

Ca 添加マグネシウム合金の曲げ加工に関する基礎研究

深 川 和 良 *

(2010 年 10 月 26 日 受理)

Fundamental Study on Bending of Ca Added Magnesium Alloys

FUKAGAWA Kazuyoshi

要約

近年、実用金属材料としてマグネシウム合金が注目を浴びている。マグネシウム合金は、豊富な資源量でなおかつ優れた材料特性、リサイクル性からあらゆる分野の機能性向上、輸送機器を起因とする CO₂ 排出量削減の切札、また資源の観点から実用化が望まれているが、例えば、その活性による安全性の問題もあり普及は遅々として進まなかった。そこで、従来のマグネシウム合金に Ca を添加した、従来の合金に比べ引火点が高く安全性の高い難燃性マグネシウム合金が開発され、その実用化へ向けた研究開発が求められている。

本研究ではこの難燃性マグネシウム合金を被加工材としてその曲げ加工性を明らかにする。

キーワード：難燃性，マグネシウム合金，温間成形，曲げ加工

* 鹿児島大学教育学部 講師

1. 諸元

近年、エネルギー効率の観点から様々な輸送機器に対し軽量化が望まれており、そのため十分な強度を有しかつ軽量な材料が求められている。このような背景から、マグネシウム合金が注目されている。マグネシウム合金は実用金属材料中最も軽量でありながら高強度、優れたリサイクル性そして電磁波シールド性、高い減衰能、さらには人体無害特性や良好な被削性も有している。これに加えマグネシウムのクラーク数は8番目でありその資源量も注目に値する¹⁾。この優れた材料の実用化は切望されてきたが、未だ普及に至っていない。その理由の一つとして、化学的に活性な金属であるため部材としての製造や適用が困難であることが大きい。製造現場ではその活性により常に爆発の危険性を考慮せねばならないため従来の実用金属材料とは異なった特殊な製造法や設備導入が必須となる。また、航空機や鉄道などの大量輸送機器分野では特に安全性が重視されることから民生用における適用は安易ではない。

そこで、マグネシウム合金の広範な利用を目指し難燃化への取組がなされカルシウム添加合金（難燃性マグネシウム合金）が開発された^{2) 3)}。これはマグネシウム合金に適量のカルシウムを添加することにより得られ、初の鉄道用部材として難燃材の認定も受けている¹⁾。残る課題は生産技術の確立、特に塑性加工技術である。

マグネシウム合金は、結晶構造が稠密六方晶ですべり面が少ないため塑性加工が容易でないが、適当な加工温度を適用することですべり系の数を増やし塑性変形を可能にする温間成形が採用されている⁴⁾。しかしながら、温間成形における加工技術は十分に確立されておらず、いまだ実用化されているとは言い難い。唯一、工業的にも重要な比較的汎用性の高い曲げ加工だけは、成形条件によっては冷間加工が可能⁵⁾であるが実用的にはその適用範囲がせまく、一般的に普及をさせるためには厳しい成形条件での加工技術の確立がやはり望まれている。このような背景の中、例えばAZ31マグネシウム合金に対する自由曲げの報告がなされている⁶⁾。一方、難燃性マグネシウムは、マグネシウム合金に必須の合金元素であるアルミニウムと添加されたカルシウムにより金属間化合物 Al_2Ca が作られ結晶粒界に晶出⁷⁾するため、従来のマグネシウム合金に比べ塑性加工性が劣ることがわかっている。このようなことから塑性加工技術の確立が切望されているが、成形技術に関する研究は一部^{8) 9)}を除きほとんど報告されていない。

そこで、本研究では難燃性マグネシウム合金の塑性加工法の中から、V曲げ加工に着目しその温間域における加工性および最適な加工条件を明らかにすることを目的とする。

2. 材料および実験方法

2. 1. 材料

今回被加工材として用いた材料はCaを2%添加したマグネシウム合金であり、その機械的性質および成分¹⁰⁾の一例を表1,2に示す。これは押出し加工にて成形された厚さ1mmの板材であり、この材料に対し押出方向(ED)とその90°方向(TD)の2方向をそれぞれブランク材とし

て用意した。ブランク材寸法は 50mm × 20mm である。

2. 2. 実験装置

表 3 に使用した金型形状について、図 1 に実験装置を示す。ダイセットにはアルミニウム合金のブロックにカートリッジヒーターを 2 本挿入したホットプレートを上型下型それぞれに備え、なおかつ金型側面からの放熱による温度低下を防ぐため、両側面にもプレートヒーターを設けた。温度制御はそれぞれのホットプレートにシー

ス型熱電対を挿入し、温度コントローラーにより各々制御している。実験の際は、熱電対によるホットプレートの温度と接触式温度計により測定した温度を比較し、金型の温度が所定の温度で安定してから成形した。また、本ダイセットはガイドレールを備え、容易に金型を交換できるように工夫している。なお、被加工材の昇温は、金型と独立させたホットプレートを別途用意し所定の成形温度まで加熱させている。

このダイセットは、万能試験機に備え付けられ、荷重、成形速度が制御されながら成形実験がおこなえるようにした。なお、万能試験機のロードセルを温間成形に伴う高温から守るため、水冷式のクーラーを備え付けている。

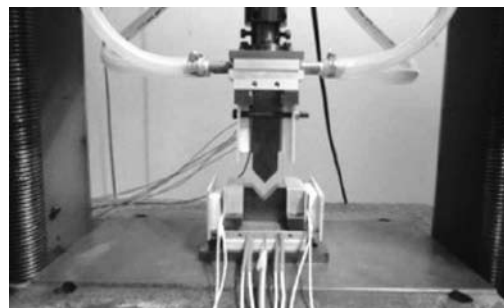
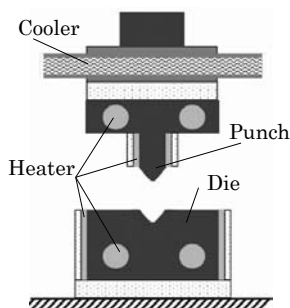


Fig.1 Schematic of warm bending

Table1 Mechanical properties

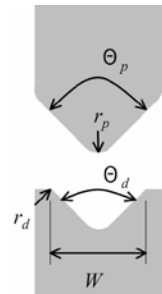
σ_b [Mpa]	$\sigma_{0.2}$ [Mpa]	E[Mpa]
264	188	58.8

Table 2 Chemical composition(mass%)

Mg	Al	Ca	Zn	Mn
Bal.	5.98	1.89	0.002	0.34
Si	Cu	Ni	Fe	
0.029	0.001	<0.001	<0.001	

Table 3 Working tools

Top angle of punch θ_p (°)	88、90
Punch radius r_p (mm)	1.0、2.0
Die opening angle θ_d (°)	90
Die opening W (mm)	30
Die radius r_d (mm)	5



2. 3. 実験方法

本研究においては曲げ角を 90°とし、成形温度の影響のほか、金型形状すなわちパンチ先端半径 r_p とパンチ角度 θ_p の影響も調査した。V 曲げ加工の成形性はパンチ先端半径に大きく左右さ

れ、被加工材の厚さ t とパンチ先端半径 r_p の比 r_p/t は重要なパラメーターであり成形の厳しさを示す。また、成形性を評価する指標だけでなく、製品の形状に直結するものでもあり、曲げ加工の被加工材としては少なくとも $r_p/t = 1.5$ で良好な成形性が得られることが求められている。パンチ先端角度は製品精度に関係する。一般的な金属材料の曲げ加工ではスプリングバックを考慮する必要があるため、パンチ先端角度には補正を加え、成形品が目的の角度になるよう工夫がなされている。そこで、本実験ではスプリングバックを考慮しよく用いられている $\theta_p = 88^\circ$ も対象とした。また、成形荷重 P については 20kN を基準としているが一部の条件で 1kN の荷重についてもおこなった。成形荷重が 20kN の条件下ではパンチとダイの斜面で板を加圧させる加工法（加圧曲げ、ボトミング）となり、スプリングバックの軽減が期待される。成形速度は 0.5mm/s でおこなった。

今回は金型について ($r_p = 1.0\text{mm}$, $\theta_p = 88^\circ$), ($r_p = 1.0\text{mm}$, $\theta_p = 90^\circ$), ($r_p = 2.0\text{mm}$, $\theta_p = 90^\circ$) を用意し成型温度 T (室温, $50^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ を 50°C 間隔) における成形実験をした。

3. 実験結果

3. 1. 曲げ部性状

表 4 に成形性の評価として曲げ部性状についてその結果をまとめている。ここで評価は、曲げ部にて破断したものは×、破断までしなくともき裂が生じているものは△、成形が良好だったものを○で示している。また成形品の曲げ部の例を図 2 に示している。 $\theta_p = 90^\circ$, $r_p = 2.0$, TD を除き、 100°C 以下の成形温度では成形に耐えられず、曲げ部に割れが生じ破断している。 150°C , 200°C の成形温度においては破断まではしていないが、き裂が生じている。ここで、被加工材の曲げ方向で比較すると、押出し方向に対して垂直な方向の方が比較的き裂が浅いことが確認できた（図 2 (a), (b) 参照）。 $\theta_p = 90^\circ$, $r_p = 2.0$ では 200°C でも成形不良は発生しなかった。これは、他の条件に比べ r_p/t が大きいことが反映された結果である。 250°C 以上になると各条件とも成形不良は発生しなかった。しかしながら、図 2 (c) と図 2 (d) を比較すると、図 2 (c) の方、すなわち曲げ方向が被加工材の押出し方向と平行な場合の方が若干肌荒れ気味であった。以上から、要求されている $r_p/t = 1.5$ 以下での加工では少なくとも成形温度は $200^\circ\text{C} \sim 250^\circ\text{C}$ 程度を求めら

Table 4 Bending formability

Bending Temperature $T(^{\circ}\text{C})$			R.T.	50	100	150	200	250	300
$\theta_p(^{\circ})$	$r_p(\text{mm})$	Direction							
88	1.0	ED	×	×	×	△	△	○	○
		TD	×	×	×	△	△	○	○
90	1.0	ED	×	×	×	△	△	○	○
		TD	×	×	×	△	△	○	○
	2.0	ED	×	×	×	△	○	○	○
		TD	×	×	△	△	○	○	○

れることがわかった。また、単純には比較できないが、AZ31 マグネシウム合金⁶⁾より少なくとも 100℃ 前後は高い成形温度を要することが予想される。

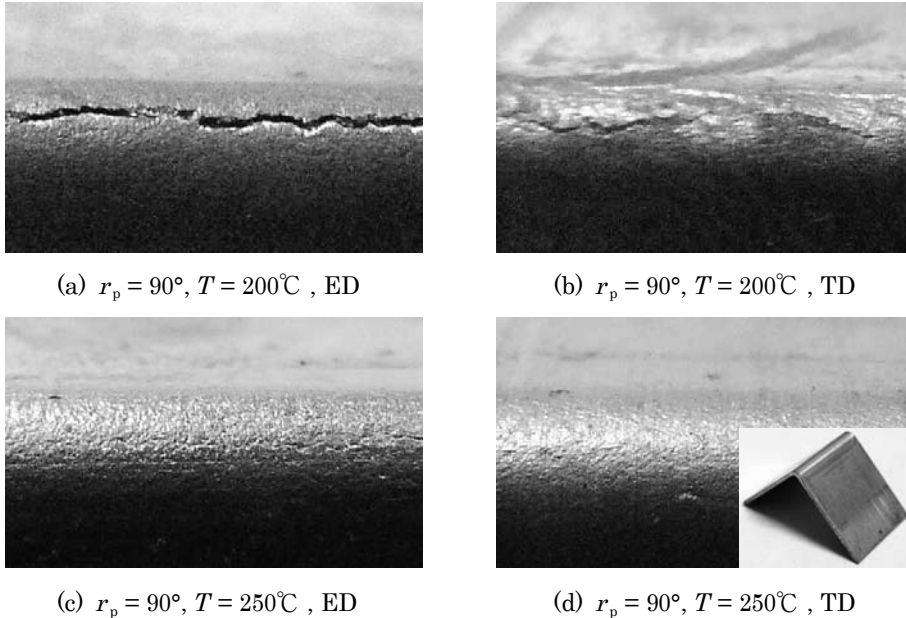


Fig.2 Results of bending test

3. 2. 曲げ角

通常、曲げ加工の際は成形後に弾性回復によるスプリングバックが生じる。成形実験により得られた結果を図3と図4に示す。ただし、これらの図は成形が良好なデータのみを扱っている。なお、成形品の角度測定にはベベルプロトラクタを使用した。

図3は90°に対する成形品の曲げ角 θ の差を $\Delta\theta (= \theta - 90^\circ)$ とし、成形温度 T との関係を示している。これより $\Delta\theta$ は負の値をとっていることがわかるが、これはパンチ先端角度に対して成形品の曲げ角が小さいことを意味している。すなわちスプリングバックの方向としては負になっている。成形温度の影響をみると、成形温度が高い方が $|\Delta\theta|$ は小さくなっている。なお、図3および図4ともデータを省いているが、今回スプリングバックを考慮した $\theta_p = 88^\circ$ に対しての成形結果は $\theta_p = 90^\circ$ の場合より大きな負のスプリングバックを示した。

図4はパンチ先端半径 r_p が $\Delta\theta$ に及ぼす影響を示している。これも負のスプリングバックが生じているが、 r_p が大きいほど $|\Delta\theta|$ が大きいことがわかる。製品精度の向上という意味では r_p を小さくすることも対策の一つとなる。

また、図3と図4の両者とも曲げ線が押し出し方向に直角となる方が負のスプリングバックが小さくなることが示されている。スプリングバックの大きさに関しては、被加工材のヤング率や降

伏応力、また成形条件などにも左右される。すなわち、ヤング率が小さいほど、あるいは降伏応力が高くなるほど弾性回復量は大きくなる。また、自由曲げのようなパンチ先端部とダイの両肩による曲げでは正のスプリングバックが生じるが、加圧曲げの条件では、曲げ戻し変形を生じ負のスプリングバックが優位となることが報告されている¹¹⁾。この観点から考えると、本成形実験では、加圧曲げであるため負のスプリングバックが生じる傾向を示し、また被加工材が高温になると降伏応力は低下するので、成形温度が高いと $|\Delta\theta|$ が小さくなることも想像できる。しかしながら、曲げ方向について考えると、本来 TD の方が降伏応力は高いため $|\Delta\theta|$ が大きくなると予想されるが、異なった結果が得られた。複合的な要因が当然考えられるが、実際には温間成形におけるスプリングバック現象の解明はまだされていなく、高張力鋼板では高温クリープの影響も示唆されている¹²⁾。今後さらに詳細な研究が必要である。

3. 3. 成形荷重の影響

表5および図5に成形荷重が1kNの場合の成形実験の結果を示す。この条件下では加圧曲げでもかなり自由曲げに近い成形といえる。すなわち、加工途中のダイ斜面の曲げ戻し変形の影響

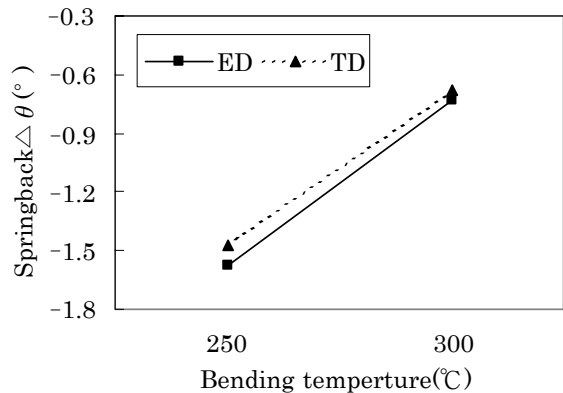


Fig.3 Effect of bending temperature on the springback
($r_p = 1.0\text{mm}$, $\theta_p = 90^\circ$, $P = 20\text{kN}$)

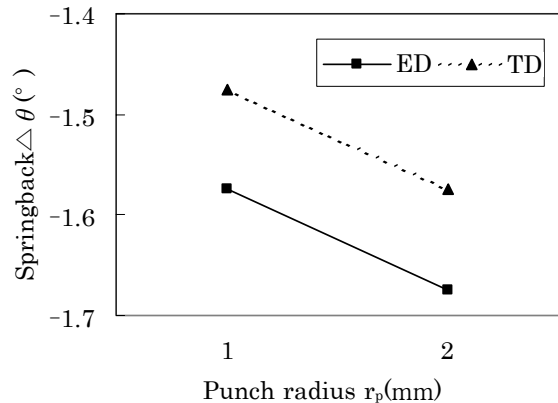


Fig.4 Effect of punch radius on the springback
($T = 250^\circ\text{C}$, $\theta_p = 90^\circ$, $P = 20\text{kN}$)

Table 5 Bending formability ($P=1\text{kN}$)

Direction	Bending Temperature T ($^\circ\text{C}$)						
	R. T.	50	100	150	200	250	300
ED	×	×	×	○	○	○	○
TD	×	×	×	○	○	○	○

はあるが、パンチとダイ斜面の間で加圧はあまりされていなかったと予想される。表 5 より成形荷重が 1kN であれば 150℃でも成形が可能であった。しかしながら成形品の曲げ半径を測定すると、 r_p に比べかなり大きく 2.0 ～ 3.5mm の範囲にあった。また、ばらつきはあるものの、スプリングバックも成形荷重が 20kN の場合に比べその絶対値は大きなものとなった。

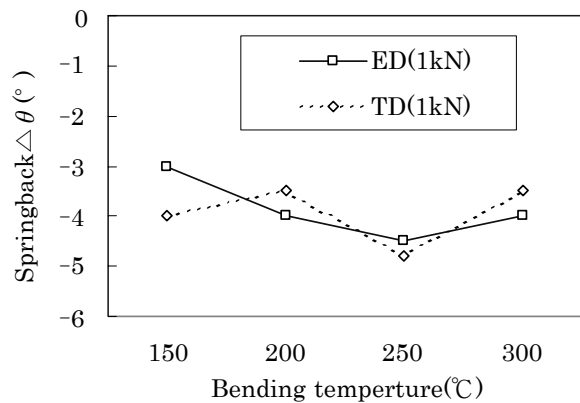


Fig.5 Effect of bending temperature on the springback
 ($r_p = 1.0\text{mm}$, $\theta_p = 90^\circ$, $P = 1\text{kN}$)

4. 結言

Ca 添加マグネシウム合金の V 曲げ加工をおこない、その成形性および成形条件を検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 実用的な $r_p/t = 1.0$ に対して、加圧曲げにおいては成形温度 250℃以上で良好な曲げ成形品が得られる。
- (2) 温間成形による加圧曲げにおいて、スプリングバックは負となりその絶対値の大きさは成形温度が高いほど小さくなる。

本研究を遂行するにあたり、実験に際しては当時本学学生の桑原田健史君に全面的なご協力をいただいた。また、一部金型に関しては熊本県産業技術センターの濱嶋英樹氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) The Japan Magnesium Association, Kogyo Chosakai Publishing Inc., *Magnesium* (2009)
- 2) Sakamoto, M. and Akiyama, S. et al, *Journal of Japan Foundry Engineering Society*, Vol.69 (1997), pp. 227-233.
- 3) Akiyama, S. and Ueno, H. et al, *Materia Japan*, Vol.39 (2000), pp. 72-74
- 4) Mukai, T. and Higashi, K., *Journal of the JSTP*, Vol.42 (2001), pp. 99-105
- 5) The Japan Society for Technology of Plasticity, Corona Publishing Co. Ltd., *Magnesium Processing Technology* (2004)
- 6) Paisarn, R., and Yugi, N. et al, *Journal of Japan Institute of Light Metals*, Vol.55, No.4 (2005), pp. 181-185
- 7) Akiyama, S., *Materials science & technology*, Vol.70, No.6 (2000), pp. 59-64
- 8) Takahashi, K. and Fukagawa, K. et al, *Reports of Kumamoto Industrial Research Institute*, No.45 (2008), pp. 8-13
- 9) Sakamoto, M. and Motoi, A. et al, *Alutopia*, Vol.38, No.8 (2008), pp.17-21
- 10) Kitahara, Y. and Ikeda, K. et al, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Series A*, Vol.72, No.717 (2006), pp. 661-668
- 11) The Japan Society for Technology of Plasticity, Corona Publishing Co. Ltd., *Bending* (1995)
- 12) Yanagimoto, J., *Monthly journal of the Institute of Industrial Science*, Vol.59, No.5 (2007), pp. 45-55