

「水中衝撃波による金属管側壁の孔あけ加工に関する研究」

第1報 水中衝撃波の圧力測定用変換器について

長野司郎^{*}, 吉良章夫^{**}, 伊東 繁^{***}

細い金属管内を伝播する水中衝撃波のピーク圧力を計測するために、タングステン棒と半導体ひずみゲージを用いた圧力変換器を試作した。この圧力変換器の基本的特性について、光学的観測実験および数値解析を用いて比較検討した。その結果、実験によって発生した水中衝撃波の波動現象を定性的に説明できることが分かった。また水中衝撃波の圧力ピーク値は、光学的観測実験から得られた水中衝撃波の速度からの換算値と比較し、試作した本装置の場合換算係数は1.4であった。

1. 緒言

筆者らは、Fig. 1に示すように、導爆線の水中爆発によって発生する水中衝撃波を金属円管内に入射させ、管の内側から孔をあける加工法を提案した¹⁾。この方法で良好に孔あけ加工を行うためには、管内での水中衝撃波の圧力を適切に制御する必要がある。そのために、管内での水中衝撃波の圧力を精度良く測定し、その伝播・減衰状況等を明確にすることが求められる。筆者らは、内径6 mm、肉厚0.5 mmのステンレス鋼管に直径3 mmの孔を多数あけることを最終目標として研究を進めてきた。この管の加工に必要な水中衝撃波の圧力は、せん断抵抗から0.7～1 GPaであると予想される。

ところで、内径6 mmという狭い管内において、数100 MPaの高い圧力を再現性よく、しかも繰り返し測定できる適当な圧力変換器は現在のところ見あたらない。そこで筆者らは、弾性棒の端面で水中衝撃波を受圧させ、棒内を伝播する弾性応力波を棒側面に貼った半導体ひずみゲージで計測し、水と棒端面との界面における音響インピーダンスを考慮して水中衝撃波の圧力を測定する方法を提案した。この測定法については、すでに種々試みられ検討されて

いるが^{2),3)}、いずれの場合も測定された圧力は100 MPa以下である。

筆者らは、弾性棒の材質にタングステンを用いることによって、1 GPa程度までの圧力を測定できる変換器を試作した。その測定値の妥当性について、光学的な観測実験および数値解析結果との比較検討を行った。

ここに、その結果を報告する。

2. ひずみゲージ型圧力変換器の構造と圧力測定法

使用したひずみゲージ型圧力変換器(以下、圧力変換器と略記する)の構造をFig. 2に示す。圧力変換器は、水中衝撃波を受圧させる弾性棒と保護用キャップおよびパイプで構成されている。弾性棒は緩衝材を介して間接的に保護用キャップおよびパイプに挿

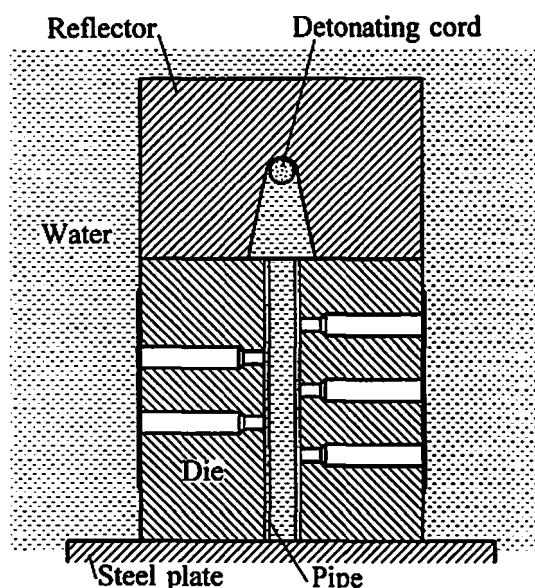


Fig.1 The assembly for pipe punching.

1999年1月5日受付

2003年9月26日受理

^{*}熊本大学工学部知能生産システム工学科

〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1

TEL 096-342-3750

FAX 096-342-3750

^{**}崇城大学工学部機械工学科

〒860-0082 熊本市池田4-22-1

TEL 096-326-3111

FAX 096-323-1351

^{***}熊本大学 衝撃・極限環境研究センター

〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1

TEL 096-342-3299

FAX 096-342-3299

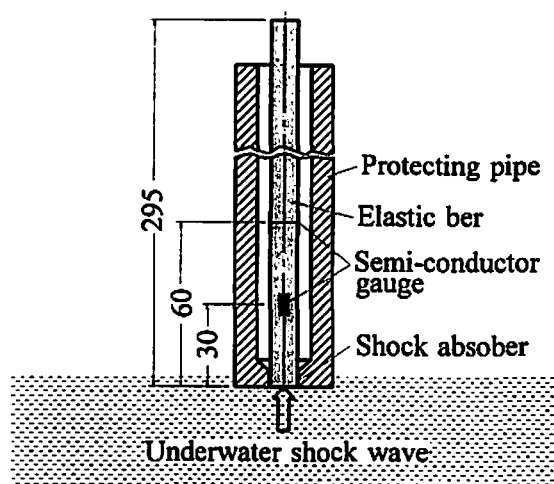


Fig.2 Schematic of the pressure transducer.

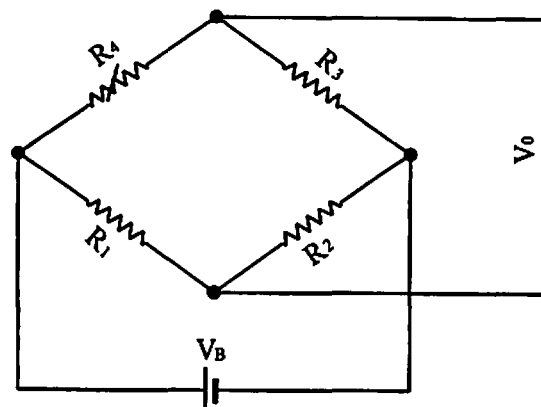
入し、受圧面(棒端面)以外からの衝撃波の入射を遮断するようにした。また受圧面での衝撃波の擾乱を防止するため、実験毎に、弾性棒の端面と保護用キャップの端面とが同一面になるようにした。弾性棒は直径 5 mm, 全長 $L=295\text{ mm}$ のタングステン棒で、受圧面から $L_a=30\text{ mm}$, $L_b=60\text{ mm}$ の位置の軸方向に左右対称にそれぞれ 2 枚の半導体ひずみゲージ(共和電業製, ゲージ長さ 1 mm, 抵抗 $350\ \Omega$, 最大ひずみ 3000×10^{-6} , ゲージファクター 151)を貼付している。この 2 枚のゲージと棒外部のダミーゲージおよび可変抵抗器で Fig. 3 に示すようなホイート・ストンブリッジ回路(以下、回路と略記する)を構成する。棒内での弾性波の減衰を調べるために、ゲージを A(L_a), B(L_b) の 2 ヶ所に貼った。この圧力変換器においては、弾性棒の直径は 5 mm であり、水中衝撃波が受圧面から入射する際、棒内には弾性応力波が一次元の平面波として伝播し、ポアソン比の影響はないと仮定する。このとき棒内に発生する弾性応力を P_B , 動的な縦弾性係数を E_B , ひずみを ε , 音速を C_B , 密度を ρ_B とすると,

$$E_B = C_B^2 \cdot \rho_B \quad (1)$$

であり、また弾性限度内では,

$$P_B = E_B \cdot \varepsilon \quad (2)$$

が成立する。普通のひずみゲージの最大ひずみ量は 2~3% 程度である。従って、(2) 式からわかるように、小さいひずみ量の範囲内で高い応力を測定するためには弾性棒の縦弾性係数を大きくする必要がある。そのため筆者らは、タングステン棒を使用した。



R_1, R_3 : Semiconductor strain gauge

Fig.3 Wheatstone bridge circuit.

さて、水中衝撃波を入射させた弾性棒内の衝撃応力 P_B は次のようにして求められる。Fig. 3 の回路で R_1, R_3 を半導体ひずみゲージの抵抗, R_2, R_4 をダミーゲージの抵抗, V_B を回路電圧, V_0 を出力電圧とする。ここで回路内を平衡状態にすると, $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ とみなすことができ、出力は 0 である。棒内を弾性波が伝播すると, $R_1=R_3=R+\Delta R$ となるので出力電圧 V_0 は,

$$V_0 = \frac{(R+\Delta R)^2 - R^2}{(2R+\Delta R)^2} \cdot V_B \approx \frac{\Delta R}{2} \cdot V_B \left(\because \frac{\Delta R}{R} \ll 1 \right) \quad (3)$$

となる。半導体ひずみゲージのゲージファクターを G とすると, $\Delta R/R = G \cdot \varepsilon$ であるので,

$$V_0 = \frac{G \cdot \varepsilon}{2} \cdot V_B \quad (4)$$

従って、(2) 式から

$$P_B = \frac{2E_B}{G \cdot V_B} \cdot V_0 \quad (5)$$

が得られ、 V_0 を計測すれば棒内に発生した弾性応力 P_B を知ることができる。この P_B から、Fig. 4 に示すように弾性棒と水の界面でのショックインピーダンスを考慮することによって、受圧面での水中衝撃波の圧力を求めることができる。図中で P, U, u, ρ はそれぞれ圧力(棒内は応力)、衝撃波の伝播速度、粒子速度、密度であり、下添え字 B, w はそれぞれ弾性棒および水中での状態量を表す。 A_B は弾性棒の断

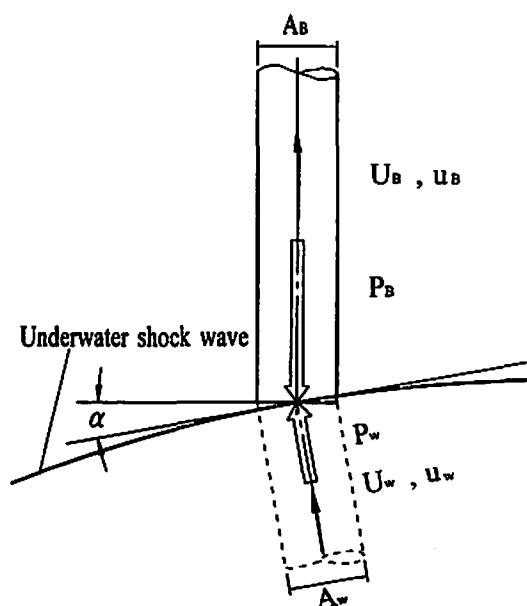


Fig.4 An illustration of the impedance matching method.

面積、 A_W は A_B の水中への正射影面積である。

今、 Δt 時間内に水中衝撃波が角 α で棒端面から入射する場合を考える。界面では質量および運動量保存則が成立するので、

$$A_B \cdot \Delta t (P_B - P_W) = \rho_W \cdot U_W \cdot \Delta t \cdot A_W (u_W \cdot \cos \alpha - u_B) \quad (6)$$

となる。このとき、

$$P_B = \rho_B \cdot U_W \cdot u_B, \quad P_W = \rho_W \cdot U_W \cdot u_W, \quad A_W = A_B \cdot \cos \alpha$$

であるので、(6)式を整理すると、

$$P_W = \frac{1 + \frac{\rho_W \cdot U_W}{\rho_B \cdot U_B}}{1 + \cos^2 \alpha} \cdot P_B \quad (7)$$

となり、計測された P_B から水中衝撃波の圧力を求めることができる。入射角が $\alpha = 0^\circ$ のときには、

$$P_W = \frac{1 + \frac{\rho_W \cdot U_W}{\rho_B \cdot U_B}}{2} \cdot P_B \quad (8)$$

また入射角が $\alpha = 90^\circ$ のときは、

$$P_W = P_B \quad (9)$$

となる。(9)式は管の内壁面に作用する水中衝撃波の圧力を測定する場合に適用できる。

このようにして水中衝撃波の圧力を測定できるが、より厳密に圧力を計測するためには、圧力に応じて変化するそれぞれの密度 ρ と衝撃波の伝播速度 U を計測する必要がある。しかしながら $\rho_W \cdot U_W / \rho_B \cdot U_B$ の値を概算してみると1 GPa程度までの圧力範囲内での変動は微小である。従って、本計測では音響インピーダンスで考えた。そこで式(7)、(8)で ρ はそれぞれの初期密度、 U はそれぞれの音速 c で置き換えることができる。また、これまでは棒内の弾性波は一次元の波として減衰せずに棒内を伝播すると仮定した。しかし、水中衝撃波を受圧して棒内を伝播する弾性波は高周波成分を含むために減衰することが指摘されている³⁾。そこで、弾性棒のA、Bの2点で計測される出力電圧をそれぞれ V_A 、 V_B として、

$$K = \frac{V_A}{V_B} \quad (10)$$

を、弾性波が受圧面からA点まで伝播する間の減衰率と仮定した。

以上のことを考慮すると、(7)、(8)、(9)式は、

$$P_W = \frac{1 + \frac{\rho_W \cdot C_W}{\rho_B \cdot C_B} \cdot \cos \alpha}{1 + \cos^2 \alpha} \cdot K \cdot P_B \quad (11)$$

$\alpha = 0^\circ$ のとき、

$$P_W = \frac{1 + \frac{\rho_W \cdot C_W}{\rho_B \cdot C_B}}{2} \cdot K \cdot P_B \quad (12)$$

$\alpha = 90^\circ$ のとき、

$$P_W = K \cdot P_B \quad (13)$$

となる。このように弾性棒のA点の弾性応力を計測することにより、それぞれの場合における受圧面での水中衝撃波の圧力を測定できることになる。

3. 水中衝撃波の圧力測定実験

3.1 圧力変換器による測定

圧力測定の際の変換器と爆薬の配置をFig. 5に示す。爆薬部は、高性能爆薬のSEP(旭化成工業(株)製; PETN 65%, パラフィン系バインダー 35%, 爆

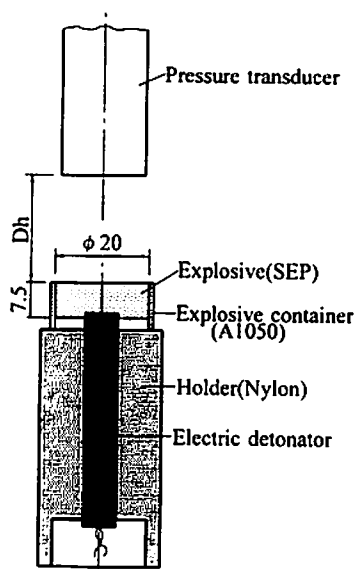


Fig.5 Experimental set-up for pressure measurement..

こう速度 $6,970\text{m/sec}$ 、密度 $1,300\text{Kg/m}^3$ 3gr を内径 $d=20\text{mm}$ 、肉厚 1mm のアルミニウム管 (JIS A1050) に、高さ $H=7.5\text{mm}$ の円柱状に充填した。それを 6 号電気雷管と共にナイロン棒の爆薬ホルダーに固定した。また光学的観測および数値解析結果との比較を容易にするため、爆薬と変換器の軸芯を一致させて、弾性棒に対する入射角 α が 0° になるように設置し、爆薬上端面から変換器の受圧面までの距離 Dh を、 $20\sim 60\text{mm}$ まで、 10mm 間隔で変化させて実験を行った。その際のブリッジ回路の出力波形は、デジタルメモリスコープ (レクロイ社モデル 9314, 最小サンプリング時間 3nsec/word , AD 変換部分解能 8bit , メモリー長 10Kword) に直接出力させた。実験は同一条件について 3 回以上行ったが、出力電圧のばらつきは、 $\pm 5\text{mV}$ ($140\sim 650\text{mV}$ の出力に対して) であった。

Fig. 6 は、 $Dh=20\text{mm}$ のときに記録された出力波形である。上がゲージ A、下がゲージ B で捉えられた波形である。図中の T_a 、 T_b は弾性波がゲージ A および B を通過し、棒の終端で反射して再びゲージ A、B まで返ってくるまでの時間である。これは、この変換器の有効な測定時間 ($T_a=114\mu\text{sec}$) と考えてよい。ここで、タングステン棒の音速 c_b は約 $4,650\text{m/s}$ ($Dh=20\sim 60\text{mm}$ で一定) であり、密度 ρ_b は $19,088\text{Kg/m}^3$ である。これらのことから、(1) 式より、動的な縦弾性係数は $E_b=412.7\text{GPa}$ であることが分かる。また、使用した半導体ひずみゲージの最大ひずみ量は $3,000\times 10^{-6}$ であるので、(2) 式よりこの変換器の許容弾性応力は $P_b=1.24\text{GPa}$ になる。使用したタングステン棒は、静的負荷の場合、抗張力 1.4GPa 、縦弾性係数 407GPa 、剛性率 165.8GPa 、ポ

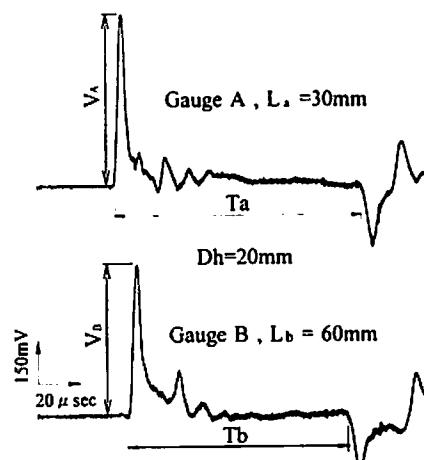


Fig.6 Pressure histories of the underwater shock wave measured by the pressure transducer.

アソン比 0.17 であるが、高ひずみ速度条件下であることや、伸びが 0.2% 程度と極めて小さいこと等を考慮すると、 1.24GPa という値はまだ弾性限界内であると考えられる。Fig. 6 の波形から V_a 、 V_b を読みとって (10) 式から減衰率を求めると、 $K=1.173$ となる。また V_a から弾性応力を求めると、 $P_b=1,205\text{MPa}$ で、前述の許容応力にほぼ近い。

一方、実験において使用したタングステン棒は、 $Dh=20\text{mm}$ までは数十回の実験でも再現性良く、異常がなかった。しかし、 $Dh=15\text{mm}$ にすると 2 回の実験でその受圧面近傍が破損した。以上のことから、前述のタングステン棒の許容応力 1.24GPa は妥当な値であると考えられる。従って、減衰率を $K=1.173$ としてこの変換器の測定限界を求めてみると、(12)、(13) 式から、入射角 $\alpha=0^\circ$ の場合に 740MPa 、 $\alpha=90^\circ$ の場合には 1.45GPa までの圧力が測定可能であるといえる。

3.2 光学的観測による圧力測定

光学的観測の場合、観測部の流れを乱すことなく、直接水中衝撃波の伝播速度が測定できるので、測定値の信頼性は高い。そこで、光学観測によって水中衝撃波の伝播速度を測定した。

水中を伝播する先頭衝撃波面の圧力は、

$$P_w = \rho_w U_w u_w \quad (14)$$

であり、また

$$U_w = C_w + S u_w \quad (15)$$

である。ところで、 $C_w=1,489\text{m/s}$ 、 $S=1.786$ であ

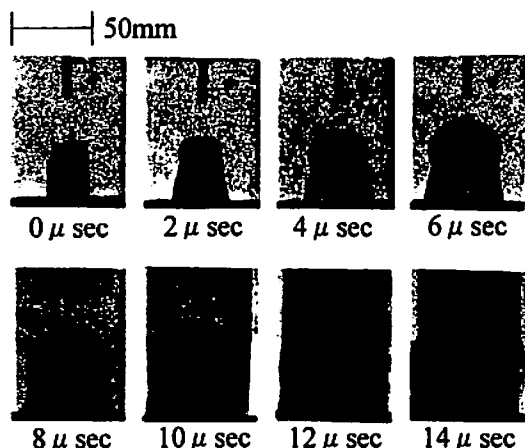


Fig.7 Sequential framing photographs of the configurations of the underwater shock wave propagation from the underwater detonation of high explosive SEP.

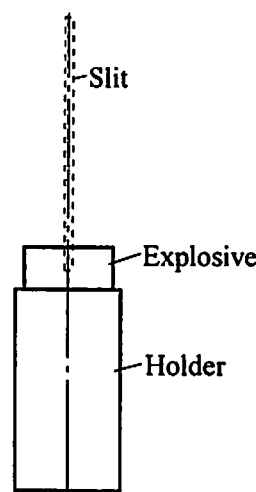


Fig.8 Position of streak slit.

るので、水中衝撃波の伝播速度 U_w を測定すれば後方の流れの速度 u_w がわかる。これらより(14)式を用いて圧力が求められる。

閃光時間 $50 \mu \text{ sec}$ のキセノンフラッシュライト (HADLAND PHOTONICS 社製, HL20/50 型, 出力 500J) を光源とし、イメージコンバータカメラ (HADLAND PHOTONICS 社製, IMACON 790, 駒撮影速度最大 2000 万駒/秒, 流し撮影速度最大 1 nsec/mm , 以下イメコンと略称する) を用い、駒撮影および流し撮影で光学的観測を行った。このときのフラッシュライトの閃光開始時間、イメコンの撮影開始時間ならびに爆ごう現象の同期は、爆薬に取り付けたイオンギャップ回路からの信号をスタートパルスとして、ディレイジェネレータ (HADLAND PHOTONICS 社製 THREE CHANNEL DELAY GENERATOR, TYPE JH-3 CDG) により制御した。

SEP 爆薬を PMMA (polymethylmethacrylate) 製の水槽内に固定し、それを観測部に配置して (Fig. 5 参照) 観察実験を行った。駒撮り撮影の場合の間隔は $2 \mu \text{ sec/駒}$ で行った。それに先立ち、20mm 間隔の直交格子を描いた PMMA 板を撮影し、光軸のずれや像のゆがみがないかを確認し、以後撮影される写真上の尺度を求めた。

Fig. 7 は爆薬の上端面から 30mm の位置に直径 5 mm の弾性棒を爆薬の軸芯に合わせて配置したときの駒撮り写真である。この写真から、水中衝撃波は弾性棒にほぼ入射角 0° で入射していることが確認された。流し撮影の場合には Fig. 8 に破線で示しているように、イメコンのスクリーン上での鉛直なスリット像が爆薬の軸芯と一致するよう爆薬を配置した。なお、イメコンのスリット幅は $25 \mu \text{ m}$ である。

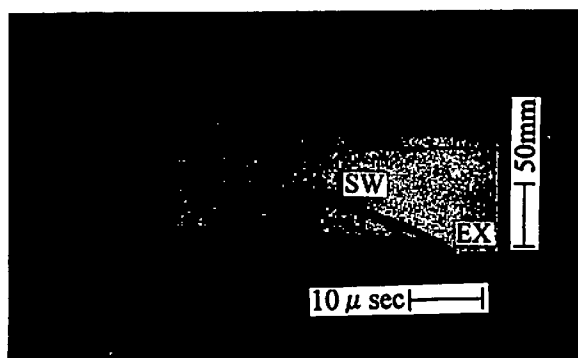


Fig.9 Streak photograph of the underwater shock wave propagation from the underwater detonation of high explosive SEP.

カメラのスクリーン上(写真上)での流し速度は $1 \mu \text{ sec/mm}$ である。この場合、写真上の距離の尺度は 50mm のブロックゲージを撮影して校正した。また流し速度はイメコンのキャリブレーション機能により、周期 1 MHz の矩形波を用いて校正した。撮影された流し写真の一例を Fig. 9 に示す。図中の縦軸はスリット像上での水中衝撃波面の移動距離で、横軸は時間である。写真の右側が原点で、左の方向へ時間が経過している。縦軸、横軸のスケールは前述の校正值から得られたそれぞれの尺度である。また図中の EX は爆ごう波が到達する前の爆薬表面、白い点は爆ごう波が爆薬表面に到達したときの自発光であり、SW は爆ごう波により水中に発生した先頭衝撃波のスリット上での伝播履歴である。この場合、スリットと水中衝撃波の伝播方向が一致しているので、SW の傾きを求めれば、水中衝撃波の伝播速度を知ることができる。

このようにして撮影した流し写真を画像処理し、

Table 1 Constants needed in curve-fitting method to the propagation of underwater shock wave.

A_1 (sec)	A_2 (sec)	A_3 (sec)	B_1 (sec ⁻¹)	B_2 (sec ⁻¹)	B_3 (sec ⁻¹)
5.825×10^{-4}	1.628×10^{-6}	2.634×10^{-7}	4.402×10	1.435×10^4	1.156×10^5

non-linear curve fitting 法⁵⁾により、伝播距離 y と時間 t を次式のように関数近似した。

$$\begin{aligned} & \frac{y}{D} \cdot A_1 \{1 - \exp(-B_1 t)\} + A_2 \{1 - \exp(-B_2 t)\} \\ & + A_3 \{1 - \exp(-B_3 t)\} + \frac{C_0}{D} t \end{aligned} \quad (16)$$

ただし、 D は爆薬の爆ごう速度である。この式を t で微分すると、

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} = U_w = & DA_1 B_1 \exp(-B_1 t) + DA_2 B_2 \exp(-B_2 t) \\ & + DA_3 B_3 \exp(-B_3 t) + C_0 \end{aligned} \quad (11)$$

となり、水中衝撃波の速度がわかる。ここで

$$A_3 = \frac{(U_i - C_0 - DA_1 B_1 - DA_2 B_2)}{DB_3} \quad (18)$$

である。 A_1 , A_2 , A_3 , B_1 , B_2 , B_3 は近似曲線の係数であり結果を Table 1 に示す。 C_0 は水の音速 (1,490m/s) であり、 U_i は水中衝撃波の初期速度で、インピーダンス・マッチング法⁶⁾で求められ、5,420m/s である。従って、(18) 式は境界条件； $t = 0$ のとき、 $dy/dt = U_i$ であることを意味する。

このように、流し写真によって爆薬表面からの距離 D_h に対する水中衝撃波の圧力 P_w を求めることができる。

3. 3 数値解析

数値解析は、Lagrange 法と Euler 法を組み合わせた Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 法⁷⁾を用いて行った。計算は、質量、運動量、エネルギーの保存則に、爆薬 SEP の爆ごう生成ガスの Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状態方程式^{8), 9)}と各媒体に応じた Mic-Grüneisen の状態方程式¹⁰⁾とを組み合わせで行った。

4. 結果及び考察

以上の結果を、両対数グラフにまとめてプロット

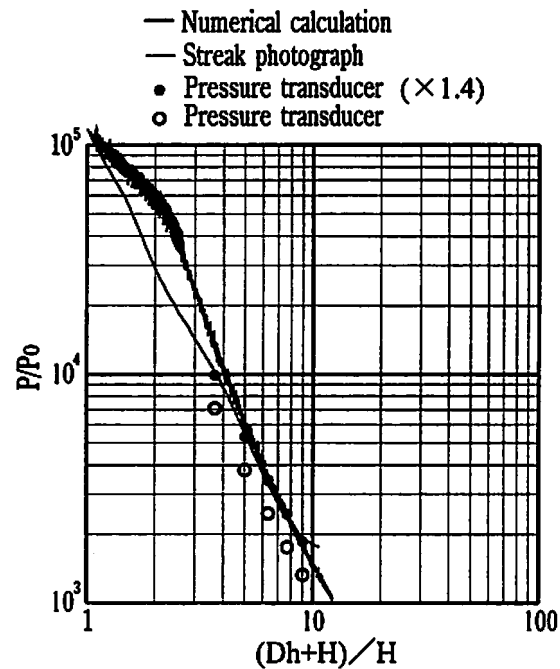


Fig.10 Comparison of pressure distributions on the underwater shock wave front from numerical calculation, streak photograph and pressure transducer measurement.

したのが Fig.10 である。図の縦軸は P/P_0 (P_0 は大気圧)、横軸は $L = (Dh + H)/H$ で、それぞれ無次元化して表示している。図中の太い実線は数値計算で得られた結果であり、細い実線は流し撮影から得られた結果、および○印は圧力変換器による測定結果である。数値計算結果については、1 GPa を超える高い圧力領域で解の振動の影響と思われる湾曲が見られるが、1 GPa 以下の範囲内では流し撮影による測定結果とほぼ一致している。これに対し、圧力変換器による測定結果は、流し撮影の結果よりも相対的に低い圧力になっている。この原因は次のように推察される。変換器では受圧面から 30mm の位置で計測された応力値から受圧面での圧力を推定している。このときポアソン比の影響を無視しているが、実際には受圧面近傍ではポアソン比の影響が大きく¹¹⁾、受圧面から 30mm までの減衰率は(10)式から求められる減衰率よりも大きくなるためであると考えられる。このように、流し撮影法と圧力変換器の測定圧

Table 2 The values of PS and PT as well as their comparison.

Dh mm	20	30	40	50	60
P_T Mpa	716.4	386.3	249.4	177.5	134.4
P_S Mpa	1002.6	540.4	348.6	248.1	187.9
P_S/P_T	1.399	1.399	1.398	1.398	1.398

力値に相違はあるが、 P/P_0 の減衰は無次元距離 L に対して直線的であることが同図から分かる。そこで、一般に知られている水中衝撃波のピーク圧力と換算距離の関係式¹²⁾と同様に、この両者を次式で近似させる。

$$P/P_0 = FL^{-\beta}$$

ただし、 P はピーク圧、 P_0 は大気圧、 F は爆薬の種類や装薬条件によって決まる定数、 β は減衰指数と呼ばれる定数である。流し撮影および圧力変換器のそれぞれの場合について最小二乗法で F 、 β を求めると、流し撮影法の場合、ピーク圧力を P_S とすると、

$$P_S/P_0 = 109300 L^{-1.857}$$

が得られる。圧力変換器の場合は、ピーク圧を P_T とすると、

$$P_T/P_0 = 78860 L^{-1.862}$$

となり、両者の減衰指数 β はほとんど一致している。

Table 2 には、爆薬上端面からの距離 Dh に対するそれぞれのピーク圧力 P_S 、 P_T および P_S/P_T を示している。この表から、 P_S/P_T は距離 Dh に関係なく一定で、約 1.4 である。また、 F_S/F_T もほぼ 1.4 である。Fig. 10 で●印でプロットされているのが、圧力変換器で計測されたピーク圧を 1.4 倍したものであり、流し撮影法で測定された圧力および計算結果と極めてよく一致している。

以上のように、今回試作した弾性棒と半導体ひずみゲージを用いた圧力変換器によっても、1 GPa 程度までの水中衝撃波のピーク圧力を、係数を用いることにより定量的に測定できることが明らかになった。

5. 結 言

得られた結果を以下に要約する。

(1) 試作した圧力変換器で計測された水中衝撃波のピーク圧力は、光学的観測実験および数値解析

結果の圧力値と定性的によく一致した。

- (2) 試作した圧力変換器の測定限界は、水中衝撃波の入射角 $\alpha = 0^\circ$ のとき 740 Ma, $\alpha = 90^\circ$ のとき 1.45 GPa である。
- (3) 試作した圧力変換器で計測された圧力値に換算係数 1.4 を掛けることによって、1 GPa 程度までの水中衝撃波の圧力を定量的に測定できる。

6. 謝 辞

実験は熊本大学工学部附置衝撃エネルギー実験所で行われた。実験に際しては、同実験所の石谷氏に負うところが多い。ここに謝意を表す。

文 献

- 1) M. Fujita, M. Motihara, S. Nagano, E. Uematsu and S. Itoh, Proc. of 4th ICTP (1993), Beijing, to be published
- 2) 土屋八郎, 井上友一, 森勇蔵, 井川直哉, 精密機械, 48(10), p.54(1982)
- 3) 戸部俊美, 加藤正名, 小原治樹, 日本機械学会論文集, 44(384), p.2908(1978)
- 4) 林卓夫, 田中吉之助 編者, 衝撃工学, 日刊工業新聞社(1988)
- 5) P.R. Bervington, Data Reduction and Error Analysis for Physical Sciences, McGraw Hill, New York, Ch. 11(1969)
- 6) 田中克己, 衝撃波と爆轟(デトネーション)波(2), 工業火薬協会誌, 37(6), p.277(1976)
- 7) C.W. Hirt, A.A. Amsden and J.L. Cook, Journal of Computational Physics, 14, p.227(1974)
- 8) E.L. Lee, M. Finger and W. Collins, Lawrence Livermore Laboratory, UCID-16189(1973)
- 9) 伊東繁, 久保田士郎, 吉良章夫, 長野司郎, 藤田昌大, 火薬学会誌, 55(5), p.202(1994)
- 10) S.P. Marsh, University of California Press(1980)
- 11) 岸田敏三, 千田香苗, 日本機械学会論文集, 37(297), p.875(1971)
- 12) 総合安全工学研究所編, 水中発破, 山海堂(1984)

On pipe wall punching by underwater shock wave 1st report The transducer for pressure measurement on the underwater shock wave

Shirou Nagano^{*}, Akio Kira^{**}, and Shigeru Itoh^{***}

A pressure transducer which consists of a tungsten bar and a semiconductor strain gage was manufactured so as to measure the peak pressure of the underwater shock wave propagating in the slender metal pipe. The reliability of the pressure transducer on the peak pressure was examined through the comparison with the optical observation experiments and numerical calculations of the underwater shock wave due to underwater explosion of explosives. It has been found that the measured pressure values qualitatively have a good agreement with the results from the optical observation experiment and the numerical analysis. Furthermore, it is also known that the quantitative measurement on the shock pressure is possible if employing the transforming coefficient of 1.4 obtained from the experiment.

(^{*}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, JAPAN

(^{**}Department of Mechanical Engineering, Sojo University, 4-22-1 Ikeda, Kumamoto 860-0082, JAPAN

(^{***}Shock Wave and Condensed Matter Research Center, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, JAPAN
