

二次元螺旋形状導爆線を用いた水中衝撃波の制御に関する研究

濱田 亨*, 村田健司**, 加藤幸夫**, 伊東 繁***

*熊本大学大学院 自然科学研究科 博士後期課程 〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2-39-1

**日本油脂株式会社 〒470-2398 愛知県知多郡武豊町字北小松谷61-1

***熊本大学 衝撃・極限環境研究センター 〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2-39-1
e-mail: itoh@mech.kumamoto-u.ac.jp

2005年2月1日 受付 2005年2月23日 受理

要旨

爆薬の水中爆ごうによって発生する水中衝撃波を利用した爆発加工において、加工目的に応じて水中衝撃波を制御することは非常に重要である。そこで本研究では、二次元螺旋形状導爆線を用いた水中衝撃波の制御法について調べた。二次元螺旋形状導爆線の水中爆ごうによって発生する水中衝撃波の圧力を測定した結果、螺旋の中心と圧力を負荷させる位置ならびに使用する導爆線の長さを変えることによって、水中衝撃波の最大圧力値と圧力作用時間が変化することが明らかになった。

1. 緒論

爆薬の爆ごうによって発生する衝撃波を利用した各種加工法は、20世紀後半から開発され始めた。中でも爆薬を水中で爆発させることによって発生する水中衝撃波を利用した加工法は数多く開発され、現在では、金属・非金属粉末の衝撃固化法¹⁾、アモルファス金属箔の爆発圧着法²⁾、美術品・球殻の成形法³⁾等がある。衝撃波を伝達する媒質として水が多く利用される理由は、取り扱いが非常に簡単であること、広い範囲に比較的長い時間衝撃波を負荷させることができること、液中で加工を行うため爆ごうガスが被加工品に与える熱の影響が少ないことなどが挙げられる。しかしながら、単に水中衝撃波を被加工品に負荷させても目的的加工を行うことはできない。その加工目的に応じて圧力分布を加工対象に適するように制御する必要がある。

従来まで、それらの制御は、爆薬の種類の変更や金属製の水中衝撃波収束装置¹⁾を利用することで行われてきた。しかし、これらの方法では加工できる材料の種類は少なく、加工にかかるコストも高い。

そこで著者らは、二次元螺旋形状導爆線を用いた水中衝撃波の新しい制御法についての研究を行った。本論文では、二次元螺旋形状導爆線の形状計算方法、光学撮影により観測された水中衝撃波の伝播過程、圧力センサにより測定した水中衝撃波の圧力履歴について報告する。

2. 二次元螺旋形状の計算

Fig. 1に著者らが提案した二次元螺旋形状の概略図を示す。本形状は、 P_1 点から始まった爆轟がO点で終了すると同時に $P_1 \sim P_n$ 点で発生した水中衝撃波全てがO点に到達するように設計された。

2.1 導爆線の水中爆ごう現象のストリーク撮影

二次元螺旋形状導爆線を設計するためには、導爆線(日本カーリット社(株)製)の水中爆ごうにより発生する水中衝撃波の伝達距離と時間の関係調べが必要がある。そこで、導爆線の水中爆ごう現象を高速度カメラ(HADLAND PHOTONICS社製, IMACON 790)を用いた光学的写真観察実験によって調べた。Fig. 2にストリーク撮影実験に使

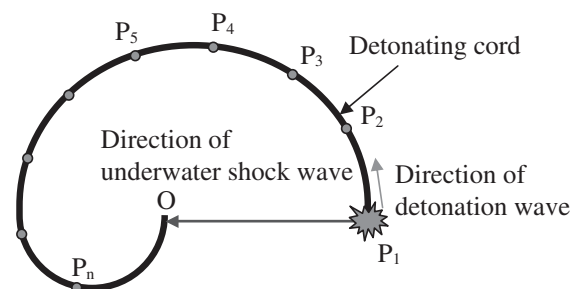


Fig. 1 Illustration for configuration of 2-dimentional spiral.

用した実験装置の概略図を示す。導爆線は直径5.4 mm (被覆厚さ0.5 mm), 長さ200 mmで, 芯爆薬はPETNであり, 爆薬の充填密度は $1200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ である。導爆線の爆ごう伝播速度は $6308 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ である。起爆は6号電気雷管(旭化成ケミカルズ(株)製)によって行った。Fig. 2に示すようにPMMA製の水槽に水を溜め, その中に導爆線を配置した。導爆線は, 撮影時に湾曲したり位置がずれたりすることのないように専用の固定ジグによって固定された。導爆線の中央付近に幅 $15 \mu\text{m}$ のストリークスリットを設け, 水中爆ごうによって発生する水中衝撃波の伝播過程を観察した。

Fig. 3にストリーク写真撮影⁵⁾より得られた導爆線の水中爆ごう現象を示す。Fig. 3の右下の水平な黒い線の部分は, 未爆ごうの導爆線(EX), その左の白い点は爆ごう波面(SL), さらにその点の上下よりそれぞれ左上と左下に伸びている黒い線の上縁が先頭水中衝撃波(SW)を示す。図中縦方向が距離を, 横方向が時間を示している。この写真を画像処理し, 水中衝撃波の未爆ごう導爆線に垂直な方向への伝播距離と時間のデータを得た。それらをnonlinear curve fitting法⁵⁾により式(1)のように関数近似した。

$$\frac{r}{D} = a_1 \{1 - \exp(-b_1 t)\} + a_2 \{1 - \exp(-b_2 t)\} + \frac{c}{D} t \quad (1)$$

ここで r は未爆ごうの導爆線に垂直な方向の距離, c は水の音速, D は導爆線の爆ごう速度である。なお a_1 , a_2 および b_1 , b_2 はTable 1で示す定数である。

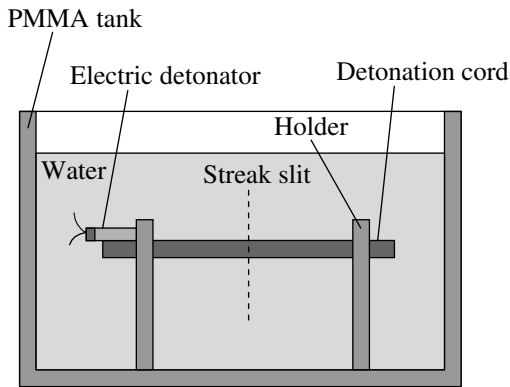


Fig. 2 Illustration of experimental set up for streak photography.

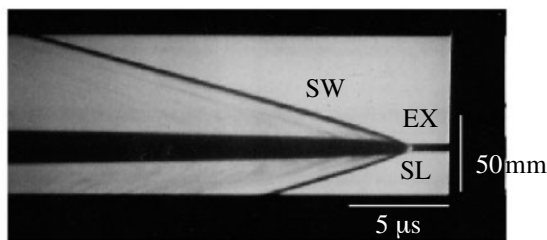


Fig. 3 Streak photograph for underwater shock wave from detonation cord.

Table 1 Curve fitting parameters for the propagation of the underwater shock wave.

a_1 (s)	a_2 (s)	b_1 (s^{-1})	b_2 (s^{-1})	c ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	D ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
15.150	1.920	4.711×10^{-3}	0.102	1489	6308

2.2 螺旋形状式の算出

算出される形状は, 螺旋形状であるため水中衝撃波の収束方向と導爆線のなす角度は垂直にならない。しかしながら本論文では, 螺旋形状を簡便化するため, 垂直で近似できると仮定し, ストリーク撮影の結果得られた水中衝撃波の伝播距離と時間の関係式(1)を用い螺旋形状式を求めた。Fig. 4に爆ごう点から水中衝撃波収束点までの距離とその位置関係を示した図を示す。

まず起爆点 P_1 から収束点 O までの直線距離 r_1 を設定する。 r_1 を式(1)に代入することで P_1 から発生した水中衝撃波の O 点までの到達時間 t_1 が決定する。

$$\frac{r_1}{D} = a_1 \{1 - \exp(-b_1 t_1)\} + a_2 \{1 - \exp(-b_2 t_1)\} + \frac{c}{D} t_1 \quad (2)$$

O 点までの水中衝撃波到達時間と爆薬の爆轟終了時間は一致していなければならないので初期爆薬長さ L_1 は式(3)より決定する。

$$L_1 = D t_1 \quad (3)$$

微少時間 dt 後の先頭爆轟波面から収束点までの距離 r_2 は, 式(1)に $t_2 = t_1 - dt$ を代入することで求めることができる。

$$\frac{r_2}{D} = a_1 [1 - \exp\{-b_1(t_1 - dt)\}] + a_2 [1 - \exp\{-b_2(t_1 - dt)\}] + \frac{c}{D} (t_1 - dt) \quad (4)$$

また dt 後の爆薬長さ L_2 は

$$L_2 = D (t_1 - dt) \quad (5)$$

となる。式(2)と(4)の差をとると式(6)を得ることができる。

$$dr = \{a_1 b_1 \exp(-b_1 t_1) D + a_2 b_2 \exp(-b_2 t_1) D + c\} dt \quad (6)$$

また, 式(3)と式(5)の差をとり, Fig.4の三角形 $P_1 P_2 O$ が半径 r , 中心角 $d\theta$ の扇形に近似できるとすると式(7)が得られる。

$$D dt = r d\theta \quad (7)$$

式(6)を(7)に代入すると式(8)を得る。

$$\frac{dr}{r} = \frac{a_1 b_1 \exp(-b_1 t_1) D + a_2 b_2 \exp(-b_2 t_1) D + c}{D} d\theta \quad (8)$$

式(8)の両辺を積分すると

$$r = r_1 \exp \left\{ \frac{a_1 b_1 \exp(-b_1 t_1) D + a_2 b_2 \exp(-b_2 t_1) D + c}{D} \theta \right\} \quad (9)$$

式(9)を求めることができる。さらに $\{a_1 b_1 \exp(-b_1 t_1) D +$

$a_2 b_2 \exp(-b_2 t_1) D + c \} / D$ の項を k と置くと、対数螺旋を表す一般式 (10) を導くことができる。

$$r = r_1 \exp(k \theta) \quad (k > 0) \tag{10}$$

式 (9) 中の $a_1 b_1 \exp(-b_1 t_1) D + a_2 b_2 \exp(-b_2 t_1) D + c$ は、式 (2) を時間 t_1 で微分した導関数であり、起爆点 P_1 から発生し

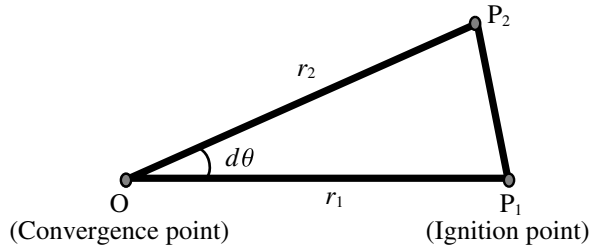


Fig. 4 Distance from detonation point to convergence point.

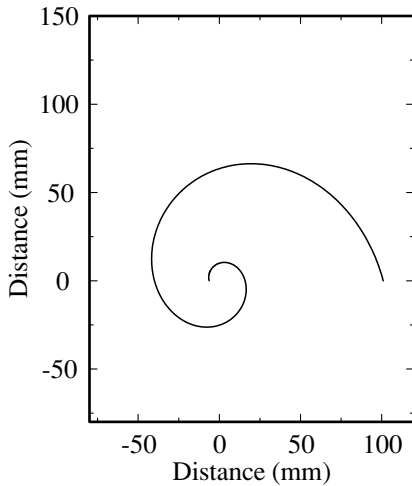


Fig. 5 Spiral configuration calculated by Eq. (10).

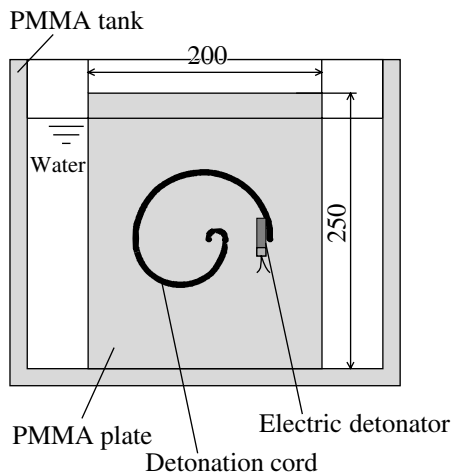


Fig. 6 Illustration of experimental set up for framing photography.

た水中衝撃波が r_1 伝播した時の速度となる。つまり係数 k は、水中衝撃波速度と導爆線の爆ごう速度の比を示している。

使用する導爆線の直径及び整形性を考慮し、実験で使用される螺旋形状導爆線の巻き数を一周半 ($\theta = 0^\circ \sim 540^\circ$) と定めると、式 (10) より、本研究で求める螺旋形状は、 r_1 と k によって決まる。Fig. 5 に上記の式 (10) によって得られた爆薬形状図を示す。

3. 実験方法

3.1 二次元螺旋形状導爆線の水中爆ごう現象の

フレーミング撮影

二次元螺旋形状導爆線の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波の伝播過程を観察するためにフレーミング撮影^(6, 7)を行った。Fig. 6 にフレーミング撮影に用いた実験装置の概略図を示す。図に示すように螺旋形状導爆線はPMMA製の水槽内に水没させ実験を行った。この時、螺旋形状導爆線が高速度カメラの真正面を向くように細心の注意を払った。高速度カメラのトリガーとしては、イオンギャップを使用し、これを導爆線の端に6号電気雷管と一緒に取り付けた。式 (10) より得られた対数螺旋形状に導爆線を持する固定具には、縦250 mm、横200 mm、厚さ5 mmのPMMAの板を使用した。PMMA板には、幅5.5 mm、深さ3 mmの溝が螺旋形状に加工されており、実験の際はその溝に導爆線をはめ込むみ使用した。

本実験で使用した螺旋形状導爆線の r_1 は100 mm、導爆線の長さは400 mmであった。また、フレーミング撮影のコマ間隔は、2 μ sであった。

3.2 圧力センサを用いた水中衝撃波圧力測定

高速度カメラを用いたフレーミング撮影において、二次元螺旋形状導爆線の水中爆ごうによって発生する水中衝撃波の伝播過程と螺旋の中心への収束状態は観察することができる。しかし、光学的写真撮影だけでは水中衝撃波が収束した部分に作用する圧力まで知ることはできない。

そこで、二次元螺旋形状導爆線の水中爆ごうによって発生する水中衝撃波が収束する位置(螺旋の中心)で作用する圧力の履歴を圧力センサ(米国PCB社製、型番102 A)で測定した。また、導爆線を真っ直ぐ伸ばした場合ならびに円形状にした場合での圧力履歴も測定し、螺旋形状の場合と比較した。

Fig. 7 に圧力センサを用いて圧力測定を行った際の実験装置の概略図を示す。Fig. 7 中の Dh は、圧力センサと二次元螺旋形状導爆線の中心までの距離を示す。まず、 $Dh=272$ mmの位置に圧力センサを設置した。本実験では、直線型と螺旋型の導爆線の形状による圧力履歴の比較だけではなく、使用する導爆線の長さによる圧力履歴の違いを調べるために、3種類の螺旋形状導爆線を準備し測定を行った。Table 2 に使用した導爆線の形状と長さを示す。また、 $Dh=50$ mmの場合でも同様の実験を行い、圧力を負荷させる距離の違いによる圧力履歴の変化について調べた。実験条件はTable 3に示される。

圧力センサは、図に示すように水に水没させて使用する必要があるが、圧力センサ本体に防水処理が施されていない

Table 2 Experimental conditions (r_1 : Distance between spiral center and ignition point).

Form of detonating cord	Case	Length of detonating cord	Dh
Straight	(I)	250 mm	272 mm
	(II), $r_1=60$ mm	250 mm	272 mm
Spiral	(III), $r_1=80$ mm	300 mm	272 mm
	(IV), $r_1=100$ mm	400 mm	272 mm

Table 3 Experimental conditions (r_1 : Distance between spiral center and ignition point, r_2 : Radial of circle).

Form of detonating cord	Case	Length of detonating cord	Dh
Straight	(V)	250 mm	50 mm
Spiral	(VI), $r_1=60$ mm	250 mm	50 mm
	(VII), $r_1=100$ mm	400 mm	50 mm
Circle	(VIII), $r_2=250$ mm	250 mm	50 mm

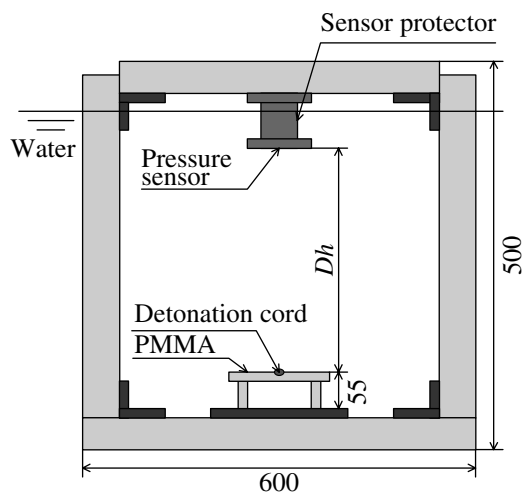


Fig. 7 Illustration of pressure measurement assembly by using pressure sensor.

い。そこでセンサプロテクタに圧力センサを取り付けセンサ内部に水が浸水しないようにした。

4. 結果及び考察

螺旋状導爆線の水中爆ごうによって発生する水中衝撃波の伝播過程をFig. 8に示す。撮影開始時間を0 μ sとし、2 μ s間隔でフレーミング撮影を行った。写真中に示す十字は、螺旋の中心(水中衝撃波収束点)である。白線(SW)は、各時間における先頭水中衝撃波の伝播位置を示し、点線は、爆ごう前の導爆線の中心軸位置を示している。

先頭水中衝撃波の前に衝撃波が発生しており、導爆線の爆轟が終わる前に螺旋の中心に到達していることが分かる。衝撃インピーダンスの関係から、この衝撃波は導爆線の固定ジグとして使用したPMMA板中を伝播する衝撃波だと考えられる。撮影された写真を観察すると、導爆線より発生した水中衝撃波が円形に湾曲しながら螺旋の中心に向かい、最終的に中心に収束していることが判る。

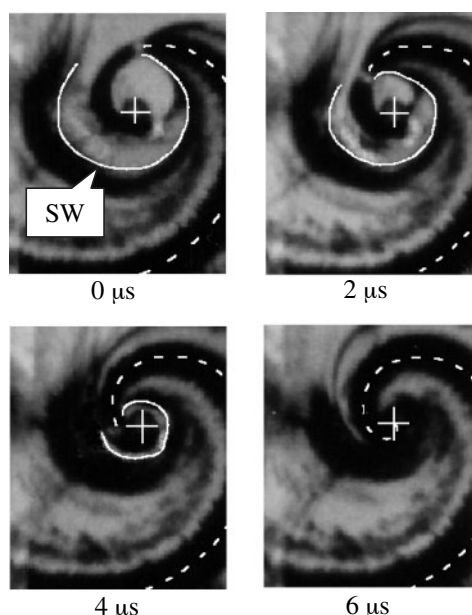


Fig. 8 Framing photographs for underwater shock wave from spiral detonating cord.

Fig. 9に $Dh=272$ mmの場合に測定された水中衝撃波の圧力履歴を示す。図中のCase IIは、導爆線を真っ直ぐに伸ばした直線型導爆線の圧力履歴である。Case II~Case IVは、螺旋型導爆線の圧力履歴である。Case IとCase IIの圧力履歴を比較すると、使用した導爆線の長さと同じであっても、その波形は全く異なるものとなっていることが判る。Case Iは、急激に圧力が上昇し下降する衝撃波特有の圧力履歴を示している。それに対してCase IIは、急激に圧力が上昇した後、ある一定以上の圧力値を40 μ s程度保ち圧力が下降している。つまり、爆薬の形状を螺旋形状にすることにより、任意の一点所に作用する圧力の作用時間が延びることが判った。また、Case III, Case IVのように使用する導爆線を長くするとそれに応じて圧力作用時間が増加した圧力履歴

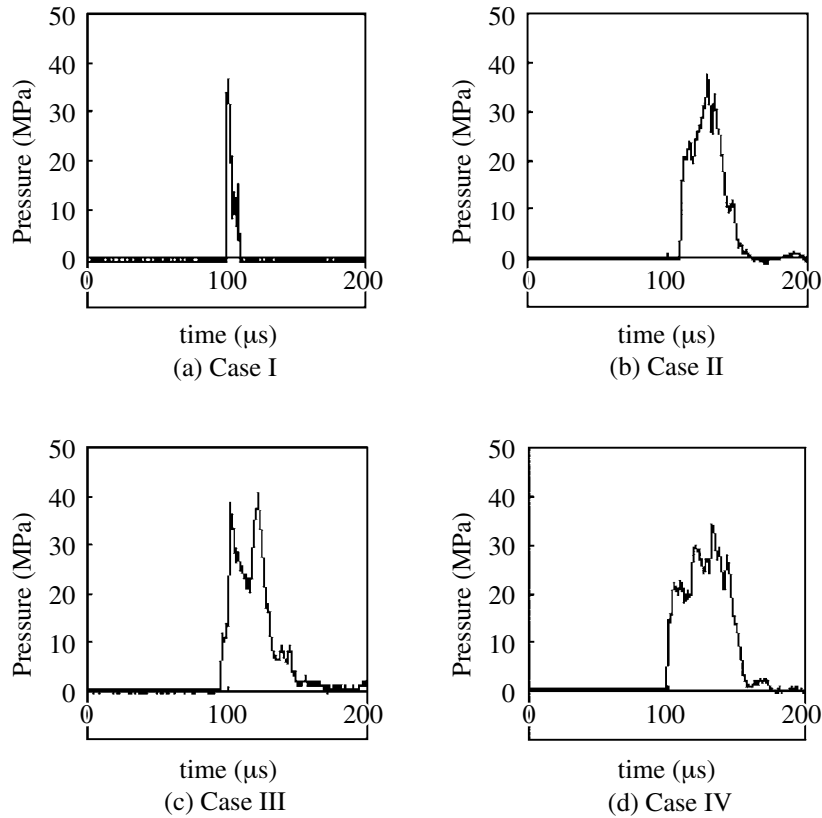


Fig. 9 Pressure history measured by pressure sensor ($Dh=272$ mm).

になることも判った。

Fig. 10 (a)は、本実験より測定された最大圧力値と導爆線の長さの関係を表したグラフである。グラフより直線型と螺旋型の最大圧力値は、35 MPa~40 MPaとほぼ同じ値を示し、導爆線の形状による違いは見られなかった。

Fig. 10 (b)に測定点に負荷した力積と導爆線長さの関係グラフを示す。グラフ中の力積値は、Fig. 9の圧力作用時間と圧力値の積である。グラフから、同じ導爆線の長さでも螺旋型の方が直線型より4倍以上も力積値が高いことが判る。

$Dh=50$ mmでの圧力履歴をFig. 11に示す。Fig. 11のCase Vは直線型、Case VI, Case VIIは螺旋型、Case VIIIは円型での圧力履歴である。それぞれの圧力履歴を比較すると、螺旋型の最大圧力値が直線型と円型に比べ、非常に高

いことが判る。

各圧力履歴の最大圧力値と使用した導爆線の長さの関係をFig. 12 (a)に示す。同じ導爆線長さで最大圧力値を比較した場合、螺旋型が最も高く、その値は、円型の約4.0倍、直線型の約2.5倍であることが判った。また、導爆線の長さを長くすることでさらに高い圧力が発生することが判った。この結果は、水中衝撃波の収束効果を示すものであると考えられる。

Fig. 12 (b)に測定点に作用した力積と使用した導爆線の長さの関係を示す。螺旋型の導爆線長が長くなると最大圧力値と同様に力積も高くなる。円型の場合、最大圧力値は他の形状の導爆線に比べ低い圧力作用時間が最も長いいため、同じ導爆線長さで比較すると最も高い力積値を示した。

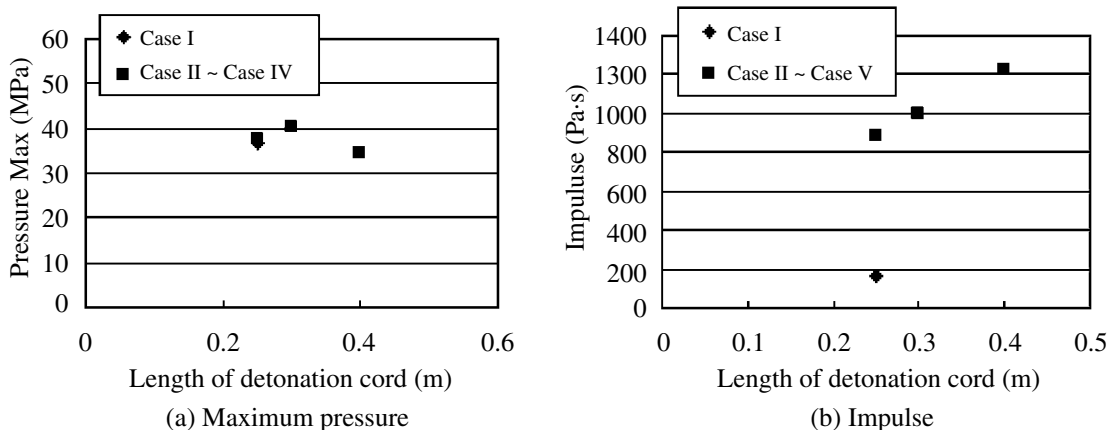


Fig. 10 Maximum pressure and impulse obtained by pressure histories ($Dh=272$ mm).

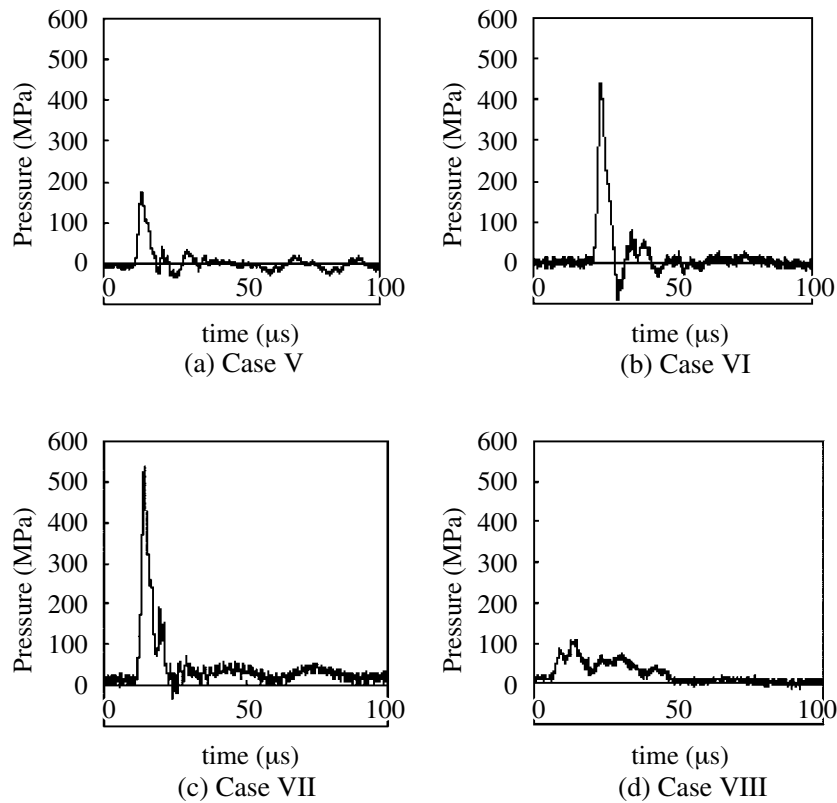


Fig. 11 Pressure history measured by pressure sensor ($Dh=50\text{ mm}$).

円型導爆線から発生する水中衝撃波の圧力履歴は、 $Dh=272\text{ mm}$ で圧力測定を行った時の螺旋型のものと似ている点がある。観測点がそれぞれ違うため水中衝撃波の圧力値は全く異なるが、どちらも直線型のような衝撃波特有の圧力履歴を示さず、圧力作用時間が $40\text{ }\mu\text{s} \sim 50\text{ }\mu\text{s}$ と長いものとなっている。この結果より螺旋型の場合、 $Dh=272\text{ mm}$ での水中衝撃波は収束の効果を示さず、単に導爆線を円形状に曲げたことによる影響のみが現れたと考えられる。

5. 結論

本研究では、二次元螺旋形状導爆線を用いた水中衝撃波の制御に関する研究を行った。水中衝撃波の伝播過程を観測するためにフレーミング撮影を行った。その結果、螺旋

形状導爆線の水中爆ごうが終了すると同時に、螺旋の中心に水中衝撃波が収束していることが判った。

圧力センサを用いて螺旋中心付近の水中衝撃波の圧力を測定した。螺旋の中心から垂直方向に 272 mm 離れた位置に圧力センサを配置した場合の圧力履歴は、圧力作用時間が長く、直線型導爆線よりも4倍以上力積が高いことが判った。本研究で計算された螺旋形状は、二次元的に水中衝撃波が収束するため、中心から距離が離れた位置では水中衝撃波の収束の効果は現れず、導爆線を円形状にすることによる影響のみが現れたと考えられる。螺旋の中心から垂直方向に 50 mm の位置に圧力センサを設置し圧力測定を行った場合、直線型導爆線に比べ2.5倍程度最大圧力値が高かった。この結果は、螺旋形状導爆線からの水中衝撃波が螺旋

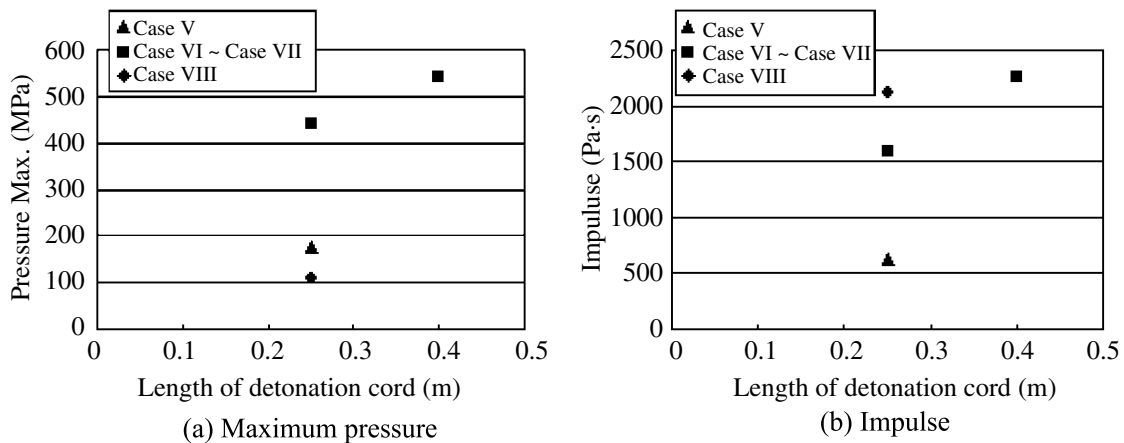


Fig. 12 Maximum pressure and impulse obtained by pressure histories ($Dh=50\text{ mm}$).

中心に収束したことを示している。

本研究の結果より、螺旋中心から圧力作用点までの距離や導爆線長を変化させることで、直線型で使用する場合より圧力作用時間が長い圧力の負荷や最大圧力値の高い圧力の負荷ができることが明らかになった。また、実験的に水中衝撃波の収束現象を確認できていることから水中衝撃波の収束方向と導爆線のなす角度を垂直で近似し螺旋形状を算出しても影響がないと考えられる。

今後、導爆線長や水中衝撃波を負荷させる距離を細かく変えた場合での圧力測定を行うことで、爆発加工における適切な負荷圧力の選定及び制御が可能であると考えている。

文 献

- 1) K. Hokamoto, S. Tanaka, and M. Fujita, *Int. J. Impact Eng.*, 24, 631-640 (2000), *J. Pressure Vessel Technol.*, 123, 486-492 (2001).
- 2) S. Itoh, H. Iyama, Y. Kato, K. Murata, K. Raghukandan, S. Nagano, S. Muramoto, and R. Matsumura, *Proc of the 2002 ASME Pressure Vessels and Piping Conf.*, 446, 163-170 (2002).
- 3) S. Itoh, S. Kubota, S. Nagano, and M. Fujita, *ASME J. Pressure Vessel Technol.*, 120, 51-55 (1998).
- 4) H. Hamashima, Y. Kato, Y. Nadamitsu, and S. Itoh, *Sci.Tech. Energetic Materials*, 64, 6, 248-253 (2003).
- 5) S. Itoh, Z. Liu, and Y. Nadamitsu, *ASME J. Pressure Vessel Technol.*, 119, 498-502 (1997).
- 6) S. Itoh, A. Kira, Z.Y. Liu, and S. Nagano, *ASME J. Pressure Vessel Technol.*, 121, 176-180 (1999).

An investigation on underwater shock wave control by 2-dimensional spiral detonating cord

Toru Hamada*, Kenji Murata**, Yukio Kato**, and Shigeru Itoh***

In the explosive processing using the underwater shock wave generated by underwater detonation of an explosive, it is very important to control the underwater shock wave for a purpose of the processing. Therefore, a new control technique of the underwater shock wave using the 2-dimensional spiral detonating cord was developed. The pressure of underwater shock wave generated from 2-dimensional spiral detonating cord was measured by the pressure sensor. From the result of the pressure measurement, it was found that the maximum pressure and the impulse could be control by varying the distance between the spiral center and the pressure sensor.

*Graduate School of science and technology Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, JAPAN

**NOF Corporation, Taketoyo Plant Aich Works, 61-1 Kitakomatsudani, Taketoyo-Cho, Chita-Gun, Aichi 470-2398, JAPAN

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

e-mail: itoh@mech.kumamoto-u.ac.jp