

マグネシウム板のプレス加工

古閑 伸裕*

1. はじめに

1990年代後半から、環境問題やITブームとも相まって、マグネシウムの軽さ、放熱性、吸振性、リサイクル性などの優れた性質が再認識され、チクソモールドイングやダイカストにより成形されたPC管体や、プレスフォーミングにより成形されたMD管体などのマグネシウム製品が脚光を浴びた。しかしその後は、これといったマグネシウムの用途開発がなされなかったことに加え、国内の景気が低迷したことなどが影響し、マグネシウムに対する一時のバブル的な状況が落ち着きを取り戻した感があった。しかし、最近になって、景気がやや回復し、環境改善を全面に掲げた欧州車のマグネシウムの積極的な利用などが刺激となり、徐々にではあるが国内におけるマグネシウムの需要が伸びつつある。特に、プレス成形用の板材の需要が伸びており、これら板材は従来材に比べ成形性が向上しており、安定したプレス加工が行えるようになりつつある。

本論文では、著者らがこれまで行ってきた、マグネシウム板の各種プレス加工における問題解決のための基礎的研究の成果を中心に述べる。

2. プレス加工用マグネシウム板

現在、プレス成形にはAZ31 (ASTM規格)と称されるマグネシウム(Mg)合金板が広く用いられている。この理由は、このAZ31材が強度や展延性、耐食性の点でバランスのとれた材料であるためである。このAZ31板は生産性や結晶粒制御の観点から、狭幅材の場合は1mmの押し出し材を圧延により所望の厚さに成形する方法で製作されたものが広く市販されており、この厚みは0.5mm程度の薄板が比較的手が取りやすい。これは0.7mm程度以上の厚板部品はチクソモールドイングやダイカストでも成形できることから、プレス成形ではこれより薄い肉厚の製品が製作対象になる場合が多いためと考えられる。今後の板製造メーカーに課せられた課題は、成形性の安定した幅広材をいかに安定してプレスメーカーに供給できるか、という点であろう。

また、最近では、マグネシウムの振動減衰性能が注目され、音響機器部品への適用が検討されはじめている。これ

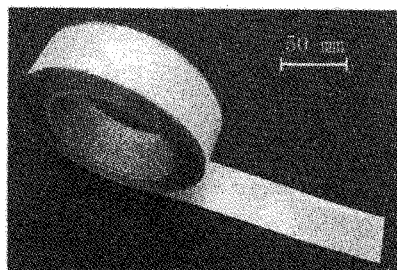


図1 マグネシウム箔コイル材

ら部品に用いられる板材は厚さが50μm程度のマグネシウム箔であり、試験的にはあるが、図1に示すようなコイル状の箔材も製造できるようになりつつある。

3. せん断加工

板材からプレス加工により製品を成形する場合、所望の形状や寸法のブランク材を得るための打抜きや、成形後のトリミングや穴あけなどのためのせん断加工が不可欠である。しかしマグネシウムのせん断加工に関しては、最近までせん断特性の調査や最適せん断条件の検討がほとんど行われていなかった。

以下に、著者らが行ったマグネシウム板のせん断特性や平滑な切口面を得るための精密せん断に関する調査研究成果の一部を述べる。

3.1 せん断特性とシェーピングによる切口面の改善¹⁾

図2はAZ31板(板厚 $t=5\text{mm}$)せん断(打抜き)時のせん断荷重-ストローク線図である。このマグネシウム合金板のせん断抵抗値は約 $98\text{N}/\text{mm}^2$ であり、この値は同材料の引張強さの45~50%である。この比率は一般の金属の同比率(約80%)に比べかなり小さな値である。またこのマグネシウム合金板の打抜きでは、材料分離後の荷重の減少が緩慢であり、材料分離後のパンチによる押込み力が全体的に大きいという特徴がある。この傾向は工具クリアランス(C_b)が小さな条件ほど顕著である。

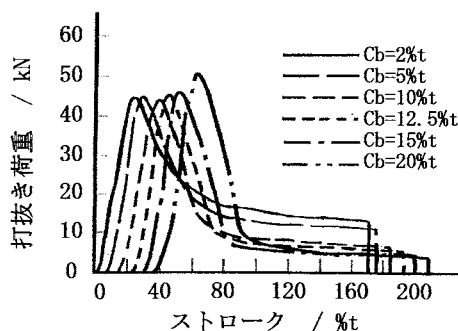


図2 AZ31板打抜き時の荷重-ストローク線図
($\phi 30\text{mm}$, AZ31, $t=5\text{mm}$, $T=RT$)

図3は打抜き品の切口面である。いずれの C_b においても破断面の凹凸が大きく、特に $C_b \geq 15\%t$ では切口面中央部に大きな段差が発生する現象が認められる。

さて、マグネシウムは被削性に優れた材料であることが知られている。これに着目し、プレスによる切削加工であるシェーピングによるマグネシウム合金板の精密せん断の試みがなされている。この結果、鋼板やアルミニウム板などでは、 $t=5\text{mm}$ 程度の厚板になると、小さな取り代でシェーピングを行っても「うろこ状」の破断面の発生が避け

られないが、マグネシウム合金の場合は取り代 $\delta \leq 0.4\text{mm}$ でほぼ全面平滑なシェーピング面が得られるようになることが明らかになっている。

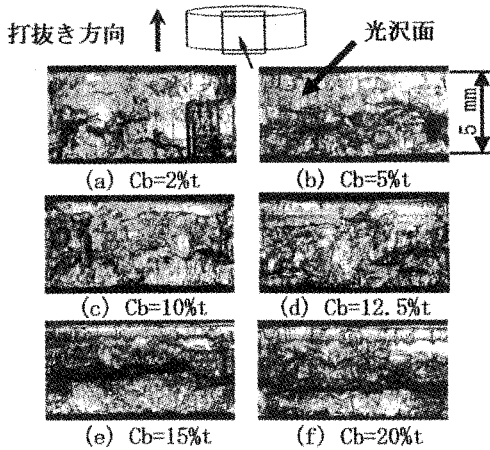


図3 打抜き品の切口面性状
($\phi 30\text{mm}$, AZ31, $t=5\text{mm}$, $T=RT$)

さらに、シェーピングにおけるブランクの位置決めや工程数の増大の問題を解決するため、図4に示すような、打抜きとシェーピングをプレス1ストローク内で行う、重ね抜きによる精密せん断が行われている。この場合、打抜き時のクリアランスや削り代を適正值に設定すれば、図5に

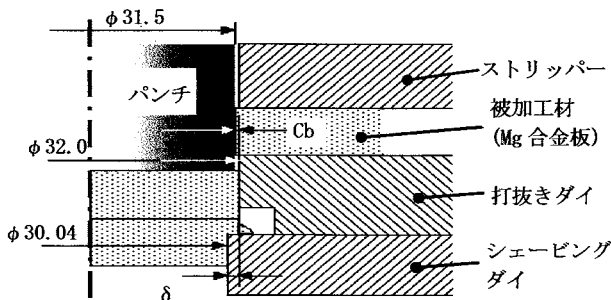


図4 平滑切口面打抜き品を得るための重ね抜き

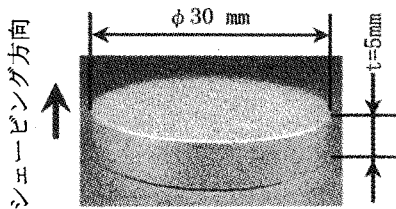


図5 重ね抜きにより得られた円形部品
($\phi 30\text{mm}$, AZ31, $t=5\text{mm}$, $T=RT$)

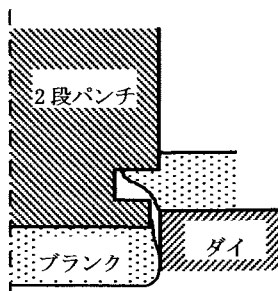


図6 平滑切口面穴を得るための削り抜き

示すような、全面平滑な切削面からなる打抜き品を得ることができる。また、図6に示すような2段の切り刃をもつパンチを用いれば、平滑切口面の穴を得ることもできる。

3.2 硬質膜コーテッド工具の凝着防止効果²⁾

Mg合金は、腐食防止の観点から、無潤滑でせん断加工が行われる場合が多い。このため、工具にはMg合金の凝着が顕著となり、この凝着が工具寿命や切口面精度に悪影響を及ぼすことが予想される。

このような問題発生を防止するため、各種硬質膜コーテッド工具の有用性が検討されている。図7は慣用工具(ノンコーテッド工具)と、TiCNとWC/C(硬質カーボン膜)とをそれぞれ被覆したコーテッド工具($\phi 7.7\text{mm}$ パンチ)のAZ31板($t=0.9\text{mm}$)2000回打抜き後の刃先付近の性状である。WC/Cコーテッド工具は白化する程度の変化は認められるものの、パンチ側面へのMg合金の凝着は他の工具に比べ少ない。また、打抜きと同様の工具で2000回シェーピングした際の、2000回目に得られたシェーピング面を図8に示す。この場合も明らかにWC/Cコーテッド工具により加工された切口面は他の工具を用いた場合に比べ縦傷の発生が少なく、加工開始時とほぼ同程度の切口面粗さが維持されており、WC/Cコーテッド工具の凝着防止に対する有効性が認められる。

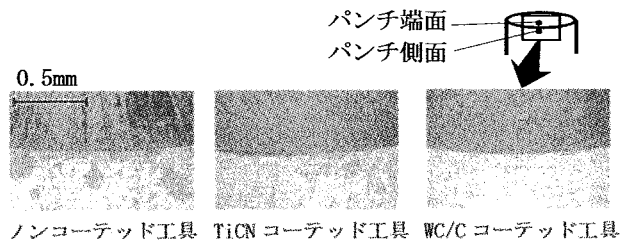


図7 2000回打抜き後のパンチ刃先性状
($\phi 7.7\text{mm}$, AZ31, $t=0.9\text{mm}$, $T=RT$)

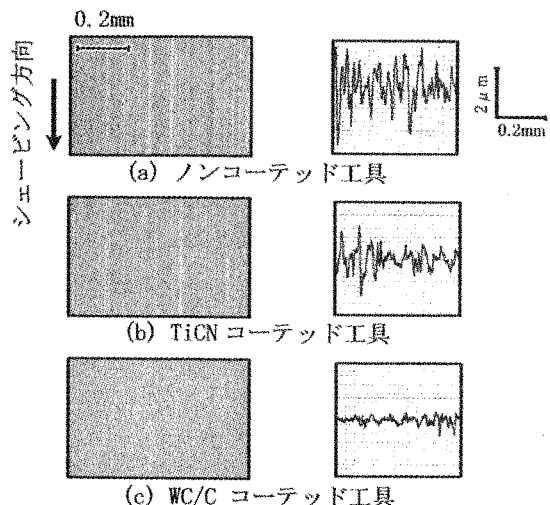


図8 2000回目に得られたシェーピング面性状
(削り代: 0.2mm , AZ31, $t=0.9\text{mm}$, $T=RT$)

4.(自由)曲げ加工³⁾

少量多品種の製品の曲げ加工には、汎用性に富むプレスプレーキを用いた曲げ加工が行われる場合が多い。特に材料の加熱が必要なMg合金板の曲げ加工では、曲げ部の

表1 各種条件により自由曲げされた AZ31 合金板曲げ部性状評価結果

T/°C		RT		50		100		150		200		250		300	
W/mm	Rp/mm	直角	平行	直角	平行	直角	平行	直角	平行	直角	平行	直角	平行	直角	平行
4	0.2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	△	○	○
	0.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	△	○	○
	0.8	×	×	×	×	×	×	×	×	△	×	○	○	○	○
	1.5	×	×	×	×	×	×	○	△	○	○	○	○	○	○
6	0.2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○
	0.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○
	0.8	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○
	1.5	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○
12	0.2	×	×	×	×	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.5	×	×	×	×	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○
	0.8	×	×	×	×	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○
	1.5	×	×	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3.0	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

みを加熱して加工が行えるこのプレスブレーキによる加工は、寸法変化やそりなどの成形不良が発生しにくいことから、極めて適した加工方法と言えよう。

プレスブレーキによる曲げ加工では、工具の圧印による成形品への傷発生を防止するため、被加工材がパンチとダイにはさまれて強圧される直前のストロークでパンチの下降を停止させ、所望の曲げ角や曲げアールに成形する自由曲げによる加工が行われる。以下に、各種加工条件の曲げ精度に及ぼす影響を述べる。

各種条件で自由曲げ加工 ($\theta_0 = 90^\circ$) された AZ31 合金板 ($t=0.5\text{mm}$) の曲げ部性状評価結果を表1に示す。○印は成形不良の発生がなく曲げ成形がなされた場合、△印は曲げ部の表面の粗さが素板に比べ大きく悪化(肌荒れが発生)した場合、そして×印は曲げ部に割れが発生した場合をそれぞれ表している。

$R_p \leq 1.5\text{mm}$ の厳しい曲げ加工条件下では $T \leq 50^\circ\text{C}$ 以下ではいずれの W においても曲げ部に割れや肌荒れの発生が避けられない。すなわち、AZ31 合金板の加工は $R_p \leq 1.5\text{mm}$ ($\leq 3t$) の条件では材料の加熱が不可欠である³⁾。

さらにこの評価結果から、ダイ溝幅 W が 12mm 程度まで大きくなると $T=150, 200^\circ\text{C}$ では小さな R_p においても曲げ部に割れの発生が認められなくなる。そして、深絞り加工で実用的な絞り比での成形が行えるようになる $T=250^\circ\text{C}$ ⁴⁾ になると、いずれの W においても肌荒れや割れなどの不良発生のない曲げ成形品が得られるようになる。

しかし、 $T \leq 200^\circ\text{C}$ で曲げ加工され“○”と評価された成形品には、いずれの R_p においても大きな弾性回復の発生により、曲げ角 θ_1 が目標角度 90° (θ_0) より大きくなったり、成形品曲げ部内アール半径 R_m がパンチ先端アール半径 R_p より大きくなる傾向が顕著に認められる。

図9 (低温域でも割れなどの不良が発生しなかった $R_p=3\text{mm}$, $W=12\text{mm}$ の場合のデータを記載) に示す加熱温度 T の曲げ角の変化 $\Delta\theta$ ($\theta_1 - \theta_0$) に及ぼす影響を、SPC材と比較したものである。縦弾性係数の小さな Mg 合金板のほうが、低温域では SPC 材に比べ大きな弾性回復量(スプリングバック)が認められる。しかし、 T の上昇と共に、マグネシウムは急激に変形抵抗が減少するため、これに伴い弾性回復量が激減し、 $T=250^\circ\text{C}$ では SPC 材とほぼ同程度、

加熱温度が $T=300^\circ\text{C}$ まで上昇すると SPC 材より $\Delta\theta$ が小さな曲げ成形品が得られるようになる。

図10に高温域での曲げ部アール半径の測定結果を示す。 $T=250^\circ\text{C}$ では曲げ部のアール半径が小さな条件では成形品の内アール半径 R_m がパンチ先端アール R_p に比べ大きくなるが、 $T=300^\circ\text{C}$ まで加熱温度が高くなると、 $R_p \leq 0.5\text{mm}$ の小さなアール半径においても R_p とほぼ同程度の R_m の曲げ成形品が得られるようになる。

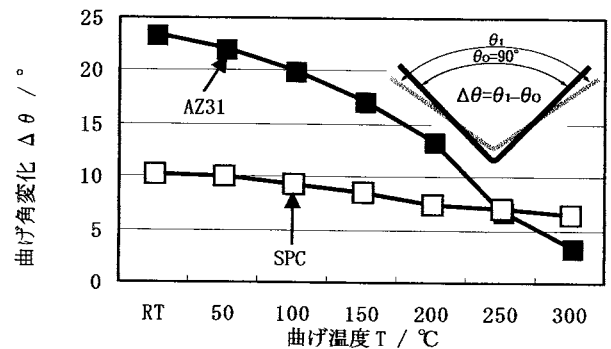


図9 加熱温度 T の曲げ角変化 (スプリングバック) に及ぼす影響 (AZ31, $t=0.5\text{mm}$, $\theta_0 = 90^\circ$)

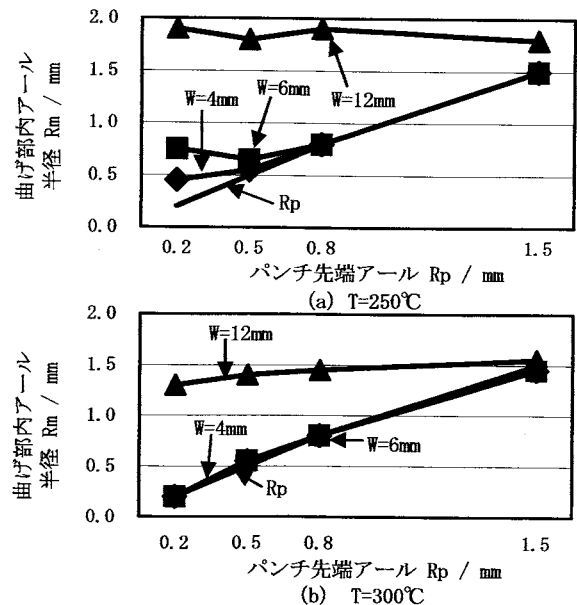


図10 ダイ溝幅 W とパンチ先端アール R_p の曲げ部内アール半径に及ぼす影響 (AZ31, $t=0.5\text{mm}$, $\theta_0 = 90^\circ$)

以上の結果から、Mg 合金板の曲げ加工における材料の加熱は、単に曲げ部での割れや肌荒れの発生を防止するだけでなく、曲げ角や曲げアールの精度向上のためにも不可欠であることが理解できる。

5. 深絞り加工 (一部、張出し加工も含む)

AZ31 合金板は冷間で加工されている用途もあるが、ある程度の絞り深さや形状を得るには、温間での加工が強いられる。これは Mg の結晶構造に起因するためである。さらに同材の深絞り加工ではひずみ (成形) 速度も成形性に大きな影響を及ぼす。そして、この Mg 合金板の深絞り加工においては、温間でも安定した潤滑性能が発揮できる潤滑方法を見いだすことが大きな課題となっている。これらに対する調査研究の結果を以下に紹介する。

5.1 成形温度と成形速度^{4), 5)}

図 11⁴⁾ は加熱温度 (ダイ温度) と限界絞り比 (LDR) の関係を示したものである (円筒絞り, パンチの水冷無し)。200°C 程度までは、温度の上昇に伴い、LDR が急激に向上する。これ以上になると、条件によってはやや LDR が向上する場合もあるが、被加工材や工具の酸化、潤滑剤の劣化などのマイナス面を考慮すると、250°C 前後の加熱温度が実用的な加熱温度と言えよう。

また、Mg 合金板の深絞り加工では成形速度も LDR に大きく影響する。図 12 はパンチ水冷の有無における成形速度と LDR の関係を調査した結果である。成形速度 (ひずみ速度) が遅いほど LDR が向上する。しかし、実用的な成形速度と考えられる $V=30\text{mm/s}$ でも $DR=2.6$ の成形が行える。また、AZ31 合金板は現在も素材製造技術の改善研究が行われており、著者が最近入手した AZ31 合金板は $V=30\text{mm/s}$ で LDR が 2.8 まで向上していた。

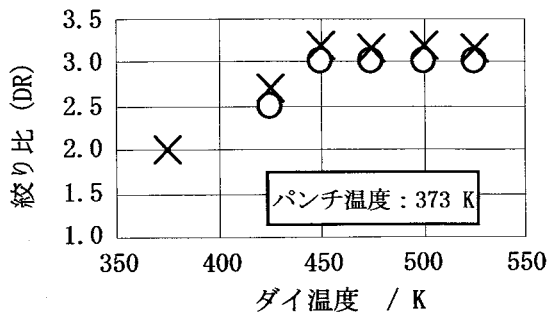


図 11 加熱 (成形) 温度の LDR に及ぼす影響 ($\phi 60\text{mm}$, AZ31, $t=0.88\text{mm}$, $V=2.5\text{mm/s}$)

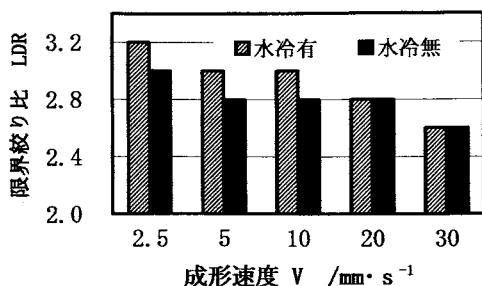


図 12 成形 (ひずみ) 速度の LDR に及ぼす影響 ($\phi 30\text{mm}$, AZ31, $t=0.5\text{mm}$, $T=250^\circ\text{C}$)

5.2 工具アール半径の成形性に及ぼす影響⁶⁾

一般に、深絞り加工においてはパンチの先端アール半径やダイの肩アール半径の大きさが成形性 (LDR) に大きな影響を及ぼす。

図 13 は AZ31 合金板 ($t=0.5\text{mm}$) の円筒容器深絞り ($T=250^\circ\text{C}$, $V=30\text{mm/s}$) における LDR 調査結果である。被加工材の製造履歴により若干の差異はあるものの、パンチ先端アール半径が被加工材板厚の 4 倍以上、ダイ肩アール半径が 6 倍以上あれば、それ以上大きくしても LDR はそれほど大きく変化しない。

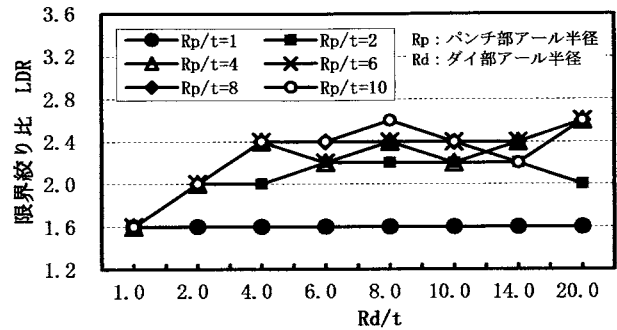


図 13 工具アール半径の LDR に及ぼす影響 ($\phi 30\text{mm}$, AZ31, $t=0.5\text{mm}$, $V=30\text{mm/s}$, $T=250^\circ\text{C}$)

角筒容器の成形では、コーナアール半径の大きさも成形性に影響を及ぼすと考えられる。しかし、実際に著者らが行った成形実験では、 0.4mm (被加工材板厚の 0.8 倍) という小さなコーナアール半径のパンチを用いた場合も角筒容器の成形 (絞り深さ: 20mm) が行えることがわかった。しかし、この場合も円筒容器の場合と同様に、パンチ先端アール半径は被加工材板厚の 4 倍 (2mm) 以上の大きさが必要であった。すなわち、コーナアール半径と先端アール半径が共に被加工材板厚以下の角筒容器を深絞り加工のみで成形することは困難である。

従って、先端アール半径の小さな容器を得るには、深絞り加工後に先端アール部分をサイジング (リストラیکنング) により矯正加工する必要がある。なお、このサイジングも割れなどの成形不良発生を防止するため、 250°C 程度の温間で加工が必要である。図 14 に深絞り加工とサイジングにより成形 ($T=250^\circ\text{C}$, $V=15\text{mm/s}$) された、先端アールとコーナアールが共に被加工材板厚以下の角筒容器を示す。

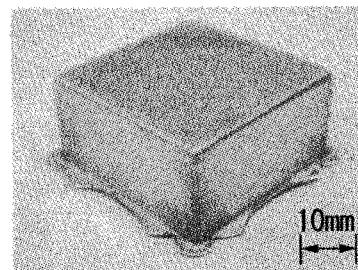


図 14 深絞り+サイジングにより成形されたコーナアールと先端アールが共に小さな角筒容器 ($\square 40\text{mm}$, AZ31, $t=0.5\text{mm}$, $T=250^\circ\text{C}$)

5.3 潤滑^{5), 7)}

マグネシウムが活性な金属であることに加え、温間での加工が強いられることから、生産において潤滑が大きな問題となる場合が多い。実験室的には PTFE シートや二硫化モリブデンなどを用いて潤滑を行う方法があるが、これらは高コストや作業の煩雑さ、脱脂の困難さなどの点から、いずれも実用的な潤滑方法とは言い難い。このような問題を解決するための一つの方法として、硬質膜コーテッド工具と環境に優しい水溶性潤滑油を併用する方法が提案されている。

図 15 は各種潤滑条件で LDR を調査した結果である。無潤滑の状態であっても、WC/C や Me-CH などの硬質カーボン膜をコーティングした工具を用いると、PTFE シートを用いた場合に匹敵する LDR の向上が認められる。しかし、無潤滑では、まだこれら硬質膜の基材（工具）との密着力が不十分であるため、また膜厚が 1 μ m 程度と薄いことから加工回数が増すと膜が摩耗するなどの問題が生ずることから、コーテッド工具だけの無潤滑による生産は難しいのが現状である。

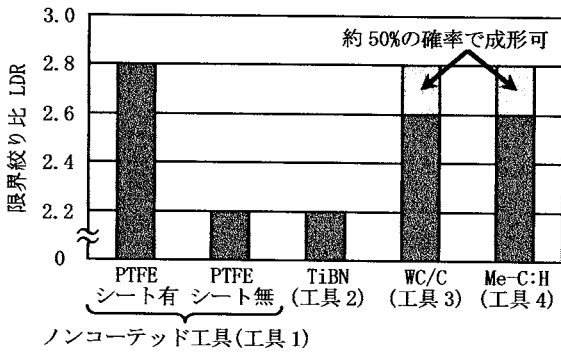


図 15 各種潤滑条件下における LDR 調査結果 (ϕ 30mm, AZ31, $t=0.9$ mm, $V=30$ mm/s, $T=250^\circ\text{C}$)

そこで、このコーテッド工具と水分散系プレコート潤滑剤との併用による AZ31 Mg 合金板深絞り加工の実用性が評価されている。図 16 は各種潤滑方法で角筒容器の連続深絞り試験を行った結果である。WC/C コーテッド工具と水分散系プレコート潤滑剤とを併用した潤滑では、試験終了時まで製品精度（表面粗さ）の大きな変化のない成形品が安定して得られている。

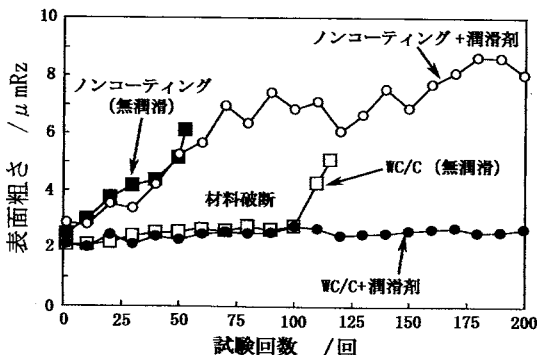


図 16 角筒容器の連続深絞り試験中の容器側壁部表面粗さの変化 (\square 18mm, AZ31, $t=0.5$ mm, $V=30$ mm/s, $T=250^\circ\text{C}$)

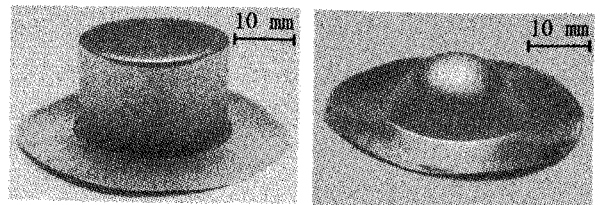
5.4 箔の深絞りと張出し⁸⁾

マグネシウムの優れた振動減衰性能に注目し、音響機器（スピーカー）部品への利用が進められている。これら部品の製造には 50 μ m 程度の厚さの箔材（純 Mg）が素材として用いられる。

一般に箔のプレス成形はしわが発生ししやすいなどの問題があることから、極めて困難な加工とされている。この問題はマグネシウムについても例外ではない。

図 17 に、板厚 $t=50\mu\text{m}$ の箔から成形した深絞り容器（純 Mg）と張出し成形品（AZ31）の一例をそれぞれ示す。

図 18 に純 Mg 箔と AZ31 箔の深絞り加工（ ϕ 25mm）における LDR 調査結果を示す。板厚が 0.5mm 程度の AZ31 Mg 合金の場合は LDR が 2.6~2.8 ($T=250^\circ\text{C}$, $V=30$ mm/s) であるのに対し、純 Mg 箔や AZ31 箔の場合の同一加工条件では LDR が 2.3~2.5 程度とやや低い。



純 Mg (DR=2.6) AZ31 (張出し深さ 9.05)

図 17 マグネシウム箔 ($t=50\mu\text{m}$) プレス成形品の例

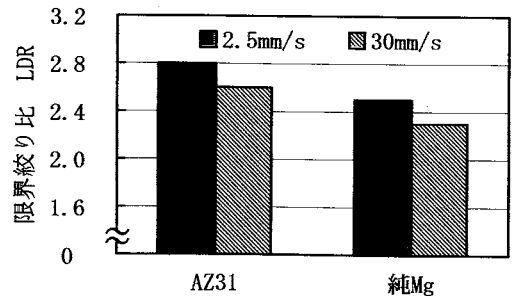


図 18 マグネシウム箔の LDR 調査結果 (ϕ 25mm, $t=50\mu\text{m}$, $T=250^\circ\text{C}$)

張出し加工（ ϕ 25mm）では、図 19 に示すように、AZ31 箔の場合の張出し限界深さは 9.05mm ($T=200^\circ\text{C}$, $V=2.5$ mm) であり、 $t=0.5$ mm の同材の同条件での張出し限界深さ 10.9mm よりやや減少するものの大きな差は認められない。しかし、純 Mg 箔の場合は張出し限界深さが AZ31 箔に比べ大きく低下する。

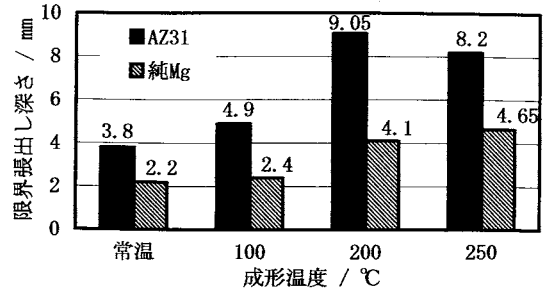


図 19 マグネシウム箔の張出し限界深さ調査結果 (ϕ 25mm, $t=50\mu\text{m}$, $V=2.5$ mm/s)

このように、深絞り加工では、純 Mg 箔、AZ31 箔いずれもほぼ同程度の実用的な限界絞り比が得られるが、張出し加工では純 Mg 箔の張出し成形性が AZ31 箔に比べ低下する現象が認められる。また、AZ31 箔の張出し加工において、 $T=200^{\circ}\text{C}$ までは T の上昇とともに、張出し限界深さが向上するが、 $T=250^{\circ}\text{C}$ になると同深さが向上せず、場合によっては低下する現象がある現象が認められた。これらについては今後詳細に調査検討する予定である。

6.(板)鍛造加工^{9),10)}

競技用自転車の部品やプレスフォーミングと呼ばれる板鍛造法によって成形された MD ウォークマン筐体の実用化されるなど、多くの Mg 合金製の鍛造部品が実用化されつつある。しかし、この鍛造の分野においては、より大きな変形能を得るため、またより低い荷重で成形を行うため、 300°C 以上の高い温度で加工が行われる場合が多い。このため、成形品の離型性が大きな問題となる場合が多い。著者らはこれまでに、各種離型(潤滑)剤の離型力や成形品表面性状に及ぼす影響を調査した。その結果、 300°C 前後の鍛造温度域では、やはり水溶性黒鉛潤滑剤が最も高温域においても低い離型力で成形品の取出しができると、さらに、鉱物油系窒化ホウ素潤滑剤の場合は、離型力は水溶性黒鉛潤滑剤よりやや上昇するが、成形品の表面性状が良好で、工具への潤滑剤の堆積も発生せず、脱脂も容易になるなどの特徴があることが明らかにしている。

さて、深絞り加工はプレスフォーミングのように大きな荷重を必要とせず、箔のような極薄物部品の成形も行えることから、マグネシウム板の成形法としては極めて有望な加工法と言える。しかし、ボスやリブの成形が行えないという欠点も同時に有している。このような欠点を克服するため、板素材または成形品にボスを成形する板鍛造の研究が行われている。図 20 は $t=0.9\text{mm}$ の AZ31 Mg 合金板に成形されたボスである。裏面にひげも発生せずネジ用穴の付いたボスの成形が行われた例である。このように深絞りなどと鍛造を組み合わせた複合加工を行えば、比較的小型のプレス設備でもボス付き筐体などの成形が可能になると思われる。

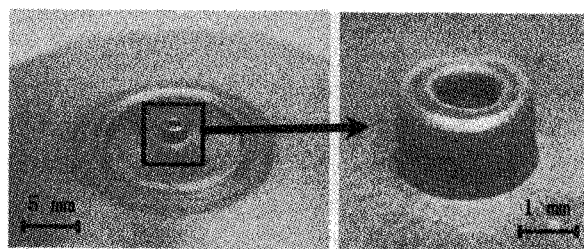


図 20 AZ31 板上に鍛造加工により成形されたボス部

7. おわりに

マグネシウムやその合金は、周知のように“軽くて強い”という特性の他、電磁波シールド性やリサイクル性、さらには振動減衰性能などの特性を有していることから、これまでは、PC を始めとする OA 機器部品や音響機器部品などへの適用が試みられてきた。しかし、これらはいずれも小物部品が多く、マグネシウムの需要拡大による素材の価格低下をもたらすまでには至っていない。すなわち、マグネシウムのさらなる需要拡大のためには、大量消費が期待できる自動車部品への構造材料としての利用が不可欠である。

既に、国内の自動車メーカーにおいても、ハンドル芯金、ステアリングロックボディ、シリンダヘッドなどの他、最近ではシートフレーム、シフトレバー、インスツルメントパネル、オイルパンなどへのマグネシウム合金の利用が積極的に始められている。これらのほとんどはダイカスト製部品であるが、今後もさらなる軽量化に向け、プレス成形に頼らざるを得ない薄肉のインナードアパネルなどのマグネシウム化が検討されるようになっていくと思われる。

これらプレス成形品は大物部品であることに加え、高い精度が要求されるため、これまでは、単に“どこまで成形できるか”ということを目標に向かってマグネシウム成形の研究が進められてきたが、これからは“いかに精度良く成形するか”という視点で研究が進められるものと考えられる。

本論文では、著者らが、2000 年頃から始めたマグネシウム板の各種プレス成形に関する基礎的研究の一部を紹介させていただいた。これら研究を実施するにあたり、多大な御助成を賜った、天田金属機械技術振興財団に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 古閑伸裕・羽斗一成・R. Paisarn: 軽金属, 51-9(2001), 452-456.
- 2) R. Paisarn・羽斗一成・古閑伸裕: 軽金属, 54-2(2004), 57-61.
- 3) 古閑伸裕・柚木伸公・R. Paisarn: 平 16 塑加春講論集(2004), 345-346.
- 4) 相田収平・高野格・田辺寛・須貝裕之・大貫秀樹・小林勝: 軽金属, 50-9(2000), 456-461.
- 5) 古閑伸裕・R. Paisarn: 塑性と加工, 42-481(2001), 63-67.
- 6) R. Paisarn・田川省吾・古閑伸裕: 軽金属, 53-4(2003), 152-156.
- 7) 古閑伸裕・R. Paisarn: 軽金属, 51-9(2001), 441-445.
- 8) 古閑未発表(平 17 塑加春講にて発表予定).
- 9) 古閑伸裕・羽斗一成: 53 回塑加連講論集(2002), 103-104.
- 10) 古閑伸裕・管之揚・柚木伸公・R. Paisarn: 55 回塑加連講論集(2004),