



N. Utsumi

## 超薄肉方形管と偏心円管の曲げ加工における変形および加工特性

内海 能重\*

### 1. まえがき

方形管は導波管として人工衛星などに適用されている。導波管はアンテナから集約した電磁波をその管内に流すもので、衛星機体中に張り巡らされているため、直管だけでなく曲げ部も必要となってくる。一般的に、曲がり管はフランジ部を溶接やロウ付けなどで設け、管の端部をボルトでつなぎ合わせて衛星に取り付けている。3次元的に曲げ加工された一体型の導波管の適用が望ましく、導波管全体を小型・薄肉軽量化することにより、衛星の本体そのものを軽量化できる。また、電磁波を効率的に伝播させるためには、導波管の断面形状の精度も重要なファクターである。

一方、円管は液体などの流体の伝送経路に適用されている。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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。さらに、構造部材としての管材の金属疲労の懸念もある。円管の曲がり部では一般的に、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。そして、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。

曲げ加工では、特に薄肉や小さな曲げ半径の管材において座屈現象である屈服やしわが発生しやすい。また、曲げ加工と同時に発生する断面変形としての偏肉やへん平化などは、断面の形状精度を著しく低下させる。さらに、その材料の持つ変形能を超えた場合に発生するくびれや割れなどの成形不良が問題となってくる。そこで筆者は導波管としての超薄肉方形管<sup>3),4)</sup>および穴円形部を断面中心から偏心させた偏心管の曲げ<sup>5),6)</sup>における変形および加工特性について調査した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 方形管としての供試材

導波管は規格化されており、材質は銅合金やアルミニウム合金などがある。断面形状は方形管と円管等が主であるがへん平管もある。方形管では小さなもので、断面の外形が1mm以下で、大きなもので500mm以上のものがある。アルミニウム合金製の方形管は一般的に押し出し加工され

るが、外形が20mmのものは、肉厚が1.2mmで、それ以下の外形、例えば10mmのものであってもその肉厚は1.0mmの規格で、一般的な肉厚の規格値は1.0~2.0mmほどとなっている。

本研究で適用した方形管は20×10×0.5mmの薄肉管である。方形管の形状寸法を図1に示す。押し出し材としては規格にないので、また、押し出し加工では薄肉化に限界があるので、市販の円管の押し出し材から引抜き加工し、方形断面形状を得たものである。導波管はコーナRの寸法も規格化されているので、それを参考にした寸法とした。

方形管の機械的性質を表1に示す。材質はA6063材の焼なまし材を適用した。導波管は電磁波を流すのが目的であり、構造部材ではないので焼なまし材とした。方形管断面の各辺20と10mmからワイヤカットで試験片14B号を切り出し作製した。各辺の肉厚差は10数μmオーダーであり、また、各数値に差がほとんどなかったため、各辺の試験片3本、計N=6を平均して求めた。

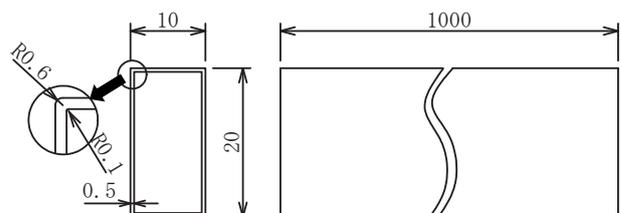


図1 供試材の形状寸法

表1 機械的性質

材質	A6063-O
引張強さ $\sigma_B$ / MPa	91
伸び $\delta$ / %	24
耐力 $\sigma_{0.2}$ / MPa	39
加工硬化指数 $n^*$	0.27*
塑性係数 $C^*$ / MPa	160*

$$^*\sigma = Ce^n \quad \text{JIS Z2201}$$

\*埼玉大学 教育学部 生活創造講座 教授

## 2.2 偏心管としての供試材

図2は偏心管を用いた場合の曲げ後の肉厚の均一化をイメージしたものである。次に供試材の機械的性質を表2に示す。実験に適用した円管は偏心のない 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  $\sigma=C\epsilon^n$  より得ている。図3は実際の偏心管断面を示す。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 0.4mm で、偏心管の最薄肉部は 1.45mm、最厚肉部は 2.25mm となっている。管長  $L$  は  $90^\circ$  曲げの場合、曲げ半径条件で異なり最長で 555mm、最短で 250mm である。

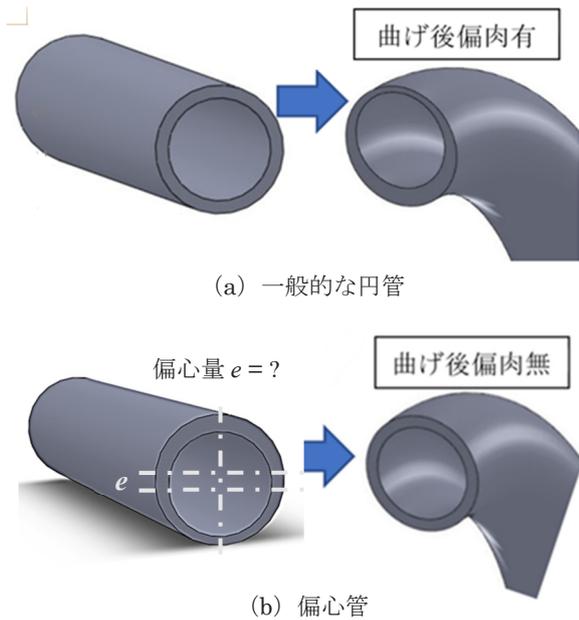


図2 偏心管の曲げによる肉厚の均一化

表2 機械的性質

材質	A6063-T1	A6063-T5
引張強さ $\sigma_B$ / MPa	175	225
耐力 $\sigma_{0.2}$ / 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

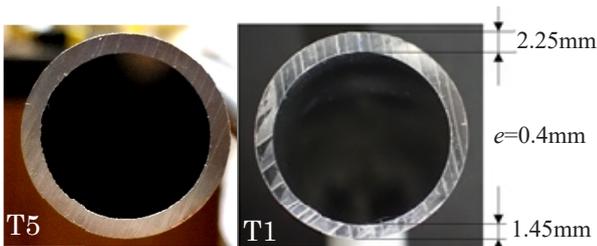


図3 円管の断面

## 2.3 曲げ加工装置

図4は方形管対応の回転引曲げ加工装置の模式図である。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。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。

曲げ型半径は方形管の場合、 $R=20, 22.5, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200$ mm、円管の場合、 $R=10, 20, 30, 50, 63$ 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、方形管高さ  $H_0$ 、円管外径  $D_0$  とすれば、加工度はそれぞれ  $R/H_0$  と  $R/D_0$  となる。

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は方形管用と円管用の心材を示す。数珠型は鋼製、積層型は PVC を適用した。

## 2.4 曲げシミュレーション

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方形管、円管、積層心材はソリッドモデル、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

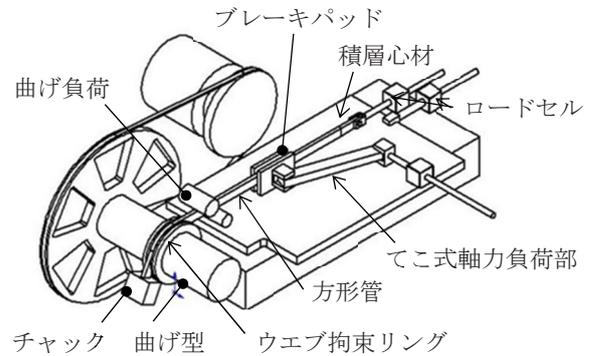


図4 回転引曲げ装置

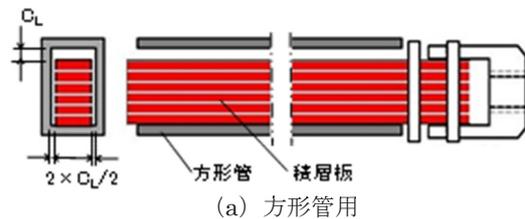


図5 各種心材

静摩擦係数は 0.01 とした。それぞれの曲げシミュレーションモデルを図 6 に示す。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 超薄肉方形管の曲げ

方形管高さ  $H_0=20$ , 幅  $W_0=10$ mm, 曲げ半径  $R=50$ mm の条件で軸引張力と積層心材を適用した回転引曲げの加工後の各種断面形状を図 7 に示す。管材側面(ウェブ)を拘束しない条件, 拘束した条件, あるいは心材に工夫を加えた段付き心材を適用した条件を (a) ~ (d) に示した。ウェブ拘束をしていない曲げによる加工後の外観を図 8

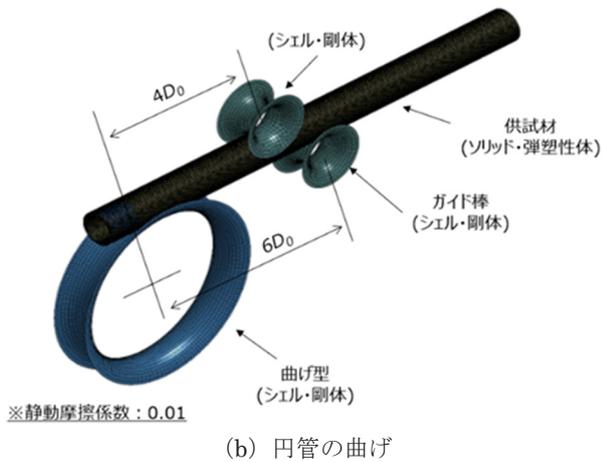
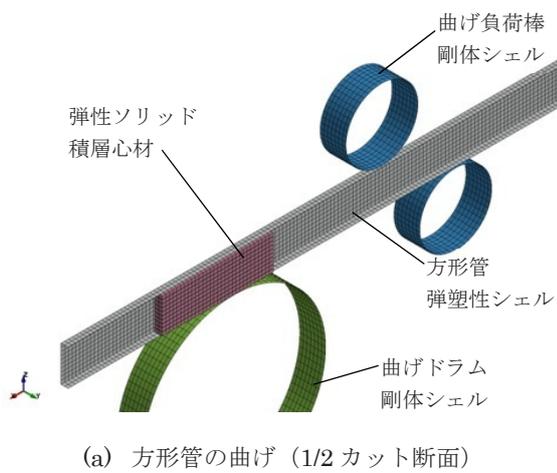


図 6 シミュレーションモデル

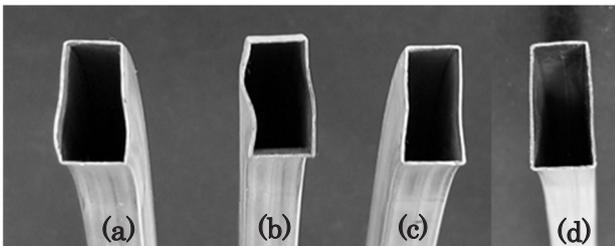


図 7 曲げ加工後の断面変形

に示す。肉厚が薄く管各稜部の剛性が低いための洋ナシ形状のふくらみが生じたと考えられる。次にウェブの拘束を半拘束と全拘束した条件の曲げ後の外観と断面を図 9 に示す。興味深いことに、はりの長柱の座屈のように半拘束では中央支持の両端回転端条件の波型の変形, 全拘束では両端固定条件の変形にウェブの変形が酷似している。ウェブの全拘束の他に, 図 10 のように心材を段付きにすると, さらに変形が抑制されていることがわかる。方形管と段付き心材のクリアランス  $C_L$  について, 高さ方向は 0 mm, 段付き引張側の幅方向は 1.0 mm, 圧縮側は 0.5mm とした。仮に, 段付きの引張側のクリアランスをゼロで曲げると, 管材の引張フランジ幅は短くなり, 破断が発生しやすくなる。段付き心材を適用した場合の断面変形は, 幅・高さ方向でそれぞれ 7%, 1% 以下の変形に抑制することができた。しかしながら, 肉厚の変化は図 11 のように拘束を付加することで大きくなることわかる。

#### 3.2 偏心管の曲げ

ここでは曲げ角度をすべて  $90^\circ$  とし, 図 12 に示すよう

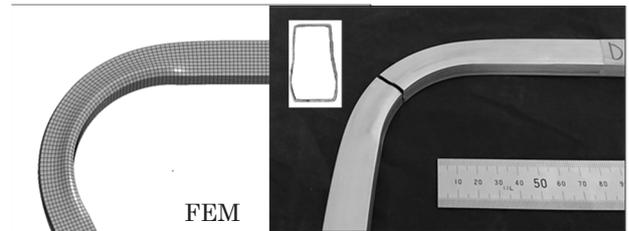


図 8 ウェブ拘束をしない曲げ

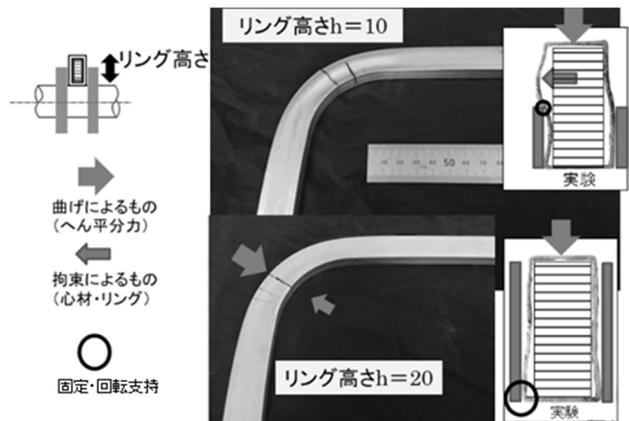


図 9 ウェブ拘束をした曲げ

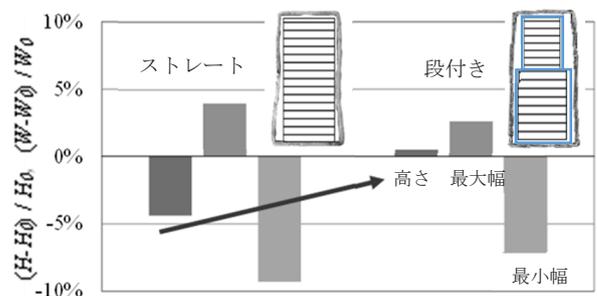


図 10 段付き心材の適用の効果

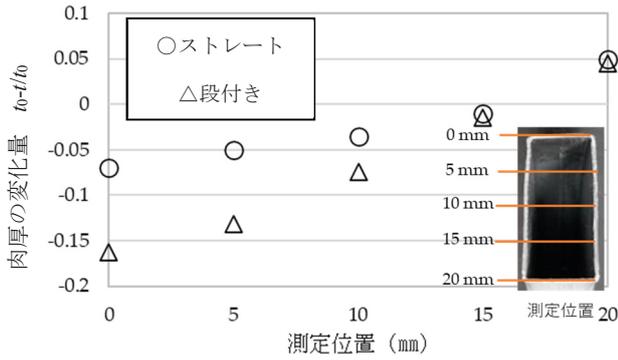


図 11 心材の違いによる肉厚の変化量

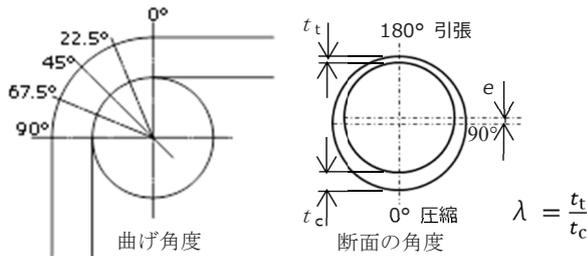


図 12 偏心管の評価方法

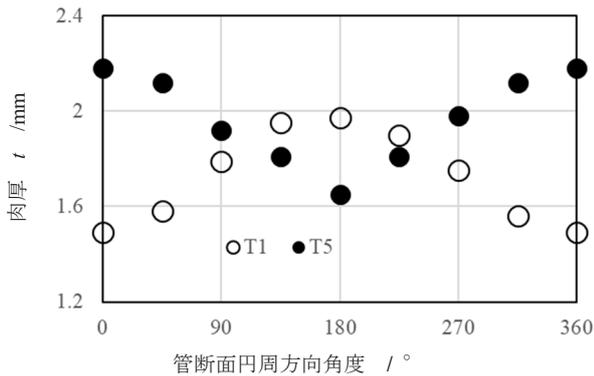


図 13 偏心管の肉厚分布

に 22.5, 45, 67.5, 90°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 $\lambda$ は引張側の肉厚  $t_t$  と引張側の肉厚  $t_c$  で表した。

### 3.2.1 曲げ実験 (EXP)

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 13 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 14 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き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。

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 15 に示す。それぞれ, 管断面引張側 180°, 圧縮側 0°

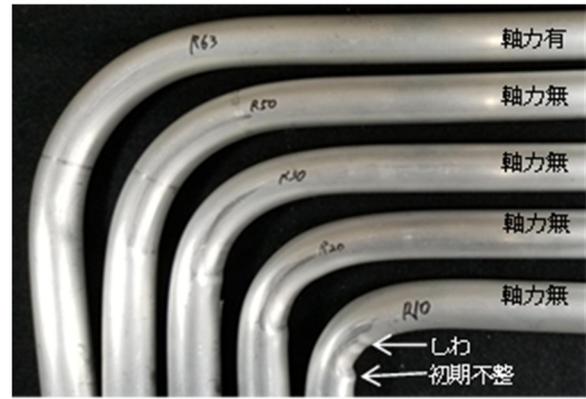


図 14 偏心管の曲げ後の外観 (心材あり)

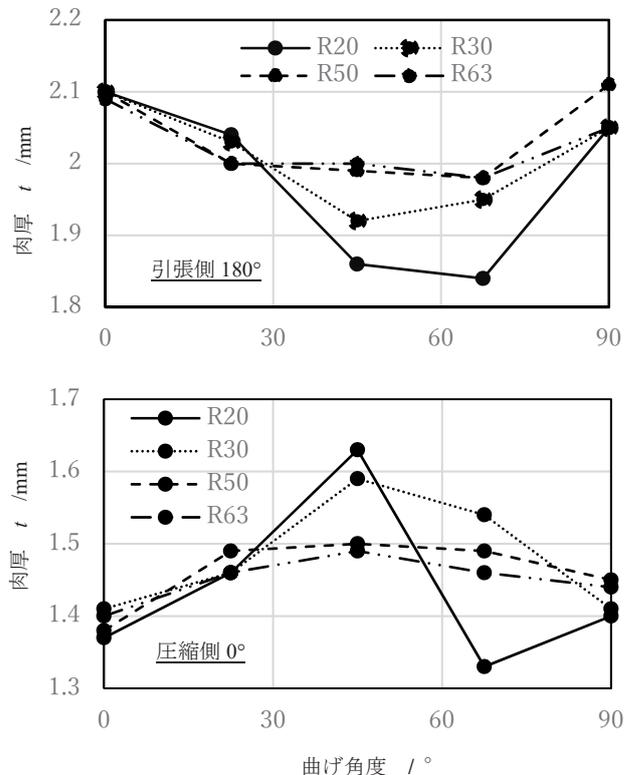


図 15 曲げ角度と肉厚

の肉厚分布で, 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°において安定した肉厚が得られないことがわかる。合わせて曲げ角度 45°の断面の変形率を図 16 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。

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 17 に示す。圧縮側の 0°と 45°に薄肉部を配置すると, 圧縮側でしわが発生した。次に, 上述の偏心させた曲げの各曲げ角度 45°の断面の変形率を図 18 に示す。ここでは心金を適用していないので, 引張側に最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 19 は心金を使用した結果である。心金を適用しているので

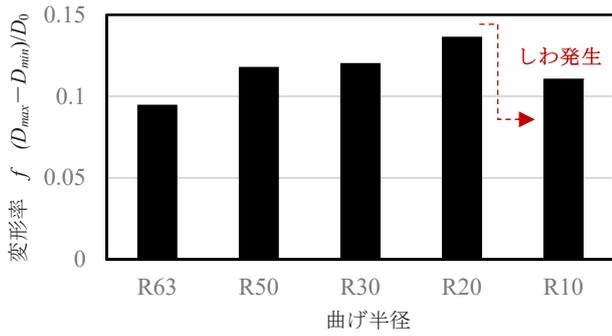


図 16 曲げ半径と断面の変形率

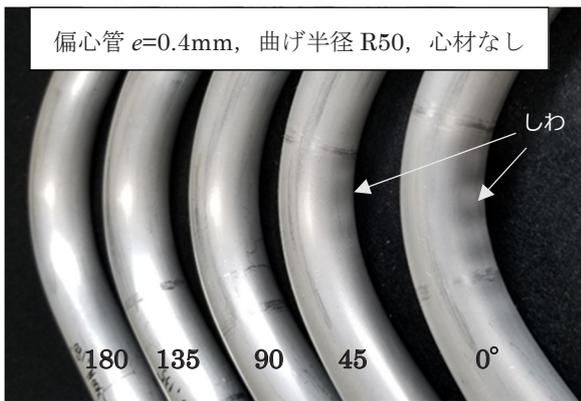


図 17 薄肉部を 180, 135, 90, 45, 0° に配置した曲げ

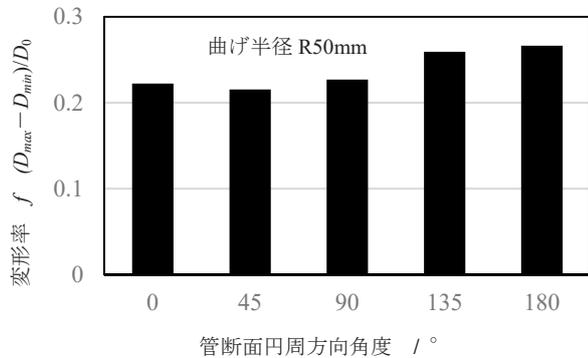


図 18 偏心角度と断面変形 (心金なし)

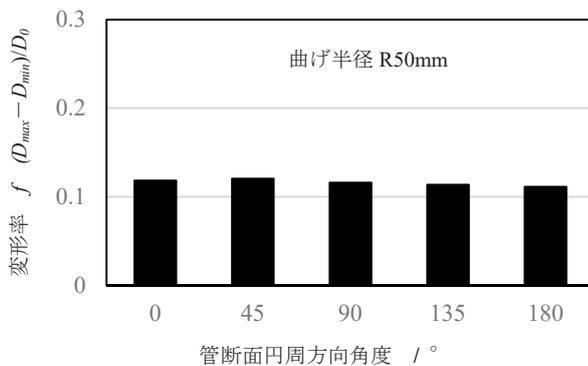


図 19 偏心角度と断面変形 (心金あり)

変形率は横ばいで、心金なしに比べほぼ半分の変形に抑えられていることがわかる。また、心金の適用ですべての条件において、図 14 に示した R50 のように、しわが抑制された。この他、肉厚の変化量については、これまでの研究結果で、心材の適用によりその変化率が大きくなることがわかっている<sup>5)</sup>。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。

### 3.2.2 曲げ解析 (FEA)

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、偏心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 20, 21 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、偏心量と偏心比の関係は、偏心量が大きくなるほど、偏心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、偏心比が 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、 $e = 0.11 \sim 0.12$  mm となる。

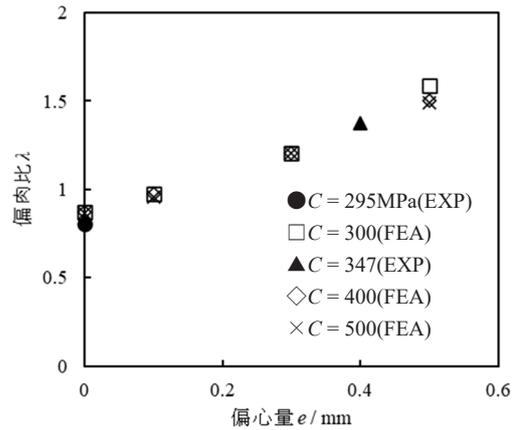


図 20 偏肉に及ぼす塑性係数の影響  
( $R/D_0=2.3$ , 実験: A6063-T1, T5, FEA:  $n=0.2$ )

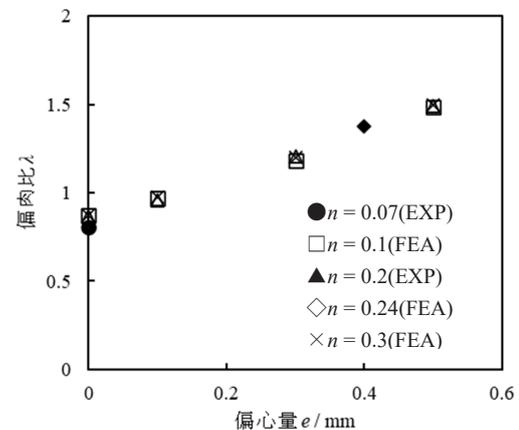


図 21 偏肉に及ぼす加工硬化指数の影響  
( $R/D_0=2.3$ , 実験: A6063-T1, T5, FEA:  $C=500$ MPa)

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 22 に示す。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 23 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。

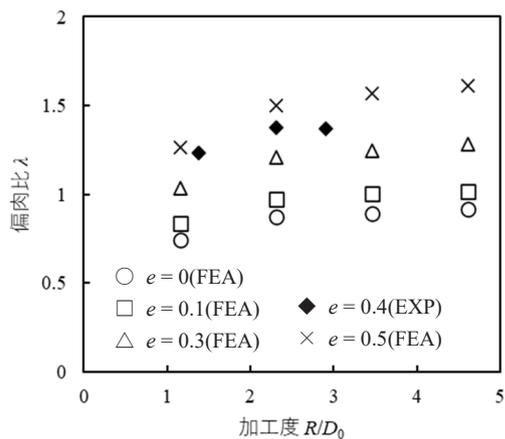


図 22 偏肉に及ぼす加工度の影響  
(FEA :  $C = 400\text{MPa}$ ,  $n = 0.2$ , 実験 : A6063-T1)

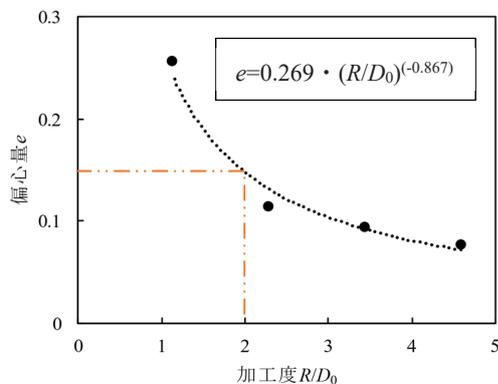


図 23 肉厚を均一にする偏心量

#### 4. あとがき

A6063-O、高さ・幅・肉厚が  $20 \times 10 \times 0.5\text{mm}$  における超薄肉方形管の回転引曲げ加工実験および曲げシミュレーションを行った。薄肉管の曲げではしわが発生しやすいが、軸引張力を負荷することによって、しわを抑制することができた。また、薄肉方形管特有のウェブの座屈による断面変形が発生することがわかった。この変形は各種拘束条件との関連が深く、方形管と心材のクリアランス、側面拘束、心材形状を適切に改善することによって、断面変形の抑制ができる。例えば、曲げ半径 R50 の本曲げ実験では、幅・高さ方向で断面変形をそれぞれ 7%、1% 以下に抑制することができた。

A6063-T1、偏心量  $e = 0.4\text{mm}$  の押し出し偏心管を用いて回転引曲げ加工実験を行った。最薄肉部を圧縮側に配置した偏心管の曲げでは、曲げ型半径が  $20\text{mm}$  までしわのない製品が得られた。心材を適用しない曲げ半径  $R = 50\text{mm}$  の曲げでは、最薄肉部を  $0 \sim 45^\circ$  に配置するとしわが発生する。また、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。曲げによる偏肉は材料定数よりも加工度や偏心量に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曲げシミュレーションによって導出することができた。本件では、 $e = 0.4\text{mm}$  の偏心管を製造したが、押し出し公差が  $\pm 0.25\text{mm}$  であるために、肉厚を均一にする理想的な偏心量  $0.1 \sim 0.2\text{mm}$  付近の偏心管を製造することができなかった。今後は偏心量の小さな値の偏心管の成形法が課題となる。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成 (AF-2016026, AF-2020008-B2) により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

#### 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) K.NAKAJIMA・N.UTSUMI・Y.SAITO・M.YOSHIDA : Metals, 10-8(2020), 1-16
- 4) 中島邦斗・内海能亜 : ぷらすとす, 5-55 (2022), 422-426.
- 5) 中島邦斗・内海能亜・吉田昌史 : 鉄と鋼, 108-7 (2022), 394-404.
- 6) 中島邦斗・内海能亜・吉田昌史 : 塑性と加工, 64-753(2023), 182-187