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*　須藤　貴裕**　山崎　栄一**

Development of High-performance Bending Technology of Magnesium Alloy Pipes

AIDA Shuhei*, SUTOH Takahiro**, 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，マグネシウム合金パイプの曲げ加工特性を把握するとともに，特徴的な現象である曲げ加工時の曲げ部内側での割れや座屈を抑制し，より小さな曲げ半径を可能とする曲げ加工技術の開発を行った。その結果，プレス曲げ加工による加工温度と曲げ比（本文 2.2.1 参照），また曲げ部の偏平化や減肉等について明らかにし，構造部材に適用する場合の加工指針とすることができた。また，パイプの軸方向に引張り力を付加しながら曲げ加工を行う引張り曲げ加工技術の開発により，割れや座屈を抑制しつつ曲げ比 1.5 という小さな曲げ加工を可能とした。

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特性を把握するとともに，より高度な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。まず，プレス曲げ加工における曲げ加工特性を把握し，製品設計や加工時の指針とすること，および高品質かつ小さな曲げ半径を可能とする曲げ加工技術の開発を目指した。

2. マグネシウム合金パイプのプレス曲げ特性

2.1　供試材および引張り・圧縮特性

供試材として，外径 D0=22mm，肉厚 t0=1.0mm，および t0=1.8mm の AZ31 マグネシウム合金パイプを用いた。また，曲げ特性の評価に先立って，供試材の引張り，および圧縮試験を行った。引張試験には JIS14B 号円弧状試験片（平行部幅 8mm，標点距離 16mm）を用いた。一方，圧縮試験には供試材であるパイプを 16mm の長さに切断し，両端面を研磨加工したものを用いた。

図 1 に供試材の室温における応力－ひずみ曲線を示す。引張り側における耐力は約 160MPa に対して圧縮側では約 90MPa と引張り側の約 50%程

*　下越技術支援センター
** 研究開発センター

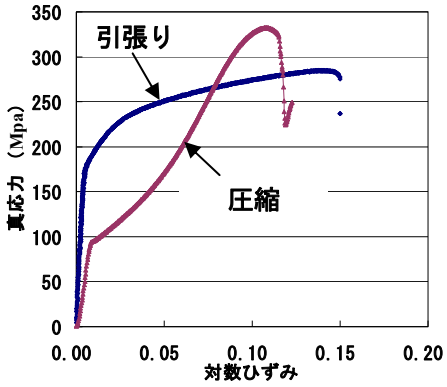


図 1 AZ31 合金パイプの応力ーひずみ曲線

度になっており引張強さと圧縮強さの差が顕著な材料である。

2.2 プレス曲げ試験

マグネシウム合金パイプの曲げ加工特性を把握することで，加工時，あるいは設計時の指針として供するほか，加工特性を明らかにすることによって，新しい曲げ加工技術へ発展させていくことを目的として曲げ試験を行った。対象とした曲げ加工法はプレス曲げである。この加工法は生産性や設備コストの点で優位性があり，これからの適用拡大が期待できる加工法である。

2.2.1 試験方法

プレス曲げ試験は，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 に切り出したパイプの 90° 曲げを行った。曲げ加工性は，パイプの外径 D0 とパイプ軸中心における曲げ半径 R0，すなわちパンチ半径 Rp にパイプの半径分を加えた値との比で表される曲げ比 Br

$$\text{曲げ比} \quad Br = R0 / D0,$$
$$\text{ここで} \quad R0 = Rp + D0/2$$

によって評価を行った。曲げ比 Br は 1.75～4.0 の範囲で 0.25 ピッチで変化させるとともに，加工温度を室温から 225℃まで変化させて曲げ試験を行い，パイプ曲げ部の割れ，および破断の有無によって曲げ加工の可否を判定した。

曲げ試験に用いたプレス機械として，以下の 2 台の機械を使用した。大きな加工速度の領域では

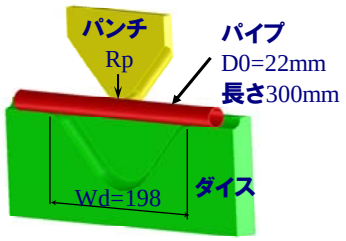


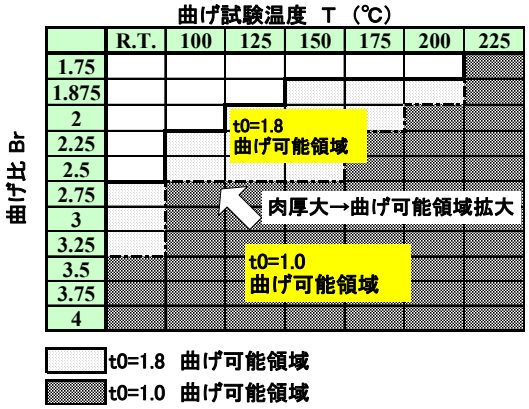
図 2 パイププレス曲げ試験金型概略

加工能力 1100kN，加工速度 50SPM のクランクプレス機械を用いた。この場合の加工領域における平均加工速度は約 270mm/s である。また，小さな加工速度領域では 1～35mm/s の範囲で速度可変，加工能力 290kN の油圧プレス機械を用いた。なお，曲げ加工に際してはパイプの偏平化を抑制する手段として，パイプ内に平均粒径 0.5mm の鉄製ビーズを充填している。

2.2.2 試験結果

表 1 にクランクプレス機械によるマグネシウム合金パイプの曲げ加工試験結果を示す。縦項目は曲げ比 Br，横項目には加工温度 T（℃）をパラメータとして，各肉厚のパイプについて曲げ加工が可能な加工条件の領域を表している。表より，t0=1.0mm よりも，厚肉の t0=1.8mm のパイプの方が曲げ加工性が良好であり，室温では t0=1.0mm パイプの限界曲げ比 Br=3.5 であるのに対し，t0=1.8mm パイプでは Br=2.75 までの曲げ加工が可能である。また，いずれの肉厚パイプについても，加工温度が上昇するにつれて曲げ加工性が向上し，

表 1 パイプのプレス曲げ試験結果



225℃では両肉厚パイプについて今回の試験での最小曲げ比 Br=1.75 の加工が可能であった。しかし，Br=2.0 を下回る小さな曲げ比では内側曲げ部に座屈による“しわ”が発生している。しわの発生具合は，肉厚の小さな t0=1.0mm のパイプにおいて顕著である。

次に，パイプの曲げ加工後の曲げ部断面形状について検討した。検討項目は，曲げ加工後の強度，および外観に影響を及ぼす，曲げ部横断面の偏平化率と曲げ部外側の肉厚の減肉率である（図 3）。

図 4 には，クランクプレス機械による曲げ加工時の偏平化率を示し，図 5 には減肉率を示している。どちらについても，曲げ比 Br=2.0 を下回るようになると，特に t0=1.8mm のパイプで顕著な悪化が認められる。t0=1.0mm，Br=1.75 においては，t0=1.8mm ほど偏平化率，減肉率の急激な悪化認められないのは，内側に発生する“しわ”の影響によるものと推測される。

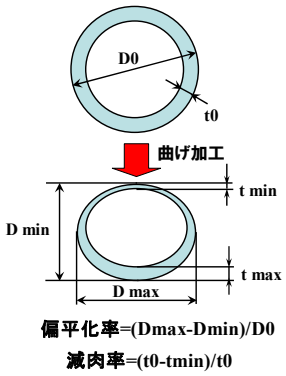


図 3 パイプ曲げ部横断面の変化模式図

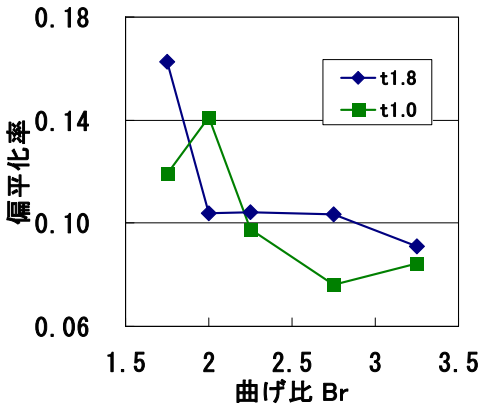


図 4 パイプ曲げ部横断面の偏平化率

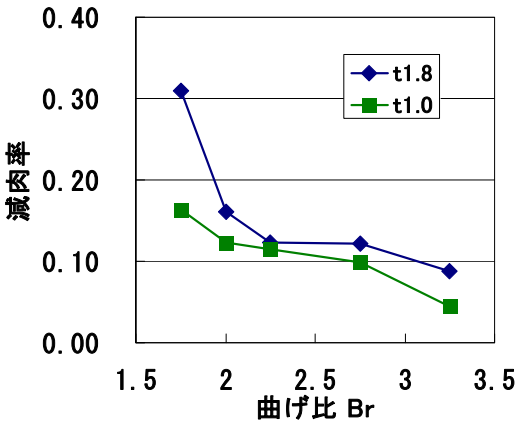


図 5 パイプ曲げ部横断面の減肉率

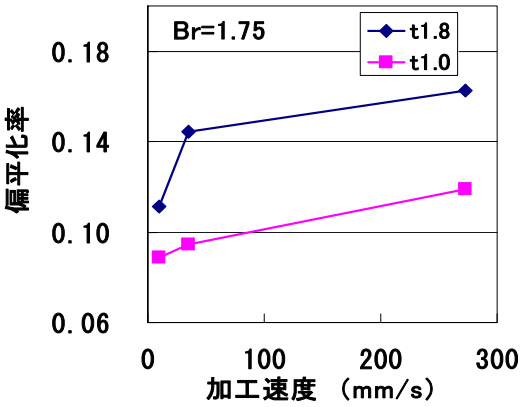


図 6 加工速度と偏平化率

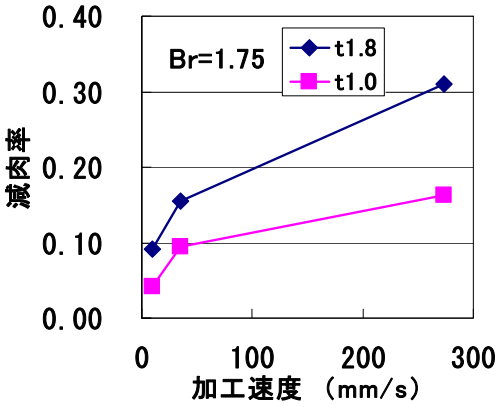


図 7 加工速度と減肉率

また図 6，7 には，Br=1.75 における偏平化率，減肉率について加工速度を変化させた場合の傾向について示す。加工速度は 10mm/s，35mm/s，および 270mm/s である。図から明らかなように，加工速度を小さくすることによって，偏平化率，

減肉率のどちらについても大幅に改善できることが明らかとなった。

3. パイプ引張り曲げ加工技術の開発

図 8 は t0=1.0mm パイプの曲げ加工時に発生する割れの形態について調べた結果である。図 1 の応力ーひずみ曲線からも明らかなように，マグネシウム合金では圧縮の耐力が引張り側の 50%程度であるため，パイプの曲げ加工時に曲げ部内側で発生する圧縮応力によって割れが発生するものと考えられ，今回調査した結果では，割れ現象の全てにおいて内側で発生していた。そこで本研究では，パイプの軸方向に引張り力を付加することでパイプ内側に発生する圧縮応力を低下させ，それによって曲げ加工性を向上させることをねらった，引張り曲げ加工技術の開発を試みた。

曲げ試験温度 T（℃）

曲げ比 Br	R.T.	100	125	150	175	200	225
1.75	内側	内側		内側	内側		
2			内側	内側			

曲げ可能領域
割れ形態調査箇所

図 8 マグネシウム合金パイプの割れ形態

3.1 パイプ引張り曲げ試験装置

図 9 に開発した引張り曲げ試験装置を示すとともに，表 2 には装置の概略仕様を示す。鉄製ビーズを充填したパイプの両端を把持するとともに，この部分を油圧シリンダによって 0～20kN の範囲で引張り力を付加しながらサーボモータとボールネジによって駆動される曲げ型を前方へ移動することによって曲げ加工を行う。なお曲げ型には，600W のヒーター，および熱電対を埋め込むことによって室温～300℃の範囲で温度制御可能となっており，パイプ曲げ部を加熱しながら曲げ加工

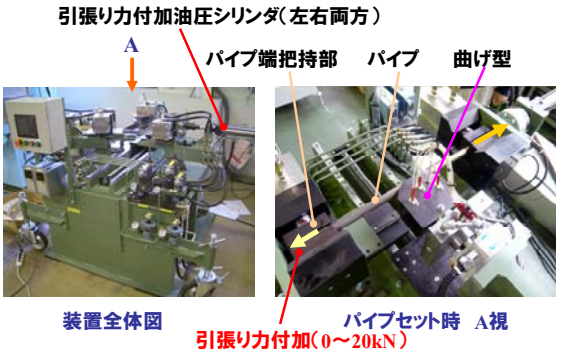


図 9 パイプ引張り曲げ試験機

表 2 パイプ引張り曲げ試験機概略仕様

パイプ外径（D0）×長さ（L）	φ22×600 mm						
曲げ比 Br	1.5	1.8	2	2.3	2.5	2.8	3
曲げ角度	0～90°						
軸方向引張り力	0～20 kN						
曲げ加工速度	0～150 mm/s						
パイプ内充填物	鉄製ビーズ（平均粒径0.5mm）						

が可能である。

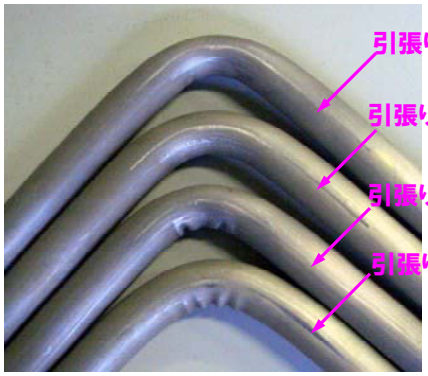
3.2 引張り曲げ加工試験結果

図 10 には，t0=1.0mm パイプに引張り力を付加した際のパイプ曲げ部の外観を示す。また図 11 には，付加引張り力と曲げ加工時の内側に発生した“しわ”の山の高さ，すなわち座屈深さとの関係を示している。この場合の曲げ比は，従来のプレス曲げ加工では困難とされるほど小さな曲げ比 Br=1.5 とし，引張り力を 0.98～2.94kN の範囲で変化させて曲げ加工を試みた。

図から明らかなように，付加した引張り力が小さい場合には，パイプ内側に座屈による“しわ”の発生が認められるが，付加引張り力を大きくし，1.96kN，および 2.45kN の引張り力では，内側の“しわ”の発生が抑えられた良好な曲げ加工が可能となっている。また，座屈深さについても，付加引張り力の増加に対して，ほぼ直線的に小さくなっていることが確認されている。

以上の結果より，マグネシウム合金パイプの曲げ加工時に，軸方向に引張り力を付加することに

より，曲げ加工性の向上効果を確認することができた。



曲げ比 Br：1.5
加工温度 T：200（℃）

図 10　付加引張り力とパイプ曲げ部

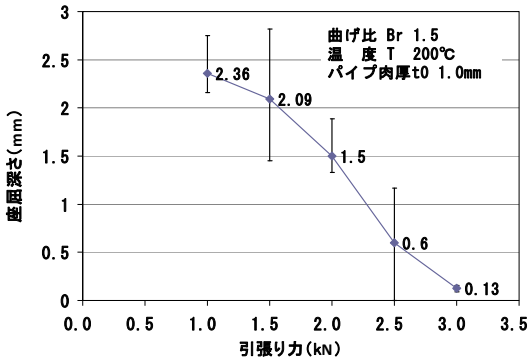


図 11　引張り力と曲げ部座屈深さの関係

4.　結　　言

(1) マグネシウム合金パイプのプレス曲げ加工特性について調査を行い，曲げ比と加工温度，および加工速度等との関係を明らかにし，曲げ加工時の指針とすることができた。

(2) マグネシウム合金パイプの曲げ加工時に発生する内側での“割れ”や“しわ”の発生を抑制し，曲げ加工性の向上をねらった引張り曲げ加工技術を開発し，曲げ比 1.5 の小半径曲げ加工を実現した。

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.