

冷間塑性加工を利用した Mg/Al 接合による高性能複合材料の開発

弘前大学 理工学研究科

助教 峯田 才寛

(2018 年度 奨励研究助成 (若手研究者) AF-2018044-C2)

キーワード：軽金属，強度，耐食性

1. 研究の目的と背景

省エネルギー化の観点から、輸送機器の軽量化は社会的に大きな需要がある。輸送機器に用いられる代表的な軽金属材料として Mg 合金および Al 合金が挙げられるが、それらの特性は一長一短であると言える。例えば Mg 合金は優れた軽量性と強度を有するが、加工性と耐食性に劣る。また Al 合金は優れた耐食性を有する一方で、密度当たりの強度が Mg 合金より劣る場合が多い。したがって、それらの欠点を克服した新たな軽金属材料の開発に期待が寄せられている。

複雑な組織制御プロセスを経ることなく材料特性を大きく変化させる手法として、異種金属の接合がある。特性の異なる金属を物理的な塑性加工により接合することで、単一の金属では到達し得ない高性能化が可能になる。目的に応じた高性能複合材を作製するためには、その原料となる金属材料の選定および組織制御が重要になる。

本研究では、軽量かつ高強度の Mg 合金と高耐食性 Al を塑性加工により接合し、強度と耐食性を両立した軽量 Mg/Al 複合材を創製することを目的とする。一般的に Mg 合金は加工性が悪いため、接合のための大きな塑性加工中に破壊に至る。そのため本研究では加工性を向上させるために Li を添加した Mg 合金を選択した。Mg-Li 基合金は他の Mg 合金に比べて強度が低いため、加工熱処理による組織制御を行った後に Mg/Al 複合材の原料とした。またそのための組織制御条件を検討した。得られた Mg/Al 複合材の力学特性と耐食性を調査し、新たな軽金属材料としての特性を評価した。

2. 実験方法

2.2. Mg 合金の組織制御および特性評価

本研究では Mg 合金として軽量性および加工性に優れ

る LA143 合金(Mg-14 mass%Li-3 mass%Al)を用いた。LA143 合金圧延板に対して Ar 雰囲気において 573 K、1 h の熱処理を施し、水冷した。その後チャンネルダイ内での冷間多軸鍛造(MDFC: multi-directional forging in channel die)を施した。チャンネルダイ内の潤滑剤としてポリテトラフルオロエチレンを用いた。力学特性の加工量依存性を評価するために、室温での圧縮試験を行った。試験片寸法は $4 \times 4 \times 8 \text{ mm}^3$ であり、ひずみ速度は $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ とした。LA143 合金の微細組織を FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope)/EBSD (electron backscatter diffraction)および WAXS (wide-angle x-ray scattering)により観察した。

2.3. Mg/Al 複合材の作製と特性評価

Mg/Al 複合材の原料である Mg として厚さ 1 mm の LA143 合金(熱処理条件：573 K、1 h、水冷)および Al として A1050(熱処理条件：773 K、1 h、水冷)を用いた。Mg/Al 複合材をチャンネルダイ内圧縮接合法により作製した(図 1)。圧縮接合は室温においてひずみ速度は 1.0 s^{-1} で行い、圧縮量は 50%とした。チャンネルダイ内の潤滑剤としてポリテトラフルオロエチレンを用いた。Mg/Al 複合材の微細組織を FE-SEM/EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy)および Vickers 硬度試験により評価した。

Mg/Al 複合材の力学特性を評価するため引張試験をひずみ速度 $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、室温の条件で行った。耐食性を腐食環境下における重量変化から評価した。腐食液として 0.1 mol% HCl および 0.1 mol% H_2SO_4 を用いた。Mg/Al 複合材における耐食性試験は接合時の圧縮方向と垂直な面(TD-LD 面)に対して行い、A1050 のみが腐食液と接触するようにした。

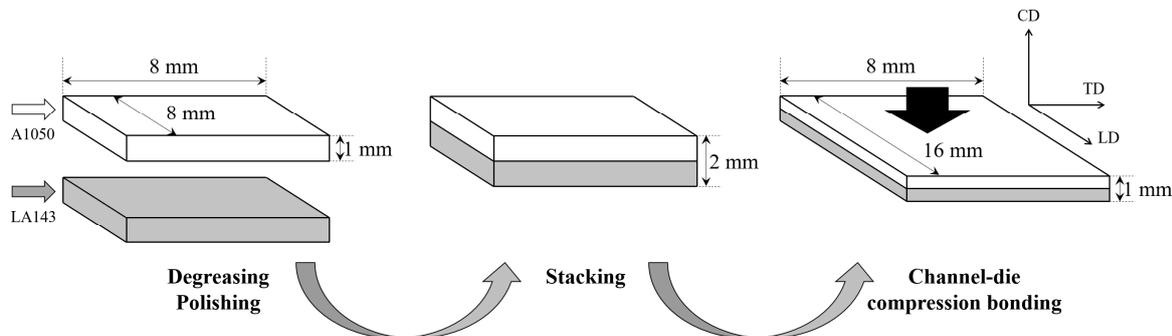


図 1 チャンネルダイ内圧縮接合の模式図

3. 実験結果

3.1. Mg 合金の特性¹⁻³⁾

図2にLA143合金熱処理材における圧縮変形挙動の加工量依存性を示す。加工量の増加に伴い降伏強度が増加することが明らかとなった。図3にLA143合金および典型的なMg合金とAl合金における降伏強度と密度の関係を示す。軽金属材料の強度として、単位密度当たりの降伏応力(比降伏応力 σ_s)が重要となる。本研究におけるLA143合金で最も降伏応力が高い加工量96.9%では $\sigma_s=263$ であった。図中の破線は $\sigma_s=263$ となる降伏応力と密度の関係を

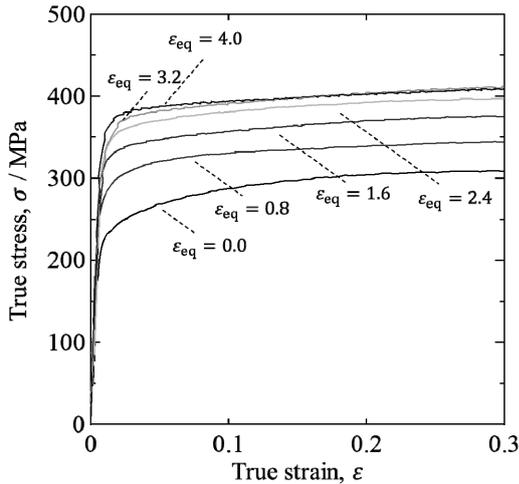


図2 LA143合金加工材の室温圧縮試験から得られた応力-ひずみ曲線¹⁾。破線と繋がる図中の数字はチャンネルダイ内冷間多軸鍛造における総加工量を意味する。

示しており、本合金は他の合金と比較しても σ_s が大きく優れた強度-軽量性のバランスを有していると言える。また本合金は加工量に因らず99%の圧延を施しても破壊せず、優れた展性を有していると言える。

図4に各LA143合金加工材のEBSD解析結果を示す。加工量の増加に伴い、結晶粒の微細化が進行していることが明らかとなった。図5に示すWAXS解析の結果から、ブラッグ間隔1.7nm程度の非常に微細な周期構造を形成していることが明らかとなった。以上より、加工熱処理を施したLA143合金の優れた力学特性は微細な結晶粒とナ

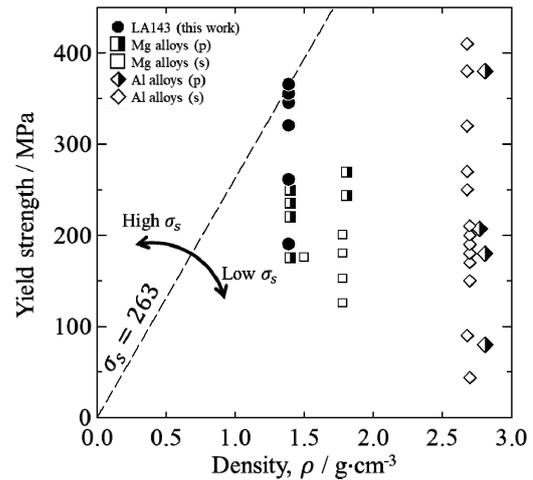


図3 加工熱処理を施したLA143合金、種々のMg合金およびAl合金における降伏応力と密度の関係¹⁾。(p)および(s)は析出強化型合金および固溶強化型合金をそれぞれ意味する。

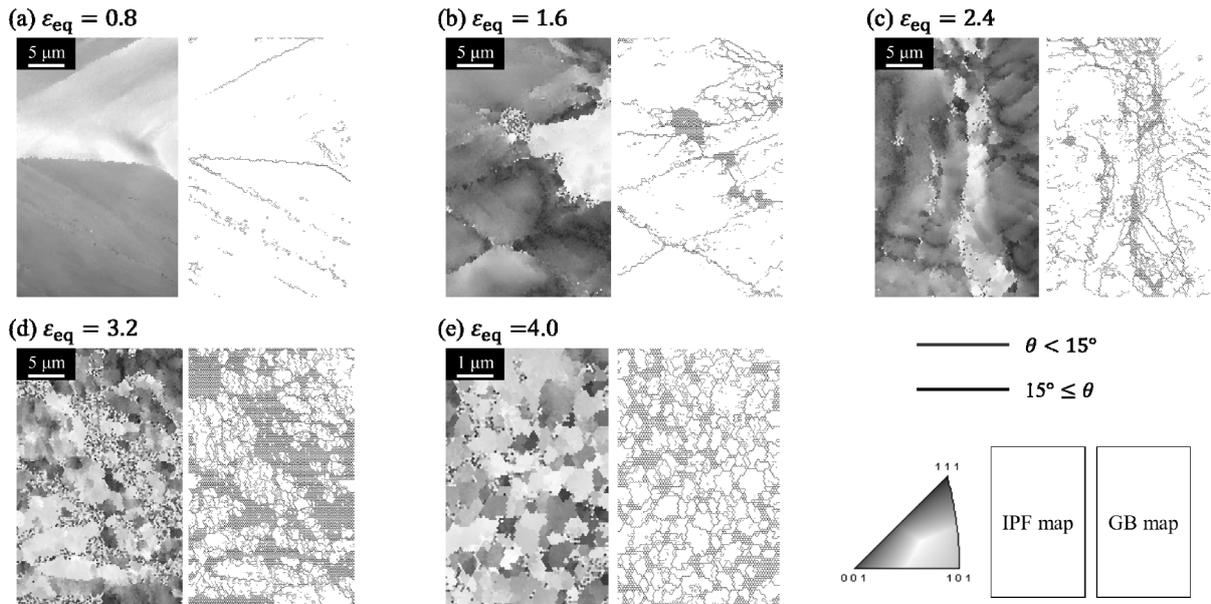


図4 LA143合金加工材のEBSD解析結果^{1,2)}

ノレベルの周期構造を有する析出相に起因していると結論される。よって、加工熱処理を施した LA143 合金は非常に優れた強度・軽量性・加工性を有しており、Mg/Al 複合材の原料として適していると言える。

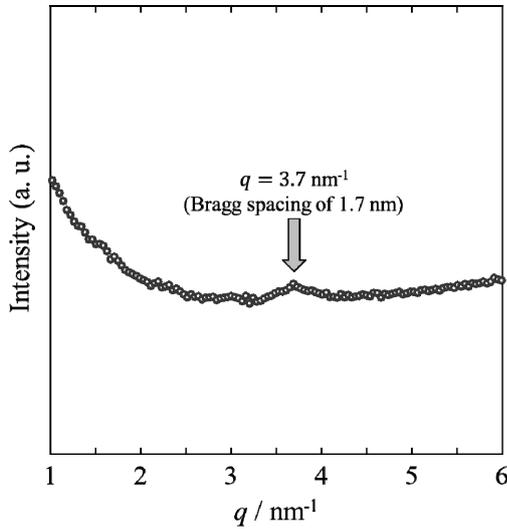


図 5 LA143 熱処理材の WAXS 解析結果³⁾

3.2. Mg/Al 複合材の特性

図 6 に Mg/Al 接合界面近傍での FE-SEM 像および EDS 分析結果を示す。接合面には目立ったボイド等は観察されず、良好な接合が達成されていると考えられる。また EDS

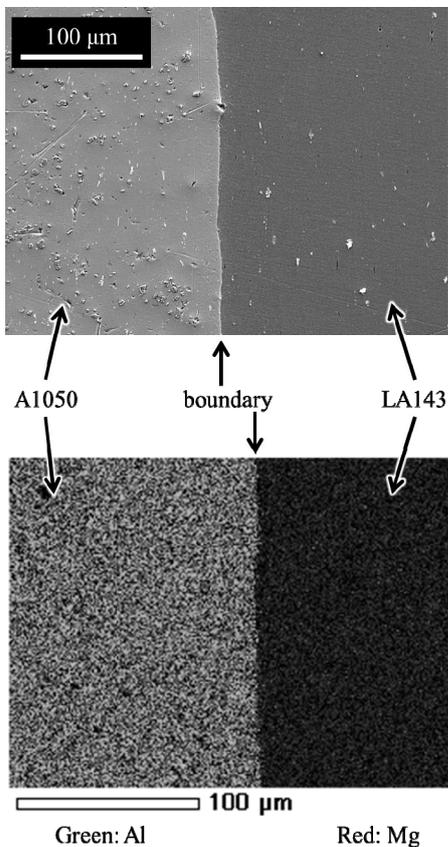


図 6 Mg/Al 複合材における接合界面近傍での (上) FE-SEM 像および (下) EDS 解析結果

分析から界面近傍にも元素の偏析や析出は確認されなかった。

図 7 に Mg/Al 複合材における Vickers 硬度の位置依存性を示す。 $x = 0$ は接合界面位置を意味し、 $x < 0$ は A1050 が、 $x > 0$ は LA143 が存在する位置に対応する。接合界面を境に硬度の大きな傾斜が確認された。また、圧子圧入時における接合界面の剥離は生じなかった。したがって、本手法により特性の異なる異種金属が良好に接合されていると言える。

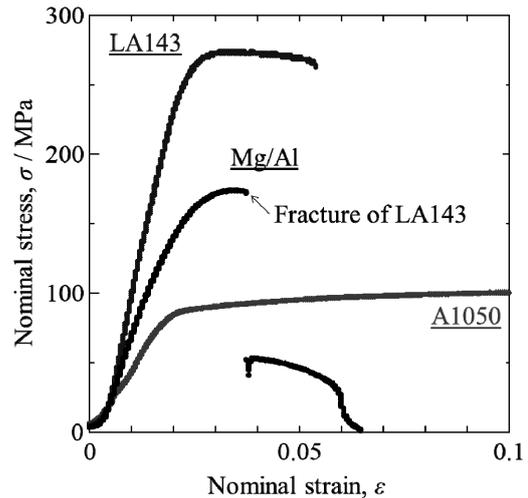


図 7 Mg/Al 複合材における接合界面近傍での Vickers 硬度分布

図 8 に LA143、A1050、および Mg/Al 複合材を用いた典型的な引張試験結果を示す。この図における試料は全て 50% チャネルダイ内圧縮後のものである。Mg/Al 複合材の強度は LA143 および A1050 の中間程度であり、両者の厚みが同程度であることを考えれば、初めに A1050 が塑性変形した後に LA143 合金の塑性変形が開始したと考えられる。また Mg/Al 複合材は変形中に急激な見かけ応力の低下が生じ、その後比較的低い見かけの応力で変形が進行した。これは延性が比較的悪い LA143 の破壊に起因しているものであり、LA143 の破壊後は A1050 のみが変形していることに対応する。複合材の降伏応力は汎用 Mg 合金と同程度であり、比較的良好な強度特性を有していると言える。

図 9 に LA143、A1050、および Mg/Al 複合材を用いた腐食試験の結果を示す。この図における試料は全て 50% チャネルダイ内圧縮後のものである。LA143 では気泡の発生を伴う急激な腐食が生じた。その一方で、A1050 および Mg/Al 複合材では腐食液に浸漬後も重量変化が生じず、良好な耐食性を示していた。また Mg/Al 複合材における腐食速度は初期の A1050 の厚みを 0.5 mm にしても変化しなかった。したがって、Mg と Al の厚さを検討することで更に優れたレベルで力学特性と耐食性を両立する Mg/Al 複合材の開発が可能であると言える。

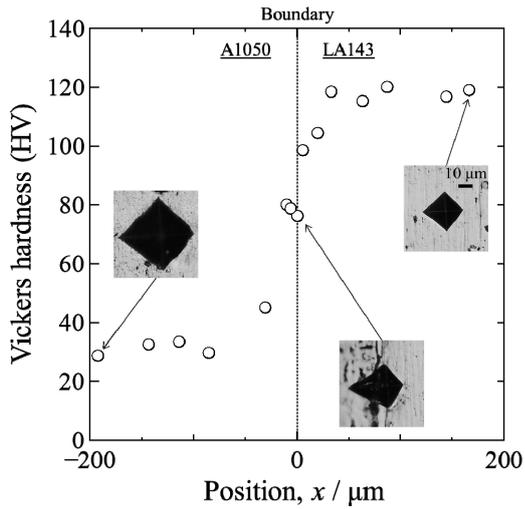


図 8 LA143、A1050、および Mg/Al 複合材での室温引張試験から得られた公称応力-ひずみ曲線

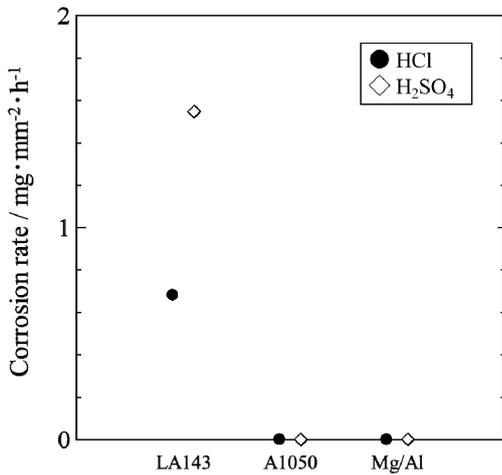


図 9 LA143、A1050、および Mg/Al 複合材での 0.1 mol% HCl および 0.1 mol% H₂SO₄ 溶液中での腐食速度

4. 結言

特定の加工熱処理を施した LA143 合金と A1050 を接合し、その力学特性と耐食性を評価した。接合材の強度は A1050 を大きく上回り、汎用的な Mg 合金と同等の強度を示した。また 0.1 mol% HCl および 0.1 mol% H₂SO₄ に対する良好な耐食性を示すことが明らかとなった。したがって、作製した Mg/Al 複合材は優れた強度と耐食性を両立しており、新たな構造軽金属材料として発展可能であることが示された。今後展望として、合金種および組織制御条件を検討することで、更なる高性能化が可能であると期待される。

謝 辞

本研究成果は、公益財団法人天田財団奨励研究助成を受けて行ったものであることを付記して謝意を表します。また研究遂行にあたり弘前大学佐藤裕之博士、長谷川薫様、熊谷一真様のご助力を頂きました。

参考文献

- 1) Takahiro Mineta, Kaoru Hasegawa, Hiroyuki Sato, Materials Science and Engineering: A, 773 (2020) 138867
- 2) Takahiro Mineta, Micron, 137 (2020) 102914
- 3) Takahiro Mineta, Kazuma Kumatani, Hiroki Adachi, Hiroyuki Sato, Material Science and Engineering Technology, 52 (2021) 339 - 345