

複合材の押出し・引抜き加工に関する研究 (第1報)

— Limit Analysis of Drawing and Extrusion of Composite Material 1st Report —

木内 学*・伊藤 澄彦*

Manabu KIUCHI and Sumihiko ITOH

1. ま え が き

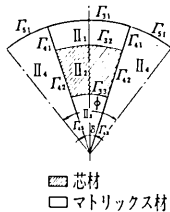
複合材の押出, 引抜き加工において健全な製品を得るためには, 加工条件に制約があることはよく知られているとおりである。これまでに, クラッド材についてはこの種の検討がなされているが¹⁾²⁾³⁾, 多芯材についての解析はまだ行われていないようである。筆者らは, 汎用性を有した動的相容速度場を提案し, 上界法による全変形仕事率計算式を導き, それに基づいて多芯材の健全な製品を得るための加工条件の解析を試みたので, その解析手法をここに示し, 計算例を報告する。

2. 解析に用いた仮定および手法

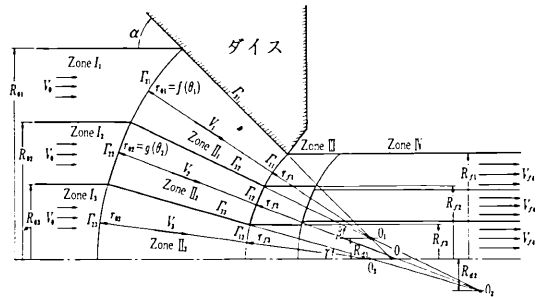
2-1. 仮定

本解析の変形モデルを図1に示す。なお, 使用記号は図に示すとおりである。本解析では, 芯材を図1(a)に

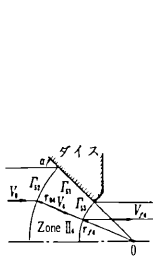
示すようなモデルに近似した。また, 芯材, マトリックス材の変形抵抗を σ_{02}, σ_{01} とし, ここでは芯材が破断する場合を想定して解析を行う。まず, 加工中の材料を Zone(I) ~ (IV)に分割する。Zone(I), (IV)は剛体域でそれぞれ一様な軸方向速度 V_0, V_{f4} を有し, 芯材とマトリックス材との境界面での相対すべりはしないものとする。Zone(II)は塑性変形領域であって4つのZoneに分割され, Zone(II₂)が芯材部である。Zone(II₁)~(II₄)の入側, 出側の境界のうち, Γ_{21}, Γ_{22} 以外は図上で円弧とする。なお, 本解析では図1(b)に示すように $R_{d1} (\geq 0), R_{d2} (\leq 0), \beta$ がパラメータとして導入されており, $R_{d1} \rightarrow 0, R_{d2} \rightarrow 0$ において, 点 O_1, O_2, O_3 は点 O に一致する。また, 次式で表されるような芯材の破断発生に関する係数 e を導入しておく。



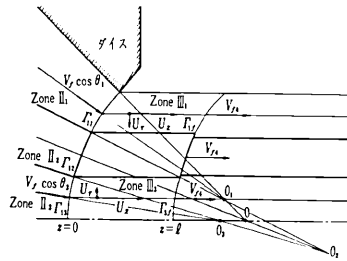
(a) 解析モデルの軸方向断面図



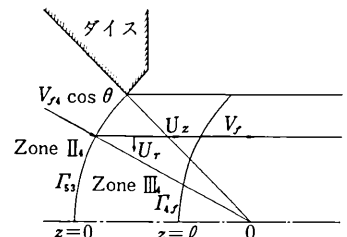
(b) 動的相容速度場 (Zone II₁ ~ III₃)



(c) 動的相容速度場 (Zone II₄)



(d) 動的相容速度場 (Zone III : Case 1)



(e) 動的相容速度場 (Zone III : Case 2)

図 1

* 東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

$$e = V_o(R_o2^2 - R_o3^2) / V_f(R_f2^2 - R_f3^2) \quad (1)$$

$e = 1$; 健全, $e < 1$; 破断発生

V_f ; ダイス出口における軸方向速度,

$e = 1$ のとき, $V_f = V_{f4}$ となる.

ここで, $e < 1$ の場合は, 加工進行中にマトリックス材の断面減少率が, 芯材のそれよりも大きくなり, ダイス出側において芯材がマトリックス材によって引っ張られ, ダイス出口 (r_{12}) において破断する場合に相当する. こうして出来た空隙部分の挙動として, 次の2通りの場合を想定する. Case 1; マトリックス材のうち, 外層部 (Zone III₁, III₃) が圧縮変形を受け, 空隙に流れ込む場合 (図1(d)). Case 2; マトリックス材の側部 (Zone III₄) が引張変形を受け, 断面積が減少する場合 (図1(e)). なお, 本論文には, Case 1 について, その解析手法・計算結果を示し, Case 2 については, 別途報告する.

2-2 動的可容速度場

図1に示された各領域内における速度を表1に示す. な

お, Zone (II) では球座標を, Zone (III) では円柱座標を用いている. 表1に示した各速度場は, 各領域内において幾何学的境界条件を満足し, かつ体積一定の条件を満足する動的可容速度場となっている.

2-3 全変形仕事率

各仕事率の求め方を簡単にまとめて表2に示す. 本解析では, $e = 1$, すなわち健全材が得られる場合には, 全変形仕事率 \dot{W}^* は,

$$\dot{W}^* = \sum (\dot{W}_i)_{in} + \sum (\dot{W}_s)_{in} + \sum \dot{W}_f \quad (2)$$

で与えられる. ここで \sum 記号は各領域および各境界での各仕事率の総和をとることを意味する. ただし $()_{in}$ はダイス内部 (図1の Zone (II)), 以下に用いる $()_{out}$ はダイス出側 (図1の Zone (III)) での各仕事率を表す. $e < 1$, すなわち破断が発生する場合には, 全変形仕事率 \dot{W}_c^* は,

$$\dot{W}_c^* = \sum (\dot{W}_i)_{in} + \sum (\dot{W}_s)_{in} + \sum \dot{W}_f - ((\dot{W}_s)_{r12})$$

表1 動的可容速度場

Zone		速 度 場
II ₁		$V_1(r_1, \theta_1) = -V_f \frac{r_{f1} \cos \theta_1 (r_{f1} \sin \theta_1 + R_{d1})}{r_1 (r_1 \sin \theta_1 + R_{d1})}$
II ₂		$V_2(r_2, \theta_2) = -e V_f \frac{r_{f2} \cos \theta_2 (r_{f2} \sin \theta_2 + R_{d2})}{r_2 (r_2 \sin \theta_2 + R_{d2})}$
II ₃		$V_3(r_3, \theta_3) = -V_f r_{f3}^2 \frac{\cos \theta_3}{r_3^2}$
II ₄		$V_4(r_4, \theta_4) = -V_{f4} r_{f4}^2 \frac{\cos \theta_4}{r_4^2}$
Case 1	III ₁	半径方向; $U_{r1} = \frac{C}{2} \left(r - \frac{R_{f1}^2}{r} \right)$ 軸方向; $U_{z1} = -C(z-l) + V_{f4} - \frac{C}{2} \left(r - \frac{R_{f1}^2}{r} \right) \frac{r - R_{d1}}{\sqrt{r_{f1}^2 - (r - R_{d1})^2}}$
	III ₃	半径方向; $U_{r3} = \frac{C}{2} r$ 軸方向; $U_{z3} = -C(z-l) + V_{f4} + \frac{C}{2} \frac{r^2}{\sqrt{r_{f3}^2 - r^2}}$
Case 2	III ₄	半径方向; $U_r = -\frac{C}{2} r$ 軸方向; $U_z = C(z-l) + V_f - \frac{C}{2} \frac{r^2}{\sqrt{r_{f4}^2 - r^2}}$

表2 各 仕 事 率

内部仕事率	$\dot{W}_i = \int_V \sigma_0 \dot{\epsilon}_{ij} dV$	σ_0 : 変形抵抗 芯材-マトリックス材界面における \dot{W}_s を求める際には, 小さい方の変形抵抗値を使用. $ dV $: 境界 Γ における相対速度 m : 材料-工具間における摩擦定数 dV_n : Γ_{12} における速度不連続の法線方向成分
剪断仕事率	$\dot{W}_s = \int_r \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} dV ds$	
摩擦損失	$\dot{W}_f = \int_r m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} dV ds$	
破断発生のための仕事率	$\dot{W}_c = \int_s \sigma_0 (dV_n) ds$	

$$\begin{aligned}
 &+ (\dot{W}_s)_{r12} + (\dot{W}_s)_{r13} + \sum (\dot{W}_i)_{out} + \sum (\dot{W}_s)_{out} \\
 &+ \dot{W}_c \quad (3)
 \end{aligned}$$

で与えられる.

2-4 判定条件

破断発生に関する係数 e の定義式(1)を幾何学的関係を用いて変形し, $e = 1$ とおくと次式が得られる.

$$\sin \beta = \sin \alpha - \frac{R_{f1} \sin \alpha (1 - R_{o2} / R_{o1})}{R_{f1} - R_{d1}} \quad (4)$$

この式から, 3つのパラメータ R_{d1} , R_{d2} , β のうち, R_{d1} と β が(4)式を満足している場合には, R_{d2} によらず, 健全材が得られることがわかる. したがってまず, (4)式を満足するパラメータ (R_{d1} , R_{d2} , β) の組み合わせの中で, 最小な全変形仕事率 \dot{W}^* を与える組み合わせ (R_{d1}^* , R_{d2}^* , β^*) を見出すことが必要になる. しかし, Case Study の結果, 常に $R_{d1}^* = R_{d2}^* = 0$ となることが判明した.

次に同加工条件における不健全材(破断発生)が得られる速度場として, パラメータの組み合わせを ($R_{d1}^* + \epsilon$, R_{d2}^* , β^*) ととり, その速度場より(3)式に基づいて全変形仕事率 \dot{W}_c^* を求める. \dot{W}^* と \dot{W}_c^* とを比較し, 低い方の全変形仕事率を与える速度場が, 実際に起こり得るものとする.

ここで, ($\dot{W}^* - \dot{W}_c^*$) と R_{d1} との関係を図2に示す. 本解析では, 加工中に突然芯材が破断するという不連続的なモデルを想定し, (3)式を用いたので, $R_{d1} \rightarrow 0$ において $\dot{W}^* - \dot{W}_c^* = (\dot{W}_s)_{r12}$ となる. したがって \dot{W}_c^* の計算の際には, \dot{W}_c^* が R_{d1} に対して安定となる範囲に ϵ を取り, \dot{W}_c^* を計算することにした. なお, 解析モデルとして, 芯材にくびれが発生するように考えた場合には, $R_{d1} \rightarrow 0$ での判定が可能となると思われる.

計算のフロー・チャートを図3に示す.

3. 解 析

まず, 得られた健全材の全変形仕事率 \dot{W}^* の値の妥当性についての検討結果を表3に示す. この結果より, 本解析で用いた計算式が妥当なものであると判断できる.

次に数値計算例を図4, 5に示す. 横軸にはダイス半角 α , 縦軸には押出比 R ととり, 境界線よりも下の加工条件では健全材が得られることを示している. また, A_{f1} は, 素材における芯材の断面積占有率を表す. この両図より, 次のことがいえる. (1) 変形抵抗比 $\sigma_{02} / \sigma_{01}$ が小さい方が, 健全材が得られやすい. (2) 芯材の断面積占有率 A_{f1} が増すにつれて, 健全材の得られる領域が狭くなる. 図5には, $A_{f1} = 70\%$ の場合の結果も示してあるが, このような場合には, 芯材が破断すると限定することは無理が

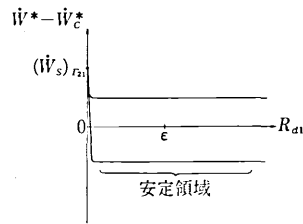


図2. ($\dot{W}^* - \dot{W}_c^*$) と R_{d1} の関係

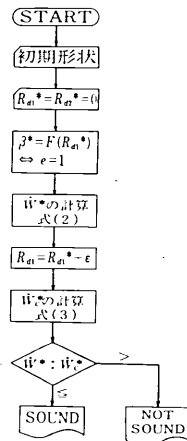


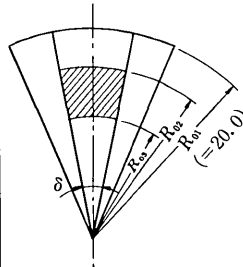
図3 計算のためのフロー・チャート

あると思われる. したがって, 本解析では, モデルを芯材の断面減少率がマトリックス材のそれよりも小さくなって破断が発生する場合に限定しているが, 逆の場合の解析も必要であると思われる. (3) 押出比 R が小さい方が健全材が得られやすい. (4) 押出比 R がある値以上では, ダイス半角 α が大きくなると不健全材が得られるようになる. さらに α が大きくなると, 再び健全材が得られる領域が現れる. ただし, ダイス入側で材料がコンテナに支持されている場合には, この範囲では, デッドメタルが発生していると考えられ, これを考慮したのが図7, 8である. 図6には, 健全材の全変形仕事率 \dot{W}^* (ただし, 材料とコンテナの間の摩擦損失は含まれていない) とダイス半角 α との関係の一例を $m = 1.0, 0.1$ の場合について示してある. 図において, $m = 0.1$ の曲線が $m = 1.0$ の実線と交わる点のダイス半角以上では, デッドメタルが形成される. 図7, 8よりデッドメタルが形成されることによって, 健全材が得られる加工範囲が広がることがわかる. (5) 図9には, 本解析手法によるクラッド材の計算結果と多芯材の計算結果が比較してある. この図より, 健全材を得るための加工条件に対する芯材の位置の影響が予測される. (6) 図4, 5, 7, 8において, 全体的に健全材が得られる領域が広いが, これはダイス外側では芯材とマトリックス材との界面での相対すべりは起こらないと仮定している

表3 \dot{W}^* の検討結果

モデル	R_{s1} (mm)	R_{s2} (mm)	δ (rad)	\dot{W}^* (kg·mm/s)
複合材	12.0	10.0	$\frac{\pi}{10}$	274.60
複合材を 単一材に 近づけた 場合	12.0	11.99	$\frac{\pi}{10}$	248.78
	*10.01	10.0	$\frac{\pi}{10}$	248.78
	12.0	10.0	$\frac{\pi}{300}$	249.43
単一材	—	—	—	248.64°

☆: この値は、参考文献(4)の式(8-75)を参考にして計算された値



$\sigma_{01} = 3.70 \text{ kg/mm}^2$
 $\sigma_{02} = 18.5 \text{ kg/mm}^2$

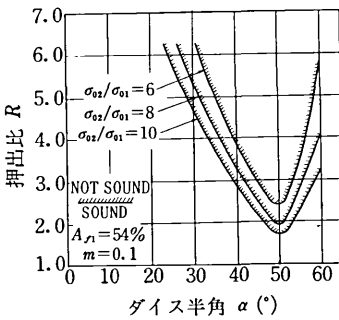


図4 健全材の得られる加工領域

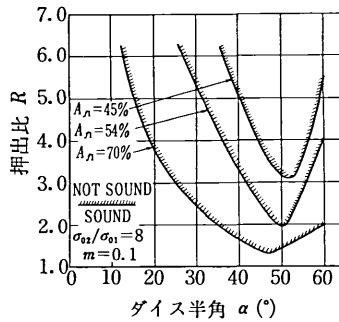


図5 健全材の得られる加工領域

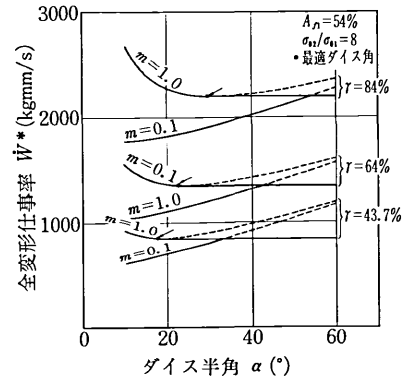


図6 全変形仕事率 \dot{W}^* とダイス半角 α との関係

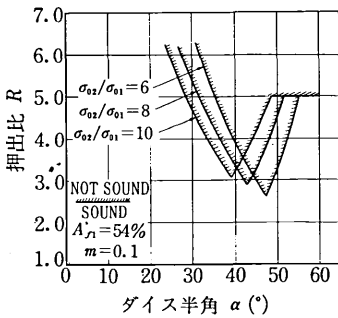


図7 健全材の得られる加工領域

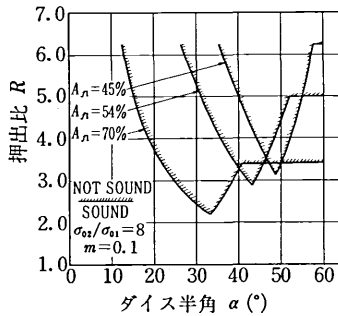


図8 健全材の得られる加工領域

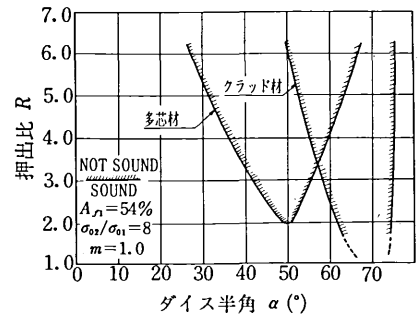


図9 健全材の得られる加工領域

ためである。このことは、クラッド材に関する研究結果からも既に指摘されていることである。

4. ま と め

複合材(多芯材)の押出・引抜加工において健全な製品を得るための加工条件を検討するため、汎用性を有した動的可容速度場を提案し、上界法により解析を行った。その結果、クラッド材について従来検討されている事実から予想される現象が定性的に見い出された。今後は、さらに変形モデルを検討し、本解析に用いた動的可容速度場の汎用性を活かして、解析の対象を拡張していく計画である。
 (1979年9月5日受理)

参 考 文 献

- 1) 松浦佑次, 高瀬川平; "塑性と加工" vol. 15, no 157, (1974-2), p 156-165
- 2) 山口喜弘, 野口昌孝, 松下富春, 西原正夫, "塑性と加工" vol. 15, no. 164, (1974-9), p 723-729
- 3) K. Osakada, M. Limb and P. B. Mellor; "Int. J. mech. Sci." vol. 15, (1973) p 291-307
- 4) 工藤英明; 「塑性学」(昭43, 森北出版)