



T. Harada

超軽量マグネシウム合金板の 冷間多段深絞り加工性

原田 泰典*

1. まえがき

国内では長年にわたって省エネの取り組みが行われており、今後さらなる省エネを進めていく必要があるとされている¹⁾。自動車、鉄道、船舶、航空機などの輸送機器業界では、機材の軽量化によるエネルギー効率改善が進められている。搬送機器分野では、自動車や鉄道車体の構造の軽量化に対して、アルミニウム合金やマグネシウム合金の軽金属材料の適用が行われている²⁾。従来から利用されていた鉄鋼材料との革新的な接合技術の開発に伴い、マルチマテリアルによる軽量化が進められている³⁾。また、航空宇宙分野では、航空機や人工衛星の構造の軽量化に対して、チタン材料⁴⁾、⁵⁾や炭素繊維強化プラスチック複合材(CFRP)⁶⁾の適用が年を追うごとに拡大している。現在、新素材の開発と同時にそれらの成形技術の開発も盛んに行われている状況である。

車体用軽量材料として、金属材料ではマグネシウム合金が構造材向けとして注目を集めている。燃費向上につながる車体の軽量化を果たすため、マグネシウム構造部品の採用が拡大しているためである⁷⁾。筐体や容器の場合、各種形状にプレス成形によって製品化されることが多く、またさらなる軽量化を図るための容器薄肉化も進められている。そのため、製品精度の高いプレス成形技術を確立するとともに、プレス成形を考慮した合金開発に関する技術は国内外で多く行われている⁸⁾。とくに、省エネを考慮した搬送機器の部材としてプレス成形性にすぐれた新しい合金開発が行われている⁹⁾。強加工後の熱処理や高温焼鈍処理などの組織制御によって、従来法に比べて成形性は飛躍的に向上している。このように、これまでに合金の材質改善に関する多くの研究が行われている。 casting後に温間圧延を施して作製したマグネシウム AZ31 合金と AZ91 合金において¹⁰⁾、また異周速圧延で結晶粒微細化したマグネシウム ZK60 合金において¹¹⁾、それぞれ超塑性挙動を示す報告がある。また、マグネシウム AZ31 合金のプレス成形性に及ぼす微細構造組織や Mn 添加効果の影響について調べられている¹²⁾。著者もマグネシウム AZ31 合金の高温焼鈍処理によって延性が改善することを報告している¹³⁾。しかし、実用合金は結晶構造的に加工性が非常に低く、室温成形は極めて困難であることが製品拡大の大きな障害となっている。ここで、室温での低加工性は、稠密六

方格子構造を有するため、独立なすべり系が少ない上に主すべり系が底面すべりであることに起因する。そのため、合金のプレス成形は温間で行われることが多く、成形に関する研究もそのほとんどが温間での成形性が調べられている¹⁴⁾。温間プレス成形性試験機によって AZ31 合金の温間成形を行い、深絞り性、伸びフランジ性、形状凍結性の温度依存性について調べた報告がある¹⁵⁾。また、恒温圧延機で作製したマグネシウム AZ61 合金、AZ91 合金、AM60 合金の各板の深絞り成形性を検討し、実用的圧延温度について調べた報告がある¹⁶⁾。また、プレス加工中の材料に対して局部加熱を用いた温間成形法によって成形限界の改善について調べられている¹⁷⁾。このように、マグネシウム材料に関する研究のほとんどは温間あるいは熱間での加工条件下で行われているのが現状である。上述したように、稠密六方格子構造であるマグネシウム合金が室温でほとんど成形加工ができない脆性材料であるためである。そのため、国内外の研究機関において、マグネシウム合金の温間や熱間における成形性の改善は進んでいるが、室温におけるプレス成形技術はほとんど確立されていない状況にある。もし、冷間成形が可能となれば、加熱装置の必要な複雑な金型は不要となるのでコスト低減につながることも製品化が飛躍的に進むものと思われる。

本研究では、マグネシウム合金の良好な室温プレス成形加工を行うため、塑性変形に伴うすべり面が多いβ型マグネシウム合金に着目した。このβ型合金は、古くからマグネシウム合金の中では比較的室温延性を示すことが知られている¹⁸⁾。実用合金の最密六方晶構造とは異なり、体心立方構造なので塑性変形に伴うすべり面が多いことが特徴である。また、この合金はリチウムを比較的多く含有しているので実用合金に比べて約 20 % 軽く、省エネ社会の実現を推進する上で注目されている。そのゆえ、リチウム含有マグネシウム合金において、冷間での機械的性質やプレス成形性について多くの研究が行われるようになった¹⁹⁻²¹⁾。深絞り加工の研究として、マグネシウム Mg-9Li-1Y 合金薄板を用いた円筒状深絞り加工やエリクセン試験などを行い、高い成形性を示す報告がある²²⁾。しかしながら、プレス加工における冷間成形性と合金組織の関係や連続加工である多段深絞り加工による冷間成形性についてはあまり調べられていない。このような状況下

* 兵庫県立大学大学院 工学研究科機械系工学専攻 教授

で、近年のマグネシウム合金の製錬技術の進歩によって、新たな高品質の β 型 Mg-Li 合金の開発が行われた。超軽量で高比強度、高剛性、高加工性に優れた合金のため、実用化の期待が望まれている。そこで、本研究ではこの開発された新しい β 型合金を用い、プレス成形の中では比較的厳しい成形とされる円筒および角筒形状の多段深絞り加工を冷間で試み、おもに成形性について調べた。

2. 実験方法

2.1 試験材料

供試材は高品位のリチウム含有マグネシウム合金で、ASTM 規格 LA141 (株式会社三徳製) である。主な添加元素の組成(mass%)は、13.56Li, 0.96Al, 0.29Ca, 0.005Zn, 0.017Si である。合金インゴット 150×400×1200 mm から熱間及び冷間の圧延によって板厚 0.5 mm (角筒容器では板厚 1.0 mm も用いた) の薄板を作製したのち、深絞り加工用ブランクを切り出した。初期ブランクの直径は角筒用も含めて 70~100 mm である。全てのブランクは、加工ひずみを除去するため、大気中で約 200 °C で 3.6 ks の焼鈍処理を施した。図 1 に、電子線後方散乱回折法(EBSD)によって観察した厚さ 0.5 mm の圧延板の組織を示す。圧延方向 RD は水平方向である。

ることは重要であるため、引張試験を行った。引張試験機はインストロン社製で引張速度は 2 mm/min である。引張試験片は JIS-13B 号で、薄板から切り出した。また、異方性を調べるため、圧延方向に対して 0 度、45 度、90 度の 3 方向から採取を行った。

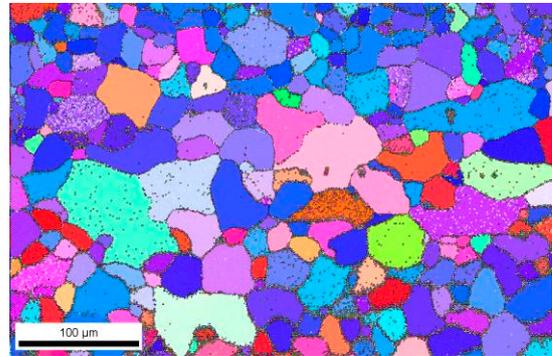


図 1 EBSD による圧延板の組織

2.2 円筒容器の多段深絞り加工

深絞り加工は、油圧式万能試験機を用い、クロスヘッド速度約 10 mm/s の速度で深絞り加工を行った。多段深絞り加工は、第 1 段~第 9 段までのパンチを用い、室温で行った。第 2 段目以降の加工では絞り比を約 1.2 で行った。パンチとダイにおけるクリアランスはブランク板厚と同じにした。パンチ形状は、すべての段数において肩半径 3 mm である。ダイ形状は、1 段目がダイ肩半径 4 mm の平ダイ、2~10 段目がダイ半角 30°、ダイ肩半径 2 mm のテーパダイである。第 2 段以降の加工ではしわ抑えはなしで行った。パンチとダイは熱処理を施した合金鋼 SKD11 を、また潤滑剤は市販の二硫化モリブデン固体粉末含有工作油を用いた。図 2 に、第 1 段加工で用いた深絞り加工装置の概略を示す。

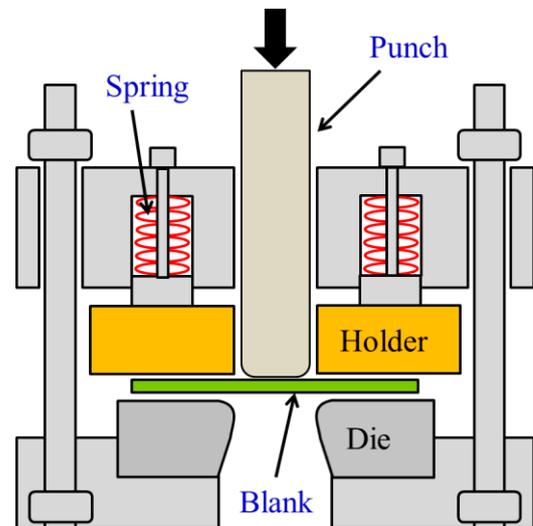


図 2 深絞り加工装置の概略

2.3 角筒容器の多段深絞り加工

第 1 段において、用いたダイは対辺 40 mm、肩半径 4 mm の正四角で、パンチは対辺 38 mm、肩半径 4 mm の正四角である。第 2 段目以降の加工ではパンチとダイの対辺を前後の加工で寸法比 20%で行った。すべての段数において、パンチとダイにおけるクリアランスは 1 mm とした。その他の深絞り加工条件は円筒容器の加工条件と同じである。図 3 に、正四角筒深絞り加工に用いたパンチとダイの外観を示す。

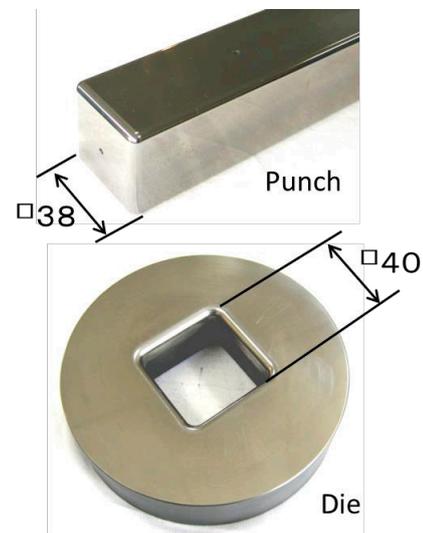


図 3 第 1 段角筒容器成形用金型の外観

2.4 引張試験

深絞り加工の成形において、合金薄板の機械的性質を知

3. 研究成果

3.1 円筒容器の成形性

図4に、板厚0.5mmの圧延板から採取した3種類の試験片で得られた荷重-変位曲線を示す。最大荷重における圧延薄板からの採取方向の影響はあまり見られないが、破断伸びに対する影響は大きな違いが見られる。得られた荷重-変位曲線から、最大引張応力と破断伸びを算出した。その結果、最大引張応力は0度方向で約142MPa、45度方向で約143MPa、90度方向で約146MPaであった。また、破断伸びは0度方向で約50%、45度方向で約40%、90度方向で約23%であった。室温における変形能は高いことが分かる。同様に、図5に、板厚1.0mmの圧延板から採取した3種類の試験片で得られた荷重変位曲線を示す。室温における変形能は高いことが分かる。

合金薄板の成形限界を調べるため、ブランク直径70mmと80mmの2種類を用い、深絞り加工を室温で行った。その結果、両ブランクから成形した容器において、しわや破断はまったく見られず、室温での成形性は良好であることが分かった。そこで、合金薄板の限界絞り比(L.D.R.)を調べた。ブランク直径90mmと92mmの2種類を用いた深絞り加工では、破断のない良好な容器が得られた。図6に、ブランク直径92mmを用いて深絞り加工を行った容器外観を示す。しかしながら、ブランク直径94mmを用いた加工では、成形中に破断を生じた(図7)。以上より、開発合金のL.D.R.は約2.3であることが分かった。

合金薄板の深絞り加工性は良好であることが分かったため、連続加工である多段深絞り加工を室温で行った。初期ブランク直径75mmのブランクを用いて多段深絞り加工を室温で行った。図8に、第1段から第8段における容器の外観を示す。工程中は中間焼鈍なしで連続加工を行った。第8段までの深絞り加工において、容器に破断は見られず成形が可能であった。しかし、第6段容器において容器表面に微細な割れが生じているのが観察された。工程中に容器への中間焼鈍を施さなかったので加工硬化によって割れが生じたものと考えられる。この微細な割れは、第7段以降の加工において成長して大きくなったが、容器の破断は見られなかった。

図9に、初期ブランク直径75mmのブランクを用いて、第6段(a)と第8段(b)における容器表面を示す。第6段(a)の場合、容器の周方向に微細な割れが生じているのが見られる。第8段(b)の場合、第6段(a)で生じた微細な割れが絞り方向に拡がり、割れ自体が大きくなっているのが分かる。しかし、成形は可能であり容器の底部や側壁部において破断を生じることはなかった。

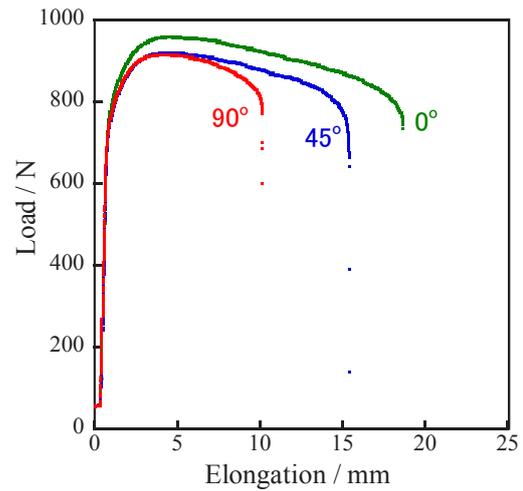


図4 板厚0.5mmの圧延板における荷重-変位曲線

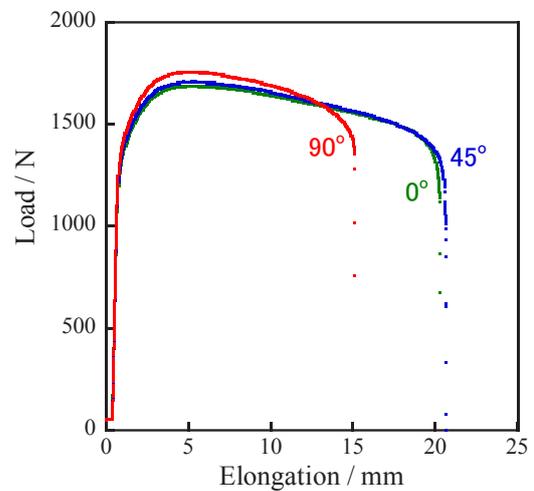


図5 板厚1.0mmの圧延板における荷重-変位曲線



図6 初期ブランク直径92mmに対して深絞り成形した容器外観

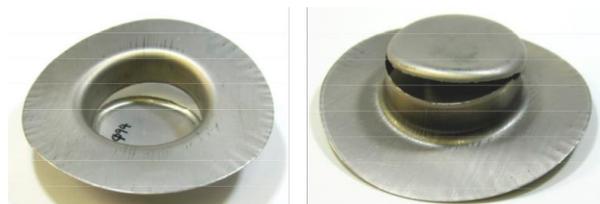


図7 ブランク直径94mmにおける深絞り加工中に破断した容器外観

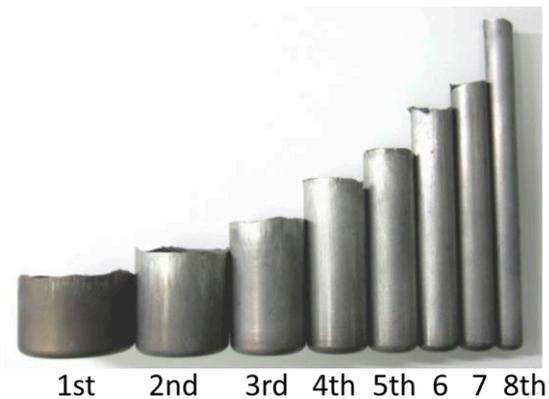


図8 初期blank直径75mmを用いた多段深絞り加工後の第1段から第8段までの容器外観

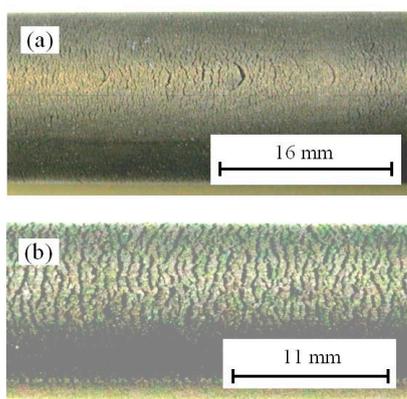


図9 blank直径75mmにおける深絞り加工後の容器表面 (a)第6段容器, (b)第8段容器

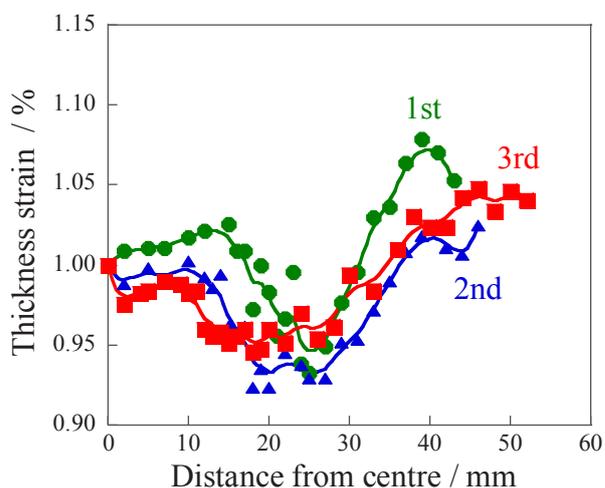


図10 初期blank直径75mmを用いた絞り加工後の第7段から第9段までの容器外観

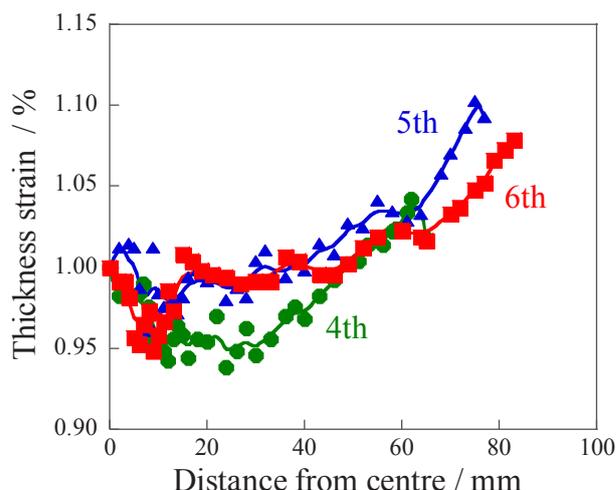
多段深絞り加工における容器表面の割れ発生を防ぐため、工程中での中間焼鈍処理の影響について調べた。その結果、工程中に数回の中間焼鈍を施すことによって、容器表面の割れは生じないことが分かった。焼鈍条件は大気中、焼鈍温度 200 °Cで保持時間 3.6 ks である。図10に、多段深絞り加工の工程中に中間焼鈍を施した第7段から第9段における容器の外観を示す。中間焼鈍は第3段と第6段の容器に対してそれぞれ行った。いずれの容器においても側壁部表面には割れの発生はまったく見られなかった。したがって、容器表面の割れ発生防止に対して、工程中で

の容器への中間焼鈍は有効であることが分かった。第9段で得られた容器寸法は外直径約9mmで長さ約200mmである。

深絞り加工では容器底部のコーナ部で板厚の減少が生じ、開口部では逆に増肉することがよく知られている。そこで、多段深絞り加工における容器の板厚分布を調べた。図11に、blank直径75mmを用いて多段深絞り加工を行った第1段から第3段の容器(a)、第4段から第6段の容器(b)における板厚分布を示す。工程中の中間焼鈍処理は行っていない。板厚測定は、デジタルポイントマイクロメーターによって容器底部中心から開口部まで行った。底部コーナ部での減少率は8%以下で、また開口部での増肉量は約10%であった。本加工におけるパンチとダイスのクリアランスをblankの板厚と同じにしているため、開口部付近ではしごきの効果が生じたためと思われる。



(a) 第1段から第3段の容器



(b) 第4段から第6段の容器

図11 容器底部中心から開口部における板厚分布

3.2 角筒容器の成形性

前節において、円筒容器の多段深絞り加工を行った結果、成形性は良好であることが分かった。深絞り容器の利用範囲をさらに広げるため、角筒絞り加工による容器の成形を試みた。円板状ブランクを用いて正四角形状容器の成形を行った。

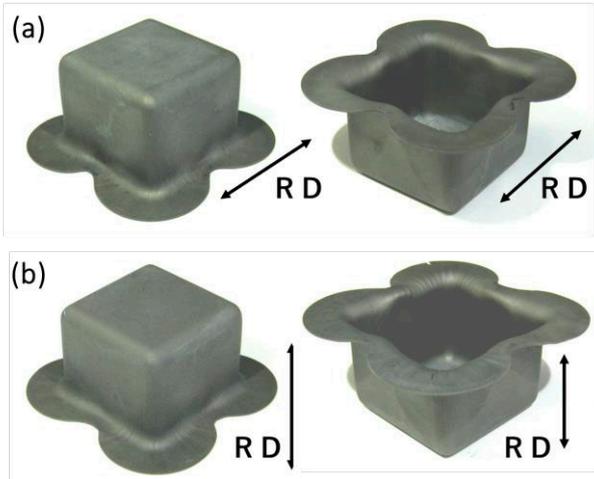


図 12 厚さ 0.5mm の第 1 段角筒容器の外観

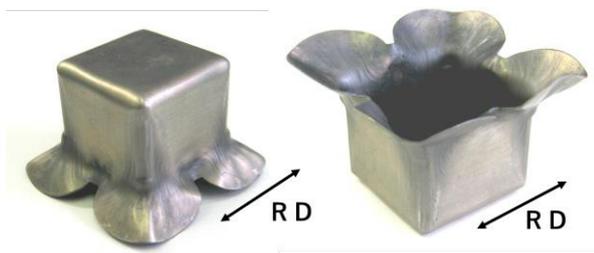


図 13 厚さ 0.5mm の第 2 段角筒容器の外観

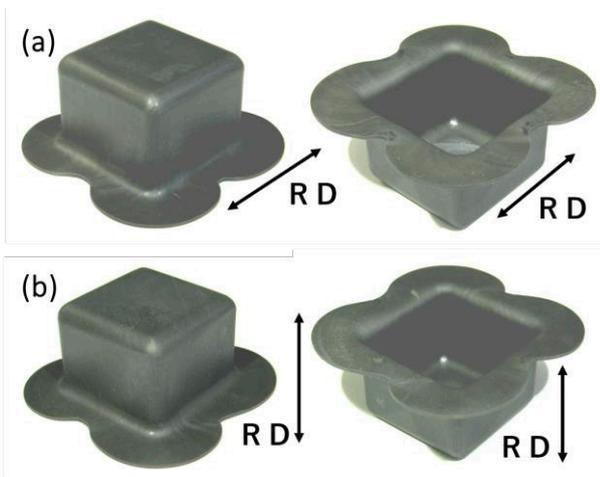


図 14 厚さ 1.0mm の第 1 段容器の外観

図 12 に、直径 100 mm、板厚 0.5 mm のブランクを用いて深絞り加工を行った第 1 段容器の外観を示す。容器(a)はブランクの圧延方向(RD)に対して角筒パンチの対辺が平行で、また容器(b)は角筒パンチの対辺が 45° でそれぞれ深絞り加工を行った容器である。両容器の深さは約 30 mm である。側壁部や側部における破断は見られず成形性は良好であった。

第 2 段容器の深絞り加工を行った。しわ抑えはなしで成形を行い、容器のフランジを残した形状とした。図 13 に、厚さ 0.5 mm の第 2 段容器の外観を示す。底割れや壁割れの破壊は生じなかったため、成形性は良好であることが分かった。

ブランクの板厚を 1.0 mm に変化させて角筒容器の成形を行った。図 14 に、直径 100 mm、板厚 1.0 mm のブランクを用いて深絞り加工を行った第 1 段容器の外観を示す。容器(a)はブランクの圧延方向(RD)に対して角筒パンチの対辺が平行で、また容器(b)は角筒パンチの対辺が 45° でそれぞれ深絞り加工を行った容器である。両容器の深さは約 30 mm である。すべての容器において、壁割れや底割れの破壊は見られず成形性は良好であった。しかし、容器(b)の底部コーナ部において、表面に細かい割れの発生が見られた。板厚 0.5 mm のブランクを用いた角筒容器には割れの発生が見られなかったことから、コーナ部での曲率が大きくなったためと考えられる。

図 15 に、底部コーナ部において割れの発生が見られた角筒容器(図 14(b))の拡大したコーナ部を示す。ブランクの圧延方向とそれに直角な方向が容器底部の四隅となる。写真(a)はブランクの圧延方向が水平方向で、また写真(b)はブランクの圧延方向が直角方向である。底部コーナにおいて割れの発生が見られるが、割れの形態に違いが見られる。すなわち、写真(a)では小さな割れが圧延方向に平行に数本生じているが、写真(b)では微細な割れが圧延方向に直角に多く生じている。このため、割れの発生は圧延材の組織的な影響を受けていると考えられる。そこで、圧延材の組織観察を行った。

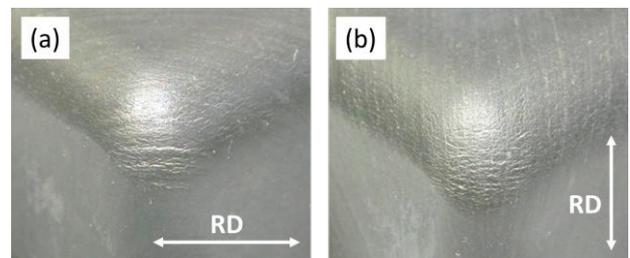


図 15 厚さ 1.0mm の容器底部四隅の外観

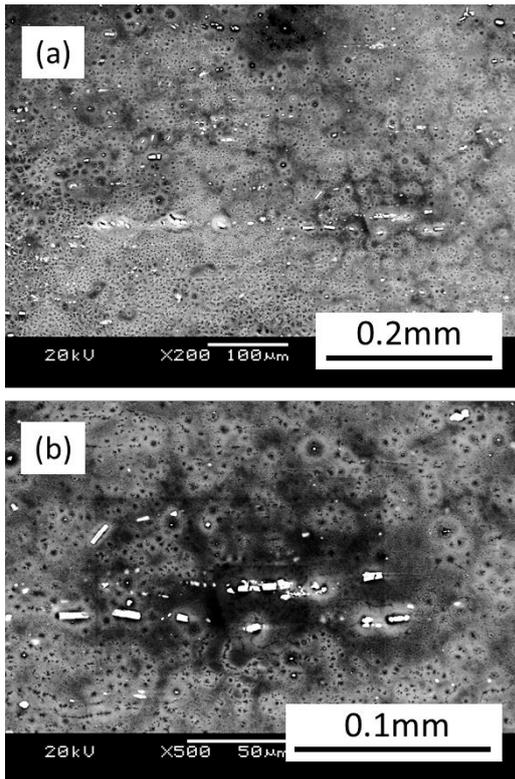


図 16 厚さ 1.0mm の圧延材表面の SEM 像
圧延方向：水平方向

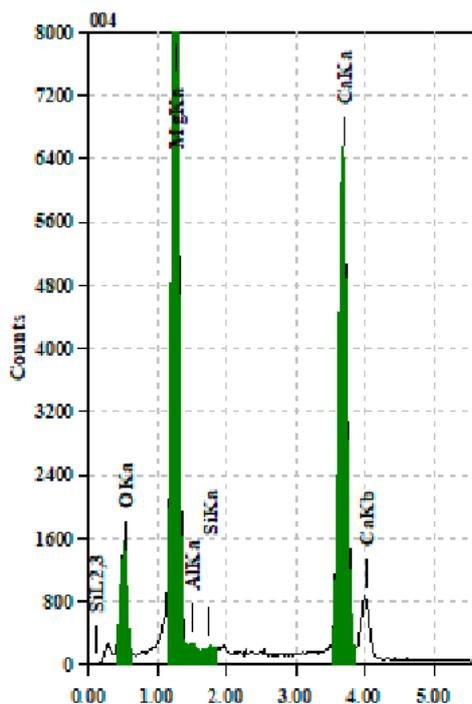


図 17 厚さ 1.0mm の第 1 段容器の外観

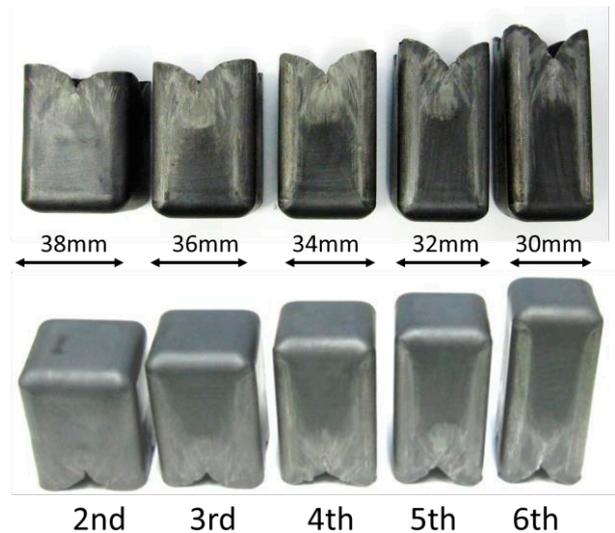


図 18 厚さ 1.0mm の多段角筒容器の外観

図 16 に、厚さ 1.0 mm の圧延材における表面の SEM 像を示す。写真(b)は写真(a)の拡大図である。材料表面に白色の介在物が見られ、圧延方向（水平方向）に沿って点在している。SEM 付属のエネルギー分散型 X 線分析装置 (EDX) により、介在物の組成分析を行った (図 17)。その結果、Ca-Mg の二元系金属間化合物あるいは Ca-Mg-Si の三元系金属間化合物、またはそれらにリチウムも混入した化合物であることが分かった。合金の溶湯中において、金属間化合物の介在物が形成され、圧延によって破壊されて圧延方向に沿って点在したものと考えられる。

容器底部コーナ四隅において、割れ発生が見られない板厚 1.0 mm の第 1 段容器を用い、多段工程による角筒深絞り加工を行った。ダイ肩半径とコーナ半径は 6 mm である。図 18 に、第 2 段目から第 6 段目の容器外観を示す。多段工程中、容器への焼鈍は行わなかったが、底割れや壁割れは見られなかった。第 6 段容器までの成形において、良好な成形性が得られることがわかった。

4. あとがき

マグネシウム合金の利用範囲を拡げるため、高品位の β 型 Mg-Li 合金を用いた室温での深絞り加工を行った。プレス成形の中では厳しい成形とされる円筒および角筒容器の多段深絞り加工を試みた。その結果、高品質の合金から作製した薄板は室温での深絞り加工が十分に可能であることが分かった。成形性の目安となる限界絞り比 LDR は円筒容器において約 2.3 であることが分かった。そこで、さらに厳しい加工である多段深絞り加工を試みた。その結果、工程中に中間焼鈍を施すことで多段深絞り加工が可能であることが分かった。第 9 段の加工において、直径 9 mm、長さ約 200 mm の細長容器が得られた。また、円筒容器の結果に基づき、利用範囲を拡げる目的で、角筒容器の多段深絞り加工も試みた。その結果、第 6 段までの容器の成形が可能であり、第 6 段の加工において、対辺

30 mm で高さ約 60 mm の角筒容器の成形が可能であることが分かった。

本研究で用いたβ型合金は冷間での塑性変形が可能であったが、他のマグネシウム合金と共通する耐食性や難燃性など改善が強く要求されている。そのため、要求されている課題を乗り越えるための研究が盛んに行われている。例えば、現在、実用化されているマグネシウム合金において、カルシウムを添加することで燃焼しにくい難燃性合金の開発や成形性に関する研究が行われている²³⁻²⁶。また、機械的性質の向上のため、少量の希土類元素を添加した合金も開発や成形性の研究が行われている²⁷⁻³⁰。マグネシウムは天然資源として豊富であり、リサイクル性に優れているため、今後、高い耐食性や難燃性を有するとともに、室温での高い変形能を有する深絞り加工性に優れた素材の開発が期待されている。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成AF-2010002により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に深く感謝いたします。また、組織観察の方法に対して的確な助言を頂いた兵庫県立大学大学院の山本厚之教授に深謝いたします。最後に、金型や試験片の作製を行っていただいた兵庫県立大学工学部工作課の皆様感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁:エネルギー白書 2019, (2019).
- 2) 吉田英雄: 軽金属, Vol.55, No.6 (2005), 270-274.
- 3) 兵藤知明・山下秀・平田好則・平田好則: 自動車技術, Vol.72, No.11 (2018), 4-9.
- 4) 長田卓: 塑性加工シンポジウム, No.321 (2017), 29-36.
- 5) 小柳禎彦: チタン, Vol.67, No.3 (2019), 174-175.
- 6) 佐藤成道: 軽金属学会シンポジウム, No.112 (2019), 33-43.
- 7) 森久史・上東直孝: 塑性と加工, Vol.58, No.679 (2017), 666-670.
- 8) 長谷川取: 天田財団助成研究成果報告書, Vol.31 (2018), 255-259.
- 9) 井上忠信: Form Tech Rev, Vol.22, No.1(2013), 86-90.
- 10) Dashwod R., Grimes R., Klaunzner D., Jackson M., Fanz.: Key Eng Mater, Vol.433(2010), 273-279.
- 11) Kim W. J., Kim M. J., Wang J. Y.: Mater Sci Eng A Struct Mater Prop Microstruct Process, Vol.527 No.1-2 (2009),322-327.
- 12) Huang X., Suzuki K., Watazu A., Shigematsu I., SAITO N.: J Mater Res, Vol.23 No.11 (2008), 3029-3039.
- 13) 森謙一郎・辻浩和・原田泰典: 塑性加工春季講演会講演論文集, Vol.2005 (2005), 229-230.
- 14) Galdos L., Saenz - De - Argandona E., Ulacia I., Arruebarrena G: Key Eng Mater, Vol.504/506 Pt.2 (2012), 815-820.
- 15) 松居正夫・鈴木隆・井上孝司・土田豊・渡辺真・河部昭雄: 大同工業大学紀要, Vol.41 (2005), 39-44.
- 16) 古閑伸裕・Paisarn Ratchanee・石原直剛・渡利久規・羽賀俊雄: 軽金属, Vol.57 No.4 (2007), 141-145.
- 17) 須貝裕之・田辺郁男・Truong Hong Minh: 日本機械学会論文集 C 編, Vol.73 No.733 (2007), 2625-2630.
- 18) 松沢和夫・越原俊夫・小島陽: 軽金属, Vol.39 No.1(1989), 45-51.
- 19) 宅田裕彦・江南貴司・塚田虎之・久保田耕平: 塑性加工連合講演会講演論文集, Vol.49th (1998), 335-336.
- 20) 後藤崇之: 工業材料, Vol.60, No.1 (2012), 34-35.
- 21) 小原美良: 軽金属, Vol.65, No.7 (2015), 276-280.
- 22) 宅田裕彦・吉田哲幸・菊池潮美・岡原治男: 塑性と加工, Vol.43, No.502 (2002), 1077-1081.
- 23) 鈴木一孝・斎藤尚文・Huang X.・湯浅元仁・千野靖正: 軽金属, Vol.66, No.5 (2016), 273-279.
- 24) 芹澤愛・岩瀬陽祐・簾智仁・齋藤永宏・齋藤永宏・神山直澄・石崎貴裕: 軽金属, Vol.66, No.1 (2016), 9-14.
- 25) 木村聖光・宮下幸雄・萩原祐斗: 日本機械学会年次大会講演論文集(CD-ROM), Vol.2017 (2017), No.S0410303.
- 26) 伊藤友美・片桐隼人・野田雅史: 軽金属学会大会講演概要, Vol.136th (2019), 103-104.
- 27) 染川英俊・大澤嘉昭・Singh A.・鷲尾宏太・加藤晃・向井敏司: 日本金属学会誌, Vol.79, No.2 (2015), 35-40.
- 28) 齋藤嘉一・佐藤勝彦: 秋田大学地方創生センター年報, Vol.2016 (2016), 147-149.
- 29) Tracy D. Berman, Tresa M. Pollock, J. Wayne Jones: Metallurgical and Materials Transactions. A., Vol.47, Np.6 (2016), 3125-3136.
- 30) Braszczynska-Malik K.N., Grzybowska A.: Journal of Alloys and Compounds, Vol.663 (2016), 172-179.