

# マグネシウム合金の引張り曲げ成形における マルチスケール変形挙動

京都大学大学院エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻  
助教 浜 孝之  
(平成 19 年度奨励研究助成 AF-2007034)

**Key words:** マグネシウム合金板, スプリングバック, 引張曲げ成形

## 1. 緒言

マグネシウム (以下 Mg) は構造用金属としては最も軽量であり, その密度は代表的な汎用金属であるアルミニウムの約 2/3, 鋼の約 1/4 である[1, 2]. このため地球温暖化対策が喫緊の課題である昨今, Mg 合金は軽量化材料として大きな注目を集めている. 加えて Mg は高比強度, 高比剛性, 良好な熱伝導性, 高電磁シールド性を有し, さらにリサイクル性にも優れている[1, 3, 4]. このような利点から近年, Mg 合金はパソコンの上板, 携帯電話の筐体などに利用され始めている[5].

現状では Mg 合金の成形には鋳造加工を用いる場合がほとんどであり[1, 4, 6, 7], その用途を拡大するためプレス加工への適用が切望されている. しかし六方最密構造を有する Mg 合金はその結晶塑性的性質から常温での成形性が著しく低い[1, 2], プレス加工への適用がほとんど進んでいないのが現状である. 一方 Mg 合金は温度上昇に伴って成形性が向上するという特性を有する. 最近では Mg 合金板を温間域で深絞り成形する方法 (温間深絞り成形) が活発に研究され[6-11], プレス加工への適用に向けて検討が進められている.

プレス加工では, 離型後に生じるスプリングバックが大きな技術課題であり, 現場ではその対策に多くの時間を費やしているのが現状である[12]. しかしこれまでマグネシウム合金板成形についてスプリングバックの観点から研究した事例は少なく[13-15], その知見が圧倒的に不足している. 前述のように Mg 合金板は六方最密構造を有しており, これまでの汎用金属である鋼やアルミ合金と比べても変形が初期の集合組織に大きく影響される. また六方最密構造においては, 通常のすべり系に加えて双晶変形も塑性変形特性に大きな影響を及ぼすことが知られている[1, 2]. さらに, Mg 合金の再結晶温度は 150° 程度であるため, 150° 以上での温間成形では再結晶も変形に大きな影響を及ぼしうる[1, 2]. 従って Mg 合金のスプリングバック特性を本質的に解明するには, 巨視的な塑性変形特性と併せて結晶レベルの微視的な変形が巨視的な塑性変形に及ぼす影響, すなわちマルチスケールの視点からの解明が不可欠である.

そこで本研究では, Mg 合金板の冷温間引張曲げ成形を行い, マルチスケールの視点からそのスプリングバック特性を検討した. ブランクホルダ力 (Blank Holding Force; 以下 BHF) と成形温度をパラメータとして実験を行い, 巨視的なスプリングバック特性とともに成形品の組織観察によ

る微視的な変形のスプリングバックに及ぼす影響について詳細な検討を行った.

## 2. 実験方法

### 2.1 一軸引張試験

市販の Mg 合金板 AZ31B (板厚 0.8mm) を供試材として用いた. 実験に先立ち, 供試材を 350°, 1.5 時間の条件で焼鈍した. 供試材の機械的性質を調べるため, 常温から 225° の範囲で冷温間一軸引張試験を行った. 実験中の評点間距離 (初期評点間距離 50mm) をビデオ撮影することにより, 画像解析から伸び量 (公称ひずみ) を算出した. またヤング率の測定には高温用ひずみゲージを用いた.

### 2.2 引張曲げ成形実験

Fig.1 に本実験で用いた引張曲げ成形実験装置を示す. 温間成形を行う際は, 金型にヒーターを直接挿入することで金型を加熱する. 実験中の金型の温度は金型に挿入された熱電対により計測され, 温度コントローラーによって制御する. BHF はバネの弾性力を通じて与えられ, 成形中はナットにより保持される.

本研究では, パンチ肩半径およびダイ肩半径を 5 mm, パンチ-ダイ間のクリアランスを 1.6 mm とし, パンチストロークが 50mm に達するまで実験を行う. パンチは 10 mm/min の一定速度とする. 試験片の形状は長さ 220 mm, 幅 50 mm, 厚さ 0.8 mm である. 潤滑剤には工作油 G-2576 ((株) 日本工作油) を用いる. 本実験では, BHF は 0 kN, 0.98 kN, 1.96 kN, 4.9 kN の 4 条件とした. 正確には, これらの値にブランクホルダの自重 (約 0.17kN) を加えた値が実際に材料に作用する BHF である. 従って BHF 0kN とはブランクホルダの自重のみを意味する. しかしここでは便宜上ブランクホルダの自重は無視した標記とする. 成形温度は常温 (25°), 75°, 100°, 150°, 200°, 225° の 6

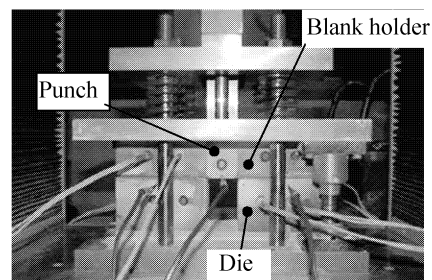


Fig.1 引張曲げ成形実験装置

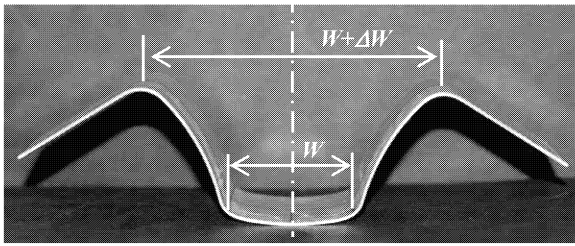


Fig.2 スプリングバック後の成形品例と  
開き量 $\Delta W$ の定義

条件とした。事前の検討より、試験中はダイ面上の温度はほぼ一様であり、また温度誤差は $\pm 10^\circ$ 程度であることが明らかとなっている。

Fig.2 にスプリングバック後の形状例を示す。本研究では、成形品のスプリングバック量を縦壁部開き量 $\Delta W$ で評価した。開き量 $\Delta W$ は成形品を画像解析することで算出した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 供試材の機械的特性

Fig.3 に一軸引張試験により得られた公称応力-公称ひずみ線図を示す。全伸びは温度が上がるほど向上している一方で、一樣伸びは温度に依らずほぼ一定である。このことから、本実験では全伸びの向上は主に非一樣伸びに起因すると考えられる。Fig.4 に温度と引張強さ、0.2%耐力、およびヤング率の関係を示す。引張強さと0.2%耐力は温度上昇とともにほぼ線形的に低下している。一方ヤング率は常温から $100^\circ$ まではほとんど変わらないのに対して、 $100^\circ$ 以上の温度域では温度上昇とともに大きく低下している。以上の傾向は過去の文献[16]で示された結果と概ね良く一致している。

一般的に、引張強さや0.2%耐力に代表される流動応力の低下はスプリングバック量を減少させ、逆にヤング率の低下はスプリングバック量を増加させると理解される。従って機械的特性の観点から考えると、温度上昇に伴うスプリングバック量の変化は流動応力およびヤング率の低下の相関で決定されると考えられる。

引張試験後の試験片について組織観察も併せて行った。詳細は省略するが、 $150^\circ$ あたりから粒界に再結晶が生じ始め、 $200^\circ$ 以上では全域に亘って再結晶が生じている様子が観察された。この結果より、 $150^\circ$ 以上での機械的特性値 (Fig.3, Fig.4) の変化には再結晶の発生が大きく影響していると考えられ、そのため再結晶はスプリングバック特性を理解する上でも重要な因子の一つであることが示唆される。

#### 3.2 引張曲げ成形実験

##### 3.2.1 縦壁部開き量

Fig.5 に各温度下におけるBHFと縦壁部開き量 $\Delta W$ の関係を示す。開き量 $\Delta W$ は温度が上昇するにつれて大きく減少し、 $225^\circ$ ではBHFに関係なく3mm未満である。この結果は文献[4]で示された傾向と同様である。また、BHFの上昇とともに開き量は減少している。しかし、温度上昇の影響に比べてBHF上昇の開き量の減少に与える影響は小さ

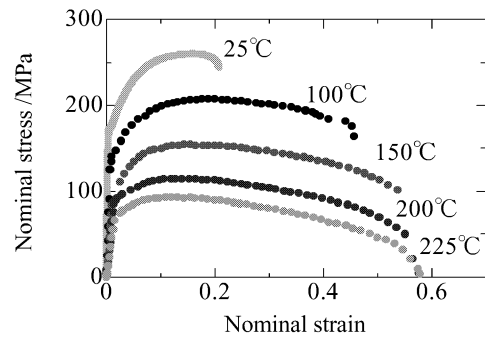


Fig.3 各温度下における公称応力-公称ひずみ線図

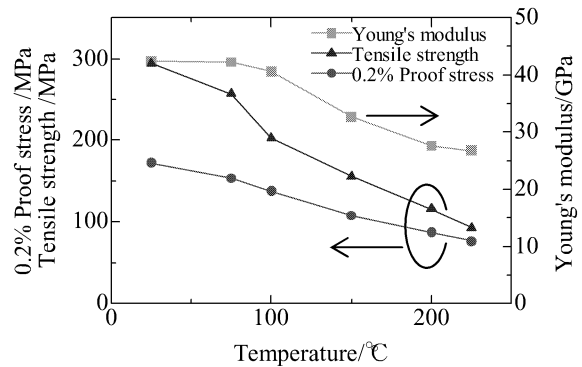


Fig.4 温度と機械的性質の関係

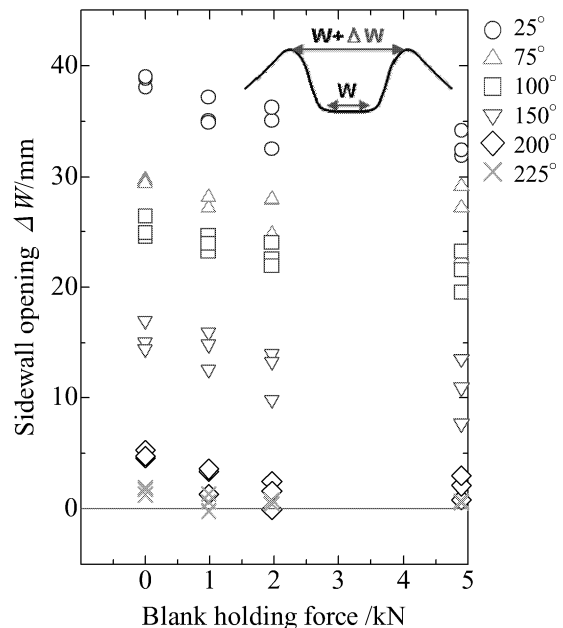


Fig.5 各温度下におけるしわ押さえ力と開き量の関係

い。さらに、BHFが0kNから1.96kNまでは開き量は減少しているが、1.96kN以上ではほとんど変化しない。この結果より、スプリングバック量を減少させるにはBHFに比べて温度を上昇させる方法が効果的であることが明らかである。

##### 3.2.2 縦壁部逆曲げの観察

引張曲げ成形実験において、成形中に縦壁部に発生する逆曲げ変形は開き量を左右する重要な因子の一つである。

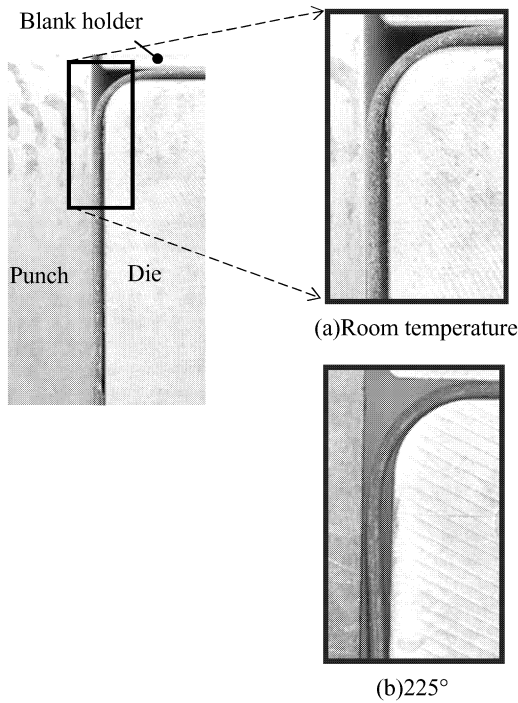


Fig.6 下死点における縦壁部形状

Fig.6 に常温および 225° で成形した場合の下死点における縦壁部形状を示す。ただし BHF は 0kN の条件である。常温では逆曲げ変形は確認できないが、225° では顕著な逆曲げ変形が確認できる。本実験では、150° 以上において顕著な逆曲げ変形が観察され、またこの傾向は BHF に依らず同様であった。

### 3.2.3 考察

以上で示した変形形状や機械的特性などの巨視的な観察結果に基づいて、開き量が Fig.5 のような推移を示す理由について考察する。

3.1 節で述べたように、温度上昇に伴う開き量の変化は温度上昇に伴う流動応力およびヤング率の低下の相関によって決定される。そこで弾塑性有限要素解析により流動応力とヤング率のいずれが開き量に対して支配的かを定性的に検討した。簡単のため、解析では Mises の降伏条件式に基づく等方硬化則を用い、成形中は温度が一定と仮定した。また簡単のため摩擦は考慮せず、ダイとブランクホルダの間隙は成形中変化しないと仮定した。成形温度によって加工硬化式およびヤング率の両方を変化させて計算した場合と、ヤング率は温度に依らず常温の値に固定して加工硬化式のみを変化させて計算した場合で開き量を比較した。解析で得られた成形温度と開き量の関係を Fig.7 に示す。加工硬化式の変化のみを考慮した結果 ((a)) では、温度が上昇するにつれて開き量は大きく減少している。一方加工硬化式とヤング率両方の変化を考慮した場合 ((b))、加工硬化式の場合に比べて温間域では開き量は増加するものの、右肩下りの傾向であることには変わりがない。この結果より、ヤング率変化に比べて加工硬化式、すなわち流動応力変化の方が開き量に及ぼす影響が支配的であるため、右肩下りの傾向になることが明らかとなった。

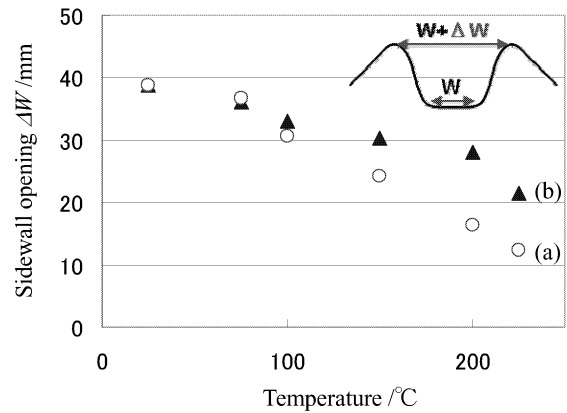


Fig.7 流動応力変化とヤング率変化の開き量に及ぼす影響の比較 (有限要素法解析結果). (a) 流動応力の変化のみを考慮した結果. (b) 流動応力およびヤング率の変化を考慮した結果.

一方ヤング率変化の開き量に与える影響は、Fig.7 から明らかなように、定性的な傾向を左右するほどではないものの決して無視できる大きさではない。これは Fig.4 に示したように、温度上昇に伴うヤング率の低下が大きく、225° では常温のおおよそ半分程度になるためである。スプリングバック量を数値解析により定量的に予測するには、ヤング率の変化も適切に考慮することが重要である。

一方、3.2.2 節で述べたように 150° 以上では縦壁部に顕著な逆曲げ変形が観察された。従来の研究[12, 17]により、逆曲げ変形が発生するとスプリングバック量が減少することが良く知られており、開き量がほぼゼロに至る場合もある。これは逆曲げ変形によって縦壁部が除荷状態となるためである。従って、温間域では流動応力の低下だけでなく逆曲げ変形の発生も大きく影響した結果、開き量が大きく減少したものと考えられる。

### 3.2.4 組織観察

続いて、結晶レベルでの微視的変形がスプリングバックに及ぼす影響を調査するため、成形前後で組織観察を行った。まず、Fig.8 に成形前の組織写真を示す。平均粒径は約 20μm である。結晶粒はほぼ等軸であり、双晶はほとんど観察されない。続いて成形後の組織写真を示す。ここでは BHF が 0kN の場合の結果を用いて考察する。以下、板材のブランクホルダと接触する側の面を上面、ダイと接触する

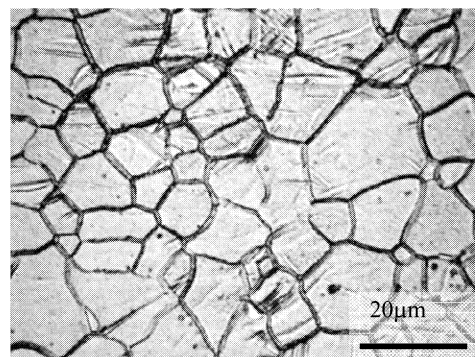
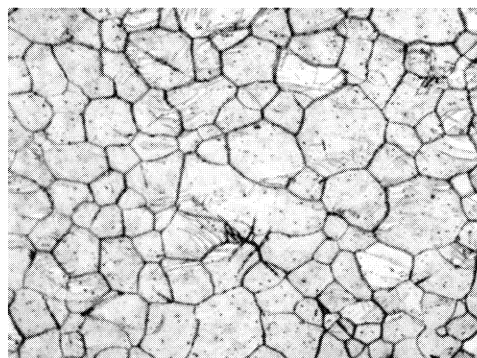
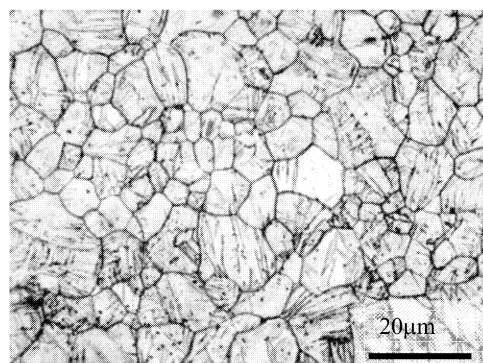


Fig.8 成形前の組織写真

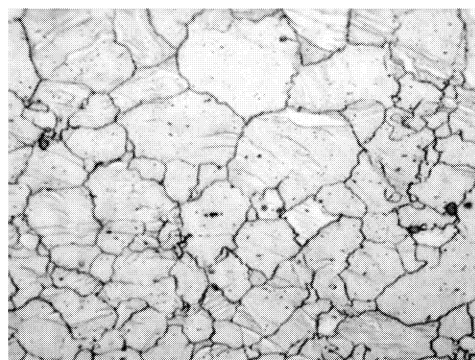


(a) 上面側 (引張側)

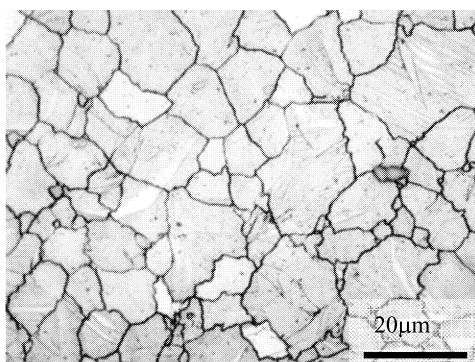


(b) 下面側 (圧縮側)

Fig.9 常温におけるダイ肩部の組織写真



(a) 上面側 (引張側)

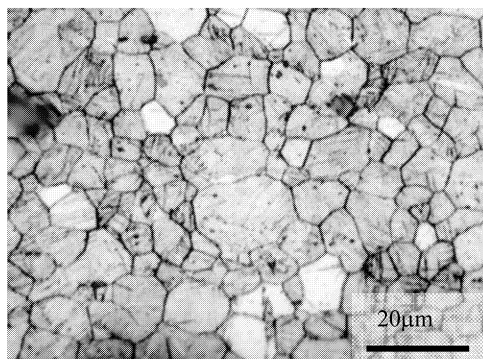


(b) 下面側 (圧縮側)

Fig.11 225°におけるダイ肩部の組織写真

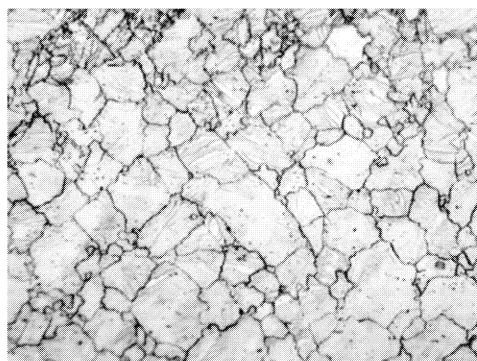


(a) 上面側 (引張→圧縮側)

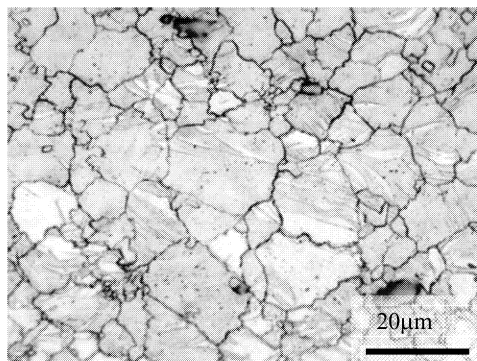


(b) 下面側 (圧縮→引張側)

Fig.10 常温における縦壁部の組織写真



(a) 上面側 (引張→圧縮側)



(b) 下面側 (圧縮→引張側)

Fig.12 225°における縦壁部の組織写真

側の面を下面と呼ぶ。Fig.9, Fig.10 に常温で成形した場合のダイ肩部および縦壁部の組織写真を示す。下面近傍は、ダイ肩部で圧縮変形を受けた後に縦壁部で引張変形を受ける。逆に上面近傍はダイ肩部で引張変形を受け、その後縦壁部で圧縮変形を受ける。下面では初期の底面集合組織の影響でダイ肩部において多くの双晶が活動している (Fig.9(b))。しかしその後縦壁部に至ると双晶の多くが消滅している (Fig.10(b))。最近の研究[18-21]より、面内で圧縮変形を受けた後に引張変形を受けると双晶が消滅し、その結果単純圧縮変形時と同様の凹型の加工硬化曲線が得られることが知られている。Fig.9 により下面ではこれと同様の双晶変形が観察されることから、下面近傍における応力-ひずみ関係は Fig.3 に示した結果とは大きく異なることが考えられる。

一方上面では、圧縮変形を受ける縦壁部でやはり双晶が活動している (Fig.10(a))。しかしその活動量は下面ダイ肩部に比べると少ない。これより、双晶の活動は予ひずみによって異なることが示唆される。前述のように双晶の活動は応力-ひずみ関係に大きな影響を及ぼすことから、以上の結果より上面近傍の応力-ひずみ関係は下面とは大きく異なることが示唆される。従って常温での成形におけるスプリングバック量を数値解析により精度良く予測するには、双晶の応力-ひずみ関係に及ぼす影響を適切に考慮することが不可欠である。

Fig.11, Fig.12 に 225° で成形した場合の組織写真を示す。常温の結果とは異なり双晶はほとんど活動していない一方で、粒界近傍に再結晶の発生が確認できる。この傾向は成形温度 200° 以上と同様であり、また上下面で違いは見られなかった。再結晶の数はダイ肩部に比べて縦壁部の方が多い。これは縦壁部では曲げ曲げ戻しによってより大きな塑性変形を受けているためと考えられる。再結晶が発生するとスプリングバック量は低下すると考えられるため、200° 以上で開き量が非常に小さいのは、前述の巨視的な要因に加えて再結晶の発生も大きな要因であると考えられる。

#### 4. 結言

本研究ではマグネシウム合金板の冷温間引張曲げ成形実験を行い、そのスプリングバック特性を調査した。本研究で得られた主な成果を以下に示す。

- (1)スプリングバック量の減少には、しわ押さえ力を上昇させるよりも温度を上昇させる方法が効果的である。
- (2)温度上昇に伴ってスプリングバック量が著しく減少するのは、温度上昇に伴う流動応力の低下、縦壁部における逆曲げ変形の発生、再結晶の発生、等の理由が複合的に作用するためである。
- (3)温度上昇に伴うヤング率の低下は、スプリングバック量変化の定性的な傾向を左右するほどの影響はないが、定量的な影響は無視できない。従って数値解析によるスプリングバックの定量的な予測を行う場合はヤング率変化を適切に考慮することが不可欠である。
- (4)常温での成形では、双晶の活動に起因して板の表裏で成形特性が大きく異なることが示唆された。従って高精度なスプリングバック予測を行うには、双晶の活動を適切にモ

デル化して解析に導入することが重要である。

#### 謝辞

本研究を遂行するに当たり、研究助成をいただいた財団法人天田金属加工機械技術振興財団に深甚なる謝意を表す。研究で用いた試験機および測定器の使用においてご協力いただいた京都大学教授馬淵守博士、京都工芸繊維大学准教授飯塚高志博士、大阪大学助教松本良博士に謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] The Japan Society for technology of Plasticity: Magnesium processing technology, (2004), Corona Publishing Co., Ltd.. (in Japanese)
- [2] B.L. Mordike, and T. Ebert, "Magnesium Properties – applications – potential", Materials Science and Engineering A, 302 (2001), 37-45.
- [3] Y. Chino, T. Furuta, M. Hakamada, and M. Mabuchi, "Fatigue behavior of AZ31 magnesium alloy produced by solid-state recycling", Journal of Materials Research, 41 (2006), 3229-3232.
- [4] H.J. Kim, S.C. Choi, K.T. Lee, and H.Y. Kim, "Experimental determination of forming limit diagram and springback characteristics of AZ31B Mg alloy sheets at elevated temperatures", Materials Transactions, 49-5 (2008), 1112-1119.
- [5] Y. Chino and M. Mabuchi, "Plastic forming of Magnesium alloys", Journal of Japan Institute of Light Metals, 51-10 (2001), 498-502. (in Japanese)
- [6] J. Kaneko, and M. Sugamata, "Mechanical properties and formability of magnesium alloy sheets", Journal of Japan Institute of Light Metals, 54-11 (2004), 484-492. (in Japanese)
- [7] Y.S. Lee, M.C. Kim, S.W. Kim, Y.N. Kwon, S.W. Choi, and J.H. Lee, "Experimental and analytical studies for forming limit of AZ31 alloy on warm sheet metal forming", Journal of Materials Processing Technology, 187-188 (2007), 103-107.
- [8] E. Doege, and K. Droder, "Sheet metal forming of magnesium wrought alloy - formability and process technology", Journal of Materials Processing Technology, 115 (2001), 14-19.
- [9] F. K. Chen, T. B. Huang, and C. K. Chang, "Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheets", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43 (2003), 1553-1559.
- [10] S. Lee, Y.H. Chen, and J.Y. Wang, "Isothermal sheet formability of magnesium alloy AZ31 and AZ61", Journal of Materials Processing Technology, 124 (2002), 19-24.
- [11] A.W. El-Morsy, and K.I. Manabe, "Finite element analysis of magnesium AZ31 alloy sheet in warm deep-drawing process considering heat transfer effect", Materials Letters, 60 (2006), 1866-1870.
- [12] T. Hama, T. Nagata, C. Teodosiu, A. Makinouchi, and H. Takuda, "Finite-element simulation of springback in sheet metal forming using local interpolation for tool surfaces", International Journal of Mechanical Sciences, 50 (2008), 175-192.

- [13] F.K. Chen, and T.B. Huang, "Formability of stamping magnesium-alloy AZ31 sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, 142 (2003), 643-647.
- [14] R. Paisarn, N. Yugi, and N. Koga, "Air bending of AZ31 magnesium alloy sheets", *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 55-4 (2005), 181-185. (in Japanese)
- [15] C. Bruni, A. Forcellese, F. Gabrielli, and M. Simoncini, "Air bending of AZ31 magnesium alloy in warm and hot forming conditions", *Journal of Materials Processing Technology*, 177 (2006), 373-376.
- [16] G. Quan, "Yield and plastic deformation of Mg-alloy AZ31 at elevated temperatures", *Materials Science forum*, 488-489 (2005), 623-628.
- [17] Y. Hayashi, and M. Takagi, "Analysis of Side Wall Curl in Draw-Bending of High Strength Steel Sheet", *Tetsu-to-Hagane*, 68 (1982), 1236-1243. (in Japanese)
- [18] Y. Chino, K. Kimura and M. Mabuchi, "Twinning behavior and deformation mechanisms of extruded AZ31 Mg alloy", *Materials Science and engineering A*, 486 (2008), 481-488.
- [19] Y. Chino, J.S. Lee, K. Sassa, A. Kamiya, and M. Mabuchi, "Press formability of a rolled AZ31 Mg alloy sheet with controlled texture", *Materials Letters*, 60 (2006), 173-176.
- [20] X.Y. Lou, M. Li, R.K. Boger, S.R. Agnew, R.H. Wagoner, "Hardening evolution of AZ31B Mg sheet", *International Journal of Plasticity*, 23 (2007), 44-86.
- [21] Y.N. Wang, and J.C. Huang, "The role of twinning and untwining in yielding behavior in hot-extruded Mg-Al-Zn alloy", *Acta Materialia*, 55 (2007), 897-905.