

# サーボプレスを用いた荷重低減をする低サイクル振動圧縮加工法の開発とメカニズムの解明

豊橋技術科学大学大学院工学研究科 機械工学系

助手 前野智美

(平成 21 年度一般研究開発助成 AF-2009010)

キーワード：板鍛造，摩擦，潤滑

## 1. 研究の目的と背景

プレス部品の高機能化および後加工削減を目的として、板鍛造が注目されている。板鍛造では積極的に材料を流動させて板厚に変化をつけて板材から複雑な形状部品を成形する加工であり、自動変速機用部品などの機能部品も板鍛造によって製造されている<sup>1)</sup>。板鍛造では圧縮変形が多く、工具面の摩擦が大きくなって変形が拘束され、加工荷重が増大する<sup>2)</sup>。

本研究では、薄板の圧縮加工において荷重を振動させて摩擦を低減する荷重振動圧縮加工法を開発した。荷重振動において、素材と金型の弾性回復変形の差によってそれらの間に小さな隙間を形成させて自動的に再潤滑した。アルミニウム合金板の圧縮加工を行い、荷重振動ありとなしの結果を比較し、荷重振動の効果を評価した。また、有限要素シミュレーションと腐食液による潤滑剤侵入部分の測定を行い、荷重振動による摩擦低減のメカニズムを明らかにした。

## 2. 荷重振動加工方法

板材の圧縮加工において荷重振動の影響を調べるために、Fig. 1 に示すように板厚 2.0mm、直径 10mm の A5052 アルミニウム合金板を平坦な工具で圧縮加工した。250kN 精密万能試験機を用い、圧縮工具は焼入れ・焼戻し処理を行った SKD11 であり、表面粗さは 0.08 $\mu$ mRa、寸法は長さ 70mm、幅 100mm、厚さ 35mm である。潤滑剤は水溶性プレス加工油サンプル SE-65CP(スギムラ化学工業(株)製)を精製水で 33%に希釈したものである。

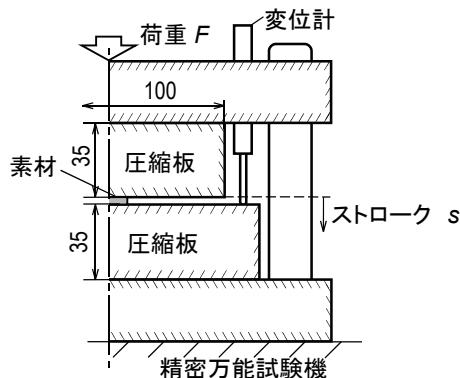


Fig. 1 アルミニウム合金板の荷重振動圧縮に用いた工具

圧縮加工における荷重振動の経路を Fig. 2 に示す。一定荷重間隔ごとに  $n$  回除荷を行い、最終荷重  $F_f$  まで負荷す

る。除荷前の荷重を  $F_i$ 、除荷率を  $\alpha$  とし、除荷量はその積  $\alpha F_i$  である。除荷率  $\alpha$  は 0-90%、荷重振動回数  $n$  は 0-30、最終荷重  $F_f$  は 80-200kN である。荷重間隔は最終荷重を  $n+1$  で除した値になる。

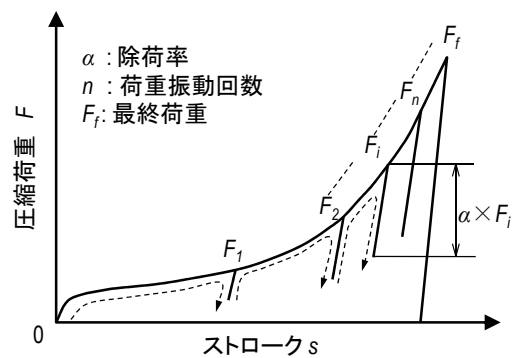


Fig. 2 荷重振動圧縮における途中除荷経路

## 3. 荷重振動による加工荷重の低減

除荷率  $\alpha=0, 75\%$ 、荷重振動回数  $n=4$ 、最終荷重  $F_f=200$ kN における圧縮荷重-ストローク曲線と圧縮後の素材を Fig. 3 に示す。ここで、最終圧縮率  $r_f$  は圧縮前後の素材中心の板厚差を初期板厚で除したものである。荷重振動を行うことによって圧縮荷重は大幅に低減しており、荷重振動なしでは最終圧縮率  $r_f=54.2\%$  であるのに対し、荷重振動ありでは  $r_f=65.6\%$  に増加し、直径も大きくなっている。荷重を全て除荷しなくても、一部だけ除荷することによって大きな荷重低減効果が得られている。また、荷重-ストローク曲線を比較すると、荷重振動ありでは再び負荷したときに除荷前よりも荷重が  $\Delta F$  だけ低下している。

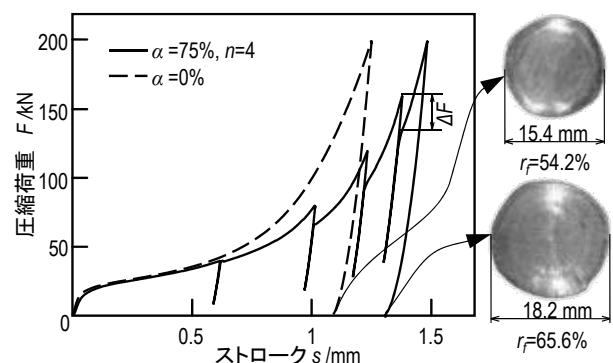


Fig. 3  $F_f=200$ kN における荷重振動ありとなしの荷重-ストローク曲線と圧縮後の素材

$n=4$ ,  $F_f=200\text{kN}$  における 4 回目の再負荷の荷重低下量  $\Delta F$  を除荷前の荷重で除した荷重低下率  $\Delta F/F_i$  と除荷率の関係を図 4 に示す。荷重低下率は  $\alpha=25\%$  以下では大きくないが、それ以降では除荷率にほぼ線形で増加し、 $\alpha=90\%$  で 27% 程度の荷重低下率となっている。

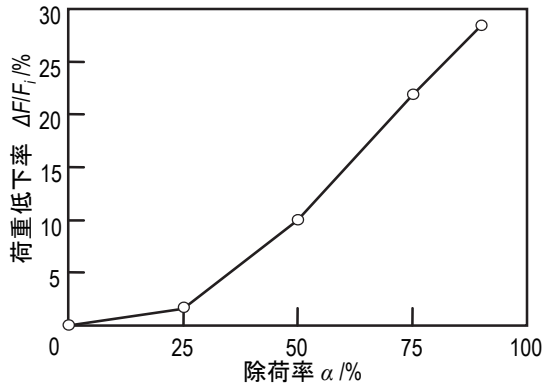


Fig. 4  $n=4$ ,  $F_f=200\text{kN}$  における 4 回目の再負荷の荷重低下率と除荷率の関係

$\alpha=75\%$ ,  $F_f=200\text{kN}$  における最終圧縮率と荷重振動回数の関係を Fig. 5 に示す。荷重振動回数が増えるとともに最終圧縮率は大きくなり荷重低減の効果が大きくなるが、 $n=12$  以上ではほとんど変化しなくなる。

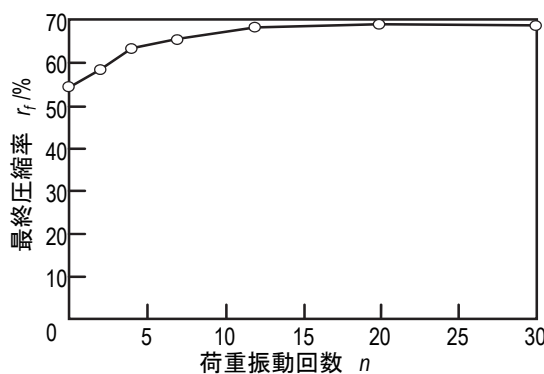


Fig. 5  $\alpha=75\%$  and  $F_f=200\text{kN}$  における最終圧縮率と荷重振動回数の関係

各種の条件における最終荷重と最終圧縮率の関係を Fig. 6 に示す。 $\alpha=75\%$ ,  $n=4$  の荷重振動ありでは、荷重振

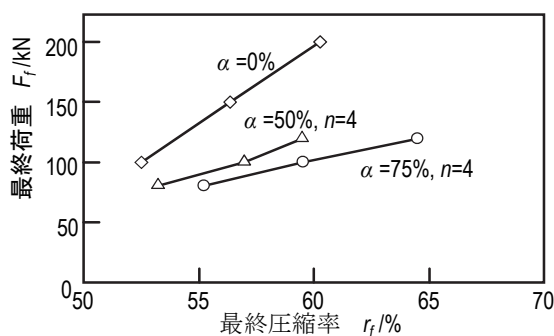


Fig. 6 最終荷重と最終圧縮率の関係

動なしの半分ぐらいの最終荷重で同じ最終圧縮率を得ることができ、荷重の一部を数回除荷しただけでも非常に大きな荷重低減効果が得られている。

各種の条件における最終荷重と板厚差  $\Delta t$  の関係を Fig. 7 に示す。ここで、 $\Delta t$  は圧縮後の素材の中央部と端部の板厚差である。 $\alpha=75\%$ ,  $n=4$  の荷重振動では、荷重振動なしよりも圧縮後の板厚差が小さくなっている。これは Fig. 6 に示すように、最終荷重が低減されたことによって工具の弾性変形量を低減されたため、荷重振動では製品の平坦度を向上することができる。

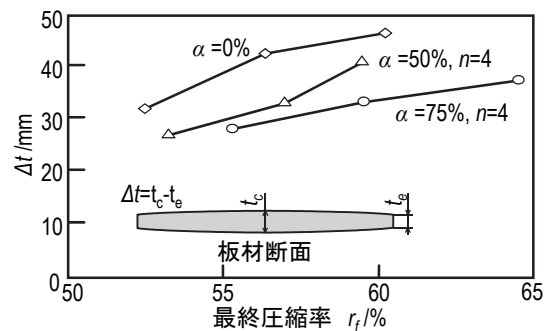


Fig. 7 板厚差  $\Delta t$  と最終圧縮率の関係

#### 4. 荷重振動圧縮による摩擦低減メカニズム

##### 4.1 荷重振動の有限要素シミュレーション

荷重振動では加工荷重が大幅に低減するが、その効果を有限要素シミュレーションによって調べた。市販有限要素ソフト ABAQUS を用いて計算を行い、素材と工具は弾塑性体とした。有限要素シミュレーションの結果と  $\alpha=0\%$  における実験の成形荷重が同じになるように、摩擦係数を 0.18 と求めた。計算は軸対称変形、上下対称とし、 $\alpha=75\%$ ,  $n=4$ ,  $F_f=200\text{kN}$  の条件でシミュレーションを行った。

4 回目の荷重振動前後の変形形状を図 8 に示す。素材は除荷前において圧縮工具と全面で接触しているが、 $\alpha=75\%$  の除荷において素材周辺部に  $14\mu\text{m}$  の隙間が生じている。圧縮加工では、中心部が高い面圧分布になって圧縮工具が凹形状に弾性変形して素材はその形状に転写

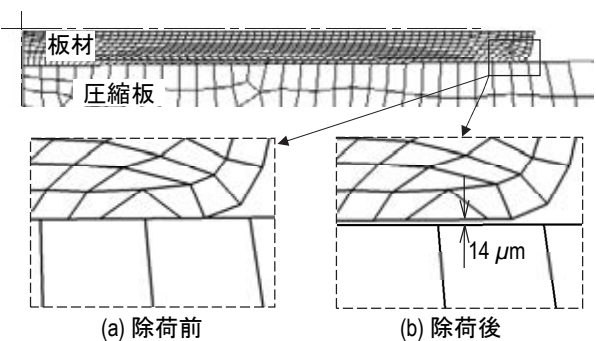


Fig. 8  $\alpha=75\%$  における荷重振動前後の有限要素シミュレーションの変形形状

されるが、荷重振動によって圧縮工具が弾性回復して平坦形状に戻り、完全に荷重を除荷しなくても素材周辺部に隙間が生じる。

#### 4・2 腐食実験による再潤滑の検証と定量的調査

有限要素シミュレーションでは、荷重振動によって圧縮工具の弾性回復により素材周辺部に隙間が生じたが、この隙間を実験においても確認した。潤滑剤の代わりに腐食液を用いて、隙間に腐食液を入り込ませて素材を腐食させることによって隙間を検証した。腐食液には 3% 水酸化ナトリウム水溶液を使用した。

$F_f=200\text{kN}$ ,  $n=4$  において 3 回目の荷重振動で素材を一度取りだし、潤滑剤を脱脂洗浄した。再び荷重を負荷して 4 回目の荷重振動直前に腐食液を素材周囲に満し、対応する荷重まで減少させて 10 分間保持して腐食液が侵入した部分を腐食させ、腐食液を洗浄して乾燥させてから素材を取り出した。

腐食された素材端部を Fig. 9 に示す。(a) $\alpha=0\%$ では素材周辺部は腐食されていないが、(b) $\alpha=25\%$ では周辺部にわずかな腐食が確認できる。隙間ができて腐食液が浸入し、リング状に腐食されている。(c), (d)のように $\alpha$ が増加するとともに腐食部分は内側に大きくなっている

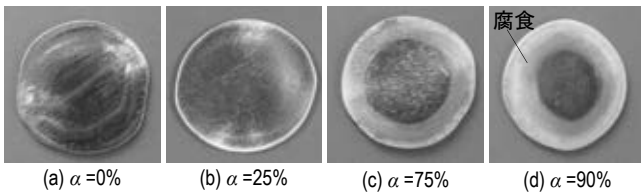


Fig. 9 腐食液が浸入して腐食された素材表面端部

#### 4・3 荷重振動による自動再潤滑のメカニズム

荷重振動による自動再潤滑のメカニズムを Fig. 10 に示す。薄板の圧縮加工では、中心部が高い面圧分布になって加工中の圧縮工具は Fig. 10(a)のように中央部分が凹んだ形状に弾性変形し、素材は凹形状工具によって圧縮されたことになり、凸形状に塑性変形される。荷重減少時に凹形状の圧縮工具は Fig. 10(b)のように弾性回復で平坦形状に戻るが、凸形状に成形された素材は弾性回復が小さく、素材周辺部に隙間が生じる。隙間が生じる

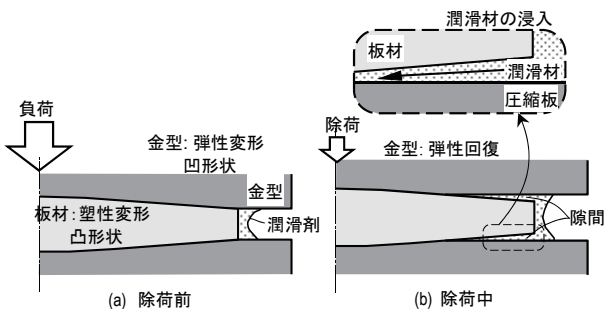


Fig. 10 荷重振動による自動再潤滑のメカニズム

と周囲の潤滑剤がこの部分に入り込むため、素材表面は自動的に再潤滑される。加工とともに潤滑性能は低下するが、すべりが大きい周辺部が再潤滑されることによって荷重が大幅に低減できる。

軸対称圧縮加工のスラブ法から平均摩擦係数を近似的に計算した。板厚はストロークから求めており、負荷荷重から金型の弾性変形量を補正して素材中央部の板厚としている。 $\alpha=0, 75\%$ ,  $n=4$ ,  $F_f=200\text{kN}$  における平均摩擦係数とストロークの関係を Fig. 11 に示す。 $\alpha=0\%$ ではストロークの増加とともに摩擦係数が大きく増加している。 $\alpha=75\%$ ,  $n=4$  でもストロークとともに摩擦係数が増加するが、荷重除荷後に再負荷したときに摩擦係数が大きく下がるため、摩擦係数は 0.1 を越えていない。

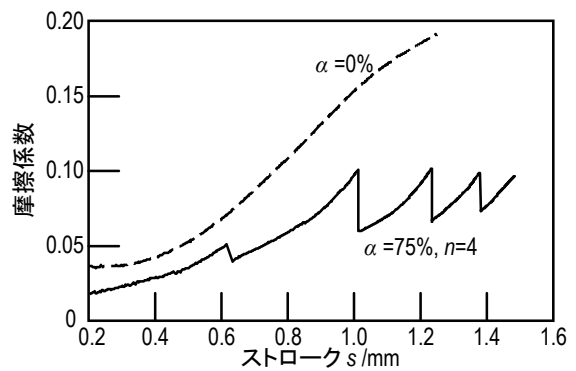


Fig. 11  $F_f=200\text{kN}$  における荷重振動ありと無しの平均摩擦係数とストロークの関係

無潤滑において荷重振動ありとなしで圧縮した場合における最終荷重と最終圧縮率の関係を Fig. 12 に示す。当然のことながら、荷重振動を行っても発生するすき間に潤滑材が浸入しないため荷重振動の効果は小さい。

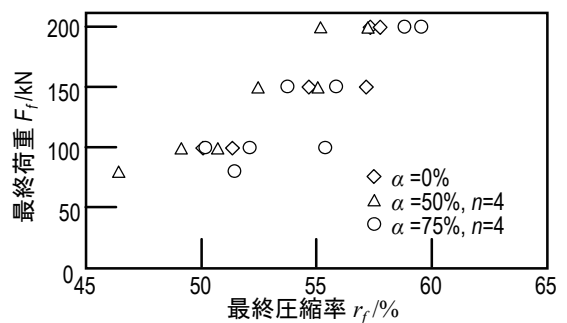


Fig. 12 無潤滑における最終荷重と最終圧縮率の関係

### 5. サーボプレスにおける荷重振動圧縮加工

圧縮試験機を荷重制御で実験を行ってきたが、通常の機械プレスでは位置制御が行われている。機械プレスにおいても荷重振動による荷重低減効果が得られるか検証するために、1500kN クランク式サーボプレス SDE-1522 (アマダ(株)製)を用いて実験を行った。実験に用いたス

ライドモーションを Fig. 13 に示す. 平均除荷率が 80-90%になるようにライドモーションを設定した. 比較としてクランクモーションも行った. また, サーボプレス機の最低ライド高さに合わせるために上工具の厚さを 188mm, 下工具の厚さを 220mm にそれぞれ変更した. また, ロードセルの容量に対して荷重が非常に小さいため 3 個の素材を並べて同時に圧縮して平均で評価した.

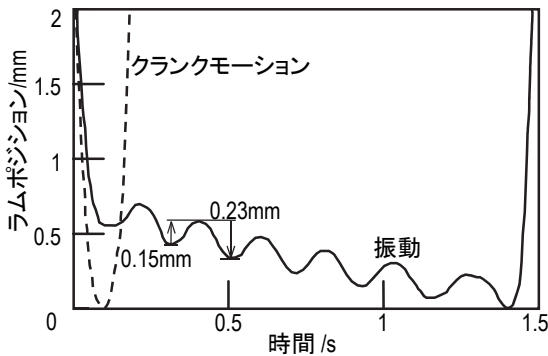


Fig. 13 サーボプレスを用いた振動ライドモーション

$r_f=70\%$ における振動モーションとクランクモーションの荷重-ストローク曲線を Fig. 14 に示す. ストロークは圧縮工具の弾性変形を含んでいるため素材の圧縮率に対して大きい値になっている.  $s=1.2\text{mm}$  までは両者の荷重はほぼ同じであるが, それ以降においてクランクモーションの荷重は振動モーションのものよりも大きくなっている. 振動モーションでは, 再潤滑されて再荷重時の荷重低減効果が観察され, 下死点付近での荷重の上昇が抑制されている.

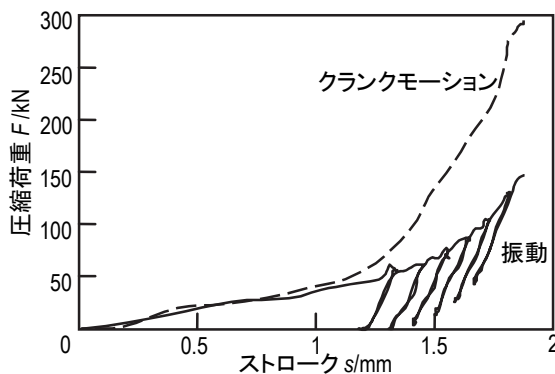


Fig. 14  $r_f=70\%$ における振動モーションおよびクランクモーションの荷重-ストローク曲線

下死点位置を変えて圧縮を行ったときの下死点荷重と最終圧縮率の関係を Fig. 15 に示す. 振動モーションではクランクモーションよりも同じ最終圧縮率を得る荷重が大幅に低下しており,  $r_f=70\%$ で比較した場合 42%の荷重低減効果が得られている. サーボプレス機のような位置制御においても荷重振動による摩擦低減が有効である.

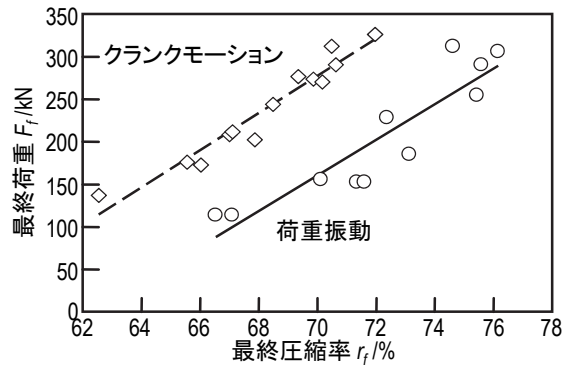


Fig. 15 サーボプレスを用いた荷重振動ありとなしにおける最終荷重と最終圧縮率の関係

## 6. 後方押しへの荷重振動の適用

### 6・1 荷重振動後方押し実験方法

摩擦の影響が大きくなる板鍛造を対象に荷重振動圧縮加工法を提案したが, 薄肉部分を成形する型鍛造への応用も考えられ, 後方押しへの応用を試みた. 後方押しに用いた工具を Fig. 16 に示す. 素材には高さ 8 mm, 直径 $\phi 20$  mm の焼鈍した純銅 C1100 を用いた. 押し比は 2.9 とし, パンチランド部およびダイス軸方向の表面粗さは  $0.04 \mu\text{mRa}$  であり, 工具には焼入れ・焼戻した SKD11 を用いた. 潤滑剤は油をバインダーとした二硫化モリブデンを用いた. 荷重振動はパンチストロークに対して一定のストローク間隔  $\Delta s$  で行った.

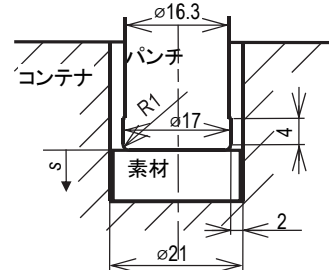


Fig. 16 荷重振動後方押しに用いた工具

### 6・2 荷重振動押し加工結果

最大荷重  $F_f=240\text{kN}$  における除荷率  $\alpha=0, 75, 90, 100\%$  での得られた押し容器素材断面を Fig. 17 に示す. 同じ最大荷重においても, 除荷率  $\alpha$  の増加とともに側壁部高さ  $h$  が高くなる.

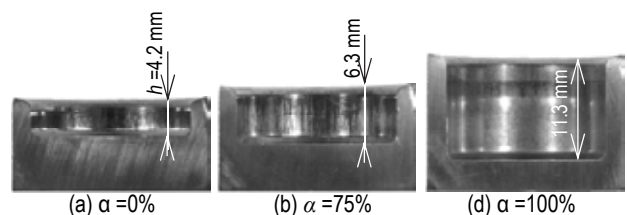


Fig. 17  $F_f=240\text{kN}$ ,  $\Delta s=0.1$  mm における押し容器素材断面

$\Delta s = 0.1 \text{ mm}$ での各除荷率における側壁部高さ $h$ と最大荷重 $F_f$ の関係を Fig. 18 に示す.  $\alpha = 0\%$ の荷重振動なしのものとは比べて, 荷重振動ありのものは成形荷重が低減している. 除荷率 $\alpha$ が大きいほど荷重低減効果は大きい.

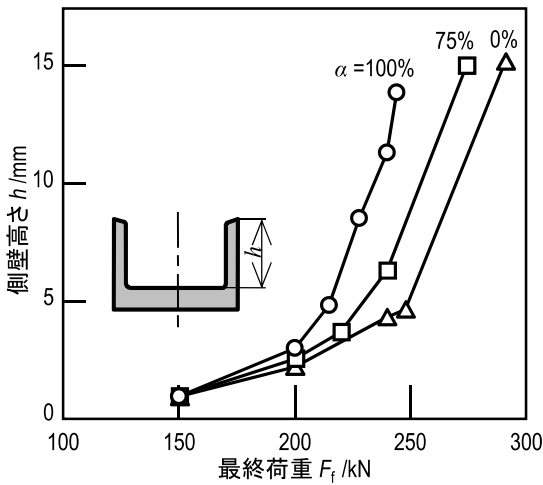


Fig. 18  $\Delta s = 0.1 \text{ mm}$ における側壁高さ $h$ と最大荷重 $F_f$ の関係

容器内側壁表面粗さを Fig. 19 に示す. 容器内側壁を周方向に表面粗さを計測した.  $\alpha = 50\%$ より小さい除荷率では表面粗さは大きい,  $\alpha = 75\%$ を超えると表面粗さは減少し一定値となった.

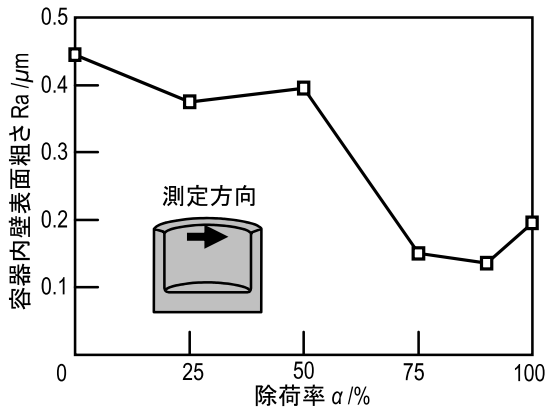


Fig. 19  $F_f = 240 \text{ kN}$ における容器内壁表面粗さに及ぼす除荷率の影響

## 7. 荷重振動を用いた軸付きフランジ部品の成形

### 7・1 荷重振動圧縮による軸へのフランジ成形方法

圧縮によって軸にフランジを成形する場合, フランジが薄くなると板鍛造同様に摩擦の影響が大きくなってしまふ. そこで, 荷重振動を応用して荷重の低減を試みた.

Fig. 20 に荷重振動を用いた圧縮による軸へのフランジ成形方法を示す. 軸の端部にヘッディング加工によってフランジを成形する. ダイス内に素材を挿入し, ダイス上面から突き出した部分を平面の上型で圧縮することによってフランジを成形する. まず, 荷重振動なしですえ込みによって厚さ  $5 \text{ mm}$  のフランジを予備成形する. 次

に, 予備成形された部分を荷重振動で圧縮してフランジを薄く拡大する. このとき, 下型内部の圧力の増加によって型が破損しないよう, 下ピンは取外して圧縮する. 素材には焼鈍したアルミニウム合金 A5056 丸棒を用いた. 試験機には容量  $100 \text{ ton}$  の油圧プレス機を用いて, 圧縮時速度が  $3 \text{ mm/min}$  で圧縮した. 金型表面は実験毎に #2000 のエメリー紙で表面を研磨した. 荷重振動は一定のフランジ圧縮率間隔  $\beta$  で行った.

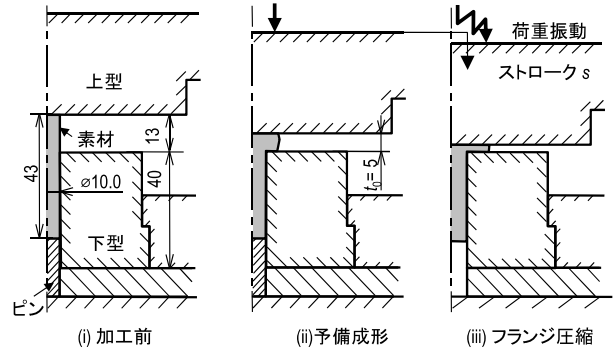


Fig. 20 荷重振動圧縮による軸へのフランジ成形方法

### 7・2 フランジ成形結果

荷重振動なしおよび  $\alpha = 100\%$ ,  $\beta = 20\%$  (振動回数 6 回),  $F_f = 300 \text{ kN}$  においてフランジ成形された製品を Fig. 21 に示す. 荷重振動なしと比べて, 荷重振動を行うと同じ最大荷重でも, 加工後のフランジ厚さは薄くなり直径は大きくなっている. また, 荷重振動なしではフランジ上面にくぼみが生じている.

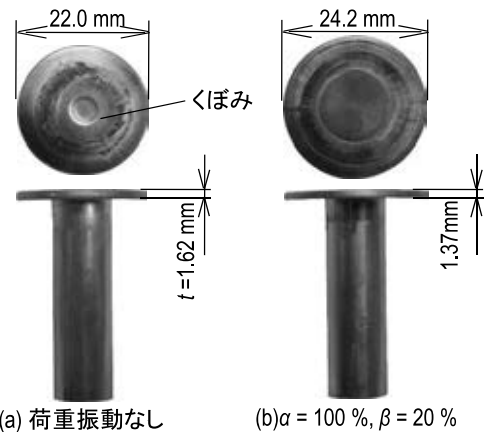


Fig. 21 荷重振動なしおよび  $\alpha = 100\%$ ,  $\beta = 20\%$ ,  $F_f = 300 \text{ kN}$  においてフランジ成形された製品

$\beta = 20\%$ ,  $F_f = 300 \text{ kN}$  における軸端部フランジ成形後の最終直径拡大率と軸長さ増加量におよぼす除荷率の影響を Fig. 22 に示す. 軸長さ増加量  $\Delta L$  は予備成形の軸長さとフランジ成形後の差である.  $\alpha = 50\%$ 以上になると最終直径拡大率が増加し, 軸長さ増加量は低下している. 荷重振動によって, 摩擦が低減され材料が半径方向に拡がりやすくなり軸方向に押出される量が低減している.

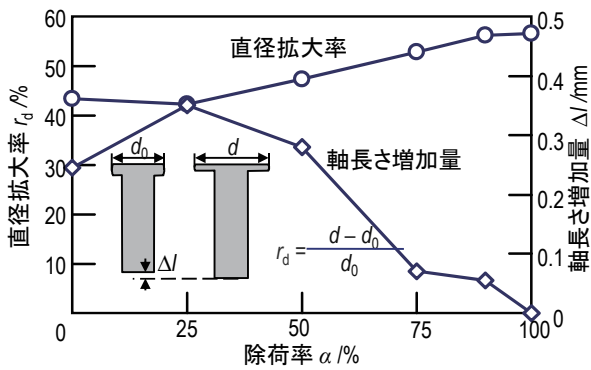


Fig. 22  $\beta = 20\%$ ,  $F_f = 300$  kN におけるフランジ成形後の最終直径拡大率と軸長さ増加量におよぼす除荷率の影響

$\beta = 20\%$ ,  $F_f = 300$  kN におけるフランジ成形後のフランジ上面に発生するくぼみの深さと除荷率の関係を Fig. 23 に示す. Fig. 22 に示した軸長さ増加量と対応するように  $\alpha = 75\%$  以上では軸長さ増加量が大きく低減され、くぼみ深さも低減している. くぼみの発生を抑制するためには  $\alpha = 75\%$  以上での荷重振動が有効である.

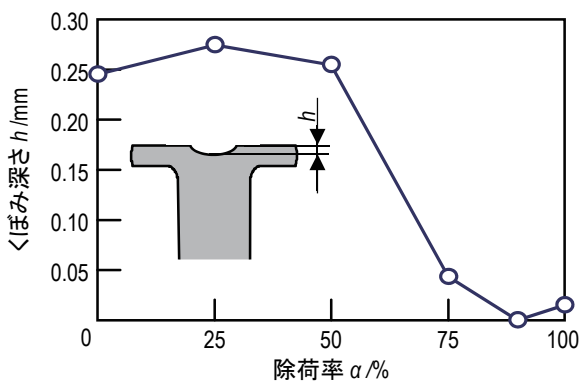


Fig. 23  $\beta = 20\%$ ,  $F_f = 300$  kN における軸端部フランジ成形後のフランジ上面くぼみ深さと除荷率の関係

## 8. 結言

薄板の圧縮加工において荷重を低減する荷重振動圧縮加工法を開発し、アルミニウム合金板の荷重振動圧縮を行い、荷重振動ありとなしの結果を比較した. また、有限要素シミュレーションと腐食液を用いた潤滑剤が侵入する部分の測定を行った. 加えて、荷重振動を型鍛造に応用して得られた知見を以下に示す.

- 1) 低サイクルの振動圧縮加工では、加工中の摩擦を小さくすることができ、加工荷重を大幅に低減できた.
- 2) 荷重振動において素材と金型の弾性変形の差によって素材周辺部に小さな隙間を形成させて、自動的に再潤滑を行った.
- 3) 成形荷重を低減させることによって下死点での弾性変形量を減少させ、製品の平坦度を向上できた.
- 4) 押出し加工において荷重振動によって成形荷重が低減され、また容器内面の表面粗さが向上した.
- 5) フランジ成形において、荷重振動によってフランジ部の摩擦は低減され素材は半径方向に拡がりやすくなり、素材が軸部分に押戻される量が低減し、フランジ部上面のくぼみが低減した.

## 謝辞

本研究は、天田金属加工機械技術振興財団による平成 21 年度研究助成金(AF-2009010)によるものであり、財団に感謝いたします. また、研究に協力した豊橋技術科学大学院生、中村彰宏氏に感謝します.

## 参考文献

- 1) 中野隆志・芦原和男・石永信行・井村隆昭・外山泰治：塑性と加工, **47**-551 (2006), 1146-1150.
- 2) 中野隆志：塑性と加工, **42**-484 (2001), 388-392.