

非軸対称クラッド棒・線材の引抜き加工(3)

——多芯クラッド材の引抜き加工——

Drawing of Non-Axisymmetric Clad Rods and Wires · 3

——Drawing of Multi-core Clad Rods——

木 内 学*・徐 瑞 坤*

Manabu KIUCHI and Ray-Quen HSU

1. はじめに

異なる特性を持つ異種の材料を組み合わせた複合クラッド棒・線材は、製造技術の進歩とともに、その応用領域も広がりつつある。特に、最近、新しい高温超電導材料が次々に発見され、このような超電導材を芯線とし、他の安定材をスリーブ材とする複合材の線材化技術が注目されつつある。従来用いられている超電導棒・線材も構造的には多芯クラッド材であり、最終製品である線材になるまでの過程で、多くの押出しまたは引抜き加工を必要としている。しかし、このような多芯クラッド材の加工に際しては、構成材料の機械性質が異なるために、芯材の破断やスリーブ材表面のしわ発生などが起こりやすく、安定した押出し・引抜きを行うことが困難である場合が多い。

筆者らは、上述の非軸対称クラッド材の押出し・引抜き加工に関連する諸問題を理論的に解明することを目標とし、一連の解析的研究を行ってきた。前報¹⁾²⁾で、非軸対称クラッド棒・線材の押出し・引抜き加工を一般的に解析可能な手法を提案し、各加工条件因子が単芯偏心クラッド材の加工限界および製品の形状・寸法の変化に与える影響について報告した。本報では、この解析モデルをさらに拡張し改良して、各加工条件因子が多芯クラッド材の押出し・引抜き加工後の製品形状や加工限界に与える影響について、系統的に検討した結果を報告する。

2. 解析モデルおよび三次元的可容速度場

非軸対称クラッド棒・線材の押出し・引抜き加工の解析に適用可能な手法、モデルの基本的な考え方およびその三次元的可容速度場の導出に関する詳細な手順については前報¹⁾²⁾に説明したので、ここでは省略する。以下、この解析モデルを本報の研究対象としている多芯クラッド棒・線材の押出し・引抜き加工へ適用する際に、新たに加わる前提条件や制約について述べる。

まず、図1に示すように、本研究で扱うクラッド棒・線材は、複数の芯材または芯線が周方向に等角分布しているものとする。芯材の断面形状や本数には特に制約がないが、解析事例としては、スリーブ材・芯材ともに円形断面を持つ多芯クラッド材を考える。図2は4芯クラッド材のダイス軸(長手)方向と垂直な断面を示す。図に、ハッチングで示した領域は対称域であり、実際の解析範囲となっている。ダイス内の被加工材の流動を表す速度場の算出の前提条件となるスリーブ材の外形状関数 $RSO(\phi, y)$ 、および芯材・スリーブ材の界面形状関数 $RSI(\phi, y)$ の考え方をそれぞれ図2に示す。多芯クラッド材の場合、図2に示すような特異点Bが存在するために、図に2点破線で示すような内部せん断面 Γ_1 を想定する。ただし、速度場の構成に際しては、この面上で回転(ϕ)方向の速度の連続性が保たなければならない

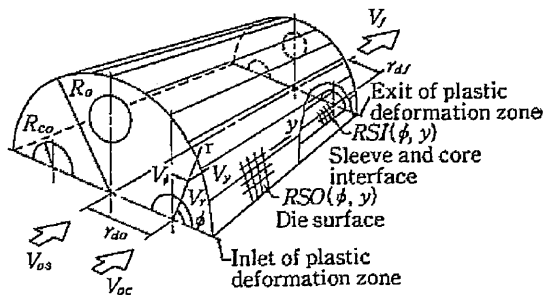


図1 多芯クラッド材の基本解析モデル

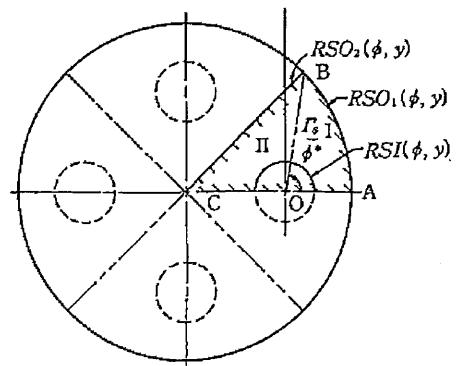


図2 4芯クラッド棒・線材の断面図

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

い。ダイス軸(長手)方向に垂直な断面上で、ダイス軸方向の速度分布 V_r が、スリーブ材、芯材それぞれにおいて一様であるので、想定した内部せん断面 Γ_s 上での相対迂り ΔV_{Γ_s} は半径方向の相対迂り速度に等しく、次式で示される。

$$\Delta V_{\Gamma_s} = (\Delta V_r)_{\Gamma_s} = |V_r(r, \phi^* + 0, y) - V_r(r, \phi^* - 0, y)| \quad (1)$$

本研究では、図1に示すともに円形断面を持つ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行う。通常、芯材とスリーブ料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ない。そのような場合の不均一変形を表す因子 ε, δ を、式(2)、(3)により、導入する。これらの因子は、芯材とスリーブ材との界面の形状寸法を規定する因子でもある。

$$(R_{cf}/R_p)^2 = (1 + \varepsilon)(R_{co}/R_o)^2 \quad (2)$$

$$r_{df}/R_f = (1 + \delta)r_{do}/R_o \quad (3)$$

実際の解析に際しては、上述の因子を可変パラメータとして、RSI(ϕ, y)を仮定および修正しつつ、全変形仕事率の最小化を図り、その最小値を与える可変パラメータの値および界面の形状RSI(ϕ, y)を最適な近似解として得る。このようにして、製品の形状寸法、特に、芯材の寸法と位置を予測することができる。一方、本研究においては、芯材、スリーブ材の加工限界の判定方法として、前報²⁾で示したように、芯材、スリーブ材のダイス出口における平均引抜き応力を個別に計算し、その結果とそれらの材料固有の変形抵抗を比較することによって、クラッド材が安定的に引抜き可能か否かを判定することとした。ダイス出口での芯材あるいはスリーブ材に

加わる引抜き応力の計算式は前報²⁾を参照されたい。

このような手順を経て、多芯クラッド材の押し出し・引抜き加工に要する各仕事率が計算でき、製品の形状、寸法の変化または加工限界が予測可能になる。なお、各仕事率の計算式についても詳細は前報²⁾を参照されたい。

3. 解析結果および検討

本報では、表1に示すような加工条件範囲で、素材の芯材の相対半径(R_{co}/R_o)、素材の芯材の初期偏心率(r_{do}/R_o)、ダイス半角(α)、芯材の本数などの因子が、製品の芯材の相対半径および偏心率、加工限界に及ぼす影響について調べた結果を示す。

3.1 各加工因子が製品形状に及ぼす影響

図3~6では、横軸には芯材とスリーブ材の変形抵抗比、縦軸には製品の芯材の相対半径または製品の芯材の偏心率を表す。図中、ハッチングで示す限界は芯材の減面率が0になる限界あるいは芯材が全く曲がらず真直ぐのままダイスを通過する限界を表示する。なお、各記号で代表する寸法は図3(a)に示す。

(1) 図3(a)、(b)に4芯クラッド材がリダクション20%、ダイス半角8°、摩擦定数0.1、芯材とスリーブ材の

表1 解析条件一覧表

Number of cores in rod	Relative core/sleeve strength	Semi-cone angle of die (deg.)	Friction factor at die surface	Shear factor at core/sleeve interface	Initial core eccentricity	Relative core to sleeve radius	Reduction in area
N	σ_{oc}/σ_{os}	α	m	m_1	r_{do}/R_o	R_{co}/R_o	r %
4	5/1.3/1	8	0.1	1.0	0.6	0.10	20%
	2/1.1/1				0.30	30%	
4	1/2, 1/3	8	0.1	1.0	0.5	0.20	40%
					0.6		
4	1/2, 1/3	8, 12, 14	0.1	1.0	0.6	0.20	40%
8		0.6			0.20		

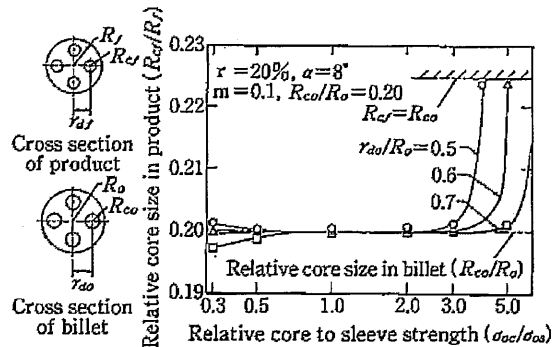


図3(a) 素材の芯材の偏心率(r_{do}/R_o)が製品の芯材の相対半径(R_{cf}/R_f)に及ぼす影響

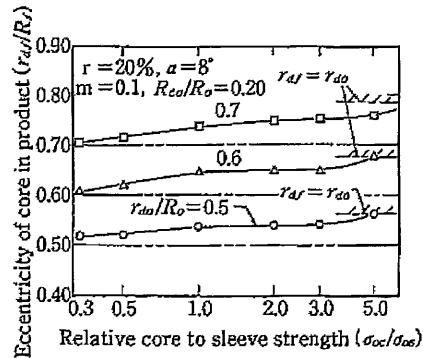


図3(b) 素材の芯材の偏心率(r_{do}/R_o)が製品の芯材の偏心率(r_{df}/R_f)に及ぼす影響

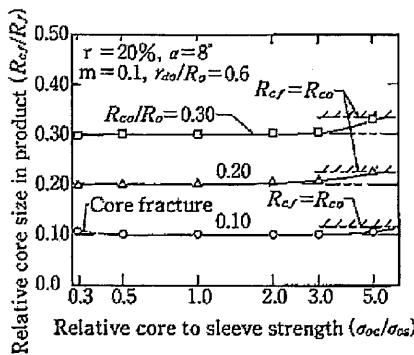


図 4 (a) 素材の芯材の相対半径 (R_{co}/R_o) が製品の芯材の相対半径 (R_{cf}/R_f) に及ぼす影響

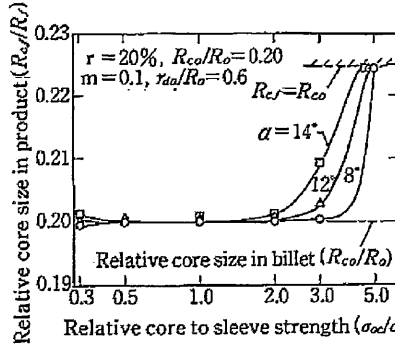


図 5 (a) ダイス半角 (α) が製品の芯材の相対半径 (R_{cf}/R_f) に及ぼす影響

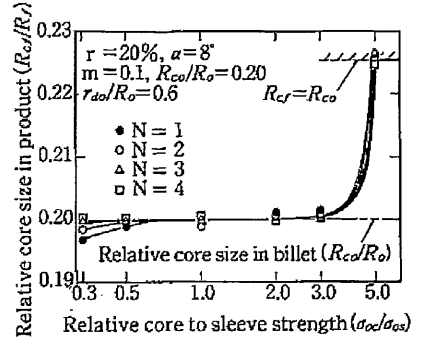


図 6 (a) 芯材本数 (N) が製品の芯材の相対半径 (R_{cf}/R_f) に及ぼす影響

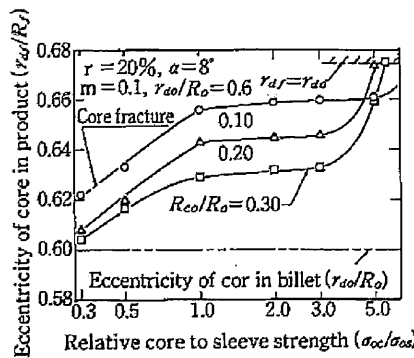


図 4 (b) 素材の芯材の相対半径 (R_{co}/R_o) が製品の芯材の偏心率 (γ_{cf}/R_f) に及ぼす影響

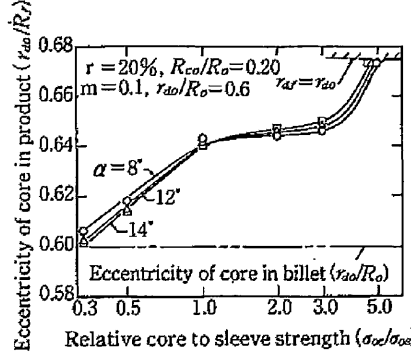


図 5 (b) ダイス半角 (α) が製品の芯材の偏心率 (γ_{cf}/R_f) に及ぼす影響

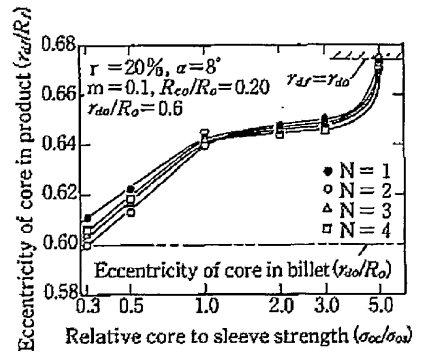


図 6 (b) 芯材本数 (N) が製品の芯材の偏心率 (γ_{cf}/R_f) に及ぼす影響

相対半径0.2のもとで、素材の芯材の偏心率を変化させた場合の計算結果を示す。図より、芯材とスリーブ材の変形抵抗比 (σ_{oc}/σ_{os}) が1.0に近いほど、芯材とスリーブ材が同一の減面率を得やすい、すなわち、製品の芯材の相対半径が素材のそれと同一になりやすいことがわかる。また、内硬外軟材 ($\sigma_{oc} > \sigma_{os}$) では、芯材が軸心に近いほうが、芯材、スリーブ材の不均一変形が起こりやすく、さらに、 σ_{oc}/σ_{os} が約4.0より大きいところで、芯材が減面なしで入口から出口まで真直ぐにダイスを通過するような現象が起こる。逆の場合、すなわち、内軟外硬材の場合、 σ_{oc}/σ_{os} が約0.7より小さい範囲では、製品の芯材の相対半径と素材のそれとが同一とならないが、内硬外軟材と比べて、その相違はわずかである。

一方、 σ_{oc}/σ_{os} が約1.0~3.0の範囲では、製品の芯材の偏心率が安定しているが、 σ_{oc}/σ_{os} がそれより大きい場合では、製品の芯材の偏心率が増加し、逆の場合、製品の芯材の偏心率が減少する傾向がある。

(2) 素材の芯材の相対半径が製品の芯材の相対半径ならびに偏心率に与える影響をまとめて図4(a), (b)に

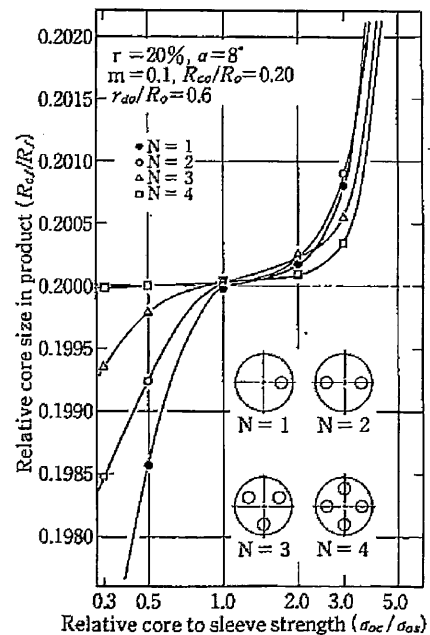


図 6 (c) (a) の拡大図

研究速報

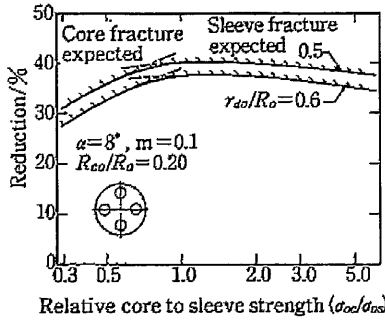


図7 素材の芯材の偏心率(r_{co}/R_o)が多芯クラッド材の加工限界に及ぼす影響

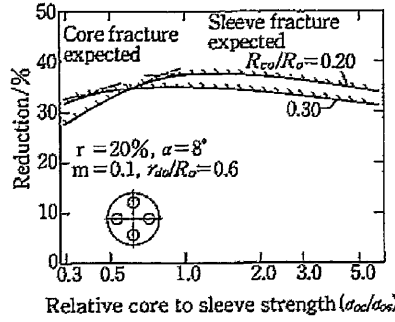


図8 素材の芯材の相対半径(R_{co}/R_o)が多芯クラッド材の加工限界に及ぼす影響

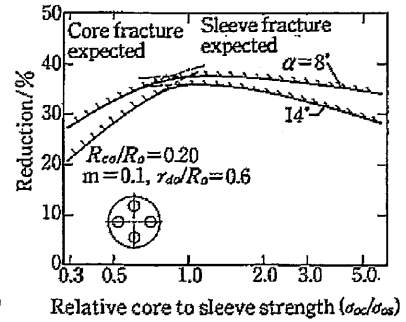


図9 ダイス半角(α)が多芯クラッド材の加工限界に及ぼす影響

示す。図に示す加工条件で、芯材とスリーブ材の変形抵抗比が0.5~2.5の範囲において、芯材とスリーブ材が安定かつ同一の減面率を得やすいこと、変形抵抗比が約3.0より大きい場合、硬い芯材が変形しにくくなること、などがわかる。

製品の芯材の偏心率の変化についてみると、前節と同様に、 σ_{oc}/σ_{os} が1.0~3.0の範囲においては、偏心率の変化はわずかであるが、変形抵抗比がそれより大きい場合、偏心率が増加し、逆の場合、減小する傾向がある。ただし、 R_{co}/R_o が0.2~0.25にかけて、前報でも指摘したように、 σ_{oc}/σ_{os} が大きい範囲で芯材が変形しにくくなる傾向が助長される R_{co}/R_o の範囲が存在し、 $R_{co}/R_o=0.1, 0.3$ よりも均一な変形が得られにくくなることわかる。

(3) ダイス半角が R_{co}/R_o および r_{co}/R_o に及ぼす影響について、図5(a), (b)に示す。偏心単芯クラッド材と同様に、ダイス半角が小さいほど、芯材とスリーブ材とが均一な変形をうける範囲が広いことがわかる。

(4) 周方向に等角分布している芯材の本数が製品の芯材の相対半径および偏心率に及ぼす影響を図6(a), (b), (c)に示す。図6(c)は図6(a)の拡大図である。全体的に、クラッド材を構成する芯材の本数が変わっても、 R_{co}/R_o や r_{co}/R_o に生じる変化は小さく、図6(c)に示すように、芯材の本数が多いほど、芯材とスリーブ材の変形が均一になりやすい面もある。

3.2 各加工因子が加工限界に及ぼす影響

図7~10に4芯クラッド材の芯材の初期偏心率、初期相対半径、ダイス半角および芯材本数が加工限界に与える影響についてまとめた結果を示す。これらの結果より、以下のことがわかる。

(1) 素材の芯材の偏心率が小さいほど、ダイス半角が小さいほど、あるいは芯材の本数が少ないほうが、健全な加工が可能な σ_{oc}/σ_{os} およびリダクションの範囲が広い。

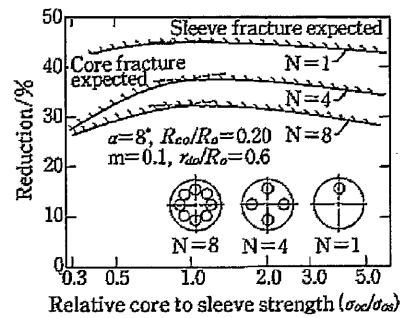


図10 芯材本数(N)が多芯クラッド材の加工限界に及ぼす影響

(2) 内硬外軟材の場合、素材の芯材の相対半径が小さいほうが破断の発生がなく、安定した加工ができる条件の範囲は広いが、逆の内軟外硬材の場合には、芯材の初期相対半径が小さいほうが破断が発生しやすい。ただし、内軟外硬材であっても素材の芯材の相対半径が0.3より大きくなると、次第に加工が難しくなってくる。

(3) 図に示す加工条件のもとで、 σ_{oc}/σ_{os} がほぼ1.0より大きい範囲では、スリーブ材のほうが破断しやすい、一方、 σ_{oc}/σ_{os} がほぼ1.0より小さい範囲では、芯材のほうが破断しやすい傾向がある。

4. まとめ

多芯クラッド棒・線材の押出し・引抜き加工に関し解析手法を提案し、各加工条件因子が製品の形状、寸法ならびに加工可能限界に及ぼす影響について系統的な検討を行い、多芯クラッド材の線材化に関する有効な情報を提供した。今後も非軸対称クラッド材の加工について種々の角度から研究を進め、この分野の理論・技術の体系化を推進する予定である。(1988年10月12日受理)

参考文献

- 1) 木内, 徐: 生産研究, 40-9(1988-9), 425
- 2) 木内, 徐: 生産研究, 40-10(1988-10), 468