

## 水中衝撃波を用いた爆発圧着法に関する研究(第1報)

### —水中衝撃波による飛翔板の加速および変形について—

伊東 繁\*, 井山裕文\*\*, 藤田昌大\*\*\*,  
外本和幸\*, 吉良章夫\*\*\*

これまで、工業生産で行われている爆発圧着法では、様々な異種金属板同士の接合が可能である。しかし、非常に薄い金属箔やアモルファス金属箔等と他金属との接合は非常に困難である。これらの接合を可能にするには、飛翔板に作用する圧力を制御し、それぞれの接合条件に適合するようにしなければならない。しかし、我々が提案した水中衝撃波を利用した新しい爆発圧着法では、爆薬と飛翔板との間隔および傾斜角などのセットアップ条件を変えることで、飛翔板に作用する圧力を制御できる。この方法を利用してこれまでアモルファス金属箔の爆発圧着が可能となっている。

本論文では、まずこの新しい爆発圧着法の例を紹介する。次に、本方法の評価を行うために爆薬の水中爆ごうにより生じた水中衝撃波を利用して、アルミニウム板を飛翔させる実験を行い、写真観測を行った。また、同一条件で数値解析を行い、実験結果と比較した。これらの結果について述べる。

#### 1. はじめに

異種金属の溶接技法の検討においては、対象とするお互いの金属間に作用する熱的な変形の影響を考慮する必要がある。たとえば、アモルファス材料を溶接しようとした場合には、発生熱による非晶質の再結晶化は避けられず、接合時間の極めて短い溶接法が要求される。ところで爆薬の爆ごうによって発生した爆ごう圧を用いた爆発圧着技術はすでに多くの分野で実用化されており、難溶接金属の組み合わせにおいても有効な接合技術として評価されて久しい<sup>1)</sup>。しかしながら爆発圧着の場合においても、熱応力によるクラックの発生や、再結晶化が起こることはさげられない。これらの問題を解決するため、我々は水中衝撃波を用いた爆発圧着方法を提案した<sup>2)</sup>。本方法では、爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波を金属板等に作用させ、高速飛翔させる。さらに、これを母材に高速衝

突させ、圧着させるものである。本装置の特性を評価するために、本報告では数値解析をもとに水中衝撃波による金属平板の加速・変形過程を明らかにし、爆着装置特性を調べた。

#### 2. 爆着装置の概要

水中衝撃波を用いたアモルファス金属箔(BNi-2)の爆着実験に用いた装置をFig. 1に示す。装置は水中衝撃波を発生させるためのシート状主爆薬SEP(旭化成(株)製、爆速6970m/s、初期密度1300kg/m<sup>3</sup>)、それを支える反射板、雷管から構成され、飛翔板は爆

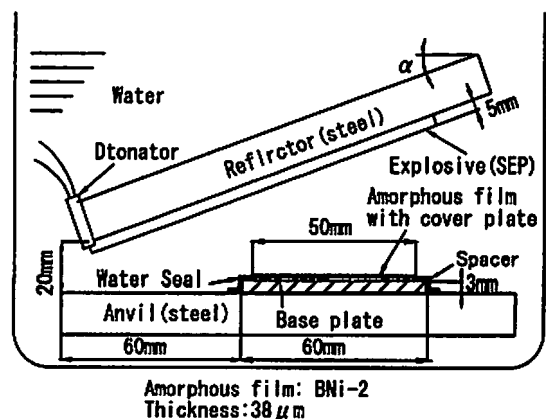


Fig. 1 Explosive welding set-up using underwater shock wave

2001年1月24日受付

2001年7月9日受理

\*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/FAX 096-342-3299

\*\*八代工業高等専門学校 機械電気工学科

〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627

TEL/FAX 0965-53-1276

\*\*\*崇城大学 工学部 機械工学科

〒860-8691 熊本市池田町4-22-1

TEL 096-326-3111

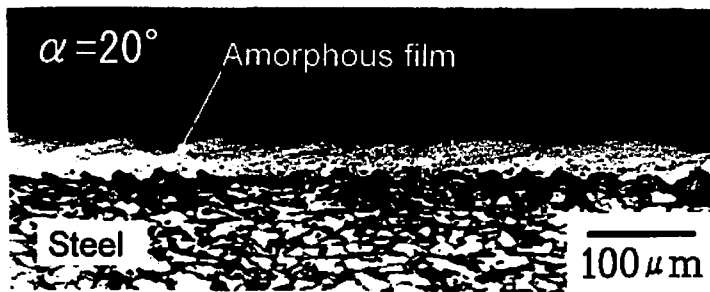


Fig. 2 A micrograph showing the interface of welded amorphous film with steel plate

薬を張り付けた反射板に対して任意の角度  $\alpha$  にセットされている。雷管によって起爆された爆薬は水中において水中衝撃波を発生させる。この水中衝撃波は水中を伝播し、アモルファス金属箔に衝突する。アモルファス金属箔は高速に加速され母材 (SS400) と衝突し、接合が行われる。

この装置として要求されることは、1) 金属飛翔板が十分高速に加速され、母材と衝突して接合が行われること。2) 金属板の飛翔速度が容易にコントロールできること。3) 衝突の際に発生する熱の影響が大きいこと等が考えられる。従来の空気中で行う爆発圧着の場合、飛翔板が母材に衝突する際の衝突移動点速度が、溶接素材の音速を超えては爆着がうまく行えないことが指摘されており<sup>3)</sup>、取り扱える爆薬の爆速に制限がある。また、金属飛翔板の速度制御は難しい。さらに金属材料同士の爆着は、多くの場合 Fig. 2 に見られように接合界面部分が波状を呈し、その振幅は爆着条件によっては数百マイクロンとなることも知られている<sup>4)</sup>。厚さ数十マイクロン程度のアモルファス金属箔の爆着には、この波の振幅を巧妙に制御することが必要となる<sup>5)</sup>。また界面に金属間化合物が生成されると、接着強度が不十分となるため、生成される化合物も少ないことが要求される<sup>6)</sup>。

### 3. 実験方法及び数値解析方法

#### 3. 1 実験方法

Fig. 3 は水中衝撃波による平板加速実験装置を示す。爆薬は SEP を使い、平面な爆ごう波が得られるように、SEP と HABW (旭化成 (株) 製、爆速 5000 m/s、初期密度 2200 kg/m<sup>3</sup>) を組み合わせた爆薬レンズを用いた。爆薬は厚さ 3 mm で、幅 120 mm、長さ 150 mm で厚さ 5 mm の PMMA (polymethylmethacrylate) 板に張って使用した。図に示すように、この爆薬を平面に対して角度  $\alpha$  傾けて水槽中に配置した。水槽の上面に加速される金属板を配した。実験は熊本大学衝撃エネルギー実験所の爆発ピット内に

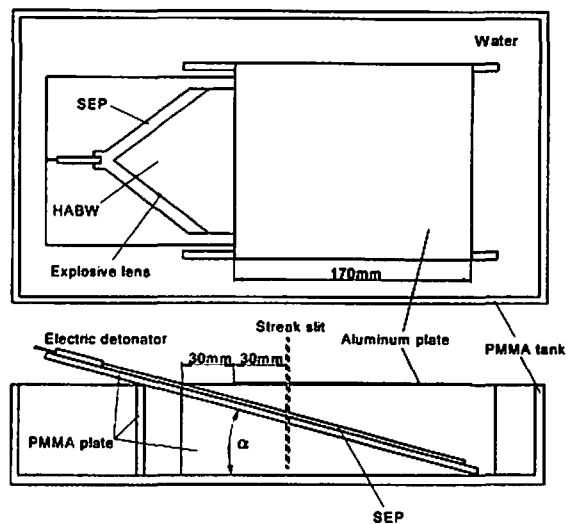


Fig. 3 Schematic diagram of aluminum plate deformation experiment by underwater shock wave

で行い、高速カメラによる写真観察を行った。傾斜角  $\alpha$  はそれぞれ 15°, 20°, 25°, 30° の場合について、ストリーク撮影を行った。また、15° の場合はフレーミング撮影も行った。これらの写真観察にはイメージコンバータカメラ (HADLAND PHOTONICS 社製、IMACON790、最大駒撮り間隔 2000 万駒、最高流し速度 1 ns/mm) を使い、通常のシャドウグラフ撮影法によった。金属板としては厚さ 0.5 mm のアルミニウム板 (A1050) を用いた。

#### 3. 2 数値解析法

数値解析は SALE 法<sup>5)</sup> をもとにしたラグランジュ座標を用いた有限差分法により計算した。以下に解析方法について述べる。

Fig. 4 は計算場を示す。計算場は PMMA 板、その上部に張られた平板状爆薬 SEP、水を介して飛翔板としてアルミニウム平板を配置した。座標はアルミニウム板の左端点を原点とした。爆薬の配置角度  $\alpha$  は実験と同様に、15°, 20°, 25°, 30° とした。爆薬の厚さは 3 mm、アルミニウム板の板厚  $t$  は 0.5 mm とし

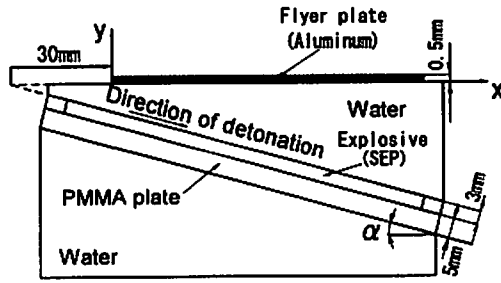


Fig. 4 Simulation model

た。また飛翔板に作用する水中衝撃波の圧力状態を理解するため、完全に剛体の場合の計算も行った。

爆薬、水、PMMA部の運動方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} = -\frac{\partial (P+q)}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} = -\frac{\partial (P+q)}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial \rho eu}{\partial x} + \frac{\partial \rho ev}{\partial y} = -\nabla \cdot U(P+q) \quad (4)$$

ここで、 $u$ 、 $v$ はそれぞれ $x$ 、 $y$ 方向の各速度成分、 $\rho$ は密度、 $P$ は圧力、 $q$ は人工粘性圧力、 $e$ は内部エネルギーである。また、 $\nabla \cdot U$ は速度発散であり次式で与えられる。

$$\nabla \cdot U = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5)$$

アルミニウム板部においては静水圧 $P$ の他に各応力成分も考慮した。その運動方程式は次式となる。

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} = \frac{\partial (P+q-S_x)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} = \frac{\partial (P+q-S_y)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \quad (7)$$

ここで、 $S_x$ 、 $S_y$ はそれぞれ $x$ 、 $y$ 方向の偏差応力成分、 $\tau_{xy}$ はせん断応力である。

PMMA、水の圧力およびアルミ板の静水圧成分は次式のMie-Grüneisen状態式<sup>61</sup>で求めた。

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1-s\eta)^2} + \left[ 1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right] + \Gamma_0 \rho_0 e \quad (8)$$

ここで $\rho_0$ は初期密度、 $c_0$ は音速、 $e$ は内部エネルギー、 $\Gamma_0$ はGrüneisenパラメーター、 $\eta = 1 - \rho_0/\rho$ である。各パラメーターをTable 1に示す。

Table 1 Material constants in Mie-Grüneisen EOS

Materials	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_0$ (m/s)	$s$	$\Gamma_0$
Water	1000	1490	1.79	1.65
PMMA	1180	2260	1.82	0.75
Aluminum	2790	5330	1.34	2.00

Table 2 JWL coefficients for SEP explosive

A(GPa)	B(GPa)	$R_1$	$R_2$	$\omega$
365	2.31	4.30	1.00	0.28

爆薬の爆ごうによる生成ガスの圧力計算は次のJWL(Johnson-Wirkin-Lee)状態式<sup>7)</sup>で求めた。

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) \exp(-R_1 V) + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \quad (9)$$

ここで、 $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $C$ 、 $\omega$ は各JWLパラメーターであり、 $V$ は爆ごう生成ガスの体積と初期体積との比である。シリンダー膨張試験より求めた爆薬SEPの各パラメーターをTable 2に示す。

爆薬部の爆ごう現象の取り扱いとして、C-J Volume Burn<sup>8)</sup>と呼ばれる方法を用いた。C-J Volume Burnではセルの比体積をパラメーターとして爆薬の分解率を算出し、各セルの分解率によってセルの爆ごう状態を決定する。 $V_0$ を爆薬の初期比体積、 $V_{CJ}$ を爆薬のC-J状態の比体積とすると次式により爆薬の分解率 $W$ が求まる。

$$W = 1 - \frac{V_0 - V}{V_0 - V_{CJ}} \quad (10)$$

$W=1$ では爆薬は未分解、 $W=0$ では完全分解したことになる。分解率 $W$ の取りうる数値の範囲は、 $0 \leq W \leq 1$ である。次に $W$ を用いて、格子内の圧力 $P$ が次式より求まる。

$$P = (1-W) P_r \quad (11)$$

ここで $P_r$ はJWL状態方程式によって求められた圧力である。

アルミニウム平板は弾塑性体として考え、下記の構成式を用いた。

$$\sigma_p = 34 + 175 \epsilon_p^{0.29} \quad (12)$$

ここで、 $\sigma_p$ は相当応力、 $\epsilon_p$ は相当ひずみである。

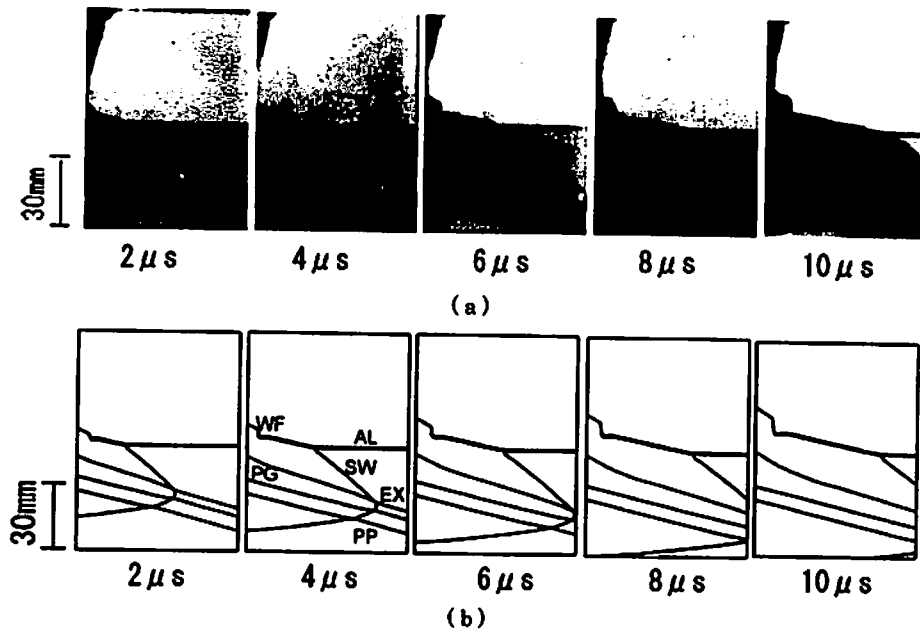


Fig. 5 (a) Framing photographs and (b) numerical results of deformation processes of aluminum plate by underwater shock wave. WF; water surface, AL; aluminum plate, PG; product duct gas, SW; shock wave, EX; explosive, PP; PMMA plate.

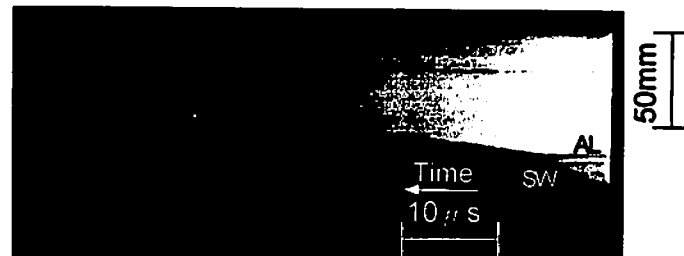


Fig. 6 Streak photograph of the case with inclined angle  $\alpha = 25^\circ$ . AS denotes shock wave in air.

境界条件として、水とアルミニウム板との境界は Wilkins<sup>9)</sup>によるすべり境界として計算した。

#### 4. 実験結果及び考察

フレーミング写真撮影によって得られた結果を Fig. 5 (a)に示す。図中ALはアルミニウム板、EXは未反応部の爆薬、SWは水中衝撃波の先頭波面を示す。WFは水中衝撃波によって加速されあふれ出た水である。爆ごう波の先頭は同図(a)にて白く観察される。フレーミング写真は $2\mu s$ おきに撮影された。ほぼ同時刻に得られた解析結果を同図(b)に示す。図中PGは爆ごう生成ガス、PPはPMMA板を示す。爆薬の爆ごうによって発生した爆ごう生成ガスが膨張し、水を上面に押し上げている様子がわかる。解析結果においても実験結果と同様WFで示される水の跳ね上がりが観測されるがその形状は実験結果のそれとは多少異

なることが両者の比較から分かる。その点をのぞけば、解析結果は発生した水中衝撃波の形状およびAl板の変形形状を比較的良好に表現している。

次に、爆薬の水中爆ごう過程、アルミニウム板の変形過程を撮影したストリーク写真の例を Fig. 6に示す。同図は、 $\alpha = 25^\circ$ の場合に撮影された。図中SWは水中衝撃波のストリーク、ALはアルミニウム板のストリークを示す。写真右側を原点とし、左の方向に時間が経過している。図中に示す水平軸の基準長さは $10\mu s$ で、距離は垂直方向の基準長さが50mmである。爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波がアルミニウム板に衝突するとアルミニウム板は直ちに加速される。その後ストリーク写真上でほぼ直線的な記録が得られており、このことより、一定時間後は、アルミニウム板はほぼ等速で飛んでいるように見られる。またアルミニウム板の軌跡のわずかに上部に傾きが

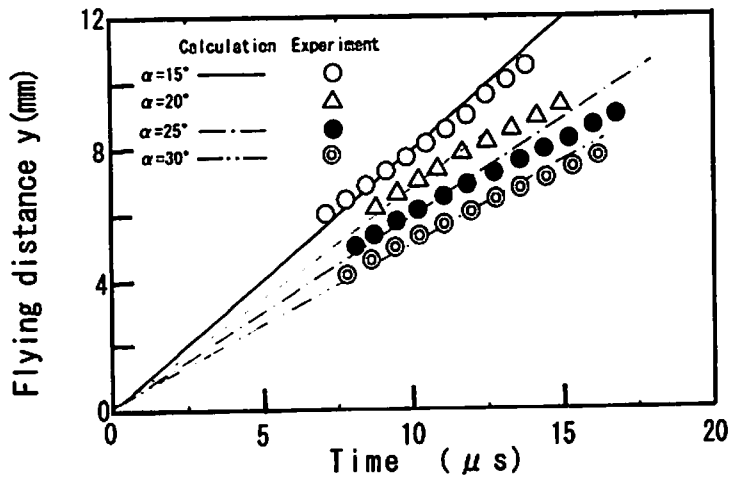


Fig. 7 Flying distance histories at  $x=30$  mm from left-end of aluminum plate

大きいストリークが見られるが(図中AS), これは水中衝撃波がアルミニウム板と衝突し, さらにアルミニウム板を通過し, 空気中に出た衝撃波の時間軌跡を表す。この空気中の衝撃波が時間の初期ではアルミニウム板の変形と重なってしまうため初期の変形過程は, 正確には観測できなかった。同写真をもとに画像処理して得られたアルミニウム板の  $y$  方向変位と時間との関係を表した図を Fig. 7 に示す。横軸は水中衝撃波がアルミニウム板に到達し, アルミニウム板が変形し始める時刻をゼロとして, それからの経過時間であり, 縦軸はアルミニウム板が Fig. 3 に示されているストリークスリットを遮っていく距離である。図中(○)は  $\alpha = 15^\circ$ , ( $\Delta$ )は  $\alpha = 20^\circ$ , (●)は  $\alpha = 25^\circ$ , (◎)は  $\alpha = 30^\circ$  の実験結果をそれぞれ示す。なおそれぞれの角度に対応する解析結果を実線, 破線, 一点鎖線, 二点鎖線でそれぞれ示す。いずれの角度においても計算と実験結果には比較的良好な一致が得られた。

Fig. 8 は解析結果より得られた,  $x = 30$  mm の位置でのアルミニウム板の変形形状に対して法線方向の速度成分と変位  $y$  の関係を示している。

同図から分かるように, 水中衝撃波が板に入射すると板厚分程度の極めて僅かな距離で板は最高速度に達し, その後, ほぼ一定の速度で飛行する。さらに到達の最終速度は  $\alpha$  が大きくなるにつれ小さくなることが同図から分かる。結果を Table 3 に示す。次に数値計算によって得られた飛行板面上の圧力分布を同時刻の変形形状と併せて Fig. 9 に示す。図中横軸は平板面に沿った水中の距離  $x$ , 縦軸は圧力である。いずれの  $\alpha$  の場合も計算のはじめから  $20 \mu\text{s}$  時における結果を示している。図中右側が水中衝撃波の未到発達領域で, 水中衝撃波がアルミニウム板に衝突すると急激に圧力が上昇し, その後左側に向かって減衰することがわか

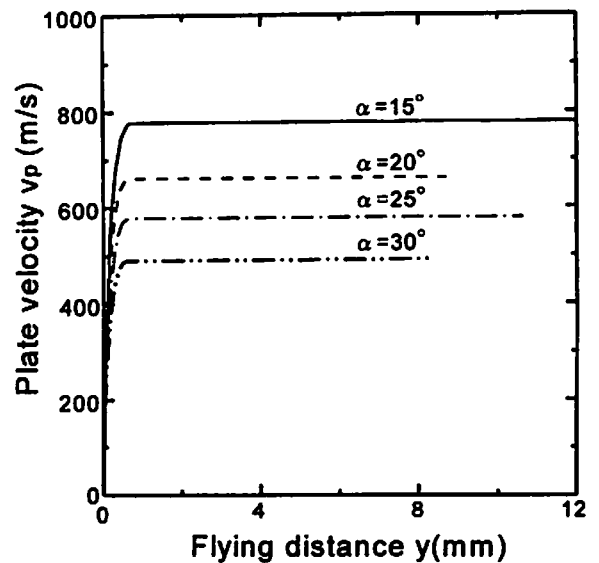


Fig. 8 Changes of normal component velocity of aluminum plate at point  $x=30$  mm

Table 3 Final plate velocity in Fig. 8 for different inclined angles

$\alpha$ (deg.)	15	20	25	30
$V_p$ (m/s)	780	677	576	490

る。またいずれの  $\alpha$  の場合も水中衝撃波の後方  $10$  mm 程度まで圧力が負荷され, その後はほとんど圧力が作用しない。また圧力のピーク値は  $\alpha$  の増加につれて減少することが同図から分かる。このようなパルス形の圧力作用では, アルミニウム板ははじめ加速されるが, その後はアルミニウム板の慣性によってのみ飛行すると考えられているため, 前述のように平板の加速過程の後に速度がほぼ一定値をとると考えられている。

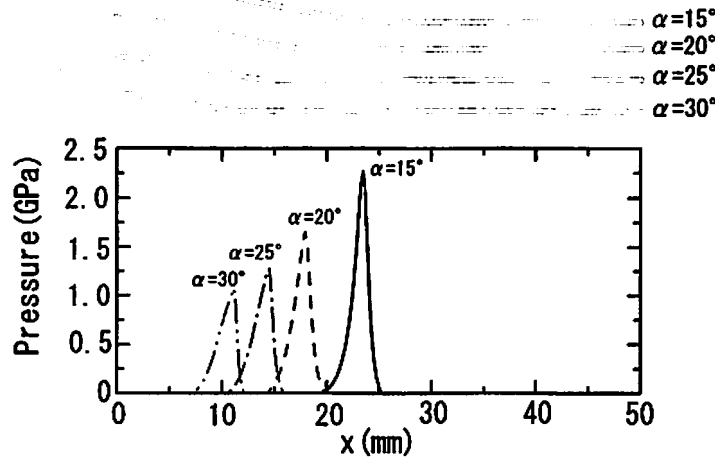


Fig. 9 Pressure distributions on the aluminum plates and deformation shapes at  $20\mu s$

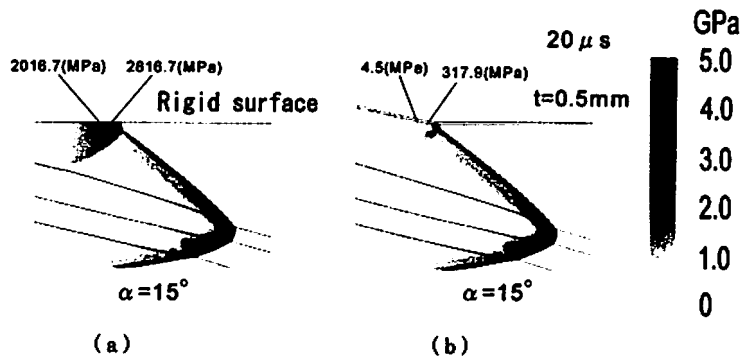


Fig. 10 Pressure distributions in the cases of (a) rigid surface and (b) 0.5 mm thick aluminum plate at time =  $20\mu s$

数値計算によって得られた剛体と板厚  $t = 0.5\text{ mm}$  の場合に得られた圧力の等高値分布と変形形状を Fig. 10 に示す。結果が示すように変形平板の場合反射衝撃波が不明瞭で、また板の変形し始めた領域での圧力減衰は急激である。このため水中衝撃波が飛翔板に入射した場合急激に圧力が上昇し、また減衰することが明らかになった。以上のことよりこの圧力の急激な上昇によって飛翔板が加速され、そして入射衝撃波後方領域の急激な圧力の減衰により、アルミニウム板は慣性力によって飛翔するようになると推察されるため、速度がほぼ一定値をとると考えられる。これらのことは爆発圧着の際、飛翔板の速度が爆薬の配置角度と爆薬から飛翔板までの距離を設定することによって、一定の飛翔速度を与えることが可能であることを示し、本装置の有用性を明らかにした。

## 5. まとめ

爆薬の水中爆ごうによって発生した水中衝撃波を利用した爆着装置の中で極めて重要な因子となる飛翔板

の加速特性を実験と数値計算によって評価した。爆薬と飛翔板までの距離ならびに爆薬と飛翔板の設定角度  $\alpha$  を変化させることにより、その加速された飛翔板はほぼ一定の速度をとり、0.5 mm のアルミニウム板の場合  $\alpha = 15^\circ$  の場合 680 m/s、 $\alpha = 30^\circ$  の場合 480 m/s であった。このことより爆着装置に必要な飛翔板速度を制御することができ、その有用性を示した。

## 文 献

- 1) B. Crossland, "Explosive Welding of Metals and its Application, Oxford University Press, (1982) 99.
- 2) H. Iyama, A. Kira, M. Fujita, S. Kubota, K. Hokamoto and S. Itoh, "An Investigation on Underwater Explosive Bonding Process", PVP-Vol. 414-2, pp.159-164, (2000).
- 3) G. R. Cown and A. H. Holtzman, J. Appl. Phys., 34, 928 (1963).
- 4) 恩沢忠男, 石井勇五郎, "爆発圧接境界の波成形

- に関する研究”, 溶接学会誌, 41, 446(1972).
- 5) A. A. Amsden, H. M. Ruppel and C. W. Hirt, SALE: A Simplified ALE computer program for fluid flow at all speeds, LA-8095, UC-32(1980)
  - 6) G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz and W. J. Carter, “The Equation of State of Solids from Shock Wave Studies,” in High-Velocity-Impact Phenomena, p.230, Academic Press(1970).
  - 7) E. Lee, M. Finger and W. Collins, 1973, “JWL Equation of State Coefficients for High Explosives”, Lawrence Livermore National Laboratory report UCID-16189(1973).
  - 8) C. L. Mader, Numerical Modeling of Detonations, University of California Press(1979).
  - 9) M. L. Wilkins, “Calculation of Elastic-Plastic Flow,” in Methods in Computational Physics, Vol. 3, pp. 211-263, Academic Press(1964).

~~~~~

## On the characteristic of the explosive welding technique using the underwater shock wave ( I )

—High speed deformation of the metal flying plate due to underwater explosion—

Shigeru ITOH\*, Hirofumi IYAMA\*\*, Masahiro FUJITA\*\*\*,  
Kazuyuki HOKAMOTO\*, and Akio KIRA\*\*\*

The explosive welding method has been applied for the industrial production. Many dissimilar metals can be welded by this technique. However, it is difficult to weld very thin metal plate and amorphous film with other metal plate. In order to realize such welding, it should be controlled so that the pressure acting on the flyer plate and be weldable condition is satisfied. In the newly proposed explosive welding method using underwater shock wave, the pressure acting on the flyer plate can simply be controlled by varying the set-up conditions such as the distance and inclined angle between explosive and flyer plate. We have successfully welded the amorphous film with the steel plate using this method.

In this paper, we first present an example by using this method. Then, in order to assess this method, we have done the experimental observation on the flying of an aluminum plate by underwater shock wave from the detonation of explosive in water. The numerical simulation under the same conditions are carried out and the comparison with the experiment is made.

(\*Shock Wave and Condensed Matter Research Center, Kumamoto Univ., 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, JAPAN

\*\*Dept. of Mechanical and Electrical Engineering, Yatsushiro National College of Technology, 2627 Hirayamashin-machi, Yatsushiro, Kumamoto 866-8501, JAPAN

\*\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Sojo Univ., 4-22-1 Ikeda, Kumamoto 860-8691, JAPAN)