 F4”」をパルスエコー法で測定した結果、同様のFFTスペクトルのパターンを持ち、

また送信面から反射板の距離によってはサイン波形が崩れる（高調波が重畳される）という特徴も類似していた。これよりレンズをもつ振動子は反射板に対して高調波が反射されることによるものでこれら両者だけが持つ特徴と推定される。

②P(VdF/TrFE)プローブのパルスエコー法による評価

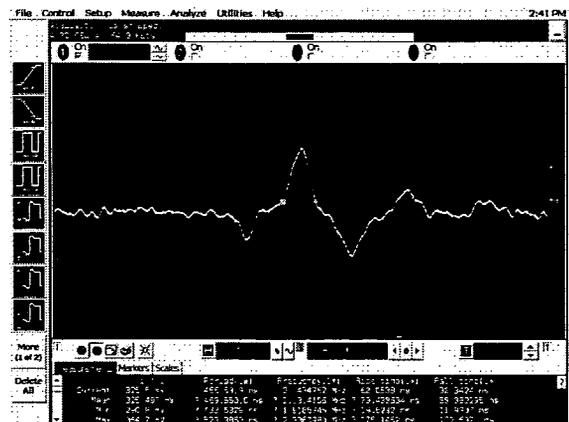
プローブ A 距離 3cm



波形 4

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 4.71MHz  
FFT Peak F 4.40MHz -6dB High F 9.5MHz -6dB Low F 1MHz Center F 5.25MHz  
-6dB Band Width 200

プローブ B 距離 3cm



波形 5

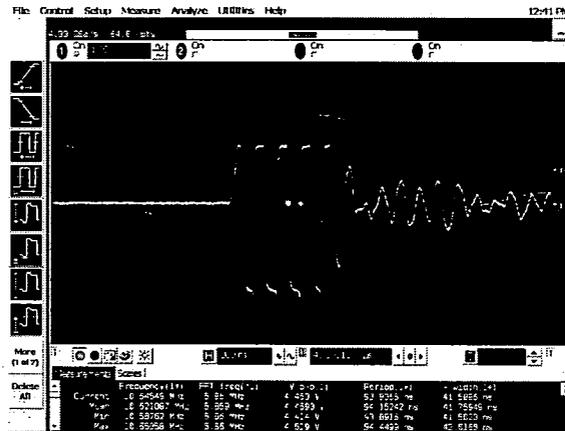
周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 2.38MHz  
FFT Peak F 2.44MHz  
-6dB High F 3.5MHz -6dB Low F 1.0MHz

Center F 1.8MHz -6dB Band Width 139%  
 [2] -6dB High F 7.5MHz -6dB Low F 5.1MHz  
 Center F 6.3MHz -6dB Band Width 38%

プローブ B はフィルムの厚さが厚いため周波数追従が出来ていないようであり、受信波形の波高値(Vpp)が低くサイン波形になっていない。また FFT 波形も多くの周波数成分を含んでいることを示している。

★プローブ B の再測定でも同様の結果である。すなわち反射波形は小さくて SIN 波成分は検出できなかった。

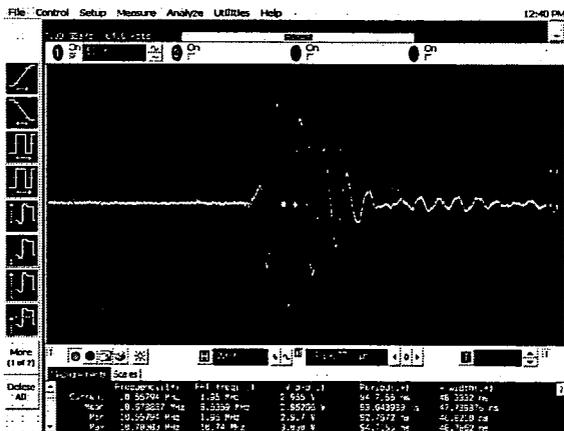
### プローブ C 距離 3cm



### 波形 6

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 10.62MHz  
 FFT Peak F 5.85MHz Vpp 4.459V

波形が上限で飽和していることからパルサーのエネルギーを 16μJ を 1μJ にして、測定したものが次の波形である。

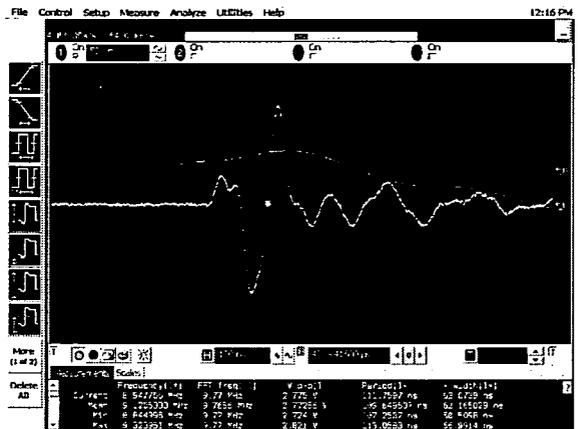


### 波形 7

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 10.67MHz  
 FFT Peak F \*\*\*MHz -6dB High F 19.2MHz  
 -6dB Low F 5.7MHz Center F 12.45MHz  
 -6dB Band Width 108%

プローブ C は超音波出力(受信感度も)が高く、トランスデューサーに印加するエネルギーをパルサー機器の最低の 1μJ にしても上記の反射波形が観測できた。このプローブが今後の実験での基準的なものとして使用した。

### プローブ D 距離 3cm

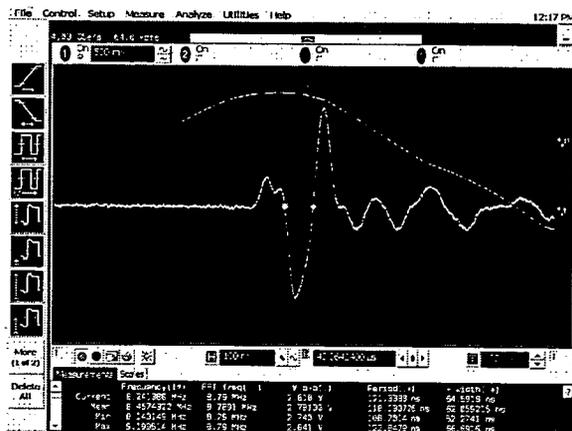


### 波形 8

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 9.12MHz  
 FFT Peak F 9.75MHz  
 -6dB High F >19.5MHz -6dB Low F 0.8MHz  
 Center F >10.65MHz -6dB Band Width \*\*\*%

プローブ D は第一周期目から高調波の影響を受け、さらに残響時間帯の波形にも大きな影響が見られる。

★ FFT の測定条件の下限ゲインを -5dB として再測定したものを次に示す。

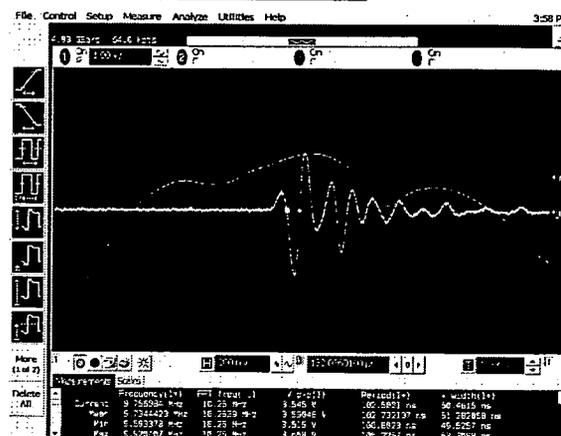


波形 9

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 8.46MHz  
 FFT Peak F 8.78MHz  
 -6dB High F 19MHz -6dB Low F 1.8MHz  
 Center F >10.4MHz -6dB Band Width 165%

以上の4本は光ファイバーケーブル用の  
 穴のないものである。

プローブ B3 距離 10cm

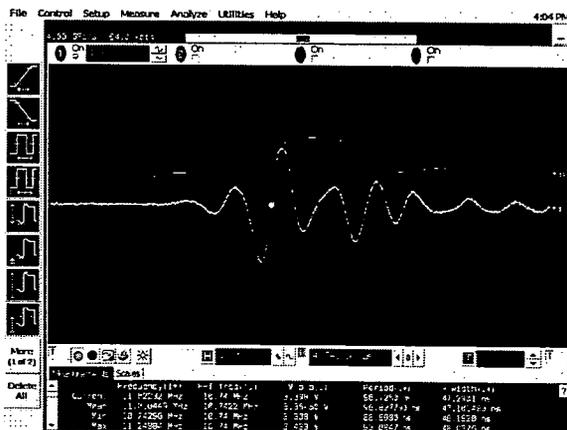


波形 11

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 9.73MHz  
 FFT Peak F 10.25MHz -6dB High F 19.5MHz  
 -6dB Low F 1.8MHz  
 Center F 10.65MHz -6dB Band Width 166%

プローブ B3 は2周期目と3周期目の間に  
 ある-Vpp が縮む波形となっている。これ  
 は3cmでも10cmでも同じで、多くの周  
 波数成分が含まれたFFT波形である

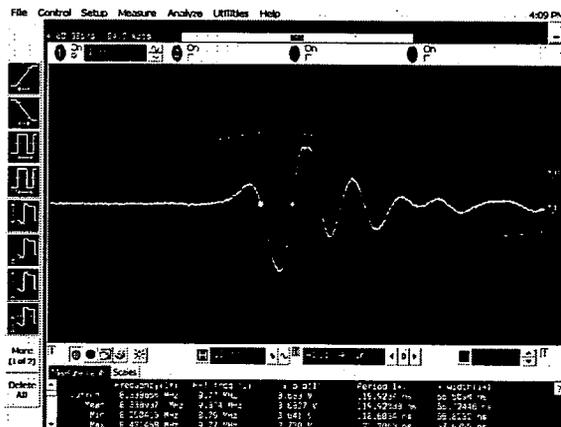
プローブ B3 距離 3cm



波形 10

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 11.01MHz  
 FFT Peak F 10.74MHz  
 -6dB High F 20.0MHz -6dB Low F 1.0MHz  
 Center F 10.5MHz  
 -6dB Band Width 180%

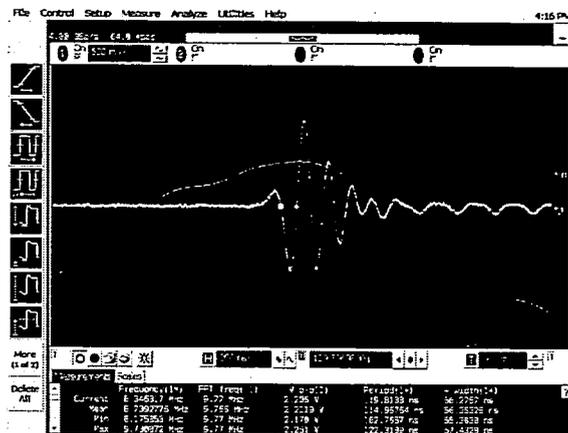
プローブ B4 距離 3cm



波形 12

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 8.33MHz  
 FFT Peak F 9.37MHz -6dB High F 15.5MHz  
 -6dB Low F 0.5MHz Center F 8.0MHz  
 -6dB Band Width 187%

プローブ B4 距離 10cm

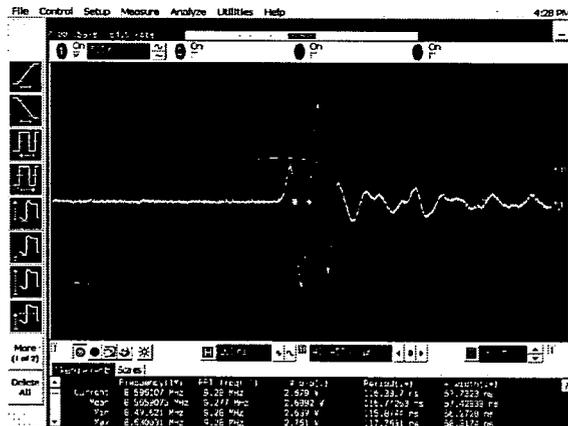


波形 13

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 8.73MHz  
 FFT Peak F 9.76MHz -6dB High F 15.0MHz  
 -6dB Low F 1.8MHz  
 Center F 8.4MHz  
 -6dB Band Width 157%

プローブ B4 は B3 の波形と似ている。波形の残響時間に高調波成分が含まれている。

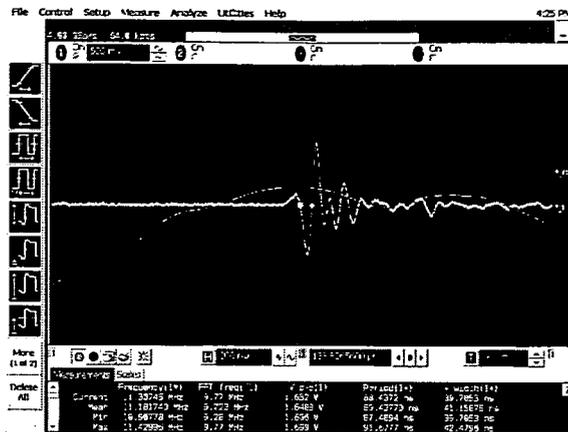
プローブ B5 距離 3cm



波形 14

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 8.56MHz  
 FFT Peak F 9.27MHz -6dB High F (15.0MHz)  
 -6dB Low F 2.4MHz Center F 8.7MHz -6dB Band Width (144%)

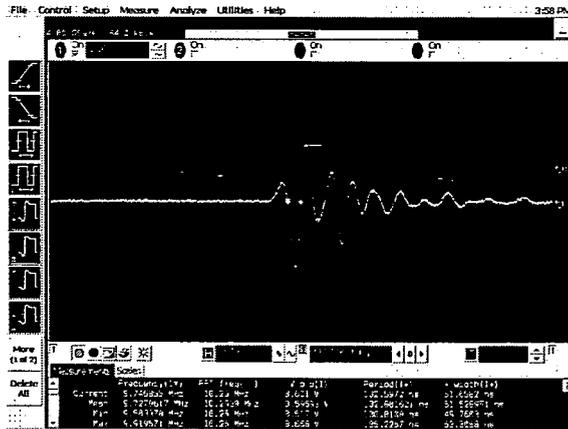
プローブ B5 距離 10cm



波形 15

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 11.18MHz  
 FFT Peak F 9.72MHz -6dB High F \* \* MHz  
 -6dB Low F 2.5MHz  
 Center F \* \* MHz -6dB Band Width \* \* %

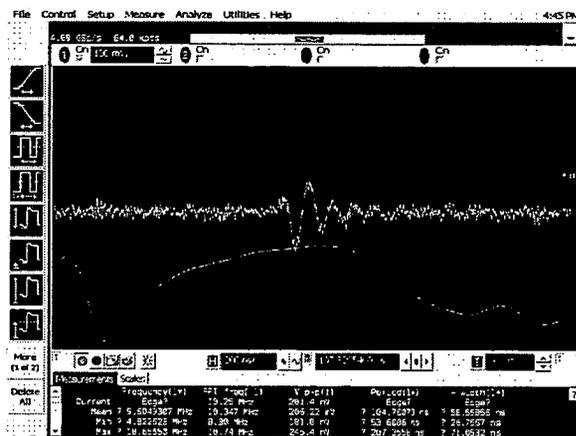
プローブ B6 距離 3cm



波形 16

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 9.72MHz  
 FFT Peak F 10.25MHz -6dB High F 19.5MHz  
 -6dB Low F 2.0MHz Center F 10.75MHz -6dB Band Width 162%

プローブ B6 距離 10cm

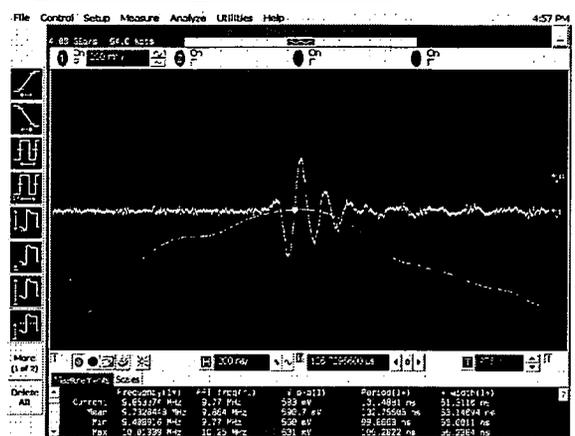


波形 17

周波数特性⇒反射波の周波数自動測定値 9.68MHz  
 FFT Peak F 10.34MHz -6dB High F 14MHz -6dB  
 Low F 3.6MHz Center F 8.8MHz  
 -6dB Band Width 118%

プローブ B6は距離を離れた場合の出力の減衰が大きい。この理由はセンサー表面の保護膜が剥がれかかったためと考えられる。

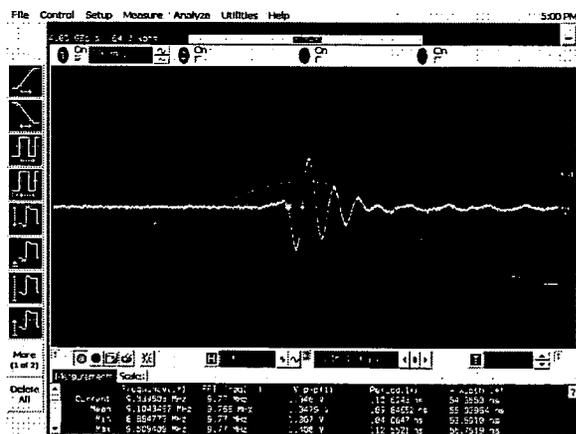
プローブ B8 距離 10cm



波形 19

周波数特性⇒反射波の周波数自動測定値 9.73MHz  
 FFT Peak F 9.86MHz -6dB High F 16.5MHz -6dB  
 Low F 2.8MHz Center F 9.65MHz  
 -6dB Band Width 141%

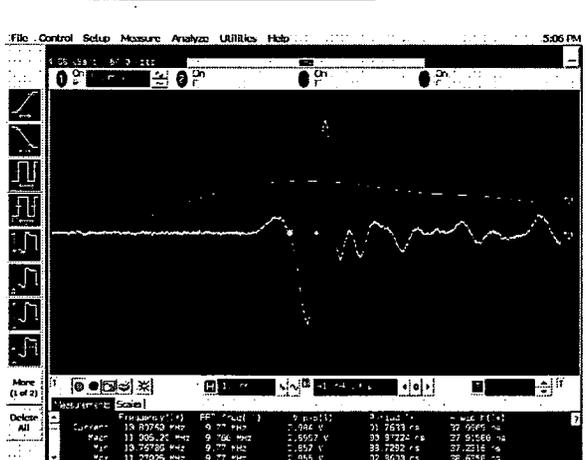
プローブ B8 距離 3cm



波形 18

周波数特性⇒反射波の周波数自動測定値 9.10MHz  
 FFT Peak F 9.76MHz -6dB High F 17.5MHz  
 -6dB Low F 2.2MHz Center F 9.85MHz  
 -6dB Band Width 155%

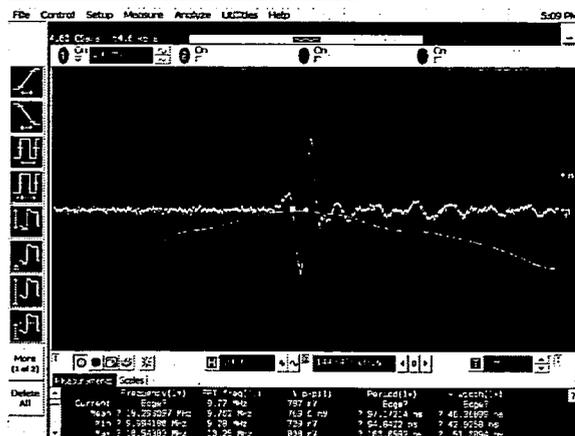
プローブ B9 距離 3cm



波形 20

周波数特性⇒反射波の周波数自動測定値 11.00MHz  
 FFT Peak F 9.76MHz -6dB High F \*\*MHz  
 -6dB Low F 0.6MHz  
 Center F \*\*MHz -6dB Band Width \*\*%

プローブ B9 距離 10cm



波形 21

周波数特性⇒反射波の周波数自動測定値 10.29MHz  
 FFT Peak F 9.76MHz -6dB High F >20.0MHz  
 -6dB Low F 2.8MHz  
 Center F \*\*MHz -6dB Band Width \*\*%

プローブ B9は2周期後半から急激に波高値が抑えられた形となっている。しかしその後の残響は長引いている。

測定結果( 距離 3cm と 10 cm)を表 3, 表 4 にまとめた。

表 3 パルスエコー法の測定結果 (距離 3cm)

	周波数 自動測定値 (MHz)	FFT Peak F (MHz)	-6dB Band Width (%)	Vpp (V)	特記事項
A	4.71	4.40	200	0.593	受信波形に高調波成分ある
B	2.38	2.44	(38、139)	0.325	反射波の S/N 比悪く SIN 波成分は検出できなかった。プローブ B はフィルム厚さが厚いため周波数追従が出来ていない。受信波形の波高値 (Vpp) が低く SIN 波形になっていない。
C	10.67 (1 μJ)	8.53	108	2.96 4.45	超音波出力 (受信感度も) がもっとも高い。残響時間が長い。
D	9.12	9.75	(165)*	2.77	第一周期目から高調波の影響を受け、さらに残響時間帯の波形にも大きな乱れを生じている。
B3	11.01	10.74	180	3.36	プローブ B3 は 2 周期目と 3 周期目の間にある -Vpp が縮む波形となっている
B4	8.33	9.37	187	3.68	プローブ B4 は B3 の波形と似ている。やはり残響時間の波形に高調波成分が含まれている。
B5	8.56	9.27	(144)	2.68	
B6	9.72	10.25	162	3.59	プローブ B6 は距離を離れた場合の出力の減衰が大きい。センサー表面の保護膜が剥がれかかったためと考えられる。
B8	9.10	9.76	155	1.34	
B9	11.00	9.76	***	2.89	プローブ B9 は 2 周期後半から急激に波高値が抑えられた形となっている。

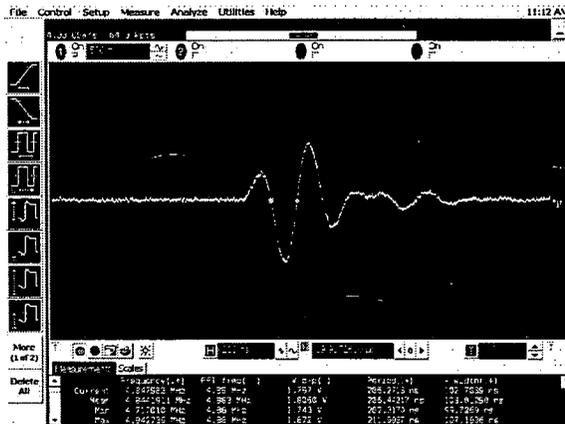
表4 パルスエコー法の測定結果（距離 10cm）

	周波数自動測定値 MHz	FFT Peak F MHz	-6dB Band Width %	Vpp V	特記事項
B3	9.73	10.25	166	3.59	
B4	8.73	9.76	157	2.21	
B5	11.18	9.72	>200	1.68	
B6	9.68	10.34	118	0.20	
B8	9.73	9.86	141	0.59	
B9	11.29	9.76	>200	0.76	
L1	9.43	8.78	124	1.09	

③P(VdF/TrFE)プローブのスルー送信  
 法による評価

測定波形を以下に順に示す。

プローブ A

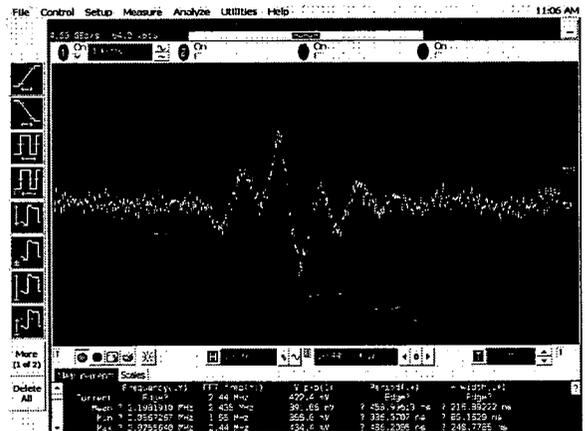


波形 22

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 4.84MHz  
 FFT Peak F 4.88MHz -6dB High F 8.8MHz -6dB  
 Low F 0.4MHz Center F 4.6MHz -6dB Band Width  
 182%

トランスデューサーの波形とは異なり高調波成分が見えるが受信周波数は4.8MHzでほぼトランスデューサーの共振周波数を再現している。

プローブ B

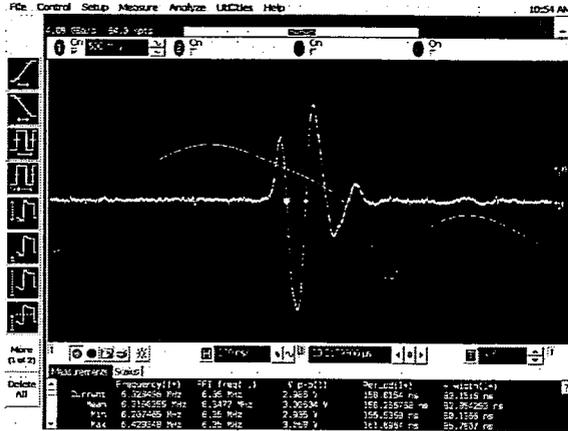


波形 23

周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 2.19MHz  
 FFT Peak F 2.43MHz -6dB High F 8.8MHz -6dB  
 Low F 0.4MHz Center F 4.6MHz -6dB Band Width 182%

受信強度が低く Vpp=390mV のためノイズも強調された波形になっている。

プローブ C

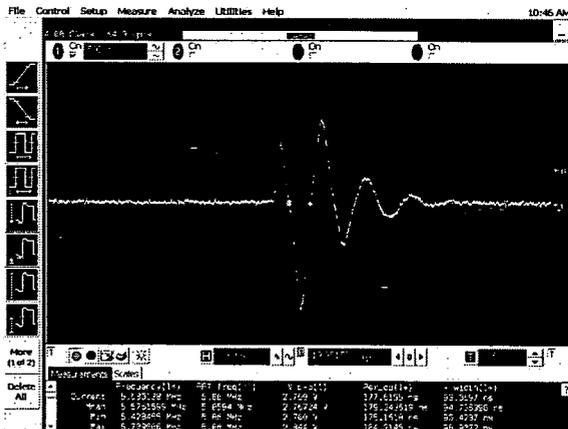


波形 24

周波数特性⇒反射波の周波数自動測定値 6.31MHz  
 FFT Peak F 6.34MHz -6dB High F 12.8MHz -6dB  
 Low F 1.4MHz  
 Center F 7.1MHz -6dB Band Width 160%

波形はかなり綺麗である。しかし受信開始から 1 $\mu$  sec のところに小さなピークが見られる。これは送信側の波形にはないので、プローブ C の特徴の可能性がある。受信周波数は 6.3MHz となっている。

プローブ D

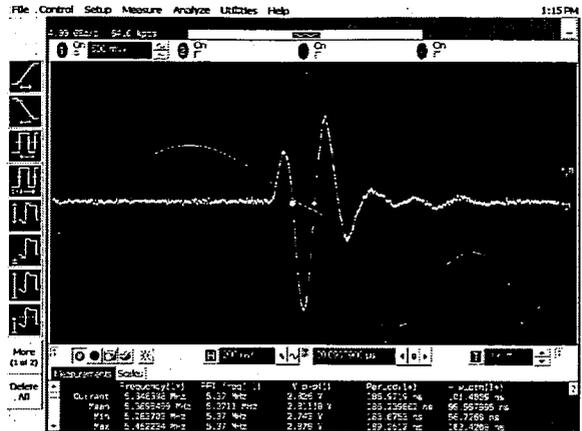


波形 25

周波数特性⇒反射波の周波数自動測定値 5.57MHz  
 FFT Peak F 5.85MHz -6dB High F 12.2MHz -6dB  
 Low F 1.2MHz  
 Center F 6.7MHz -6dB Band Width 164%

プローブ C とほぼ類似であるが、受信開始から 1 $\mu$  sec のところにピークが見られない。

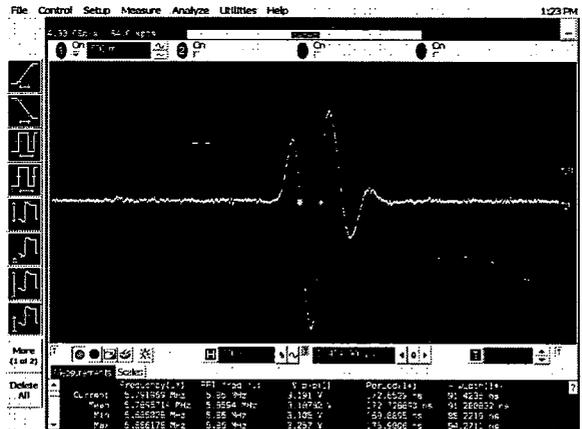
プローブ B3 距離 3cm



波形 26

反射波波形・・・500mV/Div. 200nsec/Div.  
 FFT 波形・・・Center10MHz 2MHz/Div  
 周波数特性⇒反射波の周波数自動測定値 5.36MHz  
 FFT Peak F 5.37MHz -6dB High F 12.0MHz -6dB  
 Low F 1.2MHz  
 Center F 6.6MHz -6dB Band Width 163%

プローブ B4 距離 3cm

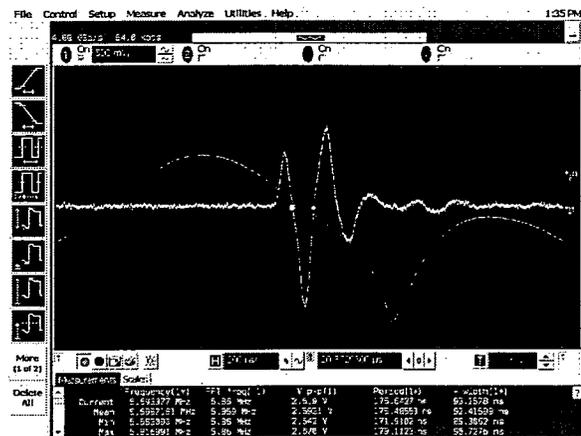


波形 27

反射波波形・・・500mV/Div. 200nsec/Div.  
 FFT 波形・・・Center10MHz 2MHz/Div  
 周波数特性⇒反射波の周波数自動測定値 5.78MHz  
 FFT Peak F 5.85MHz -6dB High F 12.6MHz -6dB  
 Low F 1.3MHz  
 Center F 6.95MHz -6dB Band Width 162%

プローブ B4 は残響時間が短い。

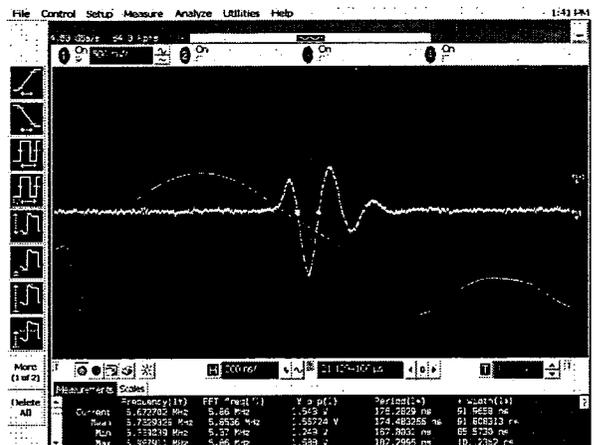
プローブ B5 距離 3cm



波形 28

反射波波形...500mV/Div. 200nsec/Div.  
 FFT 波形...Center10MHz 2MHz/Div  
 周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 5.69MHz  
 FFT Peak F 5.85MHz -6dB High F 11.8MHz -6dB  
 Low F 1.3MHz Center F 6.55MHz  
 -6dB Band Width 160%

プローブ B8 距離 3cm

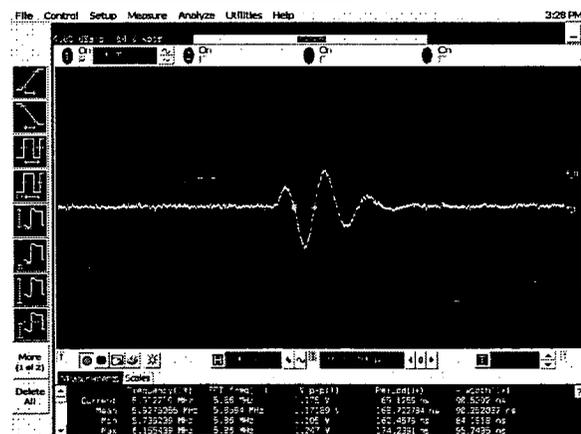


波形 30

反射波波形...500mV/Div. 200nsec/Div.  
 FFT 波形...Center10MHz 2MHz/Div  
 周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 5.73MHz  
 FFT Peak F 5.85MHz -6dB High F 11.8MHz  
 -6dB Low F 1.3MHz  
 Center F 6.55MHz -6dB Band Width 160%

プローブ B8 はプローブ B4 と同様である。

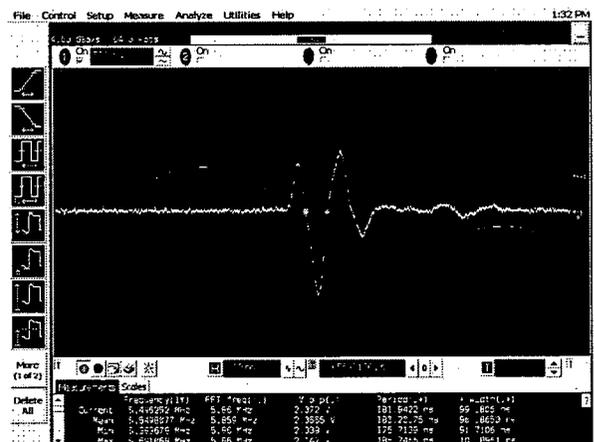
プローブ B6 距離 3cm



波形 29

反射波波形...500V/Div. 200nsec/Div.  
 FFT 波形...Center10MHz 5MHz/Div  
 周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 5.92MHz  
 FFT Peak F 5.85MHz -6dB High F 10.4MHz  
 -6dB Low F 1.8MHz Center F 6.1MHz  
 -6dB Band Width 140%

プローブ B9 距離 3cm



波形 31

反射波波形...500mV/Div. 200nsec/Div.  
 FFT 波形...Center10MHz 2MHz/Div  
 周波数特性⇒反射波形の周波数自動測定値 5.54MHz  
 FFT Peak F 5.85MHz -6dB High F 11.2MHz -6dB  
 Low F 1.3MHz Center F 6.21MHz  
 -6dB Band Width 159%

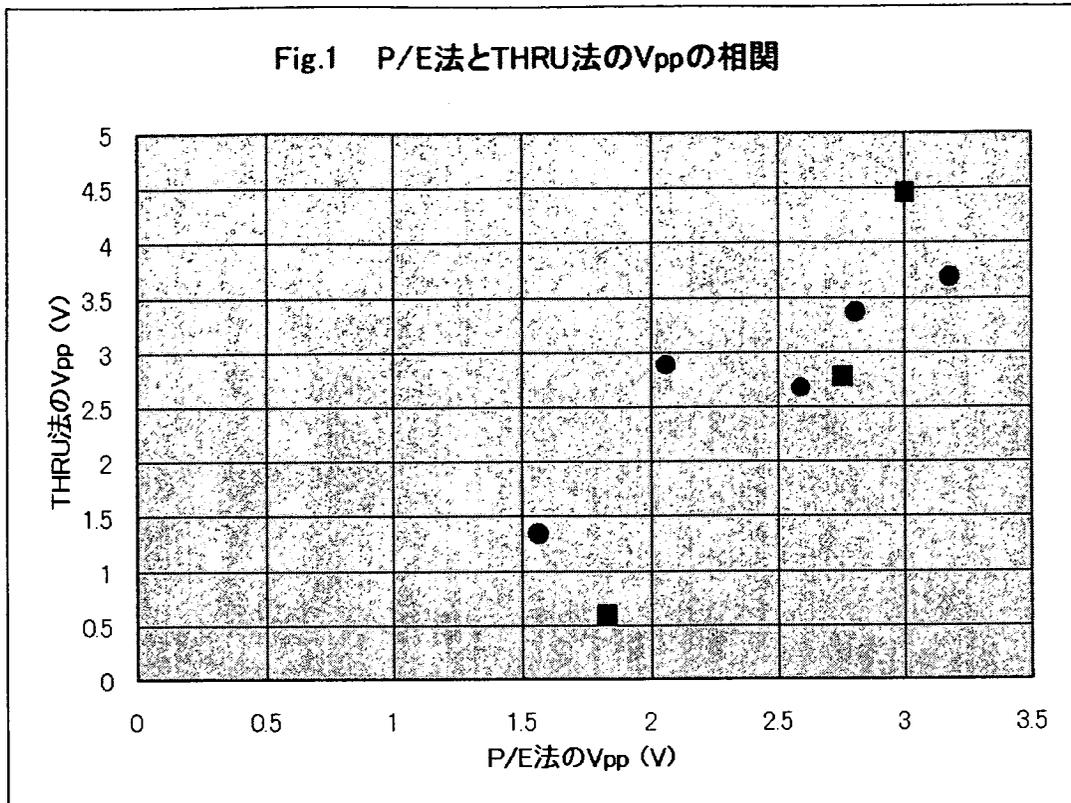
スルー法の測定結果を表5にまとめた。

表5 スルー法の測定結果

プローブ	周波数 自動測定値 (MHz)	FFT Peak F (MHz)	-6dB Band Width (%)	Vpp (V)	特記事項
A	4.84	4.88	182	1.83	トランスデューサーの波形とは異なり高調波成分が見えるが受信周波数は4.8MHzでほぼトランスデューサーの共振周波数を再現している。
B	2.19	2.43	182	0.391	受信強度が低くVpp=391mVのためノイズも強調された波形になっている。
C	6.31	6.34	160	3.00	波形はかなり綺麗である。しかし受信開始から1μsecのところに小さなピークが見える。これは送信側の波形にはないのでプローブCの特徴の可能性はある。受信周波数は6.3MHzとなっている。
D	5.57	5.85	164	2.76	プローブCとほぼ類似であるが、受信開始から1μsecの小さなピークが見られない。
B3	5.36	5.37	163	2.81	
B4	5.78	5.85	162	3.18	残響時間も少なく、波形も綺麗である。
B5	5.67	5.85	160	2.59	
B6	5.92	5.85	140	1.17	
B8	5.73	5.85	160	1.56	残響時間も少なく、波形も綺麗である。
B9	5.54	5.85	159	2.06	

以上のデータをまとめて、パルスエコー法でのVpp (P/E法Vpp) とスルー法でのVpp

(THRU法Vpp)を比較したものをFig.1に示す。



④ LCR メータによる特性評価

i) プローブ A、B、C、D の測定結果

測定周波数 2 MHz で LCR メータで測

定した結果を表 6 に示す。また同時にパルスエコー法で測定した Vpp と共振周波数 fr も併記した。

表 6 各パラメータの測定値比較

(測定周波数 2MHz、測定信号レベル 1V)

	R	X	Z	Cp	Rp	Cs	Rs	Q	D	G	B	Vpp	FR
	Ω	kΩ	kΩ	pF	kΩ	pF	Ω		m	μS	μS	V	MHz
アダプタ オープン	14	-40	40	1.98	24M	1.98	59	760	1.55	0.032	24.9	—	—
アダプタ 50Ω	49.9 Ω	661m	49.9 Ω	-21	49.9 Ω	—	49.9 Ω	13m	75.7	0.02	-246	—	—
プローブ A	12	-1.05	1.05	75	97	75	12.1	87	11	10.8	944	0.59	4.71
プローブ B	7.9	-1.06	1.06	74.7	142	74.7	7.94	133	7.4	6.99	937	0.32	2.38
プローブ C	215	-3.23	3.23	24.4	48	24.4	216	15	15	20.6	308	4.45	10.6
プローブ D	17	-0.96	0.96	82.9	53	82.9	17.1	56	18	18.45	1040	2.77	9.1

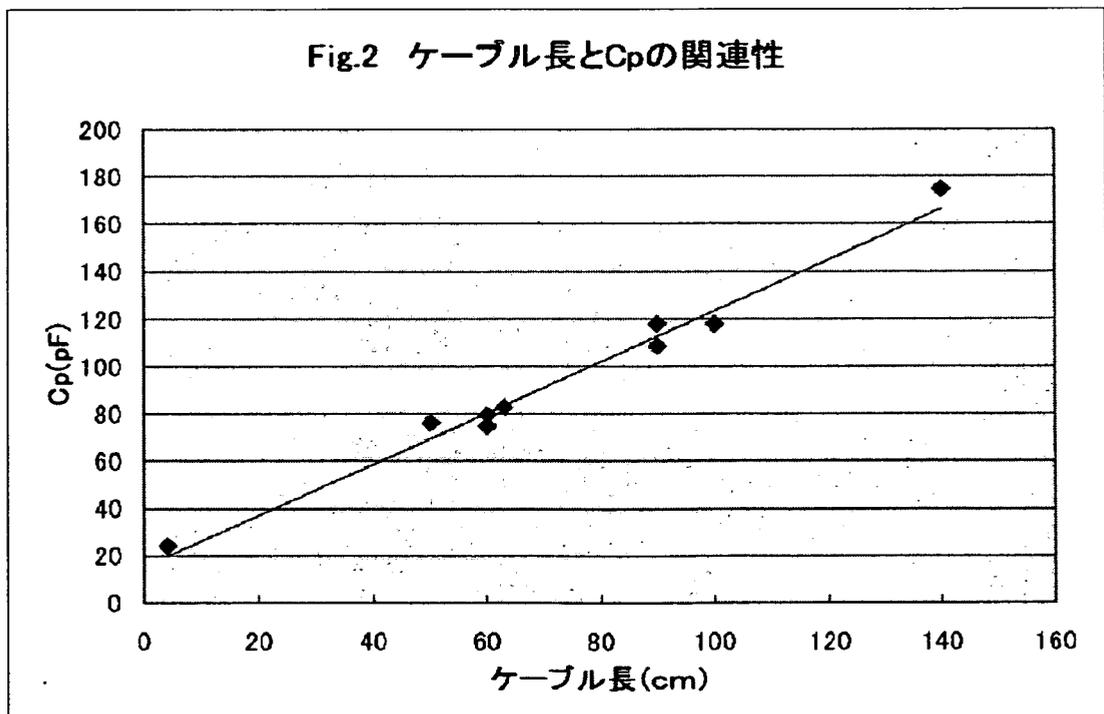
ii) 各種プローブの LCR メータによる特性評価 その2

i)の結果に基づき Cp と Rp に注目し残りのプローブも加えて測定値を整理した。表7に示す。

表7 各種プローブの Cp と Rp

プローブ名	ファイバー 穴径	プローブ径	プローブ長さ	ケーブル径	ケーブル長	Cp	Rp
		mm φ	cm	mm φ	cm	pF	KΩ
A	なし	4	15	1.8	60	75	97
B	なし	4	15	1.8	60	74.74	142
C	なし	5.5	10	2.6	4	24.4	48
D	なし	6	10	2.6	63	82.9	53
B6	1mm φ	4	14	1.8	90	108.6	52.39
B9	1mm φ	4	14	1.8	100	118	86.18
B8	1mm φ	4	15	1.8	100	118	54.7
B3	1.5mm φ	6	19	1.8	140	175	19.2
B4	1mm φ	6	14	1.8	50	76.36	33.16
B5	1.5mm φ	6	14	1.8	90	118	37.85
B1	2.0mm φ	8	10	3	60	79.7	40.28

このうち Cp についてケーブル長との相関 | が Fig.2 に示すように得られた。



P(VdF/TrFE)フィルム膜が 4mm φ で厚さ | が 50 μ m の場合、その静電容量は 4mm φ