

逐次回転を伴う多軸揺動加圧法による鍛造加工特性の改善

研究報告者 廣田 健治

プロフィール



最終学歴	1995 年 3 月 名古屋大学大学院 工学研究科 機械工学および機械工学第二 専攻 博士後期課程修了
専門分野	塑性加工
学 位	博士（工学）
所属団体	福岡工業大学 工学部 知能機械工学科
役 職 名	教授

今後の抱負

金属の塑性加工は大量生産を支える主要な基盤技術の一つです。しかし、その多くはプレスによる一方向からの加圧で行われ、加工する形状によっては無理な材料流動を強制される場合があると考えられます。一方、陶芸やそば打ちなど人が物をこねる動作では、無意識のうちに抵抗を下げるよう加圧の向きを微妙に変えています。この例に学び、「傾ける」・「ずらす」という繊細な動作をプレス機械に応用した新たな塑性加工方法の開発に数年前から取り組んでいます。今回、助成をいただいた研究課題は、鍛造加工中に「傾ける」動作と「回す」動作を加えたもので、加工荷重の低減に加え形状精度の改善にもつながりました。現在は、加圧に「ずらす」動作を加える鍛造加工に取り組んでおり、今後は鍛造以外の塑性加工法への展開を視野に入れて新たな研究計画を立てています。

1. はじめに

近年、自動車部品では燃費改善の観点から部分的に厚さを変化させる厚板部品の需要が増えており、板鍛造加工という新たなカテゴリーが塑性加工学会の中で生まれている¹⁾。この種の部品は加圧面積に対して厚さが薄い低アスペクト比断面形状が多く、摩擦の影響により加工荷重が高まることが問題となっている。この課題に対し、筆者らは直動加圧動作の連携により工具面をフレキシブルに傾斜させながら加圧を行う多軸揺動加圧法を提案し、加工荷重の低減効果や変形特性について検討を行っている²⁾³⁾。これまでに、円柱の圧縮実験において通常の加圧よりも40%ほど荷重を低減できることを実証している²⁾。また、変形に関して揺動方向の変形が促進されることが判明した。今回の助成課題ではこの特性を活用して本加工法の付加価値をさらに高めることを目指す。具体的には現状の装置に揺動方向を変える機構を追加し、次の2つの目的に対して研究を進める。

- (1) 軸対称性が求められる部品を想定し、逐次的に揺動方向を変えることで真円度の向上を目指す。そのための加工要件を明らかにする。
- (2) 非軸対称の部品形状を想定し、部品形状に沿った方向へ展伸を促進させることで成形輪郭に沿った充填の改善をはかる。そのための加工要件を明らかにする。

2. 加工法の特徴

図1に本加工法の特徴を揺動鍛造⁴⁾と比較して示す。両工法とも加圧中の接触面積を少なくすることで荷重の低減を実現している。揺動鍛造では円錐状の工具を傾斜した状態で回転させながら加圧を行う。この場合、下型側に加圧用の動力源、上型側に回転用の動力源と傾斜を与える機構を備えた専用プレスが必要になる。一方、本加工法では複数の直動アクチュエータで揺動盤を多点支持し、各加圧軸の動作のタイミングを調節することで傾斜を与える。加圧用の動力源を並列に配置すればよく、傾斜角を調整する機械的な機構も不要なため、揺動鍛造に比べて装置を小型化できる。また、すべての加圧軸を同期させて駆動すれば通常のサーボプレスとしても使用でき汎用性がある。さらに、各アクチュエータを独立に変位させるため、加工の途中から揺動動作を与えたり揺動条件を変えることも可能であり、荷重や形状の変化に応じた効率的な加圧を実現できる。ただし、揺動鍛造と異なり平坦

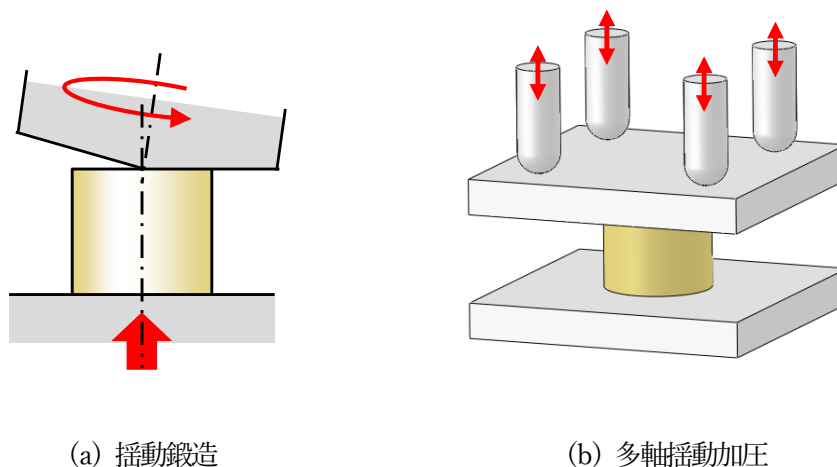


図1 接触面積を低減する鍛造手法

な工具を用いているため被加工材の端面には傾斜が残留する。これはフレキシブルな揺動動作とのトレードオフとなるが、揺動条件を選べば端面を平坦に近づけることも可能である。

3. 揺動加圧装置

図2に揺動加圧装置を示す。揺動盤は4つの加圧軸A～Dでベース盤に対して支持されており、各加圧軸はサーボプレス用の直動アクチュエータ（定格推力 3.2kN）により独立に駆動させる。各加圧軸の昇降変位を時間に対して連携させて調整することで揺動盤にフレキシブルな傾斜を与えることができる。ただし、それだけでは揺動盤が水平方向にずれてしまうため、これまでは揺動盤の下面に球面軸受を設置してベースに対して昇降可能な状態でガイドしていた。この場合、揺動盤上に設置された工具の加圧面は球面軸受より上方にあるため揺動により左右に揺れる。本助成課題では前述の1.(2)において金型内にパンチが嵌合した状態での揺動動作を想定しているため、次の2点の改修を行った。まず、球面軸受の代わりに2つのラジアル軸受を揺動盤に取り付け、図2の写真に示すように前後の支柱に対して昇降可能な状態でガイドするようにした。このとき、ラジアル軸受の中心を右図のように下工具の加圧面と一致させることで加圧面の中心で揺動が行われるようにした。しかし、この構造ではラジアル軸受の回転軸と直交方向にしか揺動を与えることができない。そこで、上型側にDD（ダイレクトドライブ）モータを設置した。モータは円筒状のインナードライブタイプを選定し、回転部Ⅰと上型ユニットⅡをボルトで固定する。一方、上型ユニットⅡはDDモータ中心部の穴を通して上方のロードセルに接触させる。DDモータは左右の支柱に昇降可能な状態でガイドしており、

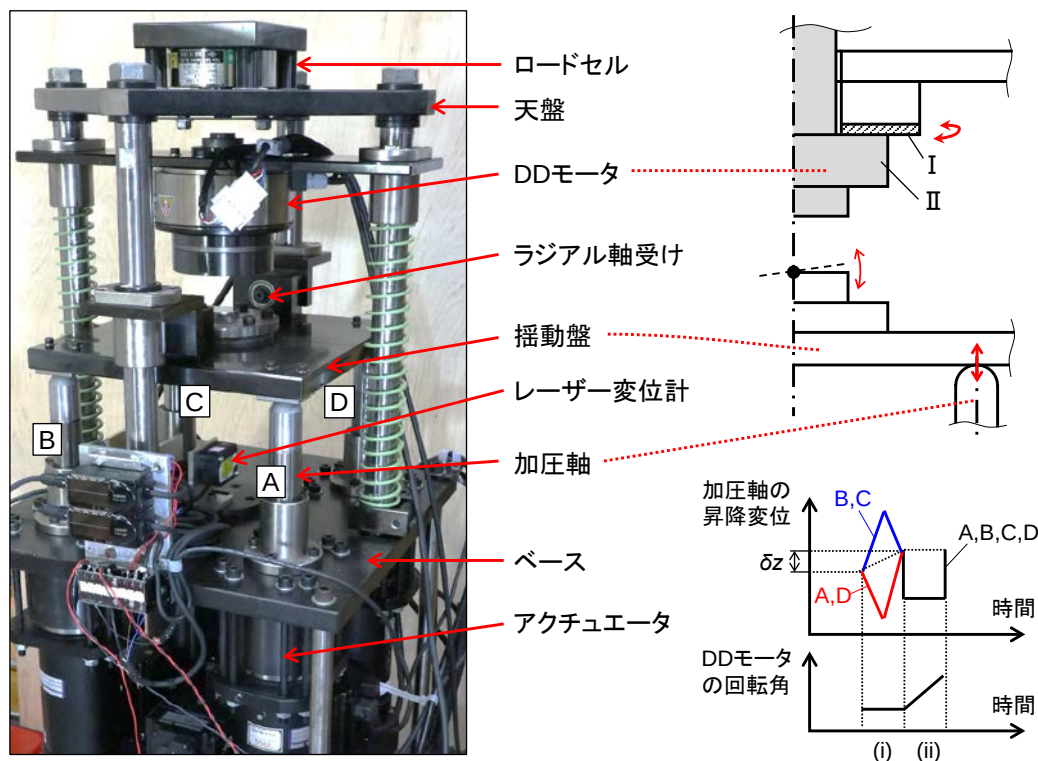


図2 揺動加圧装置の構造と工具の動作

鍛造荷重がモータに直接かからないような構造とした。図2の右下には時間に対する4つの加圧軸とDDモータの回転角の指令値の変化を模式的に示している。(i)ではラジアル軸受けの中心軸に対して対称位置にある2軸を交互に上下に昇降させる。この間に δz だけ全ての加圧軸を上昇させることで揺動をともなった加圧が行われる。(ii)ではDDモータで揺動方向を変化させるが、その際にはモータにトルクがかからないよう揺動盤全体を下方に逃がして除荷した状態で行う。

4. 揺動方向の均等化に関する検討

4-1 実験条件および解析条件

被加工材にはA1070の焼きなまし材を用い、丸棒から直径 $d_0=8\text{mm}$ 、高さ 12mm の円柱試片を切削加工で製作した。加圧は図3(a)のように被加工材の上部 4mm を拘束して行った。圧下量は未拘束部 $h_0=8\text{mm}$ に対して高さ方向に50%とし、加圧の後半25%で揺動加圧を行った。揺動角度は $\theta=1^\circ$ 、揺動回数は $n=40$ 回とし、図2に示したように1回の揺動動作を終えた後DDモータにより揺動方向を一定ピッチ $\delta\varphi$ だけ変化させる。この実験では $\delta\varphi$ を $9\sim 90^\circ$ の範囲で変化させ、比較のために $\delta\varphi=180^\circ$ の一方方向のシーソー式揺動加圧も実施した。加圧速度は 1mm/min とし、潤滑剤として二硫化モリブデンを塗布した。また、比較のために無潤滑での実験も行った。

FEM解析には塑性加工用の有限要素解析ソフト Simufact Forming 16.0 を使用し、被加工材は弾塑性体、工具は剛体として図のように三次元でモデル化した。被加工材の応力ひずみ関係はA1070-Oの圧縮試験の結果から求めた近似式を用い、工具と被加工材間の摩擦係数は実験の荷重曲線に最も一致した値としてせん断摩擦係数 $m=0.1$ とした。また、揺動加圧時に除荷を行う際にモデル間の接触エラーを避けるため、上工具と被加工材との間に解離応力を拘束条件として設定した。

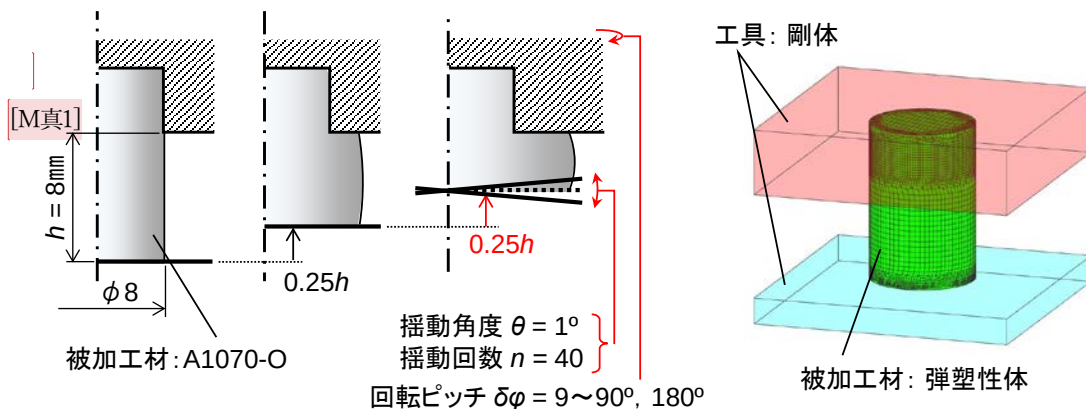


図3 実験条件およびFEM解析モデル

4-2 実験結果

図4に揺動方向の回転が荷重低減効果に及ぼす影響を示す。縦軸の荷重低減率は圧下率50%で取得し、揺動付与による荷重低減量 ΔF を揺動を与えない場合の荷重 F で除して求める。回転ピッチによらず無潤滑の方が荷重低減率がやや高くなっている。これは、揺動を与えない場合に荷重が増加することで ΔF が増えたことによる。回転ピッチに関しては $\delta\phi=9\sim90^\circ$ ではピッチを大きくするにつれて荷重低減率は増加する傾向がみられた。しかし、 $\delta\phi=180^\circ$ のシーソー式の揺動加圧では、 $\delta\phi=90^\circ$ の結果よりも荷重低減率はやや低下しており不連続になっている。

図5に回転ピッチによる横断面の楕円率の変化を示す。楕円率は加工後の横断面の最小径に対する最大径の比で、1に近いほど真円に近づく。一方向への揺動が繰り返される $\delta\phi=180^\circ$ では潤滑の有無によらず揺動方向に楕円化しており楕円率は1.1程度となった。一方、 $\delta\phi$ が 90° 以下では潤滑による差が見られた。潤滑を行った場合にはピッチを細かくするほど楕円率は低下したのに対し、無潤滑ではピッチによらず1.02程度の値となった。縦軸上には単純に圧下した場合の結果を示しているが、 $\delta\phi=9^\circ$ の結果の方が楕円率が1に近いことがわかる。円柱素材を圧縮する場合、異方性や結晶粒が

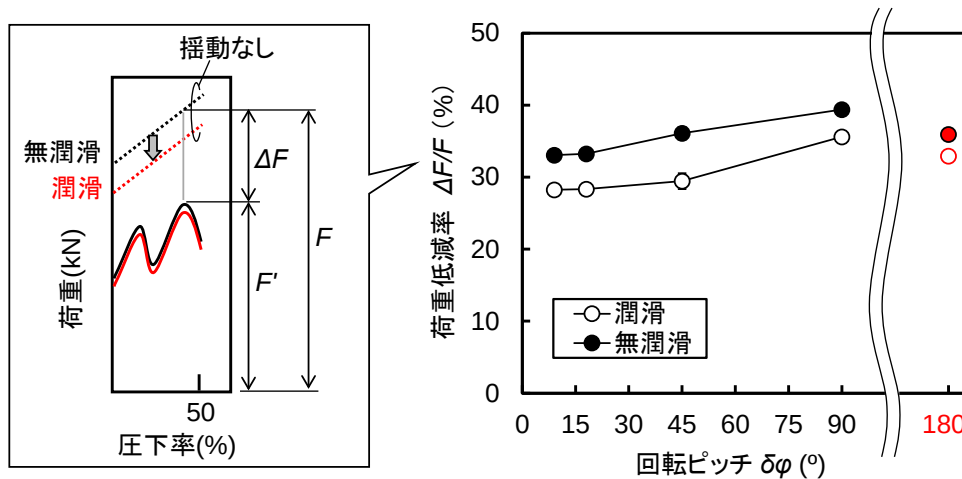


図4 揺動方向の回転ピッチによる荷重低減率の変化

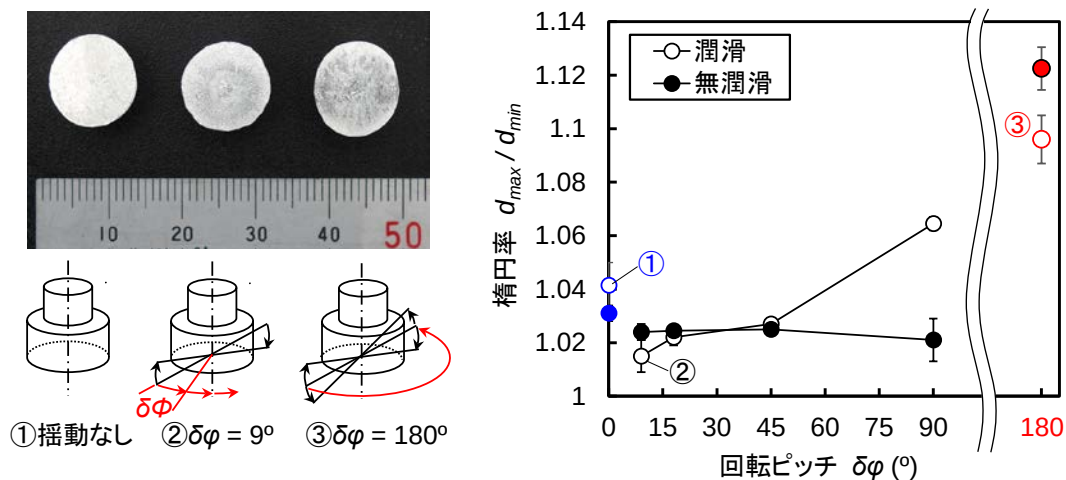


図5 揺動方向の回転ピッチによる試片横断面の楕円率の変化

大きいときに横断面の真円度が悪くなることがある。そのような場合に本工法で揺動方向を細かく変えることが有用であることが、今回の結果からうかがえる。

4-3 荷重低減率に関する考察

揺動工具で加圧を受けた試片端面にはわずかな傾斜が残留する。3D 光学プロファイラを用いて端面形状を三次元で測定し、傾斜域を推定した結果を図6の上側に示している。一方向の揺動となる $\delta\varphi = 180^\circ$ では傾斜域は半円状になっている。これに対し $\delta\varphi = 9\sim 90^\circ$ では傾斜域の重複が生じるため半円状の傾斜域に欠けが見られ、回転ピッチによって欠ける部分に差が見られる。測定は揺動荷重が最大となるサイクルで止めて試片を採取して行っており、工具と接触していない青色の部分の面積が図4の荷重低減率に関連すると考えられた。そこで、赤色と青色の面積比から工具接触面積の低減率を求め、荷重低減率との相関を調べた。図6のグラフがその結果である。点線が荷重低減率と面積低減率が等しい場合であるが、プロットはこの線に沿った正の相関を示しており、回転ピッチによって傾斜域の傾向が異なっても工具との接触面積で見れば、接触面積の少ない条件ほど荷重低減率が高くなっていると言える。また、プロットは点線よりやや下方に位置していることから、接触面積の減少率に比べて荷重の減少率が少ないことがわかる。すなわち、加工面圧がやや高くなっていると推察できる。

FEM 解析により図6に対応する状態の加圧方向の垂直応力分布を調べた結果を図7に示す。圧縮応力を示す水色から青色の領域が工具との接触域であり、その領域の形は図6の接触面積の実測結果と対応していることがわかる。図の応力分布の状態を②、回転ピッチを一つ戻した状態を①として、それぞれの応力分布を観察することで、接触域の形成過程を次のように考察した。図では $\delta\varphi = 90^\circ$

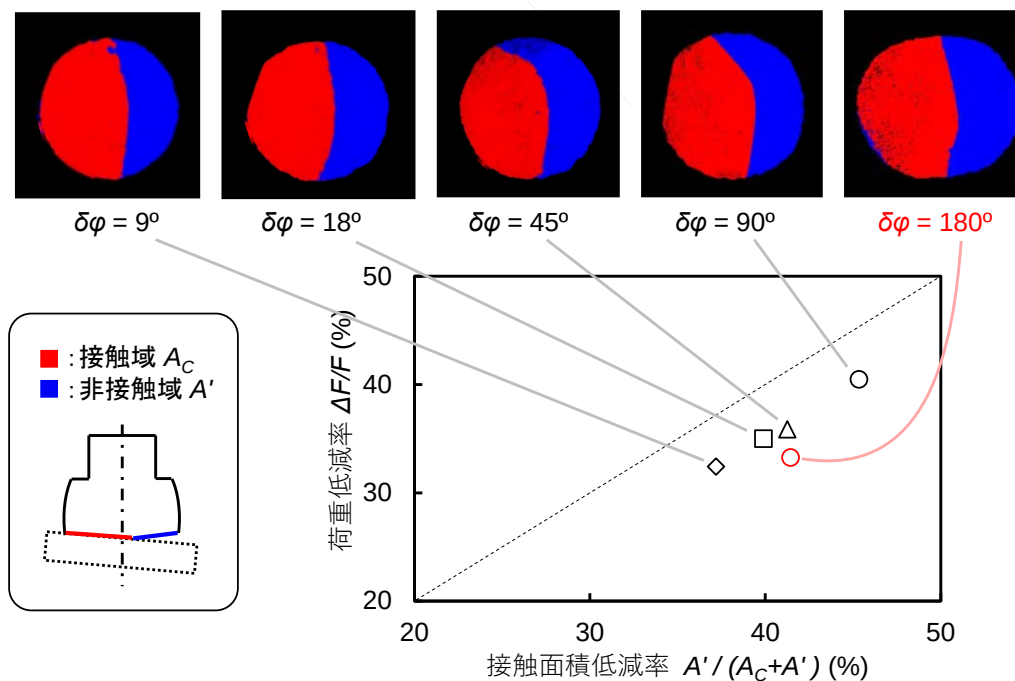


図6 揺動加圧時の工具接触面積と荷重低減率の相関（無潤滑状態）

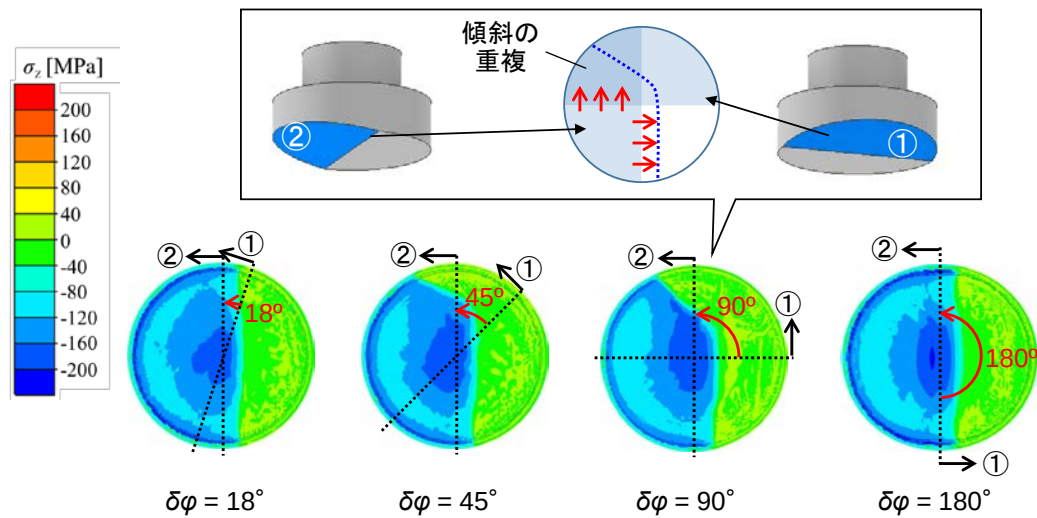


図7 FEM解析による工具傾斜時の接触面圧分布の推定

を例にとって示しているが、傾斜によって②の斜面が作られる際には、一つ前のピッチで作られた①の斜面が既に存在する。加圧によって材料は非接触域に広がるように流動し、②の傾斜方向（右）だけでなく傾斜の重複域の方向（上）へも材料流動が生じる。このように、回転ピッチによって傾斜の重複域や材料流動の方向が変わることで、半円が部分的に欠けたような接触域が形成されていると考えられる。

4-4 荷重低減率と加工面の平面度

3D 光学プロファイラを用いて加工後の試片端面に残留する傾斜角を測定した。回転ピッチによる残留傾斜角度と荷重低減率の違いを図8に示す。全ての条件において残留傾斜角度は工具に与えた揺動角度（図の点線）よりも小さくなっている。これは、工具が傾斜状態から平坦に戻る間にも加圧が進むためであり、揺動条件を選べば被加工材端面の平面度を向上させられることを示唆している。残留傾斜角度は $\delta\varphi = 180^\circ$ に比べて $\delta\varphi = 9 \sim 90^\circ$ の方が小さく、 $\varphi = 9 \sim 90^\circ$ ではピッチによる差は見ら

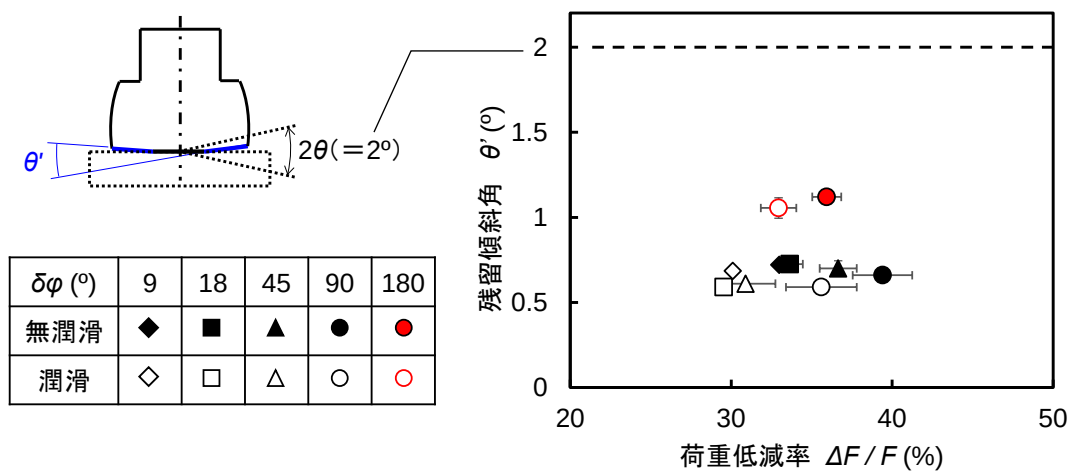


図8 試片端面の残留傾斜角と荷重低減率の相関

れない。また、残留傾斜角度と荷重低減率の間には揺動条件に対しては相関が見られることがわかっているが³⁾、今回の結果から回転ピッチに対しては相関は認められなかった。

5. 正方形輪郭の成形に関する検討

5-1 実験条件

金型を用いて円柱試片を多角形の角柱に成形する場合、側面が拘束されることで荷重が増加することが知られている⁵⁾。今回は図9のように円柱試片を正方形輪郭に成形する場合に揺動加圧を用い、荷重の低減と金型充填の改善を試みる。被加工材と実験装置は3-1で述べたとおりであるが、被加工材の寸法はアクチュエータの加圧能力の制約から直径6mm 高さ9mmとした。この円柱を高さ方向に50%圧縮し、その際に体積が円柱試片とほぼ等しくなるよう正方形の一辺の長さを7.5mmにした。加工の初期は通常の加圧を行い、試片が金型の側壁に接した圧下率37%以降で揺動を与える。揺動角度は $\theta = 1^\circ$ 、揺動方向は未充填が生じやすい正方形の角隅部に向かうように回転ピッチを $\delta\phi = 90^\circ$ とした。揺動回数是对角二方向の揺動を1回と数えて $n=100$ 回とした。バリを出す方向として図9に示すような横孔式と縦孔式を試み、バリの厚さは荷重の制約からそれぞれ0.3mm, 0.1mmとした。加圧速度は1mm/minとし、潤滑剤として二硫化モリブデンを塗布した。

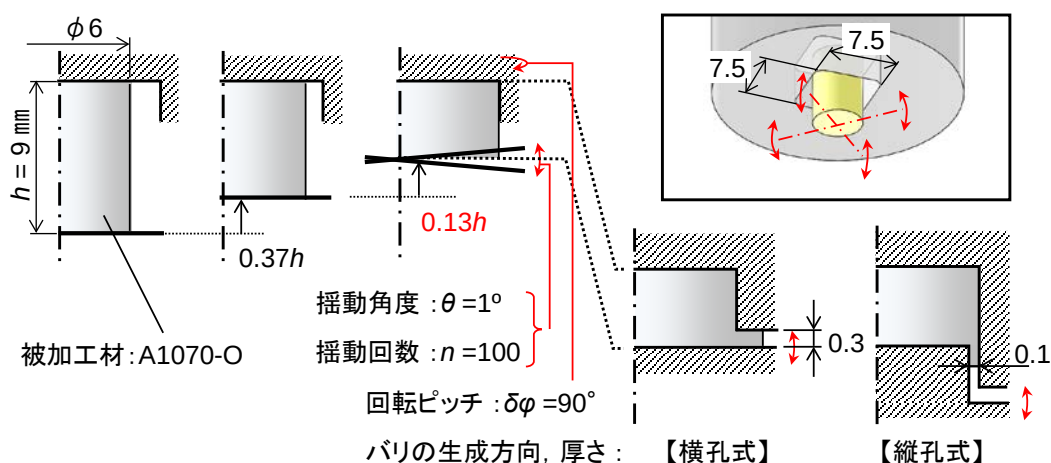


図9 実験条件（正方形輪郭成形）

5-2 荷重低減率

図10(a)に荷重線図を示す。揺動を与えない場合、圧下率40%以降で荷重が急増しているが、揺動を与えるとその増加が低く抑えられている。揺動時の荷重の変動が0に達しているのは、揺動方向を変える際に除荷しているためである。バリを出す方式に関して、揺動を与えない場合には荷重の差は見られないが、揺動を与えた場合には横孔式の方がやや低くなった。荷重低減率として数値化すると図10(b)のようになり、横孔式の方が8%ほど荷重低減効果が大いことがわかった。

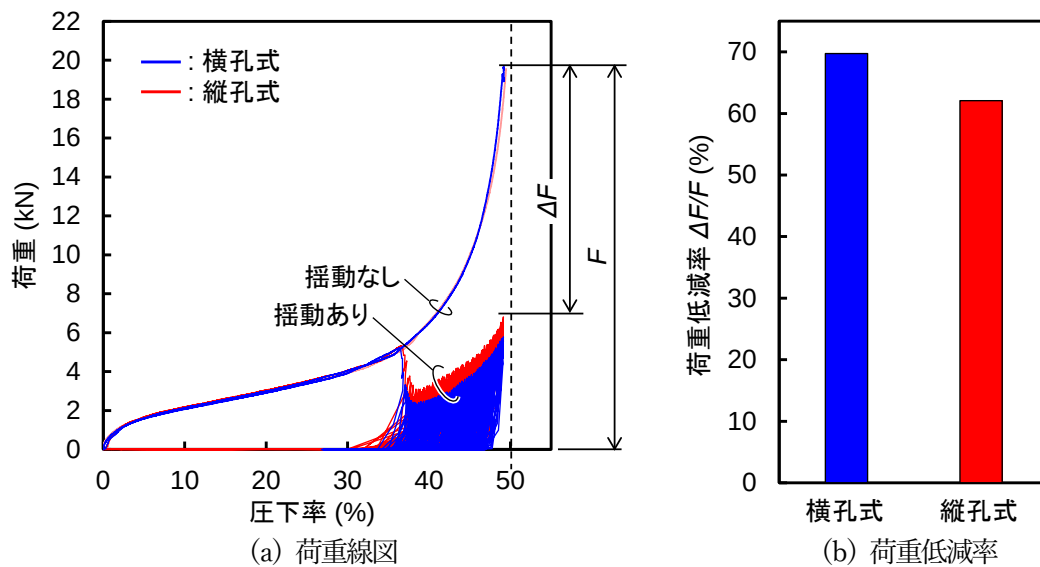


図 10 揺動の有無及びバリの生成方向による荷重の違い

5-3 充填形状

図 11 の左側に加工後の試験片の外観を示す。バリが生じている側が揺動工具側である。横孔式、縦孔式ともに揺動を与えた方がバリが大きく生じており、形状は各辺の中央で高くなるように花びら状になっていることがわかる。正方形輪郭の角部には未充填が見られ、揺動を与えた場合には未充填箇所が稜線付近に三角形の面として見える。未充填はバリの ある側で小さくなっており、揺動を受けた付近で充填が促進されていると言える。しかし、このことが高さ方向の充填の不均一につながっている。

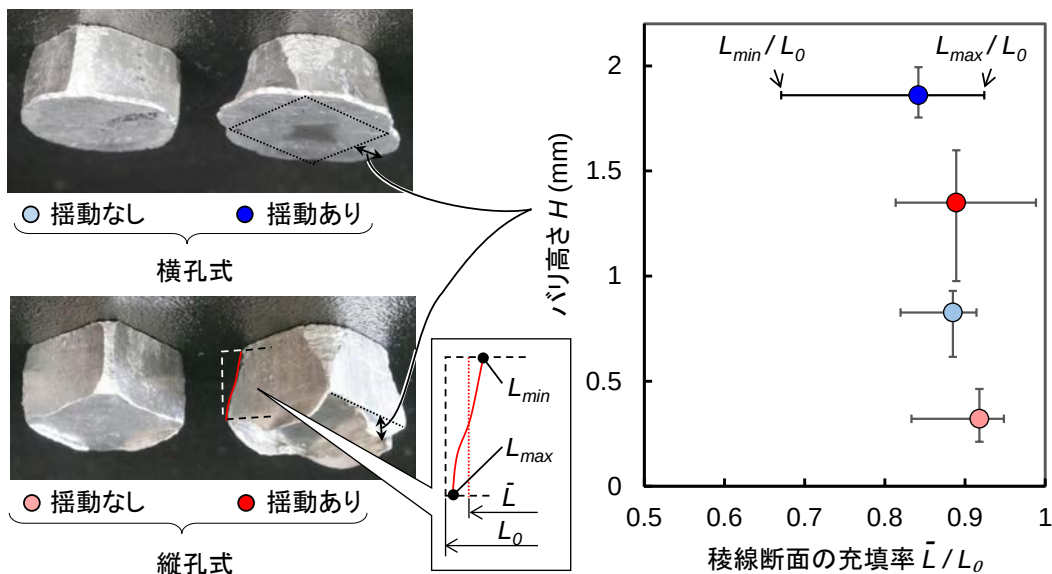


図 11 バリの高さと充填率の相関

充填の程度を比較するために、正方形の対角線を含む縦断面における充填率を求めた。二次元レーザ変位計を用いて稜線部分の形状を測定し、図のように正方形の中心から稜線までの長さ L を試片の高さ方向に測定して平均化した値を $\bar{L}$ 、正方形の中心から稜線までの長さを L_0 として $\bar{L}/L_0$ を充填率とする。バリの高さや充填率を定量化して比較した結果を図 11 の右側に示す。バリは 4 つの辺でそれぞれ測定し、平均値とばらつきを示している。一方、充填率は 4 つの稜線での平均値の差は少なかったため、図示のように高さ方向での最大値と最小値をばらつきとして示している。横軸の充填率を比較すると、揺動の有無では揺動を与えない方が充填率は高くなった。また、ばらつきについてはバリの生成方向によらず揺動を与えた方が大きい。充填率のばらつきは、その定義から充填が高さ方向で不均一になっていることを意味する。縦軸のバリ高さを比べると充填率の大小関係と対応しており、充填率が高い条件ほどバリ高さが低くなっている。このことは、バリに流動しなかった材料が輪郭成形に寄与していると考えれば説明できる。

図 12 に荷重低減率と充填率の比較を示す。充填率の高い縦孔式の方が荷重低減率は低くなっている。充填が進む条件では揺動を与えても荷重が高くなることがうかがえるが、縦孔式と横孔式ではバリの厚さが異なり、揺動条件も 1 通りしか行っていないため単純な比較はできない。今後はこの点をさらに検討する必要がある。

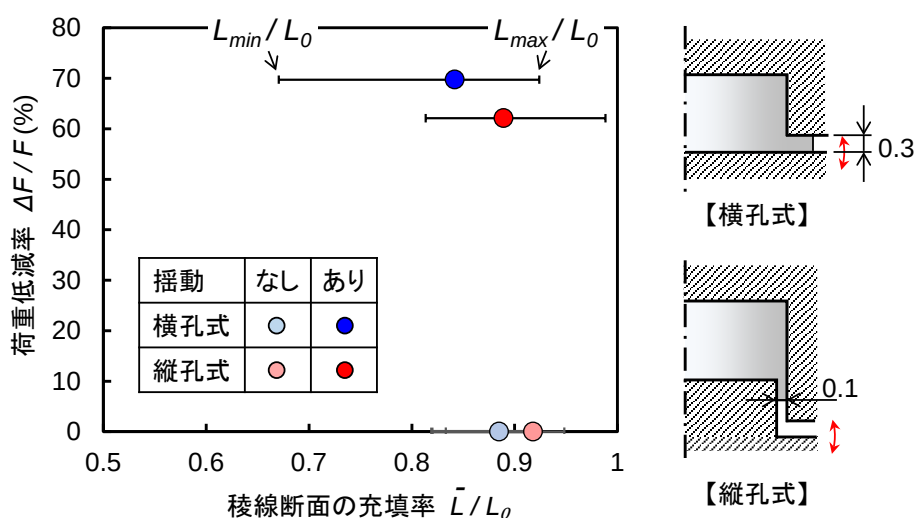


図 12 充填率と荷重低減率の関係

6. おわりに

揺動加圧において揺動方向を変化させることで得られる2つの効果に期待して実験を行い、以下のことが明らかになった。

- (1) 均等に揺動方向を変えながら揺動加圧を行い、回転ピッチが加工特性に及ぼす影響を調査した。回転ピッチを 10° 程度まで小さくすると、揺動を与えない場合よりも加工後の横断面の真円度を向上させることができた。また、シーソー式の一方向の揺動加圧に比べ、ピッチを 90° 以下にすると端面に残留する傾斜が小さくなることがわかった。試片端部の形状測定および FEM 解析による接触面圧分布の測定から、回転ピッチを変えると傾斜域の重複域が干渉して接触面積が変化することがわかった。その変化に対応して荷重低減率も変化した。変動の範囲は10%程度であった。
- (2) 非軸対称の部品形状を想定し、部品形状に沿った方向へ展伸を促進させることが可能かどうかを検証した。具体的には円柱を高さ方向に50%圧縮して正方形の角柱に成形する実験を行い、充填しにくい正方形輪郭の角部へ揺動方向を一致させて加圧を行った。その結果、揺動を与えない場合に比べて荷重を約60%低減することができた。正方形の角部には未充填が残り、揺動工具側と反対側の角部付近に未充填が多く残った。このため、高さ方向の充填は不均一になったが、揺動を与えた工具側では充填が促進されることが示され、目標とした「部品形状に沿った展伸」の一部は実証できたと考えられる。

謝辞

今回の研究助成により、揺動方向を任意に変更できるように装置及び制御システムを改修することができ、思い描いていた構想を具現化してその効果を確かめることができた。ここに感謝の意を表す。現在もこの装置を用いて上記6.(2)の目標を達成するための研究を継続している。

参考文献

- 1) 近藤：塑性と加工，51巻594号(2010)，627-627.
- 2) 平井，久保：塑性と加工，30巻345号(1989)，1361-1366.
- 3) 廣田，小川：塑性と加工，61巻712号(2020)，124-129.
- 4) 吉田，廣田：塑性と加工，(2021年12月に採択通知，発行号未定)
- 5) 清野，福井：塑性と加工，2巻10号(1961)，749-758.

成果公表

- 1) 熊埜御堂，廣田，吉田：第72回塑性加工連合講演会論文集，(2021)，215-216.

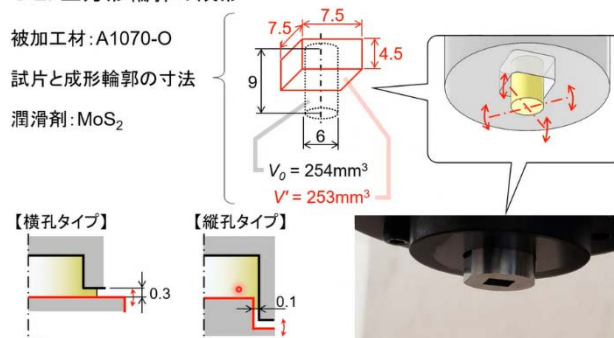
逐次回転を伴う多軸揺動加圧法 による鍛造加工特性の改善

3-2. 正方形輪郭の成形

被加工材: A1070-O

試片と成形輪郭の寸法

潤滑剤: MoS₂



15

福岡工業大学
工学部 知能機械工学科
廣田 健治

4. おわりに

21

■ 成果公表

- ・ 二方向揺動加圧による正方形輪郭への[●]据込み加工
熊埜御堂, 廣田, 吉田: 第72回塑性加工連合講演会(2021年10月29~30日)

■ 主な経費の使途

- ・ DDモータ
- ・ 装置の改修費, 成形用金型
- ・ ケーブル類&コントローラ
- ・ データロガー
- ・ FEM解析ソフト保守費用

謝辞

この助成により本工法のさらなる可能性を示すことができました。ここに感謝の意を表します。

