

非軸対称押出し・引抜きに関する研究  
——ダイス孔形への材料の充満限界 3——  
Simulation of Geometry of Products in Non-Axisymmetric  
——Extrusion and Drawing Processes -3rd Report——

木内 学\*・飯島 茂男\*・星野 倫彦\*  
Manabu KIUCHI, Shigeo IJIMA and Michihiko HOSHINO

### 1. はじめに

金属加工業の各分野において、非軸対称断面を有する線材・棒材・形材・管材（以下、これらを総称し異形材と呼ぶ）は、極めて広範囲な用途に供されている。それらの一部は圧延加工により製造されているが、その多くは押しまたは引抜き加工により製造されている。近年、工業的な需要の増大、ならびに用途の多様化と、その生産性の高さ・簡便さから、異形材の押し・引抜き加工に関する関心が次第に高まりつつある。しかし、これら異形材の押し・引抜き加工において、ダイス孔形内へ被加工材が充満し、所定の寸法・形状が得られるという保証は必ずしもなく、工具設計の際の大きな問題の一つとなっている。このような充満に関する問題に対しては、幾つかの実験例が報告<sup>1)2)</sup>されているが、解析的なアプローチはほとんど行われていない。そこで、筆者らは、筆者らがすでに開発し<sup>3)4)</sup>、種々の問題に運用してきた、いわゆる上界法を応用した汎用的な解析手法を、ダイス孔形への被加工材の充満問題に適用した。

前報<sup>5)6)</sup>では、丸棒から矩形棒・フィン付き棒、あるいは円管から外面フィン付き管などを押し・引抜く場合の解析モデルを開発し、種々の解析例ならびに実験との比較により、モデルの妥当性を示した。

本報では、近年、熱交換器用として需要の増大している、内面フィン付き管の押し・引抜きを想定した解析モデルを開発し、工具形状やリダクション等の各条件因子が被加工材の充満限界に及ぼす影響について検討したので、その結果を報告する。

### 2. 管材の一般的三次元的可容速度場

解析に用いた、管材の押し・引抜き加工における一般的三次元的可容速度場は、円柱座標系  $(r, \phi, y)$  を用いて表すと (1), (2), (3) 式となる。なお、速度場の導出に関する詳細な条件および定式化の手順等については、既報<sup>4)</sup>に示したので、ここでは省略する。

$$V_y(r, \phi, y) = V_y(y) = \frac{V_0 \int_0^{\phi_{\text{in}}} \{RSO^2(\phi, 0) - RSI^2(\phi, 0)\} d\phi}{\int_0^{\phi_{\text{in}}} \{RSO^2(\phi, y) - RSI^2(\phi, y)\} d\phi} \quad (1)$$

$$V_\phi(r, \phi, y) = r \cdot \omega(\phi, y) = \frac{r}{RSO^2(\phi, y) - RSI^2(\phi, y)} \int_0^y \frac{\partial}{\partial y} \times \{ (RSI(\phi, y) - RSO(\phi, y)) \cdot V_y(y) \} d\phi \quad (2)$$

$$V_r(r, \phi, y) = -\frac{r}{2} \cdot \left\{ \frac{\partial V_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(\phi, y)}{\partial \phi} \right\} + \frac{1}{r} \cdot \left[ \frac{RSO(\phi, y)}{2} \times \left\{ \frac{\partial V_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(\phi, y)}{\partial \phi} \right\} + RSO(\phi, y) \cdot \omega(\phi, y) \cdot \frac{\partial RSO(\phi, y)}{\partial \phi} + RSO(\phi, y) \cdot V_y(y) \cdot \frac{\partial RSO(\phi, y)}{\partial y} \right] \quad (3)$$

ここで、 $V_0$  はダイス入口からの被加工材流入速度（一様）、 $\phi_{\text{in}}$  および  $\phi_{\text{ex}}$  は、 $\phi$  方向の解析範囲であり、 $RSO(\phi, y)$ 、 $RSI(\phi, y)$  は、それぞれ外面（ダイス面）形状、内面（プラグあるいはマンドレル面）形状を表す関数である。

なお、上述の速度場の特徴は、各方向速度が内・外面形状  $RSI(\phi, y)$ 、 $RSO(\phi, y)$  の関数となっており、これにより、汎用性が高まっている点にある。

### 3. 充満限界の考え方

図-1 に示すように円管から2つのストレートな内面フィンを有する管を押し・引抜く場合を想定する。なお、以降も含め図はすべて対称性を考慮した場合の解析範囲内のみで示してある。一点鎖線で示す実際のプラグ面に対し、フィン高さ  $Bi$  を変化させ、その際の工具内での被加工材の変形形状を仮定し、そのときの仕事率を計算する。ただし、プラグ面の摩擦仕事率は、プラグ面と被加工材が接触するであろう図中斜線部のみを考える。 $Bi$  の増加に伴い、一般的には内部仕事率は減少し、摩擦仕事率およびせん断仕事率は増加していき、全仕事率と

\*東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

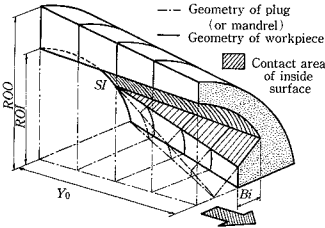


図-1 工具孔形への被加工材 充滿の概念図

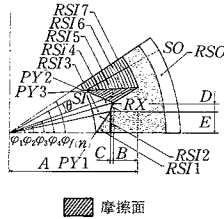


図-2 内面フィン付き管解析モデル

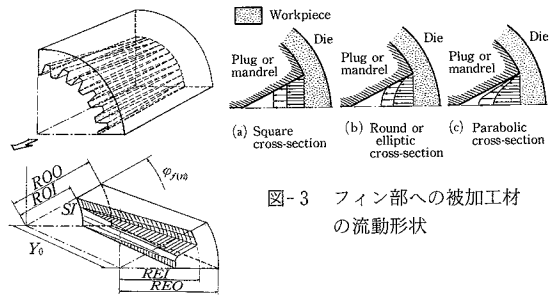


図-3 フィン部への被加工材の流動形状

しては、ある  $Bi$  において最小値をとる。このときの  $Bi$  が、被加工材の充滿限界であると考えられる。

4. 内面フィン付き管解析モデル

円管から外面が真円、内面にストレートなフィン形状を有するフィン付き管を押し・引抜く場合の解析モデルを図-2に示す。速度場を決定する被加工材の変形(表面)形状(または、工具面形状)を表す関数  $RSO(\phi, y)$ ,  $RSI(\phi, y)$  は、基本的には、前報<sup>5)</sup>のフィン付き棒解析モデルと同様である。すなわち、内面形状を表す関数  $RSI(\phi, y)$  としては、平面モード領域の  $RSI1 \cdot RSI5$  と直線モード領域の  $RSI3 \cdot RSI7$ , および特異直線モード領域の  $RSI2 \cdot RSI4 \cdot RSI6$  を表示する7つの関数を用いている。また、外面形状を表す関数  $RSO(\phi, y)$  としては、直線モード領域の  $RSO$  のみを用いている。なお、各種モード領域に関する詳細な説明は、前報に示したので、ここでは省略する。この解析モデルでは、内面の摩擦面は、図中斜線部で示す  $RSI1 \cdot RSI5 \cdot RSI6 \cdot RSI7$  の4面であるとしており、また、被加工材の各内表面領域の境界を含む内部せん断面 ( $\Gamma_{s1} \sim \Gamma_{s6}$  の6面) が存在する。このモデルの特徴は、入口断面上の  $SI$  点が、 $\theta$  を変化させることにより、移動可能であるように設定されており、プラグ面形状を変化させるパラメータの一つとなっている点と、解析範囲  $\phi_{lim}$  を変化させることにより、フィン数もパラメータの一つとなっており、図-2右上に示すような複雑な形状も容易に解析できる点である。

5. 解析結果

(1) 解析の種類と条件

図-2に示す内面フィン付き管解析モデルでは、フィン部の形状(被加工材のフィン部への流動形状)をさまざまに想定できる。すなわち、図-3(b)(c)に示すようなフィン先端部のバルジ変形を考慮した流動形状についても容易に取り扱うことが可能である。しかし、今回の解析では、簡単のため図-3(a)に示すようなバルジ変形を考慮しないフィン先端部がストレートに変化する流動形状のみを取り扱うこととする。

また、図-4に示すように素管の選び方によっては、(A)  $ROI < REI$  となる拡張タイプと、(B)  $ROI > REI$  となる縮管タイプの2通りが考えられる。以降の解析では、この拡張・縮管タイプの相違も含め、計12種類について検討した。なお、以降の、解析結果で示す各図における  $\circ, \triangle, \square$  等は、それぞれの条件において、フィン高さ  $Bi$  を変化させ、仕事率が最小となる場合のフィン高さの充滿限界値を表している。ここで、図中  $m$  はフィン数、 $s$  は素管断面積である。

(2) ダイス長さ  $\theta$  の影響

$SI$  点の位置を表すパラメータ  $\theta / (\phi_f - \phi_s)$  と得られた充滿限界値  $(B/REI)_c$  との関係を整理解ると、(A) 拡張タイプの場合は図-5(A)、(B) 縮管タイプの場合は図-5(B)となる。(A)、(B)共に、ある  $\theta / (\phi_f - \phi_s)$  において  $(B/REI)_c$  は最大値を持ち、すなわち、最適なプラグ面形状が存在することを示している。また、(A)と(B)を比較してみると、(A)のほうが全体的に  $(B/REI)_c$  は大きな値であり、充滿しやすい条件であることがわかる。これは、素管断面積  $s$  を一定としたため、(A)の場合は素管肉厚が厚くなり、急激な速度変化(回転あるいは半径方向における)が生じなくても、ある程度被加工材はフィン部へ充滿するのに対し、素管肉厚の薄い(B)の場合は、フィン部へ被加工材を流動させるために、急激な速度変化が生じる。すなわち、仕事率の面から見ると、フィン高さ

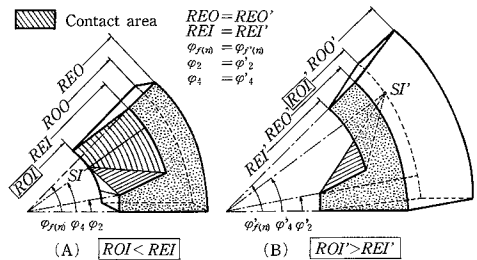


図-4 素管寸法による拡張タイプと縮管タイプ

Bの増加に伴う内部せん断仕事率の増加率は、上述の速度変化に対応して、(A)より(B)のほうが大きいので、(B)の場合、フィン形成が阻害されるものと考えられる。

次に、相対ダイス長さ  $Y_0/REI$  と  $(B/REI)_c$  との関係を整理解ると、(A)の場合は図-6(A)、(B)の場合は図-6(B)となる。(A)の場合は、ある  $Y_0/REI$  において、 $(B/REI)_c$  は最大となり、最適ダイス長さが存在することを示している。一方、(B)の場合は、 $Y_0/REI$  の増加に伴い  $(B/REI)_c$  は単調増加し、ある  $Y_0/REI$  以上では、ほぼ一定となる傾向を示している。

(3) リダクションとθの影響

$\theta/(\varphi_f - \varphi_s)$  と  $(B/REI)_c$  との関係を整理解ると、(A)の場合は図-7(A)、(B)の場合は図-7(B)となる。なお、図中○、△、□は、それぞれ素管断面積  $s=400, 300, 200$  の場合であり、また、出側形状は一定としているので、断面リダクションに直すと、Red.=70, 60, 40%に相当する。(A)、(B)共に、sは大きなほう(リダクションが高いほう)が、 $(B/REI)_c$  は大きな値をとり、充満しやすい傾向にある。特に、(B)の場合は、リダクションの影響が顕著であり、さらに、 $(B/REI)_c$  が最大となる最適プラグ形状を表すθは、リダクションの増加と共に小さな値となっていくことがわかる。すなわち、リダクシ

ンの低い場合は、平面モード領域RSI 5面が大きな傾斜を持ち、被加工材の急激な速度変化をもたらすプラグ面形状が好ましいと推定できる。

(4) 内面と外面の摩擦定数の影響

内面の摩擦定数  $m'$  と  $(B/REI)_c$  との関係を整理解ると、(A)の場合は図-8(A)、(B)の場合は図-8(B)となる。なお、図中○、△、□、●は、それぞれ外面の摩擦定数  $m=0.5, 0.3, 0.1, 0.01$  の場合である。(A)、(B)共に、 $m'$  は小さなほうが、また、 $m$  は大きなほうが  $(B/REI)_c$  は大きな値となっており、充満しやすい条件であることがわかる。すなわち、 $m'$  が小さいほど、また  $m$  が大きいほど、被加工材は外面(ダイス面)の抵抗を大きく受け、軸方向よりも半径方向内側に向かって流れやすくなることを示しており、妥当性のある傾向といえる。さらに、(A)と(B)を比較すると、 $m'$  の小さな範囲では(A)のほうが、 $m'$  の大きな範囲では(B)のほうが、充満しやすい条件であることがわかる。

(5) フィン形状とθの影響

製品のフィン形状の相違によっても、充満限界は異なってくるものと考えられる。そこで、フィン形状の種類として、図-9に示すように、フィン角度(完全充満したときのフィン頂点角度)は一定で、フィン根元部幅  $W$

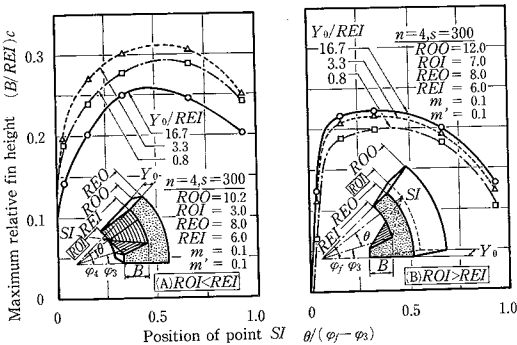


図-5 ダイス長さ と θ の影響 1

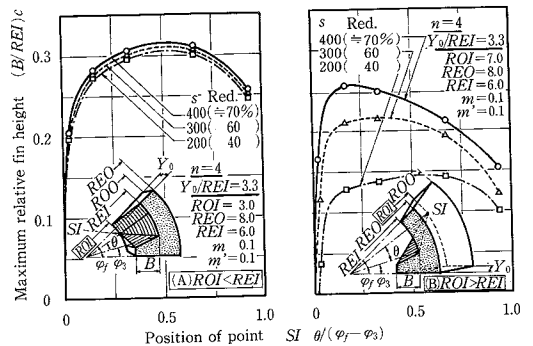


図-7 リダクション と θ の影響

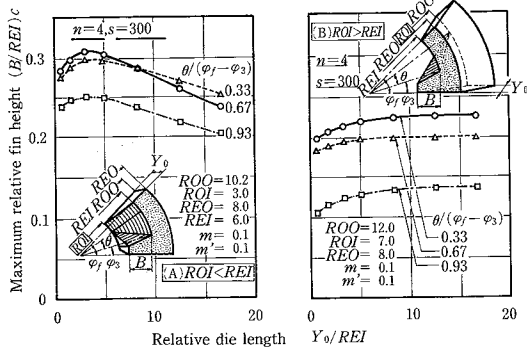


図-6 ダイス長さ と θ の影響 2

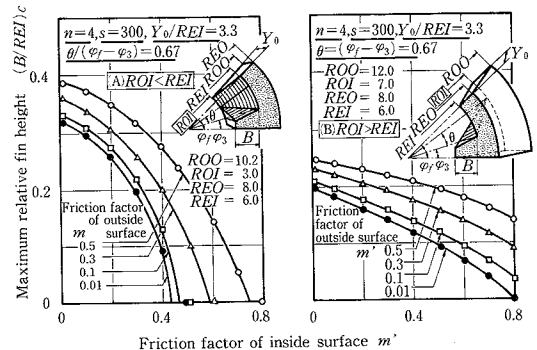


図-8 内外面の摩擦定数の影響

研 究 速 報

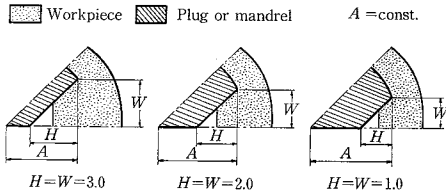


図-9 フィン形状の種類1

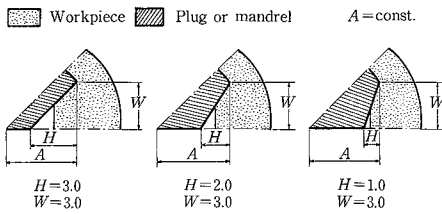


図-10 フィン形状の種類2

を変化させた場合図-10に示すように、 $W$  は一定で、フィン角度を変化させた場合の2種類について、プラグ面形状 ( $\theta$ ) との関係調べた。なお、フィン角度の変化は、図中  $H$  を用いて表しており、 $H$  が大きいほどフィン角度は小さくなることを意味する。

(5)-1 フィン根元部幅の影響

図-11(A)に拡張タイプの場合の、また、図-11(B)に縮管タイプの場合の、 $\theta/(\varphi_f - \varphi_s)$  と  $(B/REI)_c$  の関係を示す。なお、図中  $\circ$ ,  $\triangle$ ,  $\square$  はそれぞれ  $W=H=3.0$ ,  $2.0$ ,  $1.0$  の場合である。(A), (B)共に、 $W$  が大きいほど、 $(B/REI)_c$  の値は大きく、充填しやすい傾向にあることがわかる。これは、 $W$  が小さいときほど、 $B$  を増加させた際のリダクションの減少率が小さく、内部仕事率の減少率に影響し、被加工材の充填を妨げるためと考えられる。したがって、製品の全断面積に対し、極端にフィン部断面積の小さな形状、あるいはフィン底部の間隔が極端に広い形状は、充填し難い傾向にあることが推定される。

(5)-2 フィン角度の影響

図-12(A)に拡張タイプの場合の、また、図-12(B)に縮管タイプの場合の、 $\theta/(\varphi_f - \varphi_s)$  と  $(B/REI)_c$  の関係を示す。(A), (B)共に、 $H$  が大きいほど  $(B/REI)_c$  の値大きく充填しやすい傾向にあることがわかる。これも(5)-1で述べた内部仕事率の減少率の影響に大きく起因していると考えられる。今回の解析条件では、(A), (B)共に、 $H$  は大きいほうが、すなわち、フィン角度は小さなほうが充填しやすい傾向を示している。

今後、モデルの妥当性と信頼性を、より一層深めるため、バルジ変形を考慮したモデルでの解析、ならびに種々の解析例に対応した押し出し・引抜き実験等を行う予定である。

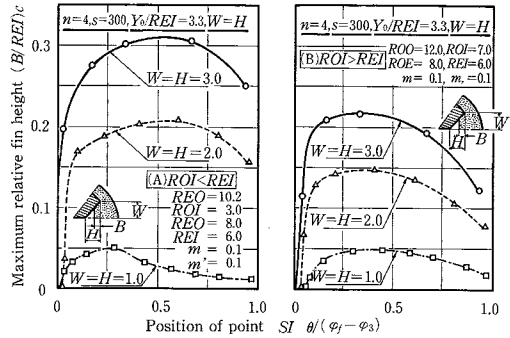


図-11 フィン根元部幅の影響

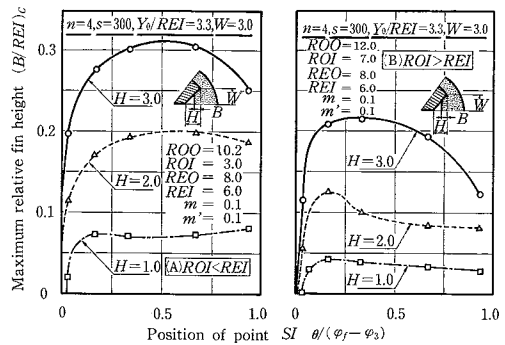


図-12 フィン角度の影響

6. ま と め

本報では、非軸対称断面を有する管材の押し出し・引抜き加工に関する一般的三次元動的可容速度場を用いて、工具孔形への被加工材の充填限界を推定する解析手法を示し、さらに、内面フィン付き管解析モデルを開発した。このモデルを用いて、被加工材の工具孔形への充填限界に及ぼす各条件因子(工具形状、素管寸法、製品寸法、摩擦定数等)の影響について、詳細な検討を行った。結果は妥当性のあるものであり、被加工材の充填限界が予測可能であることを明らかにした。特に、現在、実加工において、引抜き加工のみでの製造が困難とされている内面フィン付き管に関して、引抜き加工による製造の可能性への足がかりと多くの有用な知見を得た。

(1987年3月11日受理)

参 考 文 献

- 1) たとえば、高橋ら：昭56春塑加講論，(1981)，431。
- 2) たとえば、田中ら：昭57春塑加講論，(1982)，312。
- 3) Kiuchi, M., Kishi, H. & Ishikawa, M.: Proc. 22nd int. Mach. Tool Des. Conf., (1981), 523
- 4) 木内・石川：塑性と加工，25-282 (1984)，604。
- 5) 木内・飯島・星野：生産研究，Vol. 38, No7, 1986. 7
- 6) 木内・飯島・星野：生産研究，Vol. 39, No2, 1987. 2