

# 逃げ有り回転口広げと拡管型抽伸による 高精度薄肉管加工プロセスの開発

電気通信大学 大学院情報理工学研究科 機械知能システム学専攻  
准教授 梶川 翔平

(2021年度 一般研究開発助成 AF-2021009-B2)

キーワード：拡管，口広げ，抽伸，薄肉管

## 1. 研究の目的と背景

幅広い産業分野において、構造材や配管部品として用いられる管の軽量化および高強度化は、持続可能な開発目標 (SDGs) を達成する上で、極めて重要である。例えば、輸送機器の部品として用いられる管の軽量化および高強度化は、車体の軽量化につながるため燃費性能の向上や、省部材化に貢献する。このため、薄肉管を効率的に製造するための技術開発が望まれる。

一般的な薄肉管の製造手法として、管を縮径しながら加工する抽伸加工が挙げられる。この工法では、1パスあたりの減肉量に限界があるため、薄肉管の製造にあたっては、繰り返し抽伸加工を行うことによって、徐々に減肉する必要がある。これは、1パスあたりの減肉量を大きくしすぎると、加工荷重が大幅に増大し、管が破壊するためである。このため、加工に時間を要する。その他の薄肉管製造手法として、スピニングや圧延も挙げられるが、生産性において抽伸加工に劣る。

申請者らは、これまでに少工程にて薄肉管を製造する技術として拡管型抽伸加工を提案している<sup>1)</sup>。提案工法では、管端部にプラグを押し込み、口広げ加工した後に、口広げ部をチャックし、プラグを引き抜くことによって、管全体を拡管する。肉厚方向に働く負の偏差応力  $\sigma_r$  が従来の縮管型よりも大きいため、効率的な減肉が可能である。

しかしながら、拡管型抽伸加工における現状の課題として、口広げ加工時に生じる成形不良や、プラグ引抜き後の成形品の寸法精度が挙げられる。口広げ加工においては、拡管率を大きく設定した場合に座屈や割れが生じるため、拡管率が大きな条件で抽伸加工を行うことができない。また、プラグ引抜き時において、管材の寸法精度を悪化させる要因は、管内壁のオーバーシュートおよび周方向の偏肉である。さらに、成形品を様々な産業分野における機械部品として活用することを考慮すると、様々な材料を素管として用いた際の成形性を検討する必要がある。本研究では、これらの課題を解決するため、逃げ有りパンチを用いた回転口広げ加工および拡管型抽伸加工から構成される加工プロセスを提案し、高精度な薄肉管材を得るにあたって適正な工具形状や素管の材種の影響について調査した。

## 2. 逃げ有り回転口広げおよび拡管型抽伸加工による管材成形プロセス

図1に、本研究にて提案する加工プロセスを示す。まず、図1(a)に示すように、逃げ有りパンチを用いた回転口広げ加工によって、管端部を拡管する。逃げ有りパンチを用いると、管とパンチの接触面積が小さくなるため、加工荷重が減少し、成形不良の一つである座屈を抑制できる<sup>2)</sup>。その後、図1(b)に示すように、抽伸工程として、プラグを口広げ部に挿入し、引き抜くことによって、管全体を拡管する。抽伸工程に用いるプラグには、ガイドおよびコーナ半径  $R_p$  を設ける。ガイドを設けることによって、抽伸時に管とプラグの軸が一致しやすくなるため、管の周方向の偏肉抑制が期待できる。また、角部の  $R_p$  によって、オーバーシュートの抑制が期待できる。本研究では、回転口広げ工程および抽伸工程のそれぞれにおいて、適正な工具形状を調査した。

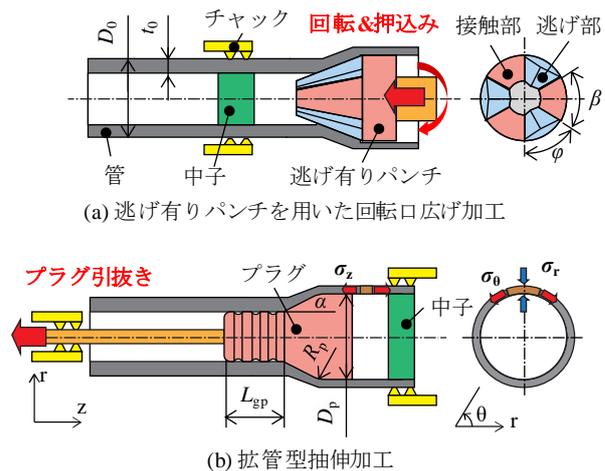


図1 高精度薄肉管加工プロセスの概略

## 3. 逃げ有りパンチを用いた回転口広げ加工<sup>2,3)</sup>

### 3.1 実験および解析方法

逃げ有りパンチを用いた回転口広げ加工においては、パンチと管の接触面積が成形限界に大きく影響する。接触面積を表す合計接触角  $\gamma$  は以下の式で定義される。

$$\gamma = \beta n_c \quad (1)$$

ここで、 $n_c$  は接触面数、 $\beta$  は1つの接触面の大きさを表す接触角である。これまでの調査において、 $\gamma = 300^\circ$ 程度に

設定することによって、成形限界が向上する一方、 $\gamma$  が小さいと割れが生じやすくなる傾向を示した<sup>2)</sup>。これは、 $\gamma$  が小さいと、溝のサイズの増加にともなって、溝部にて生じるたわみが大きくなるため、繰り返し曲げ・曲げ戻し変形による割れが生じやすくなるためである。一方、溝部の大きさは、 $\gamma$  だけではなく、 $n_c$ によっても変化する。例えば、 $\gamma$  が等しい場合においても、 $n_c$ が増加すると、1つあたりの溝のサイズは小さくなる。

そこで、高い成形限界を得るにあたって適正な逃げ有りパンチ形状を明らかにするため、本研究では、逃げ角  $\phi$  および逃げ溝数  $n_r$  が成形限界に及ぼす影響を調査した。図2に、実験の様子を示す。回転させた管材に逃げ有りパンチを押し込むことによって、加工を行った。加工条件を表1に示す。パラメータとして、逃げ有りパンチの  $\phi$  および  $n_r$  を変化させた。これらのパラメータの変化にともなって、合計接触角  $\gamma$  も変化する。 $\phi$  および  $n_r$  が成形限界に及ぼす影響を調査するため、成形不良が発生するまでパンチを押し込み、以下の式から限界口広げ率  $\kappa_{max}$  を求めた。

$$\kappa_{max} = \frac{D_{max} - D_0}{D_0} \quad (2)$$

ここで、 $D_{max}$  は不良なく加工可能であった最大の口広げ部先端の外径である。口広げ部先端の外径はパンチを 1 mm 押し込むごとに計測し、不良が確認された押し込み量の 1 mm 前の口広げ部先端外径を  $D_{max}$  とした。

逃げ角  $\phi$  および逃げ溝数  $n_r$  が成形性に及ぼす影響について考察するため、有限要素法 (FEM) 解析を行った。解

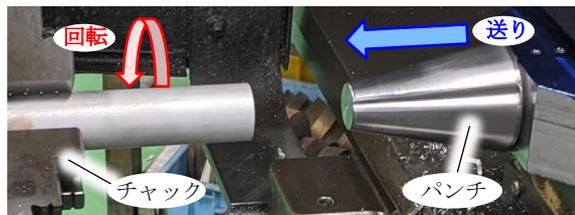


図2 逃げ有りパンチを用いた回転口広げ加工実験

表1 逃げ有りパンチを用いた回転口広げ加工条件

パンチ	半角 $\alpha / ^\circ$	12
	逃げ角 $\phi / ^\circ$	0, 20, 30, 60, 90
	逃げ溝数 $n_r$	0, 2, 3, 6
	合計接触角 $\gamma / ^\circ$	180, 300, 360
	送り速度 $f / \text{mm} \cdot \text{rev}^{-1}$	0.1
	回転数 $N / \text{rpm}$	140
管	材質	A1070
	初期外径 $D_0 / \text{mm}$	30
	初期肉厚 $t_0 / \text{mm}$	1
潤滑 (実験)	プレス工作油 G-3344 (日本工作油株式会社)	
摩擦係数 (FEM)	0.1	

析には、有限要素法汎用ソフトウェア”Elfen” (Rockfield Software 社, Swansea, 英国) を使用した。3次元モデルを使用し、動的陽解法にて解析を行った。管は弾塑性体、パンチは剛体とした。

### 3・2 逃げ角 $\phi$ および逃げ溝数 $n_r$ の影響

図3に、逃げ有りパンチを用いて加工した成形品の外観を示す。逃げ有りパンチを用いて加工した場合、いずれの条件においても管端部にて割れが発生した。一方、割れが発生するまでの拡管量は、逃げ角  $\phi$  や逃げ溝数  $n_r$  によって変化した。逃げ溝がないパンチを用いた際は、座屈が発生した。図4に限界口広げ率  $\kappa_{max}$  に及ぼす逃げ角  $\phi$  の影響を示す。 $\phi = 20^\circ$  の条件にて、 $\kappa_{max}$  は最大となった。また、 $\phi = 30^\circ$  の場合、 $n_r$  が小さい方が  $\kappa_{max}$  は大きくなった。以上の結果より、適正な逃げ角  $\phi$  は、 $20^\circ$  程度であることが明らかとなった。

### 3・3 口広げ部における周方向応力 $\sigma_\theta$

FEM 解析にて、加工時における応力状態を調査した。図5に、パンチが1回転する間に生じた口広げ部先端の周方向応力  $\sigma_\theta$  の変化を示す。逃げ角  $\phi = 20^\circ$  の場合、接触部においては外径側、内径側ともに、引張の  $\sigma_\theta$  が生じており、周方向に伸ばされていることがわかる。一方、溝を通



(i)  $n_r = 2$ ,  $\phi = 90^\circ$  (ii)  $n_r = 3$ ,  $\phi = 60^\circ$  (iii)  $n_r = 6$ ,  $\phi = 30^\circ$  (i)  $n_r = 2$ ,  $\phi = 30^\circ$  (ii)  $n_r = 3$ ,  $\phi = 20^\circ$  (iii)  $n_r = 6$ ,  $\phi = 10^\circ$   
(a)  $\gamma = 180^\circ$  (b)  $\gamma = 300^\circ$

図3 逃げ角  $\phi$  および逃げ溝数  $n_r$  が成形品外観に及ぼす影響

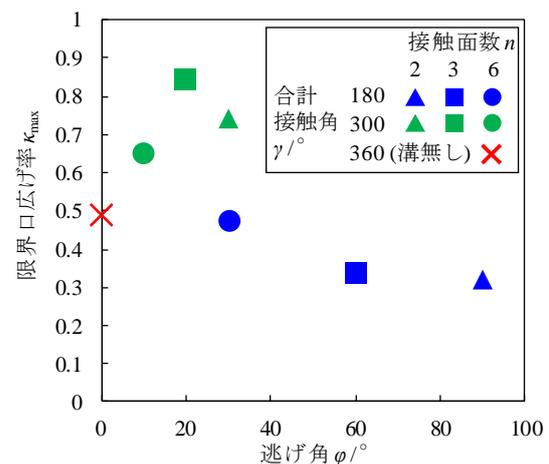
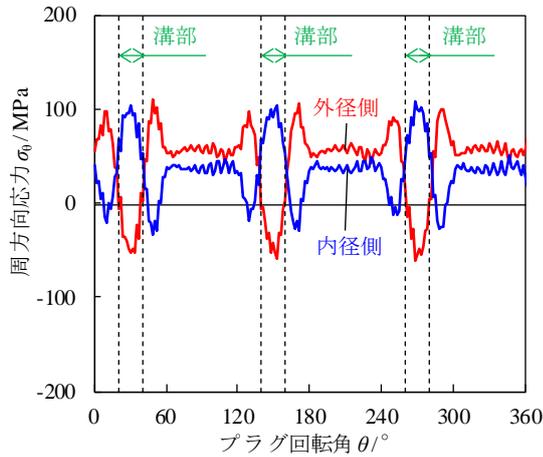
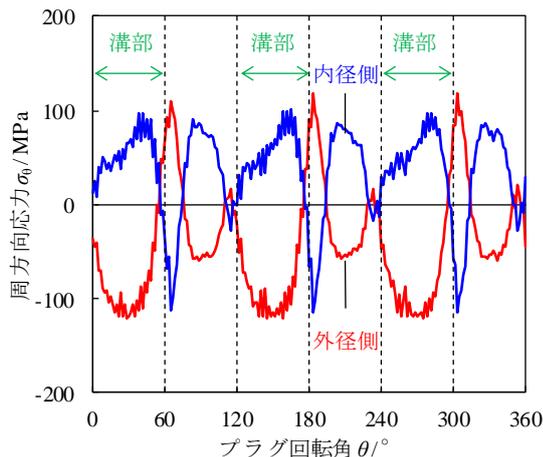


図4 限界口広げ率  $\kappa_{max}$  に及ぼす逃げ角  $\phi$  の影響 (実験)



(a) 逃げ角  $\phi = 20^\circ$  (合計接触角  $\gamma = 300^\circ$ )



(b) 逃げ角  $\phi = 60^\circ$  (合計接触角  $\gamma = 180^\circ$ )

図5 口広げ部先端における周方向応力  $\sigma_\theta$  の変化 (FEM)

過する際に、管壁はたわむため、曲げ・曲げ戻し変形が生じ、 $\sigma_\theta$ は増減する。逃げ角  $\phi = 60^\circ$ になると、溝部を通過する際に生じる曲げ・曲げ戻し変形が大きくなるため、外径側、内径側の両方が同時に引っ張られる領域は存在せず、曲げと曲げ戻しの繰り返しのみとなる。このため、周方向に伸ばされにくくなるとともに、ひずみの蓄積による割れが生じやすくなったと考えられる。一方、逃げ角  $\phi = 30^\circ$ の場合、 $n_r = 6$ の場合の方が、 $n_r = 2$ の場合と比べて限界口広げ率  $\kappa_{\max}$  は低下した。これは、溝数  $n_r$ が多いと、曲げ・曲げ戻し変形が生じる回数が増加し、ひずみの蓄積による割れが生じやすくなったためと考えられる。

#### 4. 拡管型抽伸加工における成形品の精度向上<sup>4~6)</sup>

##### 4.1 実験および解析方法

本研究では、素管の材種およびプラグ形状の影響について、検討を行った。表2に加工条件を示す。炭素鋼(STKM13C)、アルミニウム合金(A1070)、りん脱酸銅(C1220)の素管を用いた。STKM13Cに関しては、未処理

表2 拡管型抽伸加工条件

プラグ	半角 $\alpha / ^\circ$	12, 24, 36, 48
	外径 $D_p / \text{mm}$	30 ~ 42
	コーナ半径 $R_p / \text{mm}$	無し, 5 ~ 20
	ガイド長さ $L_{gp} / \text{mm}$	0, 30
管	材質	STKM13 (未処理および焼きなまし材), A1070, C1220
	初期外径 $D_0 / \text{mm}$	30
	初期肉厚 $t_0 / \text{mm}$	2
	初期長さ $L_0 / \text{mm}$	600 (実験), 200 (FEM)
潤滑 (実験)		カストール S-846M (タイコ株式会社)
摩擦係数 (FEM)		0.1

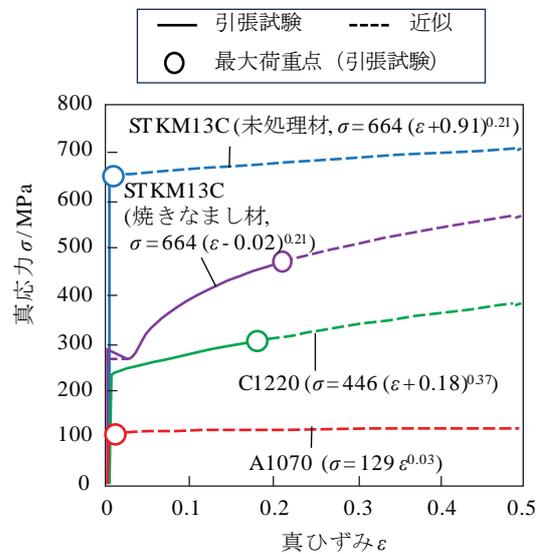


図6 供試材の応力-ひずみ線図

のものに加え、焼きなまし処理を施した材料も実験に用いた。図6に、引張試験によって得た供試材の応力-ひずみ線図を示す。STKM13Cの焼きなまし材やC1220は伸びやすい一方、STKM13Cの未処理材やA1070の伸びは小さかった。プラグ形状の影響を調査するため、半角  $\alpha$ 、ガイド長さ  $L_{gp}$ 、およびコーナ半径  $R_p$  が異なるプラグを用いて実験を行った。実験では、管端を口広げ加工後、拡管型抽伸加工を行った。なお、本検討では、口広げ加工は管を回転させずに行った。また、口広げと抽伸にて、同じプラグを用いた。FEM解析には、有限要素法汎用コード“Elfen”を用いた。2次元軸対称モデルを用い、静的陰解法にて解析を行った。管は弾塑性体、プラグは剛体とした。

成形性を評価するため、成形品の肉厚  $t$  および外径  $D$  を

周方向に45°ごとに測定し、周方向の分布を求めた。また、以下の式から減肉率 $\eta$ 、オーバーシュート $g_o$ を求めた。

$$\eta = \frac{t_0 - t}{t_0} \quad (3)$$

$$g_o = D - 2t - D_p \quad (4)$$

ここで、 $D$ および $t$ は抽伸後の管の外径および肉厚の平均値である。

#### 4・2 材種が成形性に及ぼす影響

素管の材種が成形性に及ぼす影響を調査した。本調査では、ガイドおよびコーナ半径無しプラグを用いた。図7に本実験において発生した成形不良の外観、図8にプラグ径 $D_p$ および半角 $\alpha$ が成形可否に及ぼす影響を示す。 $D_p$ が大きくなると、成形不良が発生しやすくなり、加工可能な最大の $D_p$ や成形不良の種類は、 $\alpha$ によって変化した。いずれの材種の場合においても、 $\alpha = 36^\circ$ にて最も大きく拡張できた。 $\alpha$ が小さいと、抽伸時に周方向の引張による割れ(図7(b)および(c))が生じやすくなった。 $\alpha$ の増加とともに、抽伸時の周方向割れが発生しにくくなる一方、口広げ時の座屈(図7(a))や抽伸時の軸方向割れ(図7(d))が生じやすくなった。 $\alpha = 48^\circ$ になると、抽伸工程にて加工が不安定となり、管壁のしわ(図7(e))や偏肉、管内面に切りくず(図7(f))が発生した。 $\alpha = 48^\circ$ では、プラグのテーパ部が非常に短くなり、拡張時においてプラグと管の接触が不安定となるため、不良が生じやすかったと考えられる。以上の結果より、高い成形限界が得られる適正な $\alpha$ は材種によらず、 $36^\circ$ であることが明らかになった。一方、適正条件下における成形限界は、材種によって変化した。STKM13Cの焼きなまし材やC1220など、伸びが大きい材料を用いた際に高い成形限界が得られることが明らかになった。



図7 成形不良の外観

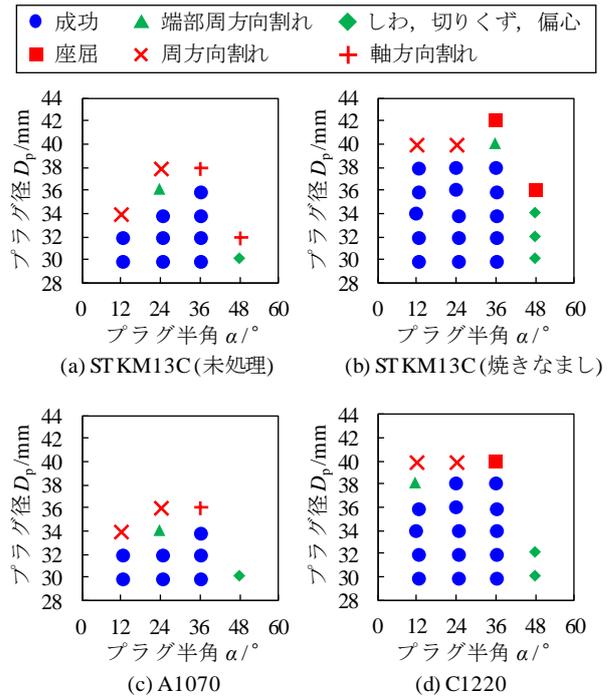


図8 プラグ径 $D_p$ および半角 $\alpha$ が成形可否に及ぼす影響 (実験)

図9に、減肉率 $\eta$ に及ぼすプラグ径 $D_p$ の影響を示す。図では、変形前後の管の断面積が変化せず(軸方向ひずみ $\epsilon_z = 0$ )、成形品の内径は $D_p$ と等しくなると仮定して計算した $\eta$ もあわせて示している。いずれの材種においても、 $D_p$ の増加とともに $\eta$ は増加した。したがって、成形限界の高いSTKM13Cの焼きなまし材やC1220は、 $D_p$ が大きなプラグを用いて大幅な減肉加工が可能である。また、 $D_p$ が一定の場合、A1070にて高い $\eta$ が得られた。A1070の場合、プラグと管の摩擦が大きく、軸方向荷重が大きくなるため<sup>5)</sup>、軸方向に材料が伸ばされ、高い減肉効果が得られたと考えられる。

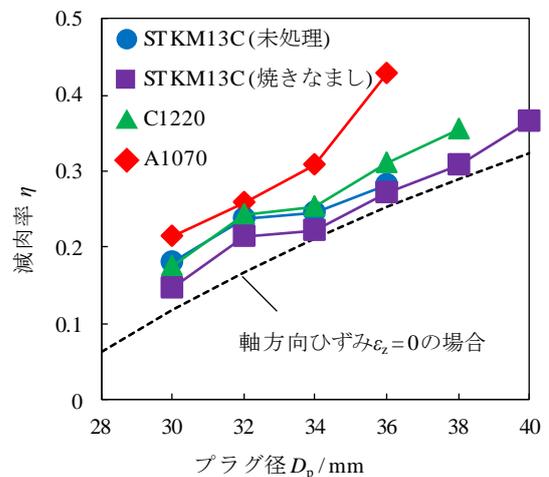


図9 プラグ径 $D_p$ が減肉率 $\eta$ に及ぼす影響 (実験)

### 4.3 プラグのガイドが偏肉に及ぼす影響

ガイドの有無が肉厚分布に及ぼす影響を調査した。本調査では、半角  $\alpha=36^\circ$ 、コーナ半径無しプラグを用いた。図10に、素管として STKM13C の未処理材を用いた際において、ガイドの有無が肉厚  $t$  の周方向分布に及ぼす影響を示す。ガイドの無いプラグを用いて抽伸すると、素管と比べて偏肉が悪化する傾向を示した。これは、抽伸時において、管の軸に対してプラグの軸がずれた状態で抽伸されているためである。ガイド付きのプラグを用いると、プラグの軸が管の軸と一致した状態で抽伸されるため、偏肉は大幅に改善し、素管と同程度となった。以上の結果より、ガイドは成形品の偏肉を抑制するにあたって有効であることが明らかになった。

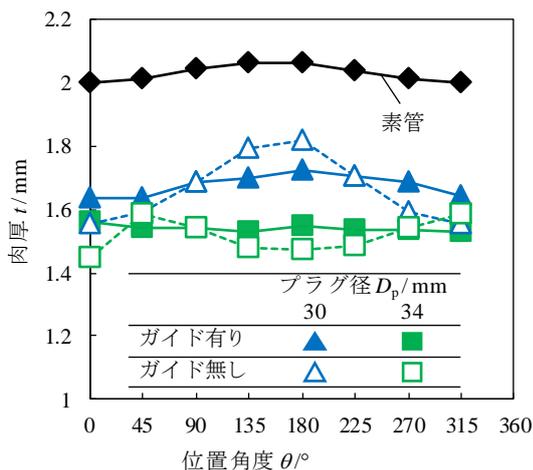


図10 ガイドが肉厚分布に及ぼす影響 (STKM13C 未処理材, プラグ半角  $\alpha=36^\circ$ , コーナ半径  $R_p$  無し, 実験)

### 4.4 プラグのコーナ半径 $R_p$ がオーバーシュートに及ぼす影響

プラグのコーナ半径  $R_p$  がオーバーシュート  $g_o$  に及ぼす影響を調査した。本調査では、半角  $\alpha=36^\circ$  のガイド付プラグを用いた。図11に、 $R_p$  が  $g_o$  に及ぼす影響を示す。まず、FEM 解析にて  $R_p$  の影響を調査した結果、 $R_p$  の増加にともなって  $g_o$  は減少し、 $R_p=20\text{ mm}$  の条件にて、 $g_o$  をおおよそ 0 に低減できた。図12に、FEM 解析にて得たプラグコーナ部近傍の管壁の変形形状を示す。オーバーシュートは、管壁がプラグのコーナ部にて曲げられるときに生じる。管壁が曲げられるとき、曲率半径  $R$  が生じ、曲げ部の曲率半径が  $R_p$  より大きいと、図12(a)に示すように、オーバーシュートが生じる。一方、 $R_p$  を曲げ部の曲率半径よりも大きく設定すると、図12(b)に示すように、管壁はプラグ形状に沿って変形できるため、オーバーシュートを抑制できる。

FEM 解析の結果に基づき、コーナ半径  $R_p=20\text{ mm}$  のプラグを用いて実験を行ったところ、図11に示すように、解析結果と同様に、オーバーシュートを抑制できた。以上の結果より、オーバーシュートの抑制にあたって、プラグ

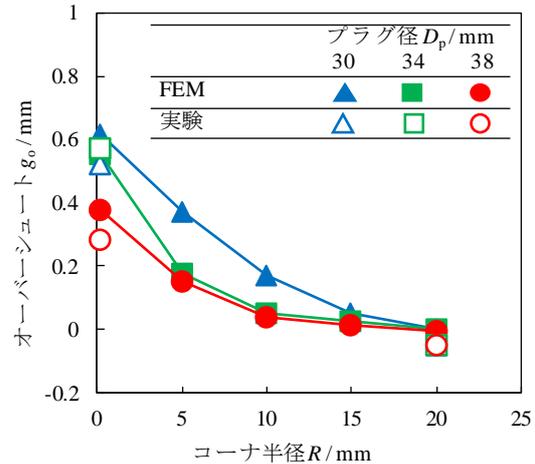


図11 ガイドが肉厚分布に及ぼす影響 (STKM13C 未処理材, プラグ半角  $\alpha=36^\circ$ , ガイド長さ  $L_{gp}=30\text{ mm}$ )

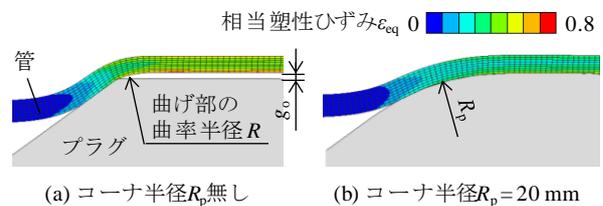


図12 プラグコーナ部近傍における変形形状 (STKM13C 未処理材,  $D_p=34\text{ mm}$ , プラグ半角  $\alpha=36^\circ$ , ガイド長さ  $L_{gp}=30\text{ mm}$ ,)

角部にコーナを設けることは有効であり、適正な  $R_p$  は 20 mm 程度であることが明らかになった。

## 4. まとめ

本研究では、高精度な薄肉管を効率的に製造する方法として、逃げ有りパンチを用いた回転口広げ加工および拡管型抽伸加工から構成される加工プロセスを提案し、それぞれの工程における適正工具形状を調査した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 逃げ有りパンチを用いた回転口広げ加工において、逃げ角  $\varphi$  および逃げ溝数  $n_r$  が成形限界に及ぼす影響を調査した。その結果、 $\varphi=20^\circ$  程度の場合に、最も高い成形限界が得られた。また、逃げ角  $\varphi$  や逃げ溝数  $n_r$  が増加すると、繰り返し曲げ・曲げ戻し変形によるひずみが蓄積しやすくなるため、割れが生じやすくなった。
- (2) 拡管型抽伸加工において、材種やプラグ形状(半角  $\alpha$ , ガイド, コーナ半径  $R_p$ ) の影響を調査した。その結果、材種によらず、 $\alpha=36^\circ$  の場合に高い成形限界が得られた。一方、素管の伸び性が高いほど、加工可能な最大の拡管量は大きくなる傾向を示した。成形品の偏肉を抑制するにあたっては、ガイドを用いるこ

とが有効であった。オーバーシュートの抑制にあたっては、プラグの角部にコーナを設けることが有効であり、適正な  $R_p$  は 20 mm であった。

### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人天田財団による研究助成を受けた。ここに記して、謝意を表す。

### 参考文献

- 1) Kajikawa, S., Kawaguchi, H., Kuboki, T., Akasaka, I., Terashita, Y., Akiyama, M.: *Metals*, **10-12** (2020), 1642.
- 2) Kajikawa, S., Iizuka, K., Kuboki, T.: *Proc. 10th Int. Conf. Tube Hydroforming* (2022), 211-216.
- 3) 内田究・久保木孝・梶川 翔平: 2023 塑加春講論 (2023), 49-50.
- 4) 張世良・川口光・久保木孝・赤坂勇・寺下雄三・秋山雅義・梶川翔平: *塑性と加工*, 63-743 (2022), 174-179.
- 5) Zhang, S., Kuboki, T., Akiyama, M., Kajikawa, S.: *J. Manuf. Sci. Eng.*, 146-7 (2024), 71005.
- 6) 張世良・久保木孝・秋山雅義・梶川翔平: 74 回塑加連講論 (2023), 87-88.