

Al-Si 合金粉末により表面複合化した Mg 合金の組織と耐摩耗性

金森陽一*, 樋尾勝也*

Microstructure and Wear Resistance of Magnesium Alloy Surface-Composited with Al-Si Alloy Powder

Yoichi KANAMORI and Katsuya HIO

Key words: magnesium alloy, Al-Si alloy powder, surface-composited, microstructure, wear resistance

1. はじめに

Mg 合金は実用金属の中で最も軽量であることから、自動車部品などへの利用が望まれている¹⁾。特に、耐食性や耐摩耗性などの機能を有する Mg 合金への期待は大きく、低コストで、Mg 合金の耐食性、耐摩耗性を向上させる技術が開発できれば、Mg 合金の利用拡大は加速すると考えられる。

Mg 合金の耐食性、耐摩耗性を向上させる技術として、各種表面処理が研究され、多数報告されているが、特に耐摩耗性に関する研究として、陽極酸化²⁾、レーザクラディング³⁾などが報告されている。

著者らは、表面処理なしで Mg 合金の耐摩耗性を向上させる技術の開発を目的として、鋳型内で Mg 合金溶湯と Al-Si 合金粉末を溶融・反応させ、Mg 合金表面に皮膜を形成させる技術を検討してきた。これまでの研究において、凝固時の加圧及び適切な鋳造条件を選定することにより、AZ91Mg 合金表面に約 260HV の硬さを有する皮膜を形成させることができることなどを明らかにした⁴⁾。

本研究では、Al-Si 合金粉末の量が皮膜の組織及び耐摩耗性に及ぼす影響を調べた。

2. 実験方法

2. 1 試験片の作製

実験には、市販の AZ91Mg 合金（以下、AZ91 とする。）とメジアン径：74 μ m の Al-12%Si 合金粉末（以下、粉末とする。）を用いた。作製した試験片の形状は 50mm×10mm×高さ 5mm である。

試験片の作製手順は以下の通りである。試験片作製用金型⁴⁾の底部に粉末 0.06g (0.12mg/mm²)、0.1g (0.2mg/mm²)、0.2g (0.4mg/mm²)、または 0.5g (1mg/mm²) をなるべく均一になるように敷き詰め、金型を 573K に加熱した。この金型に、1023K の AZ91 溶湯約 500g を注湯し、100MPa で加圧しながら凝固させ、試験片とした。

表 1 摩耗試験条件

相手材(ボール)	3/16 インチ SUJ2
荷重	0.98N
半径	2mm
線速度	50mm/s
すべり距離	15、60、180m
雰囲気	大気中

2. 2 評価

作製した試験片の評価としては、マイクロビッカース硬さ測定、光学顕微鏡及び SEM による組織観察、EDS による元素分析、X 線回折による構成相の同定、ボールオンディスク式摩擦摩耗試験機による摩耗試験等を行った。

光学顕微鏡による組織観察については、5%クエン酸によるエッチング後に行った。また、摩耗試験については、表 1 の条件にて行った。なお、摩耗試験後の摩耗痕については、工具顕微鏡により摩耗幅を測定し、摩耗体積及び比摩耗量を算出した。

* 金属研究室

3. 実験結果と考察

3.1 皮膜の硬さ

図1に、粉末量： $0\sim 1\text{mg/mm}^2$ の条件で作製した皮膜の硬さ（測定位置：表面から $60\mu\text{m}$ ）を示す。粉末量が多くなるとともに、皮膜の硬さは大きくなり、粉末量： 0.2mg/mm^2 で最大値：約 $270\text{HV}0.025$ を示し、それより粉末量が多くなると皮膜の硬さは小さくなった。また、粉末量： $0.12\sim 0.4\text{mg/mm}^2$ において、皮膜硬さ： $220\text{HV}0.025$ 以上が得られた。

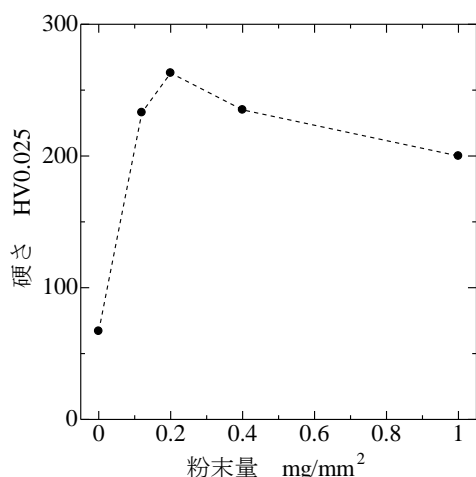


図1 粉末量と皮膜の硬さの関係

3.2 皮膜のマイクロ組織と EDS による元素分析

図2に、粉末量： 0.2mg/mm^2 で作製した皮膜のマイクロ組織を示す。図2から、 0.2mg/mm^2 では、皮膜は3つの領域（A～C部）に分かれているように見受けられる。最表面のA部では、数 μm の微細な化合物が観察された。EDSによる元素分析の結果から、この微細な化合物は Mg-Si 化合物であると推定される。また、A部のマトリックスからは、 Mg と Al が検出された。 Mg と Al の濃度比をみると、マトリックスと AZ91 の Mg と Al の濃度比は明らかに異なっていた。この結果から、溶湯(Mg)は皮膜最表面まで浸透し、溶湯(Mg)と粉末の Al が反応して、マトリックスに Mg-Al 化合物が生成したと推定される。

B部では、A部と同様な微細な化合物、粒状化合物、共晶組織が観察された。EDS

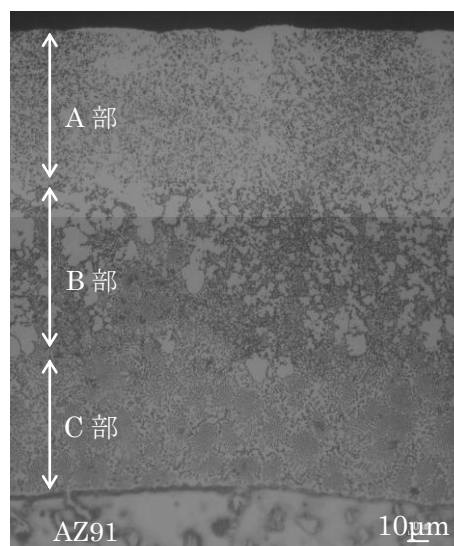


図2 0.2mg/mm^2 で作製した皮膜のマイクロ組織

による元素分析の結果から、微細な析出物は Mg-Si 化合物、粒状化合物は Mg-Al 化合物、共晶組織はロッド状の Mg 固溶体と Mg-Al 化合物であると推定される。

C部では、微細な化合物は観察されず、B部と同様の共晶組織のみが観察された。EDSによる元素分析の結果から、C部の共晶組織もロッド状の Mg 固溶体と Mg-Al 化合物であると推定される。

図3に、粉末量： 0.12mg/mm^2 (a)、 1mg/mm^2 (b)で作製した皮膜のマイクロ組織を示す。

図3-a) 0.12mg/mm^2 では、皮膜は、3つの領域に分かれておらず1つの領域からなり、微細な化合物と粒状化合物と共晶組織が観察された。EDSの測定結果から、微細な化合物は Mg-Si 化合物、粒状化合物は Mg-Al 化合物、共晶組織はロッド状 Mg 固溶体と Mg-Al 化合物であると推定される。この組織は、粉末量： 0.2mg/mm^2 のB部（図2）と同じであった。

図3-b) 1mg/mm^2 では、皮膜は2つの領域（A、B部）に分かれているように見受けられる。A部

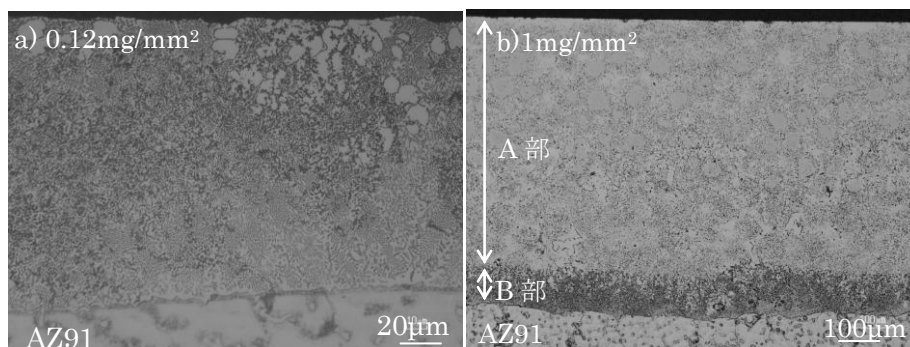


図3 $0.12, 1\text{mg/mm}^2$ で作製した皮膜のマイクロ組織

では、未溶融と思われる粉末が多数観察され、その周りに粉末量：0.2mg/mm²のA部(図2)と同様の組織が観察された。この未溶融部の硬さを測定したところ、80HV0.025程度であった。また、溶融部の硬さは約250HV0.025程度であったことから、粉末量が多い条件(1mg/mm²)では、粉末が溶け残り、皮膜の硬さを低下させることがわかった。

B部では、粉末量：0.2mg/mm²のB部(図2)や粉末量：0.12mg/mm²(図3-a)と同様の微細なMg-Si化合物とMg-Al化合物と共晶組織(ロッド状Mg固溶体とMg-Al化合物)が観察された。

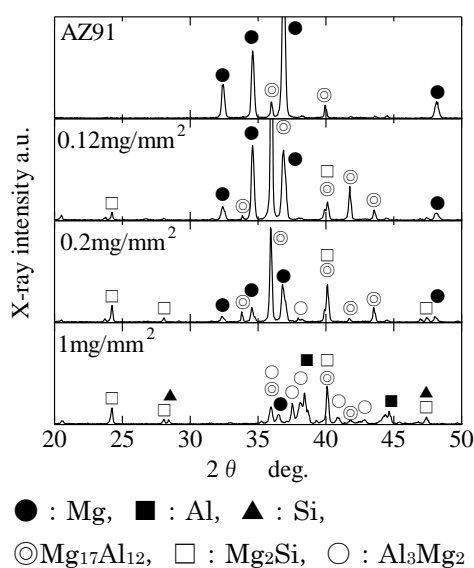


図4 X線回折パターン

3.3 X線回折による皮膜構成相の同定

図4にAZ91, 粉末量：0.12, 0.2, 1mg/mm²のX線回折パターンを示す。AZ91では、MgとMg₁₇Al₁₂のピークが検出された。

粉末量：0.12mg/mm²では、Mg, Mg₁₇Al₁₂, Mg₂Siのピークが検出された。また、AZ91の回折パターンと比較するとMgのピークが低くなりMg₁₇Al₁₂のピークが高くなっていることから、粉末量：0.12mg/mm²の皮膜では、Mg₁₇Al₁₂とMg₂Siが生成したと推定される。この結果から、粉末量：0.12mg/mm²のマイクロ組織で観察されたMg-Si化合物はMg₂Si, Mg-Al化合物はMg₁₇Al₁₂であると考えられる。また、これらの化合物の硬さはそれぞれ、約450HV, 250HVと言われている⁵⁾。粉末量：0.12mg/mm²において、約270HVが得られた要因としては、これらの化合物によるものであると考えられる。

粉末量：0.2mg/mm²では、粉末量：0.12mg/mm²に比べ、Mg₂Siのピークが高くなる(Mgのピークが更に低くなる)とともに、小さいAl₃Mg₂のピークが検出された。このことから、粉末量が増えるとMg₂Siの生成量が増える(Mgは減少する)とともに、Mg₁₇Al₁₂に加えAl₃Mg₂が生成したと考えられる。この結果から、粉末量：0.2mg/mm²のマイクロ組織で観察されたMg-Si化合物はMg₂Si, Mg-Al化合物はMg₁₇Al₁₂(一部Al₃Mg₂)であると考えられる。

粉末量：1mg/mm²では、Mgのピークは更に低くなり、Mg₂Si, Mg₁₇Al₁₂, Al₃Mg₂, Al, Siのピークが検出された。このAl, Siのピークは未溶融の粉末のピークであると考えられる。また、粉末量：0.12mg/mm²と比べると、Mg₁₇Al₁₂のピークが低くなり、Al₃Mg₂のピークが高くなったことから、粉末量が多くなるとAl₃Mg₂の生成量が増えることがわかった。

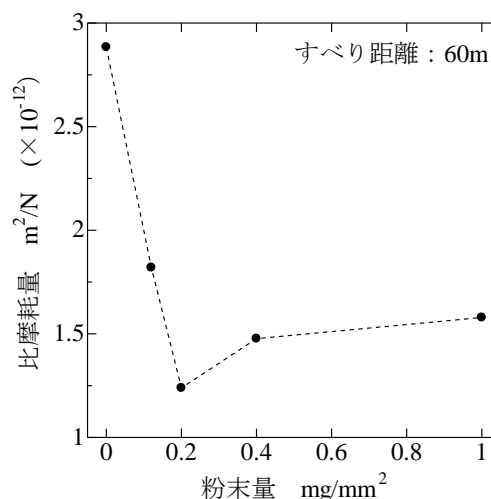


図5 粉末量と比摩耗量の関係

3.4 耐摩耗性の評価

図5に、粉末量：0~1mg/mm²の条件で作製した皮膜の粉末量と比摩耗量の関係(すべり距離：60m)を示す。比摩耗量は、粉末量が増えるとともに小さくなり、粉末量：0.2mg/mm²で最小値(約1.25×10⁻¹²m²/N)を示し、それより粉末量が多くなると比摩耗量は大きくなった。比摩耗量が小さいほど耐摩耗性に優れていることから、この結果から皮膜の耐摩耗性は粉末量：0.2mg/mm²が最も優れていること、またそれより粉末量が多くなると、耐摩耗性が悪くなることがわかった。この傾向は皮膜硬さの測定結果と同様の傾向であ

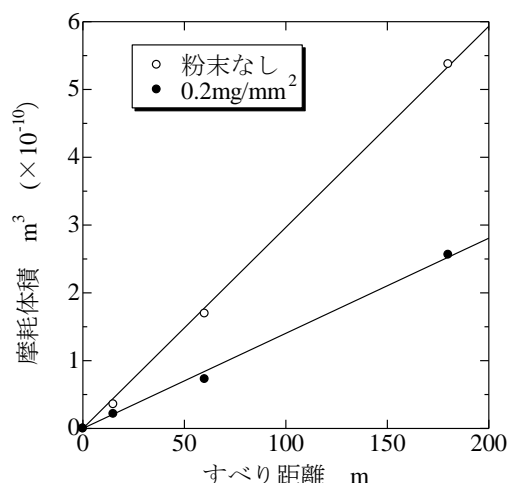


図 6 すべり距離と摩耗体積の関係

ったことから、作製した皮膜の耐摩耗性は皮膜の硬さにより決まると考えられる。

図 6 に、粉末なしと粉末量： $0.2\text{mg}/\text{mm}^2$ の条件で作製した皮膜について、すべり距離を変えて摩耗試験をしたときのすべり距離と摩耗体積の関係を示す。粉末なしと粉末量： $0.2\text{mg}/\text{mm}^2$ とともに、すべり距離が増えるとともに摩耗体積は直線的に増加し、その傾きは粉末量： $0.2\text{mg}/\text{mm}^2$ の方が小さく、すべり距離：180m での粉末量： $0.2\text{mg}/\text{mm}^2$ の摩耗体積は粉末なしのおおよそ半分であった。また、すべり距離：180m の粉末量： $0.2\text{mg}/\text{mm}^2$ の摩耗痕の深さは約 $40\mu\text{m}$ であったことから、この摩耗は A 部(図 2)のみで生じていたことがわかる。この結果から、本実験での粉末量： $0.2\text{mg}/\text{mm}^2$ の耐摩耗性の向上は、A 部で確認された Mg_2Si と $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ (一部 Al_3Mg_2) によるものと考えられる。

4. まとめ

鋳型内で Mg 合金溶湯と Al-Si 合金粉末を溶解・反応させ、Mg 合金表面に皮膜を形成させる技術の開発を目的として、粉末量が皮膜の組織、耐摩耗性に及ぼす影響を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 粉末量が多くなるとともに、皮膜の硬さは大きくなり、粉末量： $0.2\text{mg}/\text{mm}^2$ で最大値(約 $270\text{HV}0.025$)を示し、それより粉末量が多くなると皮膜の硬さは小さくなった。

(2) 粉末量： $0.2\text{mg}/\text{mm}^2$ で作製した皮膜は、3つの領域(A~C部)に分かれており、A部は微細な Mg_2Si と $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 、B部は微細な Mg_2Si と粒状 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ と共晶組織(ロッド状 Mg 固溶体と $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$)、C部は共晶組織(ロッド状 Mg 固溶体と $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$)により構成されていると考えられる。

(3) 粉末量が増えるとともに、比摩耗量は小さくなり、粉末量： $0.2\text{mg}/\text{mm}^2$ で最小値(約 $1.25 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$)を示し、それより粉末量が多くなると比摩耗量は大きくなった。この結果から、今回の実験条件では、粉末量： $0.2\text{mg}/\text{mm}^2$ の皮膜の耐摩耗性が最も優れていることがわかる。また、粉末量： $0.2\text{mg}/\text{mm}^2$ の耐摩耗性の向上は、A部で確認された Mg_2Si と $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ によるものと考えられる。

謝辞

本研究は、独立行政法人科学技術振興機構 平成 24 年度第 2 回 研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) FS ステージ 探索タイプにより実施しました。

参考文献

- 1) 板倉浩二：“マグネシウム合金の自動車への適用動向と課題”。金属, 80, p649-654 (2010)
- 2) 関口裕士ほか：“陽極処理によるマグネシウム合金上に作製した $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 膜の摩擦・摩耗特性”。軽金属, 53, p595-600 (2003)
- 3) 高木亨ほか：“レーザクラディングによる AZ91D マグネシウム合金の表面改質”。軽金属, 51, p619-624 (2001)
- 4) 金森陽一ほか：“Al-Si 合金粉末による Mg 合金鋳造材の表面複合化”。平成 23 年度三重県工業研究所研究報告, 36, p95-98 (2012)
- 5) 市川理衛ほか：“マグネシウム合金の熱間硬さにおよぼすその金属間化合物の影響”。軽金属, 14, p264-268 (1964)