

非軸対称押し・引抜きに関する研究 ——ダイス孔形への材料の充満限界 1——

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

木 内 学*・飯 島 茂 男*・星 野 倫 彦*
Manabu KIUCHI, Shigeo IJIMA and Michihiko HOSHINO

1. はじめに

押し・引抜き加工において、材料のダイス孔形への充満限界が、ある程度予測可能であれば、ダイスの設計・素材寸法の選択などに対し大きな手助けになると考えられる。

筆者らは、既報¹⁾²⁾のいわゆる上界法を応用した非軸対称断面を有する棒材・線材・型材の押し・引抜き加工に関する一般的三次元的可容速度場を用いて、ダイス孔形への材料の充満限界を検討したので、その結果について報告する。

2. 解 析 法

2.1 三次元動向可容速場と仕事率

非軸対称押し・引抜き加工における三次元的可容速度場の詳細な条件および定式化の手順については、既報¹⁾²⁾に示したので、ここでは結果のみをまとめて以下に示す。

円柱座標系 (r, ϕ, y) を用いて、ダイス内の各方向の速度成分 $V_y \cdot V_\phi \cdot V_r$ を表すと次式になる。

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

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

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

なお、ここで V_0 はダイス入口からの材料流入速度（一様）、 $\phi_{r(0)}$ および $\phi_{r(y)}$ は ϕ 方向の解析範囲であり、 $RS(\phi, y)$ はダイスの表面形状を表す関数である。

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 はそれぞれ次式で表される。

$$\dot{W}_i = \int_V \sigma_0 \cdot \dot{\epsilon}_{eq} dV \quad (4)$$

$$\dot{W}_s = \int_{r_s} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_0 \cdot \Delta V \Gamma_s dS \quad (5)$$

$$\dot{W}_f = \int_{r_f} \frac{m}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_0 \cdot \Delta V \Gamma_f dA \quad (6)$$

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、 $\Delta V \Gamma_s \cdot \Delta V \Gamma_f$ 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としてダイス表面形状 $RS(\phi, y)$ が与えられるとすべての速度成分が決定し、仕事率が計算できる形となっている。

2.2 充満限界の考え方

最も単純なモデルとして矩形断面材を押し・引抜く場合を考える。図-1に示すようなモデルで素棒半径 RO ・出側高さ B ・ダイス長さ Y_0 を一定とし、出側幅 A を変化させて計算する。なお、ダイス表面の摩擦仕事率は上部の接触部分のみを考える。 A が大きくなるにつれリダクションは減少する。これに伴い一般的に内部仕事率は減少し、摩擦仕事率およびせん断仕事率は逆に増加していく。全仕事率は、ある A_i において最小値となり、そのときの A_i が充満限界であると考えられる。すなわち A_i よりも大きな開口部を持ったダイスを用いて押し出しても、材料は A_i 以上広がらず幅方向のダイス壁まで充満しない。

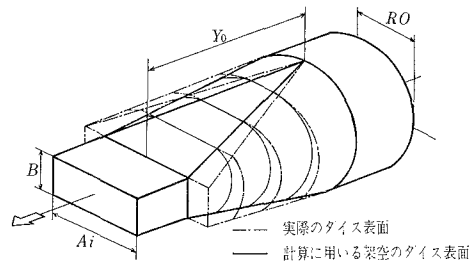


図-1 材料充満の概念図

3. 矩形棒の充満限界の解析

3.1 矩形棒解析モデル

矩形棒解析モデルは丸棒からコーナRを持った矩形棒を押し・引抜く場合のモデルである。ダイス表面形状としては従来多く用いられてきた入・出側の等角度の表面位置を直線で結んだ形状（以後直線モードと呼ぶ、図

*東京大学生産技術研究所 第2部

-3 Type A) に加えて平面形状 (以後平面モードと呼ぶ) を用いている。図-2 に示すように出側形状が与えられると、平面モードと直線モードとの境界関数 $PY1 \cdot PY2$ が幾何学的に決定され、平面モードの $RS1 \cdot RS5$ が求められる。なお $RS1 \cdot RS5$ 以外の表面形状は直線モードを用いているが、 $RS2 \cdot RS4$ は出側表面と結ぶのではなく等角度の境界線上へ結ぶ関数となっている。また5つの外表面形状のおおのの境界において、4つの内部せん断面が存在するがせん断面 $\Gamma_{s1} \cdot \Gamma_{s4}$ はねじれた内部せん断面となっていることに注意されたい。なお、このモデルは特殊なケースを含め図-3 に示す4つのタイプについて計算可能である。ただし、断面形状の対称性から ϕ 方向の解析範囲は $0 \sim \pi/2$ であり、以降の図もすべてこの範囲で示してある。

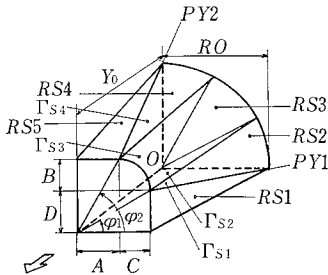


図-2 矩形棒解析モデルのダイス表面形状

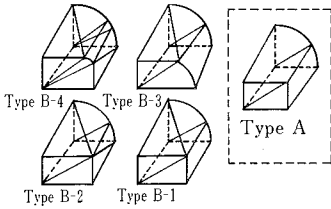


図-3 矩形棒解析モデルのダイス表面形状の種類

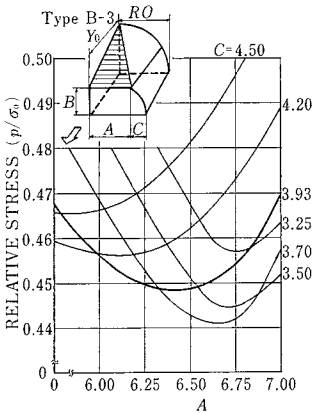


図-6 幅方向ストレート部とR部の影響 (Type B-3)

3.2 ダイス形状と材料の幅方向への充满限界

図-4 は、Type B-1 について RO 、 Y_0 、 B および $m (= 0.10)$ を一定とし、出側幅 A を変化した場合の仕事率が相対高さ $[B/RO]$ ごとに、相対幅 $[A/RO]$ を横軸にとってまとめたものである。ただし、摩擦面は $RS5$ のみであり、以降、摩擦面は図中の斜線部で示す。各 $[B/RO]$ において、仕事率が最少となる $[A/RO]$ すなわち期待される相対幅の充满限界 $[A/RO]_c$ が求められる。同様にして Type A・Type B-2 についての $[A/RO]_c$ を求め、 $[B/RO]$ を横軸にとってまとめると図-5 となる。Type B-1・Type B-2 は、ほぼ一致した値をとり、 $[B/RO]$ の増加に伴って $[A/RO]_c$ は減少していく。これに対し、Type A はあるところまでは増加していくが、その後次第に減少していく。これは Type A のダイス表面形状が曲面的であり幅方向に広がりやすく、特に $[B/RO]$ が小さい場合その影響が顕著に現れるためと思われる。したがって、幅方向へ材料をより広げようとする場合は、Type B-1・Type B-2 のダイス形状のほうが有利であると予測できる。

3.3 実験との比較

モデルの妥当性を確認する意味で、簡単な引抜き実験を行い計算結果と比較した。実験条件を (表-1) に示す。実測値の幅ストレート部 ($A=6.50$ mm)、幅 R 部 ($C=$

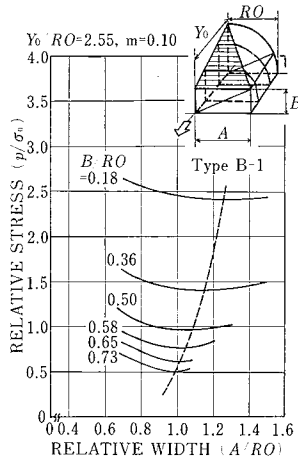


図-4 相対高さの影響 (Type B-1)

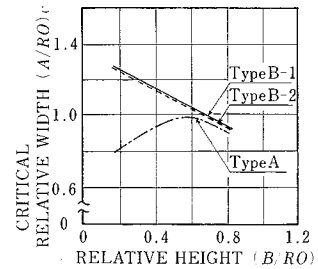
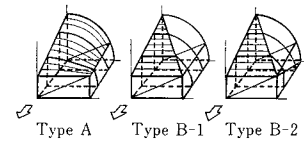


図-5 ダイス表面形状と相対高さの影響

表-1 実験条件

Material	Copper
RO : Radius (of rod)	9.73 mm
Y_0 : Die length	18.00 mm
B : Height (of product)	6.78 mm

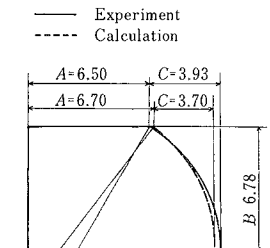


図-7 実測値と計算値の比較

研究速報
 3.93mm)近くで、TypeB-3を用いて計算した結果(ただし $m=0.10$)を図-6に示す。図-6より仕事率が最少となる A, C を求めると、 $A=6.70, C=3.70$ であり、この結果と実測値を図示すると図-7となる。実測値と計算値は、ほぼ一致した結果となっており、モデルの妥当性が確認できたと考えられる。

3.4 コーナR部の材料の充満限界

以下TypeB-4を用いてコーナR部への材料の充満限界に及ぼす出側形状の縦横比・ダイス長さ・摩擦定数・リダクションの影響を調べた。ただし、コーナRは四分円である。なお、各計算条件は(表-2)に示す。

(1) 縦横比とリダクションの影響

(表-2)条件-1で、縦横比1.0の場合において相対高さ $[H/RO]$ を変化させた計算結果を図-8に示す。図-8より、各 $[H/RO]$ ごとの仕事率最少となる相対コーナR、 $[R1/RO]$ すなわち期待される充満限界のコーナR、

表-2 計算条件

	縦横比	相対高さ H/RO	相対ダイス長さ Y_0/RO	摩擦定数 m
条件-1	1.00	0.80	2.0	0.10
	0.67	0.70		
	0.50	0.60		
条件-2	1.00	0.70	4.0	0.10
		0.60	3.5	
		0.50	3.0	
		2.5		
		2.0		
条件-3	1.00	0.60	4.0	0.20
			3.0	0.10
			2.0	0.05
				0.01

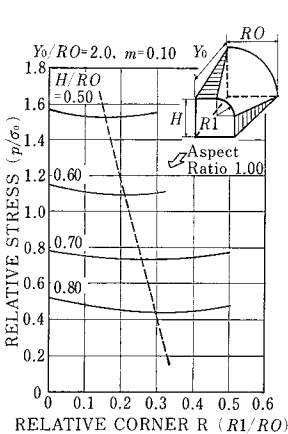


図-8 相対高さの影響
(TypeB-4, 縦横比1.0)

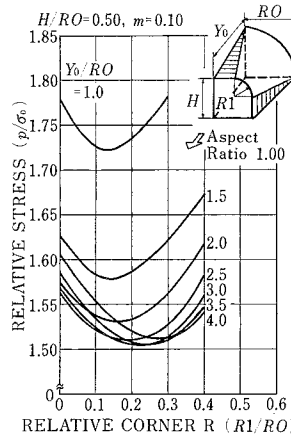


図-10 相対ダイス長さの影響
(TypeB-4, $H/RO=0.50$)

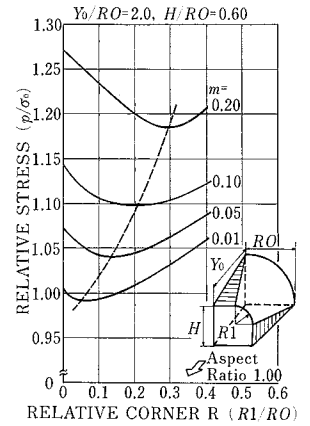


図-12 摩擦定数の影響
(TypeB-4, $Y_0/RO=2.0$)

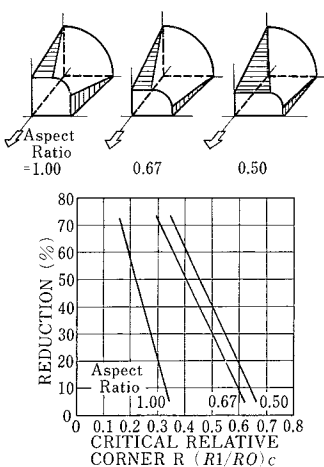


図-9 縦横比とリダクションの影響

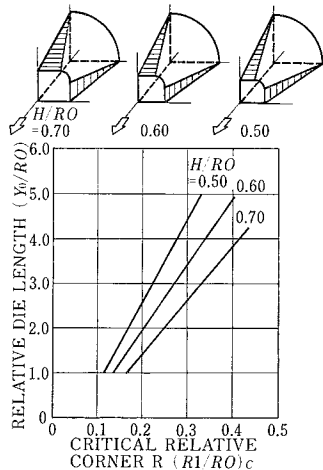


図-11 相対ダイス長さと相対高さの影響

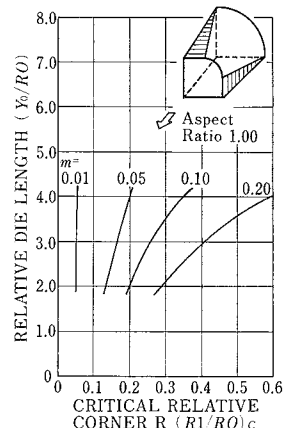


図-13 摩擦定数と相対ダイス長さの影響

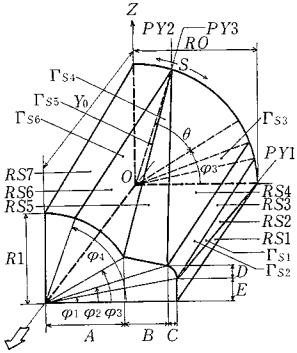


図-14 フィン付き材解析モデルのダイス表面形状

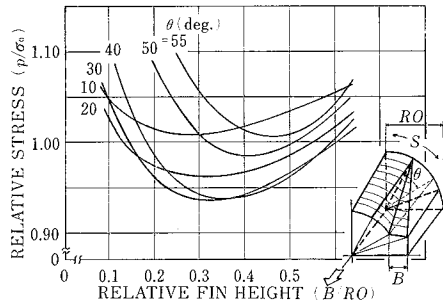


図-15 フィン部への材料充満に及ぼすθの影響(1)

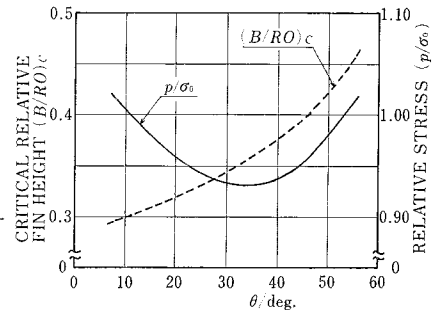


図-16 フィン部への材料充満に及ぼすθの影響(2)

$[R1/RO]_c$ が求まる。同様の手順で縦横比 $=0.67, 0.50$ の場合の $[R1/RO]_c$ を求め、得られた $[R1/RO]_c$ とそのときの断面リダクションで整理すると図-9となる。図-9より、リダクションが高いほど $[R1/RO]_c$ は小さくなり、コーナR部へ材料が充満しやすいことがわかる。また縦横比が小さくなるほど $[R1/RO]_c$ は大きくなっており、四分円の場合においては、縦横比1.0のときが最も充満しやすい条件であると予測できる。

(2) ダイス長さとしリダクションの影響

(表-2)条件-2で、 $[H/RO]=0.50$ の場合において相対ダイス長さ $[Y_0/RO]$ を変化させた計算結果を図-10に示す。図-10より、各 $[Y_0/RO]$ ごとの $[R1/RO]_c$ が求まる。同様にして $[H/RO]=0.60, 0.70$ の場合の $[R1/RO]_c$ を求め、 $[R1/RO]_c$ と $[Y_0/RO]$ で整理すると図-11となる。図-11より、 $[Y_0/RO]$ が高くなるほど $[R1/RO]_c$ は大きくなり充満しにくい傾向にあることがわかる。また、 $[H/RO]$ が小さい場合(リダクションが高い場合)ほど $[R1/RO]_c$ は小さくなっており(1)と同じ傾向となっている。

(3) 摩擦定数とダイス長さの影響

(表-2)条件-3で、 $[Y_0/RO]=2.0$ の場合において摩擦定数 m を変化させた計算結果を図-12に示す。図-12より、各 m ごとの $[R1/RO]_c$ が求まる。同様にして、 $[Y_0/RO]=3.0, 4.0$ の場合の $[R1/RO]_c$ を求め、 $[R1/RO]_c$ と $[Y_0/RO]$ で整理すると図-13となる。図-13より m が大きいかほどまた $[Y_0/RO]$ が大きいかほど、 $[R1/RO]_c$ は大きくなっており充満しにくい傾向にあることがわかる。

以上をまとめると、リダクションが高いほど・ダイス長さが短いほどまた摩擦定数が小さいほど、材料はコーナR部へ充満する傾向にあることがわかる。これらの傾向は、一般的に妥当性のある結果と思われる。

4. フィン付き材の充満限界の解析

4.1 フィン付き材解析モデル

矩形棒解析モデルを拡張し、丸棒からフィン付き材を

押し出し・引抜く場合のモデルを図-14に示す。表面形状関数は平面モードのRS1・RS5と直線モードRS2・RS3・RS4・RS6・RS7の7つで構成されており、内部せん断面は $\Gamma_{s1} \cdot \Gamma_{s2} \cdot \Gamma_{s3} \cdot \Gamma_{s4} \cdot \Gamma_{s5} \cdot \Gamma_{s6}$ の6つであり、このうち $\Gamma_{s1} \cdot \Gamma_{s4} \cdot \Gamma_{s5}$ はねじれた内部せん断面である。また、ダイス入側周上の点Sは θ を変化させることにより移動可能でありダイス表面形状もパラメータの一つとなっている。

4.2 充満に及ぼすダイス形状の影響(θの影響)

図-14のモデルを用いて、 θ を変化させフィン部への材料の充満限界を求めた。ただし、このときBをパラメータとしB以外はすべて一定、摩擦面はRS5・RS6・RS7として計算した。各 θ ごとの計算結果を、相対フィン高さ $[B/RO]$ を横軸にとってまとめると図-15となる。図-15より、各 θ ごとのフィン部への材料充満限界 $[B/RO]_c$ が求められる。 $[B/RO]_c$ と θ およびこのときの相対仕事率で整理すると図-16のようになる。図-16より仕事率から見ると必ずしも有利とは言えないが、フィン高さを高くするためには θ を大きくとること、すなわち図-15のZ軸上にS点のあるダイス形状が適当であると予測できる。なお、他のパラメータを用いての詳細な計算等は次報にて報告する。

5. ま と め

本報では、非軸対称断面を有する押し出し・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、材材のダイス孔形への材料充満限界の解析手法を示し、矩形棒解析モデルとフィン付き材解析モデルを提案し、各パラメータの影響について検討した。結果は妥当性の有るものであり、ダイスの設計・素材寸法の選択などに対し有効な情報になるものと考えられる。

(1986年3月29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) 木内学・岸秀敏: 31回塑加連講論, (1980-11), 216.