

# 市販マグネシウム合金板の冷間深絞り加工

森 謙 一 郎（豊橋技術科学大学）

## 1. まえがき

マグネシウム合金は高い比強度を有し、携帯電話などの電子機器、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、チクソモールドイ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>。圧延加工によって製造される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。

マグネシウム合金では、常温においてすべり系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。パソコン、カメラなどのケースとしての用途がマグネシウム合金においては多いため、深絞り加工の適用が望まれている。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。温間深絞り加工では、図1に示すようにヒーターを内蔵したダイスとしわ押えによってブランク接触部を加熱して延性を改善して変形抵抗を低下させ、冷却したパンチでブランク肩部の変形抵抗を増加させて肩部での割れ発生を防止している。このような局部加熱・冷却深絞り加工を用いると、限界絞り比が大幅に向上する<sup>2)</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り、加熱装置を必要としない冷間深絞り加工の開発が望まれている。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>3)</sup>。絞り比はブランク直径とパンチ直径の比である。大年ら<sup>4)</sup>は、熱間で強圧延を行うことによって材質を改善しており、冷間限界絞り比が1.7まで向上することを報告している。結晶粒を微細化して成形温度を低下する試みも行われているが、冷間成形温度には達してはいない<sup>5)</sup>。しかしながら、特殊な圧延履歴を受けた板材では、供給が問題となって実成形への適用は困難であるため、市販材を適用できる冷間深絞り加工技術の開発が望まれている。

本報告では、高温焼なまし処理された市販マグネシウム合金板を冷間深絞り加工し、高温焼なまし処理が有効であることを示す。また、成形性を向上させる冷間2段プレス成形、角筒容器の冷間プレス成形の結果も紹介する。

## 2. 高温焼なまし処理されたマグネシウム合金板の冷間深絞り加工<sup>6),7)</sup>

### 2.1 高温焼なまし処理

市販されているAZ31Bマグネシウム合金板（大阪富士工業株式会社製）を実験材料として用い、板厚は0.5mmである。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。市販のマグネシウム合金板は、圧延による強加工を受けているため延性が低く、図2(a)に示すように絞り比 $\alpha=1.32$ という小さな冷間深絞り加工においても破断する。従来温間加工される板材は300°C程度で焼なまし処理されていたが、500°Cの高温で焼なまし処理を行うと、写真2(b)に示すように冷間深絞り加工を行うことができた。焼なまし処理では、打抜いたブランクを鋼板ではさんでアルミホイルを巻いて密閉して酸化を防止し、保持時間は1hである。

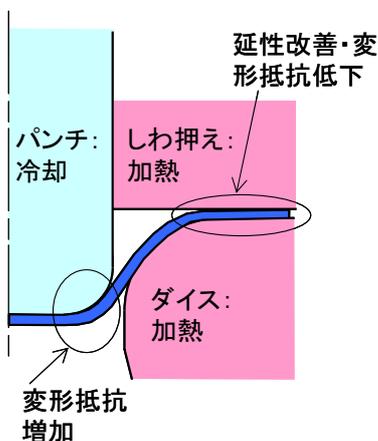
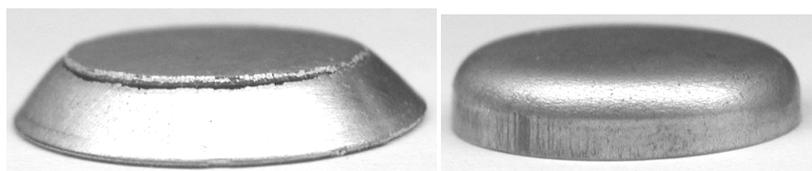


図1 温間深絞り加工



(a) 焼なましなし

(b) 焼なましあり

図2 AZ31Bマグネシウム合金板の冷間深絞り加工

焼なまし処理によって成形性が向上するために、焼なまし温度を変化させたブランクに対して深絞り加工を行った。図3に示すように、限界絞り比は焼なまし温度とともに向上しており、500°Cで最大値を示している。500°Cを越えると表面の酸化が著しくなった。

焼なまし温度による結晶粒径と硬さの変化を図4に示す。焼なまし処理を行うことにより、結晶粒径は大きくなるが、硬さは減少している。

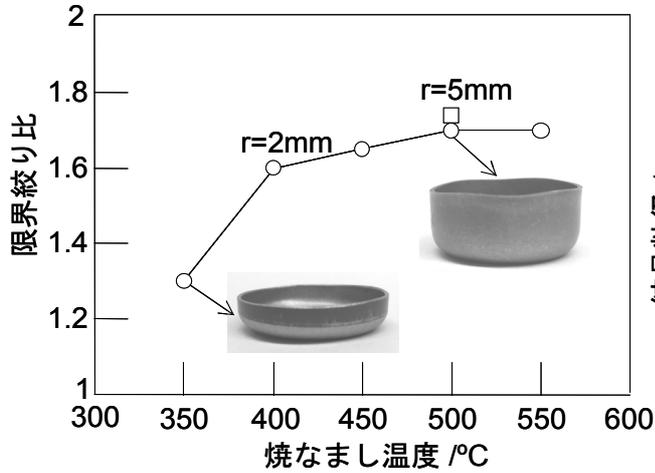


図3 冷間深絞り加工における限界絞り比と焼なまし温度の関係

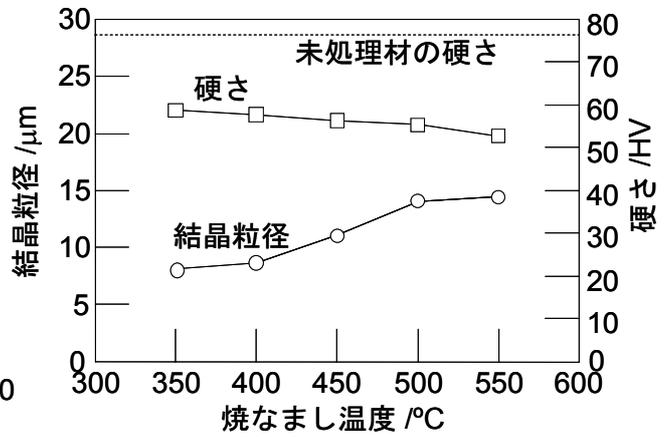


図4 焼なまし温度による結晶粒径と硬さの変化

焼なまし温度を変化させたマグネシウム合金板の常温引張り試験を行った。引張り試験から得られた全伸びと絞りを図5に示す。焼なまし温度による全伸びと絞りの変化は小さいが、図3に示す限界絞り比は大きく変化する。

500°Cの高温焼なまし処理による機械的性質の変化を表1に示す。焼なまし処理を行うことにより、降伏応力、引張強さ、硬さが減少し、全伸び、絞り、n値、r値が増加しており、成形性が向上した。

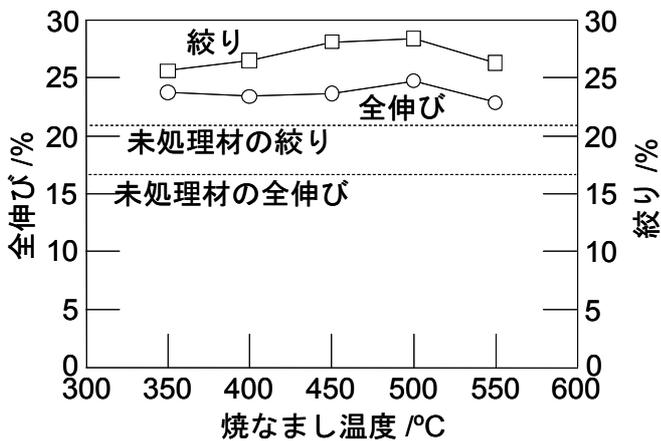


図5 焼なまし温度による全伸びと絞りの変化

表1 焼なまし処理による機械的性質の変化

	焼なましなし	焼なましあり
降伏応力 [MPa]	213	156
引張り強さ [MPa]	273	246
ビッカース硬さ [HV]	61.6	54.6
全伸び [%]	18.1	22.2
絞り [%]	20.8	23.3
n-value	0.14	0.27
r-value	1.34	1.70

## 2.2 潤滑剤

図3に示すように、限界絞り比は焼まし温度 500°C で最大値を示したため、以降の深絞り加工はこの条件で処理した板材に対して実験を行った。潤滑剤には、アルミニウム用油性潤滑剤、二硫化モリブデン、テフロンスプレー、テフロンシートを用いた。アルミニウム用油性潤滑剤、二硫化モリブデン、テフロンスプレーはポンチとの接触面を除いてblank両面に塗布し、テフロンシートはダイ側には全面に、しわ押え側にはしわ押えとの接触面にのみ取り付けて加工を行った。

成形限界時の割れの形態は、図6に示すように潤滑剤によって変化した。二硫化モリブデン、アルミニウム用油性潤滑剤、テフロンスプレーでは、ポンチ肩部において割れが発生し、テフロンシートではフランジ端部において割れが発生した。

各潤滑剤における限界絞り比を図7に示す。アルミニウム用油性潤滑剤、テフロンシート、テフロンスプレーの限界絞り比は 1.65 であったが、二硫化モリブデンを用いた場合では 1.70 と最も大きな限界絞り比が得られた。



図6 潤滑剤による割れ形態の変化

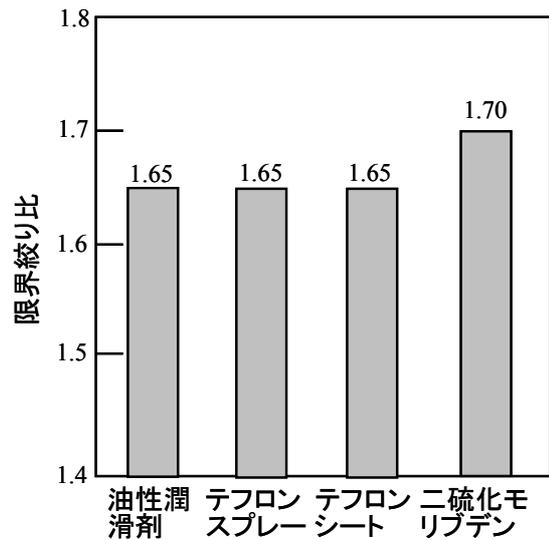


図7 各潤滑剤における限界絞り比

クリアランス  $c=0.6\text{mm}$ 、ポンチ肩半径  $r=2\text{mm}$ 、絞り比  $\alpha=1.65$  における各潤滑剤による成形荷重-ストローク曲線を図8に示す。荷重には二つのピークが現れており、それぞれ絞り荷重と側壁のしごき荷重に対応している。テフロンシートは高い潤滑性能を有しており絞り荷重は最も小さいが、シート厚さ分だけしごき量が増加してしごき荷重が高くなり、フランジ端部に割れが生じたものと考えられる。

## 2.3 クリアランスとポンチ肩半径

クリアランス  $c=0.5, 0.6, 0.7\text{mm}$  の3種類、ポンチ肩半径  $r=2, 5\text{mm}$  の2種類の計6種類に対して深絞り加工を行った。潤滑剤は前節で最も限界絞り比の高かった二硫化モリブデンである。

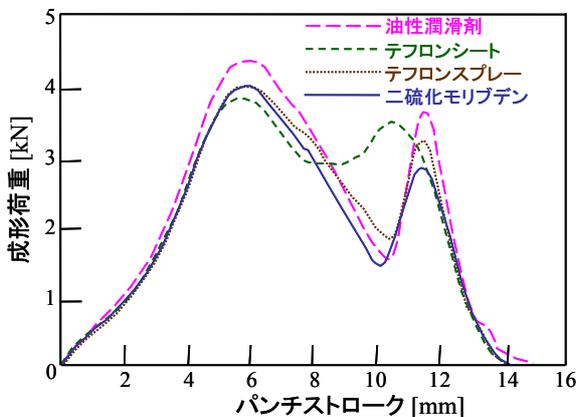


図8  $c=0.6\text{mm}$ 、 $r=2\text{mm}$ 、 $\alpha=1.65$  における成形荷重-ストローク曲線

	$c=0.5\text{mm}$	$c=0.6\text{mm}$	$c=0.7\text{mm}$
$r=2\text{mm}$	 端部引きちぎれ ( $\alpha=1.56$ )	 パンチ肩部割れ ( $\alpha=1.75$ )	 パンチ肩部割れ ( $\alpha=1.77$ )
$r=5\text{mm}$	 端部引きちぎれ ( $\alpha=1.56$ )	 フランジ端部割れ ( $\alpha=1.75$ )	 フランジ端部割れ ( $\alpha=1.75$ )

図9 クリアランスとポンチ肩半径を変化させた場合の各潤滑剤の欠陥発生

クリアランスとポンチ肩半径を変化させた場合の欠陥発生を図9に示す。c=0.5mmでは容器側壁部の大きなしごきによって端部が引きちぎられ、c=0.6, 0.7mmではr=2mmにおいてポンチ肩部、r=5mmにおいてフランジ部でそれぞれ割れが発生した。図6のテフロンシートにおいても割れが発生しているが、マグネシウム合金板の深絞り加工では、フランジ端部から割れが発生する特異な破断形態を生じる。

### 3. 円筒容器の冷間2段プレス成形<sup>8),9)</sup>

#### 3.1 2段成形方法

マグネシウム合金板では、冷間成形性が小さいため、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。そこで、図10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、図(a)に示すような大きな肩半径5mmの円錐パンチを用いて深絞り加工を行って容器を得る。この場合、しごき加工を加えることによって容器の高さを増加させた。次に2段目において、図(b)に示すように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を押すと同時に、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、割れの発生を抑制している。

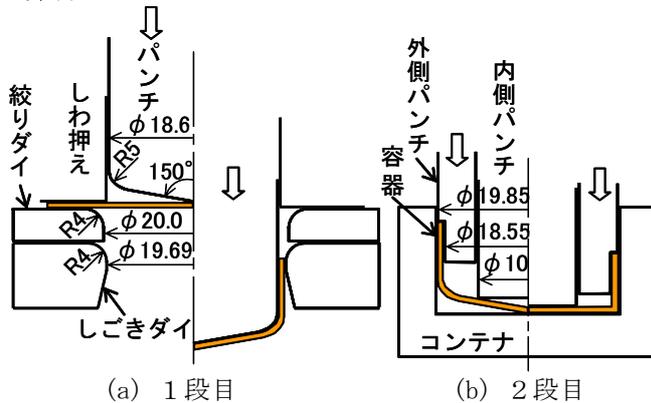


図10 1段目に円錐パンチとしごき加工を用いたマグネシウム合金板の冷間2段プレス成形

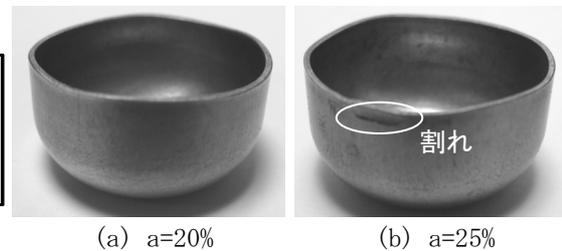


図11 1段目に平頭パンチを用いてしごき率を変化させて成形された円筒容器

#### 3.2 成形結果

1段目において平頭パンチを用いてしごき率を変化させて成形された円筒容器を図11に示す。しごき率a=20%では加工が行えているが、a=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。

円錐パンチ、a=20%における側壁高さおよび底角半径と2段目ストロークsの関係を図12に示す。2段目ストロークの増加とともに側壁高さおよび底角半径は減少する。s=3.5mm以上では、圧縮が過度になって底角部に割れが発生している。

2段成形された円筒容器の断面を図13に示す。円錐パンチを用いてa=20%のしごき加工を加えると、底角半径が0.5mm、側壁高さが7.8mmの容器を成形できた。

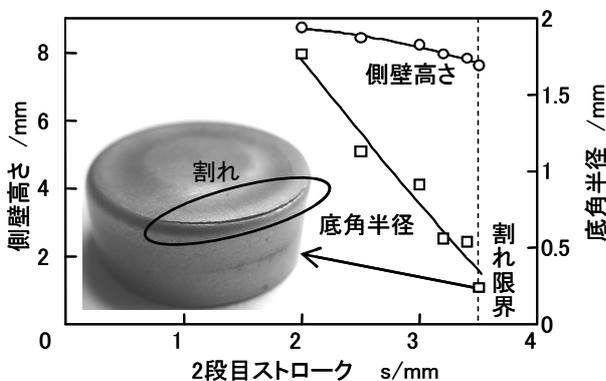


図12 円錐パンチ、a=20%における側壁高さおよび底角半径と2段目ストロークの関係

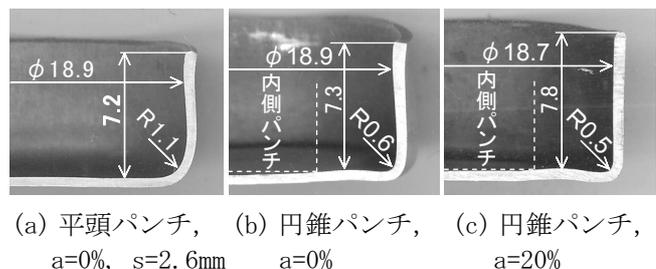


図13 2段成形された円筒容器の断面

円錐パンチ， $a=20\%$ における成形された円筒容器の肉厚ひずみと硬さ分布を図 14 に示す．1 段目では深絞り加工によって角部で肉厚が小さくなっているが，2 段目の圧縮加工において，肉厚減少が回復している．2 段目において硬さはほとんど変化しない．

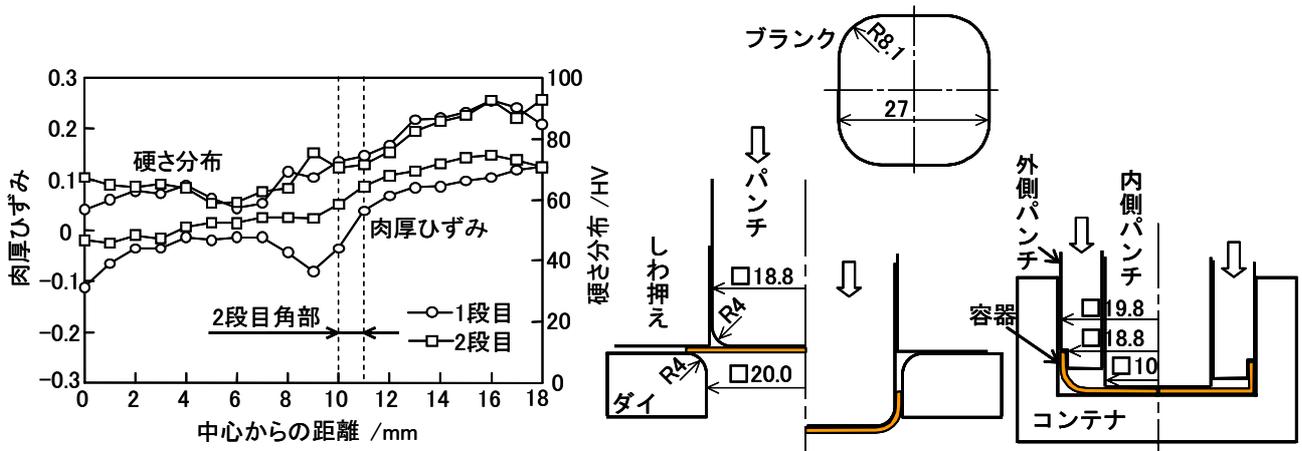


図 14 円錐パンチ， $a=20\%$ における成形された円筒容器の肉厚ひずみと硬さ分布

(a) 1 段目 (b) 2 段目  
図 15 マグネシウム合金板の 2 段角筒成形における工具とブランク

#### 4. 角筒容器の冷間 2 段プレス成形

マグネシウム合金板の角筒容器の冷間 2 段プレス成形を行い，その工具とブランクを図 15 に示す．ブランクは正方形の角部を円形にカットしたものである．角筒容器の 1 段目成形では，平頭パンチを用い，しごき加工は加えなかった．

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図 16 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．

1 段成形された角筒容器を図 17 に示す．2 段目において圧縮加工を行うことによって底角半径を小さくするだけでなく，側壁高さも均一になっている．2 段プレス成形は角筒容器の成形に有効であることが分る．



(a) 絞り比 1.44 (b) 絞り比 1.49

図 16 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



図 17 2 段プレス成形された角筒容器

2段成形された角筒容器の平行方向断面を図18に示す。底角半径の小さな角筒容器が成形されている。

2段成形された角筒容器の平行方向断面の肉厚ひずみと硬さ分布を図19に示す。2段目において肉厚ひずみはほとんど変化しないが、硬さは2段目において角部で上昇している。

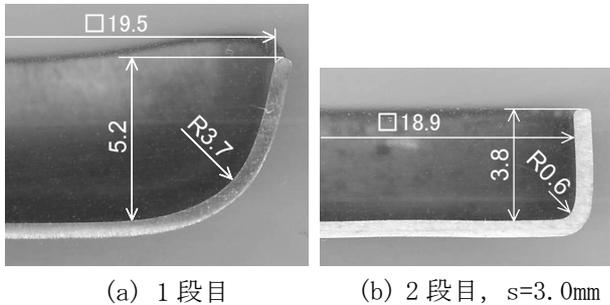


図18 2段プレス成形された角筒容器の平行方向断面

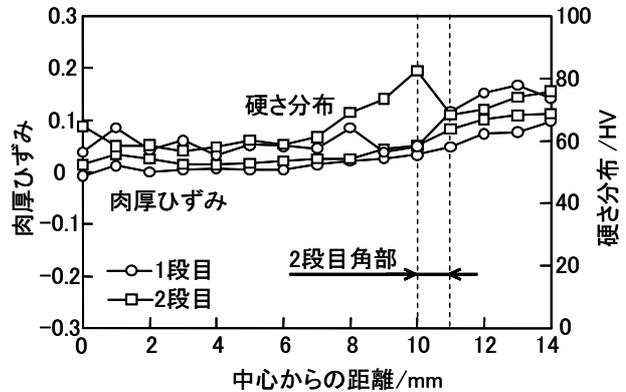


図19 2段成形された角筒容器の平行方向断面の肉厚ひずみと硬さ分布

## 5. あとがき

プレス成形は冷間で行うのが一般的であり、金型にヒーターを組込むノウハウを成形メーカーが蓄積していないため、温間プレス成形はほとんど普及していないのが現状であり、これがマグネシウムのプレス成形が余り採用されていない原因の一つである。マグネシウム合金においても通常の冷間プレス成形が適用できるようになれば、プレス成形の普及が加速されてマグネシウム合金製品のコストが低下し、製品の適用が飛躍的に拡大すると思われる。マグネシウム合金板の冷間プレス成形は困難であるとされており、まだ実用化されていないが、本報告では実用化の可能性を示した。マグネシウム合金は電子・電気機器のケースとして多く用いられているが、比較的浅い部品も多く、絞り比1.7まで成形できると浅絞り製品には適用可能である。また、2段プレス成形を用いると、ノートパソコンの筐体のような比較的浅い角筒容器が冷間で成形できる可能性を示した。本報告で示した知見を参考にして、素材メーカーが冷間プレス成形に適したマグネシウム合金板を製造することが望まれる。

## 参考文献

- 1) 林央：プレス技術，43-7（2005），18-26.
- 2) 戸澤康壽：軽金属，51-10（2001），492-497.
- 3) 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.
- 4) 大年和徳・長山知史・勝田基嗣：軽金属，53-6（2003），239-244.
- 5) 渡辺博行・向井敏司・鈴木桂介・鈴木亨：軽金属，53-2（2003），50-54.
- 6) 森謙一郎・辻浩和：塑性と加工，48-552（2007），41-45.
- 7) K. Mori and H. Tsuji: Annals of the CIRP, 56-1(2007), 285-288.
- 8) 森謙一郎・西島進之助・陳振裕：平成19 塑加春講論，（2007），151-152.
- 9) 森謙一郎・西島進之助・陳振裕：第57 塑加連講論，（2007），245-246.

## 市販マグネシウム合金板の冷間深絞り加工

豊橋技術科学大学 森 謙一郎

平成19年

100kg軽量:1km/l燃費向上

- マグネシウム (1.8)
- 高張力鋼板 (7.8)
- アルミニウム (2.7)
- チタン (4.5)



## 金属板材の比較

板材	引張強さ	比重	比強度	コスト(1kg当り)	生産量
ウルトラハイテン	980~1470MPa	7.8	126~188MPa	100円程度	鉄:12億ton
従来ハイテン	490~790MPa	7.8	63~101MPa		
軟鋼板 SPCC	340MPa	7.8	44MPa		
アルミ合金板 A6061(T6処理)	310MPa	2.7	115MPa	500円~600円	アルミ:3400万ton
マグネシウム合金板 AZ31	270MPa	1.8	137MPa	3000円程度	マグネ:60万ton

炭素繊維:数千円/kg

## マグネシウム合金部品の製造

○ダイカスト

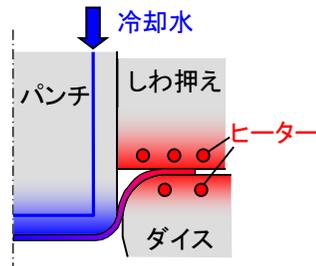
↓  
薄肉化, 高強度化  
生産性向上

○プレス成形

〔 温間(200~300°C):装置複雑  
冷間 :成形性低 〕

↓  
冷間での成形性向上

温間プレス成形品



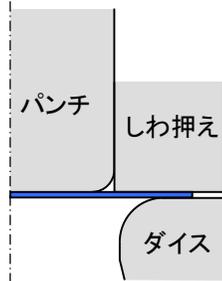
1. マグネシウム合金板の機械的特性
2. 冷間円筒・角筒深絞り加工
3. 小さな底角半径を持つ円筒容器の冷間2段プレス成形法
4. 小さな底角半径を持つ角筒容器の冷間2段プレス成形法

## 市販マグネシウム合金板の冷間深絞り加工

### 展伸用材

AZ31マグネシウム合金板, 0.5mm

(mass%)		
Al	Zn	Mn
2.5~3.5	0.7~1.3	0.20~0.35



市販材に対し、冷間において  
深絞り加工を行う



成形性の評価  
成形性の向上

### 焼なまし処理による成形性の変化 (絞り比=1.32)

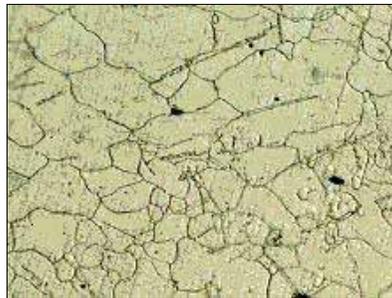


(a) 焼きなまし無し

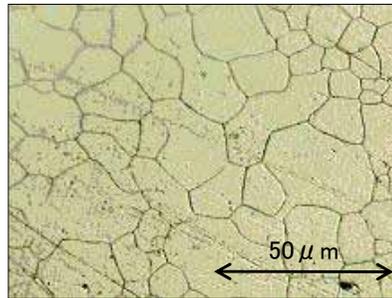


(b) 焼きなまし有り(500°C, 1h)

### 焼なまし処理による組織の変化

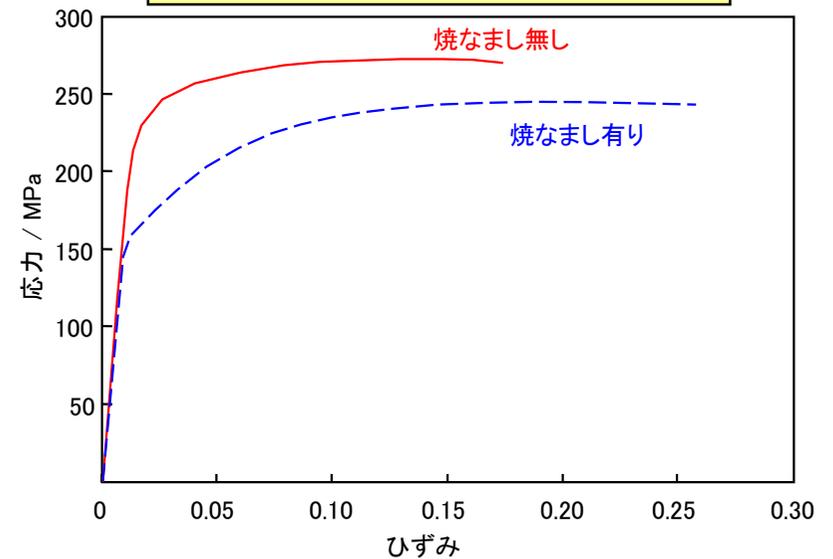


(a) 焼きなまし無し



(b) 焼きなまし有り

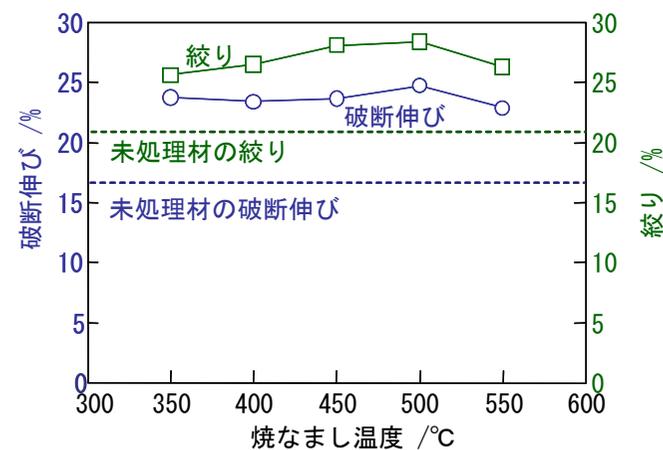
### 応力-ひずみ線図



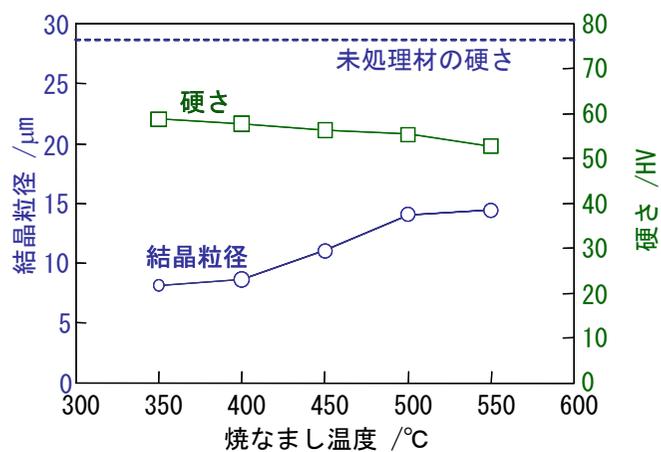
### マグネシウム合金板の機械的性質

	焼なまし無し	焼なまし有り 500°C, 1h
耐力 / MPa	214	153
引張強さ / MPa	274	247
ビッカース硬さHv	61.6	55.5
伸び / %	17.6	22.4
r値	1.33	1.50
n値	0.14	0.32
絞り比 = 1.32		

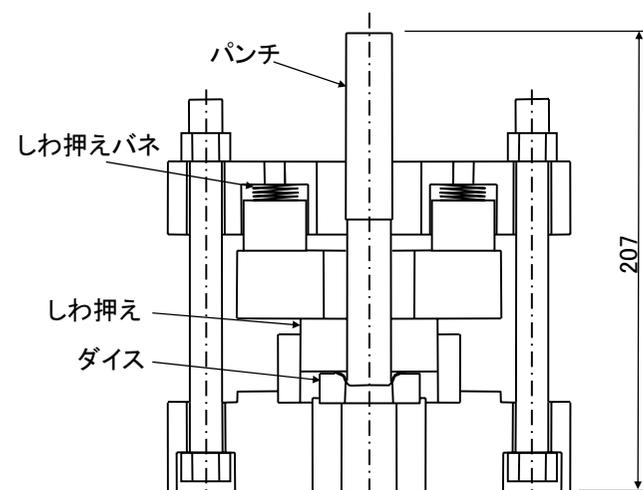
### 破断伸びおよび絞りと焼なまし温度の関係



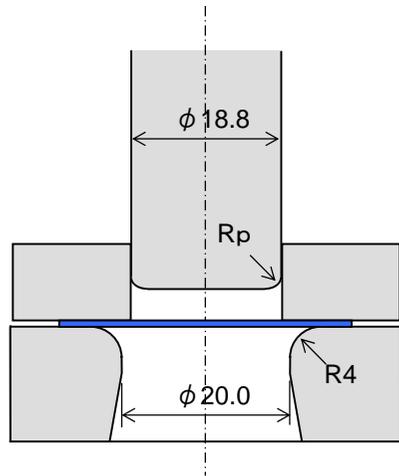
### 結晶粒径および硬さと焼なまし温度の関係



### 深絞り実験装置



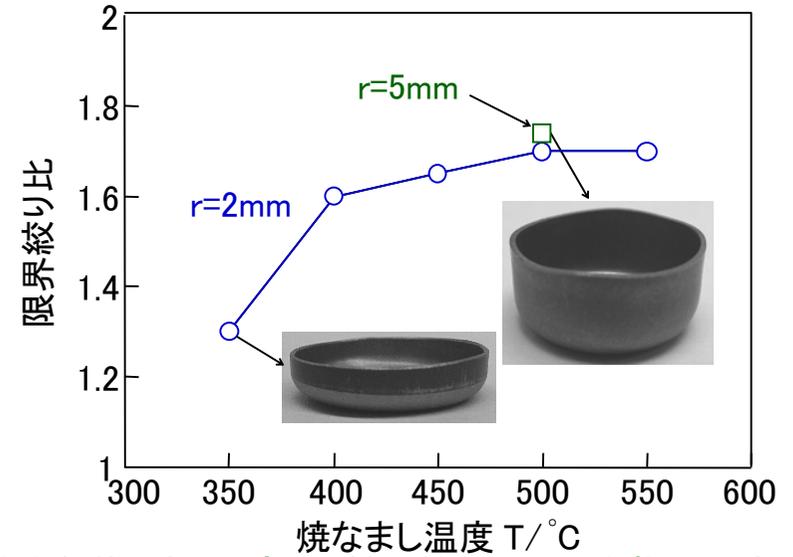
### 冷間円筒深絞り加工条件



パンチ肩半径  $R_p=2, 5\text{mm}$   
 板厚  $t=0.5\text{mm}$   
 潤滑剤: 二硫化モリブデン

ブランク直径を1mmずつ変化  
 限界絞り比

### 限界絞り比と焼なまし温度の関係



集合組織, すべり変形, 結晶粒径, Mn化合物の固溶

1. マグネシウム合金板の機械的特性
2. 冷間円筒・角筒深絞り加工
3. 小さな底角半径を持つ円筒容器の冷間2段プレス成形法,
4. 小さな底角半径を持つ角筒容器の冷間2段プレス成形法

### 冷間円筒深絞り加工条件

パンチ	パンチ直径 $D_p$ / mm	18.6, 18.8, 19.0
	パンチ肩半径 $R_p$ / mm	2, 5
	クリアランス / mm	0.5, 0.6, 0.7
ダイス	ダイス直径 $D_d$ / mm	20
	ダイス肩半径 $R_d$ / mm	4
ブランク板厚 / mm		0.5
パンチ速度 / $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$		15
しわ押え力 / kN		1
潤滑剤	アルミニウム用油性潤滑剤 二硫化モリブデン テフロンシート ( $t=0.05\text{mm}$ ) テフロンプレー	

### 円筒容器外観写真



(a) 割れ無  
(Rp=2mm, r=1.70)



(b) 割れ無  
(Rp=5mm, r=1.70)



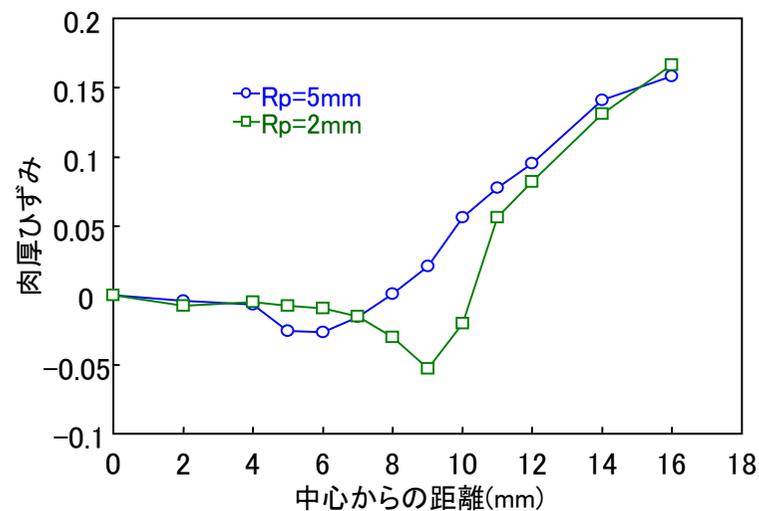
(c) パンチ肩部での割れ  
(Rp=2mm, r=1.75)



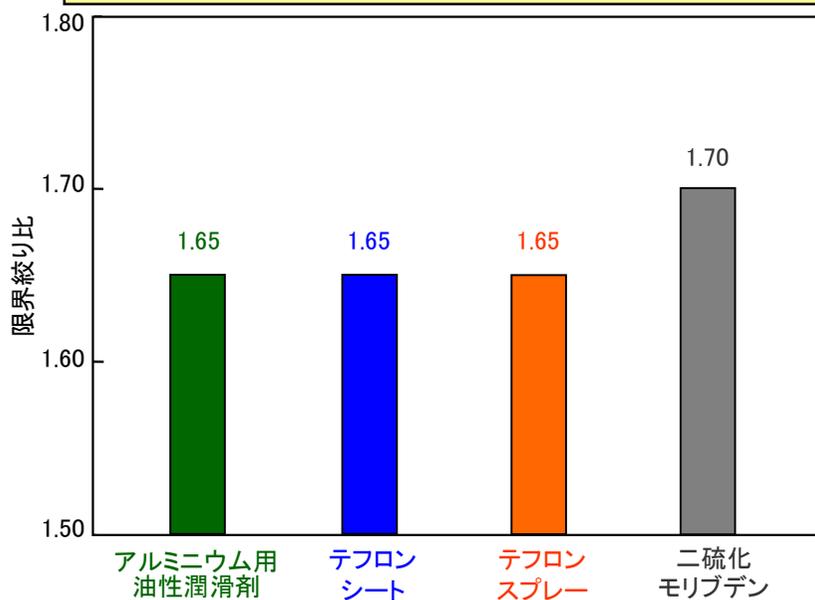
(d) フランジ端部での割れ  
(Rp=5mm, r=1.75)

10mm

### 各パンチ形状での肉厚ひずみ分布(r=1.65)



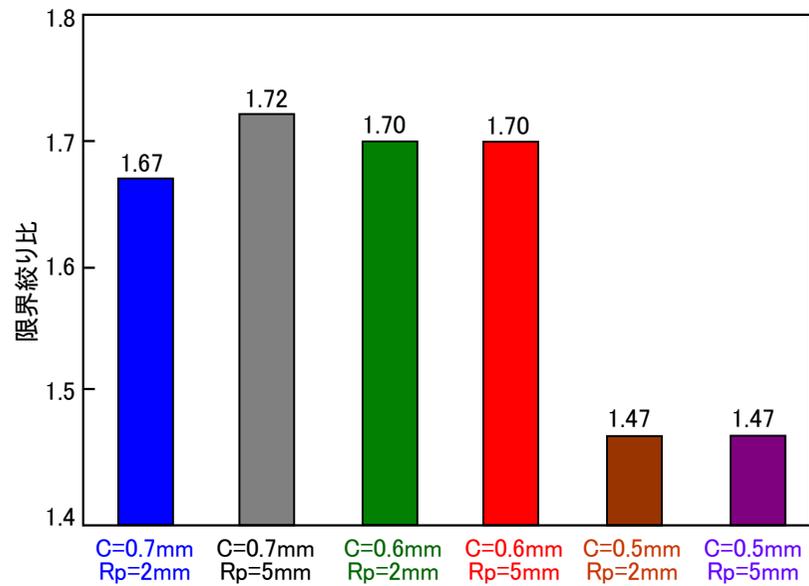
### 各潤滑剤での限界絞り比(C=0.6mm, Rp=2mm)



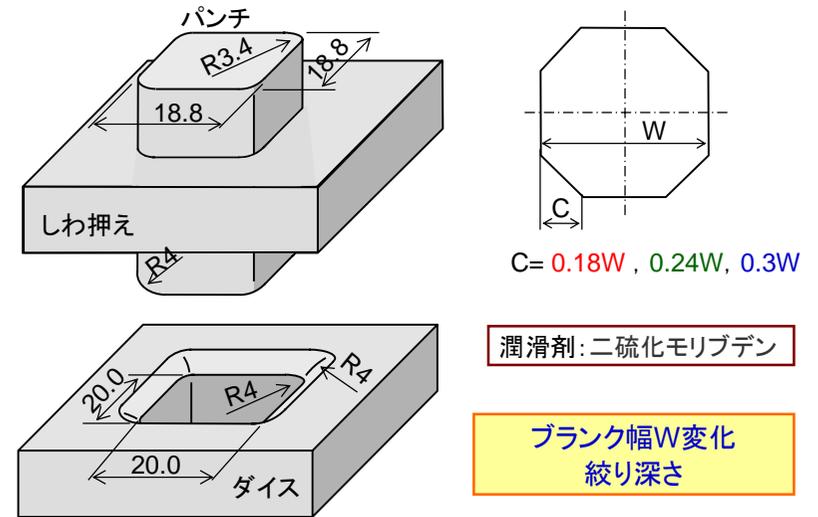
### 割れの形態

	C=0.5mm	C=0.6mm	C=0.7mm
Rp=2mm	<p>剥れ (r=1.56)</p>	<p>肩割れ (r=1.75)</p>	<p>肩割れ (r=1.77)</p>
Rp=5mm	<p>剥れ (r=1.56)</p>	<p>フランジ割れ (r=1.75)</p>	<p>フランジ割れ (r=1.77)</p>

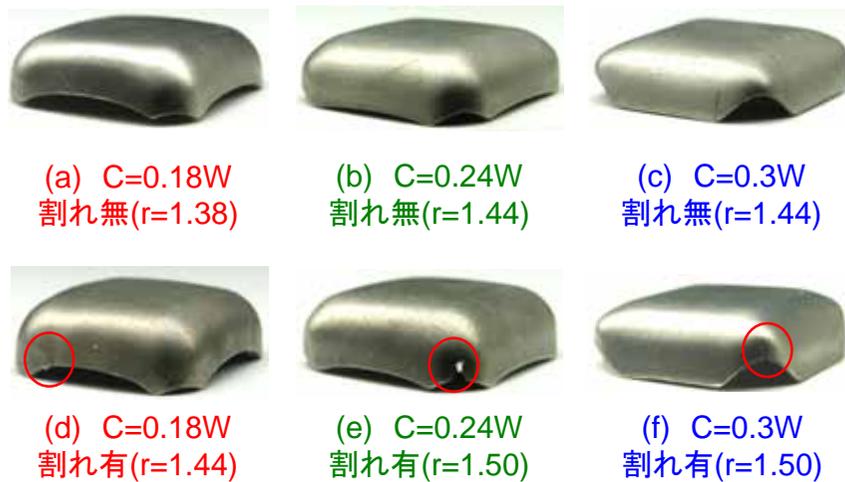
### 各パンチ形状における限界絞り比



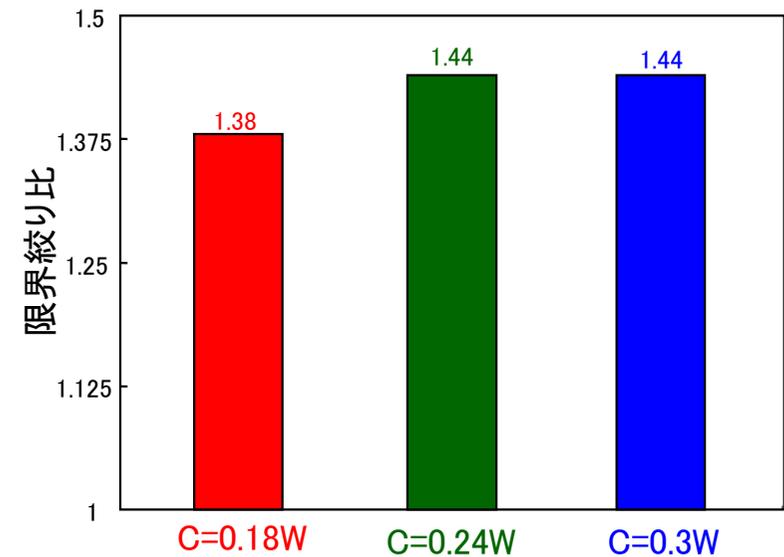
### 冷間角筒深絞り加工条件



### 角筒容器外観

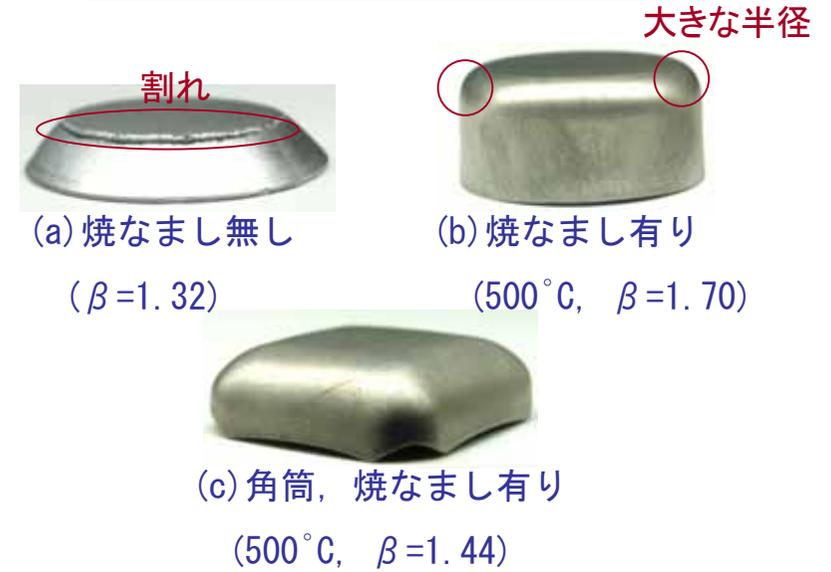


### 各ブランク形状の限界絞り比

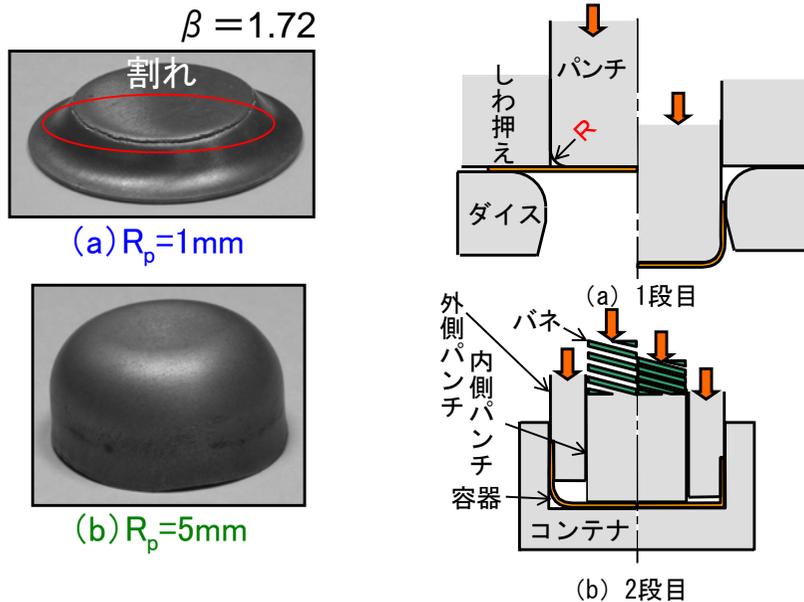


1. マグネシウム合金板の機械的特性
2. 冷間円筒・角筒深絞り加工
3. **小さな底角半径を持つ円筒容器の冷間2段プレス成形法**
4. **小さな底角半径を持つ角筒容器の冷間2段プレス成形法**

これまでの冷間深絞り加工実験結果



角半径減少のための冷間2段プレス成形



実験条件

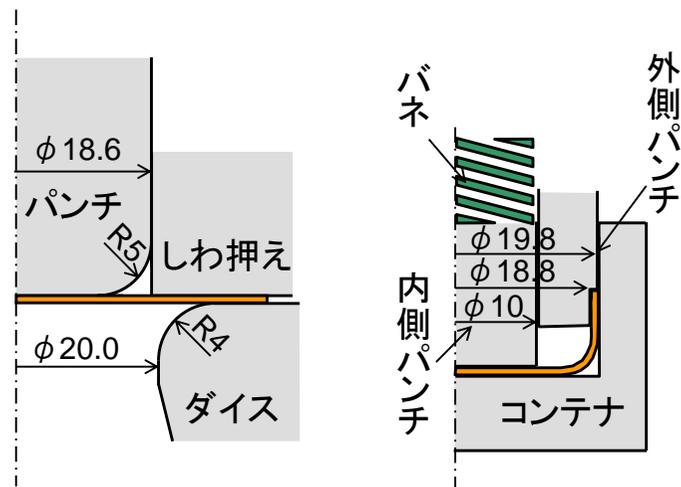
試験材料  
AZ31マグネシウム合金板  
(mass%)

Al	Zn	Mn
2.90	0.95	0.36

板厚  $t=0.5\text{mm}$       潤滑剤:  
二硫化モリブデン

焼なまし温度	$500^{\circ}\text{C}$
保持時間	1時間
パンチ速度	10mm/min

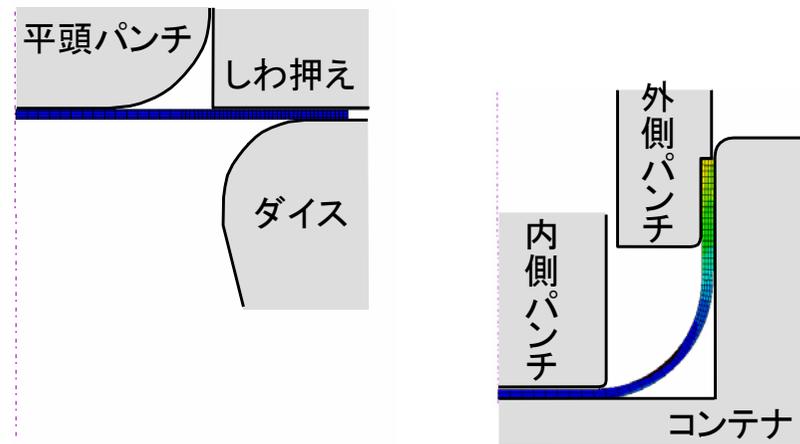
平頭パンチを用いた冷間2段プレス成形



(a) 1段目

(b) 2段目

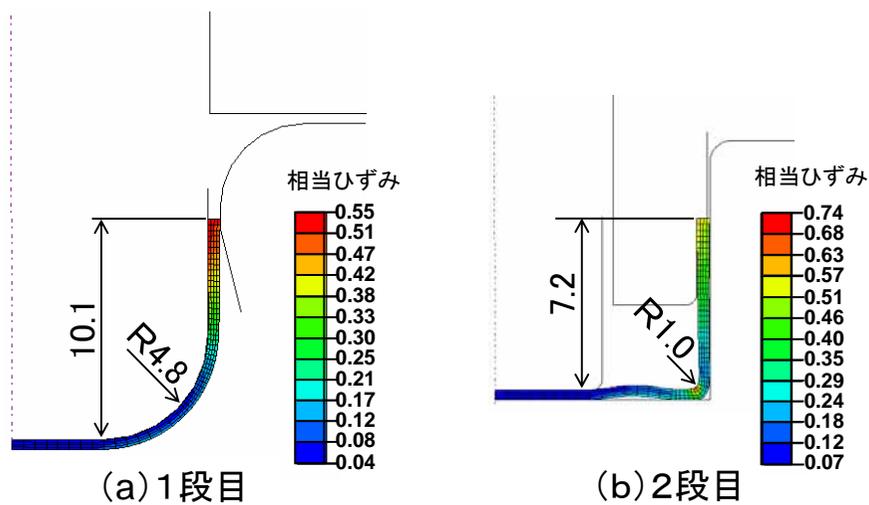
平頭パンチを用いた冷間2段成形有限要素シミュレーション結果



(a) 1段目

(b) 2段目

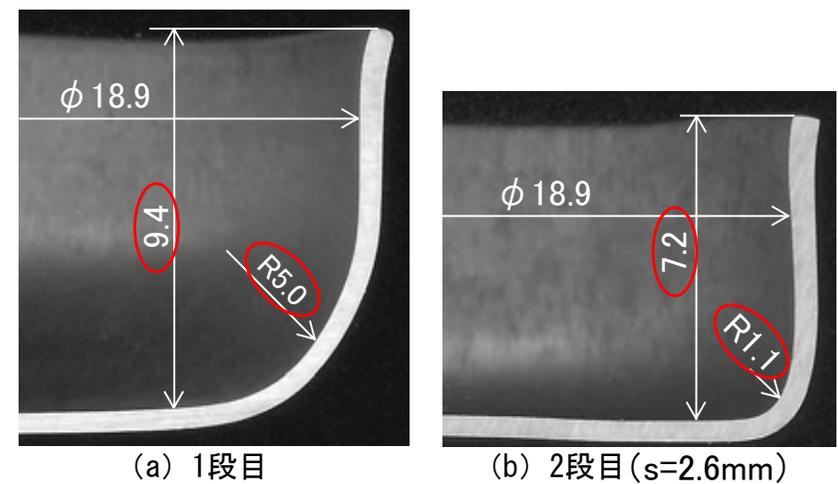
平頭パンチを用いた冷間2段成形有限要素シミュレーション結果



(a) 1段目

(b) 2段目

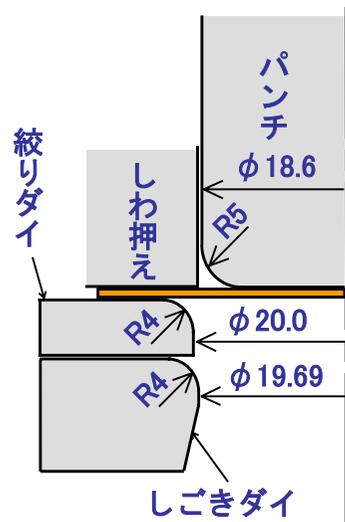
平頭パンチを用いた冷間2段成形による容器断面形状実験結果



(a) 1段目

(b) 2段目 (s=2.6mm)

側壁高さ増加のためのしごき加工

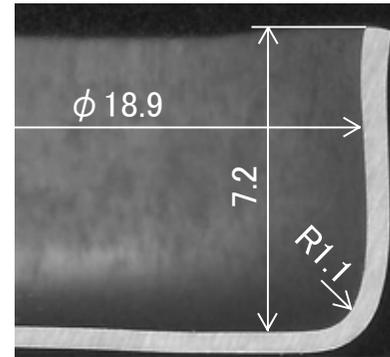


(a) a=20%

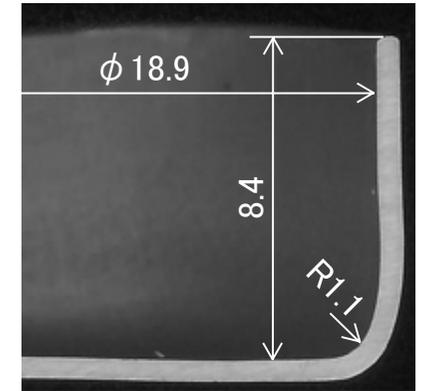


(b) a=25%

平頭パンチおよび平頭パンチとしごき加工を用いた冷間2段成形後の断面形状の比較

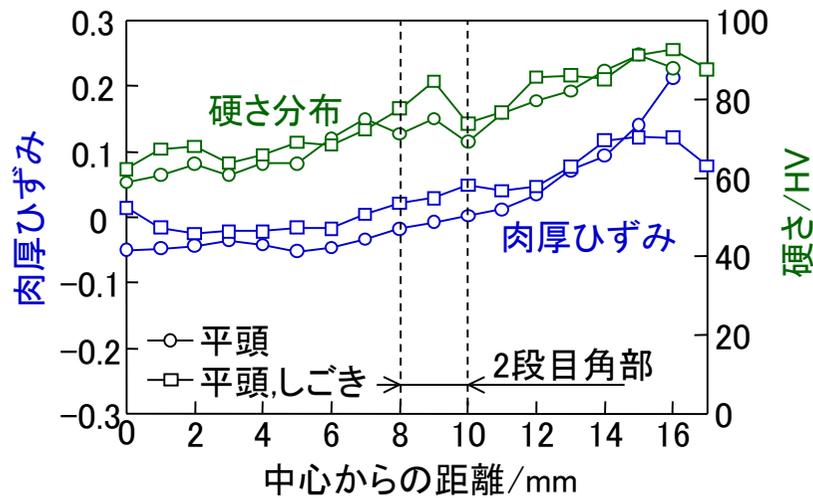


(a) 平頭パンチ  
(s=2.6mm)



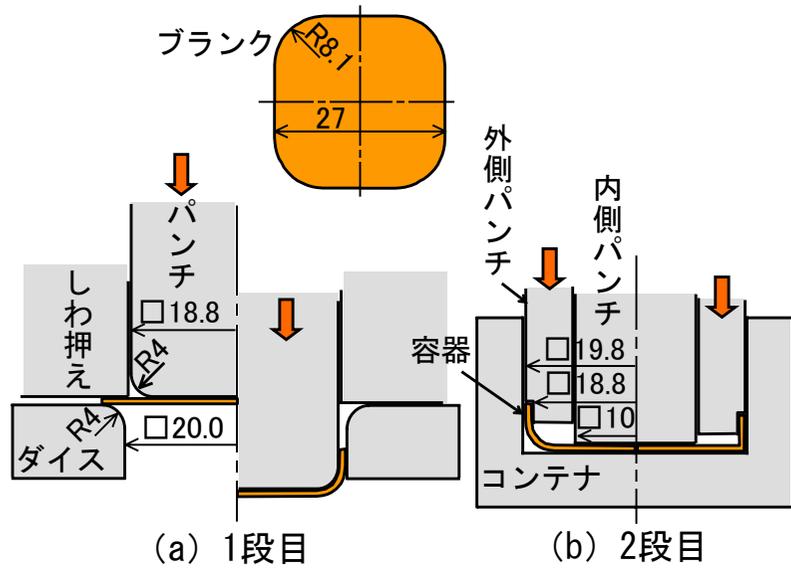
(b) 平頭パンチ, 20%しごき  
(s=2.8mm)

肉厚ひずみおよび硬さ分布の比較



1. マグネシウム合金板の機械的特性
2. 冷間円筒・角筒深絞り加工
3. 小さな底角半径を持つ円筒容器の冷間2段プレス成形法,
4. 小さな底角半径を持つ角筒容器の冷間2段プレス成形法

角筒容器の冷間2段成形



(a) 1段目

(b) 2段目

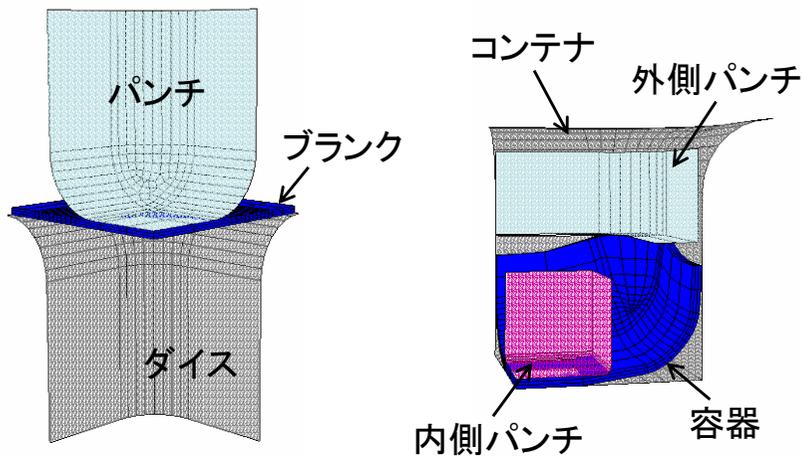
角筒容器の限界絞り比



(a)  $\beta = 1.44$

(b)  $\beta = 1.49$

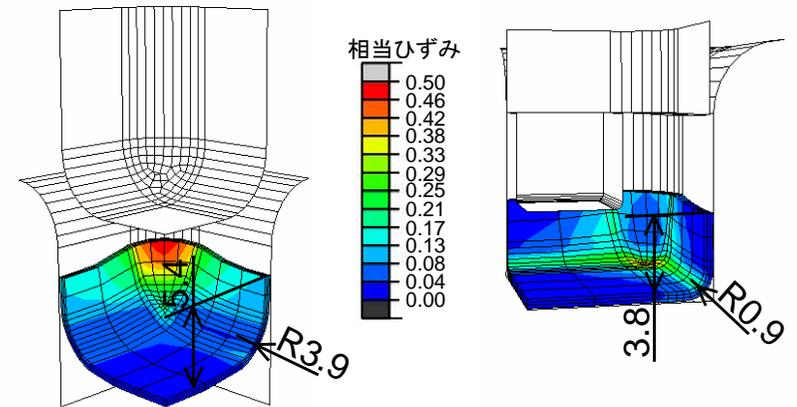
平頭パンチを用いた冷間2段角筒成形  
有限要素シミュレーション結果



(a) 1段目

(b) 2段目

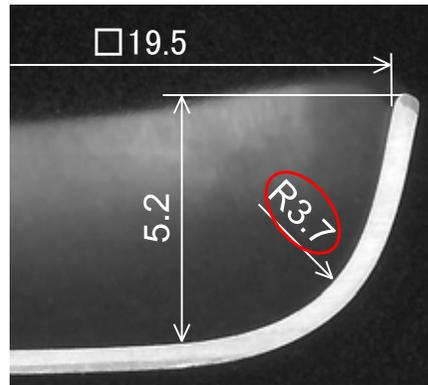
平頭パンチを用いた冷間2段角筒成形  
有限要素シミュレーション結果



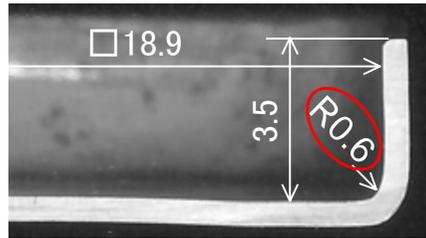
(a) 1段目

(b) 2段目

2段成形された角筒容器の平行方向断面実験結果

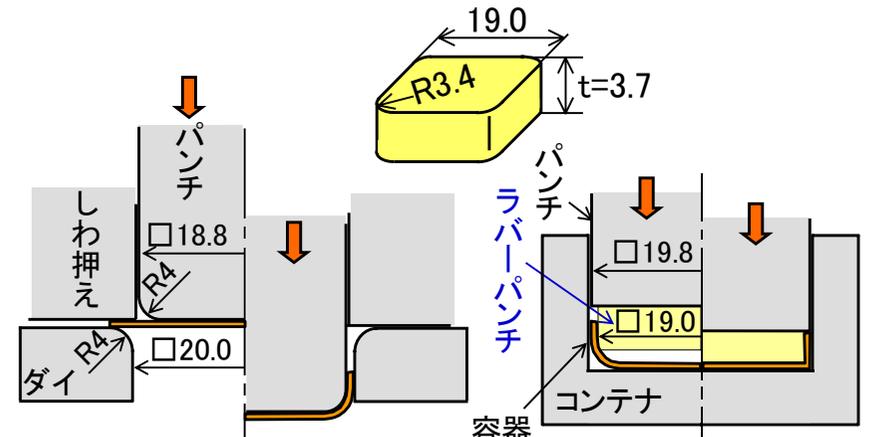


(a) 1段目



(b) 2段目 (s=2.8mm)

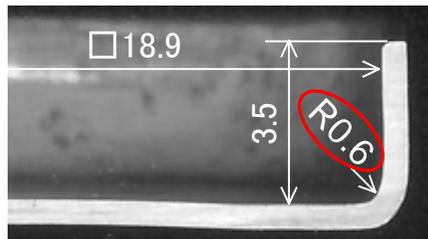
2段目にラバーパンチを用いた角筒容器の冷間2段プレス成形



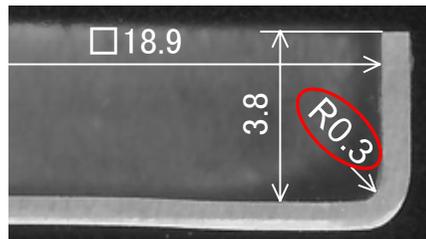
(a) 1段目

(b) 2段目

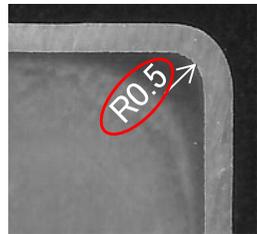
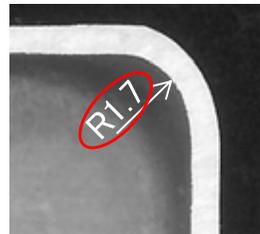
角筒容器の精度向上実験結果



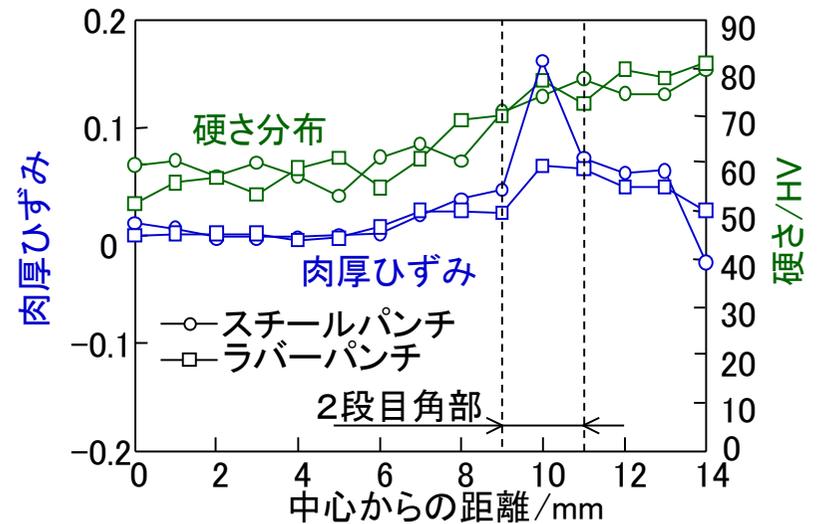
(a) スチールパンチ  
(s=2.8mm)



(b) ラバーパンチ  
(s=3.0mm)



スチールパンチとラバーパンチの硬さ分布および肉厚ひずみの比較



## まとめ

1. 市販AZ31マグネシウム合金板に高温焼なまし処理を行うことによって、冷間深絞り加工ができた。
2. 円筒容器の冷間2段成形を行い底角半径を大幅に減少できた。
3. 角筒容器の冷間2段成形を行い、パソコン筐体のような比較的浅いマグネシウム合金製容器が、冷間で成形できる可能性を示した。