

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月10日現在

機関番号：15301
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21560094
 研究課題名（和文） マグネシウム合金の冷間・温間多軸圧縮変形下における成形限界クライテリアの解明
 研究課題名（英文） Investigation of Forming Limit Criterion of Magnesium Alloys under Multiaxial Compressive Deformation at Cold and Elevated Temperatures
 研究代表者
 清水 一郎（SHIMIZU ICHIRO）
 岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
 研究者番号：10263625

研究成果の概要（和文）：

マグネシウム合金の圧縮成形限界を解明することは、使用製品拡大に極めて重要である。本研究では、独自の経路可変型二軸圧縮試験機を用いることにより、冷間～温間多軸圧縮状態におけるマグネシウム合金の圧縮成形限界を調べた。その結果、破壊状態を考慮することによって、圧縮成形限界基準を定式表現することにほぼ成功した。また、塑性異方性やひずみ経路が圧縮成形限界に及ぼす影響など、多くの新しい知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：

Elucidation of compressive forming limit of magnesium alloys is quite important to enlarge their applications to wider industrial products. In the present study, forming limits of magnesium alloys under cold/warm multiaxial compressive conditions were investigated by using a unique strain-path controllable biaxial compression apparatus. The compressive forming limit criterion was almost successfully formulated by taking fracture conditions into consideration. The new research findings, such as influences of initial anisotropy and strain paths upon the compressive forming limit, were also acquired.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：弾塑性工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械材料・材料力学

キーワード：マグネシウム合金、圧縮成形限界、二軸圧縮、塑性変形、変形双晶、塑性加工

1. 研究開始当初の背景

マグネシウム合金は、実用金属中で最軽量かつ比強度が高いことから、環境負荷低減への社会的要求とも相まって、各種産業分野で

の利用が期待されている。しかしながらマグネシウム合金は、冷間および再結晶温度以下の温間において、引張り応力のみならず圧縮応力下でも、一定の塑性変形後に破壊が起こ

る。この圧縮破壊は、圧縮応力支配型塑性加工法である圧延や鍛造等の適用を困難にし、マグネシウム合金の工業的適用範囲を制限する要因となっている。すなわち、各温度条件および変形様式下におけるマグネシウム合金の圧縮成形限界を明らかにすることは、圧縮応力支配型塑性加工における工程設計および加工量の最適制御に必要不可欠である。しかしながら、マグネシウム合金の圧縮成形限界規準は未だ明確化されていない。その主たる理由として、多軸圧縮破壊に至る主因が未解明であること、任意ひずみ経路の二軸圧縮試験が困難であることの2点が挙げられる。

2. 研究の目的

上述の背景に基づき、本研究では代表的なマグネシウム合金であるAZ系を対象に、多軸圧縮条件下における圧縮成形限界クライテリオンの解明と定式化を最終目的とし、次の段階的目標を設定して研究を遂行した。

- (1) 初期等方性AZ31マグネシウム合金に対して比例ひずみ経路二軸圧縮試験を実施し、塑性ひずみに伴う双晶の発生や異方性成長などを調べることにより、破壊発生に至る結晶学的現象を同定する。
- (2) 各二軸圧縮様式に伴う成形限界曲線から、比例ひずみ経路に対する圧縮成形限界について検討を加える。
- (3) ひずみ経路変化を伴う非比例二軸圧縮試験を実施し、ひずみ経路選択が成形限界に及ぼす影響を明らかにするとともに、成形限界基準の定式化を試みる。
- (4) AZ31系以外のマグネシウム合金、ならびに初期異方性を有するマグネシウム合金に対しても調査を行い、成形限界基準の妥当性を検証する。

3. 研究の方法

先に述べた目的を達成するために、マグネ

シウム合金材の二軸圧縮試験による成形限界調査に加え、結晶学的視点からの各種顕微鏡観察等を用いた実験的アプローチを、次の流れで実施した。

- (1) AZ31合金の等方性素材を用意し、比例ひずみ経路の二軸圧縮試験を破壊まで実施する。得られた応力-ひずみ関係から、双晶発生に伴う加工硬化率変化と、等塑性仕事点に基づく塑性異方性成長を評価する。また、実験結果を基に比例ひずみ経路の二軸圧縮成形限界について検討する。
- (2) 塑性異方性を有する素材に二軸圧縮試験を行い、先に求めた成形限界に対して初期異方性を考慮した補正の可能性について検討する。
- (3) 圧縮途中でひずみ経路を変化させる非比例経路二軸圧縮試験を破壊まで実施し、成形限界を修正する。
- (4) 温間にて二軸圧縮試験を実施し、圧縮成形限界の温度依存性を明確化する。
- (5) AZ31以外のマグネシウム合金についても同様の検討を実施し、提案した成形限界クライテリオンの妥当性を検証する。

4. 研究成果

得られた研究成果の概要を、上述の研究の流れに対応させて記述する。

- (1) 本研究の最初のアプローチとして、初期等方性AZ31マグネシウム合金鑄造丸棒材の二軸圧縮成形限界を調べた。設定した二軸圧縮比例ひずみ経路を図1に示す。これらのひずみ経路は、 ε_x 軸からの角度 α (deg) で表現している。当該材料は結晶粒径が比較的粗大であり、圧縮成形限界時に急激な破壊を生じないことから、検討の結果、二軸圧縮のいずれかの軸における最大真応力点を圧縮成形限界点として取り扱うこととした。

二軸圧縮応力下での塑性挙動を調べるために、各ひずみ経路毎に塑性仕事 W における

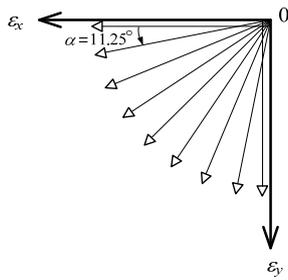


図1 比例二軸圧縮ひずみ経路

等塑性仕事点を求めた結果を図2に示す。図中には、圧縮成形限界点も合わせてプロットしている。等塑性仕事点は、塑性変形の進行に伴って等方性 Mises の降伏条件からの偏差が拡大し、初期等方性材料においても比較的早期に異方硬化が現れることがわかった。この異方性成長は、変形双晶に伴う結晶回転に起因しており、マグネシウム合金に塑性加工を適用する上で重要な知見である。さらに、最終的な圧縮成形限界の輪郭は等塑性仕事の輪郭と異なり、特に等二軸圧縮に近い領域で大きな差異がみられ、成形性が向上することが確認された。この結果は、圧縮成形限界がひずみ経路に強く依存することを表している。

二軸圧縮応力下における圧縮成形限界について検討するために、圧縮成形限界時の真ひずみ成分を求めた。その一例を図3に示す。

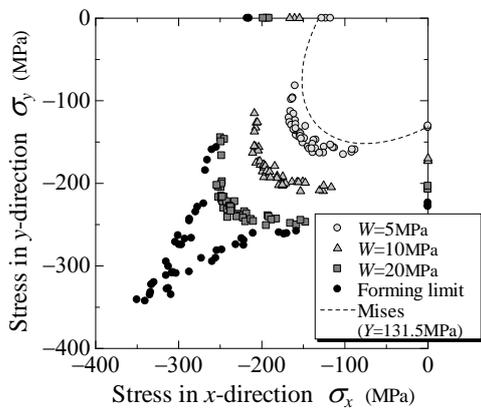


図2 初期等方性 AZ31 鋳造材の二軸圧縮に伴う等塑性仕事点の変化（圧縮成形限界点は黒丸）

単軸圧縮および二軸圧縮による圧縮成形限界点は、ひずみ平面内において等二軸経路を境に対称的に分布していた。さらに、ひずみ経路毎に成形限界時のひずみ量が異なり、二軸圧縮域では等二軸経路に近づくにつれて各方向の成形限界ひずみが大きくなる明確な経路依存性を示していた。この経路依存性は、ひずみ経路を考慮した判定規準を用いれば、圧縮成形限界を評価できる可能性を示唆するものである。

以上の知見に基づき、従来から提案されている成形限界クライテリオンの中で、二軸圧縮状態に適用可能なものを選択し、適用可能性について検討した。その一例として、圧縮成形限界時の塑性仕事と最大せん断応力を図4に示す。図中の β は、比例ひずみ経路二軸圧縮における各方向のひずみ比である。塑性仕事は、ひずみ比に伴って平面ひずみ圧縮から等二軸圧縮の領域で増加傾向を示したが、単軸圧縮時はこの傾向から外れていた。一方、最大せん断応力はひずみ比に伴って増大し、単軸経路を含めた全ての比例ひずみ経路においてほぼ単調増加を示すことがわかった。この結果から、最大せん断応力を考慮することがマグネシウム合金鋳造材の圧縮成形限界評価に有効であることが明らかと

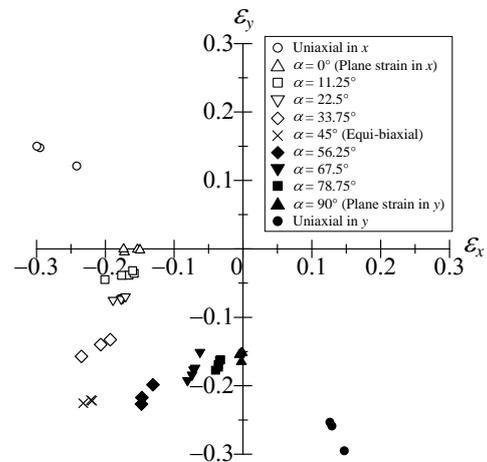


図3 二軸圧縮における圧縮成形限界ひずみ（初期等方性 AZ31 鋳造材）

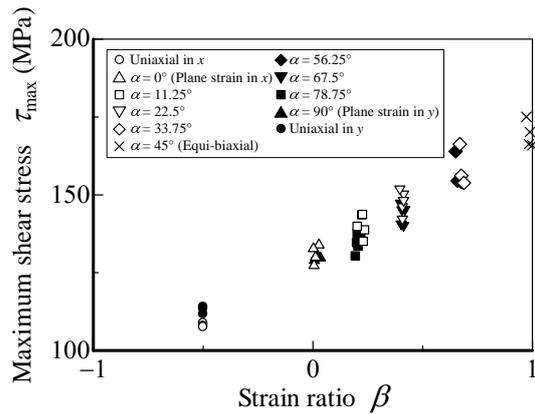
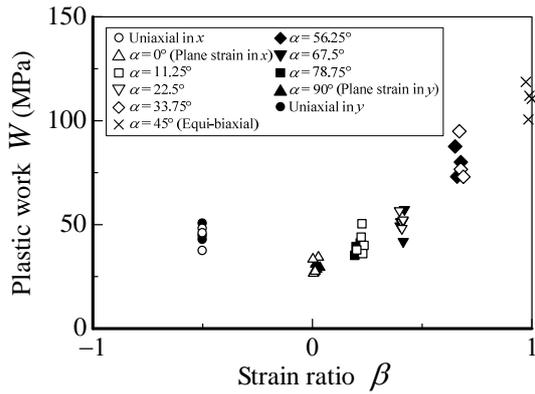


図4 初期等方性 AZ31 鋳造材の圧縮成形限界時の塑性仕事と最大せん断応力

なった。

この考察の妥当性を検証するために、破断形態および破断面の結晶学的検討を行った。圧縮破断面の一例を図5に示す。破断面には明確なせん断変形と延性破壊の痕跡が認められ、マグネシウム合金の圧縮成形限界がせん断応力と強く関連することが確かめられた。

(2) 続いて、塑性異方性を有する AZ31 マグ

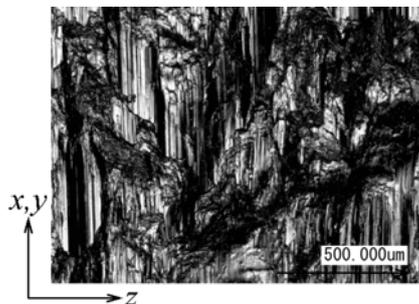


図5 AZ31 マグネシウム合金の圧縮破面

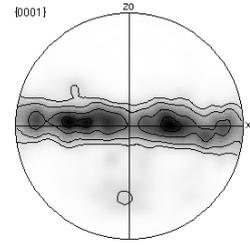


図6 初期異方性を持つ AZ31 マグネシウム合金押し材の{0001}極点図

ネシウム合金押し丸棒材を用いて、二軸圧縮成形限界について検討した。この材料は、C軸が丸棒軸方向に揃う強い集合組織を有している。以下では、軸方向をz方向、それに垂直な直交する二方向をx, y方向とする。与えた比例ひずみ経路は図1と同じである。

鋳造材と同様に、圧縮成形限界時の最大せん断応力を求めた結果を図7に示す。図中には、鋳造材の結果の一部も抜粋して示している。いずれの材料においても最大せん断応力は、ひずみ比に対してほぼ直線的に変化しており、これは圧縮成形限界のひずみ経路依存性を示すものである。しかしながら、その傾きは材料によって異なり、強い塑性異方性を有する押し材に二軸圧縮を行った場合、圧縮応力の方向に因る2つの傾きが現れ、圧縮成形限界の整理にあたっては、塑性異方性を考慮する必要性が示唆された。

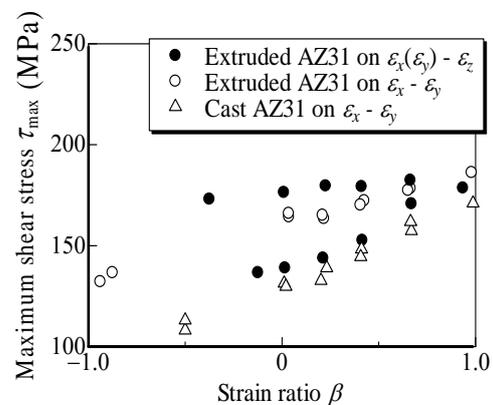


図7 初期異方性 AZ31 押し材の圧縮成形限界時の最大せん断応力

以上の知見に基づき、次のような成形限界クライテリオンを提案した。

$$\tau_{\max} + A\sigma_m = C_3 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 τ_{\max} は最大せん断応力、 σ_m は静水圧応力、 A 、 C は材料によって定まる定数である。これらの定数値を AZ31 鋳造材および AZ31 押出し材についてそれぞれ求めた結果、前者については $(A, C_3) = (-0.4, 75 \text{ MPa})$ 、後者については $(A, C_3) = (-0.32, 102 \text{ MPa})$ と算出された。

(3) 成形限界基準を鍛造や圧延などの実際の塑性加工へ適用するためには、加工途中でひずみ経路が変化する状況にも対応する必要がある。そこで図 8 に示すような、変形途中で圧縮方向が急変する非比例ひずみ経路二軸圧縮試験を実施した。圧縮成形限界時のひずみ成分を、ひずみ経路 A について図 9 に

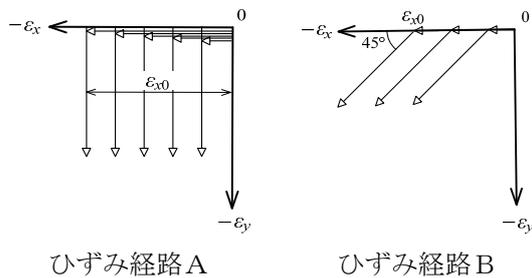


図 8 非比例二軸圧縮ひずみ経路

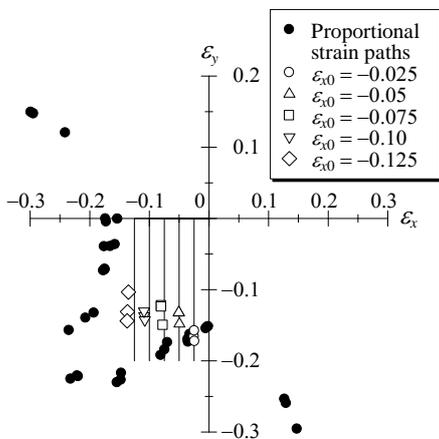


図 9 初期等方性 AZ31 鋳造材の非比例ひずみ経路二軸圧縮における圧縮成形限界

を示す。結果は、ひずみ経路の急変が圧縮成形限界に強く影響することを明示していた。しかしながら、圧縮成形限界時の最大せん断応力を求めると (図 10)、比例ひずみ経路二軸圧縮時の結果とほぼ同一直線上にプロットされることがわかった。この結果は、先に示した成形限界クライテリオンが、非比例ひずみ経路二軸圧縮に対しても適用可能であることを表している。

(4) 冷間における圧縮成形限界に加えて、温

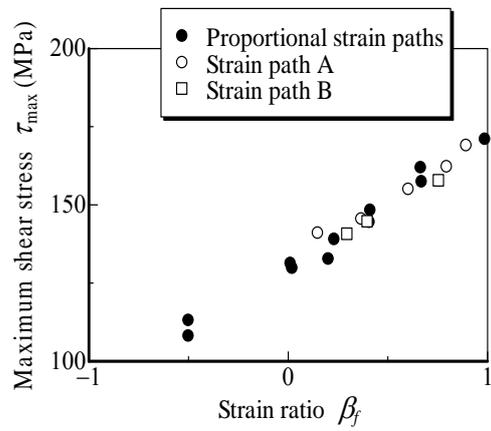


図 10 初期等方性 AZ31 鋳造材の非比例ひずみ経路二軸圧縮に伴う圧縮成形限界時の最大せん断応力

間での圧縮成形限界についても調査を行った。主要な結果のひとつとして、等二軸圧縮および平面ひずみ圧縮における圧縮成形限界時最大せん断応力の試験温度に伴う変化を図 11 に示す。これまでに報告されているマグネシウム合金の単軸試験結果では、昇温に伴って柱面すべりや錘面すべりの易動度が増すことから、流れ応力低下と延性向上が現れるとされている。しかしながら図 11 の結果では、温度上昇による延性への寄与は認められなかった。この理由として多軸圧縮状態における変形拘束の影響等が予測されるが、温間試験は昇温冷却工程に時間を要することから未だデータが不足しており、今後さ

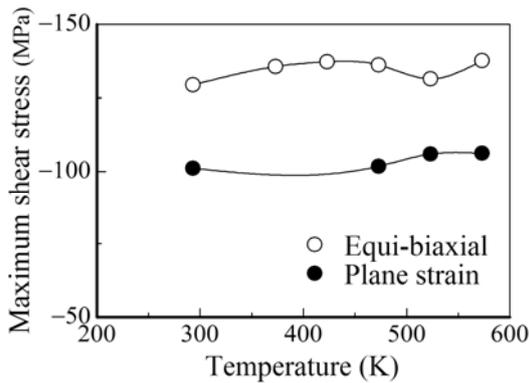


図 11 温間比例ひずみ経路二軸圧縮における圧縮成形限界時の最大せん断応力

らに検討を続ける必要がある。

(5) AZ31 マグネシウム合金以外として、AZ61 マグネシウム合金についても二軸圧縮試験を実施した。結果は割愛するが、AZ31 マグネシウム合金と比較して流れ応力は高いものの、同じ圧縮成形限界クライテリオンが適用可能であることが確かめられた。

以上、本研究の目的である成形限界クライテリオンの解明と定式化を達成するために、多様な観点から研究を遂行した。その成果として、マグネシウム合金の多軸圧縮に伴う異方性成長と圧縮成形限界について、これまでに国内外で報告例のない新規かつ重要な知見を数多く得ることができた。今後はこれらの知見を解析手段に組み込むなど、さらに実用性を高める方向へ展開していきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① Ichiro Shimizu, Kousuke Okada, Seiki Hirano and Naoya Tada: Influence of Plastic Anisotropy on Compressive Forming Limit of AZ31 Magnesium Alloy, *Proceedings of the 6th International Symposium on Advanced Science*

and Technology in Experimental Mechanics, 査読有, 2011, in CD-ROM.

② Ichiro Shimizu and Naoya Tada: Plastic Behavior and Forming Limit during Biaxial Compressions of Magnesium Alloy AZ31 at Room Temperature, *The European Physical Journal (EPJ) Web of Conference*, 査読有, 2010, No.16001.

[学会発表] (計 12 件)

① 平野 聖記, 清水 一郎, 多田 直哉, 岡田 浩輔: 初期等方性AZ31マグネシウム合金鑄造材の比例ひずみ経路二軸圧縮成形限界に関する検討, 日本材料学会第60期学術講演会, 2011年5月25日, 大阪大学.

② 岡田 浩輔, 清水 一郎, 平野 聖記, 多田 直哉: マグネシウム合金の比例ひずみ経路二軸圧縮における成形限界評価, 日本機械学会第24回計算力学講演会, 2011年10月8日, 岡山大学.

③ 岡田 浩輔, 清水 一郎, 多田 直哉: AZ31 マグネシウム合金押し出し材の比例ひずみ経路二軸圧縮における成形限界, 日本機械学会2010年度年次大会, 2010年9月8日, 名古屋工業大学.

④ 清水 一郎: 二軸圧縮試験法によるマグネシウム合金の圧縮塑性挙動および圧縮成形限界評価, 日本非破壊検査協会 応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, 2010年1月9日, 東京都大田区産業プラザ.

⑤ 清水 一郎: 最密六方晶金属の冷間圧縮塑性挙動, 第32回高性能Mg合金創成加工研究会, 2009年9月3日, 熊本大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水 一郎 (SHIMIZU ICHIRO)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 10263625

(3) 連携研究者

多田 直哉 (TADA NAOYA)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号: 70243053