

超軽量構造用マグネシウム合金押し材のマイクロ組織と プレス成形性に関する基礎研究

東京都立産業技術高等専門学校 機械システム工学コース
准教授 長谷川 収
(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015039)

キーワード：マグネシウム合金押し材、圧縮特性、横断面形状の最適化

1. 研究の目的と背景

地球環境の保護・省資源の目的から、エコカーなど輸送用機器の低エミッション化・軽量化が世界規模で進められており、省エネルギー化と、材料リサイクルの推進が求められている。軽合金材料の実用化例としては、車体の大半をアルミニウム合金で構成した乗用車が少数ながら生産されており、日本の大手メーカーでも高級乗用車の前座席の骨格に、鋳造のマグネシウム合金材料を採用した事例がある。一方、構造用材料として高剛性化と軽量化が両立可能な「管材」を有効利用するための加工、すなわちチューブフォーミング(TF)は、塑性加工の分野で精力的に研究されている課題である。しかし、TF 技術には生産性をいかに高めるかというところに研究課題が山積している。

マグネシウム合金材料はアルミニウム合金よりも比強度は高いが、他の金属材料に見られるようなすべりによる大規模な変形が生じにくいいため、一般には室温での塑性加工は困難と考えられており、加工技術としては鋳造が主流である。しかし、軽量の構造用材料として鋳造材よりも高い強度が得られる展伸材の塑性加工性についても基礎研究を進めることに価値がある。

申請者のこれまでの研究で、強度レベルの同等なマグネシウム合金押し材とアルミニウム合金押し材を、長手方向に対して直交する方向に圧縮変形をさせる際の座屈荷重や変形エネルギーを調べると、アルミニウム合金の方が2倍以上の値を示すことが明らかになっている。しかし、押し材は横断面形状の設計自由度が高く、たとえば角管の場合、横断面内にリブを加えたり、板厚に分布を与えるといった断面形状の工夫を行えば、アルミニウム合金よりも軽量で、かつ座屈荷重の高いマグネシウム合金押し材が製造できる可能性がある。

そこで本研究では、材料特性がマイクロ組織の影響を大きく受けるマグネシウム合金の組織と変形能の関連の調査や、コンピューターシミュレーションを利用して座屈荷重を増大させ得る押し材の断面形状の設計に指針を与えることを目的とする。

2. 実験および解析方法

2・1 押し材の圧縮特性

既往の研究¹⁾により、マグネシウム合金(AZ31)押し材と強度が同等のアルミニウム合金(A6063-T5)押し材を一定の長さに切出し、長手方向に対して圧縮する実験を行なった結果、AZ31 合金は、A6063 合金に対して変形エネルギーがおよそ 1/2 程度であることがわかっている。実験に用いた押し材の機械的性質を表 1 に、変形エネルギーを表 2 にそれぞれ示す。

2・2 押し材のマイクロ組織とプレス曲げ加工性

(1) プレス曲げ加工における破断限界

既往の研究²⁾により、AZ31 合金において、押し材の際の初期ピレット温度の違い(350℃と450℃)により、機械的性質が変化し、また曲げ加工した際のマグネシウム合金押し材の大きな特徴である曲げの圧縮側での破断限界が変化することが解っている。

まず、ピレット温度が低い方が、強度的因子がやや高い傾向が見られるが、圧縮で高ひずみ速度の場合には、そうでない例も確認された。TP351b と TP451b と称するロットを比較した場合がこれに該当する。

マグネシウム合金管材の曲げ加工において、曲げの圧縮側で破断するのは、圧縮側の変形抵抗が引張側に対して比較的低いために中立軸が引張側に移動しやすく、圧縮側のひずみが増大することが原因であると考えているが³⁾、今回の実験で用いた TP351b と称するロットは、その引張りと圧縮の変形抵抗差が小さく、同じ加工条件で曲げた際に破断を生じなかった。曲げ加工条件を表 3 示す。

(2) マグネシウム合金押し材の EBSD 解析

一方、マグネシウム合金の塑性変形能は、特に室温においては底面すべりによる変形のため、マイクロ組織の影響を大きく受けることが知られている⁴⁾。本研究に用いた上述の材料はどのような組織をもっているのかを調べるため、角管から試験片を切り出し、EBSD 解析を試みた。

2・3 押し材の座屈荷重

自動車のバンパーリインフォースメントへの適用を考えると、変形エネルギーの大きさが重要であるが⁵⁾、軽量化との両立を実現するとなると問題は複雑になる。本研究では、角管の長手方向に対して垂直に圧縮した場合の座屈を扱う。

表 1 実験に用いた AZ31 マグネシウム合金の機械的性質

引張り (JIS13B)							
供試材	C. H. S. / mm · min ⁻¹	n*値	F*値 / MPa	0.2%耐力 σ _{0.2} / MPa	引張強さ σ _B / MPa	平均変形抵抗 σ̄ _t / MPa (ひずみの範囲)	破断伸び / %
TP3513	5	0.12	330	190	230	240 (ε : 0~0.17)	17
	500	0.08	300	210	230	240 (ε : 0~0.17)	18
TP4524	5	0.12	330	180	220	240 (ε : 0~0.18)	18
	500	0.08	300	210	230	240 (ε : 0~0.17)	18
TP351b	5	0.085	320	210	250	240 (ε : 0~0.17)	14
TP451b	5	0.06	300	180	240	240 (ε : 0~0.15)	12
圧縮							
供試材	C. H. S. / mm · min ⁻¹	0.2%耐力 σ _{0.2} / MPa	圧縮最大応力 σ _{MAX} / MPa	平均変形抵抗 σ̄ _c / MPa (ひずみの範囲)	最大応力を示す際の ひずみ** / %		
TP3513	5	90	240	120 (ε : 0~0.11)	11		
	500	100	270	130 (ε : 0~0.11)	12		
TP4524	5	90	230	110 (ε : 0~0.11)	11		
	500	90	260	140 (ε : 0~0.12)	11		
TP351b	5	100	280	140 (ε : 0~0.08)	6		
	500	100	290	140 (ε : 0~0.14)	12		
TP451b	5	90	250	120 (ε : 0~0.07)	4		
	500	120	320	120 (ε : 0~0.13)	13		

* σ = F εⁿ, **G. L. = 25mm

表 2 角管の圧縮における変形エネルギー

条 件	AZ31	A6063-T5
	変形エネルギー* / J	
角管を 20mm の長さに切出したものを平板で圧縮	180	360
角管を表 3 の条件で曲げ加工したものを、パンチ肩半径 30 mm のパンチで圧縮	240	450

*ストロークは 20mm, C. H. S=5mm/min

表 3 曲げ加工条件

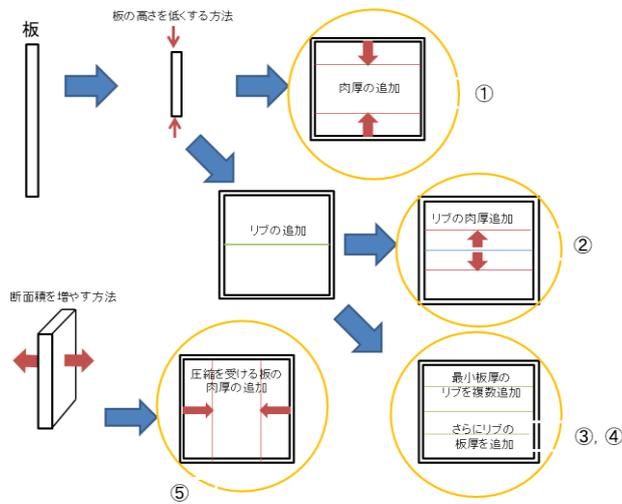
パンチストローク数 /spm	60
パンチ半径 R _p /mm	105
曲げ半径と角管横断面高さの比	4.0
目標曲げ角度 /°	45
角管と金型 (拘束板) とのクリアランス /mm	0.5
金型に塗布した潤滑油の動粘度 /mm ² s ⁻¹	630

まず、角管の横断面は、実験に用いた正方形を基本とし、内部にリブを加えて「日」型や「目」型のようにした場合を検討した。ここでは、座屈荷重を向上させることが変形エネルギーを高め得るという考え方にに基づき、ジョンソンの式を用いて座屈荷重を推定した。その結果、角管の横断面は、断面二次モーメントの高い、曲げの面に平行にリブをもつ横断面は座屈荷重を向上させるよりも、重量を増加させてしまう傾向が強いことが明らかになった。一方、曲げの面に垂直にリブをもつ横断面の場合は座屈長さが短いため、座屈荷重の向上に有利であることが確認できた。

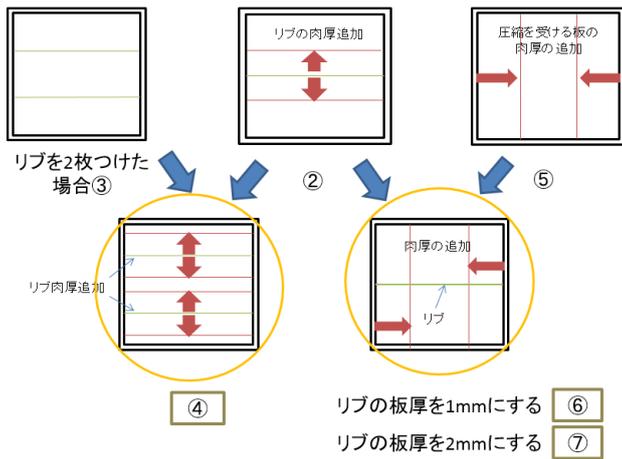
座屈荷重の向上と、角管の単位長さ当たりの重量の低減の双方を図る方法を以下に挙げる。

- (1) 圧縮する板の高さ (座屈長さ) を低くする。
- (2) 圧縮する板の断面積を大きくする (板厚を増す)。
さらに、(1) は、
 - ① 角管の上下面 (フランジ) の板厚を増す。
 - ② 上下面に平行にリブを 1 枚追加し、その板厚を増す。
 - ③ ②で、最小限の板厚のリブの枚数を増す。
 - ④ ③でリブの板厚を増す。
 という方法が考えられ、(2) については、
 - ⑤ 圧縮を受ける縦の面 (ウェブ) の板厚を増す。
 - ⑥ ⑤で、上下面に平行に、最小限の板厚のリブを 1 枚追加する。
 さらに、
 - ⑦ ⑥でリブの板厚を増す。

以上の考え方 (図 1) に基づき、ジョンソンの式を用いて座屈荷重を推定した。



(a) 座屈長さの低減と圧縮する板の板厚の追加



(b) ウェブの板厚・リブの数・リブの板厚の追加

図 1 座屈荷重の向上と、角管の単位長さ当たりの重量の低減の双方を図るための基本的な考え方

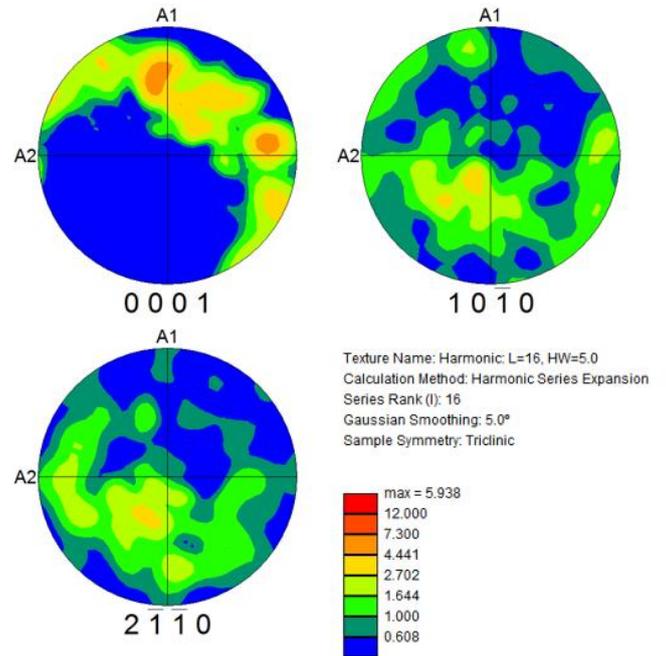
2・4 数値解析

(1) 圧縮変形のシミュレーション

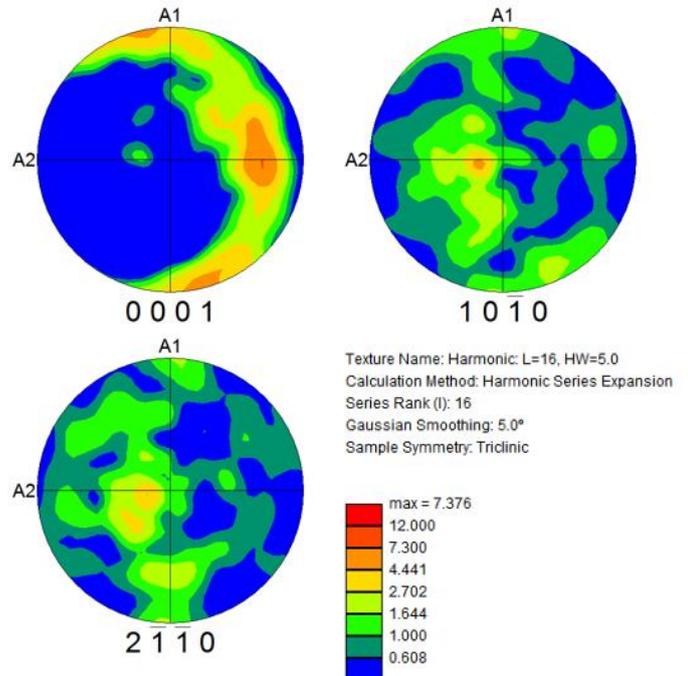
角管の長手方向に対して垂直に圧縮した場合の変形状態をシミュレーションした。解析に用いたソルバーは、LS-DYNA ver. 971 (R6. 0. 0) である。

(2) 横断面の最適化

コンピューターシミュレーションにより、剛性を最大にしつつ、質量を削減した際の横断面に形状がどのようなものになるかを、トポロジー最適化によって試みた。ソフトウェアは INSPIRE を使用した。



(a) TP3513 の極点図



(b) TP4524 の極点図

図 2 ビレット温度の異なる供試材の極点図

3. 解析結果

3-1 マグネシウム合金押し出し角管のEBSD解析

まず、押し出しの際の初期ピレット温度が350℃のTP3513と、450℃のTP4524の極点図を図2に示す。

A1, A2, A3 はそれぞれ、角管横断面の高さ方向、幅方向、長手方向（押し出し方向）である。両者を比べると、大きな違いは見られず、どちらの材料も底面が押し出し方向に対して、やや垂直に傾いているが、c軸は押し出し方向に垂直な面内で回転しているようである。ただし、どちらもEBSDの測定でパターンが不明瞭なところも多く、粒内の微小方位差が大きい。従って、粒内に生じているひずみが大きいものと考えられる。

次に、測定に成功したTP351bの結果を図3に示す。

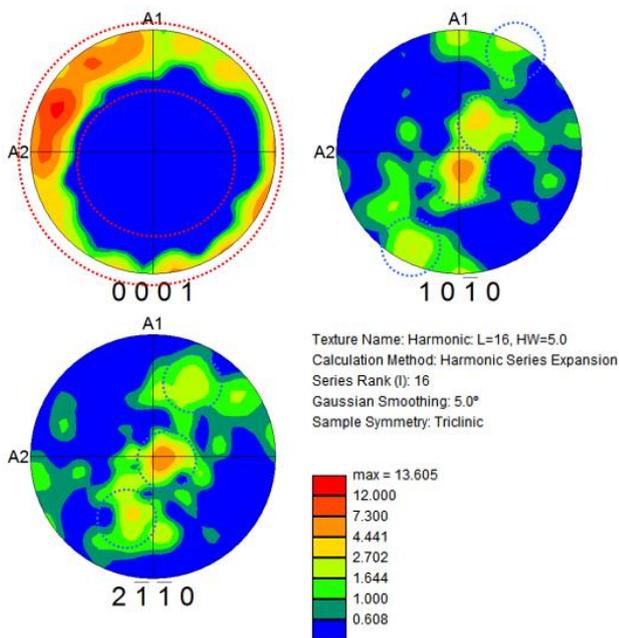


図3 TP351bの極点図

前述の材料と同様、c軸は押し出し方向に垂直な面内で回転しているが、底面はより押し出し方向に垂直な方向を向き、特に(2110)の面が押し出し方向を向いているようである。

この供試材は、特にEBSDのパターンが鮮明に得られており、結晶粒内の方位差は少なかった。従って、図2に示した材料よりは粒内のひずみが小さかったことが考えられ、押し出し温度の条件に近いものであっても、曲げの際に生じる圧縮応力の作用する方向に対して、底面がより垂直方向を向いている材料は圧縮側に生じる変形が抑えられ、破断しにくい材料となることが示唆される。

3-2 マグネシウム合金押し出し角管の圧縮変形解析と座屈荷重

FEM解析により、比較材のアルミニウム合金角管よりも、単位長さ当たりの質量が10%小さい、リブを3枚もつマグネシウム合金角管は、アルミニウム合金角管に対して89%

の座屈荷重が得られた。

また、ジョンソンの式による解析では、曲げの面に垂直に複数のリブをもつ横断面の場合は座屈長さを短くできるため、座屈荷重の向上に有利であることが確認できた。

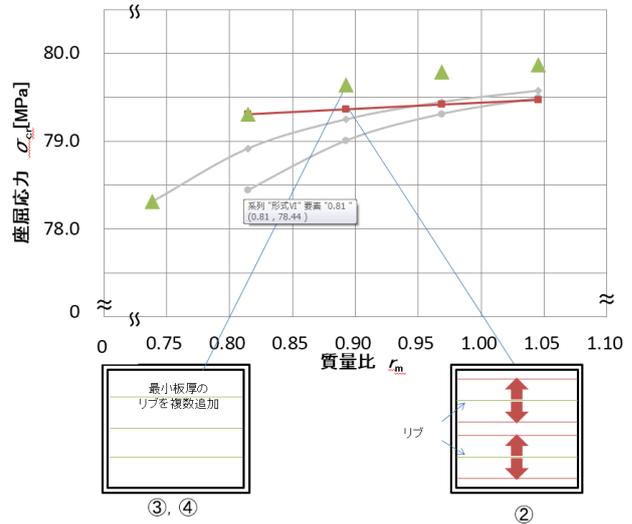


図4 種々の断面形状、板厚分布による座屈応力

図4は、横軸に比較材のアルミニウム合金角管（正方形断面）に対し、横断面内部にリブを加えたマグネシウム合金角管の単位長さ当たりの質量比(r_m)を横軸にとり、縦軸にジョンソンの式で求めた座屈応力を示したものである。例えば、板厚1mmのリブを3枚加えると、重量が10%以上低減でき、座屈応力は80%近くにまで近づけられることがわかった。

3-3 マグネシウム合金押し出し角管の横断面の最適化

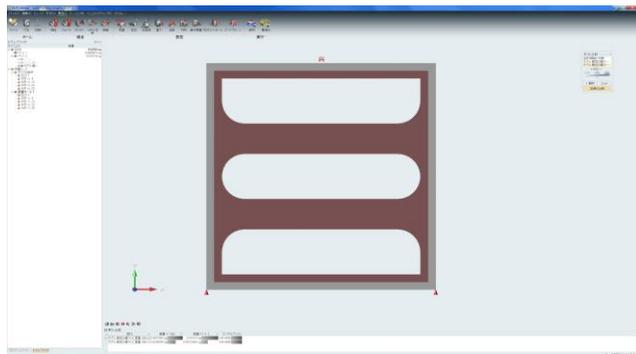
縦の板に、弾性限度の応力レベルが発生するよう角管長手方向に対して垂直な荷重を設定し、剛性を最大化した上、設計領域（内側の茶色の部分）の質量を30%まで減じることを目標値とした解析を行った事例を示す。

初期断面（図5(a)）は、リブが2枚、縦の板との境界にはフィレットを設定した場合であり、(b), (c)はそれぞれ、総質量が59%, 54%となるよう、設計領域の材料を削減したものである。片側のフィレットは残しつつ、リブの板厚が削減されていく様子が観察できた。

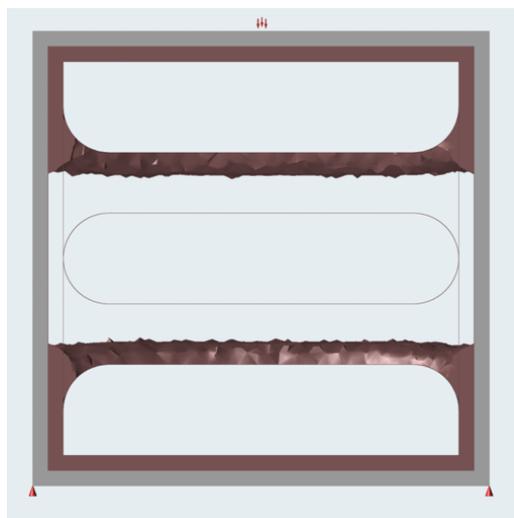
4. 結び

マグネシウム合金押し出し材の組織については、押し出し条件の違いが明確にできておらず、曲げ加工の際の圧縮側での破断限界の高い材料の押し出し条件を探索する必要がある。

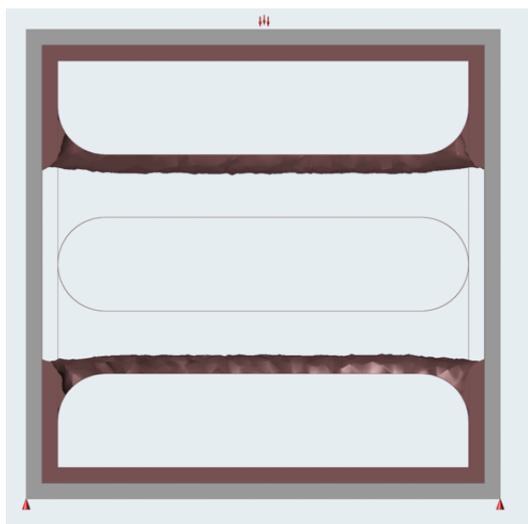
耐座屈性の高い横断面形状の設計は、最適化ソフトウェアとFEM解析を併用し、より良好な解が得られるよう繰り返し計算をしていくことが今後の課題である。



(a) 断面形状



(b) 総質量 59%



(c) 総質量 5.4%

図5 横断面形状最適化の例

謝 辞

報告者は、材料のミクロ組織の観察、結晶方位解析、コンピュータシミュレーション技術といった分野について大変未熟ですが、本助成金を賜り、こうした分野に新たに挑戦することができました。これを契機に、材料と加工性、材料の形状と変形特性について、これまで明らかにできなかったことについて研究を進めていく予定であることを記し、心から御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 長谷川一樹：平成 23 年度都立高専卒業研究.
- 2) O.Hasegawa et.al: Proc. 11th ICTP (2014), pp. 2184-2189.
- 3) 長谷川収ほか：塑性と加工 (2006), Vol. 47, No. 540, pp. 59-63.
- 4) 鎌土重晴：マグネシウム合金の成形加工技術の最前線, (2005), pp. 67-158, シーエムシー出版.
- 5) 山下浩之, 平野正和：軽金属学会第 92 回春期大会講概, pp. 213-214.