

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年03月26日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760555

研究課題名（和文）

荷重振動鍛造の金型弾性回復による自動再潤滑のメカニズム解明及び薄肉部品への適用

研究課題名（英文）

Investigation of mechanism of load pulsation, and applying for forming of parts having small thickness

研究代表者

前野 智美（MAENO TOMOYOSHI）

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助手

研究者番号：80505397

研究成果の概要（和文）：

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。板鍛造では摩擦の影響が大きくなり加工荷重が増大する問題がある。摩擦を低減するために、成形中に荷重の一部を数回除荷する荷重振動鍛造を開発した。荷重振動鍛造における摩擦低減のメカニズムを明らかにした。荷重振動鍛造を後方押し出し、軸付きフランジ部品、ステンレス合金板の段差付け加工に応用した。成形荷重が低減し形状精度が向上した。

研究成果の概要（英文）：

To prevent a sharp rise in load in compression of plates, a compression process using load pulsation was developed. The mechanism of the load pulsation was investigated. The load pulsation was applied for backward extrusion, flange forming and bulk forming of stainless steel sheet. The forming load was decreased and accuracy of the formed shape was increased by the load pulsation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学，材料加工・処理

キーワード：塑性加工

1. 研究開始当初の背景

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。板鍛造は、板材から複雑な形状部品を成形する加工であり、材料を積極的に流動させて肉厚分布をつけるなどしており、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。通常の板金成形では板材は主に引張変形によって成形されるが、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問題が

ある。また、板鍛造製品は機構部品として使用されることが多く、要求される寸法精度が高くなっており、バルク鍛造製品以上の精度が要求されており、金型の弾性変形量も無視できなくなっている。

すえ込み加工や引抜き加工などにおいて高サイクル振動である超音波を工具に与えることによって、成形荷重を大きく低減させることができる。超音波を付与することによって変形抵抗を低減でき、再潤滑による摩擦低減効果も現れる。しかしながら、高い工具

面圧および大型部品の成形では現状の超音波発生装置の能力は十分ではなく、また複雑な金型内に振動装置を組み込むのは容易ではなく、実用化はあまり多くない。一方、超音波のような高サイクルではなく低サイクル振動の利用も考えられ、対向液圧絞り加工において低サイクル振動により成形荷重を低減させ、限界絞り比を向上させている。また、チューブ hidroフォーミングにおいて内圧を振動させることによってしわの発生を防止して成形限界を向上させている。

最近スライドモーションが制御できるサーボプレスが開発され、加工荷重を低サイクルで振動できるようになってきており、超音波振動などの付加的な装置なしに振動加工ができるようになってきている。サーボプレスを用いて深絞り加工やしごき加工などにおいて工具を素材から数回離すことによって、再潤滑して摩擦を低減させて成形限界や限界しごき率を向上させている。

2. 研究の目的

本研究では、板材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、摩擦低減メカニズムについて明らかにする。また、荷重振動鍛造を薄肉部品の成形に適用し、その効果について調査する。

3. 研究の方法

荷重振動による摩擦低減の特性を調べるために、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検討した。また荷重振動鍛造の応用として後方押し出し、軸付きフランジ部品のフランジ成形、ステンレス合金板の段差付け加工に適用して振動ありとなしを比較した。

4. 研究成果

(1). 荷重振動のメカニズム

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、図 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 $0.08\mu\text{mRa}$ 、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。

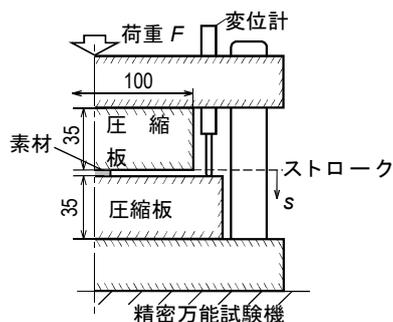


図 1 アルミニウム合金板の荷重振動圧縮に用いた工具

圧縮加工における荷重振動の経路を図 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 α とし、除荷量はその積 αF_i である。除荷率 α 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。

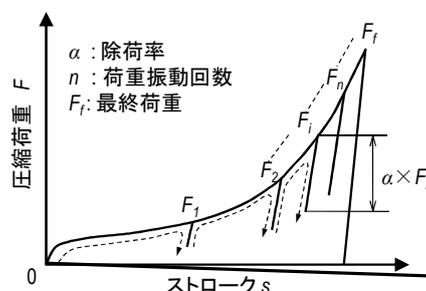


図 2 荷重振動圧縮における途中除荷経路

除荷率 $\alpha = 0, 75\%$ 、荷重振動回数 $n = 4$ 、最終荷重 $F_f = 200\text{kN}$ における圧縮荷重-ストローク曲線と圧縮後の素材を図 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。

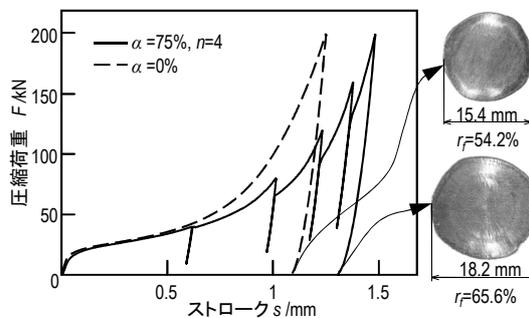


図 3 $F_f = 200\text{kN}$ における荷重振動ありとなしの荷重ストローク曲線と圧縮後の素材

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

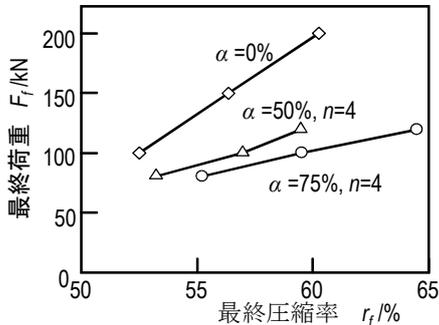


図 4 最終荷重と最終圧縮率の関係

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 $\alpha=75\%$, $n=4$, $F_f=200\text{kN}$ の条件で行った。

4 回目の荷重振動前後の変形形状を図 5 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。

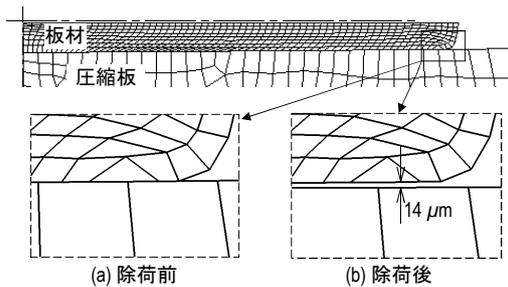


図 5 $\alpha=75\%$ における荷重振動前後の有限要素シミュレーションの変形形状

有限要素シミュレーションで生じた隙間について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、生じる隙間に腐食液を浸入させて素材を腐食させることによって検証した。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。再び荷重を荷重して

4 回目の荷重振動直前に腐食液を素材周囲に満たし、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た。

腐食された素材端部を図 6 に示す。 $\alpha=0\%$ では素材周辺部は腐食されていないが、 $\alpha=25\%$ 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。 $\alpha=75, 90\%$ のように α 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。

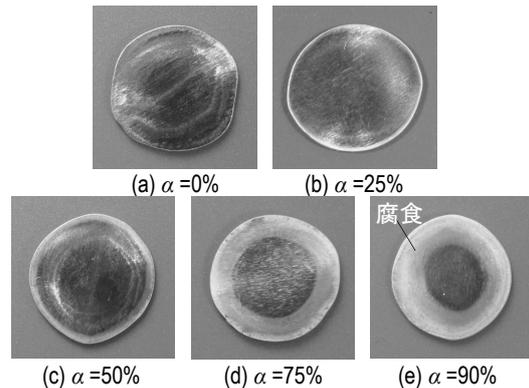


図 6 腐食液が浸入して腐食された素材表面端部

荷重振動による自動再潤滑のメカニズムを図 7 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図 7(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図 7(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。

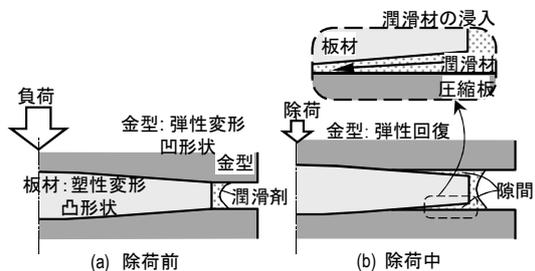


図 7 荷重振動による自動再潤滑のメカニズム

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図 8 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.

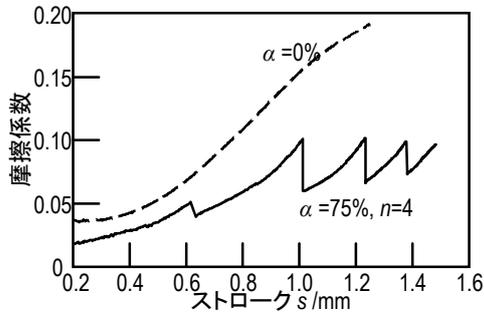


図 8 $F_f=200\text{kN}$ における荷重振動ありと無しでの平均摩擦係数とストロークの関係

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. 平均除荷率が 80-90% になるようにスライドモーションを設定し, クランクモーションと比較した. $r_f=70\%$ における振動モーションとクランクモーションの荷重-ストローク曲線を図 9 に示す. $s=1.2\text{mm}$ 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. サervo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.

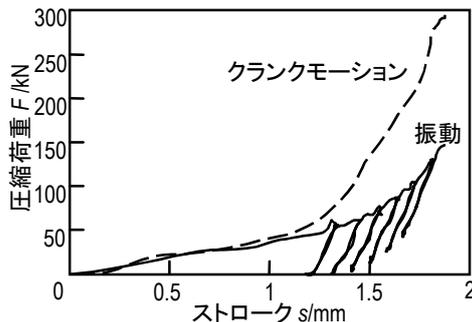


図 9 $r_f=70\%$ における荷重-ストローク曲線

(2). 後方押し出し

後方押し出しへの応用を試みた. 後方押し出しに用いた工具を図 10 に示す. 素材には高さ 8 mm, 直径 20 mm の焼鈍した純銅 C1100 を用いた. 押し出し比は 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 Δs で行った.

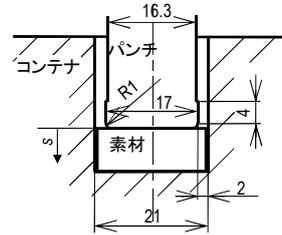


図 10 荷重振動後方押し出しに用いた工具

最大荷重 $F_f=240\text{kN}$ における除荷率 $\alpha=0, 75, 100\%$ で得られた押し出し容器素材断面を図 11 に示す. 同じ最大荷重においても, 除荷率 α の増加とともに側壁部高さ h が高くなる.

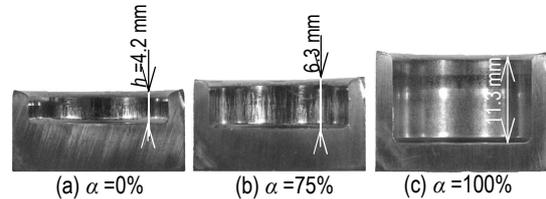


図 11 $F_f=240\text{kN}, \Delta s=0.1 \text{ mm}$ における押し出し容器素材断面

容器内側壁表面粗さを図 12 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た.

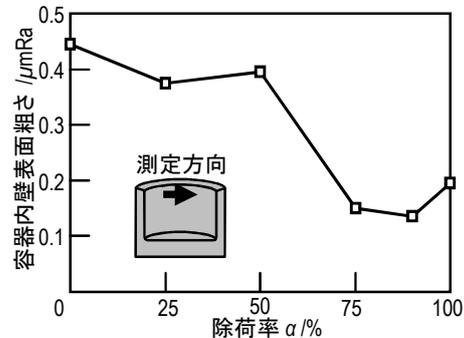


図 12 $F_f=240\text{kN}$ における容器内壁表面粗さに及ぼす除荷率の影響

(3). 軸フランジ成形

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る. そこで, 荷重振動を応用して荷重の低減を試みた. 図 13 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. 焼鈍したアルミニウム合金 A5056 丸棒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. 荷重振動は一定のフランジ圧縮率間隔 β で行った.

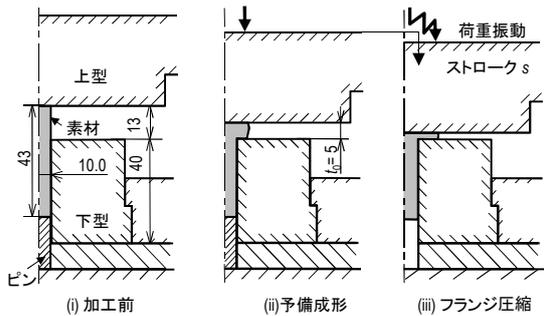


図 13 荷重振動圧縮による軸へのフランジ成形方法

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を図 14 に示す。荷重振動なしと比べて、荷重振動を行うと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、荷重振動なしでは上面にくぼみが生じている。

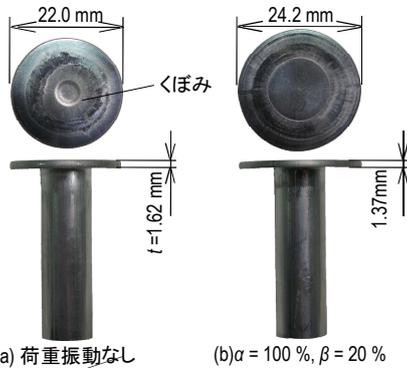


図 14 荷重振動なしおよび $\alpha = 100\%$, $\beta = 20\%$, $F_f = 300\text{kN}$ においてフランジ成形された製品

$\beta = 20\%$, $F_f = 300\text{kN}$ 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図 15 に示す。 $\alpha = 50\%$ 以上で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っている。

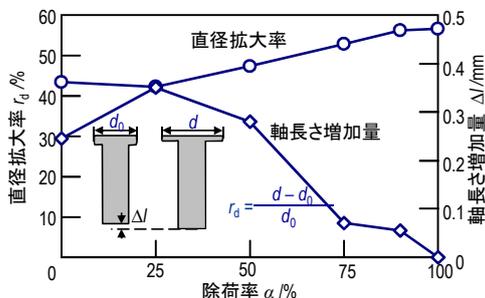


図 15 $\beta = 20\%$, $F_f = 300\text{kN}$ におけるフランジ成形後の最終直径拡大率と軸長さ増加量におよぼす除荷率の影響

$\beta = 20\%$, $F_f = 300\text{kN}$ におけるフランジ成

形後のフランジ上面くぼみ深さと除荷率の関係を図 16 に示す。図 15 に示した軸長さ増加量と対応するように $\alpha = 75\%$ 以上ではくぼみ深さも低減している。

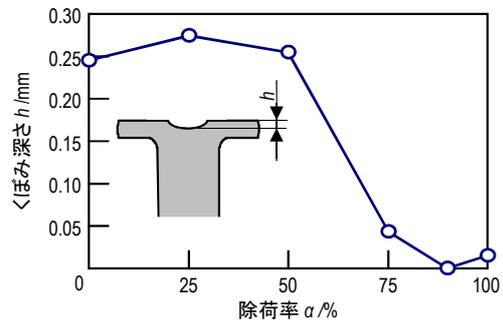


図 16 $\beta = 20\%$, $F_f = 300\text{kN}$ における軸端部フランジ成形後のフランジ上面くぼみ深さと除荷率の関係

(4). ステンレス合金板段差付け加工への適用

円形のステンレス合金板の外周部を圧縮して段差をつける加工に荷重振動を応用した。段差付け加工の工具を図 17 に示す。潤滑剤が常に板材周囲に保持されるよう粘土でシールをした。超硬圧縮板上の SUS430 板を穴の開いた超硬ダイスによって板材の外周部分のみを圧縮した。板材のズレ防止のために荷重振動における除荷は 90% とし、押し込みストロークに対して等間隔に 10 回行った。

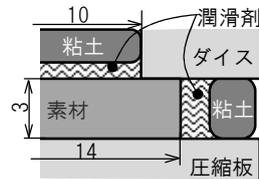


図 17 潤滑剤浸漬荷重振動による厚板圧縮および段差付け加工

図 18 にフランジ圧縮率 62% における段差付け加工後の断面を示す。段差付け加工ではフランジ部の材料の一部が凸部分に流動してダイス角部の摩擦が大きいと凸部中央と凸部側壁近傍で持ち上がる量に差が生じる。その結果、底部にひげや凸部上面にだれが発生する。振動ありでは振動なしに比べ、凸部上面のだれや底部のひげなどを低減することができおり摩擦が低減されている。

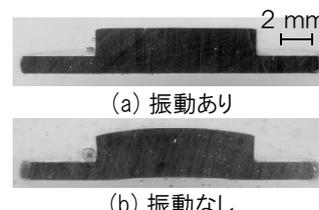


図 18 フランジ圧縮率 62% における段差付け加工後の断面

図 19 に段差付け加工における底部ひけ深さとフランジ圧縮率の関係を示す。振動なしでは $r = 50\%$ で底部ひけが発生している。振動ありでは $r = 62\%$ までひけが生じておらず、ひけの生じない限界圧縮率が向上している。

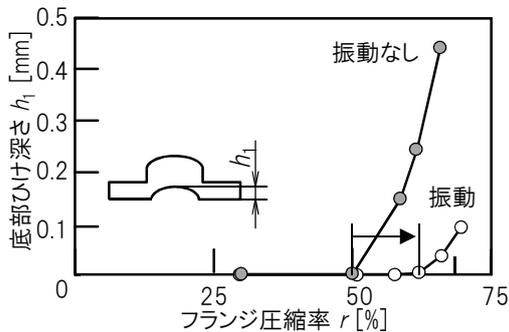


図 19 段差付け加工における底部ひけ深さとフランジ圧縮率の関係

$r = 65\%$ における凸部形状精度および表面粗さに及ぼす振動条件の影響を図 20 に示す。底部ひけと同様に振動ありでは振動なしに対して生じる欠陥が低減されており、表面粗さも同様となっている。

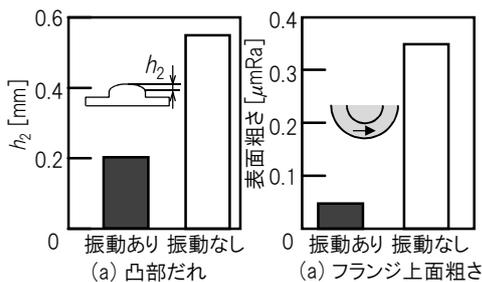


図 20 フランジ圧縮率 65% における凸部だれとフランジ表面粗さに及ぼす振動条件の影響

(5). 結言

摩擦を低減する荷重振動鍛造を開発し、そのメカニズムについて調査した。また、荷重振動を後方押し出し、フランジ成形および段差付け加工に応用してその効果を調べた結果以下の知見を得た。

- 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) 押し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。
- 4) フランジ成形において、荷重振動によって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た。

- 5) ステンレス合金の段差付け加工において荷重振動によって摩擦が低減し凸部のだれおよび底部のひけが抑制され形状精度が向上した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ① T. Maeno, K. Osakada, K. Mori, Reduction of Friction in Compression of Plates by Load Pulsation, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 51-7-8, 2011, pp. 612-617.

〔学会発表〕(計 3 件)

- ① 前野智美, サーボプレスを用いた摩擦を低減する荷重振動鍛造, 日本塑性加工学会プロセス・トライボロジー分科会 132 回研究会, 2011 年 12 月 6 日, 大阪大学.
- ② 前野智美, サーボプレスを用いた摩擦を低減する荷重振動鍛造, TECH Biz EXPO 2011 大学若手研究者シーズ発表会, 2011 年 10 月 20 日, ポートメッセなごや.
- ③ 前野智美ほか, 板鍛造における荷重振動を用いたステンレス鋼部品の段差付け加工, 日本塑性加工学会平成 23 年度塑性加工春季講演会, 平成 23 年 5 月 28 日, 早稲田大学.

〔その他〕

研究室ホームページ

<http://plast.me.tut.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前野 智美 (MAENO TOMOYOSHI) 豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助手
研究者番号：80505397

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

① 森 謙一郎 (MORI KENICHIRO)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80127167

② 小坂田 宏造 (OSAKADA KOZO)

大阪大学・名誉教授

研究者番号：50031109

(3) 研究協力者

① 中村 彰宏 (NAKAMURA AKIHIRO)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・学生

② 堀 亜由美 (HORI AYUMI)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・学生

③ 市川 雄基 (ICHIKAWA YUKI)

豊橋技術科学大学・学生