

工業化のための簡便な爆発成形法の確立に関する研究

熊本高等専門学校 機械知能システム工学科

講師 西雅俊

(平成 25 年度奨励研究助成 AF-2013036)

キーワード：塑性加工，爆発成形法，液中放電成形法

1. 研究目的と背景

曲げ加工，プレス加工などの塑性加工では，金型が必要である。しかし，被加工物である金属よりも金型の材料は硬い必要があるため，金型を所望の寸法にするためには技術を必要とする。また，作成された金型の寸法変更は容易ではなく，寸法変更が大きな場合は金型を一から作り直す必要が生じる。これに対して，爆発成形^{1), 2)}という手法を用いると，被加工物が金属の場合でも，金属製金型は不要であり，紙やアクリルなどでも塑性変形する。紙やアクリルは加工が簡単なため，寸法変更なども容易に可能である。さらに，凸型もしくは凹型のどちらかの型だけで加工できるという特徴も持ち合わせている。

爆発成形法とは，爆薬が水中爆発するとき発生する水中衝撃波を金属板に作用させ，その高い圧力で金属板を膨らませ，型と衝突させて，型に沿った形状に成形する加工法である。爆発成形法は，有効な塑性加工法の一つであるが，特殊な環境でしか使用できない。そこで，爆薬を使わずにかつ工程を簡略した爆発成形法についての検討が必要である。

そこで本研究では，水中衝撃波を発生することができ，かつ比較的安全な電気システムを用いた衝撃波発生装置を利用する液中放電成形法による爆発成形法，すなわち爆薬を使わない爆発成形法について検討する。

爆薬を用いた場合に比べると，電気システムを用いた水中衝撃波は圧力が低いといわれているため，液中放電成形法で行う場合の金属板の材質や厚みを変更しながら検討を行い，爆薬と同程度の成形品が得られる条件を調べる。本稿の構成は，2章で条件の一つである衝撃波発生源と試料の最適な位置を数値シミュレーションにより調べた後に，3章で試料の材質・厚みを変更して液

中放電成形法および爆薬を用いた実験を行い，実験結果を比較検討する。また，著者が所属する研究グループでは，この爆発成形法を用いて，美術品製作を行っている。この目的は，美術品製作を通じて，大学，高専などの研究機関で行われている難しい技術・科学等の研究を初・中等教育の生徒に分かり易く解説するとともに，金属加工の楽しさを伝える活動であり，その活動の一部を本稿の4章に紹介している。

2. 試料の設置距離について

本研究で使用する液中放電成形法用耐爆容器の概略図を図1に示す。内径100mmで鉄鋼4340 steelを使用している。発破地点からの距離候補である3地点は図2の◆で示している。地点1，地点2および地点3は発破地点からそれぞれ95mm，110mm，125mmの位置とする。

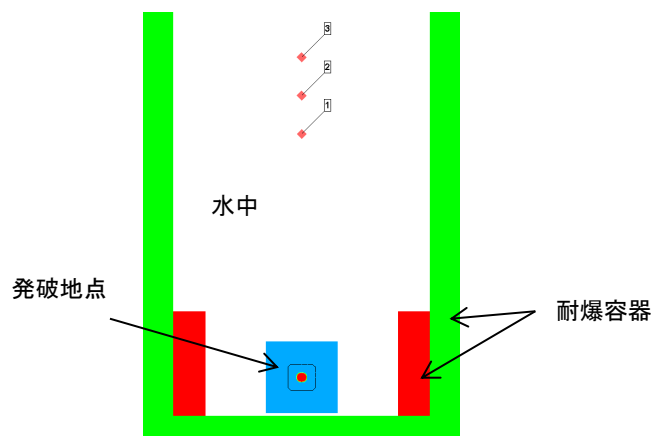


図1 耐爆容器の概略図

数値シミュレーションは衝撃解析コード ANSYS AUTODYN を使用し，2次元軸対象モデルとして計算を行っている。液中放電成形法の衝撃波に関する計算データがないため，ここでは爆薬を用いて発破地点からの距離

を検討する。図1の発破地点に初期密度 1310kg/m³, 爆
 ござう速度 6980m/s の旭化成ケミカルズ株式会社製の高性能爆薬 SEP 1g を配置する。爆薬の圧力は式(1)で示さ
 れる, JWL 状態方程式により計算される。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right) \exp\left(-\frac{R_1}{\eta}\right) + B \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}\right) \exp\left(-\frac{R_2}{\eta}\right) + \omega\eta\rho_0 e \quad (1)$$

ここで, E は内部エネルギー, V は比体積, A, B, R₁, R₂,
 ω は JWL パラメータであり, それぞれの値は表1に示す。

表1 爆薬 SEP の JWL パラメータ

A[GPa]	B[GPa]	R ₁	R ₂	Ω
371	3.23	4.15	0.950	0.30

水の圧力計算には式(2)の Mie-Gruneisen 状態方程式
 を用いており, パラメータを表2に示している。ここで
 ρ₀ は初期密度, Γ₀ は Gruneisen パラメータ,
 η = 1 - ρ/ρ₀ であり, c₀ と s は材料定数である。

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

表2 水の Mie-Gruneise パラメータ

ρ ₀ [kg/m ³]	c ₀ [m/s]	s	Γ ₀
1000	14901	1.79	1.65

また, 耐爆容器は鉄鋼(4340 steel)とし, 式(3)の
 Johnson-Cook のモデル式と表3のパラメータを用いて
 いる。

$$Y = (A + B * \epsilon^n)(1 + C * \ln \dot{\epsilon})(1 - T^{*m}) \quad (3)$$

表3 4340 Steel の Johnson-Cook パラメータ

ρ[kg/m ³]	G ₀ [GPa]	A [GPa]	B [GPa]	N	C	m
2785	81.8	0.792	0.51	0.26	0.014	1

容器内部において衝撃圧が伝播する様子を図2に示
 す。

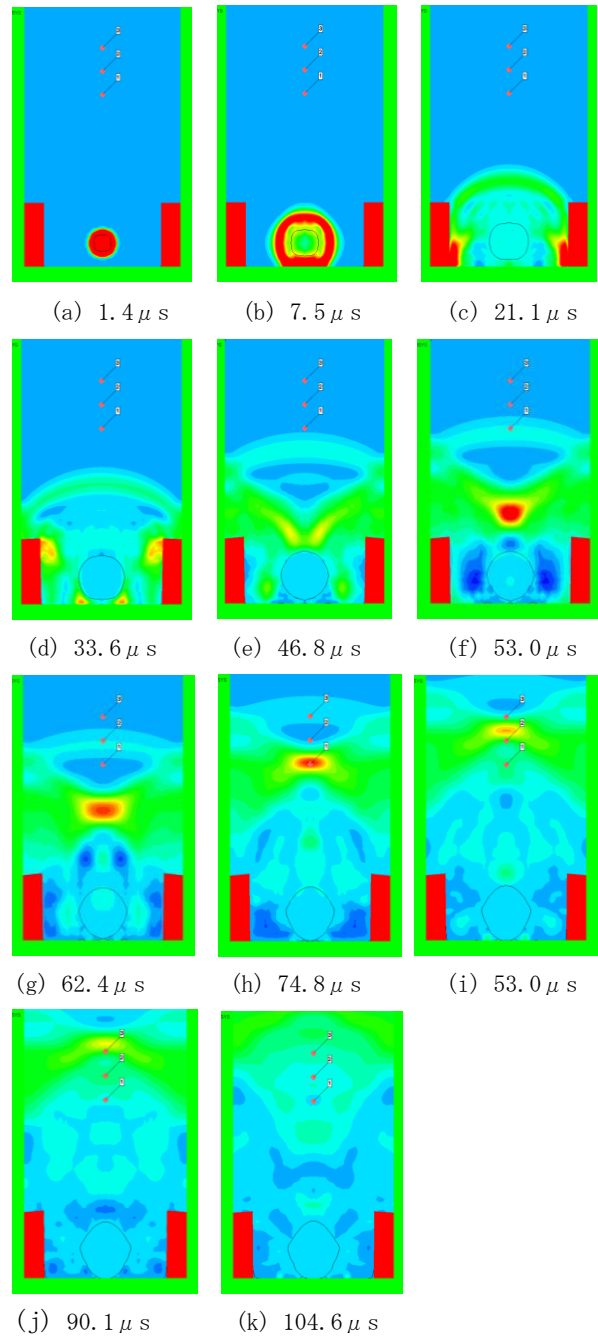


図2 衝撃圧が伝播する様子

図2-a, 図2-b, のように, 発破地点から同心円状に
 衝撃圧(以後, 第一波と呼ぶ)は広がっている, その後,
 図2-c, 図2-dにおいて, 衝撃圧が容器の壁面にあたり,
 その反射によって図2-fのような強い圧力が生じる。そ
 の圧力波(以後, 反射波と呼ぶ)は第一波を追いかける
 ように上昇し, 図3-hで, すなわち発破から 74.8 μs
 で地点1に到達する。図2-gから図2-kより, 反射波は
 どんどん小さくなり, 地点3を抜けるころには周囲の圧
 力と変わらない。この結果より, 候補点が最も近い地点

1を採用することとする。なお、さらに地点を近づけることも考えられるが、水中細線放電³⁾などを利用する場合は細線の破片が飛翔してくることもあるため、これ以上近づけるのは試料を破損させる可能性がある。

3. 実験および考察

本章では、試料の材質による違いと、厚みによる違いについて、実験結果を比較しながら考察を行う。ここでは、熊本大学パルスパワー科学研究所爆発プロセス分野の研究グループが保有する衝撃波発生装置および実験用耐爆容器を用いて実験を行っている。

前章で求めた発破地点からの距離に試料を設置し、図3の液中放電の衝撃波発生装置を用いて実験を行う。衝撃圧を発生させるパラメータは、本装置で使用できる最大電源電圧3.5(kV)、電気容量は500(μ F)とする。そのため、充電エネルギーは4.9(kJ)である。なお、型の材料はカッティングシートとし、図4のように反転させた文字⁴⁾を型とする。



図3 液中放電成形法に使用する衝撃波発生装置(左側が耐爆容器、右側が衝撃波発生装置)

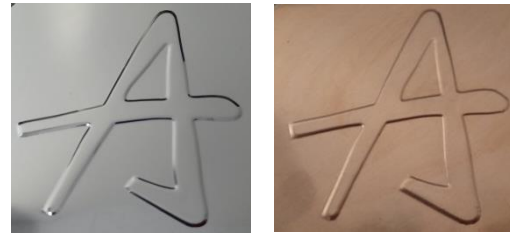


図4 使用した型

3.1 金属材料による違いについて

試料の材質についての比較を行うために、厚み0.1mmの銅板C1100、チタン板TR270、アルミ板A1N30に対して行った実験結果を図5に示す。

本稿では、4章に記してある体験授業にしようするため、型の文字に対して、成形品のエッジがシャープに立ち上がることが望ましい。この観点から図5をみると、アルミ板と銅板はシャープに立ち上がりが見られている。



(a) アルミ板

(b) 銅板



(c) チタン板

図5 液中放電成形法による実験結果

3.2 金属板の厚みによる違いについて

著者が所属する研究グループは銅板の色付けに関する技術があるため、ここでは銅板を採用する。本節では、使用する試料は銅板とし、液中放電成形法を用いて板厚0.3mm、0.2mm、0.15mmおよび0.1mmの実験を行った。その結果を図6に示す。また、図7は爆薬を用いた場合の板厚0.3mmの実験結果である。この爆薬を用いた実験は、文献2を参考にしている。

液中放電成形法では、板厚0.3mm、0.2mmの場合では、成形品のエッジの立ち上がりが緩やかであり、精密な転写ができているとは言い難い。また、板厚0.05mmはエッジの立ち上がりはシャープであるが、非常に薄いため実験前後に折り目がついてしまうことがあり、体験授業にはやや適していないと考えられる。そのため、銅板でかつ厚み0.1mmか0.15mmを体験授業に使用する。



(a) 厚み 0.05mm (b) 厚み 0.15mm



(c) 厚み 0.2mm (d) 厚み 0.3mm

図6 液中放電成形法による実験結果



図7 爆薬を用いた実験結果(銅板厚さ 0.3mm)

4. 体験授業について

技術・科学等の研究を初・中等教育の生徒に分かり易く解説するとともに金属加工の楽しさを伝える活動を行ったので紹介する。爆発成形法を用いて葉っぱの葉脈を金属板に転写する技術を紹介・体験実験を行った写真を図8に示す。

参加した生徒たちは熱心に話を聞いており、金属加工の楽しさを知ってもらえる機会になった。

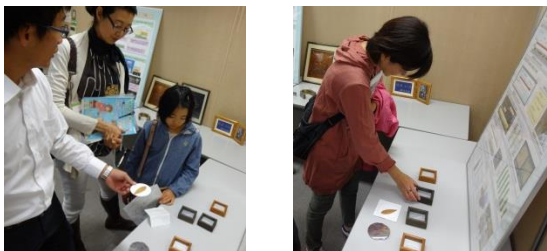


図8 体験授業の様子

5. 結言

本研究では衝撃波発生エネルギー源として、電気システムを用いた衝撃波発生装置を利用する液中放電成形法について、試料の材質・厚みによる変形具合について検討している。従来の爆薬を用いる場合には火薬類取扱法の規制に触れる点が1つの懸念材料であったがそれを除くことができる点で、この方法の、つまり液中放電成形法を用いた金属薄板成形法の一般社会への広がりが期待できるのではないかと考えている。また、4章で紹介した活動を今後とも続けていくつもりである。

謝辞

本研究は、公益社団法人天田財団の平成25年度奨励研究助成 (AF-2013036)を受けて実施したものであり、ここに感謝の意を表します。また、液中放電成形法の実験にあたりご協力を頂いた熊本大学パルスパワー科学研究研究所研究支援推進員の前園漱氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) M. Fujita, et.al : Advance in engineering plasticity and its application, Elsevier, 1993.
- 2) 藤田ほか : チタン板の爆発成形による美術品製作, 第63回塑性加工連合講演会(2012).
- 3) H. Maehara, et. al: Experimental study of the underwater shock wave on the high-voltage electric discharge by carbon fiber., Materials Science Forum Vol. 767, pp. 261-264, 2014.
- 4) 公益社団法人天田財団 HP,
URL : <https://www.amada-f.or.jp/>