

衝撃塑性加工を用いたマグネシウム合金厚板の 冷間加工に関する基礎研究

熊本高等専門学校 生産システム工学系 MI グループ
講師 西 雅俊

(2018 年度 一般研究開発助成 AF-2018020-B2)

キーワード：マグネシウム合金板，衝撃塑性加工，数値解析

1. 研究の目的と背景

環境に配慮した取組みは種々行われており、新幹線車両や航空機、より身近なものでは、自動車などの輸送機器でエネルギー効率改善が継続的に取組まれている。しかし、例えば、新幹線の車両構造、自動車のボディフォームを工夫することによる対策はほぼ飽和しており、さらなる改善には、様々な種類の材料を適材適所で使いこなすマルチマテリアル化が必要である。このマルチマテリアル化で注目されている材料の一つに、マグネシウム合金がある。マグネシウム合金は、実用金属中最軽量、高比強度で、高リサイクル性などの特徴を持つため、省エネルギー化を期待できる材料として注目されている。しかし発火性、加工(成形)性、腐食性など課題があり、性能向上に向けて研究されている¹⁾⁻³⁾。

本研究では、そのうち、常温での成形性が低く、かつ大型サイズの成形が難しいという課題に取り組む。マグネシウム合金は結晶構造が最密六方構造であり、常温の加工すべり面が一つしかなくプレス成形しにくいいため、常温での加工方法は未だ開発されていない。現在、板状加工する圧延時に高温にして冷間プレスでの成形性を向上させる方法、プレス時のマグネシウム合金板と金型を 250℃以上にする方法⁴⁾など、加工工程中の高温加熱により加工成形性能を向上させている。しかし、加熱によるコスト、冷却時の「反り」に伴う不良品や冷却時間による生産性の低下により、加工コストが増大する。そのため、マグネシウム資源は豊富にあり、上述の多くのメリットがあるにもかかわらず、市場競争力を持たない。

上述の常温での成形性が低いという課題を解決できる可能性がある塑性加工法の一つに衝撃成形法⁵⁾がある。衝撃成形法とは、これまでに異種材料の接合や難加工材の成形性向上の技術開発に貢献してきた衝撃塑性加工の一つであり、爆薬の爆発により発生した水中衝撃波および爆轟ガスによる水圧作用が試料の金属板に変形を促進し、型に押し付けて金属板を成形する方法である。これまでの先行研究⁴⁾では、衝撃銃を利用したマグネシウム合金の型成形試験による高速変形挙動の解明が行われており、高速度(820m/s)の場合では、マグネシウム合金が型(深さ 5mm、幅 3mm の溝)に流入して成形が可能であることが示されている。この衝撃成形法によるマグネシウム合金の成形方法の実用化を目指し、本稿では、この研究の第二ステップとし

て、爆薬を衝撃エネルギー源とした衝撃成形法について、実験と数値解析の両方でマグネシウム合金の型成形について調べる。

2. 実験条件および方法

2.1 実験の概要

本稿では、通常の加工方法では成形困難な図 1 の平板歯車形状を有する金型に対してマグネシウム合金厚板(AZ31、厚さ 10mm 程度)の型成形実験を行い、成形形状を調べる。図 1 (b)は、平板歯車形状を有する金型の正面図であり、孔の深さ 5mm、角度 α は 14.5(deg)とする。

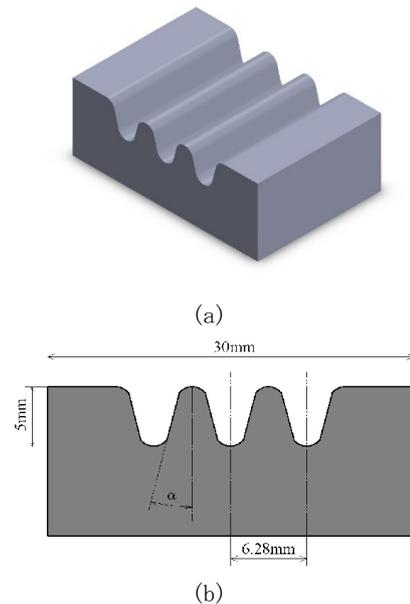
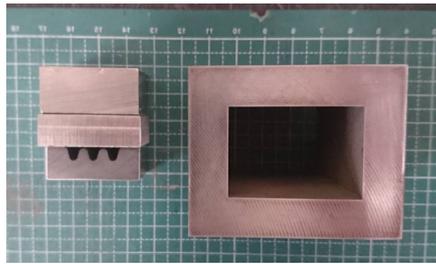


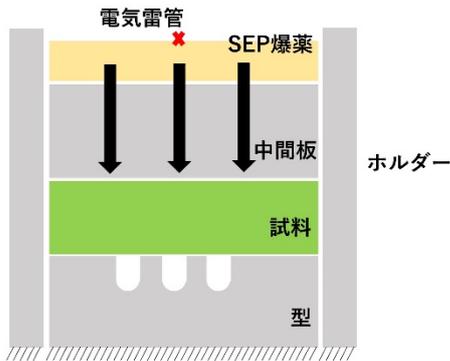
図 1 平板歯車形状を有する金型

2.2 実験装置の概要

図 2 (a)に実験装置および図 2 (b)に実験の概略図を示す。SEP 爆薬を衝撃エネルギー源として利用し、中間板の鋼板(厚み 15mm)を高速度で押し出すことにより、試料であるマグネシウム合金の型成形を達成する。なお、実験は国立大学唯一の総合爆薬実験所を有する熊本大学で適切な安全指導の下で実施する。



(a)



(b)

図2 実験装置および概略図

3. 数値解析モデルについて

3・1 数値解析モデルについて

塑性加工において、成形過程・プロセスを調べることは重要である。しかし、本衝撃成形法の実験では、実験開始から 1ms 後には成形が完了すること、また高速度ビデオカメラで撮影するのは困難（図2のホルダー内で成形）であるため、実験において成形過程を観測することは困難である。そのため、2章で実施した実験を模擬した数値解析を行い、成形過程等について調べる。なお、数値解析は衝撃現象解析に特化した商業ソフトウェア ANSYS AUTODYN を利用する。

図3は、本研究で使用した数値解析モデルを示す。このモデルでは、マグネシウム合金 AZ31、金型・中間板のステンレス鋼および SEP 爆薬を全て Lagrange 要素で模擬し、ANSYS AUTODYN に組み込まれている Lagrange-Lagrange 相互作用解析機能を用いて解析している。実験では SEP 爆薬を利用しているが、ここでは予備解析等により調べた圧力履歴を中間板上部に印加している。また、実験では、ホルダーおよび型の下部には厚いアンビルを設置して行ったため、数値解析モデルでは、ホルダーおよび型の下部は完全固定している。

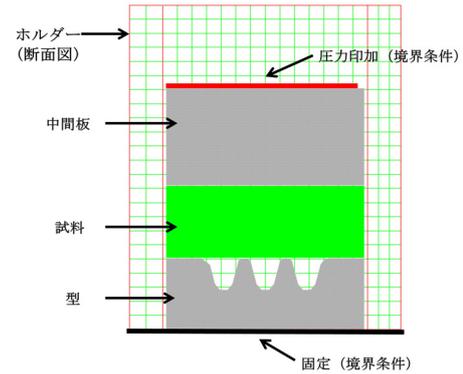


図3 数値解析モデル

3・2 材料モデルについて

マグネシウム合金厚板 AZ31 および鋼板には次式の Mie-Gruneisen 状態方程式⁶⁾と、相当塑性ひずみ・ひずみ速度・温度効果を考慮した the Johnson-Cook 構成則⁷⁾を適用する。

$$P = p_H + \Gamma \rho (e - e_H)$$

$$p_H = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1) \mu]^2}, e_H = \frac{1}{2} \frac{p_H}{\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right)$$

ここで、 P は圧力、 ρ は密度、 e は内部エネルギー、 $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 、 s と c_0 はどちらも定数であり衝撃波速度(= $c_0 + s u_p$)と粒子速度 u_p の直線関係の勾配と切片である。本稿で使用したパラメータを表1に示す。

表1 Mie-Gruneisen 状態方程式のパラメータ

密度 $\rho_0 / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	グルナイ ゼン係数 Γ	音速 c_0	s	
AZ31	1775	1.430	4516	1.256

金属材料には次式の Johnson-Cook 構成モデルを適用している。

$$Y = (A_{JC} + B_{JC} \varepsilon^n)(1 + C_{JC} \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 - T^{*m})$$

ここで、 $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ は $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$ の無次元塑性ひずみ率であり、 T^* は $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ で定義され、 T_{room} は室温、 T_{melt} は熔融温度である。AZ31 は異方性を有しているが、高ひずみ率では圧延方向と直角方向の構成パラメータは非常に似ている⁸⁾。そのため、本研究では AZ31 に対して圧延方向のパラメータ⁸⁾を用いた。本稿で利用した、パラメータ A_{JC} 、 B_{JC} 、 C_{JC} 、 m および n を表2に示す。

表2 Johnson-Cook 構成モデルのパラメータ

	A_{JC} [MPa]	B_{JC} [MPa]	C_{JC}	M	N
AZ31	224	380	0.012	1.554	0.761

なお、ステンレス鋼については、ANSYS AUTODYN に準備されているパラメータを利用している。なお、SEP 爆薬では、Jones-Wilkins-Lee (JWL) の状態方程式⁹⁾を数値解析モデルに適用しており、パラメータは表3に示す。

表3 JWL方程式のパラメータ

	A [GPa]	B [GPa]	R_1	R_2	ω
SEP 爆薬	365	2.31	4.30	1.00	0.28

4. 結果と考察

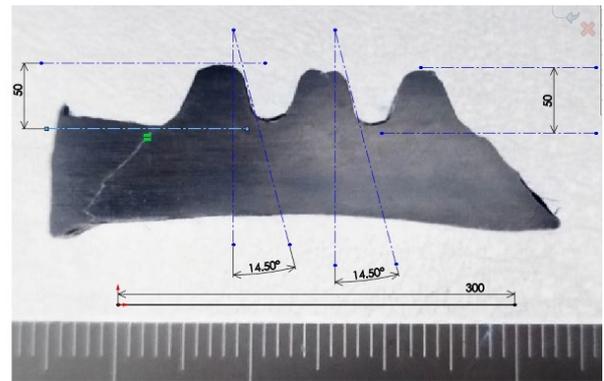
4・1 成形過程について

4 ページ下部に記載している図4に、成形過程を示している。初期圧力により中間板が下方方向に進み、開始から12[us]後から試料であるマグネシウム合金が変形を開始している。16[us]後においては、マグネシウム合金が同時に型に入り込んでいくが、20[us]後、24[us]後では、左右の穴において、穴の両サイドの流入速度が違うことがわかる。例えば、左側の穴へのマグネシウム合金流入について着目すると、穴の傾きは両サイドともに同じであるが、型の肩部（山の頂点）の形状が違うため、左サイドの流入速度に比べて右サイドの流入速度が速いことがわかる。また、中央の穴では、両サイドの流入速度は同じであるが、中央（肩部と型部の中央）の流入速度が遅いため、マグネシウム合金の下辺が、上に凸のアーチ状になりながら成形している（24[us]後の図を参照）。その後、この解析では、28.6[us]後に成形が達成されている。また、20[us]後以降では、ホルダーと型およびホルダーと中間板の隙間に、マグネシウム合金が細長く変形しながら入り込んでいる。これは実験結果にも確認できる現象であり、この要因や特徴についてもいずれは明らかにしたいと考えている。

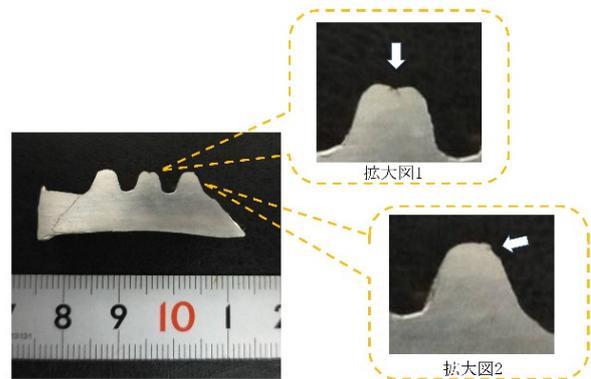
4・2 実験結果について

図5に回収されたマグネシウム合金の断面図を示す。ここでは、成形方向と上下逆向きに試料を撮影している。なお、図6(a)は、Solidworksにて写真を取り込み、その上から、定規のメモリを基準とした倍尺10:1にて寸法を記入している。図5(a)には、山部の高さ5[mm]（図6(a)では倍尺10:1のため50[mm]と表示されている）と傾き14.5[deg]を記載している。山部の高さ、すなわち型への流

入に関しては、左右の山で違いがあり、左側の山はおおよそ達成しているが、右側の山では、山の高さが5[mm]よりやや低いことがわかる。山の中腹部の傾きに関しては、おおよそ14.5[deg]であり、型に沿った成形ができています。このため、爆薬をエネルギー源とする大変形を伴う型成形が可能であることを明らかにしている。図5(b)は、頂点の拡大図を示している。拡大図1では山の頂上部に小さな窪みがあり、拡大図2では、山の肩部に小さな窪みがある。これは、4・1節で述べたように、型肩部の傾きが違う影響により、マグネシウム合金の流入速度が違うために、型底面への到達タイミングが違うことにより生じている。



(a)



(b)

図5 実験結果（成形方向と上下逆向き）

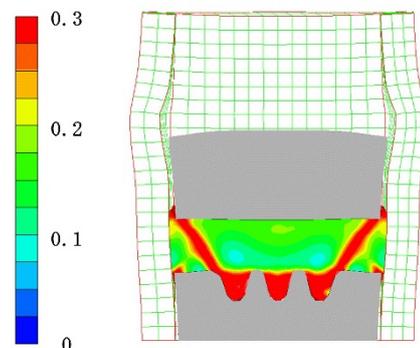


図6 数値解析結果（相当塑性ひずみ表示）

図5(a)では、マグネシウム合金の両端には、型と中間板に圧縮される部分があり、実験後には斜め45[deg]程度のせん断破壊が生じていることがわかる。図6の相当塑性ひずみ表示の解析結果からも、この亀裂部分に高い相当塑性ひずみが生じることで、せん断破壊が生じていることが明らかである。

4・3 考察 - 特殊な実験環境が不要な衝撃成形法への発展について

爆薬を利用する場合には法的制約と特殊な環境が必要である。そこで、マグネシウム合金板の実用化に向けた今後の研究では、さらなる大型化だけでなく、特殊な環境でなくても利用でき、かつ連続で水中衝撃波を発生できる衝撃大電流装置（電気エネルギー）の利用を、本研究の第3ステップとして考えている。現状では、薄板マグネシウム合金に対して衝撃エネルギーとして、衝撃大電流装置による型成形および自由成形が実施されている。本研究である厚板マグネシウムも同様に第三ステップに進むことを検討しているが、爆薬を用いる場合に比べると衝撃大電流装置の水中衝撃波圧力は低いため、現状では残念ながら難しいと考えている。そのため、今後は、衝撃大電流装置による水中衝撃波圧力を高める方法やこの実験装置の工夫等の検討が必要である。

5. 結言

衝撃成形法の優位性は、難加工材マグネシウム合金板の衝撃成形法の優位性は、室温と同等の温度条件下(常温)で成形を行うことができること、大きい成形量を実現できることである。本稿では、爆薬を衝撃エネルギー源とした衝撃成形法について、実験と数値解析の両方でマグネシウム合金の型成形について調べて、この手法の有効性を明らかにしている。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団一般研究開発助成によって行われたことをここに記し、謝意を表します。また、本研究の遂行にご協力いただいた熊本大学産業ナノマテリアル研究所田中茂助教および熊本大学技術部稲尾大介様に感謝致します。

参考文献

- 1) C. D. Yumi, B. S. You, J. S. Lee, and W. C. Kim, *Mater. Trans.*, 45, 3018-3022 (2004).
- 2) R. Matsumoto and K. Osakada, *J. Jpn. Inst. Light Met.*, 57, 274-279 (2007).
- 3) E. Doege and K. Dröder, *J. Mater. Process. Technol.*, 115, 14-19 (2001).
- 4) 日本塑性加工学会：衝撃塑性加工, (2017), コロナ社
- 4) P. Manikandan, J. Lee, K. Mizumachi, A. Mori, K. Hokamoto, *Materials Science Forum*, Volume: 706-709 Pages: 757-762.
- 5) L. Ruan, S. Ezaki, M. Fujita, S. Shen, and Y. Kawamura, *J. Magnesium Alloys*, 4, 27-29 (2016)
- 6) R. Kinslow and A. J. Cable, "High Velocity Impact Phenomena", Academic Press (1970).
- 7) M. A. Meyers, "Dynamic Behavior of Materials", Wiley Inter science (1994).
- 8) I. Ulacia, C. P. Salisbury, I. Hurtado, and M. J. Worswick, *J. Mater. Process. Technol.*, 211, 830-839 (2011).
- 9) B. M. Dobratz, "LLNL Handbook of Explosives - Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants (UCRL-52997)", Lawrence Livermore National Laboratory (1981).

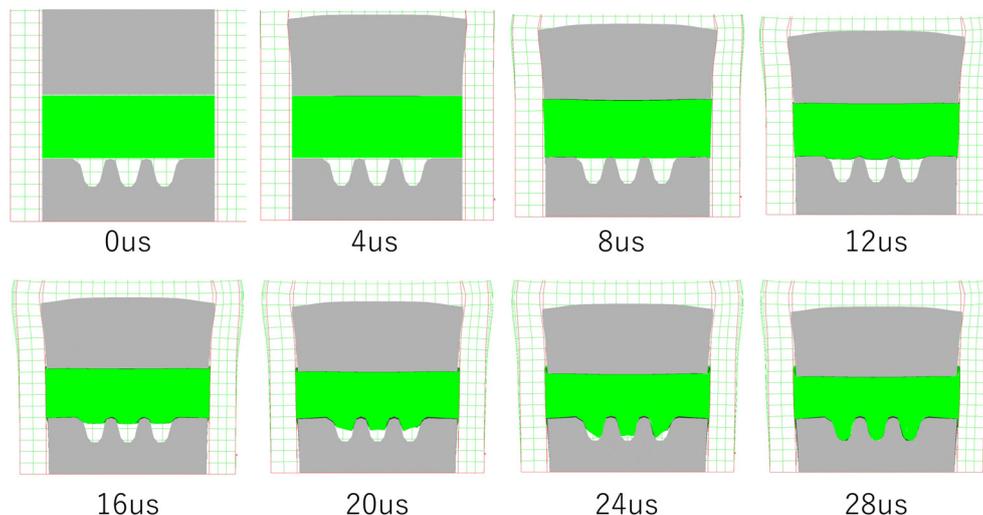


図4 数値解析結果（成形過程）