研究論文

# マグネシウム合金パイプ材の曲げ加工技術の開発

相田　収平*　白川　正登**　山崎　栄一**

Development of High-performance Bending Technology of Magnesium Alloy Pipes

AIDA Shuhei*, SHIRAKAWA Masato**and YAMAZAKI Eiichi**

**抄　　録**

マグネシウム合金パイプは，実用金属中では最軽量かつ重量に対して高剛性の中空型材といった両特長を有していることから，構造部材に適用した場合のメリットが大きく，今後の適用拡大が期待されている。本研究では，異形断面を有するパイプの曲げ加工技術として，パイプの軸方向に引張り力を付加する引張り曲げ加工，および素管径に対して拡管しながら曲げ加工を行う浮動拡管プラグ曲げ加工技術についてマグネシウム合金パイプへの適用を試みた。その結果，引張り曲げ加工では，軸方向の引張り力と曲げ部の断面形状との関係を明らかにした。また，浮動拡管プラグ曲げ加工では，円形断面の素管に対して，楕円および四角形状の断面に変形させながら曲げ加工を可能とする技術を開発した。

## 1.　緒　　言

マグネシウム合金は，実用金属としては最も軽い材料であるとともに，同一重量において比較した場合の比強度では，鋼やアルミニウムより優れている。また，パイプ材は中空構造であることから重量に対して高剛性であり，軽量化やコストダウンに適している。これら両方の特長により，例えば車両用のシートフレーム部品などの構造部材に適用した場合には，強度と軽量を両立することが可能となり，大きなメリットが得られることから，今後の用途の拡大が期待できる[1)]。

ところで，これらの製品の多くはパイプ材を曲げ加工した部品と板材をプレス成形した部品を組み合わせた形態となっている。しかしながら板材の成形技術に比べて，パイプの加工技術についての報告は少ない[2) 3)]。

本研究では，マグネシウム合金パイプの曲げ加工技術を開発することによって，構造用部品等への適用拡大を図ることを目的とした。それを実現するための加工技術として，引張り曲げ加工，および浮動拡管プラグ曲げ加工技術を取り上げ，マグネシウム合金パイプへの適用を検討した。

*　　下越技術支援センター
**　　研究開発センター

## 2.　マグネシウム合金パイプの引張り曲げ加工

### 2.1　供試材およびプレス曲げ特性

供試材である AZ31 マグネシウム合金製，長円形断面を持つパイプの断面形状を図 1 に示す。このような異形断面形状のパイプは，長軸方向断面において断面係数が大きくなり，この方向での曲げ強度が向上するため，部材の軽量化を図る上では有効な手段である。そこで，当該パイプの長軸方向のプレス曲げ試験を行った。

図 2 に示すパンチとダイスより構成される金型を用いて，長さ 300mm のパイプの 90°曲げを行った。曲げ加工性は，加工温度を室温から 230℃まで変化させ，パンチ半径 $R_p$ によって評価した。なお曲げ加工には，加工能力 1100kN，加工速度 50SPM のクランクプレス機械を用い，パイプの

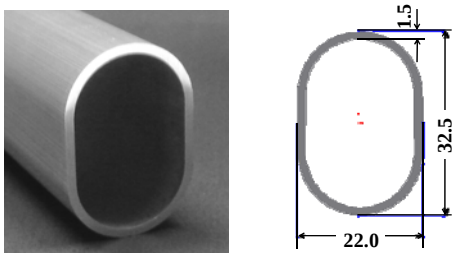



図１　長円形断面パイプ　（単位:mm）

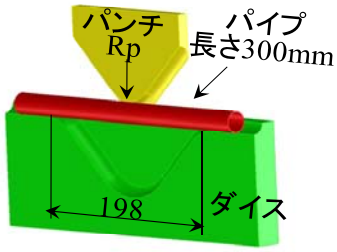



図２　パイププレス曲げ試験金型概略

表１　パイププレス曲げ試験結果

曲げ試験温度　T（℃）

| 内側曲げ半径　Rp（mm） | R.T. | 100 | 150 | 200 | 230 |
|---|---|---|---|---|---|
| 27.5 | | | | | ◎、○ |
| 33 | | | ◎ | ○ | |
| 38.5 | | ◎ | | | |
| 44 | | | | | |
| 49.5 | ◎ | ○ | ○ | | |
| 55 | | | | | |
| 60.5 | ○ | | | | |
| 66 | | | | | |
| 71.5 | | | | | |
| 77 | | | | | |

長円形断面パイプの曲げ可能領域

偏平化を抑制するために，パイプ内に平均粒径 0.5mm の鉄製ビーズを充填している。

表 1 にプレス曲げ試験結果を示す。縦項目はパンチ半径 $R_p$，横項目は加工温度 T をパラメータとして，曲げ加工が可能な加工条件の領域を表す。比較対象として，外径 $D_0$=22mm，肉厚 $t_0$=1.8mm の円管パイプの限界曲げ半径を◎で，同外径，肉厚 $t_0$=1.0mm の円管パイプの限界曲げ半径を○でそれぞれ表中に示す [4]。表から明らかなように，いずれのパイプについても加工温度の上昇に伴って曲げ加工性が向上するが，長円形断面パイプは，円管に比べて曲げ加工性が悪い。

図 3 は，長円形断面パイプの $R_p$=44mm と 55mm での曲げ加工後の曲げ部の断面形状について示しており，それぞれ加工温度 230℃，200℃での限界曲げ半径の曲げ加工結果である。$R_p$=44mm では曲げ部外側の肉厚および断面係数は加工前のそれぞれ 76%，83%に低下している。

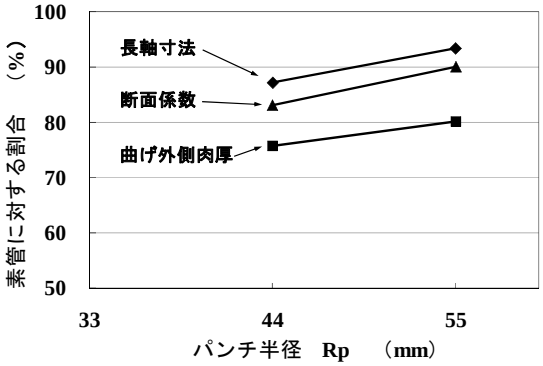



図３　パイプ曲げ部断面形状

## 2.2　引張り曲げ試験

長円形断面パイプの曲げ加工性を向上させる手段として，図 4 に示す引張り曲げ試験機により，引張り曲げ加工 [4] を試みた。付加引張り力は 1.47～2.45kN，加工温度は 200℃，パンチ半径は $R_p$=22mm にて行った。

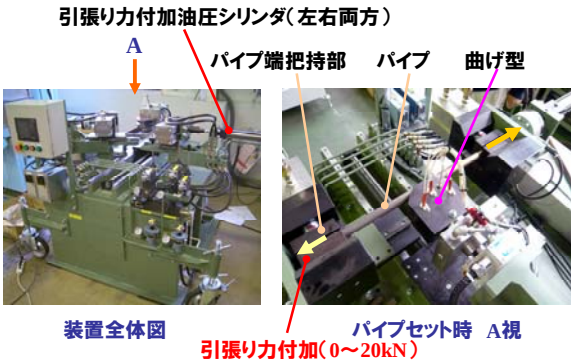



図４　パイプ引張り曲げ試験機

図５　パイプ引張り曲げ外観

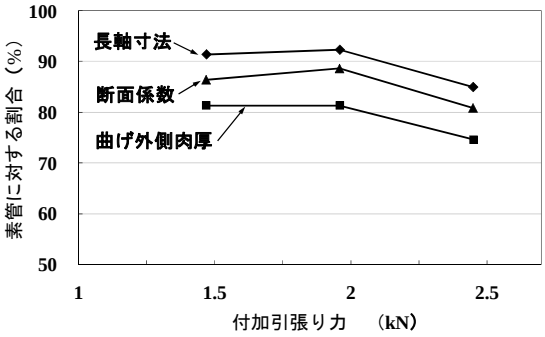



図 6　パイプ曲げ部断面形状

図 5 にはパイプ曲げ部の外観を示す。また，図 6 には付加した軸方向の引張り力と曲げ部の断面形状について示している。引張り力の増加とともに曲げ部偏平化が進んでいることが外観図から明らかである。断面係数の変化については，付加引張り力が 1.96kN 程度までは偏平化による低下は緩やかであるが，2.45kN では偏平化が大きく進行し，断面係数は曲げ加工前の約 80%程度に低下している。

## 3.　浮動拡管プラグ曲げ加工

### 3.1　浮動拡管プラグ曲げ加工装置

浮動拡管プラグ曲げ加工法とは，自由に移動できるように細い鋼線で支持された拡管プラグにパイプを通し，拡管しながら押し出すとともに，拡管されたパイプに曲げロールによって曲げモーメントを付加して所定の曲率に曲げる加工法である。その際，プラグは曲げロールの押し込み力によってその方向に移動しようとし，逆にパイプからはプラグを中心に戻そうとする力が作用する。これらがバランスした位置にプラグが移動することを

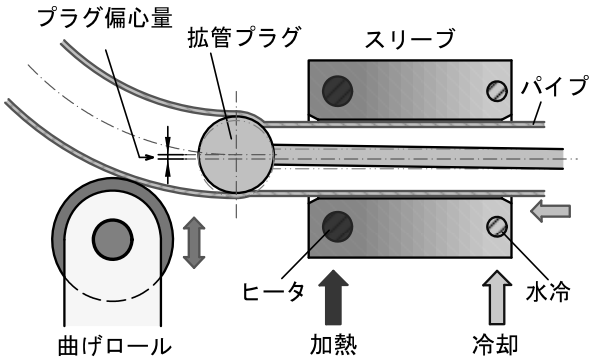
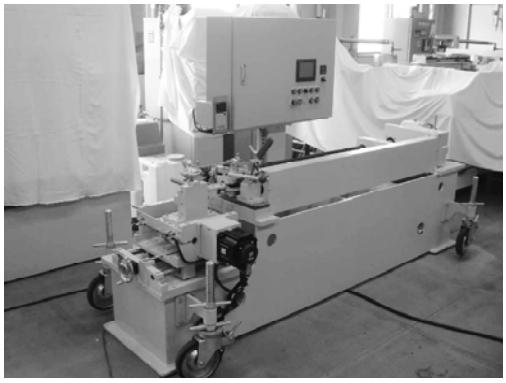



図 7　浮動拡管プラグ曲げ概要

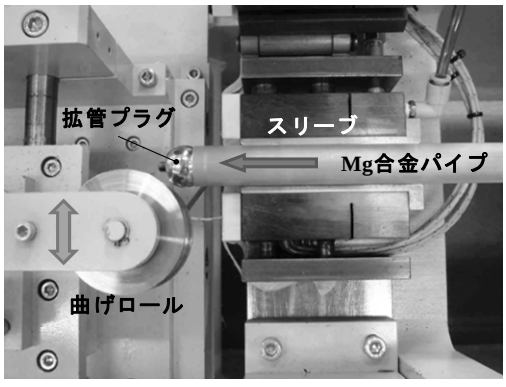
特徴とする加工法であり，偏平，偏肉等が小さく断面形状が良好で，曲げ半径が小さい加工が可能なパイプの曲げ加工法として報告されている[5) 6)]。さらに，この加工法による楕円等異形断面形状のパイプの加工も報告されている[6) 7)]。しかし，銅合金やアルミニウム合金への適用がほとんどであり，マグネシウム合金パイプへの適用例は報告されていない。

マグネシウム合金パイプの塑性加工は，一般的に常温では困難であり，温間域での加工が必要となる。そこで，温間加工が可能な浮動拡管プラグ曲げ加工装置の開発を行った。

装置の開発にあたって，既存装置の加工部近傍に簡易的な加熱構造を設けて，マグネシウム合金パイプの成形を試みた。その結果，加工するパイプが長尺の場合や曲率や拡管率が厳しい曲げ条件では，スリーブ内やスリーブ入口よりも手前で素材のパイプが座屈してしまう現象が確認された。これは，マグネシウム合金は圧縮強度が弱いうえ，伝熱によりパイプ全体が加熱され，座屈強度が低



(a)　装置外観




(b)　加工部拡大写真

図 8　浮動拡管プラグ曲げ加工装置

下したためであると考えられる。したがって，拡管荷重および曲げモーメントが大きくかかるプラグ近傍では高温に加熱することで成形荷重を低下させ，それ以外の位置では，強度を保持できる温度にパイプが冷却される構造が望まれる。そこで，パイプのガイドとなるスリーブをヒータにより加熱できる構造とし，加工部に近いスリーブ出口側で高温に，スリーブの入り口側は，水道水により冷却できる構造とした。図 7 に開発した浮動拡管プラグ曲げ加工装置の概要を示す。開発した装置の外観写真を図 8(a)に，加工部（分割スリーブを開放した状態）の拡大写真を図 8(b)に示す。

### 3.2　潤滑剤の拡管性能評価試験

#### 3.2.1　供試材および潤滑剤

供試材には，外径 $D_0$=15mm，肉厚 $t_0$=1.0mm の AZ31 マグネシウム合金パイプを用いた。試験片の長さは 60mm とした。

潤滑剤は，水溶性乾燥皮膜潤滑剤，溶剤希釈型乾燥皮膜潤滑剤，油系潤滑剤の 3 種類について評価を行った。

#### 3.2.2　試験方法

拡管の潤滑性能は，内面に潤滑剤を塗布した供試材に拡管プラグ（鋼球）を押込み，押込み荷重の最大値で評価した。主な試験条件を表 2 に，試験の様子を図 9 に示す。試験機には，自動万能試験機（インストロンジャパン製 5582）を用い，試験温度の恒温槽内にて試験を行った。押込み長さは，荷重のかかり始めた位置から 40mm とした。拡管率は E= 10，15.4，22.1%とし，試験温度は 150，175，200℃とした。拡管率 E の定義を以下

表 2　潤滑剤の拡管性能評価試験条件

| 潤滑剤種類 | | 水溶性乾燥皮膜潤滑剤<br>溶剤希釈型乾燥皮膜潤滑剤<br>油系潤滑剤 |
|---|---|---|
| 拡管プラグ（鋼球） | 材質（硬さ） | SUJ2 (60～67HRC) |
| | 寸法（mm）（拡管率） | φ14.3（10%）<br>φ15.0（15.4%）<br>φ15.875（22.1%） |
| 試験温度 （℃） | | 150,175,200 |
| 試験速度 （mm/sec） | | 1 |
| 押込み長さ （mm） | | 40 |

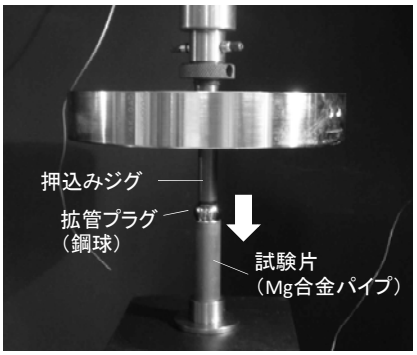



図 9　試験状況

に示す。

$$E = (d / d_i - 1) \times 100\ \%$$

ここで d は拡管プラグ外径，$d_i$ は素管内径である。

#### 3.2.3　実験結果

各拡管率における試験温度と押込み荷重の関係を図 10 に示す。すべての試験条件において，水溶性乾燥皮膜潤滑剤の最大押込み荷重が最も小さな値となり，試験温度の上昇にともなって押込み荷重は減少する傾向が確認された。この結果と比較すると他の潤滑剤は，押込み荷重が大きいのみではなく，試験温度上昇にともなう押込み荷重の低下傾向が明確には確認されなかった。特に，試験温度 175℃における最大押込み荷重が高い値を示す傾向が見られた。

試験中のプラグ押込み量と押込み荷重の関係について，拡管率 15%，試験温度 175℃における試験結果を図 11 に示す。同一潤滑剤の結果をそれぞれ 2 例ずつ示した。試験中の現象として乾燥皮膜型の潤滑剤では，びびり音等の異音が発生する場合があり，このような試料では細かな荷重の変動が確認された。特に拡管率が高い場合，試験温度が高い場合，潤滑剤皮膜の乾燥が不十分な場合に発生頻度が高かった。また，予備実験において潤滑剤皮膜の乾燥が不十分な場合には，顕著な荷重の上昇も確認されている。油系潤滑剤では，異音の発生はないものの油煙や異臭が激しく，作業環境が悪い状況であった。また，高温による粘度低下によりパイプ下端側に潤滑剤の流出が認められ，潤滑切れが懸念される。この油系潤滑剤で

は，最大押込み荷重のばらつきが大きく，図 11 においても，20～25%の押込み荷重の差が認められる。

以上の結果から，びびりの発生等の課題はあるものの，拡管時のプラグの押込み荷重が比較的安定して小さな値を示した水溶性乾燥皮膜潤滑剤を用いて次節の試験を行うこととした。また，実際のプラグ曲げ加工においては，パイプには拡管のための押出し荷重に加えて曲げモーメントが付加されるため，パイプ周方向の各位置で塑性ひずみの形態が異なることとなり，潤滑の状態も変わるものと考えられるが，実加工における潤滑性能の評価は今後の課題としたい。

### 3.3　浮動拡管プラグ曲げ加工試験

#### 3.3.1　供試材

異形断面パイプの加工実験には，外径 $D_0$=22mm，肉厚 $t_0$=1.0mm の AZ31 マグネシウム合金パイプを用いた。潤滑には，水溶性乾燥皮膜潤滑剤を用いた。

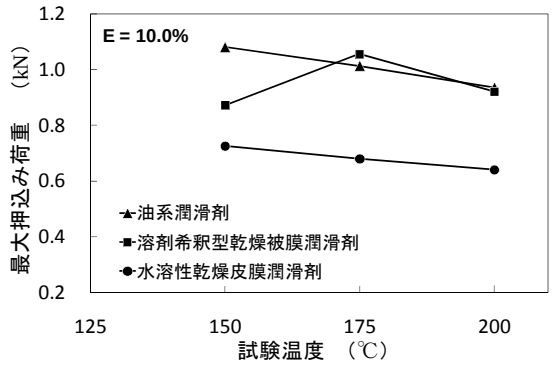
#### 3.3.2　試験方法

開発した浮動拡管プラグ曲げ加工装置を用いて，曲げ加工試験を行った。供試材である円形断面パイプから，拡管率 E=10%の円形断面および楕円断面，また，拡管率 E=16.4%の正方形断面（プラグコーナ半径 4mm）の曲げパイプの加工を試みた。試作したプラグ形状の概要を図 12 に，断面形状の設計値を図 13 に示す。楕円パイプの曲げ方向は，楕円の長径方向とした。異形断面パイプの拡管率は次式により定義する。

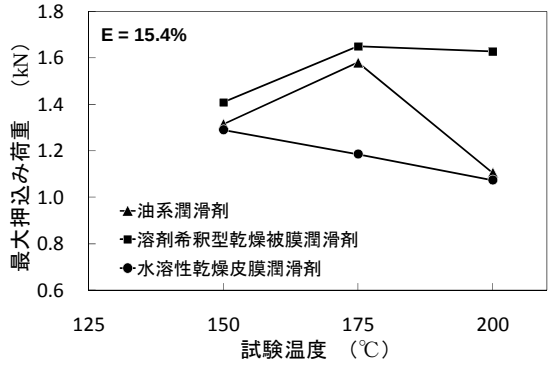
$$E = (L/\pi d_i - 1) \times 100\ \%$$

ここで L は拡管プラグの設計断面形状周長，$d_i$は素管内径である。

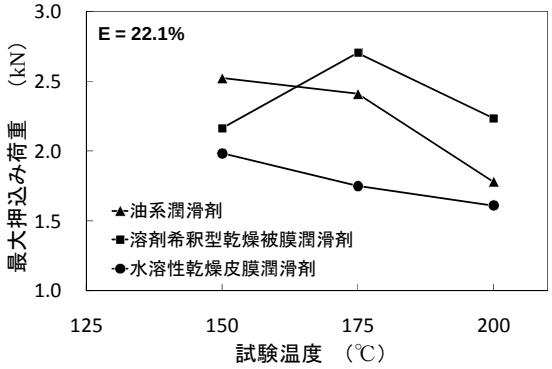
曲げ加工における主な試験条件を表 3 に，各パラメータの説明図を図 14 に示す。曲げ加工の後，万能投影機（ニコン製 V-16E）を用いて曲げ半径の測定を行った。曲げ内側および外側の曲げ半径を測定し，その平均値を中心線曲げ半径 R とした。また，曲げ部および拡管のみの押出し部につ



(a)　E=10.0%



(b)　E=15.4%



(c)　E=22.1%

図 10　拡管試験温度と最大押込み荷重

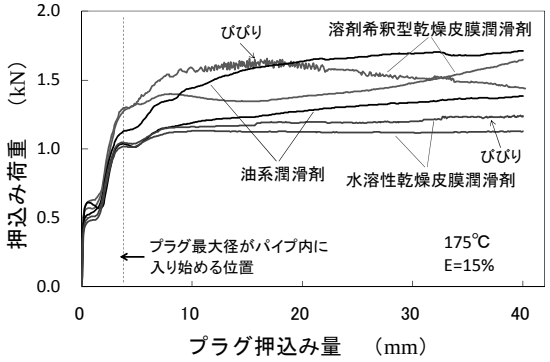
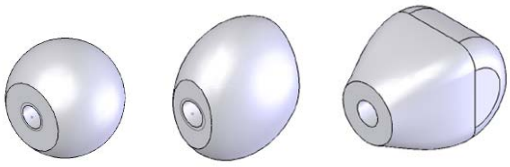



図 11　プラグ押込み量と押込み荷重の関係



円形断面プラグ　楕円断面プラグ　正方形断面プラグ

図 12　試作プラグの形状

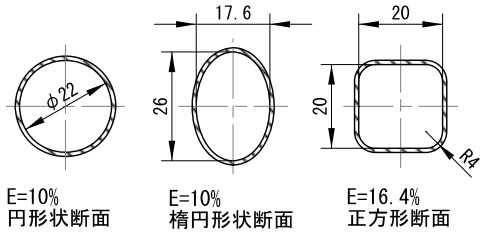



図 13　曲げパイプ断面形状（設計値）

表 3　浮動拡管プラグ曲げ試験条件

| プラグ種類 | E<br>% | v<br>mm/sec | L1<br>mm | L2<br>mm | Y<br>mm | u<br>mm/sec | T1<br>℃ | T2<br>℃ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 円 | 10 | 1.5 | 30 | 30 | 20 | 0.5 | 250 | 140 |
| 楕円 | 10 | 2.0 | 30 | 30 | 20 | 0.5 | 250 | 140 |
| 正方形 | 16.4 | 1.0 | 30 | 30 | 15 | 0.5 | 275 | 160 |

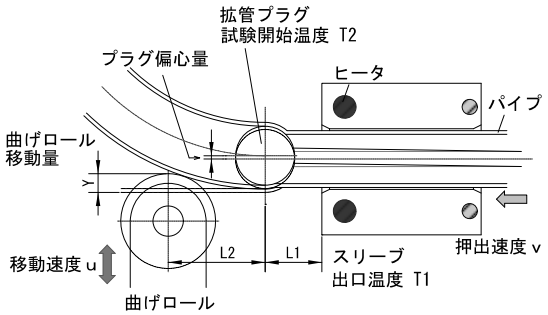



図 14　曲げ試験説明図

いて，マイクロメータを用いて肉厚および外形寸法の測定を行い，偏肉率 e，および偏平率 f を求めて評価を行った。偏肉率 e，偏平率 f の定義を以下に示す。

円形および正方形断面パイプの場合

$$e = (t_i - t_o)/t \times 100 \quad \%$$

ここで，平均肉厚 $t = (t_i + t_o)/2$

$$f = (D_1 - D_2)/D \times 100 \quad \%$$

ここで，平均外形寸法 $D = (D_1 + D_2)/2$

楕円断面パイプの場合

$$e = (t_{max} - t_{min})/t \times 100 \quad \%$$

ここで平均肉厚 $t = (t_i + t_o + t_u + t_d)/4$

$$f_1 = D_1/D_{S1} \times 100 \quad \%$$

$$f_2 = D_2/D_{S2} \times 100 \quad \%$$

$t_i$，$t_o$は，曲げ方向内側と外側の肉厚，$t_u$，$t_d$は曲げと直角方向の肉厚で，$t_u$ が加工時の上側，$t_d$ が加工時の下側である。また，$t_{max}$ および $t_{min}$ は，前記 4 方向の肉厚のうちの最大値および最小値とする。$D_1$ および $D_2$ は，曲げ方向および曲げと直角方向の外形寸法で，円形断面では外径，正方形断面では外側 2 面幅，楕円断面では長径が $D_1$，短径が $D_2$ である。また，楕円断面パイプにおいては基準外径を $D_{S1}$，$D_{S2}$ とし，それぞれ設計形状の長径と短径の寸法とする。

### 3.3.3　試験結果

曲げ加工試験中の写真を図 15 に，得られた曲げパイプの外観を図 16 に示す。図 15 に一例を示すように，円形パイプ素材から正方形断面等の異形断面への形状変更を伴う浮動拡管プラグ曲げ加工が可能なことを確認した。

図 17(a)～(c)に各断面形状の曲げパイプの曲げ部における断面の写真と各部の肉厚の測定結果を

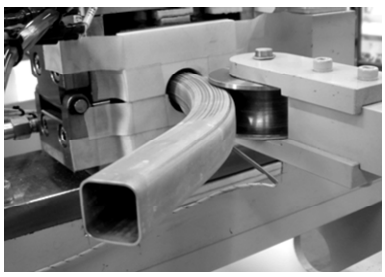


図 15　異形パイプ曲げ加工試験

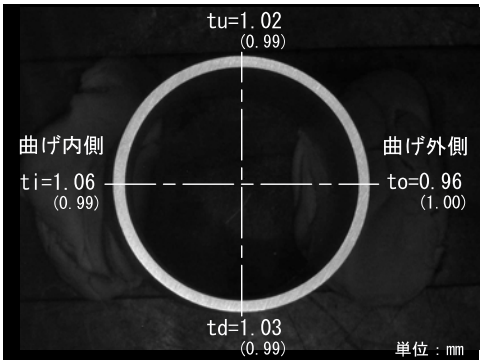
図 16　拡管曲げパイプ外観

示す。また，表 4 に曲げ半径，偏平率，偏肉率の評価結果を示す。

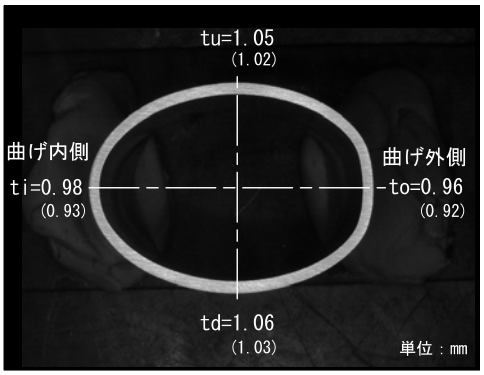
円形断面の拡管曲げパイプにおいては，曲げ部においても，偏平率が 1%以下という非常に良好な形状であった。また，偏肉率は約 10%であり，内径側が厚い傾向であった。拡管のみで曲げを伴わない断面では，偏平率，偏肉率とも 1%以下であった。

楕円断面の拡管曲げパイプでは，偏平率は，曲げ方向で 4.1%，曲げと直角方向で-2.4%であり，図 17(b)に示すように曲げ外側に顕著なつぶれが見られる。これは，曲げロールにより押しつぶされたものと考えられる。本試験では，前記の円形断面用の半径 12mm の R 溝付き曲げロールを用いたため，曲げ外側の頂部のみがロールにあたり，曲げ力が集中的に付加されて変形したものと考えられる。ロール形状を設計形状と同一にすることで改善すると考える。拡管のみで曲げを伴わない断面では，長径 27.9mm 短径 19.67mm といった設計寸法±0.1mm 以内の寸法で拡管成形されていた。偏肉率は，曲げ部で約 10%であったが，円形断面の場合と異なり曲げ方向の内側，外側ともに，肉厚が素材パイプより減少する傾向が確認された。これは，プラグの断面形状が拡管開始位置から楕円であるため長径方向に引張り力が働きながら拡管され，ひずみが集中しやすくなっているものと考えられる。特に曲げ外側が薄く，素材パイプと比べ 4%の肉厚減少があった。それに対し，曲げと直角方向に 5～6%の肉厚増加が生じたため約 10%の偏肉率となった。また，拡管のみで曲げを伴わない場合においての偏肉率は約 11%であった。長径方向の肉厚が薄くなる傾向は曲げ部と同様の結果であったが，全体的に曲げ部の方が 0.03～0.05mm 程度肉厚が厚くなる傾向にあり，曲げにより偏肉率が若干改善する結果となった。

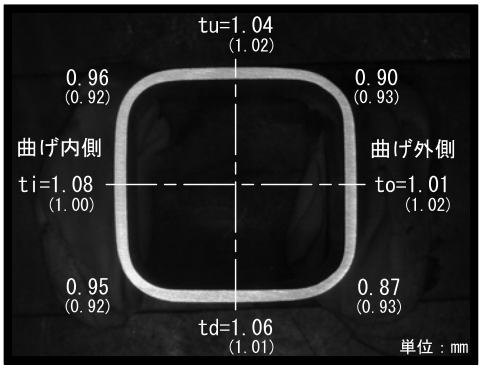
正方形断面の拡管曲げパイプでは，偏平率は，-2.9%であった。これは，曲げ方向の 2 面幅寸法が曲げ直角方向のそれより大きい形状であり，曲げ力により押しつぶされる偏平とは逆の関係になる。原因としては，プラグの設計形状断面と加工




(a)　円形断面




(b)　楕円断面




(c)　正方形断面

図中の括弧付の値は曲げを伴わない場合の肉厚

図 17　パイプの曲げ部断面

表 4　パイプの曲げ半径，偏肉率，偏平率

| 断面形状 | 拡管率 E % | 評価位置 | 曲げ半径 R mm | 偏肉率 e % | 偏平率 f % | 偏平率 f1 % | 偏平率 f2 % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 円 | 10 | 曲げ部 | 113.4 | 9.9 | 0.7 | — | — |
| | | 拡管のみ | — | -1.0 | 0.7 | — | — |
| 楕円 | 10 | 曲げ部 | 143.5 | 9.9 | — | 4.1 | -2.4 |
| | | 拡管のみ | — | 10.9 | — | 0.4 | -0.4 |
| 正方形 | 16.4 | 曲げ部 | 164.7 | 6.7 | -2.9 | — | — |
| | | 拡管のみ | — | -2.0 | 0.0 | — | — |

中にパイプがプラグから離れる位置の断面が異なっているためと思われる。また，曲げロールには，他の曲げ加工試験と同様に R 溝のロールを用いているため，曲げ外側のコーナ部に曲げ力が集中して付加され，コーナ部に形状のゆがみが見られる。これも偏平率の悪化の原因になっている可能性がある。拡管のみで曲げを伴わない場合においては，ほぼ偏平率 0%の均一な形状で拡管成形されていた。曲げ部の偏肉は，円形断面と同様曲げの内側が厚く，外側が薄くなり，偏肉率 6.7%であった。ただし，この偏肉率には，コーナ部の肉厚が考慮されておらず，図 17(c)に示すようにコーナ部において 0.1mm 以上の減肉が見られる。拡管の過程においてコーナ部にひずみが集中することによるものと考える。

本試験結果は，パイプ外形 D に対する曲げ比 R/D で 4.7～7.4 といった値であり，それほど厳しい曲げ加工ではない。より厳しい曲げ加工への適用について今後の課題である。

## 4. 結　　言

(1) 長円形断面パイプのプレス曲げ性は，内側曲げ半径で円管の 27.5mm に対して 44mm が限界であり，円管に比べて大きく低下する。

(2) 長円形断面パイプの軸方向に引張り力を付加しながら曲げることにより，曲げ性が向上する。また，付加する引張り力によって曲げ部の断面形状も大きく変化するため，適当な引張り力の付加が重要である。

(3) スリーブの温度を制御し，成形するパイプの温度を加工部では高温にすることで加工性を向上させ，加工部以外の位置では座屈を防止するために温度上昇を抑えることが可能な浮動拡管プラグ曲げ加工装置を開発した。

(4) 拡管荷重により潤滑剤の潤滑性能を評価し，浮動拡管曲げ加工に適した潤滑剤として，水溶性乾燥皮膜潤滑剤を選定した。

(5) マグネシウム合金の浮動拡管プラグ曲げ加工試験を行い，円形断面パイプを形状精度良く曲げ加工できることを確認した。また，円形パイプから楕円断面，正方形断面等異形断面への形状変更を伴う浮動拡管曲げ加工が可能なことを確認した。

なお，本研究は，平成 20 年度都市エリア産学官連携促進事業（発展型）長岡エリア「マグネシウム合金の次世代製品開発」の中で実施したものである。

## 参考文献

1) 相田収平，“車両用軽量シートフレームの開発”，軽金属，57，7，2007，p341-343.

2) 長谷川収，真鍋健一，西村尚，“AZ31 マグネシウム合金押出円管の室温におけるプレス曲げによる変形挙動”，軽金属，52，7，2002，p298-302.

3) 須貝純一，岩井匡之，本保元次郎，清水亨，早田博，アレキサンダーマクリーン，“AZ31 マグネシウム合金押出パイプの曲げ加工性に及ぼす Mn 量の影響”，軽金属，56，12，2006，p705-710.

4) 相田収平，須藤貴裕，山崎栄一，“マグネシウム合金パイプ材の曲げ加工技術の開発”，工業技術研究報告書，No.37，2008，p63-67.

5) 中村雅勇，牧清二郎，原田泰典，林清隆，中島正憲，“浮動拡管プラグを用いた円管の曲げ加工”，塑性と加工，37，424，1996，p540-545.

6) 中村雅勇，牧清二郎，小山秀夫，“浮動拡管プラグにより付加価値をつける円管の加工”，塑性と加工，46，538，2005，p1044-1049.

7) 中村雅勇，浅井雅弘，牧清二郎，原田泰典，竹内聖，“浮動拡管プラグ曲げ法による曲がり楕円管の製造”，平成 7 年度塑性加工春季講演会講演論文集，1995，p269-270.