

厚肉円管のマンドレルレス逐次鍛造

ものづくり大学 情報メカトロニクス学科
准教授 牧山 高大
(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020025-B3)

キーワード：変断面管，加工パス，偏平化抑制

1. 研究の目的と背景

図1に示すような、長手方向に内径や外径を変化させた変断面管は、部材に加わる荷重分布に対応させた形状とすることができるため、軽量化や省資源化に有利な部材である。このような特性を持つ変断面管は、自転車のフレーム¹⁾に適用されているとともに、自動車のシャフト^{2~4)}や鉄道車両の車軸^{5, 6)}等への適用が検討されている。変断面管は、同様の形状で寸法が異なる等、テーラーメイド型であることが多いため、多品種少量生産に向くフレキシブルな加工法が望ましい。従来の変断面管の加工方法には、ラジアルフォーミング⁵⁾、ロータリースウェージング^{2, 3)}、クロスウェッジローリング⁶⁾、引抜き加工⁴⁾、押し出し加工⁸⁾等がある。これら従来の変断面管の加工方法は、比較的フレキシブルな加工法であるものの、加工する形状に応じた金型やマンドレル等の専用工具が必要であった。

そこで、よりフレキシブルで多品種少量生産に向く変断面管の加工法として、マンドレルを用いず、2個1対の平金敷のみを用いる逐次鍛造を提案した⁹⁾。この提案した逐次鍛造の実用化に向けては、種々の加工因子が成形形状に及ぼす影響を体系的に明らかにし、任意の変断面形状への加工を可能にするとともに、体系的に明らかにした加工特性に基づき、加工条件を決定するアルゴリズムを開発する必要がある。本報告では、任意断面形状への加工の第1ステップとして、横断面の偏平化抑制を目的とし、いくつかの特徴的な加工パスや種々の加工条件が成形形状に及ぼす影響について検討した結果について報告する。



図1 変断面管の長手断面

2. 提案した厚肉円管のマンドレルレス逐次鍛造

提案した厚肉円管のマンドレルレス逐次鍛造の模式図を図2に示す。マニピュレータで素材を把持し、指定した回転方向位置、軸方向位置に動かすとともに、2個1対の平金敷で間欠的に素材を加圧する。この逐次鍛造における加工因子は、加工パスとして設定するマニピュレータによる素材の回転方向送り、軸方向送り、平金敷による素材の圧下率と、製品仕様や設備仕様等によって決まる素材の初期内外径比、素材の材質、金敷幅、金敷形状等がある。加工される形状は、加工パスとして設定する加工因子と素材端部の拘束状態から、固定端側段付き形状、自由端側段付

き形状、平行形状、固定端側テーパ形状、自由端側テーパ形状、管端平行形状、管端テーパ形状の7種類に分類することができる。これらの加工因子と成形形状の関係として加工特性を把握することで、種々の形状への加工に対応することができる。

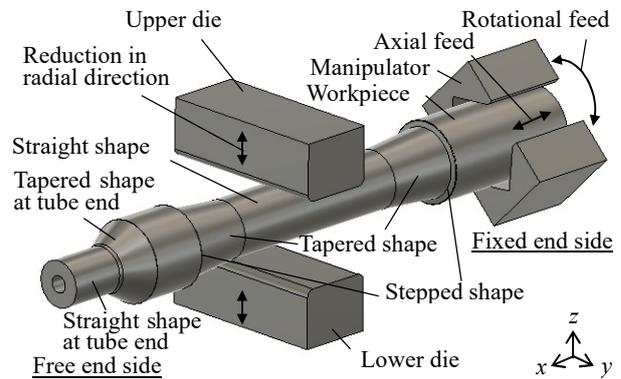


図2 厚肉円管のマンドレルレス逐次鍛造模式図

3. 実験および有限要素シミュレーションの条件

本報告では、逐次鍛造実験用金型を用いた実験と有限要素シミュレーション結果を比較し、有限要素シミュレーションモデルの妥当性を確認したうえで、有限要素シミュレーションにより、いくつかの特徴的な加工パスや種々の加工条件が成形形状に及ぼす影響について検討した結果について示す。特徴的な加工パスとして、従来加工法である4個2対の金敷で加圧するラジアルフォーミングを模した加工パス、自由鍛造で一般的に用いられる4角形、8角形、16角形の順番で角部を加圧するパスに着目した。そして、回転方向一定角度送りである、 $2\pi/k \text{ rad} \cdot \text{blow}^{-1}$ で定義した場合の $2\pi \text{ rad}$ 分割数 k が偶数の場合の従来パスと、従来パスに対して偏平化を抑制できる k が奇数の場合の提案パス⁹⁾と比較した。

図3に逐次鍛造実験用金型の外観を示す。この金型は、

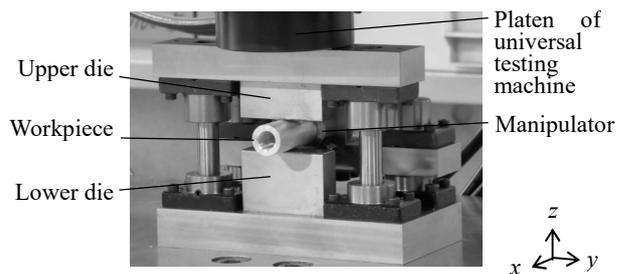


図3 逐次鍛造実験用金型の外観

素材を挟んで対向する2つの平金敷と、素材を把持するためのマニピュレータで構成される。マニピュレータは平金敷の加圧方向(z 軸方向)のみ滑らかに動くことができる機構となっており、素材- x 側端部は x 、 y 軸方向と回転方向の変位が拘束され、 z 軸方向は加圧方向の素材変形の対称性から自動で調心される。逐次鍛造実験の手順は次のとおりである。①マニピュレータに素材を取り付ける。②万能試験機(UH-F500kNI, 島津製作所)で所定の金敷間距離まで素材を加圧する。③除荷し、上金敷を持ち上げる。④マニピュレータを所定の角度だけ回転させる。以降、所定の鍛造回数まで②~④を繰り返す。素材と平金敷間には潤滑剤としてスターループ SS-7000(40℃での動粘度 $43 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, スターカット工業)を加圧ごとに塗布した。なお、所定の金敷間距離である最小金敷間距離 C_{\min} の位置決めには、金属ブロックによる物理的なストップを用いた。

素材の材質は変形抵抗が小さく、延性に富む純アルミニウム A1070-0 を用いた。素材の変形抵抗 σ は、圧縮試験に

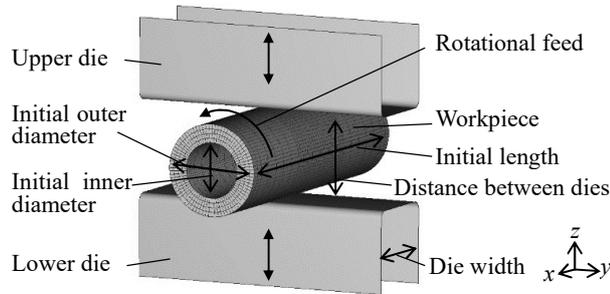


図4 有限要素シミュレーションモデル

表1 有限要素シミュレーションモデル妥当性確認の加工条件

Initial outer diameter of workpiece D_{Oini}/mm	28.0
Initial inner-to-outer diameter ratio D_{Iini}/D_{Oini}	0.6
Initial length of workpiece L_{ini}/mm	80.0
Die width B/mm	25.0
Height reduction ratio R	0.08
Axial feed $f_a/\text{mm} \cdot \text{blow}^{-1}$	0
Rotational feed $f_r/\text{rad} \cdot \text{blow}^{-1}$	$2\pi/7$, $2\pi/16(=\pi/8)$, $2\pi/9$

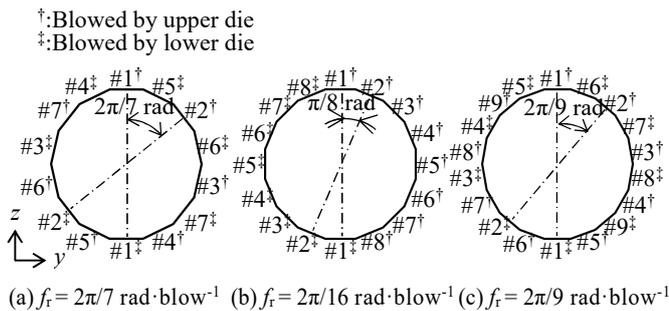


図5 仮想的な成形形状に対する加圧順番の模式図

より求めた $\sigma = 35+92(\epsilon^p)^{0.33}$ MPa に従うものとした。なお、 ϵ^p は塑性ひずみである。

図4に有限要素シミュレーションのモデルを示す。このモデルは、素材と素材を挟んで対向する2つの平金敷で構成される。素材のモデルは6面体ソリッド要素の弾塑性体とし、アダプティブリメッシュは行っていない。マニピュレータは素材に対する平金敷の相対的な動きでモデル化し、素材- x 側端部の領域にある節点の x 、 y 、 z 方向の変位を拘束し、平金敷にて素材を半径方向に加圧する工程と、素材周りに平金敷を回転させる工程を繰り返すモデルとした。ソルバーにはRockfield Software社のElfenを用い、静的陰解法を適用した。素材と平金敷間の摩擦係数はリング圧縮試験を行い求めたクーロン摩擦係数 $\mu=0.07$ とした。

表1に有限要素シミュレーションモデルの妥当性を確認するための加工条件を示す。圧下率 R は(初期外径 D_{Oini} - 最小金敷間距離 C_{\min})/初期外径 D_{Oini} で定義される値である。図5に C_{\min} と回転方向送り f_r から幾何学的に求めることができる仮想的な成形形状に対する平金敷による加圧順番を模式的に示す。この仮想的な成形形状を仮定正 n 角形とすると、仮定正 n 角形の辺の数 n は全ブロー数 $N_{\text{total}} \times 2$ となる。この検討での f_r は、 2π rad 分割数 k が偶数である従来パスの $k=16$ と、 k が奇数である提案パスの $k=7$ 、 9 とした。

図6に4個2対の金敷で加圧するラジアルフォーミングを模した加工パスにおける仮想的な成形形状に対する加

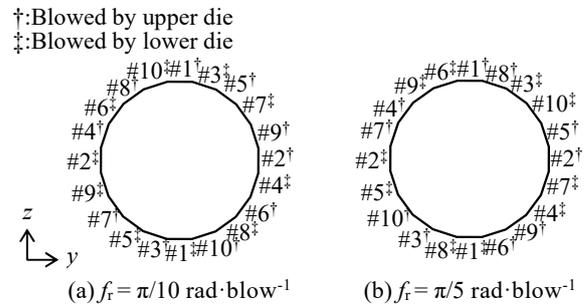


図6 ラジアルフォーミングを模した加工パスにおける仮想的な成形形状に対する加圧順番の模式図

表2 ラジアルフォーミングを模した加工パスを評価するための回転方向送り

Pass type	Expected shape in regular n -gon n/side	Rotational feed $f_r/\text{rad} \cdot \text{blow}^{-1}$
Pass-RF _{even}	12, 16, 20, 24, 28, 32, 36	$\pi/6, \pi/8, \pi/10, \pi/12, \pi/14, \pi/16, \pi/18$
Pass-RF _{odd}	12, 20, 28, 36	$\pi/3, \pi/5, \pi/7, \pi/9$
Pass-IF _{even}	12, 16, 20, 24, 28, 32, 36	$2\pi/12, 2\pi/16, 2\pi/20, 2\pi/24, 2\pi/28, 2\pi/32, 2\pi/36$
Pass-IF _{odd}	14, 18, 22, 26, 30, 34	$2\pi/7, 2\pi/9, 2\pi/11, 2\pi/13, 2\pi/15, 2\pi/17$

圧順番の模式図を示す. このパスは4個2対の平金数での加圧を, 2個1対の平金数で模擬することで偏平化抑制を狙ったもので, その特徴は, 奇数ブローにおける指定された回転方向送り f_r での加圧と, 偶数ブローにおけるそこから $\pi/2$ rad だけ回転させた加圧を1組として, 順次加圧していく点である. 表2に4個2対の金数で加圧するラジアルフォーミングを模した加工パスを評価するための回転方向送り f_r と, これらの f_r に対応する仮定正 n 角形の辺の数 n を示す. ここで評価した加工パスは, ラジアルフォーミングを模した加工パスとして, 図6(a)に示した 2π rad 分割数 k が偶数の場合に相当する Pass-RF_{even}, 図6(b)に示した k が奇数の場合に相当する Pass-RF_{odd} と, 図5(b)に示した逐次鍛造の従来パスで k が偶数の場合である Pass-IF_{even}, 図5(a), (c)に示した逐次鍛造の提案パスで k が奇数の場合である Pass-IF_{odd} の4つである. なお, f_r 以外の加工条件については, 表1に示した加工条件と同じとした.

図7に自由鍛造で一般的に用いられる8角形から16角形に加圧する加工パスにおける仮想的な成形形状に対する加圧順番の模式図を示す. このパスの特徴は, 偏平化を抑制するため4角形, 8角形, 16角形の順番で角部を順次加圧していく点である. 表3に8角形から16角形に加圧する加工パスを評価するための加工条件を示す. ここでは, 自由鍛造で一般的に用いられる8角形から16角形に加圧する加工パス Pass-OH に対して, 比較検討のため, 逐次鍛造の従来パスで 2π rad 分割数 k が偶数の場合である Pass-IF_{even} と, 逐次鍛造の提案パスで k が奇数の場合である Pass-IF_{odd} についても評価を行った. なお, 回転方向送り f_r , 初期内外径比 D_{iini}/D_{oini} , 圧下率 R 以外の加工条件については, 表1に示した加工条件と同じとした.

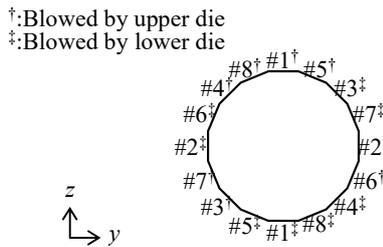


図7 8角形から16角形に加圧する加工パスにおける仮想的な成形形状に対する加圧順番の模式図

表3 8角形から16角形に加圧する加工パスを評価するための加工条件

Initial inner-to-outer diameter ratio		0.5, 0.6, 0.7
D_{iini}/D_{oini}		
Height reduction ratio R		0.04, 0.08, 0.12, 0.16
Rotational feed $f_r/\text{rad}\cdot\text{blow}^{-1}$	Pass-OH	Illustrated in Fig. 7
	Pass-IF _{even}	$2\pi/16(=\pi/8)$
	Pass-IF _{odd}	$2\pi/9$

4. 実験および有限要素シミュレーションの結果および考察

4.1 有限要素シミュレーションモデルの妥当性確認

図8に実験と有限要素シミュレーションにより得られた成形品の外観を示す. また, 図9に実験と有限要素シミュレーションの成形形状比較結果を示す. なお, 成形形状として, 加圧部軸方向中央の横断面における最大外径比 D_{Omax}/D_{Oini} , 最小外径比 D_{Omin}/D_{Oini} , 最大内径比 D_{Imax}/D_{Iini} , 最小内径比 D_{Imin}/D_{Iini} と, 素材両端の軸方向変化である軸方向伸び ΔL , 回転方向変化であるねじれ β を評価し, 比較した. 有限要素シミュレーション結果は実験結果と良い一致を示し, 有限要素シミュレーションモデルの妥当性を確認した. このことから, 以降の検討では有限要素シミュレーションの結果で評価を行った.

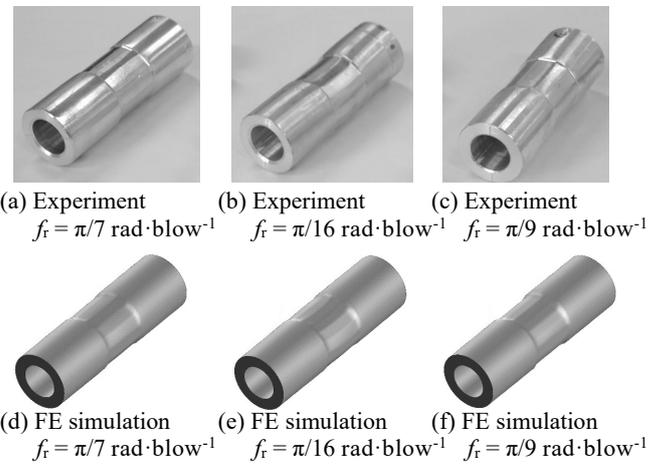


図8 成形品の外観

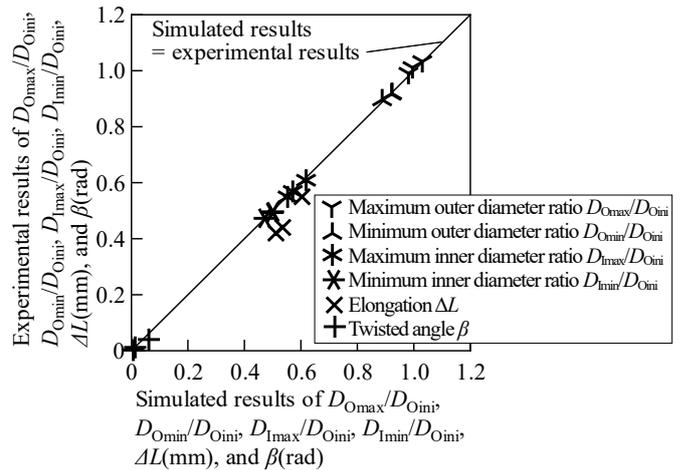


図9 実験と有限要素シミュレーションの成形形状比較

4.2 ラジアルフォーミングを模した加工パスと回転方向送りの影響

図10にラジアルフォーミングを模した2つの加工パス Pass-RF_{even}, Pass-RF_{odd}, 逐次鍛造の従来パスである Pass-IF_{even}, 逐次鍛造の提案パスである Pass-IF_{odd} における仮定正 n 角形の辺の数 n と最大外径比 D_{Omax}/D_{Oini} および

最小外径比 D_{\min}/D_{ini} の関係を示す. 図 1 0 (a) の $D_{\text{max}}/D_{\text{ini}}$ について, これまでの知見⁹⁾ とおり, Pass-IF_{even} では 1 より大きく縮径ができず, Pass-IF_{odd} では 1 より小さく縮径ができた. これに加え, Pass-RF_{even}, Pass-RF_{odd} いずれも縮径が可能であった. また, Pass-RF_{even} と Pass-RF_{odd} の間に大きな差はないものの, Pass-IF_{odd} より $D_{\text{max}}/D_{\text{ini}}$ が大きくなった. 図 1 0 (b) の D_{\min}/D_{ini} についても, これまでの知見⁹⁾ とおり, Pass-IF_{even} では圧下率 $R = 0.08$ から

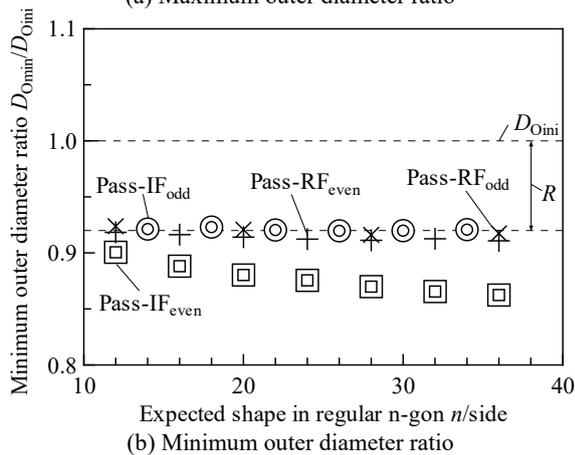
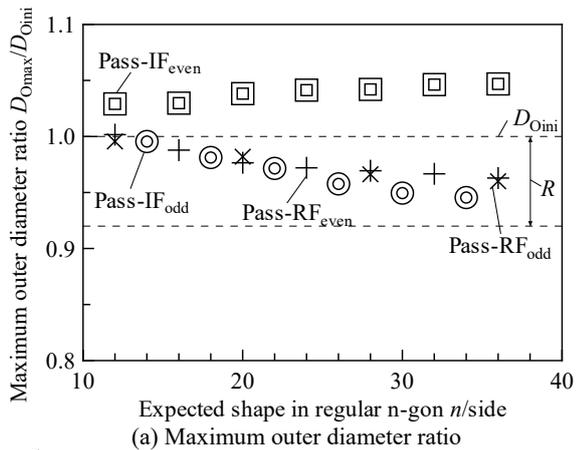


図 1 0 ラジアルフォーミングを模した加工パス, 従来パス, 提案パスにおける仮定正 n 角形の辺の数と最大外径比および最小外径比の関係

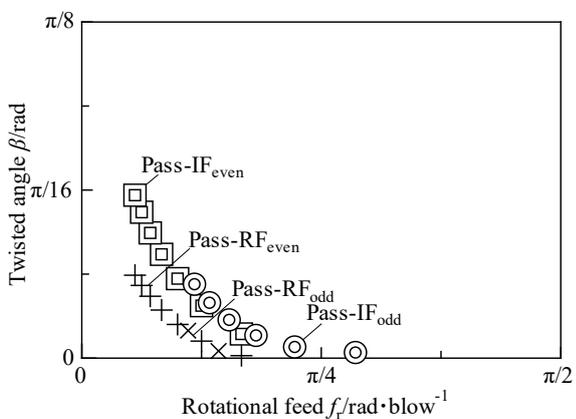


図 1 1 ラジアルフォーミングを模した加工パス, 従来パス, 提案パスにおける回転方向送りとねじれの関係

幾何学的に求まる最小外径比 0.92 より小さくなり, Pass-IF_{odd} では幾何学的に求まる最小外径比 0.92 とほぼ同じ値をとった. また, Pass-RF_{even} では幾何学的に求まる最小外径比 0.92 よりわずかではあるが小さくなり, Pass-RF_{odd} では幾何学的に求まる最小外径比 0.92 とほぼ同じ値となった.

図 1 1 にラジアルフォーミングを模した 2 つの加工パス Pass-RF_{even}, Pass-RF_{odd}, 逐次鍛造の従来パスである Pass-IF_{even}, 逐次鍛造の提案パスである Pass-IF_{odd} にお

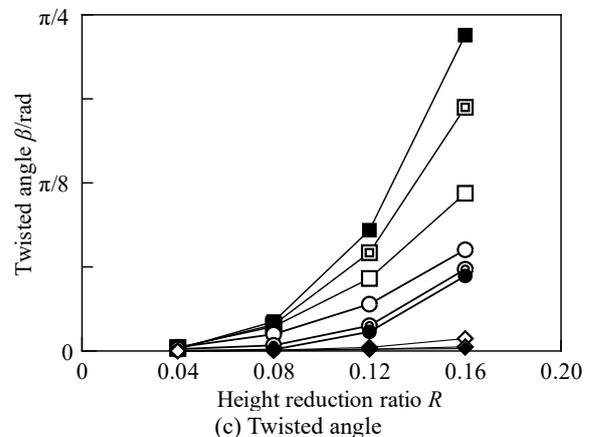
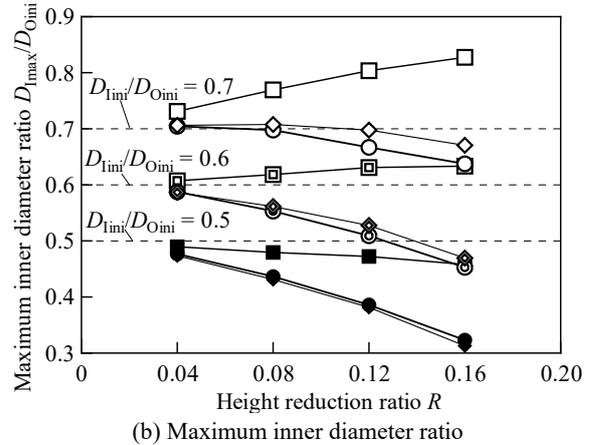
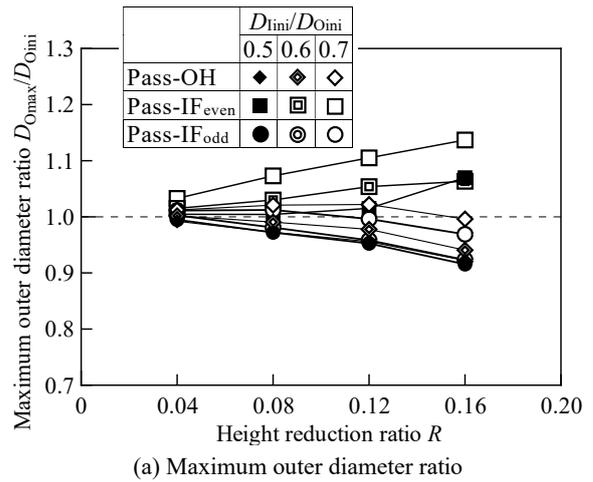


図 1 2 8 角形から 16 角形に加圧する加工パス, 従来パス, 提案パスにおける初期内外径比と圧下率が成形形状に及ぼす影響

る回転方向送り f_r とねじれ β の関係を示す。これまでの知見⁹⁾ どり、Pass-IF_{even} と Pass-IF_{odd} の β は f_r が大きくなるに従い大きくなった。また、Pass-RF_{even}, Pass-RF_{odd} においても同様に、 β は f_r が大きくなるに従い大きくなり、その値は Pass-IF_{even}, Pass-IF_{odd} の半分程度であった。

ラジアルフォーミングを模した 2 つの加工パス Pass-RF_{even}, Pass-RF_{odd} いずれも縮径が可能であり、ねじり β を低減することができたことから、成形性の観点では比較的有効な加工パスといえる。一方で、逐次鍛造の提案パスである Pass-IF_{odd} の方が最大外径比 D_{max}/D_{ini} 、最小外径比 D_{min}/D_{ini} ともに、幾何学的に求まる最小外径比に近かったことから、より実用的な加工パスであると考えられる。

4・3 8 角形から 16 角形に加圧する加工パスと初期内外径比と圧下率の影響

図 1 2 に自由鍛造で一般的に用いられる 8 角形から 16 角形に加圧する加工パス Pass-OH、逐次鍛造の従来パスである Pass-IF_{even}、逐次鍛造の提案パスである Pass-IF_{odd} における初期内外径比 D_{ini}/D_{0ini} と圧下率 R が成形形状に及ぼす影響を示す。図 1 2 (a) の最大外径比 D_{max}/D_{0ini} について、Pass-OH では 1 より小さく、Pass-IF_{odd} と同様に縮径ができた。また、Pass-OH と Pass-IF_{odd} では R が大きくなるに従い、 D_{max}/D_{0ini} が小さくなり、 D_{ini}/D_{0ini} が小さくなるに従い、 D_{max}/D_{0ini} が小さくなった。Pass-IF_{even} では D_{max}/D_{0ini} が 1 より大きく偏平化のため縮径されておらず、 R が大きくなるに従い D_{max}/D_{0ini} が大きくなり、また、 D_{ini}/D_{0ini} が大きくなるに従い D_{max}/D_{0ini} が大きくなった。図 1 2 (b) の最大内径比 D_{min}/D_{0ini} については、それぞれの D_{ini}/D_{0ini} を基準として D_{max}/D_{0ini} と同様の傾向となった。

図 1 2 (c) のねじれ β について、自由鍛造で一般的に用いられる 8 角形から 16 角形に加圧する加工パス Pass-OH では、ほとんどねじれが生じず、逐次鍛造の提案パスである Pass-IF_{odd} より小さかった。また、加工パスによらず圧下率 R が大きくなるに従い、 β が大きくなる傾向となった。

自由鍛造で一般的に用いられる 8 角形から 16 角形に加圧する加工パス Pass-OH は、逐次鍛造の提案パスである Pass-IF_{odd} と同程度に縮径することができることに加え、ねじれ β がほとんど生じないことから、成形性の観点で有効な加工パスといえる。一方で、仮想的な成形形状である仮定正 n 角形の選択の自由度が低いため、実加工への適用に際しては、Pass-IF_{odd} を基本とし、必要に応じて限定的に Pass-OH を用いることが望ましいと考える。

5. 結言

本報告では、任意断面形状への加工の第 1 ステップとして、横断面の偏平化抑制を目的とし、いくつかの特徴的な加工パスや種々の加工条件が成形形状に及ぼす影響について検討した結果についてまとめた。得られた結果を以下に示す。

(1) ラジアルフォーミングを模した加工パスはいずれも縮

径が可能であり、成形性の観点では比較的有効な加工パスであるが、幾何学的に求まる最小外径比に近い成形形状とすることができる逐次鍛造の提案パスの方がより実用的である。

- (2) 自由鍛造で一般的に用いられる 8 角形から 16 角形に加圧する加工パスは、逐次鍛造の提案パスと同程度に縮径できるとともに、ねじりも生じないことから成形性の観点で有効な加工パスといえる。ただし、自由鍛造で一般的に用いられる 8 角形から 16 角形に加圧する加工パスは、仮想的な成形形状である仮定正 n 角形の選択の自由度が低いため、実加工への適用に際しては、逐次鍛造の提案パスを基本とし、必要に応じて限定的に用いることが望ましい。
- (3) 回転方向送りで定まる仮定正 n 角形の辺の数が大きくなるに従い、ラジアルフォーミングを模した加工パスと逐次鍛造の提案パスでは、最大外径比、最小外径比ともに幾何学的に求まる最小外径比に近づく。
- (4) 圧下率が大きくなるに従い、自由鍛造で一般的に用いられる 8 角形から 16 角形に加圧する加工パスと逐次鍛造の提案パスでは、最大外径比、最大内径比ともに小さくなる。
- (5) 初期内外径比が小さくなるに従い、自由鍛造で一般的に用いられる 8 角形から 16 角形に加圧する加工パスと逐次鍛造の提案パスでは、最大外径比、最大内径比ともに小さくなる。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成 (AF-2020025-B3) により行われたものです。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Covill, D. & Drouet, J. M.: Proc. 12th Conf. Int. Sports Eng. Assoc., 2-6 (2018), 216.
- 2) Raedt, H. W., Wurm, T. & Busse, A.: ATZ worldw., 121 (2019), 54-59.
- 3) Rauschnabel, E & Schmidt, V.: J. Mater. Process. Technol., 35 (1992), 371-383.
- 4) Kim, S. W., Kwon, Y. N., Lee, Y. S. & Lee, J. H.: J. Mater. Process. Technol., 187-188 (2007), 182-186.
- 5) Romanenko, V. P., Stepanov, P. P. & Kriskovich, S. M.: Metall., 61 (2018), 873-877.
- 6) Wenfei, P., Shuhua, Z., Yijui, C., Xuedao, S. & Lihua, Z.: Rare Met. Mater. Eng., 45-4 (2016), 836-842.
- 7) Wallnera, S., Harrera, O., Buchmayra, B. & Hoferb, F.: AIP Conf. Proc., 1315-1 (2010), 315-320.
- 8) 牧山高大・村田眞・久保木孝: 塑性と加工, 45-524 (2004), 737-741.
- 9) 牧山高大: 塑性と加工, 62-727 (2021), 97-102.