

非軸対称ダイスによる回転口絞り加工

電気通信大学 知能機械工学科

助教授 久保木 孝

(平成 15 年度研究開発助成 AF-2003020)

キーワード：口絞り，円管，非軸対称ダイス

1. 研究の目的と背景

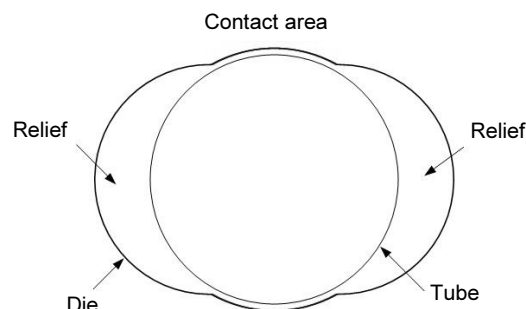
管材の末端部外側から，剛体工具により円周方向に圧縮応力を作用させ，管の末端部の径を縮小する加工法を総称して口絞り加工という¹⁾．管端部の加工は，主として他の管あるいは部材と結合する，或いは，配管部品の結合要素として利用するために行われている²⁾．また，管端部成形品は自動車のエアバッグやシャフトをはじめとした構造物や配管を中心として様々な用途に幅広く用いられている．

口絞り加工には，プレス成形，回転成形，スエージングマシンによる成形などの加工方法がある．プレス成形には加工方法が単純で安いコストで製造できる利点がある反面，高い加工限界を得ることができない欠点がある．そこで本研究は，プレス成形の長所である生産性の高さを維持しつつ，短所である加工限界の低さを改善することを目的とする．加工限界を向上させる方法としてダイスに着目し，新たなダイスおよび加工法を開発し，実験によりその有効性を検証した．

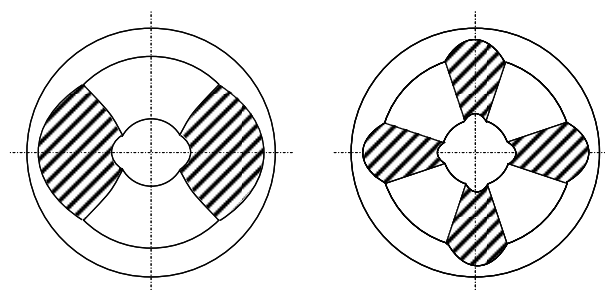
2. 加工原理および方法

口絞り加工を行う際に必要な加工力は，①管径の減少に必要な力，②ダイス-材料間に作用する摩擦力に打ち勝つための力，③ダイス入り口部の曲げ変形仕事に必要な力の3つの力の合力である¹⁾．これらの力が大きくなると屈曲やしわといった不良成型が発生しやすくなり加工限界が減少する．そのため加工限界を向上させることは，これらの力を減少させ，加工力を減少させることにより実現できる⁴⁾⁵⁾．そこで本研究ではダイスの形状に着目し，新しいダイスの形状を適用することにより加工力を減少させ，加工限界の向上を目指した．

一般的なプレスによる口絞り加工では，ダイス内面はテーパ形状や曲面形状などの形状になっており，その形は軸対称形である．ダイスと円管との接触により加工力が発生するため，その接触面積を減らすことで，加工力を抑制できると考えられる．そこで本研究ではダイスの円錐部の一部を削り，加工時にダイスと管が全円周方向からは同時に接しないような空間を設けたダイスを開発した．以下，この空間のことを逃げ部，逃げ部のあるダイスのことを非軸対称ダイスと呼ぶ．非軸対称ダイスの断面形状を Fig. 1 (a)に示す．この図ではダイス形状の特徴を，わかりやすくするために，強調している．



(a) Asymmetric die used in this research



(b) With larger relieves

(c) Four relieves

Fig. 1 Schematic illustration of asymmetric die

このような非軸対称ダイスには，Fig. 1 (a)の他，(b)のように逃げ部が広く，逃げ部と軸対称部を接線で接続する形状や(c)のように3つ以上の逃げ部を有する形状など様々な形状があり，これら形状が加工限界やその他の加工特性に大きな影響を及ぼす可能性がある．しかしながら，本研究では，最も製作が簡便で，産業界への適用も容易である Fig. 1(a)に示す形状を有するダイスを用いて，逃げ部の加工限界向上効果について検討する．(a)のダイスは，通常の軸対称ダイスから2つの円錐台形状を切削加工により削り取ることで容易に製作できる．

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験方法

本研究で開発した非軸対称ダイスの有用性を確認するために，通常の円錐ダイス及び非軸対称ダイスを用いて実験を行い，結果を比較した．円錐ダイスを用いて単純にプレス加工を行う加工方法を単純口絞り加工(Method-A)，円錐ダイスを用いて円管を回転させながら加工を行う加工方法を回転口絞り加工(Method-B)，非軸対称ダイスを用い

て円管を回転させながら加工を行う加工方法を非軸対称回転口絞り加工 (Method-C) と呼ぶ。これらの加工方法の模式図を Fig. 2 に示す。

3.2 実験装置

単純にダイスを押し込むだけである単純口絞り加工では、実験装置に島津製作所のアムスラー試験機 UH-1000kN を用いた。

回転口絞り加工および非軸対称回転口絞り加工では試験管に回転を与える必要があるため、試験装置には旋盤を用いた。チャックに円管を固定し、刃物台にダイスを設置し、チャックを回転させ刃物台を送ることで加工を行った。

3.3 実験条件

試験管材にはアルミニウム合金 (A6063) の円管を用いた。寸法および材料特性を Table 1 に示す。円管の肉厚は、0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0mm と 6 種類の厚さの円管を用意した。実験を行う際の条件を Table 2 に示す。また、ダイス半角は 10° から 45° まで 5° 刻みに用意し、ダイス半角の違いによる加工限界の変化を調べた。

4. 実験結果

4.1 限界口絞り率

不良成形が発生した時点の円管先端の外径を D とし、 $\kappa = (D_0 - D) / D_0$ で表される値を限界口絞り率とし、各加工条件における限界口絞り率を Fig. 3 に示す。

単純口絞り加工では、ダイス半角がそれぞれ 20° , 25° 以下の場合には座屈が発生し、それ以上の場合、しわが発生した。限界口絞り率もこのダイス半角の値を境に大きく低下した。ダイス半角が大きいほど、管径を急激に縮小しなければならない。そのため円管先端の円周方向に大きな力がかかり、加工を始めるとすぐにしわが発生するために加工限界が低下する。一方座屈は加工が進むと、ダイスと円管との間の摩擦が大きくなり円管が変形しにくくなる。そのため発生すると考えられるので、加工限界に差が生まれると考えられる。肉厚が厚くなるとダイス半角にかかわらず座屈が発生し、ダイス半角が 25° もしくは 30° 付近で一番高い口絞り率を得られた。

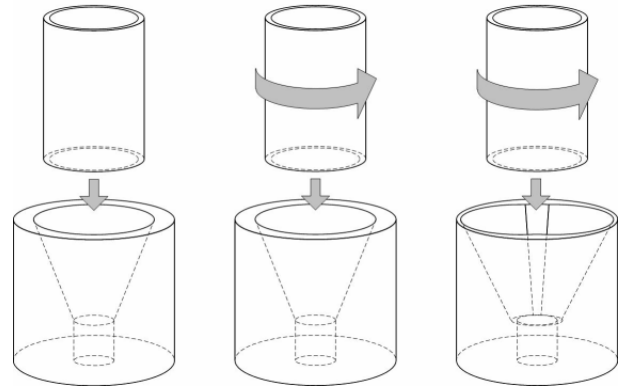


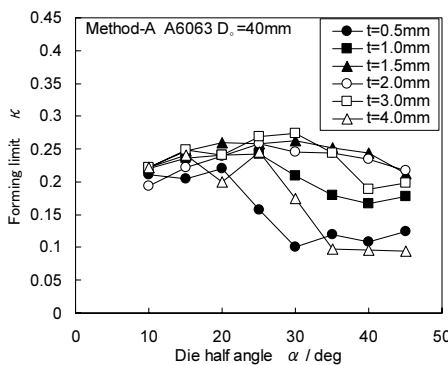
Fig. 2 Schematic illustration of asymmetric die

Table 1 Dimension and mechanical properties of tube

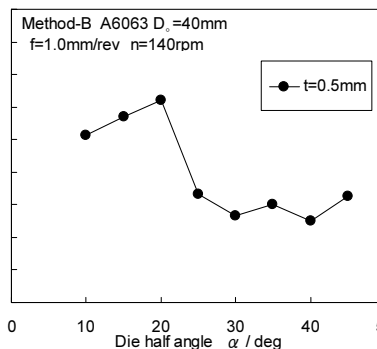
Material		A6063
Length	L_0 / mm	110, 160
Outside diameter	D_0 / mm	40
Thickness	t_0 / mm	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0
Length of thick position for chuck	l_0 / mm	40
Diameter of thick position for chuck	d_0 / mm	20
Tensile strength	MPa	248
Young's modulus	GPa	18.3
Yield stress	GPa	52.5
Percentage elongation	%	20.6

Table 2 Die geometry and working condition

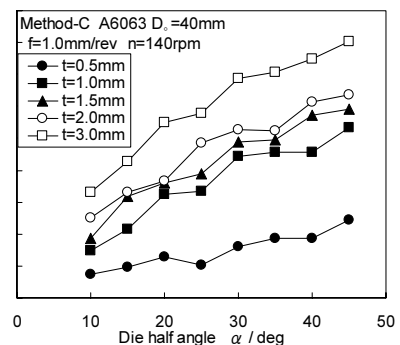
Die half angle	α [deg]	10,15,20,25, 30,35,40,45
Revolution speed	rpm	140 (Method-B・Method-C)
Forwarding speed	mm/rev	0.1 (Method-B・Method-C)
Lubricant		Shell Alvania Grease (Method-A) Yushiro's oile No.3 (Method-B・Method-C)



(a) Method A (conventional nosing)



(b) Method B (rotational nosing)



(c) Method C (Asymmetric rotational nosing)

Fig. 3 Forming limit

回転口絞り加工では、単純口絞り加工の場合と同様の傾向が現れた。肉厚が0.5mmの時は、ダイス半角が20°以下の時は円筒部で座屈が発生し、ダイス半角が25°以上ではしわが発生し、限界口絞り率が低下した。なお、肉厚が1.0mmの場合も同様に単純口絞り加工と同じ結果が現れると予想されるため、実験は行わなかった。

非軸対称回転口絞り加工では、ダイス半角が大きくなるほど限界口絞り率は大きくなった。肉厚が0.5mmの場合にはしわが発生したが、厚肉になるとダイス半角にかかわらず割れが発生した。本研究で用いた非軸対称ダイスは、ダイスと円管との接触面積が小さいため、摩擦やダイス入り口部での曲げ変形も小さい。このためしわや座屈の発生が抑制され、限界口絞り率が上昇したと考えられる。

4.2 へん平率

限界口絞り率に達した状態での、円管加工部先端のへん平率を測定した。円管加工部先端の内径の長辺の半径を ra 、短辺の半径を rb とすると、へん平率 $f=(ra-rb)/ra$ で表される。各条件での結果の一例をFig. 4に示す。

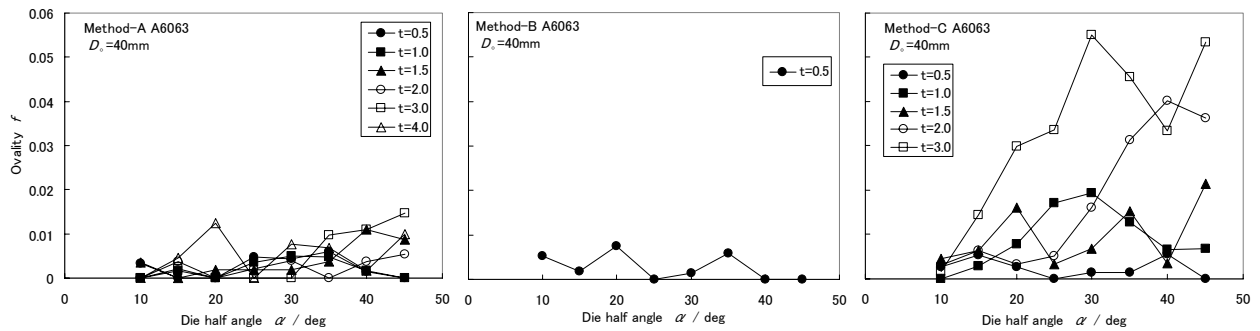
単純口絞り加工および回転口絞り加工では、へん平率は小さな値になった。円錐形のダイスを用いているので、円管は全周に渡って拘束を受けている。そのため大きく変化はしない。一方、非軸対称回転口絞り加工では、前記の2つの加工法よりも大きな値を示した。

これは円管と接触する部分よりも接触しない逃げ部があるためである。加工中、逃げ部では円管が通常よりも外側にはみ出し、円管は楕円形になっているために、結果的にへん平率が大きくなると考えられる

4.3 押し込み荷重

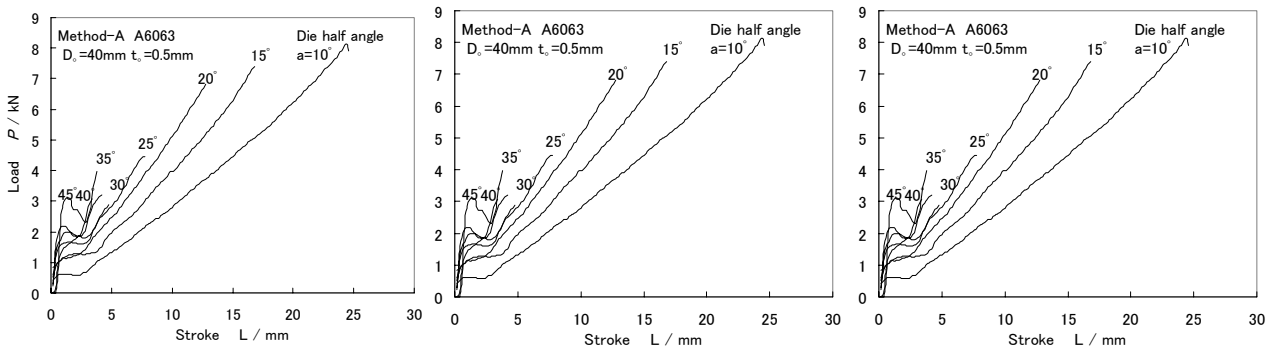
加工時に測定した押し込みに伴う荷重変化のグラフをFig. 5に示す。回転口絞り加工および非軸対称回転口絞り加工のグラフは、曲線で近似した。単純口絞り加工および回転口絞り加工では、ダイス半角が大きくなると、加工当初に押し込み荷重が急激に増大し、その後一度減少してからまた増大する現象が確認された。これは加工開始時は直線上の円管がダイスに沿って曲がる時に、ダイス入り口部の曲げ変形仕事に大きな力を必要とするためである。その後ある程度円管にダイスに沿ったテーパ部分が発生すると、ダイスに沿いながら加工が進んでいくために、ダイス入り口部の曲げ変形仕事に必要な力は減少し、そのため押し込み荷重も減少する。しかし加工が進むと、ダイスと円管の接触面積も増大するために、ダイスと円管との摩擦力が増大し、これらの力の合力である押し込み荷重は増大していくと考えられる。

3つの加工法での押し込み荷重を比較すると、単純口絞り加工に比べて回転口絞り加工は押し込み荷重が減少し、非軸対称回転口絞り加工ではさらに大きく減少した。



(a) Method A (conventional nosing) (b) Method B (rotational nosing) (c) Method C (Asymmetric rotational nosing)

Fig. 4 Ovality



(a) Method A (conventional nosing) (b) Method B (rotational nosing) (c) Method C (Asymmetric rotational nosing)

Fig. 5 Pushing load

逃げ部を設けたことで、ダイスと円管との間に働く摩擦力が大幅に減少する。そのため押し込み荷重が大幅に減少し、一部の条件では限界口絞り率の向上に大きな役割を果たしたと考えられる。

4.4 肉厚ひずみ

加工限界に達した円管の肉厚を、円管の加工部先端から測定した。加工前の初期肉厚を t_0 、加工後の肉厚を t とし、肉厚対数ひずみ $\varepsilon = \ln(t/t_0)$ を求め、結果の一例を Fig. 6 に示す。

肉厚が 1.5mm 以下では、円管先端が一番肉厚ひずみが大きくなった。肉厚が 2.0, 3.0, 4.0mm の条件では円管先端より少し手前で肉厚ひずみが大きくなり、先端では肉厚ひずみが減少した。また、一部の条件で円管先端の肉厚ひずみが非常に小さくなっている。厚肉の条件では外表面がダイスから受ける摩擦力で軸方向の流動が拘束されるのに対し、内表面は拘束がないため、内表面側のみ材料が流動し、肉厚が薄くなったと考えられる。

非軸対称回転口絞り加工では、円管の先端に大幅な肉厚ひずみの減少が確認された。この結果は初期肉厚やダイス半角にかかわらず、すべての条件で確認された。肉厚が減少した原因として、ダイスの形状が考えられる。前述したようにダイスの内面には、円管と接触する部分と接触しない逃げ部とがある。

これら 2つの部分の境には鈍角でつながっている。加工時に管の先端部とダイスの角の部分とが激しく接し、管の一部が削り取られたと考えられる。実際に加工終了時には、ダイスの角の部分よりも逃げ部のある側に円管が削り取られて金属粉が溜まっていた。また、使用した潤滑剤にも金属粉が混入していたことから、円管材料が削り取られて肉厚が減少したものと考えられる。また、ダイス半角が大きくなると、材料が胴体部の方へと張り出す現象が確認されており、このような円管の切削による肉厚減少の解消が、今後の課題となる。

4.5 形状

加工限界に達した円管の外径形状を形状測定器で測定し、結果の一例を Fig. 7 に示す。単純口絞り加工と回転口絞り加工の場合、ダイス半角が小さいほど、加工後の円管の形状はダイスの形状に沿った形になる。ダイス半角が 10° の時は、ダイスの形状とほぼ同等になっている。ダイス半角が大きくなると、加工後の円管の形状はしだいにダイスの形状から離れてくる。円管の加工部はダイス形状よりも内側に入り込むようになり、そのため円管のテーパ部の角度はダイス半角よりもわずかに大きくなる。これは、ダイス半角が大きくなるほどダイス入り口部で曲げ変形を受ける際に変形量が大きく、ダイスに沿うように変形しにくくなるためだと考えられる。

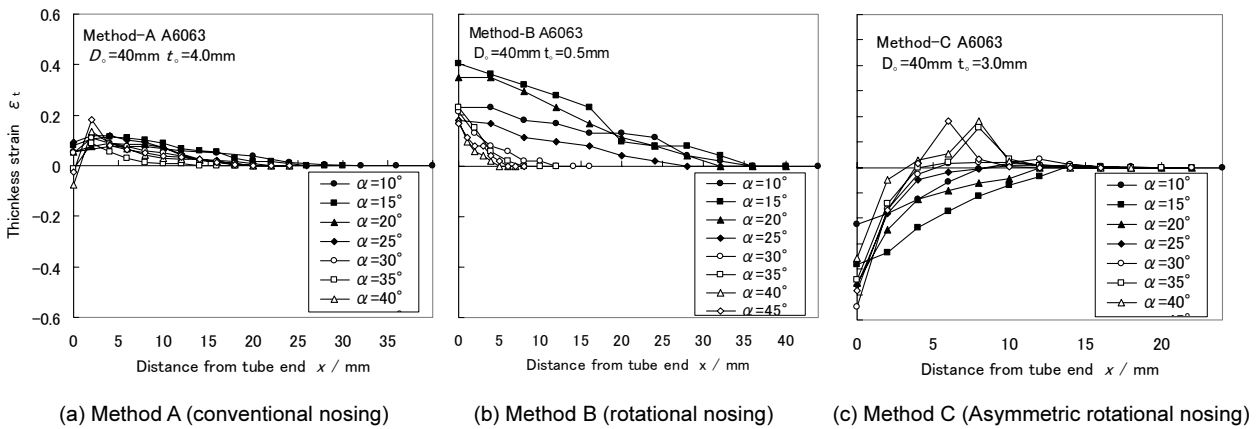


Fig. 6 Thickness strain

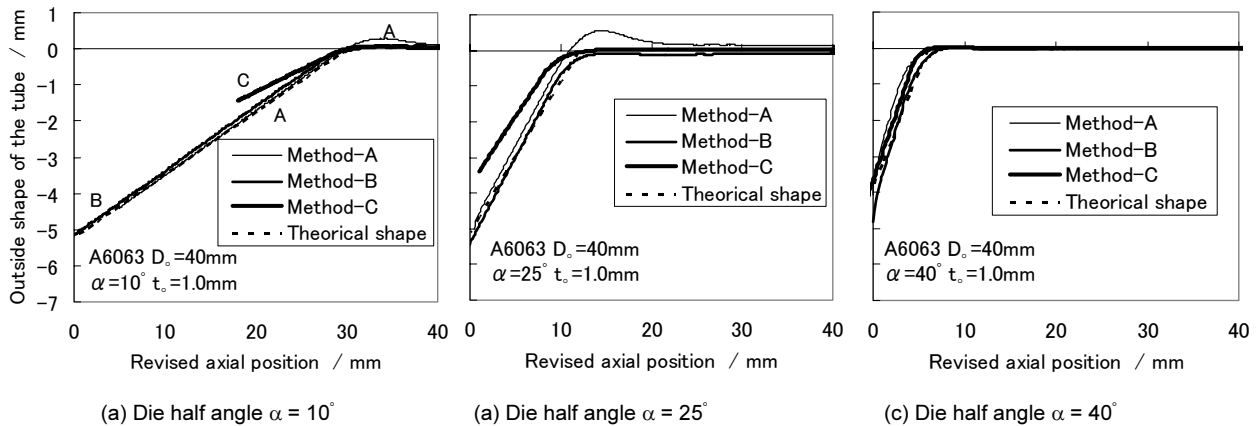


Fig. 7 Outside shape of tube

肉厚によって違いはあるが、ダイス半角が 35° もしくは 40° になると、それまで加工部はテーパ状で直線だった加工部が、丸く内側に曲がるような形状となる。

逆に、非軸対称回転口絞り加工では、ダイス半角が 10° の時はダイスの形状よりも外側に広がっているため、円管のテーパ部の角度は、ダイスの半角よりも小さくなっている。ダイス半角が大きくなるにつれて、円管の加工部の形状は、ダイスの形状に沿う形状となってくる。ダイス半角が 25° や 30° のではダイスの形状と円管の形状がほぼ同等になっている。ダイス半角が 35° 以上になると今度はダイスの角度以上に内側に入り込むようになる。ダイス半角が 45° では、ダイスの半角よりも円管加工部のテーパの角度は大きくなっている。非軸対称ダイスの場合はダイスと円管が接触する面積が狭いため、ダイス半角が小さい場合は、ダイス入り口部で十分な曲げ変形が得られなかったためと考えられる。

4.6 表面粗さ

加工限界に達した円管を、粗さ測定器を用いて口絞り加工部の最大表面粗さ (R_y) および平均粗さ (R_a) を円管の軸方向に測定し、結果の一例を Fig. 8 に示す。

単純口絞り加工ではダイス半角が 30° 以下の場合には小さな値になったが、 35° になると大きくなった。形状の項目で述べたが、ダイス半角が大きくなると円管が丸くなり、ダイスと円管とはあまり接触しなくなる。そのため接触部分が多いほどダイスが円管を研磨するようになり、粗さが小さくなると考えられる。一方回転口絞り加工と非軸対称回転口絞り加工では、ダイス半角に関わらずほぼ一定になった。回転が加わると、およびダイスの形状により円管が削られ、そのため粗さはダイス半角によらず、同程度の値になったのではないかと考えられる。

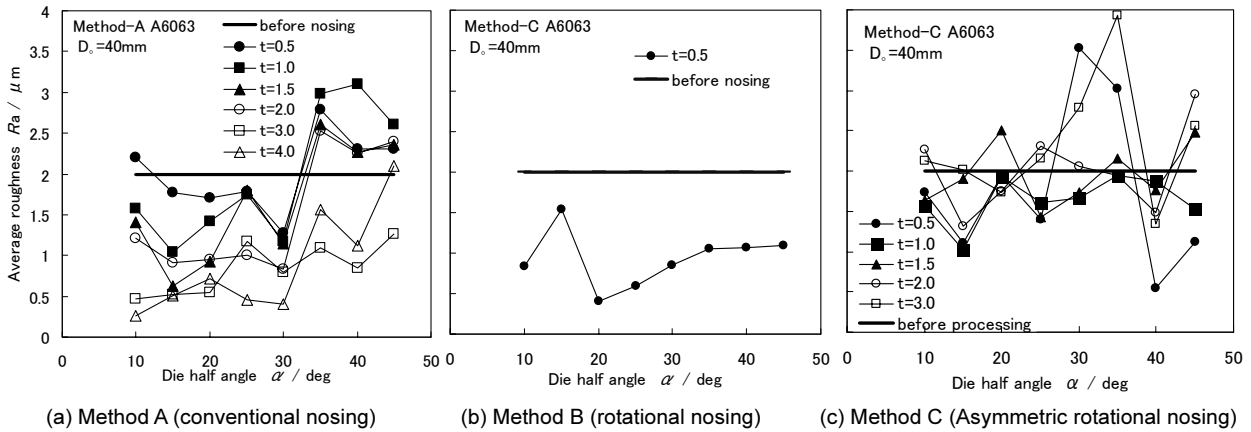
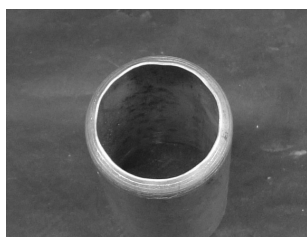
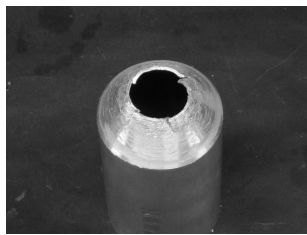


Fig. 8 Average roughness



(a) Wrinkle in method A (conventional nosing)



(b) Split in Method C (asymmetric rotational nosing)

Fig. 9 Examples of defects at forming limit (Initial thickness $t_0 = 1\text{mm}$, die half angle $\alpha = 40^\circ$)

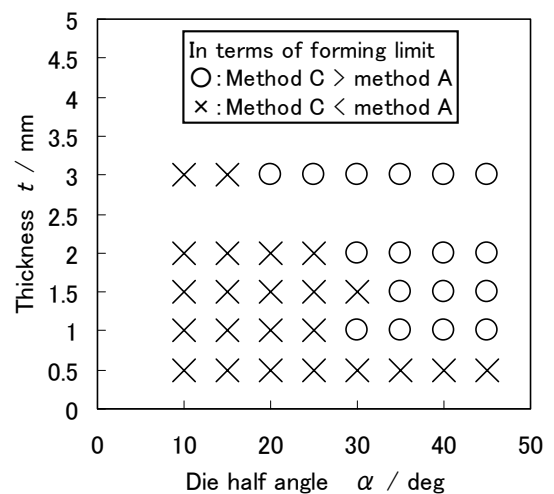


Fig. 10 Suitable conditions for asymmetric rotational nosing (method C)

5. 非軸対称回転口絞りの有効範囲

本研究で提案する非軸対称回転口絞り加工 (Method C) が、従来の単純口絞り加工 (Method A) に対して、加工限界が向上する加工条件を考察する。

Fig. 9 に加工限界に達した際の管端部形状を示す。条件によっては、非軸対称回転口絞り加工によって、大きく加工限界が向上する。さらに、Fig. 10 には、非軸対称回転口絞り加工が、従来の単純口絞り加工に比べて、加工限界に関して優れている範囲を○で示す。厚肉管で、ダイス半角が大きい条件では、有効である。

6. 結言

本研究では、非軸対称なダイスを管材と相対的に回転させながら口を絞る非軸対称回転口絞り加工法を提案し、その有効性を検討した。比較的容易に製作可能な軸対称ダイスから2つの円錐面を切除した非軸対称ダイスを製作・実験し、従来加工と比較することにより、以下のことを明らかにした。

- 1) 非軸対称回転口絞り加工では従来単純口絞り加工に比べて、管肉厚が厚く、かつ、ダイス半角が大きい場合、加工限界を向上させることが可能である。特に、ダイス半角が $25\sim 30^\circ$ で最も大きな効果が得られる。
- 2) 加工法によって、管に発生する不良形態が異なり、単純口絞り加工では、薄肉でダイス半角が大きい場合はしわ、厚肉でダイス半角が小さい場合は座屈が発生す

る。これに対し、非軸対称回転口絞り加工では、薄肉の場合はしわが発生するが、厚肉の条件では割れが発生する。

- 3) 非軸対称回転口絞り加工では、押込み荷重を大幅に抑制することができる。これは、ダイスを単純に回転させるだけでなく、非軸対称ダイスを用いたことによる。
- 4) 今後、非軸対称ダイスの形状を適正化することにより、改善すべき課題は、へん平率の抑制、テーパ部成形精度の向上である。

謝 辞

本研究では天田金属加工機械技術振興財団のご援助により、新たな加工法の特性を明らかにするとともに、更なる研究を進めるに当たり、本加工法の有用性に関する目処を得ることができました。ここに天田金属加工機械技術振興財団に心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編：チューブフォーミング，コロナ社，(1990)，91.
- 2) 真鍋健一ほか：塑性と加工，**29**-339 (1989)，481.
- 3) 西村尚ほか：塑性と加工，**19**-214 (1978)，918.
- 4) 真鍋健一ほか：日本機械学会論文集，**51**-463(1985).
- 5) 宮川松男ほか：塑性と加工，**4**-26(1963)，163.