

非軸対称クラッド棒・線材の引抜き加工・6

——多層多芯クラッド棒・線材の引抜き加工の数値シミュレーション——

Drawing of Non-Axisymmetric Clad Rods and Wires・6

——Numerical Simulation of Drawing of Multi-Cores Clad Rods——

木内 学*・徐 瑞 坤*

Manabu KIUCHI and Ray-Quen HSU

1. はじめに

現在、実用化されている金属基超電導線材に代表される多芯クラッド棒・線材は、電力をはじめ医療・通信・化学などさまざまな分野で、その応用範囲が急速に広がっておりつつある。多芯クラッド棒・線材は、一般に、それらを構成する芯材・スリーブ材などの機械的特性が異なることに加え、断面形状が複雑であるため、それらの製造に不可欠な引抜き加工に際しては、芯材・スリーブ材の形状・寸法の変化、芯材・スリーブ材の破断や、スリーブ材表面のしわの発生、その他の欠陥が起りやすく、安定した引抜き加工を行うことが困難である場合が多い。

筆者らは、このような多芯クラッド棒・線材の引抜き加工に関する諸問題を理論的に解明することを目指し、すでに、それらの引抜き加工時の変形挙動を一般的に解析可能な手法を提案し、各加工条件因子が偏心単芯あるいは単層多芯クラッド棒・線材の加工限界および製品の形状・寸法変化に与える影響について検討を行ってきた^{1)~4)}。本報では、この解析モデルをさらに拡張して、多層多芯クラッド棒・線材の変形挙動や加工限界について検討を試みたので、その結果をまとめて報告する。

2. 解析モデルおよび三次元動的可容速度場

非軸対称クラッド棒・線材の引抜き加工の解析モデルおよび解析手法の基本的な考え方、その際必要となる三次元動的可容速度場の導出手順の詳細については既報¹⁾で説明したので、ここでは省略する。以下、この解析手法を本報で研究対象としている多層多芯クラッド棒・線材の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、本研究の解析対象としては、図1に示すように、複数の芯材が周方向ならびに半径方向に配置された多層多芯クラッド棒・線の引抜き加工とする。構成された解析モデル・手法の適用範囲としては、芯材の断面形状や本数あるいは芯材の配置パターンなどに特に制約はないが、以下の解析事例としては、図2(a), (b)に示すよ

うなスリーブ材・芯材が共に円形断面を持つ場合の2層多芯クラッド棒・線材を考える。図2(a), (b)には、内層の芯材は4本、外層の芯材はそれぞれ4本と8本配置された場合のクラッド棒の断面を示す。図中の2点破線は、解析モデルを構成する便宜上、スリーブ材内部に設けた分割面を示す。いうまでもなく、スリーブ材は一体であり、それゆえ、解析モデルとしては、ダイス軸に垂直な断面上で、上記分割領域のスリーブ材の長手方向速度成分 V_{ys} は一様かつ互いに等しいと考えるものとする。以下、ダイス内のスリーブ材・芯材の流動を表す速度場の構成の前提条件となるスリーブ材の外形状(上記分割領域の界面を含む)を表す関数を $r = RSO(\phi, y)$ 、芯材・スリーブ材間の界面の形状を表す関数を $r = RSI(\phi, y)$ とする。具体的に速度場を導出するに際して、図2(a), (b)中に破線で示す Γ 面を内部せん断面として考え、この面上で、面に沿う速度の不連続すなわち相対すべりを許容するものとする。当然ながら、これらのせん断面上では、回転(ϕ)方向の速度の連続性が保たなければならない。

加工前の芯材とスリーブ材とは未接合であり、引抜き加工中に両者の間には相対すべりが発生する。また、両材料の変形抵抗が異なるので、加工後の製品における芯材の断面積比や偏心率は、加工前の素棒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(1), (2)により導入する。これらの因子

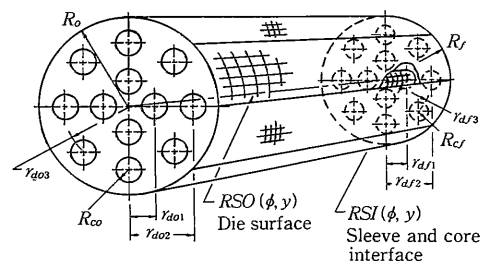
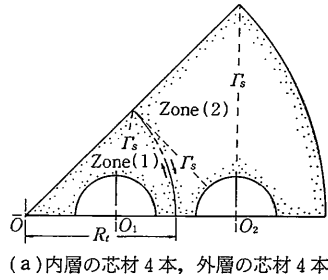


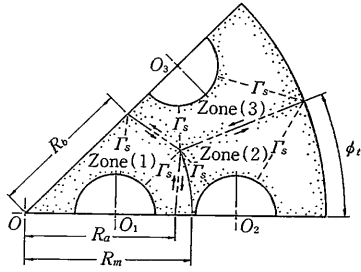
図1 多層多芯クラッド棒・線材の引抜き加工の概要

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報



(a)内層の芯材4本, 外層の芯材4本



(b)内層の芯材4本, 外層の芯材8本

図2 多層多芯クラッド棒・線材の引抜き加工の解析対象域

は, 結果的に, ダイス内の芯材・スリーブ材間の界面の形状・寸法を規定する因子ともなることに注意されたい.

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

$$r_{df}/R_f = (1 + \delta)r_{do}/R_o \quad (2)$$

実際の解析に際しては, 上述の芯材の形状・位置を規定する因子 ϵ, δ , および各層の分割面を規定する寸法(図2(a)の R_i および図2(b)の R_a, R_b, R_m ならびに ϕ_i などを可変パラメータとして取り入れ, 界面の形状 $r = RSO(\phi, y)$ および $r = RSI(\phi, y)$ を修正しつつ, 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, $RSO(\phi, y)$ および $RSI(\phi, y)$ を最適な近似解として得る. このような解析手順を経て, 加工に要する加工力・引抜き応力, 製品の形状・寸法, 芯材・スリーブ材の破断限界などが予測可能になる. 図3には, 芯材・スリーブ材の変形抵抗比が3.0場合の多層多芯クラッド棒・線材の引抜き加工時の芯材・スリーブ材内部の速度分布の計算例を示す.

ところで, 芯材・スリーブ材の加工限界の判定方法としては, 既報¹⁾で提案したように, ダイス出口において芯材・スリーブ材のそれぞれに作用する平均引抜き応力を個別に計算し, その値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する. ダイス出口で芯材・スリーブ材に加わる引抜き応力の推定方法についても既報¹⁾を参照されたい.

3. 結果および考察

以下, 図2(a), (b)に示す断面を持つ多層多芯クラッド

$R_{co}/R_o=0.10, \alpha=6^\circ$
 $r_{do1}/R_o=0.30, m=0.1$
 $r_{do2}/R_o=0.70, r=15\%$
 $r_{do3}/R_o=0.70$
 $\sigma_{oc}/\sigma_{os}=3.0$

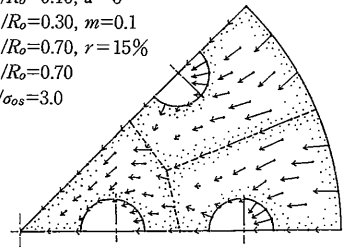


図3 芯材・スリーブ材内部の速度分布(例)

ド棒・線材の引抜き加工について, いくつかの解析事例を示す. なお, 図中の各記号およびそれらの添字(数字)は, それぞれ対応する各分割領域(Zone)(図2(a), (b)参照)に属する芯材の半径や偏心量などを示す.

図4(a), (b)には, 図2に示すクラッド棒・線材のうち外層の芯材が4本の場合の解析結果を示す. 図4(a)より, 芯材・スリーブ材の変形抵抗比 (σ_{oc}/σ_{os}) が3.0以下の範囲では, σ_{oc}/σ_{os} を変化させても, 製品の芯材の相対半径 ($R_{cf1}/R_f, R_{cf2}/R_f$) がほぼ一定であり, 変形が安定していることがわかる. 内層の芯材より, 外層の芯材のほうがやや大きな減面率を受けやすいが, σ_{oc}/σ_{os} が3.0以上になると, 内, 外層の芯材ともに変形しにくくなり, 特に, σ_{oc}/σ_{os} が約5.0より大きい場合では, 内層の芯材が変形しなくなる限界があることがわかる.

一方, 各層の芯材の偏心率の変化については, 図4(b)に示す. 図より, σ_{oc}/σ_{os} がおよそ0.7~3.0の範囲では, 製品の芯材の偏心率 ($r_{df1}/R_f, r_{df2}/R_f$) はほぼ一定であり, 安定な加工ができることがわかる. σ_{oc}/σ_{os} が3.0より大きくなると, 内層, 外層の芯材の偏心率が次第に増大し, 逆の場合すなわち σ_{oc}/σ_{os} が0.7より小さくなると, 両芯材の偏心率はともに減少する傾向があることが示されている.

図5(a), (b)は, 外層の芯材の本数が8本の場合の, σ_{oc}/σ_{os} の変化に伴う製品の芯材の相対半径 ($R_{cf1}/R_f, R_{cf2}/R_f, R_{cf3}/R_f$), 同じく偏心率 ($r_{df1}/R_f, r_{df2}/R_f, r_{df3}/R_f$) の変化について調べた結果である. 図5(a)に示すように, これらの場合, 加工後の製品中の内層の芯材の相対半径 (R_{cf1}/R_f) は外層の芯材のそれ ($R_{cf2}/R_f, R_{cf3}/R_f$) より大きい. すなわち, 内層の芯材の減面率のほう小さいこと, また, 外層に配置している芯材のうちでも, 内層側に隣接する芯材が配置されていない場合, すなわち, R_{cf3}/R_f のほうが, 内層側に隣接する芯材が配置されている場合 (R_{cf2}/R_f) に比較して, 若干大きい傾向がみられる. σ_{oc}/σ_{os} が1.0の近傍では, σ_{oc}/σ_{os} の値が多少変化しても, 各芯材の相対半径がほぼひとしく, σ_{oc}/σ_{os} の影響が顕在化しないが, σ_{oc}/σ_{os}

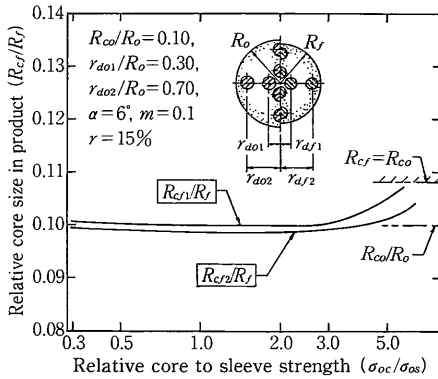


図 4 (a) 変形抵抗比が製品の芯材の相対半径に及ぼす影響

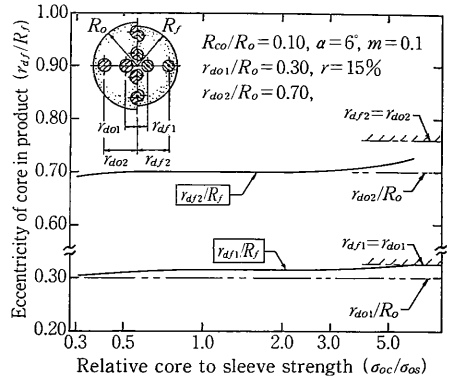


図 4 (b) 変形抵抗比が製品の芯材の偏心率に及ぼす影響

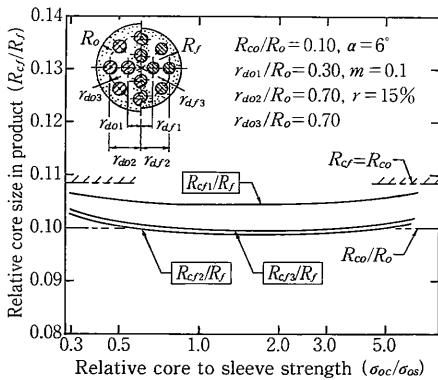


図 5 (a) 変形抵抗比が製品の芯材の相対半径に及ぼす影響

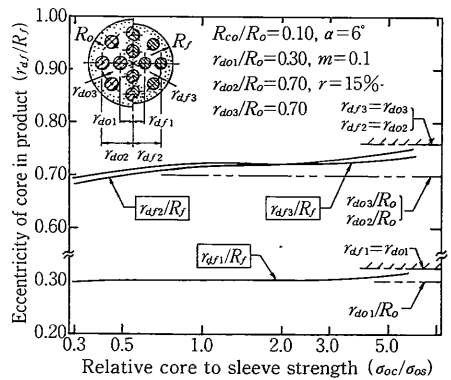


図 5 (b) 変形抵抗比が製品の芯材の偏心率に及ぼす影響

が1.0より大きく、または小さくなると、各芯材の相対半径はともに増大する傾向にあることがわかる。

一方、この場合の製品の芯材の偏心率の変化を図5(b)に示す。図より、芯材の本数が増加しても、 σ_{oc}/σ_{os} の変化は各層にある芯材の偏心率に顕著な影響を与えず、特に、内層の芯材のそれ(γ_{a1}/R_f)はほとんど変化しないことがわかる。

図6は、ダイス面での摩擦定数(m)を変えた場合の製品の芯材の相対半径(R_{c1}/R_f , R_{c2}/R_f , R_{c3}/R_f)を示す。図中、実線は $m=0.1$ 、破線は $m=0.5$ の場合の解析結果である。図に示すように、摩擦定数が大きい場合、製品の芯材の相対半径がわずかに大きくなるが、一般的に、摩擦定数は各層の芯材の相対半径の変化に顕著な影響を与えないことがわかる。しかし、摩擦定数の増大により、スリーブ材の平均引抜き応力が増大し、場合によっては、スリーブ材固有の変形抵抗(σ_{os})を超えて破断する可能性がでてくることに注意しなくてはならない(図6中の2点破線で示す範囲)。

図7(a),(b)には、芯材およびスリーブ材の各分割領域に作用する引抜き応力を示す。図7(a)に示すよう

に、 σ_{oc}/σ_{os} が1.0の近傍で、スリーブ材の各分割領域に作用する引抜き応力(σ_{js}/σ_{os})が最小となること、領域2のスリーブ材には他に比して高い引抜き応力が作用していること、などがわかる。

各層の芯材に作用する引抜き応力(σ_{jc}/σ_{oc})を調べた

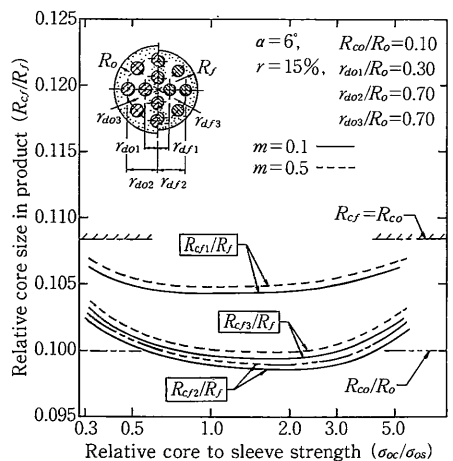


図 6 摩擦定数が製品の芯材の相対半径に及ぼす影響

研究速報

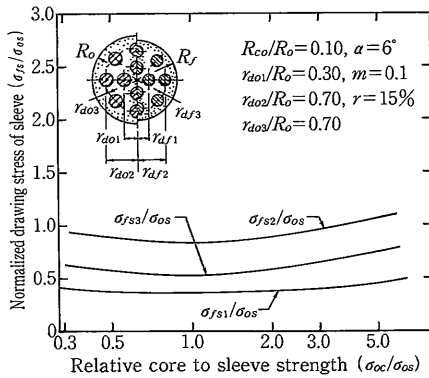


図7(a) 各分割領域のスリーブ材に作用する引抜き応力

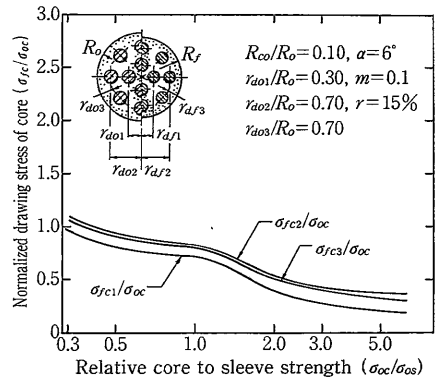


図7(b) 各分割領域の芯材に作用する引抜き応力

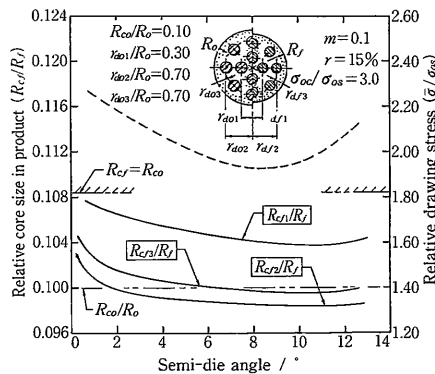


図8 ダイス半角が製品の芯材の相対半径に及ぼす影響

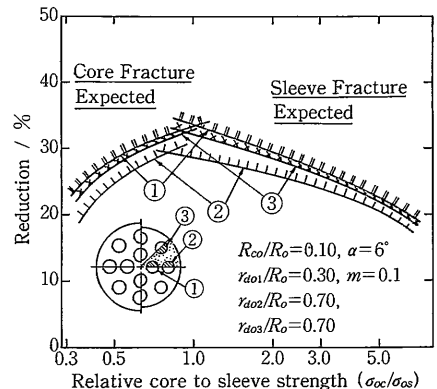


図9 多層多芯クラッド棒・線材の引抜き加工限界

結果を図7(b)に示す。この場合、 σ_{oc}/σ_{oc} が高いほど、芯材に作用する引抜き応力が小さくなる傾向がある。また、スリーブ材の場合と同様に、領域2にある芯材が他の芯材に比して高い引抜き応力を受けることがわかる。

ダイス半角(α)が製品の芯材の相対半径(R_{c1}/R_f , R_{c2}/R_f , R_{c3}/R_f)および平均引抜き応力($\bar{\sigma}/\sigma_{os}$)に及ぼす影響を図8に示す。ここで、横軸はダイス半角、縦軸は製品の芯材の相対半径、ならびにスリーブ材の変形抵抗で無次元化した平均引抜き応力($\bar{\sigma}/\sigma_{os}$)を示す。なお、この場合、芯材・スリーブ材の変形抵抗比は $\sigma_{oc}/\sigma_{os}=3.0$ である。ダイス半角の増大にしたがって、製品の芯材の相対半径が一旦減少するが、ダイス半角が 11° を超えると再び増大する、すなわち、この場合、ダイス半角 $=11^\circ$ の近辺では、各層の芯材は共に最大の減面率を得ることがわかる。一方、引抜き応力の変化をみると、引抜き応力を最小とする最適ダイス半角が存在することがわかる。ただし、この最適ダイス半角は、芯材に最大減面率を与えるダイス半角と一致するとは限らないことに注意を要する。

図9には、多層多芯クラッド棒・線材の引抜き加工限界の一例である。図より、変形抵抗比が1.0の付近では、

芯材・スリーブ材が破断しにくく、最大の減面率を得やすいことがわかる。また、領域2の芯材・スリーブ材が、他の領域と比べて、最も破断しやすいことがわかる。

4. まとめ

多層多芯クラッド棒・線材の引抜き加工の解析手法を提案し、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に検討を行い、以下のことが判明した。

- (1)本報で提案した解析モデル・手法は、多層多芯クラッド棒・線材の引抜き加工に要する加工力や製品の芯材の寸法変化の予測に有効である。
- (2)外層の芯材のほうが内層の芯材より大きな減面率を得やすい。
- (3)各層の芯材に最大減面率を与え得るダイス半角が存在する。

(1990年3月13日受理)

参考文献

- 1) 木内学・徐瑞坤：塑性と加工，30-346(1989)，1516。
- 2) 木内学・徐瑞坤：生産研究，41-3(1989)，193。
- 3) 木内学・徐瑞坤：生産研究，41-9(1989)，713。
- 4) 木内学・徐瑞坤：生産研究，42-2(1990)，103。