

マグネシウム合金のプレス加工

日本工業大学 機械工学科
 教授 古閑伸裕
 (平成12年度研究開発助成 AF-2000013)

キーワード：マグネシウム合金，プレス加工，深絞り，工具アール，LDR，サイジング，コーティング

1. 研究の目的と背景

軽量化やリサイクル性向上などの観点からマグネシウム (Mg) 合金が注目を集めている。現在、Mg 合金はチクソモルディングやダイカストによる成形が主流であるが、今後大量生産が予想される家電品や自動車などの部品に Mg 合金が採用される場合は、生産効率のよい深絞りや鍛造などのプレス加工による成形が主流になると予想される。

しかし、Mg 合金のプレス成形に関しては、これまで成形例が極めて少ない。例えば、家電品の筐体などの成形法として深絞り加工があるが、工具アール（パンチ先端アールやダイ肩アールなど）の成形限界に及ぼす影響などの基礎データが乏しい。このため新たに成形を行う場合は、まずトライ&エラーにより適正な工具アールなどの選定が強いられる。また、Mg 合金はその結晶構造から、冷間（室温）では塑性変形能が極めて低いため温間での加工が行われるため、冷間での加工に比べ潤滑剤の制限が厳しくなる。さらには同合金は成形速度（ひずみ速度）の影響を受けやすい材料であるため、加工速度の成形限界に及ぼす影響が大きいことから、成形速度の適正条件の選定が不可欠である。

本研究では、円筒深絞り加工におけるパンチ先端アールやダイ肩アール、角筒深絞り加工における工具コーナアールの成形限界に及ぼす影響を調査するとともに、サイジングによる小先端アール、コーナアール容器の製作の可能性について検討する。さらに Mg 合金のプレス（深絞り）加工の実用化をする際に解決しなければならない大きな問題とされている潤滑に関し、申請者らが提案した、硬質膜コーテッド工具と環境に優しい水分散系プレコート潤滑剤（一般的なアルカリ洗浄剤で容易に脱脂が可能な潤滑剤）とを併用した潤滑方法¹⁾による角筒容器の連続深絞り成形試験を実施し、この潤滑方法の実用性を検討する。

2. 円筒容器の深絞りにおける工具アールの影響

2.1 実験条件および方法

図1に示す構造の外径φ30mm円筒容器深絞り実験金型を用い、表1に示すパンチ先端アール (Rp) とダイ肩アール (Rd) のそれぞれの組合せ工具による深絞り実験を行い、Rp と Rd の限界絞り比 (LDR) に及ぼす影響を調査検討する。この場合、被加工材の加熱温度は、これ

までの研究結果²⁾から実用的な絞り比が得られ、工具の酸化防止などの観点からも適正な温度と判断できた $T=520\text{K}$ とし、しわ押え力は 5 kN 一定とする。成形速度 V は、実用的な成形速度と考えられる $V=30\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ を主とし、一部条件で $V=2.5\sim 20\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ での実験も行う。また、潤滑剤には温間域でも潤滑性能が十分発揮できる水分散系プレコート潤滑剤（コスモ石油ルブリカンツ製試作油、被加工材にはけ塗りした後、自然乾燥させて使用するタイプ）を使用する。

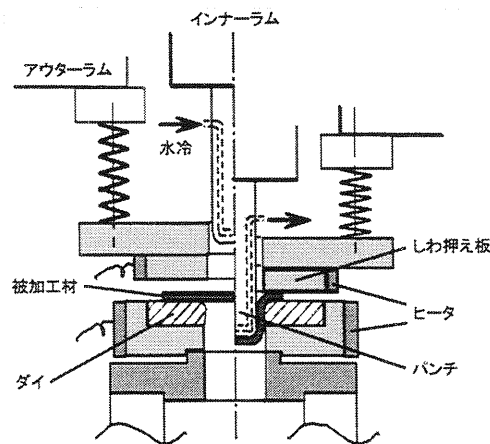


図1 円筒深絞り金型の構造概略図

表1 円筒深絞り工具の先端アールと肩アール

パンチRp (mm)	1, 2, 3, 4, 5
Rp/t(t=0.5mm)	2, 4, 6, 8, 10
Rp/t(t=0.9mm)	1.1, 2.2, 3.3, 4.4, 5.6
ダイRd (mm)	0.5 (t=0.5mmのみ使用), 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10
Rd/t(t=0.5mm)	1, 2, 4, 6, 8, 10, 14, 20
Rd/t(t=0.9mm)	1.1, 2.2, 3.3, 4.4, 5.6, 7.8, 11.1

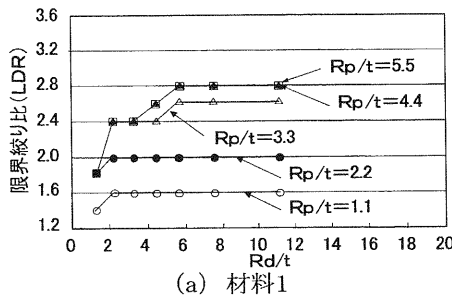
被加工材には、表2に示す機械的性質と化学成分の3種類のAZ31-0 Mg合金板を用いる。材料1はビレット材から圧延加工により板厚 $t=0.9\text{mm}$ の厚さまで圧延された板材であり、材料2は約 $t=1\text{mm}$ の押し出し材を $t=0.9\text{mm}$ まで圧延したもの、そして材料3は、材料2と同様の押し出し材から $t=0.5\text{mm}$ の厚さまで圧延加工された板材である。

表2 被加工材の機械的性質と化学成分

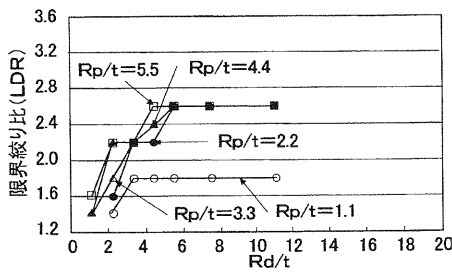
材料番号	引張強さ	0.2%耐力	伸び(G.L=50mm)	
材料1	245MPa	141MPa	25%	
材料2	263MPa	172MPa	22%	
材料3	246MPa	201MPa	17%	
材料1 (vol%)	Al	Zn	Mn	Fe
	2.7	0.9	0.47	0.004
	Si	Cu	Ni	Mg
	< 0.05	< 0.01	< 0.005	残
材料2	Al	Zn	Mn	Fe
	3.166	0.919	0.412	0.005
	Si	Cu	Ni	Mg
	< 0.05	< 0.01	< 0.005	残

2.2 実験結果および考察

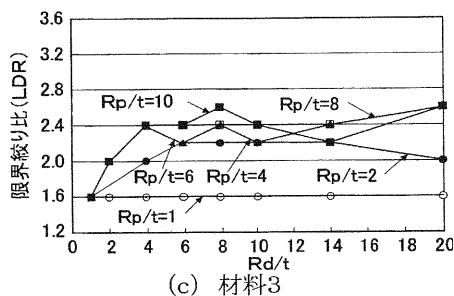
図2 (a) ~ (c) に各種AZ31-O材 (材料1~材料3) のLDR 調査結果を示す。材料1の場合 (図2 (a)) はRp (Rp/t) の増加とともに限界絞り比 (LDR) が向上する傾向が見られた。また、Rp/tが1.1や2.2と小さな条件ではRd/tが2以上で、Rp/tが4.4と5.6の比較的大きな条件ではRd/tが6以上で、それぞれRd/tを大きくしてもLDRがほぼ一定値となるRd/tの臨界値が存在することがわかった。この臨界値はやや異なるものの、Rp/tやRd/tの変化に伴うLDRに対する影響は鋼板の深絞りにおける結果³⁾ (鋼板の場合の臨界値は4付近) とほぼ同様の傾向を示すことがわかった。これに対し、材料2と材料3では、Rp/t=1ではRp/t≥2の条件に比べLDR



(a) 材料1



(b) 材料2



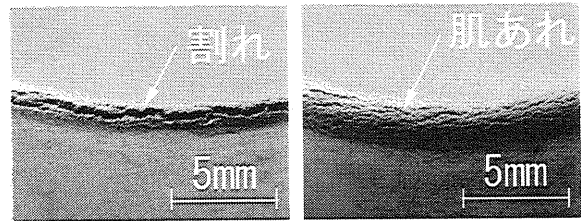
(c) 材料3

図2 工具アールのLDRに及ぼす影響

が急激に低下するが、Rp/t≥2ではLDRが大きく向上しRp/tの増加に伴うLDRの変化はほとんど認められなかった。また、いずれのRp/tにおいてもRd≥6でLDRがほぼ一定となることがわかった。ただし、いずれのMg合金においてもRp/t=1 (および1.1) で成形された容器には、図3 (a) に示すようにパンチの肩アール部に相当する成形品のアール部に割れが発生し、Rp/t=2 (および2.2) の場合には同図(b) に示すように肌あれが発生する現象が認められた。

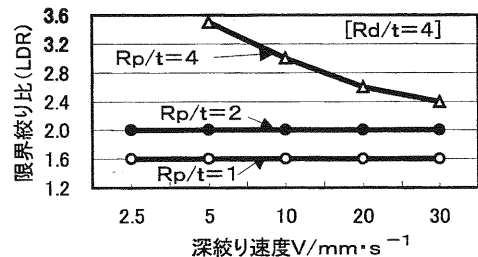
つぎに、Mg合金板材の場合は成形速度 (ひずみ速度) の成形限界に及ぼす影響が極めて大きいことから、成形速度を遅くすれば小さな肩アールでも不良発生のない成形品が得られるのではないかと考え、材料3について各種成形速度でのLDRと不良発生の有無を調査した。しかし、この場合も、図4に示すように、Rp/tやRd/tが1や2の条件の場合は成形速度を遅くしてもLDRの顕著な向上は認められず、Rp/t=1, 2で得られた成形品にはV=30mm・s⁻¹の場合と同様に、いずれの速度で得られた成形品にも割れや肌あれの不良発生が認められた。

以上の結果から、割れや肌あれなどの不良発生のない成形品を得るためにはRp/t≥4の条件設定が必要であること、また成形速度を遅くしても、Rp/t≤2, Rd/t≤2の工具条件では割れや肌あれの不良発生が防止できないことがわかった。

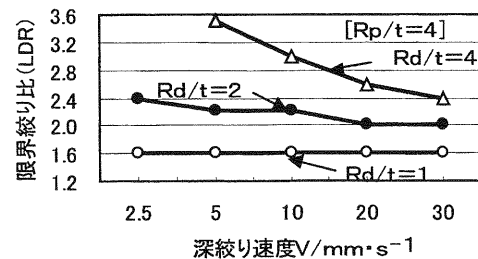


(a) 割れ (b) 肌あれ

図3 製品不良が発生した容器先端アール部



(a) 各種RpにおけるVのLDRに及ぼす影響



(b) 各種RdにおけるVのLDRに及ぼす影響

図4 成形速度と工具アールのLDRに及ぼす影響

3. 角筒容器の深絞り加工におけるコーナールの影響

3.1 実験条件および方法

図5に示す、一辺が38.8mmのパンチと、40mmのダイの3対のコーナール組合せ工具を、2章の円筒深絞り金型と同様の構造の金型内にそれぞれセットし、角筒（正方形）容器の深絞り実験を行う。この場合、成形深さの最大値は $h = 20\text{mm}$ とし、成形速度は $V = 5 \sim 30\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ とする。また、成形温度は $T = 520\text{K}$ 一定とし、潤滑剤には2章の深絞り実験でも用いた水分散系プレコート潤滑剤を用いる。

被加工材には、2章の実験で用いた材料3と同一のAZ31-O Mg合金板（板厚 $t = 0.5\text{mm}$ ）を用い、正方形ブランク（ブランクA）と、このブランクAの四隅をカットしたブランク（ブランクB）の2種類のMg合金製ブランクを作成し、それぞれについて所定の深さ（ h ）の角筒容器をそれぞれ製作する。

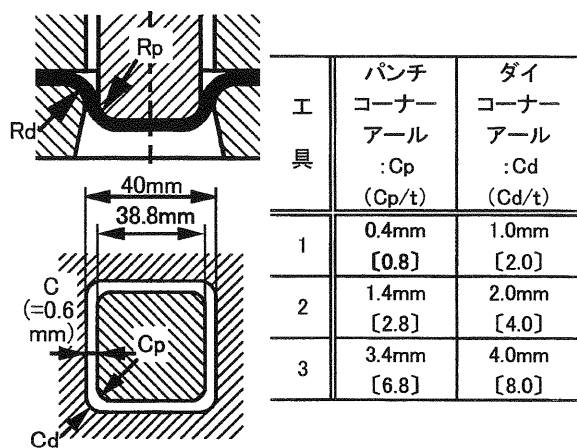


図5 角筒深絞り工具の寸法

3.2 実験結果および考察

まず、2章の円筒容器成形実験で割れや肌あれなどの製品不良の発生がなく成形が行えた、 $R_p/t = 4$, $R_d/t = 4$ 一定の条件下で、ブランクAを用い上記それぞれの工具（コーナール）による深絞り加工を行った。その結果、図6に示すように、実用的な成形速度と考えられる $V = 30\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ においてもパンチコーナール $C_p = 0.4\text{mm}$ ($C_p/t = 0.8$) という極めて小さなコーナールの角筒容器が成形できることがわかった。また、この成形品には割れや肌あれの不良発生は認められなかった。

そこでつぎに、各種家電品の筐体などの製作を想定し、被加工材板厚と同程度のコーナールと先端アールを有する形状の工具を用い四角形容器を得る場合の成形限界について検討した。すなわち、 $C_p/t = 0.8$, $R_d/t = 4$ の一定条件下で、成形速度を種々変化させ、小さなパンチ先端アール R_p ($R_p/t = 1, 2$) での深絞り実験を行った。

図7に2種類のブランクを用いて成形した場合の成形限界調査結果を示す。 $R_p/t = 2$ では成形速度を遅くしブランクBを用いれば成形限界の向上が認められたが、 $R_p/t = 1$ ではいずれのブランク、成形速度でも絞り深さ $h = 10\text{mm}$ 以上の成形品を得ることができなかった。

以上の結果より、Mg合金製角筒容器の深絞り加工においては、被加工材板厚と同程度の先端アールを有する形状のパンチによる成形は困難であることがわかった。なおこの結果は、軟鋼板（SPCE）による角筒容器の冷間深絞りにおける結果⁴⁾ とほぼ同様の傾向を示すものであった。

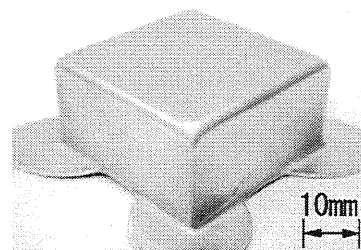


図6 コーナール $C_p = 0.4\text{mm}$ ($C_p/t = 0.8$) のパンチで成形された角筒容器 ($R_p = 2\text{mm}$)

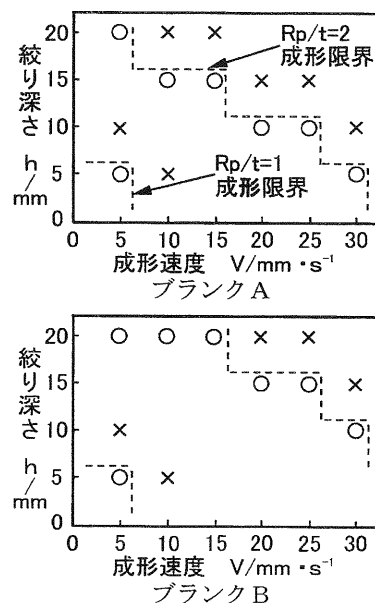


図7 小コーナール $C_p = 0.4\text{mm}$ ($C_p/t = 0.8$) 条件下での成形速度の成形限界に及ぼす影響

4. サイジングによる小先端・小コーナール容器の製作

4.1 実験条件および方法

深絞り加工のみでは、先端アールとコーナールが共に板厚と同程度の小さな角筒容器を成形することは困難であることがわかった。そこで、上記2種類のブランクから深絞り成形されたそれぞれの容器を用い、これら容器の先端部をサイジング（リストラッキング）により矯正加工することとする。サイジングに供する深絞り容器には、 $R_p = 2\text{mm}$ ($R_p/t = 4$) と 3mm ($R_p/t = 6$) の条

件で成形された容器（いずれも $C_p/t = 0.8$ ）を用いることとし、これらを図8に示すように、先端アール0.5mmのパンチと底部アール1.0mmのダイを取り付けた金型内にセットし、各種成形温度でのサイジングを行う。この場合、被加工材の加熱温度は $T = 370 \sim 520\text{K}$ とする。また、このサイジングは順送金型を用い深絞り加工と同一金型内で行うことを想定し、 $R_p/t \geq 4$ の条件で安定した深絞り加工が行えた成形速度 $30\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ と同一の速度でサイジングを行うこととする。

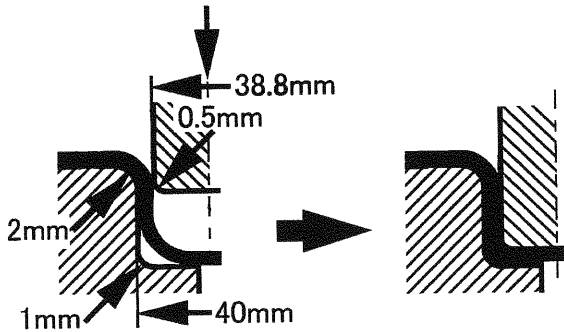


図8 深絞り容器のサイジング方法

4.2 実験結果および考察

表3に各種条件でサイジングされた容器の評価結果を示す。成形品表面に割れや肌あれなどの不良発生がない良好な成形品が得られた場合を“○”，割れの発生はないが表面に梨地状の肌あれが発生した場合を“△”，そして容器先端コーナ部に割れが発生した場合を“×”として評価した。

全体的傾向としては、成形温度(T)が470 K程度以上でなければ容器先端コーナ部に割れや肌あれ発生のない成形品が得られないことがわかった。また、コーナカットしたブランクBを用いたほうがブランクAを用いた場合に比べ、割れや肌荒れ発生のない成形品が得られる成功域がやや広がる傾向が認められた。

図9に、四隅をカット（C16）したブランクBから $R_p/t = 4$ $R_d/t = 4$ $C_p/t = 0.8$ の条件で成形された深絞り容器を、 $T = 470\text{K}$ の温度条件下で先端アール0.5mmのパンチと底部アール1.0mmのダイによりサイジングした成形品を示す。先端アールとコーナアールのいずれも小さな角筒容器を成形することができた。

表3 サイジングされた容器の評価結果

成形温度	$R_p/t=4$		$R_p/t=6$	
	カット無し	カット有り	カット無し	カット有り
520	○	○	○	○
470	△	○	△	○
420	×	△	×	×
370	×	×	×	×

○：良好な成形品 △：肌あれ発生 ×：割れ発生

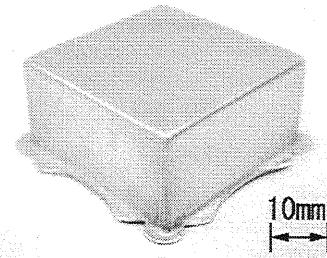


図9 サイジングにより得られた小先端アール ($R_p = 1\text{mm}$) 小コーナアール ($C_p = 0.4\text{mm}$) の角筒容器

5. 硬質膜カーボン膜コーテッド工具による連続深絞り試験

5.1 実験条件および方法

Mg合金板で深絞り成形される製品は一般に四角形容器（角筒）形状のことが多いことを考慮し、図1に示した構造の金型内のパンチ、ダイおよびしわ押えを図10に示す形状、寸法の正方形輪郭のパンチ（先端アール： $R_p = 2\text{mm}$ ）とダイ（肩アール： $R_d = 2\text{mm}$ ）およびしわ押えに交換し、角筒の連続深絞り試験を行うこととする。試験を行う工具表面処理および加工（潤滑）条件は、

- (a) ノンコーテッド工具による無潤滑加工
- (b) ノンコーテッド工具による水分散系プレコート潤滑剤を用いた加工
- (c) WC/C被覆工具による無潤滑加工
- (d) WC/C被覆工具と水分散系プレコート潤滑剤との併用による加工

の4種類の条件とする。

なお、今回実験に用いる硬質カーボン（WC/O）膜は格子間にタングステンカーバイトを含むアモルファスカーボンを反応性スパッタリング法により成膜した膜⁵⁾であり、WC/C被覆工具および比較のために用いるノンコーテッド工具の諸元は表4に示す通りである。

この連続深絞り試験では成形（パンチ下降）速度を $V = 30\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 一定と設定するため、パンチ水冷の効果は加工速度が $V = 20\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上ではほとんど発揮されないことが著者らのこれまでの研究⁶⁾で明らかにされていること、また本試験ではそれほど深い容器を製作しないなどの理由から、パンチの水冷は行わないこととする。また、絞り深さは $h = 8\text{mm}$ 、成形温度は $T = 520\text{K}$ とする。

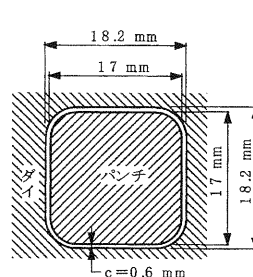


図10 連続深絞り試験に用いる工具

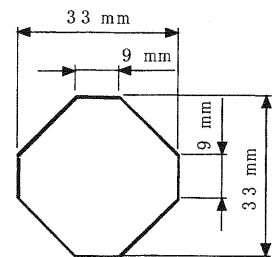


図11 連続深絞り試験に用いるブランク

表4 連続深絞り試験に用いる工具の諸元

工具	基材	膜種	膜厚 /μm	表面硬さ /HV	表面粗さ Ry/μm
1	SKD11	-	-	700	0.19
2	(HRC60)	WC/C	1.0	1100	0.20

被加工材には、3章の実験と同一のAZ31-O Mg合金板(板厚t=0.5mm)を用い、図11に示す寸法、形状にシャリングマシンにより切断したものをブランク材として実験に供する。

5.2 実験結果および考察

まず、条件(a)で加工を行った。図12に成形品(角筒容器)の一例を示す。ノンコートed工具による無潤滑加工においても成形が行えた。しかし、この場合は比較的少ない加工回数時点からダイの端面から肩アール部にかけてMg合金の凝着物が筋状に発生する現象が認められ、図13に示す成形品側壁部の表面粗さ測定結果からもわかるように、加工回数の増加に伴い急激に悪化する傾向が認められた。そして54回目に材料破断が発生し加工が行えなくなった。

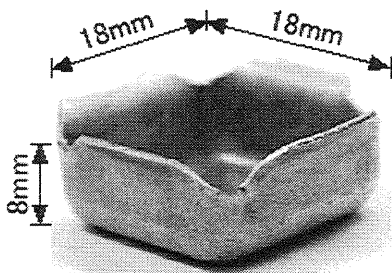


図12 連続深絞り試験により得られた容器

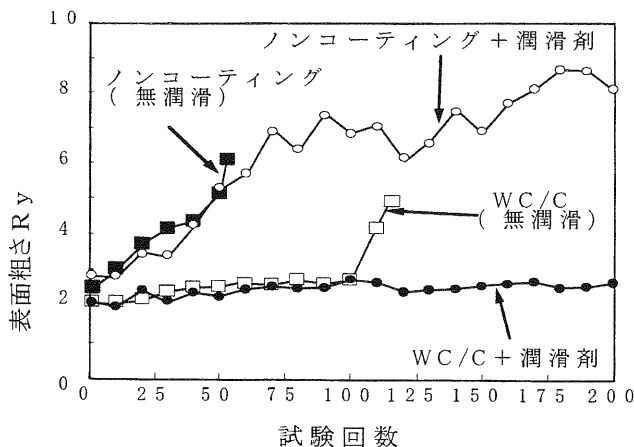


図13 連続深絞り試験回数と容器側壁部表面粗さの関係

つぎに条件(b)による加工を行った。この場合は材料破断もなく目標の200回まで加工が行えることがわかり、Mg合金板の角筒深絞り加工において、水分散系プレコー

ト潤滑剤を用いれば、かなりの回数まで加工が行えることが判明した。しかし、図13に示すように、成形品の表面粗さは加工回数の増加とともに悪化する傾向が認められた。また、この加工では、200回加工終了時まで工具の清掃などは一切行わなかったため、加工後にはダイ端面およびダイ穴内面に大量の潤滑剤と思われる堆積物の発生が認められた。

続いて、条件(c)による加工を行った。この場合は116回目に材料破断が発生した。ノンコートed工具の場合(条件(a))に比べ工具寿命は向上したものの、無潤滑条件下ではWC/C被覆工具でも実用に耐えるような長寿命は得られないことが判明した。加工後この工具の状況を観察したところ、図示はしないが、肩アール部全周にわたりMg合金と思われる凝着物の発生が認められ、特にコーナアール部に膜の剥離と顕著な凝着物の発生が認められた。なお、このWC/C被覆工具により得られた成形品の表面粗さは、100回目程度までは初回に得られたものとほぼ同程度の良好な表面粗さであったが、100回目以降に急激に悪化している。このことから、100回目付近でWC/C膜の一部が剥離または摩耗し、同部分にMg合金が凝着しはじめたと推察される。

最後に、条件(d)による連続深絞り試験を行った。この場合は200回までの加工が行えた。図14に条件(b)と条件(d)でそれぞれ200回目に得られた容器の側壁部SEM観察結果を示す。条件(b)の200回目に得られた容器には深絞り方向に多数の筋状の傷の発生が認められた。これに対し、条件(d)により成形された容器側壁部は図13の表面粗さ測定結果からもわかるように、成形品側壁部の表面粗さは200回まで初回とほぼ同程度であり、深絞り方向に対し垂直な方向にブランク材の圧延目だけが認められ、上述のような傷の発生は全く認められなかった。

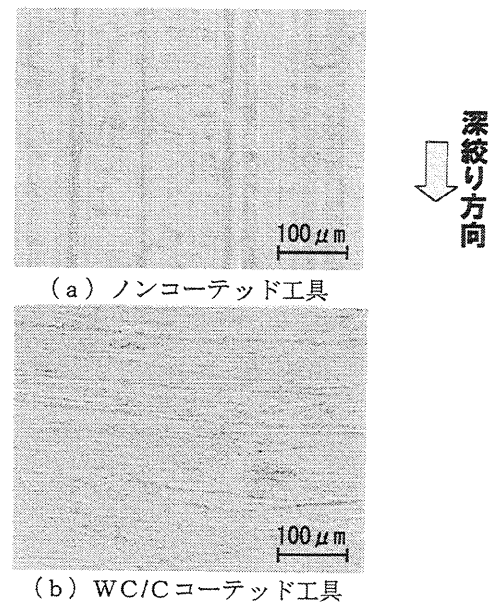
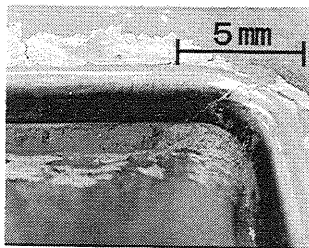


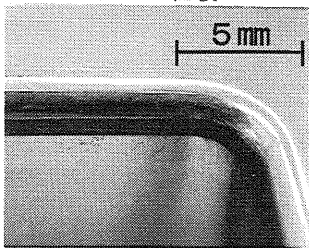
図14 200回試験後に得られた容器側壁部のSEM観察比較結果

なお、200回加工後のWC/C被覆工具には、図15(a)に示すように、ノンコート工具の場合(条件(b))よりその程度は少なかったものの、潤滑剤の堆積物が認められた。ただしこの堆積物は、水を含ませた布でふき取ったところ、同図(b)に示すように容易に除去できることが確認できた。

以上の結果から、温間域でも十分な潤滑性能を有し、脱脂が容易な水系の金属石鹸を主成分とする水分散系プレコート潤滑剤と、硬質カーボン(WC/O)被覆工具の併用による潤滑を行えば、厳しい変形が強いられるコーナール部などの形状を有する角筒容器の生産においても、硬質膜被覆工具の長寿命化が達成できるため、安定した高精度を有する製品の加工が行える見通しが得られた。



(a) 加工直後



(b) 潤滑剤除去後

図15 WC/Cコーテッド工具の加工直後と潤滑剤除去後の性状

6. まとめ

家電品などのマグネシウム(Mg)合金製筐体を効率良く製作するためのプレス加工の1つである、深絞り加工

における加工因子の成形性に及ぼす影響を調査検討した。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) パンチ先端アールやダイ肩アールは、被加工材板厚の4倍以下では成形限界が低下するが、4倍以上の条件では、ほぼ一定の実用的な成形限界値が得られる。
- (2) 深さ20mm程度の角筒容器の深絞り加工においては、パンチ先端アールが被加工材板厚の4倍以上の条件では、被加工材板厚と同程度の小さなコーナールを有する角筒容器の成形が可能である。
- (3) 深絞り成形品を520 K程度の加熱温度条件下でサイジングを行えば、コーナールと先端アールのいずれも被加工材板厚と同程度の小さな角筒容器が成形できる。
- (4) 硬質カーボン膜をコーティングした工具と環境に優しい水分散系プレコート潤滑剤を併用した潤滑方法により加工を行えば、高精度を有する深絞り容器が安定して成形できることが判明した。

最後に、本研究に対し御助成を賜った、財団法人天田金属加工機械技術振興財団に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 古閑伸裕・R.Paisarn：軽金属, Vol.51, No.9 (2001) 441.
- 2) 例えば、相田収平, 田辺寛・須貝裕之・高野格・大貫秀樹・小林勝：軽金属, Vol.50, No.9 (2000), 476.
- 3) 新プレス加工データブック, (1993), 196, 日刊工業新聞社.
- 4) 吉田清太：理研報告, Vol.33, No.4 (1958), 223.
- 5) C.Weissmantel, K.Bewilogua, D.Dietrich, H.-J.Erler, H.-J.Hinneberg, S.Klose, W.Nowick & G.Resse：Thin Solid Films, 72 (1980), 19.
- 6) 古閑伸裕・R.Paisarn：塑性と加工, Vol.42, No.481 (2001), 55.