

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04218

研究課題名(和文) 面内揺動を援用した選択的減肉鍛造技術の開発

研究課題名(英文) Development of a selective thickness-reduction technology by combining lateral oscillation with press forging

研究代表者

廣田 健治 (Hirota, Kenji)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：50273256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：鍛造荷重を低減させるために、加圧中に横方向に揺動動作を与えることを試み、試片形状と揺動条件による荷重の低減効果を検証した。純アルミニウムを用いた実験及びFEM解析により、荷重の減少量は加圧と揺動の速度比によって決まることが確認された。円柱試片では35%程度の荷重低減が可能であったが、円盤試片ではその半分程度の荷重低減しか実現できなかった。工具形状や試片寸法の見直しを行ったが、それ以上の荷重の低減には至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金属を高さ方向に圧縮する際に横方向の揺動動作によるせん断応力を加えると圧縮方向の圧縮応力が減少することが理論的に示されている。この考えを直動アクチュエータにより実現し、純アルミニウムの円柱および円盤材の圧縮加工に対してFEM解析と実験により圧縮荷重が低減できることを実証した。また、荷重低減に影響を与えるパラメータについて明らかにした。この成果は荷重の増加が問題となるような鍛造加工品において加圧限界の向上や、金型やプレス機械への負荷の低減に寄与する。

研究成果の概要(英文)：A new forging method applying lateral oscillation during axial compression was proposed to reduce the forging load. The effects of the oscillation conditions and the geometry of workpiece on the load were studied through the experiment using pure aluminum and the corresponding numerical simulation. The load reducing effect was primarily affected by the relative oscillation speed to the compression speed. The load was maximumly reduced by 35% compared with that without oscillation for cylindrical workpieces, while the maximum load reduction ratio was 17% for disk workpieces. However, the load for disk workpieces was not reduced further, although the tool shape and workpiece dimension were modified.

研究分野：塑性加工

キーワード：鍛造 荷重 揺動 振動

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車やモバイル機器では、軽量化のために部位毎に厚さを最適に分布させた板部品が増えている¹⁾。自動車のサイドアウトパネルでは、部位毎に材質や厚さの異なる部材を溶接したテーラードブランクが用いられている。最近ではこの思想が部品レベルに及びつつあり、負荷を受ける部位を考慮して部品内に肉厚分布を持たせる設計が多く見られる。しかし、断面アスペクト比が小さくなるほど圧下に対する変形抵抗が増加するため、従来の鍛造工法をそのまま適用することが難しい。

厚板部品の鍛造については図 1(a)のように円錐状の工具を傾斜回転させて圧下を行う方法が知られている²⁾。また、(b)のように金型を分割して個別に駆動させる方法が開発されている³⁾。いずれも自動車部品を中心に用いられているが、(a)は規則的な回転動作のため軸対称品への適用が多く、(b)は縦方向の材料流動を利用するため容器状の部品でない⁴⁾と効果が得られない。これらの工法が適用できない部品は数多くあり、その需要は増加し続けている。現状では切削による追加加工が必要となり、その対応が急務の課題となっている。

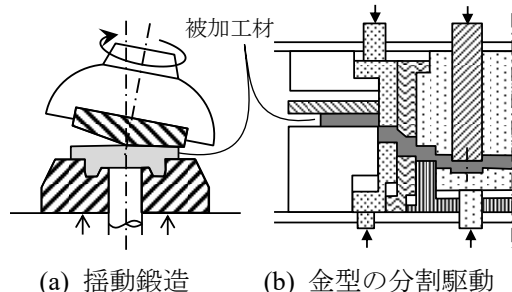


図 1 鍛造荷重の低減手法

2. 研究の目的

圧縮とせん断を同時に加えると、圧縮に対する変形抵抗が低下する。例えば、加圧と同時にねじりによるせん断を付与することで、鍛造荷重を低減した事例が報告されている⁴⁾。しかし、ねじりでは軸対称形状にしか適用できず、中心に向かうほどせん断応力の効果が弱くなる。本研究では圧縮と同時に直動アクチュエータを用いて加圧方向に垂直な面内に揺動動作を与える手法を試みる。そして、揺動による加圧部の縦断面内へのせん断応力の付与が圧下方向の応力成分の低減にどのように寄与するかを解明する。また、その効果が厚板品の部分的な減肉加工に適用できるかどうかを検証する。

3. 研究の方法

減肉加工に先立ち、図 2 のように円柱試片の中央部を 50% 圧縮する実験を行う。最初の 25% は通常の加圧を行い、後半の 25% で加圧と直交方向に揺動を与える。圧縮応力とせん断応力を同時に加える場合、圧縮方向の負荷速度とせん断方向の負荷速度 u の比 u/v が圧縮応力の低減量に影響することがわかっている。 u/v は今回の実験条件では以下の式で求められる。

$$u/v = 4n \Delta x / Z_2 \dots (1)$$

ここで、 n と Δx は面内揺動の回数と振幅、 Z_2 は面内揺動を与えている間の軸方向の圧縮量である。 Z_2 は図 2 のように 1.5mm で一定となる。また、 u は v 、 Δx 、 n を変えることで調整する。本実験では、 u/v を主要なパラメータと考えて変化させ、荷重の低減量と被加工材の変形特性を調査する。

円柱試片での検討結果をもとに、厚板部品を想定して円盤試片の端部を部分的に減肉する加工に面内揺動を適用する。図 3 に寸法形状と加工工程を示す。板厚 $t=3\text{mm}$ 、直径 $D=18\text{mm}$ の円盤試片に対し、端部を 1mm の幅で 50% 圧縮する。加工工程は円柱試片の場合と同様であり、揺動条件は円柱試片で最も高い荷重低減を実現した条件を参考に变化させた。被加工材は純アルミニウムの棒材および板材を焼き鈍し処理して用い、潤滑剤として加圧面に二硫化モリブデンを塗布した。また、塑性加工用のソフトウェア Simufact forming を用いて FEM 解析も実施した。

装置は万能試験機に固定し、中央部に金型を設置する。2 台の直動アクチュエータを直交するように設置し、駆動部を下側の金型に連結することで、面内の任意の方向に揺動を付与できる構造とした。ただし、図 2、図 3 の実験は 1 台のアクチュエータにのみ接続した一方向の揺動で行った。

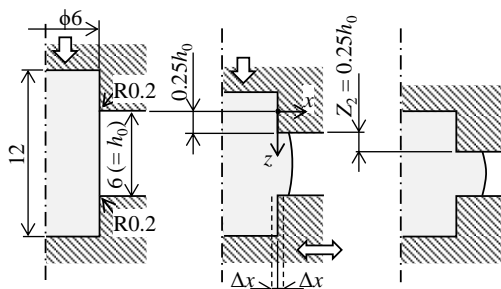


図 2 円柱材に対する加工工程

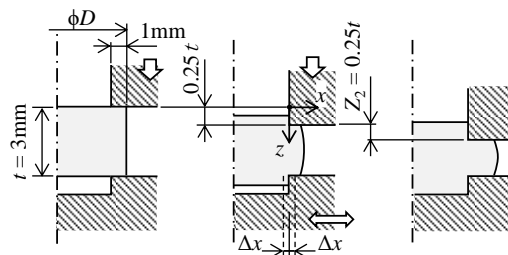


図 3 円盤材に対する加工工程

4. 研究成果

(1) 円柱試片に対する検討結果

① 揺動による荷重低減効果

荷重線図の一例として、 $u/v = 8$ の実験結果を図 4 に示す。面内揺動を付与することで荷重が減少していることがわかる。上下工具の揺動による側方変位の変化を図 5 の左側に示す。揺動は下工具に与えているが、上工具にも伝搬していることが確認された。下工具の揺動量から上工具の揺れを引いて算出した実揺動量 $\Delta x'$ の変化を図 5 の右側に示す。指令揺動量 $\Delta x = 0.075 \text{ mm}$ に対して試片に伝わる実揺動量 $\Delta x'$ は減衰していることが判明した。そこで、式 (1) において Δx を $\Delta x'$ とした実速度比 u'/v を以降では用いることにする。また、荷重の低減量は図 4 の ΔF と F の比 $\Delta F/F$ を荷重低減率として指標に用いる。

$v = 1 \text{ mm/min}$ 、 $\Delta x = 0.075 \text{ mm}$ として、実揺動量 $\Delta x'$ で算出した実速度比 u'/v が 4~24 の範囲となるように n を変化させて実験および FEM 解析を行った。実速度比と荷重低減率の関係を図 6 に示す。実験のプロットには司令揺動量 Δx で計算した理論速度比を記載している。実速度比 (横軸の値) は理論速度比 (プロットに併記した値) よりもかなり低く、例えば $u/v = 24$ の理論速度比に対して実速度比は約 8 になった。グラフから、実験および FEM 解析において、 u'/v が一定以上になると荷重低減率の増加が飽和する傾向がわかる。また、FEM 解析では実験値よりもやや高い荷重低減率を示した。これは、解析では金型の弾性変形を考慮していないため、揺動時に試片と金型加圧面の接触面圧が下がったことが一因と推察された。

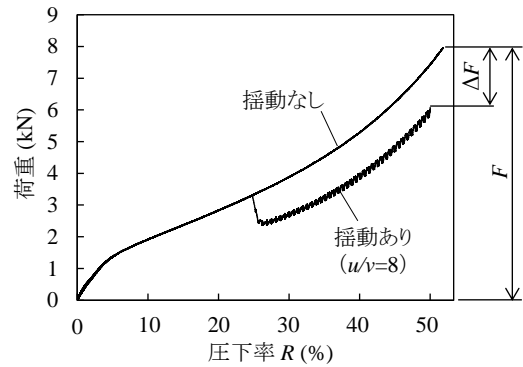


図 4 荷重線図

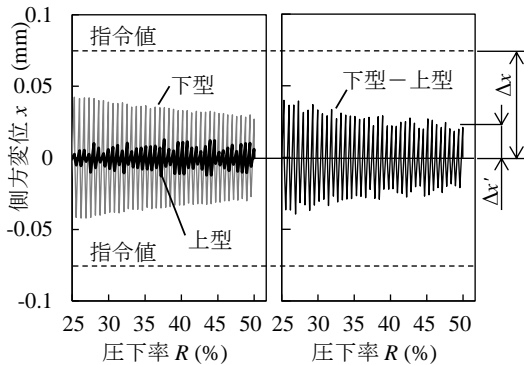


図 5 揺動加圧中の側方変位

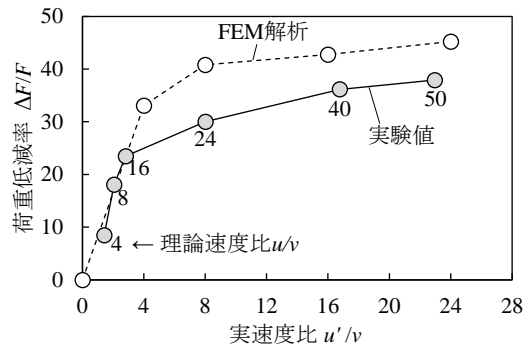


図 6 実速度比と荷重低減率

② 揺動条件と荷重低減率

3. で述べたとおり、理論速度比 u/v は $v, \Delta x, n$ によって設定している。① では n を変化させて速度比を調整したが、 Δx や v を変えて同じ速度比を設定した場合に荷重低減率に差が生じるかどうかを検証した。表 1 に揺動条件を示す。① で設定した条件を B として、式(1)において Δx を増やし n を減らした条件を A、 v を増やした条件を C として、実験および FEM 解析を行った。実験では図 5 のように側方変位を記録して実揺動量 $\Delta x'$ を算出した。それぞれの条件の $\Delta x'$ を用いて計算した実速度比 u'/v と荷重低減率 $\Delta F/F$ の相関を図 6 に重ねると図 7 のようになる。FEM 解析では A~C のプロットは、ほぼ重なっている。実験値は $u/v = 40$ (実速度比 16 付近) ではほぼ重なっているが、 $u/v = 8$ (実速度比 3 付近) では荷重低減率がばらついている。これは、荷重低減率の変化の大きい領域であることから説明できる。以上の結果より、本工法の荷重低減効果は Δx や n や v によらず加圧方向に対する揺動方向の速度比によって決まるといえる。

表 1 揺動条件

u/v	8			40		
	v (mm/min)	Δx (mm)	n	v (mm/min)	Δx (mm)	n
A	1	0.1	30	1	0.1	150
B		0.075	40		0.075	200
C	6.25			1.25		

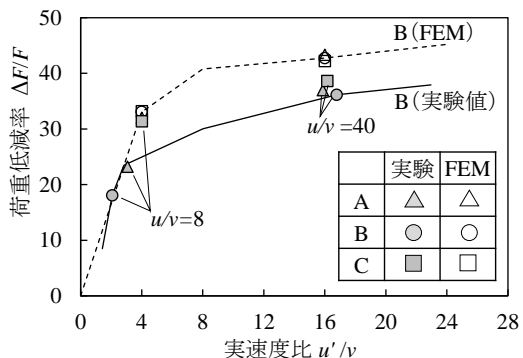


図 7 u/v 以外の因子の影響

(2) 部分減肉加工

① 揺動による荷重低減効果

試片を円柱から円盤に変更し、図 3 の金型および加工工程で円盤の端部の減肉加工を行った。揺動条件は、円柱試片の実験において荷重低減率が飽和した条件 B の理論速度

比 $u/v=40$ を選定した。図 8 に荷重線図を示す。図 5 と比べると、円柱試片よりも大きな速度比を与えたにもかかわらず、荷重の低減量は少なくなった。この時の実揺動量の変化を図 9(a)に示す。図 5 の円柱試片の結果と比べると、同じ指令揺動量 Δx を与えているにもかかわらず、測定された実揺動量 $\Delta x'$ はかなり減衰していた。

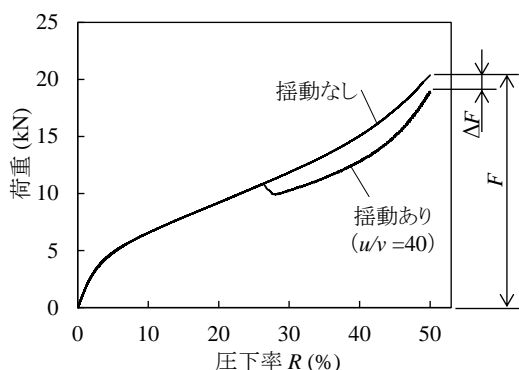
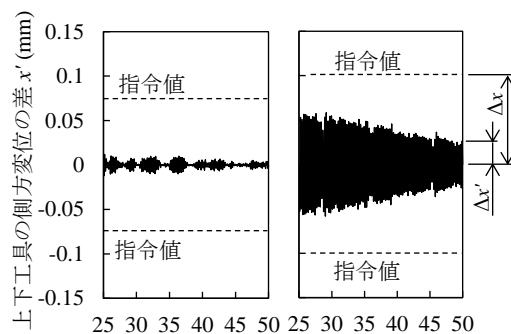


図 8 荷重線図 (円盤材 $D=18\text{mm}$)



(a) 条件 B (b) 条件 B- Δx
図 9 円盤材での実揺動量

② 揺動条件と荷重低減率

試片に伝わる実揺動量を増やすことを考え、表 2 に示す揺動条件で実験を行った。荷重低減率と実速度比の関係を整理したグラフを図 10 に示す。円柱と同じ条件 B では実速度比が大きく低下したため、設定する理論速度比 u/v を 40 から 50 に増やした。この際、振幅を増した条件 B- Δx では図 9(b)のように振幅の減衰は改善され、図 10 のように荷重低減率も条件 B に比べて 2 倍近くまで増加した。条件 B- v は圧下速度 v を減少させた場合である。 v を減少させると u も減少し揺動の向きが変わる際の振幅の減衰が小さくになると考えて実施した。しかし、図 10 に示すように条件 B とあまり変わらない結果となった。さらに圧下速度を下げた条件 B- v' を実施した結果、振幅を増やした条件 B- Δx と同程度まで荷重低減率を改善することができた。しかし、B- Δx も B- v' も円柱試片の荷重低減率に比べると半分程度である。条件 B- Δx からさらに Δx を増加させると揺動に要する推力が増加し、アクチュエータの許容出力では加工が困難になった。また、条件 B- v' から v をさらに減少させると荷重低減率は大きく低下した。実揺動量を調べると加圧の終期に振幅の減衰が大きくなっており、圧下速度を下げすぎると揺動の抵抗が増加することがわかった。

③ 荷重低減率の改善策の検討

図 10 には FEM 解析の結果を破線で示している。図 7 の円柱試片の場合の FEM 解析結果と比べると、速度比が一定以上になると荷重低減率の増加が飽和する傾向は同じであるが、荷重低減率の値は円柱に比べてかなり低い。円柱材では図 2 のように加圧部の上下が工具で拘束されているため、揺動により加圧部にせん断応力が付与されやすい。一方、円盤材では図 3 のように加圧される端部は中央の掴み部の外側にある。また、加圧部は金型との焼付きを防ぐために潤滑をしており、揺動に対して滑りやすくなる。このため、加圧部に揺動が伝わりにくくなり十分な荷重低減効果が得られなかったと考えられる。図 10 で解析結果よりも実験結果の方が荷重低減率が高いことも、潤滑剤の膜切れにより摩擦が増加して減肉部に揺動が伝わりやすくなったことで説明できる。

そこで、図 11 のように工具の加圧面に溝を与え、揺動動作に対する材料拘束を強めるようにした。併せて、アクチュエータの最大出力に対して揺動に要する推力に余裕を持たせるために、円盤寸法の直径 D を 18mm から 14mm に小さくした。

図 12 に、②の各揺動条件で実施した荷重低減率と実速度比の関係を示す。条件 B- v では荷重低減率が増加したが、②の最良条件であった条件 B- v' ではほとんど変化はなく、条件 B- Δx では逆にやや悪化する結果となった。溝を付けたことで加圧部にしっかり揺動が伝わるようになったが、それによって揺動に要する推力が増加することが判明した。このため、円盤の径を小さく

表 2 揺動条件

	u/v	v (mm/min)	Δx (mm)
B	40	1	0.075
B- Δx	50		0.1
B- v	50	0.59	0.075
B- v'	68	0.5	

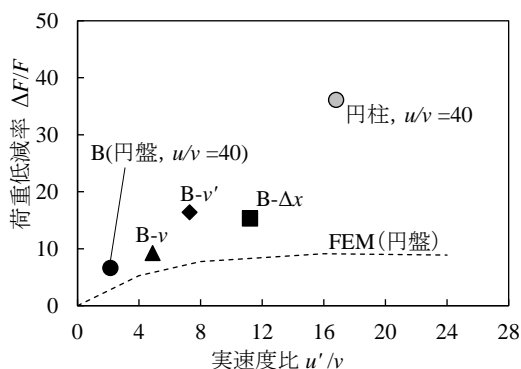


図 10 実速度比と荷重低減率 (円盤材)

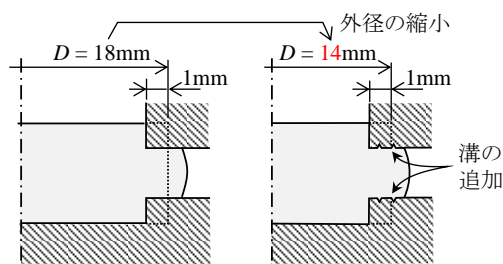


図 11 工具寸法形状の変更

して所要推力を減じた効果が相殺されてしまったと推察される。赤の破線で示した FEM 解析の結果では、荷重低減率が上昇していることから、アクチュエータの性能に応じて、適切な試片寸法を設定して実験すれば円柱試片と同程度の荷重低減効果を得られると考えられる。

(3) 総括

加圧中に加圧と直交する面内に揺動動作を与える面内揺動加圧法を提案し、荷重の低減効果と影響因子ならびに形状に対する適用性について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- ① 円柱試片の加圧実験において、面内揺動を付与することで通常の加圧に比べて最大で約 35% 荷重を低減させることができた。
- ② 荷重の低減量は、揺動速度と圧下速度の比に依存することが実験および FEM 解析により確かめられた。また、この比が一定以上になると荷重の低減量は一定となることもわかった。
- ③ 板材の端部を減肉する加工に適用した結果、円柱試片と同等の揺動条件において荷重の低減量は大きく減少した。原因として減肉部の材料拘束が不十分であったことと、揺動推力の不足が挙げられた。
- ④ ③に対して改善策を施したが、今回の実験では円柱試片の場合の半分程度の荷重低減効果しか得られなかった。FEM 解析では十分な改善効果が示されていたことから、揺動条件に対する揺動推力を適切に見積って実験条件を設定すれば、板材の減肉加工においても本工法の効果は期待できると考えている。

<引用文献>

- 1) 鈴木敬、板鍛造部品の動向、塑性と加工、51 巻 594 号、2010、633-637
- 2) 久保勝司、平井幸男、回転鍛造法の実用化の現状、塑性と加工、24 巻 271 号、1983、786-791
- 3) 早瀬正宏、岩田大助、堀智之、森孝一、森孝信、インライン生産を実現する複動 1 ストロークプレスの実用化、塑性と加工、53 巻 623 号、2012、1041-1043
- 4) Ryo Matsumoto, Jinkan Kou, Hiroshi Utsunomiya, Reduction in axial forging load by low-frequency torsional oscillation in cold upsetting, Int J Adv Manuf Technol, 93, 2017, 933-943

	B	B- Δx	B- v	B- v'
D=18mm, 溝なし	●	■	▲	◆
D=14mm, 溝あり	●	■	▲	◆

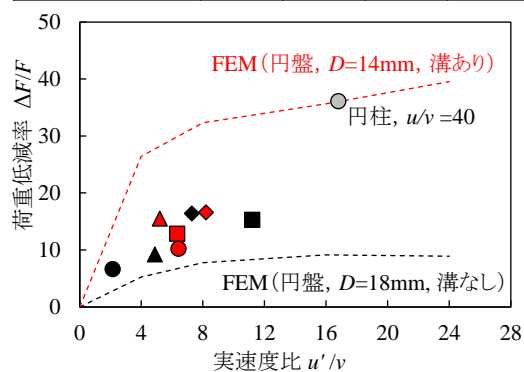


図 12 工具寸法形状の変更の効果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉田結音, 廣田健治, 橋田直樹
2. 発表標題 面内揺動加圧による円柱試片の据込み加工 - 第1報 揺動効果の検証 -
3. 学会等名 第72回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋田直樹, 廣田健治
2. 発表標題 面内揺動加圧による円柱試片の据込み加工 - 第2報 荷重低減量に及ぼす揺動条件の影響 -
3. 学会等名 第73回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 プレス加工装置	発明者 廣田健治	権利者 学校法人 福岡工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特開2023-055446	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------