

冷間加工が可能な超軽量合金の開発

報告者 大学院総合理工学研究科 東大阪ものづくり専攻 教授 沖 幸男
共同研究者 株式会社ヤマニ 取締役社長 紙田雅一郎
大阪府立大学大学院 工学研究科 准教授 辻川正人

1. 背景

地球温暖化の主因のひとつである二酸化炭素ガスによる温室効果を低減するために、国内で2割を占める運輸移動関連での排出量低減は急務である。この分野での排出量低減は電力駆動によるエネルギー変換効率の向上と慣性質量の低減によって達成されるべきである。慣性質量の低減には高比強度材料の使用が最も効果的である。

金属としてのマグネシウムは鉄の 25%、アルミニウムの 65% の密度を持つ材料である。また、地殻構成元素としてクラーク数で第5の存在量をもち、人体にも必須の元素である。

しかし、構造材料としてのマグネシウム合金の現状は、一般的な AZ31 合金の比強度（強度／密度 [$10^3 \times \text{MPa}/\text{kg}/\text{m}^3$]) が 150 と A7075-T6 材の 200 に代表される高力アルミニウム合金に劣っている。比強度の向上を目指した材料開発が必須とされている。

同時に、結晶が稠密六方構造を持つことから、冷間加工による底面すべり以外のすべり系の活動が不十分であり、冷間加工性が鋼板やアルミニウム合金板にくらべ著しく劣る。温間での加工という制限は自動車等の比較的大型で大量生産製品の生産性を大きく阻害する。冷間加工性の向上を目指した材料開発もまた必須である。

さらに、マグネシウム合金の耐食性はイオン化傾向が大きく有効な犠牲陽極となる元素は無い。効果的な表面保護皮膜の開発がマグネシウム合金の一般化を大きく推進する。

これらの問題は、原子番号3、密度 0.54 という最軽量金属元素で体心立方構造を持つリチウムを合金化し、その表面をアルミニウムでクラッドすることで解決可能と考えられる。この合金開発によってマグネシウム合金の最大限の利用が推進され、自動車等の軽量化を大きく促進し、高効率の運輸機器による二酸化炭素ガス排出量の低減につなげることができる。

2. 目的

この研究の目的は溶解鋳造と圧延等の塑性加工の全てのプロセスを通して Mg-Li 合金の品質を改善することである。さらに、この合金の最大の問題となる耐食性を解決する方法として、延性に富んだ金属コーティングを行うことを目的とした。

3. 研究組織

本年度の研究は、近畿大学が中心となり、ヤマニが合金を作製する。

4. 研究方法

本研究は、最軽量の金属系構造材料である Mg-Li 合金の耐食性を付与するために約 20 μm の純アルミニウム薄膜を保護皮膜とすることを目的とした。Mg-Li 合金上へ純アルミニウムを減圧プラズマ溶射し、この材料の冷間加工性を利用して冷間圧延した。このとき溶射条件と圧延によるアルミニウム皮膜の剥離との関係を明らかにした。

Ar ガスを作動ガスとして減圧プラズマ溶射装置を用い、40 kPa で純アルミニウム粉末を厚さ 2 mm の Mg-Li 合金基板へ溶射した。溶射前及び溶射中の基板温度を種々の方法で制御することで皮膜の様相を変化させた。その方法とはプラズマのみの照射による余熱あるいは基板の保持機構の熱伝導性を変えることによった。基板最高到達温度は、160°C から 500°C まで変化させた。溶射皮膜の厚さは 200 μm を目標とした。

溶射材は圧下率 90% 以上を目標として冷間圧延を行なった。皮膜の剥離が起こった圧下率をその試料の限界圧下率とした。この限界圧下率と溶射による基板温度の最高到達値の関係を明らかにした。

金属間化合物の生成は XRD 及び顕微鏡観察によって行なった。

5. 研究成果

5. 1 Mg-Li 系合金の強化に及ぼす添加元素の影響

溶射条件による基板の最高到達温度は溶射皮膜の形成に大きな影響を持つ。温度の影響を図1と2に示す。基板温度が低いと皮膜の密度が低く基板との密着性も劣る。基板温度が高くなると溶射界面に金属間化合物相が形成された。図3の XRD 解析結果からも $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ の形成は明らかでこのような脆い層の形成は圧延時の界面で破壊し結果的に皮膜の剥離を起こす。これらは図4の圧延結果からも明らかである。基板温度が 400°C 近辺になるような溶射条件を用いることで、90% を超す圧下率でも剥離することの無い皮膜を得ることができた。このとき皮膜は均一で厚さは約 20 μm となった。

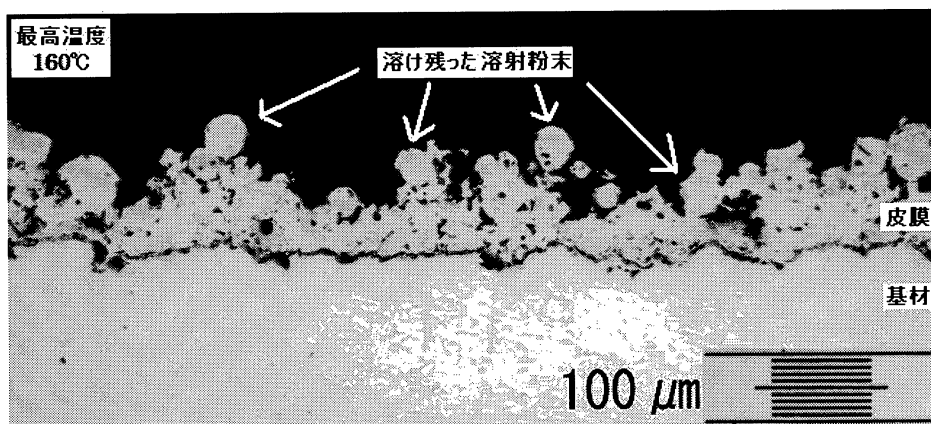


図 1 溶射断面 (基板温度 160°C)

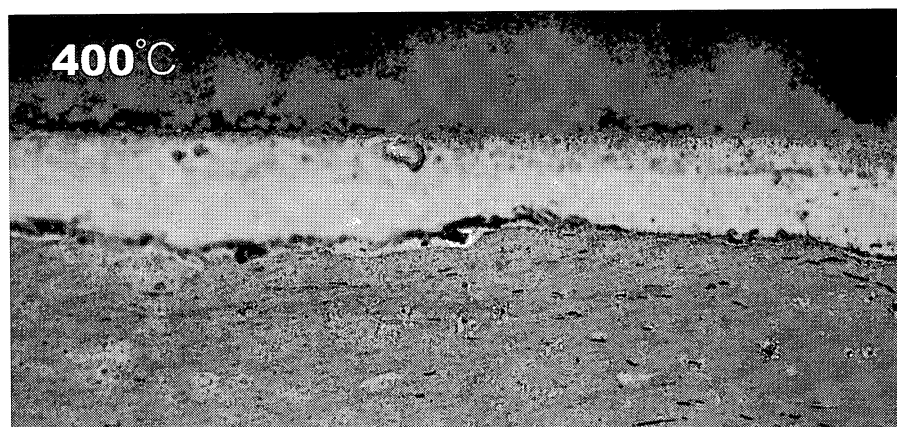


図 2 溶射断面 (基板温度 400°C)

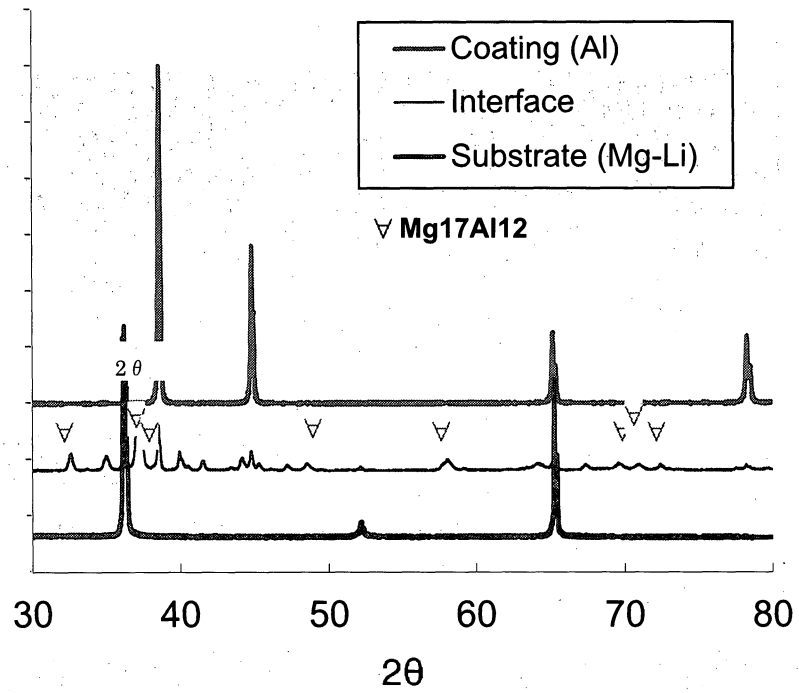


図 3 XRD 試験結果 (基板温度 490°C)

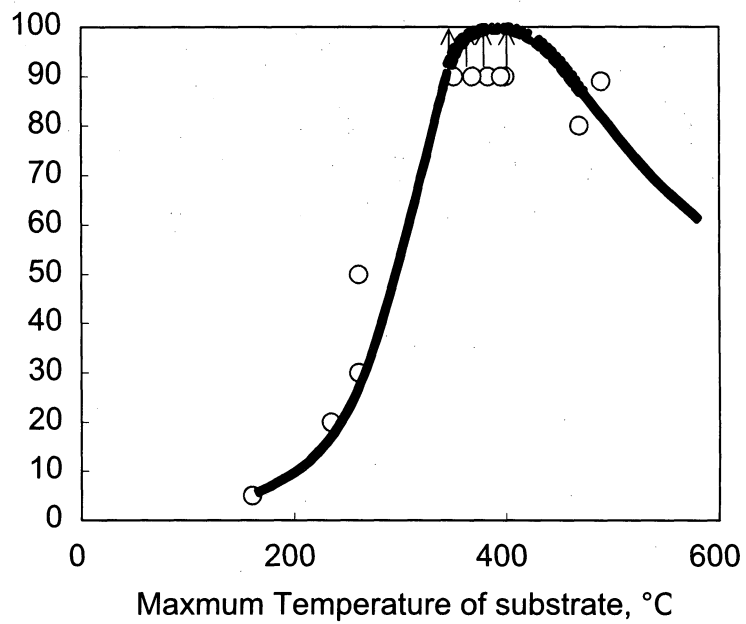


図 4 限界圧下率と基板温度の関係

減圧プラズマ溶射の条件を調整することによって基板温度が400℃程度になる条件で、Mg-Li合金上に密着性が良く冷間圧延性に富んだ純アルミニウム保護皮膜を形成することができた。この温度以下では密着性が劣り、これ以上では脆い金属間化合物が形成され限界圧下率は低下した。

5. 2 成果発表

論文

1. T. Morishige, M. Tsujikawa, S. Oki, M. Kamita, S.W. Chung, K. Higashi, "FRICTION STIR PROCESSING OF CAST Mg-Y-Zn ALLOY", *Advanced Materials Research*, 15-17 (2007) pp. 369-374
2. H. Takahara, Y. Motoyama, M. Tsujikawa, S. Oki, S. W. Chung, K. Higashi, "ALLOWANCE OF DEVIATION AND GAP IN BUTT JOINTS ON FRICTION STIR WELDING", *Advanced Materials Research*, 15-17 (2007) pp. 375-380.
3. S. Oki, Y. Okawa, M. Tsujikawa, Y. Marutani, K. Higashi, "INFLUENCE OF CONTINEOUS TRANSVERSAL INCLINATION OF TOOL ON FSW JOINTS", *Mater. Sci. Forum*, 539-543 (2007) pp. 3850-3855.
4. M. Tsujikawa, Y. Abe, S. Oki, M. Kamita, K. Higashi, "FRICTION STIR WELDING OF Mg-14mass%Li ALLOY", *Mater. Sci. Forum*, 539-543 (2007) pp. 539-543
5. S. W. Chung, T. Morishige, L. F. Chiang, Y. Takigawa, M. Tsujikawa, S. Oki, K. Higashi, "Mechanical Properties on the Friction Stir Processed Cast Mg-1at.%Zn-2at.%Y Alloy", *Magnesium Technology 2007* edited by TMS, paper No.
6. M. Tsujikawa, S. W. Chung, T. Morishige, L. F. Chiang, Y. Takigawa, S. Oki, K. Higashi, "Microstructural Evolution of Friction Stir Processed Cast Mg-5.9mass%Y-2.6mass%Zn Alloy in High Temperature Deformation", *Mater. Trans.*, 48(3) (2007), 618-621.
7. M. Tsujikawa, S. Adachi, Y. Abe, S. Oki, K. Nakata, M. Kamita, "Corrosion Protection of Mg-Li Alloy by Plasma Thermal Spraying of Aluminum", *PLASMA PROCESSES & POLYMERS*, 2007, 4, S593 S596
8. T. Morishige, M. Tsujikawa, S. W. Chung, S. Oki, K. Higashi, "Microstructure of Friction Stir Processed Mg-Y-Zn alloy", *Mater. Sci. Forum*, 558-559 (2007), 777-780.
9. Hongqui Qu, Masato Tsujikawa, Sung Wook Chung, Sachio Oki, K. Higashi, "Fatigue Strength of Friction Stir Welded Aluminum Alloy Joints", *Mater. Sci. Forum*, 558-559 (2007), 793-796.
10. M. Tsujikawa, M. Tanaka, T. Morishige, S. W. Chung, S. Oki, K. Higashi, "Effect of Processing Order on Strengthening of Friction Stirred Mg-Y-Zn Alloy", *Mater. Sci. Forum*, 558-559 (2007), 817-820.
11. Masato Tsujikawa, Shin-ichiro Adachi, Sachio Oki, Kazuhiro Nakata, Masaichiro Kamita,

“PLASMA THERMAL DEPOSITION OF ALUMINUM ON Mg-Li WORK HARDENED ALLOY”, Ceramic Transactions, 198, (2007), 453-460.

12. T. Morishige, M. Tsujikawa, S. Oki, M. Kamita, S. W. Chung, K. Higashi, “Grain refinement of Mg-Y-Zn alloy by friction stir processing”, Advanced Materials Research, 26-28 (2007), 465-468.
13. Hongqiu Qu, Masato Tsujikawa, Sung Wook Chung, Tomotaka Hirata, Sachio Oki, Kenji Higashi, “Fatigue Crack Characteristics of Friction Stir Welded Aluminum Alloy Joints”, Advanced Materials Research, 26-28 (2007), 559-562.

学会発表

1. 森重大樹, 江 立夫, 鄭 盛旭, 沖 幸男, 瀧川順庸, 辻川正人, 東 健司, “熱的機械的プロセスによる casting Mg-5.9mass%Y-2.6mass%Zn 合金のマイクロ組織形成”, 日本金属学会 2007 年春期 (140 回) 大会, 習志野, 2007.3.29, 講演概要, p.534
2. 武田佑介, 辻川正人, 東 健司, 沖 幸男, 鄭 盛旭, “固体潤滑剤による FSW の攪拌領域の拡大”, 軽金属学会、第 112 回春期大会, 富山, 5/12, 講演概要集, P.131-132.
3. 辻川正人, 足立振一郎, 沖 幸男, 阿部由紀子, 紙田雅一郎, “Mg-Li 合金へのアルミニウムのプラズマ溶射”, 軽金属学会、第 112 回春期大会, 富山, 5/12, 講演概要集, P.145-146
4. 森重大樹, 辻川正人, 沖 幸男, 紙田雅一郎, 東 健司, “摩擦攪拌を用いた casting マグネシウム合金の改質”, 日本 casting 工学会第 150 回全国講演大会, 習志野, 5/19, 概要集, p.29.
5. 森重大樹, 辻川正人, 沖 幸男, 紙田 雅一郎, 東 健司, “摩擦攪拌を用いた casting マグネシウム合金の改質”, 日本 casting 工学会第 150 回全国講演大会, 習志野, 5/19, 概要集, p.29.
6. 森重大樹, 辻川正人, 沖 幸男, 日野 実, 東 健司, “マグネシウム合金 casting 物の摩擦攪拌プロセスによる組織改質”, 日本 casting 工学会第 151 回全国講演大会, 仙台, 10/20, 概要集, p.29.
7. 高原裕典, 辻川正人, 東 健司, 鄭 盛旭, 大川裕蔵, 谷口正志, 沖 幸男, “3 次元摩擦攪拌接合におけるツール制御の最適化”, 日本 casting 工学会第 151 回全国講演大会, 仙台, 10/20, 概要集, p.31.
8. 武田佑介, 辻川正人, 東 健司, 鄭 盛旭, 沖 幸男, “固体潤滑剤を用いた摩擦攪拌接合の接合不良防止法”, 日本 casting 工学会第 151 回全国講演大会, 仙台, 10/20, 概要集, p.56.
9. S. W. Chung, T. Morishige, L. F. Chiang, Y. Takigawa, M. Tsujikawa, S. Oki, K. Higashi, “Mechanical Properties on the Friction Stir Processed Cast Mg-1at.%Zn-2at.%Y Alloy”, Magnesium Technology 2007 edited by TMS paper no.
10. T. Morishige, M. Tsujikawa, S. W. Chung, S. Oki, K. Higashi, “Microstructure of Friction Stir

- Processed Mg-Y-Zn alloy”, ReX &GG III, July 2007, Jeju Mater. Sci. Forum,558-559 (2007), 777-780.
11. Hongqiu Qu, Masato Tsujikawa, Sung Wook Chung, Sachio Oki, Kenji Higashi, “Fatigue Strength of Friction Stir Welded Aluminum Alloy Joints”, ReX &GG III, July 2007, Jeju Mater. Sci. Forum,558-559 (2007), 793-796
 12. M. Tsujikawa, M. Tanaka, T. Morishige, S. W. Chung, S. Oki, K. Higashi, “Effect of Processing Order on Strengthening of Friction Stirred Mg-Y-Zn Alloy”, ReX &GG III, July 2007, Jeju Korea.
 13. S. Oki, T. Morishige, M. Tsujikawa, S. Adachi, T. Sone, K. Nakata, “PROTECTIVE SURFACE OF Mg-Li ALLOY BY LOW PRESSURE THERMAL SPRAYING OF ALUMINUM “, The Sixth Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering, September 24-29 2007, Yasuragi-Ioujima Nagasaki, Japan
 14. Taiki Morishige, Masato Tsujikawa, Sachio Oki, Masaichiro Kamita, Kenji Higashi, “Surface Modification of Cast Mg Alloys by Friction Stir Processing”, 16th IFHTSE, Brisbane Australia, 30, Nov. (2007)
 15. Sachio Oki, Masato Tsujikawa, Taiki Morishige, Kenji Higashi, “Protective Surface of Mg-Li Alloy by Aluminum Cladding using Friction Stir Welding”, 16th IFHTSE, Brisbane Australia, 30, Nov. (2007)
 16. T. Morishige, M. Tsujikawa, S. Oki, M. Kamita, S. W. Chung, K. Higashi, “Grain refinement of Mg-Y-Zn alloy by friction stir processing”, Pricm-6, Jeju, Korea, 6 Nov.(2007)
 17. Hongqiu Qu, Masato Tsujikawa, Sung Wook Chung, Tomotaka Hirata, Sachio Oki, Kenji Higashi, “Fatigue Crack Characteristics of Friction Stir Welded Aluminum Alloy Joints “, Pricm-6, Jeju, Korea, 6 Nov.(2007)

特許

1. 辻川正人, 沖幸男, 東健司, クラッド材の製造方法およびクラッド材 出願者 大阪産業振興機構 特願 2007-009 号 (2007.3.31)
2. 辻川正人, 沖幸男, 東健司, 摩擦攪拌接合方法 出願者 大阪産業振興機構 特願 2007-082721(出願日 2007/3/27)

6. 今後の展開

板材、線材を多くの製造業者に供給するという事業化のために、新材料としてより高いアピールをめざして比強度の向上を目的とする研究開発を行う。実際には合金開発として添加元素が強度と延性に与える影響を明らかにする。