

## 非軸対称クラッド棒・線材の引抜き加工・7

## ——芯材のネッキングの予測——

Drawing of Non-Axisymmetric Clad Rods and Wires・7

——Simulation of Necking of Cores——

木 内 学\*・徐 瑞 坤\*

Manabu KIUCHI and Ray-Quen HSU

## 1. は じ め に

筆者らは、非軸対称クラッド棒・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、一連の研究を進めている。既報<sup>1)~4)</sup>では、芯材が単層あるいは多層に配置された多芯クラッド棒・線材や、外形が六角形または矩形の異形のクラッド棒・線材の引抜き加工に関し、加工後の製品の芯材・スリーブ材の形状・寸法、または芯材・スリーブ材の破断限界などについて検討を行ってきた。本報では、複合クラッド棒・線材の引抜き加工時に発生する代表的な欠陥すなわち芯材のネッキング現象について、新しいシミュレーション手法を提案し、ネッキングの発生限界の解明を試みた。

単一材の引抜き加工時のネッキングの発生限界に関しては、従来、さまざまな理論が提案されている<sup>5)</sup>。複合クラッド材の引抜き加工の場合については、実験的な研究例<sup>6)</sup>がいくつか発表されているが、芯材のネッキングを予測できる解析的手法の提案は比較的少ない。このうち、村瀬ら<sup>7)</sup>は、非軸対称性を持つ多芯クラッド材について、軸対称近似により芯材/スリーブ材界面に発生するせん断応力を算出し、それと芯材・スリーブ材の降伏応力とを比較することによって、不均一変形の発生限界を予測する試みを報告している。いずれにしても、非軸対称性を考慮した芯材のネッキングの発生限界を推定可能な解析手法はまったく提案されていないといえる。本報では、筆者らがこれまでに提案した多芯クラッド棒・線材の引抜き加工の解析モデルを踏まえて、芯材のネッキング現象を表現可能な速度場を導入し、いくつかの事例に対して、検討したので、以下この概要を報告する。

## 2. 解析モデルおよび三次元動的可容速度場

本報の研究対象としては、引抜き加工前に、芯材・スリーブ材とが接合済みの軸対称あるいは非軸対称複合クラッド棒・線材を考える。以下、図1に示す場合を例に

して述べる。

本研究では、芯材のネッキングが発生する瞬間に着目し、この瞬間のダイス内の芯材・スリーブ材の流動を表現可能な速度場の構成を行う。一般に、ネッキングが発生する場合、塑性変形域における芯材・スリーブ材の流れは非定常であり、その変形挙動はきわめて複雑と思われるが、ここでは、図2に示すような変形モードで近似できるものとする。すなわち、ダイス出口近傍で、芯材のネッキングが起り始めるものとし、塑性変形域内の長さ $L_n$ の領域（以下、ネック域と呼ぶ）において、芯材にはその中心に向かって径が縮小する流れが発生する。すなわちネック域が形成されるものとする。その間、芯材の回りに、スリーブ材が流れ込んで、両者の間には

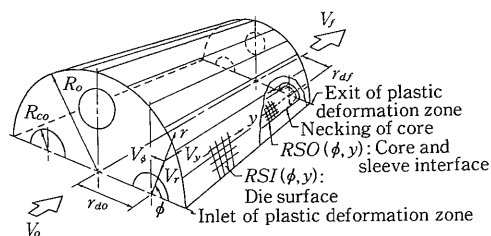


図1 非軸対称クラッド棒・線材の引抜き加工における芯材のネッキングモデル

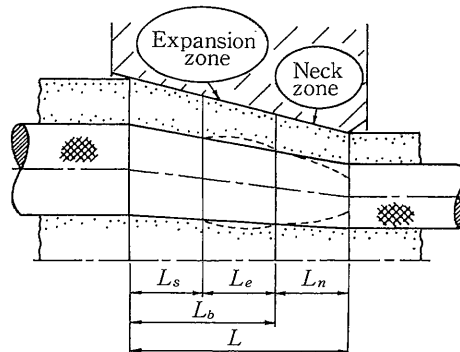


図2 芯材のネッキング発生時の変形モード

\*東京大学生産技術研究所 第2部

## 研 究 速 報

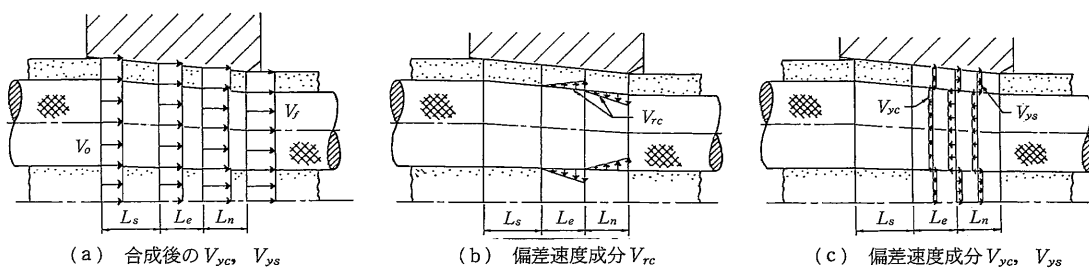
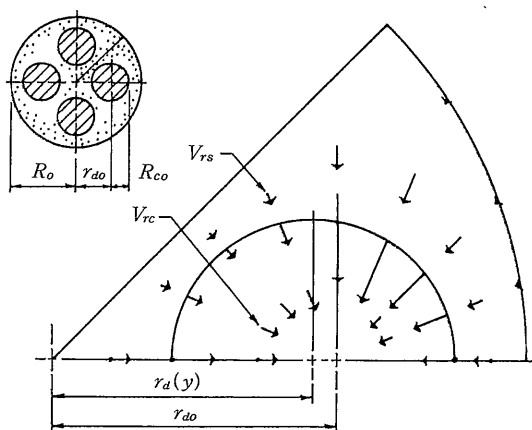
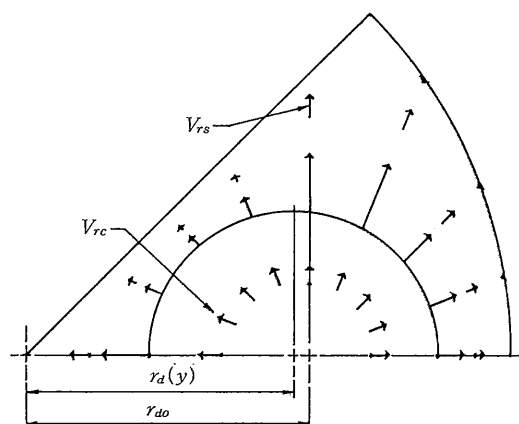


図3 偏差速度分布の計算事例



空隙が生じないものとする。なお、被加工材が既接合材であるため、ネッキングの発生に伴ってネック域内に発生する芯材・スリーブ材の流れの変化はそれぞれ上流域にある芯材またはスリーブ材の流れの変化によって補完されなければならない。仮に、この流れの変化が発生する上流側の領域が長さ  $L_e$  (以下、膨張域と呼ぶ) を持つとすれば、膨張域では芯材の径が増大しスリーブ材の

肉厚は薄くなる方向へ流れの変化が発生する。

以下、詳細な導出手順は省略するが、定常変形時を基準状態としてそこから発生する速度の変化分のみを表す速度場 ( $V_2$ , 以下、偏差速度場と呼ぶ) として、式(1)～(4)を導入する。

## 1) 芯材

## (a) ネック域

$$\begin{aligned} V_{rc} &= -[(y-L_b)/L_n](r/R_{co}) \\ V_{\phi c} &= 0 \\ V_{yc} &= \{(y^2-L^2) - 2L_b(y-L)\}/(L_n R_{co}) \end{aligned} \quad (1)$$

## (b) 膨張域

$$\begin{aligned} V_{rc} &= [(y-L_s)/L_e](r/R_{co}) \\ V_{\phi c} &= 0 \\ V_{yc} &= -(y-L_s)^2/(R_{co}L_e) \end{aligned} \quad (2)$$

## 2) スリーブ材

## (a) ネック域

$$\begin{aligned} V_{rs} &= [RSO(\phi, y)^2/(2r) - r/2] \partial V_{ys}/\partial y \\ &\quad + (RSO(\phi, y)/r) (\partial RSO(\phi, y)/\partial y) V_{ys} \\ V_{\phi s} &= 0 \\ V_{ys} &= \int V_{nc} dA/S_s(y) \end{aligned} \quad (3)$$

## (b) 膨張域

$$\begin{aligned} V_{rs} &= [RSO(\phi, y)^2/(2r) - r/2] \partial V_{ys}/\partial y \\ &\quad + (RSO(\phi, y)/r) (\partial RSO(\phi, y)/\partial y) V_{ys} \\ V_{\phi s} &= 0 \\ V_{ys} &= \int V_{nc} dA/S_s(y) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $V_{rc}$ ,  $V_{rs}$ は芯材/スリーブ材が界面を通してそれぞれ流出または流入する速度成分を表す。 $dA$ はその界面の積分要素であり、 $S(y)$ は $y=y$ におけるスリーブ材の断面積である。また、 $RSO(\phi, y)$ はダイス面の形状を表す関数である。これらの偏差速度場は、体積一定の条件、ダイス面での境界条件、芯材/スリーブ材界面での連続条件ならびにネッキング開始界面 ( $y=L_s$ )、ダイス出口断面での境界条件などをそれぞれ満している。各条件を具体的に式(5)に示す。

## 研究速報

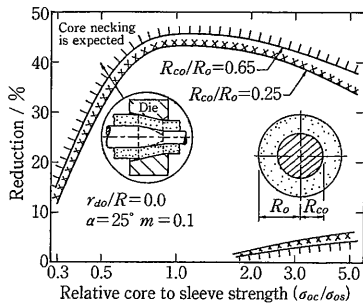
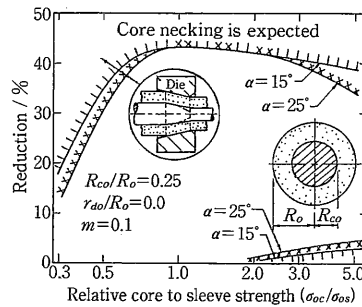
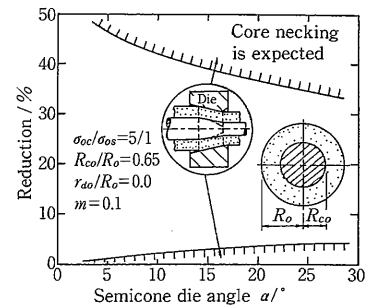
図4  $R_{co}/R_o$  と  $\sigma_{oc}/\sigma_{os}$  が芯材のネッキング発生限界に及ぼす影響図5  $\alpha$  と  $\sigma_{oc}/\sigma_{os}$  が芯材のネッキング発生限界に及ぼす影響図6  $\alpha$  が芯材のネッキング発生限界に及ぼす影響

表1 計算条件

red.%	$\sigma_{oc}/\sigma_{os}$	$\alpha^\circ$	$r_{do}/R_o$	$R_{co}/R_o$	$m$	$m_1$
5	5/1, 3/1	5	0.0, 0.30	0.15, 0.25	0.1	1.0
10	2/1, 1/1	10	0.55	0.30, 0.65		
20	1/2, 1/3	15				
30		20				
40		25				
50		30				

$$r = RSO(\phi, y) : V_{rs}/V_{ys} = -\partial RSO(\phi, y)/\partial y$$

$$r = RSI(\phi, y) : V_{ns} = V_{nc}$$

$$y = L_s : V_{ys} = V_{yc} = 0$$

$$y = L_b : V_{ys}(L_b + 0) = V_{ys}(L_b - 0)$$

$$V_{yc}(L_b + 0) = V_{yc}(L_b - 0)$$

$$y = L : V_{ys} = V_{yc} = 0 \quad (5)$$

一方、定常変形を表す速度場 ( $V_1$ , 以下、定常速度場と呼ぶ) としては、既報<sup>1)</sup>で提案した三次元動的可容速度場をそのまま導入し、両速度場を加藤ら<sup>2)</sup>が提案した速度場の合成概念を用いて、式(6)に示す芯材のネッキング変形をシミュレート可能な速度場の構成ができる。

$$\text{定常域} (y \leq L_s) \quad V = V_1$$

$$\text{膨張域} (L_s \leq y \leq L_b) \quad V = V_1 + \eta_e V_2 \quad (6)$$

$$\text{ネック域} (L_b \leq y) \quad V = V_1 + \eta_n V_2$$

ただし、 $\eta_e$ ,  $\eta_n$  はそれぞれ膨張域およびネック域の偏差速度成分の量を規定するパラメータである。

実際の解析に際しては、 $L_n$ ,  $L_e$ ,  $\eta_n$ ,  $\eta_e$  および加工後の芯材の偏心率を可変パラメータとして取り入れ、引抜き加工に要する全変形仕事率を求め、その最小値を与えるパラメータ、 $L_n$ ,  $L_e$ ,  $\eta_n$ ,  $\eta_e$  の最適値が 0 よりも大きい場合、芯材がネッキングを起こし始めると判定する。

図3(a)~(e)に、上述の偏差速度場の計算事例を示す。なお、この場合、リダクション=20%、ダイス半角 ( $\alpha$ ) = 8°,  $L_n/L = L_e/L = 0.3$ ,  $R_{co}/R_o = 0.3$ ,  $r_{do}/R_o = 0.55$ , とした場合の速度場である。

## 3. 解析結果および検討

以上説明した解析モデルを用い、表1に示す加工条件範囲について、解析を行い、以下の結果が得られた。なお、各図のハッチングを施した側が芯材のネッキングが発生しやすい加工条件範囲を示す。

## 3.1 軸対称単芯クラッド棒材の場合

図4は、横軸に芯材とスリーブ材の変形抵抗比 ( $\sigma_{oc}/\sigma_{os}$ )、縦軸にリダクションを示す。図より、以下のことがわかる。

(1) リダクションが比較的に大きい範囲では、芯材の相対半径 ( $R_{co}/R_o$ ) の大きいほうが、ネッキングが発生しにくい。

(2) リダクションの小さい範囲では、内硬外軟材 ( $\sigma_{oc} > \sigma_{os}$ ) の場合、正常な引抜き加工が可能なりダクションの下限が存在する。

(3) 上限、下限に挟まれたリダクションの範囲では、健全な加工が可能であるが、その範囲は  $\sigma_{oc}/\sigma_{os}$  が 1.0 の近辺で最大になる。

図5は、ダイス半角 ( $\alpha$ ) がそれぞれ 15°, 25° の場合に、 $\sigma_{oc}/\sigma_{os}$  の変化が芯材のネッキング発生限界に及ぼす影響を示す。図より、

(1)  $\sigma_{oc}/\sigma_{os}$  が約 1.0~2.5 の範囲では、 $\alpha$  を変えても引抜き可能なリダクションの上限はほとんど変わらない。

(2)  $\sigma_{oc}/\sigma_{os}$  が増大または減少するに伴って、 $\alpha$  の大きい場合のほうが、健全な引抜きが可能なリダクションの範囲が小さくなる。

(3)  $\alpha$  が大きいほど、引抜き可能なリダクションの下限が増大する、ことがわかる。

図6は、 $\sigma_{oc}/\sigma_{os}$  を 5.0 に固定した場合の、 $\alpha$  が芯材のネッキングの発生限界に与える影響を示す。この場合、 $\alpha$  の増加につれて、芯材のネッキングが発生する上限のリダクションが徐々に減少し、一方、下限のリダクション

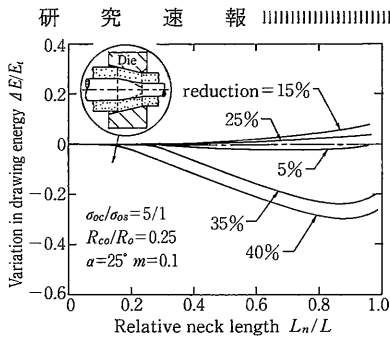


図7 相対ネック長さ ( $L_n/L$ ) が全変形仕事率 ( $\Delta E/E_0$ ) に及ぼす影響

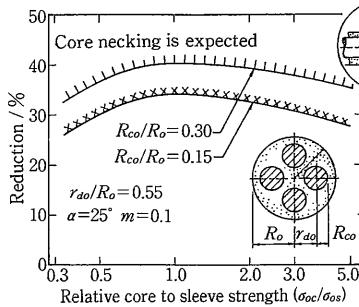


図8  $R_{co}/R_o$  と  $\sigma_{oc}/\sigma_{os}$  が芯材のネッキング発生限界に及ぼす影響

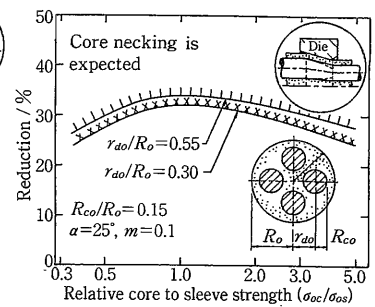


図9  $r_{do}/R_o$  と  $\sigma_{oc}/\sigma_{os}$  が芯材のネッキング発生限界に及ぼす影響

ンが、わずかながら増加し、健全な引抜き可能範囲が減少することがわかる。

図7には、ダイス長さ $L$ で無次元化した相対ネック域長さ ( $L_n/L$ ) と全変形仕事率の変化 ( $\Delta E/E_0$ ) との関係を示す。ここで、 $E_0$ は定常変形時の全変形仕事率、 $\Delta E$ は芯材のネッキングが発生する場合の全変形仕事率が、定常変形時のそれよりも増加あるいは減少する量を表す。図中、 $\Delta E/E_0$ が一点破線より上方にある場合はネッキングが起こりにくく、逆の場合、ネッキングが起こりやすいことを表す。図に示す加工条件のうち、リダクションが小さい場合には(ここで5%以下)、ネッキングが発生することがわかる。リダクションが大きくなると(15%)、芯材のネッキングが発生しなくなるが、リダクションをさらに増大していくと、再びネッキングが発生することが予想される。

### 3.2 非軸対称多芯クラッド棒・線材の場合

図8は、周方向に等角配置した4芯クラッド棒の引抜き加工の場合、芯材のネッキングの発生限界を示す。この場合も、軸対称単芯クラッド棒の場合と同様に、 $R_{co}/R_o$ の小さいほうが、健全な加工可能なリダクションの範囲が小さいことがわかる。

芯材の初期偏心率 ( $r_{do}/R_o$ ) の変化がネッキングの発生限界に与える影響について図9に示す。これは  $R_{co}/R_o$  を0.15、 $\alpha$ を25°に固定し、 $\sigma_{oc}/\sigma_{os}$ を変えた場合の解析結果である。この場合、 $r_{do}/R_o$ が小さい。すなわち、芯材が軸中心に近いところに配置された場合が、ネッキングが発生しやすいことがわかる。ただし、非軸対称クラッド棒・線材の場合では、本報の解析範囲において、軸対称単芯クラッド棒にみられる健全な引抜き加工を可能とするリダクションの下限が認められない。

## 4. ま と め

本報では、非軸対称クラッド棒・線材の引抜き加工について、芯材のネッキング現象をシミュレート可能な解析モデルを提案し、いくつかの加工条件に対し、解析を行い、ネッキングの発生限界について調べた。その結果以下のことが判明した。

- (1) 芯材の初期相対半径、初期偏心率が小さいあるいはダイス半角が大きいくほど、芯材のネッキングが起こりやすい。
- (2) 内硬外軟軸対称単芯クラッド棒材の場合、リダクションが十分小さい範囲では、ネッキングが発生しやすい。

今後は加工硬化などを含むより広範囲な加工条件が芯材のネッキング現象に及ぼす影響について研究を進める予定である。

(1990年11月27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，42-6 (1990)，365。
- 5) Dodd, B. & Bai, Y: Ductile Fracture and Ductility with Applications to Metalworking, (1987). 152, Academic Press.
- 6) Zoener, W., Austen, A. & Avitzur, B.: Trans. ASME, 94-1 (1972). 78.
- 7) 村瀬 暁・小池吉康・鈴木英元：塑性と加工，22-244 (1981)，445。
- 8) 加藤和典・室田忠雄・熊谷敏彦：塑性と加工，21-231 (1980)，359。