

厚生労働科学研究費補助金（長寿科学総合研究事業）
分担研究報告書 石原美弥 番作勲 石原雅之 菊地眞

光音響原理に基づく力学特性計測法を用いた
関節軟骨変性診断システムの開発に関する研究
—システム全体の構築について—

分担研究者 石原 美弥 防衛医科大学校 医用工学講座・准教授
研究協力者 番作 勲 防衛医科大学校 医用工学講座・研究員
分担研究者 石原 雅之 防衛医科大学校 防衛医学研究センター医療工学部門・教授
分担研究者 菊地 眞 防衛医科大学校 副校長（教育担当）兼医用工学講座・教授

本研究では、当該研究の第2年目として、昨年度に引き続き研究者らが世界で初めて原理提案及び原理実証を行なった光音響原理に基づく力学特性計測法を用いて、関節軟骨変性の診断システムの確立を目的とした。今年度は昨年度の結果を踏まえて、システム要素技術の特にプローブの開発及び試作を中心とした。開発したプローブの特徴としては、①調査した文献の範囲では、作成したプローブは世界のトップデータと同等の感度が得られていること、②関節鏡視下に適用可能な仕様になっていること、③光ファイバーとの位置関係を再考することで、臨床現場の状況に応じたプローブの仕様の最適化が可能になったことなどが挙げられる。

その他、光ファイバーの仕様と、受信側のシステムとして測定信号から力学特性を算出するためにオシロスコープの仕様とそれに伴うプログラム解析を実施した。

A. 研究目的

我々は、世界で初めて光音響原理に基づく力学特性計測法を提案・原理実証し、実際の臨床現場で、関節軟骨の診断に使用できるシステムの構築を目的に、本研究を実施している。本研究の目的である臨床使用のシステム構築の際には、いくつかの重要な要素技術があるが、そのうち、関節鏡視下で使用可能なプローブの開発が研究の中心となる。その理由は、診断の励起用物理エネルギーとして光を用い、診断のために使用する生体からの信号は音（超音波）であるために、光と超音波の技術の両方が必要になる。この両方の技術を関節鏡視下で使用する必要があるからである。

実際には光音響信号の励起源にナノ秒パルスレーザーを使用するので導光には光ファイバーを使用し、圧電素子からなるセンサーとともに、関節鏡視下で使用できる一体型プローブの開発

が必要である。その他にも独自に開発した信号解析に関する検討が必要である。

そこで、当該研究の2年目として実施した要素技術開発は、以下の通りである。

- (1) プローブの試作及び性能評価
- (2) 光ファイバーの伝送効率検証
- (3) 受信側システムの最適化

上記が実現されれば、昨年度に引き続き、臨床アプリケーションは大いに拡大される。

B. 研究方法

当該研究の第2年目として、実施した3項目の詳細については本稿とは別に報告する。

本稿では、全体のシステム構成図を示し、要素技術及び構成部品を列挙して、システム構成全体を把握する。

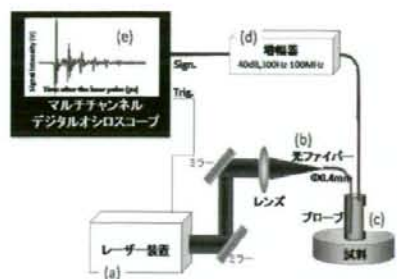


図1 システム構成図

(a)レーザー装置：昨年度の検討の結果、使用するレーザーは Q スイッチ Nd:YAG レーザーの第3高調波である。本レーザーの波長は 355nm、パルス幅は 5~6ns である。照射条件の検討は来年度の研究にて実施予定である。

(b)光ファイバー：今年度の検討事項である。

(c)プローブ：本研究においてもっとも重要な研究要素技術。昨年度に引き続き、今年度も検討事項である。

(d)信号増幅器：従来研究で検討済み事項である。使用するのは、エヌエフ回路設計カイロブロックのプリアンプ（超低雑音増幅器）を用いている。光音響信号として検出する信号や、電磁ノイズの信号の性質から、下記の仕様をもつ増幅器を選択した。

- ①周波数帯域：1kHz~80MHz
- ②電圧利得：46dB
- ③入力インピーダンス：1M Ω
- ④入力換算雑音電圧密度：0.5nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- ⑤入力換算雑音電流密度：200fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
- ⑥出力インピーダンス：50 Ω

(e)デジタルオシロスコープ：今年度検討する。

C. 研究結果

今年度は3年計画の2年目で、第1年目で得られた成果を基に、プローブの試作及び性能評価、光ファイバーの伝送効率検証、受信側システムの最適化を実施した。

プローブの試作及び性能評価に関しては、次に示す内容でまとめた。

[1]光音響プローブの残響対策

- 1]P-E法による超音波特性評価
- 2]スルー法による評価

[2]光音響測定における超音波プローブの性能

- 1]音速測定実験
- 2]光音響測定におけるレーザー光照射位置による比較

3]光音響測定における波形振動解明

すなわち、最終目標である光音響法と時間分解スペクトル分析法を用い、関節軟骨の力学特性及び性状を臨床診断法として適用できることを示すという目標達成のために各要素技術開発のより一層の促進を図り、目標を上回る成果を得た。

D. 考察

医療現場に優位に持ち込める光技術は、広く有効に活用されるようになってきた。これは、次のような特長を持つことによる。

- ・経ファイバー的・経内視鏡的に生体にアプローチが可能
- ・微細、すなわち高い空間分解能、及び、高い時間分解能の治療・診断が可能
- ・汎用性・簡便性・迅速性の実現

光技術の中でも、特に近年着目され、実用性に優れた技術の1つに光音響法が挙げられる。光音響法は一定条件のパルスレーザー光を照射する際に吸収体において熱弾性過程により組織内で発生する応力波の経時変化を圧電素子で検出する方法である。光音響法は組織の光吸収係数の分布に由来する音響信号をイメージングする方法で、光計測最大の問題である散乱による信号減衰の影響を直接的には受けないため深部診断が可能であり、光と超音波の特長を併せ持つ医学・医療分野に幅広く役立つ有力な診断・計測法である。脳内血管イメージング、眼科領域の網膜病変の1つである黄斑変性症のレーザー凝固治療時のモニタリング、グルコースモニタリング、各種癌の早期診断、熱傷の深度診断、

皮膚移植の生着モニタリングなど多分野において臨床に直結した研究開発が進められている。

本研究では局所で発生した応力波が組織内を伝播する過程で組織固有の粘弾性により減衰する現象から、力学特性を計測している。この方法は、関節鏡をはじめとする内視鏡への適用が可能で、可能な光を利用した診断技術の一つであるが、実際には、他の光技術である拡大内視鏡観察光学法、拡大内視鏡観察共焦点法、狭帯域法、OCT (光コヒーレンス断層画像化法) や光造影剤蛍光プローブ法とは異なり、診断のために使用する物理エネルギーは光で、診断のために使用する生体からの信号は音 (超音波) である。よって、光と超音波の技術の両方が必要になる。特に本研究では中心的に進めているプローブと総称している検出信号を検知するセンサーには、圧電素子の中でも、生体の音響インピーダンスに近い高分子圧電フィルムを用いている。これにより信号の損失が軽減できて、高感度なプローブの実現が可能となる。一方で、現在日本だけでなく世界でも高分子圧電フィルムを用いてプローブを試作できる研究機関は希少である。このような状況で設計・試作を自前で可能としている我々により本研究で実用的なプローブが開発されればその付加価値は高い。

また、本研究は図2に示すような本質的な医工連携を実施している。工学的なサイドとしては、真に医のニーズに答えられる研究体制を構築しつつあると考えている。



図2 医工連携の概念図

このような実質的な医工連携により、最終的には臨床現場で用いることのできる診断システムの構築が可能となると考えている。

今年度の終了後の最終年度には、滅菌環境下で実施する臨床応用のための測定プロトコールの

決定や、測定条件を最適化し、成熟したシステム化を図る。

E. 結論

上記が実現されれば、我々が世界で初めて原理を実証した光音響原理に基づく力学特性計測法を実際の臨床現場で使用するアプリケーションは大いに拡大される。3年計画の最終年度である来年度は、測定プロトコールや測定条件、または測定信号の表示など、関節軟骨の臨床診断のニーズにみあったシステム構築の仕上げを実施する予定である。

これにより、高齢者の多くに認められる軟骨変性の診断を関節軟骨本来の組織性状と力学特性に基づく、低侵襲で定量的評価が可能で新規の機能診断法として、疾患病態解明と治療効果判定に威力を発揮するものと考えられる。そして、臨床データの蓄積により、詳細な病態把握と予後診断が可能となり、個々の患者の病態に応じた、きめ細かな治療計画が可能となり、ADLの向上については健康寿命の延伸に寄与するものと考えられる。

F. 健康危険情報

なし

G 研究発表 (システム構築に関しては、本報でまとめて記載する)

1. 論文発表

- 1) 石原美弥, 菊地眞: 光による再生医療に用いる組織・細胞の評価, MICROOPTICS NEWS, 26(3) p.31-36 (2008)
- 2) 石原美弥, 佐藤正人, 持田譲治, 菊地眞: 光による軟骨再生医療の評価, 日本整形外科学会雑誌, 82(8) p.S952-S952 (2008)
- 3) 石原美弥, 菊地眞: 再生医療を光で評価する, 第4回集積光デバイス技術時限専門委員会誌, IPD08(25) p.44-49 (2008)
- 4) 石原美弥, 佐藤正人, 持田譲治, 菊地眞: 再

生医学における光技術, 第 47 回日本生体医工学会大会—明日の医療を支える BME—論文集 p.70 (2008)

5) 石原美弥, 菊地眞: 再生医療に用いられる組織・細胞のレーザーによる評価, レーザ学会学術講演会第 29 回年次大会講演予稿集, p.221-222 (2009)

2. 学会発表

1) 石原美弥: 光技術による再生医療の細胞・組織の評価, 第 9 回 医療・バイオデバイス応用レーザー専門委員会, 2008.9.26

2) 石原美弥, 佐藤正人, 持田譲治, 菊地眞: 再生医学における光技術, 第 47 回日本生体医工学会大会, 2008.05.08-10

3) 石原美弥, 佐藤正人, 持田譲治, 菊地眞: 軟骨再生医療評価のための光計測技術開発, 第 7 回日本再生医療学会総会, 2008.03.13-14

4) 石原美弥, 菊地眞: 再生医療を光で評価す

る, 第 4 回集積光デバイス技術研究会, 2008.07.30

5) 石原美弥, 菊地眞: 光による再生医療の細胞・組織の評価, 第 109 回微小光学研究会, 2008.10.9

6) 石原美弥, 佐藤正人, 持田譲治, 菊地眞: 光による再生医療の評価, 第 23 回日整会基礎学術集会, 2008.10.23-24

7) 石原美弥, 菊地眞: 再生医療に用いられる組織・細胞のレーザーによる評価, レーザ学会学術講演会第 29 回年次大会, 2009.01.10-12

H. 知的財産権の出願・登録状況

なし

光音響原理に基づく力学特性計測法を用いた
関節軟骨変性診断システムの開発に関する研究
—ブロープの開発について—

研究協力者 番作 勲 防衛医科大学校 医用工学講座・研究員
分担研究者 石原 美弥 防衛医科大学校 医用工学講座・准教授
分担研究者 石原 雅之 防衛医科大学校 防衛医学研究センター医療工学部門・教授
分担研究者 菊地 眞 防衛医科大学校 副校長（教育担当）兼医用工学講座・教授

光音響計測における超音波ブロープの評価として、一般的な水中での P/E 法やスルー法での超音波特性評価結果は、直接生体に接触しレーザー光を照射する光音響計測でのブロープの評価に有効であることを示した。また実際の光音響計測を、試料製作の容易なシリコンラバー、ゼラチン、アクリル、CR ゴム等で評価しその測定限界を確認した。これより、試料固有の音響特性に左右されることの少ない超音波ブロープの改良目標として、①高感度化（高受波強度化）、②残響時間短縮が最重要であることを示し、新たな光音響ブロープの改良へ繋げた。

[1] 光音響ブロープの残響対策

1] P/E 法による超音波特性評価

(P/E：パルスエコー)

A. 研究目的

光音響測定における超音波ブロープの開発において、超音波振動素子の残響振動を低減することは真の音響波観測において重要な要素となる。

残響振動の発生要因としては、振動子の受波面と反対側のバックリング材、ブロープ外筒材、その他の構成材料などによる反射振動などが考えられるが、今回はバックリング材として使用されているガラエポ基板の厚さを変え比較した。

超音波振動子の内部で超音波が発生した場合、超音波振動が表面(Z軸方向)と裏面(-Z軸方向)へ伝播するが裏面への振動は振動子としての用途には適さないため、バックリング材で吸収するのが一般的である。このときバックリング材での吸収が不足の場合バックリング材の表面と裏面での反射

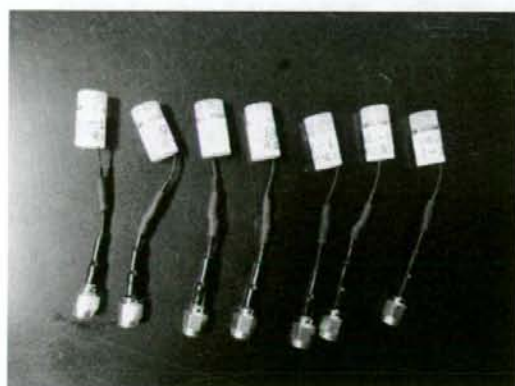
波が振動子の表面より連続して放射されることにより、観測される反射波形に残響波として残ることが考えられる。また超音波ブロープが外からの超音波を受信しこれにより振動子が振動し電圧を発生させる受波素子の場合の受波特性に対しても同様の影響があると考え、残響性能をガラエポ基板の厚さを変えたサンプルを作製し評価した。

B. 研究方法

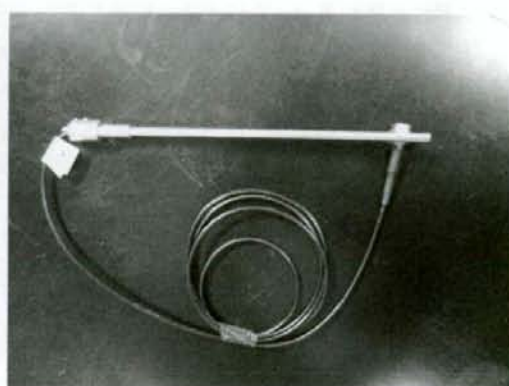
従来どおり P/E 法による超音波素子自身からの送信を受信する方法で、サンプルとステンレス反射板間隔を 3cm とし水中で第 1 次反射波を測定した。また既に報告した外筒が SUS304 のファイバー穴なしブロープ C とファイバー穴ありのブロープ B3, B4 そして L 型のファイバー一体ブロープ L1 も比較のため同時に測定した。さらに既報の裸サンプル No.01, 02, 07 の測定結果を再度比較掲載した。

サンプル水準表

実験01		外筒	長さ	ガラエボ基板厚	保護膜厚さ	数量
T1	残響対策1	アクリルパイプ	20mm	0.5mmt	透明シリコーン150 μ m	1本
T2	残響対策2	アクリルパイプ	20mm	1.6mmt	透明シリコーン150 μ m	1本
T3	残響対策3	アクリルパイプ	20mm	2.4mmt	透明シリコーン150 μ m	1本
T4	残響対策4	アクリルパイプ	20mm	なし	透明シリコーン150 μ m	1本
T5	残響対策5	アクリルパイプ	20mm	なし	透明シリコーン300 μ m	1本
T6	残響対策6	アクリルパイプ	20mm	1.6mmt	透明シリコーン300 μ m	1本
T7	残響対策7	アクリルパイプ	20mm	0.5mmt	透明シリコーン300 μ m	1本



残響対策用サンプル



プローブ写真

C. 研究結果

測定結果をまとめて表に示す。 パルサーの送信エネルギー1 μ J (B3,B4,L1は4 μ J)

サンプルNo.	T1	T2	T3	T4-1	T5	T6	T7	C	B3	B4	L1	裸01	裸02	裸07
残響時間 t(delay) (μ sec)	1.8	1.6	2	2	1.8	1.4	1.6	2.5	2	3.5	2.5	2.5	2	2.3
受信強度 Vpp (V)	3.69	2.82	3.02	3.37	2.9	0.93	1.98	3.21	2.68	3.02	2.73	4.47	3.43	3.48
t(delay)/Vpp (V/sec)	0.48	0.57	0.66	0.59	0.62	1.49	0.8	0.78	0.75	1.15	0.94	0.56	0.58	0.66
共振周波数 FR (MHz)	11.2	10.8	10.2	10.8	10.6	10.3	10.3	10.9	10.2	9.8	9.1	—	—	—
FFT -3dB幅 (%)	85	97	88	86	92	79	80	89	158	132	164	—	—	—

1. 残響時間について

1次反射波の受信開始から終了までの時間を残響時間として測定した。また残響時間の送信

エネルギー依存性を排除して残響時間を比較するための値としてt(delay)/Vppを計算した。
 (1) 今回の残響対策品T1~T7の残響時間は1.4

$\mu\text{sec} \sim 2\mu\text{sec}$ で従来のプローブに比べて短い値を示している。

- (2) P/E 法による測定であるので、各プローブの送信性能との関係も考慮されるべきであると考え $t(\text{delay})/V_{pp}$ で比較すると T6 を除いて外筒 SUS304 プローブ品のみが $t(\text{delay})/V_{pp}$ 値も大きい。その他は外筒がアクリルパイプである。
- (3) T6 は 1.49 と大きな値を示している原因は受信強度 (受信感度) が低いことによる。T6 は受信強度、FFT とともに他の残響対策品に比べて異常値である。これはサンプル製作条件に以上があると推定している。
- (4) しかし P/E 法では T1 から T7 までの残響時間 に有意差が見られなかった。

2. 残響対策品(T1~T7)の評価結果から

- (1) T1 から T7 までは受信波形の共振周波数にバラツキが少なく、表にあるよう 10.2MHz ~ 11.2MHz の範囲である。(これは同一シートの高分子圧電素子である P(VdF/TrFE) 膜を使っているためのバラツキ範囲に相当する)
- (2) 受信強度については送信エネルギーがパルサー装置の最低値設定 $1\mu\text{J}$ であるが高い受信感度で信号の V_{pp} を得ることが出来た。(Gain は 54dB-2dB で測定)
- (3) FFT 波形は従来のプローブサンプルにあった周波数のピークが色々あるような波形ではない。中央に一つのみのピークとなる良い形状で、-3dB 幅では明らかに 100% 以下であり Q 値のよい周波数分布となっている。これは超音波振動子が他の機械的制限を受けることなく本来の正常な振動運動をしているためと推定している。

3. その他の結果

B3, B4, L1 はパルサーの送信エネルギーを $4\mu\text{J}$ としなければ同等の V_{pp} が得られなかった。

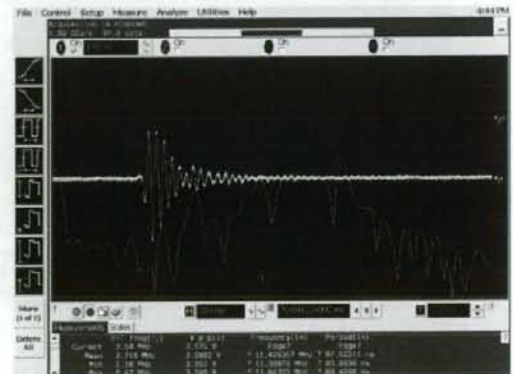
またこれらの 3 本はファーバー穴あり又はファイバー一体のプローブである。

これから中央にファイバー穴がある場合は送信効率も受信効率も低いと推定される。すなわち振動子が完全な円板でなく中央部に穴のある同心円板では超音波素子の機械的振動が中央部で不連続となるため効率・感度が低下すると推定される。各観測波形を以下に示す。

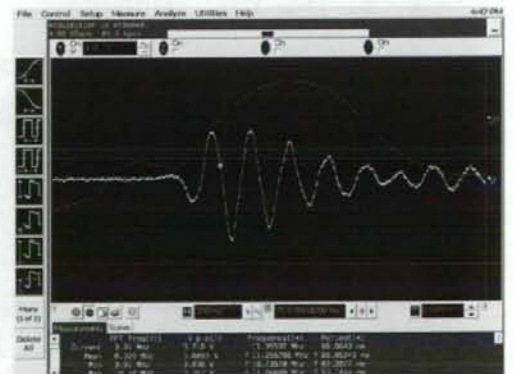
実線：1次反射波測定信号

点線：上記波形の FFT 解析波形

残響対策 1 (T1) $1\mu\text{J}$ 54dB-2dB
500nsec/Div.



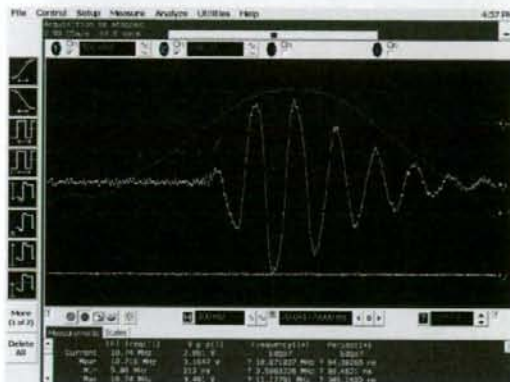
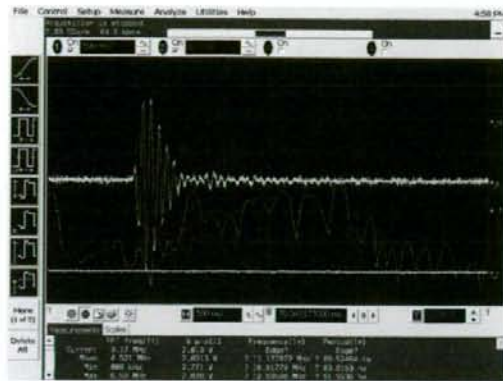
100nsec/Div.



共振周波数 FR=11.2MHz -3dB 幅 85%
残響時間 $1.8\mu\text{sec}$ $t(\text{delay})/V_{pp}=0.48\mu\text{sec}/V$

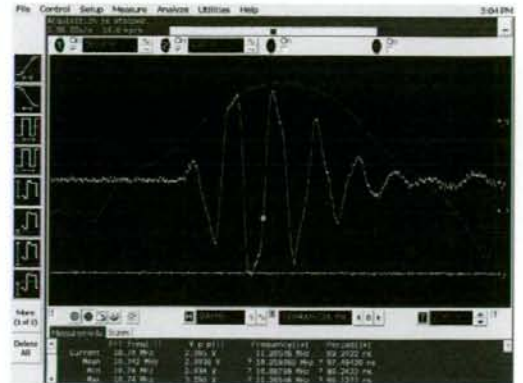
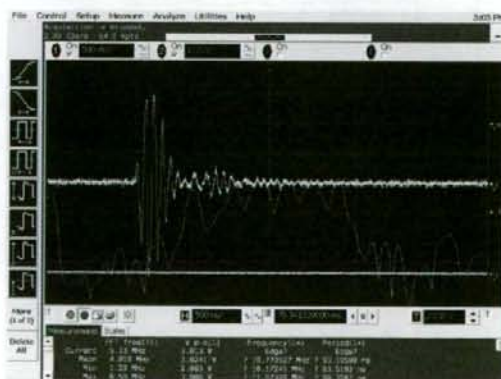
残響対策 2 (T2) 1 μ J 54dB-2dB

以下同様に時間軸を選択



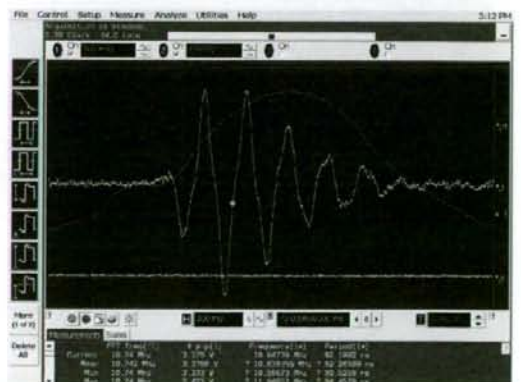
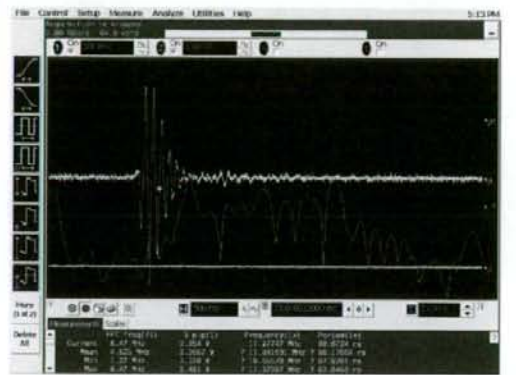
FR=10.8MHz -3dB 幅 97%
残響時間 1.6 μ sec $t(\text{delay})/V_{pp}=0.57 \mu \text{ sec}/V$

残響対策 3 (T3) 1 μ J 54dB-2dB



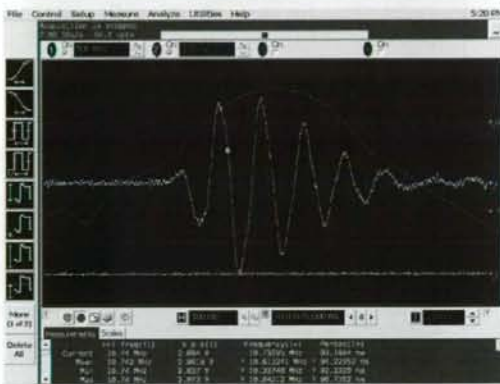
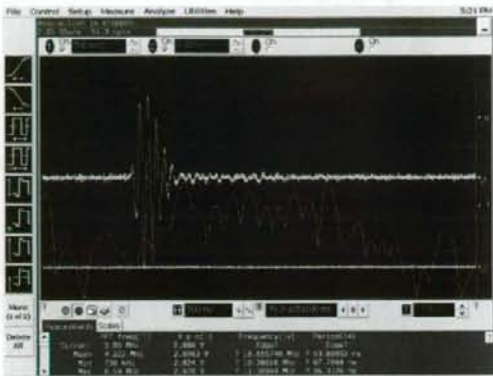
FR=10.2MHz -3dB 幅 88%
残響時間 2.0 μ sec $t(\text{delay})/V_{pp}=0.66 \mu \text{ sec}/V$

残響対策 4 (T4-1)



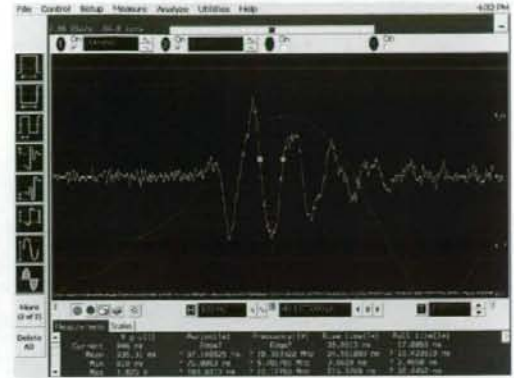
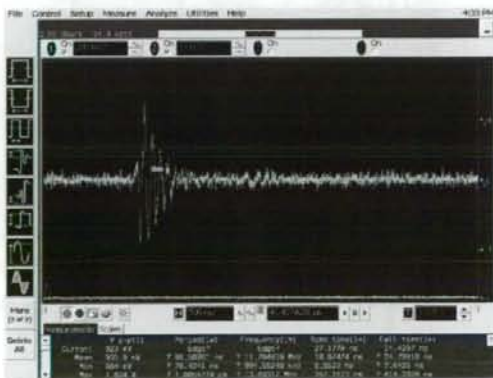
FR=10.8MHz -3dB 幅 86%
残響時間 2.0 μ sec $t(\text{delay})/V_{pp}=0.59 \mu \text{ sec}/V$

残響対策 5 (T5)



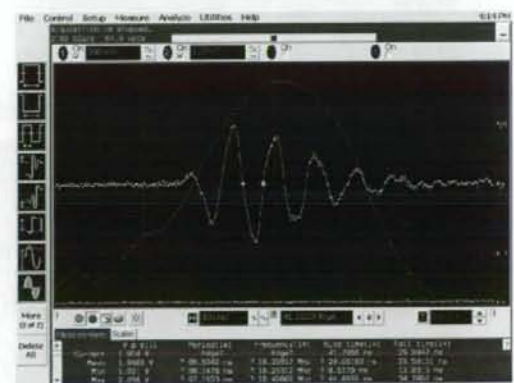
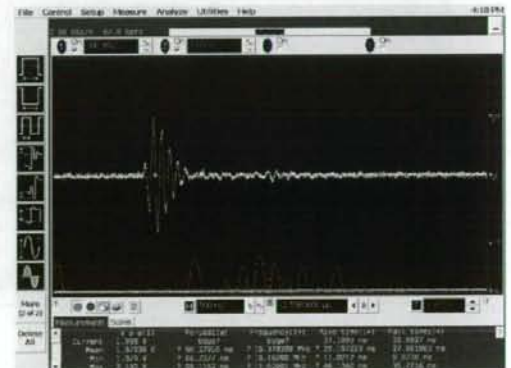
FR=10.6MHz -3dB 幅 92%
残響時間 1.8 μ sec $t(\text{delay})/V_{pp}=0.62 \mu$ sec /V

残響対策 6 (T6) P/E 1 μ J 54dB-2dB



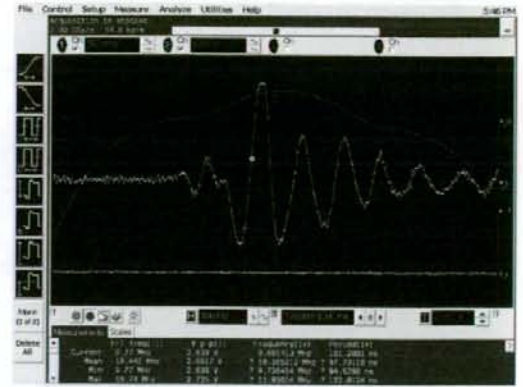
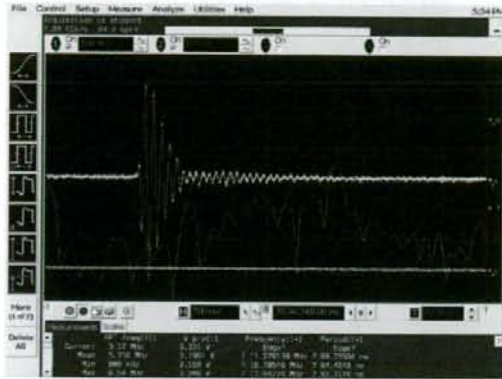
FR=10.3MHz -3dB 幅 48% -6dB 幅 79%
残響時間 1.4 μ sec $t(\text{delay})/V_{pp}=1.49 \mu$ sec /V

残響対策 7 (T7) P/E 1 μ J 54dB-2dB



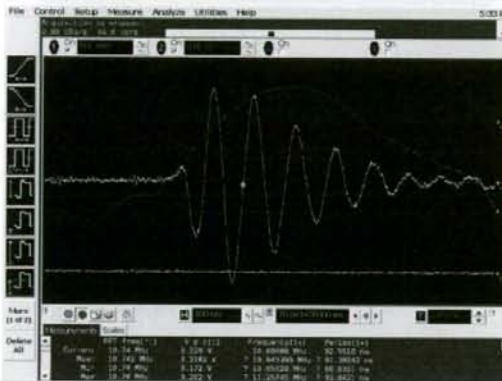
FR=10.3MHz -3dB 幅 65% -6dB 幅 80%
残響時間 1.6 μ sec $t(\text{delay})/V_{pp}=0.80 \mu$ sec /V

プローブ C (1 μ J 54dB-5dB)

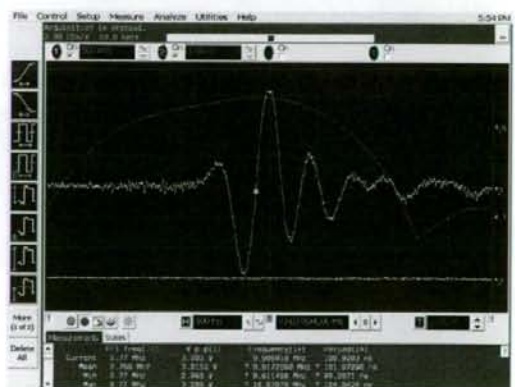
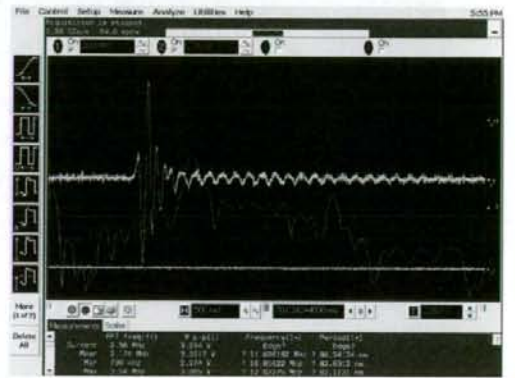


FR=10.2MHz -3dB 幅 158%
 残響時間 2.0 μ sec $t(\text{delay})/V_{pp}=0.75\mu\text{sec}/V$

プローブ B4 (4 μ J 54dB-2dB)

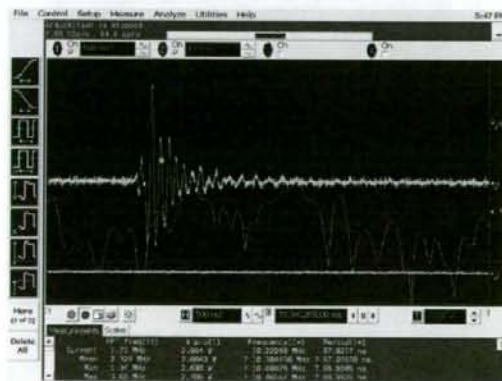


FR=10.9MHz -3dB 幅 89%
 残響時間 2.5 μ sec $t(\text{delay})/V_{pp}=0.78\mu\text{sec}/V$

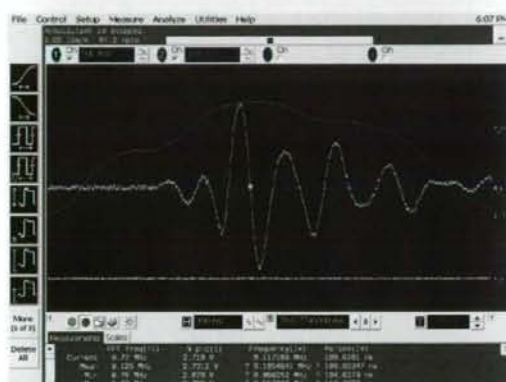
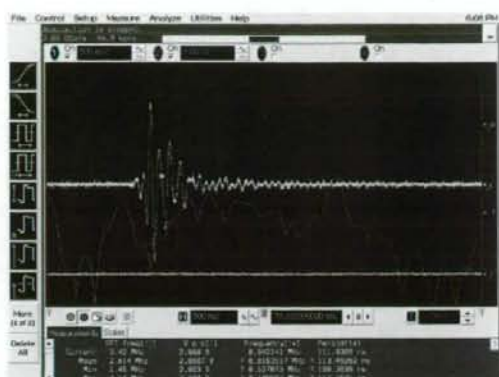


FR=9.8MHz -3dB 幅 132%
 残響時間 3.5 μ sec $t(\text{delay})/V_{pp}=1.15\mu\text{sec}/V$

プローブ B3 (4 μ J 54dB-2dB)

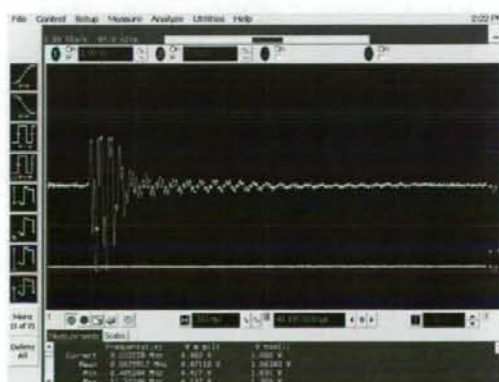


プローブ L1 (4 μ J 54dB-2dB)



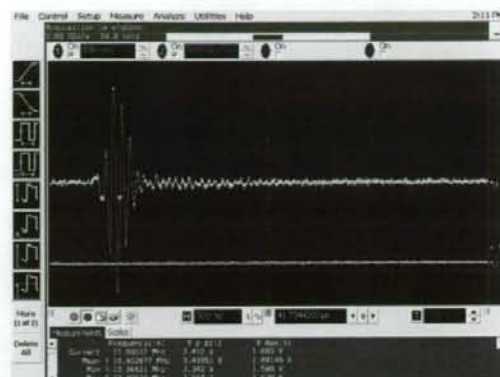
FR=9.1MHz -3dB 幅 164%
残響時間 2.5 μ sec $t(\text{delay})/V_{pp}=0.94 \mu\text{sec}/V$

裸サンプル No.01 (2 μ J 54dB-11dB)



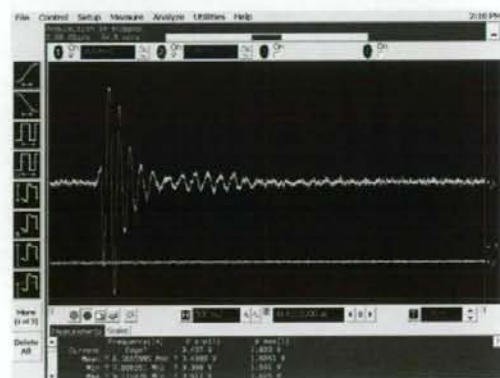
残響時間 2.5 μ sec $t(\text{delay})/V_{pp}=0.56 \mu\text{sec}/V$

裸サンプル No.02 (2 μ J 54dB-11dB)



残響時間 2.0 μ sec $t(\text{delay})/V_{pp}=0.58 \mu\text{sec}/V$

裸サンプル No.07 (2 μ J 54dB-11dB)



残響時間 2.3 μ sec $t(\text{delay})/V_{pp}=0.66 \mu\text{sec}/V$

D. 考察

- 表 2 から今回の残響時間測定や $t(\text{delay})/V_{pp}$ 値ではガラエポ基板の厚さの依存性は明確には見られていない。これは残響時間の測定方法にも精度がないためであるが、本質的な測定方法の検討が必要である。
- 今回の残響対策品はアクリルパイプで製作されており、形状が異なるがアクリルパイプの裸サンプルに近い値を示していることから、金属製の SUS304 パイプ (外筒) とアクリルパイプの違いが残響時間に大きく関係しているのではないかと推定できる。
- 超音波振動子の P(VdF/TrFE)膜は SUS より

アクリル樹脂の方に音響インピーダンスが近い。

- アクリルと SUS の弾性率が違うことなどの原因と予想される。

E. 結論

超音波特性を評価する方法として、自身の送信能力に依存しないスルー法によるガラエポ基板の優位性を確認実験する。

2] スルー法による評価

A. 研究目的

1]での P/E 法の実験では同一振動子で送信・受信性能が混合するため、ガラエポ基板の厚さおよび有無の有意差が見られないと考え、スルー法により一定の送信条件での受波素子としての1次反射波形を観察しその有意差を調査する。

B. 研究方法

1]におけるプローブの位置にプローブ C を固定し。ステンレス反射板の位置に評価サンプルプローブを置き、送信面と受信面（受波面）の間隔を同じく 3cm として受波特性を観察した。

測定条件は $1\mu\text{J}$ 40dB-2dB。

C. 研究結果

<測定結果>

1. 残響時間について

- (1) 残響時間は P/E 法に比べ短縮されている。
- (2) その短縮の幅は各サンプル間で差がある。
- (3) 金属製の SUS304 パイプ（外筒）のプローブではより残響時間が短い値となっているが、 $t(\text{delay})/V_{pp}$ は P/E 法と同じく外筒が SUS304 のプローブのほうが大きい。すなわち規格化した場合、各プローブ間の比較において SUS304 のプローブのほうが残響振動時間が長いことを示している。
- (4) 残響時間の測定において一旦振動が終了した後、ある時間後再振動の観測されるものがある。（これを含めた時間を残響時間とした）

2. ガラエポ基板の厚さおよび有無の有意差

- (1) ガラエポ基板の厚さでは 0.5mmt、1.6mmt、2.5mmt の間には有意差がない。
- (2) しかしガラエポ基板の有無では、無しの方が残響時間が短い。これは T5 や残響振動があっても T4 のように残響振動強度が小さい（残響 II の時間圧縮データ参照）こと

から判定した。

- (3) 再振動開始時点を1次反射波の振動開始時点から測定すると600nsecから800nsecとかなり短い時間に発生している。

D. 考察

- 各プローブの性能を規格化して判定するため $t(\text{delay})/V_{pp}$ で比較するとP/E法でもスルー法でも外筒 SUS304 プローブの方が残響時間が長い。
- これから推定されることは超音波振動子材

料と音響インピーダンスの近い材料が残響振動が少ないと推定される。

- さらに再振動の発生をなくするには超音波吸収効果が高い低硬度のバックング材の効果が期待できる。

E. 結論

ガラス基板有無の残響時間差は確実にある。しかしさらに外筒の材料、及びバックング材の最適化により効果が得られる見込みが得られた。

送信側プローブ C とした場合の THRU 法による各サンプルの測定データまとめ（間隔 3cm）

サンプル NO	T1	T2	T3	T4-1	T5	T6	T7	B3	B4	L1	T4-2	T4-3
残響時間 $t(\text{delay})$ (μsec)	1.2	1.1	1.1	1.1	0.7	1.7	1.8	0.9	0.6	1.1	1.3	1.2
P/E法での 残響時間 $t(\text{delay})$ (μsec)	1.8	1.6	2.0	2.0	1.8	1.4	1.6	2.0	3.5	2.5	-	-
$t(\text{delay})/V_{pp}$ (V/sec)	0.9	0.9	1.3	1.2	0.8	1.8	0.9	2.1	1.7	3.6	1.2	1.2
P/E法での $t(\text{delay})/V_{pp}$ (V/sec)	0.48	0.57	0.66	0.59	0.62	1.49	0.80	0.75	1.15	0.94	-	-
再振動有無	有	有	有	有	なし	(有)	(有)	なし	なし	有	有	有

[2] 光音響測定における超音波プローブの性能

1] 音速測定比較

A. 研究目的

光音響計測における超音波プローブの評価としては今まで一般的な超音波特性評価である水中でのP/E法やスルー法で行ってきた。

超音波プローブを直接生体に接触しレーザー光を照射する光音響計測でのプローブの評価を行なうにあたり、まず基本的な音速測定の比較をする。

B. 研究方法

評価での測定用試料は、生体組織にくらべ製作のしやすさから高分子材料としてシリコンラバ

ーを使用した。

シリコンラバー中の音速（超音波）を水中での超音波P/E法により測定したものと、透過法による光音響測定で応力波（超音波）の伝播速度（音速）を測定し比較した。

光音響測定での透過法としてレーザー光照射を超音波プローブ設置面と試料を挟んで反対側から、また超音波プローブの中心軸にあわせて照射する方法をとった。

C. 研究結果

<水中超音波P/E法による音速測定>

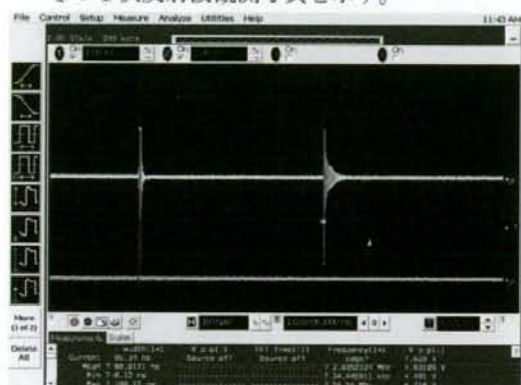
① 測定方法について

PZT 超音波トランスデューサーと SUS 反射板との間に被測定物を挟んでトランスデュー

一サから送信された超音波が試料を通過して SUS 反射板で反射してくる 1 次反射波の送信から受信までの時間 T を測定する。

なお試料はポリスチレンディッシュに入れているのでこの容器の厚さに関する波形を除き、正味の試料の中の通過時間を測定する。以下に具体的な方法を示す。

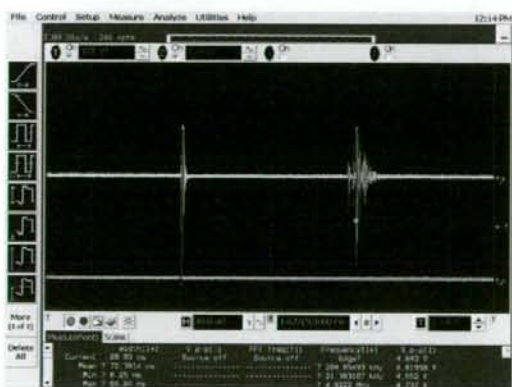
- (1) 超音波トランスデューサ と SUS 反射板を間隔 3cm で水中に置き測定する。
 その 1 次反射波観測写真を示す。



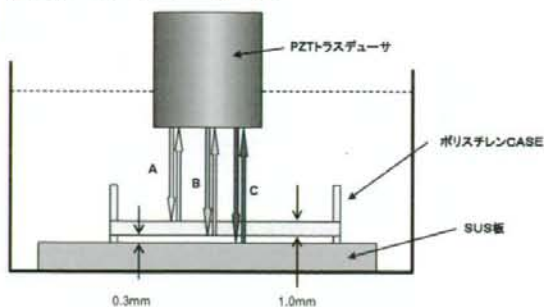
T=40 μ sec Vpp=4.6V

水中の音速 1540m/sec から T=40 μ sec は妥当な値である。

- (2) 35ml ポリスチレン CASE を SUS 板上に密接し同様に測定する。



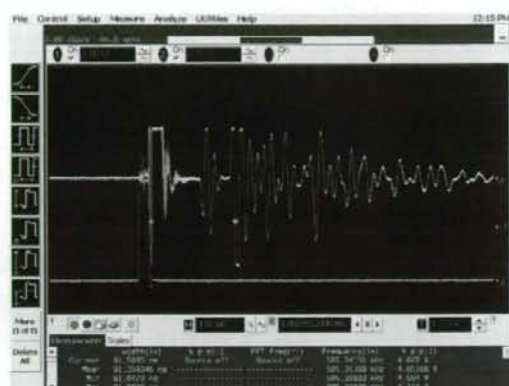
T=38 μ sec Vpp=4.6V



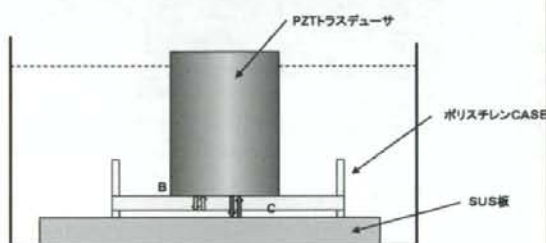
(2)の波形について説明する。(上図を参照)

- 写真の反射波形の最初に現れるピークはポリスチレン CASE 内側底面での反射波形（上図 A で示す）、次にケースの底が 0.3mm 程度浮いているため CASE 外側底面で反射された波形（上図 B で示す）が現れる。その次に SUS 表面での反射波形（上図 C で示す）が現れる。この C の波形の Vpp が一番大きな値で観察される。
- その後 A,B,C の各反射波形が、多くの境界面で複雑に反射され PZT トランスデューサに届いた音波だけが複雑な反射波形の繰り返しとして現れている。
- 1 次反射波形、最初のピーク波形の遅れ時間は 38 μ sec であり、CASE なしの場合より約 2 μ sec 早くなっている。これは SUS 板より CASE 内側底面が約 1.3mm トランスデューサ側に近く、水中の音波伝播速度 1540m/sec から計算して、往復 2.3mm の伝播時間 約 1.7 μ sec に相当した時間だけ早くなっていることに対応している。
- また SUS 表面からの反射波形のピーク Vpp は CASE 有無にかかわらず 4.6V であることより、CASE 材内部での超音波の減衰がほとんど無いことを示している。これより以降の観測データの解釈の上では、CASE 内部での音波の減衰は無視している。

(3) トランスデューサを CASE に密接



$T = 1.4 \mu\text{sec}$



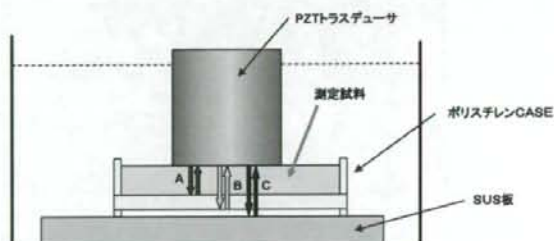
(3)の波形について説明する。

- トランスデューサを CASE に密接しているため、CASE 内側底面での反射波形はない。観測波形の最初のピークは CASE 外側底面、すなわち B で示される反射波形である。次の波形は C で示される SUS 表面での反射波形で V_{pp} が最大である。その後の波形は(2)に説明したとおり。
- ここでも V_{pp} は 4.6V で(2)と同じ。

以上の波形の見方から、シリコンラバーを CASE に充填した場合の P/R 法での超音波反射波形を観測する。

② シリコンラバー内の音速の測定

上記①での装置で、CASE の代わりに測定用のシリコンラバーを充填した CASE を SUS 板の上に置き①(2)と同様の方法で P/E 法での超音波反射波形を測定する。



A に対応する伝達時間遅れが測定試料の中の超音波の伝達時間 T となる。

また測定試料の厚さを t とすると伝達距離は $2t$ であるので、 T と $2t$ から伝達速度は $C = T/2t$ から求められる。

以下に 3 種類のシリコンラバーの各試料での反射波波形と A の伝達時間 T を求めたものを示す。各シリコンラバーの特性を表にした。なお例えば 1.26mm 品とあるのは、ラバーの CASE 内での厚さが 1.26mm であることを示している。

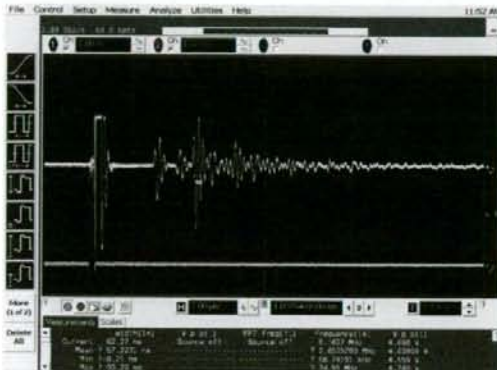
使用したシリコンラバーの特性

品名	KE-1204	KE-1031	KE-1281	KE-1283
硬化タイプ	付加	付加	付加	
ワンポイント	UL 認定品 低分子シロキサン 低減品	透明・接着	UL 認定品・低粘度 低分子シロキサン 低減品	
外観	性状	液状	液状	液状
	色相	A : 赤褐色 B : 灰白色	A/B : 無色透明	A : 黒色 B : 灰白色
粘度	Pa · s	A1 : B0.7	A2 : B1	

密度 23C g/cm ³	1.54	0.97	1.37	
硬化条件	15min/100°C	2hr/80°C	1hr/100°C	
硬さ ティモメータA	70	20	20	≪20
引張り強さ MPa	3.5	0.4	1.0	
tan δ 50Hz	1×10 ⁻³	1×10 ⁻³	1×10 ⁻³	1×10 ⁻³
配合比率	100:100	100:100	100:100	100:100

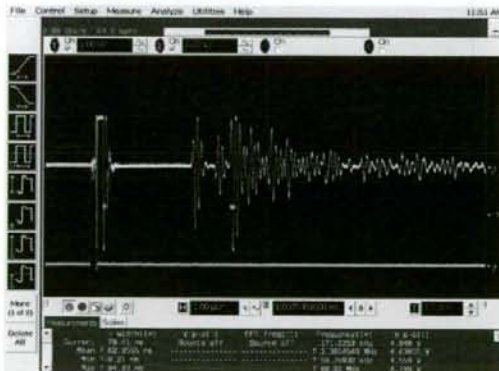
<KE-1031>

1.26mmt 品



T = 3.0 μ sec

2.05mmt 品



T = 4.8 μ sec

2.74mmt 品



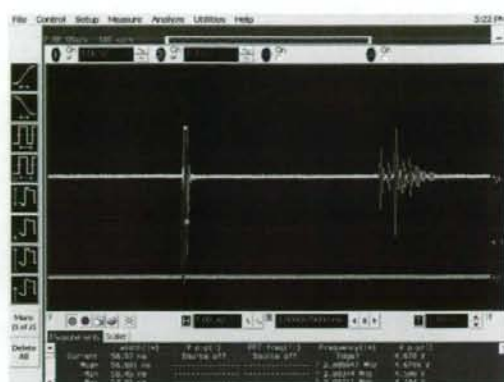
T = 6.0 μ sec

7.65mmt 品



T = 15.0 μ sec

11.7mmt 品

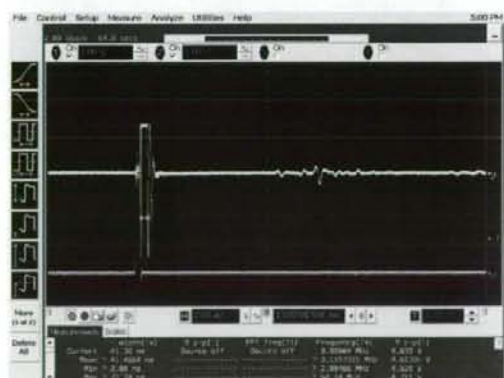


T=23.0 μ sec

<KE-1204>

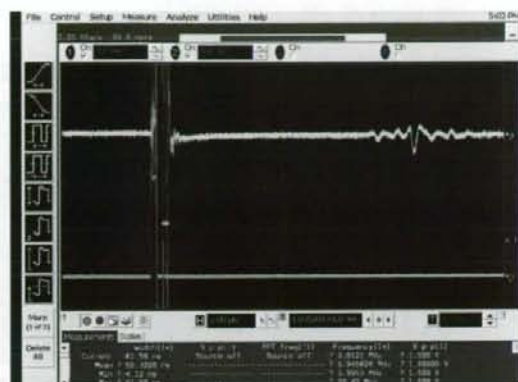
KE-1204 では測定試料中での超音波の吸収が大きく、測定する反射波形の Vpp を大きく得られなかったが同様の方法で測定した。

3.2mmt 品



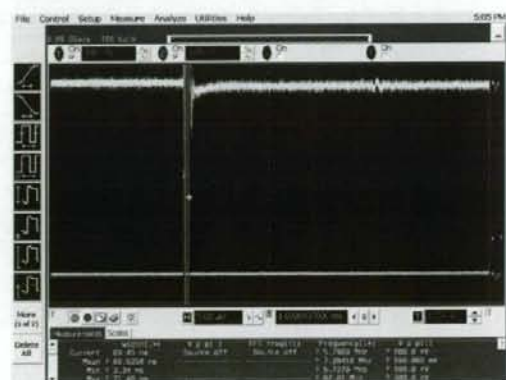
T=7.0 μ sec

4.8mmt 品



T=10.0 μ sec

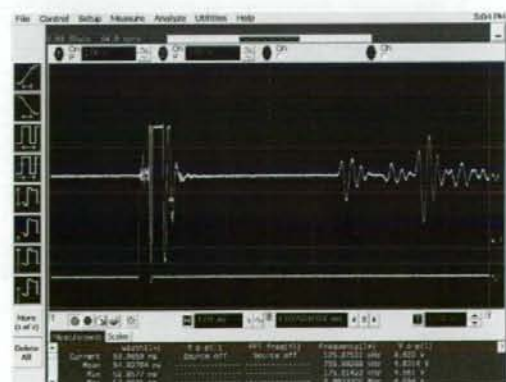
9.8mmt 品



T=22.0 μ sec

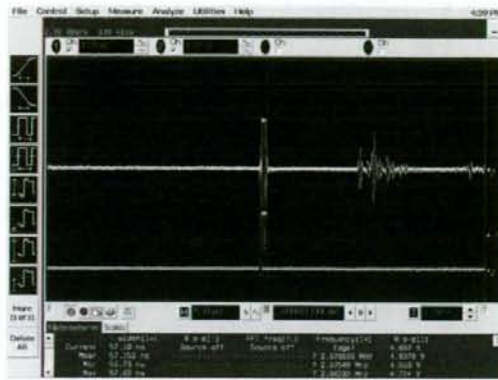
<KE-1283>

2.9mmt 品



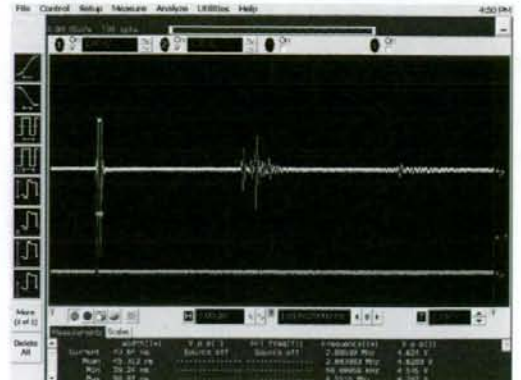
T=4.5 μ sec

7.0mm 品



T = 11.5 μ sec

9.2mm 品



T = 16.5 μ sec

まとめて伝達速度を求めた結果を表に示す。

試料名	厚さ t 伝播方向 (mm)	往復伝播 時間 T (μ sec)	伝播速度 C = 2t/T (x10 ³ m/sec)	重量 (g)	体積 (cm ³)	密度 ρ (x10 ³ kg/m ³)	音響インピーダンス Z = ρ · C (x10 ⁶ kg/m ² sec)
KE-1031	1.26	3.0	0.84	1.5	1.21	1.24	1.04
KE-1031	2.05	4.8	0.85	2.3	1.97	1.16	0.98
KE-1031	2.74	6.0	0.91	3.0	2.63	1.14	1.02
KE-1031	7.65	15.0	1.02	16.2	16.2	1.00	0.98
KE-1031	11.7	23.0	1.01	24.2	24.8	0.97	0.98
KE-1204	3.2	7.0	0.91	4.6	3.07	1.49	1.36
KE-1204	4.8	10.0	0.96	15.5	10.2	1.52	1.46
KE-1204	9.8	22.0	0.89	30.6	20.8	1.47	1.31
KE-1283	2.9	4.5	1.29	2.4	2.8	0.86	1.11
KE-1283	7.0	11.5	1.22	13.1	14.8	0.88	1.07
KE-1283	9.2	16.5	1.11	21.5	19.5	1.10	1.22

水中の超音波の伝播速度は 1.54×10^3 m/sec、水の音響インピーダンスは 1.54×10^6 kg/m²sec である。

- (1) 3種類のシリコンラバーとも 超音波の伝播速度は水中より遅い値である。
- (2) 音響インピーダンスは $1 \sim 1.5 \times 10^6$ kg/m²sec

程度で、ほぼ水と同等である。

- (3) V_{pp} と試料厚さに関して下表にまとめた。

試料名	厚さ t 伝播方向 (mm)	Vpp (V)
KE-1031	1.26	2.2
KE-1031	2.05	3.7
KE-1031	2.74	3.6
KE-1031	7.65	3.6
KE-1031	11.7	2.0
KE-1204	3.2	0.15
KE-1204	4.8	0.05
KE-1204	9.8	0.02
KE-1283	2.9	1.4
KE-1283	7.0	1.2
KE-1283	9.2	1.3

- KE-1204 のみが厚さとともに Vpp が低くなっている。
- これは他の試料ではこの程度の厚さでは超音波減衰しないことを示し、これはシリコンラバー自身の特性によるものと推定される。

<KE-1283 追加>

9.25mmt 品



T = 16.5 μ sec

6.15mmt 品



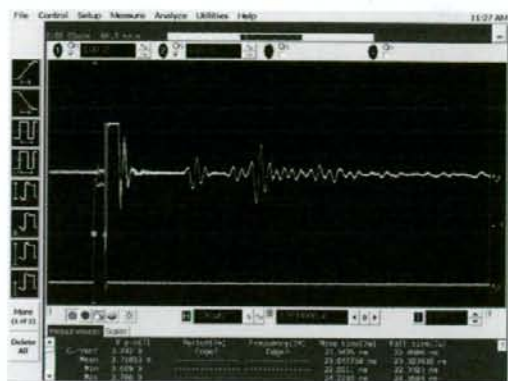
T = 11.0 μ sec

2.10mmt 品



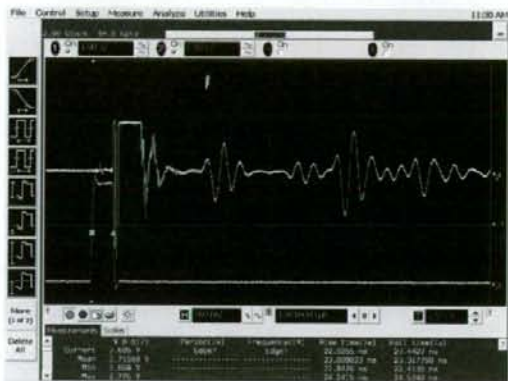
T = 4.3 μ sec

0.90mm 品



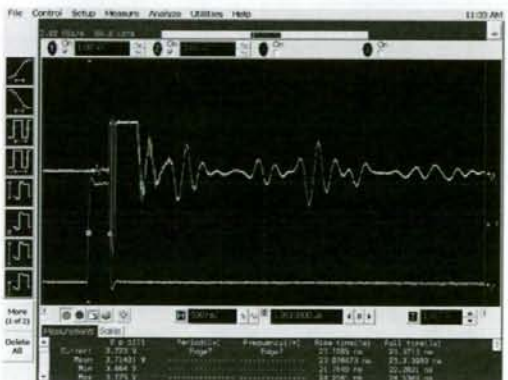
T = 1.8 μ sec

0.50mm 品



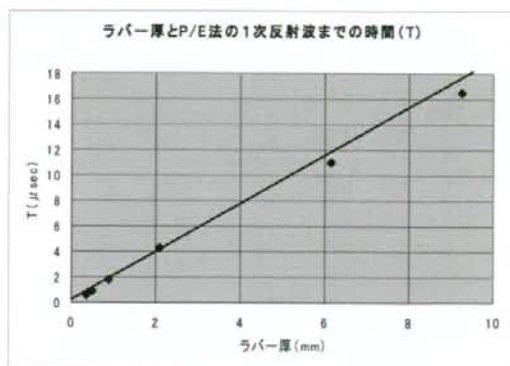
T = 0.9 μ sec

0.35mm 品



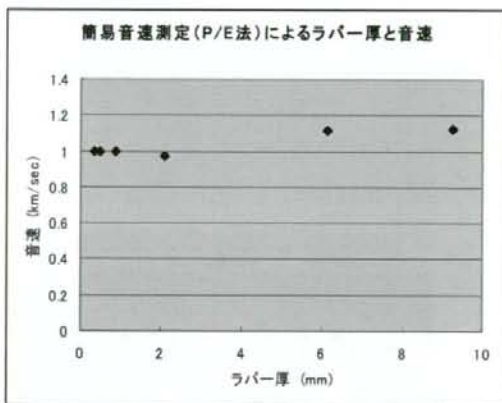
T = 0.6 μ sec

上記測定結果を以下にグラフ化した。



1次反射波までの伝播時間 T はラバー厚が薄い場合までも直線的比例関係にある結果が得られた。

この伝播時間 T から伝播速度 (音速) が求められ、その結果を以下にグラフ化した。(縦軸をリニアとしたものとセミログのグラフで示した)



上記の結果からシリコンラバーKE-1283の音速は約 1km/sec 程度である。

<光音響透過法による音速測定>

① 測定方法について

シリコンラバーをポリスチレンディッシュに作製した被評価物のディッシュ裏面からレーザー光を照射し、ラバー表面に超音波プローブ当てて(透過法)1次応力波を測定した。プローブは 10mm φ のアクリルパイプ品 (NO.7) 及び 6mm φ の SUS パイプ品プローブ C を使っ