

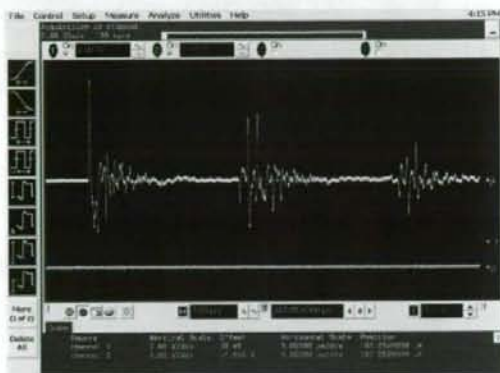
た。

測定波形を以下に示すが、伝播時間測定は応力波の受波波形の1次受波と2次受波（反射波）の各振動波形群の中で波高値  $V_p$  が一番高いものの時間間隔を応力伝播時間  $t_p$  とした。

② シリコンラバー内の音速の測定

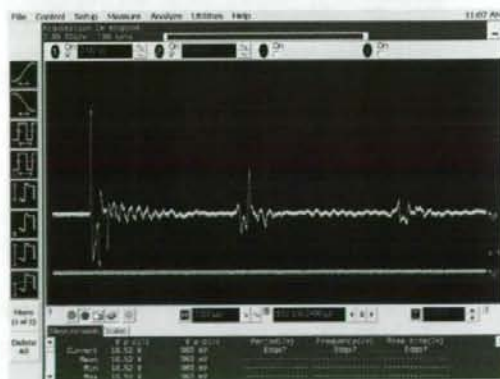
ラバー厚さ 9.25mm 品

(Probe No.07)



$t_p = 18 \mu \text{ sec}$      $V_p = 6.8 \text{ V}$

(Probe C)



$t_p = 18.0 \mu \text{ sec}$

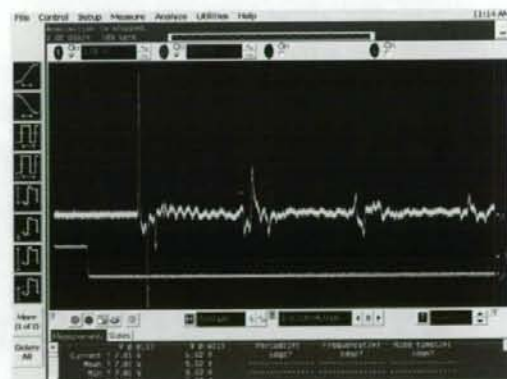
ラバー厚さ 6.15mm 品

(Probe No.07)



$t_p = 12.5 \mu \text{ sec}$      $V_p = 1.6 \text{ V}$

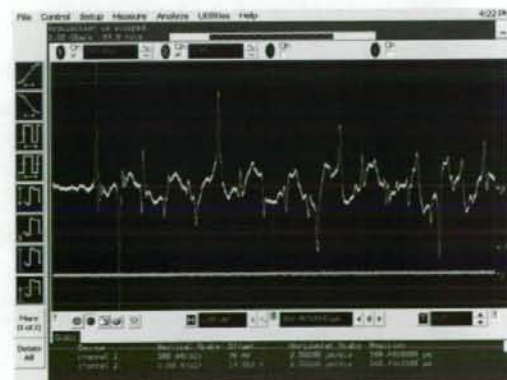
(Probe C)



$t_p = 13.0 \mu \text{ sec}$

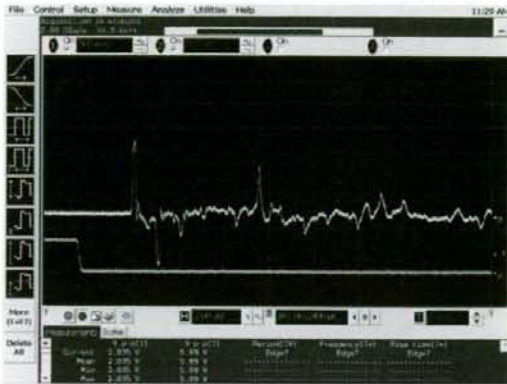
ラバー厚さ 2.10mm 品

(Probe No.07)



$t_p = 5.5 \mu \text{ sec}$      $V_p = 0.8 \text{ V}$

(Probe C)



tp=5.5 μ sec

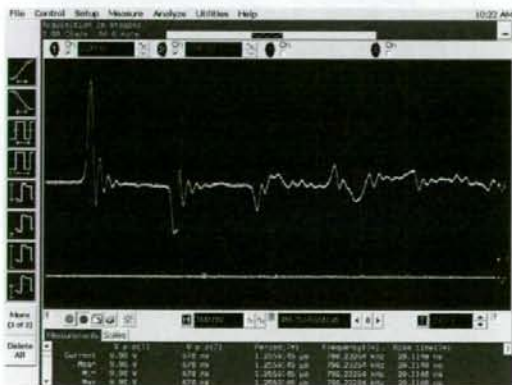
ラバー厚さ 0.90mm 品

(Probe No.07)



tp=0.90 μ sec Vp=>7V

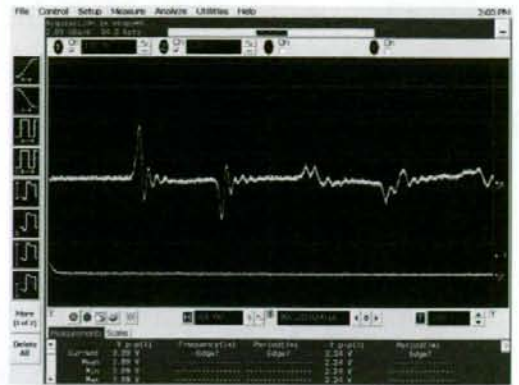
(Probe C)



tp=0.95 μ sec

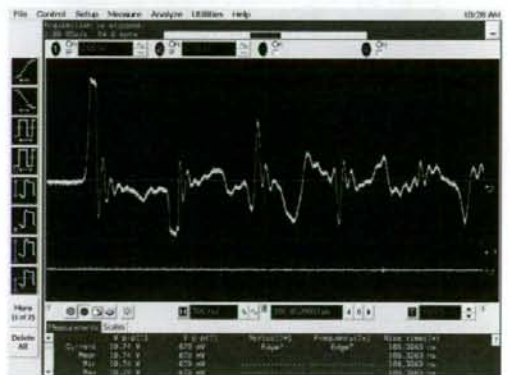
ラバー厚さ 0.50mm 品

(Probe No.07)



tp=1.0 μ sec Vp=1.8V

(Probe C)



tp=1.0 μ sec

ラバー厚さ 0.35mm 品

(Probe No.07)



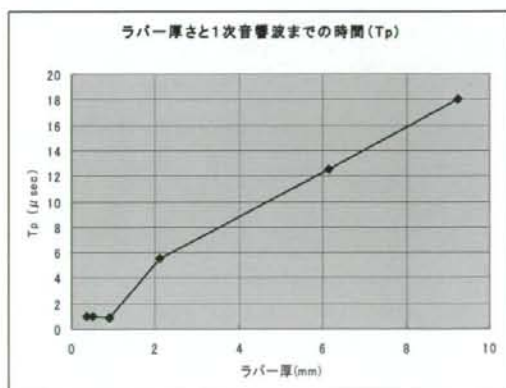
tp=1.0  $\mu$  sec Vp=2V

(Probe C)

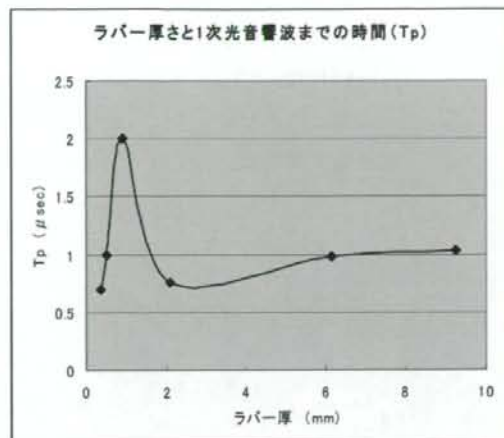


tp=1.0  $\mu$  sec

上記での測定結果を下記グラフに示す。



またこのデータより計算した音速データをグラフ化して示す。



- 光音響透過法ではtpはラバー厚さが2.1mmより厚いところでは厚さとほぼ直線関係であり、それより薄く1mm以下になるとtpが変わらない。これは1mm以下になると応力波の受波波形に規則性がなくなってしまい、はっきりしたVpを選べなくなってきているためである。
- 上記の傾向は2本のプローブNO.07とProbe Cでほとんど変わらずプローブ間での差はなかった。
- 音速の計算結果はラバーの厚い試料ではほぼ1km/secであり超音波P/E法での値と同等であった。

#### <超音波 P/E 法と光音響法での結果比較>

- (1) 両方の測定において、音速はほぼ同じ1km/secであった。このことより水中の超音波評価によるプローブの改良要素は光音響計測においても有効であると判断した。
- (2) 今回の光音響法では試料厚さが薄くなりラバー厚さが1mm以下となるとtpが判断しにくくなる。これは光音響受信波形に周期性が無くなるためであり、この原因解明が新たな改良対策となる。  
(ただし後述するレーザー照射方法比較実験で0.35mm品までその測定は可能となった)

- (1) 超音波 P/E 法では PZT トランスデューサを使い、光音響計測では高分子ポリマー P(VDF/TrFE) を圧電素子に使用したが、この差は今回は確認していないが(2)はその理由ではない。

## 2] 光音響波測定における レーザー光照射位置による比較

### A. 研究目的

1] の報告にあるように、音響波計測での受波波形の乱れが起こる理由について、レーザー光線の照射方向を超音波プローブと同一面の並行照射（反射法）と前回と同様の裏面照射（透過法）との比較測定を行いその原因調査の解明を行なう。

#### < 先行考察・・・超音波発生領域の深さ >

以下に下図を用いて研究目的の考察を行なう。平行照射ではレーザー照射の中心軸と超音波センサーの中心軸間に距離が発生する。

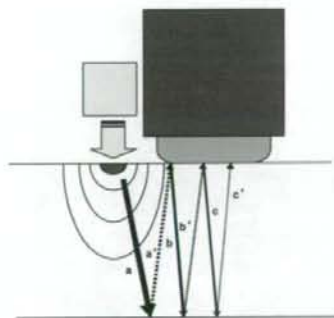
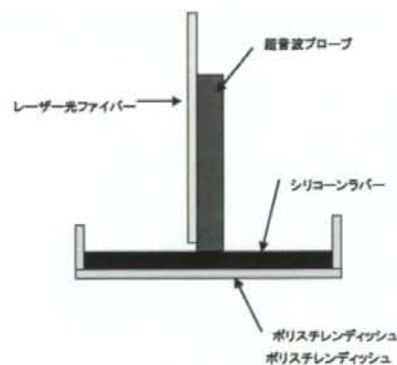
このため超音波プローブへの入力第1波は下記図面の  $a+a'$  を経由して反射してくる。一方裏面照射ではこれが  $a$  のみの経由であるのでこの差を比較する。

ここで光音響効果による応力波発生領域が試料厚さに対して無視できるほどの照射表面であるならば、並行照射と裏面照射の結果に差が出るは

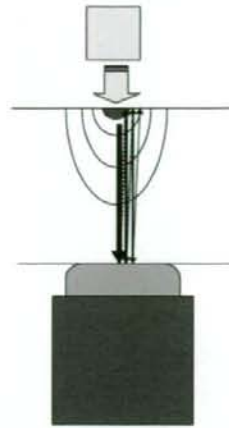
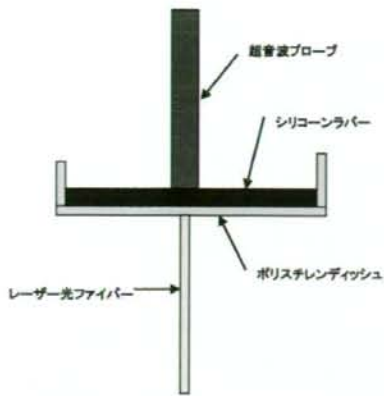
ずである。そして試料厚さが薄くなりこの応力波発生領域に近づいてくる場合は超音波受波波形が影響を受け、1] での波形乱れの原因となると仮定が成り立つ。

シリコンラバー内の音速  $f$  と応力波の発振周波数  $f$  とすると、レーザー光で熱膨張する領域の深さ  $d$  は一般に「 $d \propto v/f$ 」である。シリコンラバー中の音速は約  $1\text{km/sec}$ （前報告済み）であり、応力波の受波波形から振動周期  $T=0.1\ \mu\text{sec}$  でありこれから発振周波数を  $10\text{MHz}$  と出来るので上記式で比例定数を  $k=1$  とした場合  $d=100\ \mu\text{m}$  となる。

さてシリコンラバー内に照射するレーザー光は波長  $\lambda$  が  $355\text{nm}$ 、エネルギー密度が約  $100\ \mu\text{J}$  で測定している。Ar レーザー（波長  $\lambda$   $515\text{nm}$ ）の場合の生体への光浸透長は  $0.2\text{mm}$  とあり（近畿大学久保宇市氏資料）これより当レーザー光の浸透長  $d$  は約  $100\ \mu\text{m}$  と推定してよいと判断した。



平行照射法



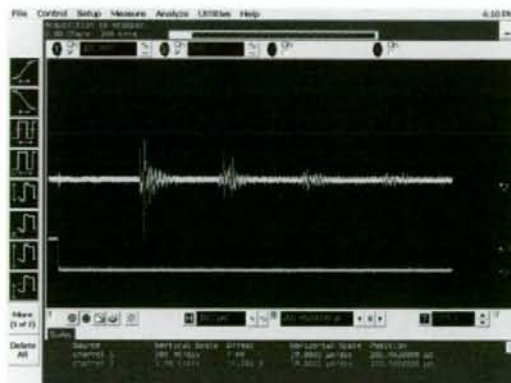
裏面照射法

## B. 研究方法

上記に説明した方法で並行照射法と裏面照射法での測定結果を比較した。試料は同じくシリコンラバーKE-1283、超音波プローブはProbeCを使用した。

### [1] ラバー厚さ 9.25mm 品

#### 平行照射



$tp(0) = 18 \mu \text{sec}$   $tp(1) = 18 \mu \text{sec}$   $Vp = 150 \text{mV}$

#### 裏面照射



$tp(0) = 8 \mu \text{sec}$   $tp(1) = 18 \mu \text{sec}$   $Vp = 8200 \text{mV}$

以下に測定写真の説明を行なう。

- (1) 緑色のラインはパルスレーザー発振装置の発振トリガーパルスのレファレンス信号である。立下りエッジでレーザーが約 5nsec 照射される。平行照射では照射面と超音波センサー面が同一であるためプローブのセンサーにこの時間のレーザー光によるノイズ信号があらわれている。
- (2) レーザー照射からの 1 次音響波受信までの遅れ時間  $tp(0)$  は平行照射では約  $18 \mu \text{sec}$ 、裏面照射では約  $8 \mu \text{sec}$  であり、上記に示した a, a' の経路についての裏付けが取れる。

(3) また平行照射では1次音響受信波と2次音響受信波形の遅れ時間  $tp(1)$  が  $18 \mu\text{sec}$  であり、これは上記のレーザー照射時からの1次音響受信波形の遅れ時間  $tp(0)$  とほとんど同じであることより、レーザー光照射による音響波発生部位は表面から  $100 \mu\text{m}$  程度であることを示している。

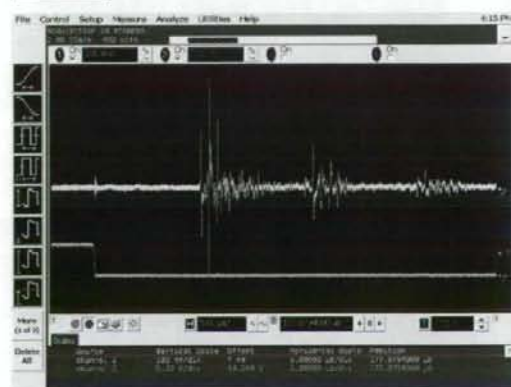
(4) 受波の波高値  $V_{pp}$  は平行照射と裏面照射の両者に大きな差がある。 裏面照射では超音波の受圧面がレーザー光の照射軸直下であり、応力波が垂直に超音波センサー受圧面に入射することにより大きな応力がセンサーに伝えられるが、平行照射では受圧面が照射軸に対して横にあるため応力波の受圧面への入射角が垂直からずれるためと考えられる。すなわち照射軸と超音波プローブの軸が離れるほど裏面照射の  $V_{pp}$  は低下すると推定される。

### C. 研究結果

以下に厚さの異なる試料についての測定結果を示す。

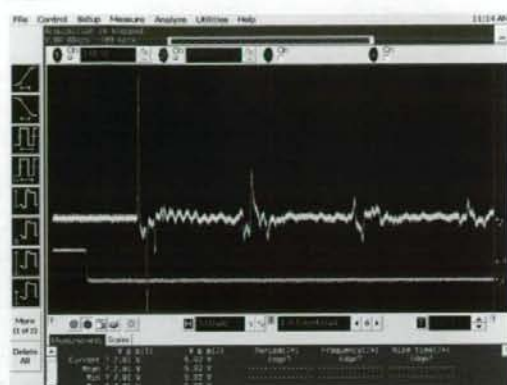
#### [2] ラバー厚さ 6.15mm 品

##### 平行照射



$tp(0) = 12 \mu\text{sec}$   $tp(1) = 12 \mu\text{sec}$   $V_p = 360\text{mV}$

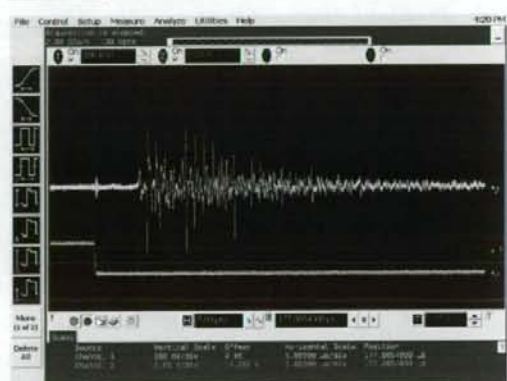
##### 裏面照射



$tp(0) = 6 \mu\text{sec}$   $tp(1) = 12.5 \mu\text{sec}$   $V_p = 4800\text{mV}$

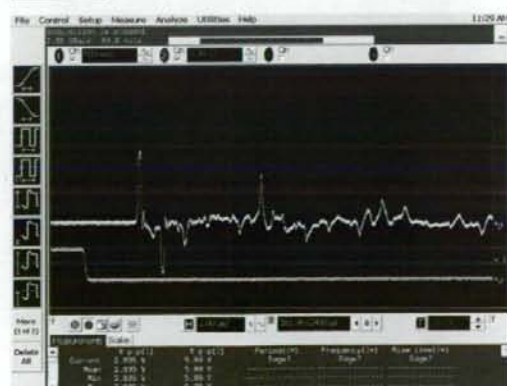
#### [3] ラバー厚さ 2.10mm 品

##### 平行照射



$tp(0) = 5 \mu\text{sec}$   $tp(1) = 5 \mu\text{sec}$   $V_p = 200\text{mV}$

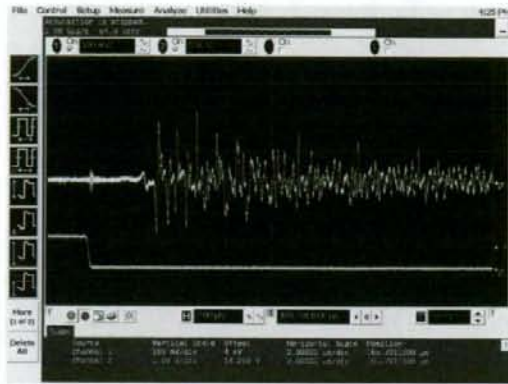
##### 裏面照射



$tp(0) = 2.2 \mu\text{sec}$   $tp(1) = 5.5 \mu\text{sec}$   $V_p = 1200\text{mV}$

[4]ラバー厚さ 0.90mm 品

平行照射



$tp(0) = 2.2 \mu\text{sec}$   $tp(1) = 3 \mu\text{sec}$   $V_p = 230\text{mV}$

裏面照射



$tp(0) = 1.1 \mu\text{sec}$   $tp(1) = 2.7 \mu\text{sec}$   $V_p = 6200\text{mV}$

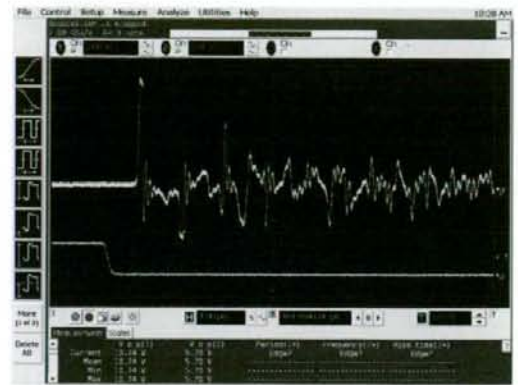
[5]ラバー厚さ 0.50mm 品

平行照射



$tp(0) = 1.8 \mu\text{sec}$   $tp(1) = 1.8 \mu\text{sec}$   $V_p = 270\text{mV}$

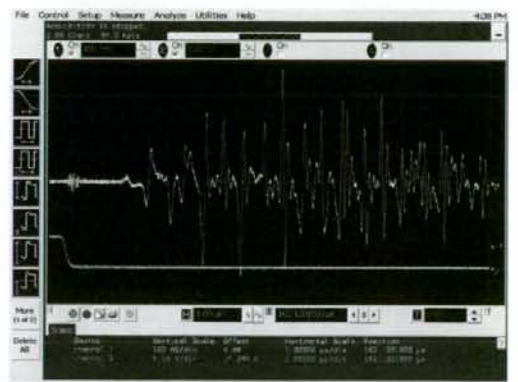
裏面照射



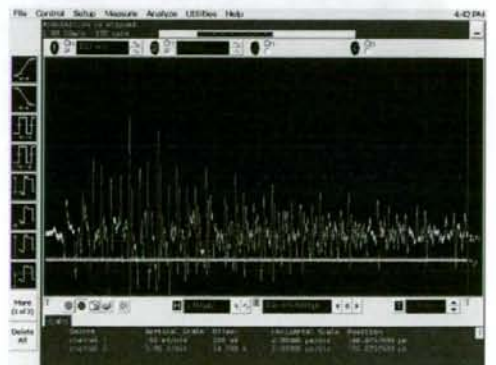
$tp(0) = 0.8 \mu\text{sec}$   $tp(1) = 1.8 \mu\text{sec}$   $V_p = 6800\text{mV}$

[6]ラバー厚さ 0.35mm 品

平行照射



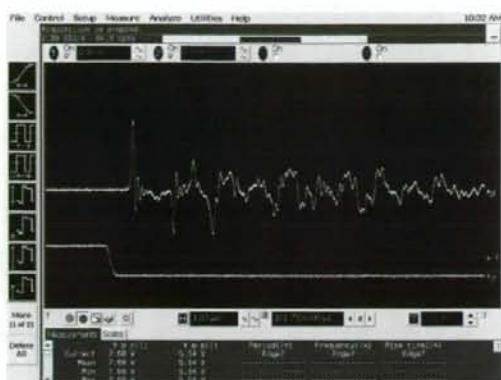
$tp(0) = 1.2 \mu\text{sec}$   $V_p = 380\text{mV}$



$tp(1) = 1.3 \mu\text{sec}$   $V_p = 400\text{mV}$



裏面照射



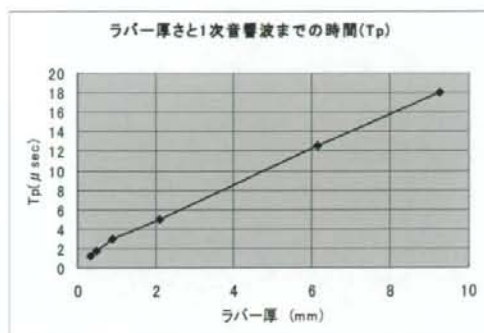
$tp(0) = 0.6 \mu \text{ sec}$   $tp(1) = 1.3 \mu \text{ sec}$   $Vp = 4500 \text{ mV}$



$tp(1) = 1.4 \mu \text{ sec}$   $Vp = 4500 \text{ mV}$

- (1) 上記の 6.15mm 品、2.10mm 品、0.90mm 品、0.50mm 品、0.35mm 品のいずれもが 9.25mm 品と同じく  $tp(0)$  と  $tp(1)$  の関係から、レーザー光による誘起音響波が発生している領域はシリコンラバーのごく表面であると推定できる結果である。
- (2) 裏面照射ではシリコンラバーの厚さが 0.35mm 品までほぼ  $tp(0) = 1/2 * tp(1)$  の関係が成り立っている。  
1] で報告した音速測定ではレーザー光照射タイミングの観測がなされなかったため、 $tp(1)$  が判断できにくい。よって、計測に誤りが出たものであると判断できた。
- (3) 今回の平行照射法で測定した  $tp(0)$  を  $Tp$  とし

てラバー厚さの関連グラフを下図に示す。ほぼ直線に近づいている。しかしこれは  $tp(0)$  を代用したことによるものであり、やはり 1mm 以下の厚さでは測定困難である。



D. 考察

- 試料厚さがより薄くなると平行照射において  $tp(0)$  と  $tp(1)$  に差が出てきているがこの原因は  $tp(1)$  が正確に読み取ることができないためである。この傾向は裏面照射より激しい。並行照射では  $Vp$  値が低いため 100mV/Div. レベルの観測をしていることも1因であるが、音響波の1サイクルの振動が終わらない前に次の反射音響波が来るため、振動波形が重なり合ってしまうためであると推定している。
- 1mm 以下の厚さでは超音波センサーの残響特性が影響していると考えられる。超音波スルー法ではこの残響時間は  $1 \mu \text{ sec}$  以下であり、1mm 以下の厚さでは影響がでるものと推定している。
- しかし条件により変わるが、残響波形ピーク値は数 10mV であるので、残響特性が影響しているとはいいいにくい。それ以外の影響が検討されるべきである。

レーザー誘起応力波はレーザー光線の中心から平面状の広い範囲に拡大しつつ伝播するので、反射波は距離的に異なった場所で反射されてくるはずで、このため受波面への反射波は時間遅れの

波形も振動として入力され残響効果を示して影響が発生しているのではないかと更に検討する。

### 3] 超音響測定における振動波形解明

#### A. 研究目的

前報告のごとく試料の厚さが薄くなると試料の境界面で反射した超音波波形の振動期間が終わらないうちに、次の反射サイクルの振動が現れると推定される。このため各サイクル間で位相が一致した場合には その振動の強度  $V_p$  (または  $I_p$ ) が両サイクルの波形が重畳された波形となると予想される。これが実際に同一周期の  $t_p$  の位置で本来の最大ピーク電圧  $V_p$  が観察されない理由と考えられる。この状態が極端な場合は全体の波形が汚くなり、粘弾性特性評価のための緩和時間  $\tau$  の測定が不能になる。

この振動期間が長くなる原因の究明を行なう。

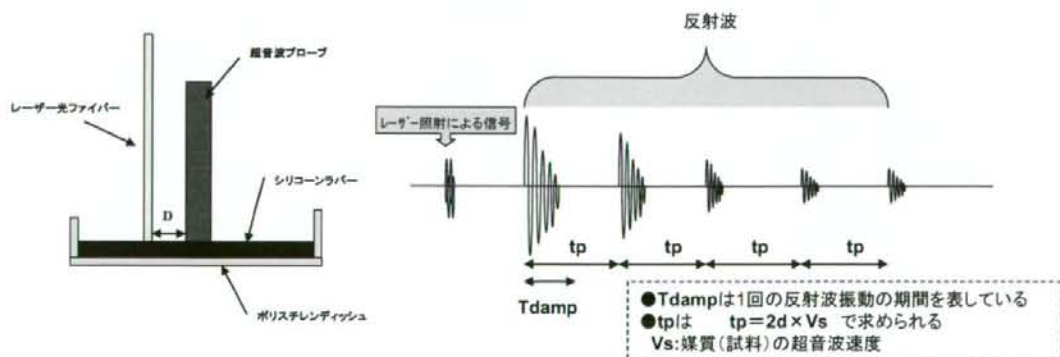
#### B. 研究方法

##### <Tdamp の説明>

振動波形ではオシロスコープでピーク電圧が現れた後、徐々にピーク値の低い振動が続き最後には GND レベルになる。その後次の反射波の振動が現れこの繰り返しで最後には反射波の信号が無い状態になる。(ただし試料厚さが十分大きいとき)

この「徐々にピーク値が低くなり GND レベルになる」までの時間を Tdamp とする。

(下図 Tdamp 参考)



<レーザー照射位置と超音波プローブ間距離>


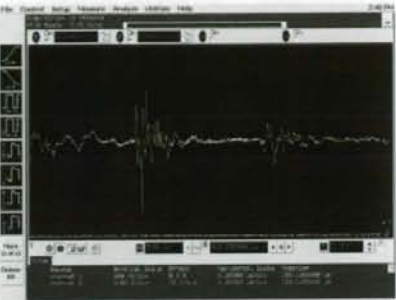
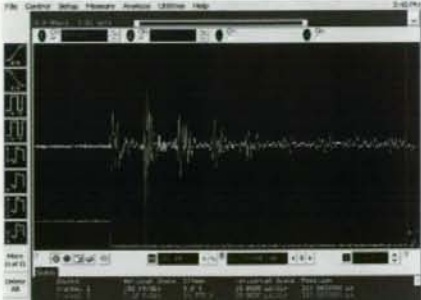

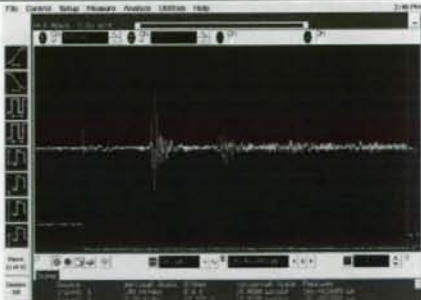

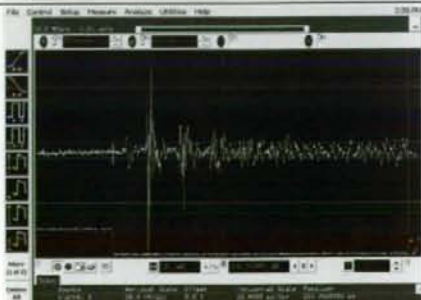
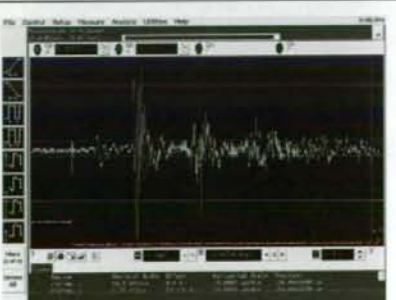
レーザー照射位置と超音波プローブ間の距離


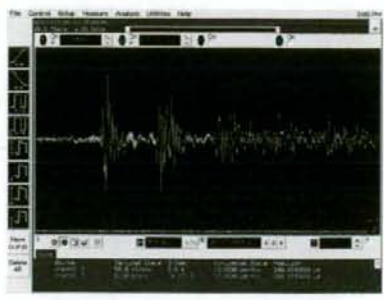
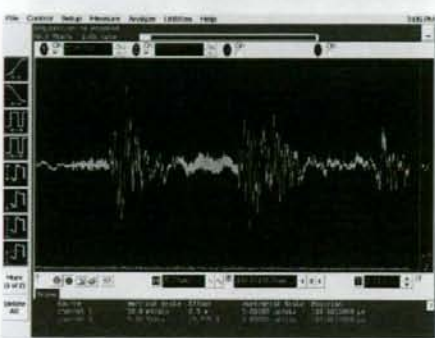
Dを変化させてTdampを測定した。

試料はシリコンラバーKE-1283 9.2mmt品

C. 研究結果

各距離での応力波受波観測写真を添付した。

D	全体波形	左の拡大波形
0mm  Vp1=300mmV Tdamp=5 $\mu$ s + $\alpha$  Tdelay=18 $\mu$ sec		
1.5mm  Vp1=250mmV Tdamp=5 $\mu$ s + $\alpha$ Tdelay=18 $\mu$ sec		
3mm  Vp1=250mmV Tdamp=5 $\mu$ s + $\alpha$ Tdelay=18 $\mu$ sec		
5mm Down  Vp1=180mmV Tdamp=5 $\mu$ s + $\alpha$ Tdelay=18 $\mu$ sec		

<p>10mm Down</p> <p><math>V_{p1}=130\text{mmV}</math>  <math>T_{\text{damp}}=5 \mu \text{ s} + \alpha</math>  <math>T_{\text{delay}}=16 \mu \text{ sec}</math></p>		
<p>10mm Down                  追加（拡大波形）</p> <p><math>V_{p1}=150\text{mmV}</math>  <math>T_{\text{damp}}=5 \mu \text{ s} + \alpha</math>  <math>T_{\text{delay}}=16 \mu \text{ sec}</math></p>		

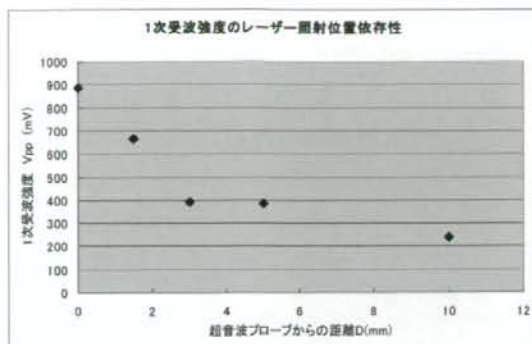
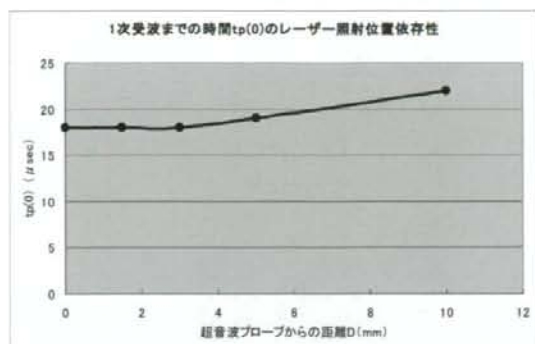
距離  $D$  を  $0\text{mm}$  から  $10\text{mm}$  まで変えて測定した結果、1次反射波の波高値  $V_{p1}$  は距離  $D$  が増加するに従い  $300\text{mV}$  から  $130\text{mV}$  と低下するが、 $T_{\text{damp}}$  は  $5 \mu \text{ sec} + \alpha$  でほとんど変わらなかった。また試料厚さに関する  $T_{\text{delay}} (=tp(0))$  のことも  $18 \mu \text{ sec}$  で変わらなかった。

#### D. 考察

- レーザー照射ポイント直下でのレーザー誘起応力波が超音波センサー受圧面に達するまでの行程  $L$  はレーザー照射位置と超音波プローブ間の距離  $D$  が大きくなればなる程長くなるので、 $T_{\text{damp}}$  も  $L$  に依存することを推定した。

最大距離  $D_{\text{max}}$  は試料厚さとほぼ等しいので行程  $L$  は最大  $\sqrt{2}$  倍長いと考えられるが、 $T_{\text{damp}}$  は  $5 \mu \text{ sec} + \alpha$  でほぼ変わらない。

- またレーザー照射から第1次反射波までの時間  $tp(0)$  と  $t(1)$  とも  $D$  が変わっても変化しないことから、応力波伝播行程は上記推定とは異なっているものと推定する。ただし現在不明である。
- 超音波が球面状に伝播する場合でも反射波はその中心行程は上記と同じと考えられるのでこれでも説明できない。
- 以上から、 $T_{\text{damp}}$  は試料自体の性質に起因する可能性を調査する。



<評価試料の性質による Tdamp 差>

試料としては既報の3種類のシリコンラバーで最大厚さの試料、またアクリル板、CR ゴム板、を

用いて平行照射法による光音響測定の実験結果の受波波形を比較した。

シリコンラバー	測定 1 回目	測定 2 回目
KE-1283・・・Black 9.2mm  Ip1=150mV Tdamp < 10 $\mu$ s  Tdelay tp(0) = 18 $\mu$ sec tp(1) = 18 $\mu$ sec		
KE-1031・・・THRU 11.7mm  Ip1=150mV (280mV) Tdamp < 20 $\mu$ s  Tdelay tp(0) = 22 $\mu$ sec tp(1) = 22 $\mu$ sec		
KE-1204・・・RED 9.8mm  Ip1=58mV  Tdelay tp(0) = 1 $\mu$ sec tp(1) = 5 $\mu$ sec		

各種シリコンラバーの測定結果から

- (1) KE-1283 と KE-1031 は Tdamp や反射波の遅れ時間 Tdelay を測定できるが RED の KE-1204 では 9.8mmt の厚さであるにもかかわらず、KE-1283 の厚さが 1mmt 以下と同様に tp(0) は読み取りにくく、また Tdamp も測定できない。

- (2) 強いて読むと RED の KE-1204 では Tdelay は tp(0)=1 $\mu$ sec、tp(1)=5 $\mu$ sec であり、他のラバーの約 20 $\mu$ sec 後と大きな違いがある。

以下にこれら 3 種類のシリコンラバーの各特性を再び表に示す。

また音速測定報告での結果表も示す。

シリコンラバーの各特性

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	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	A : 黒色 B : 灰白色	
粘度	Pa·s	A : 6/B : 4	A1 : B0.7	A2 : B1		
密度	23C g/cm <sup>3</sup>	1.54	0.97	1.37		
硬化条件		15min/100°C	2hr/80°C	1hr/100°C		
硬さ	デュロメータ A	70	20	20	≪20	
引張り強さ		MPa	3.5	0.4	1.0	
tan $\delta$	50Hz	1 $\times$ 10 <sup>-3</sup>	1 $\times$ 10 <sup>-3</sup>	1 $\times$ 10 <sup>-3</sup>	1 $\times$ 10 <sup>-3</sup>	
配合比率		100:100	100:100	100:100	100:100	

音速測定結果

試料名	厚さ t 伝播方向 (mm)	往復伝播 時間 T ( $\mu$ sec)	伝播速度 C=2t/T ( $\times$ 10 <sup>3</sup> m/sec)	重量 (g)	体積 (cm <sup>3</sup> )	密度 $\rho$ ( $\times$ 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	音響インピーダンス Z= $\rho \cdot C$ ( $\times$ 10 <sup>6</sup> kg/m <sup>2</sup> sec)
KE-1031(THRU)	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(RED)	3.2	5.6	1.14	4.6	3.07	1.49	1.69
KE-1204	4.8	8.6	1.11	15.5	10.2	1.52	1.65
KE-1204	9.8	20.6	0.95	30.6	20.8	1.47	1.39
KE-1283(Black)	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

- (3) 3 種類のシリコンラバーでは硬度に目立つ差が上げられる。しかし Tdamp との関連については明確な断言は出来ない。  
 (4) また 3 種類のシリコンラバーの超音波伝播速

度は上表のごとく 0.95~1.11 $\times$ 10<sup>3</sup>m/sec であり大きな差が無い。

- (5) しかし音響インピーダンスは RED の KE-1204 は他より確実に高い値を示している。

⇒これより  $T_{damp}$  のひとつの要因には音響インピーダンスが考えられる。

次にラバー以外の試料の測定結果を示す。

その他試料	左の時間軸拡大	
Acryl Thin 3mmt $I_{p1}=100mV$ (280mV)  $T_{delay}$ $tp(0)=2\mu sec$ $tp(1)=2\mu sec$		
Acryl Thick 9.5mmt $I_{p1}=110mV$ (190mV)  $T_{delay}$ $tp(0)=1\mu sec$ $tp(1)=7\mu sec$		
CR ゴム Thick 3mmt $I_{p1}=180mV$  $T_{delay}$ $tp(0)=1\mu sec$ $tp(1)=4.5\mu sec$		

前出の報告書より P/E 法による音速測定から音響インピーダンス計算結果をしめす。

試料名	厚さ $t$ 伝播方向 (mm)	往復伝播 時間 $T$ ( $\mu sec$ )	伝播速度 $C=2t/T$ ( $\times 10^3 m/sec$ )	重量 (g)	体積 ( $cm^3$ )	密度 $\rho$ ( $\times 10^3$ $kg/m^3$ )	音響インピーダンス $Z=\rho \cdot C$ ( $\times 10^6 kg/m^2sec$ )
Acryl Thin	3	2.5	2.4			1.49	3.57
Acryl Thick	9.5	7.5	2.5			1.49	3.72
CR ゴム Thick	3	3.7	1.62			1.15	1.86

(1) 上記結果からアクリル板、CR ゴム板とも  $tp, T_{damp}$  の測定ができない波形である。アクリル板の 3mmt と 9.5mmt では 試料厚さにほぼ比例してそれぞれ  $tp(1)$  は  $2\mu sec$  と 7

$\mu sec$  と読取ることができる。しかし  $tp(0)$  はいずれも  $2\mu sec, 1\mu sec$  で厚さと関連しない。また CR ゴム板では  $V_p$  が 2 個しか観察されないが、 $tp(1)$  は  $4.5\mu sec$  とすることができ

る。これらの値の意味は未解析である。

- (2) 上表からアクリル板、CR ゴム板ともシリコンラバーに比べて超音波伝播速度は 1.5 倍から 2.5 倍速い。また音響インピーダンス値もシリコンラバーに比べ KE-1283 と同等か 3 倍以上高い値を示している。

以上の結果から 超音波伝播速度が速く、音響インピーダンスの高い試料では振動波形が不規則になり易いのではないかと推定される。

続いて生体に一番近い試料としてゼラチン (Gelatin) を評価した。

まづ前報告と同様の音速測定結果を下表に示す。ゼラチン (Gelatin) はシリコンラバーより伝播速度が速く、音響インピーダンスが高いことが確認された。これより音響波受信波形はあまりきれいではないと推定される。

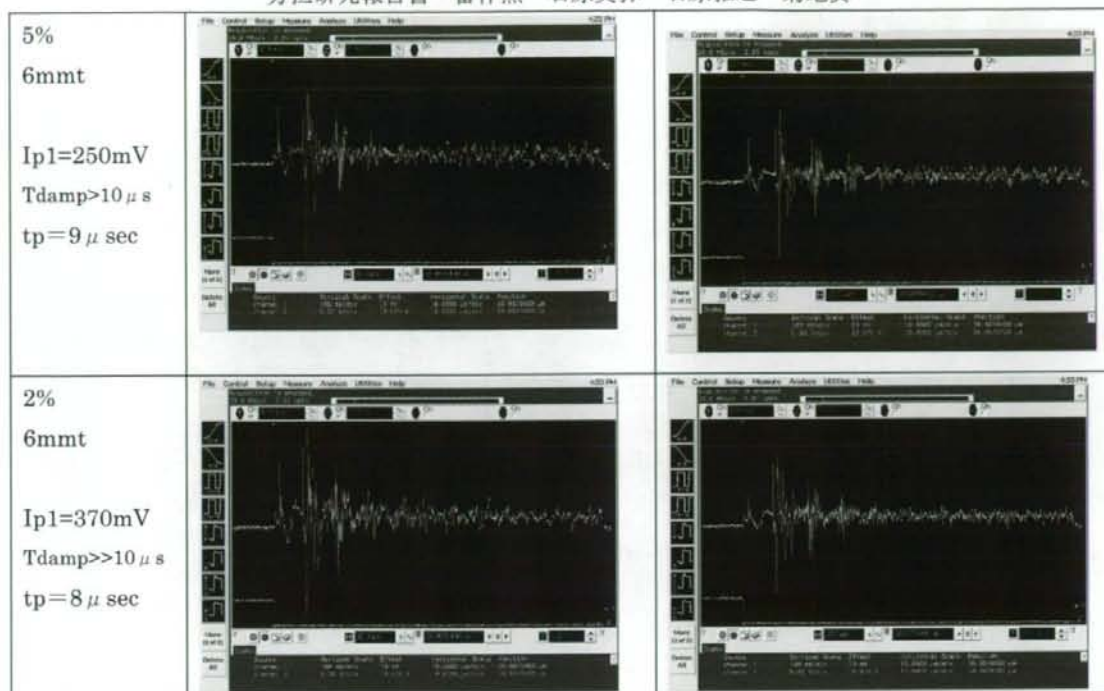
[ゼラチン試料の場合]

試料名	厚さ t 伝播方向 (mm)	往復伝播 時間 T ( $\mu$ sec)	伝播速度 $C=2t/T$ ( $\times 10^3$ m/sec)	重量 (g)	体積 ( $\text{cm}^3$ )	密度 $\rho$ ( $\times 10^3$ $\text{kg/m}^3$ )	音響インピーダンス $Z=\rho \cdot C$ ( $\times 10^6 \text{kg/m}^2 \text{sec}$ )
Gelatin 30%	5	7.0	1.42	11.3	9.42	1.19	1.69
Gelatin30%A	4.5	5.5	1.63	5.1	4.32	1.18	1.92
Gelatin30%B	4.5	5.0	1.8	4.7	4.32	1.08	1.94
Gelatin20%TK	6	7.8	1.54	16.2	12.73	1.27	1.95
Gelatin20%TN	5	7.9	1.26	15.5	11.02	1.40	1.76
Gelatin10%LG	8.5	10.5	1.61	34.3	27.33	1.25	2.01

ゼラチンの場合の測定結果を示す。

ゼラチン濃度	測定 1 回目	測定 2 回目
30% 5mm  Ip1=750mV Tdamp=5 $\mu$ s tp=7 $\mu$ sec		
20% 6mm  Ip1=700mV Tdamp=7 $\mu$ s tp=8 $\mu$ sec		





- (1) 測定結果からシリコンラバー-REDのKE-1201よりは波形は良く、 $T_{\text{damp}}$ や $t_p$ を測定できる。
- (2) ゼラチンの濃度による $t_p$ はほとんど差がない。 $(t_p(0)=t_p(1))$ であるのでまとめて表示した)また厚さは全サンプルがほとんど6mmtであるため当然の結果である。
- (3) ゼラチン濃度の低下とともに $T_{\text{damp}}$ が大きくなる傾向がある。

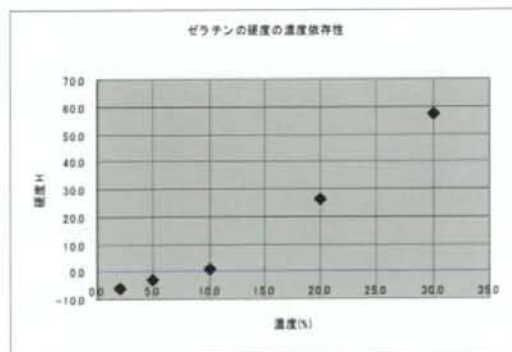
以上の結果から、シリコンラバー、その他材料で考えられた $T_{\text{damp}}$ 要因である伝播速度、音響インピーダンスの影響を打ち消す要因がゼラチン試料では存在すると考えるべきである。

そしてその要因はゼラチン濃度であり、濃度が高くなるほど光音響信号が大きくなることから受波波形が観測されやすくなるものと考えられる。

そこでゼラチン濃度の差を測定する方法としてゼラチン試料の硬度を測定した。その結果を下図に示す。ゼラチン濃度に比例して硬度が高くな

る結果である。

ところで前述した3種類のシリコンラバーの中では、 $T_{\text{damp}}$ や $t_p$ を測定しにくい周期の乱れた波形となっているKE-1201の硬度が70と一番高い。これより硬度が関係するのではなく光吸収体の量に関係した光音響波発生信号強度が関係すると判断できる。



#### D. 考察

今までの結果から $T_{\text{damp}}$ に関係する要因としては

- ① 伝播速度
- ② 音響インピーダンス
- ③ 評価試料の光吸収体濃度

が上げられる。

これらの要因は光音響計測では被検体（評価対象試料）その物の性質で決まるもので、測定装置側で制御出来ない。

しかし試料が薄い場合の  $T_{damp}$  の問題対策は

- (1) 光音響プローブでの超音波プローブを可能な限り高感度（高受波強度）とすること。これにより評価試料の光吸収体濃度が高いことと等価の効果を作り出す。
- (2) 超音波伝播速度が影響するレベルの試料厚さでは超音波プローブの残響時間を極力短くすること

がまず最低必要条件である

## E. 結論

今回光音響プローブの開発に当たり、超音波プローブの性能を試料をシリコンラバー、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。

その結果、試料の個々の音響特性に左右されることの少ない超音波プローブの改良目標として

- ①高感度化（高受波強度化）
- ②残響時間短縮

の2点に対し集中的な改良をすることで試料厚さが薄いものに対しても光音響計測が可能となる。

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  
—光ファイバーと受信側システムの最適化—

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

光音響システムの要素技術の1つである光ファイバーについて実施した検討、及び、生体からの光音響信号の受信側のシステム構築に関して検討したので報告する。十分な伝送効率(>90%)を確保して、プローブとの一体化が可能かつ臨床に使用しやすい仕様のファイバー(High OH, 0.48NA)を選択した。受信側のシステムに関しては、メモリ長が長く、ポイント数が最大オシロスコープを選び、それに伴い増大したデータポイント进行处理するアルゴリズムを構築した。

#### A. 研究目的

生体からの光音響信号は微弱であり、かつ、本計測は時間応答信号を測定するので、高感度かつ高精度な計測が要求される。よって、光音響システムの要素技術すべてにおいて、各々の仕様を最適化する必要がある。

本稿では、光音響システムの要素技術の1つである光ファイバーについて実施した検討、及び、生体からの光音響信号の受信側のシステム構築に関して検討した結果を報告する。

#### B. 研究方法

##### (1) 光ファイバーに関して

信号の励起源であるレーザーを診断時に軟骨表面まで導光する役目を果たす。励起源は昨年度の研究結果から、QスイッチNd:YAGレーザーの第3高調波と決まったことから、このレーザー光が導光できて、伝送効率のよいファイバーを検討した。ファイバーを選択する上では、①波長域、②コア径、③モード、④NA（開口数）、⑤長さなどが具体的検討項目となる。我々は、プローブと一体化をふまえて、ペアファイバー（裸芯線光ファイバー）の中で上記使用の検討をした。

ファイバー伝送実験として、QスイッチNd:YAGレーザーの第3高調波を石英レンズ（f=70mm）で集光し、OPHIR社製のパルスエネルギー測定用パワーメータを用いた。

##### (2) 受信側のシステムについて

受信側のシステムとは開発中のプローブによる受信信号から変形性関節症の診断に用いる力学特性値まで算出するプロセスを指す。構成するハードウェアは、プローブの信号を増幅する・信号増幅器、受信信号を観察する・オシロスコープ、そして信号を解析するために独自に開発する解析ソフトウェアがインストールされている・パソコンから構成される。従来研究で信号増幅器の仕様は決定して、エヌエフ回路設計カIROブロックのプリアンプ（超低雑音増幅器）を使用する。



使用している信号増幅器

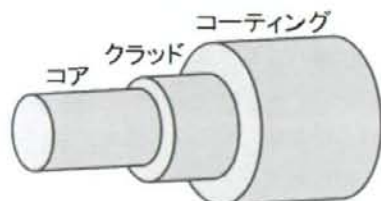
本稿では、オシロスコープと信号解析に関して検討する。オシロスコープは信号励起用のレーザー

と同期して信号を取り込む必要があるため、外部トリガ機能のあるもの、光音響信号の周波数帯域をカバーするものなどが必須の機能である。当初は臨床使用の観点からなるべく小型で軽量なタイプの TDS3054B 型、光音響信号を詳細に検討する観点からメモリ長を長くとした DSO8104A+DSO8004-4000 の両者を実際に取得信号で比較検討した。

### C. 研究結果及び D. 考察

#### (1) 光ファイバーに関して

光ファイバーは、コアとクラッドの同心二層からなり、内側のコアが光を搬送する部分、外側のクラッドはコアと異なる屈折率を持ち、コアの中の光を全反射させる役割を担っている。コアとクラッドの屈折率の差は 1% 以下に設定されている。クラッドの外周は、ポリマーでコーティングされ、ファイバーの特性を損なう衝撃から守られている。



光ファイバーの構造

#### 使用したファイバー

コア径 (μm)	200	400	600	800	1000
長さ (m)	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2

レーザー光の入射強度は、 $50 \mu\text{J/pulse}$  から  $200 \mu\text{J/pulse}$  まで変化させた。その結果、コア径が  $200 \mu\text{m}$  のファイバーは、長さに関わらずレーザー光が伝送できなかった。原因の 1 つとして、レーザー光のビーム特性が悪く、結合効率が悪かったことが考えられる。コア径が

ファイバーを選択する上では、①モード、②波長域、③NA (開口数)、④コア径、⑤長さの仕様を決定する必要がある。マルチモードとシングルモードの選択については、コア径を太く曲げに強いということからマルチモードを選択した。

まず、波長域については、すでに励起光の波長が  $355\text{nm}$  と決まっているので、この波長で損失なく伝搬できる素材を検討した。光ファイバーの母材である石英ガラスに、OH 基を多く含有させたものを選んだ (High OH)。

開口数 (NA) とは、ファイバーの“光を集める能力”のことである。ファイバーを伝搬することができる光線の注入角度は、臨界角度との関係で決まる。最大の注入角度 (受入角) を頂角とする円錐を受け入れコーンと呼ぶ。受入角と NA の関係は次式で表される。

$$\text{NA} = \sin \theta$$

ここで、 $\theta$  : 受入角の  $1/2$

つまり、NA が大きい方がよいが、入射端と出射端での広がりも考慮する必要がある。プローブの焦電性を考慮して、 $0.48\text{NA}$  を選択した。

コア径と長さについては実際に何種類からのファイバーを用いて実験をした。

この際、光がファイバーを通過するにつれてパワーを失う減衰を測定した。なお、減衰は光の波長によって変化し、減衰の主原因は散乱と吸収である。

$400 \mu\text{m}$  以上は、レーザー光が伝送できた。コア径  $400 \mu\text{m}$  で、長さが  $2\text{m}$  の場合、入射エネルギーが  $70 \mu\text{J}$  の場合、出射エネルギーが  $65 \mu\text{J}$  であった。本システムに必要とされる伝送効率は十分に得られた。その他、コア径が  $600, 800, 1000 \mu\text{m}$  のファイバーもコア径  $400 \mu\text{m}$  と同様に高い