



T. Maeno

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

前野 智美*

1. まえがき

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¹⁾。しかしながら、図1に示すように、通常の板材プレス成形では、板材は主に平面方向の引張りや圧縮変形によって成形されるが、板鍛造では板厚方向への圧縮変形が多く、工具との摩擦の影響が大きくなって変形が拘束され、加工荷重が増大する²⁾。また、板鍛造製品は機能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。

スライドモーションが自由に制御できる機械式サーボプレスが開発され、その利用が増えている³⁾。成形中に低サイクルで振動させることができるようになった。プレス加工や冷間鍛造において、自由なスライドモーションの特性を活かしたプレス成形や冷間鍛造などが検討されている⁴⁻⁶⁾。

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。加えて、この自動再潤滑をステンレス合金板の段差成形、軸部品へのフランジ成形への応用も検討を行った。

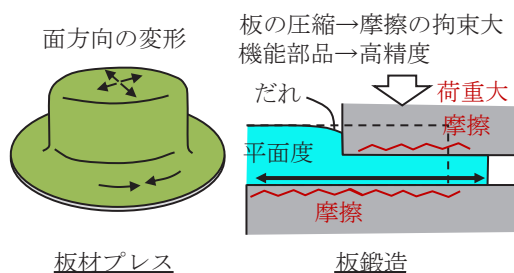


図1 板鍛造における問題点

2. 荷重振動加工方法⁷⁾

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 2 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㈱製)を精製水で 33% に希釈したものである。

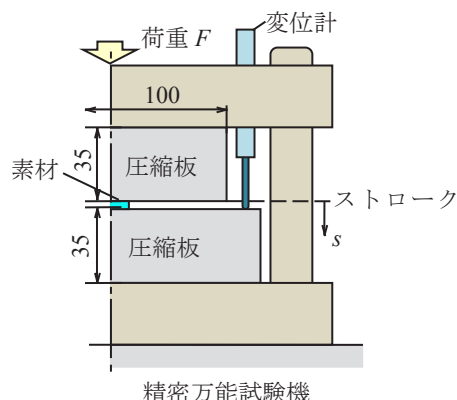


図2 アルミニウム合金板の荷重振動圧縮に用いた工具

圧縮加工における荷重振動の経路を図3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,

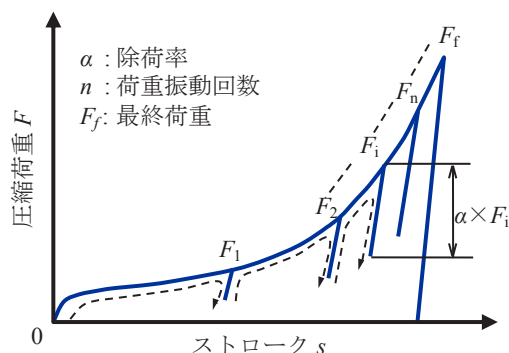


図3 荷重振動圧縮における途中除荷経路

* 横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授

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。

3. 荷重振動による加工荷重の低減⁷⁾

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図 4 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 ΔF だけ低下している。

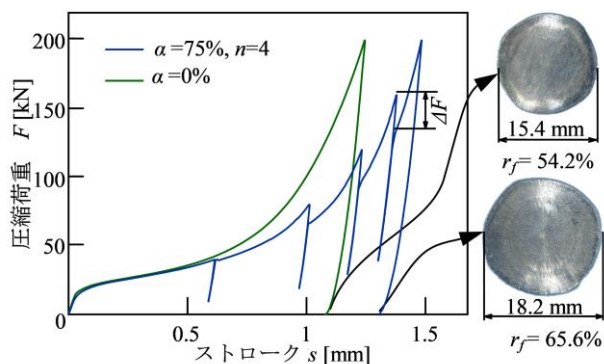


図 4 $F_f = 200$ kN における荷重振動ありとなしの荷重—ストローク曲線と圧縮後の素材

$n = 4, F_f = 200$ kN における 4 回目の再負荷の荷重低下量 ΔF 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 5 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。

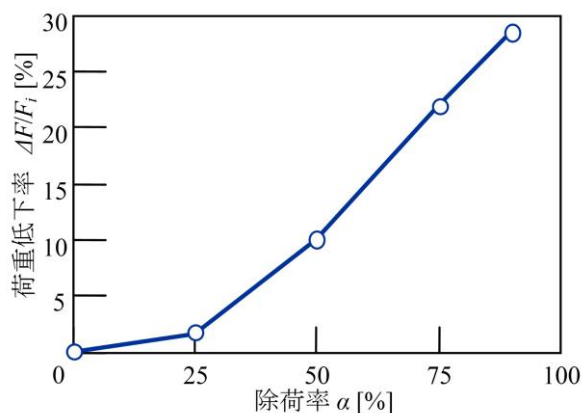


図 5 $n = 4, F_f = 200$ kN における 4 回目の再負荷の荷重低下率と除荷率の関係

$\alpha = 75\%, F_f = 200$ kN における最終圧縮率と荷重振動回数の関係を図 6 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。

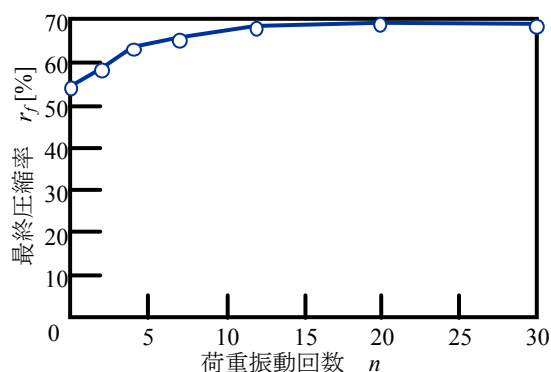


図 6 $\alpha = 75\%, F_f = 200$ kN における最終圧縮率と荷重振動回数の関係

各種の条件における最終荷重と最終圧縮率の関係を図 7 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。

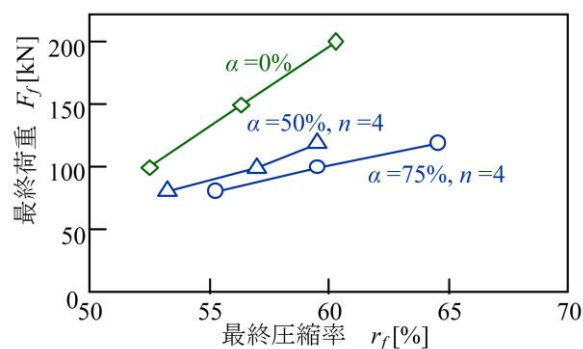


図 7 最終荷重と最終圧縮率の関係

4. 荷重振動圧縮による摩擦低減メカニズム⁷⁾

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、 $\alpha = 75\%, n = 4, F_f = 200$ 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 μm 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。

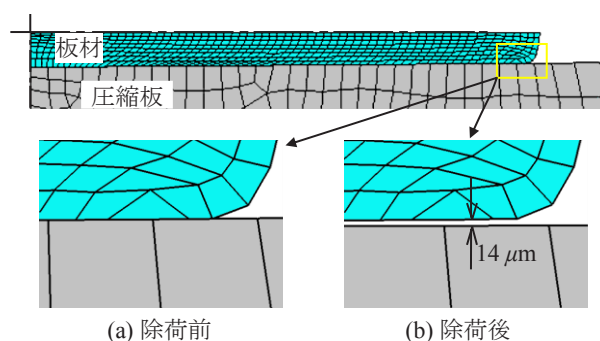


図 8 $\alpha = 75\%$ における荷重振動前後の有限要素シミュレーションの変形状

4.2 腐食実験による再潤滑の検証と定量的調査⁷⁾

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。

$F_r = 200\text{kN}$, $n = 4$ 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、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図 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) - (e) 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。

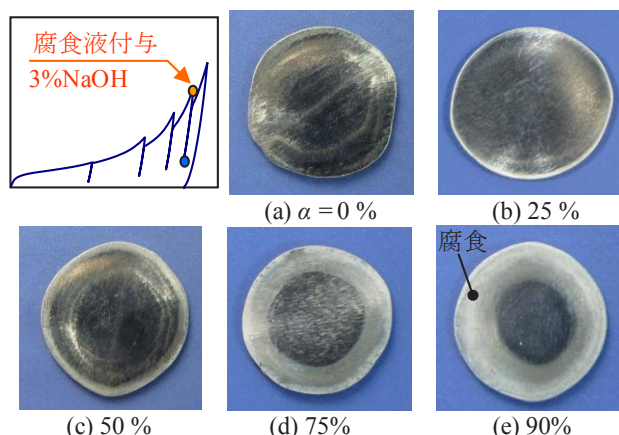


図 9 腐食液が浸入して腐食された素材表面端部

荷重振動における腐食された領域から求めた素材の接触面積率と除荷率の関係を図 10 に示す。除荷率が大きいほど隙間は大きくなって、接触面積率は小さくなっている。 $\alpha = 90\%$ では接触面積率は 20% まで低下しており再潤滑が非常に大きくなっている。有限要素シミュレーションによる計算結果と実験結果はほぼ一致しており、図 5 の荷重低下率と除荷率の関係とよく対応している。

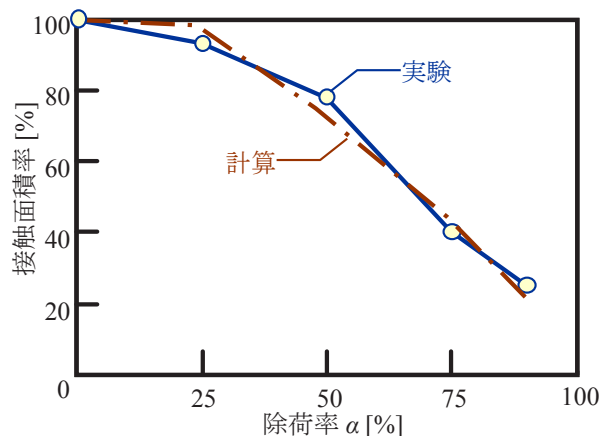


図 10 $F_r = 200\text{kN}$, $n = 4$ における素材と工具との接触面積率と荷重除荷率の関係

4.3 荷重振動による自動再潤滑メカニズム⁷⁾

荷重振動による自動再潤滑のメカニズムを図 11 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 11(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 11(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。

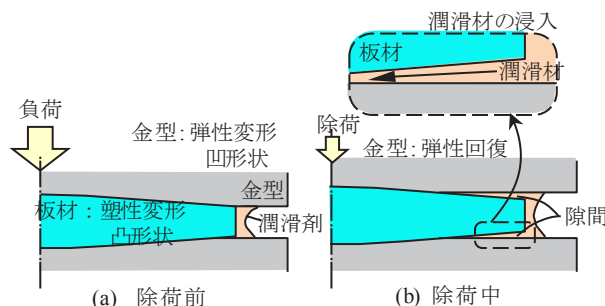


図 11 荷重振動による自動再潤滑のメカニズム

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。 $\alpha = 0, 75\%, n = 4, F_t = 200 \text{ kN}$ における平均摩擦係数とストロークの関係を図 12 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。

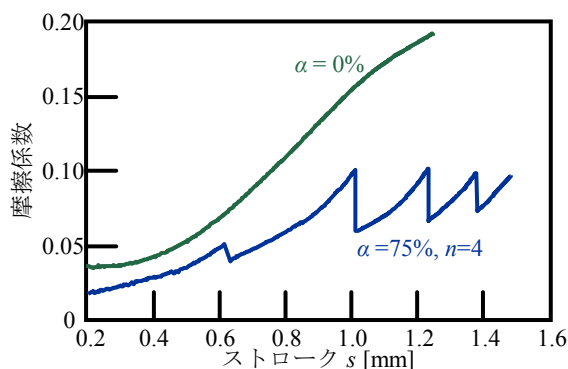


図 12 $F_t = 200 \text{ kN}$ における荷重振動ありと無しの平均摩擦係数とストロークの関係

5. サーボプレスへの適用および金型材質の低グレード化^{7,8)}

板鍛造では成形荷重が大きくなるため、変形抵抗の大きなステンレス合金などの成形は難しく、超硬金型などが必要となっている。図 13 に直径 10 mm 板厚 2 mm の SUS430 板材を、荷重振動ありとなしで圧縮した時の板材と工具の平均接触面圧を示す。使用した冷間工具鋼 SKD11 および超硬の限界面圧は、それぞれ 2.5 GPa および 5 GPa 程度である。超硬の荷重振動無しで得られる限界の圧縮率が 78% であるのに対して、SKD11 の振動ありにおけるそれは 72% となっており、あまり遜色がない。荷重振動を用いることによって、金型材質を超硬から低コストの合金工具鋼などへの置き換えも可能である。

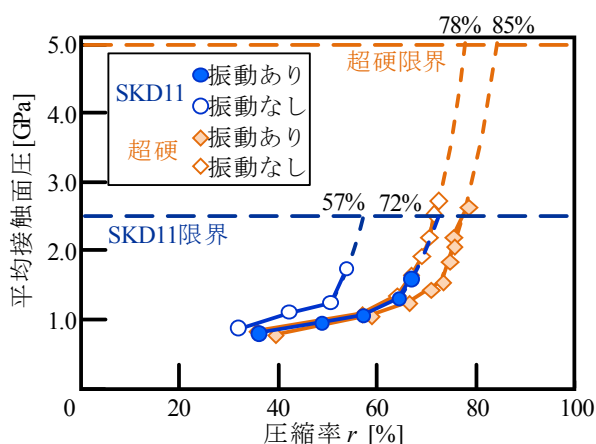


図 13 $\phi 10 \text{ mm}, t = 2 \text{ mm}$ の SUS430 板を荷重振動ありとなしで圧縮した時の平均接触面圧と圧縮率の関係

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、1500 kN 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、サーボプレスの最低スライド高さに合わせるために上工具の厚さを 188 mm, 下工具の厚さを 220 mm 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。

$r_t = 70\%$ 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 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、再潤滑されて再負荷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。

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図 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

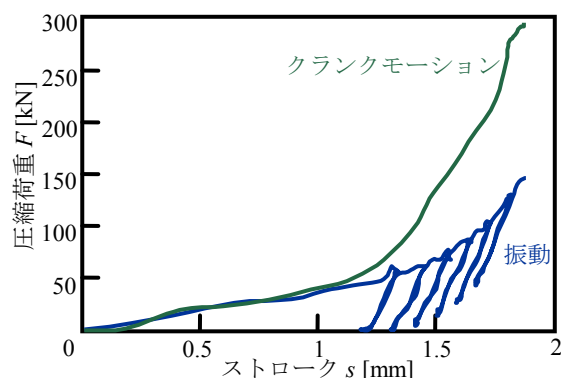


図 14 $r_t = 70\%$ における振動モーションおよびクランクモーションの荷重-ストローク曲線

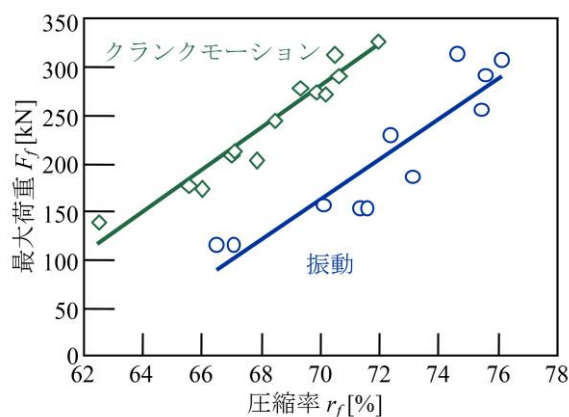


図 15 サーボプレスを用いた荷重振動ありとなしにおける最終荷重と最終圧縮率の関係

幅に低下しており、 $r_f = 70\%$ で比較した場合 40%程度の荷重低減効果が得られている。下死点から 2 mm における平均スライド速度はクランクモーションで 10 mm/s、振動モーションで 1.4mm/s となっており振動モーションの圧縮速度が小さくなっているが、冷間であるためひずみ速度依存性はほとんど無く、サーボプレス機での速度領域においても荷重振動による摩擦低減が有効である。

6. 板鍛造における欠陥の抑制⁸⁾

板鍛造ではプレス成形と異なり、材料流動が大きくなるため、鍛造に見られる“ひけ”などの欠陥が問題となることがある。前章までは、比較的均一な変形において荷重振動を検討したが、ここでは、不均一な変形において荷重振動による自動再潤滑がもたらす効果について検証を行った。図 16 にステンレス合金円板の段差成形に用いた金型を示す。ここでは自動再潤滑の効率を高めるために、図 16 (b), (c)に示すような、板材を潤滑剤中に浸して成形を行う潤滑剤浸漬成形も行った。潤滑剤浸漬では、潤滑剤が常に板材周囲に保持されるよう粘土によってシールをした。また、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、押込みストロークに対して等間隔に 10 回行った。潤滑剤は水溶性潤滑剤 SE-65CP(スギムラ化学工業)(株))を精製水で 33%に希釈して用いた。加工前の板厚から圧縮された割合の圧縮率 r に対して、潤滑剤浸漬と塗布の結果を比較した。

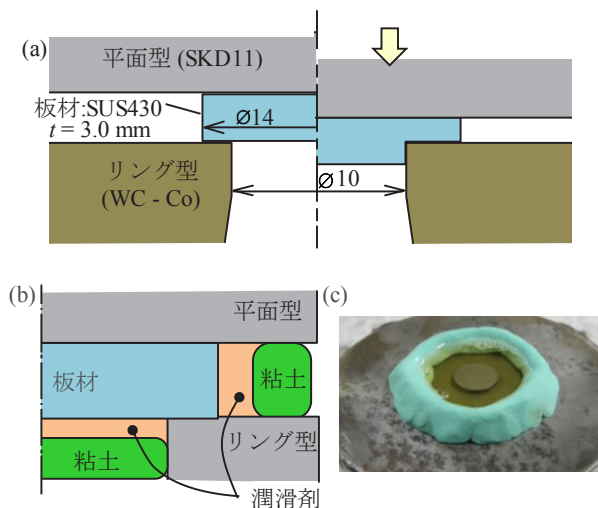


図 16 ステンレス合金円板の段差成形に用いた金型と潤滑浸漬成形方法

図 17 に荷重振動ありとなしで段差成形したステンレス合金板の断面を示す。荷重振動なしでは、潤滑剤塗布も浸漬も凸部にだれ、底部にひけが生じている。一方、荷重振動ありでは、潤滑剤塗布においては、ひけの深さが小さくなっており、潤滑剤浸漬では、ほとんどだれやひけを生じていない。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するが、フランジ部の摩擦が高いと凸部に流入

する材料が増える。また、ダイス角部では高い摩擦のために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、底部にひけ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けなどを低減することができている。

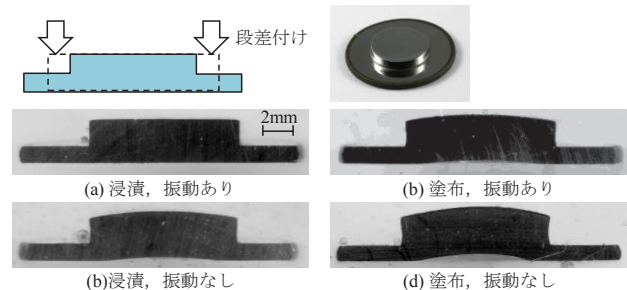


図 17 荷重振動ありとなしで $r = 62\%$ の段差成形後のステンレス合金板の断面

図 18 に段差成形における底に生じたひけの深さとフランジ圧縮率の関係を示す。振動なしでは浸漬も塗布も $r = 50\%$ で底部ひけが発生している。塗布・振動ありでは $r = 55\%$ 以上でひけが生じたが、浸漬・振動ありでは $r = 62\%$ までひけが生じていない、ひけの生じない限界圧縮率が向上している。また、潤滑剤を浸漬しても荷重振動を行わないと摩擦低減効果は得られていない。

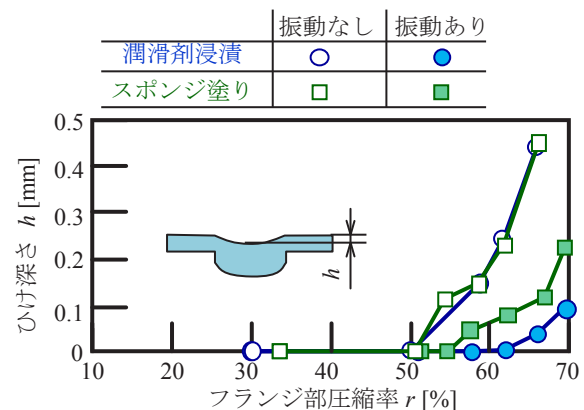


図 18 段差成形におけるひけの深さとフランジ圧縮率の関係

7. 軸付きフランジ部品への応用⁹⁾

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。図 19 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。軸の端部および中間部に据込み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、荷重振動なしで据込みによって厚さ 5 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、予備成形に用いた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 1 MN の油圧プレス機を用いて、圧縮時の速度が 3 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 β で行った。

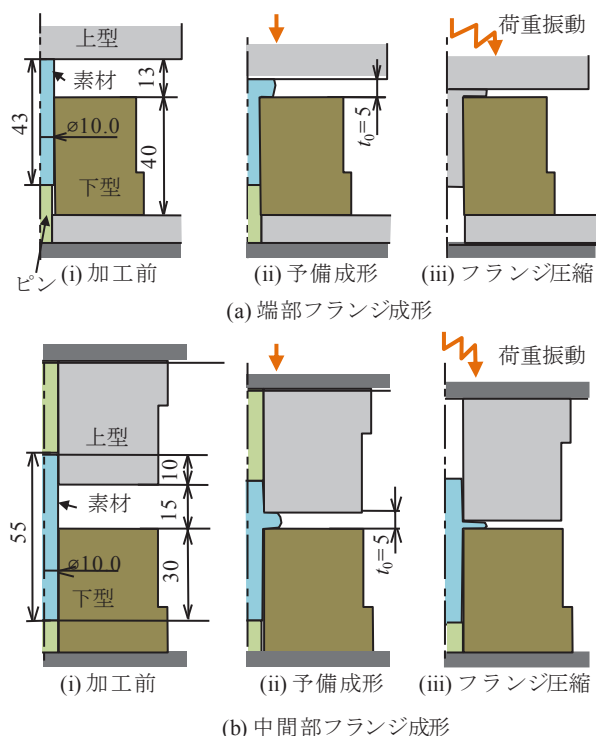


図 19 荷重振動を用いた圧縮による軸へのフランジ成形方法

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), $F_f = 300\text{kN}$ において軸端部にフランジ成形された製品を図 20 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ひけが生じている。

$\beta = 20\%$, $F_f = 300\text{kN}$ 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 21 に示す。軸長さ増加量 Δl は予備成形の軸長さとして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。

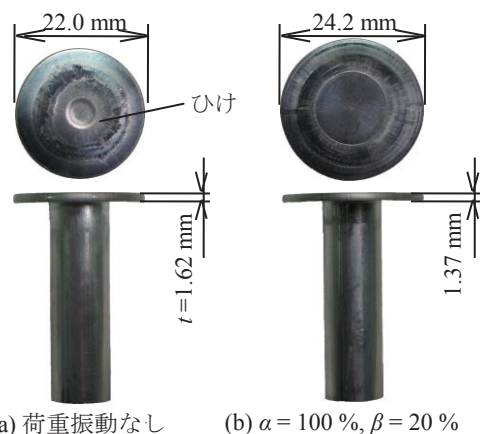


図 20 $\alpha = 0, 100\%$, $\beta = 20\%$, $F_f = 200\text{kN}$ において軸端部に成形されたフランジ

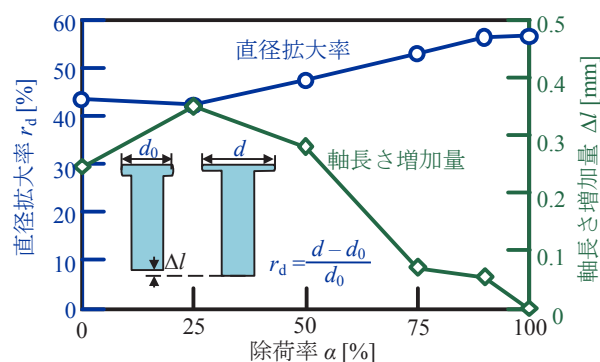


図 21 $\beta = 20\%$, $F_f = 300\text{kN}$ における最終直径拡大率と軸長さ増加量におよぼす除荷率の影響

図 22 に荷重振動なしおよび $\alpha = 100\%$, $F_f = 300\text{kN}$ で軸中間部にフランジ成形した結果を示す。 $\alpha = 100\%$, $\beta = 20\%$ では荷重振動なしに対して、直径が大きく、薄いフランジを成形することができた。また、軸長さは荷重振動なしに対して小さく、軸方向に押出される量も低減している。

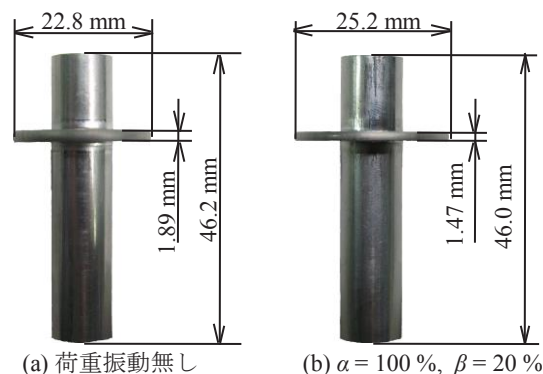


図 22 $\alpha = 0, 100\%$, $\beta = 20\%$, $F_f = 300\text{kN}$ において軸中間部に成形されたフランジ

図 23 に $\alpha = 0, 100\%$, $\beta = 20\%$ において軸中間部フランジ成形後の直径増加量と軸長さ増加量の関係を示す。荷重振

動なしでは、フランジ部の摩擦が大きく、軸方向への材料流動が大きくなっている。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た。

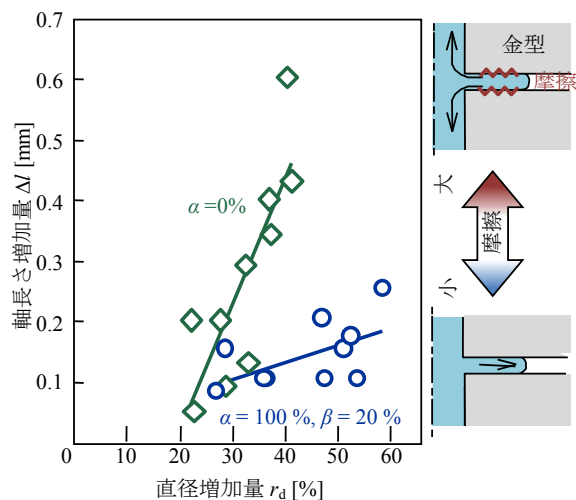


図 23 $\beta = 20\%$, $F_f = 300 \text{ kN}$ における最終直径拡大率と軸長さ増加量におよぼす除荷率の影響

8. あとがき

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、サーボプレスにおいてもその効果を確認し、ステンレス合金板の段差成形、軸部品へのフランジ成形への応用を検討した。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) 板の圧縮において、位置制御のサーボプレスを用いた実加工に近い成形速度においても自動再潤滑による荷重低減が得られることを確認した。
- 4) ステンレス合金板の段差成形において、ひけの発生を抑制した。
- 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た。

謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人天田財団（当時：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、同財団に感謝いたします。また、研究に協力して頂いた当時豊橋技術科学大学院生の中村彰宏氏、堀亜由美氏に感謝します。

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.
- 3) K. Osakada, K. Mori, T. Altan, P. Groche: CIRP Annals – Manufacturing Technology 60-2(2011), 651–672.
- 4) 菅沼俊治: 塑性と加工 49-565(2008), 118-122.
- 5) 玉井良清 他: 塑性と加工 51-592(2010), 450-454.
- 6) R. Matsumoto, S. Sawa, H. Utsunomiya, K. Osakada: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 60-1(2011), 315-318.
- 7) 前野智美・小坂田宏造・森謙一郎: 塑性と加工, 50-585 (2009), 951-955.
- 8) T. Maeno, K. Mori, A. Hori: Journal of Materials Processing Technology, 214-7 (2014), 1379-1387.
- 9) 前野智美・中村彰宏・森謙一郎・小坂田宏造：第 60 回塑性加工連合講演会, (2009), 97-98.