

# 市販マグネシウム合金板の冷間プレス成形法の開発

豊橋技術科学大学 機械工学系  
教授 森謙一郎

(平成 20 年度重点研究開発助成 AF-2008002)

キーワード：市販マグネシウム合金板，冷間プレス成形，2 段加工

## 1. 緒言

マグネシウム合金は大きな比強度を有し，携帯電話，パソコン，カメラ，自動車などに広く応用されつつある。マグネシウム合金部品は主にダイカスト，チクソモールディングで成形されているが，生産性向上，薄肉化，高強度化などの観点から板材プレス成形の適用が望まれている<sup>1)</sup>。マグネシウム合金板材の供給体制も整備されつつあり，プレス成形の環境が整ってきている<sup>2)</sup>。

マグネシウム合金では，常温においてすべり係が少ないため延性は低く，曲げのような変形が小さい加工では冷間成形が行われているが，深絞り，張出しのような変形が大きな加工は困難とされている。マグネシウム合金では，パソコン，カメラなどの筐体としての用途が多いため，深絞り加工の適用が望まれる。マグネシウム合金は 200~300°C 程度に加熱すると成形性が大きく向上するため，深絞り加工は一般に温間で行われている<sup>3~7)</sup>。温間深絞り加工は成形限界を大幅に向上させるが，加熱装置を金型に組み込むために成形装置が複雑になる。

市販マグネシウム合金板では，冷間深絞り加工の限界絞り比は 1.3~1.5 程度と低いことが報告されている<sup>8)</sup>。筆者ら<sup>9)</sup>は市販マグネシウム合金板に高温焼なましを行うことによって，冷間深絞り加工が可能であることを示した。しかしながら，小さな肩半径のパンチで冷間深絞り加工を行うと，変形が集中して破断を生じるため，小さな角半径を有する容器を成形することは難しい。マグネシウム合金は電子・電気機器のケースとして用途が多いため，角筒容器の成形が望まれるが，小さな角半径の角筒容器を冷間深絞り加工することは困難である。

本研究では，小さな角半径を有するマグネシウム合金容器の冷間 2 段プレス成形法を開発した。この方法では，1 段目に大きな肩半径のパンチで深絞り加工を行い，成形された容器の側壁を押し出すことによって角半径を小さくする。2 段プレス成形によって円筒および角筒容器を成形した。

## 2. マグネシウム合金容器の冷間 2 段プレス成形法

### 2.1 焼なまし条件

板厚 0.5mm の市販 AZ31 マグネシウム合金板(大阪富士工業(株)製)を実験材料として用いた。AZ31 はアルミニウムを約 3%，亜鉛を約 1% 含んでおり，延性，加工性に優れており，マグネシウム合金板材としては最も一般的に

製造されている。市販マグネシウム合金板は圧延による強加工を受けて延性が低いため，焼なまし処理によって成形性を向上させた。焼なまし処理は大気雰囲気で行い，マグネシウム板が酸化されて延性が低下するのを防止するため，マグネシウム板を鋼板ではさんでアルミホイルを巻いて密閉した。温度は 350°C~550°C であり，保持時間は 1h である。

焼なましされた板材の引張試験における全伸び，最小断面積の減少率である絞りと焼なまし温度の関係を Fig. 1 に示す。焼なましを行うことにより全伸びおよび絞りは向上しているが，焼なまし温度による影響は少ない。

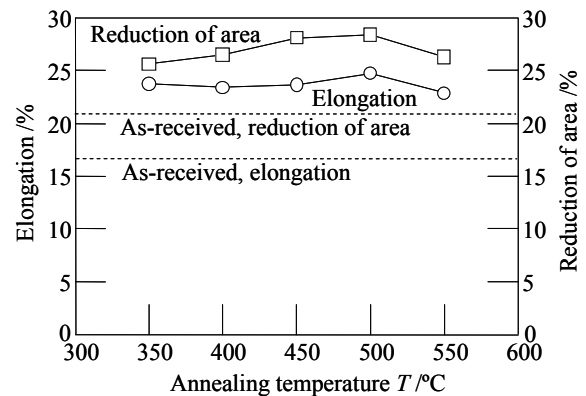


Fig. 1 Variations in elongation and reduction of area with annealing temperature obtained from tensile test of AZ31 magnesium alloy sheet

AZ31 マグネシウム合金板における結晶粒径および硬さと焼なまし温度の関係を Fig. 2 に示す。焼なまし温度の増加とともに硬さは少し減少しており，結晶粒径は大

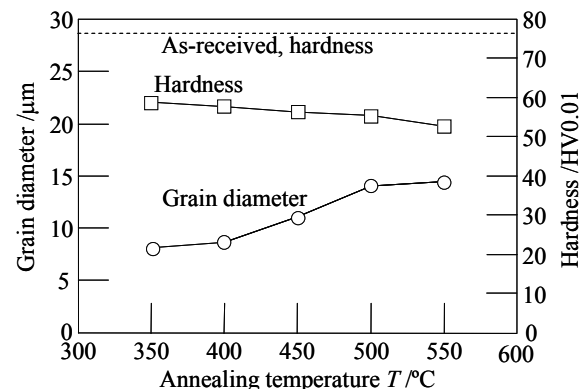


Fig. 2 Variations in grain diameter and hardness with annealing temperature for AZ31 magnesium alloy sheet

大きく増加している。焼なましを行っていない板材では強加工を受けており、結晶粒は非常にばらついており、粒径を求めるのは困難であった。

限界絞り比と焼なまし温度の関係を Fig. 3 に示す。2mm のパンチ肩半径の結果を示しているが、比較のため 500°C、5mm の結果も示した。焼なましを行わないものは、絞り比 1.32 においても割れが発生したが、焼なましを行うことによって限界絞り比は向上した。焼なまし温度とともに限界絞り比は増加し、500°C で最大値を示しており、500°C を越えると表面の酸化が著しくなった。以下の実験では、500°C の高温焼なましされた板材を用いた。

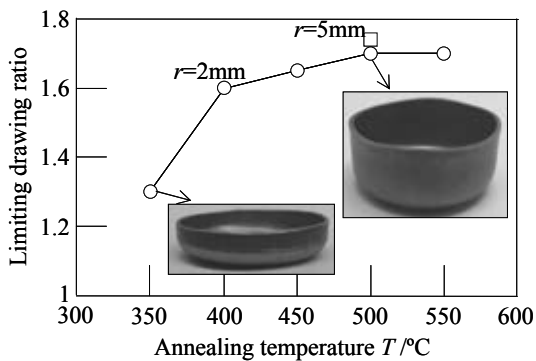


Fig. 3 Relationship between limiting drawing ratio and annealing temperature

### 2・2 2段成形法

Fig. 4 に示すようにパンチ肩半径が 1mm のように小さな底角半径を持つ容器を成形するのは容易ではない。小さな肩半径のパンチを用いると、変形が容器の底角部に集中して破断を生じる。

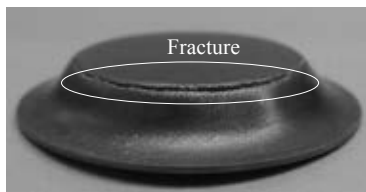


Fig. 4 Fracture in drawn cup with punch having corner radius of 1mm

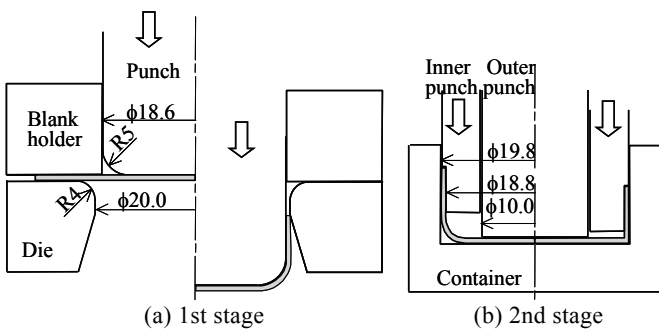


Fig. 5 2-stages stamping for forming magnesium alloy cup having small corner radius

小さな角半径を有するマグネシウム合金容器を成形するために、Fig. 5 に示すような 2 段プレス成形法を開発した。1 段目において、5mm の大きな肩半径のパンチを用いて深絞り加工を行って容器を得る。肩半径が大きいため、変形が集中しなく、絞ることができる。次に 2 段目において、成形された容器をコンテナ内に入れ、スプリングを付けた内側パンチによって容器底部を拘束した状態で、段付き外側パンチで容器側壁上端部を押下げることによって底角半径を小さくする。2 段目では圧縮応力下で成形を行うことによって、割れの発生を抑制する。

### 3. 円筒容器の冷間 2 段プレス成形

#### 3・1 冷間 2 段成形結果

市販有限要素法ソフト ABAQUS を使用して 2 段プレス成形をシミュレーションし、2 段目成形の変形形状の計算結果を Fig. 6 に示す。ここで、 $s$  は 2 段目における外側パンチのストロークである。ストローク  $s$  が増加するとともに側壁部が押し込まれて底角半径が減少しており、 $s=2.6\text{mm}$  において容器の底角半径が大幅に小さくなっている。

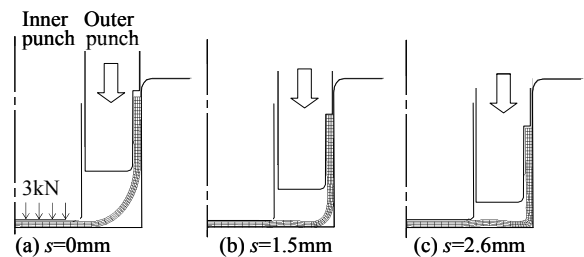


Fig. 6 Deforming shape of cup in 2nd stage calculated from finite element simulation

側壁高さおよび底角半径と 2 段目ストロークの関係を Fig. 7 に示す。2 段目ストロークとともに、側壁は圧縮されて底角半径は減少しているが、 $s=2.8\text{mm}$  では圧縮が過度になって底角部に割れが発生している。

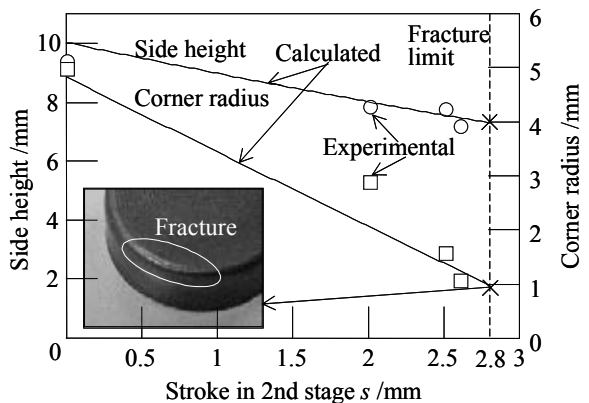


Fig. 7 Variations in side height and corner radius with stroke in 2nd stage

$s=2.6\text{mm}$  における成形実験から得られた1,2段後の容器断面を Fig. 8 に示す. 底角半径は1段目成形後に $5.0\text{mm}$  あったが, 2段目では $s=2.6\text{mm}$  において $1.1\text{mm}$  にまで減少している.

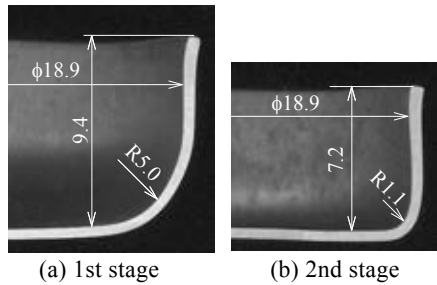


Fig. 8 Cross-sections of cup obtained from experiment for  $s=2.6\text{mm}$

$s=2.6\text{mm}$  における成形実験から得られた1,2段目の容器の板厚ひずみおよび硬さ分布を Fig. 9 に示す. ここで, 横軸は容器中央からの距離であり, 2段目底角部を破線で示し, 右端は側壁上端になる. 2段目成形前後で板厚ひずみおよび硬さ分布はあまり変化してなく, 2段目では底角半径を小さくするために, 容器側壁が押されて底角部だけが変形している.

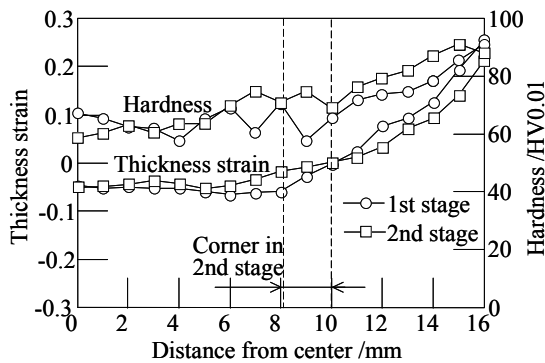
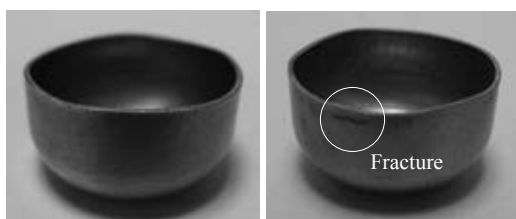


Fig. 9 Distributions of thickness strain and hardness of cup obtained from experiment for  $s=2.6\text{mm}$

### 3・2 しごき加工の適用

外側パンチで容器側壁上端部を押下げるために, 容器高さは小さくなる. 容器高さを増加するために, 1段目においてしごき加工を加えた. しごき率を変化させて成形された円筒容器を Fig. 10 に示す. しごき率は1段目の



(a)  $r=20\%$  (b)  $r=25\%$   
Fig. 10 Ironed cups in 1st stage

深絞り加工で最大になる側壁上端の板厚を基準にしている. しごき率  $r=20\%$  では加工が行えているが,  $r=25\%$  では側壁端部に割れが生じており, 限界しごき率は $20\%$  になった.

2段成形された円筒容器の断面を Fig. 11 に示す.  $r=20\%$  のしごき加工を加えると, 側壁高さが Fig. 8 に示す $7.2\text{mm}$  から $8.4\text{mm}$  に増加できた.

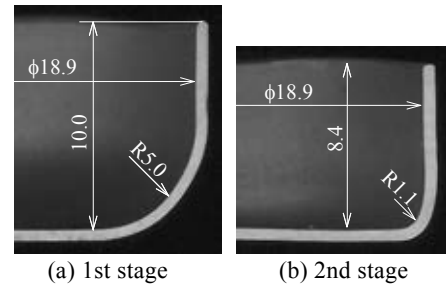


Fig. 11 Cross-sections of cup obtained from experiment with ironing in 1st stage

$r=20\%$  における成形された円筒容器の板厚ひずみと硬さ分布を Fig. 12 に示す. 1段目では深絞り加工によって角部で板厚が小さくなっているが, 2段目の圧縮加工において, 板厚が少し回復している. Fig. 9 に示すしごき加工なしの結果と比較して, しごき加工を加えることによって側壁上部の板厚増加は抑制されている. 2段目では, 底角部付近を除いて硬さはほとんど変化しない.

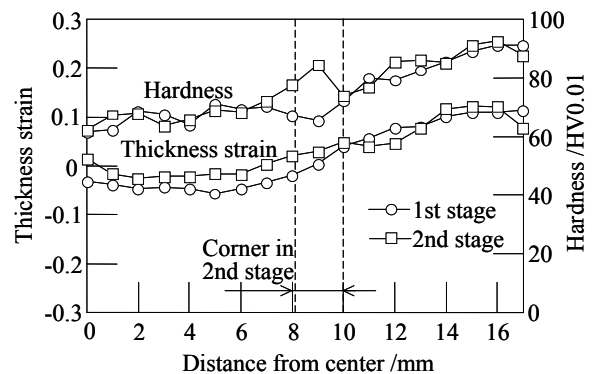


Fig. 12 Distributions of thickness strain and hardness of cup obtained from experiment with ironing in 1st stage

## 4. 角筒容器の冷間2段プレス成形

### 4・1 角筒容器の成形

マグネシウム合金板の冷間2段角筒成形を行い, その工具とブランクを Fig. 13 に示す. 正方形板材角部のカット形状を変化させて深絞り加工を行い, 容器高さが均一に近いブランク形状を採用した.

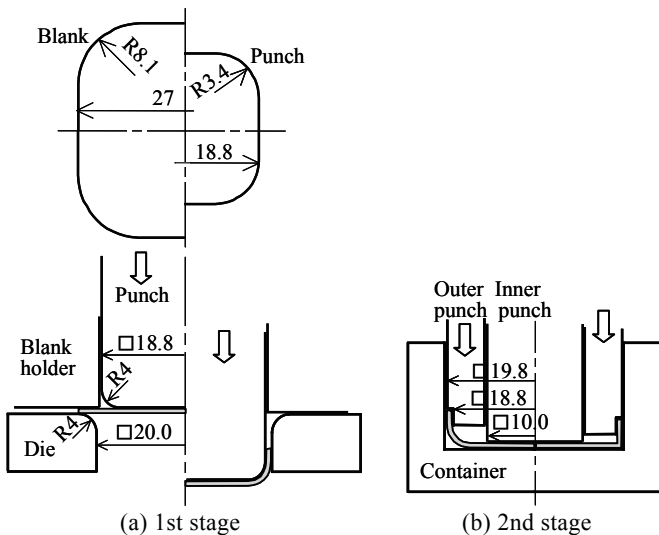


Fig. 13 2-stages stamping of square cup having small corner radius

1 段目において絞り比を変化させて成形された角筒容器を Fig. 14 に示す。絞り比 1.44 では加工が行えているが、1.49 では側壁端部に割れが生じており、限界絞り比は 1.44 になり、絞り比 1.44 に対して 2 段成形を行った。

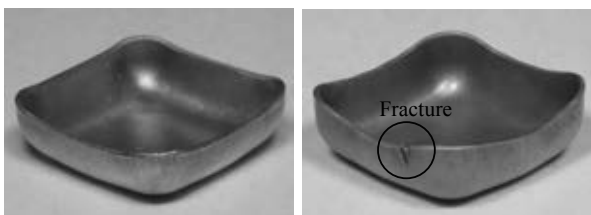


Fig. 14 Drawn square cups in 1st stage for different drawing ratios

2 段成形された角筒容器を Fig. 15 に示す。2 段目において圧縮加工を行うことによって角半径を小さくするだけでなく、1 段目で不均一であった側壁高さは 2 段目で圧縮されて均一になっている。ノートパソコン、携帯電話の筐体は比較的浅いため、成形された角筒容器はこのような筐体に十分適用できる。

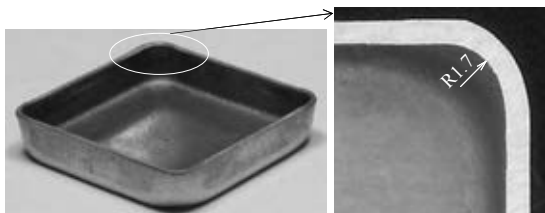


Fig. 15 Formed square cup with small corner radius by 2-stages stamping

2 段成形された角筒容器の対辺方向断面を Fig. 16 に示す。底角半径の小さな角筒容器が成形されている。

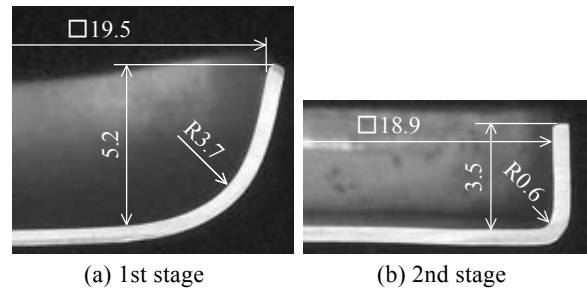


Fig. 16 Opposite side cross-sections of formed square cup by 2-stages stamping

#### 4・2 ゴムパンチの適用

底角半径および側壁角半径をさらに減少させるために、Fig. 17 に示すように 2 段目においてスチールパンチの下部にウレタンゴムパンチを挿入して成形を行った。スチールパンチによる 2 段目成形では、容器角部に圧力が作用しないため、変形するゴムパンチを用いて角部にも圧力を作用させた。

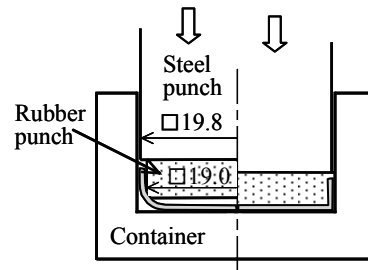


Fig. 17 Use of rubber punch in 2nd stage of 2-stages stamping of square cup

ゴムパンチによって 2 段成形された角筒容器の対辺方向断面と上面を Fig. 18 に示す。スチールパンチの結果と比較して、底角半径は Fig. 16 (b) の R0.6 から R0.3 に、側壁角半径は Fig. 15 の右図の R1.7 から R0.3 にそれぞれ減少させることができた。

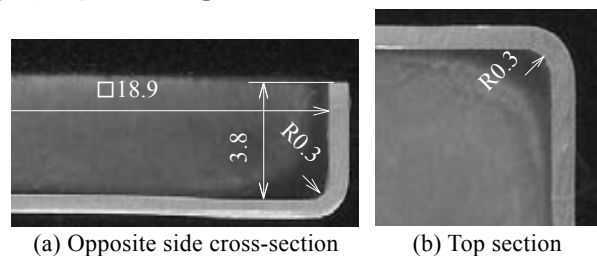


Fig. 18 Opposite side cross-section and top section of formed square cup with rubber punch

スチールパンチとゴムパンチによって 2 段成形された角筒容器の対辺方向断面の板厚ひずみと硬さ分布を Fig. 19 に示す。スチールパンチの板厚は底角部で大きくなっているが、ゴムパンチでは底角部の急激な板厚増加は抑制されている。ゴムパンチとスチールパンチの硬さは同様な分布を示している。



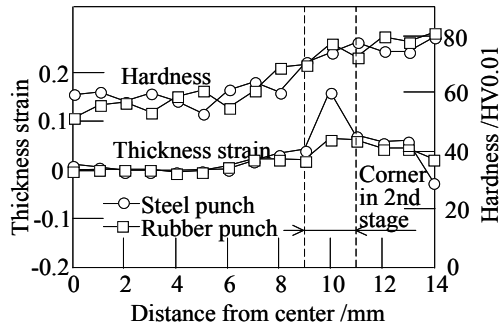


Fig. 19 Distributions of thickness strain and hardness of opposite side cross-sections of formed square cups with steel and rubber punches

スチールパンチとゴムパンチによって2段成形された角筒容器の対角方向断面を Fig. 20 に示す. 対角方向底角部では, 材料が十分に張出されていない. 今回の実験では直方体のゴムパンチを使用した, ゴムパンチは変形するため形状を最適化することによって対角方向底角部に高い圧力を作用させてこの部分を張出させることができると思われる.

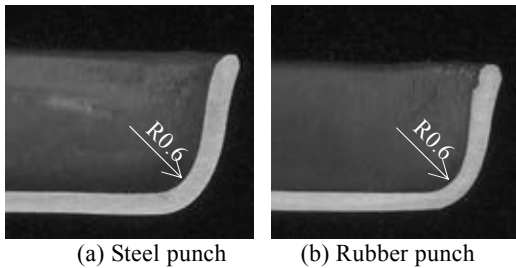


Fig. 20 Opposite angle cross-sections of formed square cups with steel and rubber punches

## 5. 底部ビードを有する角筒容器の冷間成形

### 5・1 ゴム圧による冷間底部ビード成形方法

容器の剛性を向上させるために, 角筒容器の底部に凸形状のビードを成形した. まず, 割れを防止するために角部半径の大きなパンチで割れ発生を防止して角筒容器を成形する. つぎに, Fig. 21 に示すようなゴムパンチと溝付きダイスを用いて, 角筒容器の底部ビードを成形するとともに底角部の半径を小さくする. コンテナに入れた容器の端部が鋼パンチによって圧縮されるととも

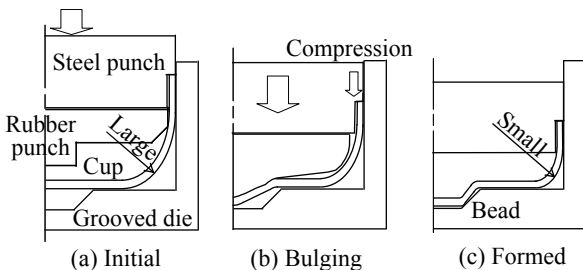


Fig. 21 Forming of square cup having bottom bead using rubber punch

に, 容器底部がゴムパンチの突起によってダイスの溝部に張出されて凸型ビードが形成される. ゴムパンチの張出しと鋼パンチの容器端部の圧縮によって容器の変形の集中を緩和して割れを防止する.

角筒容器の冷間底部ビード成形条件を Fig. 22 に示す. コンテナ底部の凹形状の幅は 5mm であり, 空隙への充填率を向上させるためにゴムパンチの凸部の幅  $w$  と高さ  $h$  を変化させた. ゴムパンチはシエア硬さ A90 のウレタン製, 潤滑剤は二硫化モリブデン, パンチ速度は 10mm/min である. 比較のために, ゴムパンチの代わりに凸型鋼パンチによってもビードを成形した.

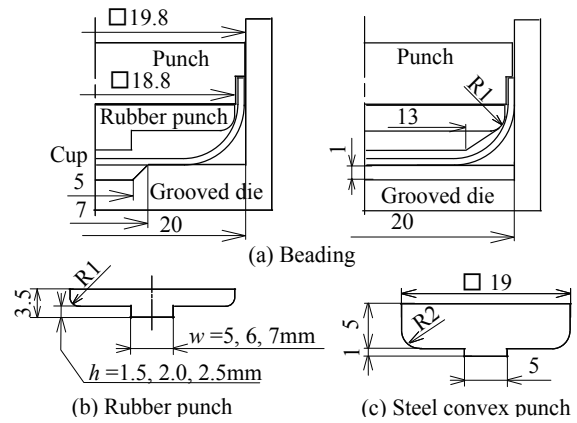


Fig. 22 Conditions of beading for AZ31

### 5・2 冷間底部ビードの成形結果

$w=5\text{mm}$ ,  $h=1.5\text{mm}$  における冷間ビード成形された容器を Fig. 23 に示す. ストローク  $s$  の増加とともに底部のビードが高くなっている.  $s=2.5\text{mm}$  に達すると容器内側のビード端部でクラックが生じている.

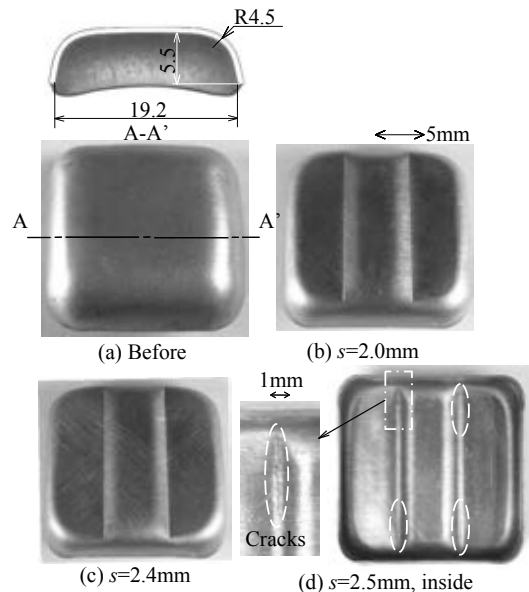


Fig. 23 Square cups after beading for  $w=5\text{mm}$  and  $h=1.5\text{mm}$

$h=1.5\text{mm}$ における限界充填率とゴム凸部の幅の関係を Fig. 24 に示す. 限界充填率は, クラックの生じない最大ストロークにおいて得られた容器凸部体積に対するコンテナ凹部容積の比である. 凸部の幅  $w=5\text{mm}$  では小さいが  $6\text{mm}$  と  $7\text{mm}$  ではほぼ同じである.

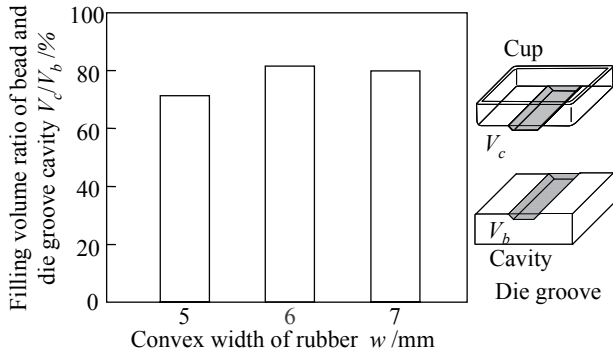


Fig. 24 Relationship between filling volume ratio and convex width of rubber for  $h=1.5\text{mm}$

$w=6\text{mm}$ , 限界ストロークにおける容器中央部の角部半径  $r_c$  におよぼすゴムパンチの凸部高さ  $h$  の影響を Fig. 25 に示す. 角部半径は  $h=2.0\text{mm}$  以上では一定となっているために  $h=2.0\text{mm}$  を採用した.

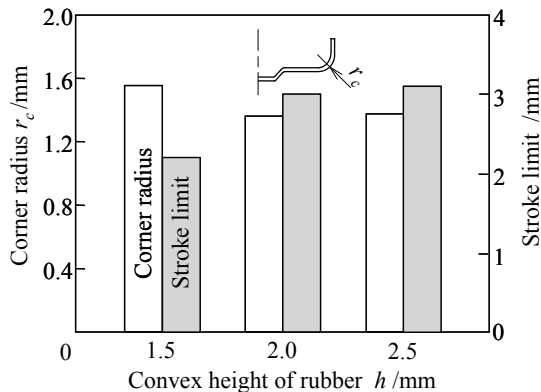


Fig. 25 Effect of convex height of rubber on corner radius for  $w=6\text{mm}$  and stroke limit

最適なゴム凸部の幅と高さを用いた底部ビード成形と鋼製のパンチにより成形された容器を Fig. 26 に示す. 鋼パンチでは容器凸部にクラックが発生しているが, 最適なゴムパンチによるビード成形では欠陥なく成形されている. また, 角部半径  $r_c$  は,  $4.5\text{mm}$  から  $1.37\text{mm}$  に減少することができ, 角部の半径を小さくできて底部に凸形ビードを有する AZ31 角筒容器が成形できた. 容器に耳がわずかに発生しているが, ブランク形状を修正することによって防止できると考えられる.

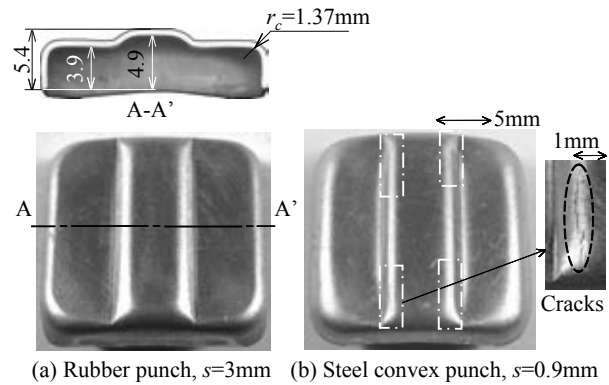


Fig. 26 Square cups after beading by optimum rubber and steel punches for  $w=6\text{mm}$  and  $h=2.0\text{mm}$

## 6. 結言

小さな角半径を有するマグネシウム合金容器の冷間 2 段プレス成形法を開発し, 以下の知見を得た.

- 1) 1 段目に大きな肩半径のパンチで深絞り加工を行い, 成形された容器側壁を押しことによって角半径が小さい容器を成形できた.
- 2) 円筒容器において, 1 段目にしごき加工を加えることによって, 容器高さを増加させた.
- 3) 角筒容器において, 2 段目成形においてゴムパンチを用いることによって, 底角半径および側壁角半径を減少させた.
- 4) 成形された角筒容器はノートパソコン, 携帯電話の筐体のような比較的浅い容器に十分適用できる.
- 5) ゴムパンチと溝付きダイスによって, 角筒容器の底部にビードを成形することができた.

## 謝辞

本研究は, 天田金属加工機械技術振興財団による平成 20 年度研究助成金(AF-2008002)によるものであり, 財団に感謝いたします.

## 参考文献

- 1) 林央: プレス技術, **43-7** (2005), 18-26.
- 2) 小原久: 同上, **45-10** (2007), 23-27.
- 3) 相田収平・田辺寛・須貝裕之・高野格・大貫秀樹・小林勝: 軽金属, **50-9** (2000), 456-461.
- 4) 戸澤康壽: 同上, **51-10** (2001), 492-497.
- 5) 佐藤雅彦: 塑性と加工, **48-556** (2007), 373-378.
- 6) 岩崎源・坂部裕司: 同上, **48-556** (2007), 384-389.
- 7) 久野拓律: プレス技術, **45-10** (2007), 40-45.
- 8) 日本塑性加工学会編: マグネシウム加工技術, (2004), 109-119, コロナ社.
- 9) 森謙一郎・辻浩和: 塑性と加工, **48-552** (2007), 41-45