導爆線の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波 による金属管への 孔あけ加工(第1報)

孔あけ加工装置の圧力特性

長野司郎,伊東 繁"

金属管への孔あけ加工法として、水中での導爆線の爆ごうによって発生した水中衝撃波を金属管 内に入射させ、内側から孔をあける水中爆発加工法を提案した。装置は、導爆線を装薬して水中で 爆ごうさせ、発生した水中衝撃波を収束させるための反射容器と孔あけ加工用の金型で構成され る。この方法では、金型を損傷させることなく、被加工管内にいかに効果的に水中衝撃波を作用さ せるかが重要である。そこで、導爆線の爆ごうにより発生した水中衝撃波を収束させ、局所的に高 い圧力と圧力の力積を発生させることのできる容器形状について、圧力測定実験と光学観測を併用 して検討した。その結果、容器内面の断面形状が楕円形の場合に最も高いピーク圧力と圧力の力積 が得られ、いずれも鋼板に導爆線を貼っただけの場合の約3.3倍であった。

1.諸 當

金属管壁の孔あけ加工を切削工具等で外側から行う と、管の内面には必ずバリが生じる。このバリの除去 は、管径が小さくなる程、あるいは、孔の数が多くな る程困難になり、その作業には多くの工程が必要とな る。そこで、管の内面から孔あけ加工する方法が各種 試みられている。山縣等<sup>1)</sup>はパンチを装着したロッド (以下工具と記す)を管内に挿入し、内燃機関のシリン ダーライナーのポート孔を内側から加工しているが、装 置は非常に複雑である。また被加工管の径が変わる毎 に工具も作り直す必要があり、管径が小さくなるとそ の製作は困難となり、工具の強度も懸念されるなど多 くの難点がある。村田等2)は管内に電磁コイルを挿入 する電磁成形法を試みている。この場合も管径に応じ て電磁コイルを製作しなければならず、管径が小さく なるとコイルの絶縁破壊等への防止対策が必要になっ てくる。また火薬類を用いた例として, Fig. 1に示す 」.Harding<sup>3)</sup>等の水中爆発加工法がある。これは図に 示すように導爆線を管内に貫通させ、その水中爆ごう によって発生する衝撃波の作用で管の内側から孔を打 ち抜く方法である。この方法は管を嵌装する金型と水

1999年11月2日受理 \*熊本大学工学部 〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1 TEL/FAX 096-342-3750 \*\*熊本大学銜撃極限環境研究センター 〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1 TEL/FAX 096-342-3299



Fig. 1 The apparatus proposed by J.Harding. S.B.Kulkarni and A.A.Ezra

槽があればよく、装置が簡単で、導爆線をそのまま使用できるという利点がある。以上のように各種の加工法が試みられているが、いずれも加工工具や加工エネルギ源を管内部に直接挿入する方法であるため、加工可能な管径が制限される。さらに多数管の同時加工の場合には、工具や加工エネルギー源を管内に挿入する工程に長時間を要する等多くの欠点がある。

筆者らは、J.Harding等の方法の欠点を解消でき、し かも多数管の同時加工をも実現できる、導爆線を用い た新しい水中爆発加工法を提案した<sup>4)</sup>。本報では筆者 らが提案した新しい加工法とその加工装置の圧力特性 についての実験結果を報告する。

2. 導爆線を用いた金属管への孔あけ加工法について Fig. 2に筆者らが提案した,水中での導爆線の爆ご



Fig. 2 A schematic illustration of the present apparatus

うを利用した加工法の基本構成図を示す。装置は導爆 線を装薬して爆ごうさせ、発生した水中衝撃波を収束 させるための反射容器(以下、単に容器と称する)と、 孔あけ加工用の金型で構成されている。装置全体は水 中に沈められている。導爆線が爆発すると、発生した 水中衝撃波は容器内壁面の反射効果で収束された後, 金型に嵌装された金属管内に入射し、管の内側から孔 が打ち抜かれる。この方法は加工部(金属管)と加工エ ネルギ源である装薬部が分離しているのでエネルギ調 整は容易であり、管径は制限されることがない。また 容器と加工用金型の配置は単に重ねるだけよく、図の ように長い容器と金型を多数配置することによって多 数管の同時加工も比較的簡単に行える。筆者らは,図 に示したように内径6mm, 肉厚0.5mm, 長さ60mmの ステンレス鋼管(SUS304)の側壁に直径3mmの孔を数 個あけることを最終目標としている。この目標を達成 するためには、ステンレス鋼管のせん断抵抗が650MPa 以上であることから、管入り口では0.7~1GPa程度の 水中衝撃波の圧力が必要であると予想される。また、 この方法では、金型を損傷させることなく、被加工管 内にいかに効果的に水中衝撃波を作用させるかが重要 である。そのためには管内を伝播する水中衝撃波の圧 力を詳細に測定し、その伝播・減衰状況等を明確にし、 管内に入射させる水中衝撃波を適切に制御することが

求められる。

3. 使用した圧力変換器について

前述のように、内径6mmという狭い管内において、 1GPa程度の高い圧力まで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当たらない。そこで筆者ら は、弾性棒と半導体ひずみゲージを利用した圧力変換 器(以下,圧力変換器と略記)を試作した。その構造を Fig. 3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(SKD11,外径18mm)および ステンレスパイプ(SUS304, 外径18mm, 肉厚3mm) で構成されている。弾性棒は直径5mm,長さ300mm のタングステン棒(0.2%耐力1.4GPa、動的な縦弾性係 数412.7GPa, 固有振動数500KHz)である。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 挿入し、受圧面(棒端面、直径18mm)以外からの衝撃 波の入射を遮断するようにした。このタングステン棒 には、受圧面から30mmの位置の軸方向に左右対称に 2枚の半導体ひずみゲージ(共和電業製、ゲージ長さ 1mm,抵抗350Ω,最大ひずみ3000×10<sup>-6</sup>,ゲージフ ァクター151)をはり付けている。この2枚の半導体ゲ ージと棒外部のダミーゲージでホイート・ストンブリ ッジ回路を構成する。棒端面で水中衝撃波を受圧する と、棒内には弾性応力波が伝播し、発生した応力に応 じてブリッジ回路に電位差が生じる。このブリッジ回 路の出力波形は増幅器を介さず、ディジタルメモリー スコープ(LeCroy社9314, 最小サンプリングタイム 3nsec/word, AD変換部分解能8bit, メモリー長 10kword)に直接出力させた。こうしてタングステン棒 内の弾性応力を計測し、水とタングステン棒端面との 界面での音響インピーダンスを考慮して棒端面での水 中衝撃波のピーク圧力が次式から求められる。



Fig. 3 Schematic structure of pressure transducer

ここで、Pは水中衝撃波の圧力(弾性棒中は応力)、ρ は単位体積あたりの質量、Cは音速、αはタングステ ン棒の軸方向に対する水中衝撃波の入射角であり、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。水中衝撃波の入射角αは後述の光学観測から 求めた。またKは、水中衝撃波が弾性棒に入射すると きの応答遅れ(応答周波数は500KHzである)や棒内を 伝播する応力波の減衰等の影響によって生じると予想 される測定誤差の修正係数である。これについては、 別に予備実験として行った光学観測との比較実験の結 果、K = 1.4 であった。

(1)式で、水中衝撃波の入射方向が弾性棒の軸方向と
 一致する場合はα=0であるので、

$$P_{w} = \frac{1 + \frac{\rho_{w}C_{w}}{\rho_{B}C_{B}}}{2} = P_{B}K$$
(2)

となる。 $\alpha = 90^{\circ}$ の場合には,

 $P_{W} = P_{B}K$ (3)

となって、管の内壁面の圧力を測定する場合に適用で きる。この圧力変換器を使用したすべての実験におい て、受圧面での衝撃波の擾乱を防止するために、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 になるように調整するとともに付着した気泡は注意深 く除去した。また、圧力変換器の先端は水中に100mm 以上浸すようにし、計測波形が、水、空気の界面から の希薄波の影響を受けないようにした。

## 4. 導爆線の水中爆ごう特性について

導爆線を各種の金属加工に応用する際、導爆線の爆 ごうによって発生する水中衝撃波の基本的な特性を把 握し、加工目的に応じて適切に制御する必要がある。 筆者らは、導爆線の爆ごうにより、導爆線のごく近傍 に発生する水中衝撃波の圧力や波形の形状ならびに、 その水中伝播と圧力減衰過程などの基本的な特性<sup>5.6</sup>や. 鋼板に導爆線をはりつけて爆ごうさせたときの水中衝 撃波の特性<sup>7</sup>等について報告している。Fig. 4(a), (b) に導爆線の爆ごうによって発生した水中衝撃波を、前 述の圧力変換器で受圧させたとき記録されたタングス テン棒内の応力波形(以下これを圧力波形と記す)の代 表例を示す。同図(a)はS 550 Cの鋼板(100 × 300 × 19t,以下単に鋼板と記す)に長さ300mmの導爆線を貼 り、導爆線からの距離Dhを10mm一定にして、軸方向 に20mm間隔で配置した4本の圧力変換器で計測された 圧力波形である。導爆線は日本カーリット(株)製の第 2種導爆線(外径5.4mm, 薬量7g/m)を使用し, 旭化成



(a) The detonating cord pasted on the steel plate.



- (b) The naked detonating cord with those obtained when it was pasted on the steel plate.
- Fig. 4 Pressure histories of the underwater shock wave obtained by the pressure transducers. A : preceding shock. B: reflected shock. Dh : distance between transducer and detonating cord

工業(株)の6号電気雷管で起爆した。記録された圧力 波形は、いずれの場合も導爆線から直接到達する衝撃 波(図中のA,以下先頭波と記す)と鋼板で反射してく る衝撃波(図中のB,以下反射波と記す)が明らかに分 離しており、しかも、それぞれの波形、ピーク圧力値 ともに大きな相違がなく,導爆線の軸芯からの距離が 一定であれば,軸方向に沿って一定の強さの水中衝撃 波を連続的に発生させることが可能であることがわか る。ところで、いずれの波形も立ち上がり時間は約2 μ secであることがわかる。このように立ち上がり時間が 2μ sec になるのは,圧力変換器を構成するタングステ ン棒の固有振動数やひずみゲージの受圧面の大きさな どの影響によって生じる応答遅れのためであると考え られる。従って、図中の波形は水中衝撃波の圧力波形 とは多少異なることに注意する必要がある。同図(b) は、導爆線のみの場合と鋼板の場合のそれぞれについ て、Dh = 10, 20, 30, 40mmの位置における圧力波形 を示す。この図で、Dh=10mmにおける鋼板の場合に は前述のように先頭波と反射波が分離しておりピーク 圧力値は導爆線のみの場合とほぼ同じであるが、圧力 波形の面積(圧力の力積)が鋼板の場合のほうが大きく

なっているのが注目される。Dhが20mmより大きくな るに伴って反射波が先頭波に次第に追いつき一体化す る傾向にあり, Dh = 30mm以上では完全に一体化して おり, ピーク圧力および圧力の力積ともに導爆線のみ の場合よりも大きくなっているのがわかる。このよう に鋼板からの反射波が先頭波に追いつき一体化するの は, 鋼板のショックインピーダンスが水のそれに対し て圧倒的(約26倍)に大きいので, 先頭波よりも鋼板か らの反射衝撃波の方が, 圧力が高く速度も速いためで あると思われる。以上の結果から, 導爆線の背後に適 切な容器を配置することにより, 局所的に高い圧力と 力積の水中衝撃波を発生させることができると期待さ れる。そこで筆者らは, 導爆線を用いた金属管への孔 あけ加工に最適な容器形状について, 圧力測定実験お よび光学観測を行って検討した。

# 5. 実験方法

# 5.1 容器開放端(出口)での圧力測定

Fig. 5に実験装置を示す。図のように導爆線を装薬 した容器の上方に、試作した4本の圧力変換器を導爆 線の軸方向に沿って20mm間隔で配置し、導爆線から の垂直距離Dhが各容器の開放端面と一致する位置 (Dh = 40mm)での圧力を計測し、各容器の反射効果を 比較した。使用した容器の断面概形はFig.6に示すよ うに鋼板,開放型,楕円型の3種類である。材質はす べてS550Cである。開放型容器の開放角は $\theta$  = 120°, 90°, 60°, 30°, 0°の5種類とし, 底部は8Rの丸みを 付けてある。また、楕円型容器の形状は、長径40mm, 短径17mmでアスペクト比は2.35である。この形状に したのは、容器の出口幅を開放型容器( $\theta = 0^{\circ}$ )の出口 幅16mmおよびDh = 40mmと同一にするためと, 楕円 の第一焦点に導爆線を装薬できるようにするためであ る。各容器の長さは鋼板の場合が300mmで、他はすべ て150mmである。







## 5.2 光学観測

各容器の圧力特性を充分理解するためには、ピーク圧 力だけではなく、水中衝撃波が容器内をどのように伝 **播し、容器出口まで到達するかを調べる必要がある。** そこで、鋼板、開放型( $\theta = 60^\circ$ ,  $0^\circ$ )および楕円型の 各容器について、 閃光時間50 µ 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1ns/mm, 以下略称イメコン)を用い, 駒撮影および流し撮影を行 って比較検討した。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および導爆線の 爆ごう現象との同期は、導爆線に取り付けたイオンギ ャップとパルスジェネレータから得られる信号をスター トパルスとして、4チャンネルディレイジェネレータ (STANFORD RESEARCH SYSTEMS社, MODEL DG535)により制御した。駒撮影では導爆線の軸方向の シャドウグラフを駒間隔2 µ sec で撮影し、容器内の水 中衝撃波の伝播過程を観測した。このとき,20mm間 隔の直交格子を描いたPMMA (Polymethylmethacrylate)板を予め撮影し、光軸のずれや像のひずみがない かを確認するとともに、写真上の尺度を求めた。流し 撮影の場合は,導爆線の半径方向(容器の長手方向に 直角方向)にスリット(幅25μm)を配置し, 1μ

- 46 --

Reflector	Steel plate	120°	90°	60°	30°	0°	Ellipsoid
Pm(MPa)	265.8	304.9	352.1	429.7	521.8	716.6	875.0
Im (Pa · s)	1866.3	2196.4	2409.1	2911.4	3471.3	4845.7	6134.4

Table 1 Shock pressure (Pm) and impulse (Im) measured by pressure transducer

sec/mmの流し速度で,容器の開放端から水中を伝播 する水中衝撃波を流し撮影した。このとき写真上の距 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,1MHzの矩形波を用いて校正した。導爆線 は日本カーリット(株)製の第2種導爆線であり,これ を長さ300mm使用した。使用した導爆線の爆ごう速度 はイオンギャップ法で測定した結果6308 ± 10m/secで あった。

## 6. 実験結果および考察

# 6.1 圧力変換器による圧力測定結果

Fig.7は鋼板,開放型( $\theta = 60^\circ$ ,  $0^\circ$ ),および楕円型の 各容器の出口(Dh=40mm一定)で記録されたそれぞれ の圧力波形を示している。この図から、開口角のが小 さくなるにつれて立ち上がりの鋭い圧力波形となり、ピ ーク圧力も高くなり、楕円型容器の場合に最も高い圧 力が記録されているのがわかる。水中衝撃波による管 の孔あけ加工においては圧力の第一波のピーク圧力だ けでなく、圧力の力積が重要である。Table 1に、全て の容器について計測された圧力波形から求めたピーク 圧力および圧力の力積を示した。力積は圧力波形の第 一波が基線から立ち上がってピーク圧力に達し、再び 基線まで減衰する範囲内について求めた。この表から、 開放型容器の開口角θが小さくなるに伴ってピーク圧 力が高くなり、圧力の力積も大きくなっているのがわ かる。特に楕円型容器の場合には、鋼板の場合に対し て、圧力および圧力の力積ともに約3.3になっている。



Fig. 7 Measured pressure records of underwater shock wave

このように導爆線の背後に適切な形状の反射容器を用 いる方法が,水中衝撃波の収束法として極めて有効な 方法であることが明らかになった。

#### 6.2 光学観測の結果

Fig. 8は、鋼板、開放型( $\theta = 60^\circ$ ,  $0^\circ$ )および楕円型 容器について、容器出口に向かって伝播する水中衝撃 波の様子を導爆線の軸方向から駒撮りした写真である。 同図は撮影開始時刻を0 $\mu$  secとして、駒間隔2 $\mu$  sec で撮影されたものである。写真から、鋼板および、開 放型( $\theta = 60^\circ$ )の容器の場合、水中衝撃波の先端部は明 らかな球面形状で容器出口まで伝播しているのがわか る。また、開放型( $\theta = 0^\circ$ )の場合はかなり平坦な形状 をしているがまだ若干の丸みがある。一方、楕円型容 器の場合はほぼ平坦で、先頭波と容器内面各部からの 反射波が一体となった時間差のない収束衝撃波が得ら れていると推測される。

ところで、開放型容器の場合に観測されたような先 端形状の衝撃波が管に入射する場合は、管の半径方向 で入射時間にずれが生じる。この時間的なずれによっ て、管の入り口部が変形すると予想される。事実、管



Fig. 8 Framing photographs of underwater shock waves corresponding to different reflectors,  $t=0 \ \mu$  sec indicating the start of photography

への孔あけ加工の予備実験ではそれが原因と思われる、 管入り口部の変形が見られた。その結果をFig.9に示 す。図中の矢印は衝撃波の人射方向である。実験の全 体図は被加工管が1本であること以外はFig.2と基本的 に同じである。管は内径6mm、肉厚0.5mm、長さ 60mmのステンレレス鋼管(SUS304)である。金型の材 質はSKD11の生材で、入り口から15mmの深さから 3mmの穴を左右交互に5mm間隔で5個配置した分割型 である。分割型の片面の寸法は40×150×60mmであ る。反射容器は実験結果を基に新たにS550Cで製作し た開放型( $\theta = 0^{\circ}$ )で、出口幅6mm、深さ(Dh)20mm、 長さ120mmである。導爆線は長さ200mm使用した。 Fig. 10の(a)~(d)は導爆線の半径方向から撮影された 鋼板および各容器の場合の流し写真である。スリット 幅は25µm,流し速度は1µsec/mmである。鋼板の 写真(a)で、右下の黒く水平な部分は未爆ごうの導爆 線,その左の白い点は爆ごう波面であり、爆ごう波面 より左上にのびている黒い線の上縁WSが水中衝撃波 の先端部のストリークである。STは鋼板部である。(b) ~(d)の右下の黒く水平な部分は容器(RT)の上端面(出 口)であり、WSは水中衝撃波である。いずれの場合も 縦方向が半径方向の伝播距離,横方向が時間で,右か ら左に経過している。これらの写真を画像処理し、導 爆線の半径方向の水中衝撃波の伝播距離 v と経過時間 tのデータを得た。ここで、水中での導爆線の爆ごう 波が一定速度Dで伝播するので、半径方向の水中衝撃 波の伝播距離yに対応する x 座標はx = Dtで求められ、 容器から出て水中を伝播する衝撃波の形状がわかる。 得られた衝撃波形状の近似式を求めてxで微分すると, ある位置における傾き角 β が求められ、水中衝撃波の 伝播速度Uwは、

$$U_{\rm W} = D\sin\beta \tag{4}$$

で与えられ、圧力が求められる<sup>6)</sup>。尚、この場合容器 の開放端から出た直後の衝撃波の速度が重要であるの で、半径方向の伝播距離yが0~5mm以下の領域につ







Fig. 10 Streak photographs obtained by the image converter camera. The streak speed was 1  $\mu$  sec/mm, WS : underwater shock wave, ST : steel plate, RT : top of reflector

いてデータ処理を行った。これら一連のデータ処理は, Microsoft Excelで行った。こうして得られた各容器の 出口(鋼板の場合はDh=40mm)における水中衝撃波の 伝播速度とピーク圧力をTable 2に示す。表2からわか るように、光学観測の結果からも楕円型容器の場合に 最も高い圧力が観測された。その値は鋼板の場合の約 3.3倍となり、その傾向は圧力変換器の場合と一致し た。

## 7.まとめ

導爆線を用いた金属管への孔あけ加工装置を提案し, 装置の圧力特性を調べた。実験は圧力測定,光学観測 を行った。結果を以下に要約する。

 導爆線の背後に反射容器を置き、容器内壁面からの反射効果を利用する方法で水中衝撃波を比較的容

Table 2Pressure (Pm) and velocity (Uw) of under-<br/>water shock wave from streak photograph

Reflector	Steel plate	$\theta = 60^{\circ}$	$\theta = 0^{\circ}$	Ellpsoid
Us(m/s)	1819.2	1914.5	2128.9	2265.3
Pm(MPa)	335.6	453.2	762.9	982.5

易に制御できることがわかった。

- 楕円型反射容器の場合に最も高い水中衝撃波の圧 力が計測され、ピーク圧力値と圧力の力積はともに 鋼板に導爆線をはった場合の約3.3倍であった。
- 3. 楕円型反射容器の場合、光学観測の結果から衝撃 波の平面性もよいことが確認され、管の孔あけ加工 に対して極めて有効であると推察された。

謝辞

実験は熊本大学衝撃・極限環境研究センターで行わ れた。実験に際し、同センターの石谷幸保氏には終始 適切な助言を頂いた。ここに深謝します。

文 献

- 1) 山縣 裕,小池俊勝,日本金属学会会報,27-6, pp.483~485(1988)
- 2) 村田 真,根岸秀明,鈴木秀雄,塑性と加工,23-

262, pp.1095~1102(1982)

- J.Harding, S.B.Kulkarni, and A.A.Ezra, Proc. 2nd International Conference of the Center for High-Energy Forming, pp.8.4.1~8.4.30(1969)
- M.Fujita, M.Motihara, S.Nagano, E.Uematsu and S.Itoh, Proc. of the 4th ICTP. pp.100~105, Beijing (1993)
- 5) 伊東 繁,長野司郎,鈴木 修,藤田昌大,火薬 学会,平成5年度年会講演要旨集,pp.27-30(1993)
- 6) 伊東 繁,灘 光陽,長野司郎,藤田昌大,火薬 学会誌,58-5, pp.189-195(1997)
- 7)伊東 繁,長野司郎,鈴木 修,田中誠一郎,藤 田昌大,火薬学会秋季研究発表講演要旨集,pp.65 -66(1993)

# Punching processing of metal pipe using underwater shock wave due to detonating cord 1st report Pressure characteristic of the experimental set-up

by Shirou NAGANO\* and Shigeru ITOH\*\*

As one of punching techniques of metal pipe, we present an underwater explosion punching method in which the holes are punched from the inside to the outside by the underwater shock wave due to the explosion of detonating cord in water. The assembly consists of a reflection vessel, which converges the underwater shock wave and a metal die for the punching purpose. In this method, the action of underwater shock wave on the interior of the to-be-punched pipe is very important while the die would not be damaged. The effects of the shape of the reflection vessel to converge the underwater shock wave to obtain a required high pressure and impulse are studied by means of pressure measurement and optical observation system. As a result, it is found that in the case of the reflection vessel, which has an elliptic cross-section, the high peak-pressure and impulse are obtained and, both values are of approximately 3.3 times those from the case of the detonating cord directly pasted on a metal plate.

(\*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kumamoto University, 2–39–1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, Japan

\*\*Shock Wave and Condensed Matter Research Center, Kumamoto University, 2– 39–1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, Japan)

# ーお 詫 びー

火薬学会誌 Vol.61,No.1 の英文目次が EXPLOXION 誌 Vol.10,No.1 の英文目次になってしまいました ことを深くお詫び申し上げます。





- 99 -