

# 304 水中衝撃波を用いた薄板の任意形状自由張り出し成形

## On Arbitrary Free Metal Sheet Forming using the Underwater Explosion of Explosive

正 伊東 繁 (熊大) 正 長野 司郎 (熊大) ○学 松村 亮 (熊大) 正 井山 裕文 (八代高専)

村田 健司 (日本油脂) 加藤 幸夫 (日本油脂)

S.Itoh · Kumamoto Univ. S.Nagano · Kumamoto Univ.

R.Matumura · Kumamoto Univ. H.Iyama · Yatusiro National College of Technology

K.Murata · NOF Co Y.Katou · NOF Co

### 1. はじめに

爆薬の爆発の際に発生する極めて密度の高いエネルギーを、破壊のエネルギーとしてではなく、金属板や管の成形に利用することを目的として発達した加工法が爆発成形法である。我々は、より良い生産力をもつ低成本の方法として、金属の型を使わずに爆薬の量や位置を変え、その爆薬による水中衝撃波で金属成形加工を行う、その爆発成形法を研究してきた。

今回は、シミュレーションによる水面下の爆発成形法の自由張り出し成形と、実際に実験を行って水中衝撃波による自由張り出し成形を行った。

### 2. 実験方法

Fig.1 は、水面下の爆発成形法によって自由な成形加工のシミュレーション・モデルを示す。

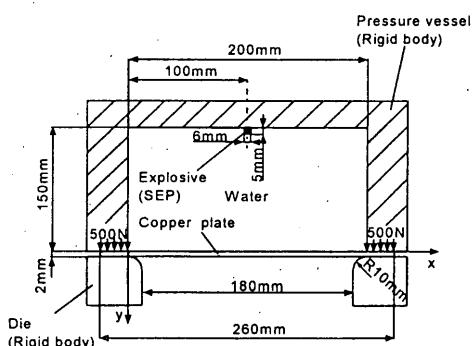


Fig.1 Simulation models

この圧力容器の中心部品は水で満たした。圧力容器の形は、内部が長方形で、高さ・幅は 150mm・200mm とした。爆薬は SEP を使用すると仮定した。SEP 爆発物の密度は 1.31kg/m<sup>3</sup> で、爆発圧力は 15.9GPa である。その爆薬の厚さ・幅は 5mm・6mm。2mm の厚い銅のプレートは、爆薬の 150mm 下に位置する。銅のプレートは圧力容器と剛体のダイスの間に置かれる。そのダイスは、10mm の曲率半径のダイス肩を持つ。実験では、圧力容器がボルトを持ったダイスホルダーとしっかりと固定するので、ここに、圧力容器の重量とボルトの影響は銅プレートの全体の端に絶えず作用する 500N の力であると仮定される。Fig.1 の中で示されるように、x-y 座標がセットされます。シミュレーション方法はラグランジュの座標を使用して、有限の差分法(FDM)を用いた。

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

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

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

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

ここで、u、v、は x、y 方向のある速度成分である。また  $\rho$ 、P、q、e、はそれぞれ密度、圧力、人工の粘着性の圧力および特定の内部エネルギーをそれぞれ示す、 $\nabla \cdot U$  は速度分岐である。

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

銅のプレートは粘着性の弾性のプラスチック資料として扱われる。銅の構成する方程式は次の方程式(Tanimura, 1992 年)によって記述される。

$$\sigma_p = 20 + 430 \epsilon_p^{0.445} + 2.9 \times 10^{-3} \dot{\epsilon}_p + 3.291 \ln(\dot{\epsilon}_p / 5.0 \times 10^{-4}) \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

ここで、 $\sigma_p$  は等価な応力、 $\epsilon_p$  は等価なひずみであり、 $\dot{\epsilon}_p$  は、等価なひずみ速度である。

応力による変形は次の運動方程式に依存する。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial (P - S_x)}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial (P - S_y)}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \quad (8)$$

P が静止の流体力学の圧力( $\rho$  is 密度)である場合。 $s_r$  は r 方角への応力のずれ、 $S_z$  は z 方向に沿った応力のずれ、 $\tau_{rz}$  はせん断応力である。 $u$  と  $v$  は r および z を表示するそれぞれの方向速度成分である。

その圧力は次の状態方程式 Mie-Grümeisen から解決されます。(McQueen et al., 1970)

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s \eta)^2} \left[ 1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right] + \Gamma_0 \rho_0 e \quad (9)$$

ここで、 $\rho_0$  は初期の密度、e はエネルギー、 $G_0$  は Grümeisen パラメーターである。 $\eta = 1 - \rho_0 / \rho$ 、 $c_0$  および s は資料定数であり、それらの定数の値は、Table 1 の中に示す。

Table 1. Material constants in Mie-Grüneisen EOS.

	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_0$ (m/s)	S	$\Gamma_0$
Water	1000	1490	1.79	1.65
Copper	8930	3940	1.48	1.96

爆薬の爆発によって生み出される圧力は、JWL(Jones-Wilkins-Lee)状態方程式(Lee et al., 1973)により計算される。方程式は次に示す。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V} \quad (10)$$

ここにおいて、A、B、R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、C、また $\omega$ は定数(あるいはJWLパラメーター)。Vは爆発されていない爆発物の初期のボリュームへの製品ガスのボリュームの比率である。SEPの爆発物については、それらの定数が円筒状の拡張テストから得られ、テーブル2の中で与えられる。爆薬要素の初期圧力値は爆発圧力として与えられる。

Table 2. JWL parameters for SEP explosive.

A(GPa)	B(Gpa)	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	$\omega$
365	2.31	4.30	1.10	0.28

次に実際に行った実験装置としては、Fig.1に示すものを用いた。作業の効率と鉄の板による反射波などの影響も考慮して、木をもちいて枠を作った。その際、Fig.1には示していないができる限りの補強を行った。その木枠に鉄の板を取りつけた。その上に、変形させる素板である銅板(図2)を取りつけ、その上に鉄板をのせ押さえつけた。シミュレーションでは、銅板の上から爆薬を爆発させたが、銅板の上に水があるとその重みで銅板がたわんでしまうために、銅板の下に爆薬を取りつけた。その銅板は、ボルトで固定しビートで締め付けることで、滑り込まないようにした。この枠の中は水を入れ、実験装置を砂の中に水平に埋め、野外で行った。

今回、爆薬には導爆線を1m用い電気雷管で起爆を行った。爆薬は鉄板に固定し、それを木枠の中に入れ、直接爆薬の影響を受けて木枠が破壊されることを防いだ。また、導爆線設置の際には、導爆線の爆轟理論である15度の爆轟波の角度を考慮して、設置をおこなった。

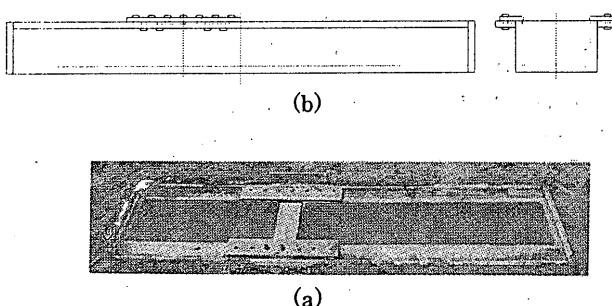


Fig. 2 Experiment equipment

### 3. 実験結果及び考察

Fig.3は、圧力容器の内部の圧力分配を示す。爆薬からの衝撃波の水中の伝達過程が、明白に示される。水中下の衝撃波の中央部分が進み、全体の衝撃波前面の形は球面を形

成する。衝撃波前面の中央は、80μsに関する銅のプレートにその後達する。また、その後、衝撃波は銅のプレートへ進み、反対側へ反射する。Fig.4は、銅板の変形の過程を示す。

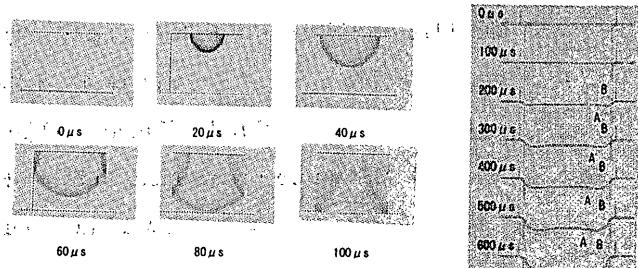


Fig.3 The diagram of pressure distribution inside the pressure vessel.

Fig.4 Deformation Processes.

次に、実際に行った実験ではFig.5のような銅板が成形された。爆薬のあった位置の場所ほど、高くなっており湾曲している。また、この図を横方向とすると縦方向にもわずかではあるが湾曲が起こっていた。シミュレーションの結果と異なった理由としては、実験では剛体でない木を用いて実験をおこなったことなどが上げることができると思われる。



Fig.5 Copper plate

### 4. おわりに

今回、爆発成形法におけるシミュレーションとそれにもとづいた実験などを行った。今後、爆薬の位置や量などを換えるなどして実験をもっと重ねて、爆発成形法において爆薬による水中衝撃波を利用した、新しい技術、金属板の形成技術を考えていきたい。

#### （参考文献）

- 1) 藤田ほか: 塑性と加工, 36-412(1995), 541.
- 2) 藤田ほか: 塑性と加工, 38-435(1997), 331.
- 3) Amsden et al.: Computer Program for Fluid Flow at All Speeds, LA-8095, UC-32 (1980).
- 4) Lee et al.: Lawrence Livermore National Laboratory report UCID-16189, (1973).
- 5) McQueen et al.: High-Velocity-Impact Phenomena, (1970), 230.
- 6) Tanimura, S.: Proceedings of International symposium on Impact Engineering, 1(1992), 17.