

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 2——

Simulation of Geometry of Products in Non-Axisymmetric Extrusion and Drawing Processes 2nd Report

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

1. はじめに

筆者らは、いわゆる上界法を応用し、非軸対称断面を有する棒材・線材・形材・管材の押出し・引抜き加工に関する総合的な解析手法の開発を目指して、一連の研究を進めてきた。その結果、汎用性の高い解析のアルゴリズムの開発に成功し、これを用いて、従来、理論的な解明が、困難とされてきた問題に対して多くの成果を得てきた。

この研究の一環として、前報³⁾ではダイス孔形への材料の充満限界の解析手法を示し、比較的簡単な矩形棒の押出し・引抜き時の材料充満限界について、詳細な検討を行い、その妥当性を示した。

本報では、充満限界の予測が困難である複雑な断面形状の押出し・引抜きの代表例として、フィン付き棒およびフィン付き管に関するモデルを開発し、ダイス形状やリダクション等の各条件因子が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. フィン付き棒の押出し・引抜きに関する充満限界の解析

2.1 棒材の一般的三次元動的可容速度場

棒材の押出し・引抜き加工における三次元動的可容速度場を円柱座標系 (r, ϕ, y) を用いて表すと(1)、(2)、(3)式となる。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¹⁾²⁾に示したので、ここでは省略する。

$$V_y(r, \phi, y) = V_y(y) = \frac{V_0 \int_0^{\phi(r,0)} RS^2(\phi, 0) d\phi}{\int_0^{\phi(r,y)} RS^2(\phi, y) d\phi} \quad (1)$$

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

$$V_r(r, \phi, y) = -\frac{r}{2} \left\{ \frac{\partial V_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(\phi, y)}{\partial \phi} \right\} \quad (3)$$

ここで、 V_0 はダイス入口からの材料流入速度(一様)

$\phi_{f(0)}$ および $\phi_{f(y)}$ は ϕ 方向の解析範囲であり、 $RS(\phi, y)$ は、ダイス面形状を表す関数である。

また、加工に要する仕事率として、内部仕事率 \dot{W}_i 、せん断仕事率 \dot{W}_s 、摩擦仕事率 \dot{W}_f はそれぞれ(4)式で表される。

$$\begin{aligned} \dot{W}_i &= \int_V \sigma_0 \cdot \dot{\epsilon}_{eq} dV, & \dot{W}_s &= \int_{\Gamma_s} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_0 \cdot \Delta VT_s dS, \\ \dot{W}_f &= \int_{\Gamma_f} \frac{m}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_0 \cdot \Delta VT_f dA \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 σ_0 は材料の変形抵抗、 $\dot{\epsilon}_{eq}$ は相当ひずみ速度、 $\Gamma_s \cdot \Gamma_f$ はせん断・摩擦境界、 $\Delta VT_s \cdot \Delta VT_f$ は $\Gamma_s \cdot \Gamma_f$ 上での相対すべり速度、 $dS \cdot dA$ は $\Gamma_s \cdot \Gamma_f$ 上での微小面積、 m は摩擦定数である。

なお、上述の速度場の特徴は、各速度がダイス面形状 $RS(\phi, y)$ の関数となっている点である。

2.2 充満限界の考え方

図-1に示す丸棒からフィン付き棒を押し出し・引抜く場合を想定する。一点鎖線で示す実際のダイス面に対し、フィン高さ Bi を変化させ、その際のダイス内での材料変形形状を仮定し、そのときの仕事率を計算する。

ただし、ダイス面の摩擦仕事率は、ダイス面と材料が接触するであろう図中斜線部のみで考える。 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、全仕事率としては、ある Bi において最小値をとる。このときの Bi が材料の

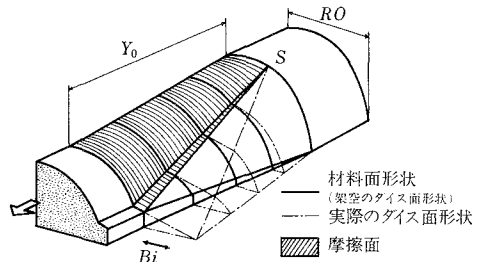


図-1 材料充満の概念図

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報
 充满限界であると考えられる。

2.3 フィン付き棒解析モデル

前報³⁾のモデルにフィン数の影響を加えたフィン付き棒解析モデルを図-2に示す。このモデルでは、解析範囲 $\varphi_f(n)$ をパラメータとすることにより、図-2に示すような複雑なフィン付き棒の解析も可能である。速度場を決定する材料の表面形状(またはダイス面形状)関数 $RS(\phi, y)$ として、直線モードの $RS2 \cdot RS3 \cdot RS4 \cdot RS6 \cdot RS7$ と平面モードの $RS1 \cdot RS5$ の7つの関数を用いている。なお、計算に際して、摩擦面は斜線で示す $RS1 \cdot RS5 \cdot RS6 \cdot RS7$ の4面であり、また、各表面形状の境界を含む内部せん断面が存在する($\Gamma_{s1} \cdot \Gamma_{s2} \cdot \Gamma_{s3} \cdot \Gamma_{s4} \cdot \Gamma_{s5} \cdot \Gamma_{s6}$ の6面)。このモデルの特徴は、入口断面上のS点が、 θ を変化させることにより移動可能であり、ダイス面形状を変化させるパラメータの一つとなっている点である。

2.4 解析結果

(1) ダイス長さと θ の影響

フィン数 $n=4$ の場合において、 Y_0 と θ をパラメータとし、得られた $[B/R1]_c$ を整理すると図-3となる。

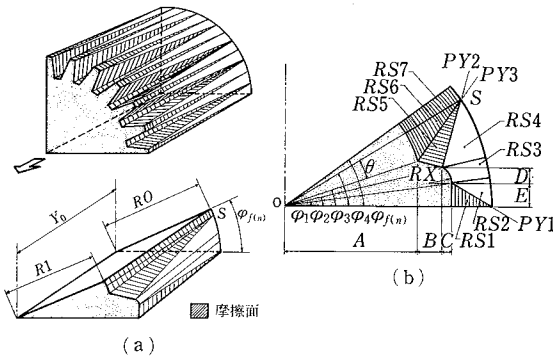


図-2 フィン付き棒解析モデル

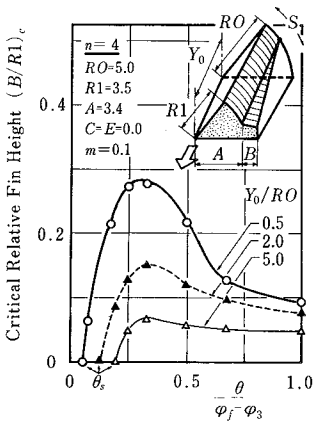


図-3 ダイス長さと θ の影響($n=4$)

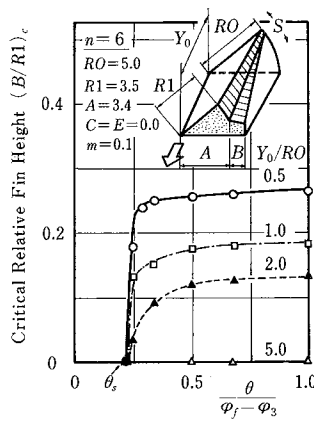


図-4 ダイス長さと θ の影響($n=6$)

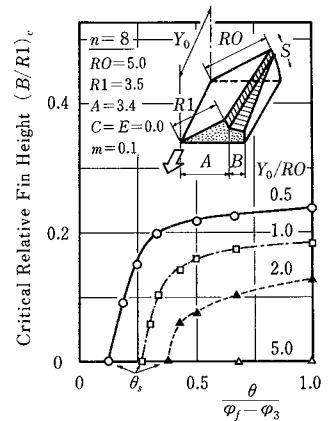


図-5 ダイス長さと θ の影響($n=8$)

同様に、 $n=6, n=8$ の場合の計算結果をそれぞれ図-4、図-5に示す。

(a) ダイス長さの影響

$n=4, 6, 8$ いずれの場合においても、ダイス長さは短いほうが、 $[B/R1]_c$ は大きくなっており、充满しやすい傾向にある。

(b) θ の影響

$n=4$ の場合は、ある θ において、 $[B/R1]_c$ は最大値を持つ。しかし、 $n=6, 8$ の場合は、 θ の増加に伴って $[B/R1]_c$ は増加していく。これらの傾向に差が生ずる原因の一つとして、S点の位置によって決定する $\Gamma_{s3} \cdot \Gamma_{s4} \cdot \Gamma_{s5} \cdot \Gamma_{s6}$ 面での内部せん断仕事率の影響が考えられる。 $\Gamma_{s4} \cdot \Gamma_{s5}$ 面での内部せん断仕事率は、 θ が大きくなるほど大きくなるのに対し、 $\Gamma_{s3} \cdot \Gamma_{s6}$ 面では逆に θ が大きくなるほど小さくなる。したがって、どちらの内部せん断仕事率の影響が支配的になるかにより、前述の傾向に差が生じてくるものと考えられる。

(2) 素棒径と θ の影響

フィン数 $n=4$ の場合において、 RO と θ をパラメータとし、得られた $[B/R1]_c$ を整理すると図-6となる。

同様に、 $n=6, n=8$ の場合の計算結果をそれぞれ図-7、図-8に示す。

(a) 素棒径(リダクション)の影響

$n=4, 6, 8$ いずれの場合においても、充满限界の最大値は、素棒径の大きいほうが(リダクションが高いほうが)大きな値となっており、充满しやすい傾向にある。

(b) θ の影響

$n=6, n=8$ で $[R1/RO]=0.70$ の場合(リダクションが高い場合)と、それ以外の条件の場合とは、 θ の及ぼす影響の傾向に差が生じているが、これは、(1)-(b)で述べた理由によるものと同じであると考えられる。

研究速報

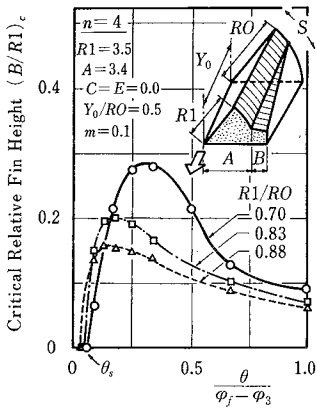


図-6 素棒径とθの影響 (n=4)

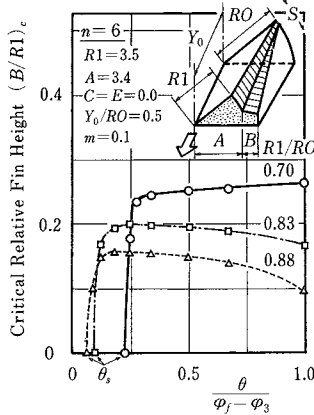


図-7 素棒径とθの影響 (n=6)

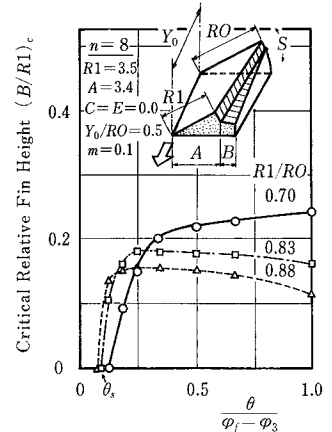


図-8 素棒径とθの影響 (n=8)

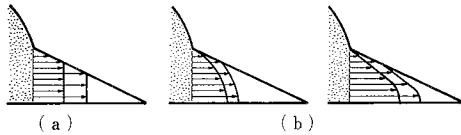


図-9 フィン部への材料流動形状

(3) フィン部への流動開始角度 (θs)

図-3～図-8の各図において、フィン部への流動が開始する角度θsが存在する。ダイス長さは短いほうが、また素棒径は小さいほうが(リダクションは低いほうが)θsは小さくなっており、小さなθで流動を開始する傾向にある。

ただし、今回の計算では、フィン部への材料の流動を図-9(a)に示すように仮定しており、図-9(b)に示すようなモデルを用いれば、さらに精度の良い解析が可能である。

(4) 摩擦定数とダイス長さの影響

n=4, RO, R1, θを固定し、mとY0をパラメータとし、得られた[B/R1]cを整理すると図-10となる。摩擦定数は小さいほうが、[B/R1]cは大きくなっており、充満しやすい傾向にある。これは、フィン高さBの増加(リダクションの減少を伴う)による摩擦仕事率の減少率と、Bの増加(摩擦面の増加を伴う)による摩擦仕事率の増加率との差が影響していると考えられるが、これらを加味した摩擦仕事率の全仕事率に及ぼす影響が、mの小さい場合のほうが小さいためであると考えられる。

3. フィン付き管の押し出し・引抜きに関する

充満限界の解析

3.1 管材の一般的三次元的可容速度場

棒材の押し出し・引抜き加工における三次元的可容速度場と同様の手法で導かれる管材の三次元的可容速度

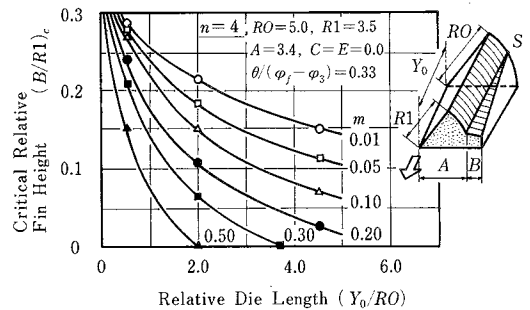


図-10 摩擦定数とダイス長さの影響 (n=4)

場を(1)', (2)', (3)'式に示す。

なお、詳細は既報⁹⁾を参照されたい。

$$V_y(r, \phi, y) = V_y(y)$$

$$= \frac{V_0 \int_0^{\phi^{(a)}} \{RSO^2(\phi, 0) - RSI^2(\phi, 0)\} d\phi}{\int_0^{\phi^{(a)}} \{RSO^2(\phi, y) - RSI^2(\phi, y)\} d\phi} \quad (1)'$$

$$V_\phi(r, \phi, y) = r \cdot \omega(\phi, y)$$

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

$$V_r(r, \phi, y) = -\frac{r}{2} \left\{ \frac{\partial V_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(\phi, y)}{\partial \phi} \right\}$$

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

3.2 外面フィン付き管解析モデル

図-11に示す外面フィン付き管解析モデルは、円管か

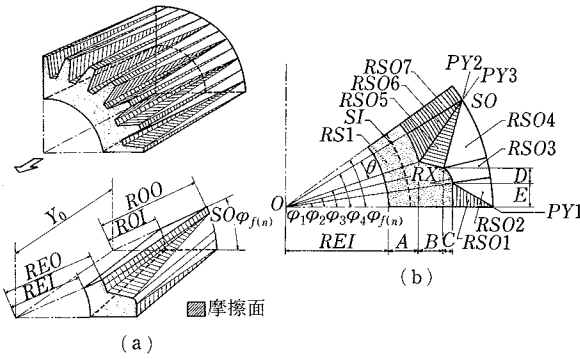


図-11 外面フィン付き管解析モデル

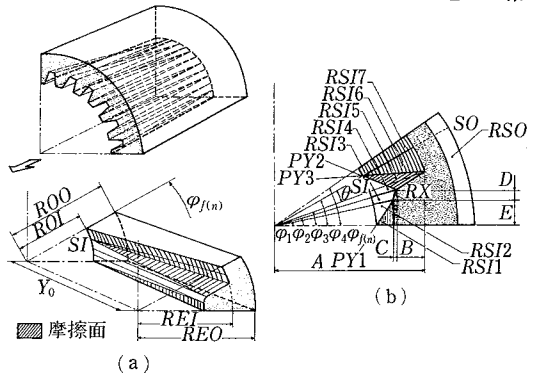


図-12 内面フィン付き管解析モデル

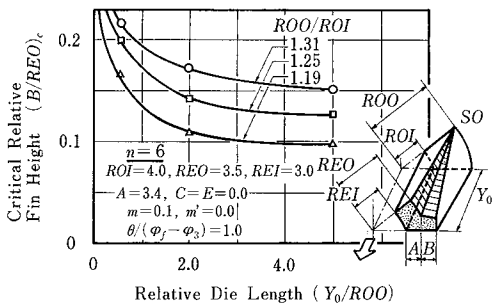


図-13 ギイス長さと素管外径の影響 (n=6)

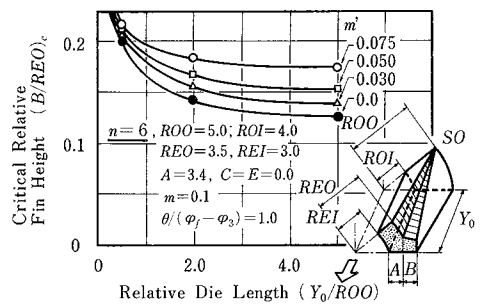


図-14 内面の摩擦定数 m' の影響 (n=6)

ら内面が真円，外面がフィン形状のフィン付き管を押し出し・引抜く場合のモデルである。なお，外面の表面形状関数 $RSO(\phi, y)$ は，前述のフィン付き棒解析モデルと同様である。

3.3 内面フィン付き管解析モデル

図-12 に示す内面フィン付き管解析モデルは，円管から外面が真円，内面がフィン形状のフィン付き管を押し出し・引抜く場合のモデルであり，内面の表面形状関数 $RSI(\phi, y)$ は，基本的には前述のフィン付き棒解析モデルと同様である。

3.4 解析結果

解析の一例として，外面フィン付き管解析モデルを用いた解析結果を示す。

(1) ギイス長さと素管外径の影響

フィン数 $n=6$ ， θ ， ROI ， REO ， REI ， m ， m' を固定し， ROO と Y_0 をパラメータとして計算し，得られた $[B/REO]_c$ を整理すると図-13 となる。ギイス長さは短いほど，また素管外径は大きいほど（リダクションが高いほど），材料はフィン部へ充填しやすい傾向にある。

(2) 内面の摩擦定数 m' の影響

棒と管の押し出し・引抜きの大きな相違点は，マンドレル（あるいはプラグ）を用いるか，否かである。そこで

内面の摩擦定数が充填限界に及ぼす影響について調べた。図-14 は， m' と Y_0 をパラメータとし，得られた $[B/REO]_c$ を整理したものである。 m' が大きいほど，材料は充填しやすい傾向にあり，すなわち軸方向へ材料が流れるよりも，半径方向へ流れやすくなることを示しており，妥当性のある傾向が得られた。

4. ま と め

本報では，非軸対称断面を有する棒材・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，フィン付き棒およびフィン付き管解析モデルを開発し，ギイス孔形への材料充填限界に及ぼす各条件因子の影響について検討した。結果は妥当性のあるものであり，材料の充填限界を予測できることが明らかとなった。

なお，本解析に用いた一般的三次元動的可容速度場は汎用性が高いので，フィン形状以外の複雑な形状を有する押し出し・引抜き製品の充填限界も比較的容易に解析することが可能である。 (1986年10月20日受理)

参 考 文 献

- 1) Kiuchi, M., Kishi, H. & Ishikawa, M. : Proc. 22nd int. Mach. Tool Des. Res. Conf., (1981), 523
- 2) 木内・岸 : 31 回塑加連講論, (1980-11), 216
- 3) 木内・飯島・星野 : 昭 61 春塑加講論, (1981), 325
- 4) 木内・岸・石川 : 昭 56 春塑加講論, (1981), 435