

偏心管の曲げ加工における変形メカニズムとその抑制法

埼玉大学 教育学部 生活創造講座
教授 内海 能亜

(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020008-B2)

キーワード：チューブフォーミング、曲げ、アルミニウム合金偏心管

1. 研究の目的と背景

管材は中空で軽量かつ曲げやねじり剛性があり、自動車や建築などの構造部材として広く適用されている。また、流体などの伝送経路に管材が適用されている。しかしながら、プラント用の炭素鋼配管では、エロージョン・コロージョンによる配管直線部および曲げ部の配管減肉の問題が指摘されている¹⁾。また、熱交換機に適用されている銅管では、内圧下の低サイクル疲労によって、管材の曲がり部の偏肉やへん平化から亀裂が発生しやすくなることも指摘されている²⁾。さらに、構造部材としての管材の金属疲労の懸念もある。管材の曲がり部は一般的に、その引張側では薄肉となるので、他部位に比べ強度不足が依然として解消されないでいる。これらの問題を解決する肉厚を均一にする既存の曲げ加工では、ハンブルグ曲げや拡管プラグ曲げなどがある。ところが、何れも管内外径が素管径よりも大きくなり、肉厚も若干薄くなる。曲げによる偏肉化は、ひずみ勾配が付く限り解消されない。そこで、図 1 に示すように筆者は発想を変え、すでに肉厚が偏った素管を用いて、一般的な曲げ加工法で肉厚を均一にすることを考えた。

本研究は 2019 年から鋼管のプレス曲げで開始した^{3) 4)}。肉厚の偏った管材は市販されておらず、中実棒材を切削で管材としなければならなかった。また、切削による長尺管材を得るには限度があり、曲げ実験の条件に制約がかかった。さらに、曲げ半径の小さな条件では、圧縮側でしわが発生してしまう。このため、心材の適用や軸引張力を負荷できる回転引曲げ加工によって研究を進めることとした。供試材の入手については、偏心した素管は市販されていないので、専用の金型を用い、アルミニウム合金を押し出し加工して偏心管を外注して得た。

ここでは、実際の偏心管を適用して回転引曲げ実験を実施し、断面の変形や肉厚の変化量に及ぼす加工度の影響を調査した。また、曲げ加工後、肉厚が均一になる偏心量を数値シミュレーションによって求めた。この偏心量に及ぼす機械的性質や曲げ半径の影響について調査したのでここに報告する⁵⁾。

2. 実験方法

2.1 供試材

表 1 は供試材の機械的性質である。実験に適用したアルミニウム合金管は偏心のない A6063-T5、偏心管は A6063-T1 材を用いた。これら管材を試験片として JIS

Z2241 で引張試験を各 3 回行い、これら平均して機械的性質を得た。また、 n 値と C 値は $\sigma = Ce^n$ より得ている。図 2 は偏心管の断面を示す。T1 および T5 とともに外径 $D_0 = 21.7$ mm、内径 $d_0 = 18$ mm である。T1 の偏心量 e は 0.4 mm で、偏心管の最薄肉部は 1.45 mm、最肉厚部は 2.25 mm となっている。管長 L は 90° 曲げの場合、曲げ半径条件で異なり最長で 555 mm、最短で 250 mm である。

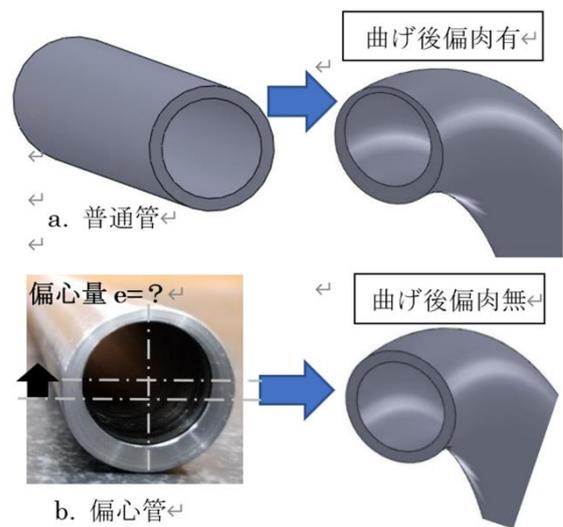


図 1 偏心管の曲げによる肉厚の均一化

表 1 機械的性質

材 質	A6063-T1	A6063-T5
引張強さ σ_B / MPa	175	225
耐 力 $\sigma_{0.2} / \text{MPa}$	83	205
伸 び $\delta / \%$	19	15
加工硬化指数 n	0.24	0.07
塑性係数 C / MPa	347	295

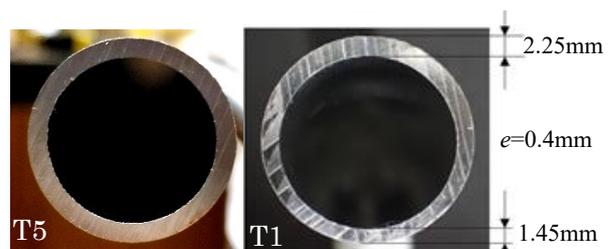


図 2 管材の断面

2・2 回転引曲げ加工装置

図3は実験で適用した回転引曲げ加工装置である。図4は装置の工具配列を模式的に示したものである。本曲げ装置は回転引曲げの特徴であるチャック部、曲げ型部、曲げ負荷部から基本構成されている。この他、本機ではブレーキパッド部で軸引張力を負荷することでき、そして、心金や積層心材などが脱着できる。そのため、小さな曲げ半径が得られ、しわや屈服などの座屈現象を抑制できる。その反面、引張側の肉厚がさらに薄くなる。本研究で提案する素管としての偏心管を適用すれば、この引張側の薄肉化の解消が見込める。本装置で負荷できる軸引張り力 P_w は、供試材の最大引張り荷重 F_{max} に対する比で表し、あらかじめ、軸力負荷率 P_w/F_{max} を事前に検討し、0.2以上として実験する。

曲げ型は半径 $R=10, 20, 30, 50, 63\text{mm}$ から選択できる。本報では曲げ型半径を曲げ半径 R として用い、加工度 $R/D_0=0.46$ (R10) 0.92 (R20) 1.38 (R30), 2.3 (R50), 2.9(R63)の5種類で曲げ実験を行った。曲げモーメントを発生する曲げ負荷型の位置は $4D_0$ とした。ガイド棒は供試材後部の逆曲げとなるダレを抑制する。

曲げ加工における断面変形の抑制にはマンドレルの適用が効果的である。図5に示す鋼の数珠型心金とPVCを適用した積層心材はそれぞれ自作の心材である。

2・3 曲げシミュレーション

図6に示す回転引き曲げのシミュレーションには、市販の汎用ソフト LS-DYNA3D を適用した。材料の構成式は等方弾塑性体とし、肉厚の変化量を検討するため供試材としての管材はソリッドモデル、心材は弾性体、それ以外は剛体シェルモデルとした。本加工では摩擦の影響が少ないため動静摩擦係数は0.01とした。また、表2には実験と解析条件を示す。

3. 結果および考察

3・1 評価方法

本件では曲げ角度をすべて 90° とし、図7に示すように $22.5, 45, 67.5, 90^\circ$ の位置の断面変形や肉厚の変化を測定した。また管断面において、圧縮側を 0° 、引張側を 180° として 45° 刻みで肉厚をそれぞれ測定した。偏肉比 λ は引張側の肉厚 t_t と引張側の肉厚 t_c で表した。

3・2 曲げ実験

普通管の T5 および偏心管の T1 材、曲げ半径 $R=50\text{mm}$ 、偏心管の最薄肉部 1.45mm は圧縮側で、曲げ角度 45° 断面の肉厚を図8に示す。肉厚分布は逆のパターンになっていることがわかる。偏心管の曲げには肉厚の均一化に効果があると予測できる。図9は各種曲げ半径で曲げた偏心管の外観を示す。R10についてははしわが発生していることがわかる。この他、小さな曲げ半径になるほど、曲げ角度 90° 付近で初期不整が目立つようになっていることがわかる。初期不整はワイパーダイスの適用で抑制が可能であるが、本実験では適用しなかった。

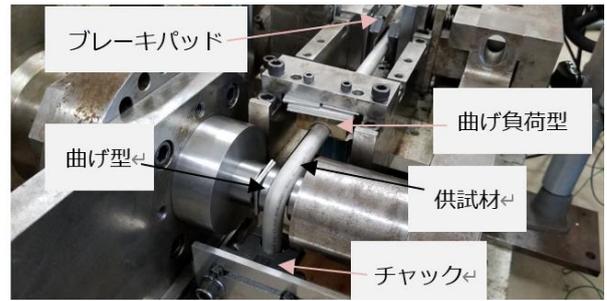


図3 回転引曲げ加工装置

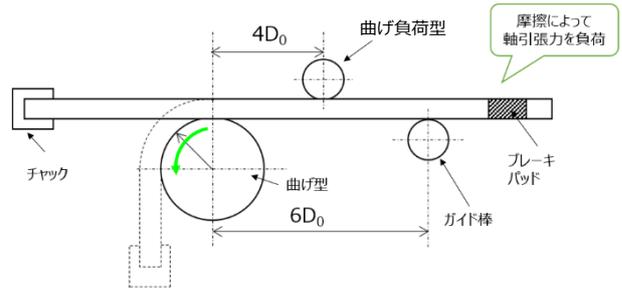


図4 工具配列

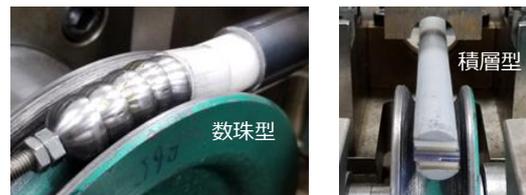


図5 心材

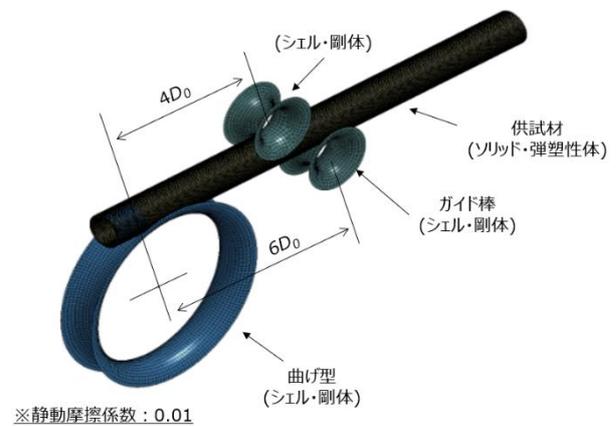


図6 回転引曲げモデル

表2 解析と実験条件

	実験	FEA
材質	A6063-T1, T5	C : 300~500 n : 0.1~0.3
外径 D_0 / mm		21.7
内径 d_0 / mm		18
偏心量 e / mm	0, 0.4	0~0.5
加工度 R/D_0	0.46~2.9	1.15~4.6
軸力負荷率 P_w/F_{max}		≥ 0.2

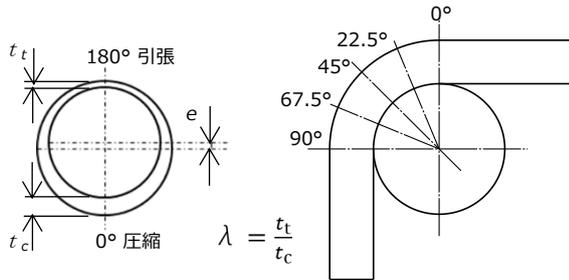


図7 評価方法

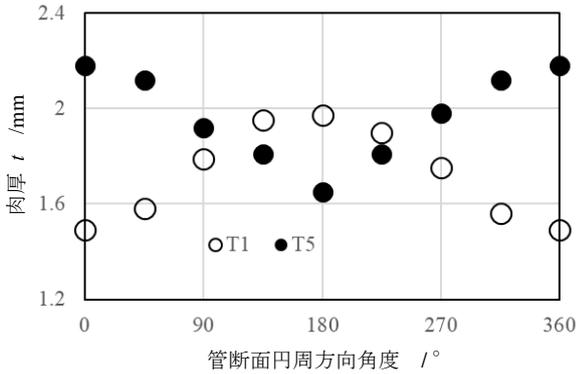


図8 偏心管の肉厚分布

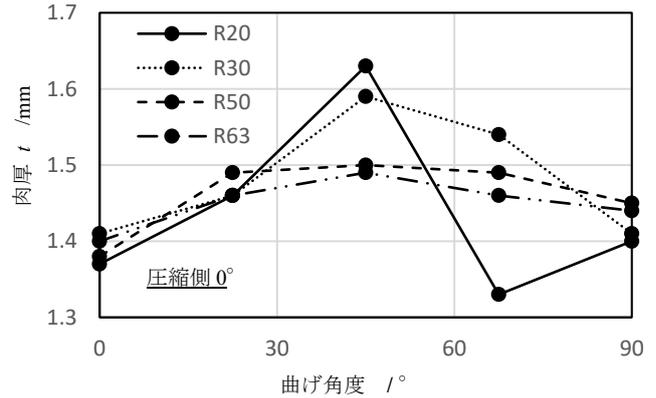
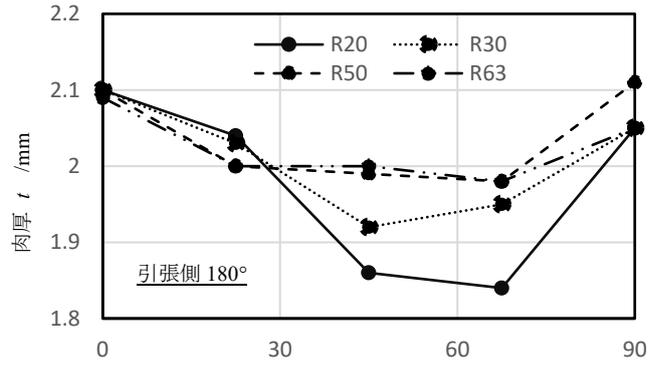


図10 曲げ角度と肉厚



図9 偏心管の曲げ後の外観 (心材あり)

次に、各種曲げ加工度における曲げ角度と肉厚の関係を図10に示す。それぞれ、管断面引張側180°と圧縮側0°の肉厚分布であるが、R10はしわが発生したので除外した。曲げ半径が小さい場合は肉厚の減少が多くなり、曲げ角度0°~90°においても均一な肉厚が得られないことがわかる。また、引張側180°の曲げ角度45°~60°付近の肉厚は他と比べ薄くなっているの、曲げ応力が大きく発生していたことがわかる。圧縮側0°のR20は初期不整の影響を受けてデータにバラツキが生じた。

合わせて曲げ角度45°の断面の変形率を図11に示す。変形率 f は曲げ後の最大外径 D_{max} と最小外径 D_{min} の差を曲げ前の外径 D_0 で除した値を取った。次に、偏心管の最薄肉部1.45mmを0, 45, 90, 135, 180°に偏心させた曲げ後の外観を図12に示す。圧縮側に薄肉部1.45mmを配

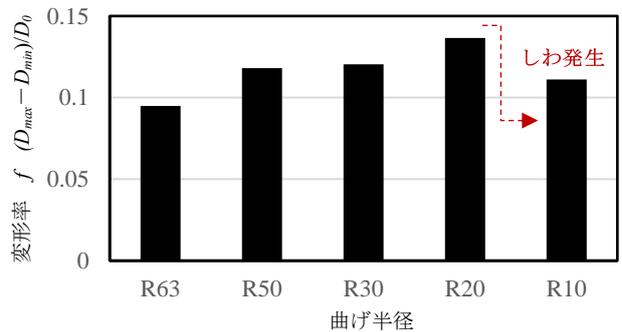


図11 曲げ半径と断面の変形率

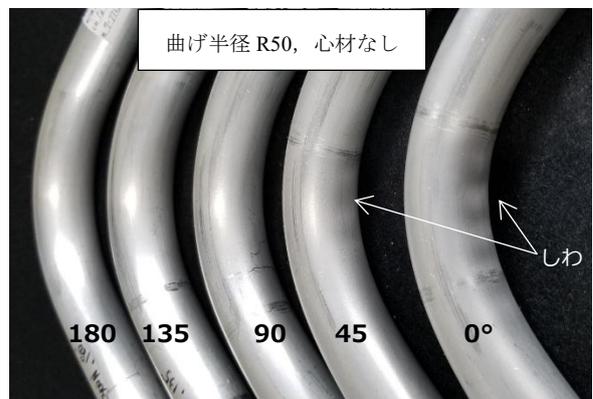


図12 薄肉部を0, 45, 90, 135, 180°に配置した曲げ

置し、曲げ加工を行ったために0と45°でしわが発生した。次に、図12に示した曲げの曲げ角度45°の断面の変形率

を図 13 に示す．ここでは心金を適用していないので，引張側に薄肉部が配置されている 180°の断面が大きく落ち込み，最も断面の変形率が高くなった．これに対して図 14 は心金を使用した結果である．心金を適用しているので変形率はほぼ横ばいで，心金なしに比べおよそ半分の変形に抑えられていることがわかる．また，心金の適用によりすべての条件において，図 9 に示す R50 のように，しわが抑制された．その他，肉厚の変化量については，これまでの研究結果で，心金を適用によりその変化率が大きくなることわかっている．これは心材で摩擦力が発生し，管材長手方向に張力が付加されるためであるとしている⁴⁾．

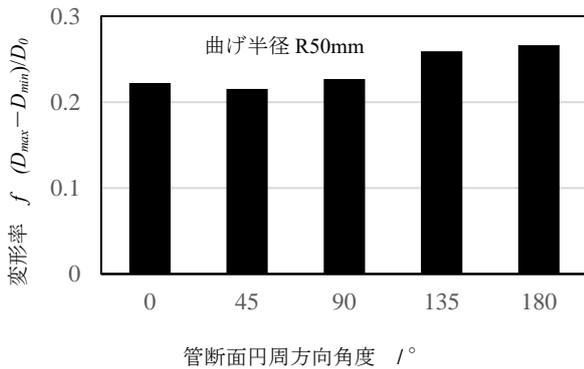


図 13 偏心角度と断面変形 (心金なし)

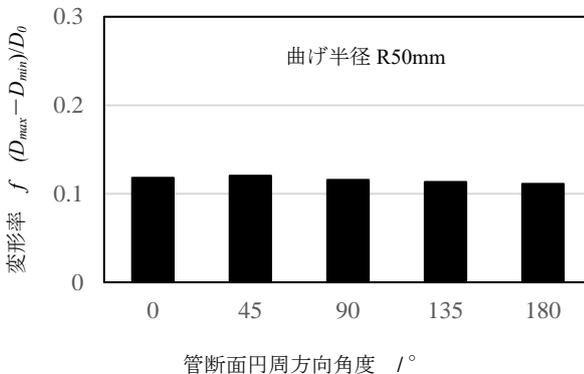


図 14 偏心角度と断面変形 (心金あり)

3・3 曲げ解析

ここでは曲げ後に肉厚が均一になる管材の偏心量を導出するために，偏肉比と偏心量の関係をシミュレーションによって調査した．まず材料定数の塑性係数 C 値および加工硬化指数 n の影響を図 15, 16 に示す．加工硬化指数，塑性係数の何れにおいてもその影響は小さいことがわかる．また，図中に黒塗りの実験結果 (EXP) をプロットしているが，シミュレーション結果 (FEA) と同様の結果を示している．このほか，偏心量と偏肉比の関係は，偏心量が大きくなるほど，偏肉比も大きくなり比例関係にあることが図から読み取れる．したがって，偏肉比が 1 であると曲げ加工後の肉厚が均一となるので，その偏心量を予測すると，材料定数 C , n にかかわらず， e

= 0.11~0.12 mm となる．

次に，曲げ加工後の偏肉に及ぼす曲げ半径，すなわち加工度の影響について調査した．その結果を図 17 に示す．

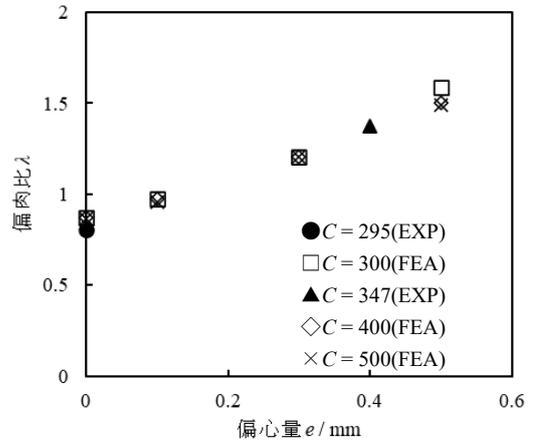


図 15 偏肉に及ぼす塑性係数の影響 ($R/D_0=2.3$, 実験: A6063-T1, T5, FEA: $n=0.2$)

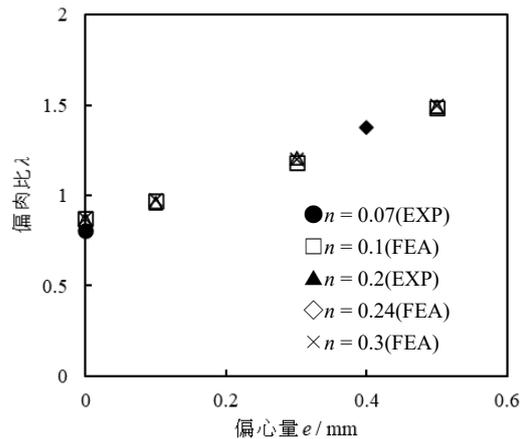


図 16 偏肉に及ぼす加工硬化指数の影響 ($R/D_0=2.3$, 実験: A6063-T1, T5, FEA: $C=500$)

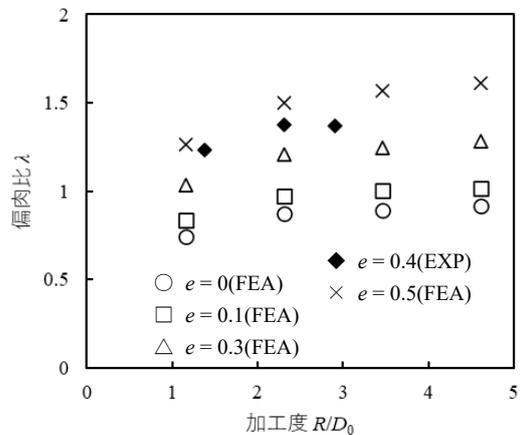


図 17 偏肉に及ぼす加工度の影響 (FEA: $C=400\text{MPa}$, $n=0.2$, 実験: A6063-T1)

曲げにおける肉厚の変化は機械的性質より曲げ半径に大きく影響する。曲げ半径の違いは曲げ引張・圧縮ひずみに影響し、肉厚を変化させる因子である。そこで偏心量 $e = 0, 0.1 \text{ mm}$ の結果を見ると、加工度が大きい場合、偏肉比は1に近づいていることがわかる。これに対して $e = 0.3, 0.5 \text{ mm}$ を見ると、加工度が小さい場合、偏肉比は最も1に近づいていることがわかる。まとめると、曲げ加工後に肉厚が均一となる偏心量は加工度に応じて変化することがわかる。黒塗りの実験結果 $e = 0.4 \text{ mm}$ の場合も同様の傾向を示しており、このような結果からもシミュレーション結果は妥当なものであると考える。

最後に、以上の結果から曲げ加工後に肉厚を均一化する偏心量と曲げ加工度の関係をシミュレーションによって求めた。図 18 にその結果と偏心量を導く指数関数の式を示す。例えば、A6063-T1 の加工度 $R/D_0 = 2$ の曲げを行う場合には ($R = 43.4 \text{ mm}, D_0 = 21.7 \text{ mm}, d_0 = 18$)、偏心量 $e \approx 0.15$ で均一な肉厚が得られることを示す。

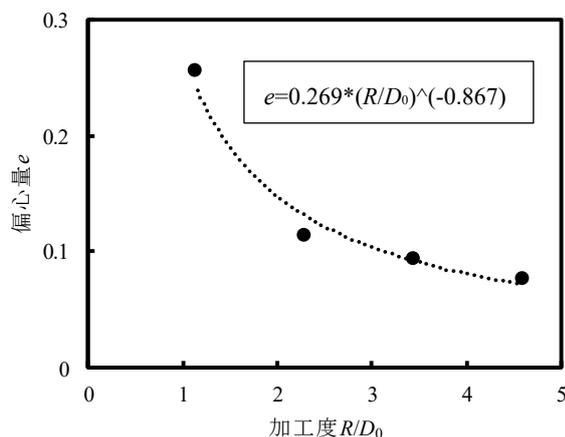


図 18 肉厚を均一にする偏心量

4. 結論

本件では $e = 0.4 \text{ mm}$ の偏心管を製造したが、製造公差が $\pm 0.25 \text{ mm}$ であるために、偏心量 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 付近の肉厚を均一にする理想的な偏心量を持つ偏心管の製造ができなかった。以降の研究では偏心量の小さい値の偏心管の調達が課題である。本研究で得た結果を以下にまとめる。

- (1) $e = 0.4 \text{ mm}$ の A6063-T1 の押し出し偏心管を用いて回転引曲げ加工実験を行うことができた。
- (2) 最薄肉部を圧縮側に配置した偏心管の曲げでは曲げ型 R が 20 mm までしわのない製品が得られた。
- (3) 心材を適用しない $R = 50 \text{ mm}$ では最薄肉部を $0 \sim 45^\circ$ に配置するとしわが発生する。
- (4) 円形中空部を偏心させることでも曲げ加工後に均一な肉厚が得られることがわかった。
- (5) 最厚肉部が引張側に配置することによって曲げによる引張側の落込み、すなわちへん平化が抑制される。
- (6) 曲げによる偏肉は材料定数より加工度や偏心量の方が大きく依存することがわかった。これらの結果により、曲げ後に肉厚を均一にする偏心量を求める関係式を導出することができた。

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-2020008-B2) によって実施した。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 稲田文夫・米田公俊・森田良・藤原和俊・古谷正裕：材料と環境，57-5 (2008)，218-223.
- 2) 田宮：材料，61-6 (2012)，550-555.
- 3) 中島邦斗・内海能亜・吉田昌史：ぷらすとす，5-55 (2022)，422-426.
- 4) 中島邦斗・内海能亜・吉田昌史：鉄と鋼，108-7 (2022)，394-404.
- 5) 中島邦斗・内海能亜・吉田昌史：第 73 回塑性加工連合講演会講演論文集，(2022)，371-372