

の電極ではさまれたキャパシタの静電容量は 28pF と計算される。しかし測定された  $C_p$  値はかなり大きく、ケーブル長が 4mm であるプローブ C の  $C_p$  は上記計算値に近い値となっていることより今回測定された  $C_p$  は同軸ケーブルの分布容量を

測定しているといえる。

しかし  $R_p$  については Fig.3、Fig.4 に示すようにケーブル長やプローブ径とは関連が無いように見えた。

Fig.3 ケーブル長と $R_p$

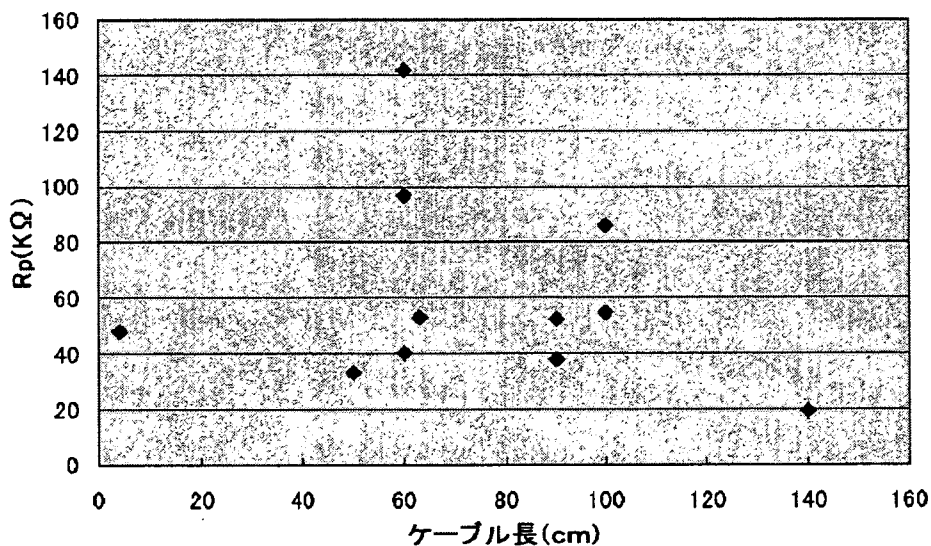
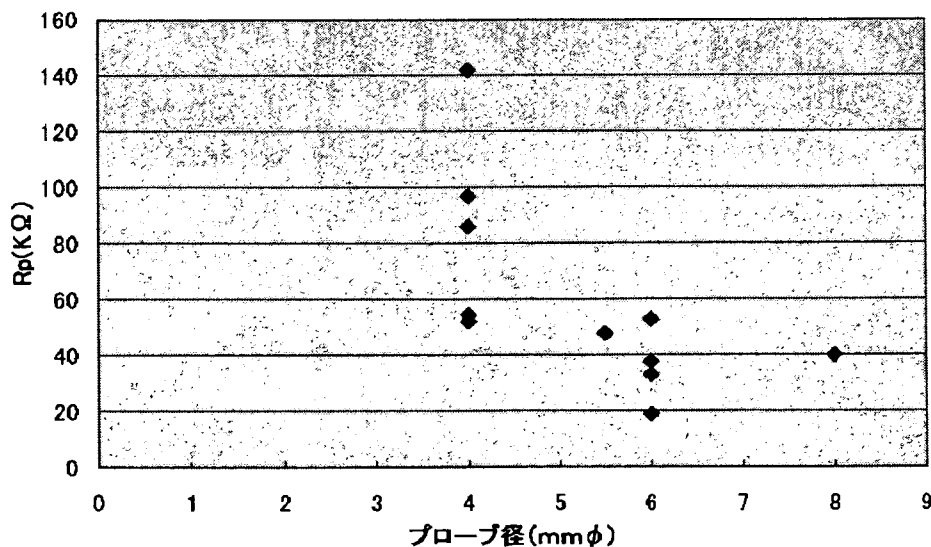
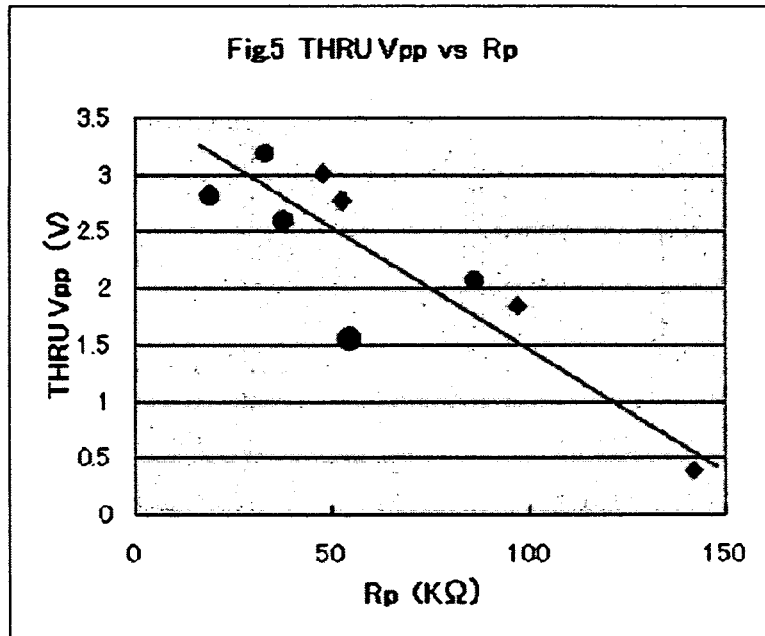


Fig.4 プローブ径と $R_p$



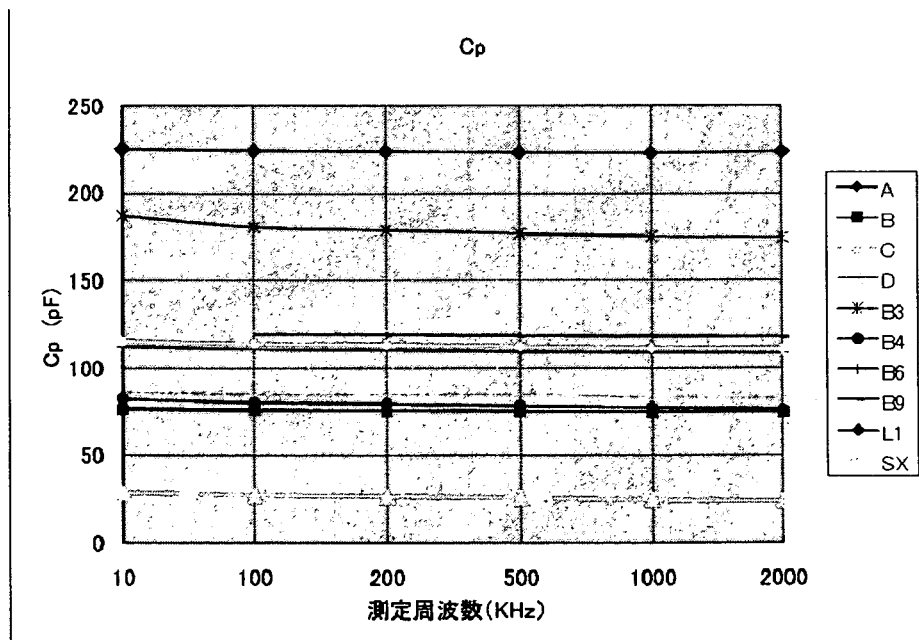
そこでスルー法の  $V_{pp}$  と  $R_p$  を比較したところ Fig.5 のようにかなりの相関関係があ

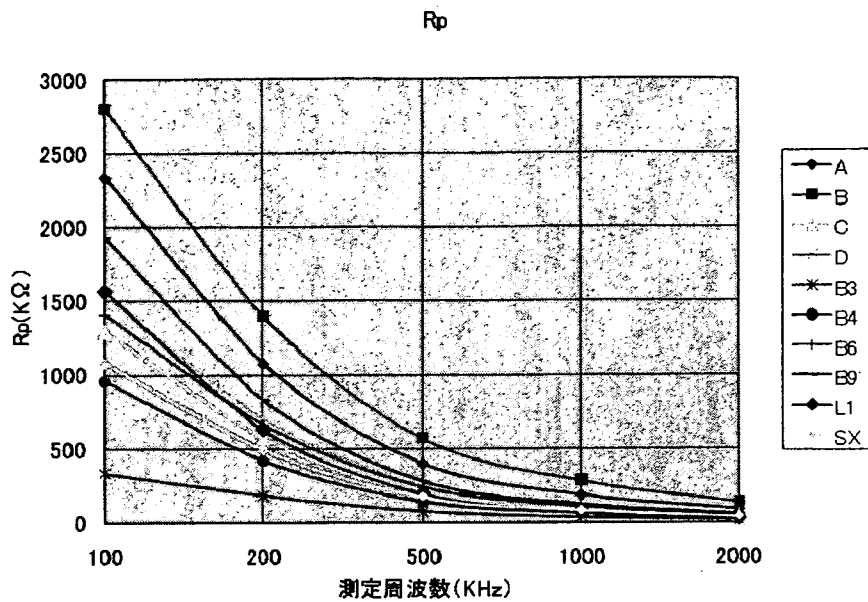
ること示された。ここで四角のマークはプローブ径が 6mm  $\phi$  のものである。



次に  $C_p$  と  $R_p$  の測定周波数依存性を示す。 $C_p$  に周波数依存性がないのは、同軸ケーブルの性能によるもので当然である。しかし  $R_p$  の周波数依存性は、明らかにあ

るが、その要因については不明である。素子周辺の特性によるものと考えるのが妥当である。





iii) P(VdF/TrFE)フィルム膜センサーの LCR メータによる特性評価

ii) で検討した内容から  $C_p$  と  $R_p$  の測定値の要因につき推定したが、むき出しの P(VdF/TrFE)フィルム膜センサーを入手したので、その LCR メータ測定を実施し

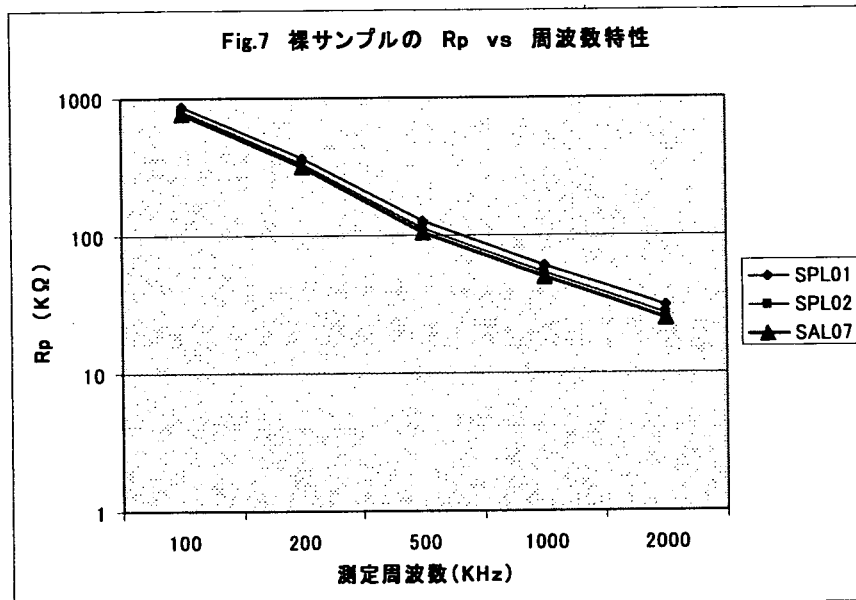
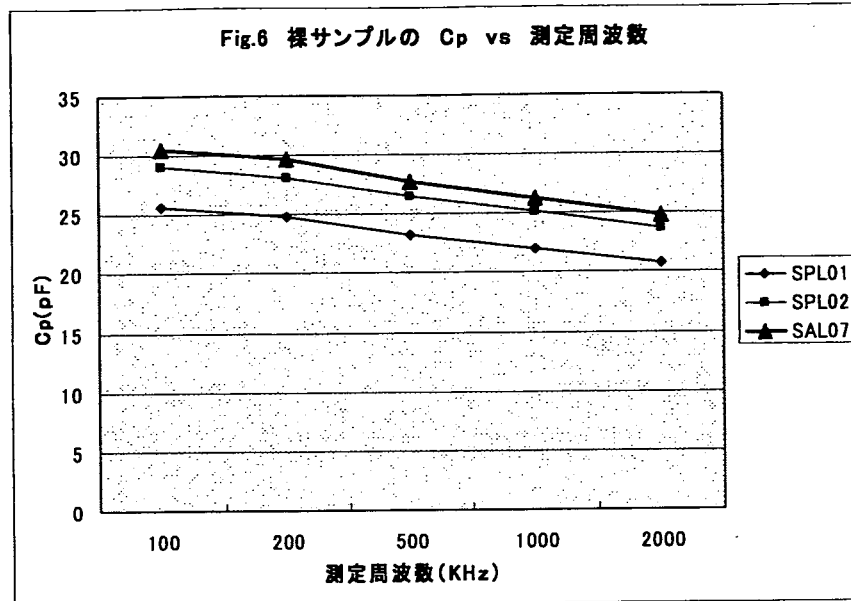
た。その結果 ii) で推論した内容に対して裏づけとなるデータとなり、今回の推論がより確かなものとして考えて良いと思われる。表 8 に示す。

表 8 サンプルの内訳と 2MHz での  $C_p$ 、 $R_p$

サンプル	表層より	$C_p$ (pF)	$R_p$ (KΩ)
No.01	エポキシ膜(10 μm) + 電極付きフィルム	20.8	30.6
No.02	エポキシ膜(10 μm) + 電極付きフィルム + ガラエボ基台	23.7	26.7
No.07	整合膜(28 μm → 7.5MHz 用) + 電極付きフィルム	24.8	24.9

P(VdF/TrFE)フィルム膜センサーの  $C_p$  はいずれもケーブル等がないセンサー素子単体の場合の計算値に近い値となっている。また P(VdF/TrFE)フィルム膜センサーでの  $C_p$  の測定周波数依存性は Fig.6 に示

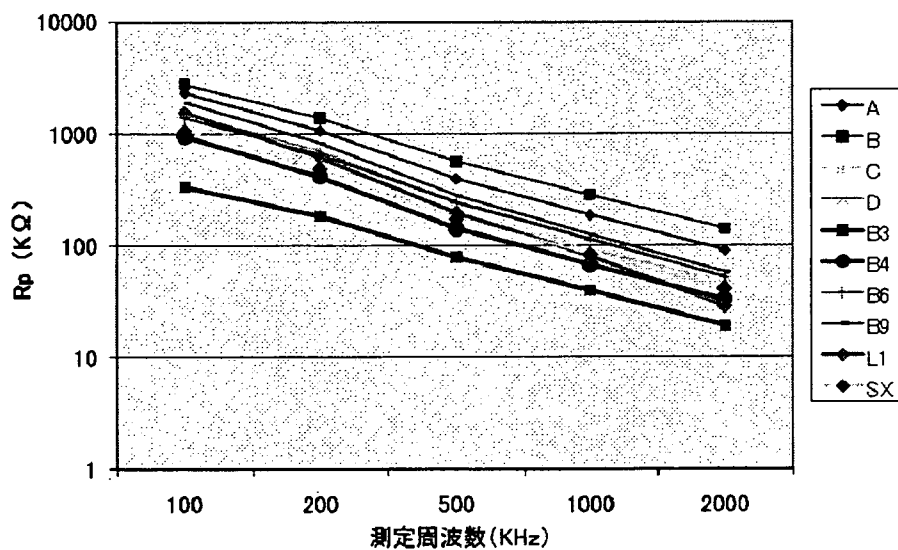
すように明確に出ており、プローブでの測定での  $C_p$  は同軸ケーブルの分布容量が加わり素子自身の  $C_p$  の測定周波数依存性が見えなくなるものと思われる。



さて  $R_p$  については Fig.7 のように周波数依存性は明らかに出ており、Fig.8 のプローブでの測定と同じ傾向を示す。またその周波数依存を示すグラフの勾配は、Log-Log の対数グラフではないので正確にはいえないが、ほとんど同じである。プローブ B4 の  $R_p$  値と今回のサンプルの  $R_p$  値はそれらの周波数依存性も含めほとん

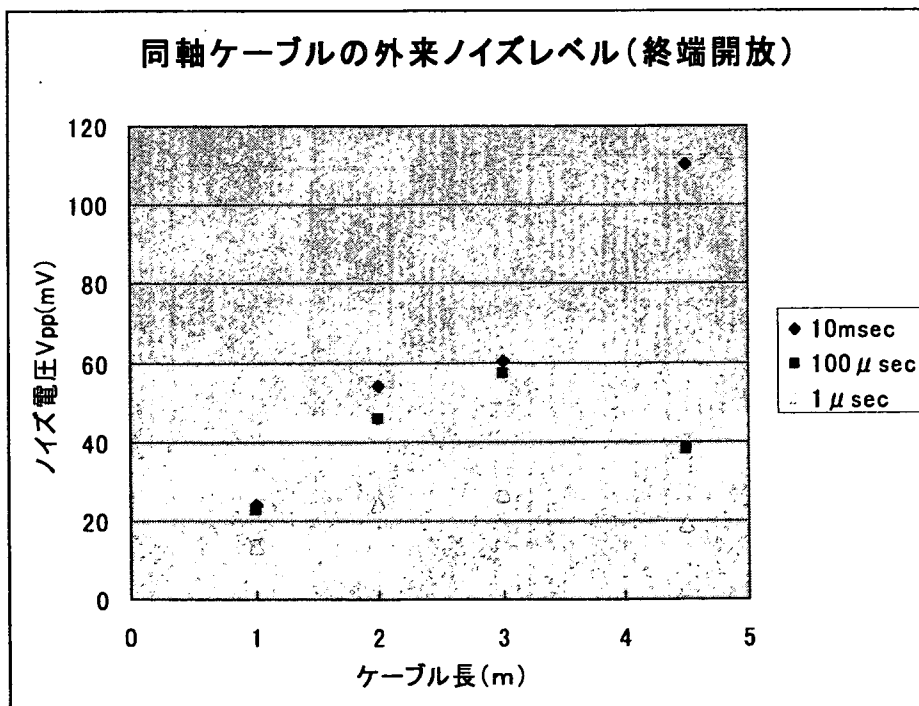
ど同じ値を示している。すなわちプローブ測定での  $R_p$  はセンサー単体での  $R_p$  値を示しているといえる。そして課題の超音波出力はこの値に依存していると考えられるので、センサー単体での  $R_p$  値を下げるのが超音波出力をアップさせる要因と考えられる。

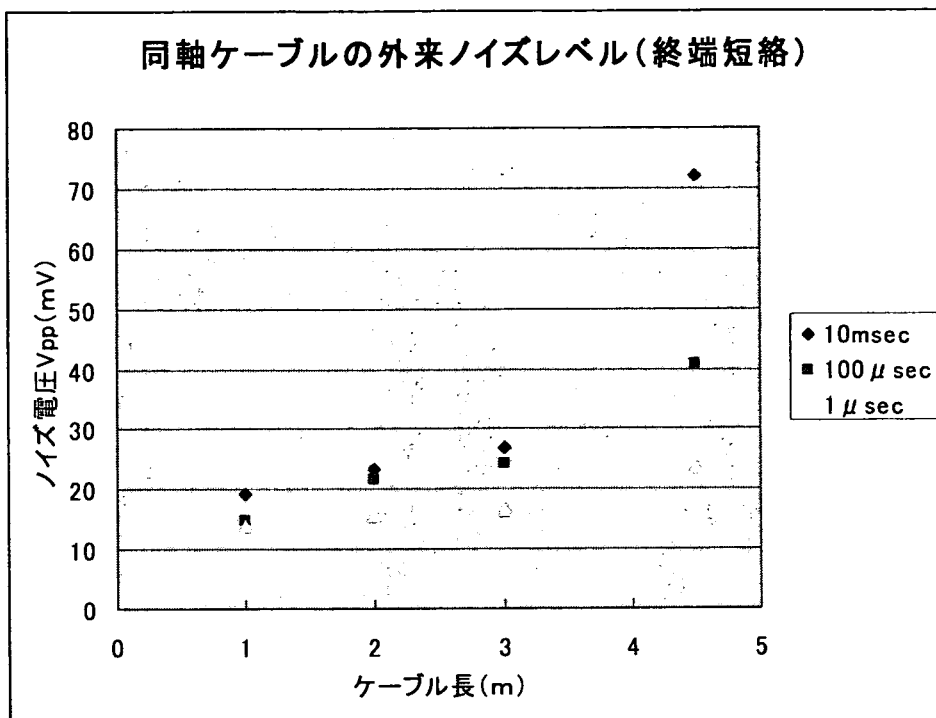
Fig.8 プローブのRpの測定周波数依存性



⑤同軸ケーブル経由の外来ノイズ  
 測定結果を下のグラフに示す。

同軸ケーブルの外来ノイズレベル(終端開放)





終端が開放の場合はノイズ電圧の  $V_{pp}$  がケーブル長に依存して大きくなるが終端  $50\Omega$  短絡では 3m までのケーブル超ではその増大傾向は抑えられる。しかし 4.5m の

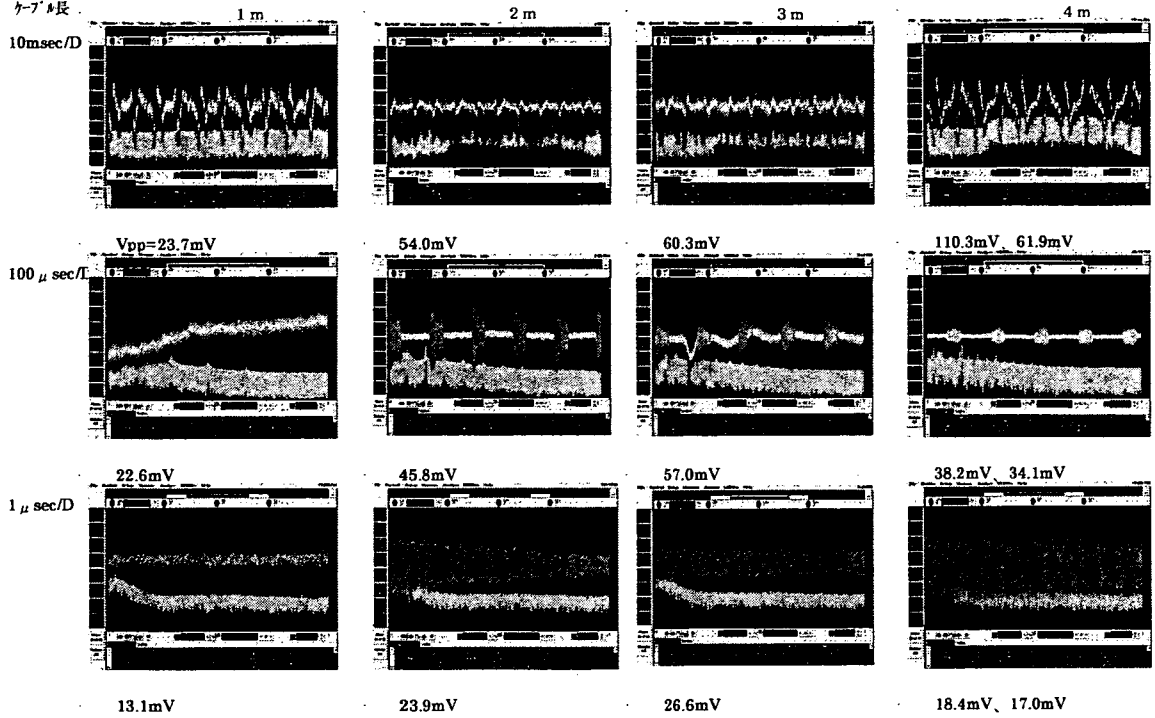
ケーブルでは異常が見られ短絡の効果がなくなっている。オシロスコープのデータもまとめて示す。

表 9

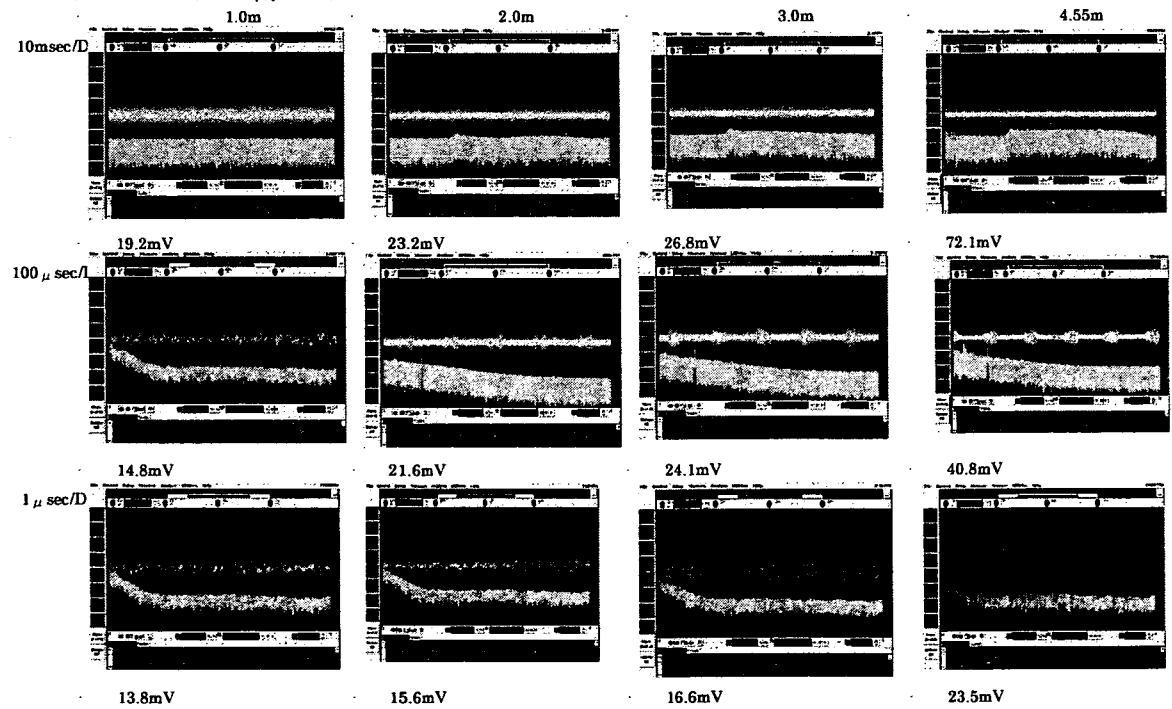
	品名	径 (mm)	静電容量 (nF/km)	特性インピーダンス ( $\Omega$ )	減衰量 (dB/km)			
					1MHz	10MHz	100MHz	200MHz
1m	RG58A/U	5	102	50	14	48	160	230
2m	RG58A/U	5	102	50	14	48	160	230
3m	3C2V	5	67	75	12	40	-	195

同軸ケーブル終端開放

ケーブル長



同軸ケーブル終端 閉ループ



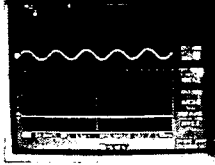
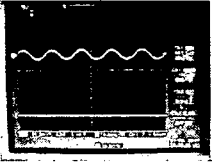
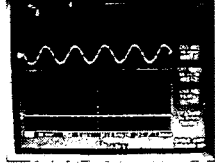
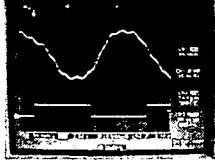
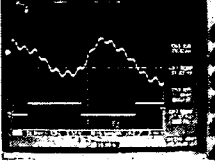
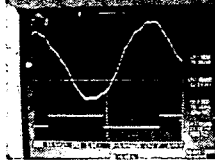
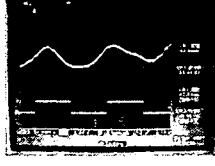
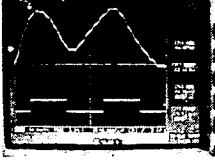
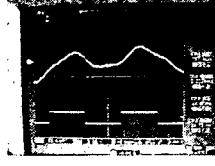
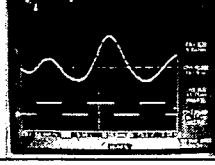
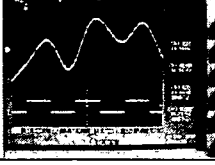
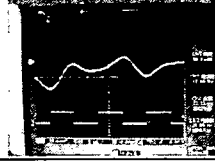
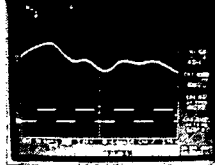
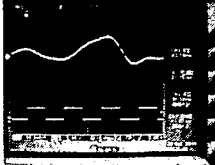
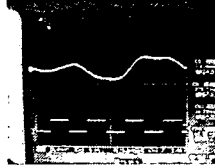
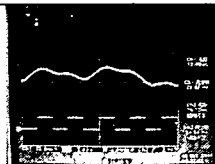
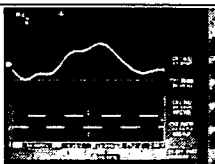
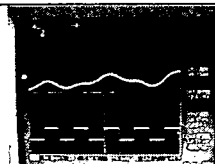
⑥焦電特性の評価

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

**P(VdF/TrFE)フィルム膜センサー（裸サンプル）での測定結果**

★測定結果を下記にまとめて示す。

光チョッパー周波数 (Hz)	裸サンプル No. 01	裸サンプル No. 02 バックキング材 (ガラエポ基板あり)		裸サンプル No. 07 (整合膜 28 $\mu$ mあり)		説明・備考
		0Hz		0Hz		
0		0Hz		0Hz		黒体炉からの放射を受けない状態でのセンサーの出力。焦電電圧の sin 波形は 50Hz の低周波であり AC ラインのノイズである。
13.4		13.9		13.3		13Hz では 3 種類とも AC ラインのノイズが無視できるほど明らかに光チョッパー周波数に追従できている出力が得られている。
20.8		20.6		20.5		13Hz の場合と光チョッパーの周期に対する位相ずれはあるが、まだ光チョッパー周波数に追従できている出力が得られている。
30.1		30.7		30.6		この周波数になると光チョッパー周期に対する追従性が崩れ始めている
40.1		40.6		40.3		3 種類すべてが追従性が崩れだしている。サンプル No. 01 は 40Hz か No. 02、No. 07 は 30Hz で崩れだしている。
50.5		40.6		50.1		


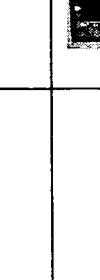
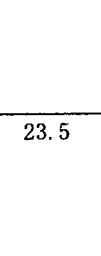


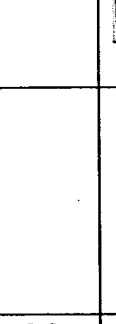
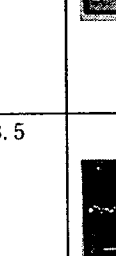

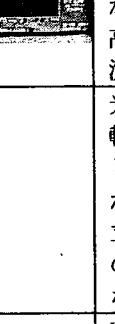
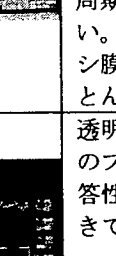

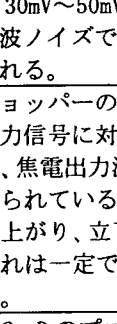
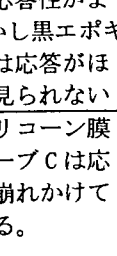


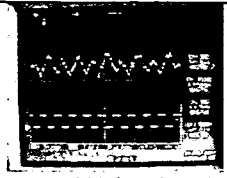
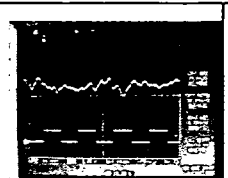
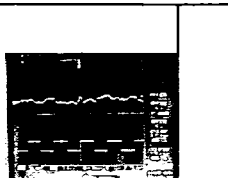
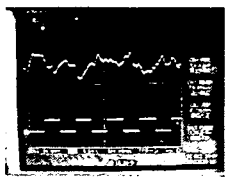
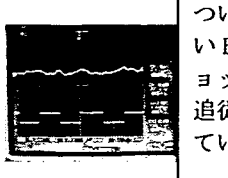
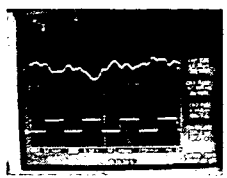
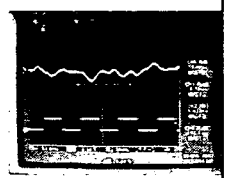
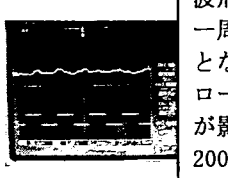
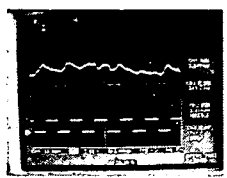
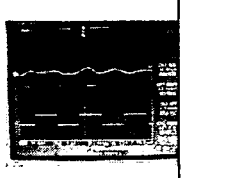

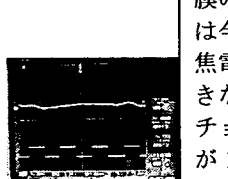
◆判定では焦電特性での出力電圧の絶対値は評価に値しないので、出力波形が光チョッパーの周期に同期しているもの、すなわち追従しているものを焦電性が高いと判断してサンプル No.01、02、07 を比較した。

裸サンプルにおいては 50Hz のノイズを抑えきれず、13Hz からしか観測できなかったが 3 種類のサンプルとも 30Hz から 40Hz の間で波形の周期追従性がなくなってきた。

### プローブの測定結果

★同様に測定結果をまとめて示す。

光チョッパー 周波数 (Hz)	B1 プローブ (透明シリコン膜 ただし 保護膜なし部分あり)	Hz	C プローブ (透明シリコン 保護膜)	Hz	D プローブ (黒エポキシ 保護膜)	説明・備考
0		0		0		プローブは静電シールドされているので AC 50Hz のノイズの影響はない。しかし 30mV~50mV の高周波ノイズで観測される。
7.7	 Peak が対応している					光チョッパーの回転出力信号に対応した、焦電出力波形が得られている。立ち上がり、立下りの遅れは一定ではない。
12.5	 Peak が対応している	13.7	 Peak が対応している	12.8		B1、C、D のプローブでの比較では明らかに保護膜がない B1 と透明シリコン膜の C プローブは光チョッパー周期の応答性がよい。しかし黒エポキシ膜では応答がほとんど見られない
38	 Peak が対応している	31	 Peak が対応しなくなり出している	23.5		透明シリコン膜のプローブ C は応答性が崩れかけてきている。
52	 Peak が対応している	51	 Peak が対応していない	54.4		保護膜がない B1 はまだ追従している。透明シリコン膜 C は一部は応答がなくなっている。

101	 Peak に対応しなくなり出している	106		118		
120				151		ついに保護膜のないB1プローブもチョッパー信号には追従できなくなっている。
200		198		205		すべての焦電出力波形は光チョッパー周期には無関係となっており、各プローブの焦電特性が影響する出力は200KHz以下の周波数領域であると推定できる。
300				300		
400				400		黒いエポキシ保護膜のあるプローブは今回の観察では焦電性能を観察できなかった。なお光チョッパー周波数が1KHzまで確認したが400Hzとほとんど類似の蛍光であったので省略する。

★評価では P(VdF/TrFE)フィルムセンサーと同様、光チョッパー周期に追従しているかどうかで比較した。測定の中から、プローブでの観測では電磁シールドがかなり良くできていると感じた。ノイズの影響が少なかった。このためかなり明確な光チョッパーの周期追従性が確認できた。また、保護膜無し B1 プロ

ーブはかなり明確に焦電性を示した。なお、透明シリコン保護膜の C プローブも焦電性を示したが周期追従性は B1 に劣った。周期追従性は B1 プローブは 120Hz レベル、C プローブは 50Hz である。黒エポキシ保護膜の D プローブは 13Hz 以下でも焦電性を示さなかった。

②光チョッパー法（極低速評価）

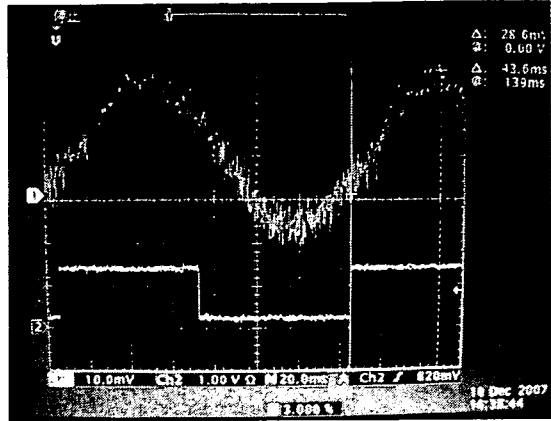
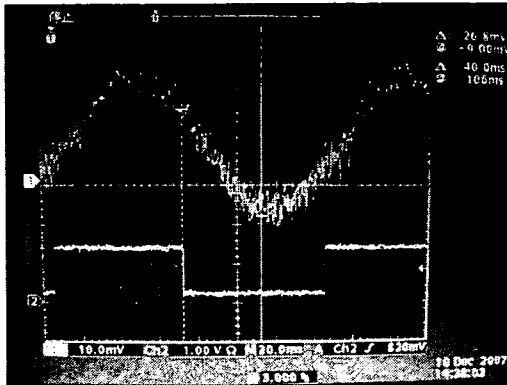
黒体炉組み付けの光チョッパーでは 13 回転以上の条件でしか制御できなかった。

さらに焦電性を正確に調べるためチョッパーシールド円盤を厚紙で手作りしチョッパーの低回転化することにより 13 回転以下の黒体放射条件で裸センサーの焦電特性をより詳しく測定した。

黒体炉温度；900℃ センサー表面位置；  
 黒体炉開孔面から 7cm

サンプルは前出の裸サンプル 01、02、07 の 3 個で実施した。

サンプル No.01 の実験での出力波形例（光チョッパー回転数 7.1Hz）を示す。



チョッパーの開窓ポイントから素子が熱を受けて温度上昇するポイントに対応する実際のセンサーの出力電圧波形の下ピークポイントまでの時間を Ton(delay)として測定した。

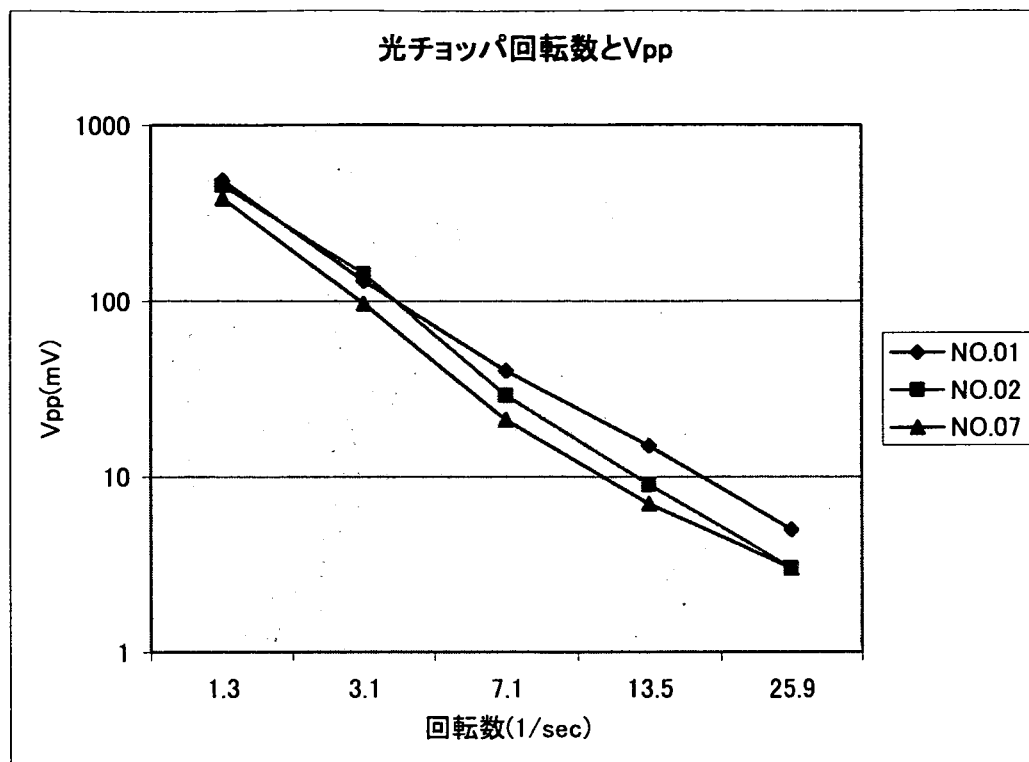
またこのときの各ポイントに対応した出力電圧の差を電位差として計測した。

この（電位差/Ton(delay)）をディレイ速度として計算し、各回転数での値を表 10 にまとめた。

表 10

サンプル No.	チョッパ 回転数 (回転/秒)	照射周期 T(msec)	ON デイレイ			OFF デイレイ			Vpp mV
			Ton(delay)	電位差	ディレイ速度 V/sec	Toff(delay)	電位差	ディレイ速度 V/sec	
01	1.3	750ms	258ms	278mV	1.077	90ms	104mV	1.155	488
	3.1	318	84.8	79.2	0.934	68.8	59.2	0.86	130
	7.1	140	40	26.8	0.67	43.6	28.6	0.655	40
	13.5	73.6	32	17.9	0.56	31.6	15.4	0.487	15
	25.9	38.6	2~3msec						5
02	1.4	686ms	214ms	156mV	0.73	80ms	48.0mV	0.60	456
	2.9	336	91.2	78.8	0.86	72.0	54.0	0.75	143
	7.1	141	47.2	27.2	0.57	44.8	27.6	0.61	29
	12.9	77.4	27.8	10.1	0.36	29.8	13.3	0.44	9
	29.6	33.6	2~3msec						3
07	1.3	756ms	280ms	248mV	0.88	98ms	84mV	0.86	384
	2.8	350	104	77.6	0.74	88.0	54.4	0.62	97
	7.1	141	54.4	22.6	0.41	48.0	15.1	0.31	21
	12.9	77.2	33.4	6.5	0.19	31.6	9.4	0.29	7
	29.7	33.6	2~3msec						3

(1) 光チョッパー回転数と出力電圧  $V_{pp}$  をグラフに示す。

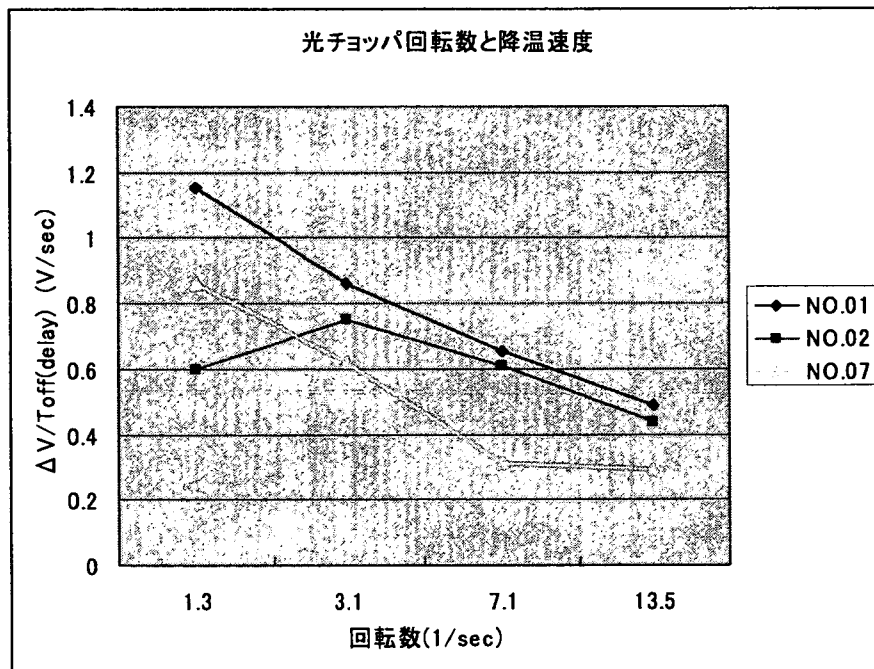
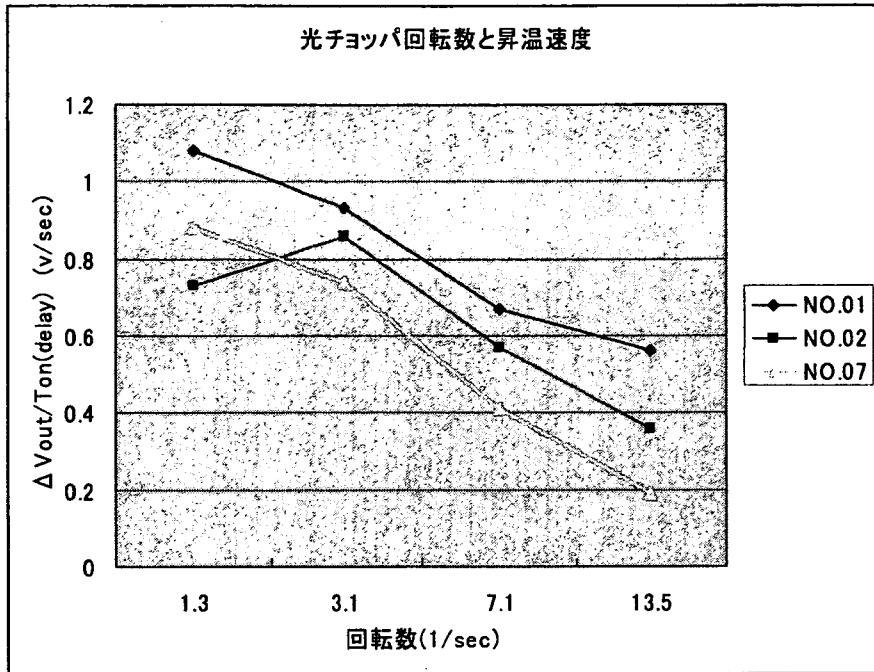


・ X 軸、Y 軸とも対数グラフで直線になり、また 3 サンプルには大きな差異はない。  
・  $V_{pp}$  の絶対値は超音波のような入射角などにはあまり敏感ではなく、距離による依存性が大きいことを確認した。これは距離の 2 乗に赤外線光量が反比例するためと思われる。次に回転数と  $V_{pp}$  の関係についてみると回転数を  $R$  とすると  $V_{pp}=R^A$  ( $A$  は傾斜勾配) で表される関係がある。 $R$  は赤外線の照射時間に反比例し、また  $V_{pp}$  は高分子圧電センサーの電極に誘起される電荷量に比例します。照射時間が長いと温度上昇期間が長くなるので電極間の電荷量から当然の結

果といえる。

(2) 昇温速度と降温速度の回転数依存性を示す。

ここで光チョッパーの ON 開始から焦電電圧出力が増加始めるポイントまでの時間を  $T_{on}(\text{delay})$  としてそれぞれに対応する電圧出力の差を電位差としてディレイ速度を求めたが、ON ディレイ速度を昇温時間、OFF ディレイを降温時間としてその回転数依存性を調べた。すなわち露光時間依存性になる。



・昇温速度および降温速度は露光時間が短くなると遅くなる。これは温度変化量が少なくなると昇温速度が遅くなる。  
 これは圧電素子内の熱の伝播速度が熱の拡散によるもので、絶対温度変化量が素子の表面から裏面への熱の拡散速度を支配している。そして素子内部の電荷分布速度もこれに支配されていると考えるのが一般的である  
 と考える。

・今回の実験で約 25Hz 以上では全てのサン

プル  $V_{pp}$  は 5mV 以下であり、改めて前節の①の光チョッパ法の結果を支持する内容となった。

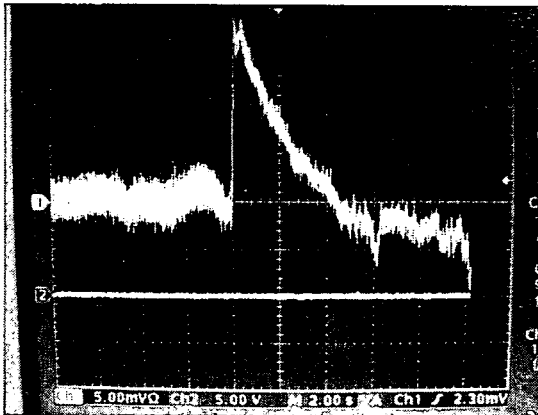
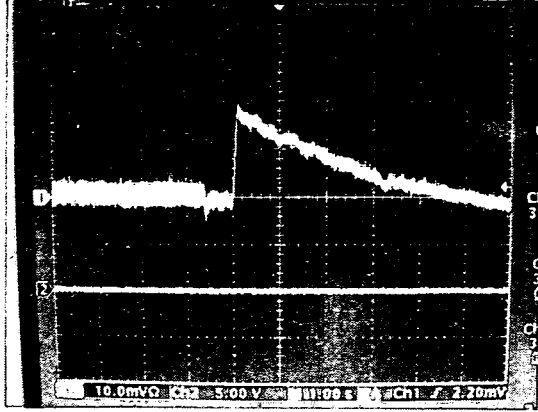
すなわち P(VdF/TrFE) フィルムセンサーの場合は 30Hz 以上 (30msec 以下) では焦電性の電圧出力が無視できることを改めて確認できた。

以上の結果から、①の光チョッパ法の結果は正確なデータと考えるべきであるといえる。

③マニュアルにより1回のみ赤外線  
 ON-OFF 照射

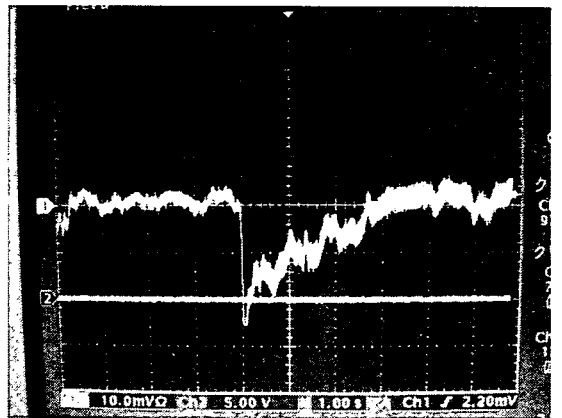
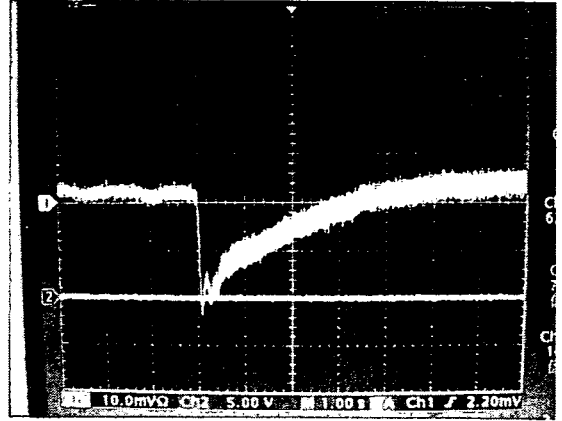
P(VdF/TrFE)フィルムセンサーNo. 01

露光 OFF⇒ON (DCで観測) (黒体炉温度  
 300℃)



露光 OFF 時はセンサー出力は0mV 線上にある  
 が 露光 ON になると約 18mV まで電圧が上昇  
 し、その後出力電圧は低下しピーク電圧  $V_p$   
 の  $1/e$  に低下する時間を測定すると、約 2.  
 5sec である。

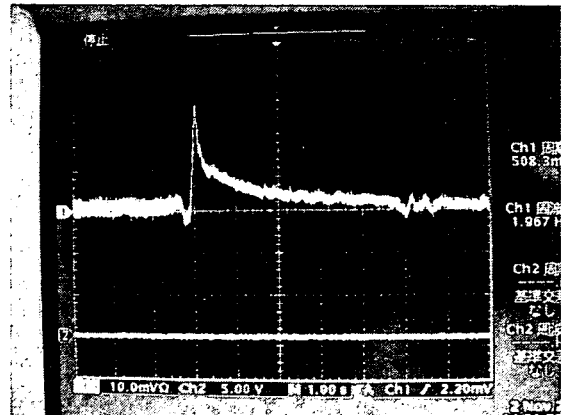
露光 ON⇒OFF (DCで観測)

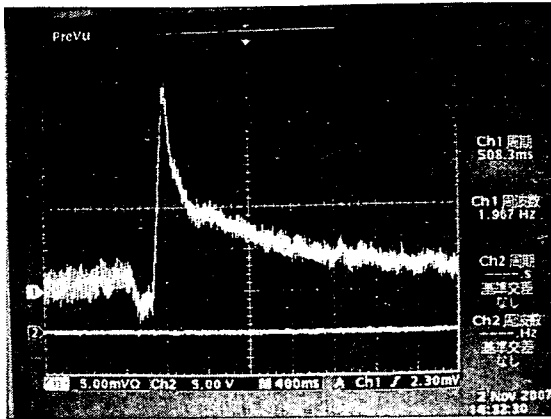


露光 ON 時はセンサー出力はわずかの出力が  
 あり約 1mV 線上にあるが 露光 OFF になると  
 約 -20mV まで電圧が低下し、上記と同様  $V_p$   
 が  $1/e$  までに回復する時間を測定すると、約  
 2sec である。

P(VdF/TrFE)フィルムセンサーNo. 02 (裏面  
 にエポキシ樹脂基板あり)

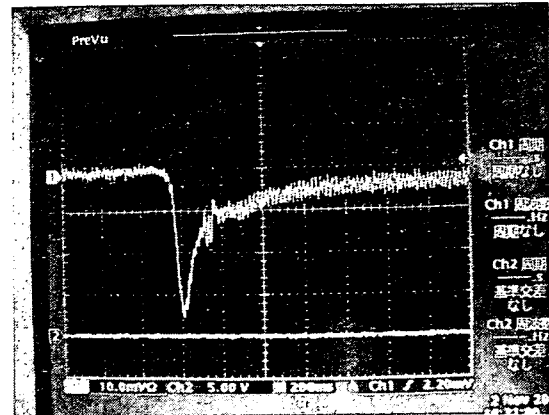
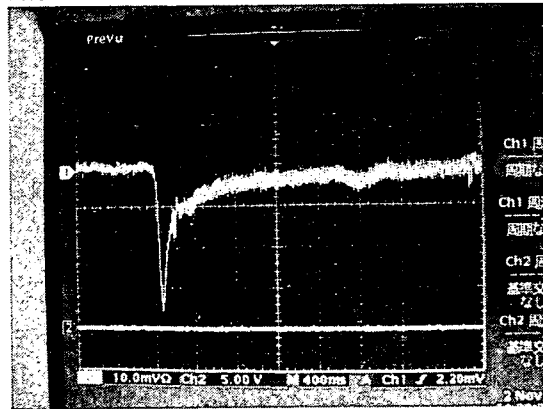
露光 OFF⇒ON (DCで観測) (黒体炉温度  
 300℃)





前記と同様に見ると  $V_p=25\text{mV}$ 、時定数は  $400\text{msec}$  程度である。

露光 ON⇒OFF (DCで観測)



$V_p=-36\text{mV}$ 、時定数は  $150\text{msec}$  程度

同様の方法で残りのサンプルを評価し結果を表 11 にまとめた。

表 11

サンプル No.	01	02 (裏面ガラエボあり)	07 (整合膜あり)
露光 OFF⇒ON	$V_p=18\text{mV}$ $\tau=2.5\text{sec}$	$V_p=25\text{mV}$ $\tau=400\text{msec}$	$V_p=16\text{mV}$ $\tau=2\text{sec}$
露光 ON⇒OFF	$V_p=-20\text{mV}$ $\tau=2\text{sec}$	$V_p=-36\text{mV}$ $\tau=150\text{msec}$	$V_p=-20\text{mV}$ $\tau=1.5\text{sec}$

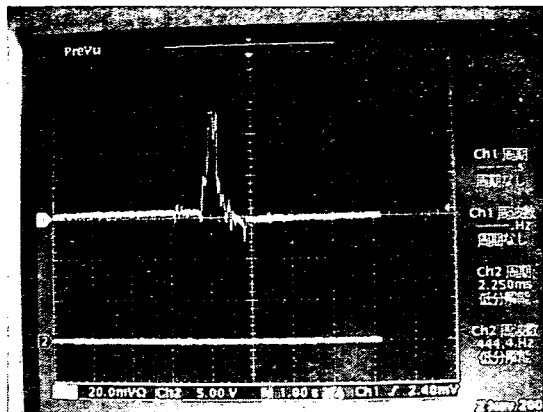
- ・サンプル No. 02 は  $V_p$ 、 $\tau$  ともに残りのサンプルとは異なるが、その原因はガラエボ基板と関係するかは不明である。
- ・この実験では手動で OFF⇒ON、や ON⇒OFF の速度を決めているので、出力電圧の立ち上がり速度や立ち下り速度の評価は適当ではない。

- ・しかしこの部分の速度が超音波プローブ接触時に関連する内容であり、他の方法を検討して確認するか、または超音波プローブの使用時に、被検体と接触後熱飽和時間を考慮してから光音響計測に入ること、影響は除くことが出来るはずである。

ストレートプローブ プローブC

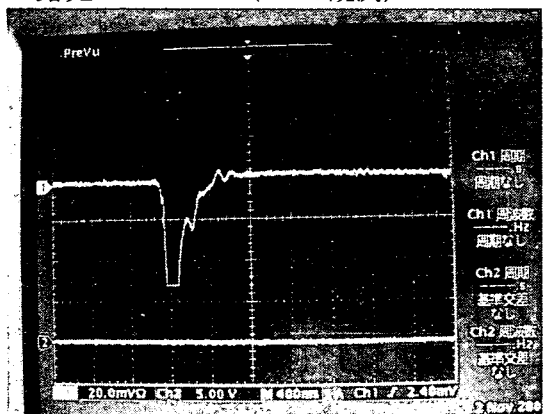
(透明シリコン保護膜)

念のためストレートプローブでも測定した。  
 露光 OFF⇒ON (DCで観測) (黒体炉温度 300°C)



$V_p = 50\text{mV}$  以上 時定数も 200msec から 400msec である。

露光 ON⇒OFF (DCで観測)



$V_p = -50\text{mV}$  以上 時定数は 400msec 程度である。

ii) 液相での温度急変による焦電性の観測

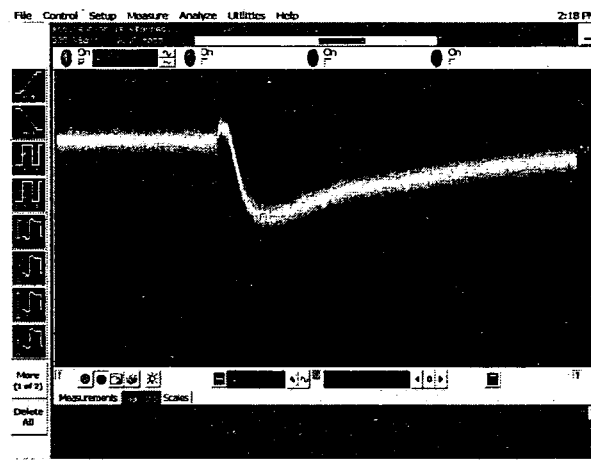
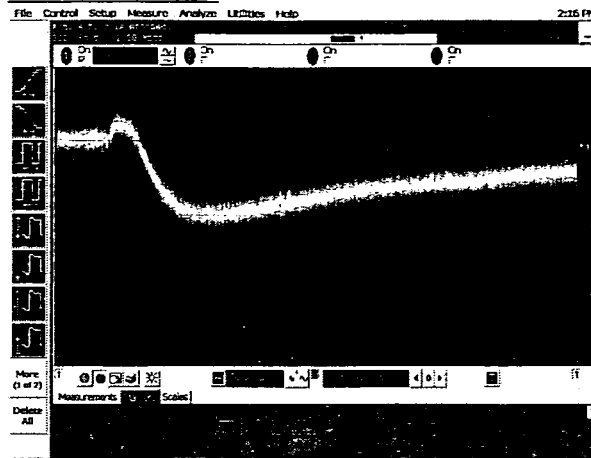
ストレートプローブ プローブD

プローブを液相に投入する前後の  $\Delta V_p$  を測定した。

また投入前はプローブを常に測定時の室温 22°C としている。

<液相 (水) 温度 1°Cの場合>

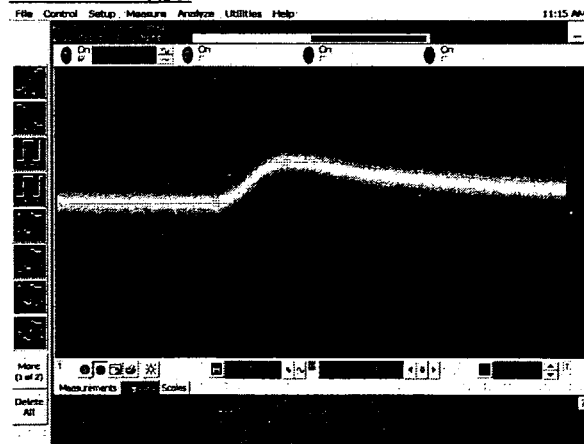
$\Delta T = -21 \text{ deg.}$



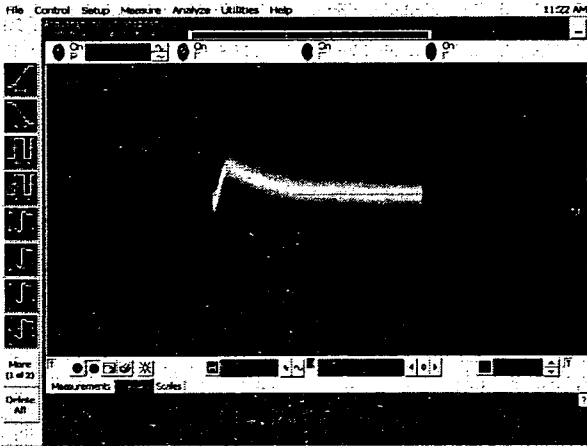
室温から 1°Cに温度が下がるので  $V_p$  はマイナスのほうに振れる。また前述したように投入前の輝線は GND ラインからずれているので、各ポイントでの輝線の中心点に近いところを測定点とした。

<液相 (水) 温度 34°Cの場合>

$\Delta T = 12 \text{ deg.}$



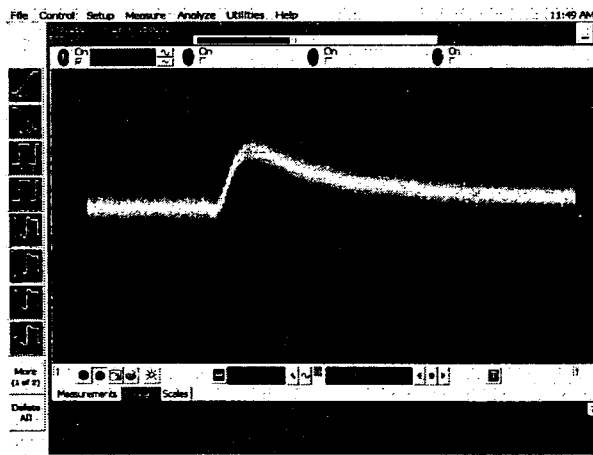
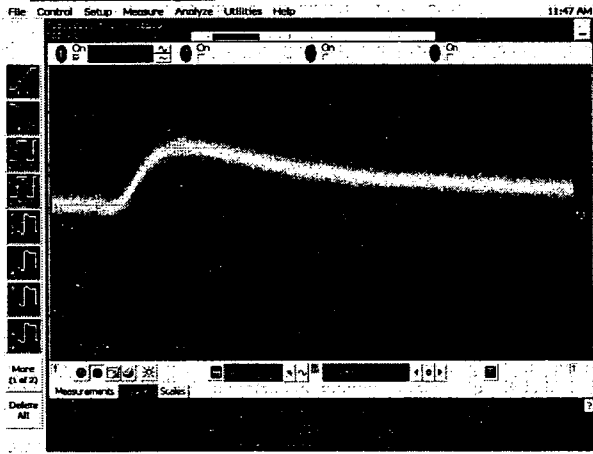




熱が加わるので  $V_p$  もプラス方向に生ずる。  
 $V_p=2.81\text{mV}$  であるのでその  $1/e$  は  $1.03\text{mV}$   
 でありそこまでの時間  $T_e$  は  $1825\text{msec}$  であ  
 った。

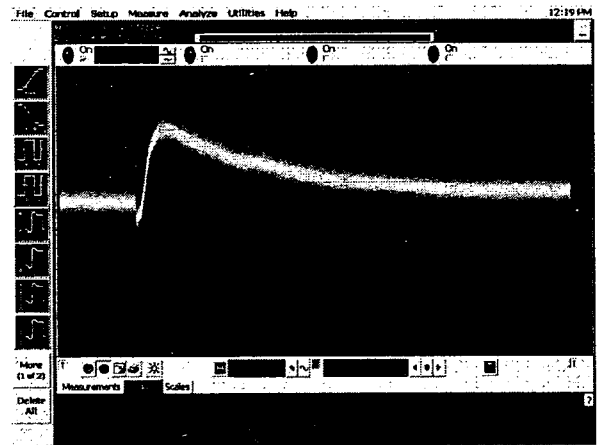
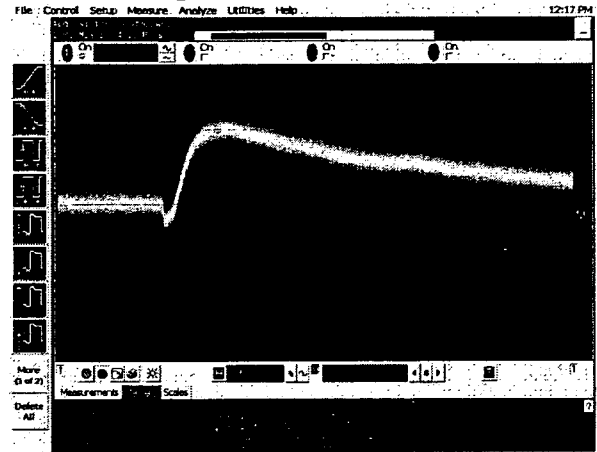
<液相 (水) 温度  $40^\circ\text{C}$  の場合>

$\Delta T=18 \text{ deg.}$



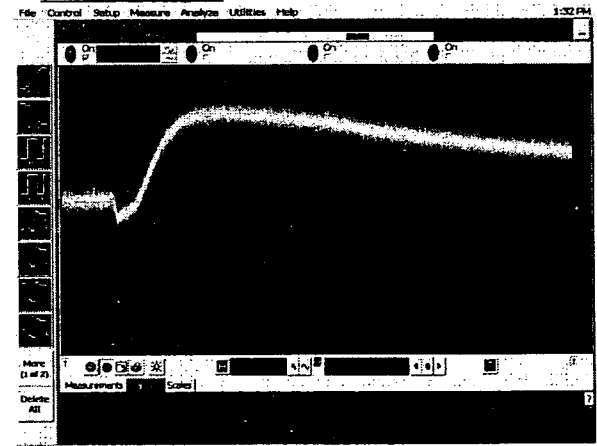
<液相 (水) 温度  $45^\circ\text{C}$  の場合>

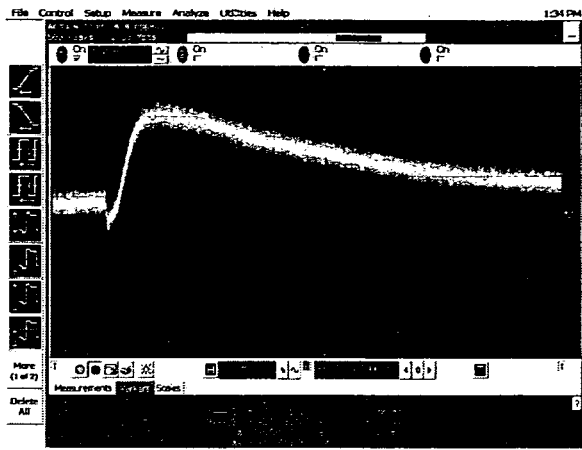
$\Delta T=23 \text{ deg.}$



<液相 (水) 温度  $50^\circ\text{C}$  の場合>

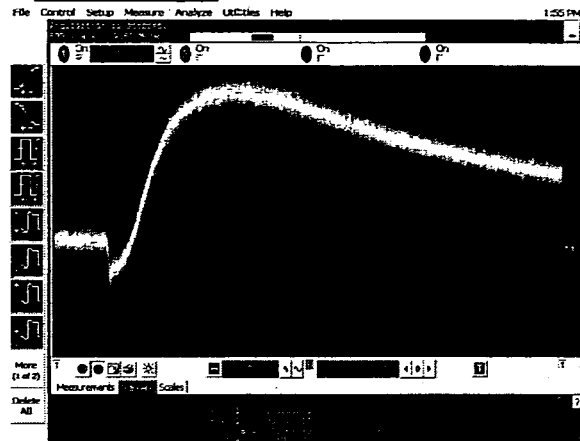
$\Delta T=28 \text{ deg.}$





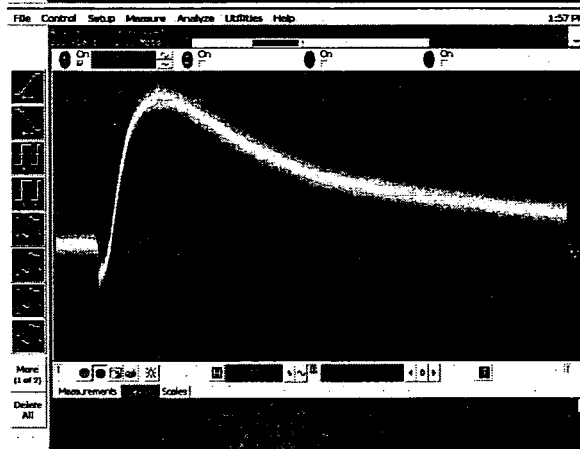
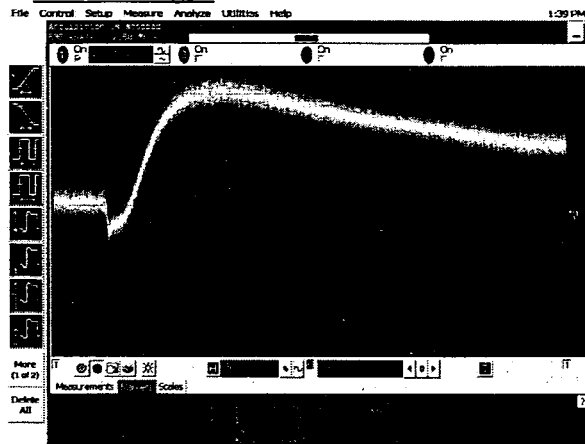
<液相 (水) 温度 60°Cの場合>

$\Delta T=38 \text{ deg.}$



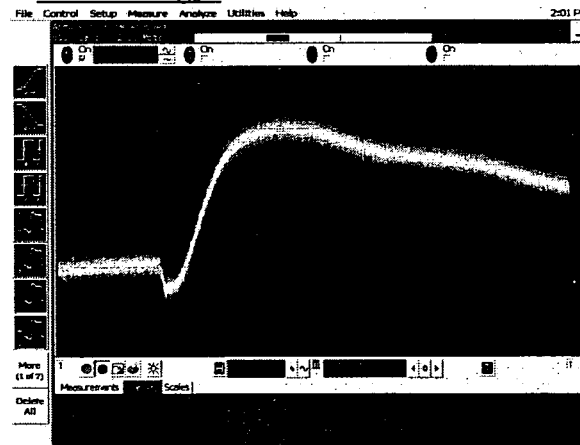
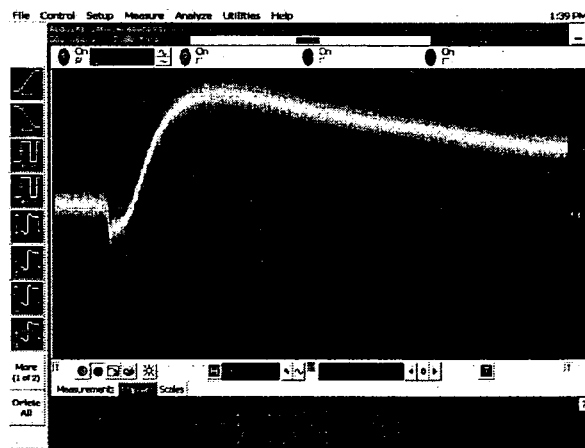
<液相 (水) 温度 55°Cの場合>

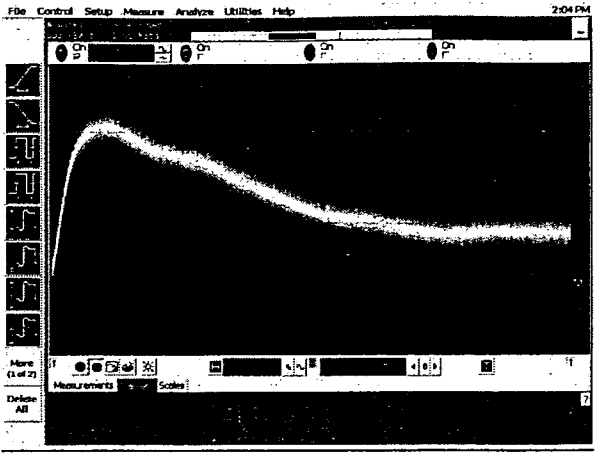
$\Delta T=33 \text{ deg.}$



<液相 (水) 温度 65°Cの場合>

$\Delta T=43 \text{ deg.}$



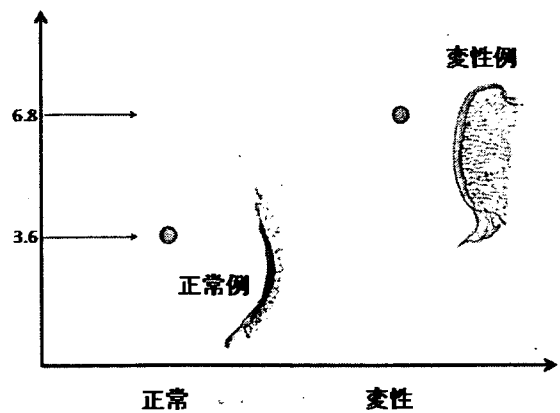


これらの結果を一覧表にまとめて以下に示す。

T room	T bath	$\Delta T$	$\Delta V_p$	$T_p$	$T_e$
			mV	msec	ms
22	1	-21	-4.08	91	357
	22	0			
	34	12	2.32	140	1825
	40	18	2.88	150	876
	45	23	4.07	108	707
	50	28	4.94	94	648
	55	33	6.25	105	740
	60	38	8.35	122	497
	65	43	7.77	117	536

### [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したヒト骨軟骨プラグを対象とした計測を行ったところ、超音響信号が観察された。計測結果（減衰時間）と病理切片（サフラニンO染色）の代表的な組織像と比較したグラフを作成し、以下に示す。グラフの縦軸が減衰時間（ $\mu s$ ）である。



## D. 考察

### [1] 励起光源の最適化

本項目の目的は、開発システムを臨床使用可能には、システム全体を小型化し、可搬化する必要がある。レーザー光は種類によっては、実験室でしか使用できないような大型でかつ、複雑な手順でしか操作できないようなものもある。一方で、半導体技術の進歩により小型化・パッケージされたレーザーもある。臨床現場に持ち込むためには、小型で安全に使用できるレーザーで本開発システムを構成する必要がある。軟骨組織に吸収のある波長を共振できて上記の仕様を満たすレーザーが Q スイッチ Nd:YAG レーザーの第 3 高調波であることに着目したところ、所望の力学特性計測ができることを今回示した。すなわち、システム全体の小型化において最も重要な点が本項目で検討され、システム全体の小型化が可能となる目処がたった。

### [2] 実用的プローブの検討

超音波実験系の動作確認では、構築した実験系で所望の測定ができることを確認した。P(VdF/TrFE)プローブのパルスエコー法による評価においては、1 次反射波形の  $V_{pp}$  から測定した受信感度（送信強度も含まれる）はプローブ A、B を除けばある程度実用的な値であり、プローブ A、B については P(VdF/TrFE) フィルム膜厚がそれぞれ  $100\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$  であり膜厚が厚いことにより機械的振動強度が弱く、 $V_{pp}$  が低くなっているものと考えられる。すなわちフィルム膜厚は加工上問題がない範囲で出来るだけ薄い方がよいことが実験的に示された。プローブの共振周波数は反射波形の第 1 周期から求められる自動測定

値と FFT の周波数特性からの Peak 周波数値に差が出ている。FFT では周波数成分の対象帯域全体での積分から求めているので共振周波数としては自動測定値を採用した。一般にフィルムセンサーの共振周波数は  $\lambda/4$  共振よりセンサーの共振周波数  $f_r$  は高分子フィルム内の音速を  $2100(\text{m/s})$ 、高分子膜厚  $d(\text{m})$  とすると  $f_r = 2100/4d$  より求められ、これよりそれぞれの膜厚に対して以下のような値をとる。

$$d=50\mu\text{m}\cdots 10.5\text{MHz}$$

$$d=100\mu\text{m}\cdots 5.25\text{MHz}$$

$$d=500\mu\text{m}\cdots 1\text{MHz}$$

今回の測定でプローブの共振周波数（自動測定値）はプローブ A $\cdots$ 4.7MHz、プローブ B $\cdots$ 2.3MHz、プローブ C $\cdots$ 10.6MHz、プローブ D $\cdots$ 9.1MHz。また B3~B9 では 8.3 MHz~11.0 MHz であり、プローブ B を除けば上記の計算値に対してほぼ 20%以内の範囲にある。これはフィルム膜厚のバラツキ差のほか電極層及び保護膜が加わった状態での厚さおよび音速の値で共振周波数が決まるため同一条件であっても 20%程度の差が出るものと考えられる。またプローブ B は高分子膜厚が  $500\mu\text{m}$  であるがその反射波受信感度は小さく、発信面から反射板までの距離が 1cm で漸く反射波形が観測ができる程度であることより共振周波数が測定できていないものと判断した。反射波形・高調波成分はすべてのプローブで発生が観測された。今回は残響時間の評価が出来ていないが、高調波成分は残響時間に影響する。

P(VdF/TrFE)プローブのスルー送信法による評価では、パルスエコー法とは違い共振周波数は自動測定値と FFT の Peak 周