

薄肉管の効率的な製造を可能とする 拡管型抽伸加工法の開発

電気通信大学 機械知能システム学専攻
准教授 梶川 翔平

(2018年度 奨励研究助成(若手研究者) AF-2018034-C2)

キーワード：拡管，口広げ，抽伸，薄肉管

1. 研究の目的と背景

管の抽伸加工とは、管をダイスから引き抜くことによって、所定の寸法に加工する方法である。機械的強度、寸法精度および表面性状の向上を目的として行われ、抽伸加工品は幅広い産業分野において、構造材や配管部品などとして利用されている。一方、近年、部材軽量化のため、薄肉管の需要が高まっているが、抽伸加工において効率的に薄肉管を製造することは難しい。これは、1パスあたりの管肉厚の減少率（減肉率）を大きく設定しすぎると、抽伸荷重の大幅な増加によって、加工時に管が破断するためである。このため、抽伸加工によって薄肉管を製造する際は、複数回ダイスを通して、段階的に薄肉化する必要がある、加工に時間がかかる。

上記の問題を解決するため、拡管型抽伸加工法を提案する。図1に、提案手法の概略図を示す。まず口広げ工程にて、後続工程用のつかみ部を成形する。その後、口広げ部をつかみ、プラグを円管材から引き抜く。図2に示すように、本手法は、拡管時に円周方向に引張応力が働くため、従来の円周方向に圧縮応力が働く縮管型の抽伸加工と比べ、効率的な薄肉化が実現できる可能性がある。

本研究では、拡管型抽伸加工の加工特性を把握するとともに、薄肉管を製造するにあたって、適切な工具形状を明らかにすることを目的とした。まず、有限要素法（FEM）解析および小型の試験機を用いた実験によって提案手法の優位性を確認するとともに、基本的な加工特性を明らかにした。さらに、プロトタイプ機を用いた実験を行うことによって、薄肉管を製造するにあたって適正な工具形状や、成形品の強度を明らかにした。

2. 拡管型抽伸加工における加工特性の把握^{1)~3)}

2.1 解析および実験方法

拡管型抽伸加工の有効性を調査するため、FEM解析を行った。拡管と縮管抽伸において、減肉率をはじめとした加工特性を比較した。さらに、小型の試験機を用いた実験を行い、解析結果と比較することによって、解析結果の妥当性を検証した。

FEM解析には、Rockfield Software社にて開発された汎用有限要素法解析ソフトウェア“ELFEN”を用いた。図3にFEM解析モデルの概略を示す。拡管と縮管抽伸の加工特性を比較するため、図3(a)および(b)に示す2次元軸

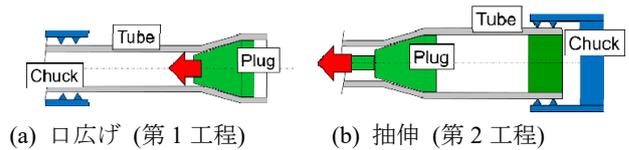
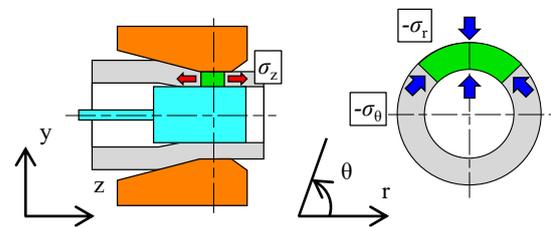
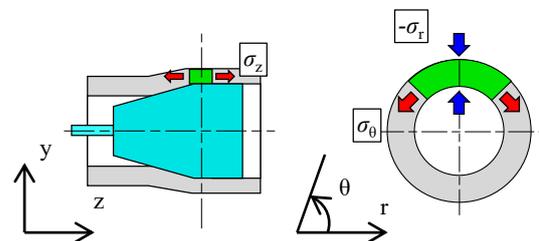


図1 拡管型抽伸加工の概要



$$\text{半径方向偏差応力 } \sigma_r' = -(2\sigma_r + \sigma_z - \sigma_\theta)/3$$

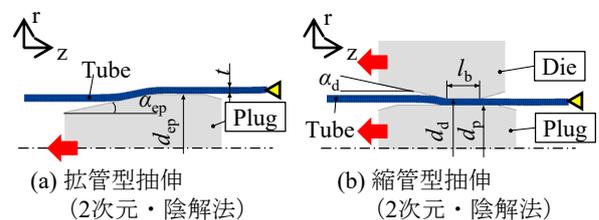
(a) 縮管型抽伸（従来手法）



$$\text{半径方向偏差応力 } \sigma_r' = -(2\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta)/3$$

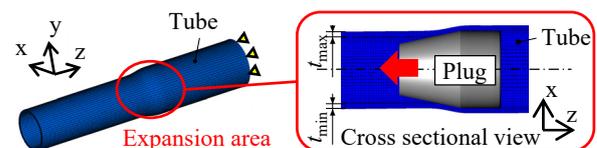
(b) 拡管型抽伸（提案手法）

図2 縮管型と拡管型の比較



(a) 拡管型抽伸
(2次元・陰解法)

(b) 縮管型抽伸
(2次元・陰解法)



(c) 拡管型抽伸 (3次元・陽解法)

図3 解析モデルの概略

対称モデルを作成し、静的陰解法を採用した。また、拡管抽伸において、管の初期偏肉の影響を検討するため、図3(c)に示す3次元モデルを作成し、動的陽解法を採用した。

実験では、図1(a)のように口広げ加工を施した管の口広げ部を、図1(b)のようにチャックでつかみ、油圧シリンダーにて、プラグを管から引き抜くことによって加工した。成形品を評価するため、拡管率 κ 、肉厚変化率 η 、減肉率 γ および偏肉率 λ は以下の式にて求めた。

$$\kappa = (d_{ep} - d_{i0}) / d_{i0} \quad (1)$$

$$\eta = -\gamma = (t - t_0) / t_0 \quad (2)$$

$$\lambda = (t_{max} - t_{min}) / t_{ave} \quad (3)$$

ここで、 d_{ep} はプラグ外径、 d_{i0} は管の初期内径、 t_0 および t は加工前後の管肉厚である。 t_{max} 、 t_{min} および t_{ave} は、それぞれ円周方向における肉厚の最大値、最小値および平均値である。

表1に供試材料を示す。鋼管(STKM13C)およびアルミニウム合金管(AA1070)を使用した。引張試験にて求めた応力-ひずみ線図をSwiftの式にて近似し、解析における材料特性として用いた。表2に加工条件を示す。拡管抽伸においては、成形品の肉厚 t を調整するため、プラグ径 d_{ep} を変化させた。縮管抽伸においては、ダイス径 d_d を一定

表1 供試材料

材料	STKM13C	AA1070
ヤング率 E / GPa	200	66
ポアソン比 ν	0.3	0.34
降伏応力 σ_y / MPa	637	88
Swift近似 $\sigma_{eq} = F(\epsilon_{eq} + \epsilon_0)^n$	$\sigma_{eq} = 725(\epsilon_{eq} + 0.0032)^{0.023}$	$\sigma_{eq} = 121(\epsilon_{eq} + 0.0013)^{0.048}$

表2 加工条件

管	初期外径 d_0 / mm		30
	初期肉厚 t_0 / mm		2, 4
初期長さ l_0 / mm	実験		200
	2D FEM		160
	3D FEM		170
プラグ (拡管型抽伸用)	半角 α_{ep} / °		12
	外径 d_{ep} / mm (拡管率 κ)		24-38 (0.07-0.46)
ダイス (縮管型抽伸用)	半角 α_d / °		12
	内径 d_d / mm		28
ベアリング長さ l_b / mm		9	
プラグ (縮管型抽伸用)	外径 d_p / mm (目標肉厚 g / mm)	$t_0 = 2.0$ mm	24-25 (1.5-2.0)
		$t_0 = 4.0$ mm	20-22 (3.0-4.0)
潤滑 (実験)		プレス工作油 G-3344	
摩擦係数 μ (FEM)		0.1 (STKM13C) 0.25 (AA1070)	

として、プラグ径 d_p を変化させることによって、成形品の肉厚 t を調整した。

2・2 拡管型抽伸加工における減肉特性

図4に、拡管抽伸において、拡管率 κ が減肉率 γ に及ぼす影響を示す。なお、加工後の軸方向ひずみ ϵ_z が0と仮定して求めた理論値もあわせて示している。FEM解析によって求めた γ は、 κ の増加にともなって上昇し、理論値ともおおそ一致した。したがって、拡管抽伸において、管は軸方向にあまり変形せず、主に周方向に伸ばされる。

図5に、拡管と縮管抽伸における減肉率 γ と加工荷重 P の関係を示す。拡管抽伸の方が、低荷重にて高い γ が得られており、効率的な薄肉化を実現している。また、縮管抽伸の場合、所定の P に達すると、 γ が急激に増加する現象が見られた。実際は、この領域において、管にくびれが発生し、破断すると考えられる。拡管抽伸の場合に、このような現象は確認されなかった。したがって、拡管抽伸の方が高い減肉率まで加工できる可能性がある。

図6に減肉率 γ がおおよそ0.1の場合(図5(i)および(ii))における軸方向および半径方向の偏差応力 σ_r 、 σ_θ およびひずみ ϵ_z 、 ϵ_r 分布を示す。縮管抽伸の場合、テーパ部において周方向に縮むため、半径方向の偏差応力 σ_r が大きくなり厚肉化する。厚肉化した管壁をダイおよびプラグにてしごく必要があるため、管は軸方向に伸ばされ、加工荷重 P は大きくなる。拡管抽伸の場合は、まず、図6[A]の部分において、周方向に伸ばされるため、半径方向の偏差応力 σ_r が小さくなり、管壁は薄肉化する。図6[B]に達すると、管壁が軸方向に強く引っ張られるため、負の偏差応力 σ_r が作用し、さらに薄肉化する。上記のFEM解析の結果、管肉厚を減少させるにあたって、拡管抽伸は縮管抽伸よりも効率が良いことが示された。

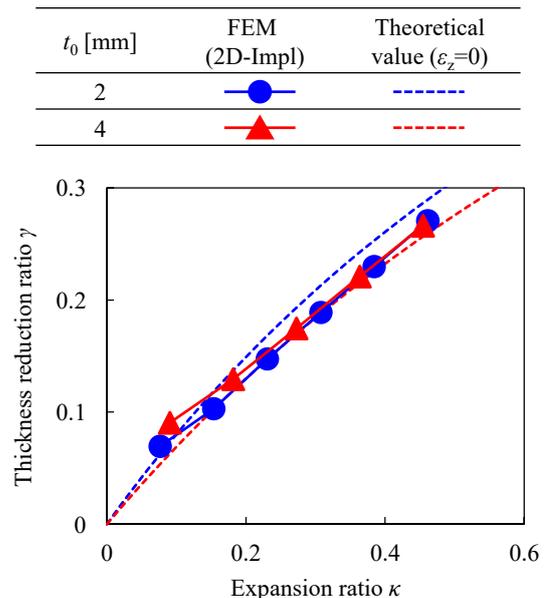


図4 減肉率 γ に及ぼす拡管率 κ の影響 (FEM, 2次元軸対称モデル)

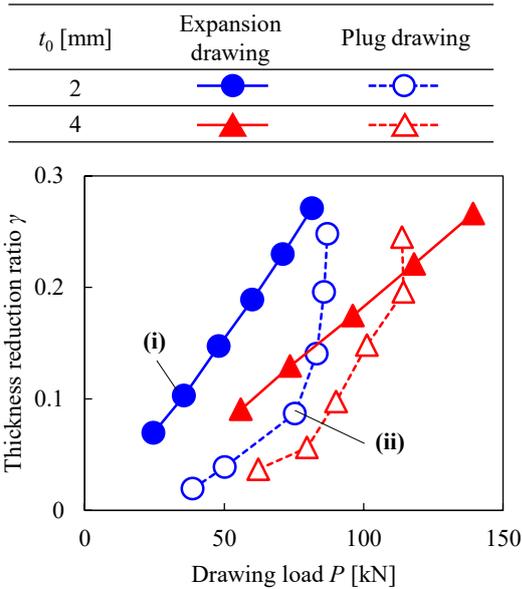


図5 減肉率 γ と加工荷重 P の関係

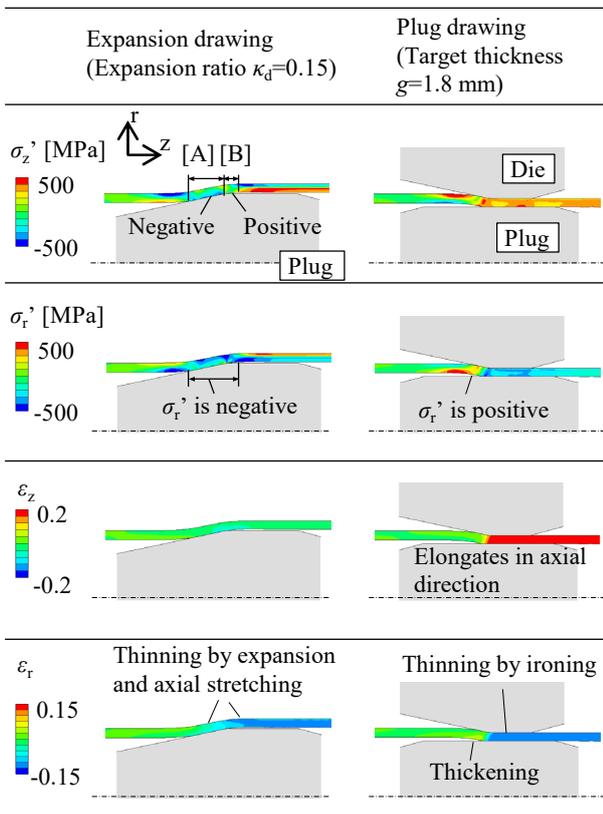


図6 偏差応力 σ_z' , σ_r' およびひずみ ε_z , ε_r の分布 ($t_0=2$ mm)

2・3 実験による検証

拡管抽伸実験を行い、FEM 解析結果と比較した。表 3 に、実験における加工可否を示す。いずれの材料においても、拡管率 κ が大きくなると、成形不良として、割れが発生した。AA1070 の方が、高い κ においても割れにくい傾向を示した。これは、表 1 に示すように、AA1070 の n 値が STKM13C よりも高く、伸びやすい材料だったためと考

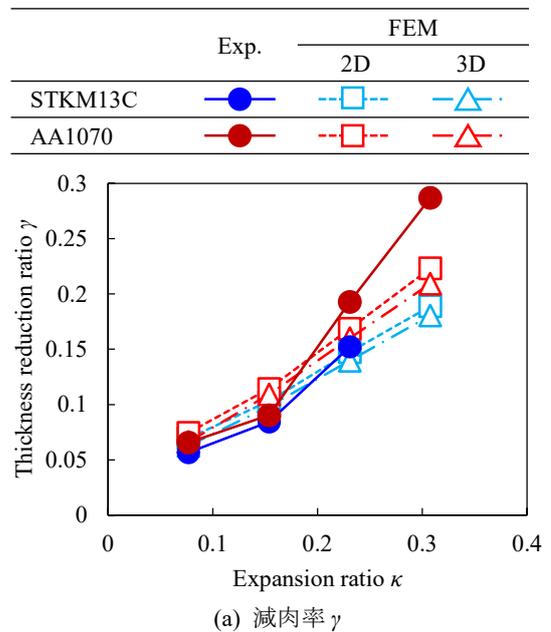
えられる。

図 7 に、減肉率 γ および偏肉率 λ に及ぼす拡管率 κ の影響を示す。図 7 (a) に示すように、 κ が大きくなるほど、 γ は増加する傾向を示した。特に、AA1070 の場合においては、 κ が 0.31 のとき、 γ が最大の 0.29 に達した。実験結果を FEM 解析結果と比較すると、 $\kappa=0.08\sim 0.23$ の範囲において、解析結果は実験結果とおおよそ一致した。しかしながら、 $\kappa=0.31$ では実験結果が解析結果よりも大幅に高い値となった。これは、 $\kappa=0.31$ の条件にて、局所的な薄肉化が生じたことが原因であり、詳細については後述する。

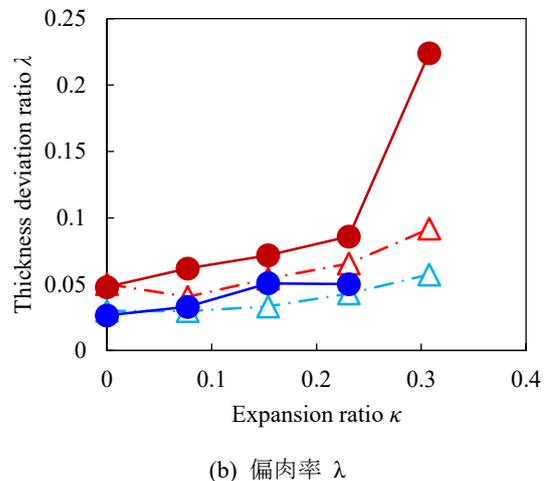
表 3 拡管型抽伸における加工可否

Material	Expansion Ratio κ				
	0.08	0.15	0.23	0.31	0.38
STKM13C	s	s	s	c	-
AA1070	s	s	s	s	c

s: Success, c: Crack



(a) 減肉率 γ



(b) 偏肉率 λ

図 7 減肉率 γ および偏肉率 λ に及ぼす拡管率 κ の影響

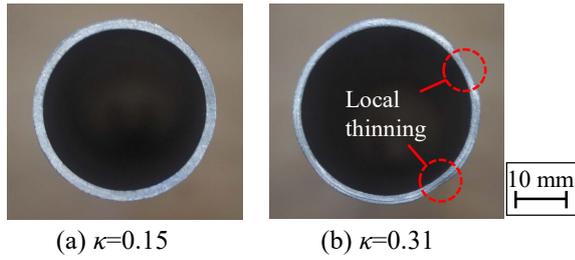


図8 管断面の様子 (AA1070)

偏肉率 λ に関しては、図7(b)に示すように、拡管率 $\kappa=0\sim 0.23$ の範囲において、大きな変化が見られなかった。一方、AA1070の場合、 $\kappa=0.31$ の場合に λ が急激に増加した。これは、図8(b)に示すように、局所的な薄肉化が生じたためである。したがって、偏肉の少ない管を成形するためには、局所的な薄肉化が生じない程度の拡管率 κ に設定する必要がある。

3. プロトタイプ機を用いた拡管型抽伸実験

3-1 実験条件

口広げおよび抽伸を一貫して行うことができるプロトタイプ機を作製し、図9に示すように、長尺な管を用いた加工実験を行った。プラグ半角 α は拡管限界に大きく影響を及ぼす可能性がFEM解析により明らかになっている⁴⁾。そこで、プラグ半角 α が最大拡管率 κ_{max} や減肉率 γ に及ぼす影響を系統的に調査した。

表4に本調査における加工条件を示す。半角 α および外径 D_p が異なる様々なプラグを用いて実験を行った。図10に本実験で見られた成形不良の代表例を示す。図10(a)~

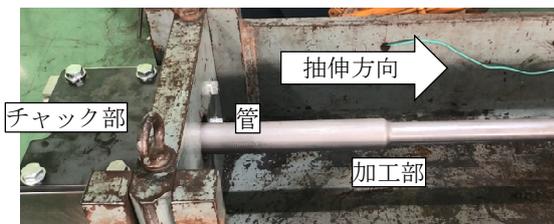


図9 プロトタイプ機を用いた実験

表4 加工条件

管	材料	STKM13C
	初期外径 d_0 / mm	30
	初期肉厚 t_0 / mm	2
	初期長さ l_0 / mm	600
プラグ	半角 α / °	12, 24, 36, 48
	平行部長さ B_p / mm	15
	外径 D_p / mm (拡管率 κ)	30, 32, 34, 36, 38 (0.15, 0.23, 0.31, 0.37, 0.46)
潤滑		カストル油 (S-846M)

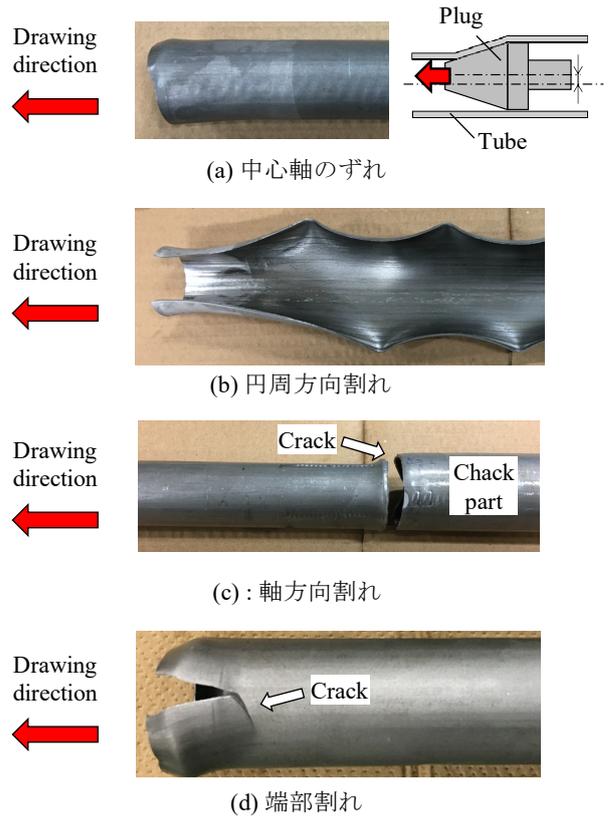


図10 拡管型抽伸加工における成形不良

(c)の不良が生じなかった成形品に対して、寸法測定を行い、減肉率 γ やオーバーシュート δ を求めた。なお、 δ は以下の式より求めた。

$$\delta = (d - 2t - d_{ep}) / 2 \quad (4)$$

ここで、 d および t は成形品の外径および肉厚、 d_{ep} はプラグ径である。 δ が小さいほど、内径の寸法精度が高いとして評価した。さらに、成形品の強度を評価するため、引張試験を行った。

3-2 プラグ半角 α が成形可否に及ぼす影響

表5に、成形可否を示す。プラグ半角 α が大きくなるほど、成形可能な拡管率 κ は上昇し、 $\alpha=36^\circ$ のときに、不良なく成形可能な最大拡管率 $\kappa_{max}=0.38$ に達した。一方で、 $\alpha=48^\circ$ になると、プラグのテーパ長さが大幅に短くなるため、加工時に偏心が生じやすくなり、 $\kappa=0.13$ では図10(a)のように中心軸がずれた形状に成形された。また、 $\alpha=48^\circ$ 、 $\kappa=0.23$ では、図10(c)に示すように、軸方向の割れが生じ、成形不可であった。

3-3 プラグ半角 α が抽伸荷重に及ぼす影響

図11に、拡管率 κ とプラグ半角 α が抽伸荷重 P に及ぼす影響を示す。 κ および α が大きくなるにともなって、 P も上昇する傾向を示した。特に、 $\alpha=36^\circ$ および 48° にて

表 5 プラグ半角 α が成形可否に及ぼす影響

Half angle $\alpha / ^\circ$	Expansion Ratio κ				
	0.13	0.23	0.30	0.38	0.46
12	s	s	hc		
24	s	s	s	ec	hc
36	s	s	s	s	ec
48	e	ac			

s: Success, e: Eccentric, ac: Axial crack,
hc: Hoop crack, ec: Edge crack

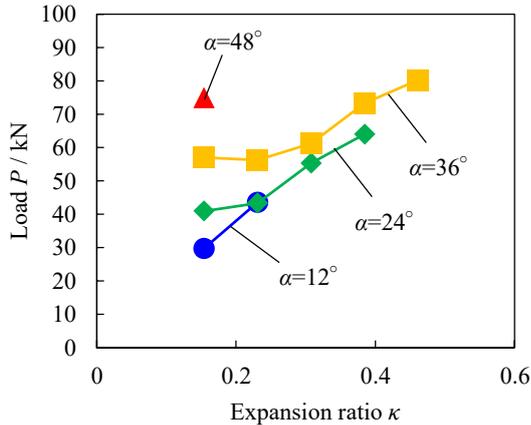


図 11 加工荷重 P に及ぼす拡張率 κ および半角 α の影響

P が上昇する傾向を示した。これは、 α が大きくなるほど、拡張時における曲げ・曲げ戻し変形が大きくなるためである。特に、 $\alpha=48^\circ$ 、 $\kappa=0.23$ の条件では、軸方向荷重が過大となったため、管が軸方向に伸ばされ、図 10 (c) に示すような軸方向割れが生じたと考えられる。

3・4 プラグ半角 α が減肉率 γ およびオーバーシュート δ に及ぼす影響

図 12 に、拡張率 κ とプラグ半角 α が減肉率 γ に及ぼす影響を示す。なお、加工後の軸方向ひずみ ε_z が 0 と仮定して求めた理論値もあわせて示している。 κ が大きくなるにともなって減肉率 γ も大きくなり、 $\alpha=36^\circ$ のプラグを用いた際に最大減肉率 $\gamma_{\max} = 0.33$ に達した。これは、従来の縮管抽伸における 1 パスあたりの減肉率である 20% よりも高く、薄肉管を製造するにあたって、拡張抽伸が従来手法より優れている可能性が示された。また、 α の影響に着目すると、 α が多いほど γ は高くなる傾向を示した。この現象は、図 11 に示すように、 α の増加にともなって上昇した加工荷重 P によるものと考えられる。加工荷重の上昇によって、管壁が軸方向に引き伸ばされ、薄肉化が促進されたと考えられる。

図 13 に、拡張率 κ とプラグ半角 α がオーバーシュート δ に及ぼす影響を示す。 κ が大きくなると δ は小さくなる傾向を示した。これは、 κ の増加にともなって増加した軸方向の引張力が、管の半径方向への広がりを抑えたためだと考えられる。また同じ κ であっても、 α が大きいほど δ が大きくなる傾向にあった。

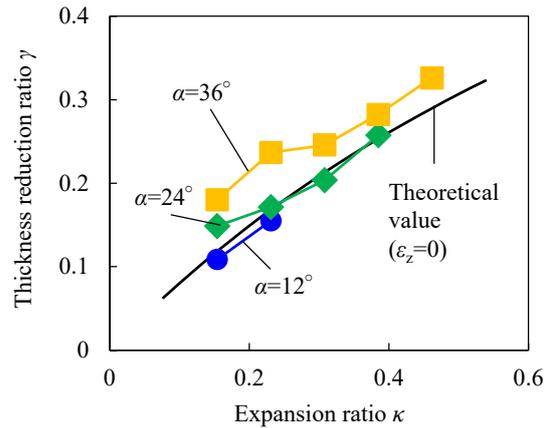


図 12 減肉率 γ に及ぼす拡張率 κ および半角 α の影響

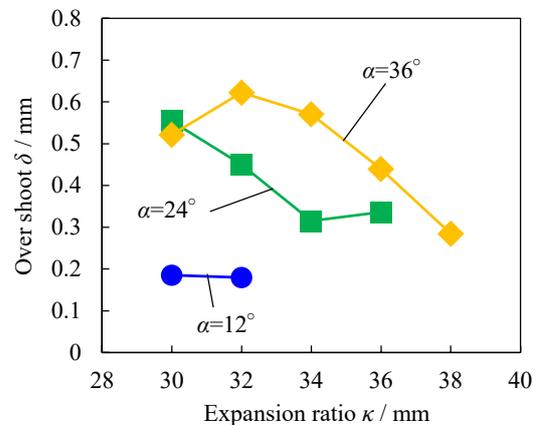


図 13 オーバーシュート δ に及ぼす拡張率 κ および半角 α の影響

プラグ半角 α の増加にともない、減肉率 γ やオーバーシュート δ が増加した原因に関して、さらなる検討を加えるため、図 3 (a) に示すモデルを用いて、FEM 解析を行った。図 14 に、拡張率 $\kappa=0.23$ の場合において、 α が軸方向ひずみ ε_z の分布に及ぼす影響を示す。 α が大きくなると、プラグ角部における曲げ変形によって生じる ε_z が増加する。この曲げ変形量の増加により、抽伸荷重 P も図 11 に示すように増加する。 P の増加によって、平行部における軸方向ひずみが増大し、その結果として、減肉率 γ が大きくなったと考えられる。一方で、 α が大きくなると、プラグ角部における曲げ変形量が大きくなるため、図 14 (c) に示すように δ が大きくなる。曲げ変形量の増加によって生じる δ を減少させ、管内径の寸法精度を高めるためには、プラグ角部にコーナー半径を設けることが有効と考えられる。

3・5 プラグ半角 α が成形品の強度に及ぼす影響

拡張率 $\kappa=0.23$ の条件にて加工した成形品の引張試験を行い、プラグ半角 α が成形品の応力・ひずみに及ぼす影響を調査した。図 15 に、 α を変化した場合における成形品の公称応力 σ_n -公称ひずみ ε_n 線図を示す。拡張抽伸によって、管の引張強度が向上した。これは加工硬化によるも

のと考えられる。一方、 $\alpha=12^\circ$ のプラグにて加工した管の伸びは、素管の伸びよりも高くなった。また、 $\alpha=12$ および 24° の場合に、素管よりも成形品の降伏点が低くなる傾向を示した。この原因として、バウシinger効果が考えられる。引張試験において、管は軸方向に伸ばされ、円周方向に縮む。一方、拡管抽伸においては、軸方向の変形は小さく、円周方向に伸ばされる。両者の円周方向の変形は逆方向であるため、低い拡管率にて拡管抽伸した管は、降伏点の低下や、伸びの上昇が生じた可能性がある。これは、縮管抽伸では見られない現象であり、拡管抽伸にて加工した管が、一般的な縮管抽伸にて加工した管と異なる強度特性を有する可能性を示唆している。これに関しては、今後、さらなる検討が必要である。

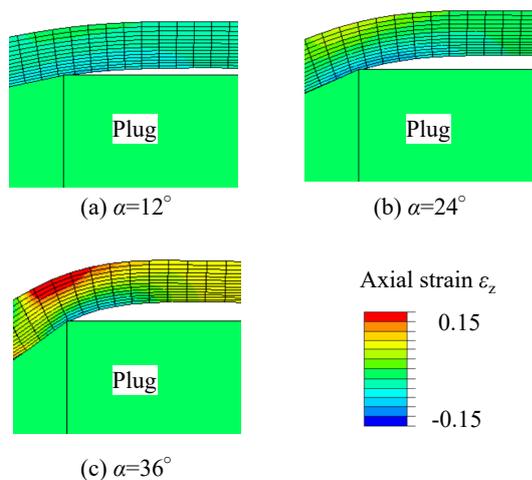


図 14 軸方向ひずみ ϵ_z 分布に及ぼすプラグ半角 α の影響 (拡管率 $\kappa=0.23$)

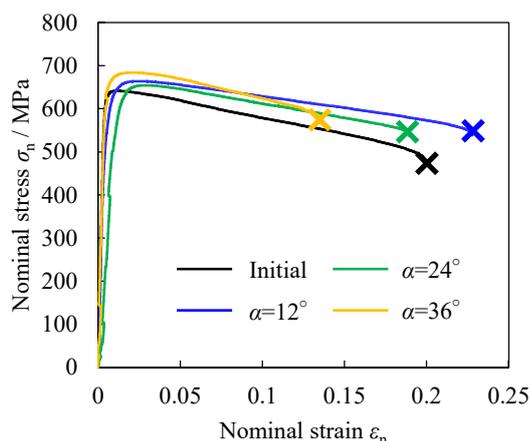


図 15 成形品の応力-ひずみ線図 (拡管率 $\kappa=0.23$)

4. まとめ

本研究では、薄肉管を効率的に製造する手法として、拡管型抽伸加工を提案した。基本的な加工特性を明らかにするとともに、成形限界や減肉特性を向上させるにあたって適切な工具形状を明らかにした。さらに成形品の寸法精度や強度を評価した。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) FEM 解析によって、従来の縮管型抽伸加工と比較した結果、拡管抽伸は縮管抽伸よりも低荷重で、高い減肉率が得られることがわかった。
- (2) 拡管抽伸では、円周方向に大きく伸ばされることによって肉厚が減少する。また、縮管抽伸と異なり、軸方向の変形量は小さい。
- (3) プラグ半角 α によって、成形限界は大きく変化する。供試材料として STKM13C を用いた場合、 $\alpha = 36^\circ$ のプラグを用いると、拡管率 $\kappa=0.46$ まで加工することができ、そのときの減肉率 γ は 0.33 であった。これは、縮管抽伸における 1 パスあたりの減肉率 γ よりも高い。
- (4) 抽伸後の管内径とプラグ径の隙間長さを表すオーバーシュート δ は、プラグ半角 α が小さく、プラグ径 d_{ep} が大きい条件になるほど小さくなる。
- (5) 拡管抽伸後の材料は、加工硬化によって引張強度が上昇した。一方、降伏点の低下や、伸びの上昇など、縮管抽伸にて加工された管では見られない特性が見られた。

謝 辞

本研究では、公益財団法人天田財団のご援助によって薄肉管の製造方法としての拡管型抽伸加工法を提案でき、その有効性を検証することができました。また、さらなる研究を進めるにあたって有用な知見を得ることができました。ここに、公益財団法人天田財団に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kajikawa, S., Kawaguchi, H., Kuboki, T., Akasaka, I., Terashita, Y. & Akiyama, M.: Proc. 9th Int. Conf. Tube Hydroforming (2019), 67-74.
- 2) 川口光・梶川翔平・久保木孝・赤坂 勇・寺下 雄三・秋山雅義：70 回塑加連講論 (2019), 235-236.
- 3) Kajikawa, S., Kawaguchi, H., Kuboki, T., Akasaka, I., Terashita, Y. & Akiyama, M.: Metals, **10-12** (2020), 1642.
- 4) Kajikawa, S., Kawaguchi, H., Kuboki, T., Akasaka, I., Terashita, Y. & Akiyama, M.: Proc. COMPLAS XV (2019), 48-58.
- 5) 日本塑性加工学会：引抜き加工-基礎から先端技術まで-, (1990), 2, コロナ社.