

摩擦発熱によるマグネシウム合金容器成形技術の開発

兵庫県立大学大学院 工学研究科

教授 原田 泰典

(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020016-B3)

キーワード：摩擦，マグネシウム，成形性

1. 研究の目的と背景

プレス加工は塑性加工の代表的な技法として古くから利用されている。この技法は製品を少ない工程で大量に生産できるため、生産性が高く金型を変えることでせん断加工や曲げ加工など複数の形状に加工ができる。この加工法の一つに深絞り加工がある。金属薄板であるブランクをダイと呼ばれる金型に設置し、パンチを用いて所定の荷重を負荷することで継ぎ目のない立体的な容器に成形する技術である。プレス加工の中において厳しい加工法として知られているが、大量生産に向いている。工業製品ではセンサケースやバッテリーケースなどの自動車部品として、また生活用品では飲料用缶や調理用鍋などの製品として広く使われている¹⁾。近年の自動車や航空機などの搬送機器業界では、電子部品等の装備の拡充による車体重量が増加傾向にあり、燃費改善や運動性向上には車体の軽量化が強く要求されている²⁾。軽量化を図るために鉄鋼材料から樹脂や軽金属への利用が進められている。軽金属の場合、鉄の密度 7.8 g/cm^3 に比べて、アルミニウムの 2.7 g/cm^3 やマグネシウム 1.7 g/cm^3 の密度は小さく、また高いリサイクル性や高強度といった特徴から注目が寄せられている。アルミニウム合金やマグネシウム合金の多くは鋳造部品や押出部品によって置換えが行われているとともに、量産化、材料歩留り、製品の薄肉化の観点から、板材のプレス加工の適応が望まれている³⁾。しかし、アルミニウム合金やマグネシウム合金は鉄鋼材料に比べて、延性や成形性が低い合金も少なくない。とくに、マグネシウム合金の場合、リチウムを添加したベータ型合金⁴⁾ や組織制御した合金⁵⁾ を除けば、多くの合金は室温での加工が困難である⁶⁾。そのため、冷間での深絞り加工では成形がとても難しいのが現状である。成形を高める方法の一つとして、温間深絞り加工がある。この加工では成形前にフランジ部を加熱して変形抵抗を低下させ、パンチ肩部に接触した部分を冷却することで変形抵抗や強度を増加させ深絞り加工の成形性を向上させる技術である⁷⁾。しかしながら、温間成形の場合、成形用金型に対して加熱冷却構造をもつ制御装置が必要となることやそれら設備に伴う高コストとなることの課題があるのが現状である。

本研究では、摩擦攪拌接合 FSW (Friction Stir Welding) や摩擦圧接 FW (Friction Welding) の際に発生する摩擦熱に着目した。FSW では、摩擦熱で軟化させた材料を攪拌して接合する技術である⁸⁾。鉄鋼材料の場合、摩擦によって生じる温度は $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上となる。そこで、金型である

パンチ自体を加熱するため、パンチ内部に摩擦発熱の構造を取り込んだ。つまり、異種金属である摩擦発熱用の治具をパンチ内部に内蔵し、回転による摩擦熱を利用した温間深絞り加工を試みた。摩擦発熱したパンチの発熱温度と加工時間の関係について、また各治具の摩擦による摩耗量について調べた。また、摩擦発熱型パンチを用いた温間深絞り加工を行い、成形性について調べた。

2. 実験方法

2.1 摩擦発熱型パンチ

温間深絞り加工のため、摩擦発熱型パンチの設計・試作を行った。図 1 に、温間加工のために試作した摩擦発熱型パンチとその固定台座の概略を示す。摩擦発熱として回転治具と発熱治具がパンチ内部に設置してある。各種回転治具は、接続した回転軸をボール盤のつかみ部に取り付け、回転速度 $2200 \sim 2800 \text{ rpm}$ で回転し、回転治具と発熱治具の間で摩擦発熱を行った。回転軸はパンチ内部に設置した 2 つのベアリングにより固定し、発熱治具に対して $100 \sim 300 \text{ N}$ の負荷で回転した。摩擦により生じた発熱温度は発熱治具内部の加工した穴に設置した熱電対によって測定を行った。

2.2 摩擦表面観察と摩耗量

摩擦摩耗後のおける回転治具および発熱治具の摩擦面はデジタルマイクロスコープによって観察を行った。また、試験後の回転治具と発熱治具の摩耗量について調べた。摩耗量は表面から材料内部方向への深さと定義した。

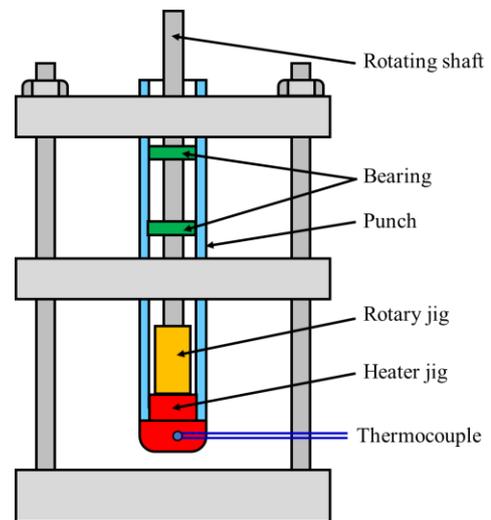


図 1 摩擦発熱型パンチの概略

2・3 実験材料

パンチは市販のステンレス鋼 SUS304 パイプ、長さ 160 mm で、外径および内径は 20 mm および 16 mm である。パンチ先端部に発熱治具を取り付けた。回転治具は市販の合金鋼、合金工具鋼、高速度工具鋼、ステンレス鋼で、発熱治具は合金工具鋼である。発熱治具は実際に金型として使用されている合金工具鋼である。治具同士の接触する摩擦面に対して、試験前に研磨紙#240 によって研磨処理を行った。表 1 に試験材料と加工条件を示す。

表 1 深絞り加工条件

Rotary jig	Alloy steel	SUP9 (spring steel) chrome manganese steel SUJ2 (bearing steel) high carbon chrome steel SCM440 chrome molybdenum steel
	Alloy tool steel	SKD11 cold work tool steel SKD61 hot work tool steel SKH51 high-speed tool steel
	Stainless steel	SUS304 austenite stainless steel SUS430 ferritic stainless steel SUS310S austenite stainless steel SUS327L1 duplex phase stainless steel
Heater jig	Alloy tool steel	SKD11, SKD61, SKH51
Rotating velocity		2200~2800 rpm
Polishing paper (particle size)		#240 (0.08 mm)
Load force of rotary jig		200~400 N

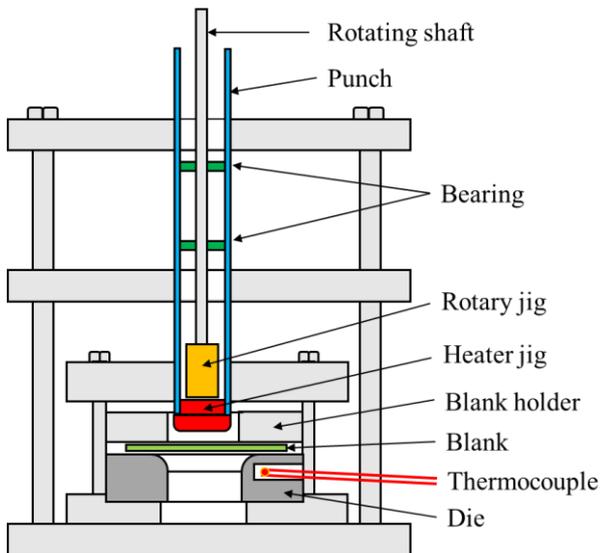


図 2 温間深絞り加工装置の概略

2・4 温間深絞り加工

図 2 に、試作した摩擦発熱型パンチを利用した温間深絞り加工装置の概略を示す。摩擦発熱によって所定の温度に到達した時点で深絞り加工を実施する。加熱温度はダイ肩部近傍に穴加工した内部に設置した熱電対によって測定を行った。使用するブランク材はマグネシウム合金 AZ31 で、サイズは直径 35 mm、板厚 0.5 mm である。ダイは標準熱処理を施した工具鋼 SKD61 である。パンチの先端部は合金工具鋼 SKD11 で、先端コーナ半径 3 mm で、直径 20 mm である。ダイは穴径 21 mm で、肩半径 4 mm である。潤滑剤は二硫化モリブデン粉末含有工作油である。

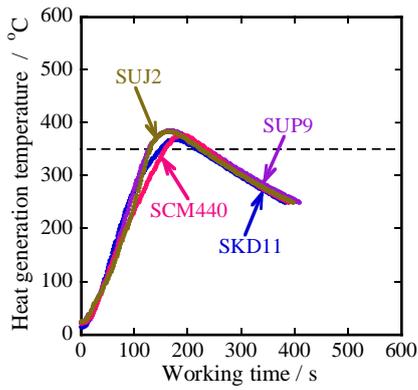
3. 研究成果

3・1 摩擦発熱温度

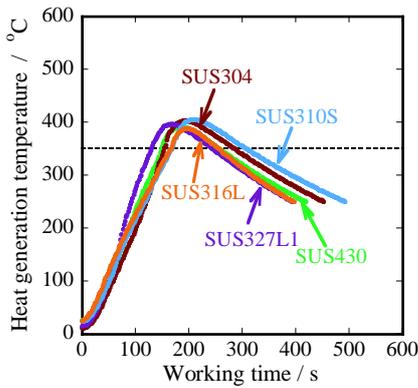
回転治具と摩擦治具の組み合わせによって得られる発熱温度の試験を行った。ステンレス鋼 SUS304 の回転治具と合金工具鋼 SKD11 を用いて摩擦発熱を行った結果、約 300 s の加工時間で約 500 °C の温度に達した。マグネシウム合金のプレス加工技術では、200~250 °C での温間成形による成形性改善の研究が古くから行われている⁹⁾。また、深絞り加工においても、鋳造および圧延材料から作製した厚さ 1.0 mm の Mg - 1.5Zr 合金のブランクに対して、150 °C の温間で成形が可能であることが報告されている¹⁰⁾。以上より、本研究では 300 °C 程度の加熱温度が得られれば、マグネシウム合金のブランクは十分に成形が可能であると考え、測定温度が 350 °C に達した加工時間で回転治具の回転を停止することにした。

図 3 に、合金工具鋼系回転治具(a)およびステンレス鋼系回転治具(b)における発熱温度と加工時間の関係を示す。発熱治具は合金工具鋼 SKD11 である。図中の破線は、回転治具を停止させた発熱温度 350 °C を示す。合金工具鋼系回転治具の場合(a)、回転を停止後に予熱による 20~30 °C の上昇があり、400 °C 付近まで上昇した。一方、ステンレス鋼系回転治具の場合(b)、SUS430 や SUS327L1 では、400 °C 付近まで上昇し、SUS304 や SUS310S では、400 °C 以上の上昇が見られた。合金工具鋼系とステンレス鋼系の回転治具において、回転の開始から最高温度に到達する時間は 150~200 s であった。

発熱治具の材質の影響を調べるため、鋼種を変えて試験を行った。発熱治具は SKD61 である。図 4 に、合金工具鋼系回転治具(a)およびステンレス鋼系回転治具(b)における発熱温度と加工時間の関係を示す。発熱治具 SKD11 で得られた発熱温度と同様に 400 °C 付近の上昇があった。しかし、回転治具 SUS430 と発熱治具 SKD61 を用いた場合、発熱温度 150 °C 付近で、これらの回転治具は焼付きによって回転が停止した。焼付きに及ぼす多くの因子として、硬さや表面粗さなどが知られている。ステンレス鋼は焼付きが生じやすい材料として知られているが¹¹⁾、SUS304、SUS327L1、SUS310S では焼付きは見られなかった。現在、この理由については明確にできていない。

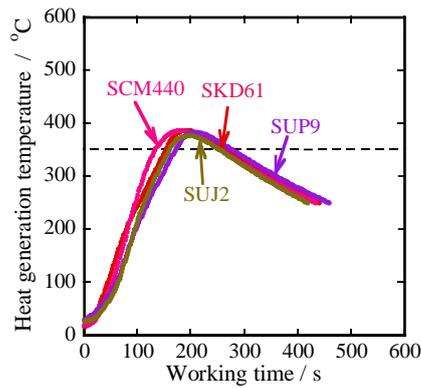


(a) 回転治具：合金鋼

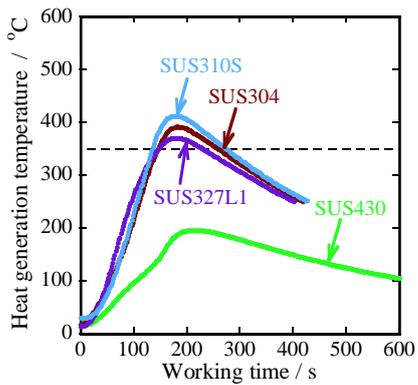


(b) 回転治具：ステンレス鋼

図3 SKD11における摩擦発熱温度と加工時間の関係



(a) 回転治具：合金鋼

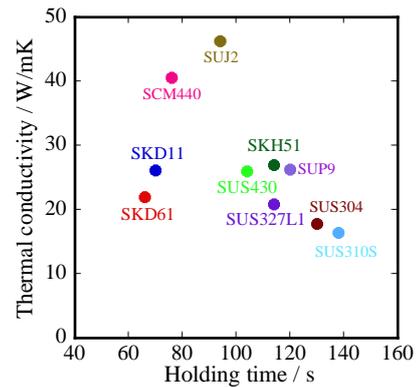


(b) 回転治具：ステンレス鋼

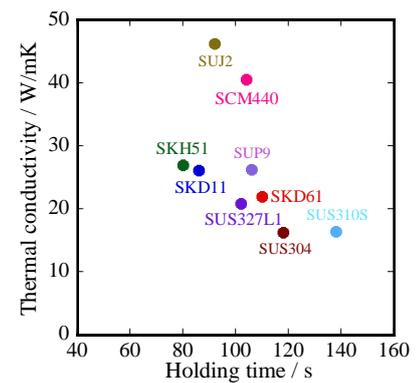
図4 SKD61における摩擦発熱温度と加工時間の関係

3・2 熱伝導率との関係

回転治具の種類によって 350℃以上を保持する時間に違いがあることがわかった。保持温度に影響のある物理定数として熱伝導率がある。そこで、各種治具と熱伝導率の関係について調べた。図5に、発熱治具 SKD11(a)および発熱治具 SKD61(b)における各種回転治具の熱伝導率と 350℃以上の保持時間の関係を示す。回転治具が SKD11 や SUJ2 の場合では 100 s 以下であったが、回転治具がステンレス鋼系の場合では 100 s 以上であった。この保持時間はほかの回転治具に比べて大きい。これはステンレス鋼系の熱伝導率が他の回転治具よりも低い⁷⁾ため、摩擦面の温度が上昇しやすく、回転停止後の温度上昇や 350℃以上の保持時間に関して良好な結果が得られたと考えられる。



(a) 発熱治具：SKD11

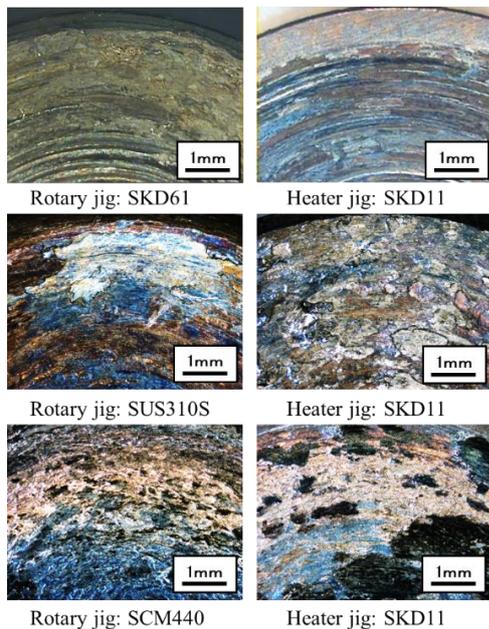


(b) 発熱治具：SKD61

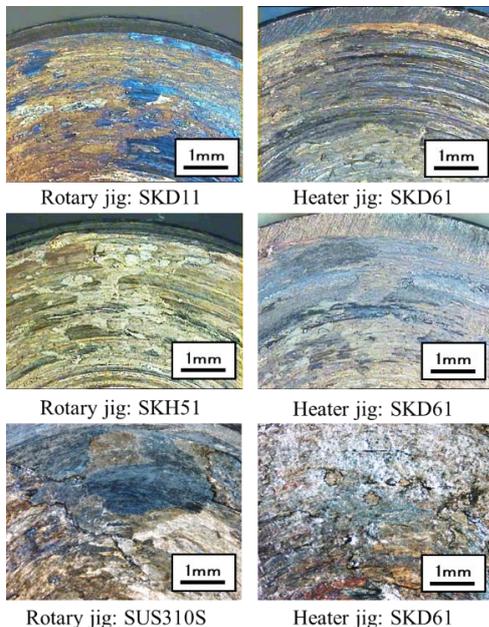
図5 熱伝導率と加工保持時間の関係

3・3 摩耗表面の観察

摩擦発熱の加工中において、ほとんどの回転治具の回転は止まることはなかった。つまり、回転治具と発熱治具との組み合わせでは接着は生じなかった。そこで、摩擦発熱後の回転治具および発熱治具の表面を観察した。図6に、発熱治具 SKD11(a)およびSKD61(b)に対する摩擦後の各種回転治具の表面状態を示す。回転治具や発熱治具において、焼付きの形跡は見られなかったが、各回転治具の表面には回転による直線状の跡が観察された。同様に、発熱治具 SKH51 においても線状の跡が観察された。



(a) 発熱治具：SKD11



(b) 発熱治具：SKD61

図6 摩擦発熱後の回転治具の表面状態

3・4 摩耗量

回転治具と発熱治具の摩擦によって、両治具の接触面において磨耗が生じていると考えられる。そこで、摩擦発熱後の回転治具の摩耗量を調べた。表2に、発熱治具SKD11およびSKD61に対する各種回転治具の摩耗量を示す。摩耗量は加工前後の表面からの深さ方向の寸法変化量と定義した。測定は一回の加工後で行われた。各種回転治具において、合金鋼系治具の摩耗量はステンレス鋼系治具のそれと比べて小さかった。これは、ステンレス鋼の組成中の炭

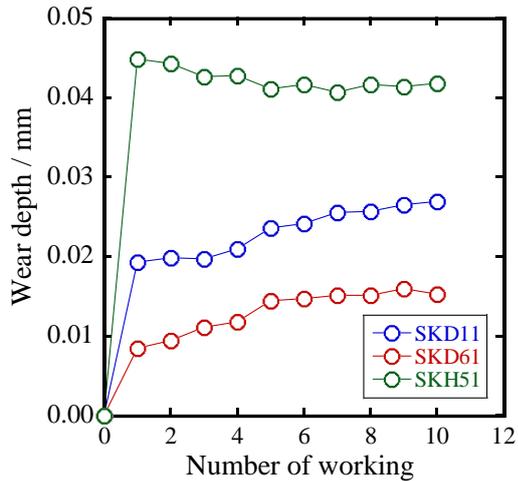
素含有量が低いため、高温での変形抵抗が低くなったと考えられる。一方、ステンレス鋼系回転治具に対する発熱治具の磨耗はほとんどみられなかった。ただし、合金鋼同士での組み合わせの場合、両方の治具の摩耗量は増加した。

表2 摩擦発熱後の発熱治具および回転治具の摩耗量

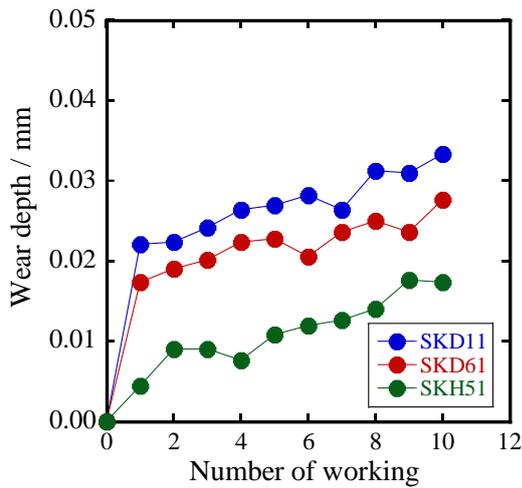
		Heater jig (mm)		Rotary jig (mm)	
SKD11	2.3	SKD11	9.2		
	15.2	SCM440	21.0		
	6.8	SUP9	3.0		
	6.0	SUJ2	1.0		
	3.4	SUS430	54.5		
	5.3	SUS304	28.8		
	11.3	SUS327L1	31.6		
	8.7	SUS310s	37.9		
SKD61	4.1	SKD61	5.8		
	10.4	SCM440	8.0		
	8.0	SUP9	2.3		
	5.8	SUJ2	2.3		
	4.8	SUS430	19.9		
	8.0	SUS304	14.0		
	4.75	SUS327L1	13.3		
	8.25	SUS310s	22.8		

摩擦発熱後における発熱治具および回転治具の摩耗量に変化がみられた。そこで、複数の工程を経た後の治具の摩耗量の変化について調べた。図7に、摩擦発熱の工程を10回繰り返した後の回転治具SUS304の摩耗量(a)と発熱治具の摩耗量(b)を示す。摩耗量の測定は摩擦発熱の工程ごとに行った。回転治具の摩耗量の変化は発熱治具によって異なる。発熱治具が工具鋼SKD11とSKD61の場合、回転治具の摩耗量は徐々に増加した。しかし、発熱治具が高速度工具鋼SKH51の場合、回転治具の摩耗量はほとんど変化しなかった。高速度工具鋼の熱処理では一般に1200～1300℃の高温から焼入が行われるが、本研究では熱処理は行っていない受け入れ材のままである。発熱治具で用いた3種類の工具鋼の硬さに大きな違いはなかった。各発熱治具の平均硬さは、SKD11で約219HV、SKD61で約231HV、SKH51で約238HVであった。現在、発熱治具SKH51の摩耗量の変化の理由については不明である。一方、発熱治具の摩耗量の変化は、どの治具も徐々に増加しており、各治具の増加率はほぼ同じであった。

複数回の工程を行った回転治具と発熱治具の表面状態について調べた。発熱治具はSKD11、SKD61、SKH51である。工程数10回の摩擦発熱後において、摩擦発熱の工程数が増加しても、両治具の表面に焼付きは観察されなかった。



(a) 回転治具 SUS304 の摩耗量



(b) 各種発熱治具の摩耗量

図7 回転治具および発熱治具の摩耗量

3・5 温間深絞り加工

摩擦発熱によりパンチ先端部が 350~400 °C に加熱されることがわかった。実際に温間で深絞り加工を行った。図8に、室温(a)および温間(b)におけるマグネシウム合金 AZ31 の容器外観を示す。ブランクの板厚および直径は 0.5 mm および 35 mm である。加工温度はダイの肩部付近で測定した。深絞り加工時の温度はダイ肩半径付近で約 210 °C であった。摩擦発熱により、良好な成形性が見られ、容器の壁割れや底割れ破断は発生しなかった。

4. おわりに

本研究では、摩擦発熱治具を内蔵したパンチを用い、数種類の鉄鋼材料を組み合わせる摩擦発熱を行った。得られた成果は次の通りである。

- (1) 回転治具が合金工具鋼とステンレス鋼の場合、回転治具の回転時間 180 s 付近で 370~400 °C の発熱温度が得られることが確認できた。
- (2) 回転治具がステンレス鋼の場合、熱伝導率が低いので 350 °C 以上の保持時間が 100 s 以上得られることがわかった。
- (3) 回転治具と発熱治具の接触面である摩擦面において、ほとんどの回転治具や発熱治具に焼付きの形跡は見られなかった。
- (4) 回転治具がステンレス鋼系の場合、他の回転治具の鋼種に比べて摩耗深さは増加したが、最大値は 0.1 mm 以下であることがわかった。
- (5) 提案した本手法は、パンチ金型に対して加熱が可能であり、温間深絞り加工によるマグネシウム合金の加工性改善の可能性があることがわかった。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、公益財団法人天田財団の 2020 年度一般研究開発助成 AF-2020016-B3 を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。また、本学工作センター職員の方々には加工装置の試作を、大学院生の高原太樹君には多くの実験を手伝っていただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 工藤智行：ふらすとす, 6-61 (2023), 29-33.
- 2) 櫻井健夫：アルトピア, 53-1 (2023), 9-18.
- 3) 星野克弥：表面技術, 73-3 (2022), 123-1327.
- 4) 宮野遥, 竹本圭佑, 津志田雅之, 北原弘基, 北原弘基, 安藤新二：軽金属, 70-4 (2020), 117-121.
- 5) 中田大貴：天田財団助成研究成果報告書, 35 (2022), 360-364.
- 6) 千野靖正, HUANG Xincheng, 斎藤尚文, 西脇武志, 毛利猛, 松田幹雄：塑性と加工, 64-744 (2023), 13-18.



(a) 室温



(b) 温間, 210 °C

図8 マグネシウム合金 AZ31 の容器外観

- 7) 濱崎洋：天田財団助成研究成果報告書, 32 (2019), 131-135.
- 8) 吉村英徳：天田財団助成研究成果報告書, 35 (2022), 125-130.
- 9) 西野創一郎：軽金属, 61-6 (2011), 269-273.
- 10) 田村洋介, 早田博, A. Mclean：軽金属, 69-2 (2019), 101-106.
- 11) 古閑伸裕, 薄憲毅, 許昌龍：塑性と加工, 53-612 (2012), 74-78.