

Fig. 1 Experimental apparatus for making holes on a pipe wall .  
 (a) the ellipsoid like pressure vessel, (b) the open-type pressure vessel with Maraging steel bar for pressure measurement.

圧力容器としては同図(a)に示される楕円型容器と(b)に示される開口型容器を用いた。(b)には圧力測定棒もあわせて示されている。楕円型容器の場合、その長軸を $L_a$ 、短軸を $L_b$ とし、 $L_a/L_b$ をアスペクト比と定義した。この比および $L_a$ 、 $L_b$ を種々変えて実験を行った。また金型の材質は合金工具鋼(SKD-11)であり、所要の寸法に仕上げられた型孔がある。導爆線は紙面に垂直にはられ、楕円容器の場合はその第1焦点に配されている。これらの装置全体を水槽に沈めて実験を行う。この導爆線を爆轟させ発生した水中衝撃波を圧力容器の内壁と干渉させ収束させる。この収束された水中衝撃波を金型内に導入し、その衝撃力で管の内部から側壁に孔あけ加工を行う。実験および解析に用いた導爆線は日本カーリット製の直径5.4mmの第2種導爆線で、長さを250mmとした。その爆轟速度は、約6400m/secである。起爆には旭化成工業㈱製の6号電気雷管を用いた。また計算に際しては導爆線によって発生した水中衝撃波と導爆線との境界の圧力値の特性を予め知る必要があり、圧力測定棒を作製し圧力を測定した。圧力測定棒としては半導体ゲージ(㈱共和電業製)を貼ったNi18%マルエージング鋼棒(0.2%耐力=1.96GPa、動的ヤング率=180GPa、直径5mm、長さ400mm)を用いた。この半導体ゲージはゲージファクターが151と大きく、アンプを介せず直接デジタルメモリー(DC~100MHz)に出力できる。この圧力測定棒を圧力容器出口壁面に垂直に挿入し、棒の端面が壁面と一致するようにした(Fig. 1(b))。水中衝撃波がこの圧力測定棒の端面を通過すると、棒

内に応力波が発生する。その応力波によるひずみ変化を半導体ゲージにより電圧変化としてとらえた。半導体ゲージは、棒内を伝播する応力波の減衰の影響がないように端面からできるだけ近いところに貼った。このような圧力の測定では衝撃波は棒の端面に平行に移動するため、衝撃波後方流れの静圧が直接棒に作用し、応力波を棒内に発生させる。このためショックインピーダンスを考慮することなく、ひずみ量から測定された応力が水の圧力と等価と考えられる。圧力測定法の詳細は次報にゆずる。このようにして実験的に得られた圧力値と一致するような導爆線の爆発条件を数値シミュレーションし、それをもとに導爆線と木との界面の圧力条件を与えた。これは導爆線が外部に被膜を有し、その爆発特性を解析的に求めることが一般に難しく、導爆線によって発生した爆轟ガスについて何らかの状態方程式を仮定しても、十分正しくその爆発特性を解析することができないと考えられるためである。

## 2.2 数値解析方法

水中衝撃波のように音速を超えるような現象の解析には差分法が有効である。著者らはHarten<sup>5)</sup>により提案され、Chakravarthy-Osher<sup>6)</sup>によって発展されたTotal Variation Diminishing(TVD)差分法を用いて数値解析した。計算は質量、運動量の保存則に水のHugoniotの関係式<sup>7)</sup>からもとまる状態方程式を組み合わせて行った。次にそれぞれの保存式を示す。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$q, f, g$  は以下に示すベクトルである。

$$q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \end{pmatrix}, f = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + P \\ \rho uv \end{pmatrix}, g = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + P \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $P$ は圧力、 $\rho$ は単位体積あたりの質量を示し、 $u$ 、 $v$ はそれぞれ $x$ 、 $y$ 方向の速度成分である。 $x$ 方向は圧力容器の軸方向である。(1)式の $x$ 方向成分を次のように離散化する。

$$q_i^{n+1} = q_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\hat{f}_{i+1/2}^n - \hat{f}_{i-1/2}^n) \quad (3)$$

$q_i^n$ は $q(i\Delta x, n\Delta t)$ を示し、 $\Delta x$ は $x$ 方向における格子幅、 $\Delta t$ は時間刻みを示す。 $i$ 、 $n$ はそれぞれ $\Delta x$ 、 $\Delta t$ の個数を表す。

$\hat{f}_{i+1/2}^n$ は数値流束 (numerical flux) を表す。計算では次の数値フラックスを用いた。

$$\hat{f}_{i+1/2}^n = h_{i+1/2}$$

$$\begin{aligned} & -\frac{(1-\phi)}{4} [d\tilde{f}_{i-3/2}^n] - \frac{(1+\phi)}{4} [d\tilde{f}_{i-1/2}^n] \\ & + \frac{(1+\phi)}{4} [d\tilde{f}_{i+1/2}^n] + \frac{(1-\phi)}{4} [d\tilde{f}_{i+3/2}^n] \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、

$$\begin{aligned} d\tilde{f}_{i-3/2}^n &= \min\text{mod} [df_{i-3/2}^n, \beta df_{i-1/2}^n] \\ d\tilde{f}_{i-1/2}^n &= \min\text{mod} [df_{i-1/2}^n, \beta df_{i+1/2}^n] \\ d\tilde{f}_{i+1/2}^n &= \min\text{mod} [df_{i+1/2}^n, \beta df_{i-1/2}^n] \\ d\tilde{f}_{i+3/2}^n &= \min\text{mod} [df_{i+3/2}^n, \beta df_{i+1/2}^n] \end{aligned} \quad (5)$$

であり、 $\beta$ は次式で与えられる定数である。

$$1 < \beta \leq \frac{3-\phi}{1-\phi} \quad (6)$$

さらに

$\min\text{mod}(x, y) = \text{sign}(x) \times \max\{0, \min\{|x|, y \times \text{sign}(x)\}\}$ である。 $h_{i+1/2} = h(q_{i+1/2})$ は1次精度の数値フラックスで次式で与えられる。

$$\begin{aligned} h_{i+1/2} &= f(q_i) + \sum_{n=1}^m df_{i+1/2}^n \\ &= f(q_{i+1}) - \sum_{n=1}^m df_{i+1/2}^n \\ &= \frac{1}{2} [f(q_{i+1}) + f(q_i)] \\ &\quad - \frac{1}{2} \left[ \sum_{n=1}^m df_{i+1/2}^n - \sum_{n=1}^m df_{i-1/2}^n \right] \end{aligned} \quad (7)$$

計算の精度をあげるために $\beta=2$ 、 $\phi=-1$ とした。なお壁境界条件としては外挿の条件を採用した。 $m$ は(2)式で表される変数の数を示し3元連立偏微分方程式の解法の場合は3となる。 $i$ は考えている流れ場の格子番号を表す。 $i+1/2$ は $1/2(i+i+1)$ を示し、 $i$ 番目の格子と $i+1$ 番目の格子の中間点を示す。本研究の対

象となるような多次元問題では、次に示されるような時間分割法を用いる。(3)式で表される $x$ 方向差分演算子を $L_x$ とし、 $y$ 方向には次の差分演算子を用いる。

$$q_j^{n+1} = q_j^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\hat{g}_{j+1/2}^n - \hat{g}_{j-1/2}^n)$$

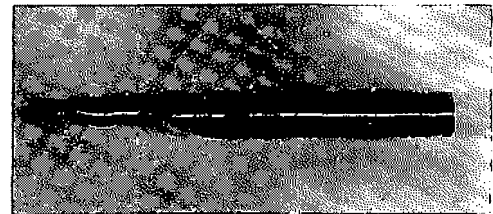
ここで $j$ は $y$ 方向の格子の個数を表す。上式を $L_y$ と記すと、 $n+2$ 時間での $q$ は次式で与えられる。

$$q^{n+2} = L_x L_y L_y L_x q^n$$

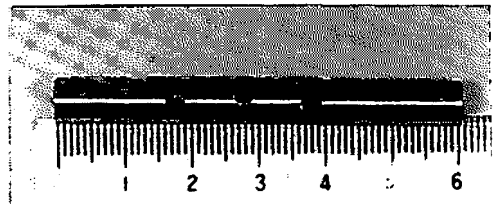
演算子 $L_x$ 、 $L_y$ を交互に繰り返すことによって、必要とされる計算時間での計算結果を得る。また楕円容器のような非一様な形状を持つ物理場は適当な座標変換<sup>8)</sup>を施し矩形の計算場に変換して上式の演算子を適用する。計算にはトランスビューダーを搭載したパーソナルコンピュータ(NEC製PC9801-DA)を用いた。 $\Delta t/\Delta x$ は解の安定性の条件(CFL条件)から与えた。代表的な計算の場合、格子数は $x$ 方向400、 $y$ 方向30で1回の計算に必要な時間はおよそ6時間程度であった。

### 3. 実験結果および考察

開口型容器を用いて円管の側壁に孔あけ加工した場合の実験結果をすでに報告<sup>9)</sup>しているが、この場合Fig. 2(a)に見られるように管の先端部分がつぶれる結果が多く得られた。同図は内径6mm、肉厚0.5mm、長さ60mmのステンレス鋼管(SUS304)の側壁に孔あけ加工を行った結果を示す。この原因として次の2つが推測される。(1)容器内に発生した水中衝撃波が容器出口から円管内に入射する際、導爆線の爆轟にと



(a)



(b)

(a) open-type vessel (b) ellipsoid like vessel

Fig. 2 Photographs of a collapsed and a succeeded pipe obtained in the open-type vessel and the ellipsoid like vessel.

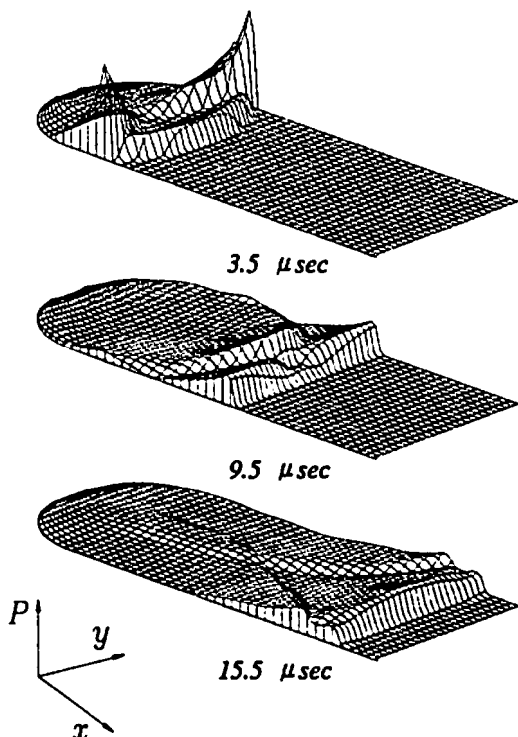


Fig. 3 Pressure distributions obtained in the open-type vessel. Each time is measured from the instant of explosion.

もなつて、なが手方向から伝播してくる衝撃波が円管の肉厚部と衝突し円管を変形させ坐屈を引き起こす。

(2) 衝撃波が円管内を通過後に入り口付近に膨張波が発生しこれにより発生した低圧のため、円管が中心方向に弾性変形させられ、そのあと後続の衝撃波が存在した場合、それがこの変形された円管を衝撃的にたたため、このように管の先頭がつぶれた。

また楕円型容器を用いて得られた実験結果を同図(b)

に示す。同図は $L_a=20\text{mm}$ ,  $L_b=10\text{mm}$ の場合の結果を示し、ステンレス鋼管の諸寸法、材質は開口型容器の実験に用いたものと同じである。極めて良好な孔あけ加工がなされていることが同図からわかる。このため本報告では後続の衝撃波の影響等を解析的に検討した。

開口型容器について数値計算で得られた圧力の3次元表示をFig. 3に示す。容器は水中衝撃波の収束を効率よく行うために上部に半径 $R=3\text{mm}$ の丸みを設けた。図中の $x-y$ 面は容器断面を示し、縦軸は圧力を示す。導爆線が爆轟してからの経過時間も図中に示されている。時間の初期に発生した水中衝撃波は容器壁面から反射し、図にみられるように高い圧力を持っている。これが時間が進むにつれて容器の中心方向に進行しそこで再反射する。このように水中衝撃波は容器の壁と中心で反射を繰り返しながら複数の衝撃波を発生させていることが同図から定性的に分かる。Fig. 4は容器出口部における圧力の時間履歴を示す。図中の $d$ は開口型容器の出口の幅方向中心からの距離を示し、 $d=3.0\text{mm}$ は容器出口の壁面に対応している。同図縦軸は圧力を、横軸は時間を示している。同図には実験によって測定された壁面での先頭の衝撃波によって得られた圧力のピーク値が示されている。この先頭衝撃波の圧力の実験結果をもとに導爆線と水との境界面での圧力条件を次のように与えた。

$$P(t) = 3000 \exp(-2.5 \times 10^4 t) \text{ (MPa)}$$

ここで $t$ は導爆線が起爆してからの時間で、単位は秒である。

先頭衝撃波が通過した後、中心付近ではおよそ $21.0\ \mu\text{sec}$ 後(図中のA)でふたたび高い圧力が生じ、壁面では(図中B)およそ $22.5\ \mu\text{sec}$ で後続衝撃波によるピーク圧力が現れていることが同図から分かる。さらに後方にも圧力のピーク値が観察される。これは後

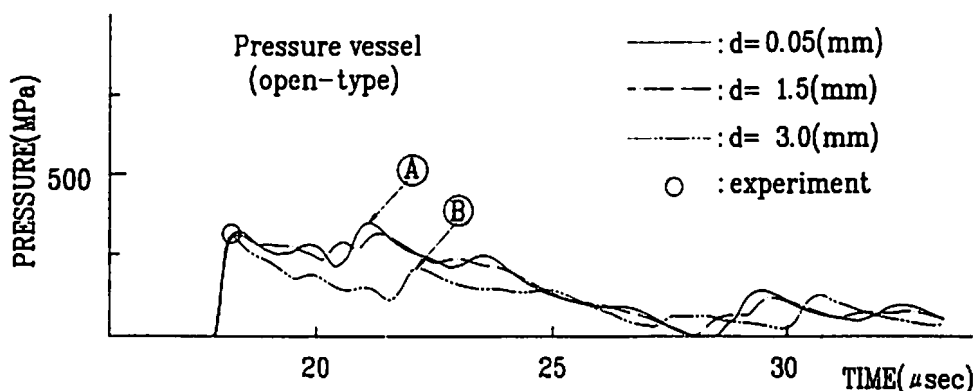


Fig. 4 Pressure histories obtained in the open-type vessel. "d" denotes the distance from the center of vessel.

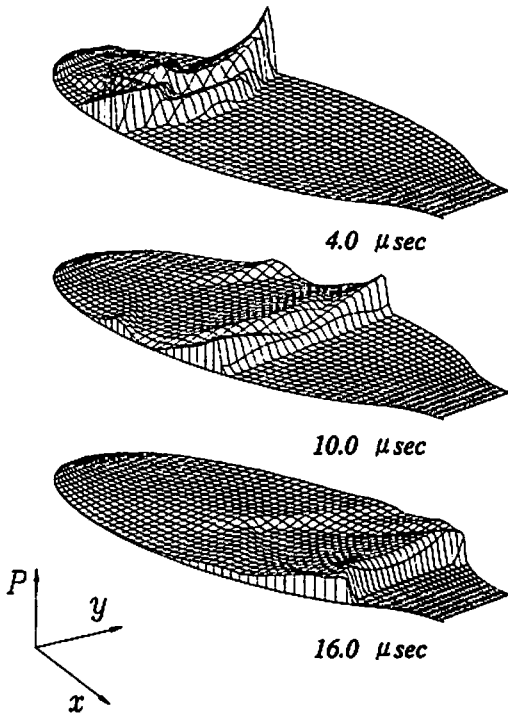


Fig. 5 Pressure distributions obtained in the ellipsoid vessel. Each time is measured from the instant of explosion.

統衝撃波が平面でないことを示す。この後統の衝撃波のピーク圧のために、Fig. 2 (a)に示されたような管のつぶれが生じたものと考えられる。

開口型容器を用いた実験から得られた圧力条件をもとに計算で得られた楕円型容器内の圧力の3次元表示をFig. 5に示す。同図は $L_a=20\text{mm}$ 、 $L_b=10\text{mm}$ の場合に対して、導爆線の爆轟からそれぞれ、4.0、10.0、16.0 $\mu\text{sec}$ 後において得られた圧力分布を示す。図中のx-y面は容器断面を示し、縦軸は圧力を示す。導爆線を楕円容器の第1焦点で爆轟させると容器内では出口方向（図左から右方向）に進む先頭衝撃波と容器上部方向（図右から左方向）に進む衝撃波が発生する。後者の衝撃波は容器から反射し、先頭衝撃波よりも高い圧力で出口方向へ向かい、徐々に先頭衝撃波に追いついてくる。そして16.0 $\mu\text{sec}$ で両者は一体化して、下流に伝播して楕円容器から金型へ入射して行く過程が同図から定性的に理解できる。

開口型容器を用いた管の孔あけ加工実験および数値解析結果から明らかになったように、孔あけ加工では衝撃波の強さが重要であると同時に管内への入射衝撃波の平面性および入射時間のズレが非常に重要である。Fig. 6は容器出口部における管壁上での圧力と時間の

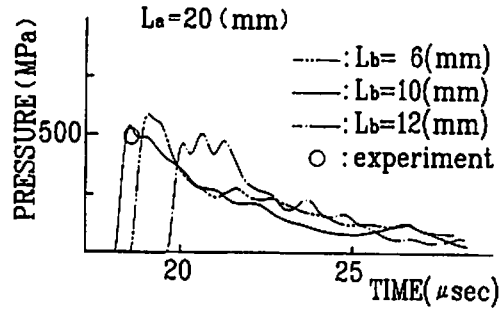


Fig. 6 Pressure histories obtained for various  $L_b$  in the ellipsoid like vessel.  $L_a$  indicates the major axis of an ellipsoid and  $L_b$  shows the minor axis of ellipsoid.

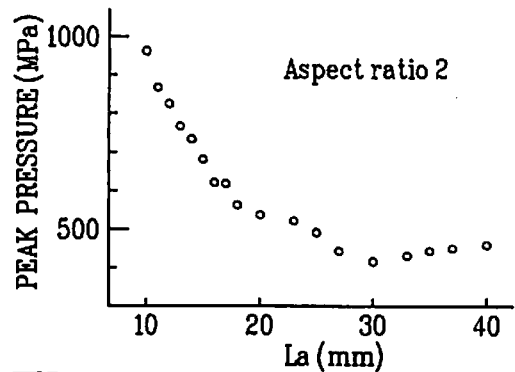


Fig. 7 Peak pressures obtained in the ellipsoid like vessel for an aspect ratio of 2.0.

関係を示す。同図は $L_b=20\text{mm}$ と固定し $L_b$ を変化させ、アスペクト比の影響を示す。同図 $L_b=12\text{mm}$ では、他の場合と異なりピーク圧力が3点あることが分かる。これは前述のように後統の衝撃波があることを示し、これが管をつぶす要因の一つになる。アスペクト比が2以上の他の2つの場合はピーク圧点が一点で、またその圧力値はいずれの場合も約500MPa得られている。また $L_a=20\text{mm}$ の場合に得られた圧力の測定結果を同図に記号○で示すが、両者は極めて良い一致を示している。圧力の実験結果に関するその詳細は別の機会に発表する予定である。アスペクト比が2の場合に得られた圧力の波形は極めて良好であるので、本研究ではアスペクト比が2の容器について解析を進めた。Fig. 7はアスペクト比2の場合に得られた圧力の最高値を $L_a$ に対して示す。同図から $L_a$ が大きくなるにつれて圧力の最高値は急激に減少することが分かる。開口型容器を用いた実験によって、内径6mm、肉厚0.5mmのステンレス管に孔あけ加工するためには350MPa以上の圧力が必要であることが実験的に分かっている。こ

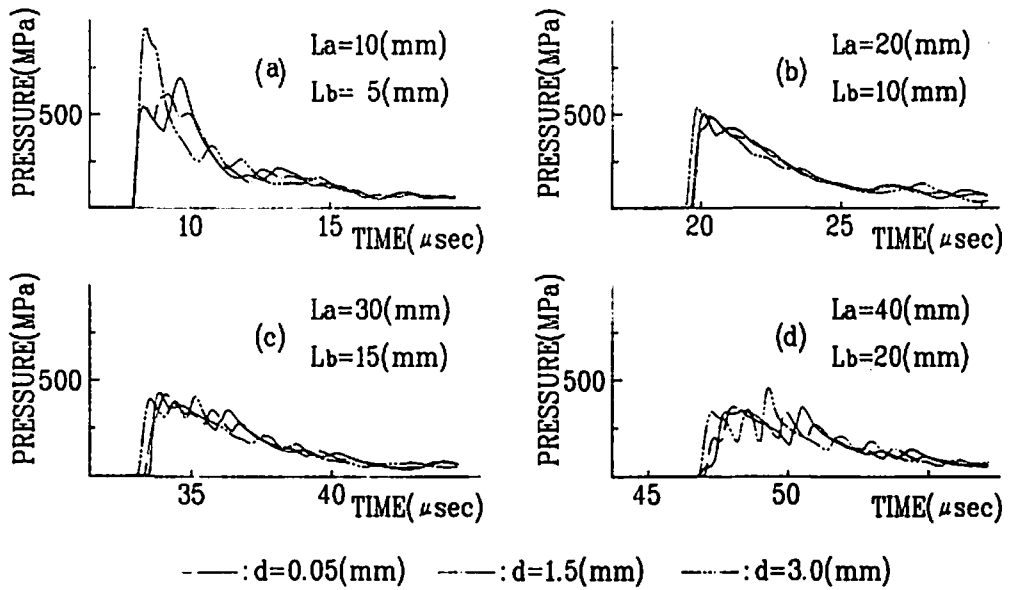


Fig. 8 Pressure histories obtained for various  $L_a$  at the same aspect ratio of 2. "d" denotes distance from the center of vessel.

のため孔あけの対象となる管の材料によっては必然的に要求される最低圧力があり、 $L_a$ の要求される範囲が決められる。容器出口部における圧力と時間との関係を $L_a$ を変化させて解析を行った結果をFig. 8に示す。図中dは楕円容器出口の中心からの距離を示しd=3.0mmは出口の壁面に対応している。 $L_a=10$ mmの場合(同図(a))容器出口の壁面上では約1000MPaの最大圧力値をとっているが、容器中心部(d=0.05mm)と中心から1.5mm離れた位置では、いずれも600~700MPa程度と低い。また中心部付近と壁面上での最大圧力に到達するまでに時間のズレがあり、容器出口の圧力分布が非常に乱れていることが分かる。壁面上の圧力の時間履歴には複数のピーク圧点はみられないが半径方向にこのような圧力分布があることより、衝撃波が大きく湾曲していることが分かる。この影響によって管が弾性変形や坐屈を起こし、つぶれる可能性があるため孔あけ加工には不適切である。 $L_a=20$ mmの場合(同図(b))は安定した圧力分布を示し各半径方向部における圧力もほぼ一定であり、その最大値は500MPaに達し有効な孔あけ加工が期待できる。 $L_a=30$ mmおよび $L_a=40$ mmの場合(同図(c),(d))圧力値が振動していることが確認できる。同図から分かるようにアスペクト比が同じ2の場合でも圧力の時間履歴に $L_a$ 、 $L_b$ の大きさによって計算結果の傾向が大きく異なることが分かった。この違いを説明するために、 $L_a=20$ mmおよび $L_a=40$ mmの場合の等圧線と速度ベクトルをFig. 9, Fig. 10にそれぞれ示す。図中には

導爆線の爆轟からの経過時間が合わせて示されている。等圧線は圧力が30MPaおきに書かれており、最低圧力は0.1MPa(大気圧)である。この等圧線が密になっているところが水中衝撃波に対応している。 $L_a=20$ mmの場合、先頭衝撃波は管内へ平面的に入射していることが分かる。また入射後その後流に大きな湾曲流れが生じていないことが同速度ベクトル図から分かり、

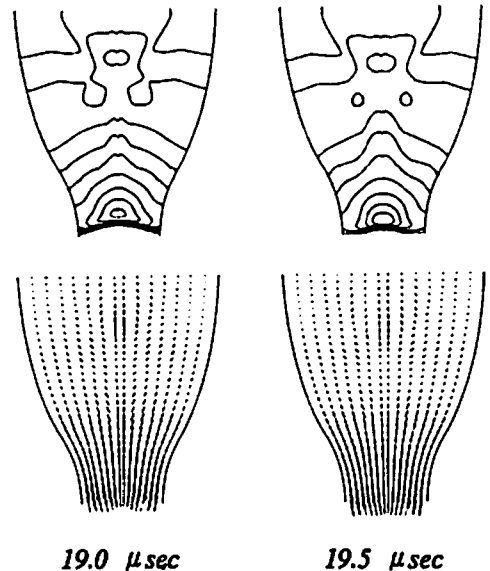


Fig. 9 Pressure contour maps and velocity vectors. ( $L_a$  is 20mm and  $L_b$  is 10mm)

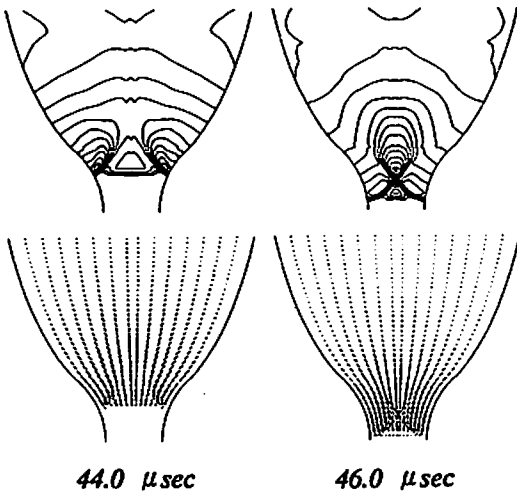


Fig. 10 Pressure contour maps and velocity vectors. ( $L_a$  is 40mm and  $L_b$  is 20mm)

このことより先頭衝撃波に続く後方衝撃波が存在していないことが分かる。このため容器内に圧力の乱れはほとんど見ることができない。ところで、 $L_a=40$  mmの場合は、容器出口の手前で膨張波が発生し(44.0  $\mu$ sec)、その影響で水中衝撃波が大きく湾曲し、出口方向へ進んでいることが分かる。そのため、46.0  $\mu$ secの図から分かるように水中衝撃波は平面となって入射できず、またその後方に斜め衝撃波を伴っている。そのため先頭の入射衝撃波の後に高い圧力を持つ衝撃波が存在している。このために圧力分布に大きな乱れが生じた。

#### 4. まとめ

導爆線を用いてその内側から管に孔あけ加工する装置としての最適容器形状を提案するに先立ち、閉口型容器について数値解析した。その結果発生した水中衝撃波は容器壁面と中心部での反射を繰り返し、容器内部に複数の水中衝撃波が発生することが明らかになった。複数のピーク圧力が存在する場合、管には連続的な衝撃圧が作用し、弾性変形や坐屈を受け、条件によっては管入り口部でつぶれ等の現象がみられた。そのため半径方向に時間差のない高圧力が得られ、複数のピーク圧力が発生しない容器形状が要求されることを確認した。そこで楕円型容器を提案した。その容器の内部流れをTVD差分法を用い数値解析し次のような結果を得た。

楕円のアスペクト比(長軸 $L_a$ と短軸 $L_b$ の比)が2以上の場合に上述の条件を比較的満足する結果が得られ、管の孔あけに適切な水中衝撃波を得ることができた。この場合、 $L_a$ が長すぎても、短かすぎても最適な圧力分布を得ることができなかった。これは $L_a$ が長い場合は容器の全長が長くなり、管入り口部の到達圧力が低くなり、また $L_a$ が短いとその圧力が大きいが、圧力の履歴が大きく乱れる結果が得られたためである。数値解析の結果 $L_a=20$ mm、 $L_b=10$ mmの場合に管の孔あけ加工に極めて良好な圧力分布およびおよそ500 MPaの圧力値を持つ水中衝撃波を得ることができた。さらに同容器を用いた管打ち抜き実験で極めて良好な孔あけ加工ができた。

ところで導爆線は長手方向に爆轟が進むため、それにより発生する水中衝撃波の解析を行うためには、本来計算場を三次元的に取り扱うことが必要である。しかしながら本論文では数値解析のコストやその取扱いの容易さを考え、二次元的な数値解析方法の確立を行った。そして計算結果と実験結果を比較し、解析結果が極めて有効であることを明らかにした。

本研究を遂行するにあたり旭化成工業株式会社からご支援を賜った。また爆発実験は本学付風衝撃エネルギー実験所において行い、同実験所 石谷幸保氏に協力いただいた。ここにあわせて謝意を表す。

#### 文 献

- 1) 山縣裕, 小池俊勝, 日本金属学会会報, 27, 6, (1988)
- 2) 村田真, 根岸秀明, 鈴木秀雄, 塑性と加工, 23, 262, (1982)
- 3) J. Harding, S. B. Kulkarni, A. A. Erza, 2nd Int. Conf. of Center for High Energy Forming, 8, (1969)
- 4) M. Fujita, M. Motihara, S. Nagano, E. Uematsu and S. Itoh, Proceeding of 4th ICTP (1993), Beijing, to be published
- 5) A. Harten, SIAM J. Numerical Analysis, 21, 1-23, (1984)
- 6) S. R. Chakravarthy, S. Osher, AIAA paper 85-360, (1985)
- 7) J. M. Walsh, J. of Chemical Phys., 26, 4, (1967)
- 8) R. W. MacCormack, A. J. Pully, AIAA paper 72-154, (1972)

# On converging of underwater shock waves by an ellipsoid like vessel

## An application for making holes on pipe wall

by Shigeru ITOH\*, Kiyotaka KAMOHARA\*, Shiro NAGANO\*  
Masahiro FUJITA\*

We have investigated a technique to make holes on a pipe by underwater explosion of a detonating cord stretched over the pipe. In application, the regulations of an underwater shock wave are most important and very difficult. In this paper, we propose an ellipsoid like pressure vessel for generating and regulating underwater shock waves to apply for making holes on pipes. The profile of the underwater shock wave or the pressure distributions in the pressure vessel is calculated by TVD difference scheme. A piece of detonating cord is located at the first focus point of ellipsoid like pressure vessel. When an explosion occurs, the underwater shock wave is generated from the site of explosion and travels downstream and interacts with the wall of the pressure vessel to converge its strength. Finally, it enters into the pipe to make holes from the inside. When the aspect ratio (the ratio between the major axis and the minor axis of ellipsoid) is 2.0, the most suitable pressure distribution was obtained in this apparatus.

(\*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kumamoto  
University 2 — 39 — 1 Kurokami Kumamoto, 860)

---