アルミニウム押出し棒の不均一流れ

池田 千里*・池田 圭介*・福田 武司*
徳能 裕巳*・田中英八郎*

The inhomogeneous flow in extruded aluminum bar

UDC 669.71-12 : 621.77 : 548.23

IKEDA Senri*, IKEDA Keisuke*, FUKUDA Takeji*,
TOKUNO Hiromi* and TANAKA Eihachiro*

Most of extrusion defects are caused by inhomogeneous flow of materials during extrusion, and there are many singular phenomena resulted from inhomogeneous flow in the outer parts of the products. But few quantitative studies of the metal flow in extrusion, especially near the outer surface of the products with high reductions, have been made. The present work was carried out to study quantitatively the flow of aluminum extruded with high reductions. The redundant strain from center to surface of the products was evaluated and compared with the slip line field theory.

The results are summarized as follows:

- 1) By a unique method of extruding aluminum billets with high purity Au wires as flow line markers, redundant strain values in the outer parts of the extruded bars could be obtained quantitatively.
- 2) It can be said, within the experimental errors, that the intervals between longitudinal markers of the billet are similarly reduced in the extruded rod. Consequently, the displacement in the direction of the diameter agrees with that in plane strain analysis by the slip line field theory.
- 3) The flow lines of the products could be represented by a function, $Y = a \exp(bX)$, where X is the distance from the center line of the bar, Y is the height of the marker from X -axis, and a and b are constants. On the other hand, the flow lines from the slip line field theory under equivalent conditions were represented as $Y = mX^n$, where m and n are constants, irrespective of extrusion ratios and friction conditions.
- 4) The redundant strain in the outer part of the product is almost ten times as much as that from the theory. This may give a clue to make clear the anomalous structure near the surface of the extruded metals.

(Received June 16, 1975)

1. 緒 言

押出し加工では素材が工具によつて密閉され、他の加工法に比べて高い三軸の圧縮力が加わるため、一回の工程で大きな変形量が得られる点有利である一方、流れの不均一が著しいことが特徴である。特に押出し棒表面近傍では摩擦の影響もあつて付加的せん断ひずみが極端に大きく、このことが古くから知られている表面層粗粒組織¹⁾や piping²⁾、表皮の巻き込み³⁾、横割れ⁴⁾等の欠陥の直接あるいは間接的原因となつている。これら欠陥の成因を追求したり、あるいは健全な押出し材を得ようとする場合に、押出し棒全体にわたる付加的せん断ひずみの分布を定量的に求めることは重要な意義を持つと考えら

れる。

押出し製品欠陥究明のための流れに関する研究は古くから数多くなされてきているが、理想変形を基にした解析⁵⁾が行なわれ、しかも低い押出し比の実験例が大半を占めている。しかしながら工業上の押出し加工では鑄造組織鍛錬の目的も兼ねるのが普通で、そのためには約80% (押出し比5) 以上の加工率が必要⁶⁾とされている点からみて、より高い加工度の実験例が望まれるが、定量的に検討された例は極めて少ない。

一方、理論的に付加的せん断変形の解析が可能になつたのは Hill⁷⁾ のすべり線場理論に基づく解析が報告されて以来であり、現在に至つている。すべり線場理論による押出しの流れと実験から得た流線とを比較した報告例

* 東北大学金属材料研究所 (仙台市)。The Research Institute for Iron, Steel and Other Metals, Tohoku University (Sendai).

もいくつかあり⁸⁾、定性的にはほぼ一致していると言われているが、定量的な比較が行なわれているわけではなく、まして高押し比での比較例はほとんど見当らない。

さらに押し欠陥に直接関係する表面層での流れについても、マーカーとして格子線⁹⁾をはじめ種々の方法^{9), 10), 11)}を用いた研究がなされているが、そのいずれも、押し棒表面に至るまで測定が困難であるがために、定性的解析の域を出ていない現状である。このように実際上価値のある、高押し比あるいは押し棒表面近傍における、流れの解析例が乏しいのは、大きな付加的せん断変形を追随できる手段が考え出されなかつたためと考えられる。

以上の観点から、本研究では広汎な押し比(5~20)にわたってアルミニウム冷間押し棒における流線を表面に至るまで測定できる方法を試行すると同時に、得られたせん断ひずみ量をすべり線場理論による結果との定量的な比較を行ない、検討を加えた。

2. 実験方法

素材には板厚 35 mm 板幅 1,000 mm の純度 99.5% アルミニウム JIS 規格第 3 種熱延材を用い、これから径 20 mm の長さを適当に変えたビレットを切り出した後、400℃×1 hr の焼鈍を行なったものを試料とした。Table 1 に実験に供した素材の分析内容を示す。実験には 50 t および 30 t 万能試験機を使用し、室温で直接押しを行なった。

押し加工時の材料の流れ観察のため、ビレットは平滑な面を有する半割りとした。ビレット半割り面に切った格子溝は幅 0.5 mm 深さ 0.5 mm の正方形断面とし、このビレットの溝の中に油絵具、銅線、金線を埋め込んだものを試料とした。さらに工具を用いて溝に新生金属面を出し、純度 99.99% の金線を打ち込んで圧着させたものを試料として加えた。押し比は 20 以下 15, 10, 5 の 4 段階のほか、Thomsen ら⁸⁾の報告例と比較のため、類似した押し比 7.5 を選定した。Table 2 に各押し比における試料形状、マーカーの位置等を示す。マーカーの位置は、あらかじめ予備実験を行ない、定常流れが得られるところに設定し、それに応じてビレット長さを決定した。

流線の測定を容易にするため縦方向マーカー、横方向マーカー別個の試料を用意した。ラム速度は加工中の温

Table 1 Chemical composition of specimens.

Fe	Si	Al
0.40	0.090	rest

Table 2 Specimens for extrusion.

Extrusion Ratio	Billet length (mm)	Position of marker (mm)	Dia of extruded rod (mm)	Discard length (mm)
5	60	25	8.80	13
7.5	55	20	7.40	13
10	46	15	6.40	13
15	40	14	5.20	13
20	36	13	4.50	13

度上昇¹²⁾を押えるため 1~2 mm/min とした。潤滑剤には鉛薄膜を用い、無潤滑押しではアルミニウムビレットを空押ししてコンテナ壁にあらかじめ焼き付きを起こさせた後、試料をコンテナに挿入した。実験はすべて直角ダイスを使用して行なった。

変形後の試料のマーカーの流線は 1/1,000 mm 精度のコンパレータを用いて測定し、押し棒中心線におけるマーカーの位置を原点にとり、流線各個所の座標を求めた。併行してすべり線場理論の直接押しに対するホドグラフからも流線を求め、実験結果のそれと定量的比較を行なった。

3. 実験結果および考察

Fig. 1 は横線マーカーの流線の略図である。(A)は溝にマーカーを入れず押しした場合で、表面近傍に至つて細くなり、溝とアルミニウム地との識別が困難になる。(B)は油絵具を溝の中に埋めて押ししたもので、加工に先立つて十分乾燥させても、著しい変形を受ける個所では溝からはみ出し、流線としての役をなさない。(C)は銅線あるいは金線を溝に埋めて押しした場合で、流線は各所で分断されており、表面近傍まで流線を測定することは不可能である。(D)は金線をビレットの格子溝中に圧着させた場合で、マーカーは大きなせん断変形にも追随して良く伸び、表面に至るまで流線として明確に観察することができた。

Photo 1 に金線マーカーの流線の一例を示す。このように高純度金線埋め込み圧着法によつてはじめて高加工率の押し材の不均一流れの測定が可能になった。従来マーカーとしてピンの打ち込み⁹⁾、インク¹⁰⁾、異種合金の積み重ね¹¹⁾などが見うけられるが、いずれも棒表面近傍の流れを解析するには緻密さに欠けている。本実験のように金線の圧着を採用した場合、金線特有の延性、金とアルミニウムの化学的・物理的結合性、アルミニウム地との色彩対照性、半割りビレットのための分離剤・不慮の傷などで不明瞭となつても耐食性がよいためエッチングにより鮮明な流線が得られる点、変形抵抗が類似しているためアルミニウム自体の変形にほとんど影響を与えな

- A: Groove line
 B: Oil color
 C: Copper wire
 D: Gold Wire clad to aluminum

Fig. 1 Schematic representation of flow patterns in extrusion using various markers.

い点などが考えられ、金線圧着法はアルミニウム押出しのマーカーとして最も有利な方法の一つであると思われる。

縦線の場合は溝のみで高押し比でも流線の測定が可能であったので、マーカーとして特定の材料を埋め込むことなく押しを行なった。

不均一流れを助長する因子として摩擦の影響が第一に考えられることから、摩擦条件を極端に変えて押しを行なった。**Photo 2** にそれぞれの押し後の表面の状態を示す。a) は鉛薄膜を潤滑剤として用いた場合で、加工

後も鉛薄膜が試料を完全に覆っており、潤滑は良好と思われる。この状態はすべり線場理論における「無摩擦」状態に匹敵すると考えてよいと思われる。b) は無潤滑でコンテナ壁にあらかじめ焼き付きを起こさせた後に押出したもので、極端な焼き付き、むしれが見られる。この状態は理論における「付着摩擦」状態に近いとして良いと考えられる。

摩擦条件の極端に異なる押し棒の付加的せん断ひずみ量を知るために、縦線および横線それぞれの流れを調べた。**Fig. 2** はピレットに等間隔に印した35本の縦線の流れ測定の結果を示すものである。変形後の間隔が変形前のそれと相似的に縮小するとした場合の値を実線で示しており、鉛薄膜潤滑・無潤滑いずれの条件で押しした場合も測定誤差内で等間隔に分布するとみなして差し支えないことがわかる。これはすべり線場理論において、未変形部で等間隔に引いた縦線はダイス孔通過後の製品においても等間隔¹³⁾、という変形に合致している。

横線の流線については鉛薄膜を潤滑剤として用いた場合と無潤滑の場合についてそれぞれ**Fig. 3**および**Fig. 4**に結果を図示してある。鉛薄膜潤滑では棒表面に至るまで片対数の直線によく乗っている。一方無潤滑では、内部と表面層近傍と二つの領域に分けられるが、やはり片対数表示で直線となる。したがって押し材の横線の流線は、押し条件・材料に個有の関数 $Y = a \exp(bX)$ (a, b は定数) の形で表示できることがわかる。押し比を変えて行なった場合も同様な傾向が観察された。

得られた縦線の流線・横線の流線から付加的せん断ひずみの絶対量が求められる。平面ひずみ状態とした場合、本押し時の定常流れにおける付加的せん断ひずみ量は押し棒の中心からの距離に対する流線の各位置での勾配で表わされる。**Fig. 5** は鉛薄膜潤滑、押し比20および5の場合の付加的せん断ひずみ量を押し棒中心線からの距離に対して示したものである。押し比20の場合付加的せん断ひずみは表面近傍で800以上にものぼる

Photo 1 Flow pattern of gold marker clad to aluminum billet, after extrusion.

(a) Using lead foil as lubricant

(b) Without lubricant

Photo 2 Surface appearance of specimens after extrusion. **Fig. 2** Variation of width between longitudinal grid lines in extruded aluminum rod. Extrusion ratio 20.

値となっており、押し比 5 の場合は約 25 である。棒中心部と外周部との付加的せん断ひずみの差が数 10 から数 100 にも及ぶ事実は、押し製品内外の著しい組織不均一の大きな誘因であることを示唆している。一方 Siebel⁵⁾ の楕円体モデルを使った鉛の押しによれば、押し比 4 の場合外周部の流れの勾配が 11.43 となっているのが最大である。楕円体モデルは格子線に囲まれた正方形の中に仮想した球が加工後楕円形に変化するとしてせん断ひずみ量を二次元的に解析するもので、加工度が増すと外周部の格子線が混み入ってきて個々の角度を測定することが困難になる。本実験のように流線が鮮明であれば表面層のひずみ解析は流線の関数表示を行なつて、傾きを計算する方がより簡明で正確であると思われる。

Fig. 6 は無潤滑押しの場合の付加的せん断ひずみ量を示すものである。表面層に至つての急激な変化は、ビレットがコンテナ内の時点から表面層とコンテナ壁との

Fig. 3 Displacement of transverse grid lines in aluminum extruded with lead foil as lubricant. **Fig. 4** Displacement of transverse grid lines in aluminum extruded without lubricant.

Fig. 5 Distribution of the redundant strain in aluminum extruded with lead foil as lubricant.

著しい摩擦により表層部の流れが抑制され、内部の流れが先行すること、およびデッドメタルとの境界で著しいせん断形を受けることが主要な原因と考えられる。

アルミニウム軸対称押出しにおける流線をすべり線場理論によつてどの程度推定しうるかを知るために、実験で求めた流線と理論から求めた流線との定量化を行ない比較した。Fig. 7 に押出し比 7.5 の場合の実験による金線マーカーの流線と、実験と同等の条件下のすべり線場ホドグラフから得られた流線とを比較して示してある。実験から得られた流線(A)は理論から得られた流線(B)よりほぼ一桁大きい変形量を示している。他の押出し比・摩擦条件の場合も同様の傾向を呈した。

Table 3 は各押出し条件での実験および理論から求めた流線の関数表示をまとめて示したものである。理論から求めた流線はどの押出し条件でも $Y = mX^n$ (m, n は定数) に近似でき、実験から得られた指数関数型とは大きな相違を示している。本実験ですべり線場理論による押出し流れとの比較の際に問題となるのは、摩擦、温度勾配、定常・非定常流れ、軸対称変形と平面ひずみ変形、加工硬化等の諸条件の差異であろう。以下これら諸条件に関して個々に検討する。

理論における摩擦条件は求める流れの唯一性を期するため単純なものに限られる。本実験ではなめらかな「無摩擦」と粗い「付着摩擦」状態に近い条件で押出しており、理論による結果との比較を容易にしている。変形中の材料内部の温度勾配は、均質材料として扱っている理論との比較の際に障害となる。本実験ではラム速度は試

Fig. 6 Distribution of the redundant strain in aluminum extruded without lubricant.

験機で可能な限りの低速 (1~2 mm/min) にして温度上昇を抑えてあり、材料各点はほぼ均一な温度で変形していると考えられる。理論における材料の流れは定常として扱っているが、本実験でのマーカーの設定箇所は前も

Fig. 7 Comparison between flow lines observed on aluminum extruded under the high friction condition and determined from the slip-line field theory.

つて実験により定常流れが得られる位置にしてあるので比較の際大きな問題とはならない。

すべり線場法が適用できるのは厳密には平面ひずみ加工に限られるが、ダイス出口速度など適当な調整を行えば軸対称押出しに適用してもかなりの近似が得られる⁸⁾とされている。しかしダイス出口速度を二乗したとしても、押出し比 20 の場合で約 4.5 倍のひずみ量となり、実験値の 1/2 にも達しない。また本実験で使用了材料は加工硬化材料であり、デッドメタル・変形域間の境界は「線」ではなく強いせん断の起こる「領域」となっており、加工硬化が押出し棒表面近傍の著しい付加的せん断ひずみを助長する一因になっていると思われるが、以上を考慮したとしてもすべり線場解をもとにして得られた付加的せん断変形が近似値を与えるとは結論し難い。すべり線場解が押出し圧力の算定に関しては充分な近似値を与えることは周知のことであるが、流れに関しては今後改善の余地があると言えよう。

無潤滑押出しにおいて表面近傍で著しい付加的せん断変形が見られることの裏付けとして、押出し荷重・ストローク線図からその原因を推察することができる。すなわち、Fig. 8 に鉛薄膜潤滑の場合と無潤滑の場合の押出し荷重・ストローク線図であるが、同一試料、同一押出し比でこのように大きな荷重差が生じる原因として単にコンテナ・ビレット間の摩擦力だけでなく、付加的せん断変形量の相違を考えなければならない。点線で示す(C)曲線は無潤滑押出し荷重の(B)曲線から、空押出し実験から得た試料・コンテナ壁間の摩擦力を差し引いた値を示すものであるが、潤滑良好な(A)曲線の荷重をなおも大きく上回っている。したがって、無潤滑押出しにおける高い押出し荷重を引き起こすために、試料・コンテナ間の

Table 3 Functional representation of flow lines of extrusion under various conditions.

Ratio	A	B	
20	$Y = 2.8e^{2.14X}$	$Y = 1.5e^{2.15X}$	Theoretical
	$*Y = 0.1X^{2.79}$	$**Y = 0.03X^{3.13}$	
15	$Y = 0.8e^{2.25X}$	—	
10	$Y = 0.75e^{1.74X}$	—	
7.5	$Y = 1.6e^{1.15X}$	$Y = 0.72e^{1.23X}$	Theoretical
	$*Y = 0.1X^{2.48}$	$**Y = 0.06X^{2.58}$	
5	$Y = 2.5e^{0.63X}$	—	

A: Using lead foil as lubricant

B: Without lubricant

* Frictionless extrusion in plane strain

** High friction extrusion in plane strain

Fig. 8 Effect of lubrication on extrusion load. Extrusion ratio 20.

摩擦力以外に付加的せん断変形がかなりの役割を果たしていると考えられる。

4. 結 論

20以下5まで5段階の押出し比で冷間直接押出ししたアルミニウム棒の流線を特に表面近傍に重点を置いて解析し、次の結論を得た。

1) アルミニウムビレットに流線マーカーとして高純度金線を圧着させることにより、高加工率押出し材の表面層に至るまで付加的せん断変形を定量的に測定することができた。

2) ビレット半割りに等間隔に印した縦線は押出し後、測定誤差範囲内で未変形部が相似的に縮小された等間隔になるとして差し支えない。したがって本押出しにおける材料半割りの縦線の半径方向への変位はすべり線場理論の平面ひずみ押出しの場合と合致する。

3) 押出し材の流線は押出し条件個有の関数形で表示することができ、半径方向を X 、長手方向を Y とすると、 $Y = a \exp(bX)$ 、(a, b は定数) の形で表わされる。同等の条件ですべり線場理論から導いた流線の式は、いずれの押出し比、摩擦条件下でも $Y = mX^n$ (m, n は定数) に近似される。

4) 付加的せん断ひずみ量は、十分な潤滑効果が認められる場合でも、表面層近傍で理論値をほぼ一桁の差異で上回っている。この事実は押出し加工金属の表面部の異常組織を解明する上で重要な示唆を与えるものである

と考えられる。

参 考 文 献

- 1) H. Walbert: Aluminium, **20**, (1938), 379.
- 2) C. E. Pearson and R. N. Parkins: The Extrusion of Metals, Chapman and Hall, London, (1960).
- 3) R. H. Greaves: J. Inst. Metals, **26** (1921 II), 254.
- 4) A. J. Bryant: Z. Metallkde., **62** (1971), 701.
- 5) E. Siebel: "The Plastic Forming of Metals," translated by J. H. Hitchcock, reprinted from *Steel*, (March 19, 1934), 28, (March 26, 1934), 38.
- 6) G. Sachs: J. Inst. Metals, **64** (1939), 261.
- 7) R. Hill: 塑性学 (鷺津ほか訳), 培風館 (1954).
- 8) E. G. Thomsen, C. T. Yang and S. Kobayashi: 金属塑性加工の力学 (工藤訳), コロナ社 (1967).
- 9) C. Blazey and D. Stead: Metal Ind., **100** (July 11, 1963), 53, (July 18, 1963), 88.
- 10) C. E. Pearson: J. Inst. Metals, **64** (1939), 299.
- 11) 竹内, 小林: 軽金属, **21** (1971), 628.
- 12) A. R. E. Singer and S. H. K. Alsamarrai: J. Inst. Metals, **89** (1960 ~ 61), 225.
- 13) 工藤: 塑性と加工, **1** (1960), 219.