

AZ31 マグネシウム合金の引込曲げ試験の スプリングバックにおよぼす温度・速度・潤滑剤の影響

広島商船高等専門学校 商船学科

助教 片平 卓志

(2018 年度 奨励研究助成(若手研究者) AF-2018048-C2)

キーワード：マグネシウム合金，温間加工，スプリングバック

1. 研究の目的と背景

近年，資源の有効利用や地球環境保全などの観点から輸送機器の軽量化や材料のリサイクルが重要視され¹⁾，比強度，比剛性，制振性など構造材料としての多くの利点を有するマグネシウム合金が注目されてきた²⁾．しかし展伸材としての需要は，成形性，特に冷間成形性が悪いことから伸び悩んでいる．これは，薄板では六方晶の c 軸が圧延面に垂直に配向し，特に板厚減少を伴う面内二軸引張での成形限界ひずみは極めて小さい．そのため，非底面すべりが容易になる $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ でプレス成形されているのが現状であり，冷間ないしそれに近い低温で成形できる材料も報告されているが実用化には至っていない．そこで本研究では，マグネシウム合金板の主に $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ の温度域における温間成形技術を確認するために，マグネシウム合金板の温間における変形挙動を実験的に把握すること，プレス成形におけるスプリングバックを主に実験的に調査することを目的とし，温間単軸引張試験および，温間引込み曲げ試験を行った．

2. 実験方法

2・1 単軸引張試験

マグネシウム合金板の温間プレス成形性に強く影響を及ぼす材料特性として変形抵抗と延性がある．これらの材料特性に及ぼす温度とひずみ速度の影響を調べた実験研究は多いが，その多くは 200°C 以上の高温で行っている．温間プレス成形では，省エネルギーや生産性，さらには成形品の機械的性質の観点から，成形温度はできるだけ低くできることが望ましい．そのことを意識すれば， 200°C 以下の材料特性は重要であるが，詳細なデータが少ない．そこで本研究ではまず温間単軸引張試験を行い，変形抵抗と延性に及ぼす温度と変形速度の影響を調査した．

2・1・1 供試材

供試材として，大阪富士工業株式会社製の AZ31B マグネシウム合金圧延板を用いた．供試材の公称組成を表 1 に，焼鈍後の極点図を図 1 にそれぞれ示す．図 1 において濃淡で示される X 線の回折強度は粉末試料での値を 1 として規格化した．本材料は c 軸が圧延面に垂直に配向した強い底面配向の集合組織を示す．

2・1・2 単軸引張試験方法

単軸引張試験により，各種条件下での真応力-真ひずみ曲線取得した．なお試験回数 N は各種試験についてそれぞれ 3 回とした．これらの試験結果は，各種試験における供試材の成形性を評価する上で基礎となる必要不可欠なデータである．

a) 試験片 試験片形状を図 2 に示す．試験片は平行部長さ 35mm ，板幅 6mm であり圧延方向に対して 0° 方向にワイヤー放電加工で切り出して用いた．切り出し後，十分なひずみ除去と試験片ごとのばらつきを抑えるため，条件を 300°C で 30 分間として焼鈍した．焼鈍後，エタノールで試験片表面を脱脂した．

b) 試験装置 試験装置の外観図を図 3 に示す．試験機は株式会社島津製作所製の油圧式サーボパルサー(定格荷重 100kN)を使用した．試験片に掛かる荷重はロードセルを用いて測定した．試験片の変位は試験片の 2 箇所の切り欠きに石英ガラス棒を固定し，変形時の切欠きの間隔の変化を電気炉外で逐次，レーザーを用いた変位測定器で測定した．試験片の温度管理は R 型熱電対を試験片平行部の上・下部の 2 箇所にスポット溶接し，それぞれの熱電対を温度制御器に接続し，電気炉を PID 制御して行った．

c) 試験方法 試験片断面積算出のため，試験片平行部の板幅および板厚をマイクロメーターでそれぞれ 5 点測定し平均値を算出した．ひずみの取得には，試験片の 2 箇所の切り欠きに石英ガラス棒を固定し，変形時の切欠きの間隔の変化を電気炉外で逐次，株式会社キーエンス製のレーザー変位測定器を用いて測定し算出した．

表 1 供試材の公称組成(mass%)

Al	Mn	Zn	Si	Cu	Ni	Fe	Ca	other	Mg
2.5-3.5	0.2-1.0	0.7-1.3	0.05	0.05	0.005	0.005	0.04	0.3	bal

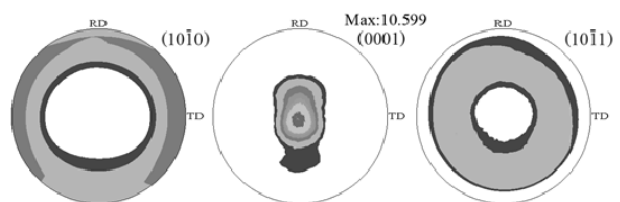


図 1 供試材の極点図

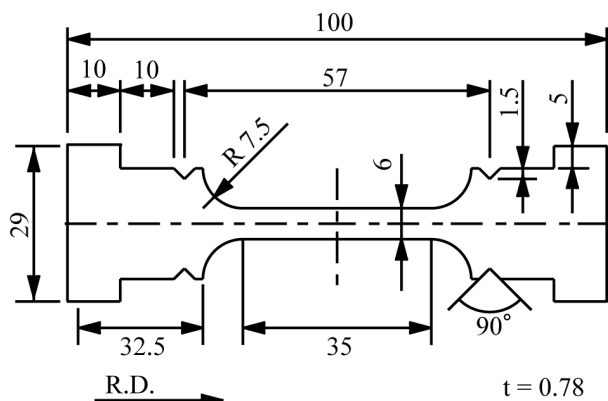


図2 単軸試験片形状

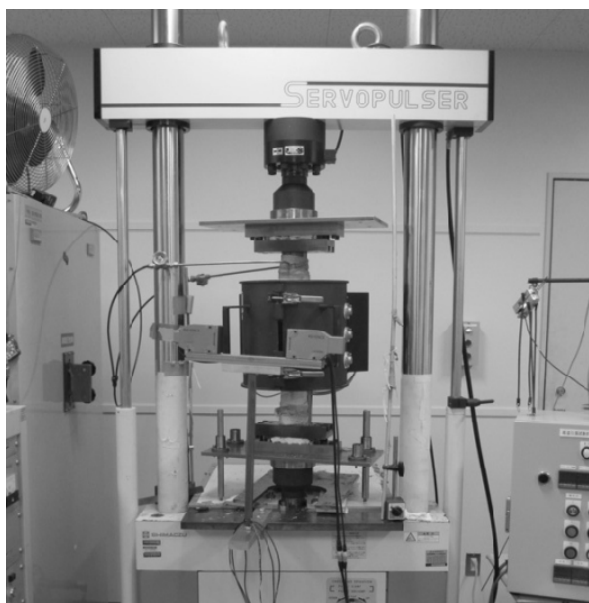


図3 試験装置外観図

2・1・3 単軸試験条件

試験温度は、RT(室温)、100、150、200 および 250℃ の4条件、引張速度は初期のひずみ速度が 0.1、0.01 および 0.001s^{-1} となるように、試験片平行部が 35mm であることから、それぞれに対応して $3.5\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.35\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ および $0.035\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ の3条件とした。

2・2 引込み曲げ試験

板材のプレス加工において、スプリングバックは製品の形状精度に大きく影響する。スプリングバックの大きさはおおむね σ/E (σ : 塑性変形抵抗, E : ヤング率) に比例するが、マグネシウム合金はヤング率(E)が 18GPa と極めて小さいため、スプリングバック量は必然的に大きくなり、その対策は重要である。マグネシウム合金の変形抵抗(σ)は温度とともに大きく低下するので、スプリングバック対策として温間成形は有望である。

そこで本研究では、プレス加工で多く見られる変形モードとして引込み曲げを取り上げる。引込み曲げにおけるスプリングバックの実験を室温で行った例は、ハット曲げ形式

の実験も含めて、数多く報告されているが^{3),4)}、マグネシウムにおける高温での実験報告は見当たらない。本研究では、室温から 200℃で AZ31 合金帯板の引込み実験を行い、温度と引込み速度がスプリングバックに及ぼす影響を調査した。

2・2・1 供試材

供試材として、2・2・1 の単軸引張試験で用いたものと同じ AZ31B マグネシウム合金板を使用した。

2・2・2 引込み曲げ試験方法

a) 試験片 試験片形状を図4に示す。試験片は平行部長さ 265mm、板幅 20mm であり圧延方向に対して 0° 方向にワイヤー放電加工で切り出して用いた。試験片断面積算出のため、試験片平行部の板幅および板厚をマイクロメーターでそれぞれ5点測定し平均値を算出した。試験片は図5に示すとおり試験機に取り付けるためにダイに沿うように曲げた後、十分なひずみ除去と試験片ごとのばらつきを抑えるため、条件を 300℃で 30 分間として焼鈍した。焼鈍した後、エタノールで試験片表面を脱脂した。

b) 試験装置 試験装置全体の概略図をそれぞれ図6に示す。試験機は大まかにモーター部、油圧部およびダイス部によって構成されている。試験片の両端はチャックにより固定する。試験片のチャックの一方は角ネジと平歯車を介してモーターに接続されており直線運動をする。もう一方はアクチュエーターに接続され油圧サーボシステムによる荷重制御を行う。この機構によって、図7に示すように試験片に一定の張力および速度の下でダイス肩部に沿った引張り曲げ、曲げ戻しを付加することができる。

チャックと角ネジ、アクチュエーターの間にはロードセルが取り付けられており、引き込み力が測定できる。試験チャック部には直線型ポテンシオメータがそれぞれ取り付けられており、試験片の引込み量が計測できる。

試験機は PC によって制御され任意の変位量および任意の荷重を制御プログラム上で設定することができる。モーターは PC で設定された信号により速度制御される。設定信号は、一定速度域とその速度に達するまでの加速度域および設定された変位量でストップするための減速域で構成される速度信号をプログラム上で作成し、その信号を D/A ボードより出力する。なお、モーターはオートレータにより無断変速制御される。またアクチュエーターは油圧ユニットを動力源としサーボバルブによって制御され一定荷重を試験片に与える。サーボバルブは D/A ボードより出力された信号電圧と、角ネジ側に取り付けられたロードセルより出力された信号電圧との差を 0 にするフィードバック制御系によって制御する。潤滑剤と潤滑シートを付着させた試験片を装置に取り付け、試験片を目標温度まで加熱した後 10 分間保持した。10 分保持後、試験を開始した。

c) 試験片加熱装置 試験片の加熱のためダイスには 3 本のヒーターが挿入されており、ダイ表面の試験片近傍にはシース型熱電対が取り付けられている。図8にダイス加

熱部の概略図を示す。ヒーターの出力はボルトスライダーで電圧を変えることによって調節できる。試験片の加熱・温度保持はPID制御によって行った。

2・2・3 試験片の温度制御

試験中、試験片は曲げ部近傍が加熱されながら引張方向にスライドしていく。そのため試験中に試験片に熱電対をスポット溶接して試験片温度を取得するのは困難であった。そこで試験片の温度とダイ表面の温度の関係を予備試験によりあらかじめ調査し、試験中は試験片温度を直接計測せず、ダイ表面の試験片近傍の温度を熱電対で計測し、試験片が目標の温度になるようにヒーターをPID制御する手法を採った。

2・2・4 引込み曲げ試験条件

試験温度は、RT, 100, 150 および 200℃ の 4 条件、引込速度は 0.1, 0.01 および 0.001mm・s⁻¹ の 3 条件とした。また引込み荷重としてそれぞれの条件における降伏荷重の 1/2 の荷重を試験片に負荷した。また、試験片と金型の接触部には潤滑剤として PTFE・MCA 系固体潤滑剤（住鋳潤滑剤株式会社製）および潤滑シートとしてテフロンシート（中興化成工業株式会社製）を用いた。

3. 実験結果

3・1 単軸引張試験結果

図9に試験速度 0.35 mm・s⁻¹ における種々の温度での公称応力-公称ひずみ曲線を示す。本供試材は温度が上昇するにつれ流動応力が低下しており、顕著な温度依存性が観察された。さらに温度の上昇に伴って加工硬化の度合いが小さくなっていることが確認できた。これは他の速度条件においても同様の傾向があった。

図10に試験温度 200℃ における種々の試験速度での称応力-公称ひずみ曲線を示す。ひずみ速度の上昇とともに流動応力が上昇しており、その傾向は温度の上昇に伴い顕著となった。しかし RT の条件においては顕著な速度依存性は見られなかった。

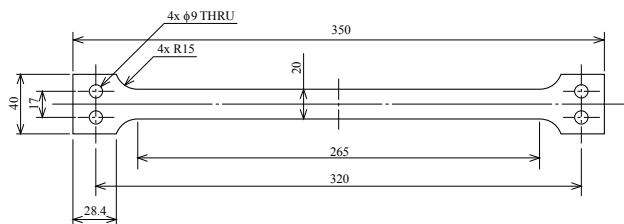


図4 試験片形状

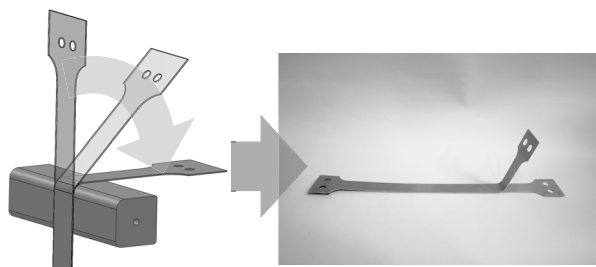


図5 試験片取付けのための曲げ予変形

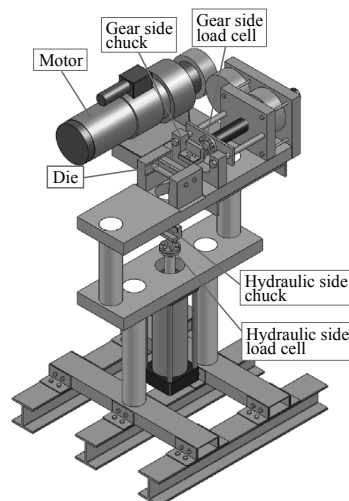


図6 試験装置概略図

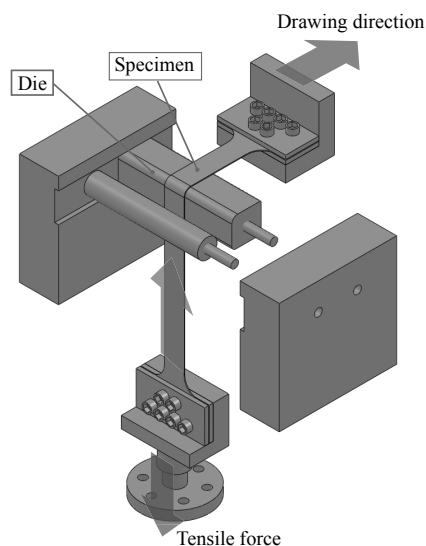


図7 曲げ部詳細

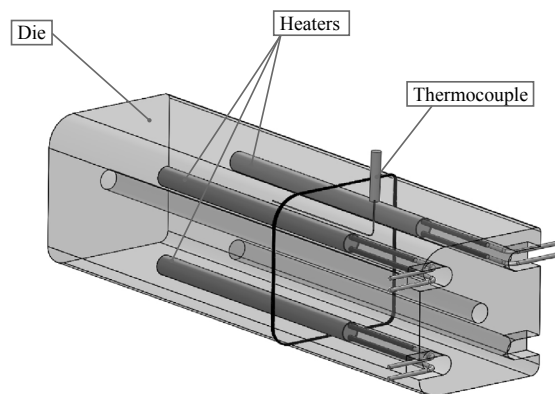


図8 ダイス加熱部概略図

3・2 引込み曲げ試験結果

図 11 から図 13 に試験終了（スプリングバック）後の試験片形状が試験温度によってどのように異なるかを示している。図 14 から図 17 は、試験温度ごとに、スプリングバックに及ぼす試験片引込み速度の影響を示したものである。図 18 および図 19 は、それぞれスプリングバック後の残留曲率に及ぼす温度と引抜き速度の影響をまとめたものである。

これらの結果より、温度が高いほどスプリングバックが小さくなっており、温度 200℃、引抜き速度 0.01mm.s⁻¹の実験ではスプリングバックがほとんどなくなっていることがわかる。これは単軸引張試験の結果からもわかる通り、材料の流動応力が温度上昇とともに低下したためであると考えられる。スプリングバックの駆動力となる変形後の応力（厳密には曲げモーメント）はおおむね変形抵抗に比例すると考えられ、変形抵抗の低下に伴ってスプリングバックは減少する。しかし、単軸引張り試験や繰返し引張り圧縮試験における変形抵抗レベルからは 200℃においてスプリングバックがほとんどなくなる現象は説明できない。というのは、200℃における変形抵抗は室温に比べてもせいぜい 1/4 程度であるが、スプリングバック後の残留曲率はそれよりもはるかに小さくなっているからである。この現象は、高温変形における動的回復による応力緩和によりスプリングバックの駆動力となる曲げモーメントの値が大きく低下したためと考えられる。単軸引張りや繰返し引張り圧縮試験でも温度が高いほど変形抵抗の速度依存性が大きくなっているが、これは高温におけるクリープ・応力緩和が大きいことを示唆している。スプリングバックに及ぼす変形速度（引抜き速度）の影響は温度が高くなるほど顕著となっているのもこのことと対応している。

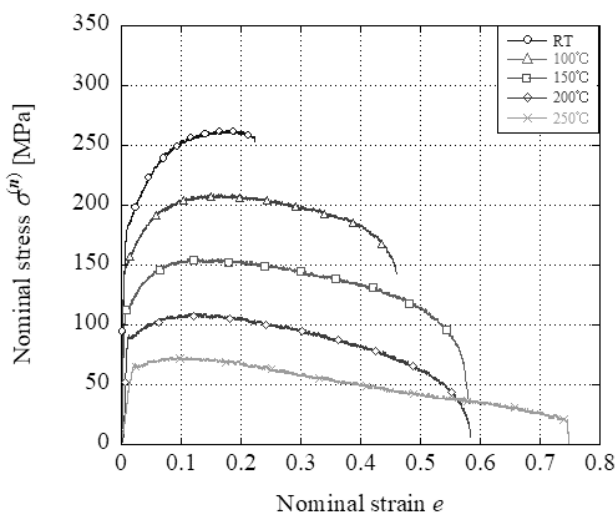


図 9 試験速度 0.35 mm.s⁻¹における種々の温度での公称応力-公称ひずみ曲線

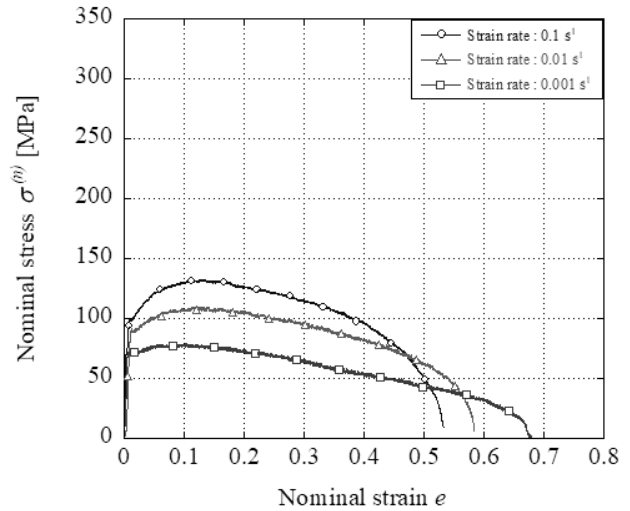


図 10 試験温度 200℃における種々の試験速度での称応力-公称ひずみ曲線

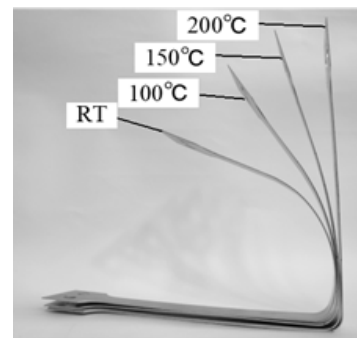


図 11 試験速度 0.01 mm.s⁻¹における各種温度条件の試験後の試験片形状

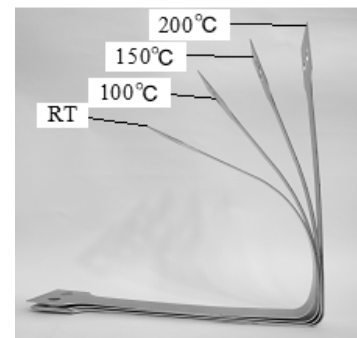


図 12 試験速度 0.1 mm.s⁻¹における各種温度条件の試験後の試験片形状

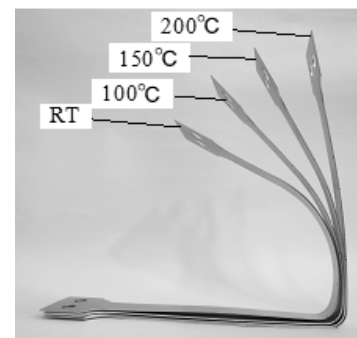


図 13 試験速度 1.0 mm.s⁻¹における各種温度条件の試験後の試験片形状

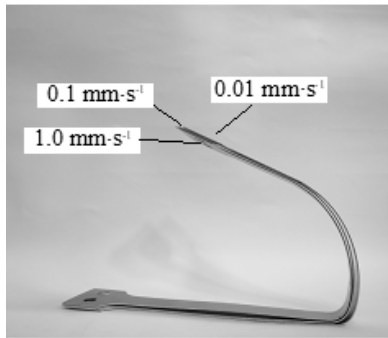


図 14 試験温度 RT における各種試験速度条件の試験後の試験片形状

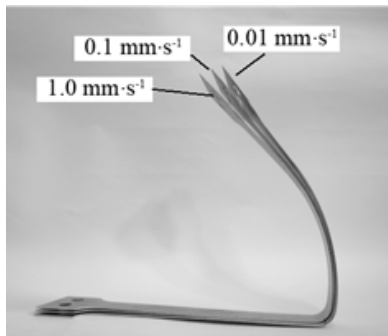


図 15 試験温度 100°C における各種試験速度条件の試験後の試験片形状

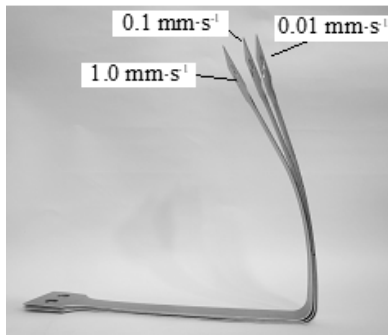


図 16 試験温度 150°C における各種試験速度条件の試験後の試験片形状

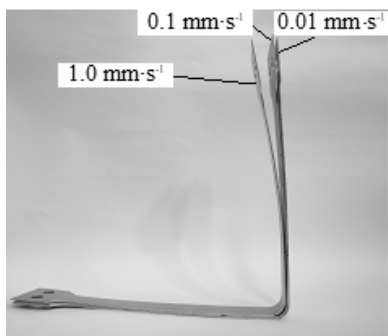


図 17 試験温度 200°C における各種試験速度条件の試験後の試験片形状

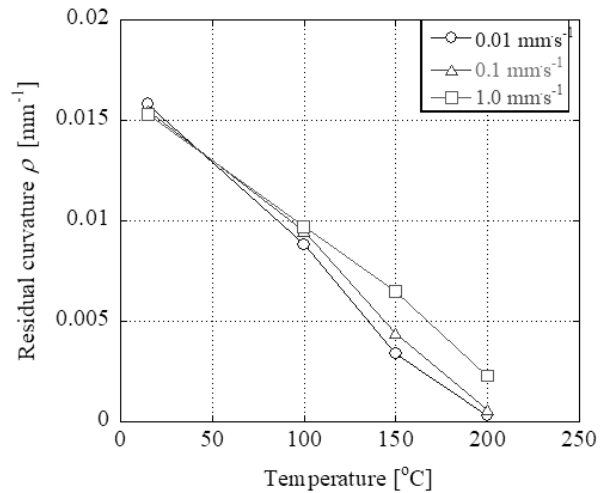


図 18 スプリングバックに及ぼす温度の影響

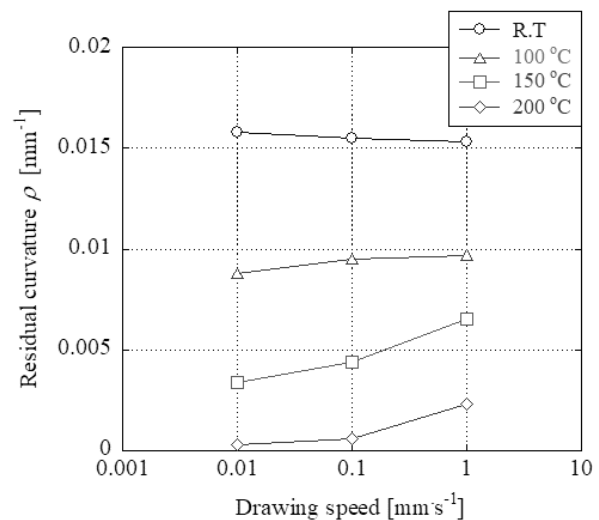


図 19 スプリングバックに及ぼす速度の影響

4. 結 言

マグネシウム合金板の引込み曲げにおいて温度と引込み速度がスプリングバックに及ぼす影響を調査した. その結果, 単軸引張試験と同様に顕著な温度および速度依存性が確認できた.

温度の上昇に従いスプリングバックは顕著に小さくなり, 200°C, 引抜き速度 0.01mm/s¹ の条件ではスプリングバックはほとんどなくなっていた. これは変形抵抗の温度依存性ととも動的回復による応力緩和が大きく影響していると思われる. また, 高温においては引抜き速度が遅いほどスプリングバックが小さくなるが, この現象も変形抵抗の温度依存性と応力緩和機構により説明することができる.

以上の実験結果から 200°C 以上の温度での成形でスプリングバックをほぼ抑制できることがわかったが, このことは実際のマグネシウム合金板のプレス成形条件設定に重要な指針となる.

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団奨励研究助成(若手研究者)(2018年度)の支援を受けて行われたものであり、同財団に深く感謝いたします。

本研究の遂行にあたり研究方針, 内容につきましてご助言をいただきました広島大学の吉田総仁教授に心から感謝の意を表します

参考文献

- 1) 行武栄太郎, 金子純一, 菅又信: 塑性と加工 44-506(2003), 276-280.
- 2) 鎌土重晴, 小島陽: 塑性と加工, 44-504(2003), 3-9.
- 3) F. Pourboghraat and E. Chu: Journal of Materials Processing Technology, 50(1995), 361-374.
- 4) 林豊, 高木美智雄: 鉄と鋼, 68-9(1982), 110-117.