

高強度を有する急速凝固 P/M アルミニウム合金の耐摩耗性

Wear Properties of Rapidly Solidified P/M Aluminum Alloys with High Strength

高木 誠*, 太田 英伸**, 岩田博之***, 井村 徹***, 河村 能人****

Makoto Takagi, Hidenobu Ohta, Hiroyuki Iwata,
Toru Imura, Yoshihito Kawamura

Abstract High-strength P/M (powder metallurgy) aluminum alloys of Al-Ni-Y-Co, Al-Si-Ni-Ce and Al-Ti-Fe-TM(TM: Cr, Mo, V, Zr) systems were prepared by extrusion of rapidly solidified powders which were produced by high-pressure He gas atomization. It was found that wear resistance of the P/M aluminum alloys thus prepared was better than that of the conventional aluminum alloys. Al₈₉(Ni_{0.33}Y_{0.54}Co_{0.13})₁₁ alloy had the best wear resistance among the P/M aluminum alloys studied in this experiment. In order to investigate the cause of the difference of wear properties in those P/M aluminum alloys, wear traces and wear particles were analyzed by EPMA, SEM, TEM and Micro-Vickers hardness measurement. It was found that the hard oxide layer was formed on the surface of the wear trace in Al₈₉(Ni_{0.33}Y_{0.54}Co_{0.13})₁₁ alloy. However, in the case of Al_{78.5}Si₁₉Ni₂Ce_{0.5} alloy, wear particles were included in the surface of the wear trace. It is considered that the oxidation of wear surface and the stability of the formed oxide layer significantly influenced wear resistance of the P/M aluminum alloy.

1 はじめに

近年、Al 系合金などの軽合金材料において、組織を非晶質化したり微結晶化することにより、従来になく高い強度を持った新しい材料が見い出され、活発に研究が進められている¹⁻⁶⁾。これらの材料は、構造材料などへの幅広い応用が期待されているが、その作製には急速凝固法が用いられているため粉末が薄帯しか得られない。そこで、応用に必要な任意形状のバルク材を得るには粉末冶金(P/M)法等を用いて成形する必要がある。

一方、非晶質合金の摩耗特性は、構造材料として、摺動部品等に応用する場合に特に重要でありそれに関する基礎的研究がこれまで主に鉄系合金にて行われてきている⁷⁾。

本研究では、高圧 He ガスアトマイズ法により作製された急速凝固粉末の押し出し成形材の摩耗特性を系統的に研究した。その際、研究対象とした合金系は Al-Ni-Y-Co 系、Al-Si-Ni-Ce 系、Al-Ti-Fe 系であり、得られている特性として 500MPa を越える高強度や 3%以上の伸び、及び比較的低い熱膨張係数が挙げられる。こうした特性により、これらの高強度 P/M アルミニウム合金は摺動材料として期待されており、本研究ではそれらを応用する上で必要な基礎的知見を得ることを目的とした。

* 愛知工業大学 機械工学科 (豊田市)
** 愛知工業大学大学院 院生 (豊田市)
*** 愛知工業大学 総合技術研究所 (豊田市)
**** 東北大学 金属材料研究所 (仙台市)

2 試料及び実験方法

本研究に用いた試料は、高圧 He ガスアトマイズ法で作製した急速凝固粉末の押し出し成形材で、成分比及び押し出し温度を変えた 5 種類の Al-Ni-Y-Co 系合金、成分比を変えた 2 種類の Al-Si-Ni-Ce 系合金、及び添加した遷移金属元素(TM)を変えた希土類を含まない 4 種類の Al-Ti-Fe-TM 系合金(TM: Cr, Mo, V, Zr)である(表 1)。

表 1 本研究に用いた急速凝固 P/M アルミニウム合金

Specimen No.	Composition	Extrusion Temperature Te
Al-Ni-Y-Co alloys		
1	Al ₈₅ (Ni _{0.33} Y _{0.54} Co _{0.13}) ₁₅	773K
2	Al ₈₇ (Ni _{0.33} Y _{0.54} Co _{0.13}) ₁₃	673K
3	Al ₈₇ (Ni _{0.33} Y _{0.54} Co _{0.13}) ₁₃	723K
4	Al ₈₇ (Ni _{0.33} Y _{0.54} Co _{0.13}) ₁₃	773K
5	Al ₈₉ (Ni _{0.33} Y _{0.54} Co _{0.13}) ₁₁	773K
Al-Si-Ni-Ce Alloys		
6	Al ₇₆ Si ₁₉ Ni ₄ Ce ₁	673K
7	Al _{78.5} Si ₁₉ Ni ₂ Ce _{0.5}	723K
Al-Ti-Fe-TM Alloys		
8	Al ₉₂ Ti _{3.5} Fe _{3.5} Cr ₁	673K
9	Al ₉₂ Ti _{3.5} Fe _{3.5} Mo ₁	723K
10	Al ₉₂ Ti _{3.5} Fe _{3.5} V ₁	673K
11	Al ₉₂ Ti _{3.5} Fe _{3.5} Zr ₁	723K

摩耗試験は、自作の Sawin 式摩耗試験機にて乾式で行い、相手材とし、硬度 900Hv の高炭素クロム軸受け鋼(SUJ 2)製の摩擦ディスクを用いた(図 1)。本実験では摩耗量の荷重、摩擦距離、摩擦速度の依存性を調べた。それらの実験条件は、摩耗量の荷重依存性では摩擦速度 0.5m/s、摩擦距離 50m と一定にして、荷重を 1.0~4.0kg の範囲で変化させて行い、距離依存性は、摩擦速度 0.5m/s、荷重 2.0kg にて摩擦距離を 25~1000m の範囲で変化させて行った。また、速度依存性については、荷重 2.0kg、摩擦距離 50m にて、摩擦速度を 0.08~1.50m/s に変化させて行った。

さらに、既存の高強度アルミニウム合金についても同様な実験を行い、上記実験で得られた摩耗特性の結果と比較した。

摩耗の機構を調べる目的で、摩耗試験により生じた摩耗痕について、摩擦距離増大に伴う表面形状及び組成の変化をそれぞれ SEM 及び EPMA で分析し、摩耗前後の表面層及び内部の硬度を超微小硬度計で測定した。また、摩耗粉については、形状を光

学顕微鏡で、組織を TEM で観察し、組成は EDS で調べた。

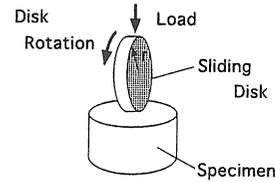


図 1 Sawin 式摩耗試験の概略図

3 実験結果及び考察

表 1 に示した 5 種類の Al-Ni-Y-Co 系合金(試料 No.1~5)について摩耗試験を行い、摩耗量の荷重依存性、摩擦速度依存性、摩擦距離依存性を調べた結果、摩耗量の荷重依存性と速度依存性については、各試料間に大きな差は見られなかった。

しかし、図 2 に示すように、摩耗量の摩擦距離依存性の実験結果には、試料間に顕著な差が現れた。全ての試料は摩擦距離の増大に伴い摩耗量は増加したが、摩擦距離 200m 以上における摩耗量の増加の割合には、試料間に大きな差が生じた。その中で、Al₈₉(Ni_{0.33}Y_{0.54}Co_{0.13})₁₁ 合金(試料 No.5)は耐摩耗性が最も高く、摩擦距離 500m と 1000m では摩耗量がほとんど変化しなかった。

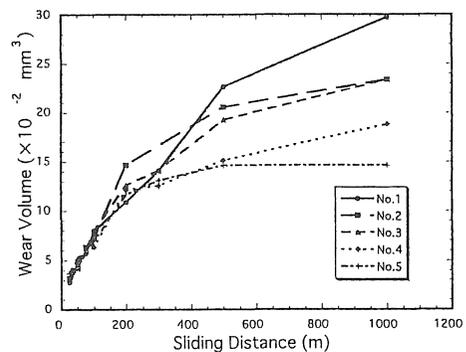
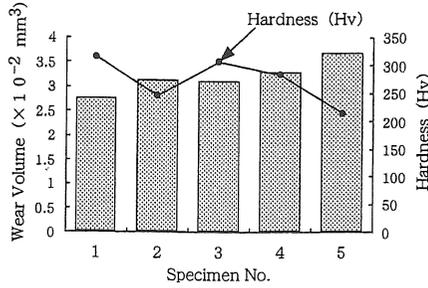
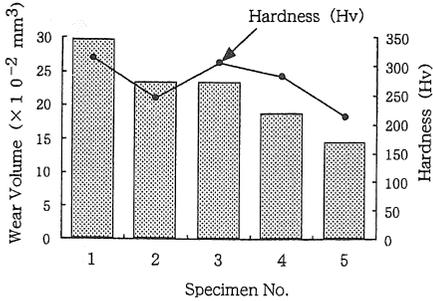


図 2 Al-Ni-Y-Co 系合金の摩耗量の摩擦距離依存性

一般に、材料の耐摩耗性は硬度と相関があると言われていたため、上記 5 種類の Al-Ni-Y-Co 系合金について摩耗試験前の硬度を測定し、摩擦距離 25m と 1000m における摩耗量との関係を示したものが図 3 である。摩擦距離 25m では硬度の高い試料の方が摩耗量が少なく、耐摩耗性が良くなっているが、1000m になると、その関係はくずれている。この



(a) Sliding Distance 25 m



(b) Sliding Distance 1000 m

図3 Al-Ni-Y-Co系合金の摩耗量と硬度の関係

結果から、これらの合金の耐摩耗性には、硬度以外の要因が関与していることが考えられる。

表1に示した2種類のAl-Si-Ni-Ce系合金(試料No.6及びNo.7)と、4種類のAl-Ti-Fe-TM系合金(試料No.8~11)について、摩耗量の摩擦距離依存性を調べた実験結果がそれぞれ図4及び図5である。2種類のAl-Si-Ni-Ce系合金では、Al78.5Si19Ni2Ce0.5組成(試料No.7)の方が耐摩耗性が若干良かったが、ともに摩擦距離の増大に伴い摩耗量が単調に増加した(図4)。Al-Ti-Fe-TM系合金では、添加元素(TM)がMoやZrの場合は、摩擦距離の増大に伴い摩耗量が単調に増大した。それに対して、TMがVやCrの場合には、Al-Ni-Y-Co系合金と同様、摩擦距離が増大すると摩耗量の増加の割合が小さくなる傾向がみられた。特に、Al92Ti3.5Fe3.5Cr1合金(試料No.8)は本研究のAl-Ti-Fe-TM系合金の中では最も高い耐摩耗性を示した。

図6は、これまでに述べたAl-Ni-Y-Co系、Al-Si-Ni-Ce系、Al-Ti-Fe-TM系のそれぞれの合金の中で耐摩耗性の最も優れていた合金(試料No.5, No.7及びNo.8)と、同様の方法で測定した既存の代表的な高強度アルミニウム合金(A4032, PA420及びA7075)の耐摩耗性(摩耗量の摩擦距離依存性)

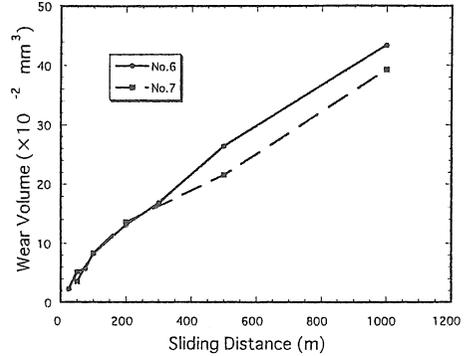


図4 Al-Si-Ni-Ce系合金の摩耗量の摩擦距離依存性

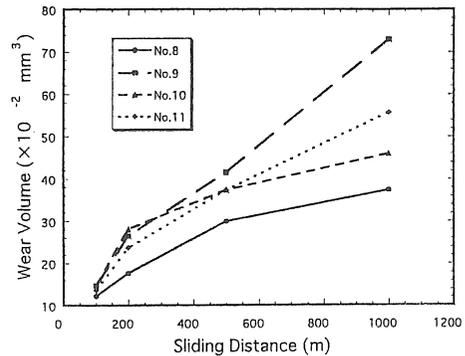


図5 Al-Ti-Fe-TM系合金の摩耗量の摩擦距離依存性

を比較したものである。本研究の急速凝固P/Mアルミニウム合金は全て、既存のAl合金よりも耐摩耗性が高くなった。そして、本研究の急速凝固P/Mアルミニウム合金の中でも、Al-Ni-Y-Co系のAl89(Ni0.33Y0.54Co0.13)11合金(試料No.5)が最も優れた耐摩耗性を示した。

図2, 図4, 図5及び図6等の実験結果から、本研究の急速凝固P/Mアルミニウム合金の中でも耐摩耗性の最も良かったAl-Ni-Y-Co系合金のように、摩擦距離200m以上で摩耗量の増加が抑えられるタイプと、Al-Si-Ni-Ce系合金のように摩擦距離の増大に伴い摩耗量が単調に増加するタイプとがあることが分かる。そこで、前者としてAl89(Ni0.33Y0.54Co0.13)11合金(試料No.5)、後者としてAl78.5Si19Ni2Ce0.5合金(試料No.7)を選び、摩耗に伴う組織変化の相違を調べることで、それぞれの摩耗機構を推測することを試みた。

図7(a)及び(b)は、それぞれAl89(Ni0.33Y0.54Co0.13)11合金(試料No.5)及び

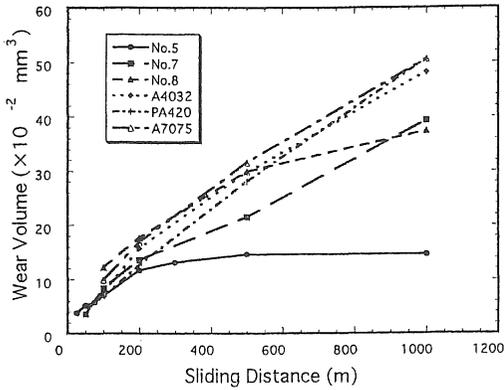


図6 急速凝固 P/M アルミニウム合金(No.5, No.7, No.8)と既存のアルミニウム合金(A4032, PA420, A7075)の摩耗量の摩擦距離依存性の比較

Al78.5Si19Ni2Ce0.5 合金(試料 No.7)の摩擦距離 100m で生じた摩耗痕の SEM 写真であり、図 8(a) 及び(b)はこれら2つの合金の 100m 及び 500m の摩擦距離で生じた摩耗痕の組成変化を EPMA で分析した結果である。図 7(a)及び(b)のどちらの摩耗痕にも、摩擦方向に平行な多数の直線状の摩耗傷が観察されることから、ここでは、摩擦により発生した摩耗粉が原因で生じるアブレシブ摩耗が起きているものと思われる。図 8 の EPMA による分析結果では、耐摩耗性の良かった試料 No.5 は摩擦距離 100m で Al 量が減少して O 量及び Fe 量が増加した後、500m まで大きな変化がないことから、摩耗の初期段階で表面に強固な酸化被膜が形成されたものと考えられる。尚、ここで検出された Fe は摩耗試験時の相手材である SUJ 2(高炭素 Cr 軸受け鋼)製のディスクが摩耗して混入したものである。それに対して、試料 No.7 は摩擦距離 100m までは O 量及び Fe 量は少し増加するものの、Al 量及び Si 量はほとんど変化せず、摩擦距離 500m になって Al 量及び Si 量が減少し、O 量の著しい増加が見られることから、試料 No.5 に比べて酸化被膜の形成が遅いものと思われる。そして、形成される酸化被膜は、主にアルミナ(Al₂O₃)から成ると考えられる。

摩耗痕表面の酸化被膜の形成について調査するために、Al89(Ni0.33Y0.54Co0.13)11 合金(試料 No.5)及び Al78.5Si19Ni2Ce0.5 合金(試料 No.7)の摩擦距離 500m における摩耗痕断面を SEM で観察し、ピッカース硬度を測定した結果を、それぞれ図 9(a)

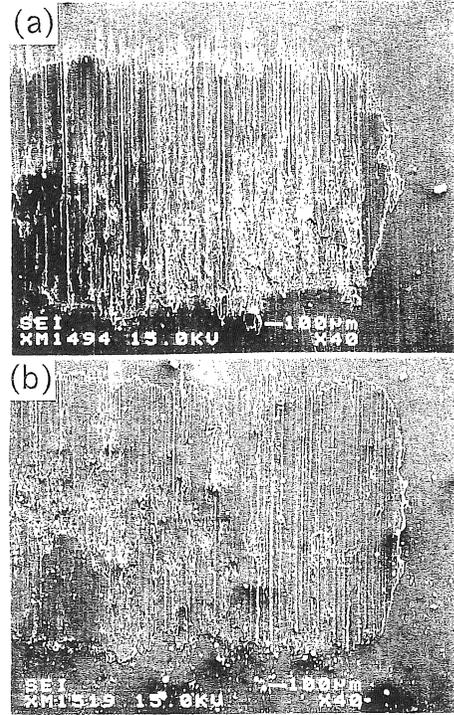


図7 摩耗痕の SEM 観察結果
(a) Al89(Ni0.33Y0.54Co0.13)11 合金(試料 No.5)
(b) Al78.5Si19Ni2Ce0.5 合金(試料 No.7)

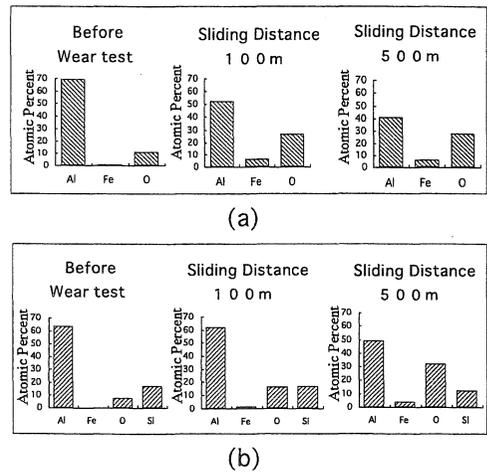


図8 種々の摩擦距離で形成された摩耗痕表面の EPMA 分析結果
(a) Al89(Ni0.33Y0.54Co0.13)11 合金(試料 No.5)
(b) Al78.5Si19Ni2Ce0.5 合金(試料 No.7)

及び(b)に示す。試料 No.5(図 9(a))には、Al₂O₃ と思われる高硬度な表面層が形成されているのに対して、試料 No.7(図 9(b))では、摩耗粉が表面に混入しているのが観察され、アブレシブ摩耗が進行中であることが分かる。

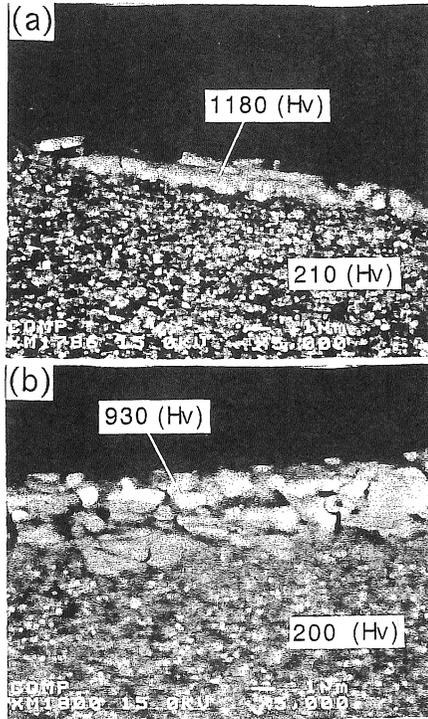


図9 摩耗痕断面のSEM像及び硬度
 (a) Al₈₉(Ni_{0.33}Y_{0.54}Co_{0.13})₁₁合金 (試料 No.5)
 (b) Al_{78.5}Si₁₉Ni₂Ce_{0.5}合金 (試料 No.7)

以上のことから耐摩耗性の良い Al-Ni-Y-Co 系合金は摩耗の初期段階に Al₂O₃ と思われる強固な酸化被膜が形成されるため、図 2 のように、摩耗量の増加が抑えられるものと考えられる。それに対して、Al-Si-Ni-Ce 系合金は、酸化被膜の形成が Al-Ni-Y-Co 系合金ほど進行しないために、内部に摩耗粉が侵入してアブレシブ摩耗が進み、摩耗量がほぼ単調に増加するものと考えられる。

次に、アブレシブ摩耗を引き起こす摩耗粉について調べた。図 10 は Al₈₉(Ni_{0.33}Y_{0.54}Co_{0.13})₁₁合金(試料 No.5)と Al_{78.5}Si₁₉Ni₂Ce_{0.5}合金(試料 No.7)の摩擦距離 100m及び 500mで生じた摩耗粉の光学顕微鏡写真である。摩擦距離 100mで生じた摩耗粉には両者に大きな差は認められないが、摩擦距離 500mになると試料 No.5 の摩耗粉は褐色に変化し、微粒化した。微粒化した原因は、摩擦により強固な酸化被膜が形成された試料表面と摩擦ディスクの間で摩耗粉が粉碎されたためと考えられる。褐色に変色した原因は、摩擦ディスクが摩耗し、その主成分である Fe が摩耗粉に混入して酸化したためであると考えられる。

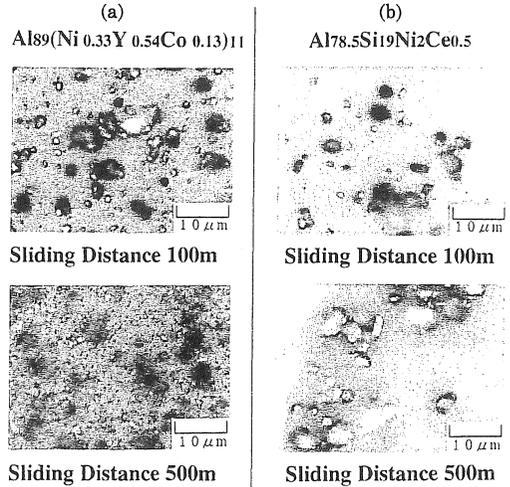


図10 摩耗粉の光学顕微鏡写真
 (a) Al₈₉(Ni_{0.33}Y_{0.54}Co_{0.13})₁₁合金 (試料 No.5)
 (b) Al_{78.5}Si₁₉Ni₂Ce_{0.5}合金 (試料 No.7)

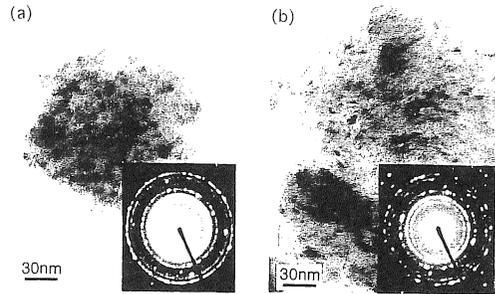


図11 摩耗粉のTEM写真
 (a) Al₈₉(Ni_{0.33}Y_{0.54}Co_{0.13})₁₁合金 (試料 No.5)
 (b) Al_{78.5}Si₁₉Ni₂Ce_{0.5}合金 (試料 No.7)

図 11 及び図 12 は、摩擦距離 500mで生じた試料 No.5 と No.7 の摩耗粉について、それぞれ TEM 観察及び EDS 分析を行った結果である。図 11(a),(b)より、摩耗粉は共に微結晶状態であることが分かる。図 12 の EDS による分析結果から、耐摩耗性の良い試料 No.5 の摩耗粉から、Fe 量が多く検出された。これは、摩擦により試料表面に強固な酸化被膜が形成されたために、摩擦ディスクの方が摩耗していることを意味している。尚、図 12 で検出されている Cu は、分析の際に使用したホルダーの成分である。

以上の結果から、今回の実験で耐摩耗性の最も良かった Al₈₉(Ni_{0.33}Y_{0.54}Co_{0.13})₁₁合金は、アブレシブ

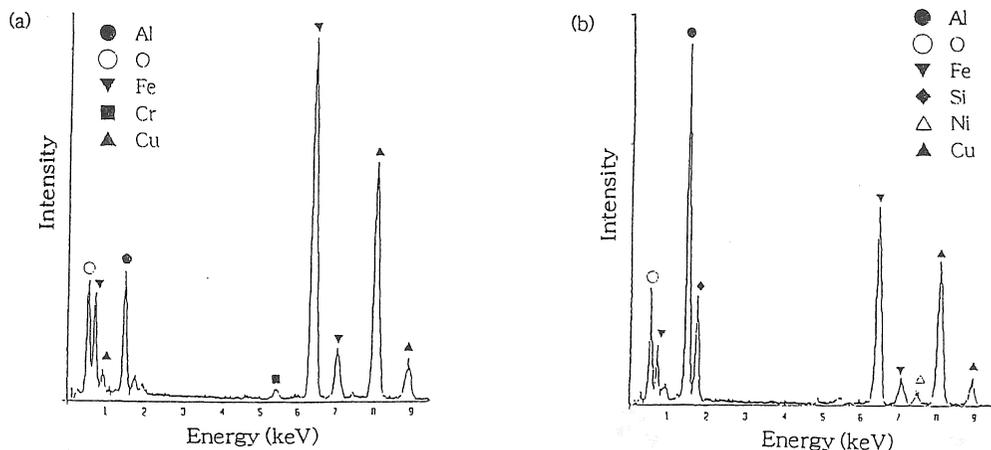


図 12 摩耗粉の EDS 分析結果

(a) Al₈₉(Ni_{0.33}Y_{0.54}Co_{0.13})₁₁ 合金 (試料 No.5)

(b) Al_{78.5}Si₁₉Ni₂Ce_{0.5} 合金 (試料 No.7)

ブ摩耗の初期段階に摩耗面に強固な酸化被膜が形成されるために、摩耗の進行が抑えられ、耐摩耗性が良好になるものと考えられる。その際、摩耗面と摩擦ディスクの間で摩耗粉は細かく粉砕されて微粒化するとともに、相手材の摩擦ディスクも摩耗するものと考えられる。それに対して、Al_{78.5}Si₁₉Ni₂Ce_{0.5}合金は、摩耗面に酸化被膜が形成される時期が遅く、酸化被膜も強固ではないために摩擦距離の増大とともにアプレシブ摩耗が進行するものと考えられる。

以上をまとめると、本研究の急速凝固 P/M アルミニウム合金は、既存の高強度アルミニウム合金に比べて耐摩耗性が優れていた。また、本研究の急速凝固 P/M アルミニウム合金の耐摩耗性は、摩擦により形成される酸化被膜の形成時期とその安定性に大きく左右されるものと考えられる。

4 結 言

高圧 He ガスアトマイズ法により作製した急速凝固粉末の押し出し成形材である種々の P/M アルミニウム合金について摩耗特性を研究した。得られた結果は以下の通りである。

- 1) 本研究に用いた高強度を有する急速凝固 P/M アルミニウム合金は、既存のアルミニウム合金と比較して良好な耐摩耗性を示した。
- 2) Al-Ni-Y-Co 系合金が特に高い耐摩耗性を有し、中でも Al₈₉(Ni_{0.33}Y_{0.54}Co_{0.13})₁₁ の組成の合金が最も耐摩耗性に優れていた。

- 3) 本研究の急速凝固 P/M アルミニウム合金の耐摩耗性は、摩擦に伴い形成される表面酸化被膜の形成時期とその安定性によって大きく左右されることが分かった。

文 献

- 1) A.Inoue, K.Ohtera, A.P.Tsai and T.Masumoto : Jpn. J. Appl. Phys., 27(1988) L479-L482.
- 2) Y.Kawamura, A.Inoue and T.Masumoto : Scripta Metall. Mater., 29 (1993)25-30.
- 3) Y.Kawamura, A.Inoue, K.Sasamori, A.Katoh and T.Masumoto : Mater. Trans., JIM, 34 (1993) 969-975.
- 4) 河村能人, 井上明久, 増本 健 : 粉体および粉末冶金, 41(1994)851-856.
- 5) Y.Kawamura, A.Inoue, K.Sasamori and T.Masumoto : Scripta Metall. Mater., 29 (1993)275-280.
- 6) Y.Kawamura, H.B.Liu, A.Inoue and T.Masumoto : Scripta Metall. Mater., 37 (1997)205-210.
- 7) T.Imura, K.Hasegawa, M.Moori, T.Nishiwaki, M.Takagi and Y.Kawamura : Materials Science and Engineering, A133(1991)332-336.

(受理 平成11年 3月20日)