

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：37401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820328

研究課題名(和文) 一般Mg合金を用いた衝撃圧によるポーラス材料創製技術の検討

研究課題名(英文) Investigation for the explosive manufacturing technique of porous materials used by Mg alloy

研究代表者

森 昭寿(MORI, Akihisa)

崇城大学・工学部・准教授

研究者番号：60433017

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、爆薬の爆発時に発生する高エネルギーを利用してマグネシウム合金によるポーラス材料の作成を試みた。マグネシウム及びマグネシウム合金は反応性が高いので、特に粉末形状である場合には取扱いに注意する必要がある材料である。そこで、試料粉末に対して熱的影響が少なく極短時間で固化成形を行う衝撃粉末固化法を適用し、マグネシウム合金AZ31の丸棒を切削したときの切削屑を用いて、一般マグネシウム合金のポーラス材作製の可能性を探究した。固化条件について実験及び数値解析的手法から検討し、ガスを試料内部に残存しないように切削屑の粒径を調整することで、ある程度良好な固化成形を達成した。

研究成果の概要(英文)：This investigation intended to clarify the possibility for the production of porous materials by the magnesium alloy using the explosive material processing methods. Magnesium and its alloy were known well as the high reactive materials. Therefore, the explosive compaction method of cylindrical compacts, which is the solidification method of metal powders without thermal effect, was applied in this research. In the experiments, sawdust of magnesium alloy AZ31 was mainly used as the sample powder. By the regulation of the sawdust size and the reexamination of the experimental conditions considered from the experimental and numerical results, a compacted magnesium material with voids was recovered well in the cylindrical explosive compaction.

研究分野：衝撃工学，材料工学

キーワード：マグネシウム ポーラス材料 爆発加工 円筒圧搾法

1. 研究開始当初の背景

マグネシウム及びマグネシウム合金は軽量素材として工業的利用が大きく期待される材料である。しかしながら、常温下での塑性加工性や高い反応性などの問題点も多く、工業用材料としての用途に多くの制限が生じていた。一方、機械部品等の軽量化と高付加価値化を図るため、マグネシウム材料よりも軽量の軽量材料の開発が行われ、多孔質金属材料、いわゆるポーラス金属材料が注目を集めた。ポーラス金属の製造には、発泡溶融法やガス膨張法、燃焼合成法、スペーサ法など各種の方法を用いられ、主にポーラスアルミニウム合金製造に関して多くの研究が行われていた。マグネシウム材料のポーラス金属製造についても研究が行われていたが、マグネシウムの反応性といった問題から実施されている研究は数少なく、良好な成形体を得るために複雑な装置等が必要な状況であった。工業用材料の中で最軽量材料であるマグネシウム材料のポーラス金属体を比較的簡単に製造できれば、工業化へ適用でき、機械製品の更なる軽量化・高付加価値化が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、入手が容易なマグネシウム合金を用いてポーラス金属材料を比較的容易に創製する方法を検討する。ここでは、爆薬が爆発する際に発生する高圧力を利用して、瞬間的に金属粉末を固化成形する衝撃粉末固化法に着目し、本方法によるポーラス金属創製を試みた。この方法は金属粒子の表面のみが粒子間結合するので、試料粉末内部まで熱的影響を与えないまま極短時間で成形することができる。また、試料となるマグネシウム粉末は、その特性上、容易に取り扱うことが難しい。そこで、入手が容易なマグネシウム合金の丸棒を切削することで発生する切削屑を用いるようにした。本研究では、試料とスペーサと一緒に固化成形を行い、成形後にスペーサを取り除くことでポーラス材料を作製するスペーサ法を適用した衝撃粉末固化法によるマグネシウム合金ポーラス材の創製を目指す。また、実験及び数値解析的手法を用いて、固化成形に必要な条件を明らかにすることを目指す。

3. 研究の方法

本研究で適用した衝撃粉末固化法は、図1に示す円筒型衝撃圧搾法とした。この方法は成形体が円筒形にしか成形されないものの、半径及び軸方向を変更でき、爆薬量に依存するものの成形体の大型化が可能となるため、工業的な応用を視野に入れ採用した。また、爆薬の爆轟で発生する熱の影響を受けにくくするため、粉末容器と外パイプの間に圧力伝達媒体(水)を配置し、試料と接触しないように試料を上下の蓋で密閉した。爆薬には粉末状の爆薬(カヤクジャパン株式会社製、

PAVEX, 爆轟速度 2400m/s)を用いた。この爆薬は、6号電気雷管のみでは起爆しないため、伝爆薬として高性能爆薬(旭化成株式会社製、SEP, 爆轟速度 7000m/s)を用いた。

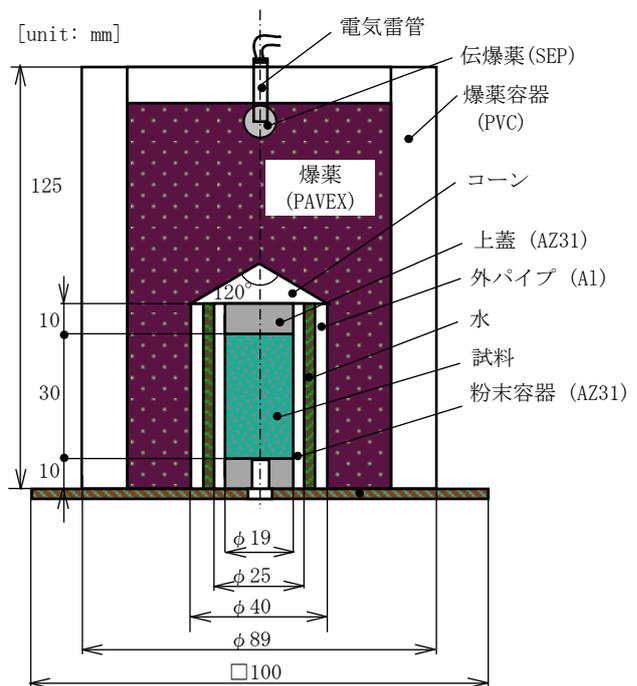
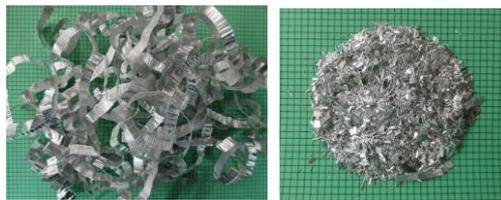


図1 衝撃粉末固化法(円筒法)の模式図

実験に使用するマグネシウム合金として、入手が容易で多く利用されているマグネシウム合金である AZ31 を用いることにした。マグネシウム粉末は取扱いに細心の注意が必要となるので、ここでは AZ31 の丸棒を旋盤で切削して AZ31 の切削屑を作成した。しかし切削したままの状態では、図2(a)に示すような帯状となる。このままの状態では粉末容器内部にスペーサとともに充填することが難しい。また、ミリング装置を用いて粉碎する場合、試料粉末がミリング容器内部に付着するため、手作業で図2(b)のように粉碎し、内部に多量のガスが残存ないようにプレス機で加圧しながら充填した。実験ではスペーサを用いない場合での状況を確認することも考慮し、(1)スペーサを用いず、砕いた切削屑をそのまま利用する、あるいは、ふるいで分別した切削屑をある比率に調整して配合する方法、(2)気孔を形成するためのスペーサとともに充填する方法の2種類の方法について実験を行った。また(1)の場合は更に(A)試料のみをそのまま充填した場合、(B)ふるいでサイズごとに分別した切削屑をある比率に調整して充填した場合、(C)試料の中心軸上に直径 6mm の AZ31 丸棒を配置した場合、(D)粉末容器の直径を 35mm に変更し、その中心軸上に、内部に水を満たした直径 16mm の AZ31 パイプを配置した場合の、4 パターンの条件で行った。

爆薬内部の圧力挙動を確認するため、ANSYS AUTODYN 2D を用いて数値解析を適用した。試料となる AZ31 切削屑は粉末とみなし、

粉末状態を模擬できる P- α 状態方程式と、材料の強度構成式として Johnson & Cook モデルを適用した。また変形が著しく、内部にスペーサが存在するため、装置外周部の空気（理想気体）と爆薬部分を含め、Euler 法でモデル化した。この他の爆薬容器、粉末容器、上蓋、下蓋、コーン、外パイプ、スペーサ（プラスチックボール）はそれぞれ Lagrange 法でモデル化を行った。AZ31 の Johnson & Cook パラメータは既報の論文 (I. Ulacia et al., J. Mater. Process. Technol., 211, (2011), 830-839) のデータを用い、それ以外のパラメータはソフトウェア内に組み込まれている AUTODYN Library のデータを用いた。



(a) 切削直後 (b) 粉碎後
図 2 試料として用いた AZ31 切削屑
(画像の升目サイズ:1mm)

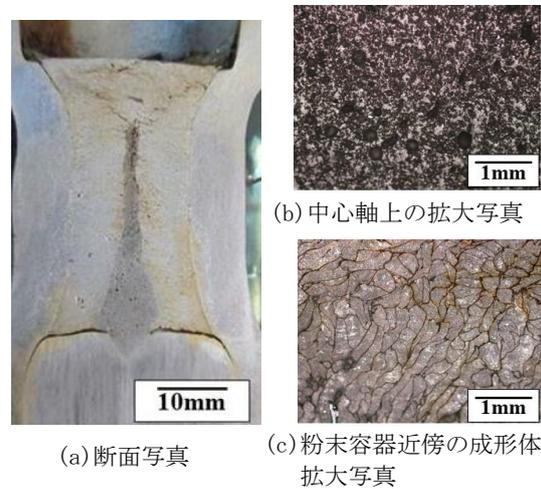
4. 研究成果

○ マグネシウム合金 AZ31 切削屑を用いたポーラス材創製実験

本研究では良好なポーラス金属成形体を得るための条件を求めため、まず、スペーサを用いずに固化成形実験を行った。図 3(a) に試料のみをそのまま充填したときの成形体の全断面写真を、図 3(b) 及び(c) に拡大写真を示す。この図から、粉末容器上部に配置した上蓋は飛散し、成形体の上部にクラックが生じていることが判る。これはプレス機を用いて粉末を充填したものの上部部分には十分に圧搾できておらず、空気が残存したものだと考えられる。残存ガスは固化成形するとともに下方向へ移動し、下蓋に設けた空気孔から外部に排出されるように装置を作成している。しかし、残存ガスが過剰の場合は抜けきれず、衝撃波によってガスが圧縮され、衝撃波が通過した後に周辺の圧力が弱まることで、ガスが膨張し、破壊に繋がったものだと考えられる。予備実験においても、プレス機を用いずに充填した場合やスペーサが大きすぎた場合に同様の現象が生じ、試料自体が飛散した例もあった。

また、中心軸上には、熔融したと思われる部分が形成され、下方向へ向かうにつれてその領域が大きくなり、下蓋まで入り込んでいた。これはマッハステムと呼ばれる現象が生じたものと考えられる。円筒形の衝撃圧搾法の場合、使用する爆薬の爆轟速度及び内部を通過する衝撃波の進行速度の条件によっては、中心軸上に衝撃波が集束し、中心軸近傍が超高压力状態になる、マッハステムが生じることがある。中心軸の部分拡大した写真を図 3(b) に、中心軸と粉末容器との間の部分

の拡大写真を図 3(c) に示す。中心軸以外の部分は良好な成形が達成しており、切削屑がやや潰れながら接合している状態なのが見てとれる。良好な成形が得られた部分のみを切り出し、その密度を計測した結果、1619 kg/m³ と固体密度の約 91% となり、スペーサを用いずともわずかな気孔が生じる結果となった。



(a) 断面写真 (b) 中心軸上の拡大写真 (c) 粉末容器近傍の成形体拡大写真
図 3 切削屑のみでの固化成形体断面写真

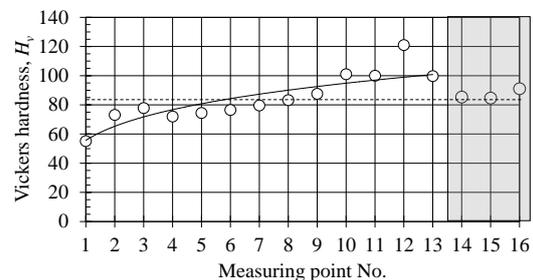
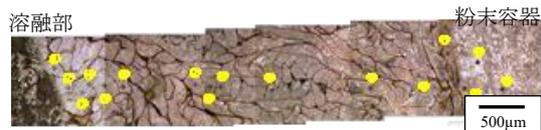


図 4 固化成形部分のビッカース硬さ

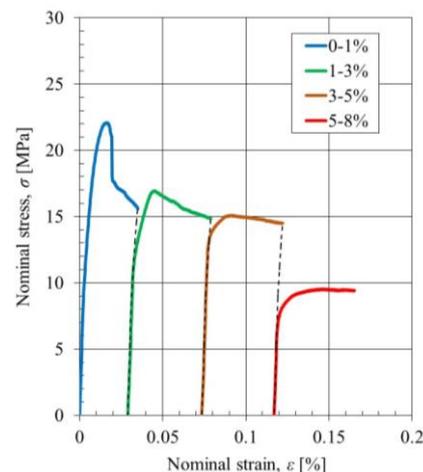


図 5 成形体の引張試験結果

成形部分の特性を求めため、半径方向に対してビッカース硬さ試験を行った結果を

図4に示す。中心軸近傍の熔融部に近い部分ではAZ31のビッカース硬さHV83よりやや低い値を示し、粉末容器近傍はやや高い値を示したものの、全体的にはほぼHV83と同じ硬さであることから、良好に成形された部分は衝撃波や熱の影響によって硬度変化を生じていないことが確認できた。また、この部分を切り取り、小片に加工して引張試験した結果、図5に示すように、最大引張応力が22MPaと、AZ31の引張強度(260MPa程)の1/10程度の強度となった。

これらのことからマッシュシステム現象を回避することで良好な成形体を得られることが判る。そこで、以下の条件で実験を行った。

- (B) ふるいで切削屑サイズごとに分別し、充填しやすいように重量比を調整した場合、
- (C) マッシュシステム現象によって粉末が熔融しないように、試料の中心軸上に直径6mmのAZ31丸棒を配置した場合
- (D) 粉末容器の直径を35mmに変更し、内部を水またはパラフィンで満たした外径16mmのAZ31パイプ(内パイプ)を中心軸上に配置した場合

で実験を行った。これらの実験で回収した試料の断面写真の一例を図6~図8にそれぞれ示す。

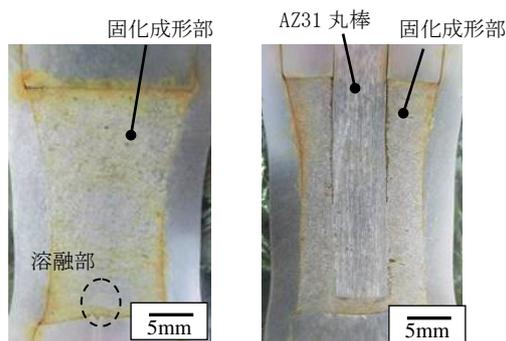


図6 実験(B)の結果 図7 実験(C)の結果

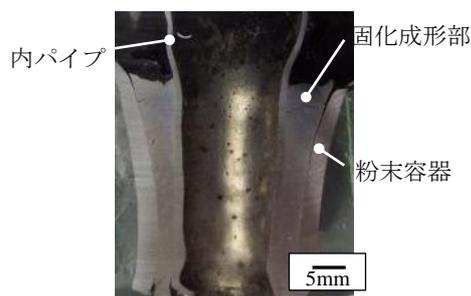


図8 実験(D)の結果

これらの実験結果から、

- ・実験(B)：切削屑をふるいにかけて、2mm以上、1mm以上、0.5mm以上、0.25mm以上に分別しある重量比で固化成形を行った結果、2mm以上のみを用いた場合以外は良好な成形体を得ることができたが、中心軸上に生じる熔融部を完全に抑えることはできなかった。また、良好な成形体を得られた部分を切り出し、その密度を計測した結果、密度比が

平均84.3%となった。

- ・実験(C)：中心軸上に丸棒を背馳した結果、熔融層を発生させずに切削屑の部分は良好に成形することができた。丸棒との境界部分は固化成形されていない箇所も見受けられ、断面に切断した後、丸棒のみを取り除き、中空円筒型の成形体を得ることができた。

- ・実験(D)：実験(C)と同様に良好な接合体を得ることができた。しかし、試料上部が半径方向に膨張したような形状となった。これは、中心軸の部分を取り除きやすいように水またはパラフィンを充填材として内パイプの中を充填したが、下方向へ流出せず、下面に反射して上部へ爆発的に流出したためだと考えられる。

これらの結果から、粉末サイズを調整しつつ、中心軸上に丸棒を配置する方法が最適な条件だと判断できる。

以上の実験条件を基に、試料粉末の条件を設定し、気孔形成材としてプラスチックボールを用いた実験結果を図9、図10に示す。図9はプラスチックボール(ABS)のみを配置した場合の結果で、図10は中心軸上にAZ31丸棒を配置し、丸棒を取り囲むように周辺にプラスチックボールを配置した結果である。プラスチックボールは直径6mmで、成形後に取り除きやすいように、6個のボールを紐で連結し、試料とスペーサを交互に充填した。それぞれの図9(a)は回収した試料を切断したままの断面である。図9(b)は、粉末容器と上下蓋を取り外した成形体を250℃まで加熱してプラスチックボールを熔融させて除去し、残渣を薬品で除去した断面写真である。

図9の試料上部は、衝撃圧によってプラスチックボールが中心軸上へ圧縮され、ボールの間隔が小さくなり、粉末容器を取り外す際に割れが生じた。他の部分も同様な状態で、スペーサを混在させた状況でも中心部に熔融箇所が観察された。図10の場合は、中心軸上に丸棒を配置しているためボールが移動せずに圧縮されたため、プラスチックボールを除去する過程で間隔が狭い部分が破損しやすい状態となったものの比較的良好な結果となった。スペーサの位置に関してより深い議論を行う必要があるものの、大きな気孔を有するポーラス体として創製できる可能性を示すことができた。

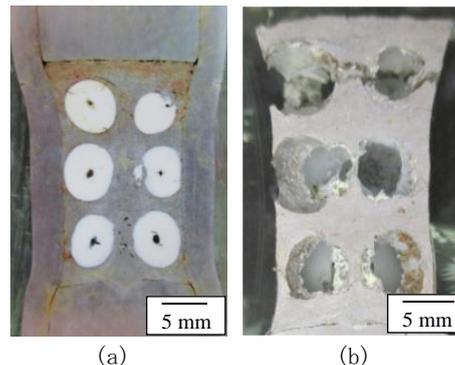


図9 スペーサ法によるポーラス材料創製

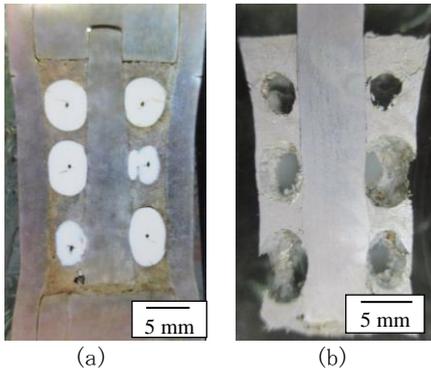


図 10 中心軸上に丸棒を配置したときのスぺーサ法によるポーラス材料創製

○ 数値解析法を用いた実験条件の検討

図 11 に、実験(a)を模擬したときの数値解析結果を示す。爆薬の爆轟によって生じた 5GPa 程の爆轟圧が水を介してもほぼ減衰せず、試料内部に伝播して 3GPa 程の圧力が作用し始める。爆轟が進行しても爆轟圧及び水圧はほぼ変動しないが、図 11(b)のように、中心軸上の圧力は上昇し始め、(c)のときには最大約 6GPa まで中心部の圧力が上昇する。その後、下蓋で衝撃波が通過・反射し、高圧力の部分が半径方向へ広がる。これらの結果は、実験後の断面形状である図 3(a)と良好な一致を示し、実験時における圧力作用状況を良好に模擬できたと判断できる。

良好な結果が得られた中心軸上に丸棒を配置したとき実験(c)の数値解析結果を図 12 に示す。図 11 と比較しても判るように中心軸上にはマッハステム現象は発生せず、丸棒との境界部分に約 4.2GPa まで圧力上昇が見られた。これは粉末との僅かな密度差によって衝撃波が丸棒表面で反射したものと考察される。実験では丸棒との境界部分は固化成形されていない箇所もあったことから、この圧力上昇が成形に影響を与えたと推察される。

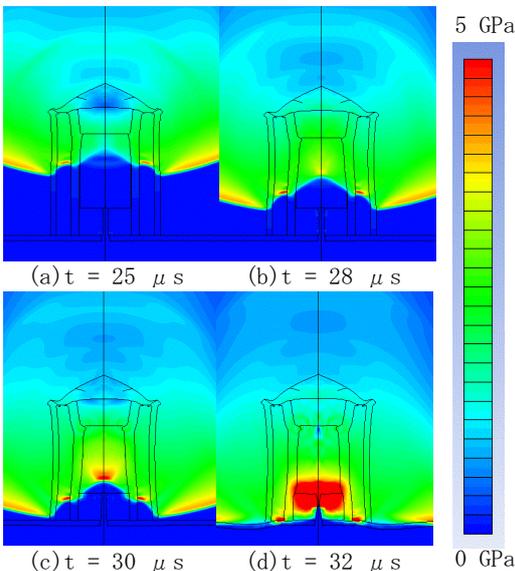


図 11 切削屑のみを試料とした実験を模擬した数値解析結果 (圧力分布図)

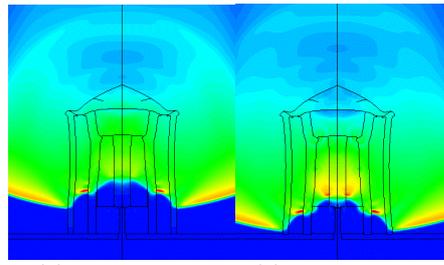


図 12 中心軸上に AZ31 丸棒を配置した実験を模擬した数値解析結果 (圧力分布図)

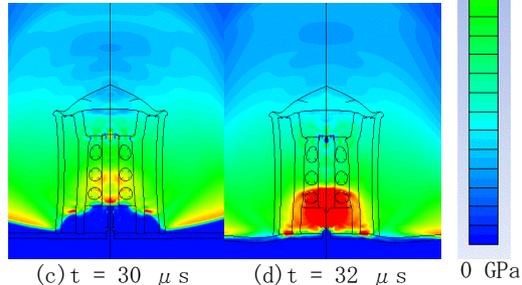
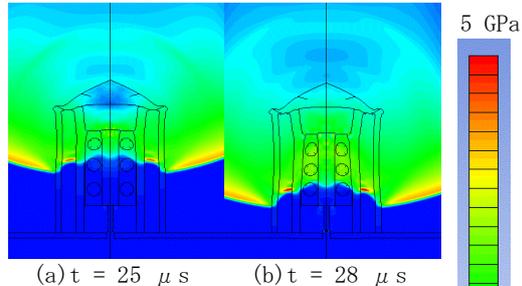


図 13 プラスチックボールと AZ31 丸棒を配置した実験を模擬した数値解析結果

スぺーサ法によるマグネシウム合金のポーラス材料創製を試みた実験を模擬した数値解析結果を図 13 に示す。ボールと丸棒が衝突することで丸棒内部の圧力が上昇するものの全体的にはほぼ同じ圧力状態であることが確認できた。衝撃波の制御など考慮すべき点もあるもの、本方法を用いることで、複雑な実験装置を用いず、比較的容易にポーラス材料を作製できる可能性が示された。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 2 件)

- ① 森 昭寿, 大谷尚生, 高橋大輔, 外本和幸, 衝撃粉末固化法を用いたマグネシウムポーラス材料作製法の開発, 平成 28 年度塑性加工春季講演会, 2016. 5. 22, 京都工芸繊維大学 (京都市)
- ② 高橋大輔, 森 昭寿, 円筒爆発圧搾法による Mg 切削屑を用いたポーラス材の作製, 平成 27 年度火薬学会西部支部学生発表会, 2016. 3. 1, 九州工業大学 (北九州市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 昭寿 (MORI, Akihisa)

崇城大学・工学部・准教授

研究者番号: 60433017