板材の押出し加工による微小ビレット成形* (試片拘束条件に関する検討)

広 田 健 治*¹, 杉 岡 巧*²

Forming of Small Billet by Sheet Extrusion (Investigation on Constraining Conditions of Specimen)

Kenji HIROTA*³ and Takumi SUGIOKA

*³ Department of Materials Science, Kyushu Institute of Technology,
1-1 Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 804-8550 Japan

This study aims at making a small billet for micro forging from sheet metals. Disk specimens were made from 2 mm thick aluminum sheets and extruded in the thickness direction at an extrusion ratio of 2. A billet of 1 mm in diameter was successfully formed on the specimen and the billet height varied from 2 to 5 mm depending on constraining conditions of specimen. The highest billet was obtained when the specimen was extruded with both the top and side faces constrained. Diameter of specimen also affected the billet height in the case of no constraint in the radial direction. Deformation behavior was studied by FE analysis and difference in metal flow by the constraining conditions was clarified. Strain distributions showed that deformation became severe toward the bottom of the billet. Piping defects that occurred in the end of forming were also predicted. Calculated billet heights agreed well with the measured ones.

Key Words: Plastic Working, Press Working, Finite Element Method, Extrusion

1. 緒 言

機器の小型集積化にともない、プレス加工部品においても微細化が進んでいる。板材成形では半製品をキャリアに連結して順送加工するため、工程間の搬送や位置決めが行いやすく、電子部品を中心に高精度な金型技術を駆使してサブミリオーダーの微細プレス部品が量産されている。一方、鍛造などのバルク成形では切断したビレット素材をグリッパで搬送しながら多工程の加工を行うが、微細化とともにビレットの慣性力に対して表面力の影響が大きくなる。このため、リリース時にビレットがグリッパに付着しやすくなり搬送や位置決めに支障を生じることが指摘されている^①。この問題に対して、特殊なグリッパ^②も開発されているがコスト増をとまう。

一般に微細バルク成形用の微小ビレットは細線素材を切断して得ているが、対象が数mm以下になれば図1のように板材を板厚方向に押し出すことによって同様の微小ビレット素材を生成できると考えられる。この場合、ビレットが板に接続した状態で得られるた

め、微細寸法においても板材成形の順送加工と同じ手法により、特殊な搬送装置を用いることなく多工程の加工が行えると考えられる。また、従来法では微小ビレットの元となる細線素材の径や形状は限られているが、本方法ではそれをダイの穴形状により自由に決定できる。また、板材成形ではブランク採取後に図1のように棒状の廃材が生じるが、本方法では板厚程度の狭小領域しか利用しないため、こうした廃材を回収してその一部を素材として利用することも可能であり、省資源と材料コスト低減につながる。

本研究ではこの方法によるビレット成形要件を解明し、微細寸法に特化した新たなバルク成形工法を確立することを目的とする。その第一段階として、本論文では試片の拘束条件がビレット成形挙動に及ぼす影響に関して検討を行う。

Fig.1 A new concept for micro forging

* 原稿受付 2006年10月12日。

*¹ 正員、九州工業大学工学部(☎804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)。

*² 九州工業大学大学院工学研究科。

E-mail: hirota@post.matsc.kyutech.ac.jp

2. 板材の押出し加工

近年、部品点数の削減や軽量化の要求から、板材に対して圧縮応力やせん断応力を付加して板厚方向に形状や肉厚を変化させるプレス加工が多く見られ、「板金成形と冷間鍛造の複合技術」、「板鍛造」などと呼ばれている^{③-④}。本加工法もパンチ径とダイ穴径との関係を見ると押出し加工と言えるが、バルク素材ではなく板材を対象とした圧縮加工という観点で見れば上記の範疇に分類できる。工業的には、成形した突起を利用して他の部品を組み付けたり、可動部品の回転軸として利用する事例が見られる。加工現象に関しては Chen らが有限要素法により成形部のひずみ分布等を明らかにしている^⑤。しかし、以上の事例は成形した突起を部品の一部として用いるため、板との接続部に強度が要求される。このため、押出し比やパンチの押し込み量が制約され、成形される突起高さも低い。これに対し本研究では、成形した突起を鍛造加工して最終的には板から切り離して部品とする。このため、上記の事例に比べて板との接続部に対する制約は少なく、よりアスペクト比の高い突起を成形できると考えられる。本論文では成形した突起を微細バルク成形用の素材として利用することを想定しているため、以降ではこの突起をビレットと呼ぶことにする。

3. ビレット成形実験

3-1 被加工材および実験装置 図2に成形に用いる工具配置を示す。ダイ穴およびパンチは円形とし、それぞれの直径を $D_D = 1.0 \text{ mm}$ 、 $D_P = 2.0 \text{ mm}$ とする。すなわち、押出し比2で直径1mmのビレットを成形する加工となる。被加工材は表1に示す純アルミニウム半硬質材を用いる。この板材から円形の試片を打抜き加工により製作する。試片側面の拘束には円筒状のガイドリング④を用いる。また、試片の板厚方向

Fig.2 Experimental set up

- ① Punch
 - ② Die
 - ③ Counter punch
 - ④ Guide ring
 - ⑤ Blank holder
 - ⑥ Spacing ring
 - ⑦ Ram
 - ⑧ Specimen
- $t = 2.0 \text{ mm}$
 $D_P = 2.0 \text{ mm}$
 $D_D = 1.0 \text{ mm}$
 $D_S = 5 \text{ mm}, 10 \text{ mm}$

は板押さえ⑤を4本のボルトでダイへ固定することで拘束する。ダイ穴内の下パンチ③は成形後の試片を取り出すときにのみ使用し、成形中には負荷を与えない。パンチの押し込み量 h の調整は試験機のラム⑦と板押さえ④の間に適切な厚みのスペーサ⑥を挟み、機械的にパンチの押し込みを規定することで行う。加圧には万能試験機（島津製作所製 AGS-20kNG）を用い、加工力は3kN、加工速度は1mm/minに設定した。

3-2 実験条件 通常の押出し加工では柱状の試片をコンテナに収め、試片の端面を加圧して押出しを行う。これに対し本加工では、板材の一部の領域に対して押出しを行う。このため、パンチで加圧されない部分があり、ビレットの成形挙動はその部分の体積と拘束状態により影響を受けると考えられる。このうち、前者については試片の直径 D_S を、後者については試片の半径方向と板厚方向の拘束の有無を変化させる。具体的には、試片径 D_S を5mmと10mm、試片の拘束条件を表2に示す4条件とし、合計8条件について検討を行う。なお、表2 (iii), (iv) の下向き矢印は板押さえをボルトによりダイに固定することを表し、締め付けトルクは1N・mとした。

潤滑条件については試片の両面に牛脂黒鉛を塗布する。また、パンチの押し込み量は特に明記しない限り1.8mm (0.9 t) とする。

3-3 ビレット成形高さ 図3に成形したビレットの拡大写真と断面形状を示す。表面および内部にも破断等は見られない。ビレットの底部にはひけが生じているが、これについては4.2, 4.3で述べる。図4に各条件での成形後の試片外観を示す。いずれも図3と同様に破断することなく良好なビレット成形が可能であった。ただし、パンチで排除した材料の体積は同一

Table 1 Mechanical properties of test material

Material (JIS)	Thickness [mm]	Flow stress [MPa]
A1050-H24	2.0	$\sigma = 134 \varepsilon^{0.07}$

Table 2 Constraining conditions of specimen

		Displacement of specimen in radial direction	
		Not constrained	Constrained
Displacement of specimen in thickness direction	Not constrained	(i)	(ii)
	Constrained	(iii)	(iv)

であるにも関わらず成形されたピレットの高さは大きく異なっている。そこで、各条件について試片の寸法変化量とピレット高さの関係性を調べた。図5にその結果を示す。 dD_s および dt はそれぞれ成形前後での試片の外径および板厚の変化量であり、いずれも変化が最大の箇所で測定している。

図5 (a)は試片径 $D_s=5\text{mm}$ の場合である。試片を完全に拘束した(i)において、 dD_s 、 dt が最も小さくなり、ピレット高さ h' が最大になっている。 dD_s 、 dt が0でないのは試片や金型の弾性変形によるものと考えられる。一方向のみを拘束した(ii)、(iii)では拘束のない方向に大きな寸法変化が生じているが、ピレット高さを比べると(ii)の方が高い。このことから、試片の板厚方向の変形を拘束した方がピレット高さへの影響が大きいと言える。また、全く拘束を与えない(iv)では、両方向への変形が許されるが、寸法変化は主に半径方向に生じている。この理由については、3.4で述べる。

図5 (b)は $D_s=10\text{mm}$ の場合である。ピレット高さの変化の傾向は(a)と同じであるが、 $D_s=5\text{mm}$ に比べて半径方向の寸法変化 dD_s が小さく抑えられている。(iii)では半径方向の拘束がなく試片は外向きに押し広げられるが、その抵抗は試片径が大きいほど大きい。このため、半径方向の寸法変化 dD_s は(b)の方

が小さく、その分だけダイ穴内へ向かう材料流動が増えて高いピレットが得られたと考えられる。また、板厚方向の拘束がない(ii)の条件を図4で比較すると、 $D_s=5\text{mm}$ では試片全体の板厚が増加しているのに対し、 $D_s=10\text{mm}$ ではピレットの周囲に盛り上がりが生じ、局所的に板厚が増加していることがわかる。同様の盛り上がりは全く拘束がない(iv)においても見られる。

3.4 成形加工力 図6にパンチ押し込み量に対する成形加工力の変化を示す。図中の点線は図2⑥のスペーサで規定された最大のパンチ押し込み量を表す。板厚方向を拘束した(ii)、(iv)ではスペーサに当たるまでパンチが押し込まれて加工力が急増している。これに対し、板厚方向を拘束しない(i)、(iii)ではパンチで排除された材料の一部が板厚方向へ流動して板押さえが浮き上がる。このため、スペーサとの干渉が早期に生じ、所定の押し込み量に達する前に加工力が急増している。この過程で、 $D_s=5\text{mm}$ の(a)では(i)の条件で

(a) Appearance

(b) Cross section

Fig.3 Photographs of extruded billet ($D_s=10\text{mm}$, Constraining condition (iv))

(a) $D_s=5\text{mm}$

(b) $D_s=10\text{mm}$

Fig.4 Appearance of specimens after forming

Fig.5 Influence of constraining conditions on billet height

パンチの押し込みが少し進んでいる。これは④では拘束が全くないため一度試片が板厚方向に変形してから板押さえで押し広げられたことを示す。その結果として、図 5 (a)の④では試片の外径変化 dD_s が顕著に現れている。一方、 $D_s=10\text{mm}$ の⑥では試片の剛性が高いため⑥の条件でもこのような現象は見られず、図 5(b)においても板厚方向の寸法変化が生じている。

加工力の変化を見ると、どの条件でも降伏後に多少の変化はあるが顕著に増加することはない、ほぼ一定の加工力でパンチの押し込みが進んでいることがわかる。成形中の加工力の大小については試片の拘束が厳しいほど大きい。これは、パンチで加圧された材料の流動方向が制約されるためと考えられる。また、試片径で比べると、径が小さい(a)では試片が変形しやすいため、完全に拘束した(iv)以外では加工力は(b)に比べて低く抑えられている。

4. 有限要素解析による検討

4.1 解析条件 解析には剛塑性有限要素コード DEFORM-2D (Ver.8.1)を使用した。解析モデルの一例 ($D_s=10\text{mm}$, 拘束条件(iv)) を図 7 に、解析条件を表 3 に示す。軸対称問題として半断面をモデル化し、工具は剛体、被加工材は剛塑性体とした。なお、被加工材の応力ひずみ関係は表 1 に記載した近似式を

Fig.6 Punch force - stroke diagrams

用いる。パンチおよびダイのエッジ近くでは被加工材に厳しい変形が生じるため、この部位には他の部位よりも小さい1辺が 0.02mm 程度の要素を配置するとともに、10 ステップ毎に要素の再配置をするように設定した。また、これに合わせて1ステップ当たりのパンチ押し込み量も 0.01mm とした。工具-材料間の摩擦についてはせん断摩擦則を用い、摩擦係数は $m=0.1$ とした。板押さえおよびガイドリングは試片の拘束条件に応じて適宜設定をした。

4.2 成形挙動 図 8 に拘束条件(iv), 試片径 $D_s=5\text{mm}$ における、パンチの押し込みに伴うビレット内部の変形と加工硬化の様子を示す。左側の図は仮想的な格子線を設定しその変形を追跡した結果、右側の図は相当塑性ひずみの分布を表している。(a)は成形初期の状態であるが、左側の図からパンチとダイのエッジを結ぶ AA' 面に沿ってせん断変形が生じている。パンチ直下の材料はこの面に沿ってダイ穴内へ流動しており、バレル材の押出し加工と同様の変形が見られる。このとき、A 点と O 点でダイ穴までの距離を比べると $AA' > OO'$ であるため、中心付近の方がビレットの表層付近に比べて押し込みが先行する。この差は押し込みとともに大きくなり、成形終期の(b)ではビレット底部に向かうほど格子の水平線のゆがみが大きくなっていることがわかる。また、ビレット底部では中心部で材料がパンチ底面から離れて深さ δ のひけが生じている。これは図 3 (b)に示した実験結果においても見られる。

一方、右側のひずみ分布を見ると、(a)では AA' 面を中心にパンチやダイの側面に沿ってひずみが生じて

Fig.7 Simulation model ($D_s=10\text{mm}$, Constraining condition (iv))

Table 3 Conditions for simulation

Geometry	Axisymmetric
Object type	Workpiece : Rigid plastic Tools : Rigid
Number of elements	3000
Simulation steps	180
Step increment [mm/step]	0.01
Friction coefficient	$m=0.1$

Fig.8 Results of FE simulation concerning material flow and work hardening during billet formation ($D_s = 5\text{mm}$, Constraining condition (iv))

いる。このため、ピレット内部でも表層部でひずみが大きくなっている。押し込みが進むと、前述のように中心部と表層部の流動量の差により中心部で材料が軸方向に大きく伸ばされるようになる。このため、ピレットの底部へ向かうほど表層部だけでなく中心部でもひずみが大きくなっている。

以上は試片径 $D_s = 5\text{mm}$ の結果であるが、(iv)の条件では試片が完全に拘束されているため $D_s = 10\text{mm}$ においてもほぼ同じ結果が得られた。

4.3 拘束条件による変形の違い 拘束条件による変形の違いについて、試片径 $D_s = 5\text{mm}$ 、パンチ押し込み量 $h = 0.7t$ での比較を図9に示す。図8と同様にAA面に沿って変形が生じているが、試片の拘束が不十分のためAA面より外側の材料がダイ端面に沿って側方へ流動していることがわかる。拘束条件(i),(ii)ではダイ穴の真上にある材料がそのままダイ穴へ流動しており、パンチの押し込みと同じ量しかピレ

Fig.9 Difference in deformation depending on constraining conditions ($D_s = 5\text{mm}$, Punch stroke $h = 0.7t$)

Fig.10 Increase in billet height and depth of piping with punch stroke

ットが成形されない。一方、(iii)では格子線のゆがみから図8のようにAA'面より内側でも変形が生じており、(i),(ii)よりも高いピレットが得られている。このように、試片の変形が許される拘束条件では、試片の変形抵抗によってAA'面の外側と内側への流動比率が変化してピレット高さに差が生じると推察される。

解析結果からパンチの押し込み量 h に対するピレット高さ h' と図8(b)に示したひけ深さ δ の変化を求めた。その結果を図10に示す。ピレット高さについて、パンチで加圧した材料がすべてダイ穴に流動すれば体積計算より $h' = 4h$ となる。試片を完全に拘束した(iv)では図8の変形を見るとこの状態に近いことがわかる。一方、拘束が不十分な(i), (ii), (iii)の条件では、途中まで $h' = h$ に沿って変化している。これは、図9のようにパンチで加圧された材料が変形面の外側へ流動しているためと考えられる。パンチの押し込みが進み試片内部へ向かう流動抵抗が高まるとダイ穴へ向かう流動が支配的になり、 $h' = 4h$ に平行な直線へ推移していくと考えられる。一方、ひけについてはいずれもパンチの押し込み量 h が 1.5mm ($0.75t$) 程度から発生し、1.8

Fig.11 Cross section of extruded billet without piping ($D_s=10\text{mm}$, $h=0.75t$, Constraining condition (iv))

(a) $D_s=5\text{mm}$

(b) $D_s=10\text{mm}$

Fig.12 Comparison of billet height between experiment and simulation ($h=0.75t$)

mm ($0.9t$)で深さ $0.6\sim 0.8\text{ mm}$ 程度に達している。また、試片板厚の増加により所定の押し込み量に達しなかった条件ではひけは見られなかった。ひけはビレット底部にカップ等を二次成形する場合には有効に利用できることもあるが、一般的には表面欠陥とされる。そこで、図 10 よりひけが生じない $h=1.5\text{mm}$ ($0.75t$) で実験を行った。その結果、すべての条件でひけを抑制することができた。図 11 にその一例を示す。

この時のビレット高さについて、図 12 に実験値と解析値の比較を示す。拘束条件によるビレット高さの変化の傾向は解析値と実験値で概ね一致している。実験値について、ひけを許容した図 5 に比べるとパンチの押し込み量が減少したことでビレット高さはやや低くなっている。解析値については、実験値と多少の差が見られるが、その一因として解析では工具は剛体、被加工材は剛塑性体であり、弾性変形が考慮されていないことが挙げられる。板押さえやガイドリングで試片を拘束した場合、解析ではその方向への寸法変化は 0 になるが、実際には図 5 のようにわずかではあるが寸法変化を生じている。この影響は、試片を完全に拘束した(iv)において最も大きく現れている。

5. 結 言

板厚 2mm の純アルミニウム半硬質材の板面上に、直径 1mm のビレットを押し出し比 2 で成形した。試片径および試片の拘束条件を変えてビレット成形挙動への影響を検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) ビレット高さは試片の拘束条件により大きく異なり、拘束が厳しいほど高くなった。
- (2) 成形時にはパンチとダイの両エッジを結ぶ面に沿ってせん断変形が生じ、パンチで加圧された材料は変形面の内側と外側へ流動することが有

限要素解析により示された。このうち変形面の内側への流動がビレット成形に寄与し、その流動比率が試片の拘束条件によって変化することでビレットの高さが変化することが推察された。

- (3) 加工力は拘束が厳しいほどやや高くなるが、成形中の増減は少なく、ほぼ一定の力でビレット成形が行われた。
- (4) 成形時に破断が生じることはなかったが、パンチの押し込み量が大さいとビレット底部にひけを生じる場合があった。ひけはパンチの押し込み量を板厚の 75% にすることで、すべての条件について抑制することができた。

文 献

- (1) Geiger, M., Kleiner, M., Eckstein, R., Tiesler, N. and Engel, U., Microforming, *Annals of the CIRP*, 50/2 (2001), pp.445–462.
- (2) Nakano, T., Compound Technology of Sheet Metal Forming and Forging, *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity*, Vol.42, No.484 (2001), pp.388–392.
- (3) Kondo, K., General Statement of Sheet Forging, *Proceedings of the 241st Symposium on Technology of Plasticity* (in Japanese) (2005–9), pp.1–8.
- (4) Ohashi, S., Latest Report on Fine Blanking Technology, *Journal of Metal Press* (in Japanese), Vol.25, No.2 (1993), pp.12–19.
- (5) Chen, Z.H., Tang, C.Y., Chan, L.C. and Lee, T.C., Simulation of the Sheet Metal Extrusion Process by the Enhanced Assumed Strain Finite Element Method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.91 (1999), pp.250–256.