

# アルミニウム合金熱間押出し加工に関する基礎的研究 (初期変形挙動)

## Fundamental Study on Hot Extrusion Process of Aluminium Alloy (Initial Deformation of the Billet)

○ 藪 哲 史 (岐阜大院)  
正 王 志 剛 (岐阜大)

正 井 上 吉 弘 (岐阜大)  
正 山 下 新 太 郎 (岐阜大)

Satoshi YABU, Graduate School of Eng., Gifu Univ., 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193

Yoshihiro INOUE, Dept. Mechanical and Systems Eng., Gifu Univ.

Zhrgang WANG, Dept. Mechanical and Systems Eng., Gifu Univ.

Shintaro YAMASHITA, Dept. Mechanical and Systems Eng., Gifu Univ.

*Key Words* : Extruding, Bubble, Billet Upset, Buckling, Numerical Simulation

### 1. はじめに

熱間押出し加工は、アルミニウム合金の成形加工のうちの大きな部分を占め、従来から多くの研究が行われてきている。生産現場で実際に生じる問題では複数の因子が影響し合い、その複合結果が製品歩留まりや加工時間、加工動力、ダイスの耐久性となって生産現場に現れる。どの因子に注目し、どこまで生産現場に還元できるのかが重要であり、近年ではこれまでの経験的アプローチ法に対して数値シミュレーションを実行し、再検証が進められている。

本研究では、直接押出しの実操業時に成形不良となる事象として、製品内に現れる空洞部に着目する。これまで空洞部の発生を解析的に予測した研究例はなく、実験的研究もほとんど行われていないようである。空洞部発生を回避するための経験的方法はいくつか試されているが、現時点、抜本的な解決策とはなっていない。

### 2. これまでの研究事例

著者らは、現在、岐阜大学金型創成技術研究センターにおいて成形加工技術の高度化に取り組んでおり、ここでは熱間押出し加工法についてこれまでに行われた研究を概観し、研究の進展状況の整理を試みる。

岡庭の解説<sup>(1)</sup>によれば、押出し加工に関する最初の特許は1797年に取得され、以来200有余年にわたる技術の歴史を有する。その中で押出性に影響を及ぼす因子の考察と最適化が進められ、また押出材の欠陥発生防止対策が講じられてきた(文献[1]中の表4)。最近では数値シミュレーション法に関する研究が多くみられ、解析法自体の開発<sup>(2)</sup>や実験との比較による解析法の検証<sup>(3)-(4)</sup>、あるいは、解析結果と比較照合するための実験法の開発<sup>(5)</sup>にも取り組まれている。製品精度と生産性の向上に関して、製品断面内の特性の一様化<sup>(6)</sup>、金型変形量の測定<sup>(7)</sup>、ベアリング面のトライボロジ<sup>(8)</sup>などの研究も継続的に行われている。

空洞部発生という製品欠陥についてはJowettら<sup>(9)</sup>が取り上げており、コンテナ内へのビレット挿入後、押出し開始までの据え込み過程に注目している。図1は直接押出し法の原理図を示し、図2にはビレット表層の流入(灰色矢印)とビレット後端での巻き込み(黒色矢印)を説明するためにJowettら<sup>(9)</sup>が引用した図を再掲する。ビレット後端の表皮巻き込みは沖<sup>(10)</sup>も詳しく調べており、据え込み時に巻き込まれた部分は押出し終期まで変化しないとしている。両研究ともに注目している点は、コンテナ内径 $D_c$ とビレット外径 $D_b$ の寸法差から生じるすき間によって、据え込み過程でビレットがどのように変形するかである。これより沖<sup>(10)</sup>はビレット表皮層の挙動を調べ、Jowettら<sup>(9)</sup>は空気

溜まりのできる箇所を実験的に明らかにしているが、コンテナ内に取り残された空気の挙動を直接調べてはいない。

以上より、本研究ではビレットの据え込み過程で生じる初期変形に注目し、上述の実験結果を数値シミュレーションによって検証する。解析には汎用コードを利用するが、現在でも汎用解析コードには多くの制約があり、本現象を十分に解析できる段階には至っていない。そのため、ここではごく初期の変形に関するシミュレーション結果を示すにとどめる。近年の計算力学の発展は目覚ましく、マルチスケール・マルチフィジクス問題<sup>(11)</sup>への取り組みが推進されている。本研究課題は、本来、固体-気体の連成問題であるだけでなく、固体-固体間摩擦や結晶粒組織に至るまでの幅広いスケールを含むものであり、今後取り組むべき課題として位置づけておく必要がある。

### 3. 解析方法

本研究で用いた汎用解析コードは、DEFORM-2D および DEFORM-3D である。解析の温度条件は等温とし、ビレット材料には6061材を指定した。軸対称解析、3D解析の何れにおいても計算モデルは同じサイズとし、コンテナ内径は $D_c = 200 \text{ mm}$ 、押出し比は $(D_c/d)^2 = 25$ である。ビレット直径 $D_b$ は、押出し開始前のすき間 $c = D_c - D_b$ を2~10 mmの範囲で変化させたため、190~198 mmとなる。ビレット長さは $L = 400, 600, 800 \text{ mm}$ とした。

なお、本センター所有のDEFORM-3Dバージョンではコンテナビレットのすき間をモデル化できず、空気の圧縮抵抗を模擬することができない。空気を理想気体とみなせば、断熱圧縮の場合、 $pV^\kappa = \text{const.}$ に従って圧力変化する。ここで、 $\kappa$ は空気の比熱比(=1.4)であり、 $p, V$ はそれぞれ空気の圧力と体積である。 $c=8 \text{ mm}$ 、 $L=600 \text{ mm}$ の場合、押出し開始前にコンテナ内には約 $1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ だけのすき間体

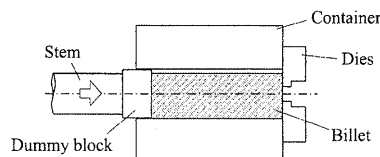


Fig. 1 Principle of a forward extrusion.

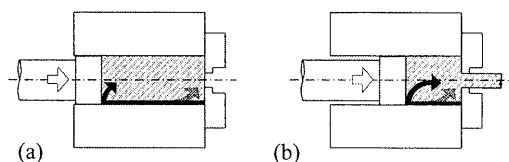


Fig. 2 Schematic of metal flow [Ref. 9].

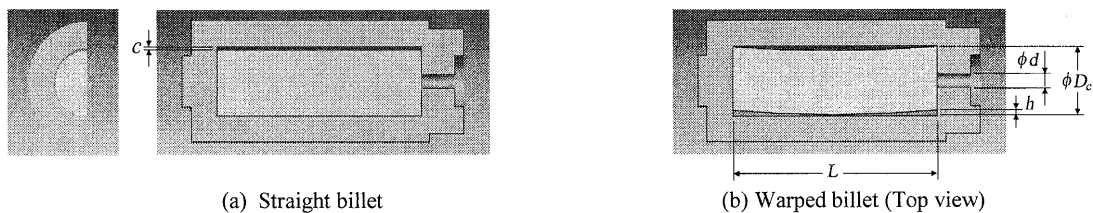


Fig. 3 Analysis models for DEFORM-3D.

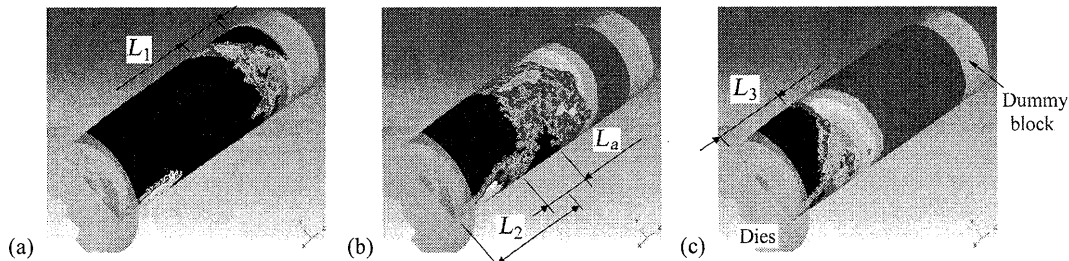


Fig. 4 Contour maps of normal stresses over the surface of an initially straight billet. (a)  $S = 36.8$  mm, (b)  $S = 41.0$  mm and (c)  $S = 43.0$  mm

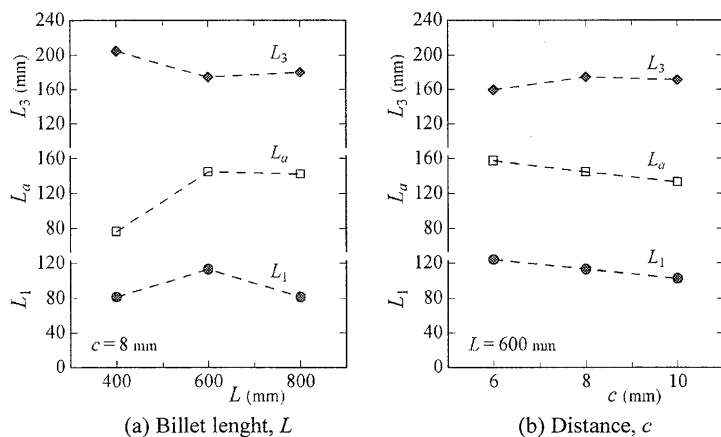


Fig. 5 Variations of axial length of the cavities.

積が存在し、据え込みの完了までに約 47 mm のストロークが必要となる。この過程で空気は圧縮加圧され、ビレットに対して圧縮抵抗を及ぼすわけだが、空気の流動性を考慮し、ここでは近似的に圧縮抵抗を無視できるものとする。

#### 4. 解析結果と考察

Jowett<sup>(9)</sup>の実験によれば、ビレットの据え込み機構は、まずビレット中央部が座屈し樽状に変形する、その後、ダミーブロック側のビレット後方端が据え込まれ、最後に、後方から前方に向けて据え込みが進行して完了する。本研究では、この過程を数値シミュレーションによって検証する。ビレットの解析モデルには、図3に示すように2種類のものを用意した。1つは曲がりのない直線状ビレットであり、もう1つは $h$ だけの反りを加えたビレットである。

図4は、直線状ビレットの代表的な場合として $c = 8$  mm,  $L = 600$  mm における解析結果を示す。図の左から、ストロークが $S = 36.8, 41.0, 43.0$  mm に対応し、ビレット表面における垂直応力の大きさをコンタ表示している。黒色は応力ゼロの領域を表す。図4はビレットの変形過程から特徴的段階を抽出したものであり、図4(a)はビレット後方端の上方に、図4(b)は中央部下方に孤立した黒色領域が存在する場合、図4(c)は中央部下方の黒色領域が消失し、前方端のみに黒色領域が存在する場合となる。黒色領域ではビレットとコンテナの間にキャビティがあり、この領域に空気が存在する。以上の据え込み過程は、Jowett<sup>(9)</sup>の示したものとやや様相を異にする。一方、本研究で行った軸対称解析の結果は、彼らの実験をよく模擬していた。両解析結

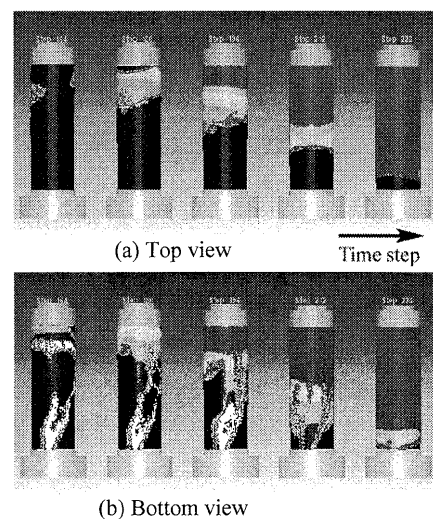


Fig. 6 Contour maps of normal stresses using a warped billet.

果の差異については、今後の検討を要する。

上述のキャビティ領域を特徴づける量として、図4に示される長さを定義することとし、その結果を図5に示す。図から、キャビティサイズが大きく変化するの $L = 400$  mm の場合で、 $L_a$ は約半分となり、キャビティの大部分は前方端に集まる傾向にある。

図6は、 $L = 600$  mm で $h = 2$  mm の反りを有するビレットを用いた解析結果を垂直応力コンタで示す。図の右方向に計算ステップは進行し、(a)と(b)はコンテナの上方からと下方から観た図である。図4(b)で観られた中央部下方のキャビティはこの場合には現れず、ビレット後方端一部を除き、据え込みは単純に後方から前方に向けて進行している。

#### 参考文献

- (1) 岡庭, 軽金属, **45** (1995), 471-489.
- (2) Alfaro, I. *et al.*, *Arch. Comput. Meth. Eng.*, **13** (2006), 3-43.
- (3) 佐野・他5名, 軽金属, **58** (2008), 189-193.
- (4) Ishikawa, T. *et al.*, *CIRP Annals*, **55** (2006), 275-278.
- (5) 米山・高橋, 塑性と加工, **47** (2006), 527-531.
- (6) 針山・松岡, 塑性と加工, **44** (2003), 755-759.
- (7) Mori, T. *et al.*, *J. Mater. Process. Tech.*, **130-131** (2002), 421-425.
- (8) 高辻・他4名, 軽金属, **57** (2007), 62-66.
- (9) Jowett, C.W. *et al.*, *Proc. Int. Sympo. "Extrusion Process 2005,"* Nagoya Univ., JAPAN, (2005), 56-65.
- (10) 沖, 岐阜大学地域共同研究センター報告書, **9** (1999), 12-22.
- (11) 越塚ら, 日本機械学会誌, **110** (2007), 576-579.