

## フッ素系高分子を利用した水中衝撃波測定用圧力センサーの開発 (1)

村田健司\*, 高橋勝彦\*, 加藤幸夫\*, 村井幸一\*\*

我々は、100 MPaを越える爆源近傍のような高い圧力領域の水中衝撃波の測定を行うために、ポリフッ化ビニリデン(PVDF)及びフッ化ビニリデンとトリフルオロエチレンの共重合体(VDF-TFE)を感圧部分に使用した、水中衝撃波測定用の圧力センサーを開発し、その性能を水中爆発性能評価試験によってトルマリンゲージと比較・検討した。

その結果、VDF-TFEを使用した圧力センサーは、トルマリンゲージと同等以上の性能を示し、衝撃波のピーク圧力が107 MPaであっても衝撃波エネルギーの測定が可能であった。

一方、PVDFを用いた圧力センサーは、水中衝撃波のピーク圧力の測定は可能であるが、水中衝撃波の減衰部分の測定が困難であった。

### 1. 緒言

水中爆発性能評価試験(以下、水中爆発試験と略記する)は、その測定法の原理上、火薬・爆薬の有するエネルギーを衝撃波エネルギー( $E_s$ )及びバブルエネルギー( $E_b$ )に分離し、かつ定量的に評価できる利点がある。このため、水中爆発は長年多岐にわたり多くの研究者により研究され、その理論的取り扱いがColeの著書<sup>1)</sup>に詳細にまとめられており、その著書は現在においても古典的バイブルとなっている。

水中爆発試験用の圧力センサーは、感圧部分に圧電性を有するトルマリン(電気石)を使用したトルマリンゲージが一般に使用されている。しかし、トルマリンは鉱物結晶であるため脆性破壊しやすく、衝撃波のピーク圧力が20~30 MPa程度までが繰り返し実験できる上限である。

トルマリンゲージ以外の衝撃波の測定手法に関しては、弾性棒を圧力変換器として用い、同時に光学的な手法も用いた水中衝撃波のピーク圧力の測定<sup>2)</sup>、水面の変位の計測による水中衝撃圧の測定<sup>3)</sup>、圧電性を示すフッ素系高分子<sup>4)</sup>を圧力変換器として用いたF. Baureら<sup>5), 6)</sup>による、ポリビニリデンフルオライド

(Polyvinylidene fluoride; PVDF)或いはビニリデンフルオライド(Vinylidene fluoride; VDF)とトリフルオロエチレン(Trifluoroethylene; TFE)の共重合体(以下、VDF-TFEと略記する)による固体中の衝撃波の測定、PVDFを金属のホルダー内に取り付け、体内結石破碎用微小爆発における水中衝撃波のピーク圧力の測定<sup>7)</sup>がすでに行われている。

しかし、トルマリンゲージよりも耐圧性能が優れ、爆薬近傍の100 MPaを越えるような非常に高い圧力領域においても、衝撃波のピーク圧力だけではなくピーク圧力以降の減衰部分も含めた衝撃波の波形全体の測定、及び $E_s$ の解析が可能なる圧力センサーの報告は無く、この領域での測定が可能であり、衝撃波の構造の解明に有効な高性能圧力センサーの開発が望まれている。

本研究では、この課題を解決するために、トルマリンゲージに代わる新たな圧力センサーの開発を目的とした。

トルマリンゲージの耐圧性能の上限は、トルマリンの結晶構造が部分的にあるいは全体的に脆性破壊することによって決まることから、我々は圧電性を有しながらも脆性破壊しにくいと思われる素材の調査を実施した。その結果、各種の圧電性物質の中でもPVDFを代表としたフッ素系高分子が高分子特有の粘弾性を有するため、衝撃波による破壊に対する抵抗性を有するのではないかと考え、2種類のフッ素系高分子PVDF及びVDF-TFEを感圧部分に用いた2種類の圧力センサーを考案した。そして、水中爆発試験を行い測定した圧力-時間曲線から $E_s$ の定量的可能性に

1996年1月5日受理

\*日本油脂(株)愛知事業所武豊工場 研究開発部  
〒470-23 愛知県知多郡武豊町字北小松谷61-1  
TEL 0569-72-0915  
FAX 0569-73-7376

\*\*秋田大学 鉱山学部 物質工学科  
〒010 秋田市手形学園町1-1  
TEL 0188-89-2440  
FAX 0188-37-0404

ついてトルマリンゲージによる測定結果と比較検討した。

また、水中爆発試験においては、 $E_s$ の測定だけでなく $E_b$ の測定も行われる。 $E_b$ は、バブルの脈動現象に伴うバブルパルスの測定を行い、衝撃波との時間差、即ち第1バブル周期( $T_b$ )から求められる。開発した圧力センサーについてもバブルパルスの測定を行い、トルマリンゲージによる測定結果と比較検討した。

その結果、フッ素系高分子は水中爆発試験用の水中衝撃波測定用圧力センサーの感圧部分への応用が可能であり、水中衝撃波の測定による $E_s$ の定量、バブルパルスの測定による $E_b$ の定量が可能なる圧力センサーを開発したので報告する。

## 2. センサーの動作原理と測定方法

トルマリン、PVDFのような圧電性物質を感圧部分に使用した圧力センサーに、衝撃波が作用する場合の挙動は以下のように考える事ができる<sup>8)</sup>。

感圧部分に衝撃波によって圧縮応力 $\sigma$  (N/㎡)が作用すると、感圧部分の圧電定数を $d$  (C/N)、受圧面積を $S$  (㎡)とするならば、発生電荷量 $Q$  (C)は、式(1)で表すことができる。

$$Q = d \cdot S \cdot \sigma \quad (1)$$

次に、センサーを直接ケーブルで波形観測機器に接続し測定する最も単純な構成の直結計測系を考えると、センサーから波形観測機器に至る各部分には、静電容量 $C$  (F)のコンデンサーが存在し、Fig. 1 (a)の等価回路で表すことができる。

感圧部分の静電容量を $C_e$  (F)、感圧部分を保持しケーブルに接続するためのセンサーの構造に基づく静電容量を $C_s$  (F)、ケーブルの静電容量を $C_c$  (F)、接続するオシロスコープ等の波形観測機器の入力端子の静電容量を $C_m$  (F)とするならば、波形観測機器で観測される出力電圧 $V_o$  (V)は、式(2)で表すことができる。

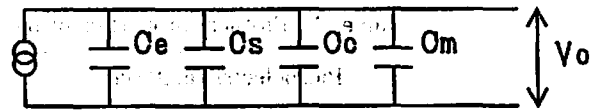
$$V_o = Q / (C_e + C_s + C_c + C_m) \quad (2)$$

$C_e$ は、感圧部分に用いる物質の誘電率、電極の面積に比例し、電極間の厚みに反比例する。トルマリンでは、直径6mm、厚み2mmの場合 $C_e$ は数pFであり、PVDF及びVDF-TFEでは、厚み50ミクロンで5mm角の場合 $C_e$ は数百pFである。

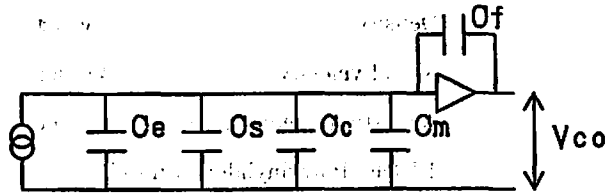
$C_s$ は、主にセンサーの構造各部の浮遊容量であり、センサーの構造によって変化する。

$C_c$ は、接続ケーブルの種類と長さによって決まる値であり、50Ω系汎用高周波同軸ケーブルでは、1m当たり約85~100pFの静電容量である。

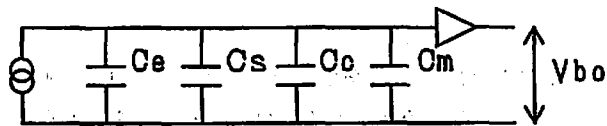
通常の水中爆発試験では、センサーと計測機器を接続するケーブルの長さは30m以上必要となる。従っ



(a) Equivalent circuit for sensor with measurement system



(b) Equivalent circuit for sensor with charge amplifier



(c) Equivalent circuit for sensor with buffer amplifier

Fig. 1 Schematics of equivalent circuit for various measurement systems

$C_e$ ; Capacitance of sensor element,  $C_s$ ; Capacitance of sensor's structure  $C_c$ ; Capacitance of cable,  $C_m$ ; Capacitance of measurement system at input terminal,  $C_f$ ; Capacitance of feedback condenser of charge amplifier,  $V_o$ ; Output voltage,  $V_{co}$ ; Output voltage of charge amplifier,  $V_{bo}$ ; Output voltage of buffer amplifier

て $C_c$ は数千pF以上である。

$C_m$ は、波形観測機器の種類に依存し、通常用いられるデジタルオシロスコープ、ストレージオシロスコープでは機種によって大きく異なるが、一般に数十~百pF程度の装置が多い。

ここで問題となるのは、出力電圧 $V_o$ は式(2)に明らかなように静電容量の変化の影響を受けることである。特にケーブルの長さが変わると $C_c$ が大きく変化するため、出力電圧 $V_o$ は大きな影響を受けるという欠点が存在することである。

このため、トルマリン、水晶等の圧電性物質を感圧部分に用いたセンサーは、センサーからのケーブルを入力容量 $C_m$ 、フィードバックコンデンサーの容量 $C_f$  (F)のチャージアンプに接続し、チャージアンプの出力 $V_{co}$  (V)を波形観測機器で測定することが行われている。

この場合にも、測定系の各部にはコンデンサーが存在し、Fig. 1 (b)の等価回路で表すことができる。チャージアンプの入力容量 $C_m$ は $C_e$ 、 $C_s$ 、 $C_c$ を無視できるほど極めて大きく<sup>9)</sup>、チャージアンプの入力端子間

Table 1 Physical properties of piezoelectric fluoropolymers and tourmaline

Piezoelectric material	PVDF	VDF-TFE	Tourmaline
Piezoelectric modulus $d_{33}$ (pC/N)	12	9	2
Dielectric constant ratio $\epsilon/\epsilon_0$	12	10	1
Density ( $g/cm^3$ )	1.8	1.9	6.0
Sound velocity (km/sec)	1.9	2.4	3.1
Acoustic impedance ( $kg/m^2 \times sec$ )	$3.4 \times 10^6$	$4.5 \times 10^6$	$19 \times 10^6$

PVDF; Polyvinylidene fluoride

VDF-TFE; Vinylidene fluoride-trifluoroethylene copolymer

$d_{33}$ ; Piezoelectric modulus of  $d_{33}$  axis

$\epsilon$ ; Dielectric constant of piezoelectric material,  $\epsilon_0$ ; Dielectric constant at vacuum

には電圧はほとんど発生しない。しかし、Cfの両端には、感圧部に発生した電荷Qに比例した電圧が発生し、それがチャージアンプの出力 $V_{co}$ として出力され、その値は式(3)で表すことができるという特徴を有する。

$$V_{co} = Q/C_f \quad (3)$$

チャージアンプを用いる使用形態においては、圧力センサーは圧力に応じて電荷を供給するデバイスとして作用することから「電荷出力型」と呼ばれている<sup>10)</sup>。

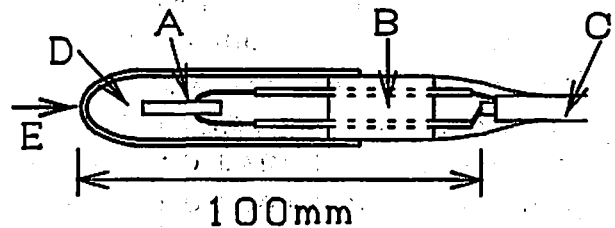
チャージアンプには上記のような利点もあるが、入力端子のインピーダンスが極めて大きく、動作が不安定で、チャージリークやノイズの影響を受けやすいという欠点も存在する。

以上のように、直結計測系とチャージアンプを用いる計測系には各々長所と短所が存在する。

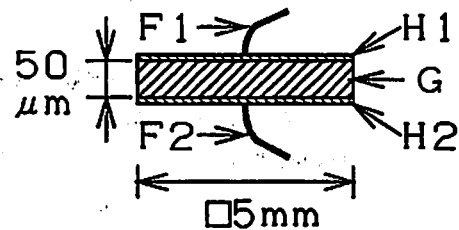
### 3. 実験

#### 3.1 センサーの製作

製作した圧力センサーの感圧部分に使用した2種類のフッ素系高分子PVDFとVDF-TFEの物性をTable 1に、圧力センサーの断面構造をFig. 2に示す。PVDFは、常法に従い重合し、キャスト法により原料薄膜とし、所定の厚みになるよう延伸処理を行った<sup>4)</sup>。平均重合度は、 $n = 800 \sim 1500$ 、結晶化度は30~50%である。VDF-TFEは、モノマーモル比がVDF:TFE=80%:20%である以外はPVDFと同じである。延伸処理後のシート(G)は、アルミニウム電極(H1, H2)を両面に蒸着した後分極処理を行い<sup>4)</sup>、5mm角の正方形に切断し感圧部分とした。感圧部分のアルミニウム電極にリード線(F1, F2)(直径0.5mm、錫メッキ軟銅線)を極少量の導電性エポキシ樹脂系接着剤(グレースジャパン(社)製、エコボンド83



(a) Schematic of fluoropolymer sensor



(b) Sections of sensing element

Fig. 2 Schematic of fluoropolymer sensor and sections of sensing element

(A) Sensing element, (B) Body, (C) Coaxial cable, (D) Insulation oil, (E) Shock wave, (F1, F2) Copper wire, (G) Fluoropolymer, (H1, H2) Aluminum electrode

C)によって電氣的に接続し、さらに同軸ケーブル(C)(JIS C 3501, 型式3D-2V)に半田付けによって、感圧部分が加圧された場合に正に分極する側の電極が同軸ケーブルの心線側になるよう電氣的に接続した。リード線を内部に収納するボディ(B)は、直径が10mm、長さが30mmであり、エポキシ系樹脂(グレースジャパン(社)製、スタイクキャスト1266)を用いて製作した。

信号伝達経路の組立が完了した後、絶縁油(D)(ポリジメチルシロキサン、重合度 $n = 2 \sim 8$ <sup>11)</sup>)を充填したポリアミド製のキャップ(TYGON®, R-3603, コード3/8, 内径10mm、厚み1mmのチューブの片端を閉じ、長さ70mmに切断した物)をかぶせ、直径0.3

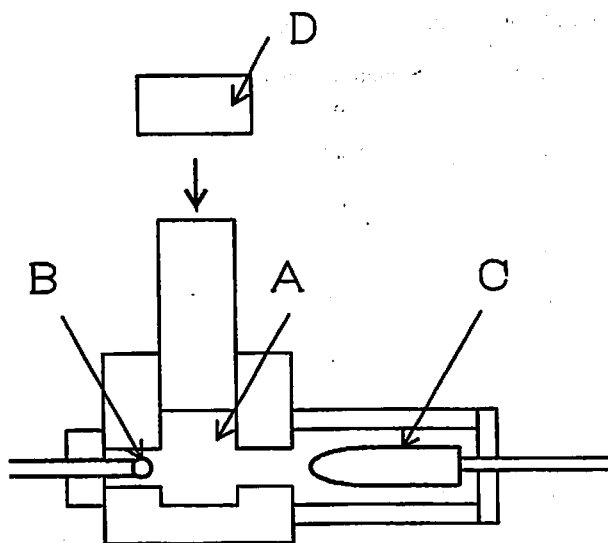


Fig. 3 Schematic of calibration apparatus  
(A) Oil, (B) Reference sensor; Model 136 A sensor, (C) Calibrated sensor; PVDF or VDF-TFE sensor, (D) Impact weight

mmのナイロンワイヤー(東レテグス, 0.03号, 東レ(株)製)で固縛し, ビニールテープで結び目部分がほどけないよう固定すると共に, 同軸ケーブルとリード線の接続部分の絶縁と防水処理を行った。センサーの完成後の寸法は, キャップの先端からリード線と同軸ケーブルの接続部分までの長さが100mm, 最大直径が12mmである。

以降, PVDFを感圧部分に使用した圧力センサーをPVDFセンサー, 同様にVDF-TFEを使用したセンサーをVDF-TFEセンサーと呼ぶ。

### 3.2 センサーの校正

組み立てた圧力センサーは, Fig. 3に示す油圧校正装置(Piezotronics社, 以下PCB社と略記する, Model 913 A 02)を使用し, 油圧パルスによる校正を実施し, 感度係数を求めた。

基準圧力センサー(B)には, 感圧部分にトルマリンを使用し液体中の圧力測定に適したPCB社, Model 136 A(ST-6)(測定レンジ0~20000 psi, (=0~138 MPa), 感度係数0.2 pC/psi, 共振周波数100 kHz)を使用した。基準圧力センサー出力は同軸ケーブル(PCB社Model 002 C/10)を用いてチャージアンプ(PCB社Model 462 A 37, 周波数帯域0~100 kHz, カットオフ周波数80 kHzのローパスフィルター内蔵)に接続し, チャージアンプからの出力をデジタルオシロスコープ(ニコレ社 Model Pro 50, AD変換部分解能8 bits, 最高サンプリング間隔5 nsec, 最高サンプリング点数64000点)の1 chに接続した。

感度係数を求めるためPVDFセンサーまたはVDF-

TFEセンサー(C)の出力は, 同軸ケーブルでバッファアンプに接続し, バッファアンプの出力をデジタルオシロスコープの2 chに接続した。このバッファアンプを用いる計測系については, 「4.1 センサーの校正結果」の章に詳しく報告する。

油圧チャンパー内には, 絶縁油(A)を気泡が残らない様充填した後, インパクトウエイト(D)の落高を10~50 cmと変化させることによって, 2~40 MPa程度の油圧を発生させ, 各圧力における両圧力センサーの出力をオシロスコープで同時に観測し(ニコレ(社) Model Pro 50, 測定サンプリング間隔2 μsec, 測定サンプリング点数10000点)電圧の時間変化を記録し, 各圧力における基準圧力センサーの最大圧力値と被校正圧力センサーの最大出力電圧を比較し, 被校正圧力センサーの各圧力における出力電圧値を得た。

そして, 被校正圧力センサーの出力電圧値を最小2乗法によって直線に近似することによって, 直線の傾きから単位出力電圧当たりの圧力値, すなわち感度係数を得た。

同様に, 比較に使用するトルマリンゲージ(PCB社 Model 138 A 10, 測定レンジ0~10000 psi (=0~69 MPa), 周波数帯域2.5 Hz~1 MHz)についても, 水中爆発試験に使用するケーブル(PCB社 Model 002 C/134)とゲイン付電源(PCB社 Model 480 D 09, 周波数帯域0.15 Hz~100 kHz)を用い, インパクトウエイトの落高を10~30 cmと変化させることによって, 2~20 MPa程度の油圧を発生させ, 基準圧力センサーと比較校正した。

### 3.3 水中爆発試験

Table 2の実験条件に従い, エマルジョン爆薬(爆轟速度3200 m/sec, 密度は1.1 g/cm<sup>3</sup>)を用いた水中爆発試験を実施し, PVDFセンサー, VDF-TFEセンサー及びトルマリンゲージによる測定結果を比較検討した。Fig. 4に水中爆発試験池及びセンサーの設置方法を示す。池の寸法は, 水面での直径が36 m, 最深部の直径が10 m, 最深部までの水深が8 mである。球形に成形したエマルジョン爆薬は, 池の中央水深4 mの位置にセットし, 先端を中心部まで挿入した6号瞬発電気雷管にて起爆した。圧力センサーは爆薬と同水深で, センサーの感圧部分と爆薬の中心間の距離, すなわちスタンドオフ(R)が所定の距離0.2~4 mの位置になるように設置した。これらの, 水中爆発試験の実施方法については, 参考文献12)に詳しく報告しているのでここでは省略する。

PVDFセンサー及びVDF-TFEセンサーの出力は, 同軸ケーブルによって計測室まで信号を伝搬し, バッファアンプに接続し, バッファアンプの出力は,

Table 2 Experimental conditions

Run	Charge weight (g)	Stand off (m)	Scaled distance (m/kg <sup>1/3</sup> )
1	100	0.200	0.431
2	100	0.300	0.646
3	100	0.500	1.08
4	200	1.00	1.71
5	500	2.00	2.52
6	300	2.00	2.99
7	100	2.00	4.30
8	200	3.00	5.13
9	200	4.00	6.83

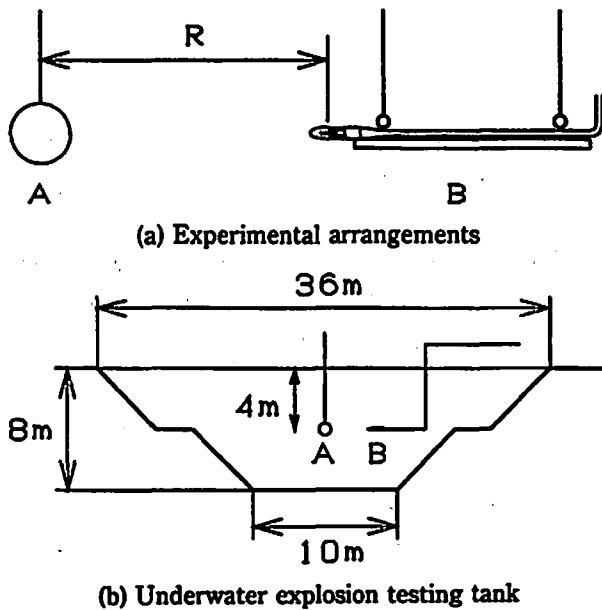


Fig. 4 Experimental arrangements and underwater explosion testing tank  
(A) Charge, (B) Sensors, (R) Stand off distance

サンプリング時間間隔の異なる2台のデジタルオシロスコープ((1)衝撃波用;ニコレ(社) Model 460, AD変換部分解能8 bits, 最高サンプリング間隔5 nsec, 最高サンプリング点数64000点, 測定サンプリング間隔200 nsec, 測定サンプリング点数20000点, (2)バブルパルス用;ニコレ(社) Model Pro 50, 測定サンプリング間隔20 μsec, 測定サンプリング点数20000点)に並列に接続し, 衝撃波部分とバブルパルスに分けて電圧の時間変化として記録した。

比較のためのトルマリンゲージは, 同軸ケーブル(PCB社 Model 002 C/134)によってゲイン付電源

(PCB社 Model 480 D 09)に接続し, その出力を, デジタルオシロスコープに接続し記録した。

尚, これらの水中爆発試験に使用する, ケーブル, アンプ類は全て校正に使用した物と同一である。

次に, デジタルオシロスコープによって記録した電圧信号波形を解析し,  $E_s$ を式(4)に従い,  $E_b$ を式(5)に従い計算した。

$$E_s = (4\pi R^2 / \rho_w \cdot C_w \cdot W) \int_0^{\theta} P(t)^2 dt \quad (\text{MJ/kg}) \quad (4)$$

$$E_b = 68.4 \cdot P_0^{5/2} \cdot T_b^3 / W \quad (\text{MJ/kg}) \quad (5)$$

ここで,  $R$ は爆薬と圧力センサーの距離(m),  $\rho_w$ は水の密度(kg/m<sup>3</sup>),  $C_w$ は水の音速(m/sec),  $\theta$ は特性時間(sec),  $P(t)$ は時間 $t$ における衝撃波圧力(Pa),  $W$ は爆薬の質量(kg),  $P_0$ は爆薬の水深における静水圧(100 kPa),  $T_b$ はバブル周期(sec)である。

測定された衝撃波圧力のピーク圧力までの立ち上がり時間の1/2の時間を0 secとして, ピーク圧力以降の衝撃波圧力曲線の最小二乗法による近似曲線を, この時間まで外挿した時の圧力を最大衝撃圧力( $P_{max}$ )とし, 測定された衝撃圧力が,  $P_{max}/e$ ( $e$ は自然対数の底)となるまでの時間が $\theta$ である。

この水中爆発試験における $E_s$ の計算方法についての詳細は参考文献12)に記述しており,  $E_b$ を求める式(5)の計算方法は参考文献12), 13)に詳しく紹介されているのでここでは省略する。

#### 4. 実験結果及び考察

##### 4.1 センサーの校正結果

PVDFセンサー及びVDF-TFEセンサーが校正器の油圧パルスを受けて発生した電荷を比例した電圧信号として測定するために, 2種類の汎用チャージアン

ブ(キスラー社 形式5007, 周波数帯域1 Hz~100 kHz, 及びPCB社, Model 462A 37, 周波数帯域0~100 kHz, カットオフ周波数80 kHzのローパスフィルター内蔵)を用いての測定を試みた。その結果チャージアンプとのインピーダンスマッチングが取れないことに起因すると思われるノイズが大きく, 校正が困難であった。

そこで我々は, チャージアンプを用いない測定系の開発を, 校正に先立ち実施することにした。

検討の結果, Fig. 1 (C)に示すように, 入力容量 $C_m$ を持つバッファアンプを開発し, センサーの出力は波形観測機器に直接接続せず, バッファアンプに接続し, この出力電圧 $V_{bo}$  (V)を波形観測機器に接続する計測系を開発した。この計測系の動作原理と特徴について以下に簡単に説明する。

バッファアンプの増幅率を $k$ とし, その出力電圧 $V_{bo}$ とすると, 前述の式(1)と式(2)から式(6)が得られる。

$$V_{bo} = k \cdot d \cdot S \cdot \sigma / (C_e + C_s + C_c + C_m) \quad (6)$$

式(6)において, PVDF及びVDF-TFEは, Table 1に示したように, 各々固有の $d$ を持つ。

$S$ は, 5 mm角すなわち25 mm<sup>2</sup>である。

$C_e$ は, 感圧部分のコンデンサーを形成する電極面積と誘電率に比例し電極間距離に反比例する。本実験の感圧部分は受圧面全面にアルミニウムを蒸着した電極であるため, 電極面積は $S$ と同一面積で25 mm<sup>2</sup>である, 電極間距離はPVDF及びVDF-TFEのシートの厚みと同じで50  $\mu$ mである。PVDF及びVDF-TFEはTable 1に示す固有の誘電率を持つため,  $C_e$ は一定の値となる。

$C_s$ は, センサーの構造各部の浮遊容量によって決まる。本圧力センサーにおいては, 感圧部分の材質以外は, センサーの寸法・構造が同一なので数pF程度となる。

そのため, 式(6)の左辺即ち観測される出力電圧に影響を与える可能性があるのは,  $C_c$ ,  $C_m$ 及び $k$ となる。

$C_c$ は, ケーブルの種類と長さに依存するため, 1 m当たり85 pFの静電容量で長さ30 mの固定長のケーブルを用いることで, 2550 pFとした。

$C_m$ は, バッファアンプの入力容量である。我々は, 回路素子に電界効果トランジスタを使用することで, バッファアンプの出力側に接続される波形観測機器の構成が変化しても,  $C_m$ は約10 pF,  $k$ は1.0と常に一定の値を持つバッファアンプを開発した。

以上の計測系を用いることにより, 式(6)の $\sigma$ 以外

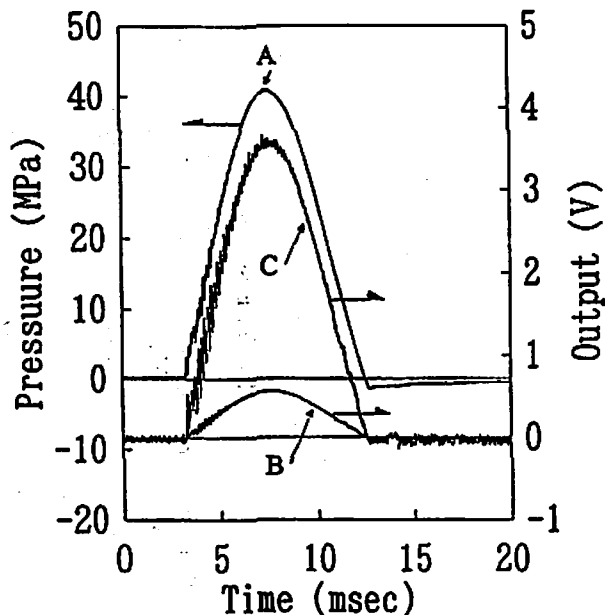


Fig. 5 Example of pressure waves by calibration  
A; 136 A sensor (reference), B; PVDF sensor, C; VDF-TFE sensor

の各項は一定の値となり, PVDFセンサー及びVDF-TFEセンサーとバッファアンプを用いた計測系は, 圧力すなわち $\sigma$ に比例した電圧を発生するデバイスとして作用し, 安定した測定が可能となった。

尚, 本実験に用いたバッファアンプの $k$ は1.0であるがこの $k$ を適宜変化させることで出力電圧の調整も可能である。

Fig. 5に, 校正装置による圧力の測定例を示す。PVDFセンサーの出力は, 校正装置が1度に1本のセンサーしか校正できないため, 同一条件で校正圧力を印可した場合の波形を比較のため同一図にプロットしたものである。校正圧力波形については, PVDFセンサー, VDF-TFEセンサーとも, 基準センサーと同様に山状の圧力曲線が得られており, 立ち上がりが遅れる等の異常波形, 電荷が急激に放電し出力電圧が低下する等の異常波形, リンキング等の発振現象による異常波形は観測されなかった。VDF-TFEセンサーには, 隣接したデジタルオシロスコープからの誘導と思われる, 約250 kHzの高周波のノイズが認められたため, 最大電圧を求める前にスムージング処理を行った。基準センサーに同様の高周波のノイズが観測されないのは, 基準センサーの上限周波数帯域が100 kHzであり, チャージアンプにもカットオフ周波数が80 kHzのローパスフィルターが内蔵されている為と考えられる。

校正の結果, PVDFセンサーの感度係数は, 70.0 (MPa/V), VDF-TFEセンサー11.2 (MPa/V)であり,

Table 3 Results of underwater shock waves measurements

Type of sensor	138 A 10 sensor			PVDF sensor			VDF-TFE sensor		
Run	Peak pressure (MPa)	Shock energy (MJ/kg)	Characteristic time ( $\mu$ sec)	Peak pressure (MPa)	Shock energy (MJ/kg)	Characteristic time ( $\mu$ sec)	Peak pressure (MPa)	Shock energy (MJ/kg)	Characteristic time ( $\mu$ sec)
1	—	—	—	—	—	—	107.	0.867	38.1
2	—	—	—	—	—	—	57.8	0.810	50.1
3	*	*	*	—	—	—	36.9	0.854	52.0
4	20.9	0.788	78.6	19.7	0.01	3.0	21.0	0.802	77.1
5	14.4	0.803	107.	—	—	—	15.3	0.864	103.
6	12.4	0.821	88.9	—	—	—	13.4	0.863	79.9
7	7.66	0.777	73.2	—	—	—	8.40	0.850	65.9
8	6.70	0.793	87.2	—	—	—	7.32	0.842	81.6
9	4.83	0.777	88.8	5.80	0.07	6.0	5.37	0.845	77.9

\*; Damaged by strong shock wave —; Non experiment

Table 4 Results of underwater bubble pulses measurements

Type of sensor	138A 10 sensor		PVDF sensor		VDF-TFE sensor	
Run	Bubble time (msec)	Bubble energy (MJ/kg)	Bubble time (msec)	Bubble energy (MJ/kg)	Bubble time (msec)	Bubble energy (MJ/kg)
1	—	—	—	—	108.5	2.04
2	—	—	—	—	108.4	2.03
3	*	*	—	—	108.4	2.03
4	136.6	2.04	135.7	2.04	136.6	2.04
5	183.8	1.99	—	—	183.7	1.99
6	155.8	2.02	—	—	155.8	2.02
7	108.4	2.03	—	—	108.4	2.03
8	135.8	2.00	—	—	135.7	2.00
9	135.9	2.00	135.9	2.00	135.8	2.00

\*; Damaged by strong shock wave —; Non experiment

感度係数の誤差は、±3～5%と考えられる。

圧力センサーの感圧部分に使用したPVDF、VDF-TFEの2種類のフッ素系高分子の圧電定数、誘電率はほぼ同一であり、かつ感圧部分の寸法形状も同一であるにも関わらず、VDF-TFEセンサーの方が、同一圧力に対して大きな電圧出力が得られた。これは、圧電定数を測定する際の応力印可条件と校正時における応力の印可条件が異なるため、あるいはVDF-TFEの方がPVDFよりも発生した電荷の感圧部分内部での損失が少ない為ではないかと思われる。

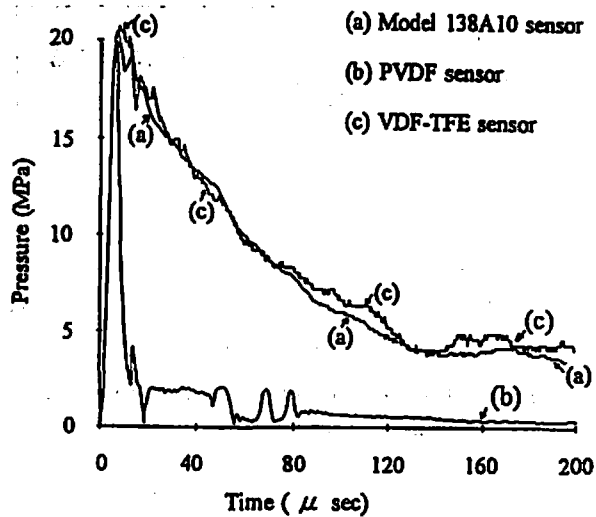
4.2 水中爆発試験結果

Table 3に衝撃波の測定結果を、Table 4にバブルの測定結果を示す。

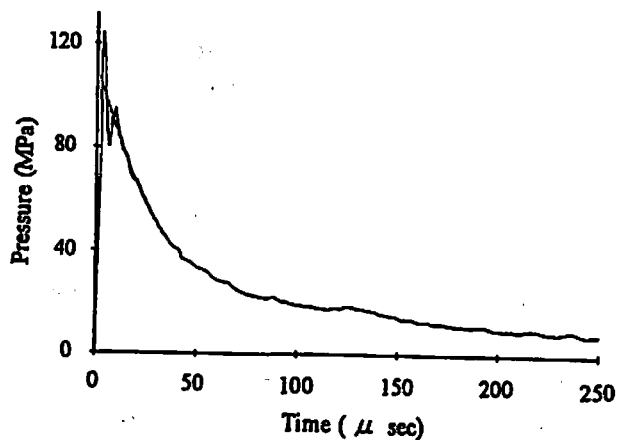
実験順序は、圧力センサーに作用するPmaxが徐々に大きくなるようRun 9から降順で実施した。Run 1～3の試験条件においても、VDF-TFE圧力センサーは測定が可能であったが、トルマリンゲージはRun 3の試験条件で破損し測定が不可能であった。PVDFセンサーはRun 4及び9の試験条件のみ測定を行った。

Run 4の試験条件における3種類の圧力センサーによる衝撃波の波形測定例をFig. 6(a)に、Run 1の試験条件におけるVDF-TFE圧力センサーによる衝撃波の測定結果をFig. 6(b)に示す。

3種類の圧力センサーの測定結果を比較するとFig. 6(a)に明らかな様に、PVDFセンサーは、衝撃波のピーク圧力の直後から急激に出力電圧が低下したが、VDF-TFEセンサーは、トルマリンゲージと同様に衝



(a) Three types of sensors  
Charge weight; 200 (g), Stand off; 1 (m)



(b) VDF-TFE sensor  
Charge weight; 100 (g), Stand off; 0.2 (m)

Fig. 6 Example of shock wave profiles



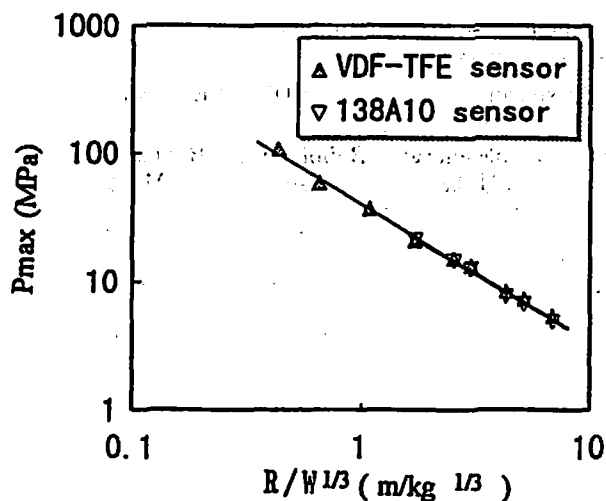


Fig. 7 Relation between  $P_{max}$  and scaled distance

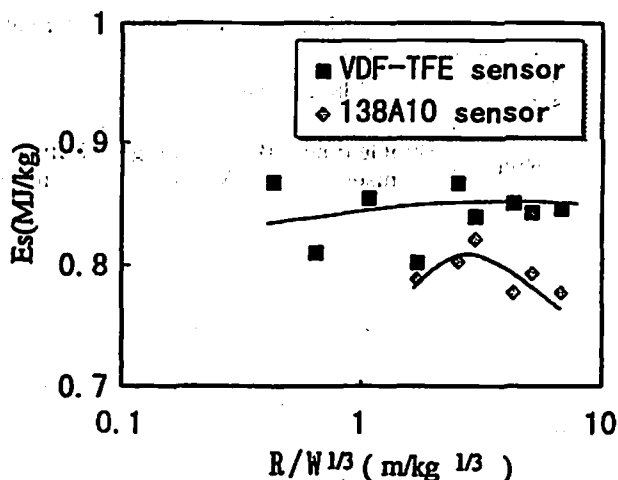


Fig. 9 Relation between shock wave energy and scaled distance

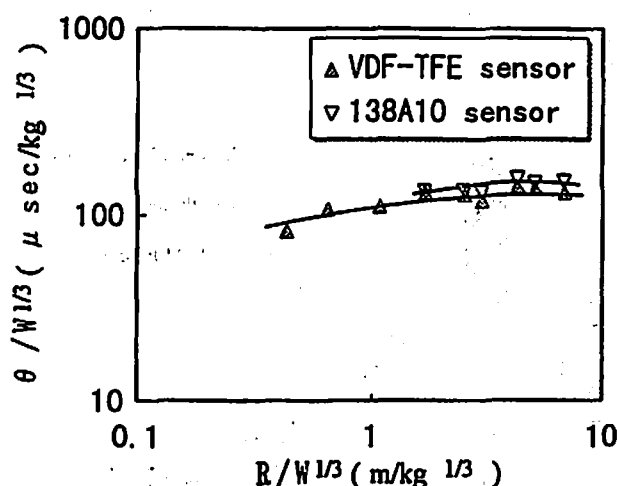


Fig. 8 Relation between scaled characteristic time  $\theta$  and scaled distance

撃波のピーク圧力だけでなく、ピーク圧力以降の圧力の減衰部分の測定も可能であった。ピーク圧力直後の波形に着目すると、VDF-TFEセンサーの方が、トルマリンゲージに比べピーク圧力直後のリンキングが少ない。これは、VDF-TFEの音響インピーダンスがトルマリンの音響インピーダンスに比べて水のそれに近いためと考えられる。VDF-TFEセンサーとトルマリンゲージのピーク圧力以降の減衰部分の波形が数回交差を繰り返しているのは、トルマリンゲージが商用電源60 Hzの誘導の影響(ハムノイズ)を受け僅かに波打っている為である。

次に、VDF-TFEセンサーとトルマリンゲージによる測定結果について、Fig. 7に $P_{max}$ と換算距離の関係、Fig. 8に換算特性時間と換算距離の関係、Fig. 9に $E_s$ と換算距離の関係をプロットし、両センサーの測定結果を相互に比較した。

2種類の圧力センサーで測定した $P_{max}$ は、VDF-TFEセンサーが平均7.5%(最小0.5%、最大11%)高いものの、Fig. 7に明らかなように、両圧力センサーの測定結果はよく一致した。

Run 1, 2の試験条件における、VDF-TFE圧力センサーの $P_{max}$ は、校正装置で発生可能な最大圧力よりも大きく、厳密には校正装置で求めたセンサーの校正値の適用範囲外であるが、 $P_{max}$ は全て1直線上にあり、100 MPa付近に於いても圧力センサーの比例領域内であると考えられる。

$\theta$ はVDF-TFEセンサーの方が平均7.4%(最小-2.0%、最大-12%)短いものの、Fig. 8に明らかなように、両圧力センサーの測定結果は良く一致している。

$E_s$ は、VDF-TFEセンサーが平均0.842 MJ/kg、138A10センサーが平均0.793 MJ/kgであり、VDF-TFEセンサーの測定値が平均6.0%(最小1.8%、最大9.4%)高いものの、Fig. 9に明らかなように、両圧力センサーの測定結果は良く一致している。

VDF-TFE圧力センサーとトルマリンゲージによる測定結果に数%の差が生じたのは、衝撃波のピーク圧力付近の波形の僅かな違いが、影響していると考えられる。

しかしながら、複数のトルマリンゲージを用いて同時計測を行っても、トルマリンゲージの個体差によって数%程度のデータのばらつきが生じることを考えれば、2つのセンサーの測定結果は良く一致したと考えられる。

PVDFセンサーの測定結果については、従来の最小自乗法を用いる解析手法の適用が困難で有り、実測圧力波形の最大値を最大衝撃圧 $P_{max}$ とし、 $\theta$ 及び $E_s$ を求めた。その結果、 $P_{max}$ はトルマリンゲージによ

る測定結果と同程度であったが、 $P_{max}$ を過ぎると急激に出力電圧が減少し、 $\theta$ がトルマリンゲージの値が1/10~1/20程度と短く、 $E_s$ は、1/10~1/80程度であった。このように、PVDFセンサーは衝撃波のピーク圧力の測定は可能であるが、ピーク圧力以降の圧力の減衰部分の測定ができず、VDF-TFEセンサーと異なった結果を与えた。これは衝撃波を測定する場合には、フッ素系高分子の内部の微細な分子配列・構造が異なることが影響し、内部抵抗の特性、特に衝撃加圧下での特性が異なり、内部抵抗による電荷のPVDF内での放電が衝撃波の持続時間に比べ速い為と考えられる。

Table 4に明らかなように、バブルパルスの測定結果は、PVDFセンサー、VDF-TFEセンサーとも、トルマリンゲージによる測定結果と一致し、バブル周期の差は $\pm 0.1$  msecの範囲内にあり、バブル周期から計算したバブルエネルギーは一致した。

## 5. 結 論

PVDF及びVDF-TFEを感圧部分に用いた水中衝撃波測定用の圧力センサーの開発を行い、以下の結果を得た。

- (1) PVDFセンサー及びVDF-TFEセンサーは、共に水中爆発試験において衝撃波のピーク圧力の測定、バブルパルスの測定が可能である。
  - (2) VDF-TFEセンサーはピーク圧力だけでなく圧力の減衰部分の測定も可能であり、トルマリンゲージと同様に $E_s$ の測定が可能である。
  - (3) VDF-TFEセンサーは、衝撃波のピーク圧力が107 MPaの試験条件においても $E_s$ の測定が可能であり、トルマリンゲージ以上の耐圧性能を有する。
- 今後は、本報告に記載しきれなかったPVDF、VDF-TFEの製造方法、分子レベルの性質、センサー

各部の詳細構造、バッファアンプの電気回路の設計・製作方法及び電気的性能の測定試験結果を統報に詳しく報告する予定である。

## 文 献

- 1) Cole, R. H., "Underwater Explosions", Dover Publications, New York (1948)
- 2) 伊藤 繁, 鈴木 修, 長野司郎, 藤田昌大, 日本機械学会講演論文集, C, 1328 (1993)
- 3) 花崎絃一, 伊藤一郎, 工業火薬協会誌, 35, 6 (1974)
- 4) 田所宏行, 田代孝二, 高分子, 29, 11 (1980)
- 5) F. Bauer, SHOCK WAVES IN CONDENSED MATTER, 1981, eds. W. J. Nellis, L. Seaman and R. A. Graham (American Institute of Physics, NY, 1982), pp. 251-262
- 6) F. Baure, Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena, eds. L. E. Murr, K. P. Staudhammer and M. A. Meyers (Marcel Dekker, NY, 1986), pp. 1071-1082
- 7) 桑原正明, 黒須清一, 神部広一, 景山鎮一, 折笠清一, 高山和喜, 日泌尿会誌, 76, 2 (1985)
- 8) 星名民雄ら, 「セラミックセンサ」, P. 81 (1980) エレセラ出版委員会, (株)技献
- 9) 鈴木雅臣「新・低周波/高周波回路設計マニュアル」, P. 64 (1988), CQ出版社
- 10) 文献8. P. 83
- 11) たとえば, 化学便覧(材料編), P. 1105 (1986), 丸善(株)
- 12) 村田健司, 高橋勝彦, 加藤幸夫, 工業火薬協会誌, 54, 3 (1993)
- 13) 田中一三, 工業火薬協会誌, 36, 11 (1975)

## Development of pressure sensors using fluoropolymer for underwater shock wave measurements (1)

by Kenji MURATA\*, Katsuhiko TAKAHASHI\*, Yukio KATO\*  
and Koichi MURAI\*\*

To realize pressure gauge which can sustain underwater shock pressure higher than 100 MPa, we developed new type of pressure gauges using two materials as sensing element, PVDF and VDF-TFE copolymer. Measurements of underwater shock wave profile were performed using new type of pressure gauges and compared with the results obtained by pressure gauge using tourmaline. Experimental results using VDF-TFE copolymer is very similar to that using tourmaline. We succeeded in measurement of underwater shock wave profile (maximum peak pressure 107 MPa) using VDF-TFE copolymer. On the other hand, using PVDF gauge can measured peak pressure (20.7 MPa). However, difficulty is to measure decay part of shock wave profile accurately.

(\*NOF Corporation Aichi Works Taketoyo-Plant 61-1 Kitakomatsudani  
Taketoyo-cho Chita-gun, Aichi 470-23, JAPAN)

\*\*Department of Materials Engineering and Applied Chemistry, Mining College,  
Akita University 1-1 Gakuen-cho Tegata Akita-city, Akita 010, JAPAN)