

# 圧縮空気をエネルギー源とした衝撃水圧成形法における 衝撃圧力波の可視化と高速変形挙動の in-situ 観察

鹿児島工業高等専門学校 機械工学科  
准教授 東 雄一

(2020 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2020034-C2)

キーワード：衝撃圧力波，可視化，高速変形

## 1. 研究の目的と背景

近年、衝撃力を応用した衝撃塑性加工（高エネルギー速度加工）技術が多数見られるようになってきた<sup>1, 2)</sup>。その代表的な加工法として、火薬類の爆発エネルギーを利用する爆発成形や衝撃磁場のエネルギーを利用する電磁成形等が挙げられる<sup>2)</sup>。しかし、これらの加工技術はエネルギーを生み出すための装置や設備に安全面での制約が多く、専用の設備を保有する必要がある<sup>1, 2)</sup>。一方で、本研究で着目した衝撃塑性加工技術の衝撃水圧成形法は圧縮空気をエネルギー源としているため、大型の専用設備等を設ける必要もなく、比較的安価かつ安価な衝撃塑性加工技術として応用することができる<sup>1)</sup>。衝撃水圧成形法は、高速度ハンマの衝撃により水圧を瞬間的に発生し成形を行う加工法である<sup>1)</sup>。この加工法を用いた衝撃水圧成形装置は、圧縮空気により加速されたハンマ（以下、衝撃弾と呼ぶ）で密閉器（以下、水圧室と呼ぶ）内の水を打撃し、水を瞬間的に圧縮することで発生した高圧の衝撃圧力波が水を伝播していき、各種の成形加工を行う<sup>1~3)</sup>。ここで、圧力波とは弾性媒質中を伝播する圧力変動の波動の総称である<sup>4)</sup>。圧力波には、圧力変動が十分小さい微小振幅波の音波や圧力変動が大きい有限振幅の非線形波である圧縮波や衝撃波などがある<sup>3)</sup>。本研究では、衝撃弾が水を打撃した際の衝撃によって圧力波が発生するため、衝撃圧力波と呼称する。

### 1・1 衝撃圧力波の可視化

衝撃水圧成形装置において現状の加工パラメータは圧縮空気の圧力のみであり、これは衝撃弾を発射させる際の打ち出し圧力に相当する。しかし、金属材料の加工に直接的に影響を与えるパラメータには、プレス加工におけるパンチの役割をする衝撃圧力波の速度（以下、伝播速度と呼ぶ）が重要であり、打ち出し圧力のみを直接的な加工パラメータとするのは加工条件として不十分である。さらに、密閉空間となる水圧室内の現象や衝撃圧力波を実測することは非常に困難なため、伝播速度は加工パラメータとして確立していない。衝撃水圧成形法における塑性加工性を検討した例は既に多く存在するが、そのほとんどが打ち出し圧力を加工パラメータとしたものである<sup>1, 5)</sup>。また、胡は衝撃水圧成形法を応用し衝撃弾の弾丸速度や水圧室内の衝撃水圧の測定について報告しているが、水圧室内の

衝撃圧力波の速度までは解析しておらず、水圧室内の挙動まで評価・分析した報告は他にもない<sup>5)</sup>。衝撃水圧成形法における伝播速度を明らかにすることで、衝撃水圧成形法における高ひずみ速度域における金属材料の定量評価が可能となることを期待できる。そこで本研究では衝撃圧力波を可視化することで打ち出し圧力と伝播速度の関係を明らかにし、伝播速度を衝撃水圧成形法の加工パラメータの1つとして確立させることを本研究の目的の1つとして、衝撃圧力波の可視化実験を行った。

### 1・2 高速変形挙動の in-situ 観察

本研究で応用している衝撃水圧成形法では金属板の深絞り加工を行うことができるが、衝撃水圧成形法において金属の変形は金型内部で起こっており、衝撃弾を発射してから金属が変形するまでの時間が非常に短く、加工プロセスが超高速であることから、金属材料が変形するプロセスの観察が困難であり、金属材料のひずみ速度や変形挙動などが不明である。そこで、衝撃水圧成形法における材料の変形挙動を可視化し、変形のプロセスを明らかにすること及び材料のひずみ速度を明らかにすることをもう1つの研究目的として実験を試みた。

## 2. 実験方法

### 2・1 衝撃水圧成形装置

図1に衝撃水圧成形装置の概略図を示す。この装置は、以下に示す動作原理で材料の加工を行う。

- ① 空気ボンベから貯気槽に充填された高圧の圧縮空気が電磁弁の開放により装填室に高速で流れ込む。
- ② 装填室にあらかじめ装填されていた衝撃弾が、装填室に流れ込んできた圧縮空気により発射され、高速で水圧室に向かって走行管内を走行する。
- ③ 発射された衝撃弾は、走行管内を進み水圧室内の水を打撃する。

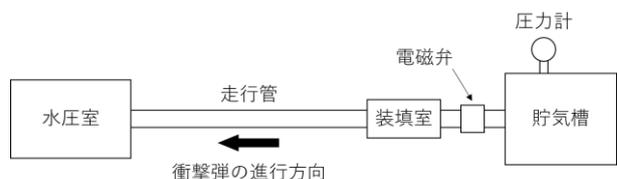


図1 衝撃水圧成形装置の概略図

- ④ 打撃により水を瞬間的に圧縮することで発生する衝撃圧力波が水中を伝播し、衝撃圧力波が材料に到達することで材料の加工を行う。

## 2・2 衝撃弾

衝撃弾は旋盤を用いて MC ナイロン樹脂を円筒形に加工したものを使用した。寸法は、直径約 27 mm、全長約 83 mm 程度で、質量は約 54~55 g である。

## 2・3 打ち出し圧力

本研究で用いた衝撃水圧成形装置においては打ち出し圧力を 0~600 MPa まで設定することができる。

## 2・4 衝撃圧力波の可視化実験

衝撃圧力波の可視化実験では株式会社キーエンスのハイスピードカメラ（高速カメラユニット：VW-600C、長距離マイクロズームユニット：VW-Z2）を用いた。図 2 に本実験で使用した水圧室を示す。この水圧室は衝撃圧力波を可視化するために金型の側面をくり抜き、金型の内側にはアクリルパイプを挿入した。図 3 には可視化実験を行う際の光源やハイスピードカメラの配置図を示す。光源にはハロゲンランプ（日動工業株式会社、HS-500L）を使用し、光源と水圧室の間に白色のアクリル板で製作したスリット幅 1.5 mm、間隔 1.5 mm のスリットを、水圧室の観察部に垂直な方向に影ができるように設置した。ハイスピードカメラの撮影速度は約 80000 fps とした。

打ち出し圧力は 100 kPa から 600 kPa まで 50 kPa ずつ変化させて実験を行った。



図 2 衝撃圧力波の可視化実験で用いた水圧室

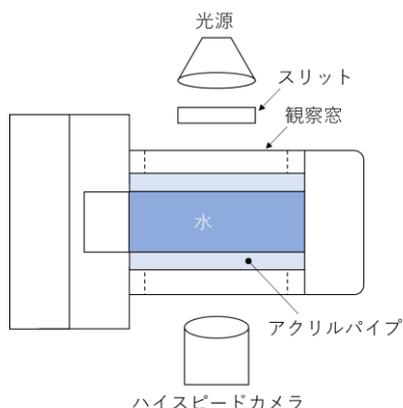


図 3 衝撃圧力波の可視化実験における配置図

## 2・5 高速変形挙動の in-situ 観察

試験片は厚さ 0.6 mm、直径 30 mm の Mg 合金：LZ91 を使用し、試験片には直径 5 mm 間隔のケガキ線を描いた。

高速変形挙動の in-situ 観察では株式会社フォトロン社のハイスピードカメラ（FASTCAM mini AX200）を用いた。図 4 に本実験で使用した水圧室を示す。水圧室は透明なアクリルを用いて製作した。最初に製作したアクリル製水圧室では水圧室内部の試験片が観察しにくく、変形挙動を捉えることが困難であったため、図 4 には改良型の水圧室を示している。図 5 には変形挙動を観察するための光源やハイスピードカメラの配置図を示す。光源には高輝度 LED ライト（AItec PU-LLBKC-S）を使用した。ハイスピードカメラの撮影速度は 160000 fps とした。

打ち出し圧力は、事前に LZ91 の試験片が加工可能である打ち出し圧力を調査し、また、アクリル製水圧室が衝撃弾の衝突により破損しないよう、100 kPa を選定し実験を行った。



図 4 高速変形挙動の in-situ 観察実験で用いたアクリル製水圧室

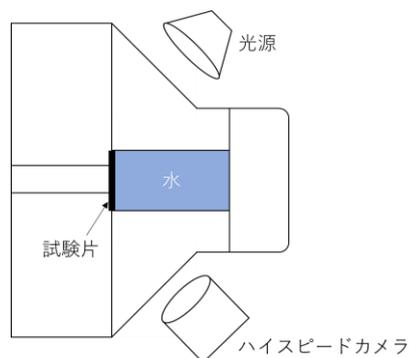


図 5 高速変形挙動の in-situ 観察実験における配置図

## 3. 研究成果

### 3・1 衝撃圧力波の可視化実験

衝撃圧力波の可視化実験を行った結果の一例として、図 6 に 550 kPa の打ち出し圧力で可視化を行った際に捉えた

画像を示す。図6において各画像の右側が走行管側であり、右側から衝撃弾が衝突し、左側に向かって衝撃圧力波が伝播していく。縦方向にある黒い線はスリットの影が見えている状態である。図6(a)は衝撃弾が衝突する前の画像を示している。水圧室内は静止している状態であり、スリットによってできる影は不変である。一方で、衝撃弾が衝突した後に捉えた画像を図6(b)に示しており、この図では中央付近にスリットの影がぼやけて見える領域(もやがかった領域)が見られた。この領域は衝撃弾が衝突したことにより発生した衝撃圧力波であり、衝撃圧力波が有する急激に生じた圧力変動によって光の屈折率が変化することで像がぼやけて観察されたものと考えられる。この領域は時間経過とともに右側から左側に向かって移動していることが確認できた。

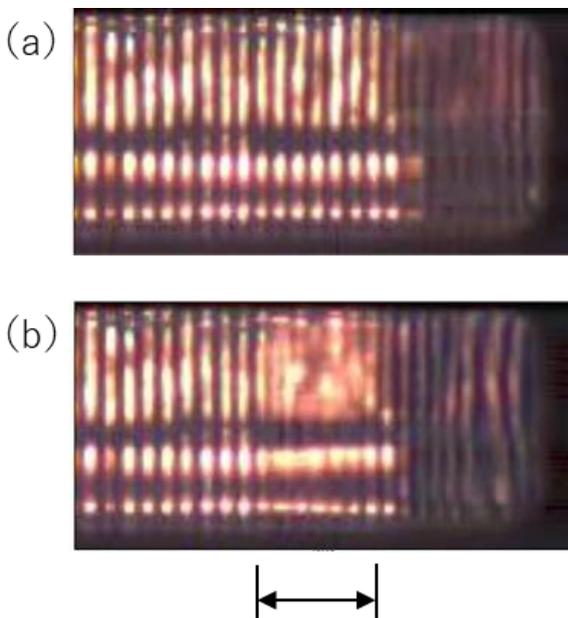


図6 550 kPaの打ち出し圧力における衝撃圧力波の画像

このぼやけた領域は250 kPa以上の打ち出し圧力で観察された。一方で、250 kPaより低い打ち出し圧力ではこのような領域は観察されなかったが、250 kPaより低い打ち出し圧力ではスリットの影ははっきり観察されている中でその影がゆがみ、ゆがんだ影が時間経過とともに右側から左側に向かって移動している様子が確認できた。これは、ぼやけた領域が発生するほどの急激な圧力変動は起ってはおらず、圧力変動の小さい衝撃圧力波が伝播しているものと考えられる。

ここで、スリットの影がぼやけて観察された打ち出し圧力において、そのぼやけた領域が伝播していく速度の算出を試みたが、より詳細な分析・検証が必要になってくることが分かってきたため、その結果について本報告書では割愛させて頂きたい。

### 3・2 高速変形挙動の in-situ 観察

100 kPaの打ち出し圧力でMg合金：LZ91の深絞り加工を行い、その変形プロセスの撮影を試みた。図7に水圧室内部を捉えた画像を示す。図7(a)は衝撃圧力波が試験片に到達する前の様子であり、ケガキ線が描かれている試験片が明瞭に観察できた。図7(b)は、衝撃圧力波により試験片が変形し加工が終了した後の様子であり、水圧室内の内部にある試験片の高速変形を捉えることに成功した。撮影した動画を解析した結果、水圧室内で発生した衝撃圧力波が試験片に到達した瞬間を0  $\mu$ sとした際に、162.5  $\mu$ s後に試験片の変形が終了していることが分かり非常に短い時間で加工されていることが明らかになった。また、その変形挙動は、衝撃圧力波が到達した瞬間から衝撃圧力波が作用する面の領域が高速で衝撃圧力波の進行方向に張り出されるように変形していった。この際、試験片の中心部から伸びていくのが確認できた。その後、フランジ部がダイス穴へ引き込まれる深絞りのような変形に変わり、加工が完了することが分かった。

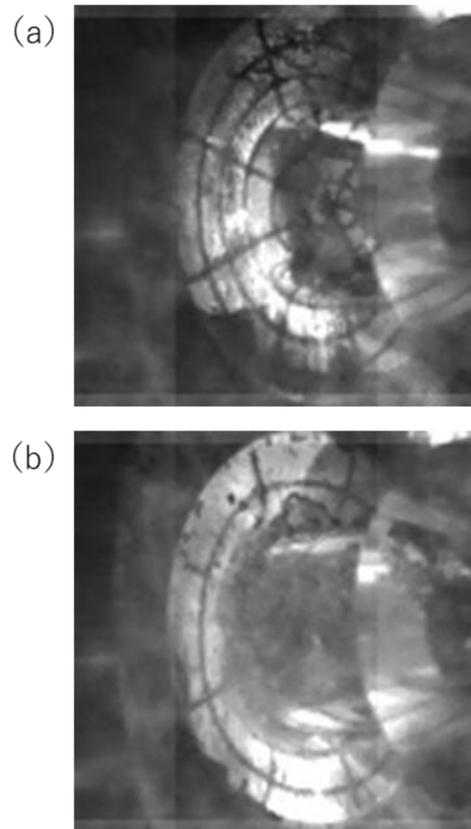


図7 100 kPaの打ち出し圧力で変形した試験片

次に、変形した試験片の面内の伸びを計測し、面内ひずみとひずみ速度を算出した。その結果を表1に示す。一般的に、Mg合金は異方性の強い材料であり、変形した後の試験片も同心円状に均等に变形しておらず各方向によって伸びの大小が見られた。そこで、圧延方向を0°とし、

0°, 45°, 90° の3方向について面内の伸びを計測した。また、面内の伸びは試験片の形状から計測した値であり（局所的なある特定の箇所を測定したわけではない）、ひずみ速度は面内ひずみの加工に要した時間（162.5 μs）で除しているため、加工開始から終了までの平均的なひずみ速度となっている。今回の条件において、試験片は200~400 s<sup>-1</sup>のひずみ速度で変形していることが分かり、最も伸びが大きく、面内ひずみとひずみ速度が大きかったのは45°方向であり、そのひずみ速度は403.1 s<sup>-1</sup>であることが分かった。

表1 各方向における面内ひずみとひずみ速度

方向	直径 [mm]	面内ひずみ [-]	ひずみ速度 [s <sup>-1</sup> ]
0°	30	0.0423	260.5
45°		0.0655	403.1
90°		0.0323	199.0

#### 4. まとめ

本研究では、衝撃水圧成形法における衝撃圧力波の可視化と高速変形挙動の in-situ 観察に挑戦した。本研究から得られた主な知見を下記にまとめる。

- ① 急激な圧力変動により生じた衝撃圧力波を捉えることができ、衝撃圧力波が伝播していく様子を観測することができた。

- ② 水圧室内部で起こっている超高速な金属変形を捉えることに成功した。加工に要した時間は約162.5 μsであり、200~400 s<sup>-1</sup>の非常に速いひずみ速度で変形していることが分かった。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の奨励研究助成（若手研究者枠）：AF-2020034-C2により実施されたものであり、心より深く感謝の意を表します。また、研究を進めるにあたり協力頂いた、鹿児島高専専攻科生の塩田滉斗君、当時の鹿児島高専専攻科生の新富洋平君、曾原健郎君に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 高松正誠：衝撃液圧成形法，高圧力，9-6（1971），29.
- 2) 日本塑性加工学会：衝撃塑性加工-衝撃エネルギーを利用した高度成形技術-，（2017），コロナ社
- 3) 高松正誠：ハイドロパンチ技術開発と安全，安全工学，22-1（1983），33
- 4) 日本機械学会：機械工学辞典，（2011），丸善
- 5) 胡習之：水中収束衝撃波の塑性加工への応用，兵庫教育大学大学院，（2004）