

# 水中衝撃波を利用した爆発加工プロセスの開発

熊本大学 工学部 知能生産システム工学科

教授 藤田昌大

(平成6年度研究開発助成 AF-94008)

## 1. 研究の背景と目的

爆薬の爆轟エネルギーを利用して材料を加工する、いわゆる爆発加工は、爆発成形や圧着といった分野で多く利用されている。また近年では粉末の衝撃固化や新物質の衝撃合成といった方面への利用もなされつつあり、そのための研究が盛んに行われている。爆発加工には、爆薬を材料に直接接触させ爆轟圧を材料に与える直接法と、爆薬を材料から離して水などの圧力媒体を介して圧力作用を与える間接法の2通りがある。通常爆発成形法は間接法で、爆発圧着や粉末の衝撃固化などは直接法で行われているが、本研究は上記3つの加工法をいずれも水を介した間接法で行うことを目的として、間接法の特徴、加工条件の設定、期待される成果などを明らかにすることを目指す。

本研究で取り上げた課題は次の3点である。

- (1) 爆発成形過程の数値解析シミュレーション
- (2) 水中衝撃波を利用した金属箔の爆発圧着
- (3) 水中収束衝撃波を用いた粉末の衝撃圧縮システムの開発

## 2. 爆発成形過程の数値解析シミュレーション

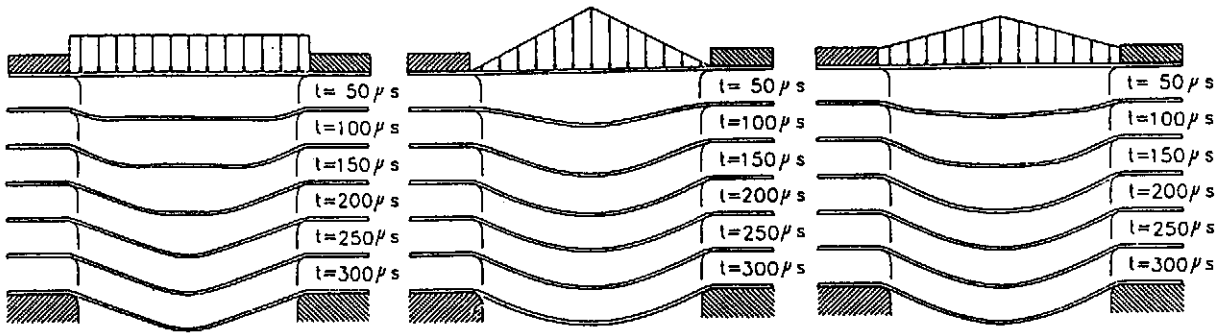
### 2.1 研究の方法

爆発成形法は、スプリングバックが小さく、型への充填性が高いことが特徴として知られているが、実際に成形を行ってみると思いがけないところにしわや凹みを生じたりすることがある。これは動的な変形機構の結果もたらされたものであると推察され、精密な成形を達成するためには、その変形機構を十分に把握しておく必要がとなる。ここでは有限差分法による数値解析シミュレーションによって周辺を板押さえによって固定された円板が、(A)一様な衝撃圧を受けた場合、及び(B)中心から外周に向かって直線的に降下する分布の衝撃圧を受けた場合を対象として、その変形機構を明らかにすることを試みた。(B)については降下の割合の異なる2つの場合を取り上げた。その際、板厚方向にも要素を5分割したので、曲げ波の影響も考慮することができる。ここで板の材料は銅とし、板厚1mmの場合について計算を行った。材料の構成式は谷村によって得られた式<sup>1)</sup>を用い、等方硬化材と見なして計算した。

### 2.2 自由張り出し成形過程の解析結果

図1は自由張り出し成形の変形過程を示している。図1(a)は一様な圧力分布の場合の計算結果であり、図から明らかのように、変形で生じた傾斜部と未変形の平坦部の間には、それをなめらかに結ぶために生じる下に凸の曲げ波が、外周部から中央部に向かって移動する。それとともにほぼ一定角度の変形傾斜面が次第に形成され、やがて板の中央にまで変形が及ぶことになる。上述の下に凸の曲げ波の前方には、曲率の小さな上に凸の曲げ波が生じる。そのために中央部はいったん下向きに凹みを生じ、その後、押し出されるように突出するような変形を生じる。図1(b)は、中央部から外周へ向かって直線的に衝撃圧力が減少する圧力分布(外周部で圧力0)の場合の結果である。この場合には、衝撃圧分布と相似の変位速度分布が変形の初期に与えられるので、板は外周縁を回転軸として回転運動を開始し、これによって中央部では大きな引っ張り作用が生じて球面状の変形となる。やがて球面状の変形波は、中央から外周へ及び、全体が球面状に変形する。図1(c)は(a)と(b)の中間の衝撃圧分布の場合の結果を示している(上記(b)と同様の圧力分布で、外周部で一定の圧力値を与えた場合)。この場合には、外周縁を回転軸とする回転運動と、外周部から中央に向かう曲げ波の移動過程の両方の変形機構を合わせ持つ変形機構になっている。

図2は浅い球面凹型を用いる場合の変形過程を示している<sup>2)</sup>。一様な衝撃圧の場合には、前述の変形機構の特徴から、先行する上に凸の小さな曲げ波が中央部に凹みを作ることによって、凹みを持ったまま型に衝突してることがわかる。これに対して圧力勾配がある場合には、中央部には凹みは生じないこと、及び外周縁部を中心とした回転運動によって、全体として型と密着した成形体を得られる。図3は、これら2つの場合を模した実験結果である。図3(a)は回転放物面の内面を持つ密閉容器を、図3(b)は回転双曲面の内面を持つ密閉容器を用いて成形実験を行った結果である。(a)の場合、衝撃圧の力積はほぼ一様となり、(b)の場合では衝撃圧が中央から外周に向けて一定勾配で低下する(外周部の圧力は0でない)分布となる。図から明らかのように、図3(a)では中央部に凹みの痕跡が見られるのに対して、図3(b)ではそれが認められないことがわかる。



(B) Meridional stress distributions for different pressure distributions at  $100\mu s$

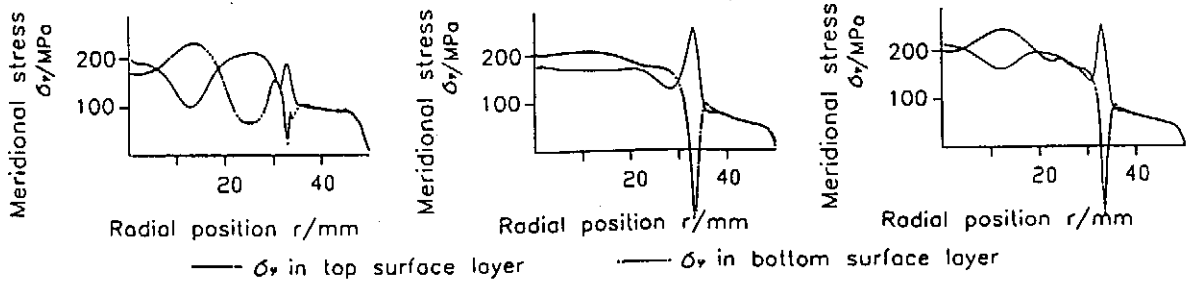


図1 変形過程に及ぼす初期圧力分布の効果と子午線方向応力分布

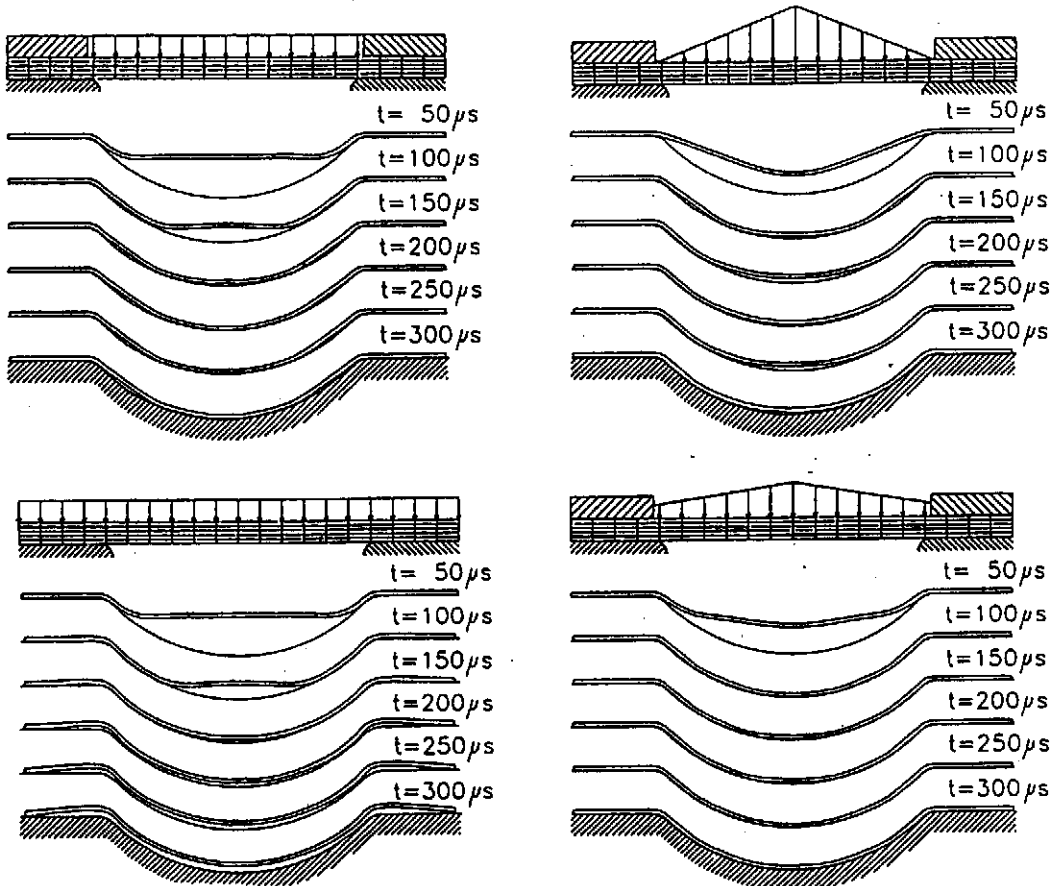


図2 浅い球面凹型を用いる場合の変形過程の比較

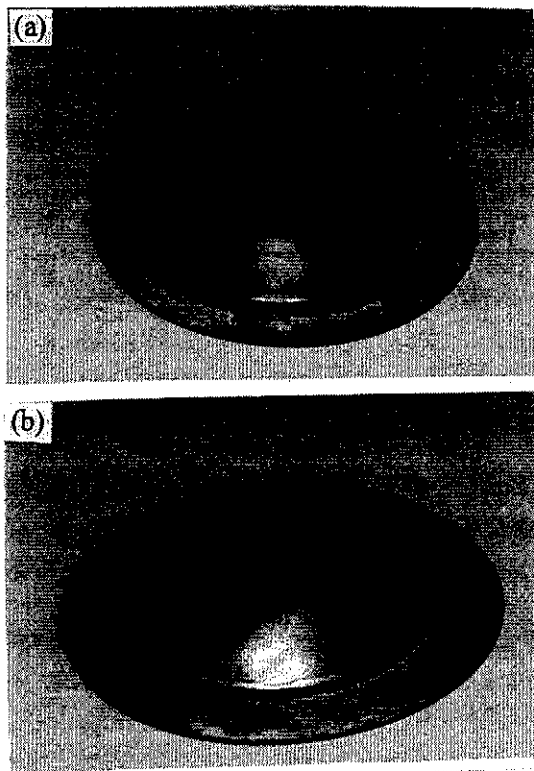


図3 浅い球面凹型への爆発成形実験結果 ((a)は回転放物面、(b)は回転双曲面の内面を持つ密閉容器を用いた場合の結果)

上記のように、動的変形においては静的な場合には予期できない特殊な変形機構を示すことが本研究によって示すことができた。

### 3. 水中衝撃波を利用した金属箔の爆発圧着

#### 3.1 研究の方法

爆発圧着法は、通常金属板の全面に亘って一定薬厚の爆薬を敷き、これを一端から起爆して爆轟波を発生させることで金属板を高速飛翔、他の金属板に傾斜衝突させることで接合が行われる。その際、衝突点の移動速度と衝突角の条件を適当な範囲内に収まるように加工条件を設定する必要がある。

爆薬が定常的に爆轟するためには、ある程度の薬厚が必要であるために、金属板が薄い場合には薬量が過剰になってしまう懸念がある。また、加工条件がわかっていない場合には、衝突点の移動速度を変化させて予備実験を行うことが必要である。しかしながら、爆薬は種類によって爆轟速度が決まっているために、衝突点の移動速度を変化させるためには何種類もの爆薬を用いなければならないという不便さがある。

本研究では、アモルファス金属箔を軟鋼板に爆発圧着することを目的とした。ここでは衝突点移動速度についての最適加工条件を求めるために、図4に示すような軟鋼板に貼りつけた可塑性爆薬(爆速約7km/s)を傾斜して配置し、下方に0.035mm厚のアモルファス金属箔(Flyer plate)を軟鋼板(Base plate)と平行に0.3mm隔てて平行に配置した。試料全体は水中に沈められているので、爆薬が爆轟するとともに水中衝撃波が発生する。水中衝撃波は急峻な立ち上りの後、極めて速やかに減衰するので、金属板は僅かの飛翔距離で所定の速度に達するという特徴を有している。

#### 3.2 加工条件の設定と爆発圧着実験の結果

水中衝撃波の観測結果から、爆薬のセットアップ角に対する板面上での水中衝撃波の移動速度(間隙が小さいので、衝突点移動速度と見なしてよい)の変化を求めた結果を図5に示す。図から明らかなように、爆薬の傾斜角を変えることによって衝突点の移動速度を変化させることができるが、爆薬が起爆点から遠ざかるにつれて、金属箔からの距離が大きくなるために、衝突速度や衝突角度は、図6の計算結果に示すように水平距離 $x$ の増加とともに低下する。なお、図において $x=0$ mmは金属箔の起爆点に最も近い端部の位置を示す。このとき衝突速度や衝突角度の値が良好な爆発圧着条件の範囲内に収まっていれば、全面的な圧着が達成できる。

ここでは試料中心の $x=20$ mmの位置での界面の顕微鏡組織の一例を図7に示している。初期傾斜角 $\alpha$ の値が低いとき( $10^\circ$ )、接合界面の波は小さく、 $\alpha$ の値が $30^\circ$ になると波は小さくなる。定常的波が見られるのは $\alpha=20^\circ, 25^\circ$ の場合であり、その範囲周辺が最も良好な爆発圧着条件になっているといえる。

### 4. 水中収束衝撃波を用いた粉末の衝撃圧縮システムの開発

#### 4.1 研究の方法

爆薬の爆轟エネルギーを利用して、高硬度セラミックスなどを衝撃的に圧縮固化成形する加工法が最近盛んに研究されるようになった。この場合の問題は、圧力が急激に減衰し、反射波として希薄波(引張波)が生じるためにクラックが生じてしまう点にある。そのための工夫として、図8に示すようにじょうご型の容器に水を充填し、その上に爆薬を配置する装置を考案した。粉末はじょうごの出口の所にある鋼製容器に充填されている。爆轟圧は、まず衝撃水圧に変換され、それがじょうご型の容器の壁面から反射などを受けつつ増幅されながら粉末充填部に到達する。こ

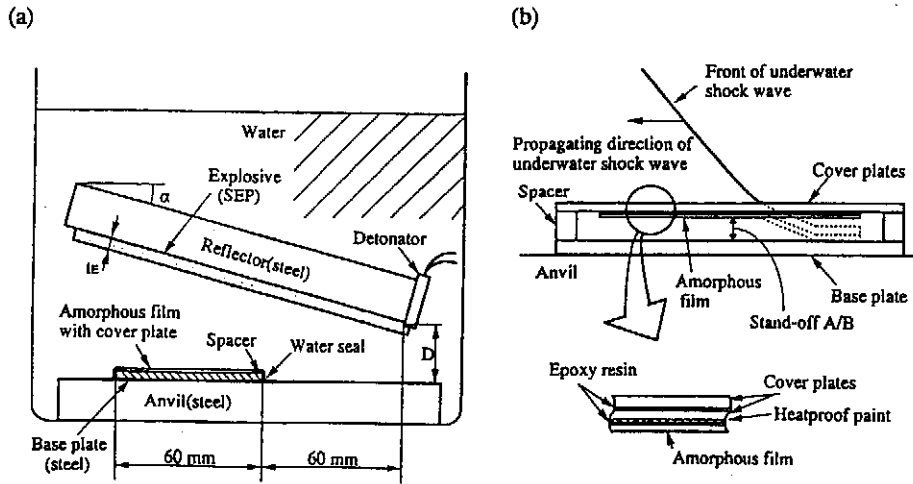


図4 水中衝撃波を利用した爆発圧着装置の模式図

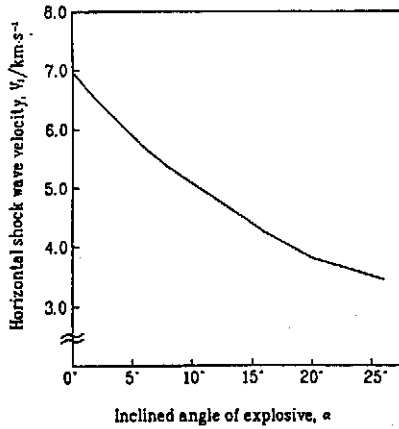


図5 爆薬のセットアップ角に対する水中衝撃波の水平方向移動速度

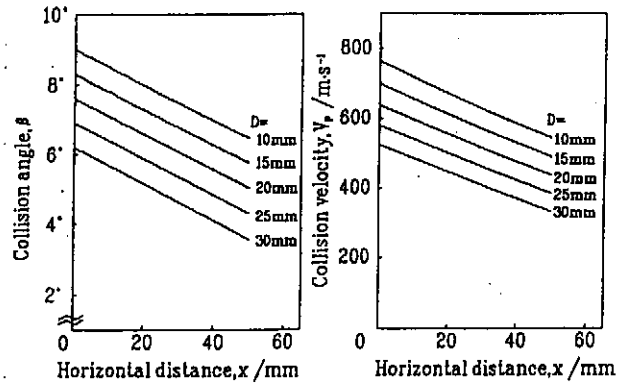


図6 水平方向距離 x の変化による衝突角、衝突速度の変化

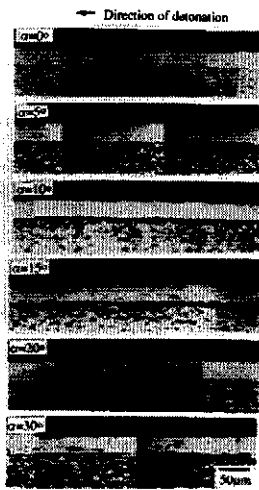


図7 初期傾斜角  $\alpha$  による界面組織の変化

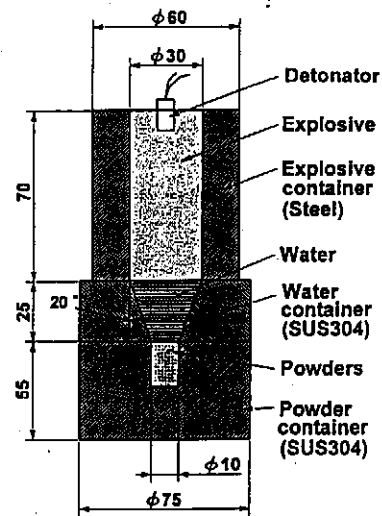


図8 水中収束衝撃波を用いた粉末の衝撃圧縮システムの模式図

れによって衝撃水圧の減衰曲線はなだらかとなるので、直接に爆轟圧が作用するような場合と比較して、希薄波の影響が少ないのではないかと期待される。

#### 4. 2 粉末充填部に作用する圧力の計算結果と粉末圧縮成形実験結果

図9は、水圧容器内での衝撃水圧の増幅過程を示す数値シミュレーションの結果である<sup>3)</sup>。爆轟圧が水面に作用して衝撃水圧を誘起した後(経過時間 $t=7.9\mu s$ )、衝撃水圧はじょうご型の容器壁面で反射して増幅され( $t=9.5\mu s$ )、圧力が高められ、波面が平面波として整えられて粉末直上に作用している( $t=12.7\mu s$ )ことがわかる。図10は粉末充填部入り口における圧力波形の計算結果である。ここでは粉末充填部も水が充填されているとして計算した。図中に破線で示してあるのはマンガニンゲージによる圧力計測結果である。図からわかるように、圧力波形はなだらかに減衰し、持続時間も比較的長い。このことがクラック発生の防止について効果をもたらすのではないかと期待している。図10は高速度鋼粉末の圧縮成形実験の結果を示している。図11(a)は成形体の断面写真であり、図11(b)は光学顕微鏡による拡大写真である。

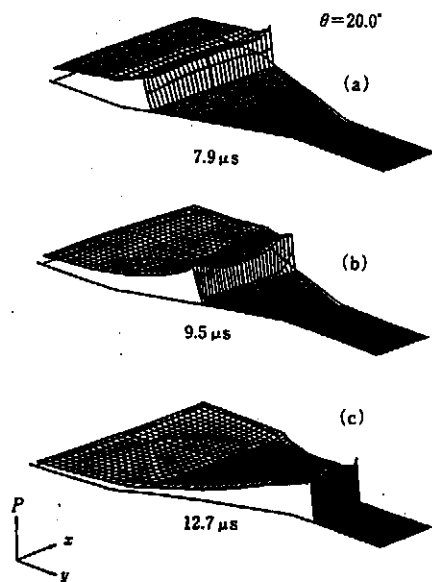


図9 水圧容器内での衝撃水圧の増幅過程を示す数値シミュレーション結果

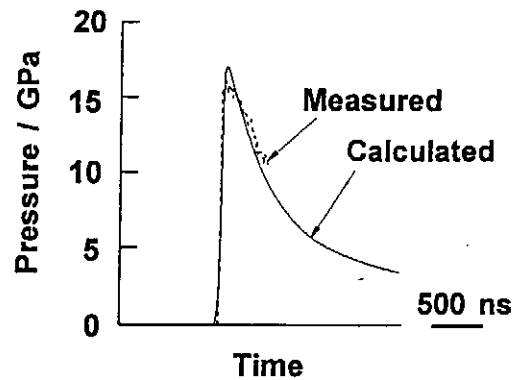


図10 粉末充填部入り口における圧力波形の計算(実線)および計測結果(破線)

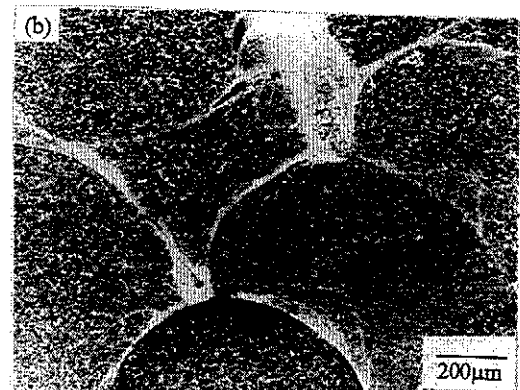
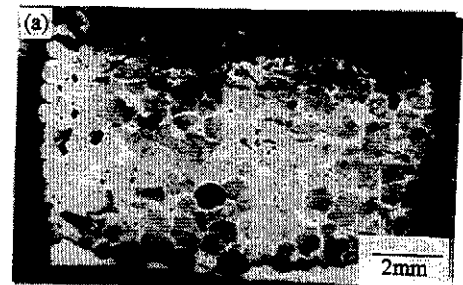


図11 高速度鋼成形体の断面写真(a)および拡大写真(b)

#### 5. 結言

上記のように、水中衝撃波を利用したいくつかの爆発加工の方法について研究結果を述べさせていただいた。水中衝撃波は、爆薬の形状や圧力の収束のさせ方によって比較的容易にその圧力作用条件を変化させることができるという特徴を有している。その特殊な効果を利用して、この他

にもさまざまな材料加工技術としての展開が開かれることを期待している。

最後に、助成いただいた天田金属加工機械技術振興財団に深謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Tanimura, S. :Proc. Int. Symp. on Impact Engng., 1 (1992), 17.
- 2) 藤田ほか：塑性と加工, 38-435(1997), 331-336.
- 3) 藤田ほか：塑性と加工, 37-426(1996), 682-687.