

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760084  
 研究課題名（和文）マグネシウム合金の精密鍛造プロセス開発のための延性破壊条件式の確立  
 研究課題名（英文） Establishment of Ductile Fracture Criterion for Development of Precision Forging Process of Magnesium Alloys  
 研究代表者  
 松本 良 (MATSUMOTO RYO)  
 大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教  
 研究者番号：50362645

研究成果の概要（和文）：Mg合金の精密鍛造の実用化を目指して、鍛造加工中に生じるMg合金の割れ発生について調べた。Mg合金の鍛造加工に適した割れ発生予測式を考案し、いくつかの加工条件下で鍛造実験を行い、考案した割れ発生予測式の有効性を検証した。鍛造中のスライド速度を任意に制御可能なサーボプレスを利用して、スライドモーションとMg合金の割れ発生の関係について調べ、スライド減速制御がMg合金の割れ発生の抑制に有効なスライドモーションであることが分かった。

研究成果の概要（英文）：In order to practice precision forging process of magnesium alloys in industry, occurrence of fracture of Mg alloys in forging were investigated. A ductile fracture criterion for Mg alloys in forging was suggested from the obtained results of some forging tests of Mg alloys. The proposed criterion was confirmed to be predicted the occurrence of fracture of Mg alloys accurately in some forging tests, compared with the conventional ductile fracture criteria. The influence of the ram motion on the occurrence of fracture of Mg alloys in forging was investigated on a servo press with controlled ram motion. The deceleration ram motion was effective ram motion for the ductility improvement of Mg alloys.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：塑性加工

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：成形加工，塑性加工，鍛造，マグネシウム合金，プレス

#### 1. 研究開始当初の背景

マグネシウム合金（以後、Mg合金と書く）は実用金属材料中、最軽量、高比強度であり、

リサイクル性等も優れた特性を有するため、環境に優しい金属材料として家電、自動車分野を中心に注目されている。現在、Mg合金

を使用した大量生産製品の製造は、ダイカスト、チクソモールディングによる鋳造法が主流であるが、生産効率、歩留まり率の改善が課題となっており、生産効率、製品の強度の向上等の利点から Mg 合金の塑性加工が望まれている。家電分野ではノートパソコン等の小型製品の筐体に Mg 合金板の使用が進められているが、Mg 合金の使用による重量削減効果は大型部品が多い自動車分野の方が高い。したがって、今後、Mg 合金製品の大型部品への展開は非常に重要な課題であり、鍛造加工は自動車部品製造の多くを占めるため、Mg 合金の精密鍛造技術の確立が必要である。

Mg 合金の塑性加工の研究は板材成形の研究が中心であり、材料開発に主眼を置いた研究も多い。加工プロセス開発に主眼を置いた市販 Mg 合金の精密鍛造の研究はほとんど取り組まれておらず、また精密鍛造では高精度な割れ発生予測技術が非常に重要であるが、Mg 合金の割れ発生メカニズムの研究は世界的にもほとんど取組まれていない。鍛造加工における Mg 合金の割れ発生は従来の延性破壊条件式（割れ発生予測式）では予測困難であることが研究代表者らにより示唆されており、新延性破壊条件の確立は Mg 合金の精密鍛造プロセスの実用化に対して必要不可欠な事項である。

## 2. 研究の目的

Mg 合金の精密鍛造の実用化を目指して、鍛造加工中に生じる Mg 合金の割れ発生について、割れ発生メカニズムを塑性力学、金属学の両観点から考察し、Mg 合金の鍛造加工に適した新延性破壊条件式を考案する。考案する延性破壊条件式を有限要素解析シミュレーターに組み込み、Mg 合金の精密鍛造での割れ発生について高精度な予測が可能となることを目指す。また鍛造基礎試験および有限要素法（FEM）解析の結果を基にして、Mg 合金の変形能（鍛造限界）を向上させるために効果的な鍛造法を提案する。

## 3. 研究の方法

### (1) Mg 合金の鍛造加工における割れ発生条件の考察

研究代表者がこれまでに取り組んだ Mg 合金の鍛造実験の結果を用いて、鍛造条件（鍛造形状、温度、速度等）と割れ発生条件を整理して、幅広い鍛造条件下での Mg 合金の割れ発生について考察した。塑性力学の観点からは鍛造中の Mg 合金の応力、ひずみ、温度分布を FEM 解析により算出した。一方、金属学の観点からは割れ発生部を顕微鏡で観察し、鍛造条件と金属組織変化、結晶粒径等の関係を調べた。

### (2) Mg 合金の鍛造加工における延性破壊条件式の考案

上記(1)で行った考察を基に Mg 合金の鍛造加工において冷間域から熱間域まで取扱うことが可能な延性破壊条件式を提案した。延性破壊条件式は従来の延性破壊条件式を基にして、材料内部の応力、ひずみ分布を組合わせて考案した。また鍛造中の静水圧圧力を高めた鍛造実験や曲げ加工を行い、考案した延性破壊条件式の有効性を検証した。

### (3) サーボプレスを活用した Mg 合金の鍛造プロセス

サーボプレスを利用した塑性加工法の開発が注目されている。難加工材の一つである Mg 合金の鍛造加工において、サーボプレスの最大の特徴であるスライドモーションを任意に制御できることを活かして、また上記(1)、(2)での結果を踏まえて、Mg 合金の割れ発生の抑制に有効なスライドモーションを提案した。

## 4. 研究成果

### (1) Mg 合金の鍛造加工における割れ発生条件の考察

研究代表者がこれまでに取り組んだ市販 Mg 合金 AZ31B (Mg-3%Al-1%Zn) の鍛造実験の結果を割れ発生の観点から整理し、さらに FEM シミュレーションにより鍛造中の応力、ひずみ、温度分布を調べたところ、

- ・冷間鍛造では工具形状を変化させることで割れが生じない加工限界は大幅に向上する。
- ・温間鍛造では変形抵抗曲線が加工軟化特性を示す。

ことが分かり、Mg 合金の鍛造加工での割れ発生について、

- ・冷間鍛造では局所的に大きなひずみを受けても割れは生じない。
- ・温間鍛造での割れは塑性力学的な不安定現象によって引き起こされる。

と推測された。

### (2) Mg 合金の鍛造加工における延性破壊条件式の考案

上記(1)での考察を基に Mg 合金の鍛造加工における割れ発生を次のように考えた。局部的に大きなひずみを受けても割れは発生せず、ある破壊ひずみ値を超えるひずみを受ける領域が拡大すると割れが発生するものと仮定する。つまり、破壊ひずみ領域体積率 $\alpha$ を、

$$\alpha = V_f/V \quad (1)$$

と定義し、延性破壊条件式を、

$$\alpha > C \quad (2)$$

とする。ここで、 $V_f$ は破壊ひずみ $\alpha$ を超えるひずみを受ける試験片体積、 $V$ は塑性変形を受ける試験片体積、 $C$ は材料や温度に依存す

るものとする。本研究では $\alpha_f$ を端面拘束圧縮試験で割れが発生する平均相当ひずみとし、各パラメータは実験結果とFEM解析を組み合わせることで算出する。

図1にAZ31B試験片の鍛造開始温度20~170°Cで行った端面拘束圧縮試験における試験片平均温度と $\alpha_f$ 、 $\alpha_f$ の関係を示す。試験片平均温度は端面拘束圧縮実験で割れが発生した圧縮率での温度分布をFEM解析により求め、平均値を算出した。 $\alpha_f$ 、 $\alpha_f$ も同様に端面拘束圧縮実験で割れが発生した圧縮率でのひずみ分布をFEM解析により算出した。 $\alpha_f$ 、 $\alpha_f$ ともに試験片温度が高いほど値は高くなり、式(2)の延性破壊条件式では割れが発生しない鍛造限界は向上することを意味する。

次に延性破壊条件式(2)の有効性を検証するため、背圧を付加することで鍛造中の静水圧圧力を高めた鍛造実験を行った。一般に加工中の静水圧圧力を高めることで、割れ発生は抑制される。背圧付加型鍛造におけるAZ31B合金の $\alpha_f$ (計算結果)と実験での割れ発生の関係を図2に示す。付加背圧により加工中の温度上昇が異なり、端面拘束圧縮における加工限界の境界線と割れ発生の関係は概ね一致した。これは従来の破壊条件式による割れ発生予測よりも高精度であった。

ところで、Mg合金は引張り、圧縮で応力-ひずみ線図のふるまいが異なる。上述の背圧付加型鍛造では、圧縮応力場が主であるため、割れ発生予測を行うFEM解析には、圧縮応力-ひずみ線図のみを用いれば良いが、引張り応力、圧縮応力が混在した状況下で加工が行われる板材成形等の塑性加工では、引張り、圧縮両方の応力-ひずみ線図をFEM解析に同時に取扱う必要がある。そこで、引張り、圧縮両方の応力-ひずみ線図を同時に取扱えるFEMコードを作成し、AZ31Bの冷間三点曲げ試験を対象に引張り、圧縮両方の応力-ひずみ線図を同時に取扱ったFEM解析を行った。また延性破壊条件式(2)により割れ発生を予測し、実験結果と比較した。

図3に曲げ試験における割れ発生予測結果を示す。引張り特性のみ取扱ったFEM解析ではストローク2.38mm、圧縮特性のみ取扱ったFEM解析ではストローク2.45mm、引張り、圧縮特性両方を取扱ったFEM解析ではストローク2.55mmで割れが発生すると予測され、実験ではストローク2.5~2.6mmの間で割れが発生した。したがって、引張り、圧縮特性両方を取込んだFEM解析の方が割れ発生の予測精度は高く、延性破壊条件式(2)も有効であることが分かった。

以上の結果より、塑性加工中のMg合金の割れ発生は破壊ひずみ領域体積率で整理でき、破壊ひずみ領域体積率が0.1~0.4に達すると割れが生じることが分かった。しかしな

がら、割れ発生位置の特定やさまざまな鍛造条件での検証、また結晶組織変化の考慮などさらなる高精度化を目指した考察が今後の課題であり、割れ発生式を確立するためには取り組むべき課題は多い。

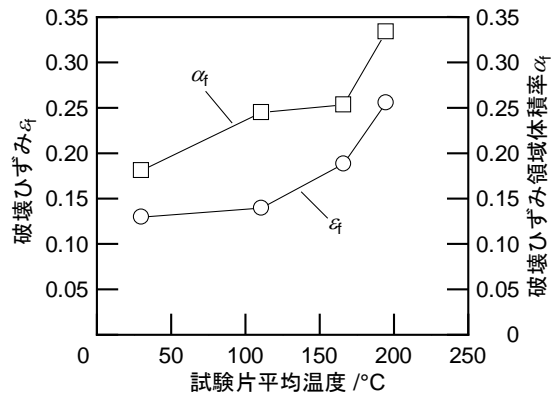


図1 端面拘束圧縮における割れ発生時のAZ31B試験片平均温度と破壊ひずみ、破壊ひずみ領域体積率の関係

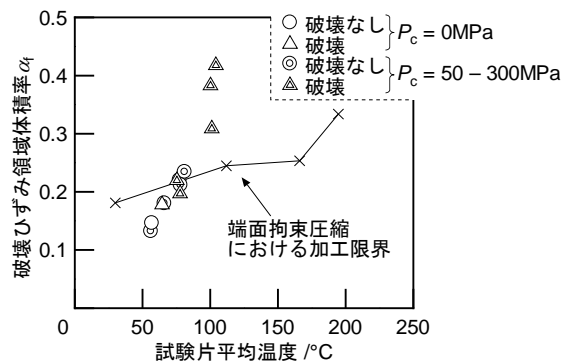


図2 背圧付加型鍛造における破壊ひずみ領域体積率とAZ31B試験片の割れ発生の関係

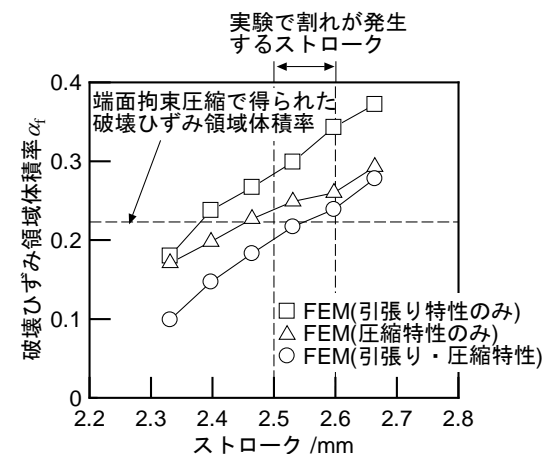


図3 冷間三点曲げ試験における破壊ひずみ領域体積率とAZ31B試験片の割れ発生の関係

(3) サーボプレスを活用した Mg 合金の鍛造プロセス

鍛造中のスライド速度を任意に制御できるサーボプレスを利用して、既出(1), (2)の結果を踏まえて、スライドモーションと Mg 合金の割れ発生の関係について調べた。

使用したサーボプレスはリンク式 AC サーボプレス (コマツ産機株: H1F45) であり, Mg 合金は AZ31B 合金を使用した. 図 4 にスライド速度線図の一部を示す. 圧縮率 20% の位置で加速制御(B)の場合は速度設定を加速・減速制御なし(A) (標準モーション) に対して 2 倍, 減速制御(C)の場合は 0.4 倍にそれぞれ目標速度を設定した. いずれの場合もスライド速度は下死点に向かって減速したが, 加速制御(B)でのひずみ速度は加速した.

図 5 に据込み鍛造におけるスライドモーションと AZ31B 合金の変形能の関係を示す. いずれのスライドモーションにおいても, 平均ひずみ速度が高いほど高変形能であり, 加速・減速制御なし(A)と加速制御(B)では変形能に違いはほとんどみられなかった. 一方, 減速制御(C)での変形能は加速・減速制御なし(A)での変形能よりも高く, 平均ひずみ速度  $1.0\text{s}^{-1}$  程度の低速度域において, 圧縮率 70% 程度まで割れずに圧縮可能であった.

また FEM 解析により破壊ひずみ領域体積率  $\alpha_f$  を求めたところ, 減速制御(C)での  $\alpha_f$  が加速・減速制御なし(A), 加速制御(B)の  $\alpha_f$  よりも小さく, このことから減速制御(C)が Mg 合金の割れ発生の抑制に有効なスライドモーションであることが示唆された.

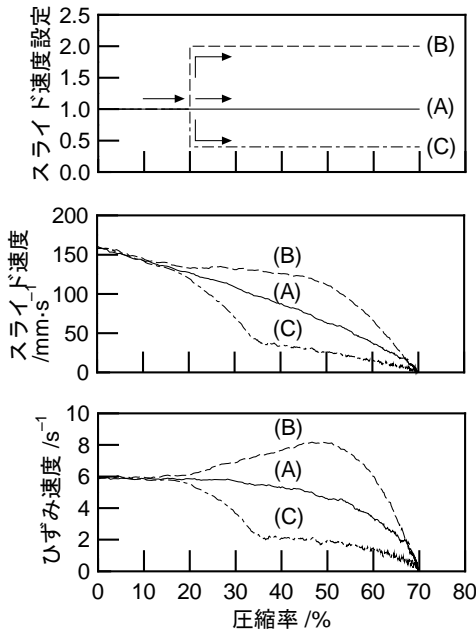


図 4 プレススライド速度線図 ((A) 加速・減速制御なし, (B) 加速制御, (C) 減速制御) (プレス: コマツ産機株: H1F45)

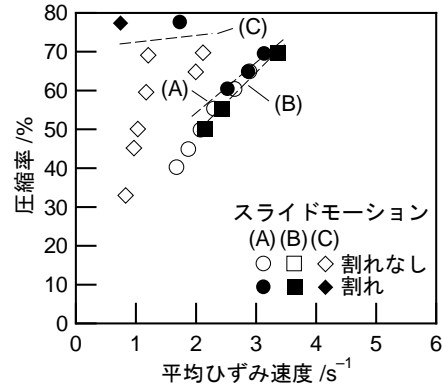


図 5 据込み鍛造におけるスライドモーションと AZ31B 押し出し材の変形能の関係 ((A) 加速・減速制御なし, (B) 加速制御, (C) 減速制御) (鍛造温度:  $200^{\circ}\text{C}$ )

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 松本 良, 市販 AZ31B マグネシウム合金の冷間鍛造, 塑性と加工, 査読有, 50 巻, 2009, 914-918.

[学会発表] (計 8 件)

- ① R. Matsumoto, Ductility Enhancement of AZ31B Magnesium Alloy in Warm Forging with Controlled Forging Speed on Servo Press, 4th Pan-Yellow Sea Rim International Symposium on Magnesium Alloys, 2009/11/13, 熊本大学 (熊本県).
- ② 松本 良: サーボプレス温間鍛造におけるプレススライドモーションとマグネシウム合金の鍛造限界, 日本機械学会第 17 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2009), 2009/11/6, 富山国際会議場 (富山県).
- ③ R. Matsumoto, Y. Togase, K. Osakada: Forming Limit of Magnesium Alloy in Warm Forging using CNC Servo Press with Controlled Forming Speed, 8th International Conference on Magnesium Alloys and their Applications, 2009/10/27, ワイマール (ドイツ).
- ④ R. Matsumoto, Some Methods for Improving Forgeability of Commercial AZ31B Magnesium Alloy in Cold Forging, 3rd Asian Symposium on Magnesium Alloys, 2009/9/23, 瀋陽 (中華人民共和国).
- ⑤ 松本 良, 小坂田宏造: マグネシウム合金の温間鍛造 (第 8 報 プレススライドモーションと変形能に関する考察), 平成

- 21 年度塑性加工春季講演会, 2009/5/30, 京都大学 (京都府).
- ⑥ R. Matsumoto, K. Osakada, Forging Limit Improvement of Commercial Magnesium Alloys by Heat Treatment, 9th International Conference on Technology of Plasticity, 2008/9/11, 慶州 (大韓民国).
- ⑦ 松本 良, AZ31 マグネシウム合金鑄造材の多段鍛造, 平成 20 年度塑性加工春季講演会, 2008/5/25, 日本大学 (千葉県).
- ⑧ 松本 良, 小坂田宏造, マグネシウム合金の冷間鍛造 (第 4 報 背圧付加鍛造における割れ発生予測), 平成 20 年度塑性加工春季講演会, 2008/5/25, 日本大学 (千

葉県).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 良 (MATSUMOTO RYO)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号 : 50362645

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし