特集号

研究論文

側方押出法によるアルミニウム円板形状品の
加工成形限界の向上

本村 貢*・井上 研司**

Improvement of limit deformability of aluminum-disc by lateral extrusion method

Mitsugu MOTOMURA* and Kenji INOUE**

Lateral extrusion is a method for making “disc” shaped products. The extrusion press includes a billet chamber, a ram adapted to drive a billet through the billet chamber and a mandrel for making an axial flow of metal change to radial direction. This research is about an unique extrusion process, which is based on lateral extrusion. In lateral extrusion, a billet is extruded radially by a mandrel. As the extrusion progresses, the diameter of produced disc increases. But, when the extrusion has more progressed, the produced disc breaks at the circumference of it because of tensile force. The maximum diameter of A1050 at cold work, expressed by the sectional area ratio of billet (A_0) to disc (A_1), is about 5 ($=A_1/A_0$). To improve the sectional area ratio, attention is paid to the design of mandrel. Several kinds of mandrels are used in this experiment. The mandrel with radial grooves, the mandrel with concentric step, the mandrel with concentric grooves with no lubrication make the ratio improve. Further, the experiment with the mandrel with radial grooves and concentric step is performed. The mandrel with radial grooves and concentric step can make the ratio larger than the mandrel with each element individually. About the mandrel with radial grooves, the relation between number of grooves and the ratio, and depth of grooves and the ratio are researched.

Keywords: aluminum forging, extrusion, deformability, lower load, lateral extrusion

(Received June 30, 1993)

1. 緒 言

側方押出法 (Lateral Extrusion) は、コンテナからプランジャによって押出された材料を、マンドレルと呼ばれる金型によって、荷重方向と直角 (側方方向) へ流れの方向を変化させることにより、ディスク等の平面形状の製品を作製するための加工法である。側方押出法の概念図を Fig. 1 に示す。

一定直径の素材から、より直径の大きな円板に成形する場合、平板ダイスによる据込み圧縮があるが、工具と材料との接触面は変形とともに増大していき、負荷力は変形とともに増大する。また、外周寸法を拡大しながら所定形状に成形する場合は、その形状の型を用いて型鍛

造を行えばよいが、これも同様に負荷力の増大をきたす。一方、押出加工は初期断面積を減じて各種任意形状を得る方法で、断面積を拡大することができず、その断面減少率に見合った大きな負荷力が必要となる。今仮に、Fig. 1 のモデルで試験片直径を $D=20\text{ mm}$ とし、ピレットチャンバとマンドレルの間隙を $t=5\text{ mm}$ とすると、ラムによって負荷される断面は $(\pi/4) \times D^2=314\text{ mm}^2$ で、ピレットチャンバとマンドレルの間隙に押出される部分の断面は、 $\pi D \times t=314\text{ mm}^2$ となり、同一となる。したがって、理想的断面減少率は 0 となり、押出しの断面減少率の効果による負荷力の増大は存在しないこととなり、かつ間隙 t は変形中一定に保たれているため、鍛造のような上・下ダイスやフラッシュランドの接

* 早稲田大学理工学部、早稲田大学材料技術研究所 (東京都)。School of Science and Engineering, Waseda University, Laboratory for Material Science and Technology, Waseda University (Shinjyuku-ku, Tokyo).

** 早稲田大学大学院 (東京都)。Graduate School, Waseda University (Shinjyuku-ku, Tokyo).

Fig. 1 The outline of lateral extrusion.

Table 1 Experimental Conditions

Material of billet	A1050
Size of billet	$\phi 20 \times h50$ mm
Heat treatment	Annealing (400°C-8 h)
Lubricants	SUMICO Rocol Paste (MoS ₂)
Extrusion temperature	Room temperature
Extrusion speed	6.6×10^{-2} mm/s

近による変形のように、ひずみ量増大による負荷力の増大が生じないことに本側方押出法の利点がある。この利点に着目し、本法によってディスク形状製品を作製する際の加工可能側方限界ディスク拡大率（以後、側方限界と呼ぶ）を調査し、さらに側方限界向上に対するマンドレル形状の影響について調査する。過去において、製品の板厚や材料の出口部の形状を変化させる研究¹⁾は見られるが、マンドレル形状に関する調査はほとんど行われていない。本研究では、マンドレル表面に様々な加工を施すことによって積極的に側方限界を変化させ、その結果から側方限界を向上させるために必要と考えられる要因を調査することとした。

2. 実験方法

試験片にはA1050押出棒を使用し、実験は冷間で行った。試験片は $\phi 20 \times h50$ mmの丸棒とし、製品の設定板厚は6 mmとした。

実験装置はFig. 1に示したものと同様で、材料の出口部は直角($R=0$)としてある。押出しには100トンアマスラ万能試験機を用い、押出速度は4 mm/minとした。その他の条件を含めて、実験条件をTable 1に示す。

限界直径の測定においては、3個の製品が連続して欠陥を生じない押出量をまず求めた。そして、その際の製

Fig. 2 The constriction which arises at disc products.

Basic Shape	Adding Compressional Force	Unifying Lubricating Condition	Unifying Flow of Material

Fig. 3 Mandrels used in experiment of section area ratio.

品の直径を製品一つに対して3点で測定し、それらを平均することで最大直径を求めた。ただし本研究ではFig. 2に示すように、製品の端部で引張力によって、円板形状の直径の差違が局部的に他の部分と大きく生じたことが目視で観察できた（くびれ）状態を限界と判定した。

2.1 マンドレル形状と側方限界との関係

マンドレル形状は、直径 $\phi 40$ mmで表面がフラットなものを基本とした。本研究ではこの基本形状に対して、表面に加工を施したマンドレルを使用することによって側方限界がどのように変化するかを調査した。

使用したマンドレルの形状をFig. 3に示す。Fig. 3はそれらのマンドレルが、そのデザインから期待される効果によって分類されている。以下にそれら効果をまとめる。

(1) 材料に内向きの力を与えるもの

ディスク形状製品は外径が増大する段階で端部の引張りによって破壊する。そこで材料に内向きの力を加えることによって側方限界の向上を期待したものである。その考え方を具体的にマンドレル形状に現すと、マンドレルには次のような条件が必要となる。

- 直径を増大させたもの
- マイナスのテーパを付加したもの

Table 2 Measures of radial grooves (mm)

Number of groove	6, 8, 12
Depth of groove	0.25, 0.5, 1.0, 1.5

Fig. 4 Results of experiment of section area ratio.

c) 同心円状に溝を加工したもの（無潤滑状態）

(2) 加工時の潤滑状態を均一にするもの

本側方押出法では材料に大変形が加えられるため、潤滑が一つの大きな問題となる。マンドレル上の潤滑剤が容易に払拭されることが基本形状（φ40，フラット）での実験からわかっているため、潤滑剤だまりとなるような溝を持つマンドレルによって、側方限界の向上を期待したものである。具体的には、マンドレルに次の加工と条件が必要となる。

a) 同心円状に溝を加工したもの（潤滑状態）

(3) 材料の流れを均一にするもの

ディスク作製時に不均一な材料供給が起こることは、側方限界の向上にとって非常に不利な要因となる。そこで、円周方向に均一な流れを実現することによって、側方限界の向上を狙ったものである。前述と同様、マンドレルに具現化すると次のようになる。

a) プラスのテーパを付加したもの

b) 放射状に溝を加工したもの

c) 同心円状の段を持つもの

ただし、以上のうち同心円状に溝を加工したもので無潤滑のものとは、マンドレル面にのみ潤滑剤を塗布しないもので、その他の部分には十分に潤滑剤を塗布するものとした。

2.2 放射溝形状の側方限界に与える影響

マンドレルに加工された溝が側方限界に影響を与えることは容易に想像できるが、放射溝付マンドレルに関してその溝形状を変化させることによって側方限界にどの程度の違いが見られるかを調査した。Table 2 に使用した放射溝付マンドレルの溝形状を示す。

ただし溝本数は、溝同士の角度の間隔を規定するパラ

Fig. 5 The comparison of disc profile.

メータである。つまり溝本数に従って放射溝同士の角度間隔が決定する。数値として表せば、溝本数が6本の場合は溝角度間隔が60 deg, 8本の場合は45 deg, 12本の場合は30 deg となる。

本研究においては、まず溝深さを1.0 mm に固定した上で溝本数を変化させ、その結果が最も良好だった溝本数において、溝深さを変化させることによって溝本数および溝深さの側方限界に与える影響を調査した。

3. 実験結果

3.1 マンドレル形状と側方限界との関係

Fig. 4 に実験結果を示す。ただし側方限界 T は、作製されたディスクの断面積 A_1 を、試験片の初期直径における断面積 A_0 で除算することによって無次元化したものである。

$$T = A_1 / A_0 \quad (1)$$

また側定対象としたディスクは、端部に前述のようなくびれ状態が生じる直前のものとした。

結果から側方限界の向上がよく認められたマンドレルを以下に示す。マンドレル表面に同心溝を有する場合で、かつ無潤滑状態の場合は、側方限界 T は7.40 となり、放射溝の場合は6.47, 同心段の場合は6.20 となる。

Fig. 5 に、基本形状としたフラットなマンドレル、同心溝マンドレル（無潤滑状態）、同心段マンドレルの3種類を用いた場合の製品の断面形状を示す。

Fig. 5 からわかるように、フラットなマンドレルを用いた場合にはコンテナを出た材料のディスク上面は金型面から離れてしまっており、マンドレル-コンテナ間隙

Fig. 6 The distribution of vickers hardness.

Fig. 7 The comparison of flow vector.

部を満たしていない。その傾向はディスクの先端部へ行くに従って顕著になり、端部の肉厚は4 mm程度となり、材料はマンドレル側のみ接触している。

それと比較して他の2種類のマンドレルでは、図から明らかなようにフラットなマンドレルを用いた場合よりも全体に均肉化していることがわかる。

同心溝マンドレルの場合は、押出しが進行する段階で同心円状の溝に材料が流れ込むことによって溝が抵抗となり、マンドレル側での材料の流れが妨害されるものと考えられる。そのため材料が主にコンテナ側を流れることになり、よって均肉化が可能となったものと考えられる。

Fig. 6 にフラット・同心溝マンドレルのディスクの硬さ分布を示す。ただし硬さはビッカース硬さで、マンドレル面から1 mmの位置のものである。また加工前の試験片のビッカース硬さは、HV=21.7であった。

Fig. 6 から、フラットなマンドレルを用いた場合には、製品端部において硬さが極端に減少していることがわかる。それと比して、同心溝では硬さは緩やかに減少しているだけである。このように、特にフラットなマンドレルを用いた場合において、ディスク端部に加えられるひずみが小さいことがわかる。つまり押出しを通じて、先端部は直径の拡大による円周方向への伸びを受けるだけで、後から流れてくる材料によって押し流されているだけであるものと考えられる。円周方向の伸びはディスク端部の板厚を減少させるのみで、製品をさらに引

Fig. 8 The broken disc in lateral extrusion.

張りに弱い形状にし、これによりディスクは破断する。

同心段マンドレルの場合には、ディスク端部へ行くに従って若干の肉厚の減少が見られるが、フラットなマンドレルと比較するとその傾向は小さい。これは押出し初期においてマンドレルの同心段部がデッドメタル域となり、変形領域との境界面がコンテナ側材料出口部と同じ固着摩擦状態となりそれによって流れが拘束され、上下の変形がフラットなマンドレルを用いた場合と比較して均等に進むためであると考えられる。そのため、このときの製品端部はマンドレル側に沿うようにはならず、マンドレル-コンテナ間隙部を均等に満たしている。

このことを確認するために平面ひずみ状態での格子線解析実験を行い、材料の流動ベクトルを調査した。結果をFig. 7に示す。Fig. 7から明らかなように、同心段の存在によってデッドメタル部の形状が変化し、クリアランス部の中心側へ移動している。

以上から側方限界の向上だけを考えた場合には、ビレット直下での材料流れをある程度拘束することが必要であることがわかる。変形部での潤滑状態を良好にしたり、材料の流れやすい金型形状を設計したりすることは、この場合には側方限界を低下させる。

Fig. 8 に、フラットなマンドレル・放射溝マンドレルを用いて作製したディスクの破断の様子を示す。

フラットなマンドレルを用いた場合には、ディスク端部に欠陥が生じた場合、そこから発生した亀裂がその1箇所において急激に成長していることがわかる。それと比べて放射溝マンドレルでは、溝によって刻まれた突起部のうち数箇所でも同時に亀裂が成長している。つまり放射溝マンドレルにおいては、放射溝による突起によって欠陥や亀裂等がディスク外周上に分散して存在することとなり、側方限界が向上するものと考えられる。

放射状の突起は、ディスクの外径が拡大していく際に発生する欠陥、もしくは欠陥に成長する以前のひずみをディスク上に均等に分布させ、それらが1箇所に集中することを防ぐ働きがあるものと考えられる。このことよって、放射溝マンドレルにおいては側方限界が向上する。

Fig. 9 Section area ratio of superposed elements mandrel.

Fig. 10 The relation between number of grooves and section area ratio.

以上をまとめると、以下の2点のような効果のあるマンドレルのデザインが、側方限界の向上に有効であることがわかった。

- ① ディスク端部の肉厚を確保できるもの
 - ② 円周方向に対してひずみ・欠陥を拘束できるもの
- ここで、これらの2点が機能として独立したものであることを確認するために、放射溝と同心段の要素を複合したマンドレルを作製し、側方限界を調査した。

結果を Fig. 9 に示す。結果から、要素を重ね合わせることによって、より一層の側方限界の向上が可能であることを確認した。

3.2 放射溝形状の側方限界に与える影響

Fig. 10 に溝本数と側方限界との関係を示す。

溝本数を0本とするということは、フラットなマンドレルによって製品を加工していることと同一となることである。しかし、側方限界自体は直線的にフラットなマンドレルを用いた状態に接近しない。つまり、溝は十分に亀裂の起点となる性質を持っているものと考えられる。したがって、溝本数が少なすぎるような場合には側方限界は低下している。

逆に本数を∞とする場合を考えれば、こちらも結果的にマンドレルの形状としてはフラットなマンドレルにな

Fig. 11 The relation between thickness of disc and section area ratio.

Fig. 12 The relation between depth of grooves and section area ratio.

る。このときには、溝深さ分だけ板厚を増加させた製品を作製することと同一の結果となるはずであるが、Fig. 11 に示すように溝本数12本での側方限界は、板厚7.5 mmでの側方限界を上回っている。このことから放射溝の効果がわかる。

Fig. 12 に溝深さと側方限界との関係を示す。

マンドレル上に加工された溝の深さに関しては、板厚に対応した最適値が存在するものと考えられる。Fig. 11 および Fig. 12 から、製品の板厚を大きく、マンドレルの溝深さを深くすれば、より成形性が向上する。

5. 結 言

側方押出時におけるディスク形状製品の作製において、様々なデザインのマンドレルを用い、側方限界の向上を目的とする実験を行い、以下の知見を得た。

側方押出法において、低負荷でディスク状製品を加工する際、ディスク端部の肉厚を確保でき、かつ円周方向にひずみや欠陥を拘束できるようなマンドレルを採用することによって、その成形加工限界は向上する。さらに、この2つの機能を複合することにより、その効果は顕著となり、側方変形の加工限界は向上することが明らかになった。

参 考 文 献

- 1) 山田：円盤押出しの研究，日本金属学会誌，**46** (1982)，1017.
- 2) 松浦佑次，石田公一：鋳研報告，**41** (1985)，49.