

SiC 粒子強化 Al 基複合材料の摩耗特性に及ぼす 粒子径と体積含有率の影響*

宮島 敏郎*¹, 本田 知己*², 岩井 善郎*²

Effect of Particle Diameter and Volume Fraction on Wear Behaviour of SiC-Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites

Toshiro MIYAJIMA, Tomomi HONDA and Yoshiro IWAI*³

*³ Department of Mechanical Engineering, University of Fukui,
3-9-1 Bunkyo, Fukui-shi, Fukui, 910-8507 Japan

The wear behavior of SiC-particle reinforced aluminum matrix composites (MMC_p) was investigated by pin-on-disk tests under atmospheric conditions. The matrix material was 2024 aluminum alloy. The SiC particles were between 2 and 10 μm in diameter (d) with volume fractions (V_f) between 2 and 10%. The MMC_p of the disk were rubbed against the 0.45% carbon steel of the pin with a load of 10 N at a sliding velocity of 0.1 m/s. The steady-state wear rate of MMC_p decreased with increasing d and V_f . On the other hand, the wear rate of the steel counterface increased with increasing d and V_f . The wear rate was affected by two factors; one is the effect of reinforced particles against adhesive wear, and the other is the abrasive action of reinforcements. As a result, it was concluded that $d=5\mu\text{m}$, $V_f=5, 10\%$ provide the highest wear resistance for MMC_p in this study.

Key Words: Tribology, Wear, Friction, Composite Material, Aluminum, SiC-Particle

1. 結 言

Al 合金に各種セラミックスの粒子, 短繊維, ウィスカを含有して強化した Al 基複合材料は, 軽量かつ高剛性であるため, 自動車のエンジン部品やブレーキ部品などのしゅう動部に使用されている⁽¹⁾. 無潤滑下の Al 基複合材料の耐摩耗性に関する研究は国内外で多く行われている. その成果は, Al 基複合材料の摩耗形態と機構を接触荷重やすべり速度を変化させて調べた研究論文^{(2)~(9)}や, 解説^{(10)~(12)}として報告されている. 結果を概説すると, 一般に Al 基複合材料は Al 合金より耐摩耗性が向上し, その要因は, 強化材が接触荷重を支持する効果や, マトリックス材の変形を抑制する効果, さらに摩耗抑制作用をもつ表面層の形成に関与することにあるとされている^{(2)~(4), (8)~(14)}.

著者らも, 強化材の種類と体積含有率が異なる Al 基複合材料のすべり摩耗試験を無潤滑下で行い, 各強化材で耐摩耗性を向上させる最適な含有率が存在することを明らかにした^{(17)~(20)}. しかし, 強化材の大きさと含有率の複合効果については不明な点が多く, さらに研究が必要である.

本研究では, このような点の解明を目指して, ウィスカや短繊維で強化した Al 基複合材料に比べて耐摩耗性が良好であり, 強化材の大きさと含有率を制御しやすい SiC 粒子強化 Al 基複合材料 (以下, MMC_p) の摩耗特性について研究した⁽²⁰⁾. 本報では, 定常摩耗に及ぼす強化材の SiC 粒子の粒子径 (以下, d) と体積含有率 (以下, V_f) の影響を, 摩耗面の形態と接触二面間に存在する強化粒子の破砕片の大きさに注目して考察した結果を述べる.

2. 試験方法と供試材料

2.1 試験方法

2.1.1 摩耗試験 摩耗試験方法は既報⁽²⁰⁾と同じである. MMC_pとそのマトリックス材である 2024 Al 合金のディスク試験片に S45C 炭素鋼のピン試験片をすべり摩擦させるピン・オン・ディスク方式で行った. MMC_pは直径 30 mm, 厚さ 5 mm の円板で摩耗こんの平均直径は 23 mm である. ピン試験片は直径 4mm で, 試験面は平面である. 接触荷重は $P=10\text{ N}$, すべり速度は $v=0.10\text{ m/s}$ である. 摩耗試験は試験装置全体をアクリル製の密封容器で囲み, 相対湿度 $70\pm 1\%$ に制御した大気中無潤滑下で行った. 摩耗量は試験片を試験機から取り外し, アセトン中で超音波洗浄後, 質量減少量を精密天びん (感度 0.01 mg) で測定し, その値を既知の密度で除して体積減少量

* 原稿受付 2004年12月3日.

*¹ 正員, 新潟大学大学院自然科学研究科 (☎ 950-2181 新潟市五十嵐2の町8050).

*² 正員, 福井大学工学部 (☎ 910-8507 福井市文京3-9-1).
E-mail: iwai@mech.fukui-u.ac.jp

Table 1 Mechanical property of test materials

| Reinforcement | SiC-particle | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| Matrix material | 2024Al | | | | | | | | | | |
| Heat treatment | T6 | | | | | | | | | | |
| Manufacturing procedure | PM (Powder metallurgy) | | | | | | | | | | |
| Volume fraction of SiC-particles $V_f, \%$ | 0 | 2 | | | 5 | | | 10 | | | |
| Diameter of SiC-particles $d, \mu\text{m}$ | - | 2 | 5 | 10 | 2 | 5 | 10 | 2 | 5 | 10 | |
| Density, g/cm^3 | 2.80 | 2.81 | 2.81 | 2.81 | 2.82 | 2.82 | 2.83 | 2.81 | 2.83 | 2.84 | |
| Vickers hardness HV | 145 | 173 | 201 | 221 | 186 | 216 | 168 | 214 | 170 | 188 | |
| Brinell hardness HB | 106 | 112 | 114 | 110 | 113 | 118 | 108 | 119 | 110 | 115 | |

で表示した。摩擦力はピン試験片支持アームの板バネに貼り付けたひずみゲージを用いて測定した。

2・1・2 摩耗面の硬さ測定 摩耗面の硬さ測定は超微小押し込み硬さ試験機を用いて行った。圧子には Berkovich 型ダイヤモンド圧子 (稜間角 115° の三角すい) を用いた。試験荷重は $W=49 \text{ mN}$, 荷重負荷の分割数は 500 個, ステップインターバルは 20 msec , 保持時間は 1000 msec とした。本試験での硬さ H は最大押し込み深さ h_{max} を用いて, 式 (1) から求めた。

$$H=0.3717 \times W / h_{\text{max}}^2 \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

W : 最大押し込み荷重 [mN]

h_{max} : 最大押し込み深さ [μm]

測定は試験片ごとに 7 点測定し, 最大値と最小値を除く 5 点の平均値で示した。

2・2 供試材料 ディスク試験片には, MMC_p とそのマトリックス材の 2024 Al 合金を使用した。 MMC_p の詳細を表 1 に, 光学顕微鏡写真を図 1 に示す。 MMC_p は 2024 Al 合金 (化学成分 [mass %] Cu, 4.8 % ; Mg, 1.7 % ; Mn, 0.6 % ; Al, bal.) のマトリックス材に, 強化材として $d=2, 5, 10 \mu\text{m}$ の SiC 粒子を $V_f=2, 5, 10 \%$ 混合し粉末焼結 (PM) 法で製造された直径 30 mm の丸棒である。ディスク試験片は丸棒を厚さ 5 mm に輪切りにして製作し, 試験面を # 1200 エメリー紙で最終仕上げした。表面粗さは $Ra=0.09 \sim 0.15 \mu\text{m}$ であった。

相手材のピン試験片には S45C 炭素鋼 ($HV=320$) を用いた。端面の試験面 (平面) は, 試験開始時の当たりをよくするため, ディスク試験面に貼り付けた #1200 エメリー紙で約 50 m 摩擦研磨した。表面粗さは $Ra=0.1 \mu\text{m}$ であった。

3. 実験結果および考察

3・1 摩耗進行過程 図 2 にすべり距離に伴う摩擦係数の変化を, 図 3 に摩耗進行曲線を示す。 $V_f=2 \%$ の MMC_p では各 d とも試験開始直後, 金属光沢をした摩耗粉が発生し, 摩擦係数, 摩耗量ともに大

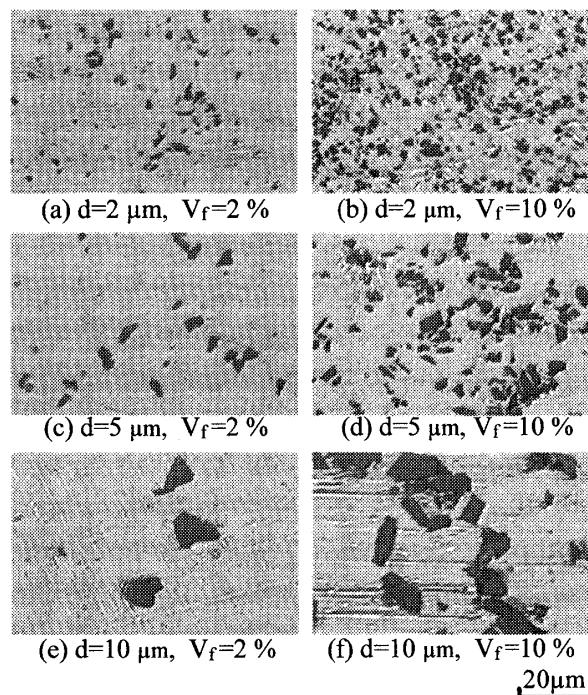


Fig.1 Optical photomicrographs of the surface of MMC_p specimens as received (unetched).

きい初期摩耗が生じた。その後, すべり距離に対し摩擦係数がほぼ一定となり, 摩耗量が直線的に増加する定常摩耗へと遷移した。しかし, 遷移する距離は, 既報のウイスカ⁽⁷⁾,⁽⁸⁾ や短繊維⁽⁹⁾ 強化 MMC とは異なり, 摩擦係数とピン試験片の垂直変位量の変化では明瞭に特定できなかった。図 3 の摩耗曲線の折れ曲がりの距離は概略値で示してある。一方, $V_f=5, 10 \%$ では各 d とも試験開始直後から定常摩耗となった。そこで本報では, MMC_p の定常摩耗域における強化粒子の影響を検討する。 MMC_p の定常摩耗率は 250 m 以降の摩耗曲線の傾きを最小自乗法によって求めた。また, 相手材 (ピン試験片) の S45C の摩耗率は, 摩耗量が非常に小さく, 摩耗量測定に伴い試験片の取り外しと取り付けを繰り返すことの影響を避けるために, 試験終了後にのみ取り外して試験開始後からの全質量減少量を密度とすべり距離で除した値とした。

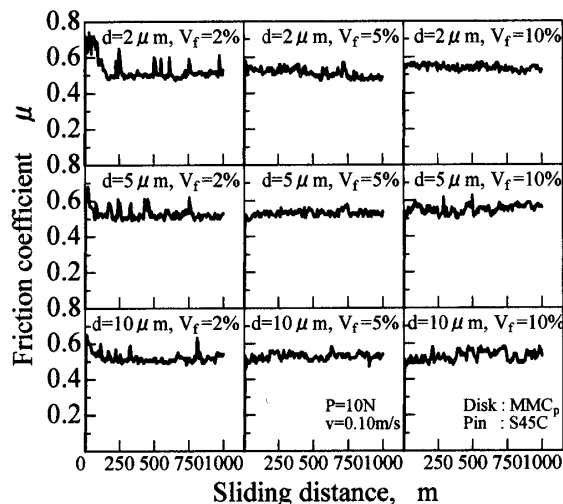


Fig.2 Variation in friction coefficient of MMC_p as a function of sliding distance.

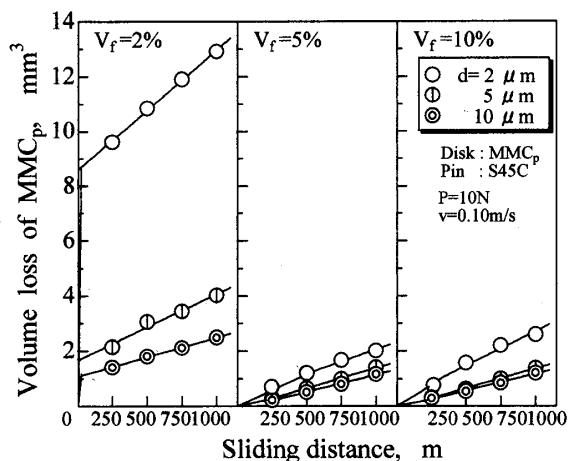


Fig.3 Wear curve of MMC_p (disk specimen) with various d and V_f .

3・2 定常摩耗率と粒子径 (d) および体積含有率 (V_f) の関係 図4に d と V_f に対する MMC_p の定常摩耗率の変化を示す。 d と V_f の増加に伴い定常摩耗率は減少するが、 d が $5\mu\text{m}$ 以上、 V_f が 5%以上になると、減少の程度が緩やかになる。

相手材の S45C の摩耗率の変化を図5に示す。 S45C の摩耗率は、 $V_f=5, 10\%$ の $d=10\mu\text{m}$ の MMC_p に対する場合は、 MMC_p の摩耗率の 1/100 程度の小さな値を示したが、それ以外の場合ではほとんど摩耗していなかった。

3・3 摩耗面の性状 試験終了後の各 MMC_p の摩耗面を光学顕微鏡で観察し、触針式粗さ計を用いてすべり方向に対し直角に断面形状を測定した。結果の一例を図6に示す。 MMC_p の摩耗面は d と V_f により著しく異なる。 $V_f=2\%$ では、大きな凹凸がある金属光沢部分と、すべり方向に一樣に細かい溝がある黒色部

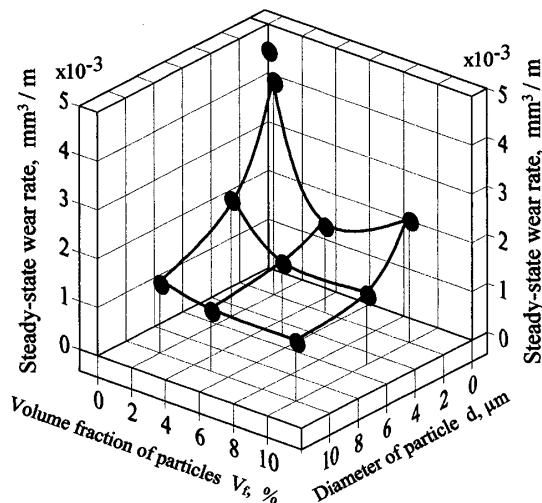


Fig.4 Wear rate of MMC_p (disk specimen) in steady-state wear regime as functions of d and V_f .

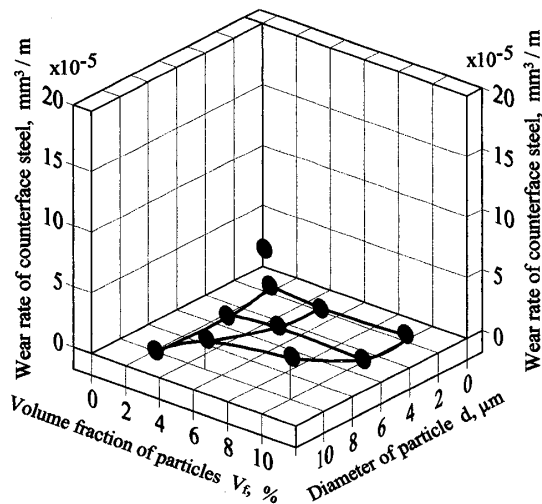


Fig.5 Wear rate of S45C (pin specimen) as functions of d and V_f of the MMC_p disk.

分が混在していたが、 d が大きくなるのに伴い、金属光沢部の割合は減少した。 $V_f=5\%$ では、 $d=2\mu\text{m}$ の摩耗面には金属光沢部が少し見られたが、 $d=5, 10\mu\text{m}$ にはほとんど観察されなかった。 $V_f=10\%$ では、各 d ともに金属光沢部はなくなり、細かい溝が形成された黒色の摩耗面であった。いずれの MMC_p でも、金属光沢部では凹凸部の山間隔は $70\sim 300\mu\text{m}$ 、深さは $5\sim 30\mu\text{m}$ であるのに対し、黒色部分では山間隔は $27\sim 36\mu\text{m}$ 、深さは $8\sim 17\mu\text{m}$ と小さくなった。

図7に S45C (ピン試験片) の摩耗面の光学顕微鏡写真の一例を示す。 $V_f=2\%$ ではいずれの d でも金属光沢部と黒色部が混在しているが、 $V_f=10\%$ の $d=5, 10\mu\text{m}$ では黒色で細かい溝が多数存在する面となった。

3・4 摩耗面の金属光沢部と黒色部の元素分析 エネルギー分散型 X線分析装置 (EDX) を用いて、各 d の $V_f=2\%$ の摩耗面の金属光沢部と黒色部、

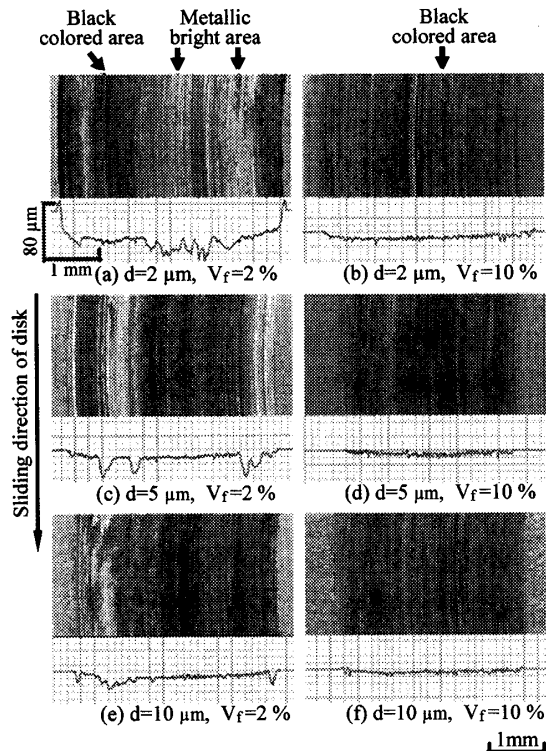


Fig. 6 Optical photographs and cross-section profiles of the worn surfaces of MMC_p in steady-state wear regime.

$V_f=10\%$ の黒色部, 比較として摩耗試験前の表面における酸素 O と Al の原子数濃度を計測した. 分析対象とした特性 X 線は K α 線で, 分析範囲は $43\ \mu\text{m} \times 43\ \mu\text{m}$ である. 分析の最大深さは, 加速電圧を 20 kV としたので, 純 Al の SEM モンテカルロシミュレーション¹⁰から約 $5\ \mu\text{m}$ であると推定される.

各計測面における O と Al の原子数濃度比 (O/Al) を表 2 に示す. 金属光沢部では V_f と d によらず (O/Al) の値は摩耗試験前の表面と同様に 1 以下であることから, Al が露出しているものと考えられる. 一方, 黒色部は (O/Al) の値が約 1.5 を示していることから, Al の酸化物の Al₂O₃ と考えられる.

3・5 摩耗面全体における元素の面積割合 d と V_f によって各 MMC_p の摩耗面に存在する金属光沢部と黒色部の割合が異なっていたことから, 摩耗面の酸化部分が占める O, SiC 粒子が占める Si, 相手材の S45C が MMC_p 側に移着した Fe, マトリックス材の主成分である Al の 4 種類の元素の面分析 (以下, マッピング) を行って, それぞれの面積割合を求めた. 摩耗面のマッピングは, しゅう動方向に対し直角に摩耗こんの内側 (ディスク試験片の中心側) から外側に向けて一定間隔おきに 25 箇所行った. また, 比較として摩耗試験前の表面のマッピングは一定間隔おきに 10 箇所行った. 1 箇所での分析範囲は約 $70\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m}$, ピクセル数は 512×512 である. 元素 (O, Si,

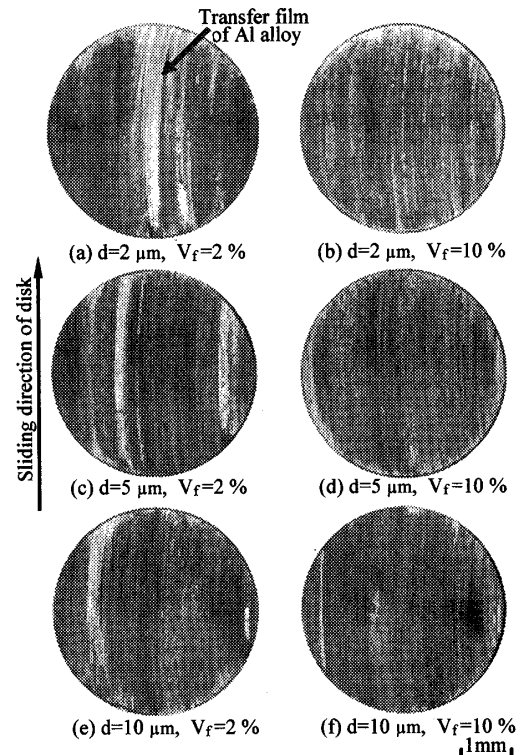


Fig. 7 Optical photographs of the worn surface of S45C in steady-state wear regime.

Table 2 Atomicity density ratio of O to Al on the worn surface of MMC_p

| Volume fraction of SiC-particles V_f % | Diameter of SiC-particles d , μm | Atomicity density ratio of O to Al | | |
|--|---|------------------------------------|----------------------|--------------------|
| | | Original surface | Worn surface | |
| | | | Metallic bright area | Black colored area |
| 2 | 2 | 0.43 | 0.13 | 1.21 |
| | 5 | 0.27 | 0.13 | 1.58 |
| | 10 | 0.43 | 0.83 | 1.56 |
| 10 | 2 | 0.59 | - | 1.41 |
| | 5 | 0.51 | - | 1.54 |
| | 10 | 0.59 | - | 1.63 |

Fe, Al) ごとにマッピング画像のピクセル数を計数し, それらの値を O, Si, Fe, Al のピクセル数の総和で除して各元素の摩耗面に占める面積割合とした. 本解析では, マッピングの色濃淡 (X 線強度) によらず検出されたすべてのピクセル数を計数した.

表 3 に各 MMC_p の摩耗試験前の表面と摩耗面の各元素の面積割合を示す. d が大きくなり V_f が増加するに伴い, 摩耗面での O と Si の面積割合は大きくなり, Al の面積割合は小さくなるが, $V_f=5, 10\%$ の $d=5\ \mu\text{m}$ と $10\ \mu\text{m}$ では, ほぼ同じになる. Fe は, ほとんど検出されないが, $V_f=5, 10\%$ の $d=10\ \mu\text{m}$ の摩耗面のみ 1% 以上の値を示した.

以上のことから, d が大きくなり, V_f が増加するに伴い, 摩耗面での酸化面積と SiC 粒子の露出面積の

Table 3 The relative frequency of O, Si, Fe and Al on the original surfaces and worn surfaces of MMC_p

| Volume fraction of SiC-particles V _f % | Diameter of SiC-particles d, μm | Original surface | | | | Worn surface | | | |
|---|---------------------------------|-----------------------|------|-----|------|-----------------------|-----|-----|------|
| | | Relative frequency, % | | | | Relative frequency, % | | | |
| | | O | Si | Fe | Al | O | Si | Fe | Al |
| 2 | 2 | 2.2 | 3.8 | 0.5 | 93.5 | 5.0 | 2.3 | 0.5 | 92.2 |
| | 5 | 1.9 | 2.9 | 0.6 | 94.6 | 6.8 | 2.6 | 0.6 | 89.9 |
| | 10 | 2.6 | 3.5 | 0.6 | 93.4 | 7.6 | 2.5 | 0.6 | 89.2 |
| 5 | 2 | 1.9 | 7.6 | 0.5 | 90.0 | 7.8 | 4.5 | 0.5 | 87.2 |
| | 5 | 2.7 | 8.0 | 0.5 | 88.8 | 11.0 | 5.6 | 0.7 | 82.7 |
| | 10 | 2.7 | 8.0 | 0.6 | 88.7 | 11.4 | 5.3 | 1.1 | 82.1 |
| 10 | 2 | 2.6 | 9.2 | 0.5 | 87.7 | 7.6 | 6.9 | 0.5 | 85.0 |
| | 5 | 3.1 | 13.4 | 0.5 | 83.0 | 10.4 | 9.1 | 0.9 | 79.6 |
| | 10 | 3.0 | 14.0 | 0.6 | 82.5 | 10.6 | 9.4 | 1.3 | 78.7 |

Table 4 Hardness of the worn surface of MMC_p

| Volume fraction of SiC-particles V _f % | Diameter of SiC-particles d, μm | Hardness of worn surface, GPa | |
|---|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| | | Metallic bright area | Black colored area |
| 2 | 2 | 2.43 | 3.09 |
| | 5 | 2.69 | 3.50 |
| | 10 | 2.43 | 2.90 |
| 10 | 2 | - | 2.85 |
| | 5 | - | 3.25 |
| | 10 | - | 3.60 |

割合が増加し、V_fが5%以上になると d=5 μm と d=10 μm ではほとんど変化しないことがわかった。

3・6 粒子強化 Al 基複合材料の摩耗機構 著者らは既報⁽⁷⁾で、ウイスカ強化 Al 基複合材料の定常摩耗率の減少が摩耗面全体の酸化と破碎したウイスカの堆積によって生じた摩耗面の硬さ上昇と密接な関係にあることを明らかにした。しかし、本研究の粒子強化の場合、摩耗面での SiC 粒子の分布や酸化した黒色部の形成が均一でないため、硬さで単純に摩耗率の変化を説明できない。

金属光沢部と黒色部の硬さを超微小押し込み硬さ試験機で測定した結果を表4に示す。d と V_fによらず、黒色部の硬さは 2.9~3.6 GPa となり、金属光沢部の硬さの約 1.2~1.3 倍となった。この結果は硬化した黒色部が摩耗率に著しく影響したことを示唆している。そこで、黒色（酸化）部と SiC 粒子部の元素（O+Si）の面積割合と MMC_p の定常摩耗率との関係をみると図8のようになる。（O+Si）の面積割合が大きくなると、定常摩耗率は減少するが、その減少の程度は次第に緩やかになる。また、MMC_p の摩耗面に占める Fe の面積割合と相手材の S45C の摩耗率との関係を図9に示す。大部分の MMC_p では Fe が検出されず、S45C の摩耗率はほぼ零に近いが、V_f=5, 10% の d=10 μm では、Fe の割合の増加に伴って S45C の摩耗率は大きくなる。

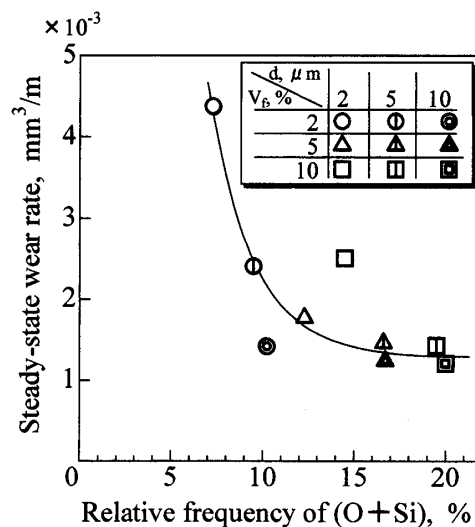
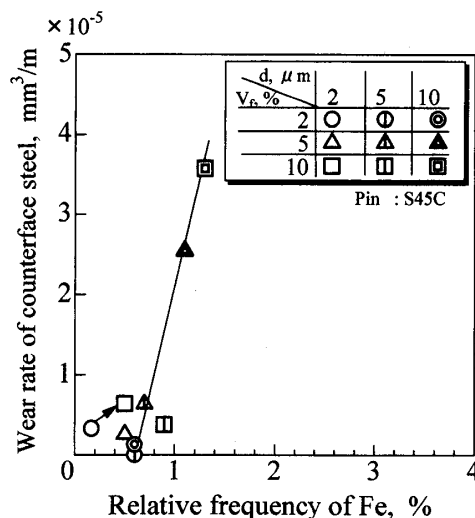
Fig.8 Relationship between steady-state wear rate of MMC_p and the relative frequency of (O+Si).

Fig.9 Relationship between wear rate of counterface steel (S45C) and the relative frequency of Fe.

以上のことから、MMC_pの摩耗率が d と V_f の増加に伴って減少するのは、硬化した酸化部と SiC 粒子の面積割合が増加することで、Al の凝着による摩耗が抑制されるためと考えられる。一方、 d と V_f がある大きさ以上になると、MMC_pの定常摩耗率の減少の程度が緩やかになり、相手材の S45C の摩耗率が大きくなったのは、既報^{(19), (20)}と同様に接触二面間に存在する SiC 粒子の影響によるものと考えられる。

そこで、摩耗粉および摩耗粉中に含まれる破砕した強化材の SiC 粒子（以下、破砕片）を観察し、それぞれ任意に 100 個取り出しその長径と短径を測定した。測定方法は既報^{(19), (20)}と同様である。摩耗粉および破砕片の平均粒径と d および V_f の関係を図 10 に示す。摩耗粉径と破砕片径を比較すると、各 V_f とも、

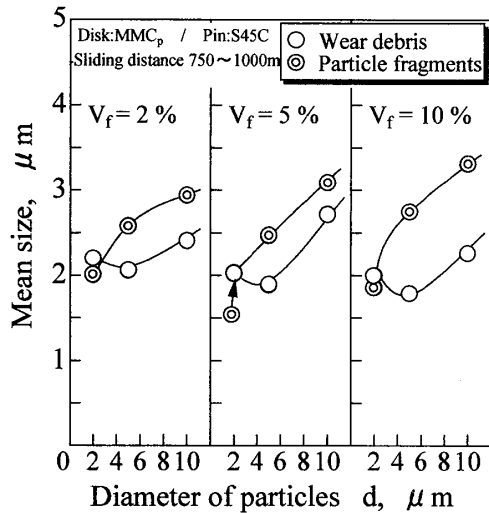


Fig.10 Sizes of wear debris and fragments of particles as function of V_f in steady-state wear regime (sliding distance 750-1000m).

$d=2\ \mu\text{m}$ では摩耗粉径と破砕片径はほぼ同じ大きさであるのに対し、 $d=5, 10\ \mu\text{m}$ では破砕片の方が 1.1~1.5 倍大きくなる。したがって、 d が大きくなることで表面から脱落する粒子や摩擦過程によって破砕される粒子径が大きくなり、また V_f の増加で接触二面間に存在する粒子の数が増加する。その結果、Al 合金と S45C の直接接触が緩和され、高湿度な大気中での摩擦であるため摩耗面の酸化が促進され、摩耗率は減少する。一方、 $d=10\ \mu\text{m}$ では、 V_f の増加でアプレシブ作用が顕著となり、MMC_pの摩耗抑制効果を低下させ、相手材の S45C の摩耗を増加させたものと考えられる。

以上の結果を総合して、MMC_pの摩耗機構モデル図を前述の図 4 と合体させて描くと図 11 のようになる。 $d=2\ \mu\text{m}$, $V_f=2\%$ (図(a)) は、表面に存在する SiC 粒子の割合が小さくマトリクス材の Al 合金が相手面の鋼と凝着や移着を繰り返して摩耗する。 $d=2\ \mu\text{m}$, $V_f=10\%$ (図(b)) は、摩耗面に占める SiC 粒子の面積割合が大きくなることによって Al 合金の凝着の程度が小さくなり摩擦過程で硬い酸化部分の面積割合も増大して摩耗が小さくなる。 $d=10\ \mu\text{m}$, $V_f=2\%$ (図(c)) は、(a)と同様な摩耗機構であるが、接触二面間に存在する SiC の破砕片の大きさが摩耗粉に比べ大きくなるので、相手面との直接接触が抑制され凝着による摩耗が小さくなる。 $d=10\ \mu\text{m}$, $V_f=10\%$ (図(d)) は、(b)と(c)における SiC 粒子の効果を合体させた作用で摩耗が抑制されるが、二面間に存在する破砕片のアプレシブ作用が顕著となり、MMC_pの摩耗が減少する程度は小さくなり、他方相手面の鋼が摩耗するようになる。

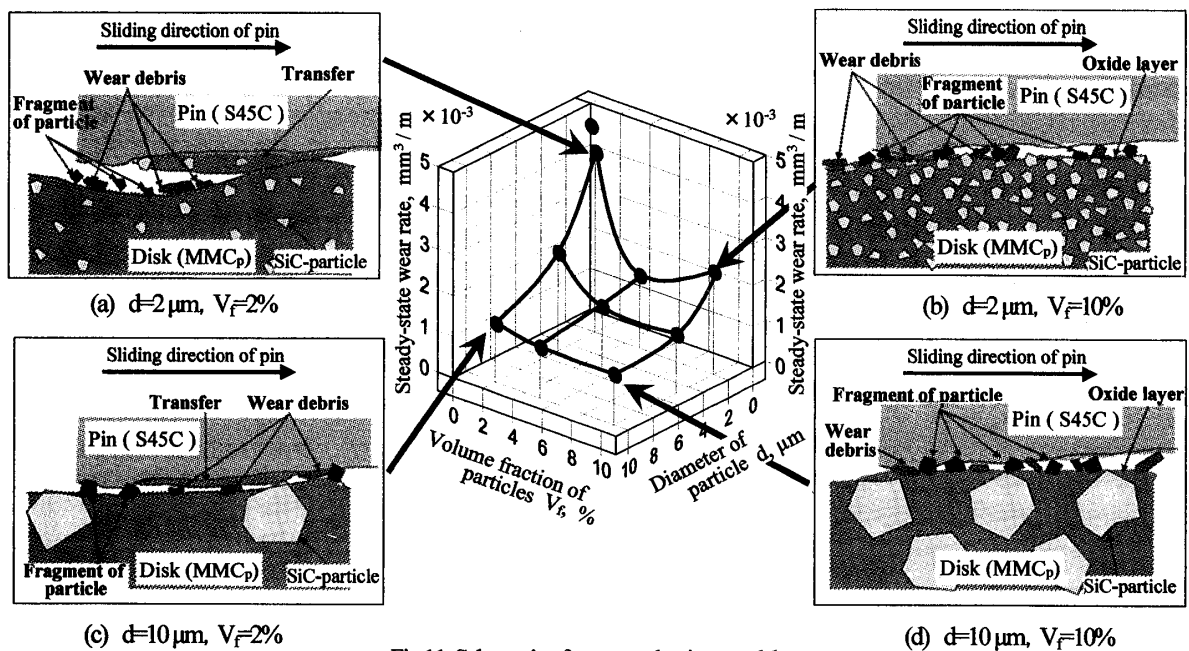


Fig.11 Schematic of wear mechanism model.

本研究では、耐摩耗性に優れ相手材への攻撃性も小さい MMC_p とするには、粒子径を $d=5\ \mu\text{m}$ とし、体積含有率を 5%、10% にすると良いことが明らかになった。

4. 結 言

SiC 粒子強化 Al 基複合材料 (MMC_p) と S45C の摩耗試験を相対湿度 70% の室温大気中で行い、以下の結言を得た。

- (1) MMC_p の定常摩耗率は、粒子径と体積含有率の増加に伴い減少するが、粒子径が $5\ \mu\text{m}$ 以上、体積含有率が 5% 以上になると減少の程度が緩やかになり、相手材の S45C の摩耗率が大きくなる。
- (2) MMC_p の摩耗面での酸化面積と SiC 粒子の露出面積の割合は、粒子径と体積含有率の増加に伴い大きくなり、体積含有率が 5% 以上になると粒子径 $5\ \mu\text{m}$ と $10\ \mu\text{m}$ ではほとんど変化しない。このような硬化した酸化部と SiC 粒子の面積割合が増加することで、Al の凝着による摩耗が抑制されるため、MMC_p の定常摩耗率は減少する。
- (4) 摩擦中に破碎された SiC 粒子は、アブレシブ作用によって MMC_p 自身の摩耗抑制効果を減じ、相手材の S45C を摩耗させるために、大きな粒子径と高含有率では MMC_p の摩耗率の減少の程度が小さくなり相手材の摩耗が顕著になる。
- (5) 本研究では、耐摩耗性に優れ相手材への攻撃性も小さい MMC_p は、SiC 粒子径を $5\ \mu\text{m}$ とし、体積含有率を 5%、10% とする場合であった。

文 献

- (1) K. Shibata, H. Ushio, Tribological application of MMC for reducing engine weight, *Tribol. Int.* **27-1** (1994), 39-44.
- (2) A.T. Alpas, J.D. Embury, Wear mechanisms in particle reinforced and laminated metal matrix composites, in: K.C. Ludema and R.G. Bayer (eds), *Proc. Conf. Wear of Materials 1991*, ASME (1991), 159-166.
- (3) J. Zhang and A.T. Alpas, Wear regimes and transitions in Al₂O₃ particulate-reinforced Al alloys, *Materials Science and Engineering*, **A161** (1993), 278-284.
- (4) A.T. Alpas and J. Zhang, Effect of microstructure (particulate size and volume fraction) and counterface material on the sliding wear resistance of particulate-reinforced aluminum matrix composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **25A** (1994), 969-983.
- (5) S.F. Moustafa, Wear and wear mechanisms of Al-22% Si/Al₂O₃ composite, *Wear*, **185** (1995), 189-195.
- (6) O.P. Modi, B.K. Prasad, A.H. Yegneswaran and M.L. Vaidya, Dry sliding wear behaviour of squeeze cast aluminium alloy-silicon carbide composites, *Materials Science and Engineering*, **A151** (1992), 235-245.
- (7) S. Wilson, A.T. Alpas, Wear mechanism map for metal matrix composites, *Wear*, **212** (1997), 41-49.
- (8) P.K. Rohatgi, Y. Liu, and S.C. Lim, Wear mapping for metal and ceramic matrix composites, in *Advances in composites Tribology*, K. Friedrich (ed), *Composite Materials Series (Ser. Ed. B. Pipes)*, Elsevier Science Publishers, **8**, (1993), 291-309.
- (9) 野呂瀬進, 笹田直, 宮下忠志, SiC ウィスカ強化 Al 合金の耐摩耗性, *トライボロジスト*, **34-7** (1989), 538-541.
- (10) B. Venkataraman, G. Sundararajan, Correlation between the characteristics of the mechanically mixed layer and wear behaviour of aluminum, Al-7075 alloy and Al-MMCs, *Wear*, **245** (2000), 22-38.
- (11) M. Gui, S.B. Kang, J.M. Lee, Influence of porosity on dry sliding wear behavior in spray deposited Al-6Cu-Mn/SiC_p composite, *Materials Science and Engineering*, **A293** (2000), 146-156.
- (12) M.H. Korkut, Microstructure and wear behavior of Al₂₀₂₄/SiFe and Al₂₀₂₄/SiFe/Al₂O₃ composites, *Tribology International*, **36** (2003), 169-180.
- (13) X.Y. Li, K.N. Tandon, Microstructural characterization of mechanically mixed layer and wear debris in sliding wear of an Al alloy and an Al based composite, *Wear*, **245** (2000), 148-161.
- (14) P.K. Rohatgi, Y. Liu and S. Ray, Friction and Wear of Metal-Matrix Composites, *ASM Handbook, Vol. 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology*, (1992), 801-811, ASM.
- (15) A.P. Sannino, H.J. Rack, Dry sliding wear of discontinuously reinforced aluminum composites: review and discussion, *Wear*, **189** (1995), 1-19.
- (16) R.L. Deuis, C. Subramanina, J.M. Yellup, Dry sliding wear of aluminum composites-A review, *Composites Science and Technology* **57** (1997), 415-435.
- (17) Y. Iwai, H. Yoneda, T. Honda, Sliding wear behavior of SiC whisker reinforced aluminum composite, *Wear*, **181-183** (1995), 594-602.
- (18) 岩井善郎, 本田知己, 宮島敏郎, 米田英智, SiC ウィスカ強化 Al 基複合材料の摩耗特性に及ぼすウィスカ含有率の影響, *トライボロジスト*, **44-6** (1999), 460-467.
- (19) Y. Iwai, T. Honda, T. Miyajima, Y. Iwasaki, M.K. Surappa, J.F. Xu, Dry sliding wear behavior of Al₂O₃ fiber reinforced aluminum composites, *Composites Science and Technology*, **60** (2000), 1781-1789.
- (20) T. Miyajima, Y. Iwai, Effects of reinforcements on sliding wear behavior of aluminum matrix composites, *Wear*, **255** (2003), 606-616.
- (21) 神田公生, 走査電顕モンテ・カルロ, フリーソフト