

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による バブルパルスの測定

村田健司*, 高橋勝彦*, 加藤幸夫*, 村井幸一**

フッ素系高分子を使用した圧力センサーを用いて、エマルジョン爆薬の水中爆発により生じたバブルパルスの測定を実施し、バブルパルスの最大圧力と力積の解析方法の検討を行うと共に、距離減衰式の導出を行った。

実験の結果、エマルジョン爆薬の水中爆発により生じたバブルパルスの最大圧力は衝撃波の最大圧力の数分の1程度であるが、バブルパルスの力積の方が衝撃波の力積よりも大きいことが判明した。これは、バブルパルスの持続時間が数ミリ秒程度と、水中衝撃波の持続時間に比べ1桁程度長く、圧力が長時間維持される為であった。

1. 緒言

多くの研究者によって、各種の爆薬を用いた水中爆発実験が実施され、水中衝撃波の測定波形から衝撃波の最大圧力(P_{max})、特性時間(θ)、衝撃波エネルギー(E_s)、衝撃波の力積(I_{mp})の解析と、換算距離($R \cdot W^{-1/3}$, R :爆薬とセンサーの距離, W :爆薬重量)の関数として表した距離減衰式^{1,2,3)}が求められている。また、バブルについては、バブル周期(T_b)、バブルエネルギー(E_b)とバブルの最大膨張半径(A_{max})の解析や高速度カメラによる撮影⁴⁾或いは電氣的測定⁵⁾によるバブルの脈動現象の解析、バブルの浮上運動に対する試験池の影響の研究⁶⁾など幅広い研究報告が行われている。

従来の水中爆発実験においては、一般に衝撃波とバブルパルスの圧力を測定するために、トルマリンセンサーが使用されてきた¹⁾。

ところが、トルマリンセンサーは感圧部分にトルマリン(電気石)を使用しているため、衝撃波のピーク圧力が20~30MPa程度が繰り返し測定可能な上限である。そのため、火薬学会規格(IV)(感度試験法)の爆力

試験(水中法)でも、爆薬量100gに対し2m離れた位置にトルマリンセンサーを設置する(換算距離; 4.31 $m \cdot kg^{-1/3}$)ことが望ましいとされている⁷⁾。

更に、トルマリンセンサーには、ピーク圧力が10~20MPa以上の衝撃波を測定すると、衝撃波の測定直後からベースラインが静水圧よりも低圧側へドリフトするという問題点がある。このベースラインのドリフトは、同一実験条件であっても実験毎に異なる。また、トルマリンセンサーの個体差、使用履歴による差も大きい。更に、 P_{max} が15~20MPaよりも大きい場合には、絶対圧力で0気圧よりも低圧側までドリフトし、数百ms以上も継続し、徐々に静水圧まで回復する。水中爆発の原理から、衝撃波の通過直後から数百msまで低圧が継続するとは考えられない。また、ベースラインの低圧側への大きなドリフトを生じたトルマリンセンサーを、実験後に再校正すると、その感度が低下している場合が多いことから、衝撃波によるトルマリン結晶の部分破壊等による劣化が生じ、それが原因でベースラインのドリフトが生じている可能性がある。

このため、ベースラインのドリフトを生じない、爆源より十分離れた位置におけるバブルパルスの最大圧力、力積の測定は可能であっても、ベースラインのドリフトを生じる爆源近傍の場合は、バブルパルスの実際の圧力と力積を小さく評価してしまう可能性がある。そのため、トルマリンセンサーによる爆源近傍領域のバブルパルスの測定と圧力及び力積の計算は困難であると考えられる。

圧電性の有機フッ素系高分子の1つであるフッ

1997年3月17日受付

2001年10月22日受理

*日本油脂(株)愛知事業所武豊工場 研究開発部
〒470-2398 愛知県知多郡武豊町字北小松谷61番地の1
TEL 0569-72-0921
FAX 0569-73-7376

E-mail kenji_murata@nof.co.jp

**秋田大学 工学資源学部 鉱業博物館
〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町1番1号
TEL 0188-89-2468
FAX 0188-89-2465

化ビニリデンとトリフルオロエチレンの共重合体 (Vinylidene fluoride-trifluoroethylene-copolymer, 以下VDF-TFE共重合体) を感圧部分に使用した圧力センサー(以下, VDF-TFE圧力センサー)は, 従来使用されているトルマリンセンサーと同様に, 衝撃波の測定結果からは P_{max} , θ , E_s , I_{mp} , バブルパルスの測定結果からは T_b , E_b , A_{max} の計算が可能であることを参考文献(8)に報告した。

VDF-TFE圧力センサーはトルマリンセンサーと異なり, P_{max} が100MPaを越えるような爆源近傍の領域であっても衝撃波の測定が可能だけでなく, 衝撃波測定後のベースラインの負圧側へのドリフトが無い特徴を有している。そのため, 爆源近傍の領域においても, バブルパルスの測定が可能である。

また, バブルパルスの圧力の持続時間は衝撃波に比べて長いため, 有限の大きさの水中爆発実験池を用いた水中爆発実験では, 水面及び底面からの反射波が合成した形で測定される¹⁾。爆源近傍の測定の場合は, バブルパルスの圧力が減衰した後に, 反射波が圧力センサーに到達する位置に配置すると, 反射波の影響が少ない条件でのバブルパルスの波形を測定できる可能性がある。

本研究では, 第1バブルパルス(以下バブルパルスと略記する)は衝撃波に比べ圧力は小さいが, その持続時間が長く, 水中爆発現象に対する構造体の応答挙動や, 地盤振動の発生挙動に大きな影響を与える可能性があると考え, VDF-TFE圧力センサーを用いて, バブルパルスの測定方法, 最大圧力及び力積の計算方法の検討を行うこととし, エマルジョン爆薬の水中爆発により生じる爆源近傍のバブルパルスの最大圧力(P_{maxb}), バブルパルスの力積(I_{mpb})の距離減衰式の導出を行ったので報告する。

2. 水中爆発実験

試料爆薬として, 酸化剤水溶液95wt%, 油剤5wt%からなる基材エマルジョン98.9wt%に対し気泡保持材を1.1wt%加えた組成を有し, 密度1100 kg \cdot m⁻³, 爆轟速度3200m \cdot s⁻¹(直径25mmの紙筒, 砂上)であるエマルジョン爆薬を用いた。

Table 1に各実験毎の爆薬量(W)と爆薬とセンサーの距離(R)及び換算距離($R \cdot W^{-1/3}$)の関係を示す。水深(D)は2mと4mに変化させた。

Fig. 1に圧力センサーと爆薬の位置関係及び実験に使用した水中爆発試験池の形状を示す。水面の直径は

Table 1 Experimental conditions

| Case | Charge depth D (m) | Charge weight W (kg) | Standoff R (m) | Scaled distance $R \cdot W^{-1/3}$ (m \cdot kg ^{-1/3}) |
|------|-----------------------|-------------------------|-------------------|---|
| 1 | 2.0 | 0.1 | 1.0 | 2.15 |
| 2 | 2.0 | 0.2 | 2.0 | 3.42 |
| 3 | 2.0 | 0.1 | 2.0 | 4.31 |
| 4 | 2.0 | 0.1 | 3.0 | 6.46 |
| 5 | 2.0 | 0.1 | 4.0 | 8.61 |
| 6 | 4.0 | 0.1 | 0.20 | 0.43 |
| 7 | 4.0 | 0.1 | 0.30 | 0.65 |
| 8 | 4.0 | 0.1 | 0.50 | 1.08 |
| 9 | 4.0 | 0.2 | 1.0 | 1.71 |
| 10 | 4.0 | 0.2 | 1.0 | 1.71 |
| 11 | 4.0 | 0.5 | 2.0 | 2.52 |
| 12 | 4.0 | 0.5 | 2.0 | 2.52 |
| 13 | 4.0 | 0.3 | 2.0 | 2.99 |
| 14 | 4.0 | 0.3 | 2.0 | 2.99 |
| 15 | 4.0 | 0.2 | 2.0 | 3.42 |
| 16 | 4.0 | 0.2 | 2.0 | 3.42 |
| 17 | 4.0 | 0.1 | 2.0 | 4.30 |
| 18 | 4.0 | 0.2 | 3.0 | 5.13 |
| 19 | 4.0 | 0.2 | 3.0 | 5.13 |
| 20 | 4.0 | 0.2 | 4.0 | 6.84 |
| 21 | 4.0 | 0.2 | 4.0 | 6.84 |

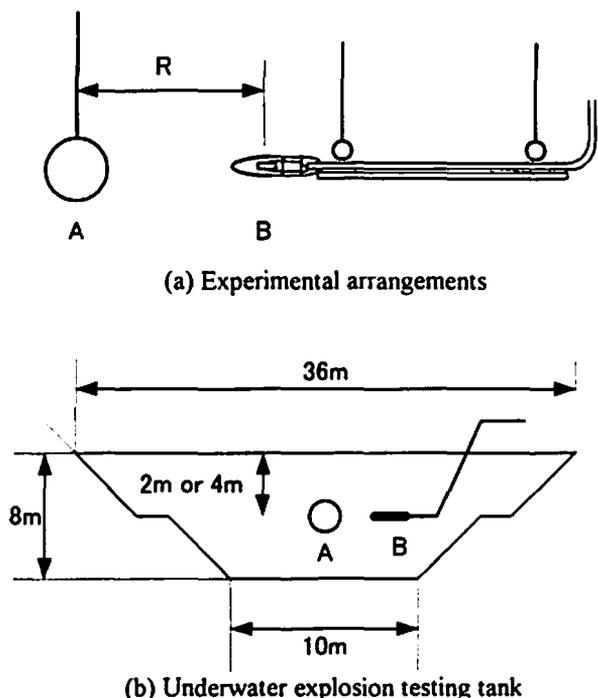


Fig. 1 Experimental arrangements and underwater testing tank
(A) Charge, (B) Sensors, R; Stand off distance

36m, 最深部の直径は10m, 最深部までの水深は8mである。爆薬は球状に成形し、ロープにて池中央の所定的水深に吊り下げ、6号電気雷管の先端を中心部分まで挿入し起爆した。

VDF-TFE圧力センサーは、爆薬と同水深で所定の距離の位置に吊り下げ、出力を記録時間分解能の異なる2台のデジタルオシロスコープに接続し、衝撃波とバブルパルスに分けて記録した。衝撃波の記録には、ニコレ社製モデル460デジタルオシロスコープ(周波数帯域DC~200MHz, 分解能8bits, 記録点数64kw, 波形記録時の時間分解能200ns, 記録点数20kw)を使用し、バブルパルスの記録にはニコレ社製Pro 50(周波数帯域DC~200MHz, 分解能8bits, 記録点数64kw, 波形記録時の時間分解能20 μ s, 記録点数40kw)を使用した。圧力センサーの感圧部分は一辺が5mmの正方形で厚みが50 μ mのシート状であり、油圧パルスによって校正した感度係数は11.2MPa \cdot V⁻¹である。

VDF-TFE圧力センサー, 校正方法及び計測システム, 計測方法に関しては, 文献(8)に詳しく報告したのでここでは省略する。

3. 試験結果及び考察

3. 1 衝撃波の測定結果及び衝撃波エネルギー, 衝撃波の力積の計算

デジタルオシロスコープによって記録した水中衝撃

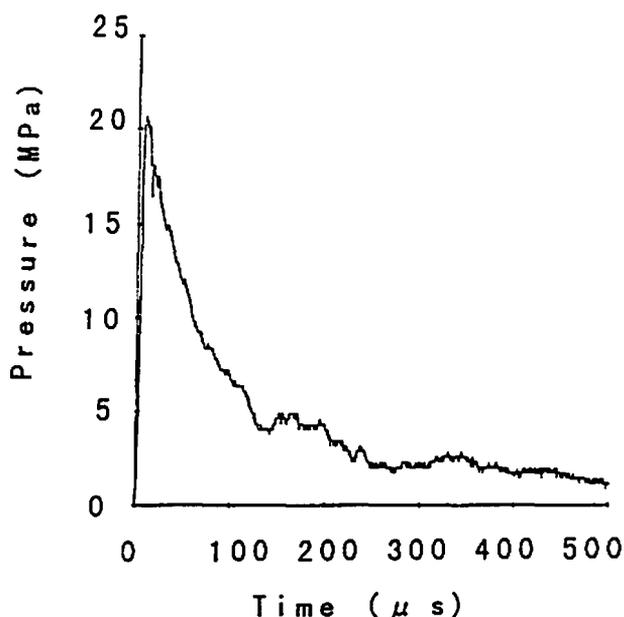


Fig. 2 Example of shock waver profile
Charge weight; 200(g), Stand off; 1(m)

波の測定例をFig. 2に示す。

記録した衝撃波形から式(1), 式(2)を用い, 衝撃波エネルギー(E_s), 衝撃波の力積(Imp)を計算した。

Table 2に計算結果を, Table 3にTable 2の計算結果をもとに求めた衝撃波の距離減衰式の計算結果を示す。力積の距離減衰式は, 爆薬重量(W)の異なる試験条件の比較を行うため, 式(2)の Imp を W の立方根で除した換算力積($Imp \cdot W^{-1/3}$)を用いて計算した。

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_w \cdot C_w \cdot W} \int_0^{50} P(t)^2 dt \quad (\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1/3}) \quad (1)$$

$$Imp = \int_0^{50} P(t) dt \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (2)$$

ここで, R は爆薬と圧力センサーの距離(m), ρ_w は水の密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), C_w は水の音速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), θ は特性時間(s), W は爆薬重量(kg), $P(t)$ は時間 t における衝撃波の圧力である。

測定された衝撃波のピーク圧力の1/2まで立ち上がる時間を0(s)として, ピーク圧力以降の衝撃波圧力の最小二乗法による近似曲線をこの $t=0$ まで外挿した時の圧力が最大衝撃波圧力(P_{max}), 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特性時間(θ)である⁹⁾。

3. 2 バブルパルスの測定結果及びバブルエネルギーの計算

Fig. 3(a)にCase 9の実験条件, すなわち試料爆薬200gを水深4mに設置し, 爆薬との距離が1mになるようトルマリン及びVDF-TFE圧力センサーを設置して測定した衝撃波とバブルパルスの結果を示す。 $t=$

Table 2 Experimental results

| Case | Shock wave | | | | Bubble pulse | | | |
|------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|--|---------------|---------------|---------------------|---|
| | P_{max} (MPa) | θ (μs) | E_s (MJ $\cdot kg^{-1}$) | $I_{mp} \cdot W^{-1/3}$ (Pa $\cdot s \cdot kg^{-1/3}$) | T_b (ms) | E_b (MJ) | P_{maxb} (MPa) | $I_{mpb} \cdot W^{-1/3}$ (Pa $\cdot s \cdot kg^{-1/3}$) |
| 1 | 17.9 | 67.1 | 0.81 | 3280 | 117.9 | 0.187 | 3.66 | 7880 |
| 2 | 10.7 | 83.1 | 0.85 | 1820 | 144.1 | 0.330 | 1.89 | 3280 |
| 3 | 7.77 | 69.3 | 0.76 | 1660 | 116.0 | 0.170 | 1.75 | 2820 |
| 4 | 5.18 | 77.2 | 0.77 | 1120 | 116.0 | 0.170 | 1.17 | 1670 |
| 5 | 3.63 | 84.3 | 0.78 | 829 | 116.1 | 0.170 | 0.989 | 1000 |
| 7 | 110.1 | 38.0 | 0.76 | 12220 | 108.5 | 0.205 | 10.6 | 37900 |
| 8 | 67.8 | 50.5 | 0.79 | 8950 | 107.9 | 0.203 | 7.42 | 24250 |
| 9 | 35.0 | 70.3 | 0.80 | 6690 | 108.4 | 0.204 | 4.68 | 13910 |
| 10 | 21.0 | 78.6 | 0.79 | 3510 | 136.6 | 0.408 | 3.31 | 8390 |
| 11 | 14.8 | 100.3 | 0.80 | 2330 | 183.8 | 0.995 | 2.26 | 5230 |
| 12 | 14.4 | 106.8 | 0.80 | 2400 | 183.8 | 0.995 | 2.49 | 5160 |
| 13 | 12.1 | 94.5 | 0.82 | 2060 | 155.6 | 0.603 | 2.10 | 4610 |
| 14 | 12.4 | 88.9 | 0.82 | 2020 | 155.8 | 0.606 | 2.03 | 4590 |
| 15 | 10.5 | 83.2 | 0.82 | 1810 | 136.1 | 0.404 | 1.60 | 4290 |
| 16 | 10.0 | 85.4 | 0.77 | 1810 | 136.1 | 0.404 | 1.78 | 4090 |
| 17 | 7.66 | 82.0 | 0.77 | 1500 | 108.4 | 0.204 | 1.57 | 3530 |
| 18 | 6.47 | 87.7 | 0.76 | 1220 | 135.9 | 0.402 | 1.22 | 2680 |
| 19 | 6.70 | 87.2 | 0.79 | 1230 | 135.8 | 0.401 | 1.01 | 2640 |
| 20 | 4.84 | 90.1 | 0.77 | 930 | 136.2 | 0.405 | 0.77 | 1830 |
| 21 | 4.83 | 88.8 | 0.78 | 950 | 135.9 | 0.402 | 0.90 | 1840 |

P_{max} ; Maximum shock wave pressure, θ ; Characteristic time,
 E_s ; Shock energy, $I_{mp} \cdot W^{-1/3}$; Scaled shock wave impulse,
 T_b ; Bubble period, E_b ; Bubble energy,
 P_{maxb} ; Maximum 1st bubble pulse pressure,
 $I_{mpb} \cdot W^{-1/3}$; Scaled bubble pulse impulse

Table 3 Similitude equation of emulsion explosive

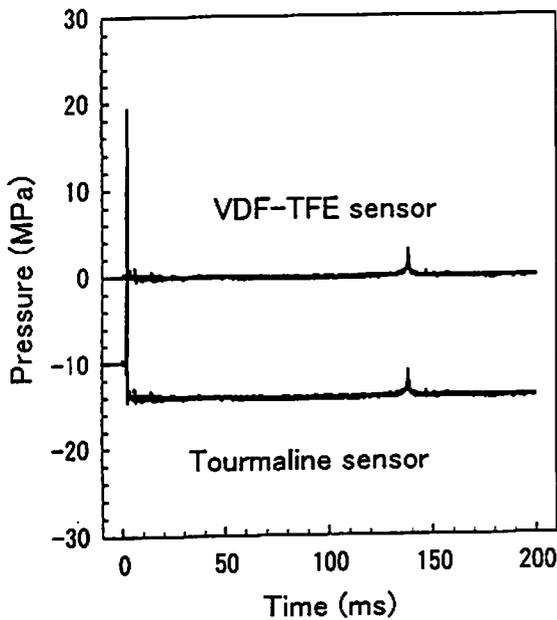
| Charge depth D (m) | 2 | | 4 | |
|--|-------|----------|-------|----------|
| | K | α | K | α |
| P_{max} (MPa) | 43 | -1.1 | 41 | -1.1 |
| P_{bmax} (MPa) | 6.7 | -0.92 | 5.8 | -0.91 |
| $I_{mp} \cdot w^{-1/3}$ (Pa $\cdot s \cdot kg^{-1/3}$) | 6520 | -0.96 | 5945 | -0.96 |
| $I_{mpb} \cdot w^{-1/3}$ (Pa $\cdot s \cdot kg^{-1/3}$) | 17530 | -1.0 | 15100 | -1.1 |

Similitude equation form ; $Y=K(R \cdot W^{-1/3})^\alpha$

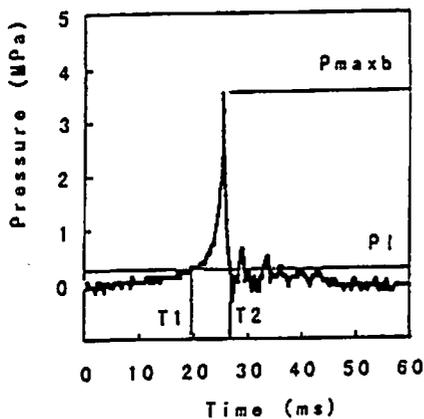
Y ; $P_{max}, P_{maxb}, I_{mp} \cdot W^{-1/3}, I_{mpb} \cdot W^{-1/3}$

0のピーク圧力が衝撃波であり、 $t=140ms$ 付近におけるピーク圧力が第1バブルパルスである。トルマリンセンサーの測定波形は、比較して表記するためベースラインを10MPaマイナス側にオフセットした。VDF-TFE圧力センサーの測定波形には衝撃波を測定

したあとのベースラインのマイナス圧力側へのドリフトは認められないが、トルマリンセンサーの測定波形は衝撃波を測定した後ベースラインがマイナス14MPaになっている。すなわち、4MPa程度のマイナス側へのドリフトが生じている。このため、トルマリ



(a) Example of bubble pulse profiles measured by tourmaline sensor and VDF-TFE sensor



(b) Magnifying bubble pulse measured by VDF-TFE sensor

Fig. 3 Example of bubble pulse profile
Charge weight ; 200 (g), Stand off ; 1 (m)

ンセンサーによるバブル周期の測定は可能であるが、バブルパルスのピーク圧力を読み取っても負圧となってしまうことがわかる。

Fig. 3 (b)にVDF-TFE圧力センサーにより測定した第1バブルパルスの拡大図を示す。

バブルパルスの測定結果から、バブルエネルギーを式(3)を用いて計算した。

$$Eb = 68.4 \cdot Po^{5/2} \cdot Tb^3 \quad (\text{MJ}) \quad (3)$$

ここで、 Po は爆薬の水深における静水圧、 Tb は衝撃波と第1バブルパルスの時間間隔であるバブル周期を示す。式(3)の右辺の係数は、 Eb を(MJ)、 Po を(100kPa)、 Tb を(s)の単位にとった場合の値で

ある²⁾。

3.3 バブルパルスの最大圧力と力積の計算方法の検討

次に、バブルパルスの最大圧力と力積を求めるため、バブルパルスの測定波形と計算方法の検討を行った。

トルマリンセンサーとVDF-TFE圧力センサーの測定結果の比較を行うと、Fig. 3 (a)に示したようにトルマリンセンサーの出力は明らかに衝撃波の測定直後から大きく負圧側へドリフトを生じ、絶対圧で0気圧以下となっている。他方、VDF-TFE圧力センサーによる測定結果にはベースラインのドリフトがない。これはVDF-TFE圧力センサーの感圧部分であるVDF-TFE共重合体はフッ素系高分子であるため、トルマリンのような脆性材料と異なり、高分子特有の粘弾性という性質を有し、衝撃波による応力に耐え、部分的な破壊も生じにくい為と考えられる¹⁰⁾。

次に、VDF-TFE圧力センサーによって測定したバブルパルスの波形は、Fig. 3 (b)に示したように10ms程度の持続時間を有し、衝撃波と異なり圧力の立ち上がりが緩やかな三角形状である。そのピーク圧力部分の波形には、衝撃波のピーク圧力部分のように、計測系の過渡応答特性により発生するリンキングなどのノイズ成分は見られない。これは、本実験に使用した測定系の周波数帯域の下限は数Hz、上限は20MHz以上であり、バブルパルスの周波数帯域よりも測定系の周波数帯域が十分広いためと考えられる。

バブルパルスのピーク圧力以降の波形には、試験池が有限の大きさであるため、試験池の水面からの膨張波と、試験池の底面と側面からの反射波の影響が含まれていると考えられる。本実験に使用した試験池の形状では、水深4mにおける実験の場合には、水面からの膨張波と底面からの反射波は同時にセンサーの位置に到達し、水深が2mにおける実験の場合には、水面からの膨張波の方が底面からの反射波よりも早く到達すると考えられる。この膨張波と反射波の中で最も早く到達する波の時刻は、その速度が水の音速(1500 m・s⁻¹)と同じと仮定すると、水深4mの場合は爆薬とセンサーの距離が0.2mの位置でバブルパルスのピーク圧力の到達後5.3ms後であり、距離が0.3m, 0.5m, 2m, 3m, 4mの場合は各々5.0, 5.0, 4.7, 4.2, 3.7, 3.3ms後である。水深2mの場合は距離が1m, 2m, 3m, 4mに対し、各々2.1, 1.7, 1.3, 1.1ms後である。

センサーと池側部の最短距離は、水深4m、爆薬とセンサーの距離4mの実験条件でも8.5m以上であ

り、池側部からの反射波はバブルパルスのピーク圧力の観測後11.3ms以降にセンサーに到達する。池の底部及び側部は粘土質の土砂でできているため、衝撃波の反射率が小さくなると考えられる。更に、池の側部は傾斜しているために、側部からのセンサー方向への反射率は、極めて小さいと考えられる。

以上のことから、本実験におけるバブルパルスのピーク圧力までの測定値には、反射波の影響は含まれていないと考えられるが、バブルパルスのピーク圧力以降の波形には、反射波の影響が含まれている可能性がある。

しかし、爆薬とセンサーの距離が小さくバブルパルスのピーク圧力が大きい試験条件ほど、バブルパルスが十分に減衰した後に反射波が到達するため、その影響も小さいと考えられる。

全実験条件におけるバブルパルスの測定波形にも、圧力が負圧になるなどの顕著な反射波は認められない。

以上のことから、バブルパルスの最大圧力を求める場合には、衝撃波の測定波形のような最小二乗法による近似曲線の解析と外挿は不要と考えられる。そこで、バブルパルスの最大圧力 P_{maxb} は、測定波形の最大圧力の点と定義して計算を行った。

次に、力積の計算方法の検討を行う。衝撃波エネルギー或いは衝撃波の力積の計算の際には、積分範囲を時間ゼロから50倍までとしている。これは、50程度における圧力は、もはや最大圧力の数%以下と小さく、これ以上積分区間を長くしても計算上積分値は増加するが、この増加分には測定上のノイズの誤差も含まれることから決定されている⁹⁾。バブルパルスの力積の計算の際にも同様な検討を行い積分範囲を定める必要がある。

代表的な実験について、積分区間のしきい値(P_1)を変化させた場合のバブルパルスの力積(I_{mpb})の変化について検討した。ここで、 I_{mpb} は以下のように定義する。

$$I_{mpb} = \int_{T_1}^{T_2} P(t) dt \quad (4)$$

$P(t)$ は時間 t におけるバブルパルスの圧力、 T_1 はバブルパルスの圧力が次第に大きくなり圧力 P_1 に達した時刻(積分開始時刻)、 T_2 は逆にバブルパルスが減衰し圧力 P_1 に達した時刻(積分終了時刻)である。このため、 P_1 が大きいほど積分区間は短くなり、逆に P_1 を小さくすると積分区間は長くなる。最も I_{mpb} が大きい場合として P_1 を P_{maxb} の0.5%にとり $I_{mpbmax}(P_1/P_{maxb}=0.5\%)$ をもとめ、次に P_1 を P_{maxb} の0.5%から50%まで

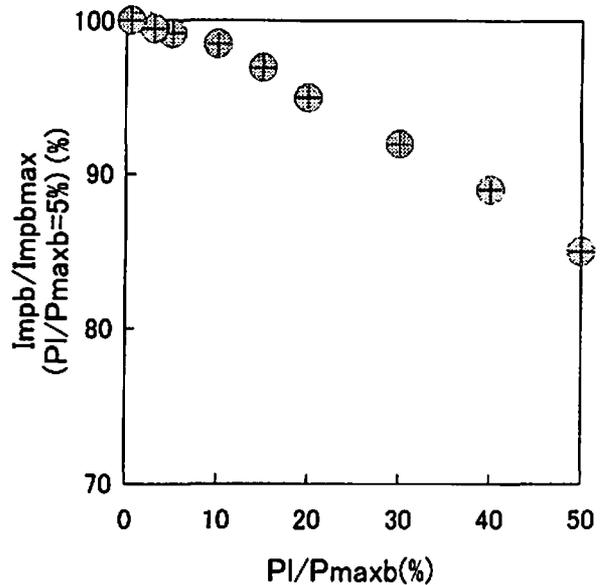


Fig. 4 Effects of threshold level P_1/P_{maxb} (%) on $I_{impb}/I_{impbmax}(P_1/P_{maxb}=5\%)$ (%)

変化させた場合の P_1 と $I_{impb}/I_{impbmax}(P_1/P_{maxb}=0.5\%)$ の関係をFig. 4に図示した。

Fig. 4から、 P_1 が P_{maxb} の5%以下の領域では I_{impb} は P_1 を更に小さくして積分区間を大きくしてもほぼ一定となる。また、 P_1 が P_{maxb} の5%の時のバブルパルスの圧力は衝撃波の50における圧力よりも小さい。そこで、積分区間は測定時のノイズレベルや圧力センサーの性能のばらつき、デジタルオシロスコープのA/D変換誤差などを考慮し、コンピューターで処理計算を行う上でも確実に T_1 、 T_2 の判定が可能ないように、 P_{maxb} を基準に、 P_1 を P_{maxb} の5%とし、 T_1 、 T_2 を定めることとした。

以上の計算方法を用い、各試験におけるバブルパルスの測定結果から P_{bmax} 、 I_{mpb} を計算した結果をTable 2に示す。 I_{mpb} は、 I_{mp} と同様に W の異なる試験条件間の比較のため換算力積($I_{mpb} \cdot W^{-1/3}$)とした。

ここで、衝撃波の中心は爆薬の設置位置であり、実験的に R が定まるが、バブルは脈動しながら上昇運動を行っている⁹⁾ため、バブルの中心と圧力センサーの距離は、厳密にはバブルパルスが発生するまでの時間内でも僅かに変化する可能性がある。しかし、十分な大きさの試験池を用いて実験した場合には、第1バブルパルスの発生時点でのバブルの上昇量は圧力センサーとの距離に比べ十分に小さいと考えられる^{4,5,6)}。そのため、本研究においては、第1バブルパルスの発生時のセンサーとの距離は衝撃波測定時の距離 R と同一として計算した。

Table 2の衝撃波とバブルパルスの計算結果を相互に比較するため、衝撃波の解析結果から、Fig.

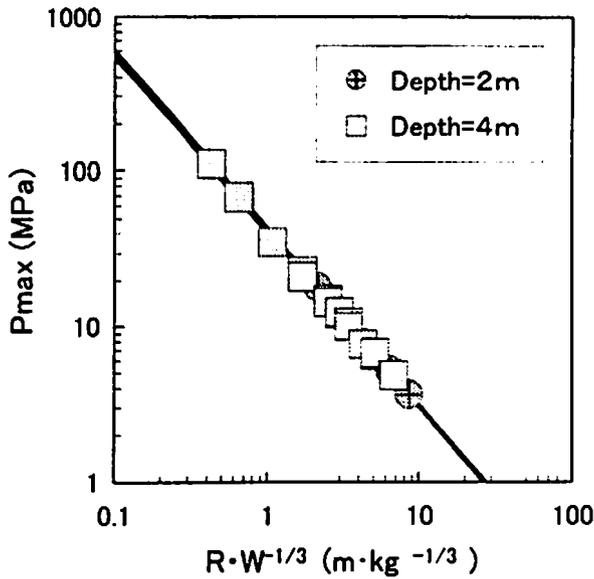


Fig. 5 Relation between P_{max} and scaled distance

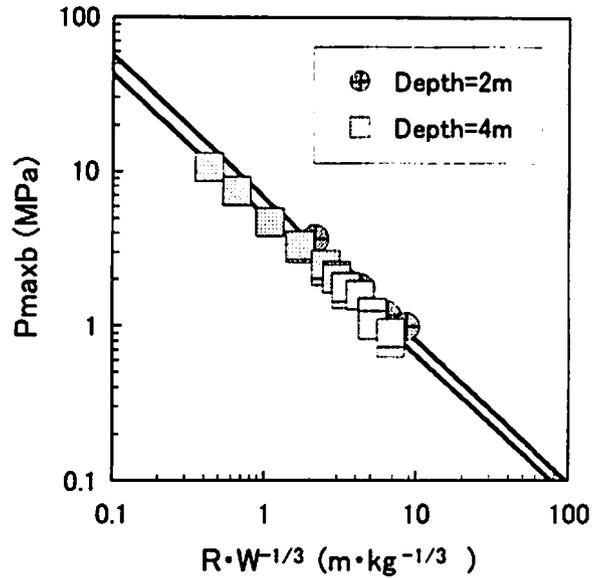


Fig. 7 Relation between P_{maxb} and scaled distance

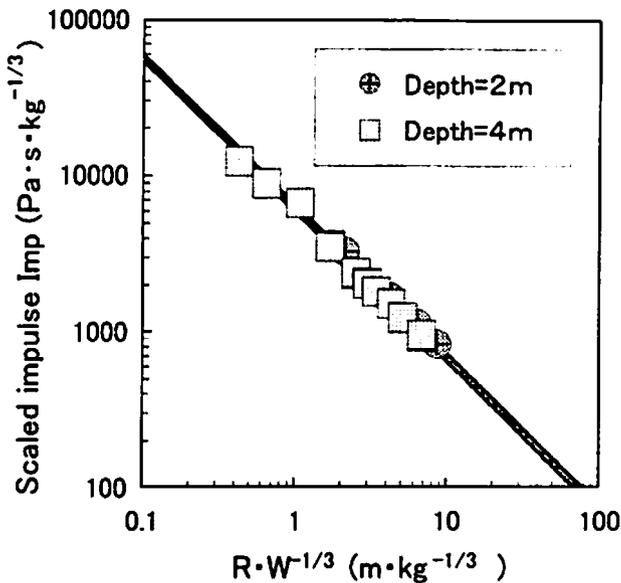


Fig. 6 Relation between scaled impulse of shock wave and scaled distance

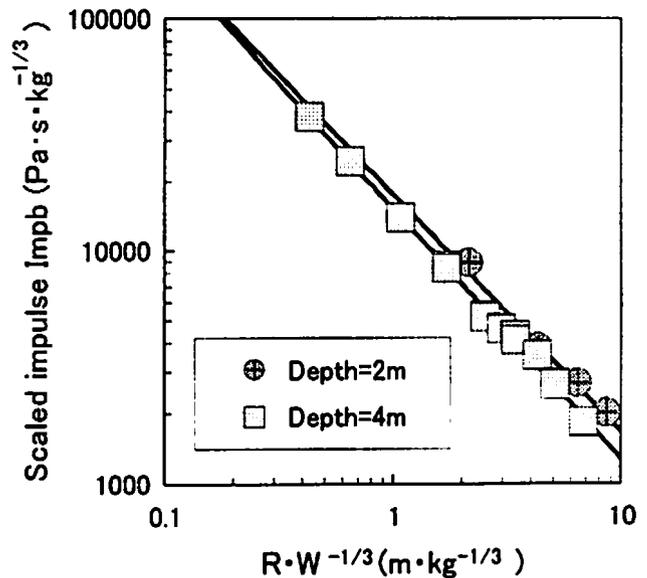


Fig. 8 Relation between scaled impulse of bubble pulse and scaled distance

5に P_{max} と換算距離の関係を、Fig. 6に換算力積($I_{imp} \cdot W^{-1/3}$)と換算距離の関係を示す。同様にバブルパルスの計算結果から、Fig. 7に P_{maxb} と換算距離の関係を、Fig. 8に換算力積($I_{impb} \cdot W^{-1/3}$)と換算距離の関係を示す。

Fig. 5とFig. 6より、水深を2mと4mに変化させても衝撃波の P_{max} と換算力積は同一の距離減衰傾向、ほぼ同一の値を示し、 P_{max} は水深が4mの方が同じ換算距離では5%小さく、換算力積は水深4mの方が9%小さかった。

Fig. 7とFig. 8より、水深を2mと4mに変化させてもバブルパルスの P_{maxb} と換算力積は同一の距離減

衰傾向を示し、 P_{maxb} は水深が4mの方が同じ換算距離でも22%小さく、換算力積は水深が4mの方が同じ換算距離でも14%小さかった。これは、爆薬の爆轟により発生する衝撃波は、水深が異なることによる静水圧の影響を受けにくいのに対し、バブルの挙動は静水圧の影響を大きく受けるためだと考えられる。

次に、衝撃波とバブルパルスの計算結果を比較すると、Fig. 5～8より、バブルパルスの P_{maxb} は、衝撃波の P_{max} の0.14から0.16倍と小さいが、その力積 I_{impb} は I_{imp} よりも2.5から2.7倍大きいことが判明した。これはバブルパルスの持続時間は10ミリ秒程度と衝撃波に比べ10倍程度長い為だと考えられる。

Coleの研究では、トルマリンセンサーを用いた、TNTの水中爆発におけるバブルパルスと衝撃波の測定波形から計算した力積は、同程度の値であると本研究とは異なった結論を報告¹⁾している。実験条件が異なるため単純な比較はできないが、Coleの実験ではトルマリンセンサーを使用しているため、ベースラインの負圧側へのドリフトを生じ、バブルパルスの圧力と圧力の時間積分値である力積を過小評価している可能性もあり、今後の検討課題としたい。それを検証するためには、衝撃波とバブルパルスの両方に対する構造体の応答を歪ゲージ等を用いて測定し、圧力センサーにより測定した衝撃波・バブルパルスの力積と歪を整理する必要もあると考えられる。

4. 結 論

本研究によって以下の結果が得られた。

- (1) エマルジョン爆薬の爆発によって発生した、爆源近傍のバブルパルスの最大圧力と力積を、換算距離の関数とした距離減衰特性式により数値化することができた。
- (2) エマルジョン爆薬のバブルパルスの最大値は、衝撃波の最大値に比べ小さいが、バブルパルスは圧

力の持続時間が長いこと、バブルパルスの力積は衝撃波の力積に比べ大きい。

文 献

- 1) Cole, R.H., "Underwater Explosions", Dover Publications, New York (1948).
- 2) 田中克己, 吉田正典, 米田窓昭, 水島容二郎, 工業火薬協会誌, 42, 239(1981).
- 3) 疋田強, 工業火薬協会「火薬ハンドブック」, P.217, 共立出版株式会社.
- 4) 中山良男, 生沼仙三, 田中一三, 工業火薬協会誌, 50, 179(1989).
- 5) 田中一三, 工業火薬協会誌, 36, 11(1975).
- 6) 田中一三, 工業火薬協会誌, 40, 306(1979).
- 7) 火薬学会規格(IV), (感度試験法), P.103(1996)
- 8) 村田健司, 高橋勝彦, 加藤幸夫, 村井幸一, 火薬学会誌, 57, 252(1996).
- 9) 村田健司, 高橋勝彦, 加藤幸夫, 工業火薬協会誌, 54, 123(1993).
- 10) 村田健司, 高橋勝彦, 加藤幸夫, 村井幸一, 火薬学会誌, 62, 184(2001).

Precise measurement of bubble pulse by pressure sensor using fluoropolymer

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

To understand the effects of underwater explosion phenomena, as in the case of shock forming, it is necessary to accurately measure bubble pulses, as well as underwater shock waves. In the measurements of underwater explosion phenomena by a tourmaline sensor, a shift of baseline to negative pressure in the bubble pulse after the passage of shock wave is observed. The shift of the baseline makes the precise quantitative measurements of bubble pulses difficult. It is demonstrated that the pressure sensor using fluoropolymer can maintain the baseline of bubble pulse at the zero value after the passage of the shock wave.

Precise measurements of peak pressure and impulse of the bubble pulse, as well as the underwater shock waves, were performed by the pressure sensor using fluoropolymer. The experimental results show that the peak pressure of bubble pulse is about 10-30% of the peak pressure of shock wave, but the impulse of bubble pulse is about 1.5-2.5 times bigger than that of shock wave, in the measured scaled distance range. This is due to the fact that the duration of the bubble pulse is about ten times longer than that of the shock wave.

(*NOF Corporation Aichi Works Taketoyo-plant, 61-1 Kitakomatudani Taketoyo-cho Chita-gun, Aichi 470-2398, JAPAN

**MINERAL INDUSTRY MUSEUM, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, 1-1 Gakuen-cho Tegata Akita-city, Akita 010-8502, JAPAN)