

研究報告

Al-SiC 複合合金のスラリーエロージョン挙動

小松芳成**・後藤正治**・麻生節夫**・本山勝見***・池 浩之****・勝負澤善行*****

Slurry-Erosion Behavior of Aluminum-Silicon Carbide Composite Alloys

Yoshinari Komatsu **, Shoji Goto **, Setsuo Aso **, Katsumi Motoyama ***, Hiroyuki Ike ****
and Yoshiyuki Shobuzawa *****

Abstract

Composite materials have good mechanical properties such as high strength, high hardness and high wear resistance. They are widely used in the fields of automobiles, civil engineering and many other machine industries. Hopefully it will be used more wide engineering fields such as ship industry and slurry sucking up pumps, in which high resistance for slurry-erosion should be required. And also mechanical properties of the materials are known to depend on the microstructure. In this paper, relationships among microstructure, mechanical properties and slurry-erosion behavior are discussed on the specimens of pure Al, dispersion hardend Al alloys (Al-Si alloys), solution hardend alloys (Al-Mg alloy, Al-Cu alloy) and SiC particles inserted Al alloys for developing a material for slurry sucking up pump. Based on the experimental results, it was revealed that slurry-erosion resistance of the SiC particles inserted Al alloy shows about seven times higher than that of the dispersion hardend alloys and the solution hardend alloys. It was concluded that the SiC particles inserted Al alloys are a promising materials for the slurry sucking up pump.

1. はじめに

一般に複合材料は物理的および化学的性質の点で優れた特性を有するものが多く、自動車産業、建築産業、各種機械部品など広い分野において使用されている⁽¹⁾。特にアルミニウム合金を母材とする複合合金は軽量かつ高強度である点を注目して、各種の輸送機器や回転機器などに実用されている。

ところで船舶、農機具、水排出ポンプなどでは軽量、高強度のほかに耐摩耗性や耐食性にすぐれることが要求されている⁽²⁾。これらの特性は一般に材料の内部組織に大きく依存することが考えられる。高強度であっても耐摩耗性や耐食性に劣る場合もある⁽³⁾。

特に近年、水排出ポンプなどでは軽量、高強度で

かつ耐スラリーエロージョン性にすぐれた部材が要求されるようになってきている。したがって、これらの部材を開発するためには内部組織と強度や耐摩耗性などの機械的性質および耐食性などの化学的性質との関係を詳細に調べることが必要とされている⁽⁴⁾。

そこで本研究では、軽量かつ高強度耐摩耗性の水排出ポンプ吸い込み口部材を開発するために、種々の体積率の SiC 粉末を含有するアルミニウム基複合材料を作製し、種々の条件でスラリーエロージョン試験を行い、スラリーエロージョン性評価の方法を確立すると共に、耐スラリーエロージョン摩耗に優れるアルミニウム基複合材料を開発することを目標とした。

2. 研究方法

2.1 研究目的

本研究においては、①アルミニウム合金における耐スラリーエロージョン性の評価方法の確立、② SiC 粉末を含むアルミニウム基複合材料における耐スラリーエロージョン性の評価、および最適 SiC 粉末含有量の検討、③通常アルミニウム合金と含

2006年7月21日受理

**秋田大学工学資源学部材料工学科, Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University.

***横河電子機器(株), Yokogawa Denshikiki Co., Ltd.

****岩手県工業技術センター, Iwate Industrial Research Institute.

***** (財)いわて産業振興センター, Iwate Industry Promotion Center.

SiC 粉末アルミニウム基複合材料の耐スラリーエロージョン摩耗特性の比較検討, および耐スラリーエロージョン性向上のための検討, ④含 SiC 粉末アルミニウム基複合材料の鑄ぐるみ部材の作製とその応用性および実用化への検討を目的に実験を行なった。

2.2 研究計画

上述の目標を達成するために以下の計画によって研究を実施した。

2.2.1 耐スラリーエロージョン複合材料の製造

種々の SiC 粉末量を含有するアルミニウム合金溶湯の湯流れ性試験を行ない, SiC 粉末を含有するアルミニウム複合材料の作製を行う。

2.2.2 耐スラリーエロージョン試験用試験片の作製と組織評価

作製した複合材料に関して組織観察, 素材の均質性と完全度の検討を行ない, スラリーエロージョン試験に最適な試験片の作製を行うとともに, その方法を確立する。

2.2.3 スラリーエロージョン摩耗試験および評価方法の確立

得られた種々のスラリーエロージョン試験片に関して, 秋田大学で作製したスラリーエロージョン試験機を用いて室温のもとで砂粒子濃度を 10~40vol%まで変化させたスラリー中においてスラリーエロージョン試験を行ない, スラリーエロージョン挙動についての知見を得る。さらにそれらのスラリーエロージョン挙動に関して, 通常アルミニウム合金のスラリーエロージョン摩耗挙動, 摩耗形態の比較検討を行うことにより, アルミニウム合金におけるスラリーエロージョン摩耗試験法の確立および SiC 粉末含有アルミニウム複合材料の耐スラリーエロージョン性の評価方法を確立する。

2.2.4 耐スラリーエロージョン複合材料の開発

以上の実験結果にもとづき, 水排出ポンプ使用環境における最適な耐スラリーエロージョン摩耗アルミニウム合金について検討する。

2.2.5 鑄ぐるみ用試験片の作製とその耐スラリーエロージョン試験の試み

本研究で得られた耐スラリーエロージョン摩耗アルミニウム合金チップを Al 合金で鑄ぐるみ, 鑄ぐるみ性の検討と評価を行う。一部の鑄ぐるみ材からスラリーエロージョン試験の試験片を切り出し, 組織の完全度の検討を行なう。これらの含 SiC 粉末複合材料鑄ぐるみアルミニウム合金試験片についてスラリーエロージョン試験を行ない耐スラリーエロージョン性について評価する。

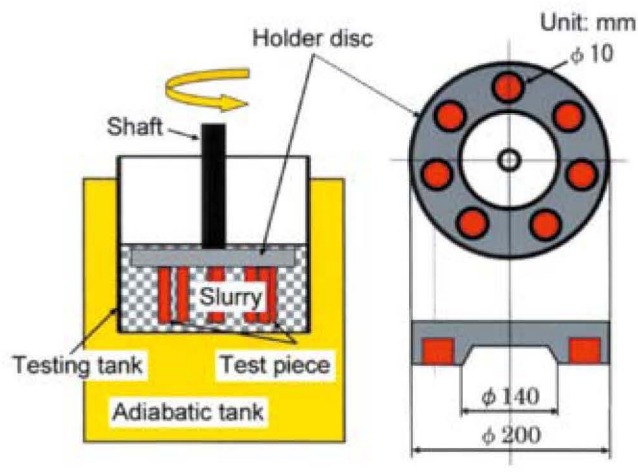


Fig. 1 Schematic diagram of slurry-erosion test apparatus.

2.2.6 水排出ポンプ吸い込み口部材開発の検討

含 SiC アルミニウム鑄ぐるみ部材を用いた軽量排水ポンプ用吸い込み口部材の開発について検討する。

3. 研究結果

3.1 アルミニウム合金における耐スラリーエロージョン性の評価方法の確立

材料のスラリーエロージョン挙動を支配する主な環境因子として, スラリー中の砂粒子濃度, スラリー温度, スラリー粒子衝突速度などが挙げられる^{(5),(6)}。これらの因子を制御して耐スラリーエロージョン性の評価を行なえるようにするために, Fig. 1 に示すような試験片回転型試験装置を考案した。すなわち, スラリーの入った試験タンクの中に試験片を浸漬させ, シャフトを回転させることにより, 試験片はスラリーと衝突してスラリーエロージョンの現象がおこるようにした。この際, 試験片ホルダーには一度に7本の試験片がセットできるようにし, 同一条件で7種類の試験片が同時に試験できるので, 相互のスラリーエロージョン挙動が直接比較検討できるようにした^{(7)~(10)}。なお本実験において, スラリーは固体粒子としてフラタリーサンド (粒径 100~200 μ m) を, 液体には水道水を使用した。その体積比 (水:砂) を 90:10, 85:15, 80:20, 75:25, 70:30, 65:35, 60:40 に変化させて, どのような排水ポンプ用吸い込み口部材の使用条件にも対応できるようにした。また, 試験結果の再現性や比較検討ができるように試験温度を 297K, 砂粒子衝突速度を 8.55m/s とそれぞれ一定とした。試験時間は全て 35 時間として, 7 時間ごとに試験片を計量し, その質量減少率からスラリーエロージョン性を評価した。

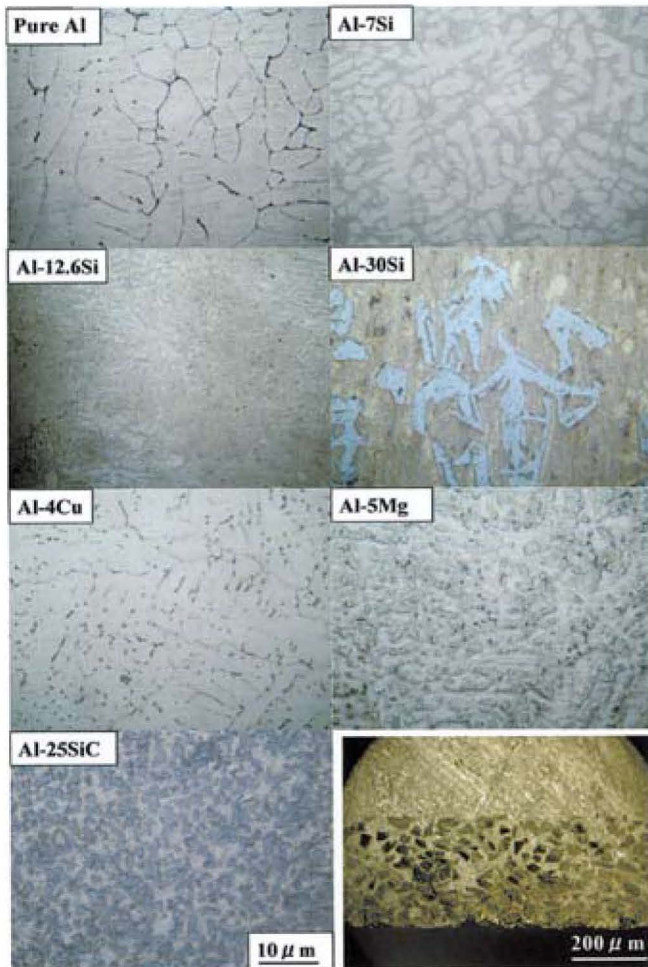


Fig. 2 Microstructures of the specimens used for the test.

3.2 試験片の作製と組織評価

本実験に用いた試験片の組織を Fig. 2 に示す。ここで純 Al は比較材として基準となる材料の組織である。純 Al であるので結晶粒界が示されているのみである。Al-Si 系は casting solidification で作製したもので、Al-7Si は α 相の初晶 Al と共晶の Al-Si 相からなり、Al-12.6Si は完全共晶で針状の共晶組織を示し、また Al-30Si は過共晶で Si 相の初晶と共晶の Al-Si 相からなっている。これらは粒子分散強化型の材料である。Al-4Cu と Al-5Mg は casting solidification により急冷されて Cu や Mg が Al 母相中に強制固溶された状態にあるので固溶体硬化型の材料として比較の対象とした。また、Al-25SiC は種々の SiC 粉末量を含有するアルミニウム合金の湯流れ性試験の結果得られた SiC 粉末 25vol% を含有するアルミニウム複合材料の組織である。SiC 粒子が均一に分散した組織になっていることがわかる。最後の試料は、SiC-50vol%Ni の粉末の上に AC4C 合金を乗せて黒鉛型にセットし 800°C で 30min 間真空中で加熱して SiC 粒子を Al 合金で

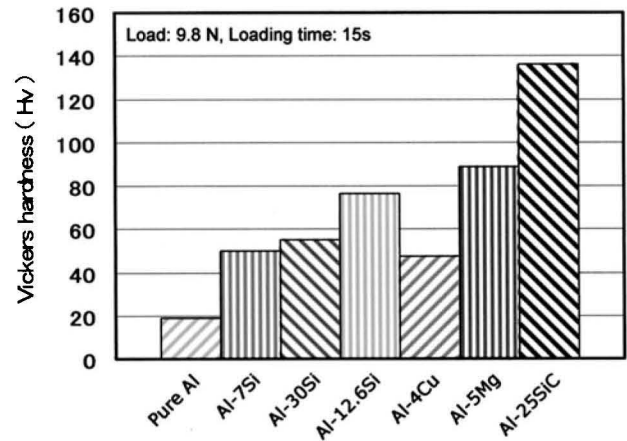


Fig. 3 Vickers hardness of the specimens.

铸ぐるんだものの組織である。完全な組織を有する铸ぐるみ層が形成されているのがわかる。なお、このような手法で細粒(粒径 $41 \mu\text{m}$)SiC50+Ni50, 粗粒(粒径 $543 \mu\text{m}$)SiC25+Ni75, 粗粒(粒径 $543 \mu\text{m}$)SiC75+Ni25 および粗粒(粒径 $543 \mu\text{m}$)SiC50+Ni50 の試験片を作製した。

3.3 試験片の機械的性質の評価

Fig. 3 は各試験片のビッカース硬さ試験の結果を示したものである。純 Al が最も軟らかく、Al-12.6Si, Al-5Mg の順に硬くなり Al-25SiC が最も硬いことがわかる。Al-30Si は過共晶組織で硬い Si 粒子が大量に含まれているにもかかわらず、共晶の Al-12.6Si よりも硬さが低いことが注目される。これらの試験片に対して圧縮試験を行なった結果を Fig. 4 に示す。基準として用いた純 Al は応力レベルが低く、かつ延性が非常に大きいのに対し、共晶の Al-12.6Si は

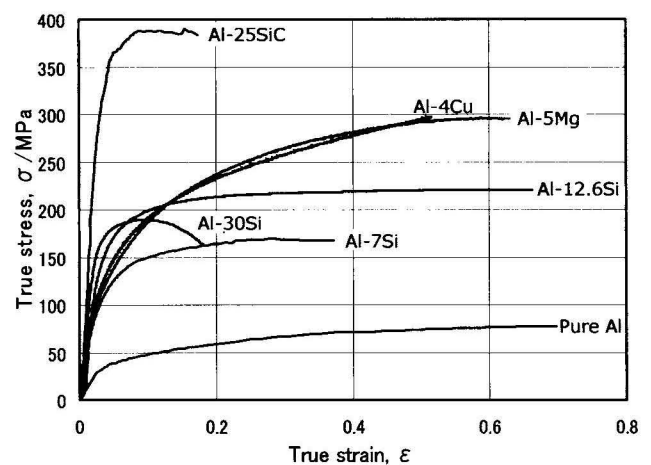


Fig. 4 True stress-true strain curves of the specimens compressed under a strain rate of $2.5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ at room temperature.

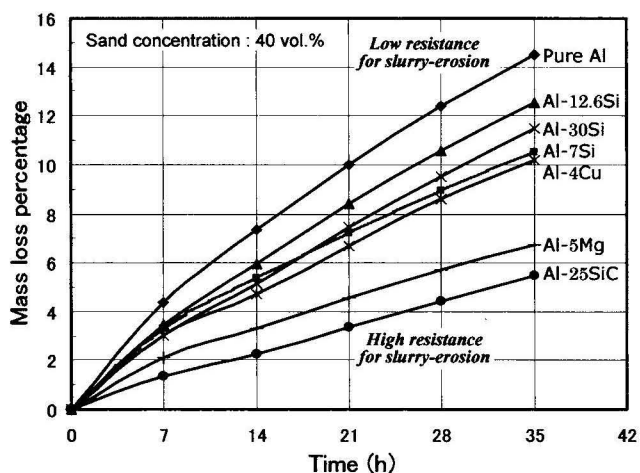


Fig. 5 Slurry-erosion behavior of the specimens in a slurry containing 40 vol.% sand.

200MPa もの高い応力レベルを示し、過共晶 Al-30Si や亜共晶 Al-7Si より応力レベルが高く、かつ延性があるのが注目される。また固溶体硬化型の Al-4Cu と Al-5Mg は応力レベル、延性とも優れている。Al-25SiC 複合材料は約 380MPa もの高い応力レベルを示し、他の試験片に比較すると延性が少ないものの高靱性が期待される。

3.4 各試験片のスラリーエロージョン挙動

Fig. 5 は一例として砂粒子濃度 40vol%における各試料のスラリーエロージョン挙動を示したものである。純 Al は時間の経過とともに質量減少率が格段に増加しており、耐摩耗性が最も悪いことがわかる。これに対して粒子分散型の Al-Si 系、固溶体強化型の Al-4Cu と Al-5Mg の順に質量減少率が少なくなり Al-25SiC 複合材料は最も良い耐摩耗性を示している。純 Al の約 3 倍の耐スラリーエロージョン性を示すこ

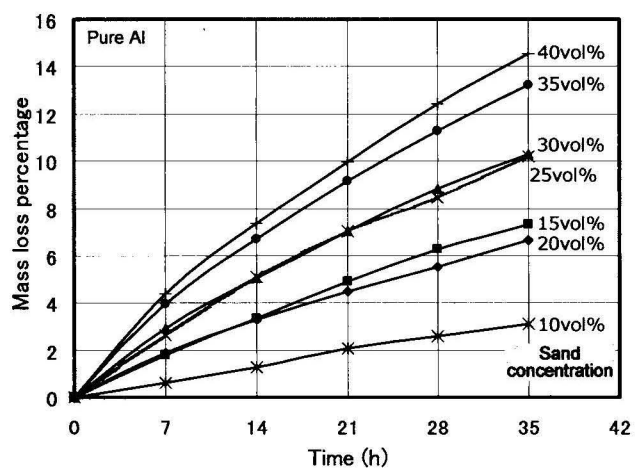


Fig. 6 Sand concentration dependence on slurry-erosion behavior of the Pure Al specimen.

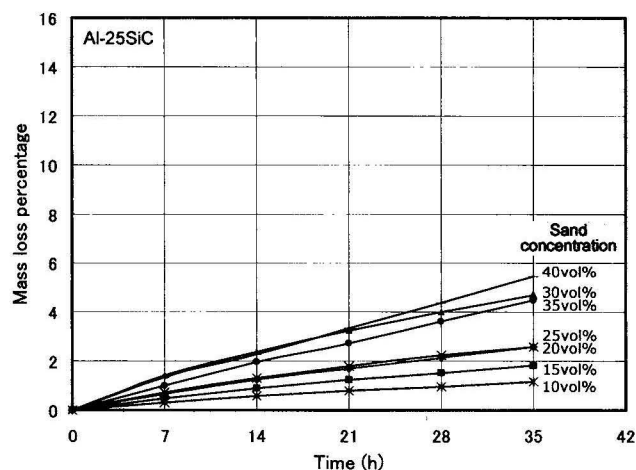


Fig. 7 Sand concentration dependence on slurry-erosion behavior of the Al-25 SiC specimen.

とがわかる。次に基準としている純 Al において、スラリー中の砂粒子濃度を 10vol% から 40vol% まで変化した場合のスラリーエロージョン挙動を Fig. 6 に示す。いずれの砂粒子濃度の場合においても、質量減少率は時間とともに放物線的な増加を示し、かつその傾向は砂粒子濃度の多いものほど顕著である。砂粒子濃度が高い過酷な環境では著しい摩耗を生ずることが推察される。これに対して Fig. 7 は最も優れた耐スラリーエロージョン性を示した Al-25SiC 複合材料において、スラリー中の砂粒子濃度を 10vol% から 40vol% まで変化した場合のスラリーエロージョン挙動を示したものである。いずれの時間においてもスラリー中の砂粒子濃度が増加するほど質量減少率が上昇し、その傾向は純 Al の場合と類似しているが、質量減少率は純 Al の場合と比べると

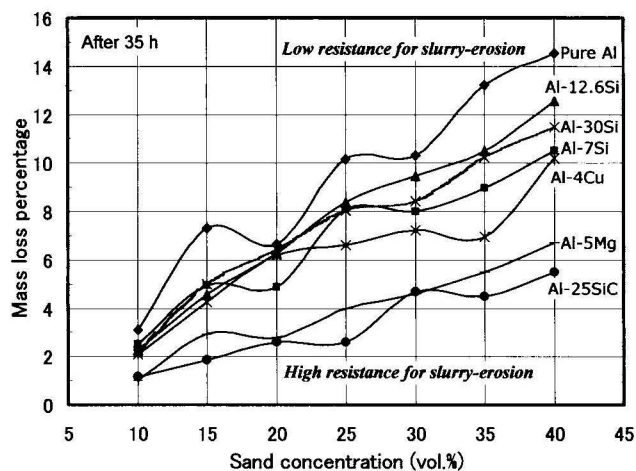


Fig. 8 Relationship between mass loss percentage and sand concentration in the specimens after 35 h slurry-erosion test.

圧倒的に少なく、この材料が如何なるスラリー環境でも耐摩耗性を発揮することがわかる。すなわち、Al中にSiC粒子を分散させることは耐スラリーエロージョン性向上にきわめて有効である。Fig. 8は各試料における35時間後の質量減少率に対するスラリー中の砂粒子濃度との関係を示したものである。いずれの場合においても純Alが最も耐スラリーエロージョン性が悪く、Al-Si系粒子分散型合金、Al-4CuとAl-5Mgの固溶体硬合金の順に耐摩耗性が良くなっている。最も耐摩耗性に優れるのはAl-25SiC粒子分散複合材料である。ここで注目されることは、各試料の曲線が単純な増加曲線ではなく、砂粒子濃度に対して波打つような形を示すことである。また波の形が試験片の違いによって異なっている。このことはスラリーエロージョン環境が摩耗挙動に強く影響を及ぼしていることを示すものである。

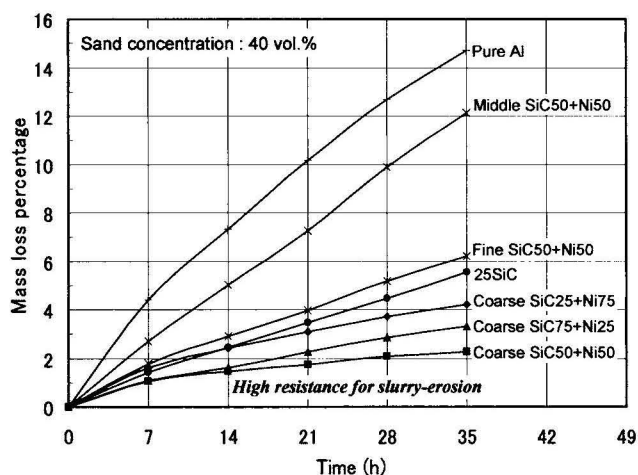


Fig. 9 Slurry-erosion behavior of the SiC particles inserted specimens.

3.5 SiC粒子鑄ぐるみ試験片のスラリーエロージョン挙動

Fig. 9はSiC粒子鑄ぐるみ試験片の砂粒子濃度40vol%の場合におけるスラリーエロージョン挙動を示したものである。比較のために純AlとAl-25SiC複合材料の実験結果も一緒に示した。図から明らかなようにSiC粒子鑄ぐるみ試験片では、きわめて優れた耐スラリーエロージョン性を示す。特に粗粒SiC50+Ni50の試料ではAl-25SiC複合材料の約2.5倍、純Alの約7倍もの耐摩耗性を示すことがわかる。粗粒SiCの方が細粒SiCや中粒SiCの場合よりも良いようである。さらに粗粒SiCの中でも粗粒SiC50の方が粗粒SiC75よりも良い。これは粗粒SiC50の方が組織の緻密なものが得られ、組織の均一性と完

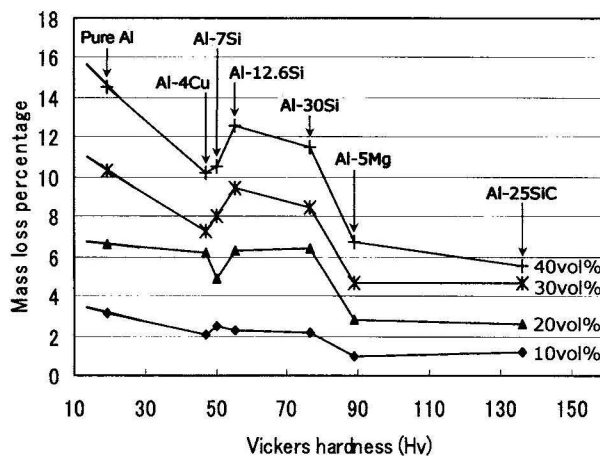


Fig. 10 Relationship between mass loss percentage and Vickers hardness in the specimens.

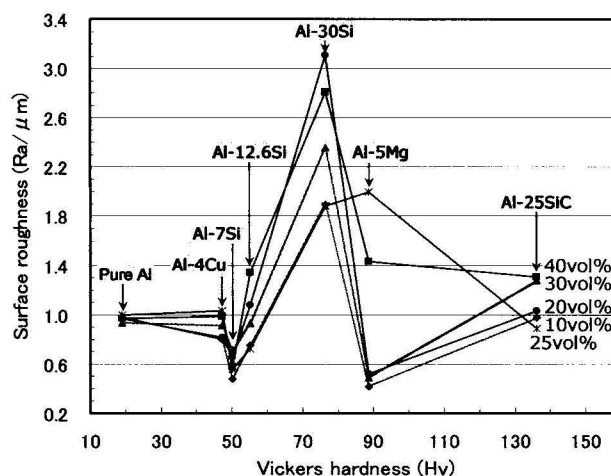


Fig. 11 Relationship between surface roughness and Vickers hardness in the specimens after slurry-erosion test.

全度の高い結果であろうと思われる。すなわち、粗粒SiCを如何に完全に鑄ぐるむかという点が今後の問題として挙げられる。

3.6 アルミニウム合金におけるスラリーエロージョン機構の解析

Fig. 10は各試料の35時間後の質量減少率とビッカース硬さとの関係を示したものである。一般的傾向として、ビッカース硬さが高いものほど質量減少率は少なく耐スラリーエロージョン性が良いようである。しかしAl-Si系では、いずれの砂粒子濃度の環境においても異常に高い質量減少率を示している。これはSi粒子自体が脆性で破壊しやすく、砂粒子の衝突によって容易に脱落してしまった結果であろうと思われる。それを推察させる結果をFig. 11に挙げ

る。Fig. 11 はスラリーエロージョン面の表面粗さ Ra を測定した結果であるが、ほとんどの試験片は Ra 値が $1\mu\text{m}$ 前後の値を示しているのに対し Al-Si 系では $1.5\sim 3\mu\text{m}$ の値を示している。すなわち Si 粒子は砂粒子の衝突によって破壊されやすく、大きく深い摩耗痕を残すことになる。通常 Al-Si 系合金は湯流れ性が良いために、 casting 用合金として用いられているが、耐スラリーエロージョン性の必要とする部材には適用できないことが知られる。

4. まとめ

種々のアルミニウム合金についてスラリーエロージョン試験を行なった結果以下の結論が得られた。

1. スラリーエロージョン試験によって得られた質量減少率の値は、各材料の特性や種々の試験条件が的確に反映されたものであった。したがって、アルミニウム合金における耐スラリーエロージョン性の評価方法として、本実験で用いた回転型サンドエロージョン試験機は適当である。
2. 通常アルミニウム合金と含 SiC 粉末アルミニウム基複合材料の耐スラリーエロージョン摩耗特性を比較検討した結果、含 SiC 粉末アルミニウム基複合材料は純 Al や Al-Si 系合金にくらべて約 3 倍も耐スラリーエロージョン性が高い。通常用いられる Al-Si 系は特に耐スラリーエロージョン性が劣る。
3. 含粗粒 SiC 鑄ぐるみ材の耐スラリーエロージョン性は、純 Al や Al-Si 系合金にくらべて約 7 倍も高い。但し、鑄ぐるみ組織が均一で完全なものほど良く、本実験では粗粒 SiC50+Ni50 鑄ぐるみ材が最も良かった。

謝 辞

本研究を進めるにあたり試験片の機械加工をして頂いた材料工学科、三浦敏秋技術専門員に心より感謝申し上げます。

文 献

- (1) Hirofumi Miyahara, Zou Xinguo, Takashi Moriguchi and Keisaku Ogi (2003) : Influence of the Matrix Microstructure on the Wear Resistance of Alumina Continuous Fiber Reinforced Aluminum Alloy Composites, Materials Transactions, Vol. 44, No. 2, pp.247-252.
- (2) 腐食防食協会編 (1987) : エロージョンとコロージョン, 裳華房, 131.
- (3) 腐食防食協会編 (1987) : エロージョンとコロージョン, 裳華房, 186.
- (4) 小松芳成, 後藤正治, 麻生節夫 (2004) : Al-Si 二元系鑄造合金のスラリー・エロージョン挙動, 日本素材物性学会誌, 17, 13-19.
- (5) 麻生節夫, 菅原勉, 田上道弘, 後藤正治 (1993) : 高クロム白鑄鉄のサンド・エロージョン速度の温度依存性, 日本金属学会誌, 57, 96-102.
- (6) 麻生節夫, 菅原勉, 田上道弘, 後藤正治 (1993) : 高クロム白鑄鉄のサンド・エロージョン速度のスラリー速度依存性, 日本金属学会誌, 57, 312-319.
- (7) 小松芳成, 鎌田久雄, 伊藤信雄, 三浦敏秋, マスカルド ガスパル リト, 後藤正治, 麻生節夫 (1996) : 改良型サンド・エロージョン試験機の試作, 秋大地研報告, 61, 63-72.
- (8) 小松芳成 (1996) : 改良型サンド・エロージョン試験機による 2, 3 の実験, 秋大鉱山学部技術発表会報告集, 4, 17-20.
- (9) 小松芳成 (1995) : 改良型サンド・エロージョン試験機の試作, 秋大鉱山学部技術発表会報告集, 3, 25-28.
- (10) 小松芳成, 伊藤信雄, 三浦敏秋, 後藤正治, 麻生節夫 (2000) : 改良型試験機による Al-Si 鑄造合金のスラリー・エロージョン挙動, 秋大工学資源学部研究報告, 21, 27-34.