研究論文

マグネシウム合金管の浮動拡管プラグ曲げ加工技術の開発

白川　正登*　山崎　栄一**　本田　崇*

Development of Pipe Bending Technology Using Floating-Expanding-Plug of Magnesium Alloy Pipes

SHIRAKAWA Masato*, YAMAZAKI Eiichi**and HONDA Takashi*

抄　録

浮動拡管プラグ曲げ加工技術のマグネシウム合金管への適用を試み，その加工性について評価を行った。その結果，曲げ比（曲げ半径／曲げパイプ外径）1.7 の厳しい曲げ加工が可能であることを示した。さらに，同加工法における円管曲げにおいて，曲げ加工性の向上と曲げパイプのさらなる形状の改善を目的にプラグの形状に工夫を加え，テーパ形状を付与した拡管プラグを用いて加工試験を行いその効果について調べたが，成形性改善の効果は確認されなかった。さらに，曲げ部の金属組織観察を行い，加工温度の影響について調べたところ，曲げ各部に双晶変形を確認するとともに，加工温度を高くにすることにより動的再結晶を利用した成形性に富む加工の可能性を示した。

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，比強度に優れた材料である。また，パイプ材は中空構造であることから重量に比して高剛性であり，軽量化やコストダウンに適している。これらの特長を生かし，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，強度と軽量の両立が可能となり，今後の用途拡大が期待できる [1)]。

一方，偏平，偏肉等が小さく曲げ断面形状が良好で，かつ半径の小さい曲げが可能なパイプの加工法のひとつとして浮動拡管プラグ曲げ加工法が報告されている [2) 3)]。著者らは，前報 [4)] において，マグネシウム合金管の曲げ加工に適用可能な温間浮動拡管プラグ曲げ加工装置を開発し，円管および異形断面管の曲げ加工が可能であることを示した。

また，浮動拡管プラグ曲げ加工では，曲げにともない拡管プラグが曲げ内側に移動するため，内側ほどより大きく拡管され，大きなせん断変形を受ける（図 4(a)参照）。そこで，拡管プラグ形状を単純な球形ではなく r 付プラグとすることで，せん断変形を抑え，加工限界，偏肉率，表面粗さを小さくする効果があることが報告されている [5)]。

本研究では，マグネシウム合金管の浮動拡管プラグ曲げ加工における加工性を評価するとともに，曲げ加工性の向上と曲げパイプのさらなる形状の改善を目的に，テーパ形状を付与した拡管プラグを用いて加工試験を行い，その効果について調べた。さらに，曲げ部の金属組織観察を行い，加工温度の影響についても検討したので報告する。

2.　曲げ加工実験

2.1　加工装置

実験には開発装置である浮動拡管プラグ曲げ加工装置を用いた。図 1 に装置の外観を，図 2 に温間浮動拡管プラグ曲げ加工法の概要を示す。浮動拡管プラグ曲げ加工法とは，自由に移動で

*　研究開発センター
**　下越技術支援センター

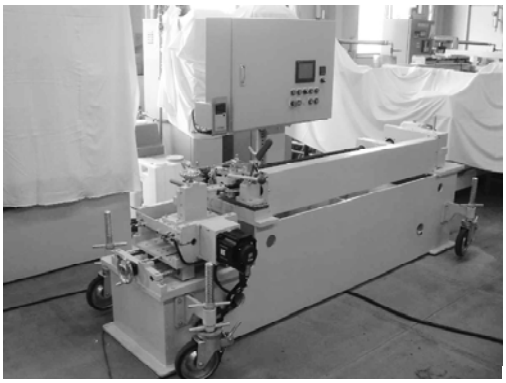


図 1　浮動拡管プラグ曲げ加工装置外観

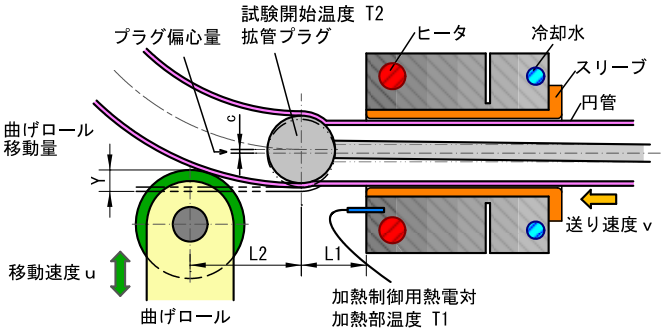


図 2　温間浮動拡管プラグ曲げ加工法概要

きるように細い鋼線等で支持された拡管プラグを素材となるパイプに通し，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，拡管プラグは曲げロールによる押込み力とパイプがプラグを中心に戻そうとする力がバランスした位置に移動することが特徴である。

一般にマグネシウム合金の塑性加工においては，200℃以上の温度に加熱して加工を行う必要がある。本装置では，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，パイプの座屈防止のために水道水により冷却できる構造となっている。

2.2　供試材

供試材には，外径 D_0=22mm，肉厚 t_0=1.8mm 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，十分乾燥させた後，さらにグラファイト系潤滑剤を外径側のみにスプレーして用いた。

2.3　拡管プラグ

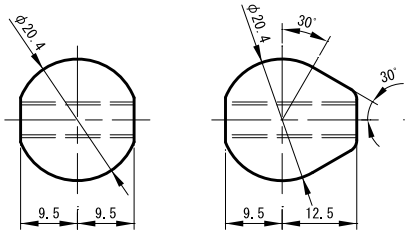
拡管プラグには，プラグ外径 20.4mm（拡管率 E=10.9%）の球形プラグ（以下球プラグ）およびテーパ付き球プラグ（以下テーパプラグ）を用いた。拡管率 E の定義を以下に示す。

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

ここで d は拡管プラグ外径，d_i は素管内径である。プラグ形状を図 3 に，それぞれのプラグで浮動拡管曲げを行った時のイメージ図を図 4 に示す。図 4(b)に示すようにテーパプラグでは，プラグが移動したとき曲げ内側のパイプがプラグにあたる位置がテーパ部となり，拡管にともなうせん断変形を抑制することをねらったものである。

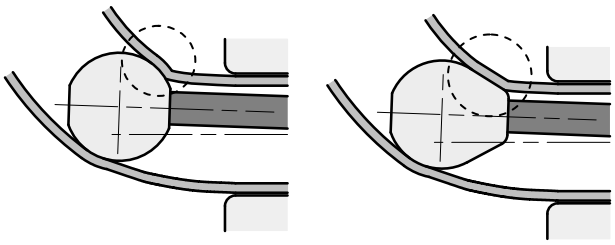
2.4　実験方法

曲げ加工における主な試験条件を表 1 に示す。曲げロール外周には，拡管曲げ加工後のパイプ外径寸法の設計値に合わせて半径 12mm の半円形状の溝加工を施した。



(a) 球プラグ　(b) テーパプラグ

図 3　プラグ形状



(a) 球プラグ　(b) テーパプラグ

図 4　プラグ形状と浮動拡管曲げイメージ

表 1　試験条件

スリーブ端面とプラグ中心の距離　L_1	20 mm
プラグ中心と曲げロール中心の距離　L_2	30 mm
パイプ押出し速度　v	2 mm/sec
曲げロール移動量　Y	15～35 mm
曲げロール移動速度　u	1 mm/sec
ヒータ加熱部設定温度　T_1	325 ℃
試験開始時拡管プラグ温度　T_2	225 ℃

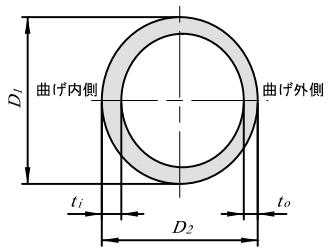


図 5　曲げパイプ断面の形状寸法

曲げ半径の測定には，万能投影機（ニコン製 V-16E）を用い，曲げ内側および外側の曲げ半径の平均値を中心曲げ半径 R とした。また，マイクロメータを用いて曲げ部の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 を求めて評価した。偏肉率 e，偏平率 f の定義を以下に示す。

$$e = (t_i - t_o) / t \times 100 \quad \% \qquad (2)$$

$$f = (D_1 - D_2) / D \times 100 \quad \% \qquad (3)$$

ここで，t_i，t_o は，曲げ内側と外側の肉厚，t はその平均肉厚 $t = (t_i + t_o) / 2$ である。また，D_1 および D_2 は，曲げと直角方向および曲げ方向の外径，D は平均外径 $D = (D_1 + D_2) / 2$ である（図 5）。曲げの程度は，中心曲げ半径 R の平均外径 D との比（以下曲げ比）R/D により評価を行った。

パイプの押出し荷重を評価するため，パイプ押出し部にロードセルを設けた。また，曲げ荷重を評価するため，曲げロールのベース部に圧電型動力計を配し，曲げロールの前進方向およびそれと直角な方向の曲げロールにかかる荷重を検出し，それぞれの方向の荷重の合成荷重を曲げ荷重とした。

プラグ偏心量の直接の測定は困難なため，プ

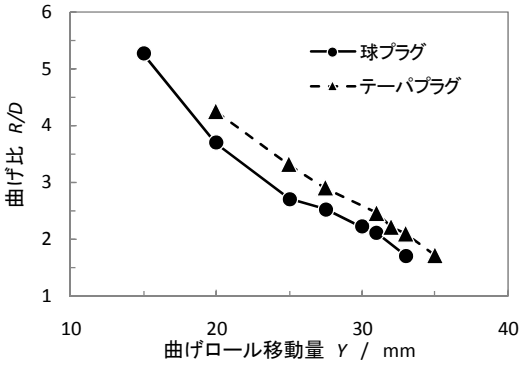


図 6　曲げロール移動量と曲げ比の関係

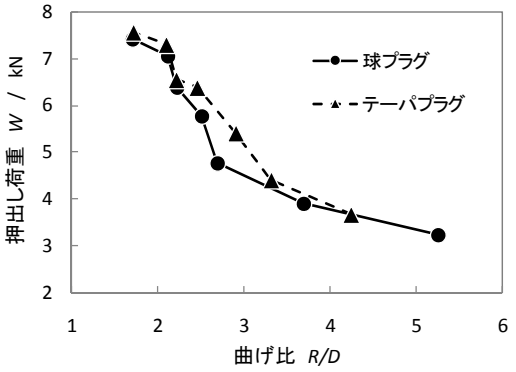


図 7　曲げ比と押出し荷重の関係

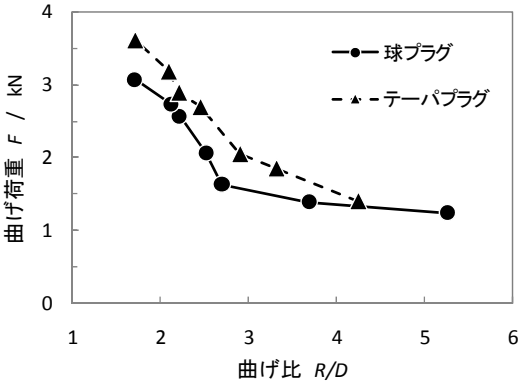


図 8　曲げ比と曲げ荷重の関係

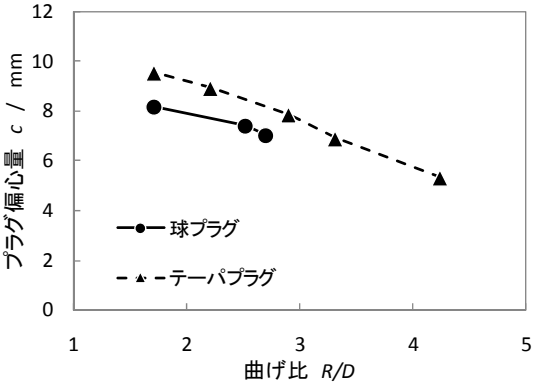


図 9　曲げ比とプラグ偏心量の関係

ラグ中心位置における拡管パイプの曲げ方向移動量をダイヤルゲージで測定し，その値をプラグ偏心量とした。

2.5　曲げ加工実験結果

曲げロールの移動量と曲げ比の関係を図 6 に示す。曲げロール移動量が大きいほど曲げ比は小さくなり（*R/D* の曲げ半径 *R* が小さくなる）厳しい曲げ加工が行われる。同一の曲げロール移動量では，球プラグの方が曲げ比は小さくなることがわかった。

曲げ比と押出し荷重の関係を図 7 に，曲げ比と曲げ荷重の関係を図 8 に，また，曲げ比とプラグ偏心量の関係を図 9 に示す。曲げ比が小さい厳しい曲げ加工ほど押出し荷重や曲げ荷重といった加工荷重は大きな値となり，曲げ比 4.3 以下の領域において，これらの加工荷重はテーパプラグの方が大きい傾向が認められる。プラグ偏心量は，曲げ比が小さいほど大きな値となり，テーパプラグの方が同一曲げ比では偏心量が大きい。これは，テーパプラグの方が曲げ内側のせん断部の変形抵抗が小さく，プラグの移動が容易になるためである。一方，テーパプラグの方が，プラグの移動により曲げ内側におけるパイプ内径と拡管プラグとの接触長さが長くなるため，摩擦の影響が大きくなり，押出し荷重が大きくなるものと考えられる。さらに曲げが厳しい曲げ比 2.3 以下の曲げでは，押出し荷重のプラグ形状による差は小さくなっている。これは，パイプ内面およびプラグ表面の痕跡から，プラグの偏心量が大きくなりすぎプラグ支持側端面のコーナ部が曲げ内側のパイプ内面にあたったことで変形抵抗が大きくなり，形状の差による影響が縮小されたものと考える。

曲げ比と偏平率および偏肉率の関係を，それぞれ図 10 および図 11 に示す。偏平率は，いずれのプラグを用いた場合も±3%以内の値であり良好な結果を示している。曲げ部の偏平率は，曲げロールの移動方向（曲げ方向）に押しつぶされた場合に正の値となるよう定義している。本研究では，曲げ比 2.5 以下の領域において，曲げ比が小さいほど負の偏平率が大きくなり，押しつぶされる形状とは逆で曲げ方向の外径寸法が大きな値となっている。特に，テーパプラグを用いた場合においてその傾向は顕著である。偏肉率は，曲げ比が小さくなると大きくなる傾向を示し，テーパプラグを用いた場合の方がその値は大きい。

これらの結果をふまえて，図 12 に曲げ比と

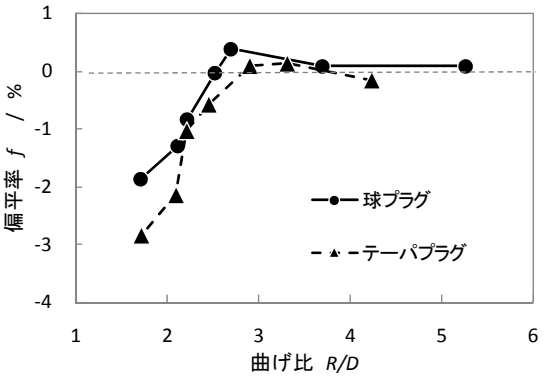


図 10　曲げ比と偏平率の関係

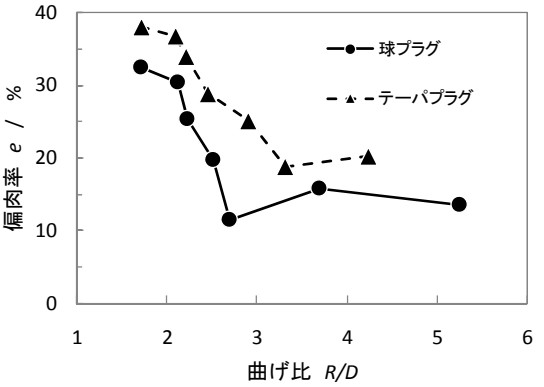


図 11　曲げ比と偏肉率の関係

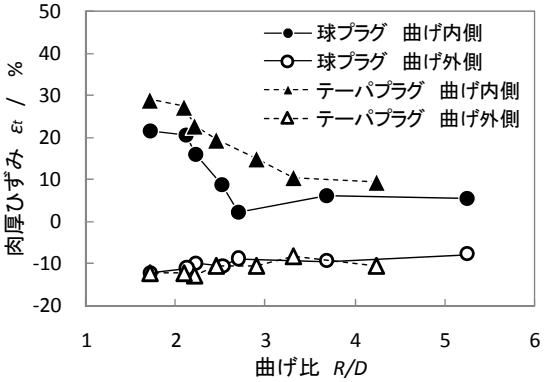


図 12　曲げ比と肉厚ひずみの関係

肉厚ひずみ（ε_t：供試材肉厚に対する加工後のパイプの肉厚変化の割合）の関係を示した。曲げ比が小さい曲げでも，また，いずれのプラグを用いた場合でも，曲げ外側の肉厚ひずみは約-10%で大きな変化はみられない。一方，曲げ内側の肉厚は曲げ比が小さいほど厚くなっていることがわかる。また，プラグ偏心量が大きいテーパプラグの方が，曲げ内側の肉厚ひずみが大きな値となっている。この曲げ内側の肉厚ひずみの増加が，負の偏平率および偏肉率の増加に大きく影響していることがわかる。

一般に銅合金等においては，浮動拡管プラグ曲げには偏心プラグ曲げの特徴が含まれており，プラグ偏心量が大きいほどその効果は大きく曲げに有利に働くため，曲げモーメントが小さくなり，曲げられたパイプの偏肉率や偏平率も小さくなるといわれている [2) 3)]。しかし，本研究のマグネシウム合金管の温間浮動拡管プラグ曲げでは，同一曲げ比における曲げ荷重や押出し荷重といった加工に要する荷重は，プラグ偏心量の大きいテーパプラグを用いた場合の方が大きくなっている。また，曲げパイプの形状も，同一曲げ比ではテーパプラグを用いた場合の方が悪い傾向であった。これは，プラグをテーパ形状にしたことで，プラグとパイプが接触する拡管領域が長くなり，ひずみの増分が小さくなるために拡管曲げの効果が得にくくなることが原因のひとつと考えられる。

また，マグネシウム合金の加工温度 150℃で

図 13　曲げパイプの外観および断面写真

の偏心プラグ曲げにおいて，曲げ内側が薄肉となるひずみ分布は得られず，プラグ偏心の効果が得られにくいといった報告 [5)] もあり，マグネシウム合金の材料特性が浮動拡管プラグ曲げ加工に及ぼす影響についても検討の必要がある。

本研究では，用いた加工装置の仕様の制約から，マグネシウム合金の浮動拡管プラグ曲げにおける加工限界は明らかにできなかったが，いずれのプラグを用いた場合でも曲げ比 1.7 程度の厳しい曲げ加工が可能となった。図 13 に球プラグを用いた場合の曲げ比 1.71 の曲げパイプの外観および曲げ部断面写真を示す。厳しい曲げにもかかわらず，偏平率は-1.9%と非常に良好であり，偏肉率は 32.4%に抑えることができた。

3.　浮動拡管プラグ曲げ加工の金属組織変化

3.1　供試材の金属組織

供試材の軸方向断面の金属組織を，図 14 に示す。図中，上段は低倍率，下段は拡大して高

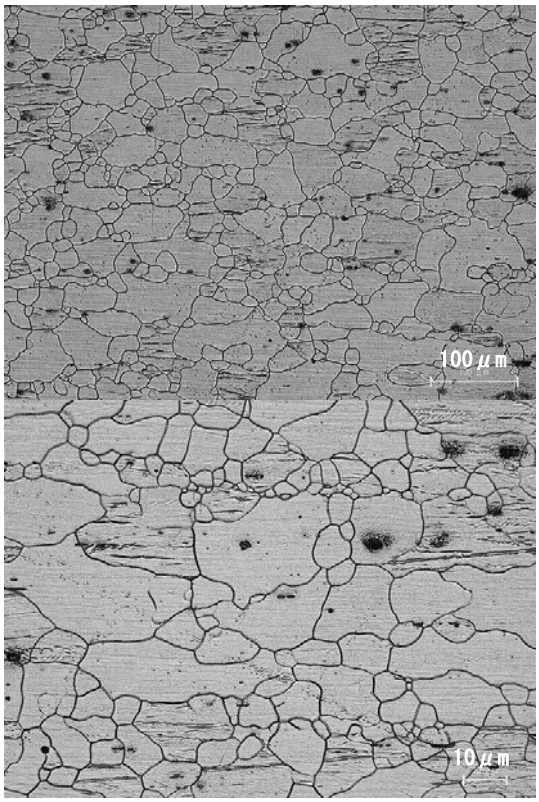


図 14　供試材の金属組織

倍率で観察を行った結果を示す。押出し加工後，焼鈍処理した典型的な金属組織であり，細粒と粗大化した粒が存在する混粒組織である。

3.2　浮動拡管プラグ曲げ加工の金属組織変化

浮動拡管プラグ曲げによる材質変化を調べるため，加工後のパイプ曲げ部の金属組織観察を行った。図 15 に観察場所を示す。観察方向は図中に示すようなパイプ軸方向断面とし，A 部の外側曲げ部，内側曲げ部について調べた。ヒータ加熱部の設定温度は 275℃とし，拡管プラグの温度が 180℃に達した段階で曲げ加工を開始した。

曲げ部外側の組織写真を図 16 に，内側の組織写真を図 17 に各々示す。両者とも，双晶変形がいたるところに発現し，素材組織に比し荒々しい様相となり，非常に過酷な成形であることがわかる。

一方，外側と内側の金属組織は若干異なり，後者において全体的にぼやけた感じであり，拡大して観察すると粒界から新しい結晶粒が成長しようとしている様子がうかがえる。曲げ部内側の加工温度が，外側より高かったことを示している。

3.3　加工温度の影響

図 18 に加熱部設定温度と曲げ比の関係を示す。加熱部設定温度以外の条件は同一とし，曲げロールの移動量は 25mm とした。加熱部の

図 15　観察場所

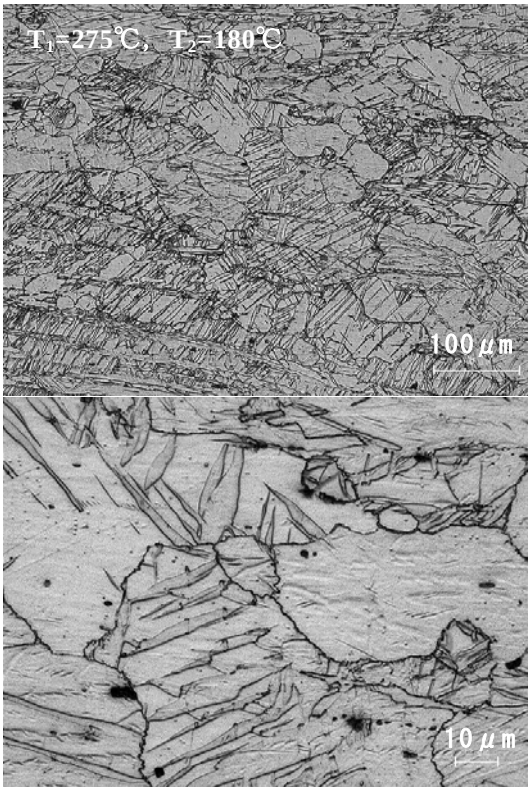


図 16　浮動拡管プラグ曲げ加工の金属組織（曲げ外側）

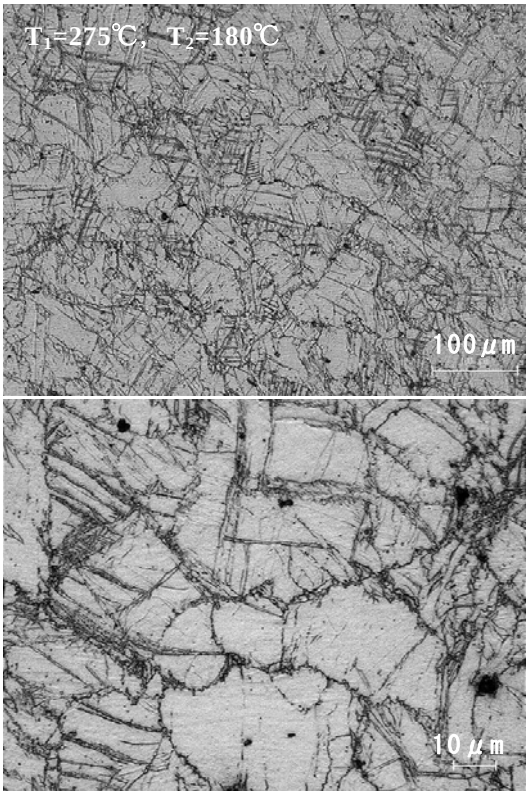


図 17　浮動拡管プラグ曲げ加工の金属組織（曲げ内側）

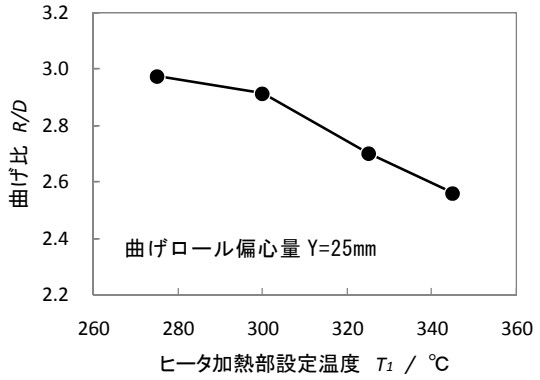


図 18　加熱部設定温度と曲げ比の関係

温度設定が高いほど曲げ比は小さくなり，加工温度が高いほど加工性が向上することがわかる。この結果を受けて金属組織観察を行った。ヒータ設定温度の異なる浮動拡管プラグ曲げ加工後の金属組織を図 19 に示す。曲げ部外側では，各温度において双晶がみられるが，温度上昇とともにその形が崩れ始めている様子がわかる。曲げ部内側では，ヒータ設定温度 275℃にて双晶変形の跡が認められるものの，325℃，345℃では認められず，むしろ微細な結晶粒の発生が観察される。

ヒータ設定温度 325℃以上では，動的再結晶（加工と同時に再結晶が生じる現象）が発現し，加工性が改善されたと考える。

現状では，素管加熱温度を直接把握できていないが，浮動拡管プラグ曲げ加工装置の加熱部に工夫を加え，適当な加工温度の設定により，動的再結晶を利用した成形技術開発の可能性を示唆するものである。

4. 結　　言

（1）マグネシウム合金管の温間浮動拡管プラグ曲げ加工を行い，曲げ比 1.7 の厳しい曲げ加工が可能であることを示した。

（2）本研究で試作したテーパプラグ形状では，曲げ加工性や曲げパイプ形状の改善効果は得られず，いずれも逆に悪い傾向を示した。

（3）組織観察により，双晶変形が認められ，厳しい加工であることがわかった。一方，加熱温度を高くすることにより，動的再結晶を利用した成形性に富む加工の可能性も示した。

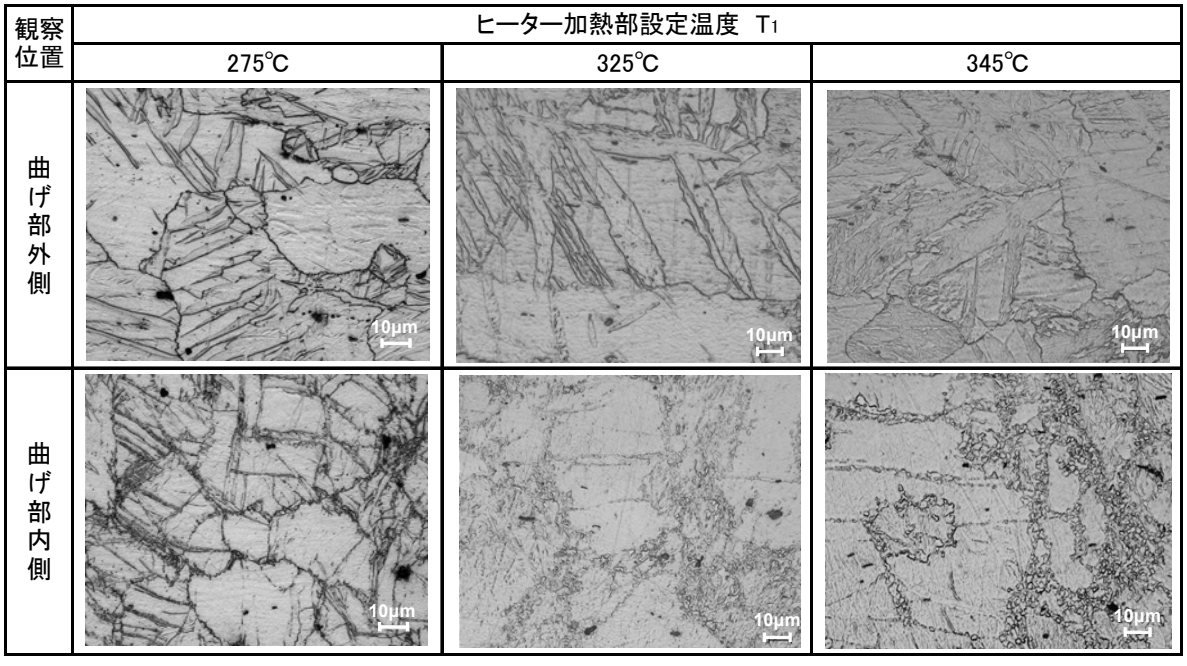


図 19　加工温度による金属組織変化

なお，本研究は，平成 21 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）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.
3）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.
4）相田収平ほか，“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.38，2009， p10-17.
5）林清隆，中村雅勇，牧清二郎，原田泰典，中島正憲，“浮動拡管プラグ曲げにおける二，三の工夫”，塑性と加工，38，433，1997，p67-72.
6）福田雄太，“マグネシウム合金の浮動拡管プラグ曲げにおける変形挙動とその解析”，平成 21 年度千葉大学大学院工学研究科修士論文，2010.