

非軸対称クラッド棒・線材の引抜き加工・4

——異形クラッド材の引抜き加工——

Drawing of Non-Axisymmetric Clad Rods and Wires・4

——Drawing of Square, Hexagonal and Other Non-Symmetric Clad Rods——

木 内 学*・徐 瑞 坤*

Manabu KIUCHI and Ray-Quen HSU

1. はじめに

鉄鋼をはじめとする各種材料の異形（正方形，矩形，六角形など）棒・線材は工業的に広く使われている。単一材の場合と同様に，クラッド材の場合もさまざまな異形断面を持つ棒・線材を要求され，製造技術の一層の発展が強く望まれており，各種製品に対する需要も増大する傾向にある。また，最終製品ではなく，製造過程で異形クラッド材の加工技術が求められる場合もあり，例えば，現在実用化されているNbTi系等の金属基超電導材料も，線材化の過程で，異形（六角形）断面を持つ棒・線に加工され，最終製品としての多芯極細線化までには，異形クラッド材の押し出し・引抜き加工を繰り返す必要がある。

異形材の押し出し・引抜き加工においては，ダイス内における材料の塑性流動は長手方向軸まわりの回転速度成分を有し，その挙動を的確に把握することは容易ではない。そのため，単一材の異形棒・線材の押し出し・引抜き加工に関してさえも，解析的な研究¹⁾が非常に少ないのが実情である。異形クラッド材の場合には，断面構成の複雑さにより速度場の構成が更に困難となることや，構成材料の機械的特性が異なるために，加工に際して，芯材・スリーブ材の破断や線材表面のしわ発生などの欠陥

が生じやすいことなど，被加工材の変形特性に関する数多くの問題が残されている。

筆者らは，既報²⁻⁴⁾で提案した非軸対称クラッド材の押し出し・引抜き加工に適用可能な解析モデルを更に改良し，拡張を加え，異形多芯クラッド材の押し出し・引抜き加工の解析を可能にした。本報では，丸棒から異形多芯クラッド材（以下，単に異形クラッド材と呼ぶ）への押し出し・引抜き加工を対象とし，各加工条件因子が製品の形状寸法や加工限界に与える影響について検討した結果を報告する。

2. 解析モデルおよび三次元動的可容速度場

本研究で用いている異形クラッド棒・線材の押し出し・引抜き加工の解析手法やモデルの基本的な考え方，および三次元動的可容速度場の導出手順については前報²⁾にて説明したので，ここでは省略する。以下，丸棒から異形（正方形，矩形，六角形）クラッド材への押し出し・引抜き加工に適用する際に，新たに加わる条件や制約について説明する。

図1に，代表的な事例として，六角断面を持つ6芯クラッド材の押し出し・引抜き加工の概略を示す。解析モデルの構成に際しては以下の近似を行う。まず，図に示すように，素材および製品中の芯材の断面形状は円形を維持するものとする。また，ダイスの形状については，い

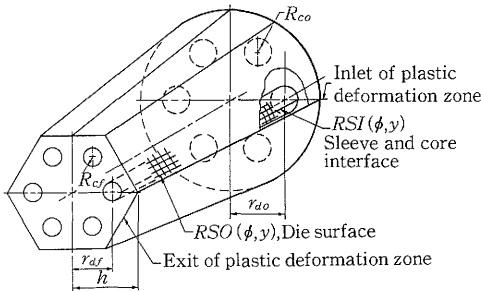


図1 6芯六角クラッド棒・線材の引抜き

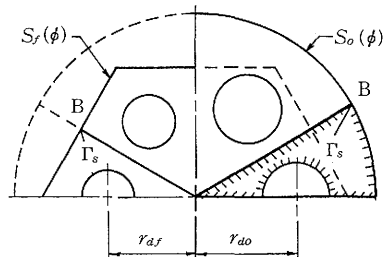


図2 解析対象域

*東京大学生産技術研究所 第2部

研 究 速 報

わゆる直線型のダイスを用いることとする。すなわち、円柱座標系で、ダイス入口断面を $r=S_0(\phi)$ 、出口断面を $r=S_f(\phi)$ 、ダイス長さを W で表す場合、ダイス面形状関数 $RSO(\phi, y)$ は、次式で示される。

$$RSO(\phi, y) = S_0(\phi) + \frac{[S_f(\phi) - S_0(\phi)]}{W} \cdot y \quad (1)$$

材料がダイスコーナ部へ充填程度する挙動の予測も解析可能であるが、本報では、ダイスコーナ部には常に材料が充填するものと考えておく。図2は六角クラッド材のダイス軸に垂直な断面を示す。太い実線で囲まれた範囲は解析対象領域を表す。ハッチングで示すスリーブ材には特異点Bが存在するために、座標中心軸と特異点Bを結ぶ面 Γ_s を内部せん断面として考え、速度場の構成に際して考慮する。 Γ_s 面上では回転方向の速度の連続性が保たれなくてはならない。ダイス軸に垂直な断面では芯材、スリーブ材がそれぞれ別々に異なる軸方向の速度成分 V_r を持っているが、スリーブ材中に定義された内部せん断面 Γ_s 上での相対すべり ΔV_{Γ_s} は、軸方向の相対すべりがないので、半径方向の相対すべり速度に等しくなる。すなわち、 $\Delta V_{\Gamma_s} = (\Delta V_r)_{\Gamma_s}$ 。

一方、異種材料を組み合わせたクラッド材は、一般に、芯材、スリーブ材の変形抵抗などの機械的性質が異なるために、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を規定する因子でもある。

$$\pi \cdot R_c^2 / S_p = (1 + \epsilon) (R_{co} / R_o)^2 \quad (2)$$

$$r_{af} / h = (1 + \delta) r_{ao} / R_o \quad (3)$$

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、芯材、スリーブ材との境界面をあらわす形状関数 $RSI(\phi, y)$ を仮定あるいは修正しつつ全仕事率の最小化を図り、その最小値を与えるパラメータの値および界面の形状 $RSI(\phi, y)$ を最適な近似解として得る。このような手順を通して、製品の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、スリーブ材に加わる引抜き応力の詳しい計算式は前報³⁾を参照されたい。なお、各仕事率の計算式についても詳細は前報³⁾を参照されたい。

3. 解析結果および検討

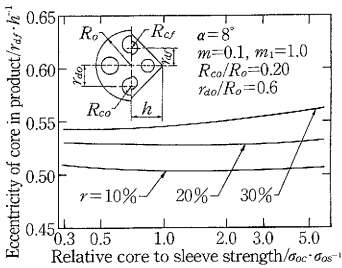
3.1 各加工条件が製品形状に及ぼす影響

図3～6の各図では、横軸には芯材、スリーブ材の変形抵抗比 $(\sigma_{oc}/\sigma_{os})$ 、以下、単に変形抵抗比と呼ぶ)、縦軸には製品の芯材の断面積比 (S_c/S_p) または製品の芯材の偏心率 (r_{af}/h) を表す。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まった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。各記号で代表する寸法は図中に示す。

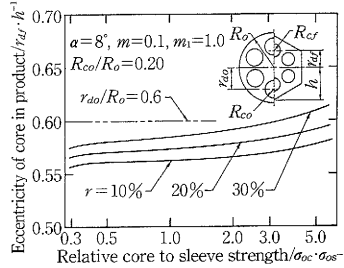
(1) 図3は4芯一正方形、図4は6芯一六角形クラッド棒・線を、ダイス半角 8° 、芯材、スリーブ材の半径比0.20、初期芯材の偏心率 (r_{ao}/R_o) 0.6の下で引抜く場合について、リダクションを変化させた場合の計算結果を示す。図に示すように、正方クラッド材・六角クラッド材とも変形抵抗比が約2.0以下の範囲で、素材と製品の芯材の断面積比がほぼ同一となり、すなわち、芯材、スリーブ材が均一な加工を得やすいことがわかる。変形抵抗比がそれより大きくなると、製品の芯材の断面積比が素材のそれよりも大きくなり、芯材が次第に変形しにくくなる傾向になることがわかる。特に、リダクションが小さい場合(10%)、 σ_{oc}/σ_{os} が5.0以上では、芯材が変形しなくなる限界が存在することがわかる。正方クラッド材の場合は、図3(b)に示すように、変形抵抗比が大きいほど、製品の芯材の偏心率が大きくなり、変形抵抗比が1.0に近づくにつれて、製品の芯材の偏心率が小さくなるが、変形抵抗比が更に減少すると、偏心率がやや増加する傾向がみられる。一方、六角クラッド材の場合は、図4(b)に示すように、変形抵抗比が減少するとともに、偏心率も減少することがわかる。

(2) 図5は芯材の初期偏心率を変えた場合の六角クラッド材の製品の芯材の断面積比(図5(a))および偏心率の変化(図5(b))を示す。変形抵抗比が2.0までの範囲では、芯材、スリーブ材がほぼ同一の減面率を受け、加工前後の芯材の断面積比にあまり大きな変化がみられない。変形抵抗比がそれより大きい場合、徐々に芯材が変形しにくくなり、特に、初期偏心率が小さいほど、この傾向が強い。製品の芯材の偏心率は、変形抵抗比の増加につれて、単調に増大する傾向があることがわかる。

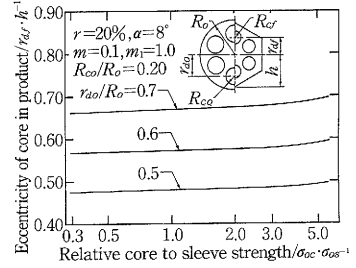
(3) 図6には、ダイス面および芯材とスリーブ材との界面における摩擦が製品の芯材の寸法に及ぼす影響について示す。ここでは、ダイス面での摩擦定数 (m) を0.1、0.3、両材料界面での摩擦定数 (m_i) を1.0、0.5と変化させて、製品の芯材の断面積比および偏心率を求めている。図6(a)に示す結果より、変形抵抗比が約2.0より小さい範囲では、摩擦条件を変えても素材、製品の芯材



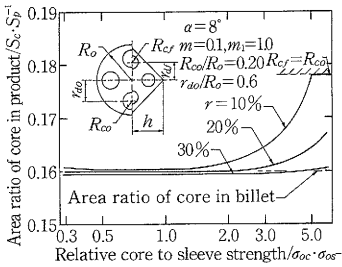
(b)



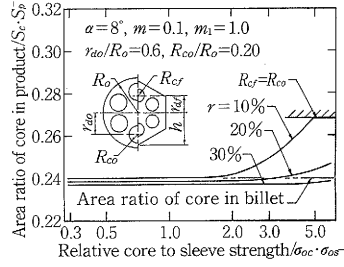
(b)



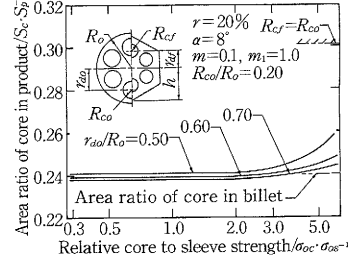
(b)



(a)



(a)

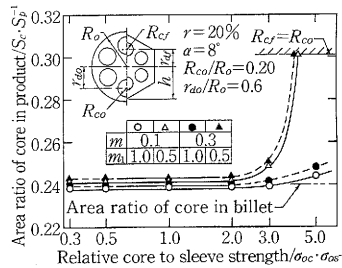


(a)

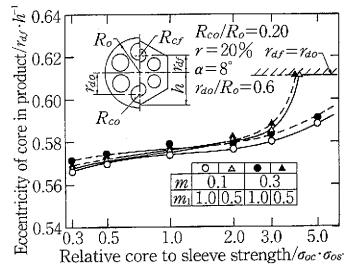
図3 リダクションによる影響 (正方クラッド材)

図4 リダクションによる影響 (六角クラッド材)

図5 芯材の初期偏心率が六角クラッド棒・線材の製品寸法に及ぼす影響



(a)



(b)

図6 摩擦条件が六角クラッド棒・線材の製品寸法に及ぼす影響

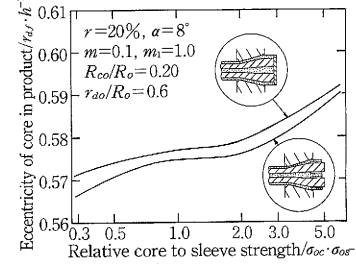


図7 芯材とスリーブ材の初期接合条件が製品の芯材の偏心率に及ぼす影響

の断面積比がほぼ同一になり、芯材、スリーブ材が均一な減面率を得る安定した加工ができることがわかる。変形抵抗比がそれ以上になると、硬い芯材が変形しなくなり、製品の芯材の断面積比も急激に大きくなるのがわかる。特に、両材料界面での摩擦が小さいほど、芯材、スリーブ材の不均一変形が促進される傾向がある。変形抵抗比が4.0の近辺に、芯材がまったく変形しなくなり、まっすぐのままダイスから出る限界が存在することがわかる。また、ダイス面での摩擦が小さいほうが芯材およびスリーブ材の均一な変形を促進するうえで、望ましいことなどがわかる。なお、図に破線で示す範囲は、スリーブ材における平均引抜き応力が材料の変形抵抗よりも大きく、正常な引抜き加工ができなくなることを意味する。

(4) 上述の解析結果は、主に加工前に芯材、スリーブ材が接合されていない場合を対象として行ったが、加工前に芯材、スリーブ材が既に接合されている場合については、図7に示す。この場合、ダイス入口、出口において、芯材、スリーブ材が均一な流入、流出速度を持たなければならない。したがって、素材と製品における芯材の断面積比は必然的に同一となり、偏心率だけが変化可能になる。図7に示す加工条件で、芯材、スリーブ材の初期接合がある場合と無い場合とを比較すると、初期接合がある場合のほうが製品の芯材の偏心率がやや大きい。変形抵抗の変化に対する製品の芯材の偏心率の変化は、両者とも同様な傾向を持つことがわかる。

研究速報

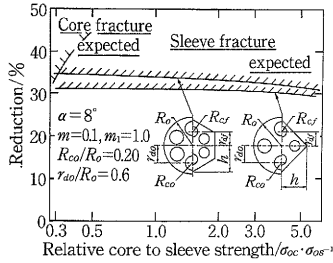


図8 正方クラッド材と六角クラッド材の加工限界の比較

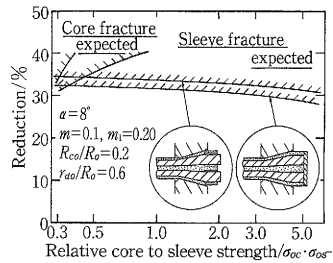


図9 芯材とスリーブ材の初期接合条件が加工限界に及ぼす影響

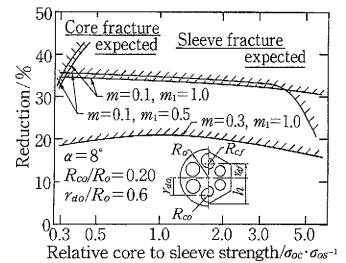


図10 摩擦条件が加工限界に及ぼす影響

3.2 異形クラッド材の加工限界

以下、図8～10の各図に、横軸には、芯材、スリーブ材の変形抵抗比、縦軸にはリダクションを表す。ハッチングで示す範囲はスリーブ材もしくは芯材が破断する加工条件域を表す。

図8は正方クラッド材と六角クラッド材との比較を示す。図に示すように、正方クラッドより、六角クラッド材のほうが加工可能な範囲が大きいことがわかる。また、六角クラッド材の場合、 σ_{oc}/σ_{os} が0.3より小さい範囲では、スリーブ材より軟らかい芯材が先に破断することが予想される。図9は、芯材、スリーブ材の初期接合条件が六角クラッド棒・線材の引抜き加工限界に与える影響を示す。図より、加工前に、芯材、スリーブ材が接合されていないほうが広い範囲において安定した加工ができる。摩擦が加工限界に与える影響については、図10に示す。ダイス面の摩擦が大きいくほど、スリーブ材が破断しやすい。一方、芯材、スリーブ材の界面における摩擦が小さい場合や加工可能な範囲が広いが、変形抵抗比が4.0以上になると、前述のように、芯材が変形しなくなり、その間、スリーブ材のほうが大きな減面率を受け、平均引抜き応力も急激に増大し、非常に破断しやすくなることがわかる。

4. ま と め

以上、多芯正方形および六角形クラッド棒・線材の押

出し・引抜き加工に関し、加工限界および加工後の芯材の寸法変化について解析を行い、下記のことが判明した。

(1) 芯材、スリーブ材の変形抵抗比が小さい範囲(約2.0)では、芯材・スリーブ材の均一な変形を達成しやすい、すなわち、安定した引抜き加工を実現しやすい。一方、製品の芯材の偏心率は変形抵抗比の増加とともに次第に増加する傾向がある。

(2) リダクションが小さく、芯材とスリーブ材との界面摩擦が小さく、かつ変形抵抗比が大きい場合、硬い芯材が加工を受けず、まっすぐのままダイスを出る可能性が高くなる。

(3) 正方形クラッド材より、六角クラッド材のほうが加工可能な条件の範囲が広い。しかし、同じ六角クラッド材の場合であっても、芯材、スリーブ材が加工前に接合されていない場合、更にダイス面の摩擦が小さいほうがスリーブ材の破断が発生しにくく、安定した加工を達成しやすい傾向がある。
(1989年5月23日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内・岸・石川：塑性と加工，24-266 (1983)，290.
- 2) 木内・徐：生産研究，40-9 (1988)，425.
- 3) 木内・徐：生産研究，40-10 (1988)，468.
- 4) 木内・徐：生産研究，41-3 (1989)，193.