

# 広幅薄肉大形材用押出ダイスの設計技術

栄 輝(工博)\*・井上勝彦\*\*

\*技術開発本部・生産技術研究所 \*\*長府製造所・アルミ押出製造部

## Die Designs for Wide-thin Shape Extrusion

Dr. Hui Rong・Katsuhiko Inoue

To obtain a close dimensional tolerance for wide-thin shape aluminum extrusions, the deformation behavior of die assembly during extrusion was simulated by FEM. Through this study, it was determined that the deflection of die openings was closely related to the assembling clearance between the die set and the die holder. The following process was thought to have caused this. The pressure generated by the metal flow expanded the flow guide opening by the assembling clearance distance between the flow guide and the die holder. As a result, the expansion of the flow guide opening stretches the extrusion die opening. An improved construction plan was proposed based on this study.

まえがき = アルミニウムの熱間押出加工では、製品の断面寸法は押し出しにもちいるダイス開口部の寸法とは一致しない。押し出し後の製品寸法は熱収縮による変化のほか、ダイス開口部の寸法の温度や負荷変動にともなう変化もある。要求寸法の精度を達成するために、押出された製品の寸法をもとにダイスの修正や新作などが繰り返しておこなわれる。とくに板形状のような広幅薄肉の断面を有する製品は押出加工では難問の一つとされ<sup>1)~7)</sup>、より頻繁なダイスの試行錯誤的な修正を余儀なくされる。さらに、製品の大型化<sup>8)</sup>につれて押出加工の難度が高くなるのみならずダイスも大きくなるので、費用の制約から頻繁な修正や新作は許されなくなっている。

ここでは、押出加工におけるアルミニウム合金製広幅薄肉大形材の断面“寸法偏差”，すなわち、設計値からのへだたりやばらつきを問題として取上げた。数値解析法をもちいて押し出し負荷時のダイス変形を定量化することによって、設計値からはずれる原因を解明し、ダイス系構成寸法の最適設計方法を見出す。さらに、ダイス開口部の変形の主要影響因子を特定し、その影響を除くダイス構造を提案する。

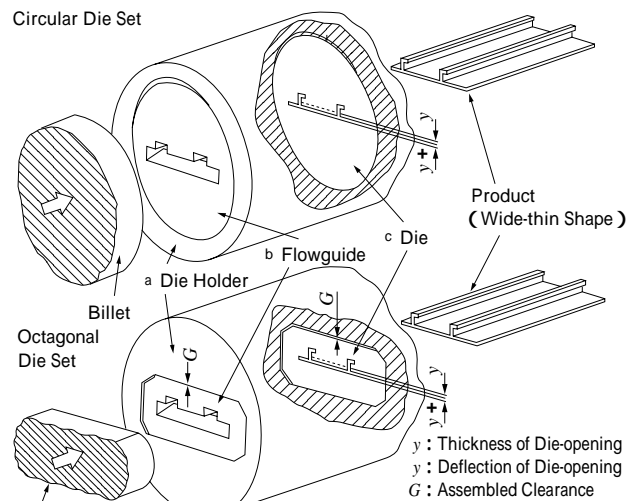
### 1. ダイス設計の対象と手法

押出加工によって製作されるアルミニウム合金製広幅薄肉大形材の具体例として、第1図に示す製品の字形材(板部の幅は約600mm、厚みは約4mm)について述べる。

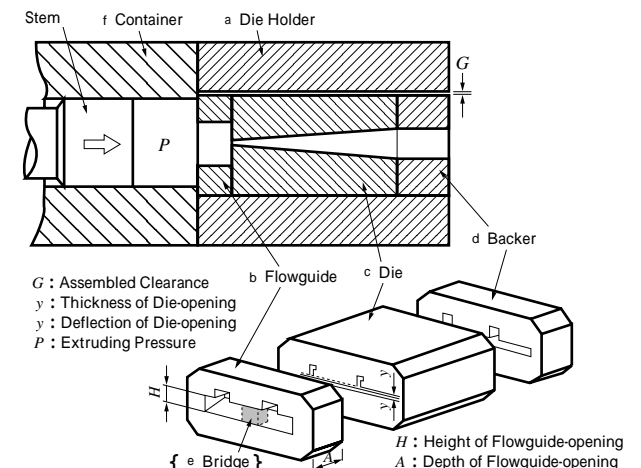
字形材の断面形状とビレットの断面形状との相似性がいちじるしく低いので、ビレットからダイスへの材料流動が不均一になり、製品の形状寸法に悪影響を与える<sup>4)</sup>。この相似性を改善するため、一般にビレットとダイス間に材料流動を制御するフローガイドを設ける<sup>1)~3)</sup>。第1図に示すように字形材の押し出しでは丸形と角形と二通りのフローガイド付きダイセットが採用できる。丸形ダイセットの構成は通常材の押し出しでも使用されており、角形ダイセット(外形は幅約800×高さ約400mm)はとくに字形材の押し出しにもちいられる。角形ダイセットの採用にはダイセット製造費用の低減効

果が期待されている。第1図のダイホルダ<sup>a)</sup>(外径約1000mm)内に収容される角形ダイセットは第2図に示すように、フローガイド<sup>b)</sup>、ダイス<sup>c)</sup>、バック<sup>d)</sup>(合計厚みは約300mm)から構成される。

角形ダイセットの採用には製造コストダウンの利点があるいっぽう、とくに字形材の広幅薄肉部における



第1図 広幅薄肉大形材用押出の構成  
Fig. 1 Configuration of extruding die for wide-thin shape



第2図 押し出しダイセットの構成  
Fig. 2 Combination of an extruding die set

“寸法偏差”の問題が存在する。すなわち、広幅薄肉部厚みの“寸法偏差”には、公差を越える寸法精度、押出長手方向の寸法ばらつき、ダイス開口の寸法からのへだたりなどが観測された。いずれの場合も厚み方向では寸法が設計値より大きかった。さらに、ダイス開口の測定結果と押出し製品の広幅薄肉部の寸法とは対応しなかった。

ここでは、基本課題を押出し負荷時の定常状態におけるダイス開口変形機構の解明として、ダイス開口変形の定量化により薄肉広幅大形材の“寸法偏差”最小化の対策を導き出す。すなわち、押出し現象における“寸法偏差”の基本要因を捉えて、効果的なダイス設計の対策を立てる。

現象の解析に数値実験の手法をもちいる。過去の試作結果をシミュレートすることによって問題の基本要点の抽出を試みる。数値実験の目的はダイスの設計思想の確認である。したがって、数値解析の結果が既存の実験データと完璧に合致することは追求しない。数値実験にもとづいて“寸法偏差”の対策を試みるもう一つの理由は、大形材押出しのダイス費用が高価なため実物での試行錯誤が簡単ではないためである。

具体的な数値実験では、材料力学モデルにもとづく初歩的オーダー解析と有限要素モデルによる詳細解析との二段階にした。有限要素法による数値解析には市販コードABAQUS(Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc 製品)を使用した。はりや平板の曲げモデルをもちいたオーダー解析ではダイスの寸法以外にダイセットの寸法、とくにフローガイドの寸法もダイス開口の変形量に大きな影響を与えうるという見通しをえた。したがって、詳細解析ではフローガイド⑥、ダイス③、パッカ④とその外周に位置するダイホルダ⑤の集合体を対象とし、四者間に接触かつ摩擦モデルを設定した。その他の負荷や拘束などの解析条件は実押しし定常状態のデータにもとづいて決定した。

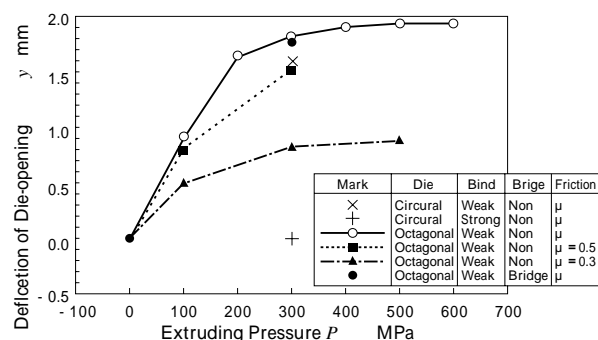
## 2. 定量化による変形機構の解明

### 2.1 定量化の結果

#### 1) 丸形ダイセットと角形ダイセットとの比較

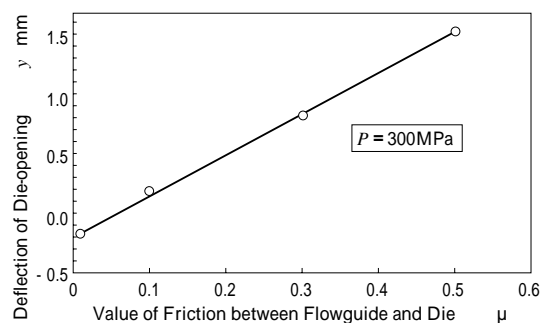
丸形および角形のダイセットに対して、有限要素分割モデルをもちいて数値解析をおこなった。変形解析の結果より、押出し面圧  $P$  にもなう 字形材の広幅薄肉部に該当するダイス開口の最大変形  $y$  を第3図に示した。なお、この場合は第2図に示すフローガイド⑥、ダイス③、パッカ④間にボルトの連結を設定しており、摩擦係数  $\mu$  と表した。第3図中の  $\times$  印は角形ダイスの結果、 $\times$  印は丸形ダイスの弱拘束(ダイセット外周の一部分拘束)の場合、また、 $+$  印は強拘束(ダイセット外周の全周拘束)の場合の結果を示す。

材料力学の視点から角形ダイスにくらべ、丸形ダイスが寸法かつ構造的に有利と思われる。第3図から丸形ダイス開口寸法の変形量が角形の変形量より小さいことがわかる。しかしながら、丸形ダイスの強拘束( $+$ 印)の場合にダイス開口の変形量はわずかであるが、弱拘束の



第3図 押出負荷とダイス開口変形量との関係

Fig. 3 Relation between deflection of die-opening and extruding pressure



第4図 摩擦係数とダイス開口変形量との関係

Fig. 4 Relation between deflection of die-opening and friction

場合( $\times$ 印)に丸形ダイスの材料力学的強みはそれほど発揮されないという知見もえた。ここでは丸形ダイスの拘束条件を両極端に設定したが、押出しの実機データによれば丸形ダイスの実使用条件は強拘束(図中の $+$ 印)寄りであった。

また、角形ダイセットの解析結果( $\circ$ 印)から、押出し面圧の増大にともなってダイス開口の変形量が対数関数のように増加して、ある限界値に漸近し、かつ、この限界値はダイホルダ、ダイセット間のアセンブリ間隙  $G$  とほぼ同じ値であることがわかった。すなわち、面圧がある程度以上であれば変形量がほとんど一定であり、面圧がある程度以下に低減させれば変形量が急激に減少できる仕組みにある。しかし、現実的には該当 字形材の押しに必要な負荷面圧には下限値が存在する。

以上の解析結果から、広幅薄肉大形材の押しダイスの設計、とくに開口変形抑制の設計には有用な示唆を見出すことができる。すなわち、ダイセット外周の強拘束がダイス開口変形の抑制に非常に有効であることと、角形ダイス開口の変形はダイホルダとのアセンブリ間隙を埋めるように振る舞うことから、アセンブリ間隙を無くした強固な拘束が有用な設計指針であると考えられる。

#### 2) フローガイド・ダイス間の潤滑による効果

角形ダイセットのフローガイド⑥とダイス③間の連結ボルトを外して潤滑剤を塗布し、両者の接触面内の相対移動によりフローガイドの変形伝播阻止を狙った検討もおこなった。しかし、設計値からの寸法誤差は改善される場合もみられたが、試作ごとの再現性はなかった。

ここでは、フローガイド⑥とダイス③の接触面間の力学的挙動がクーロン則と限界せん断則との混合摩擦則に支配されると仮定し、潤滑剤の塗布による両接触面間の相対滑りやすさを両面間の摩擦係数に置き換えてその効

果を見積もった。摩擦係数  $\mu = 0.5 \sim 0.3$  (それぞれと印) における負荷面圧の増加にともなうそれぞれのダイス開口の変形量を、 $\mu$  の場合と比較して第3図中に示している。第4図には一定負荷面圧下における摩擦係数の増大によるダイス開口の変形量への影響を示した。

第3図では、フローガイドとダイス間に相対滑りを許した場合にも面圧の増大にともなうダイス開口の変形量が対数関数的に増加し、ある限界値に漸近している。しかし、この限界値はアセンブリ間隙  $G$  には達せず摩擦係数によって変化する。いっぽう、第4図より摩擦係数  $\mu = 0.01 \sim 0.5$  の間では、摩擦係数の増加にともなう広幅薄肉部のダイス開口の変形量が線形的に大きくなる。

上述の解析結果によれば、フローガイドとダイス間に十分な相対すべりを実現すれば、ダイス開口の変形量を低減することができる。しかし、この変形量を該当字形材の寸法許容公差内に収めるためには、安定な低摩擦係数を、数百気圧、数百の温度の条件を十数分の加工時間中維持することが必要で、実用的には困難である。

### 3) フローガイド部にブリッジを設けた効果

フローガイド部にブリッジ⑥を設け(第2図参照)、フローガイド開口の上下への広がりを抑えようとする実験もおこなった。結果として広幅薄肉部の寸法が押し出し長手方向では安定する傾向にあったが、押し出し後にダイホルダ①からフローガイド②が離脱できなくなった。

ブリッジを設けた場合のダイス開口変形量の解析結果は第3図の印で示した。ブリッジなしの場合と比較してブリッジの設置によってダイス開口の絶対変形量を抑える効果はほとんどないことがわかった。さらに、数値解析の結果によればブリッジ全体が押し出し負荷時に大きな塑性変形を受け、除荷後もブリッジがフローガイド開口内で支えとして上下への開口広がりを持続した。このブリッジの塑性変形は広幅薄肉部の変形量を安定させた原因であると考えられる。

## 2.2 変形機構と設計課題

フローガイド付きダイセットの構成に関する前述の解析結果をまとめてみる。フローガイド②の開口に充満したメタルの圧力によって主にフローガイドの長辺がダイホルダ①との間のアセンブリ間隙  $G$  をなくすように上下へ広がって変形し、変形にともなうこの間隙がなくなればフローガイド②がダイホルダ①にバックアップされるので広がりにくくなる。さらに、フローガイド②の上下への広がりにはダイス③との接触面を介してダイスの開口も上下へ広げる。なお、ダイス開口の広がりにはダイホルダ①とのアセンブリ間隙量  $G$  が上限である。第3図および第4図の実線はこのような変形の過程を示し、第3図におけるブリッジ設置時の変形量(印)はブリッジの永久変形によりフローガイド開口の広がりが残されたものである。

上述の変形過程における知見にもとづき、次章ではダイス設計にかぎって以下のダイス開口変形の抑制策を検討する<sup>9)</sup>。

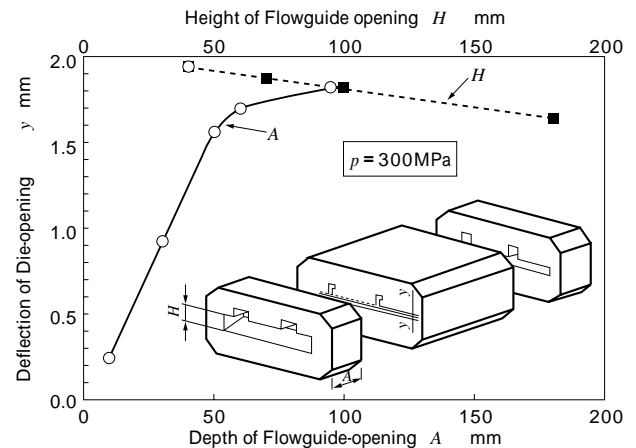
- 1) ダイス開口の変形量を許容範囲に抑えるフローガイド開口寸法の最適化の設計
- 2) ダイス開口の変形量を最小限に抑えるアセンブリ間隙  $G = 0$  のテーバ機構の設計

## 3. フローガイド開口寸法の最適設計

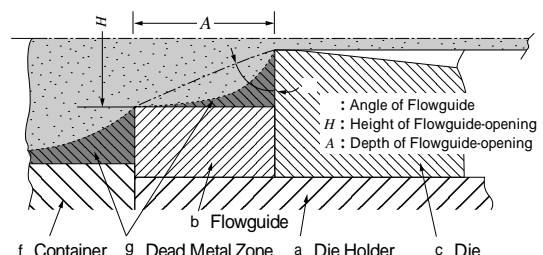
### 3.1 設計寸法変化による影響

前述のようにフローガイドの開口が充満したメタルの圧力によって上下へ広げられ、接触部を介してダイスの開口も上下へ拡大される。定性的にはフローガイドの寸法変化は負荷形態および剛性の変化をもたらす、ダイス開口変形の拡大と抑制との相反する効果が同時に混在する。ここでは、まずフローガイドの厚み  $A$  と、その主要部開口高さ  $H$  を変数として、ダイス開口の変形量を解析した(第5図)。

解析の結果よりフローガイドの開口高さ  $H$  がダイス開口の変形量にあまり影響を与えないことがわかった。開口高さ  $H$  の増加にともないダイス開口変形量はわずかに減少するが、これはフローガイドとダイス間の接触面積および接触位置変化による抑制効果の結果であると思われる。これに対し、フローガイドの厚み  $A$  はダイス開口の変形量に大きな影響を及ぼす。厚み  $A$  の増加にともなうダイス開口変形量は対数関数的に増大した。これは、ダイス開口の変形量が厚み  $A$  の増加にともなうフローガイドの剛性が増加することよりも、ダイスとの間の接触部に伝達する負荷の増加に支配されると考えられる。このことは、フローガイドの厚みを減少できればダイス開口の変形量を大きく減少できることを意味し、この例では、フローガイドの厚みが50mm以下であればダイス開口の変形量が急激に低減してくる。



第5図 ダイス寸法とダイス開口変形量との関係  
Fig. 5 Relation between deflection of die-opening and dimensions of flowguide



第6図 フローガイドの機能  
Fig. 6 Function of the flowguide

### 3.2 ダイセットの最適寸法設計と一般化

フローガイドは金属の流れを安定させる機能を持たなければならないので厚みの減少には限度がある。第6図に示すようにデットメタルゾーン④をコンテナ①とフローガイド⑥間、およびフローガイドとダイス③間の二段階に形成させる必要がある。第6図から推定できるように、二段のせん断層を一段にするおそれがあるためフローガイド開口厚み $A$ を過小にしたり、高さ $H$ を過大にすることは好ましくない。その適正値は基本的に同図中の角度 $\theta$ によって特徴づけられる。詳細は本稿の主旨からはずれるので省くが、 $\theta$ の範囲は $45^\circ \sim 20^\circ$ である<sup>9)</sup>。

フローガイド寸法の最適値設計は、上述の $\theta$ の範囲内で第5図のフローガイド寸法とダイス開口変形量との関係にもとづいて、フローガイドの機能を保証し、かつダイス開口の変形量を該当字形材の許容公差に抑えることを考慮して決定できる。また、ダイス開口の変形機構によればその変形量にはフローガイドの厚みが大きな影響を及ぼすが、ダイス厚さにはほとんど無関係である。材料節約のメリットからダイス厚みを薄くすればよい。

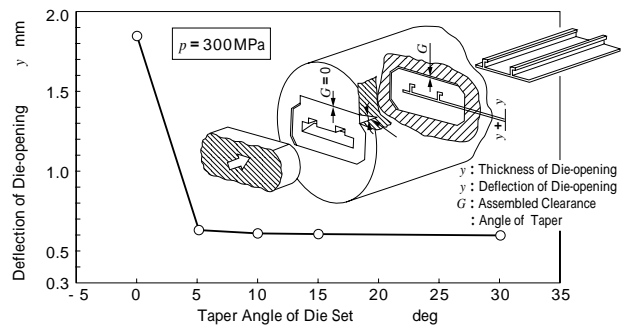
すでに述べたように、フローガイドの開口は押し出し時のダイス開口を通過する金属流れを安定させる役目を果たし、ダイス開口とほぼ相似な形状としている。通常では、フローガイドの厚みが大きいほど金属流れの安定性が良いといわれている。いっぽう、ダイス開口は主に金属内圧によるフローガイド開口の上下広がり起因して変形するので、ダイス開口の変形量の減少にはフローガイド厚みの減少が求められる。すなわち、フローガイド厚み寸法の設計は相反する要求下に置かれており、両者を満足する寸法の存在は一般に保証されない。

## 4. テーパ構造のダイス設計

### 4.1 テーパ構造とその効果

上述のようにフローガイドはアセンブリ間隙を埋める方向に上下へ広がりやすく、この広がりがダイス開口の上下への変形をもたらす。定量的にはダイス開口の変位量もほとんどアセンブリ隙間に相当し、残りわずかな変位量がダイホルダを含む全ダイセットの剛性によって決まる。したがって負荷を加える前からダイホルダとダイセット間のアセンブリ間隙 $G$ を無くせば、ダイス開口の広がりを抑えることができる。具体例としてダイホルダとダイセット間のアセンブリ用テーパ構造を考える。

ここでは、第7図に示す例について述べる。ダイホルダ②、フローガイド⑥が相合致するテーパを設ければ、装填と脱着時にダイホルダとの隙間を利用してダイセットがダイホルダから進退可能になる。装填終了時にテーパによってフローガイドとダイホルダを合致させ、その間の隙間をなくす。当然ながら、押し出し中の圧力によってその合致が一層緊密になり、ダイホルダを含む全ダイセットの剛性がフローガイドの広がりを抑える。



第7図 テーパ角度とダイス開口変形量との関係  
Fig. 7 Relation between deflection of die-opening and taper angle

テーパ構造のダイスに対する押し出し面圧 $P = 300\text{MPa}$ の数値解析結果を第7図に示す。フローガイド外周に設けたテーパの角度とダイス開口の変形量との関係より、テーパ角を設ければテーパ角なしの場合にくらべてダイス開口の変形量が大幅に減少できること、かつテーパ角の大きさにほとんど影響されないことがわかった。

### 4.2 テーパ設計の一般化

第7図にはフローガイド外周にテーパを設けた結果を示したが、テーパをダイスに設けた場合や、フローガイドとダイスの両方に設けた場合の解析結果によれば、それぞれのダイス開口変形量抑制効果はほとんど差が認められなかった。さらに、テーパ付与にともなうアセンブリや押し出し時のダイセットの押し出し方向への撓動に関しては $5 \sim 30^\circ$ の角度範囲では構造上大きな障害はない。したがって、テーパ付きダイセットの設計には根本的な支障がないと思われる。

さらに、3章で述べたダイセット寸法の最適設計とテーパ付きダイセットの設計とを組み合わせれば、該当字形材押し出しにおけるダイス開口の変形量はほとんどゼロまでに抑えることができる<sup>9)</sup>。

むすび = 広幅薄肉大形材用押し出しダイス構造の数値解析によって、ダイス開口の変形はダイホルダとダイセット間のアセンブリ間隙に強く依存することを解明し、ダイス開口変形量抑制の指針をえた。すなわち、押し出しによる内圧がアセンブリ間隙量を上限にしてフローガイドの開口を広げ、この広がりはダイス開口の変形を引き起こした。これらの変形機構を考慮したダイス構成の設計案を提示した。

### 参考文献

- 1) T. Li et al. : Advanced Technology of Plasticity(1993), p.621 .
- 2) 岡崎恵子ほか : 第89回軽金属秋期講演(1995), p.175 .
- 3) 高辻則夫ほか : 塑性と加工, Vol.27, No.304 (1986), p.620 .
- 4) 今村吉延ほか : 平成9年塑加春季講演(1997), p.473 .
- 5) 小松 健 : 第91回軽金属秋期講演(1996), p.317 .
- 6) 宇梶浩章ほか : 平成9年塑加春季講演(1996), p.148 .
- 7) 木内 学ほか : 第47回塑加連講演(1996), p.459 .
- 8) 浜口喜博 : アルミニウム, Vol.2, No.4 (1995), p.122 .
- 9) 栄 輝ほか : 公開特許, 平08-294719 .