

次世代軽量構造材料としての用途拡大を目指した 高靱性マグネシウム合金の開発

熊本大学 先進マグネシウム国際研究センター*

西本 宗矢

1. はじめに

地球温暖化や資源枯渇などの環境問題を解決するために、燃費向上を目指した輸送機器の軽量化が世界的に重要な課題の一つとなっている。マグネシウムは、鉄の 1/4、アルミニウムの 2/3 の比重であり、その軽量性からアルミニウムに代わる軽量構造材料として注目されている。また、マグネシウムを含む鉱石は広範囲に存在するため資源の枯渇の心配もなく、人体や環境にも優しい金属である。一方で、1. 強度が低い、2. 加工性が悪い、3. 耐食性が悪い、4. 発火し易いなど改善すべき課題が存在するため構造材料として使用される例は少ない。このような状況の中、 α -Mg 母相中に長周期積層(LPSO)構造相が強化相として分散した LPSO 型 $Mg_{97}Zn_1Y_2$ (at.%) 合金が開発され、その優れた特性から学理構築を目指した基礎研究と実用化を視野に入れた応用研究が国内外で活発に行われている¹⁻³⁾。本合金は、塑性加工を施すことで延性、強度が著しく向上するため、押出加工により棒状、板状に加工後、航空機のストリンガーなど構造体の梁としての使用が検討されている。一方で、構造部材に適用するためには、強度に加えて安全性の観点から破壊靱性(破壊に対する抵抗力)も重要な材料特性となり、強度と破壊靱性の両立が求められる。

$Mg_{97}Zn_1Y_2$ 合金は高強度を示すものの、元素戦略やさらなる軽量化、耐食性改善の観点から、添加元素量を極力抑えた Mg-Zn-Y 系希薄合金の開発が実用化を目指す上で重要であると考えられる。しかしながら、元素添加量を少なくすると強化相である LPSO 相の体積分率が減少してしまうために強度が大幅に減少してしまうことが課題となる。その解決策として強度と破壊靱性を両立しうる「不均一組織」を積極的に利用することが考えられる。本合金系は、合金成分や押出条件によっては、押出後も α -Mg 母相が再結晶せずに残存し押出方向に伸長された結晶粒(繊維状加工粒)が形成される。繊維状加工粒は高い転位密度と集合組織の形成によって合金の強度や破壊靱性に寄与しうる⁴⁻⁶⁾。そこで、本研究では、LPSO 相に代わる繊維状加工粒を強化相とする、高強度と高破壊靱性を併せ持つ Mg-Zn-Y 系希薄合金の開発を目的として、合金成分が合金組織、引張特性および破壊靱性に及ぼす影響を調査した。

2. 合金の作製

図 1 に本研究で行った合金作製プロセスの模式図を示す。合金元素を秤量後、鑄造および押出加工により試料を作製した。鑄造材は、Mg (99.9 wt. %) および Zn (99.99wt. %)、Y (99.9 wt. %) の各元素を用いて、高周波誘導溶解炉にてアルゴンガス雰囲気中で溶解し、鉄製の金型に鑄込むことで作製した。合金組成は $Mg_{99.2}Zn_{0.2}Y_{0.6}$ 、 $Mg_{99.2}Zn_{0.3}Y_{0.9}$ 、

*2026.4 より熊本大学 軽金属材料研究拠点 に所属

Mg_{99.2}Zn_{0.6}Y_{1.3}、Mg_{99.2}Zn₁Y₂とした。鋳造材をφ69のピレット状に加工後、押出温度573 K、押出ラム速度0.9 mm·s⁻¹で押出加工を施すことで押出材を作製した。組織観察には光学顕微鏡と走査電子顕微鏡 (SEM) を用いた。押出材の機械的特性評価として室温引張試験と破壊靱性試験を行った。引張試験は初期ひずみ速度5.0 x 10⁻⁴ s⁻¹で行い、荷重軸は押出方向と平行とした。破壊靱性試験はASTM E1822-25Aに準じて行い、試験片には試験片厚さ5 mmの三点曲げ試験片を用いた。疲労予き裂導入後、破壊靱性試験を定変位制御で行った。

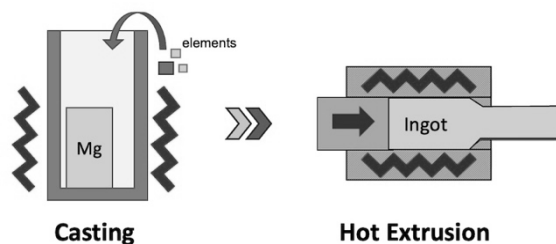


図1. 本研究で用いた合金作製プロセスの模式図.

3. 合金の組織解析

図2にMg-Y-Zn合金の鋳造まま材のSEM像を示す。暗い領域がα-Mg母相であり、明るい領域が第二相であるLPSO相に対応する。YとZn元素の添加量を減らすと、LPSO相の体積分率が低下していくことが確認できた。

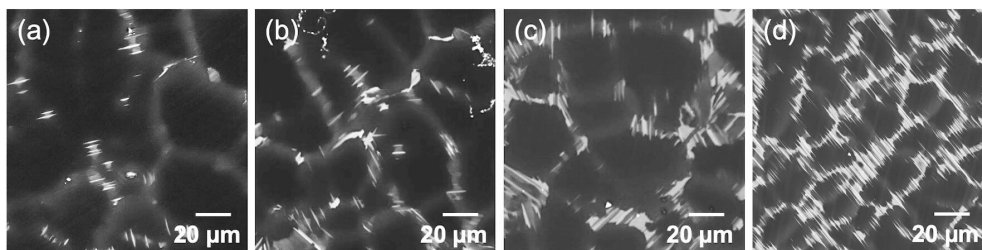


図2. 鋳造まま材のSEM像: (a) Mg_{99.2}Zn_{0.2}Y_{0.6}, (b) Mg_{99.2}Zn_{0.3}Y_{0.9}, (c) Mg_{99.2}Zn_{0.6}Y_{1.3}, (d) Mg_{99.2}Zn₁Y₂.

図3にMg-Y-Zn合金押出材の光学顕微鏡像およびSEM像を示す。紙面水平方向が押出方向となるように示している。SEM像で明るい領域で示されるLPSO相は押出方向に伸長しており、分散度は添加元素量の減少に伴って低下した。光学顕微鏡像からは、いずれの試料もLPSO相に加えて当軸微細粒の再結晶と繊維状加工粒にバイモーダル化した組織を形成していることが確認できた。各構成領域の体積分率を定量化した結果を図4に示す。横軸は鋳造まま材でのLPSO相体積分率で整理した。押出後のLPSO相体積分率は鋳造まま材のものとほぼ同じで、鋳造時にLPSO相が少ないと押出後も少ない状態が保持される。一方で繊維状加工粒はLPSO相体積分率が小さくなると増加し、~5%でピークを示すことが明らかとなった。

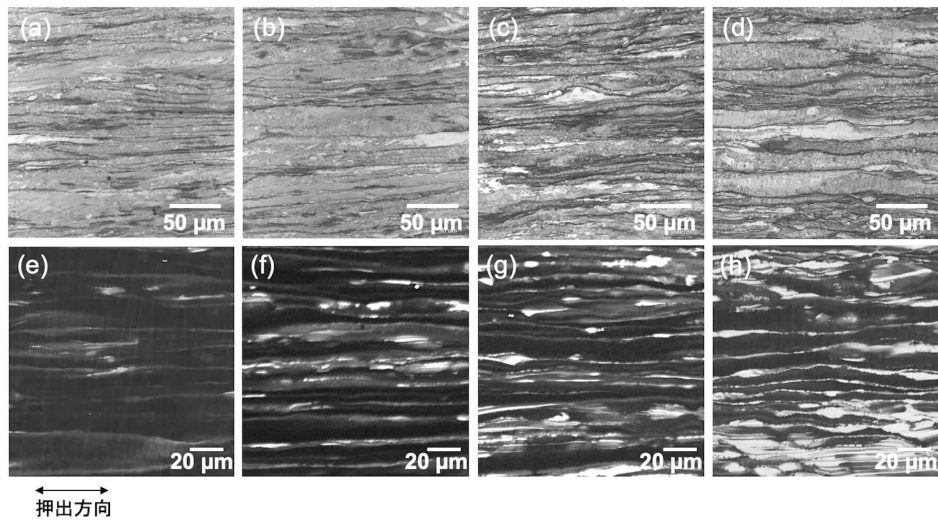


図 3. 押出加工材の(a-d) 光学顕微鏡像と(e-h) SEM 像: (a) $Mg_{99.2}Zn_{0.2}Y_{0.6}$, (b) $Mg_{99.2}Zn_{0.3}Y_{0.9}$, (c) $Mg_{99.2}Zn_{0.6}Y_{1.3}$, (d) $Mg_{99.2}Zn_1Y_2$.

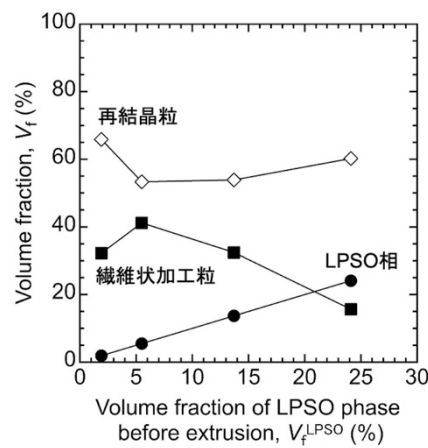


図 4. 铸造まま材の LPSO 相体積分率と押出加工材の構成領域の体積分率の関係.

3. 合金の力学特性評価

図 5 に作製した Mg-Y-Zn 合金押出材の引張特性および破壊靱性値を示す。降伏応力は $Mg_{99.2}Zn_{0.6}Y_{1.3}$ の試料で最も高い値を示し、合金元素希薄化により LPSO 相体積分率が減少しても、必ずしも降伏応力は減少しないことが明らかとなった。これは、LPSO 相体積分率減少を補うだけの繊維状加工粒の形成によるものと考えられる。また、伸びについては合金元素を希薄化するほど増加する傾向を示し、希薄化は伸びの向上について有効に働くことがわかった。破壊靱性についても、合金希薄化に伴い中間組成の合金でピークを示し、破壊靱性の向上に有効な適度な LPSO 相の体積分率および分散度があることがわかった。

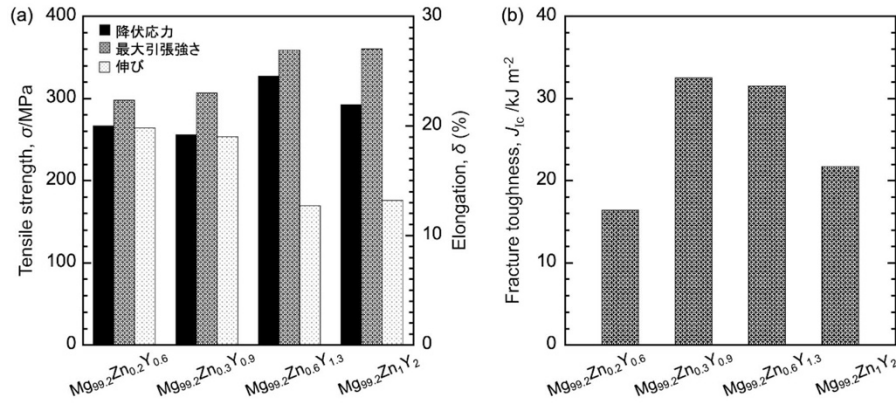


図 5. 各合金の力学特性のまとめ. (a) 降伏強度, 最大引張強さ, 伸び. (b) 破壊靱性.

9. まとめ

本研究では、合金元素の希薄化が、Mg-Y-Zn 系合金押出材の組織形成、引張特性および破壊靱性に及ぼす影響を調査した。その結果、Zn + Y 元素量が 1.2–1.9 (LPSO 相体積分率: 5–14%) の範囲で強度と破壊靱性を両立することが可能であることが明らかとなった。

謝辞

本研究は（公益財団法人）天野工業技術研究所、2025 年研究助成を受けて実施されました。

参考文献

- 1) Y. Kawamura, K. Hayashi, A. Inoue, T. Masumoto, Rapidly solidified powder metallurgy Mg₉₇Zn₁Y₂ alloys with excellent tensile yield strength above 600 MPa, *Mater. Trans.* 42 (2001) 1172–1176.
- 2) M. Yamasaki, K. Hashimoto, K. Hagihara, Y. Kawamura, Effect of multimodal microstructure evolution on mechanical properties of Mg-Zn-Y extruded alloy, *Acta Mater.* 59 (2011) 3646–3658.
- 3) K. Hagihara, T. Mayama, M. Yamasaki, S. Harjo, T. Tokunaga, K. Yamamoto, M. Sugita, K. Aoyama, W. Gong, S. Nishimoto, Contributions of multimodal microstructure in the deformation behavior of extruded Mg alloys containing LPSO phase, *Int. J. Plast.* 173 (2024) 103865.
- 4) S. Nishimoto, Y. Koguchi, M. Yamasaki, Y. Kawamura, Effect of hierarchical multimodal microstructure evolution on tensile properties and fracture toughness of rapidly solidified Mg-Zn-Y-Al alloys with LPSO phase, *Mater. Sci. Eng. A* 832 (2022) 142348.
- 5) S. Nishimoto, T. Yasuda, K. Hagihara, M. Yamasaki, Effects of multimodal microstructure on fracture toughness and its anisotropy of LPSO-type extruded Mg-1Zn-2Y alloys, *J. Magnes. Alloy.* 12 (2024) 2952–2966.
- 6) S. Nishimoto, T. Yasuda, K. Hagihara, M. Yamasaki, Fracture toughening mechanisms acting in Mg-Y-Zn alloys with microstructural anisotropy and heterogeneity, *J. Alloy. Compd.*, 1036 (2025) 182027.