

修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工 学研究科 知能機械工学 専攻 博士前期課程		
氏 名	田坂 俊祐	学籍番号	1532050
論 文 題 目	初期偏肉を有する管抽伸において工具形状が加工後の寸法精度に及ぼす影響		
<p style="text-align: center;">要 旨</p> <p>抽伸加工とは、金属材料をダイスに通して引抜くことで、ダイス穴形状と外径形状が同一となる棒、線および管材を製造する加工法である。抽伸加工された成形品は寸法精度や表面性状が良好であり、なおかつ大量生産が可能であるため、棒、線および管材の成形方法として産業界で広く用いられている。単純な抽伸加工において解決すべき問題は形状精度、残留応力、強度など多々あり、これまで問題解決のために多くの研究がなされてきた。しかし、これらの研究では素材が軸対象である場合が多く、素材が非軸対象である場合や、偏肉が存在して肉厚分布が不均一となっている場合の変形挙動に関する報告は少ない。素材となる円管の成形過程において、偏肉は不可避免的に発生し、抽伸加工後の成形品の寸法精度に影響を与える可能性がある。切削加工などを用いれば改善することも可能であるが、作業工程やコストの増加を招くため、追加工を行う場合は少なく、偏肉を有する円管をそのまま素材として用い、抽伸加工を行っている。したがって、初期偏肉を有する管を用いた抽伸加工において、工具形状が成形品の寸法精度に与える影響を定量的に示すことができれば、成形品の寸法精度の向上が期待できる。そこで本研究では、抽伸加工において、有限要素法解析により調査を行い、抽伸加工中の変形挙動を明らかにし、工具形状が成形品に与える影響を示した。</p> <p>抽伸加工時に厚肉側の材料のみが工具との接触により肉厚増加を妨げられる領域が存在する。この領域では、工具によって拘束されていない薄肉側が大きく増肉するため、偏肉率が減少する。また、ダイス半角を減少させることで、材料と工具の接触範囲が増加し、上記の厚肉側の増肉のみが妨げられる領域も増加する。このため、半角の小さいダイスを用いることが、成形品の偏肉率を減少させるにあたり有効である。円管の初期肉厚を増加させることで、薄肉側にかかる周方向圧縮応力が増加するため、厚肉側からプラグにかかる荷重よりも、薄肉側からプラグにかかる荷重の方が大きくなる。このため、プラグは厚肉側へ移動し、成形品の偏肉率は減少する。加えて、材料外径を大きくすることで、材料とダイスの接触面積が増加し、肉厚が増加する領域が増える。このため、材料がプラグに接触する時点での材料肉厚が大きくなり、初期肉厚が増加した場合と同様に成形品の偏肉率が減少する。</p>			

平成 28 年度 修士論文

初期偏肉を有する管抽伸において
工具形状が加工後の寸法精度に及ぼす影響

報告者

電気通信大学大学院

情報理工学研究科

知能機械工学専攻

1532050

田坂 俊祐

指導教員

久保木 孝 教授

松村 隆 准教授

提出日：平成 29 年 1 月 30 日

目次

第1章 序論	1
1.1 緒言	2
1.2 円管材の生産過程	3
1.3 抽伸加工	4
1.4 研究目的	5
1.5 構成	6
第2章 解析モデルの最適分割数の検討	7
2.1 数値解析	8
2.1.1 目的	8
2.1.2 2次元数値解析手法	8
2.2 解析条件	9
2.3 2次元モデルを用いた分割数の検討	11
2.3.1 分割数の検討手法	11
2.3.2 半径方向分割数の検討	11
2.3.3 軸方向分割数の検討	14
2.4 最適分割数の決定と備考	15
第3章 工具形状が成形品の偏肉率へ与える影響	17
3.1 数値解析	18
3.1.1 目的	18
3.1.2 3次元解析手法	18
3.1.3 3次元解析条件	20
3.2 解析結果	22
3.2.1 ダイス半角の影響	22
3.2.1.1 プラグを用いない抽伸加工	22
3.2.1.2 プラグを用いる抽伸加工	26
3.2.2 円管外径の影響	29
3.2.3 肉厚の影響	32
3.3 結言	35
第4章 偏肉率を減少させる工具形状の提案	36
4.1 目的	37
4.2 解析結果考察	38
4.2.1 ダイス半角の影響	38
4.2.1.1 プラグを用いない抽伸加工	38
4.2.1.2 プラグを用いる抽伸加工	43
4.2.2 円管外径の影響	50
4.2.3 肉厚の影響	55
4.3 工具形状の提案と検証	64

第5章 結言	67
5.1 結言	68

参考文献

謝辭

平成二十八年

修士論文

初期偏肉を有する管抽伸において工具形状が加工後の寸法精度に及ぼす影響

田坂

俊祐

第1章 序論

1.1 緒言

抽伸加工とは Fig. 1.1 に示すように、金属材料をダイスに通して引抜くことによって、ダイス穴形状と外径形状が同一となる棒、線および管材を製造する加工法である。抽伸加工品の成形品は寸法精度や表面性状が良好であり、材料表面が加工硬化することにより材料の強度を確保できる。そのため、抽伸加工は橋梁のワイヤ、タイヤのコードワイヤなどの中実材、自動車部品、油井管などの円管材をはじめとする、強度を必要とする製品の成形に用いられている。また作業を連続かつ高速に行えるため、大量生産が可能であり、低コストでの生産が可能であるため、棒、線および管材の成形方法として産業界で広く用いられている。単純な抽伸加工においても解決すべき問題は多々あり、これまでに問題解決のための研究がなされてきた^{1)~3)}。これらの研究では素材が軸対称である場合が多く、素材が非軸対称である場合や、肉厚分布が不均一となっている、偏肉が存在している場合の変形挙動に関する報告は少ない。しかしながら、円管の成形過程では偏肉が不可避免的に発生する。切削加工を行うことで成形品の偏肉を改善することも可能であるが、作業工程が多くなり、生産コストの増加に繋がってしまうため、追加工を行う場合は少ない。そのため、偏肉を有する円管をそのまま素材として用い、抽伸加工を行っている。そこで、初期偏肉を有する管を用いた抽伸加工において、工具形状が成形品の寸法精度に与える影響を定量的に示すことができれば、成形品の寸法精度の向上や、偏肉を改善させる作業工程の必要性の有無を事前に判断することが可能となり、作業工程の効率化が期待できる。

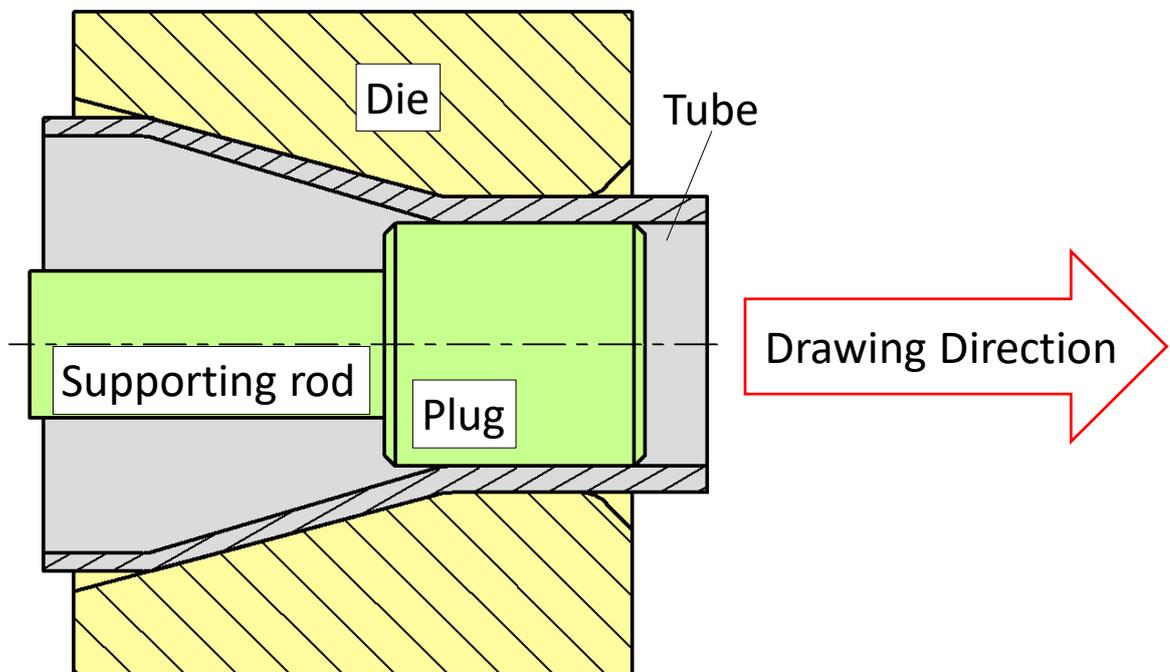


Fig. 1.1 Drawing

1.2 円管材の生産過程

円管材料の生産過程を Fig. 1.3.1 に示す。円管の生産は最初に円管の成形を行い、次に抽伸加工を行い外径や肉厚を整えて、最後に矯正を行う。円管材の成形方法には、穿孔を行った後に圧延を行う方法と、ロールフォーミングの2つの手法がある。穿孔・圧延による成形では、円管の外形を3ロールによって加工を行うため、ロールと円管には接触部と非接触部が発生し、偏肉が発生する⁴⁾。また、ロールフォーミングは板材を円管状に成形し、継目を溶接することで円管を成形する。この際、素材となる板材の寸法精度や成形精度、継目を溶接する際の熱応力の影響により、偏肉が発生する⁵⁾。以上のように、高い加工精度を有する近年の製造技術を以ってしても、円管を成形する際には必ず偏肉が発生する。また最終工程である矯正は、円管の曲がりや歪みを低減させる加工法であり、円管材の寸法は変化しない。そのため抽伸加工での成形品の寸法が、円管材料の最終的な寸法となる。したがって偏肉を有する円管の抽伸加工における、偏肉の増減のメカニズムを明らかにすることは、円管材料の寸法精度を向上させる上で重要となる。

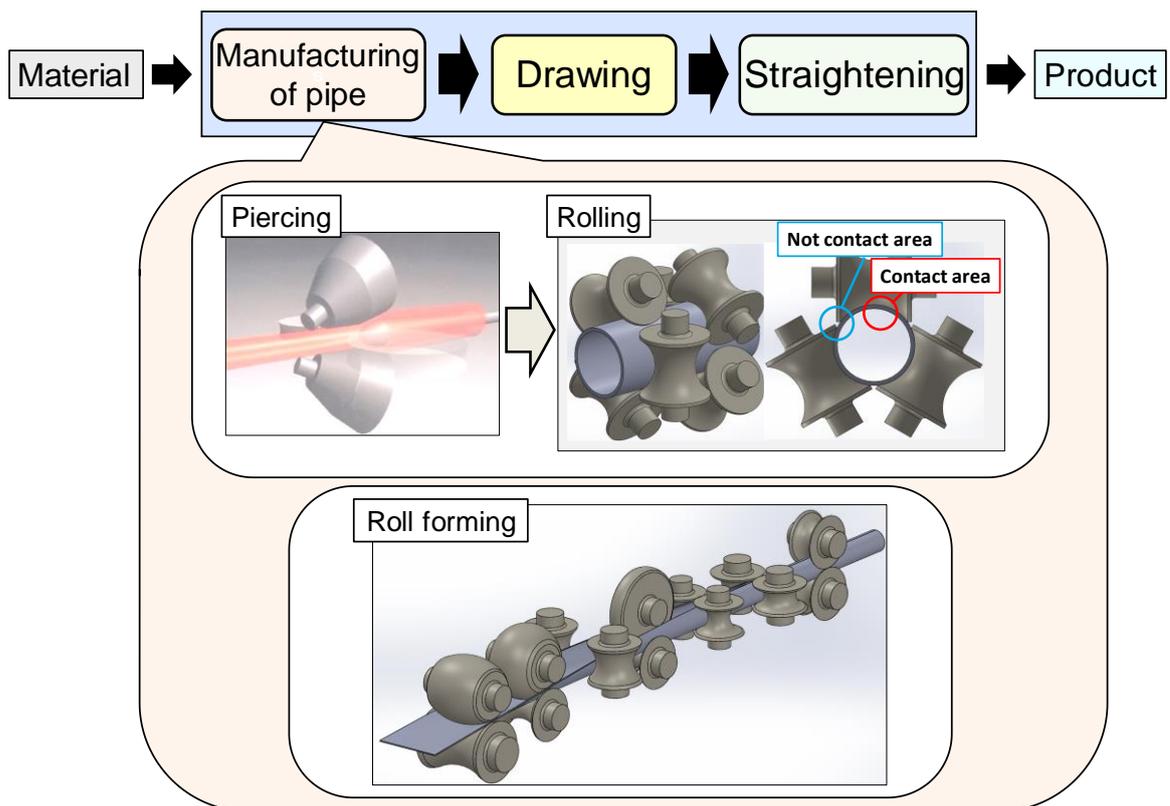


Fig. 1.2 Variation of pipe drawing

1.3 抽伸加工

中空の材料を用いた抽伸加工は Fig. 1.3 に示すように、プラグの有無や種類によって、幾つかの種類に分けられる。プラグを用いない空引(Fig. 1.3(a)), 固定されたプラグを用いた心金引き(Fig. 1.3(b)), プラグを固定しない浮きプラグ引き(Fig. 1.3(c)), 長尺のマンドレルを用いるマンドレル引き(Fig. 1.3(d))などの種類がある。その中でも心金引きはプラグを用いることによって、外面だけでなく内面の表面性状を良好に仕上げることが可能であり、プラグ自体を支持棒で支えることで高い寸法精度の成形品の成形が可能である。円管の製造過程では、抽伸加工を複数回行うことで、材料の減径や肉厚の調整を行うが、心金引きは最終工程の抽伸加工として広く用いられている。したがって、心金引きにおける加工品の寸法精度を向上させることが、そのまま製品の寸法精度の向上に繋がる。そこで本研究では、心金引きにおける円管材料の変形挙動の解明を行う。

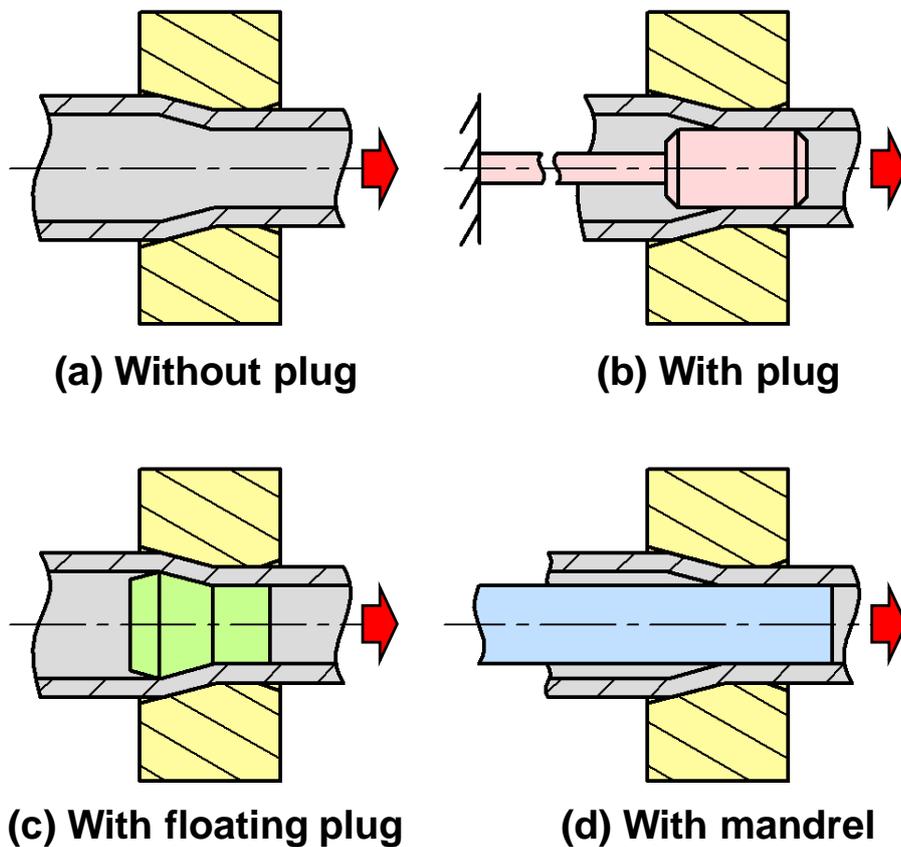


Fig. 1.3 Variation of pipe drawing

1.4 研究目的

本研究と同様に抽伸加工や、その後工程である矯正加工における、円管の偏肉の動向を調査している研究は報告されている^{6),7)}。しかしながら現在報告されている手法は、生産現場で実用することが難しい。そこで本研究では、初期偏肉を有する円管を用いた抽伸加工を有限要素法解析によって行い、工具形状が成形品の偏肉率に与える影響を調査する。解析を行うことにより抽伸加工中の変形挙動を明らかにし、工具形状による偏肉率増減のメカニズムを明らかにすることで、生産現場においても実用が可能な成形品の偏肉率の低減させる加工条件を示す。

1.5 構成

本論文は以下の全5章で構成される。

第1章は、緒言であり本研究の背景および研究目的について述べる。

第2章では、数値解析による解析手法を示し、解析モデルにおける最適分割数を、2次元モデルを用いて明らかにする。

第3章では、3次元モデルの概要と各条件による解析結果を示し、工具形状が成形品の偏肉率に与える影響を示す。

第4章では、第3章における偏肉率増減のメカニズムを明らかにし、偏肉率を減少させる工具形状を提案する。

第5章は結言であり、各章のまとめを述べる。

第2章 解析モデルの最適要素数の検討

2.1 数値解析

2.1.1 目的

偏心管を用いた抽伸加工の解析では、肉厚が周方向に移動することを考慮しなければならないため、3次元モデルによる解析が必要不可欠である。そのため、本研究における解析には3次元の解析モデルを用いるが、3次元モデルを用いた解析は、2次元モデルと比べて多大な時間を要してしまう。要素数を少なくすることで解析時間は短くできるが、要素数を少なくすると正しい解析結果が得られない可能性がある¹⁾。そこで本章では、解析を行う前段階として、2次元モデルを用いた偏肉を有さない円管の抽伸加工を行い、円管に対する最適要素数を、各方向の中で最も大きい値をとる軸方向の残留応力の解析精度に着目し検討した。

2.1.2 2次元数値解析手法

本研究で用いた数値計算ツールは、英国 Wales 大学 Swansea 校内の Rockfield Software 社にて開発された有限要素法汎用コード“ELFEN”⁹⁾である。解析手法として精度の良い陰解法を用い、ロッキング現象を防止するために F-bar 要素⁸⁾を採用した。通常、産業上で実施されている引抜き速度は 30~150m/min 程度である。したがって、慣性力の影響は小さいものとして考え、加速度成分は考慮しない静的解法を用いた。境界条件としてダイスと材料の境界に垂直方向に面圧が発生するとし、工作油を塗布して加工することを考慮し、摩擦係数 0.07 を乗じた摩擦力がすべり方向と反対向きに発生すると仮定した¹⁰⁾。Fig. 2.1.1 に2次元モデルにおける解析モデルの概略を示す。2次元モデルには、軸対称であることを前提としたモデルを使用し、被加工材を弾塑性体、ダイス、プラグ、支持棒を剛体として解析を行った。

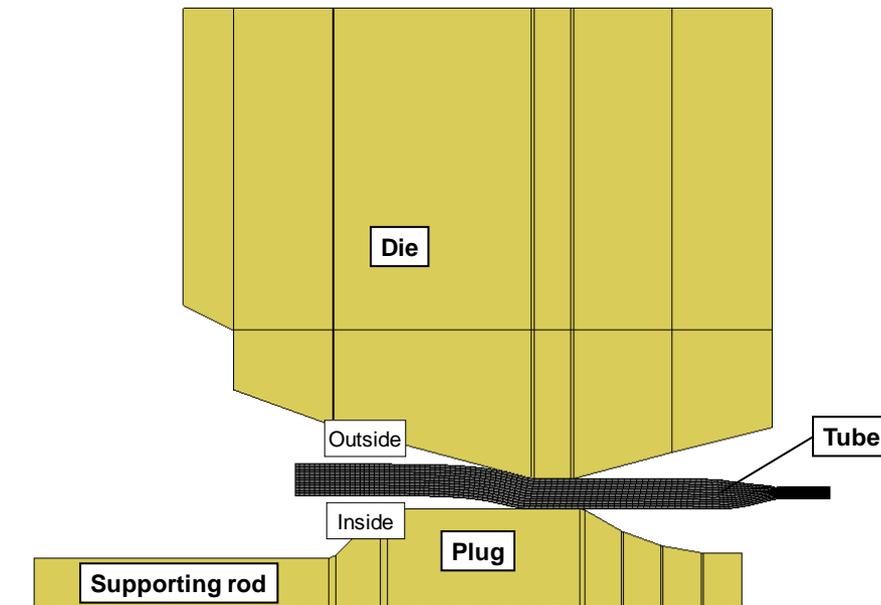


Fig. 2.1.1 Example of FEM mesh for tube drawing with plug in 2D analysis

2.2 解析条件

偏心管の材料にはアルミニウム合金 A1070 を用いた。引張試験を行い、その実験結果を Swift の式により近似し、解析上の応力とひずみの関係式として用いた。Swift の式を以下の 2.1 式に示す。

$$\sigma = F(\varepsilon^p + \varepsilon_0)^n \quad (2.1)$$

使用したアルミニウム合金 A1070 の材料特性を Table 2.2.1 に、Fig. 2.2.1 に真応力-真ひずみ線図を示す。また、抽伸加工の概念図を Fig. 2.2.2 に、2次元モデルにおける解析条件を Table 2.2.2 に示す。解析条件は、産業上の加工条件と同等の条件となるように定めた。

Table 2.2.1 Mechanical property of material

Material	A1070
0.2% proof stress	89.9 MPa
Young's modulus	68.3 GPa
Hardening exponent n	0.0348
Strength coefficient F / MPa	110
Offset of yield strain ε_0	9.93×10^{-8}

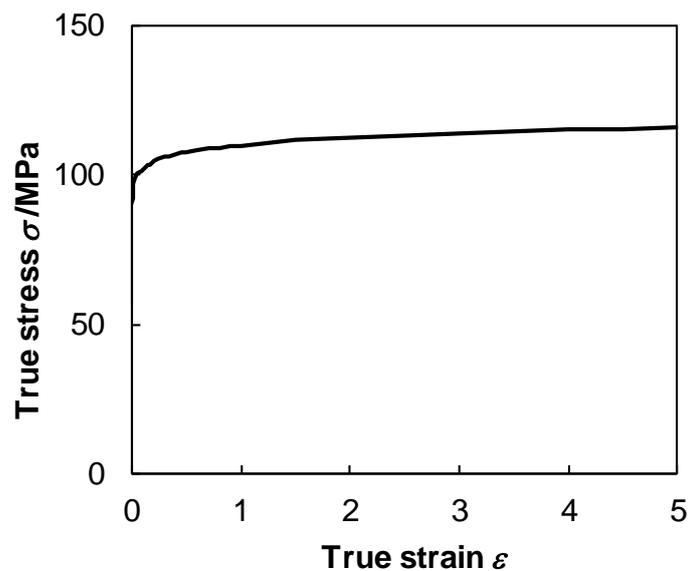


Fig. 2.2.1 True stress - true strain diagram

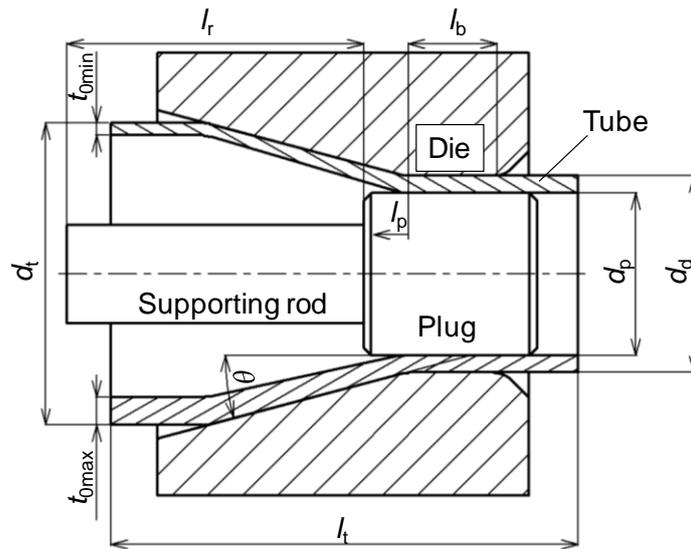


Fig. 2.2.2 Drawing

Table 2.2.2 2D Analysis condition

Die	Type	Rigid
	Die hole diameter d_d /mm	30
	Die half angle θ /°	15
	Bearing length l_b /mm	4
Plug	Condition	Rigid
	Plug diameter d_p /mm	24
Tube	Type	Plastic
	Material of tube	A1070
	Tube outer diameter d_t /mm	31.5
	Tube thickness t_0 /mm	3.2
	Length of tube l /mm	50
	Initial thickness variation $\Delta t_0 = t_{0\max} - t_{0\min}$ /mm (Initial thickness variation rate ϵ_0)	0 (0)
Coefficient of friction μ		0.07

2.3.2 次元モデルを用いた要素数の検討

2.3.1 要素数の検討手法

要素数が少ないと、解析結果が正常に現れない場合や、正常な結果であっても大まかな結果しか出力ができない場合がある。そこで本章では、半径方向要素数 N_r を変化させて、それぞれの軸方向残留応力分布を比較する。軸方向に対して一様な解析結果が出力できている結果を、正しい解析結果が得られているものとし、その要素数の中で最も要素数が少なくなるものを最適要素数とした。

2.3.2 半径方向要素数の検討

本項では軸方向の1要素の長さを0.5mmで均等に分割すると仮に決定し、半径方向の要素数を変化させることで最適な要素数を、軸方向残留応力分布から検討した。まず始めに等間隔に半径方向を分割することを考える。Fig. 2.3.1 にそれぞれの軸方向残留応力分布を示す。 $N_r \geq 8$ の場合では、解析結果が軸方向に一様であり、良好な結果が得られている。対して、 $6 \geq N_r \geq 5$ の場合では外表面側の解析結果が一様ではなく、 $N_r \geq 7$ の場合と異なっており、解析結果が一様ではない箇所もある。さらに要素数を減らした $N_r = 4$ の場合、解析結果が一様ではない上に、他の要素数の解析結果と比較して、軸方向残留応力分布が大きく異なっている。これは要素数が少なすぎるために、適切な解析結果が得られなかったことを示している。以上から等間隔分割の場合、最適な解析結果を得られる最小の要素数は7と考えられる。 $6 \geq N_r \geq 5$ の解析結果では、 $N_r \geq 7$ の場合の比較して、外表面側の解析結果が異なり、一方で内表面側には解析結果の違いが少ない。そこで分割の間隔を非等間隔にし、外表面側の要素数を細かくすることで、より高い精度の解析結果を得ることを考える。非等間隔での分割方法としては、以下の2通りの分割方法を検討する。

- (a) 半径方向要素サイズを、管外面側を細かく管内面側を粗くする
- (b) 半径方向要素サイズを管外表面に近づくにつれて段階的に細かくする

Fig. 2.3.2 は上記の (a) と (b) の解析結果である。解析結果は、(a) と (b) のそれぞれの分割方法において、最も良好な結果が得られた分割条件の結果である。(a) の場合、Fig. 2.3.1 における $N_r = 7$ 、等間隔分割の条件と比較して、大きな違いは無かった。対して (b) の場合、 $N_r = 7$ 、等間隔分割の条件でわずかに発生していたむらが無くなり、さらに残留応力分布が一様となる、より精度の高い解析結果を得ることができた。以上から、本研究の解析条件における本モデルの半径方向には、要素数 $N_r = 7$ 、外表面側が細くなるように隣接する要素長さ比 $\Delta t_i : \Delta t_{i+1} = 1 : 0.93$ になるように分割した。

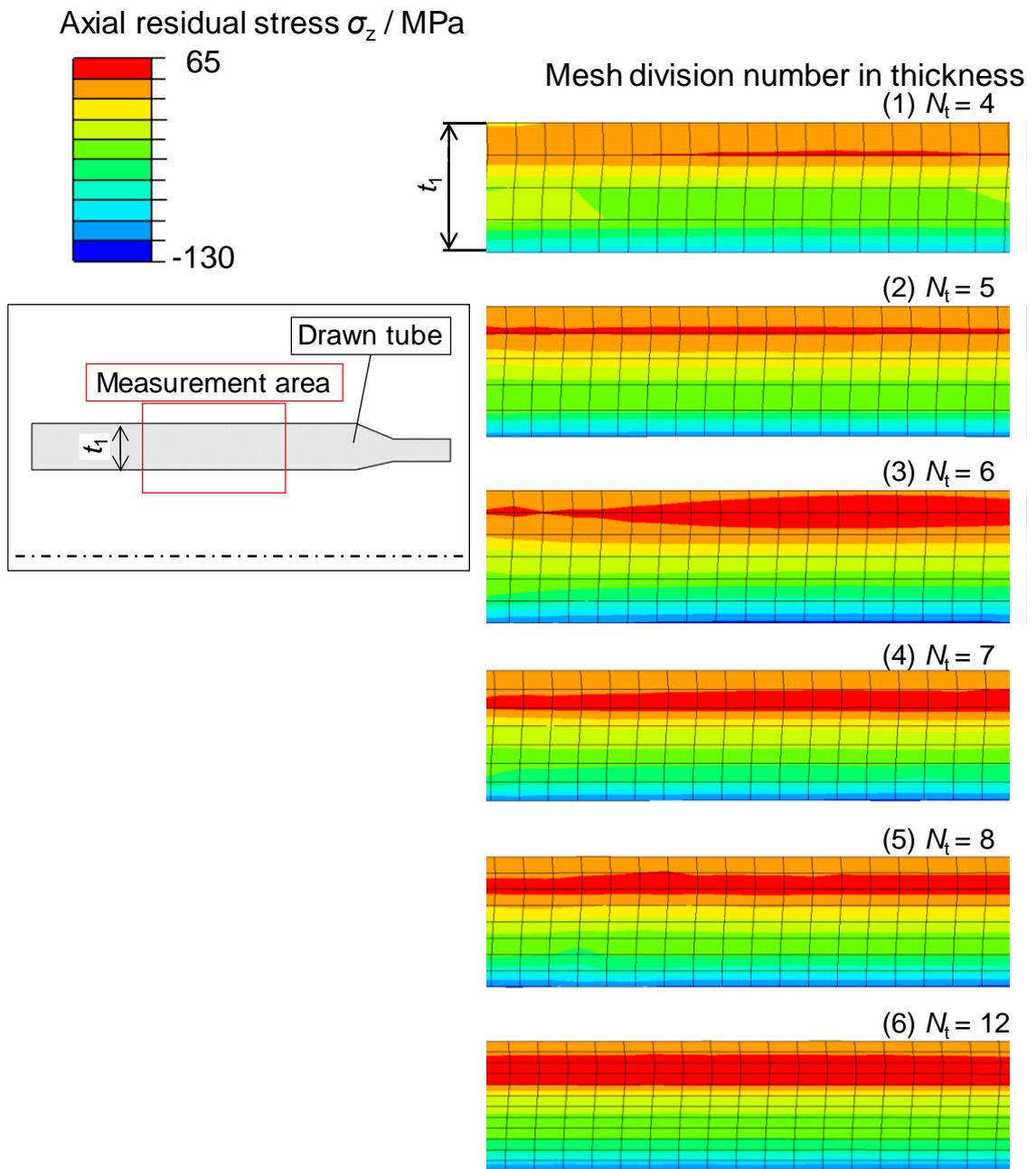


Fig. 2.3.1 Influence of radial mesh division number on axial residual stress distribution (element size in axial direction is 2 mm per division)

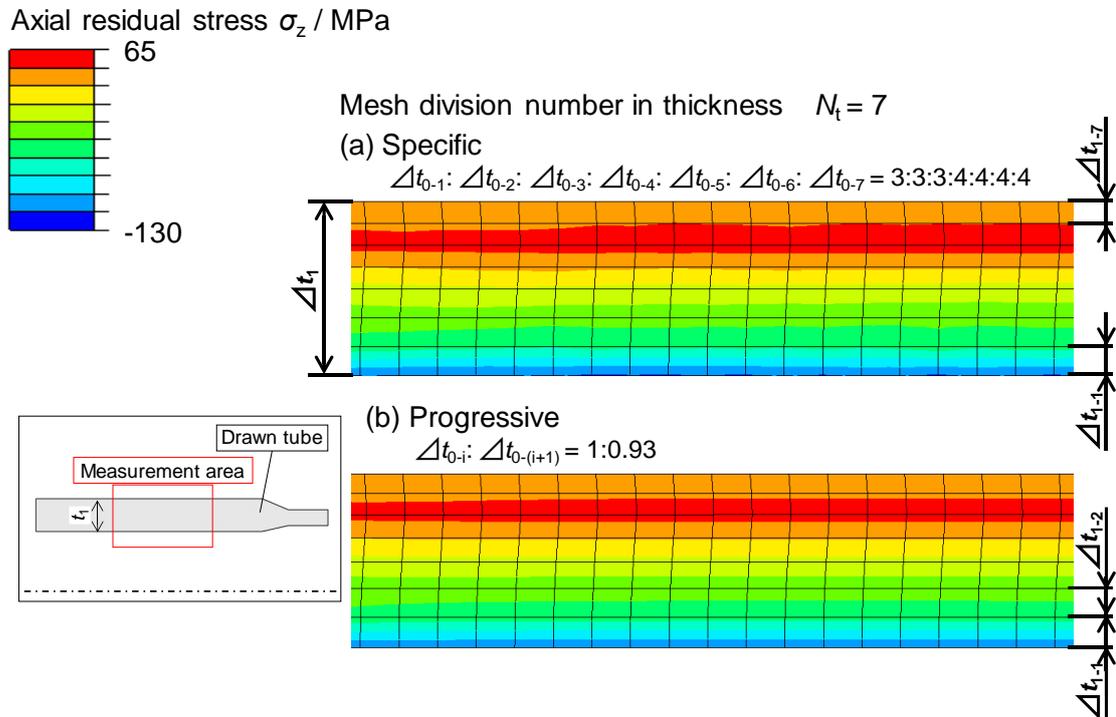


Fig. 2.3.2 Influence of radial element-size allocation on axial residual stress distribution (radial mesh division number $N_t = 7$, element size in axial direction is 2 mm per division)

2.3.3 軸方向要素数の検討

本項では、前項で決定した半径方向要素数を用いて、軸方向の最適な要素数を検討する。Fig. 2.3.3 に要素の軸方向長さを変化させたときの、軸方向残留応力分布を示す。要素長さ 0.50mm/div. , 0.44mm/div. の場合、一様な軸方向残留応力分布が得られた。対して要素長さ 0.67mm/div. の場合、要素長さが長すぎるために、他の解析結果と大きく異なる分布となっている。0.57mm/div. の場合も同様に要素長さが短いため、軸方向に一様な残留応力分布が得られなかった。また、0.40mm/div. の条件では管内面付近にむらが生じ、一様な軸方向残留応力分布が得られなかった。0.50mm/div. , 0.44mm/div. を比較すると、0.44mm/div. には管内面部分にわずかにむらが生じているため、より一様な結果を得られている 0.50mm/div. を軸方向要素数として用いた。

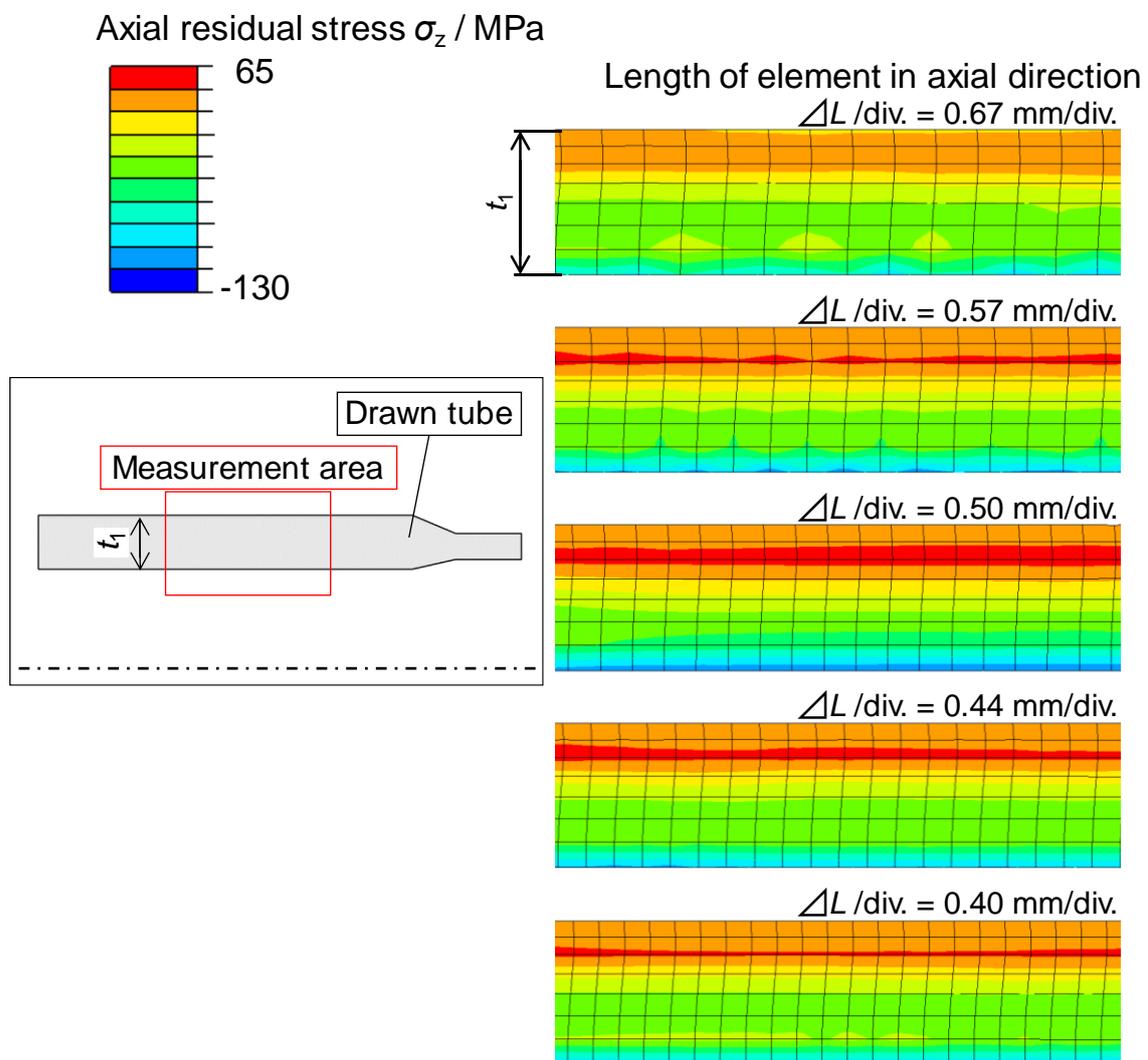


Fig. 2.3.3 Difference of residual stress distribution in axial by number of axial mesh

2.4 最適要素数の決定と備考

前項までで決定した円管の軸方向と半径方向を使用し3次元モデルによる解析を行い、前項までの2次元モデルによる軸方向残留応力の解析結果と比較することで、適切な解析結果が得られているのかを調査した。3次元モデルの詳細については、第3章にて記述する。2次元モデルの解析条件はTable 2.2.2と同様であり、3次元モデルの解析条件もそれに準ずる条件とし、Table 2.4.1に示す。3次元モデルでは周方向要素を15°/div.として、Fig. 2.4.1に示すように円管材料の中心位置を測定箇所とした。それぞれのモデルによる、軸方向残留応力の解析結果を、Fig. 2.4.2示す。3次元モデルの解析においても、2次元モデルの解析結果と同等の結果が得られた。したがって、本研究における3次元モデルの要素数はTable 2.4.1に示したものをを用いる。

Table 2.4.1 Analysis condition of 3D model

Die	Type		Rigid
	Die hole diameter d_d /mm		30
	Die half angle θ /°		15
	Bearing length l_b /mm		4
Plug	Type		Rigid
	Plug diameter d_p /mm		24
Tube	Type		Plastic
	Material of tube		A1070
	Tube outer diameter d_t /mm		31.5
	Tube thickness t_0 /mm		3.2
	Length of tube l /mm		50
	Initial thickness variation $\Delta t_0 = t_{0\max} - t_{0\min}$ /mm (Initial thickness variation rate ε_0)		0 (0)
	Division	Axial	0.5 mm/div.
		Radial	7 div. (progressive)
Hoop		15 ° /div.	
Coefficient of friction μ			0.07

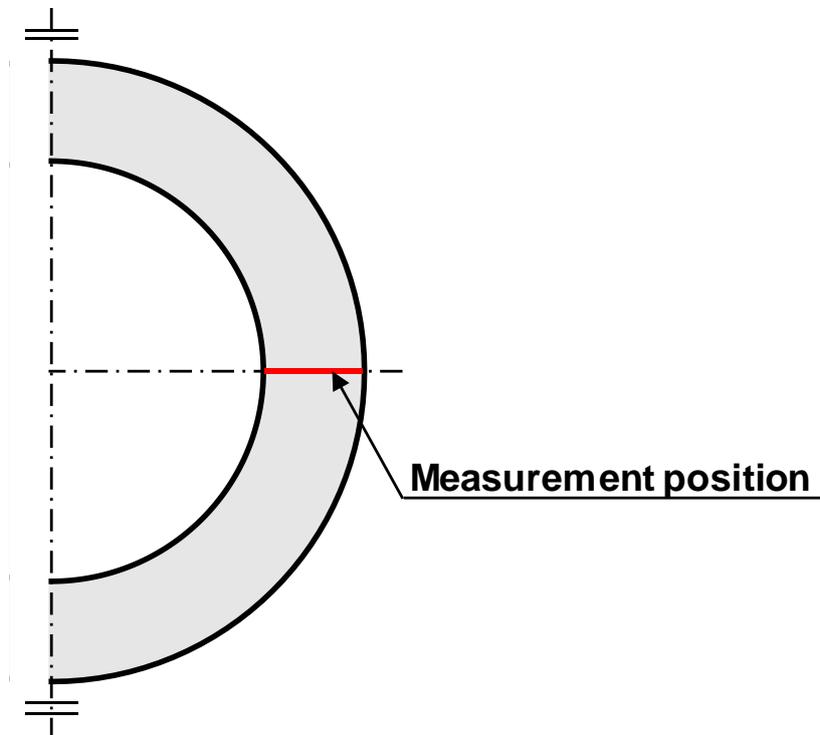


Fig. 2.4.1 Measurement position on 3D model

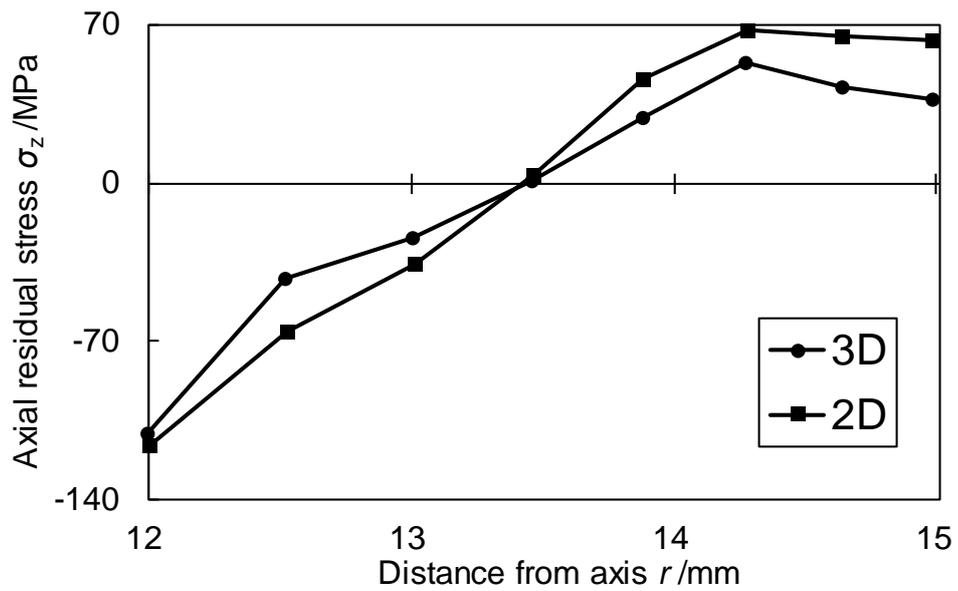


Fig. 2.4.2 Compare 3D and 2D in axial residual stress

第 3 章 工具形状が成形品の偏肉率へ与える 影響

3.1 数値解析

3.1.1 目的

抽伸実験を行う場合，加工機械の弾性変形や引抜き軸とダイス穴軸のずれが不可避免的に生じてしまう¹²⁾．そのため，実験では偏肉に与える工具形状の影響のみを純粹に評価することは難しい．そこで本研究では，有限要素法解析によって，外乱のない理想的な加工条件を実現し，工具形状が成形品の偏肉率に及ぼす影響を調査した．

3.1.2.3 次元解析手法

本研究にて用いる3次元解析モデルをFig. 3.1.1に示す．前章で用いた2次元モデルをダイスの中心軸周りに展開することによって3次元化し，y-z平面を対称面とした1/2モデルである．Fig. 3.1.2に示すように，材料にはy軸方向に初期偏肉を与え，偏肉量 Δt を肉厚の最大値と最小値の差として定義した．また，偏肉率 E は以下の(3.1)式のように定義した．

$$E = \frac{\Delta t}{t_{ave}} = \frac{t_{max} - t_{min}}{(t_{max} + t_{min})/2} \quad (3.1)$$

初期偏肉を有する円管材料を抽伸加工する場合，材料が周方向に移動することで，加工前後で偏肉量が変化する．しかしながら，周方向の分割を工具と材料で同じ分割を行うと，Fig. 3.1.3 (a)に示すように多角体の角同士が重なることで，周方向の動きが妨げられてしまう可能性がある．そのため本モデルはFig. 3.1.3 (b)のように，工具と材料の分割位置を変更し，材料の節点が工具の多角体の面の中央部分と接触するようにして，加工材の周方向の動きを妨げないモデルとした．

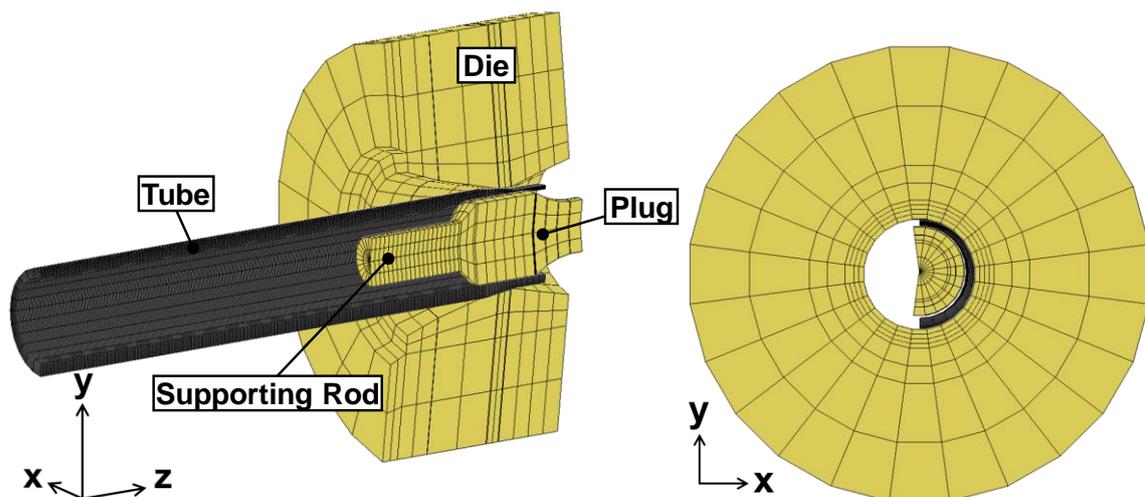


Fig. 3.1.1 Example of FEM mesh for tube drawing with plug in 3D analysis

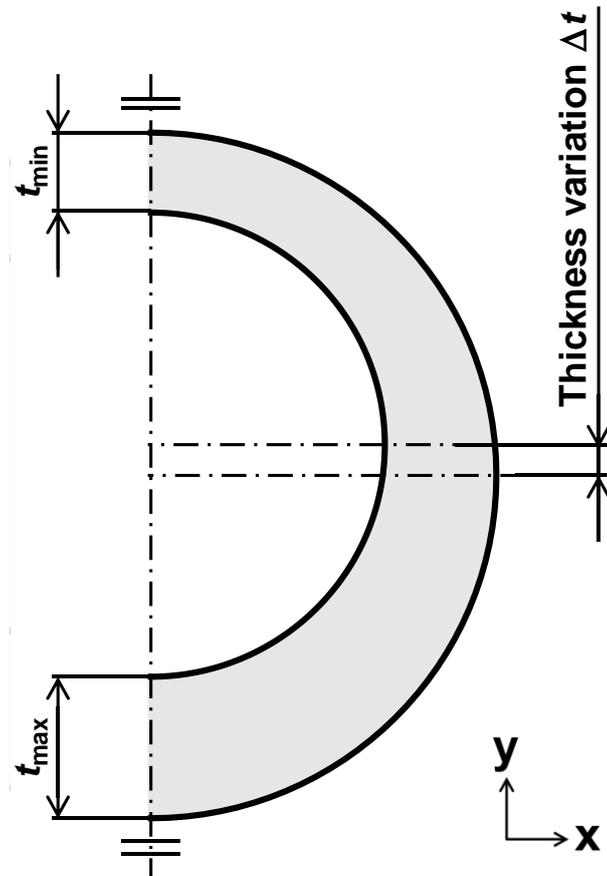
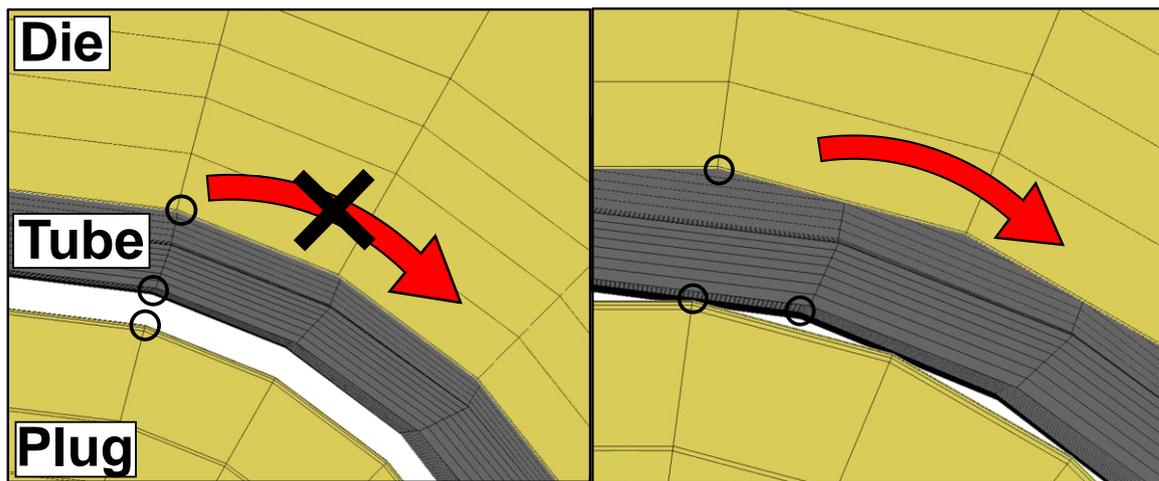


Fig. 3.1.2 Eccentricity of tube in 3D analysis



(a) Same hoop division

(b) Another hoop division

Fig. 3.1.3 Hoop division in 3D analysis

3.1.3.3 次元解析条件

実産業上の抽伸加工では、プラグの支持棒は長尺であり20mほどになる。そのため支持棒に弾性変形が生じ、プラグは水平、垂直方向に移動する。そのプラグの動きを再現するため、解析上ではFig. 3.1.4に示すように、対称面に平行に上下方向(y軸)を非拘束にすることでプラグの動きを再現した。また、2次元モデルと同様に工具と材料の摩擦係数0.07と仮定し、ダイスは剛体、プラグは弾性体、加工材は弾塑性体として解析を行った。図中のように、管の先端には、外径がダイス内径よりも小さくなっている掴み部があり、掴み部と管の加工部の間にテーパ部がある。そのため、加工条件によって管のテーパ位置が変化してしまう。したがって、Fig. 3.1.5に示すように円管のテーパ部と並行部の境界からの長手方向距離 l_a を定義することで、管の加工された範囲のみを結果に示すこととした。それぞれの解析において、共通した解析条件をTable 4.2.1に示す。円管の初期偏肉量には、実際の生産ラインで成形品に生じ得る偏肉率⁴⁾を用い、 $\Delta t_0 = 0.2\text{mm}$ として、全ての解析において一定とした。

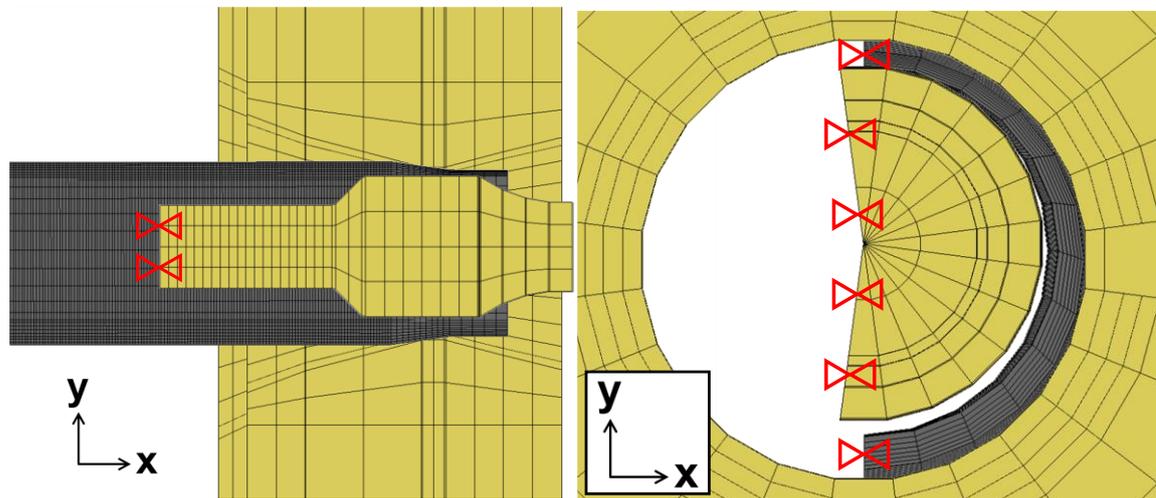


Fig. 3.1.4 Constrains of Plug in 3D analysis

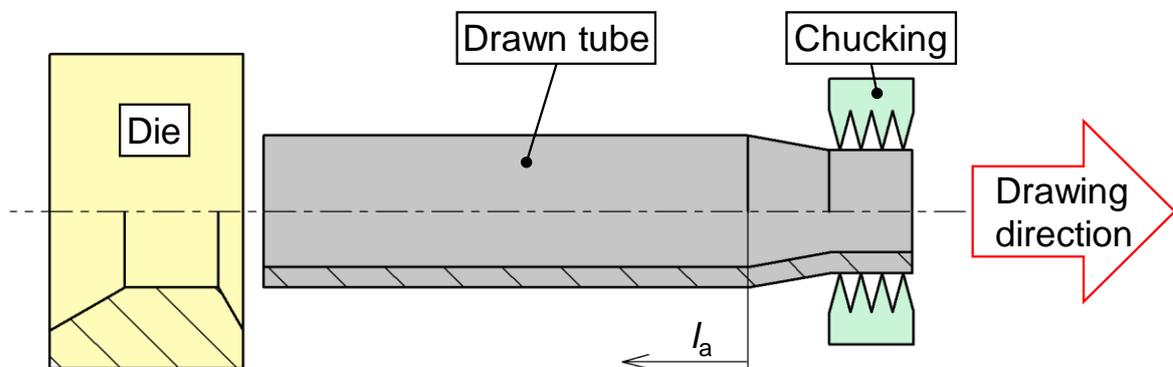


Fig. 3.1.5 Definition of position from boundary between taper and parallel parts

Table 3.1.1 Analysis condition in 3D model

Die	Type		Rigid
	Die hole diameter d_d /mm		30
	Bearing length l_b /mm		4
Plug	Type		Elastic
	Plug diameter d_p /mm		24.4
Tube	Type		Plastic
	Material of tube		A1070
	Length of tube l /mm		170
	Initial thickness variation $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$ /mm		0.2
	Division	Axial	0.5 mm/div.
		Radial	7 div. (progressive)
Hoop		15 °/div.	
Coefficient of friction μ			0.07

3.2 解析結果

3.2.1 ダイス半角の影響

一般的に、プラグを用いない抽伸加工である空引きを行うことで、偏肉率が減少することが知られている¹³⁾。空引きにおける変形挙動と、プラグを用いた抽伸加工における変形挙動が同一となるかを調査し、比較を行う。そこで、本項では空引きと芯金引きの抽伸加工を解析する。それぞれの加工においての変形挙動を調査し、その上でダイス半角が成形品に及ぼす影響を調査した。

3.2.1.1 プラグを用いない抽伸加工

空引きにおける解析条件を Table 3.2.1 に示し、Fig. 3.2.1 に成形品の薄肉側の長手方向肉厚分布を、Fig. 3.2.2 に厚肉側の長手方向肉厚分布をそれぞれ示す。横軸の l_a は、Fig. 3.1.5 に示した円管の長手方向距離である。薄肉側と厚肉側の両方で、管の先端部分 ($0\text{mm} \leq l_a \leq 10\text{mm}$) と、管の末端部分 ($150\text{mm} \leq l_a \leq 160\text{mm}$) で大きく肉厚が変化している。これは、加工開始直後と加工終了時で加工が安定していないためである。対して、 $50\text{mm} < l_a < 130\text{mm}$ では肉厚の変化は小さく、一定となっている。この肉厚変化の小さい加工域を加工が定常状態で行われている、定常域とした。成形品の測定は定常域の中心位置である、 $90\text{mm} < l_a < 100\text{mm}$ の区間における、測定結果の平均を用いた。Table 3.2.2 に肉厚の測定結果、Table 3.2.3, Fig. 3.2.3, Fig. 3.2.4 に偏肉の測定結果を示す。ダイス半角にかかわらず、空引を行うことで偏肉、偏肉率は小さくなった。また、ダイス半角が大きくなるほど、偏肉はわずかに減少する。

Table 3.2.1 Analysis condition drawing without plug

Die	Die half angle θ /°	6 ~ 15
Tube	Tube outer diameter d_t /mm	31.5
	Tube thickness on average $t_{0\text{ave}}$ /mm	3.2
	Initial thickness variation $\Delta t = t_{0\text{max}} - t_{0\text{min}}$ /mm (Initial thickness variation rate E_0)	0.2 (0.0625)

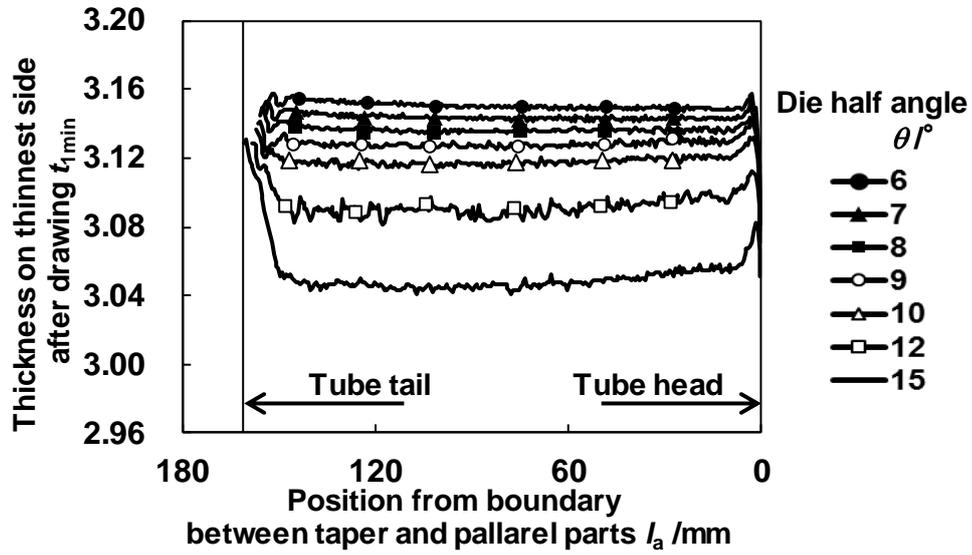


Fig. 3.2.1 Thickness distribution of drawn tube without plug on thinnest side

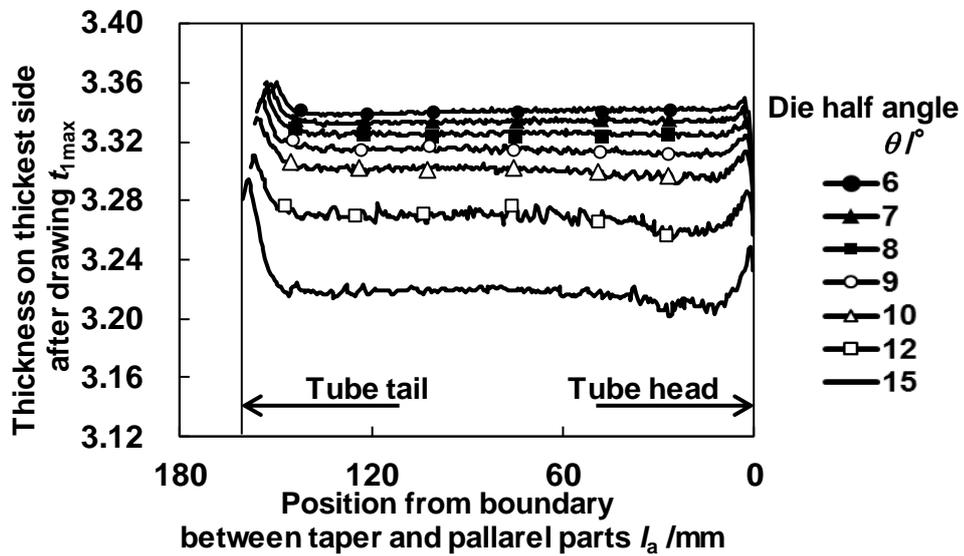


Fig. 3.2.2 Thickness distribution of drawn tube without plug on thickest side

Table 3.2.2 Thickness of drawn tube without plug

Die half angle $\theta/^\circ$	Thickness on thinnest side t_{\min}/mm		Thickness on thickest side t_{\max}/mm	
	Initial	After drawing	Initial	After drawing
6	3.1	3.1503	3.3	3.3406
7		3.1434		3.3336
8		3.1356		3.3254
9		3.1272		3.3154
10		3.1165		3.3026
12		3.0895		3.2707
15		3.0449		3.2195

Table 3.2.3 Eccentricity of drawn tube without plug

Die half angle $\theta/^\circ$	Thickness variation $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}/\text{mm}$		Thickness on thickest side E	
	Initial	After drawing	Initial	After drawing
6	0.2	0.1903	0.0625	0.0586
7		0.1902		0.0587
8		0.1899		0.0588
9		0.1883		0.0585
10		0.1862		0.0580
12		0.1811		0.0570
15		0.1746		0.0557

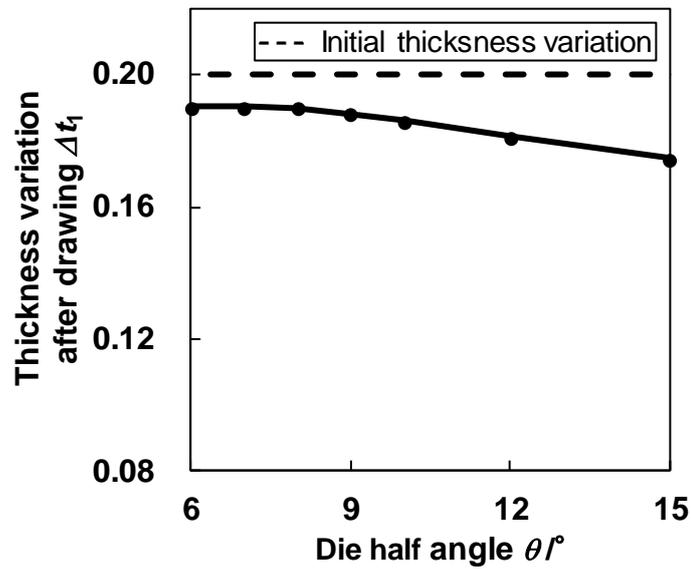


Fig. 3.2.3 Thickness of drawn tube without plug ($t_{0ave}=3.2\text{mm}$)

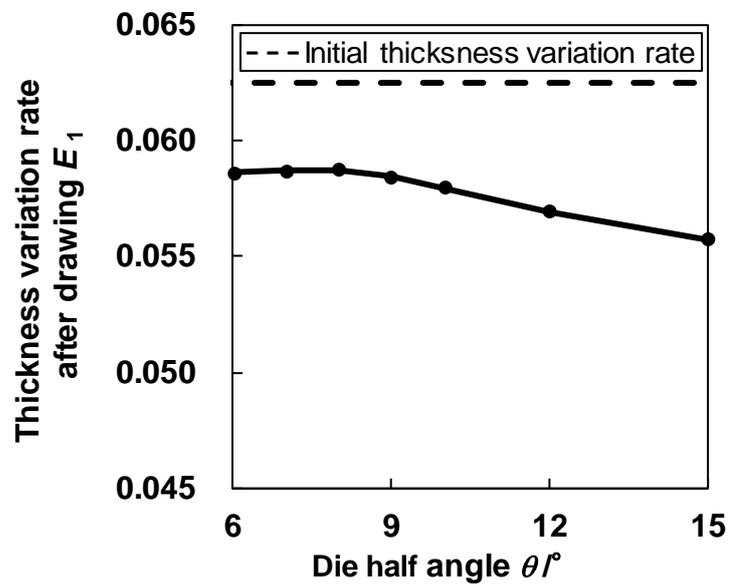


Fig. 3.2.4 Eccentricity of drawn tube without plug ($t_{0ave}=3.2\text{mm}$)

3.2.1.2 プラグを用いる抽伸加工

ダイス半角を変更した場合の解析条件を Table 3.2.4 に示し、成形品の薄肉側の長手方向肉厚分布を Fig. 3.2.5 に示し、厚肉側の長手方向肉厚分布を Fig. 3.2.6 に示す。薄肉側と厚肉側の両方で、管の末端部分で大きく肉厚が変化している。しかしながら空引きの場合とは異なり、肉厚変化の小さい定常域は現れない。これは、解析において使用しているプラグが y 軸方向に拘束されていないためにプラグの位置が一意に定まらない、もしくは円管材料が短いことで定常域での加工が始まる前に加工が終わっているためである。そこでプラグを用いた条件では円管の測定箇所を決めるのではなく、長手方向分布の傾向から工具形状の影響を調査した。Fig. 3.2.7 に成形品の偏肉、Fig. 3.2.8 に偏肉率の長手方向分布を示す。 $7^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ の条件では成形品の肉厚と偏肉、偏肉率がほとんど等しく、同じ傾向を示している。しかし、 $\theta \leq 6^\circ$ の場合、ダイス半角が減少するほど薄肉側が増肉、厚肉側が減肉し、偏肉、偏肉率が減少している。そのためプラグを用いる抽伸加工においては、空引きと異なり、ダイス半角が小さいほうが、成形品の偏肉率が小さくなる傾向が得られた。また $7^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ の条件では、成形品の偏肉率は増加する傾向を示し、 $\theta = 6^\circ$ の条件では、偏肉率が減少する傾向を示したものの、初期偏肉率を下回る区間はほとんど無い。以上のことから、工具条件次第では成形品の偏肉率は増加するため、工具形状の選定には注意が必要である。

Table 3.2.4 Analysis condition drawing with plug

Die	Die half angle $\theta / ^\circ$	4.5 ~ 10
Tube	Tube outer diameter d_t /mm	31.5
	Tube thickness on average t_0 /mm	3.2
	Initial thickness variation $\Delta t_0 = t_{0\max} - t_{0\min}$ /mm (Initial thickness variation rate E_0)	0.2 (0.0625)

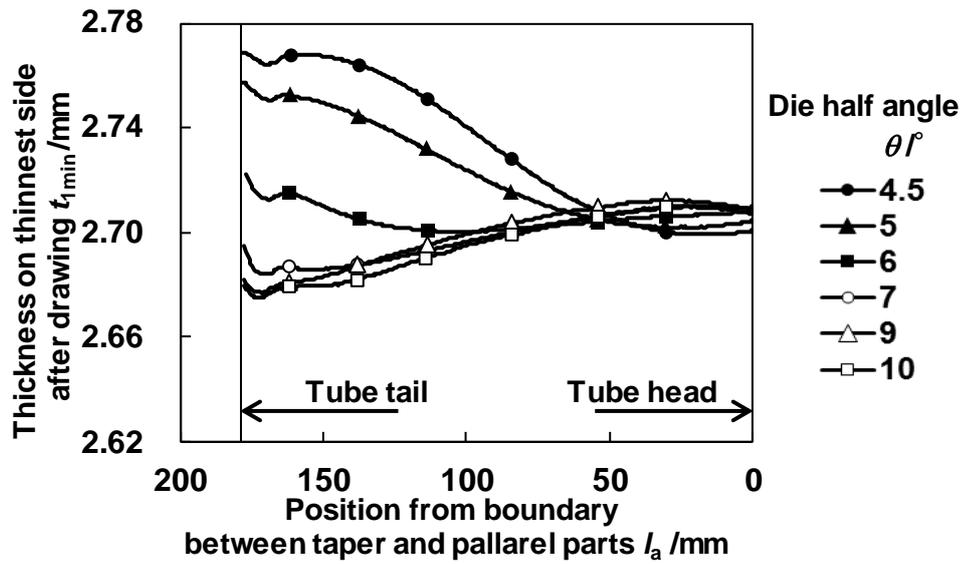


Fig. 3.2.5 Thickness distribution of drawn tube with plug on thinnest side ($d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

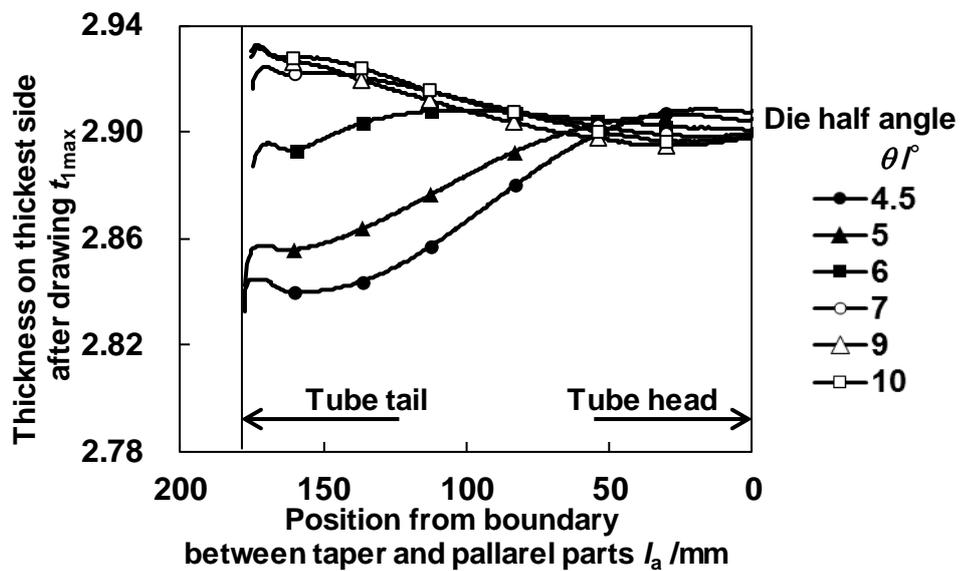


Fig. 3.2.6 Thickness distribution of drawn tube with plug on thickest side ($d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

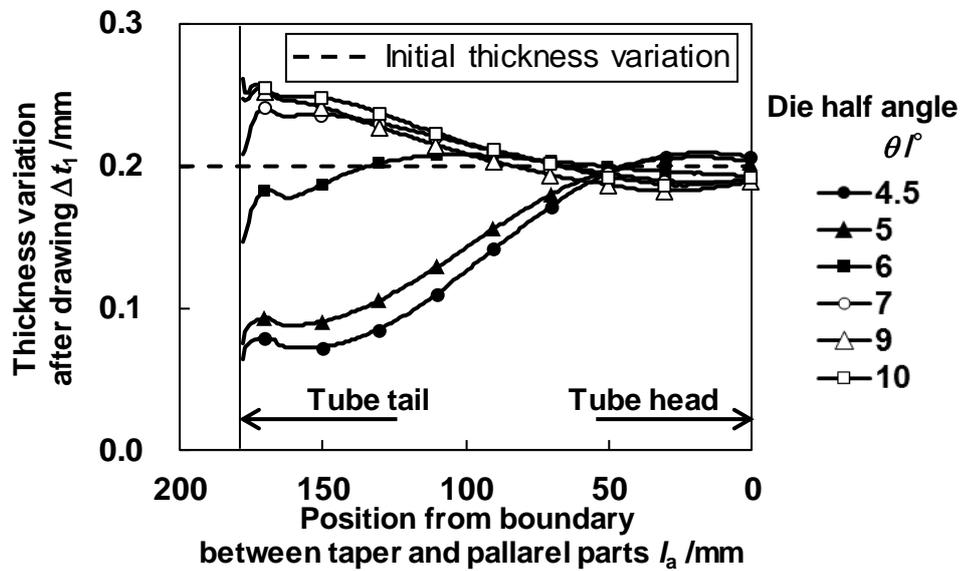


Fig. 3.2.7 Thickness variation of drawn tube with plug ($d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

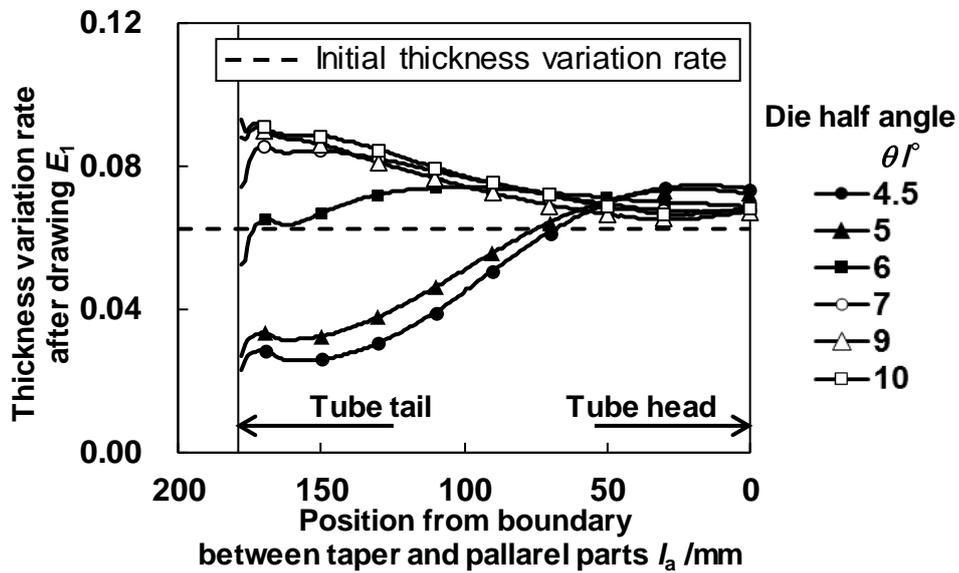


Fig. 3.2.8 Thickness variation rate of drawn tube with plug ($d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

3.2.2 円管外径の影響

円管外径 d_t を 31.5mm から 33mm に変化させた場合において、ダイス半角が偏肉に及ぼす影響を調査した。解析条件を Table 3.2.2 に示し、Fig. 3.2.9 に成形品の薄肉側の長手方向肉厚分布を、Fig. 3.2.10 に厚肉側の長手方向肉厚分布をそれぞれ示す。ダイス半角の減少にともない、薄肉側が増肉、厚肉側が減肉し、3.2.1.2 項の外径 $d_t=31.5\text{mm}$ の場合と同様の傾向を示したが、肉厚の変化量が大きくなっている。Fig. 3.2.11 に成形品の偏肉、Fig. 3.2.12 に偏肉率の長手方向分布を示す。 $\theta = 5, 6^\circ$ の結果では、y 軸方向に拘束されていないプラグの位置が一意に定まっていないために、偏肉率が負の値をとった後に、増加している。いずれのダイス半角においても、円管の先端部 $0\text{mm} \leq l_a \leq 50\text{mm}$ には偏肉、偏肉率が減少する傾向を示し、 $d_t=31.5\text{mm}$ の結果同様に、ダイス半角の減少にともない偏肉、偏肉率がより減少する。いずれの条件においても加工が始まった後に偏肉率が減少し、初期偏肉率よりも減少する。Fig. 3.2.13 に $d_t=31.5, 33$ それぞれの条件における偏肉率を示す。初期外径が大きいほど、成形品の偏肉率はより減少する。

Table 3.2.4 Analysis condition drawing with plug

Die	Die half angle $\theta / ^\circ$	5 ~ 10
Tube	Tube outer diameter d_t / mm	33
	Tube thickness on average t_0 / mm	3.2
	Initial thickness variation $\Delta t_0 = t_{0\text{max}} - t_{0\text{min}} / \text{mm}$ (Initial thickness variation rate E_0)	0.2 (0.0625)

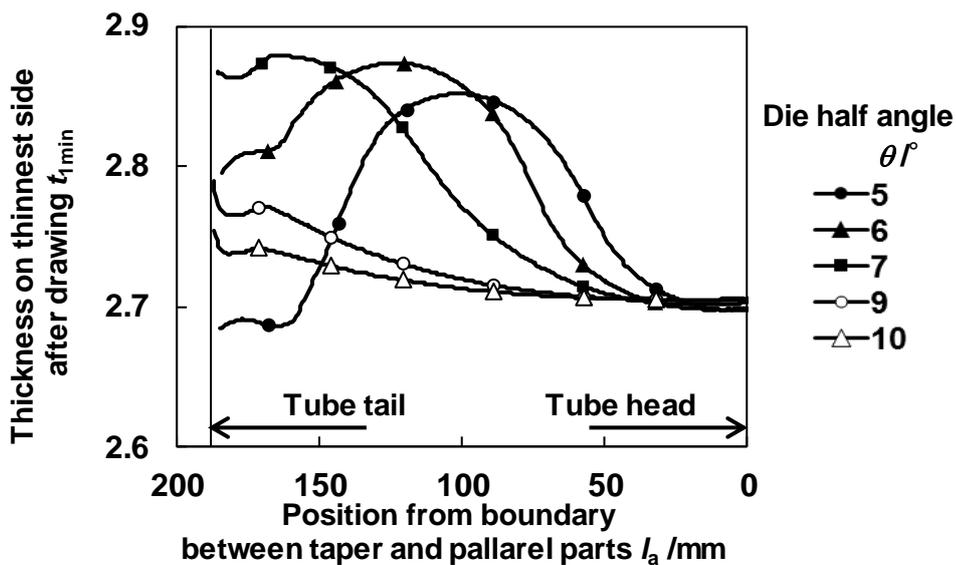


Fig. 3.2.9 Thickness distribution of drawn tube with plug on thinnest side ($d_t=33\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

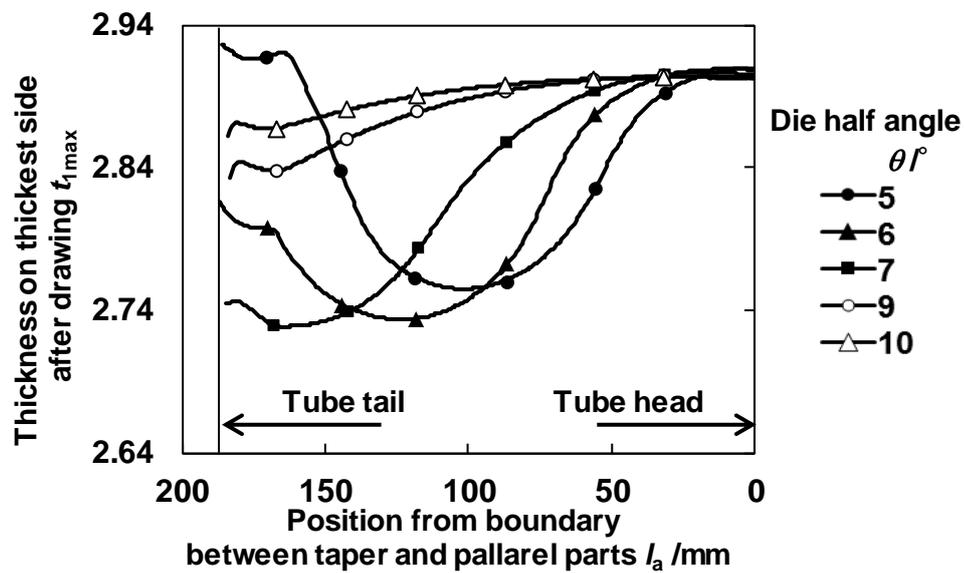


Fig. 3.2.10 Thickness distribution of drawn tube with plug on thickest side ($d_t=33\text{mm}$, $t_{ave}=3.2\text{mm}$)

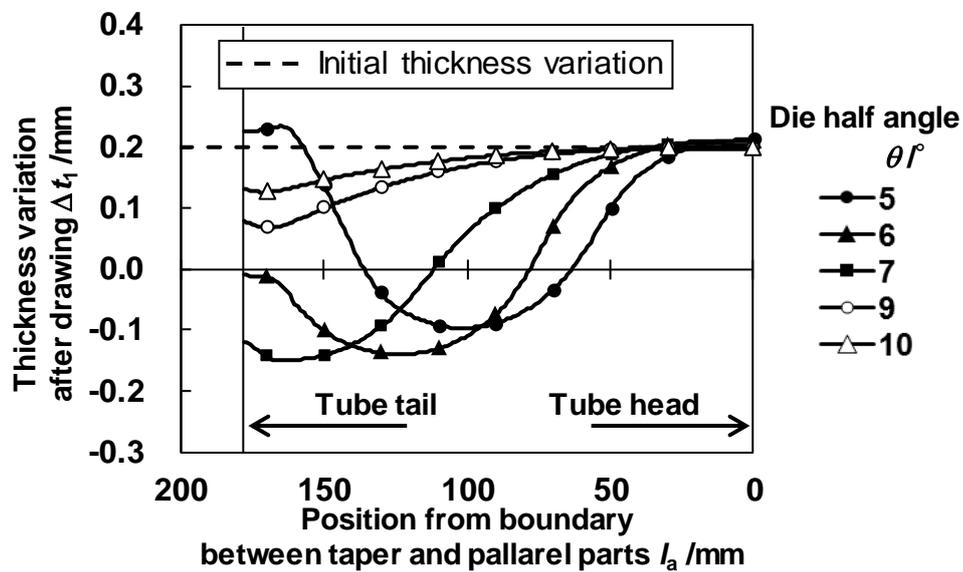


Fig. 3.2.11 Thickness variation of drawn tube with plug ($d_t=33\text{mm}$, $t_{ave}=3.2\text{mm}$)

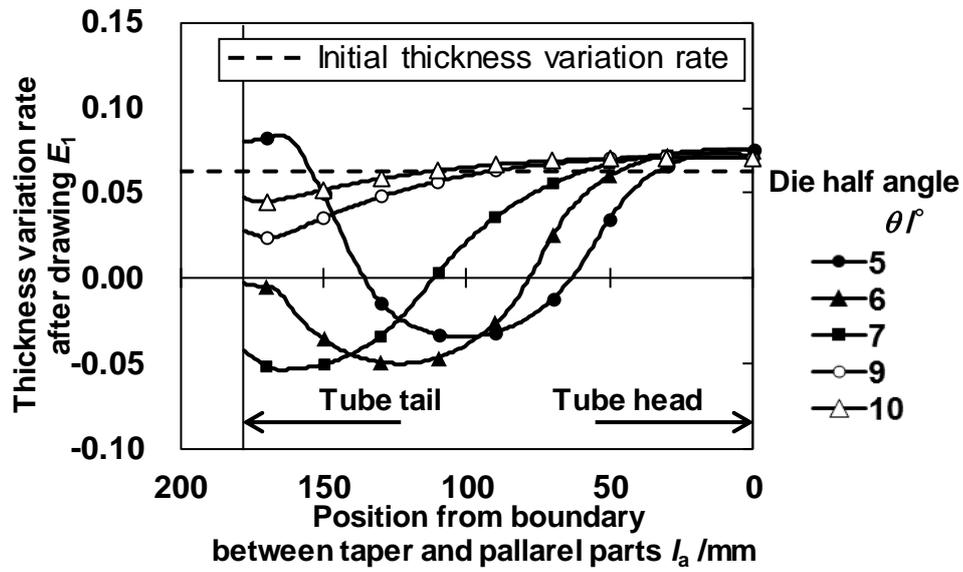


Fig. 3.2.12 Thickness variation rate of drawn tube with plug ($d_t=33\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

	Tube diameter d_t /mm	
	31.5	33
Die half angle θ /°	● 4.5	○ 5
	▲ 6	△ 6
	■ 10	□ 10

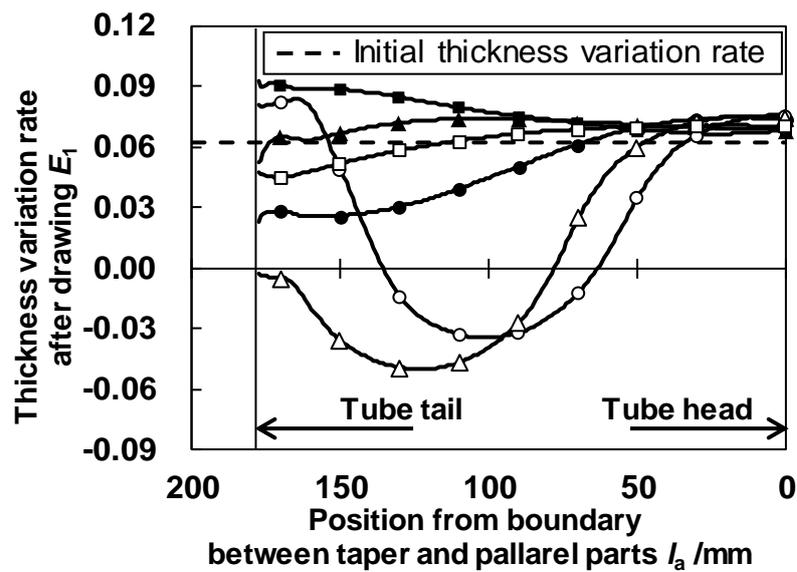


Fig. 3.2.13 Thickness variation rate of drawn tube with plug ($d_t=31.5, 33\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

3.2.3 初期肉厚の影響

抽伸加工における肉厚減少率が偏肉率に与える影響を調査した。肉厚減少率はプラグ径 d_t 、もしくは平均初期肉厚 t_{0ave} を調整することによって変更できる。本研究では成形品形状が同一であり、解析結果の比較が容易であるため平均初期肉厚 t_{0ave} をパラメータとして用いた。解析条件を Table 3.2.5 に示す。また Table 3.2.6 に示すように、本項で用いる円管材料は、初期肉厚を変化させ、偏肉量を一定としているため、初期偏肉率が異なっている。Fig. 3.2.14 に成形品の薄肉側の肉厚、Fig. 3.2.15 に厚肉側の肉厚、Fig. 3.2.16 に成形品の偏肉、Fig. 3.2.17 に偏肉率の長手方向分布を示す。初期平均肉厚が増加するほど、薄肉側の増肉、厚肉側の減肉が大きくなり、偏肉率が減少する傾向がある。

Table 3.2.5 Analysis condition drawing with plug

Die	Die half angle $\theta / ^\circ$	5
Tube	Tube outer diameter d_t /mm	31.5
	Tube thickness on average t_{0ave} /mm	2.9 ~ 3.2
	Initial thickness variation $\Delta t_0 = t_{0max} - t_{0min}$ /mm (Initial thickness variation rate E_0)	0.2 (0.0625 ~ 0.690)

Table 3.2.6 Initial thickness variation rate of tube

Tube thickness on average t_{0ave} /mm	Initial thickness variation $\Delta t_0 = t_{0max} - t_{0min}$ /mm	Initial thickness variation rate E_0
2.9	0.2	0.0690
3		0.0667
3.1		0.0645
3.2		0.0625

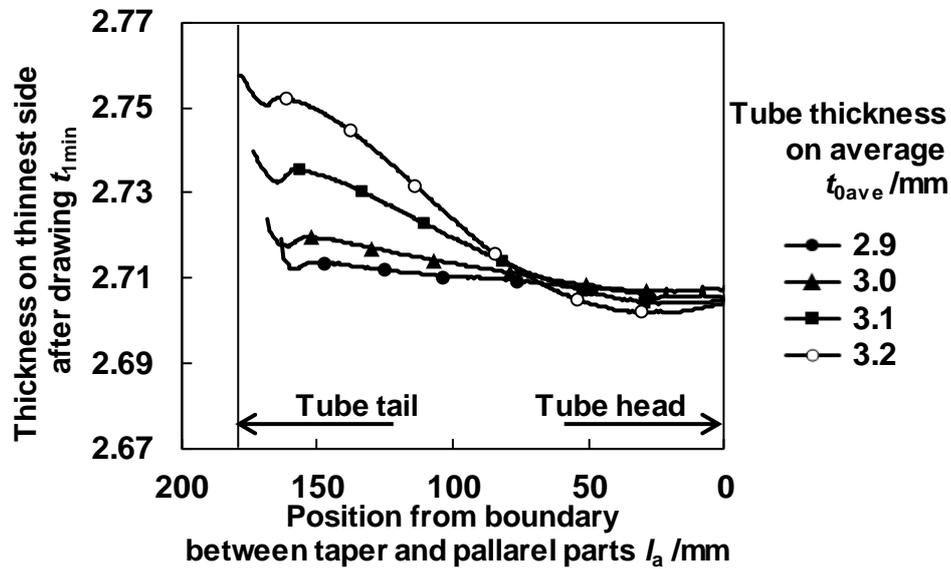


Fig. 3.2.14 Thickness distribution of drawn tube with plug on thinnest side ($d_t=31.5\text{mm}$, $\theta=5^\circ$)

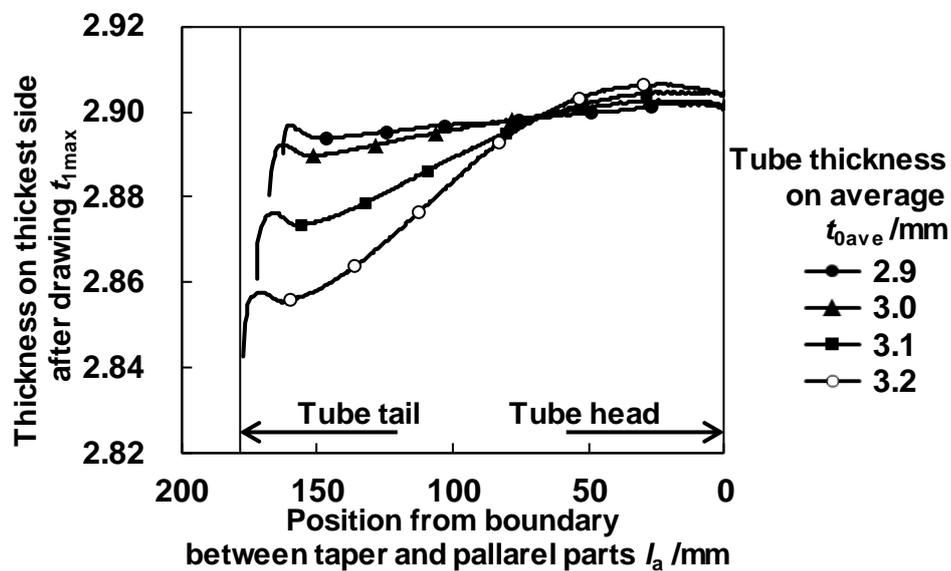


Fig. 3.2.15 Thickness distribution of drawn tube with plug on thickest side ($d_t=31.5\text{mm}$, $\theta=5^\circ$)

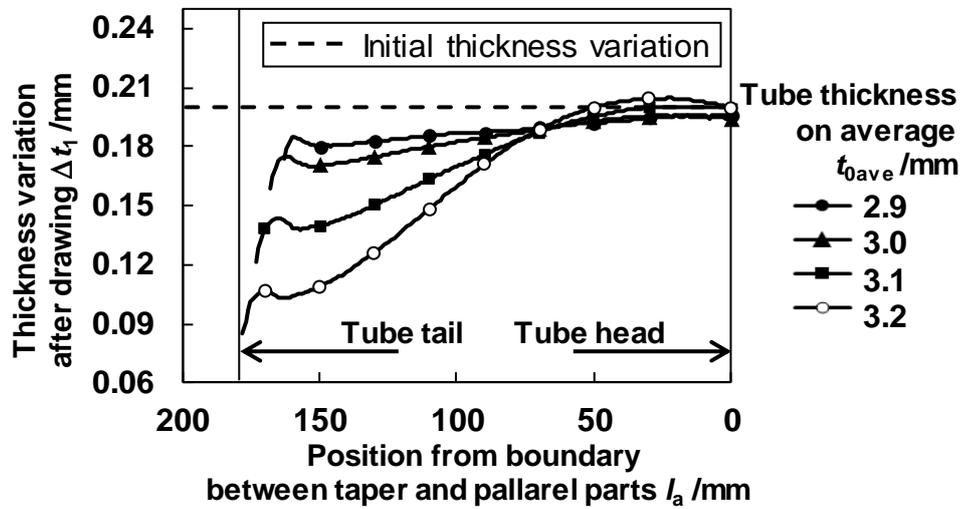


Fig. 3.2.16 Thickness variation of drawn tube with plug ($\alpha_t = 31.5^\circ$, $\theta = 5^\circ$)

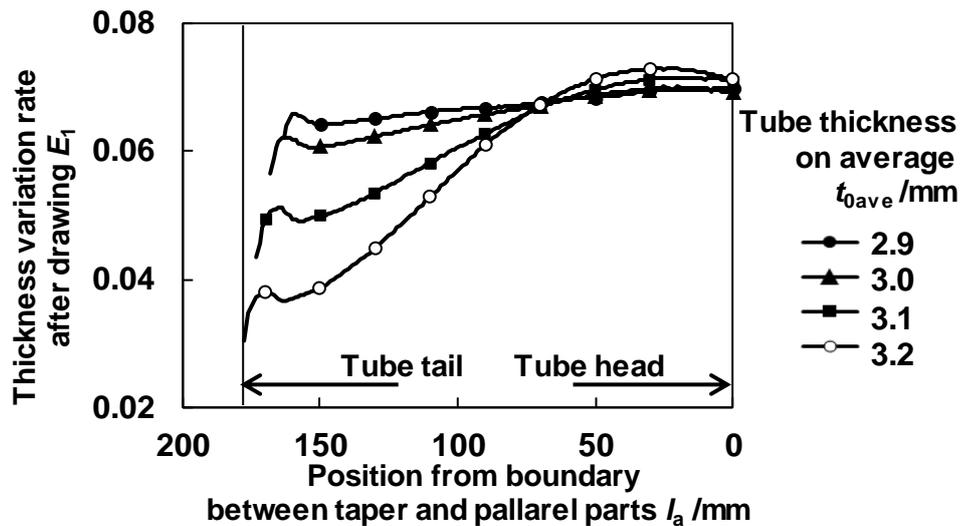


Fig. 3.2.17 Thickness variation rate of drawn tube with plug ($\alpha_t = 31.5^\circ$, $\theta = 5^\circ$)

3.3 結言

初期偏肉を有する管の抽伸加工における工具形状のパラメータとしてダイス半角 θ 、円管初期外径 d_i 、初期平均肉厚 t_{0ave} 、を変化させ、成形品の偏肉率に与える影響を調査した。ダイス半角が小さく、円管初期外径が大きく、初期平均肉厚が大きいほど、成形品の偏肉率が減少する。また、円管外径 $d_i=31.5\text{mm}$ 、初期平均肉厚 $t_{0ave}=3.2\text{mm}$ 、ダイス半角 $\theta \geq 7^\circ$ の条件のように、工具形状の組み合わせ次第では偏肉率が増加する場合もあるため、注意が必要である。また一方で、プラグを用いない空引きの場合、ダイス半角が大きい条件で偏肉率がより減少する傾向が得られた。

第 4 章 偏肉率減少を目的とした工具形状の 提案

4.1 目的

前章にて初期偏肉を有する管の抽伸加工において、工具形状が偏肉率に与える影響を各パラメータで示した。しかし前章の結果では傾向しか示せていないために、実産業における実用性は低い。そこで本章では、各パラメータにおけるメカニズムを明らかにすることで、偏肉率を最も減少させる工具形状を提案し、解析を行うことで偏肉率低減の効果を検証した。

本章では、Fig. 4.1.1 に示す各点の応力と y 軸方向座標(肉厚方向座標)を用いて、長手方向位置に対する応力を、応力の平均値として以下の 4.1 式を用いて示した。また、長手方向位置を示すために、4.2 式に示す各節点における長手方向座標 z_n の平均値 z を用いた。

$$\sigma = \sum_{i=1}^7 \left\{ \frac{(y_{i+1} - y_i) \times (\sigma_{i+1} + \sigma_i) / 2}{(y_{i+1} - y_i)} \right\} \quad (4.1)$$

$$z = \frac{\sum_{j=1}^8 (z_j)}{8} \quad (4.2)$$

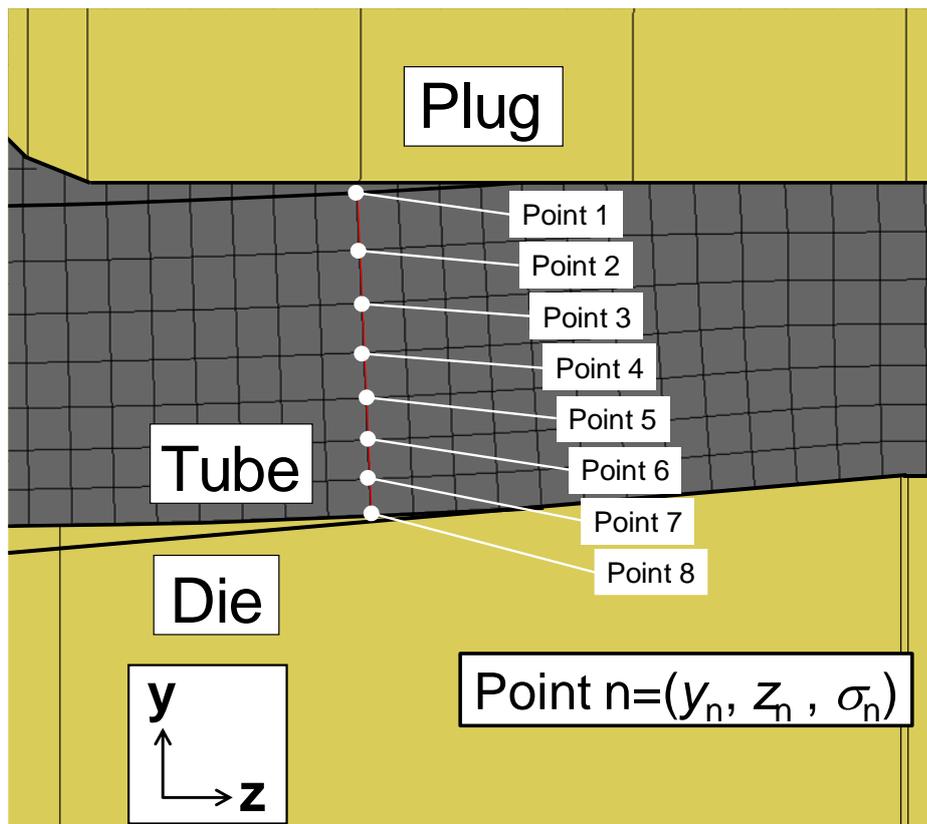


Fig. 4.1.1 Nodes in radial direction

4.2 解析結果考察

4.2.1 ダイス半角の影響

4.2.1.1 プラグを用いない抽伸加工

3.2.1.1 項の解析結果から、プラグを用いない抽伸加工ではダイス半角に関わらず偏肉率が加工前後で減少する。本項ではこの現象を考察する。前章の Fig. 3.1.5 で定義した長手方向距離 l_a における、 $l_a=99\text{mm}$ が $l_p=0\text{mm}$ となる位置の加工中における、加工中の肉厚 t_d と偏肉 Δt_d 、偏肉率 E_d を、Fig. 4.2.1 に示すダイステーパ部とベアリング部の境界からの長手方向距離 l_p を用いて、Fig. 4.2.2～Fig. 4.2.5 に示す。いずれのダイス半角においても薄肉側、厚肉側ともに、 $15\text{mm} \geq l_p \geq 3\text{mm}$ の区間で肉厚は増加し、それにともない偏肉、偏肉率は減少する。また、 $3\text{mm} \geq l_p \geq 0\text{mm}$ の区間でダイス半角が大きいほどに肉厚は大きく減少し、偏肉や偏肉率も同様に減少する。 $\theta = 6^\circ$ の条件では、 $3\text{mm} \geq l_p \geq 0\text{mm}$ の区間での肉厚や偏肉、偏肉率の変化は非常に小さい。したがって、ダイス半角が小さい場合には $15\text{mm} \geq l_p \geq 3\text{mm}$ の区間における肉厚の増加の影響のみで、偏肉率がわずかに減少する。対して、 $\theta = 12, 15^\circ$ の条件では、 $15\text{mm} \geq l_p \geq 3\text{mm}$ の区間における増肉による偏肉率の減少と、 $3\text{mm} \geq l_p \geq 0\text{mm}$ の区間における肉厚の急激な変化による偏肉率の減少の2つが作用しする。

ここで、 $\theta = 6, 15^\circ$ の条件における、 $l_a=99\text{mm}$ が $l_p=0\text{mm}$ となる位置の加工中における加工中の円管の周方向偏差応力の平均値を Fig. 4.2.6 (a), Fig. 4.2.7 (a) に示す。周方向偏差応力が負の値の場合、周方向に圧縮変形が生じていることを示している。 $15\text{mm} \geq l_p \geq 3\text{mm}$ の範囲では、ダイス半角の違いによる差は少なく、周方向の圧縮応力が生じることで薄肉側と厚肉側の両方の肉厚で、加工が進むにつれて肉厚が増加し、偏肉率が減少する。また、Fig. 4.2.6 (b), Fig. 4.2.7 (b) に示す周方向偏差応力の拡大図を見ると、薄肉側の周方向偏差応力が厚肉側よりもわずかに大きく、薄肉側が厚肉側よりも増肉するため、偏肉も同様に減少する。

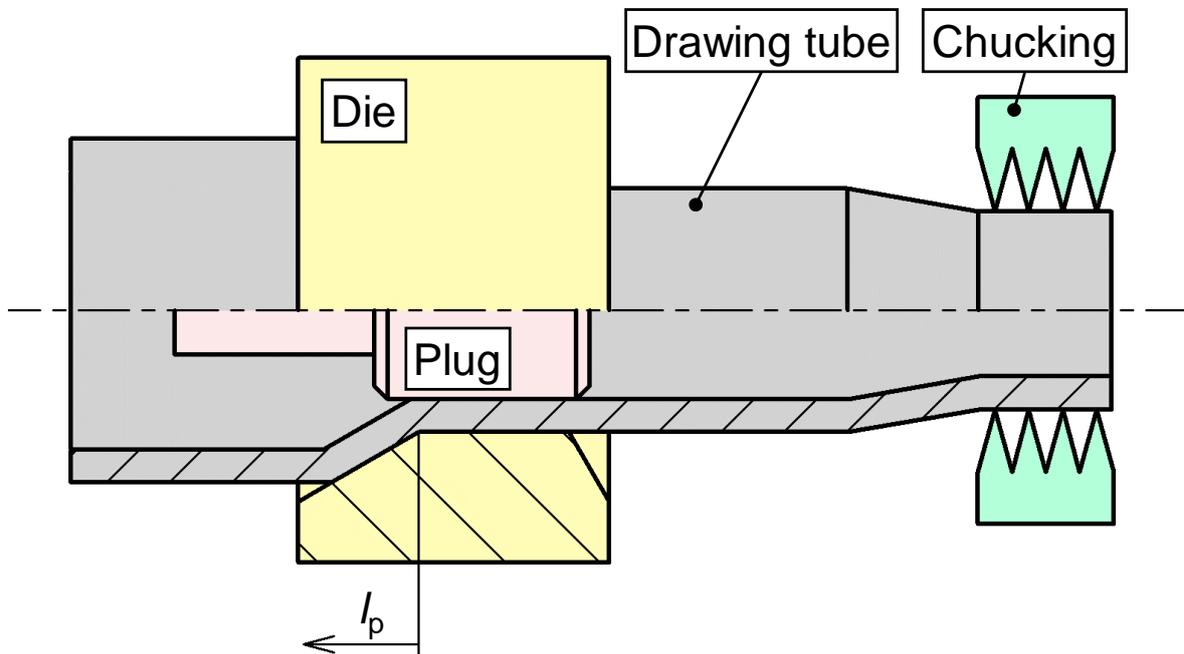


Fig. 4.2.1 Definition of position from boundary between bearing and taper parts

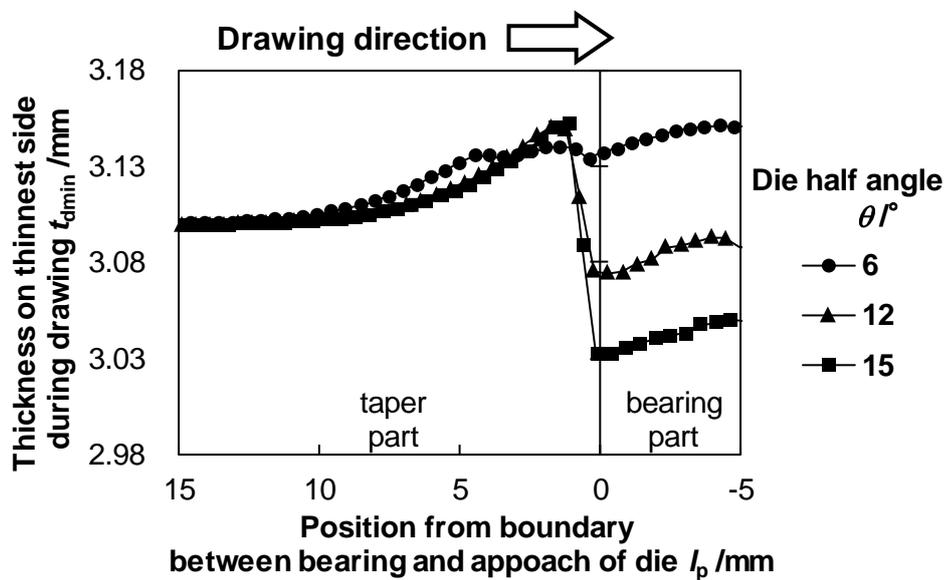


Fig. 4.2.2 Thickness distribution on thinnest side during drawing without plug ($d_t = 31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}} = 3.2\text{mm}$)

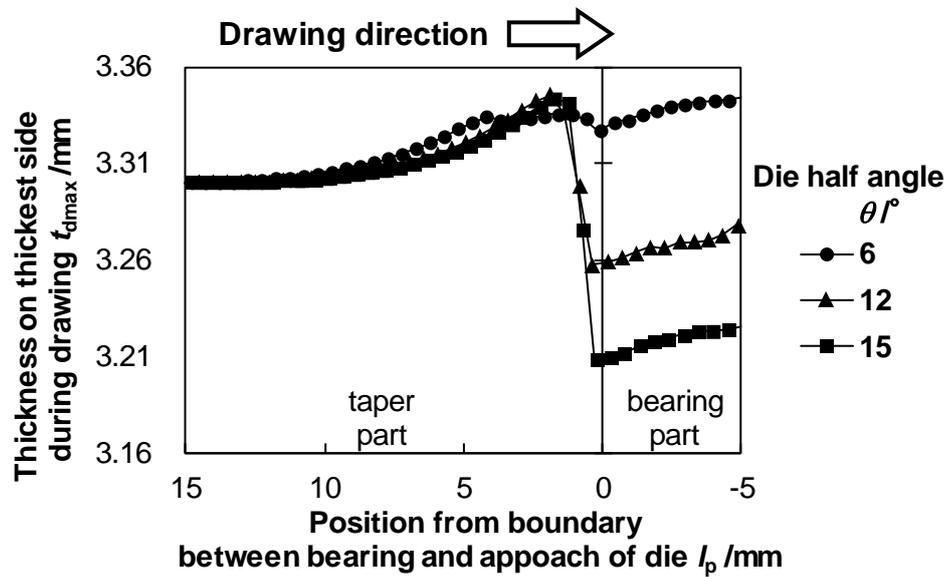


Fig. 4.2.3 Thickness distribution on thickest side during drawing without plug ($d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

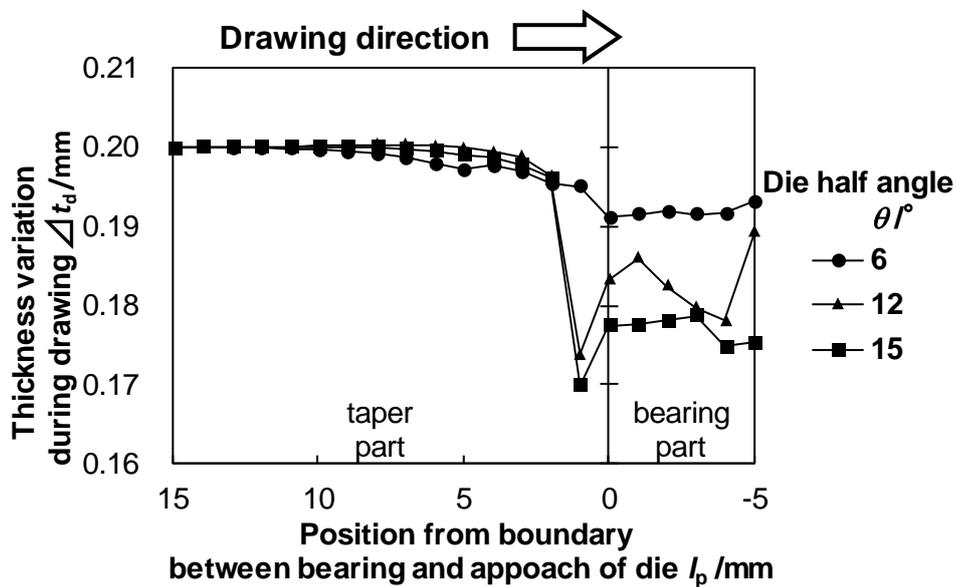


Fig. 4.2.4 Distribution of thickness variation during drawing without plug ($d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

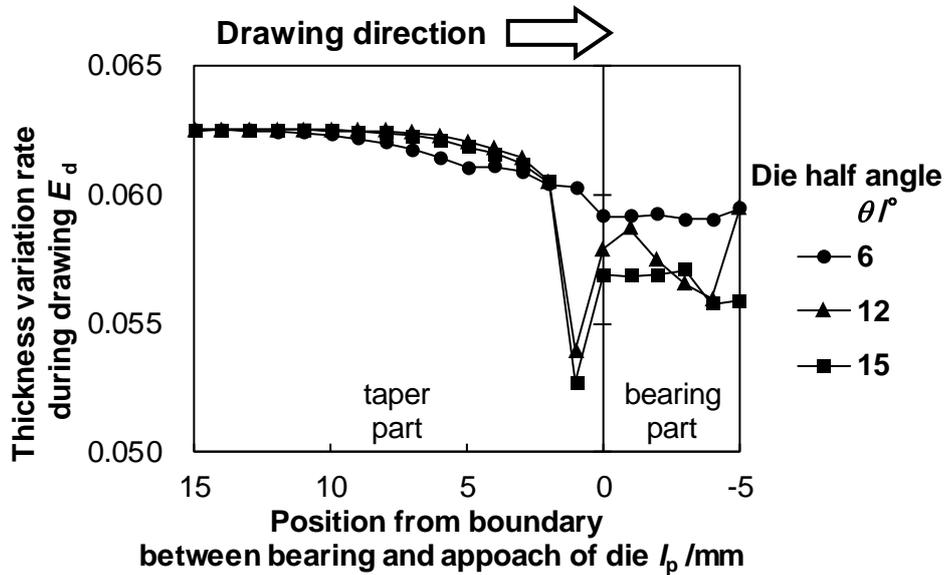
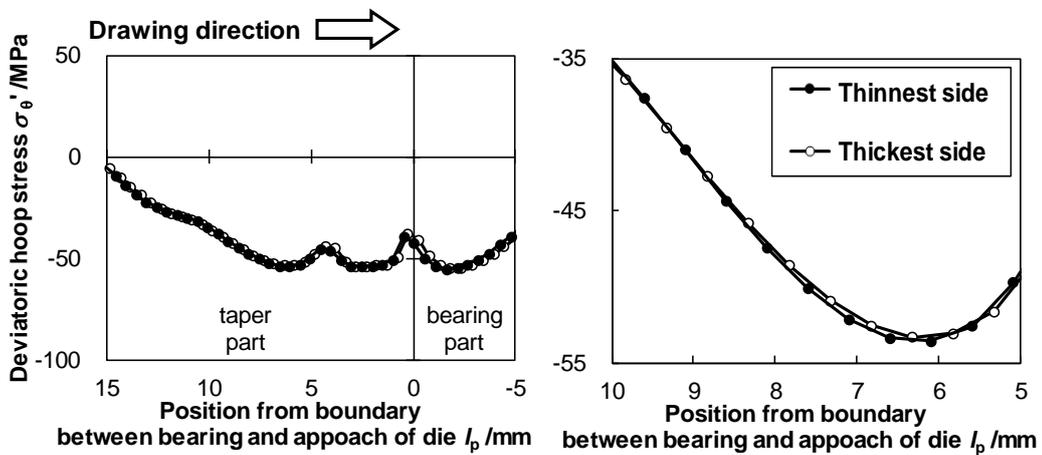


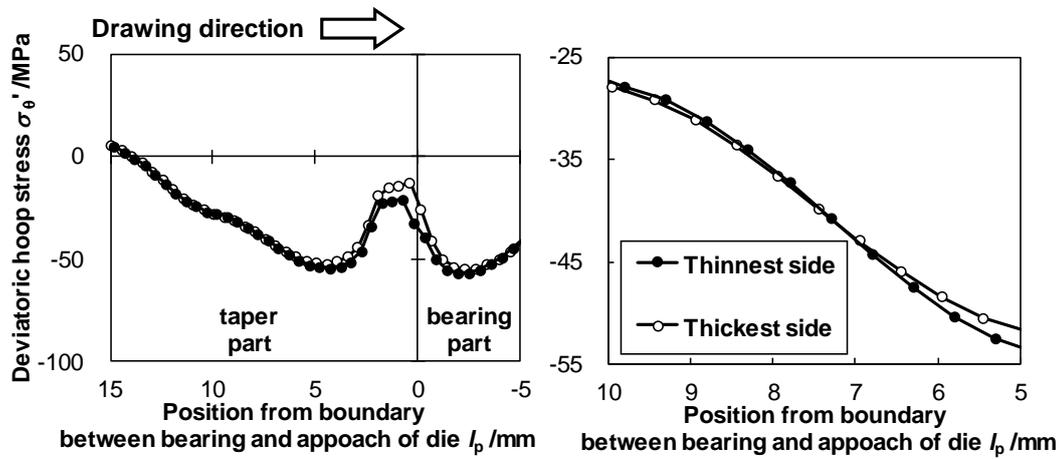
Fig. 4.2.5 Distribution of thickness variation rate during drawing without plug ($d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)



(a) Deviatoric hoop stress ($15 \geq l_p \geq -5$)

(b) Deviatoric hoop stress ($10 \geq l_p \geq 5$)

Fig. 4.2.6 Distribution of deviatoric hoop stress during drawing without plug ($\theta=6^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)



(a) Deviatoric hoop stress ($15 \geq l_p \geq -5$)

(b) Deviatoric hoop stress ($10 \geq l_p \geq 5$)

Fig. 4.2.7 Distribution of deviatoric hoop stress during drawing without plug
 ($\theta=15^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

4.2.1.2 プラグを用いる抽伸加工

3.2.1.2 項の解析結果から、プラグを用いる抽伸加工では、ダイス半角を小さくすることで、偏肉率の減少が大きくなる。本項ではこの現象を考察する。 $l_a=110\text{mm}$ が $l_p=0\text{mm}$ となる位置の加工中における、ダイス半角を変更した場合の加工中の肉厚 t_d の変化を、長手方向距離 l_p を用いて Fig. 4.2.8, Fig. 4.2.9 に示す。薄肉側と厚肉側の肉厚で共通して、 $15\text{mm} \geq l_p \geq 3\text{mm}$ の区間で肉厚はわずかに増加、 $3\text{mm} \geq l_p \geq 0\text{mm}$ の区間で肉厚は大きく減少する傾向が得られた。Fig. 4.2.10, Fig. 4.2.11 に加工中の偏肉 Δt_d 、偏肉率 E_d の変化を示す。 $15\text{mm} \geq l_p \geq 3\text{mm}$ の増肉をする区間において、偏肉と偏肉率は減少を始め、 $6\text{mm} \geq l_p \geq 3\text{mm}$ の区間では偏肉と偏肉率が条件によって増加および減少する。その後 $4\text{mm} \geq l_p \geq 0\text{mm}$ の区間では偏肉が一定であり、加工が進むことで肉厚が減少することで、偏肉率だけが増加する。

ここで、Fig. 4.2.11 の偏肉率の変化を(a)~(c)の3区間にわけ、それぞれの区間と加工中の円管の状態を Fig. 4.2.12 に示し、ダイス半角 $\theta=4.5^\circ$ の条件における $l_a=110\text{mm}$ が $l_p=0\text{mm}$ となる位置の加工中の円管にかかる周方向偏差応力の平均値と半径方向偏差応力の平均値の長手方向分布を Fig. 4.2.13 に示し、Fig. 4.2.14 に FEM 解析上における周方向偏差応力の分布図を示す。Fig. 4.2.13 (a) より、 $15\text{mm} \geq l_p \geq 5\text{mm}$ の区間では材料に負の周方向偏差応力がかかり、半径方向偏差応力も正の値を示すため、肉厚は増加の傾向を示す。一方で、区間(a)の左端である、 $l_p=10\text{mm}$ において、厚肉側の負の周方向応力が減少する。この位置は Fig. 4.2.10 および Fig. 4.2.11 における、偏肉と偏肉率が減少を始めた位置である。また、同じ位置における Fig. 4.2.13 (b) の厚肉側の半径方向偏差応力は、0に近い値を示しており、肉厚の増加がほとんど無いことを示している。この半径方向偏差応力が大きく下がる l_p の位置は、Fig. 4.2.12 (a) の左端であり厚肉側の材料とダイスが接触を始めた点である。そのため、周方向の圧縮応力がわずかに下がり、加えて工具と接触したことで肉厚の増加が妨げられ、半径方向偏差応力が大きく減少する。 $l_p \geq 11$ の区間では、厚肉側の方が薄肉側よりも半径方向偏差応力が大きく、より増肉する。また、この区間では材料と工具が接触しないため、肉厚は管の内面方向と外面方向に増加する。このため、外面方向への肉厚増加量の大きい厚肉側の材料が薄肉側よりも l_p が大きい位置で接触を始め、厚肉側の肉厚増加のみが妨げられるので偏肉率が減少しているように見える。後に薄肉側の材料もダイスと接触し($l_p=6\text{mm}$)、同様に肉厚増加が妨げられるため、区間(a)が成形品の偏肉率に与える影響は少ない。

次に、偏肉と偏肉率が大きな変化を示した区間(b)、 $6\text{mm} \geq l_p \geq 4\text{mm}$ の区間に注目する。Fig. 4.2.13 (a) から、負の周方向偏差応力は厚肉側で大きく減少する。また、Fig. 4.2.13 (b) の半径方向偏差応力を見ると、薄肉側の方が厚肉側よりも半径方向偏差応力が大きく、厚肉側よりも薄肉側の肉厚減少が少ないことを示している。この偏肉率の減少が始まる位置は、Fig. 4.2.12 (b) のように、厚肉側の材料のみがダイスとプラグの両方に接触をしている位置である。また、区間(b)の右端は、薄肉側の材料がダイスとプラグの両方に接触をした位置である。つまりこの区間(b)では、厚肉側はプラグ、ダイスと接触し増肉が妨げられているが、薄肉側はプラグと未接触のために増肉をしている。そのため、この区間では薄肉側と厚肉側で肉厚変化が異なり、厚肉側に比べて薄肉側で肉厚減少量が少なくなるため、偏肉や偏肉率が減少する。

最後に区間(c)、 $4\text{mm} \geq l_p \geq 0\text{mm}$ の区間に注目する。この区間は円管の全周がダイスと

プラグの両方に接触しているため、厚肉側と薄肉側で肉厚減少の傾向は同じとなり、偏肉が一定となる。偏肉が一定であり、加工が進み平均肉厚が減少することで、偏肉率は増加する。抽伸加工における偏肉率変化は、以上の3区間における変化が存在する。

Fig. 4.2.15～Fig. 4.2.17 に $\theta=5, 6, 10^\circ$ の条件における加工中の周方向偏差応力の平均値と半径方向偏差応力の平均値の長手方向分布を示す。いずれのダイス半角においても、上記の3区間が存在する。しかしながら、 $\theta=10^\circ$ の条件では区間(a)、区間(b)の範囲が微小であり、また $\theta=6^\circ$ の条件でも区間(b)の範囲が狭い。これは、ダイス半角が大きいことによって、材料と工具の接触する範囲が減少するためである。Fig. 4.2.18 に示すように、ダイス半角の小さいダイスを用いることで、材料と工具の接触する範囲が増加し、区間(b)の薄肉のみが工具と接触していない加工範囲が増加する。そのためダイス半角を小さくすると、偏肉率をより減少させることができる。

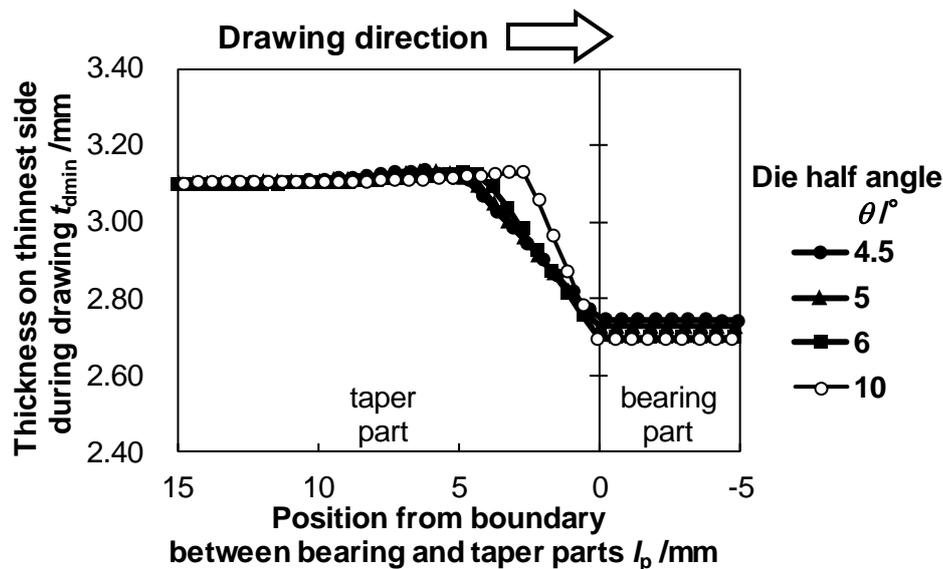


Fig. 4.2.8 Thickness distribution on thinnest side during drawing with plug
($d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

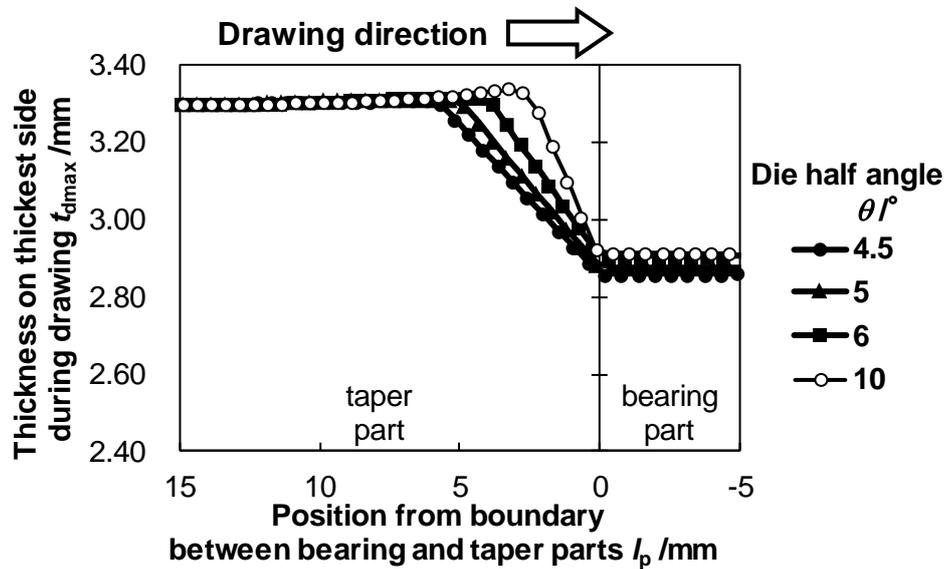


Fig. 4.2.9 Thickness distribution on thickest side during drawing with plug ($d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

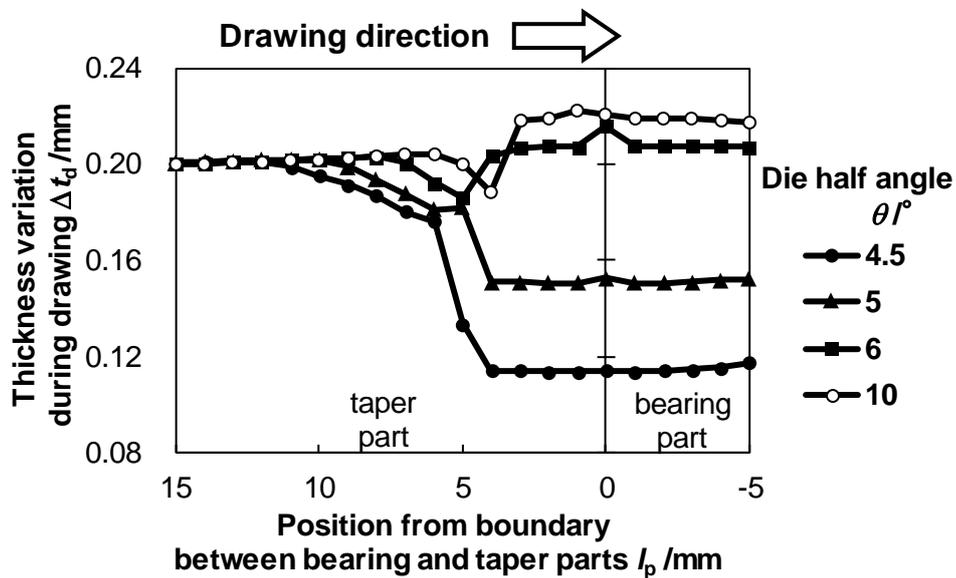


Fig. 4.2.10 Distribution of thickness variation during drawing with plug ($d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

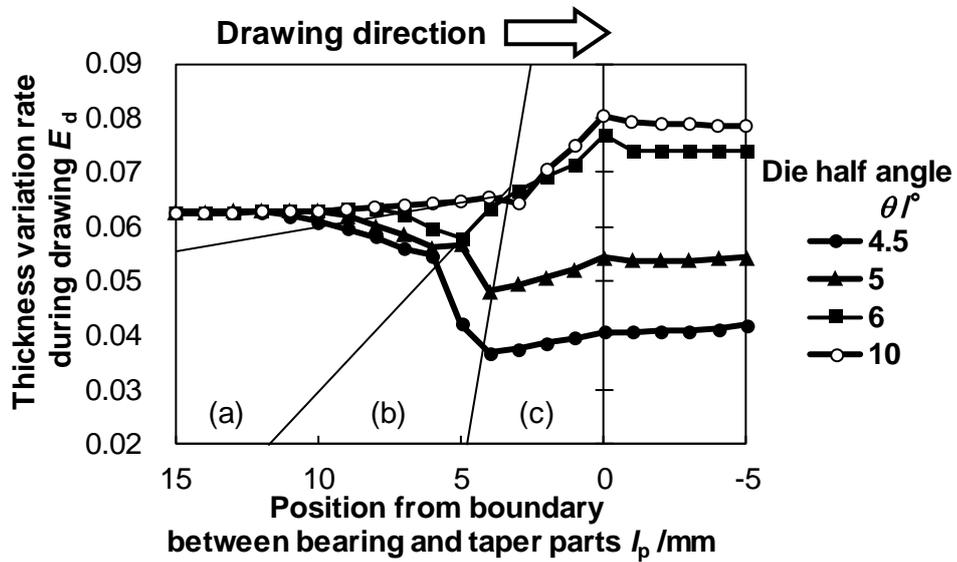


Fig. 4.2.11 Distribution of thickness variation rate during drawing with plug ($d_t=31.5\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

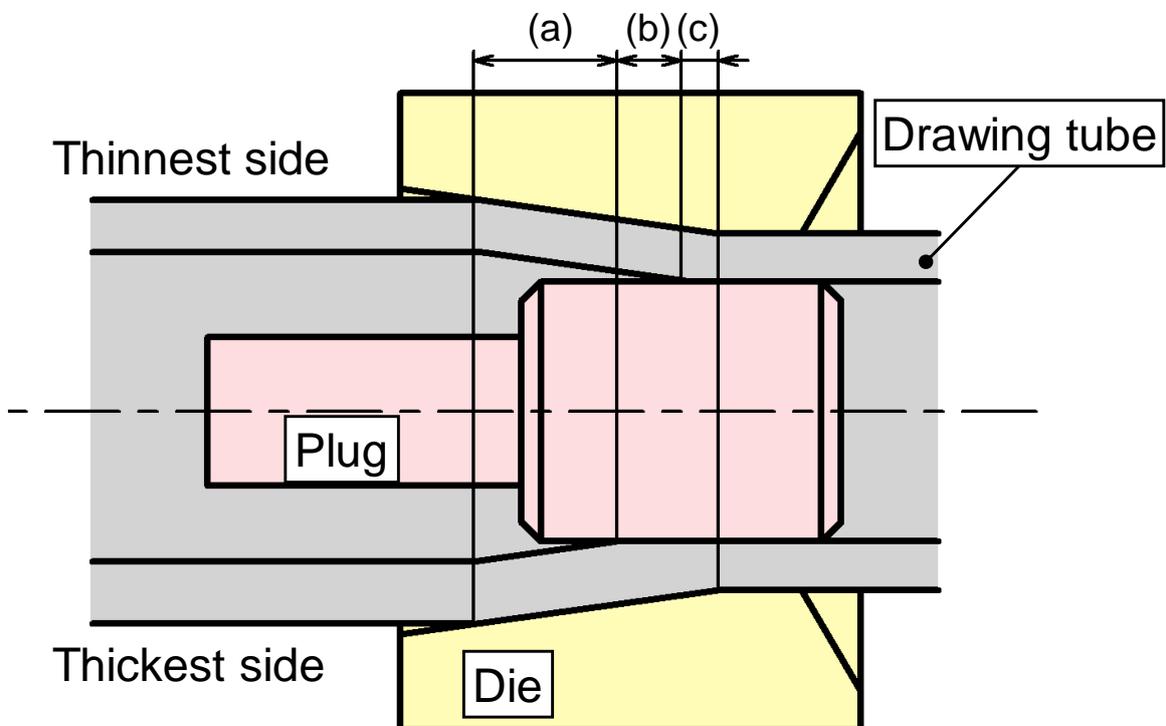
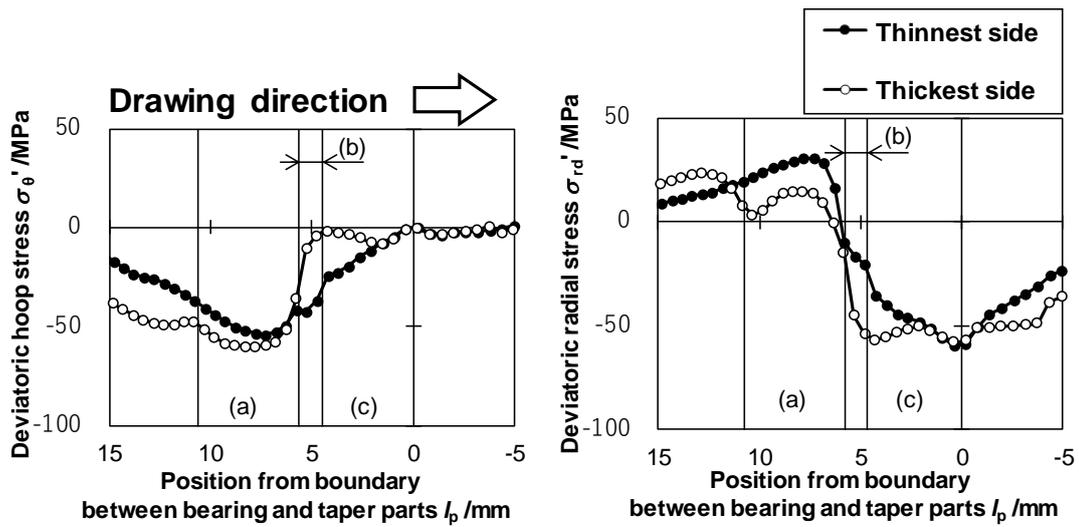


Fig. 4.2.12 Outline during drawing



(a) Deviatoric hoop stress

(b) Deviatoric radial stress

Fig. 4.2.13 Distribution of deviatoric stress during drawing with plug
 ($\theta=4.5^\circ$, $\alpha_t=31.5\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

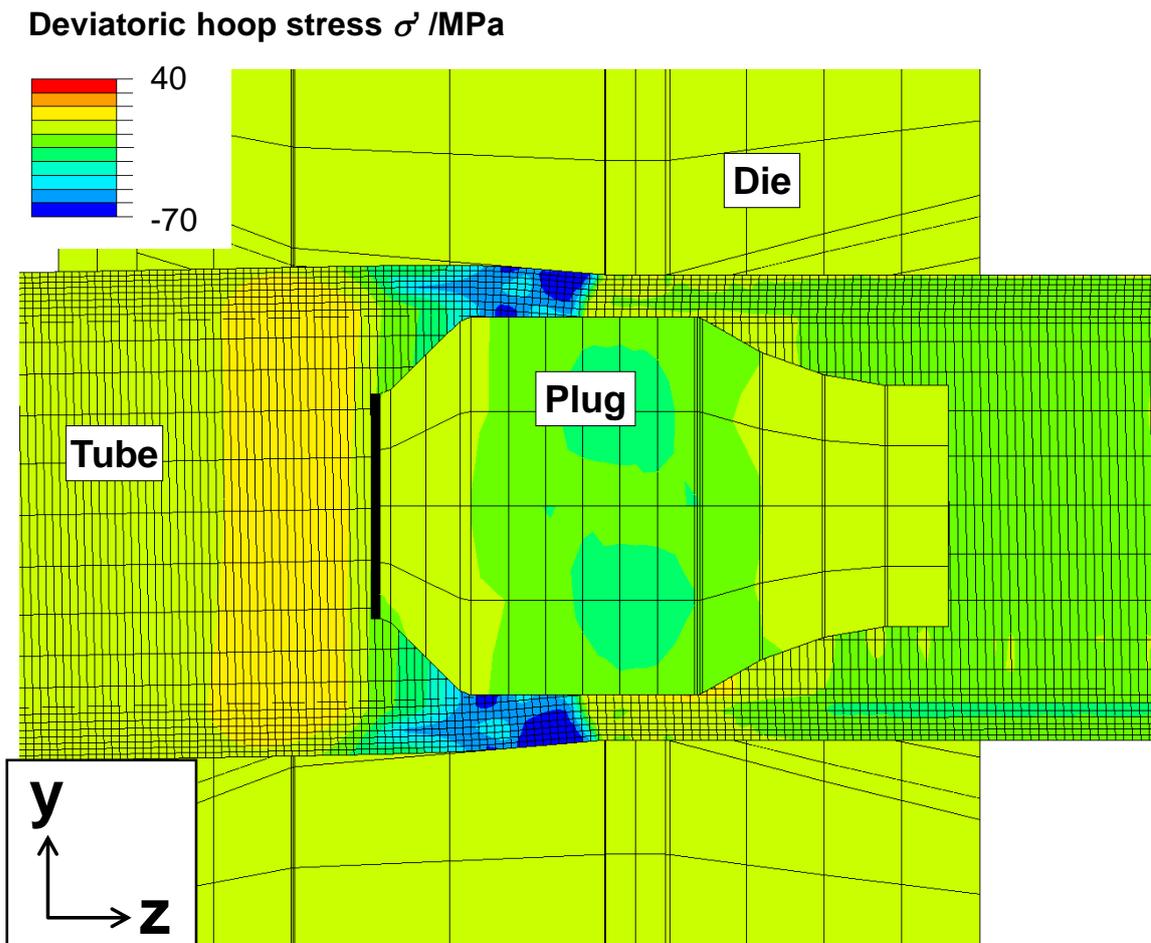


Fig. 4.2.14 Distribution of deviatoric hoop stress on FEM model
 ($\theta=4.5^\circ$, $\alpha_t=31.5\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

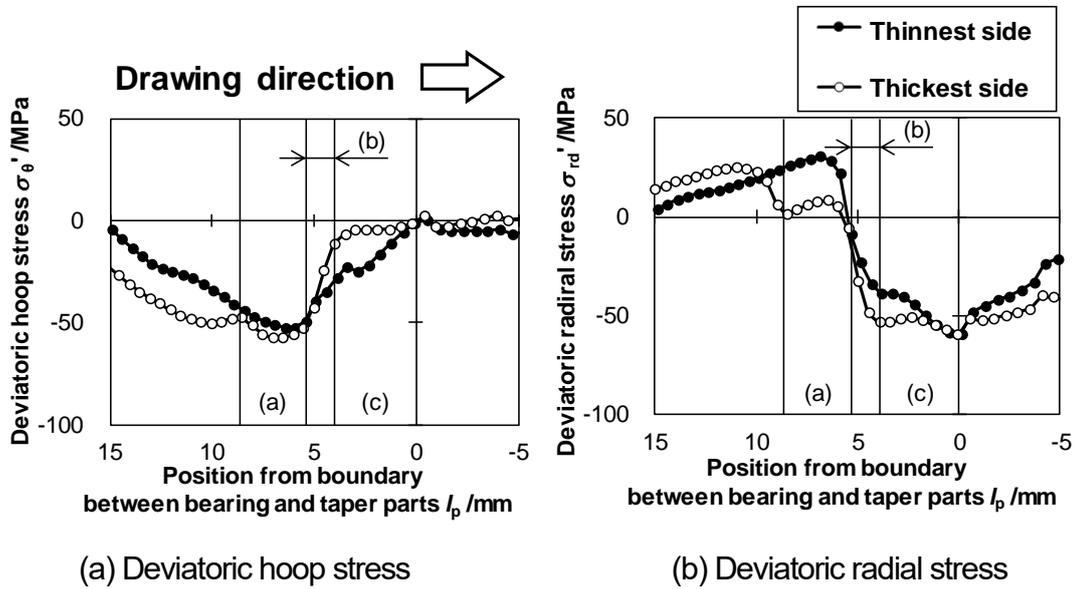


Fig. 4.2.15 Distribution of deviatoric stress rate during drawing with plug ($\theta=5^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

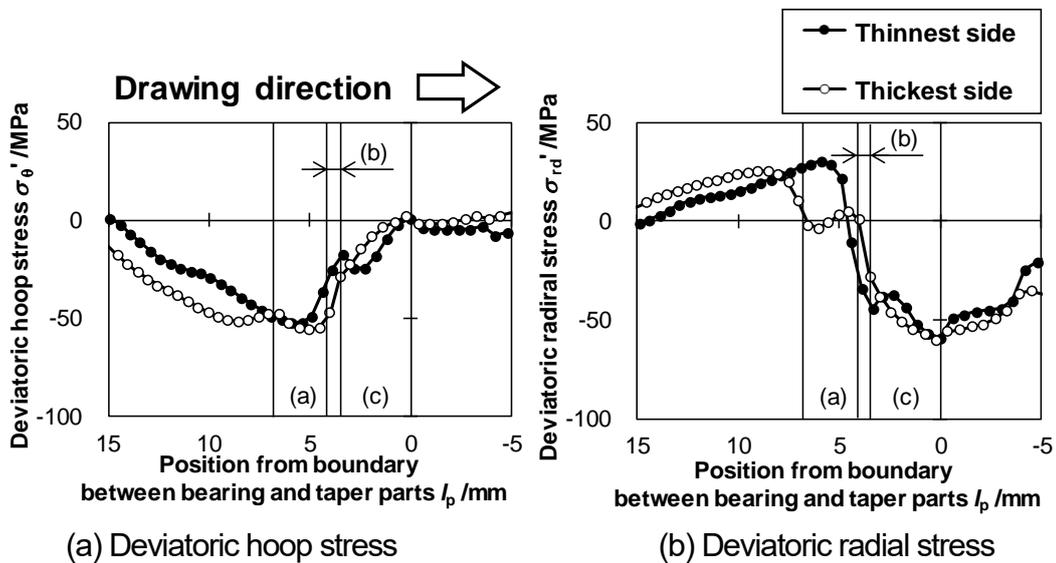
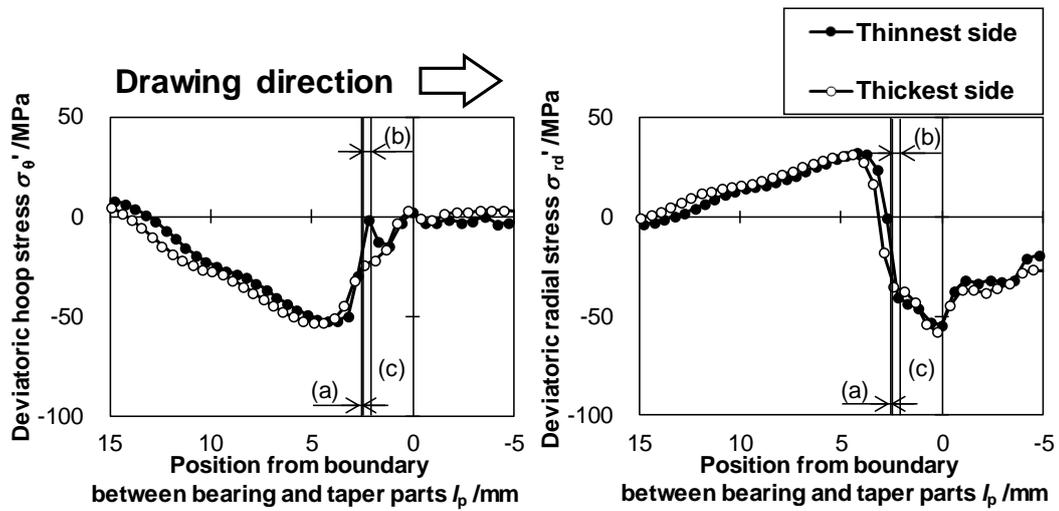


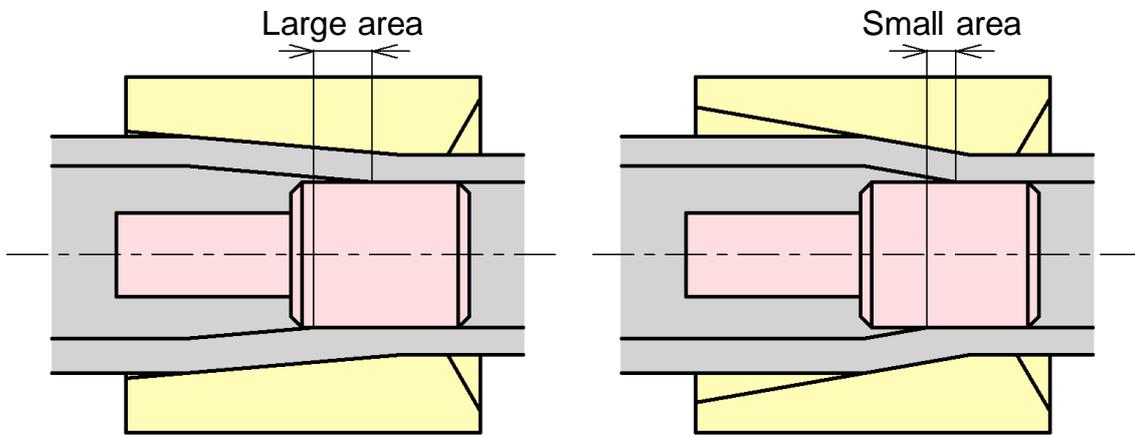
Fig. 4.2.16 Distribution of deviatoric stress rate during drawing with plug ($\theta=6^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)



(a) Deviatoric hoop stress

(b) Deviatoric radial stress

Fig. 4.2.17 Distribution of deviatoric stress rate during drawing with plug ($\theta=10^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.2\text{mm}$)



(a) Small die half angle

(b) Large die half angle

Fig. 4.2.18 Overview of drawing changed die half angle

4.2.2 円管外径の影響

3.2.2 項の解析結果から、円管の初期外径が大きいほど、成形品の偏肉率はより減少する。本項ではこの現象を考察する。円管外径 $d_i = 31.5, 33\text{mm}$ 、ダイス半角 $\theta = 7, 10^\circ$ における、 $l_a = 95 \sim 110\text{mm}$ が $l_p = 0\text{mm}$ となる位置を加工中の肉厚 t_d と偏肉 Δt_d 、偏肉率 E_d の変化を、長手方向距離 l_p を用いて Fig. 4.2.19～Fig. 4.2.22 に示す。 $d_i = 31.5\text{mm}$ よりも、 $d_i = 33\text{mm}$ の方が l_p の大きい値の位置から、すなわちベアリング部分よりも遠い位置から、肉厚の増加が始まっている。また、ダイス半角 θ が小さいほど、肉厚増加が l_p の大きい値の位置から始まっている。偏肉、偏肉率の変化も肉厚と同様に、 d_i が大きく、 θ が小さいほど、 l_p が大きい値の位置から偏肉、偏肉率の減少が始まっている。

Fig. 4.2.23～Fig. 4.2.25 に各条件における、 $l_a = 95 \sim 110\text{mm}$ が $l_p = 0\text{mm}$ となる位置を加工中の円管にかかる周方向偏差応力と半径方向偏差応力の平均値の長手方向分布を示し、その代表例として、 $d_i = 33\text{mm}$ 、 $\theta = 7^\circ$ の条件での FEM 解析上における周方向偏差応力の分布図を Fig. 4.2.26 示す。 $d_i = 31.5\text{mm}$ 、 $\theta = 10^\circ$ の条件における、偏差応力分布は Fig. 4.2.16 に示している。4.2.1.2 項同様、偏差応力分布は Fig. 4.2.12 (a) ～ (c) の 3 区間に分けられる。 d_i が大きく、 θ が小さい条件ほど、材料とダイスの接触開始が l_p の大きい値の位置から始まるため、 l_p が大きい値の位置から負の周方向偏差応力を示す。そのため、広い範囲で負の周方向偏差応力が生じるため、より肉厚が増加する。

区間(b)の、薄肉側の材料のみが工具と非接触の加工域は、ダイス半角や初期偏肉によって決まる。そのため円管外径 d_i に関わらず、区間(b)の範囲は同じになり、偏肉率の減少傾向は同様となるはずである。しかし、偏肉と偏肉率ともに、円管外径 d_i が増加することにとともに、より大きく偏肉率が減少している。これは円管外径 d_i の増加により、材料とダイスの接触区間が増加し、プラグと材料が接触するまでに、より肉厚が増加したためである。このメカニズムの詳細に関しては、次項の肉厚の影響で記す。

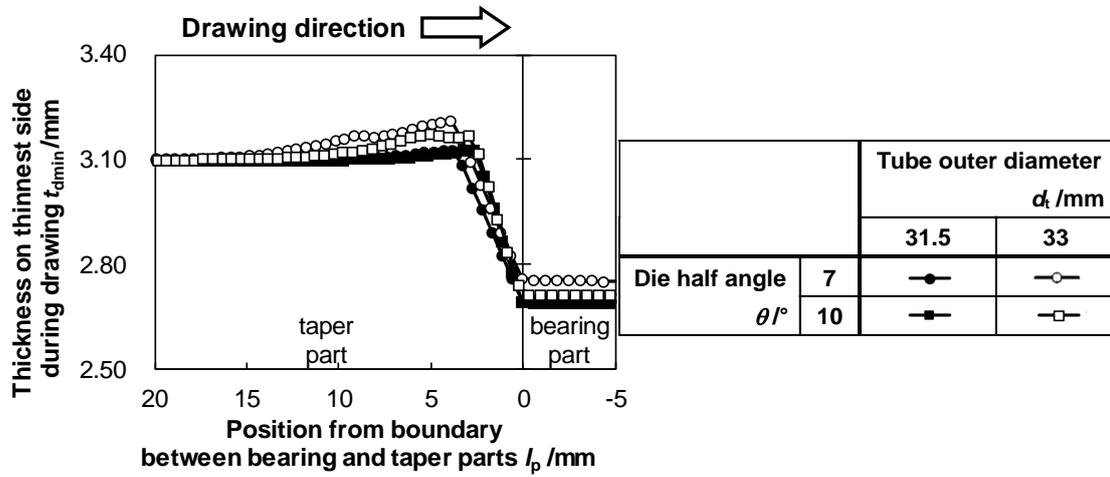


Fig. 4.2.19 Thickness distribution on thinnest side during drawing with plug ($t_{ave}=3.2\text{mm}$)

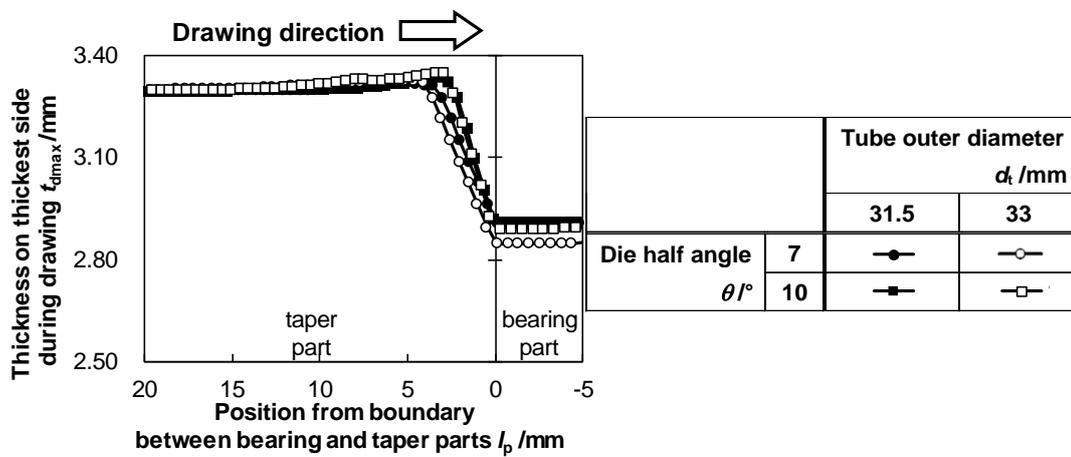


Fig. 4.2.20 Thickness distribution on thickest side during drawing with plug ($t_{ave}=3.2\text{mm}$)

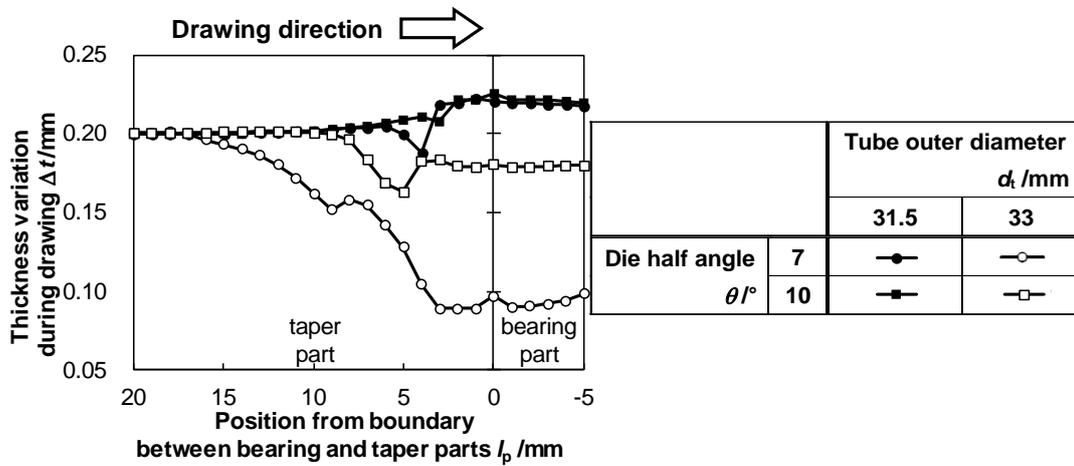


Fig. 4.2.21 Distribution of thickness variation during drawing with plug ($t_{ave}=3.2\text{mm}$)

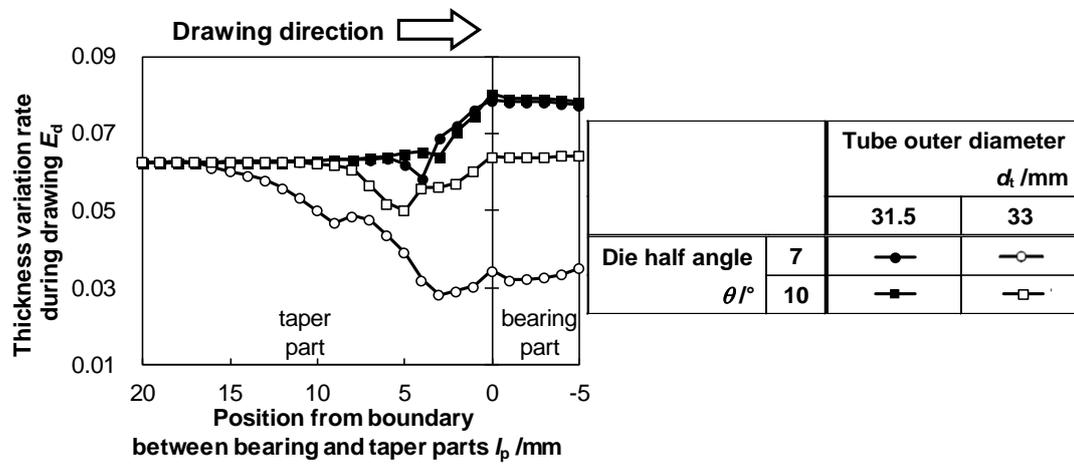


Fig. 4.2.22 Distribution of thickness variation rate during drawing with plug ($t_{ave}=3.2\text{mm}$)

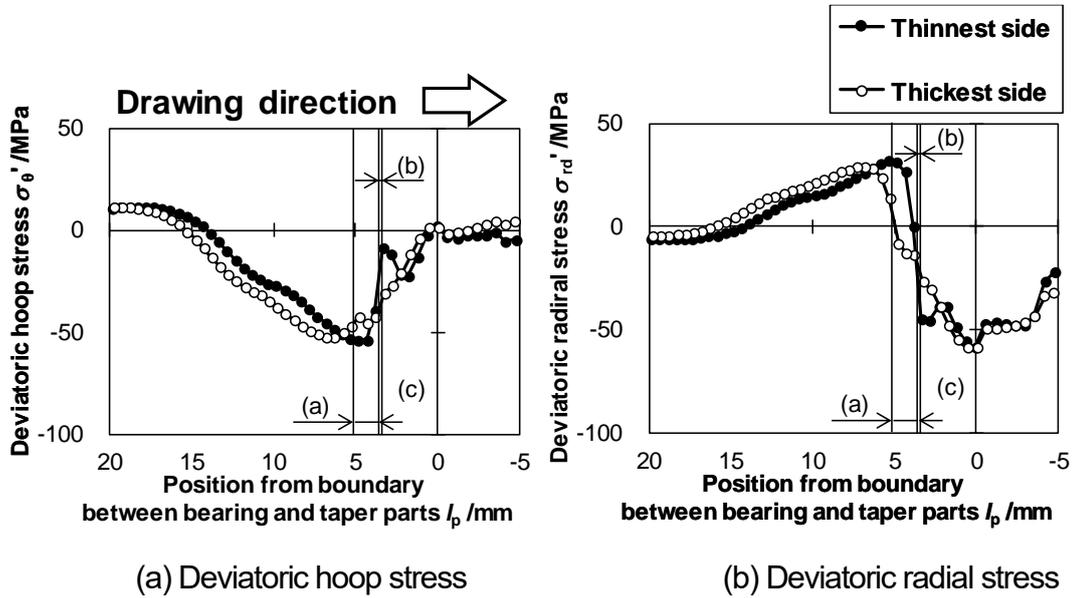


Fig. 4.2.23 Distribution of deviatoric stress rate during drawing with plug ($\theta=7^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

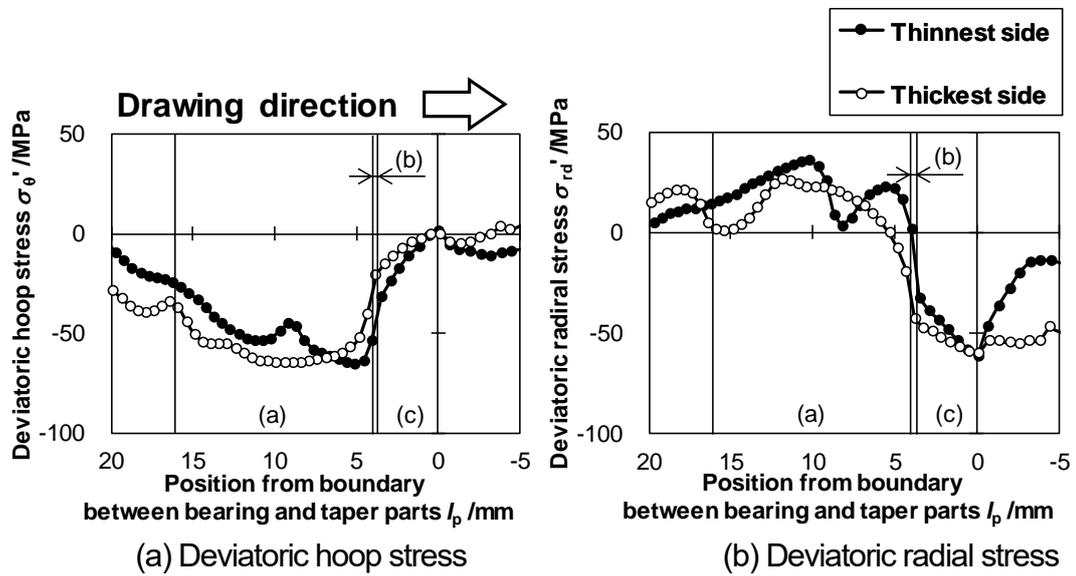
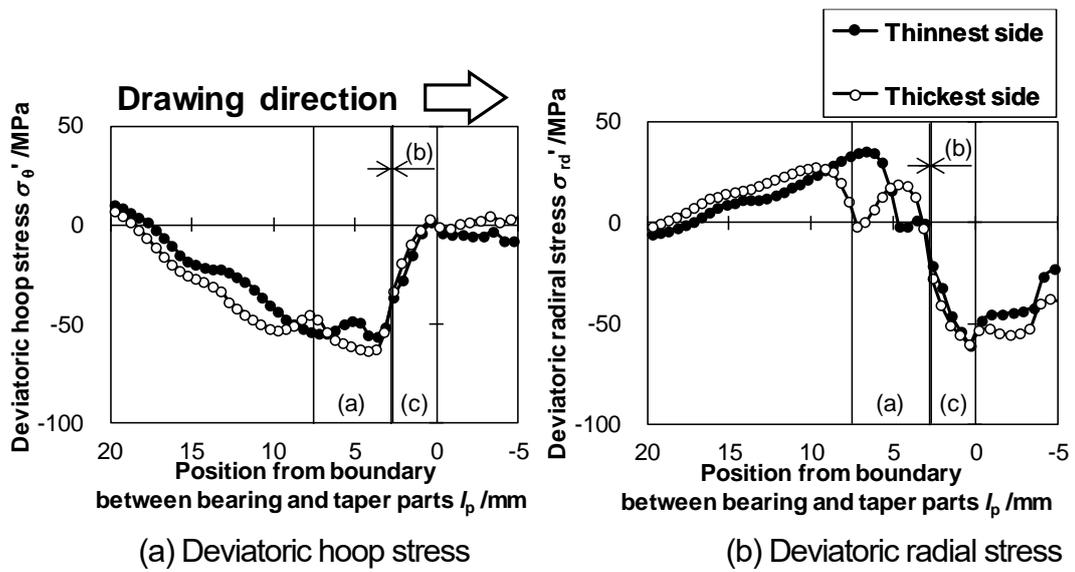


Fig. 4.2.24 Distribution of deviatoric stress rate during drawing with plug ($\theta=7^\circ$, $d_t=33\text{mm}$, $t_{0\text{ave}}=3.2\text{mm}$)



(a) Deviatoric hoop stress (b) Deviatoric radial stress
Fig. 4.2.25 Distribution of deviatoric stress rate during drawing with plug
 ($\theta=10^\circ$, $d_t=33\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

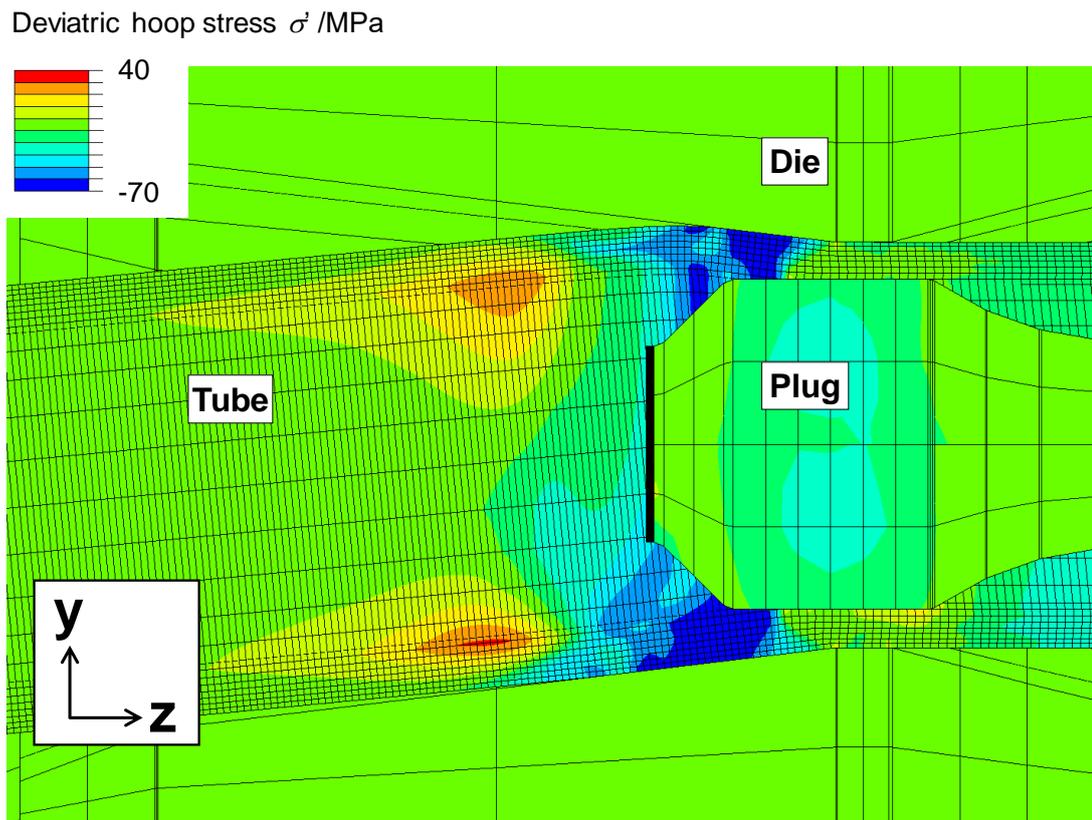


Fig. 4.2.26 Distribution of deviatoric hoop stress on FEM model
 ($\theta=7^\circ$, $d_t=33\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

4.2.3 肉厚の影響

3.2.3 項の解析結果から、初期平均肉厚を増加させることで、肉厚減少率を増加させるほど成形品の偏肉率が減少する傾向がある。本項ではこの肉厚増加による現象を考察する。円管外径 $d_t = 31.5\text{mm}$ で一定にし、初期肉厚 $t_{0\text{ave}}$ を変更した各条件における、 $l_a = 122\text{mm}$ が $l_p = 0\text{mm}$ となる位置を加工中の肉厚変化率 γ の変化を薄肉側、厚肉側でそれぞれ Fig. 4.2.27, Fig. 4.2.28 に示す。各条件によって初期肉厚が異なり、肉厚変化では結果の比較が困難なため、比較しやすいように、初期肉厚 t_0 と加工中の肉厚 t_d を用いて、以下の 4.3 式に示す肉厚変化率 γ を用いて加工中の肉厚の変化を示した。

$$\gamma = \frac{t_d}{t_0} \quad (4.3)$$

薄肉側と厚肉側の両側で、 $15\text{mm} \geq l_p \geq 5\text{mm}$ の区間で肉厚が増加し、 $5\text{mm} \geq l_p \geq 0\text{mm}$ の区間で肉厚は大きく減少する。また、初期肉厚が大きいほど肉厚減少が $l_p \geq 0\text{mm}$ の値が大きい位置から肉厚減少が生じている。次に、加工中の偏肉と偏肉率の変化を Fig. 4.2.29, Fig. 4.2.30 にそれぞれ示す。初期肉厚 t_0 が大きい条件ほど、偏肉と偏肉率が大きく変化する。 $5\text{mm} \geq l_p \geq 1\text{mm}$ の区間で、より大きく偏肉と偏肉率が減少している。4.2.1.2 項と同様に、加工中の偏肉率の変化は、Fig. 4.2.12 (a) ~ (c) の 3 区間に分けられ、条件によって材料と工具の接触開始位置が異なっている。偏肉率の減少する区間(b)の範囲は、ダイス半角や初期偏肉によって変化するため、初期肉厚 $t_{0\text{ave}}$ に関わらず範囲は一定となる。しかし初期肉厚が増加するほど、区間(b)の範囲は増加し、偏肉率は減少している。

Fig. 4.2.31~Fig. 4.2.34 に、各条件における $l_a = 120\text{mm}$ が $l_p = 0\text{mm}$ となる位置を加工中の円管にかかる周方向と半径方向の偏差応力分布を示し、Fig. 4.2.35 に代表例として $t_{0\text{ave}} = 2.9\text{mm}$ における FEM 解析上における周方向偏差応力の分布図を示す。各条件で工具との接触位置が変化するだけとなり、大きな変化はなかった。Fig. 4.2.36 に定義するダイスの中心軸とプラグ中心位置の差 l_m の加工中の変化を Fig. 4.2.37 に示す。ここでの横軸 l_d は Fig. 4.2.38 に示す加工中のダイスの位置を示している。初期肉厚 $t_{0\text{ave}}$ が大きくなるほど、加工が進むにつれてプラグの位置がダイス中心軸の位置に近づく。そのため、成形品の偏肉率が減少する。この原因を調査するために、非固定だったプラグを固定して抽伸加工を行い、考察を行った。薄肉側と厚肉側の肉厚減少率が同じになるようにプラグの垂直方向(y 軸方向)の変位を拘束した場合における、加工中にプラグが材料から受ける y 軸方向荷重 F_y を Fig. 4.2.39 に示す。y 軸方向荷重 F_y は、プラグ上面からかかる荷重 F_u と、プラグ下面からかかる荷重 F_d の差で表している。初期肉厚 $t_{0\text{ave}}$ が増加するほど、プラグにかかる y 軸方向荷重は減少し、厚肉側への荷重が生じる。 $t_{0\text{ave}} = 2.9, 3.2\text{mm}$ における、プラグを固定した場合での、加工中の円管にかかる周方向偏差応力分布を Fig. 4.2.40, Fig. 4.2.41 に示す。両方の肉厚がプラグと接触している区間(c)では、薄肉側が厚肉側よりも負の周方向偏差応力が大きくなるため、薄肉側により大きな周方向圧縮応力が生じる。また、初期肉厚を増加させることで材料とプラグの接触範囲が増加するため、区間(c)の範囲が増加し、プラグの荷重差が大きくなる。このため、初期肉厚 $t_{0\text{ave}}$ が大きいほど、薄肉側からの荷重が厚肉側からの荷重よりも大きくなるため、プラグは厚肉側に移動し、成形品の偏肉率は減少する。

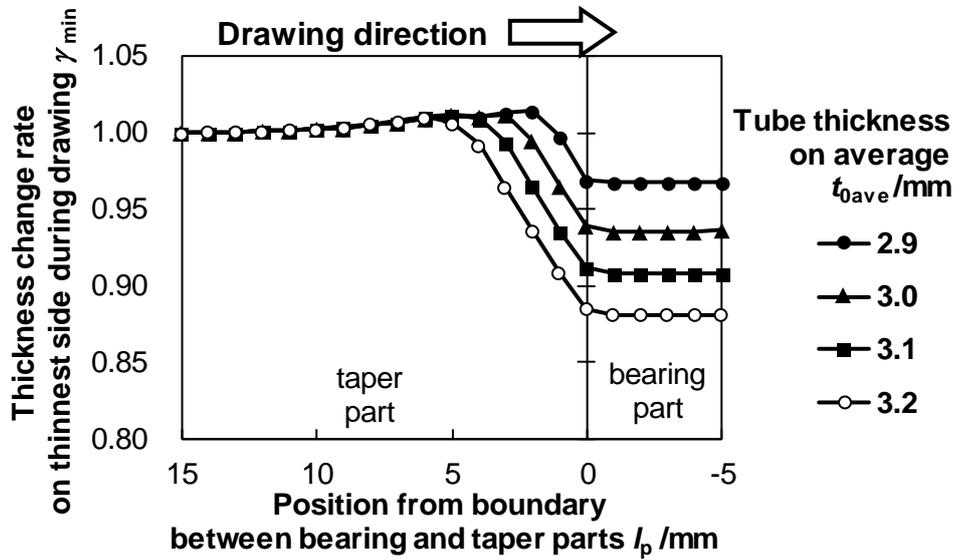


Fig. 4.2.27 Distribution of thickness change rate on thinnest side during drawing with plug ($\theta=5^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$)

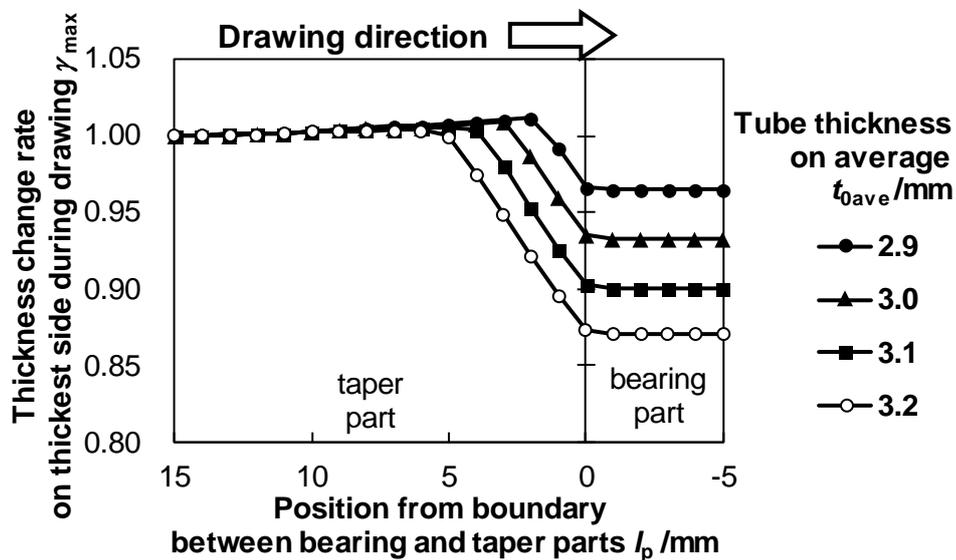


Fig. 4.2.28 Distribution of thickness change rate on thickest side during drawing with plug ($\theta=5^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$)

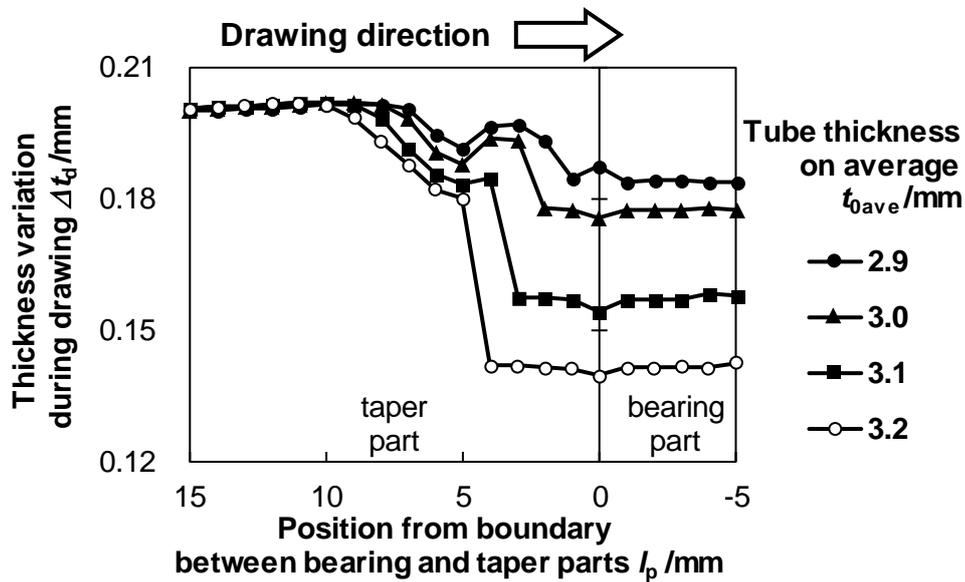


Fig. 4.2.29 Distribution of thickness variation during drawing with plug ($\theta=5^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$)

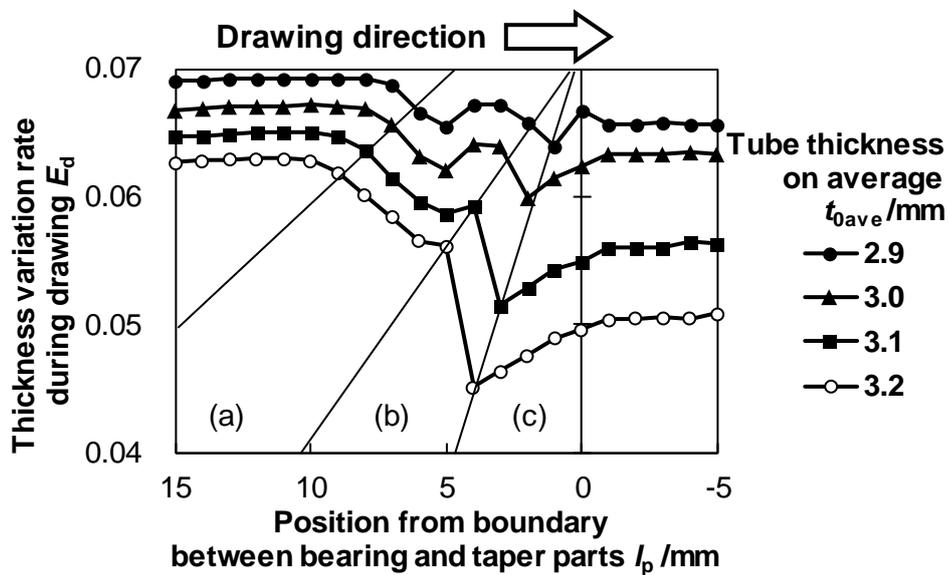


Fig. 4.2.30 Distribution of thickness variation rate during drawing with plug ($\theta=5^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$)

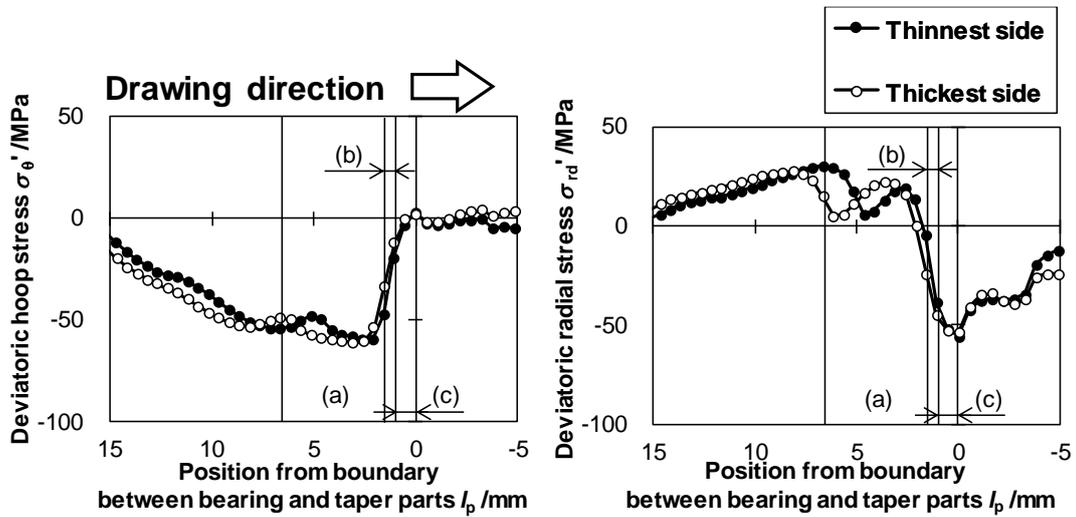


Fig. 4.2.31 Distribution of deviatoric stress rate during drawing with plug ($\theta=5^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=2.9\text{mm}$)

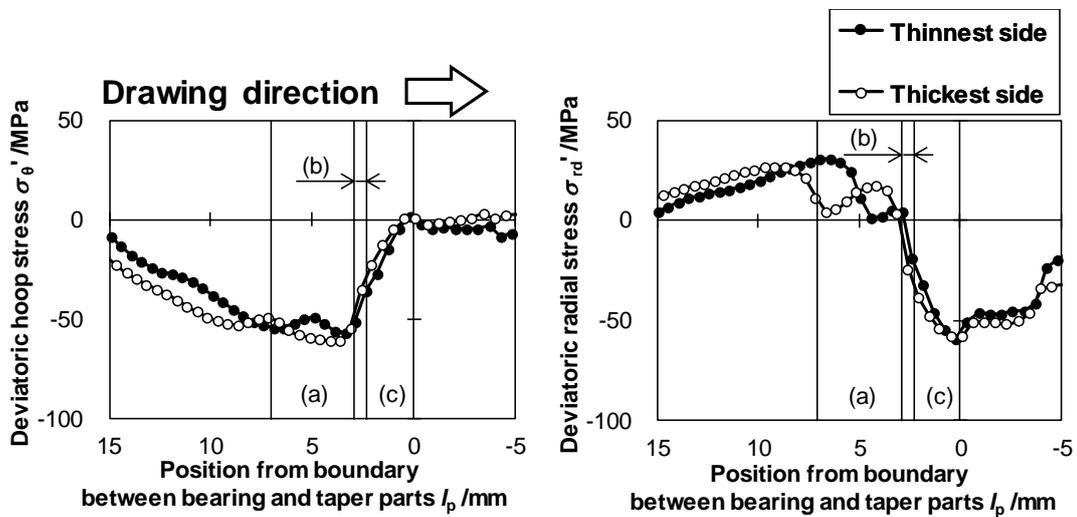


Fig. 4.2.32 Distribution of deviatoric stress rate during drawing with plug ($\theta=5^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.0\text{mm}$)

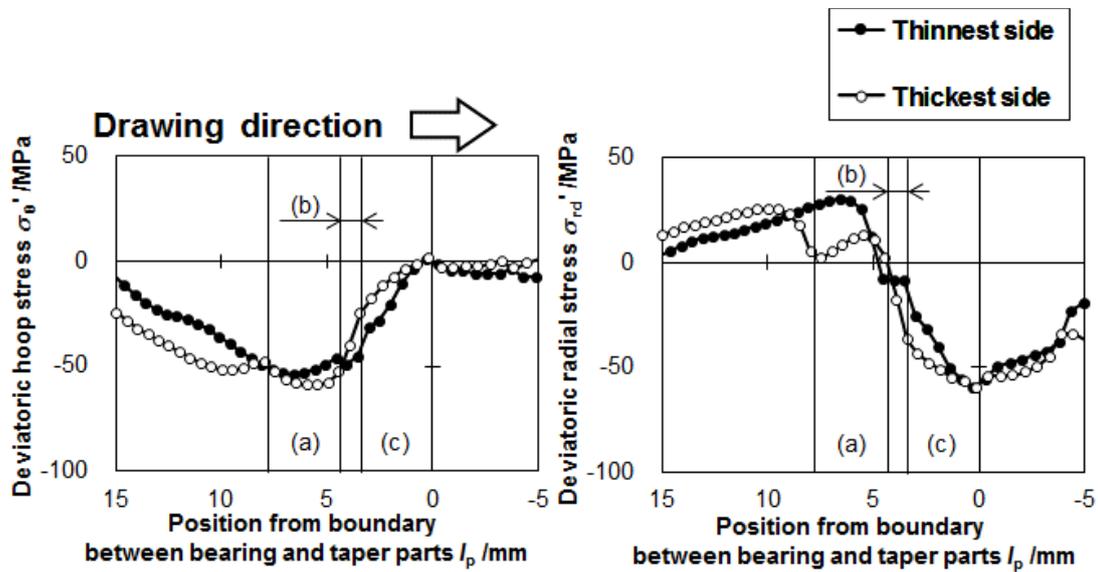


Fig. 4.2.33 Distribution of deviatoric stress rate during drawing with plug ($\theta=5^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.1\text{mm}$)

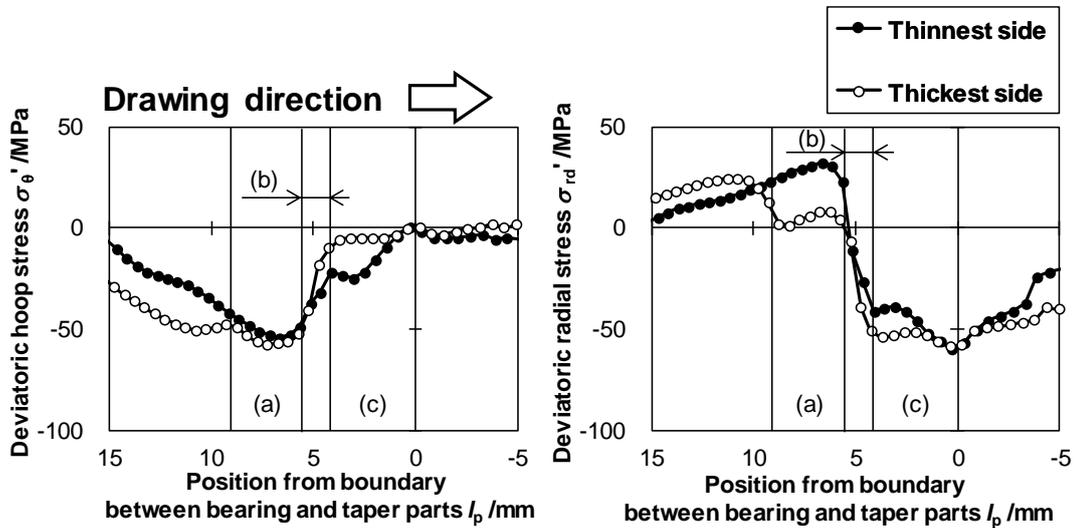


Fig. 4.2.34 Distribution of deviatoric stress rate during drawing with plug ($\theta=5^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

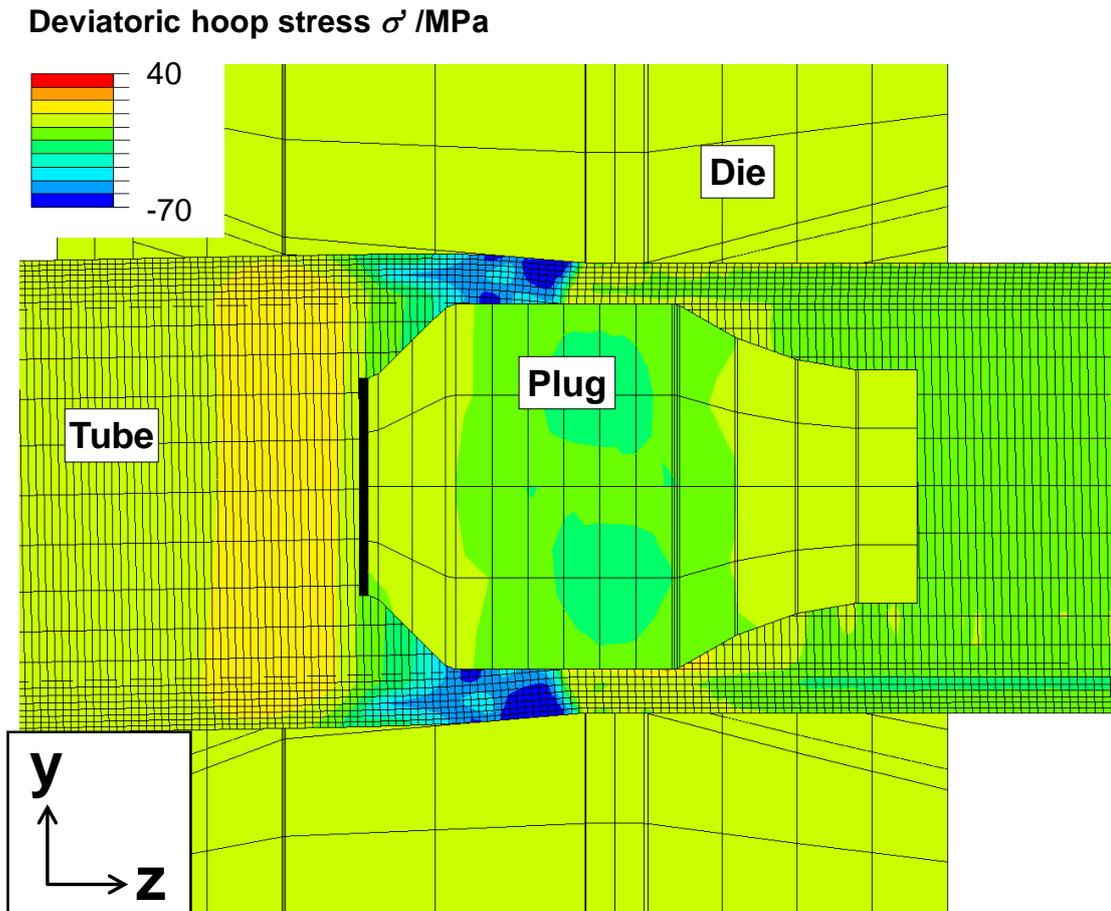


Fig. 4.2.35 Distribution of deviatoric hoop stress on FEM model
 ($\theta=5^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=2.9\text{mm}$)

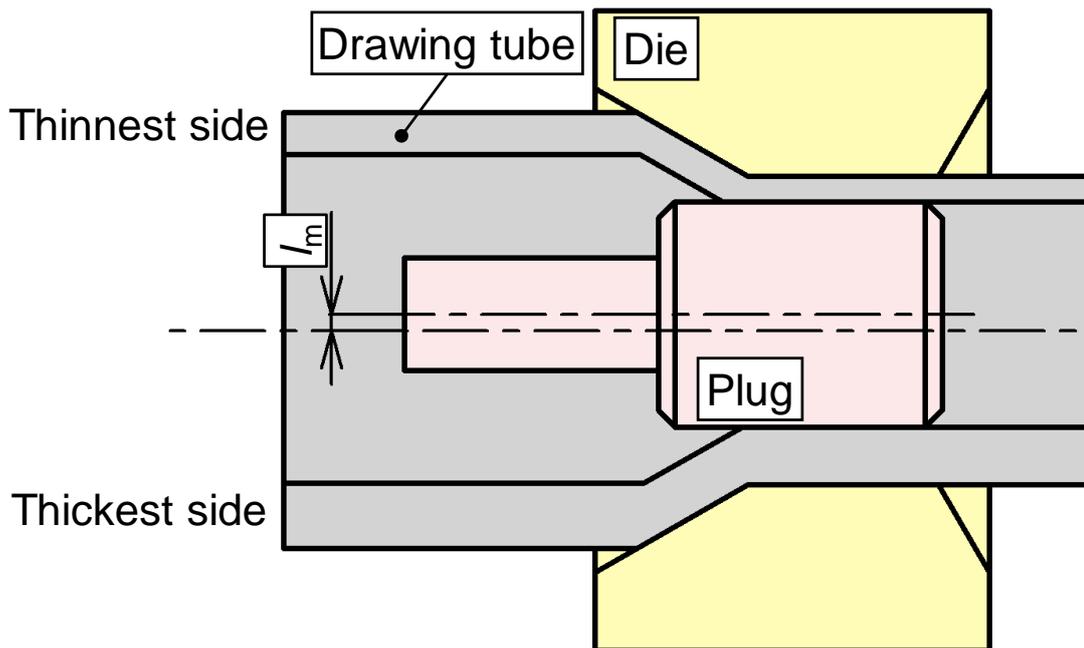


Fig. 4.2.36 Definition of distance plug center from die center at y direction

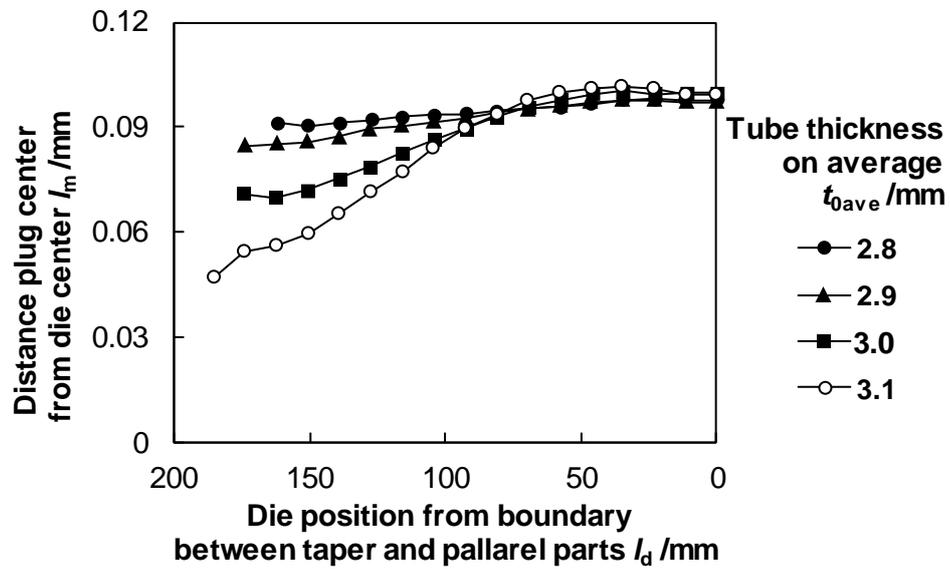


Fig. 4.2.37 Distance plug center from die center at y direction

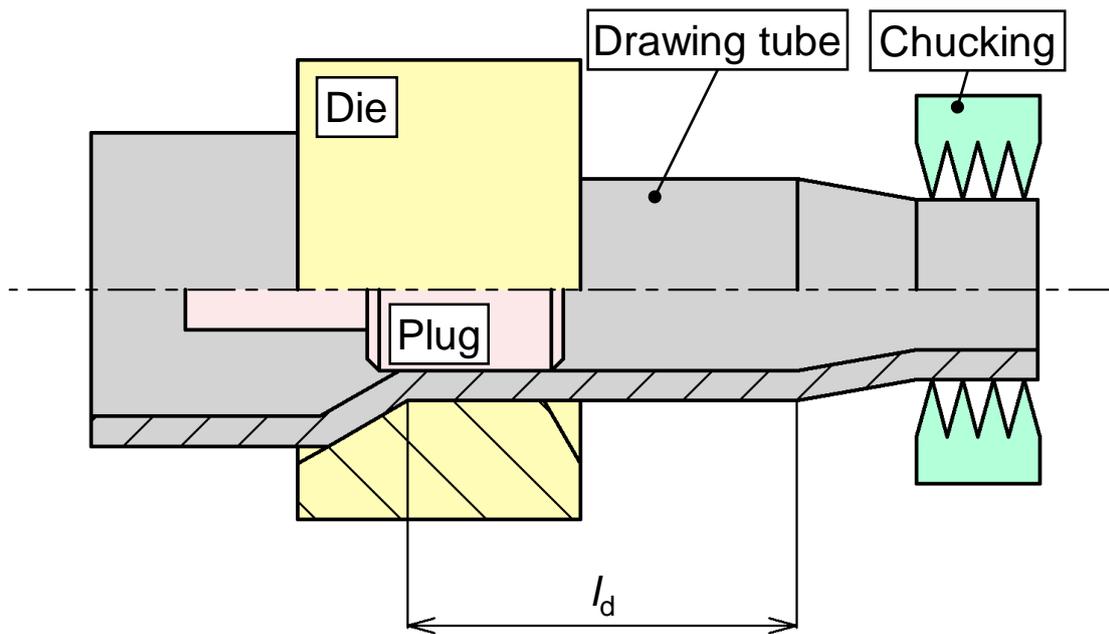


Fig. 4.2.38 Definition of die position from boundary between taper and parallel parts

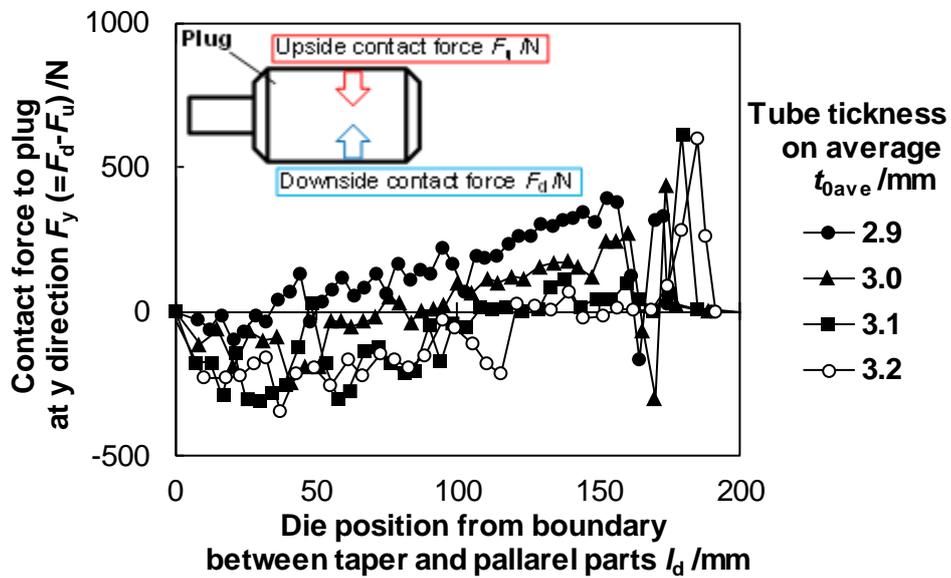


Fig. 4.2.39 Contact force to plug at y direction with fixed plug

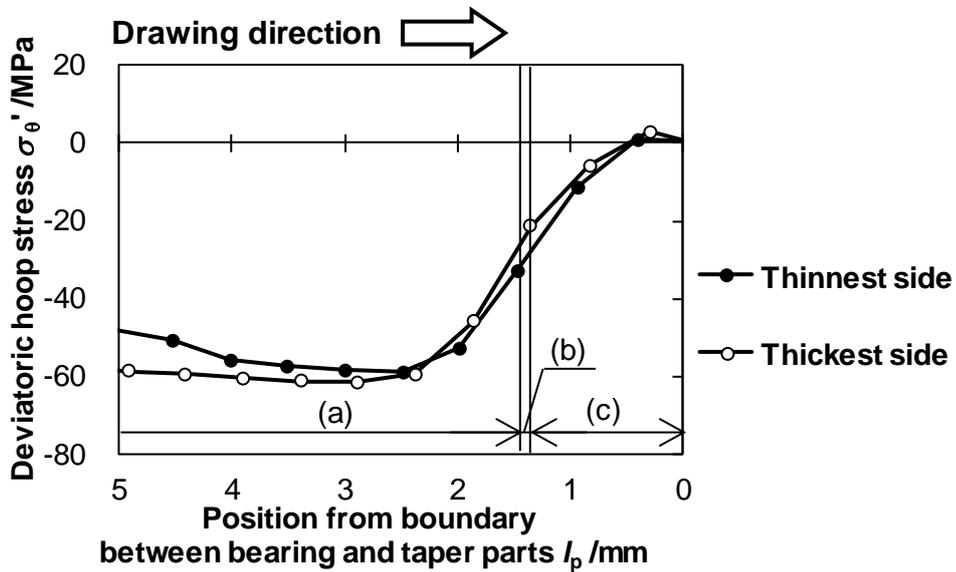


Fig. 4.2.40 Distribution of deviatoric stress during drawing with fixed plug ($\theta=5^\circ$, $d_t=31.5$ mm, $t_{0ave}=2.9$ mm)

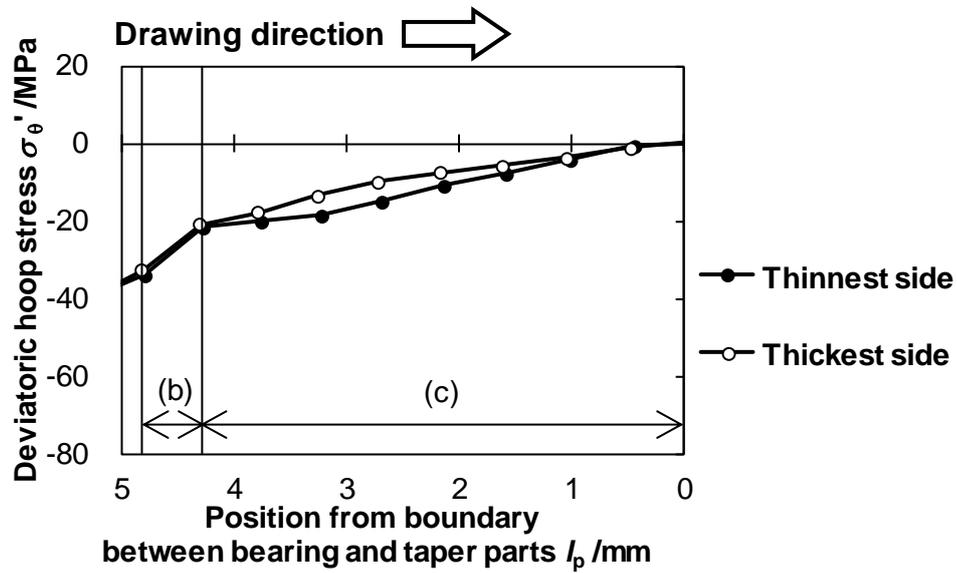


Fig. 4.2.41 Distribution of deviatoric stress during drawing with fixed plug ($\theta=5^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$, $t_{\text{ave}}=3.2\text{mm}$)

4.3 工具形状の提案と検証

本章の考察から、ダイス半角 θ を小さく、円管外径 d_d を大きく、圧下率として初期肉厚 t_{0ave} を大きくすることによって偏肉率が小さくなる傾向が得られた。しかしながら、非固定のプラグを用いたために、プラグの位置が安定せず、成形品の偏肉率を一定の値として得ることができていない。そこで本項では、固定された長軸プラグによる抽伸加工を、偏肉率が最も大きくなる加工条件 (A) と偏肉率が最も小さくなる加工条件 (B) で解析を行い、成形品の偏肉率を示す。本項における解析条件を Table 4.3.1 に示し、加工条件(A)と(B)の詳細を、Table 4.3.2 に示す。支持棒の根本をダイス中心軸と同じ位置で固定し、10000mmの長軸とすることで、プラグのたわみを再現した。本項における解析と、プラグを固定しない条件における解析にかかる時間を Table 4.3.2 に示す。プラグを固定しない条件で行う解析の場合、解析時間が半分程度となるため、多くの条件で解析を行う場合に適している。Fig. 4.3.1 に、成形品の長手方向偏肉率分布を示す。どちらの条件でも、約 $100 \leq l_a \leq 150$ の区間で偏肉率の変化が少なく、加工が安定している定常域となっている。加工条件 (A) では、初期偏肉率よりも成形品の偏肉率が増加している。対して加工条件 (B) では、 l_a が大きくなるほどに偏肉率は減少し、定常域ではほとんど0を示している。したがって、適切な工具形状を使用することで、成形品の偏肉率は減少させる事が可能である。

Table 4.3.1 Analysis condition with fixed long plug (1)

Die	Type		Rigid	
	Die hole diameter d_d /mm		30	
	Bearing length l_b /mm		4	
Plug	Type		Elastic	
	Plug diameter d_p /mm		24.4	
	Supporting rod length l_p /mm		10000	
Tube	Type		Plastic	
	Material of tube		A1070	
	Length of tube l /mm		170	
	Initial thickness variation $\Delta t = t_{max} - t_{min}$ /mm		0.2	
	Division	Axial		0.5 mm/div.
		Radial		7 div. (progressive)
Hoop		15 °/div.		
Coefficient of friction μ			0.07	

Table 4.3.2 Analysis condition with fixed long plug (2)

Drawing condition		(A)	(B)
Die	Die half angle $\theta/^\circ$	10	5
Tube	Tube outer diameter d_t /mm	31.5	33
	Tube thickness on average t_{0ave} /mm	2.9	3.2
	(Initial thickness variation rate E_0)	(0.0690)	(0.0625)

Table 4.3.3 Analysis time

Drawing condition	Use long and fixed plug		Use not fixed plug ($\theta=4.5^\circ$, $d_t=31.5\text{mm}$, $t_{0ave}=3.2\text{mm}$)
	(A)	(B)	
Analysis time t_a / h	103.5	127.5	60.0

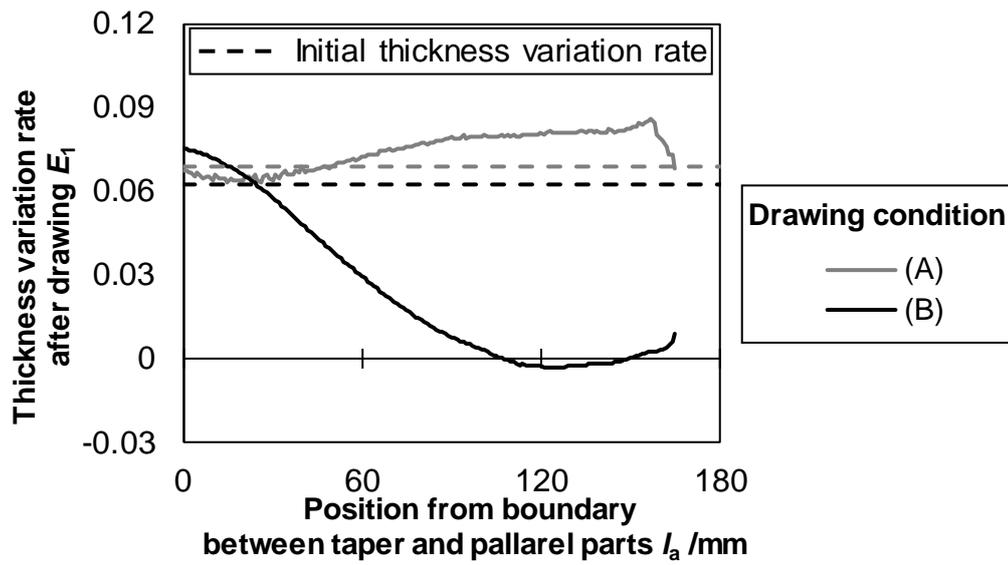


Fig. 4.3.1 Thickness variation rate of drawn tube with fixed plug

第5章 結言

5.1 結言

初期偏肉を有する円管の抽伸加工において、工具形状が成形品の偏肉率に与える影響をFEM解析により調査した。その結果、以下の結論を得た。

- プラグを用いずに抽伸加工を行う場合、加工時に薄肉側の肉厚が厚肉側の肉厚よりも増加するため、成形品の偏肉率が減少する。
- プラグを用いた抽伸加工を行う場合、加工時に厚肉側の材料のみが工具との接触により肉厚増加を妨げられる領域が存在する。この領域では、工具によって拘束されていない薄肉側が大きく増肉するため、偏肉率が減少する。
- プラグを用いた抽伸加工において、ダイス半角を減少させることで、上記の厚肉側の増肉のみが妨げられる領域が増加する。このため、半角の小さいダイスを用いることが、成形品の偏肉率を減少させるにあたり有効である。この偏肉率減少効果はダイス半角 $\theta \leq 5^\circ$ にすることで現れる。
- プラグを用いた抽伸加工において、円管の初期肉厚を増加させることで、ダイスから材料の薄肉側と厚肉側にかかる荷重に差が生じる。このため、プラグは厚肉側へ移動し、成形品の偏肉率は減少する。この偏肉率減少効果は、初期肉厚を増加させるほど、高い効果が得られる。
- プラグを用いた抽伸加工において、材料外径を増加させることで、材料とダイスの接触領域が増加し、材料の肉厚が増加する領域が増える。このため、材料外径を大きくすることで、材料がプラグに接触する時点での材料肉厚が大きくなり、初期肉厚が増加した場合と同様に、ダイスから材料の薄肉側と厚肉側にかかる荷重に差が生じ、成形品の偏肉率が減少する。この偏肉率減少効果も初期肉厚の影響と同様に、材料外径を増加させるほど高い効果が得られる。

参考文献

- 1) 篠原哲雄・吉田一也, 鋼線の引抜きにおける横割れ表面疵の成長・消滅解析, 鉄と鋼, vol. 90, (2004), No.12, pp.1010-1015.
- 2) T. Kuboki, K. Nishida, T. Sakaki, M. Murata: Effect of plug on levelling of residual stress in tube drawing, J. Mater. Process. Technol., Vol. 201, No. 1-3 (2008), pp. 189-192.
- 3) 山本憲隆・島進, 引抜き加工における摩擦係数に及ぼす素材の材質および断面減少率の影響, 日本機械学会論文集, vol. 57, (1991-6), No.538, pp.2034-2040.
- 4) 奥井達也・山田将之・山田建夫, 3 ロールレデューサの変形解析, 塑性と加工, Vol. 38, No.432, (1997), pp. 76-80.
- 5) 井口敬之助・栗山幸久・師井直紀・浜孝之・宅田裕彦, 高張力鋼板のロール成形におけるスプリングバックの検討—電縫鋼管のロール成形シミュレーション 第1報—, 塑性と加工, Vol. 53, No. 622 (2012-11), pp. 1003-1007.
- 6) F.Foadian, A.Carradó, H. Palkowski, Precision tube production: Influencing the eccentricity and residual stresses by tilting and shifting, J. Mater. Process. Technol., Vol. 222, (2008), pp. 155-162.
- 7) 吉村英徳・出宮久士・三原豊, 銅管の真円矯正における接触率の影響, 鉄と鋼, vol. 95, (2009), No.11, pp.801-806.
- 8) 久保木孝, 塑性加工に必要な FEM^⑦管の引抜き・押出し加工の解法, 塑性と加工, Vol. 55, No.646, (2014-11), pp. 989-994.
- 9) 渡部了・阿部正昭・久保木孝, 引抜き材の非軸対称切削加工時の曲がり抑制に関する検討, 塑性と加工, Vol. 41, No. 476 (2000), pp. 701-705.
- 10) de Souza Neto, E.A., Peric, D., Dutko, M., Owen, D.R.J. Design of simple low order finite elements for large strain analysis of nearly incompressible solids, Int. J. Solids Struct., Vol33, No.20-22, (1996) pp. 3277-3296.
- 11) P Mullet, J Rance : Applied discrete element technology, BENCHmark, 17-24, no.1, 2003.
- 12) T. Kuboki, H. Furuta, M. Akiyama: Suppression of bending after steel bar drawing by heavy-reduction pass, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf., Vol. 216, No. 12 (2004), pp. 1461-1470.
- 13) 田中浩・佐藤優・吉田一也, 空引きにおける肉厚分布の変化—管の偏肉に関する研究 I—, 塑性と加工, Vol. 18, No.202 (1977-11), pp. 901-908.

謝辞

本研究を進めるに当たってご享受頂いた久保木孝教授に厚く御礼申し上げますとともに、梶川翔平助教授、梶正子様のご多大なるご支援に感謝を申し上げます。また、加工を行う際に指導していただいた電気通信大学ものづくりセンター機械設計工作部門の齋藤悟様、荒川欣吾様、田幡秀典様、藤本甫様に深い感謝の意を表します。

最後になりますが、高い能力を持って研究の方針を示して頂いた研究室の先輩方、類まれなる才能と希代の個性を持ち多くのサポートとアットホームな雰囲気をもたらした M1 の石川、大場、村岡、他山の石として生活に安定と笑顔を与えてくれた B4 に心より感謝申し上げます。