

偏心クラッド棒・線材の引抜き加工・1

Drawing of Eccentric Clad Rods and Wires・1

木 内 学*・徐 瑞 坤*
Manabu KIUCHI and Ray-Quen HSU

1. は じ め に

近年、工業用材料に要求される諸機能の高度化や用途の多様化にともない、機械的・電気的その他の特性が異なる異種の材料を組み合わせたクラッド材と、その製造技術に関する関心が高まりつつある。この問題に関しては、すでに多くの研究がなされており、松浦、小坂田ら^{1),2)}はクラッド材の静水圧押し出しについて、必要な加圧力や被加工材の変形モード、あるいは正常な接合を達成するための加工条件について研究を行い、Avitzurら^{3),4)}は上界法を用いて、押し出し・引抜き時のコア材またはスリーブ材の破断限界等の加工限界を求めている。しかしながら、これらの研究はすべて軸対称のクラッド材を対象としており、非軸対称のクラッド材の加工問題については、これまでほとんど研究されていないのが実状である⁵⁾。

本報では、偏心している単芯、多芯クラッド棒・線材の押し出しまたは引抜き加工について、各加工条件因子が製品の形状・寸法その他の特性に与える影響を解析可能とする手法の提案を行い、それを用いた幾つかの解析事例を示す。

2. 三次元動的可容速度場と仕事率

中実材、中空材の非軸対称押し出し・引抜き加工の解析に適用可能な三次元動的可容速度場は、すでに筆者らに

よって提案されているが^{6),7)}、本研究では、それらの速度場を拡張・複合化して芯材・スリーブ材のダイス内での流れの数学的表示に適用し、偏心クラッド材の押し出しまたは引抜き加工の解析を可能ならしめることを目指している。用いた速度場の一般形を以下に示す。

解析には、図1に示すように円柱座標系 (r, ϕ, y) を用い、ダイス内の各方向の速度成分を V_r, V_ϕ, V_y で表示する。速度場の構成に際しては、以下の仮定を導入した。すなわち、

- (1) 被加工材は剛塑性体であり、ダイス入口・出口のy軸に垂直な断面が剛塑性境界であり、両者とダイス面とに囲まれた領域が素材の塑性変形域である。
- (2) ダイス内のy軸に垂直な断面上で、長手方向の速度成分 V_y は一様である。
- (3) 回転方向の速度成分 V_ϕ は半径方向に線形分布し、 $V_\phi(r, \phi, y) = r \times \omega(\phi, y)$ のように変数分離形の関数表示が可能である。

速度場を導出する際の手続きは省略して結果のみを示すと、外層のスリーブ材と、内層の芯材との動的可容速度場は、それぞれ次式のごとく表される。

1) スリーブ材

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

$$= \frac{V_{os} \int_0^{\phi_{r\omega}} \{RSO^2(\phi, 0) - RSI^2(\phi, 0)\} d\phi}{\int_0^{\phi_{r\omega}} \{RSO^2(\phi, y) - RSI^2(\phi, y)\} d\phi} \quad (1)$$

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

$$= \frac{r}{RSO^2(\phi, y) - RSI^2(\phi, y)} \int_0^\phi \frac{\partial}{\partial y}$$

$$\times \{ [RSI^2(\phi, y) - RSO^2(\phi, y)] \cdot V_y(y) \} d\phi \quad (2)$$

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

$$+ \frac{1}{r} \left\{ \frac{RSO^2(\phi, y)}{2} \times \left[\frac{\partial V_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(\phi, y)}{\partial \phi} \right] \right.$$

$$\left. + RSO(\phi, y) \cdot \omega(\phi, y) \cdot \frac{\partial RSO(\phi, y)}{\partial \phi} \right\}$$

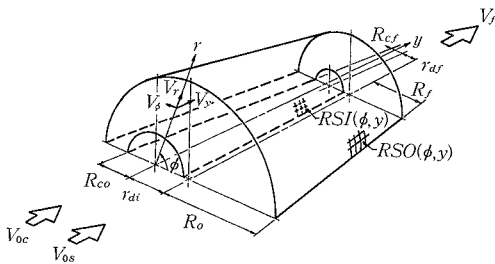


図1 一般化解析モデル

*東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

$$+ RSO(\phi, y) \cdot V_y(y) \cdot \frac{\partial RSO(\phi, y)}{\partial y} \} \quad (3)$$

2) 芯材

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

$$= \frac{V_{oc} \int_0^{\phi_{r(o)}} RSI^2(\phi, 0) d\phi}{\int_0^{\phi_{r(y)}} RSI^2(\phi, y) d\phi} \quad (4)$$

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

$$= \frac{-r}{RSI^2(\phi, y)} \int_0^\phi \frac{\partial}{\partial y} \{ V_y(y) RSI^2(\phi, y) \} d\phi \quad (5)$$

$$V_r(r, \phi, y) = -\frac{r}{2} \left\{ \frac{\partial V_y(y)}{\partial y} + \frac{\partial \omega(\phi, y)}{\partial \phi} \right\} \quad (6)$$

クラッド材の押し・引抜き加工は、大別して、(1)加工前に芯材とスリーブ材が接合されている場合、(2)両者が接合されていない場合、とに分けられ、解析手法や手続きが若干異なる。本研究では、当面、芯材とスリーブ材が加工前に接合されていない場合を対象として解析を進める。それゆえ、ダイスの入口において、スリーブ材と芯材はそれぞれ V_{os} 、 V_{oc} で表される異なる流入速度を持つことが許される。上式で、 $\phi_{r(o)}$ および $\phi_{r(y)}$ は ϕ 方向の解析範囲である。 $RSO(\phi, y)$ はダイス面形状を、 $RSI(\phi, y)$ は両材料の境界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。

$$\dot{W}_i = \int_{V_s} \sigma_{os} \cdot \dot{\epsilon}_{eq} dV + \int_{V_c} \sigma_{oc} \cdot \dot{\epsilon}_{eq} dV \quad (7)$$

$$\dot{W}_s = \int_{\Gamma_s} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{os} \cdot \Delta V_{\Gamma_s} dS$$

$$+ \int_{\Gamma_c} \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{oc} \cdot \Delta V_{\Gamma_c} dS$$

$$+ \int_{\Gamma_{sc}} \frac{m_s}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{min} \cdot \Delta V_{\Gamma_{sc}} dS \quad (8)$$

$$\dot{W}_f = \int_{\Gamma_f} \frac{m}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_{os} \cdot \Delta V_{\Gamma_f} dA \quad (9)$$

ここで、 σ_{os} 、 σ_{oc} はスリーブ材と芯材の変形抵抗、 $\dot{\epsilon}_{eq}$ は相当ひずみ速度、 m は摩擦定数である。 σ_{min} は、 σ_{os} と σ_{oc} のうち小さいほうの値とする。上述の速度場の特徴として、形状関数 $RSO(\phi, y)$ 、 $RSI(\phi, y)$ 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ことが挙げられる。

3. 解析事例のためのモデル

図2はケーススタディのための解析モデルの概要を示す。初期(入口)偏心 r_{di} を有する芯材は、 V_{oc} の速度でダイスに流入し、出口において、 r_{df} だけの偏心でダイスから流出する。芯材とスリーブ材が組み合わされた複合

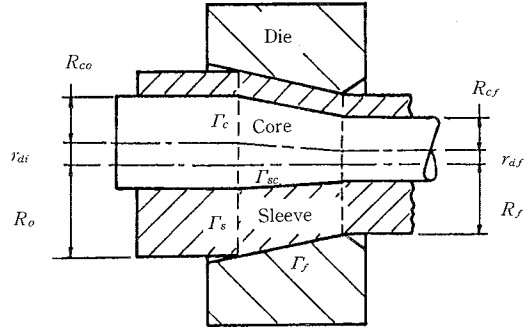


図2 解析モデル

レッドの、理想的な引抜きまたは押し加工の場合として、スリーブ材と芯材とが同一の加工率(同一の減面率)を受ける場合には、次式に示される関係が成立すると考えられる。

$$(R_{cf}/R_f)^2 = (R_{co}/R_o)^2 \quad (10)$$

$$r_{df}/R_f = r_{di}/R_o \quad (11)$$

ここで、 R_{co} 、 R_{cf} はそれぞれ素材と製品の芯材半径、 r_{di} と r_{df} は素材と製品の複合材の中心から見た芯材中心までの偏心量、 R_o 、 R_f はダイスの入口と出口半径である。実際には、芯材とスリーブ材の変形抵抗が異なるために、加工後の製品における芯材の断面積比や偏心率は素材のそれと一致するとは限らず、したがって上式は必ずしも成立しない。そのような場合の不均一変形を表すために、パラメータ ϵ 、 δ を導入し、次式を定義する。

$$(R_{cf}/R_f)^2 = (1 + \epsilon) (R_{co}/R_o)^2 \quad (12)$$

$$r_{df}/R_f = (1 + \delta) r_{di}/R_o \quad (13)$$

パラメータ ϵ 、 δ がともに零の時、(12)、(13)式は(10)、(11)式になり、クラッド材は芯材・スリーブ材共に一様な加工率を受ける場合を表す。 ϵ 、 δ が正または負の場合は、芯材の減面率の増または減、あるいは、芯材の偏心率の増または減に対応する。実際の計算に際しては、以下の仮定を用いた。

- (1) 塑性変形域内で y 軸と垂直な断面上では、芯材断面は円形である。
- (2) 芯材半径の長手方向にみた変化は線形である。
- (3) 両材料はダイス内で常に接触している。

これらの仮定により、 $RSO(\phi, y)$ と $RSI(\phi, y)$ の形状関数が幾何学的に決定される。加工に要する全仕事率 J^* は、芯材の出口での半径、芯材の出口での偏心量等を準独立変数として最小化され、これらを通して各加工因子が芯材の偏心率や断面積比に与える影響が解析可能になる。

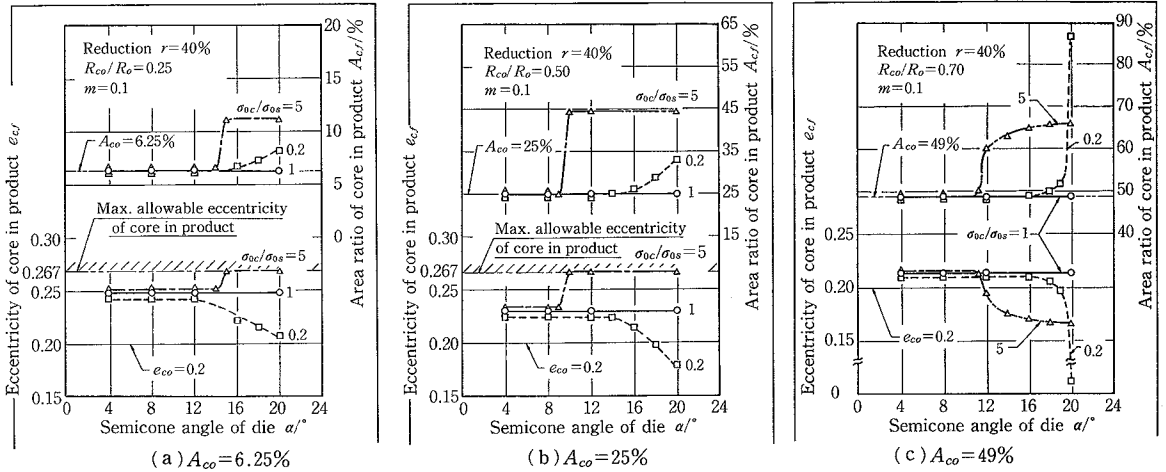


図3 ダイス半角および断面積比の影響

4. 計算結果および考察

以下、芯材・スリーブ材の変形抵抗比やダイスの半角、芯材の初期断面積比、偏心率、摩擦、リダクション、芯材の本数等の因子が、製品の芯材の断面積比や偏心率に与える影響について調べた結果を示す。なお素材と製品の芯材の断面積比を $A_{co}(=R_{co}^2/R_o^2)$ 、 $A_{cf}(=R_{cf}^2/R_p^2)$ とし、同じく偏心率を $e_{co}(=r_{di}/R_o)$ 、 $e_{cf}(=r_{df}/R_p)$ とする。

- (1) 図3の(a), (b), (c)は、 A_{co} がそれぞれ6.25%、25%と49%の場合について芯材とスリーブ材の変形抵抗比 (σ_{oc}/σ_{os}) およびダイス半角(α)が製品の A_{cf} 、 e_{cf} に与える影響を示す。図より、一般に、ダイス半角が小さいほど、スリーブ材と芯材は均一な加工率を得やすくなる傾向があることがわかる。また、内硬外軟材 ($\sigma_{oc} > \sigma_{os}$) の場合、ダイス半角の増加に伴って、変形抵抗の高い芯材はまったく変形しなくなる臨界ダイス角が存在することがわかる。また、芯材の初期断面積比 A_{co} が小さいほど、上述の臨界角は大きく、 A_{co} の増加につれて、臨界角は一度減少し、極小値を持つことがわかる (図4、5参照)。
- (2) 図6は変形抵抗比0.2, 0.5および1.0の場合の摩擦定数 m が製品の A_{cf} および e_{cf} に与える影響を示す。図に示す結果より、クラッド材の引抜き加工においては、 m が小さいほど、芯材・スリーブ材は均一な減面率を得やすくなることがわかる。特に、スリーブ材の変形抵抗が高いほど、摩擦の影響を大きく受ける。
- (3) 図7はリダクションが製品の A_{cf} 、 e_{cf} に与える影響を示す。芯材の変形抵抗が高い ($\sigma_{oc}/\sigma_{os} \geq 5$) 場

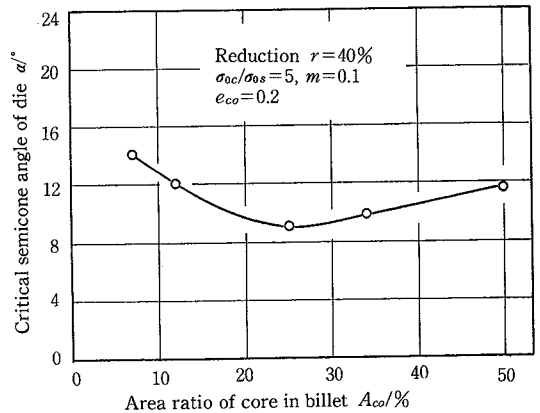


図4 臨界ダイス半角

合、芯材はほとんど加工を受けず、製品内部に欠陥を生ずる可能性がある。逆にスリーブ材の変形抵抗が高い場合には、芯材・スリーブ材の減面率は同一となるが、リダクションの増加に伴って、芯材の偏心率が大きくなる傾向がある。

- (4) 図8は、横軸に素材の芯材の偏心率 e_{co} 、縦軸に製品と素材の偏心率の変化 $\Delta e = e_{cf} - e_{co}$ 、および製品の芯材の断面積比 A_{cf} を示す。計算範囲では、芯材の断面積比 A_{cf} には極端な変化が見られないが、初期偏心率 e_{co} を増加すると、製品の偏心率 e_{cf} は増加し、ある極値に達してから減少する傾向を示す。
- (5) 図9は同じ断面を有する芯材の、本数が増加する際の、製品の A_{cf} および e_{cf} の変化を示す。全体的に、芯材の本数が増すと、芯材とスリーブ材の変形は均一化され、変形が安定化してくることがわかる。

研究速報

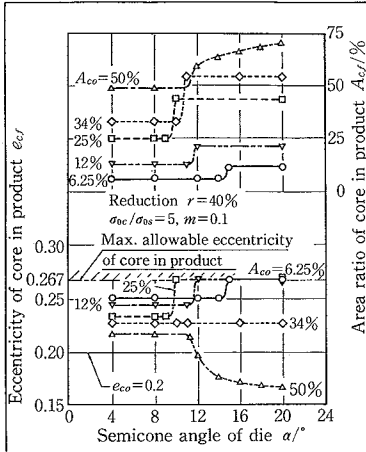


図5 断面積比の影響

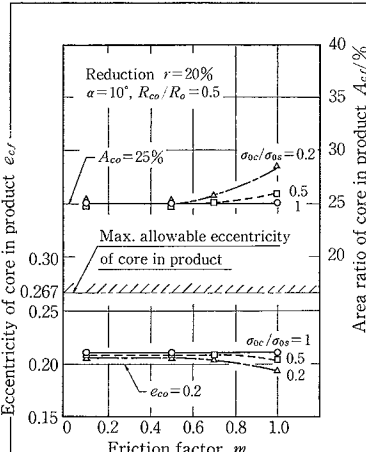


図6 まさつの影響

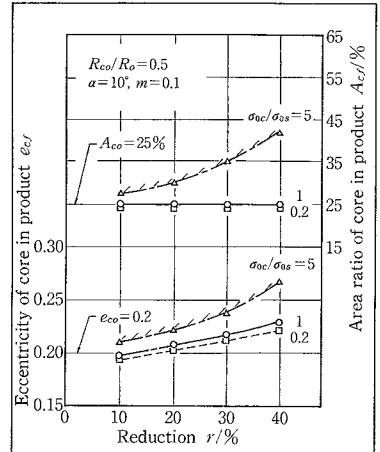


図7 リダクションの影響

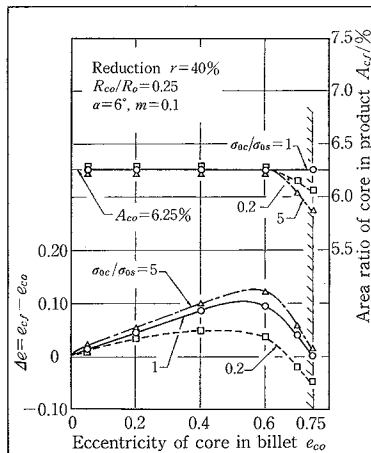


図8 偏心率 e_{co} の影響

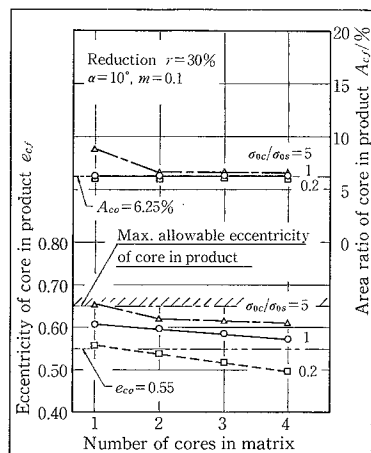


図9 芯材の本数の影響

5. ま と め

初期接合が無く、初期偏心を有するクラッド棒・線材の引抜き加工について、芯材の偏心率と断面積比の変化に与える加工条件の影響に関して検討し、次の結果を得た。

- (1) 芯材の変形抵抗がスリーブ材の変形抵抗より高い場合、均一な加工率が得られなくなる臨界ダイス角が存在することを見出した。
- (2) 芯材の本数が増すと、健全な加工を達成しうる加工条件の範囲が広がることがわかった。
- (3) 一般的に、ダイス半角、リダクション、摩擦抵抗を小さくすることが、芯材・スリーブ材の均一な加工

率を実現するために好ましい、という経験則を理論的に明らかにした。
(1988年5月16日受理)

参 考 文 献

- 1) 松浦, 高瀬: 塑性と加工, 15-157(1974-2), 156
- 2) K. Osakada, M. Limb & P.B. Mellor: Int. J. Mech. Sci., Vol. 15(1973), 291
- 3) B. Avitzur, et al: Trans. ASME J. Eng. Ind., Vol. 104(1982), 293
- 4) B. Avitzur, et al: Trans. ASME J. Eng. Ind., Vol. 108(1986), 133
- 5) 木内, 伊藤: 生産研究, 31-12(1979-12), 763
- 6) M. Kiuchi, H. Kishi & M. Ishikawa: Proc. 22nd MTDR Conf., 1981, 523
- 7) 木内, 岸: 31回塑加連講論, 1980-11, 216