ポートホールダイ押出しにおける
ダイ圧力分布の測定

金 英泰*・池田 圭介**・村上 紘**

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 49, No. 7 (1999), pp. 296-301

Measurement of pressure distribution on
dies in porthole die extrusion

Young-Tae KIM*, Keisuke IKEDA** and Tadasu MURAKAMI**

While the porthole die extrusion has been widely used in manufacturing hollow products, die manufacturing including die designing has been still dependent on the expert's skill and trial and error practice. Although detailed understanding of die pressure in extrusion is essential to systematic die designing and also leads to more correct results of finite element analysis, the experimental research for die pressure in porthole die extrusion has hardly been found. In this study, in order to investigate the distribution of die pressure in porthole die extrusion, pressure sensor which has lots of concentric serration was used. Pressure sensors were placed on the faces of dies (core and cap), before extrusion starts. The die pressure was examined at two different extrusion stages: the one was just after division process was completed and the other was during steady state. Just after division process was completed, the highest pressure area on the core existed in the vicinity of the porthole near the center. In steady state, pressure gradient was very large in the area between the porthole and die edge, and the pressure around the central part was lower on the core. Besides, the pressure decreased from outside to die exit on cap.

(Received February 3, 1999)

Keywords: extrusion, porthole die, pressure sensor, die pressure distribution

1. 緒 言

ポートホールダイ押出しは軟質アルミニウム合金中空材の製造に広く使われている押出法で、最近では硬質アルミニウム合金にも適用されている。この押出法では材料の分割と接合が同時に行われるため、ダイに高い圧力が働き、かつダイ形状は複雑である。したがって、ダイ設計および作製の重要性は非常に高いものの、実際のダイ設計と作製は経験や試行錯誤に大きく依存しているのが実状であり、合理的なダイ設計のための基準が求められている。

特に、押出しの際ダイに負荷される圧力分布の把握はポートホールダイ設計において必要不可欠であるにもかかわらず、測定面積が広いこと、測定の困難さなどの理由で測定方法はいまだ確立されていないのが現状である。しかしながら押出しの際、ダイに負荷される圧力分布がわかれば、有限要素法などの理論解析に当たって荷重境界条件として入力することによって、今までより一層精度のよい解析結果が得られるのはもちろん、合理的なダイ設計のための有用な情報として活用されるなど、その有用性が高いのは明らかである。ところが、今まで行われてきた押出し時の圧力測定は大部分がコンテナ部位^{1),2)}、パンチ面^{3),4)}、または単純形状の工具

面^{2),4),5)}を対象としており、複雑形状であるポートホールダイを対象とした圧力測定に関する報告例は見当たらなかった。

そこで本報では、ポートホールダイ押出しの際、ダイにかかる圧力分布の測定を試み、その測定法の詳細と結果について以下に記述する。

2. 実験方法

2.1 圧力測定法

今まで行われてきた接触圧力測定法には測圧ピン法、セレーション形感圧素子法⁵⁾、ひずみゲージ法¹⁾、感圧箔による測定法⁶⁾、光ファイバ式変位法⁷⁾等があり、これらの測定法にはそれぞれの長一短がある。この中でセレーション形感圧素子法は、広い面積にわたり2次元的な圧力分布測定が可能である、感圧素子材料の変更により幅広い範囲の圧力測定ができる、適用が容易であるなどの利点を有する。反面、加工過程中の圧力変動には追従できず、最大圧力しか得られないことが欠点となる。しかし、押出加工のように定常的に変形が進行する場合には圧力変動は小さいと見られることから、本研究に最も適していると判断し、この方法を採用することにした。過去に報告されているセレーション形感圧素子

* 東北大学工学研究科材料加工プロセス学専攻大学院生 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉02)。Graduate student, Department of materials processing, Tohoku University, (Aobayama 02, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi 980-8579).

** 東北大学工学研究科 (仙台市)。Department of materials processing, Tohoku University (Sendai-shi, Miyagi).

Fig. 1 Fabrication process of pressure sensor.

のほとんどは転造ダイによって作られた直線溝が平行に配列した長方形であり、本研究に必要な円板形状の感圧素子には適していない。そこで、同心円状にセレーション形状を機械加工した円盤状感圧素子の作製を試み、ポートホールダイ押出しの際の分割ダイ面上およびウェルディングチャンパ底面上に負荷される面圧分布の把握を目指した。

2.2 感圧素子の作製方法

感圧素子材料としては、純鉛を熱間変形モデル材料とした予備実験を通じ、分割工程のみにおける圧力測定には1050アルミニウム板材（厚さ0.5 mm）を、定常押出工程における圧力測定には5052アルミニウム合金板材（厚さ0.6 mm）を使用することにした。ポートホールダイ押出しにおけるダイ圧力分布を測定するための感圧素子の作製手順を Fig. 1 に示した。各々の板材から円盤形素子を打抜いた後、旋盤加工のために作製した専用工具に取付け、片面に Fig. 2(a)に示す所定寸法の同心円状セレーション形状を有する感圧素子を旋削加工した。感圧素子の外径は分割ダイ面の圧力測定用は49.8 mm、ウェルディングチャンパ底面の圧力測定用は46.2 mmとした。その後、Fig. 5(b)に示した2種のポートホール形状およびウェルディングチャンパの穴形状と同一寸法の電極を作製し、放電加工により Fig. 3 に示す最終形状に作製した。放電加工後、洗浄された板材にそれぞれ所定の焼なまし処理を施し、これを感圧素子として用いた。焼なまし後の1050および5052の硬度値は各々 HV23, HV55であった。

作製した感圧素子のセレーション形状の均一性を表面粗さ測定機と光学顕微鏡を併用して調べたところ、感圧素子全体にわたって一様なセレーション形状が加工されていることが確認された。円盤状感圧素子の中央断面の光学顕微鏡写真を Fig. 2(b)に示す。これからほぼ目標寸法通りのセレーション形状を持つ感圧素子が得られているのがわかる。

2.3 較正試験

圧力値と感圧素子のセレーション頂部のつぶれ幅との関係を求めるべく、上記2種の板材を対象とし較正試験を行った。

Fig. 2 Designed cross-sectional dimension of pressure sensor (a) and photograph of pressure sensor obtained by lathe machining (b).

Fig. 3 Pressure sensor for small porthole die on core (a), pressure sensor for large porthole die on core (b) and pressure sensor for small and large porthole die on cap (c).

較正試験は焼なまし処理された円盤状感圧素子から切出した15 mm×15 mmの正方形素子を試験片とし、平行平面工具を用い、常温（約25℃）で到達荷重を種々変化させて1分当たり1 mmの速度で圧縮変形を行った。その際、なるべく均一な変形になるように感圧素子の両面に二硫化モリブデン（MoS₂）を均一に塗布して潤滑した。圧縮試験後のセレーションのつぶれ幅は光学顕微鏡を用い、20倍の倍率で測定し、Fig. 4の較正曲線を得た。この較正曲線から1050製素子では130 MPaまで、5052製素子では250 MPaまでの範囲で圧力とセレーションのつぶれ幅とがよい直線関係を持つことがわかった。

2.4 ダイ圧力分布測定実験

押出材料としては熱間変形モデル材としてよく使われている純鉛（直径49.8 mm×高さ50.0 mm）を用いた。ダイ圧力分布を測定するための押出実験は Fig. 5(a)に示す装置を使い、常温（約25℃）、無潤滑、毎分1 mm速度の条件で行った。ダイ圧力分布は Fig. 6に示す荷重-ストローク曲線における分割工程完了直後（A位置）と定常押出状態の間（F位置）の2位置で測定した。感圧素子はセレーション加工面が測定したいダイ面に接するようにした。分割工程完了直後（A位置）までの場合は、分割ダイ面上のみに感圧素子を置き、定常押出状態の間（F位置）までの場合は、分割ダイ面上とウェルディングチャンパ底面上に感圧素子を置き、押出

Fig. 4 Relationship between plateau width and contact pressure.

(a) Extrusion apparatus

(b) Small porthole die and large porthole die

Fig. 5 Extrusion apparatus and dies.

実験の間、感圧素子が動かないように固定した。

ダイ圧力分布測定は、ダイ形状による変化を調べる目的で、Fig. 5(b)に示す2種のダイを対象として行った。以後、小さいポートホルのダイを小穴ダイ、大きいポートホルのダイを大穴ダイと呼ぶことにする。分割比は小穴ダイが

Fig. 6 Extrusion load-stroke curve.

Fig. 7 Process of porthole die extrusion.

2.70、大穴ダイが2.15である。下のキャップは同一形状のものを使用したので、押出比は両ダイともに20.8である。

押出実験は2種のダイに対し、分割工程が終わった直後(A位置)と定常押出しのところ(F位置)で、各々押出しを中止し、押出工具を分解し、感圧素子が付いている押残りを取出した。実験はそれぞれの位置まで2回ずつ行った。その後、感圧素子の全体面を対象とし、倍率20倍の光学顕微鏡を用い、中心を通る基準線から5度間隔で、感圧素子のセレーシヨンのつぶれ幅を測定した。

3. 結果および考察

3.1 ポートホールダイ押出工程

Fig. 6の押出荷重-ストローク曲線の中で、小穴ダイを使った場合AからFまでのポートホールダイ押出工程別写真をFig. 7に示す。この写真はFig. 6の各位置で押出しを中断し、ダイを取出し、下のキャップをはずして撮影したものである。ビレットを押込むと、ビレットはP位置で3つに分流しはじめ、ポートホールの中を流動した材料はA位置で材料の先端部が下のウェルディングチャンバの底面に到達する。そこで荷重は急激に上昇する。ここから材料はウェルディングチャンバの空間部分を順次満たし続け、C位置から

分割された材料同士の接触が開始する。次いでウェルディングチャンバ部分が完全に材料で充填され、Eのところからパイプがダイの外側へ出はじめ、定常押出状態に入ることがFig. 6とFig. 7からわかる。大穴ダイは小穴ダイよりポートホールの体積が大きいので、分割工程完了までのストロークが長いこと、小穴ダイの方が大穴ダイより全体工程にわたり荷重が高いことがFig. 6から見てとれる。

3.2 圧力値の妥当性の検討

上記の測定結果に基づき、Fig. 4の較正曲線からセレーシヨンのつぶれ幅の測定点における圧力値を求めた。Table 1に実測荷重値と感圧素子の測定結果に基づいた積分荷重値および積分荷重値を該当測定面の面積で割った平均圧力値をまとめた。Table 1からすべての項目について小穴ダイの値が大穴ダイの値より大きいことがわかる。両ダイにおける分割ダイ面上の積分荷重値間の差より平均圧力値の差が小さくなったのは、分割ダイ面上の面積が小穴ダイの方が大穴ダイより大きいためである。

分割工程のみの押出荷重と分割ダイ面上の積分荷重を比較すると、Table 1から明らかなように、大穴ダイで18.0 kN、小穴ダイで17.3 kNの差があり、近似的に同じ程度の値である。感圧素子による圧力測定は、押出荷重-ストローク曲線(Fig. 6)のA位置で素子を取り出して行ったが、実際には分流開始時点のP位置で最大荷重を示し、測定された圧力分布はP位置における値を反映しているとも考えられる。しかし、この間にピレット長さの減少に伴ってコンテナ壁面摩擦力が減少する一方で、ポートホールに流入した分によるポートホール壁面摩擦力の増加が生じる。もし、コンテナとポートホールの両壁面で摩擦条件が同じならば、荷重は増加すべきであるが、実際にはわずかながら減少傾向にあり、この段階でのポートホール壁面摩擦の寄与は小さいと考えられる。とするならば、押出荷重と分割ダイ面上の積分荷重との荷重差は主にコンテナ壁面での摩擦分に相当するとみなされる。仮にこの荷重差のすべてがコンテナ壁面摩擦によるものとすれば、摩擦因子 m は約0.45、荷重差の80%がコンテナ壁面摩擦によるならば、 m は約0.35になる。無潤滑状態で押出しを行っているので、一見 m の値が小さいように思われるが、被押出材の純鉛自体が低い摩擦因子値を与えるのみならず、押出荷重も低いので、 m の値としては妥当な値と判断

Table 1 Measured maximum extrusion load, integrated extrusion load and mean pressure

		Small porthole die	Large porthole die
Measured maximum extrusion load (kN)	Until division process is completed	103.9	86.2
	In steady state	294.2	274.6
Integrated extrusion load (kN)	Just after division process is completed on core	86.6	68.2
	In steady state	on core	156.4
		on cap	153.4
Mean pressure (MPa)	Just after division process is completed on core	70.1	65.0
	In steady state	on core	149.0
		on cap	105.1

される。定常押出しにおけるウェルディングチャンバ底面上の積分荷重は、小穴ダイで164.5 kN、大穴ダイで153.4 kNの値が得られている。この値は純鉛の多素材押出しの荷重⁸⁾にはほぼ匹敵している。多素材押出しはウェルディングチャンバ内の変形を模擬した押出法であり、構造の多少の違いを考慮すれば、セレーション形感圧素子による測定結果は信頼できる値であると言える。

3.3 ダイ圧力分布

較正曲線から求められた2回の実験の平均圧力値を常温(約25°C)における圧縮実験から得た純鉛の平均流動応力値11 MPaで割って無次元化し、補間法により定めた測定面の1/3に当たる部分の圧力分布を示したのがFig. 8からFig. 10である。いずれもポートホールの中心を通る線に対してよい対称性を示し、ポートホールの形状が異なっても圧力分布の大略の傾向は類似している。また、Table 1の平均圧力値を中心に幅広い圧力値がダイ面上に分布していることがわかる。

Fig. 8に示す分割工程のみの分割ダイ面上の圧力値は小穴

Fig. 8 Pressure distribution on core just after division process is completed.

Fig. 9 Pressure distribution on core in steady state.

Fig. 10 Pressure distribution on cap in steady state.

ダイの方が大穴ダイの方より高いものの、圧力分布に関しては両者とも類似しており、ダイ中心部とポートホールの外縁部で圧力が低く、ポートホールの内縁沿いに最も圧力が高い部分が存在する。また、ポートホール両サイド周辺も比較的高い圧力値となっている。ポートホール周辺以外の部分では、中心部から外側に向かって圧力が増加する傾向が見られる。

定常押出状態における分割ダイ面上の圧力分布の様相は、Fig. 9に見られるように、分割工程のみの場合とは異なっている。ポートホールの外縁部で最も低い圧力値を示している点は分割工程のみの場合と共通しているが、それに隣接するダイ縁部で最大の圧力値となっているのが特徴的で、その領域で極めて大きな圧力勾配を示している。もう一つ興味を引く点は、ダイ中心部の圧力値が低いことである。ダイ中心部は材料が分流する位置の直下であり、単純に考えれば圧力値が高いと予想されるが、結果は逆である。むしろダイ中心部から離れたポートホールの内縁部沿いで比較的高い圧力値を示している。分割工程のみの場合にも同じような結果となっているが、それと比較すると、定常状態ではポートホールの内縁部の応力集中が緩和される傾向が認められ、小穴ダイでその傾向が強く現れている。また、ポートホール両サイド沿いの圧力は周囲より低い状態にある。全体的にポートホール周囲の圧力は他の部分より低くなる傾向が見られ、分割工程

のみにおける圧力分布と大きく異なる点である。分割工程のみの変形段階においては、ポートホールに流入した材料はポートホール壁面と不完全な接触状態にあり、ポートホールエッジ部に応力集中が起こると推測できる。これに対し、定常状態においては、ポートホールに流入した材料が高い圧縮応力を受けてポートホール壁面に完全密着して流動しにくい状態になるため、壁面近傍の材料が圧力を分担する結果として、ポートホールエッジ部の応力集中が緩和されるかあるいは圧力が低下するものと思われる。ポートホール外縁部で圧力勾配が大きくなる明確な理由については不明であるが、この部分は狭い範囲の中で材料の変位方向が大きく変化すると考えられ、材料流動挙動と関係があるものと推察される。

Fig. 10は定常押出工程におけるウェルディングチャンパ底面上の圧力分布である。参考のため、ポートホール位置に該当する部分を点線で描いた。キャップ形状は小穴ダイ、大穴ダイとも共通であるが、分割ダイのポートホール形状の違いを反映して圧力分布の様子が異なっている。両者とも中心に近いダイ円孔部で最も圧力が低く、外周部に向かって圧力は増加していく。圧力最大の部分はポートホールの下部に存在し、大穴ダイの方が小穴ダイよりも外側に位置している。それに対応するように、円孔部周辺の圧力は小穴ダイの方が低い圧力値を示している。このような差違は、小穴ダイのブ

リッジ部の幅が外周にいくにつれて広がっていることに関連していると思われる。また、大穴ダイの場合、円周方向の圧力分布は比較的一様であるが、小穴ダイでは接合が起こる部分（圧力分布図の両端部）へ向かって圧力の減少が見られるが、ポートホール部から接合部への流動距離が長いことを考えれば当然の結果と言える。

以上の分割ダイ形状、押出工程別の圧力分布の変化は、デットメタルゾーンを含む材料流れの様子と密接に関連していると予想されるが、被押出材として用いた純鉛は、常温での再結晶によりメタルフローの観察が不可能であるなどの事情から、ここではメタルフローとの関係について言及することは避け、測定結果の説明に主眼を置いた。メタルフローの詳細については、現在アルミニウム合金を対象とし研究が進行中であり、別途報告の予定である。

これまでに有限要素法によるダイ応力分布の予測が試みられている^{9)~11)}が、実測したダイ面圧力分布を境界条件として用いることにより、今まで以上に正確なダイ内部の応力分布、ダイ変形量および破損部予測ができると考えられる。本研究では、純鉛を熱間変形モデル材料とし、かつポートホールダイ押出しとしては最も形状が単純な円管押出しを対象としたが、適当な感圧素子材料があれば、形状が複雑なアルミニウム合金中空材の熱間押出しに対しても本方法が適用でき、ダイ圧力に関する定量的知見が得られるであろう。

4. 結 言

本研究を通じて得られたことを以下にまとめた。

(1) ポートホールダイ押出しの際、ダイに負荷される圧力分布を調べるため、同心円状にセレーション形状を有する円盤状感圧素子を作製し、分割ダイ面上およびウェルディングチャンバ底面上にかかる圧力分布について信頼できる結果を得た。

(2) 分割工程のみにおける分割ダイ面上の圧力分布は、ダイ中心部とダイエッジ部に近いポートホールの外縁部で圧力

が低く、ダイ中心部に近いポートホールの内縁沿いに最も圧力が高い部分が存在する。また、ポートホール両サイド周辺も比較的高い圧力値となっている。

(3) 定常押出状態における分割ダイ面上の圧力分布においては、ポートホールの外縁部で最も低い圧力値を、隣接するダイ縁部で最大の圧力値を示し、その領域での圧力勾配が極めて大きい。ポートホール周囲の圧力は他の部分より低い傾向にあり、またダイ中心部は比較的低い圧力値を示している。

(4) 定常押出工程におけるウェルディングチャンバ底面上の圧力分布においては、中心に近いダイ円孔部で最も圧力が低く、外周部に向かって圧力は増加していく。最高圧力値を示す部分はポートホールの下部に存在し、その位置はポートホール形状に依存する。

終わりに、本研究を遂行するに当たって、感圧素子の作製を担当して頂いた東北大学工学部技術部の山田義信氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 時澤 貢, 高辻則夫, 室谷和雄, 中村 隆, 後藤善弘: 塑性と加工, **30** (1989), 1675.
- 2) 松原茂夫, 工藤英明: 塑性と加工, **32** (1991), 862.
- 3) 松原茂夫, 工藤英明: 塑性と加工, **32** (1991), 874.
- 4) 松原茂夫, 工藤英明: 塑性と加工, **32** (1991), 868.
- 5) 松原茂夫, 工藤英明: 塑性と加工, **32** (1991), 589.
- 6) 池 浩: 塑性と加工, **33** (1992), 1394.
- 7) 米山 猛, 高塚和彦, 北川正義, 畑村洋太郎: 塑性と加工, **36** (1995), 1397.
- 8) 村上 紘, 謝 建新, 高橋裕男: 塑性と加工, **31** (1990), 495.
- 9) 家田詔夫, 田中康之: 塑性と加工, **23** (1982), 965.
- 10) 沖 善成, 津野亮二, 中村正志, 吉田善博: 軽金属, **41** (1991), 114.
- 11) Y. Qin and R. Balendra: Int. J. Mach. Tools Manufact., **37** (1997), 183.