

# Al-19Si-1Cu-1Mg合金およびAl-12Si-1Cu-1Mg合金の フレッティング摩耗特性に及ぼす硬さの影響

Effect of Hardness on the Fretting Wear Characteristics of an Al-19Si-1Cu-1Mg and an Al-12Si-1Cu-1Mg Alloys

栗田洋敬 Hirotaka Kurita

山縣 裕 Hiroshi Yamagata

●技術本部 基盤技術研究室

## 要旨

繰返し荷重と微小すべりを同時に加えることができるフレッティング摩耗試験機を用い、熱処理条件を変化させることで硬さを変化させた過共晶組成のAl-Si合金（JIS-AC9B）および共晶組成のAl-Si合金（JIS-AC8A）の硬さと摩耗量の関係を調べ、硬さおよび組織が耐摩耗性に及ぼす影響を検討した。試験片は、半球形接触面をもつライダ（浸炭焼入れを施した合金鋼）と、平面接触面をもつロータ（AC9BまたはAC8A）よりなる。試験片接触部に周波数40Hz、荷重振幅98±10Nの繰返し荷重を付加すると同時に、接触部中心を軸とした $6.8 \times 10^{-2}$ radの振動回転運動を与えた。AC9BおよびAC8Aは、763Kで1時間保持後水焼入れし、その後523Kで所定時間時効処理を行った。その際、時効時間を変化させロータの硬さを変化させた。試験は、室温（298K）および523Kにて、無潤滑、大気中で行った。室温および523Kでの摩耗痕面積は、硬さの増加に伴い減少した。凝着摩耗が支配的形態で、耐摩耗性はマトリックスの硬さによって決まり、組織中のSi粒子の分散状態の影響は受けないものと考えられた。

## 1 はじめに

最近の地球環境問題に対する意識の高まりから、自動車エンジンに対する燃費向上、排ガス低減のニーズは非常に大きくなっている。軽量化は、これらのニーズにこたえるための有効な方法であり、部品のアルミニ化が進められている<sup>(1)</sup>。アルミニウム合金に要求される特性には強度、剛性、耐熱、耐摩耗などがある。耐摩耗性については、一方向または往復すべり摩耗について評価したものが数多く見られる。しかし、摩耗は一方向または往復すべりだけではない。微小すべりを受ける自動車エンジン部品にはフレッティング摩耗が生じ、繰返し荷重下でのフレッティング摩耗特性を把握することは、アルミニウム合金を適用する上で重要である。

これまで筆者らはDe Geeらにより開発されたフレッティング摩耗試験機<sup>(2)</sup>を参考に、繰返し荷重と微小すべりを同時に加えることができる試験機を試作<sup>(3)</sup>した。そして無潤滑、室温において、共晶組成のAl-Si合金中に平均粒径 $14 \mu\text{m}$ のSiC粒子を体積率20%分散させた複合材料（MMC）と共晶組成のAl-Si合金JIS-AC8Aのフレッティング摩耗挙動の比較を行い、SiC粒子が耐摩耗性に及ぼす影響を検討した。その結果、MMCとAC8Aは同様のプロセスに沿って摩耗が進行すること、また組織中に分散しているSiC粒子によりMMCの耐摩耗性は、

AC8Aと比べて優れていることが明らかになった。このとき、MMCとAC8Aの硬さおよび組織の違いが耐摩耗性に及ぼす影響については検討していない。しかし、実際に使用されるエンジン部品は、運転時にかかる熱により過時効が進み、硬度低下を起こす場合も多い。したがって、硬度低下が耐摩耗性に及ぼす影響を調べることは実用的価値が大きい。

そこで本研究では、熱処理条件を変化させることで硬さを変化させた過共晶組成のAl-Si合金（JIS-AC9B）および共晶組成のAl-Si合金（JIS-AC8A）の硬さと摩耗量の関係を調べ、硬さおよび組織が耐摩耗性に及ぼす影響を検討した。

## 2 実験方法

### 2.1 実験装置及び条件

試験機<sup>(3)</sup>は、De Geeらにより開発されたフレッティング摩耗試験機<sup>(2)</sup>を参考にして試作したもので、試験片に対し繰返し荷重と微小すべりを同時に加えることができる。図1に試験片の形状および接触状態を示す。上側試験片をライダ、下側試験片をロータと呼ぶ。ライダの接触面はR40の半球形であり、ロータの接触面は平面である。繰返し荷重は周波数40Hz、荷重振幅98±10Nで付

加した。ライダ取り付け部と試験機本体は連結されておらず、ライダとロータは試験中常に接触状態にある。ロータに対して、繰返し荷重と同時に、接触部中心を軸とした周波数10Hz,  $6.8 \times 10^{-2}$  radの揺動回転運動を与えた。この揺動回転の1周期をフレッティングの繰返し数（以下、繰返し数という）1回とした。このとき繰返し荷重と揺動回転運動は同期させていない。揺動回転運動の角度（以下、揺動角という）は、非接触式レーザ変位センサにより実測した。その他試験機の詳細は、前報<sup>(3)</sup>参照。

試験は、室温（298K）および523Kにて行った。523Kにおける試験は、ライダおよびロータの周囲に環状電気炉を設置し、電気炉内で行った。523Kに昇温後、ライダおよびロータの温度が均一になるように、600s保持後試験を行った。試験時間は540sである。523Kでの保持および試験中の硬さ変化は時間が短いため認められなかった。

実験条件を表1に示す。実験はすべて無潤滑、大気中で行った。

表1 実験条件

|     |          |                       |
|-----|----------|-----------------------|
| ライダ | 荷重振幅, N  | 98                    |
|     | 周波数, Hz  | 40                    |
| ロータ | 繰返し数     | $5.4 \times 10^3$     |
|     | 揺動角, rad | $6.81 \times 10^{-2}$ |
|     | 周波数, Hz  | 10                    |
|     | 試験温度, K  | 298, 523              |
|     | 潤滑       | 無潤滑                   |

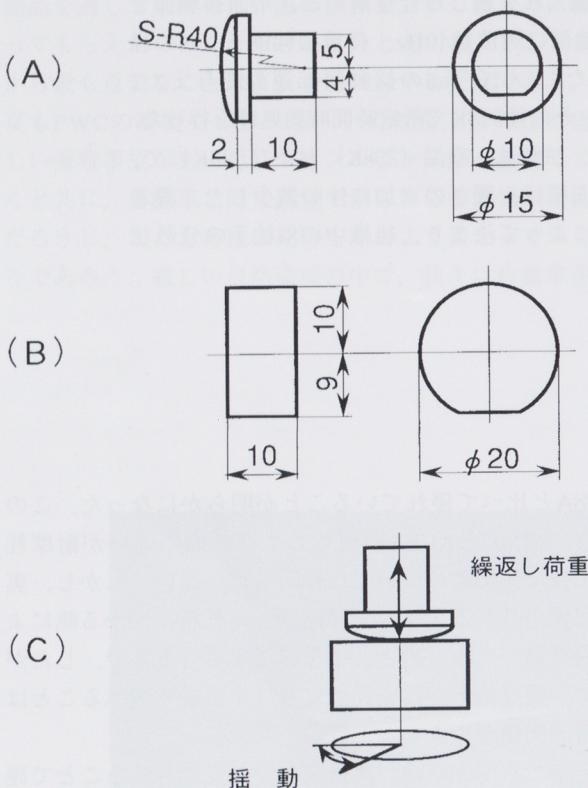


図1 フレッティング摩耗試験片

(A) ライダ, (B) ロータ, (C) 接触状態

## 2.2 試験片

表2にAC9BおよびAC8Aのマトリックスの組成を示す。図2にロータ材のAC9BおよびAC8Aのミクロ組織を示す。AC9BおよびAC8Aは763Kで1時間保持後水焼入れし、その後523Kで所定時間時効処理を行った。その際時効時間を変化させロータの硬さを変化させた。ロータの硬さは、ロックウェル硬さFスケールにて室温で測定した。表3に時効時間と硬さを示す。

ライダは、合金鋼（JIS-SCM415）に浸炭焼入れを施したものである。そのビッカース硬さ（荷重2.9N）は室温で795であった。ライダ、ロータは共に接触面をバフ研磨し、表面粗さはRz=0.6±0.2 μmであった。試験片は、接触面をエタノールにより洗浄し、試験に供した。

表2 ロータおよびライダの合金組成

### ロータ

| ロータ  | Cu  | Si | Mg  | Zn    | Fe   | Mn    | Ni  | Ti   | Pb    | Sn    | Cr    | Al |
|------|-----|----|-----|-------|------|-------|-----|------|-------|-------|-------|----|
| AC9B | 1.0 | 19 | 1.0 | ≤0.20 | ≤0.8 | ≤0.50 | 1.0 | ≤0.2 | ≤0.10 | ≤0.10 | ≤0.10 | 残  |
| AC8A | 1.0 | 12 | 1.0 | ≤0.15 | ≤0.8 | ≤0.15 | 1.2 | ≤0.2 | ≤0.05 | ≤0.05 | ≤0.10 | 残  |

### ライダ

|        | C    | Si   | Mn  | P      | S      | Cr  | Mo   | Fe |
|--------|------|------|-----|--------|--------|-----|------|----|
| SCM415 | 0.15 | 0.25 | 0.7 | ≤0.030 | ≤0.030 | 1.0 | 0.22 | 残  |

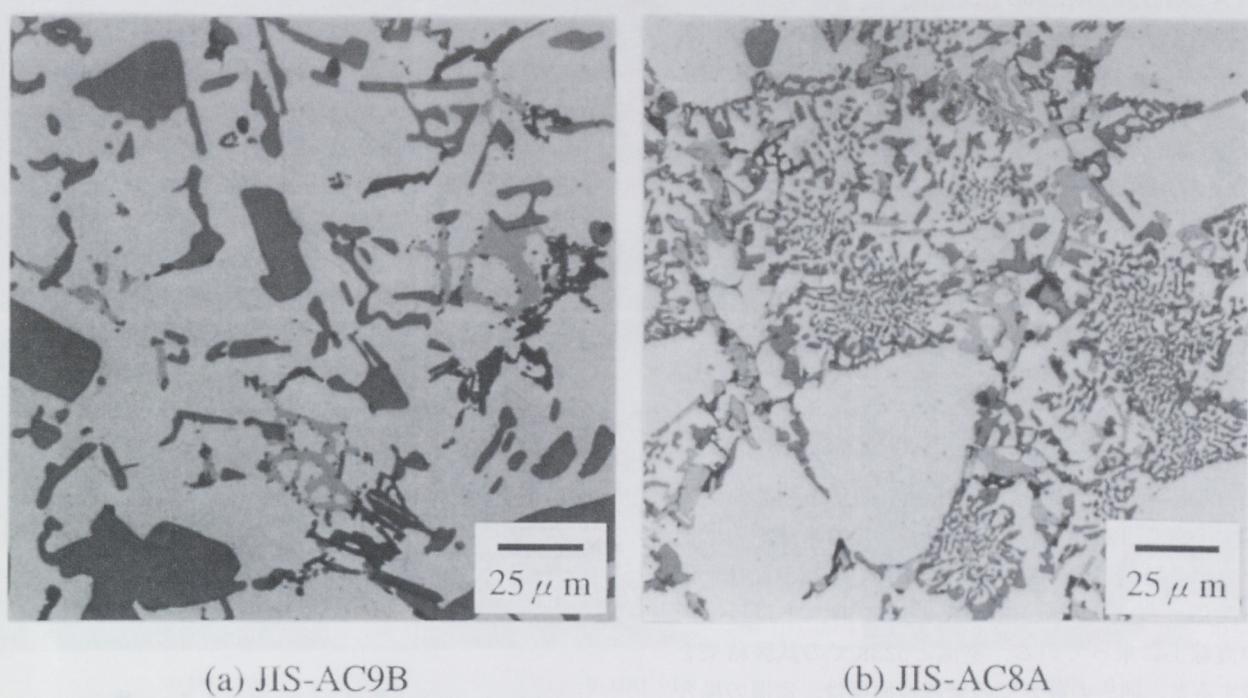


図2 JIS-AC9B (a) および JIS-AC8A (b) の金属組織

表3 時効時間と硬さ

| 材質   | 溶体化処理        | 523Kにおける時効時間, ks | 硬さ, HRF |
|------|--------------|------------------|---------|
| AC9B | 763K × 3.6ks | 3.6              | 96      |
|      |              | 36               | 92      |
|      |              | 360              | 82      |
| AC8A | 763K × 3.6ks | 3.6              | 95      |
|      |              | 360              | 76      |

### 2.3 耐摩耗性の評価

摩耗量は、試験片質量の減少、表面粗さ計による摩耗痕の深さ、摩耗痕の半径とライダ接触面の曲率半径から摩耗体積を算出するなどの方法<sup>(4)</sup>で測定できる。本研究では、ロータ表面の摩耗痕には摩耗粉がたい積し、同時に摩耗痕中央部には、摩耗の生じていない固着域が存在する。そこで、本研究での耐摩耗性の評価は、試験後のロータ表面の摩耗痕面積を光学顕微鏡に付属した画像処理装置により計測することで行った。また、SEMによる摩耗痕の観察も行った。ライダについては、試験後の摩耗痕面積がロータとほぼ同一の値であったため、

今回はロータの摩耗にのみ注目し、検討することとした。

## 3 実験結果

### 3.1 試験片接触状態

ライダとロータの接触状態を調べるために、室温および523Kにおいて114Nの垂直荷重のみ加え、接触部の変形量を表面粗さ計にて測定した。その結果、接触部に塑性変形は全く認められなかった。したがって、本実験においてライダとロータは、弾性接触状態にあるといえる。

### 3.2 AC9BおよびAC8Aの金属組織

本実験で使用したロータ材であるAC9BおよびAC8A(図2)の金属組織中のSi粒子の分散状態の違いを調べるために、金属組織観察を行った。AC9Bは、 $\alpha$ 相と針状の共晶Siおよび粒径10~50 $\mu\text{m}$ の初晶Siからなる。一方、AC8Aは $\alpha$ 相と粒径2~10 $\mu\text{m}$ の共晶Siよりなる。組織中にしめるSi粒子の面積割合は、画像処理装置により実測したところ、AC9Bが28%、AC8Aが29%であり、ほぼ同程度であった。これはAC8Aの組織中のSi粒子が、AC9Bに比べて粒径が小さく、数が多いためである。

### 3.3 摩耗痕面積と硬さの関係

図3に室温および523Kでの摩耗痕面積と硬さの関係を示す。室温(298K)、523Kいずれの場合も硬さの増加に伴い、摩耗痕面積は減少した。また、摩耗痕面積と硬さの関係において、AC9BとAC8Aのプロットはほぼ同一の直線上に乗っている。室温と523Kでの試験結果を比較すると、同一の硬さでの摩耗痕面積は、室温の場合よりも523Kの場合の方が大きい。グラフの傾きも異なり、室温の場合よりも523Kの場合の方が大きい。

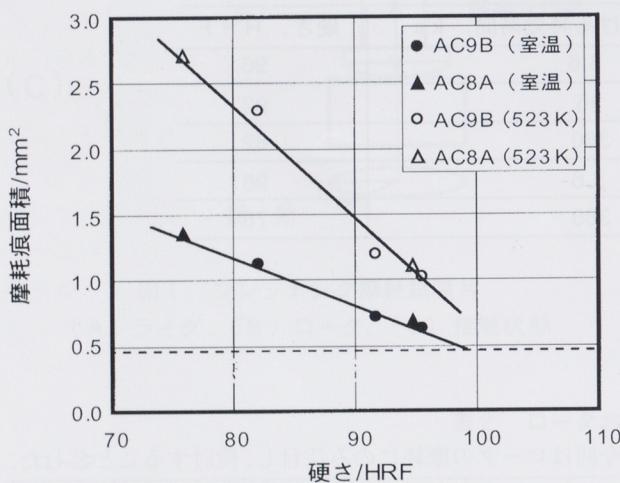


図3 摩耗痕面積と硬さの関係

### 3.4 摩耗痕の観察

この試験機でのフレッチング摩耗痕には、図4に示すように接触する2面が相対的にすべる環状の部分(slip region, すべり域)と、中心部のすべらない円状の部分(stick region, 固着域)が生じる<sup>(5)</sup>。本実験の場合にも試験片接触部には、すべり域と固着域が生じた。摩耗痕外周部には、摩耗粉が排出されている様子が認められた。

図5に523Kでの試験後のAC9Bの摩耗痕のSEM観察結果を示す。試験片硬さが低くなるにつれて、摩耗痕中央部の固着域は小さくなり、c) HRF82では固着域は認められない。摩耗痕すべり域は、全面でマトリックスが円周方向に塑性流動を起こしており、所々表面層がはく離している箇所が認められた。初晶Siとマトリックスの界面にクラックが生じている様子は認められなかった。

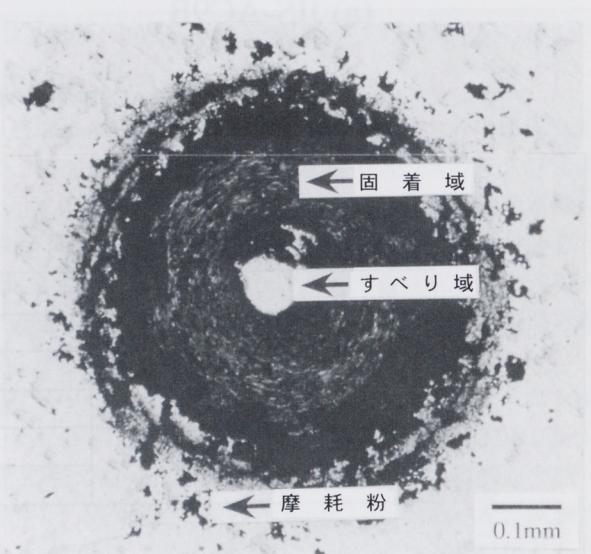


図4 AC9Bのフレッチング摩耗痕

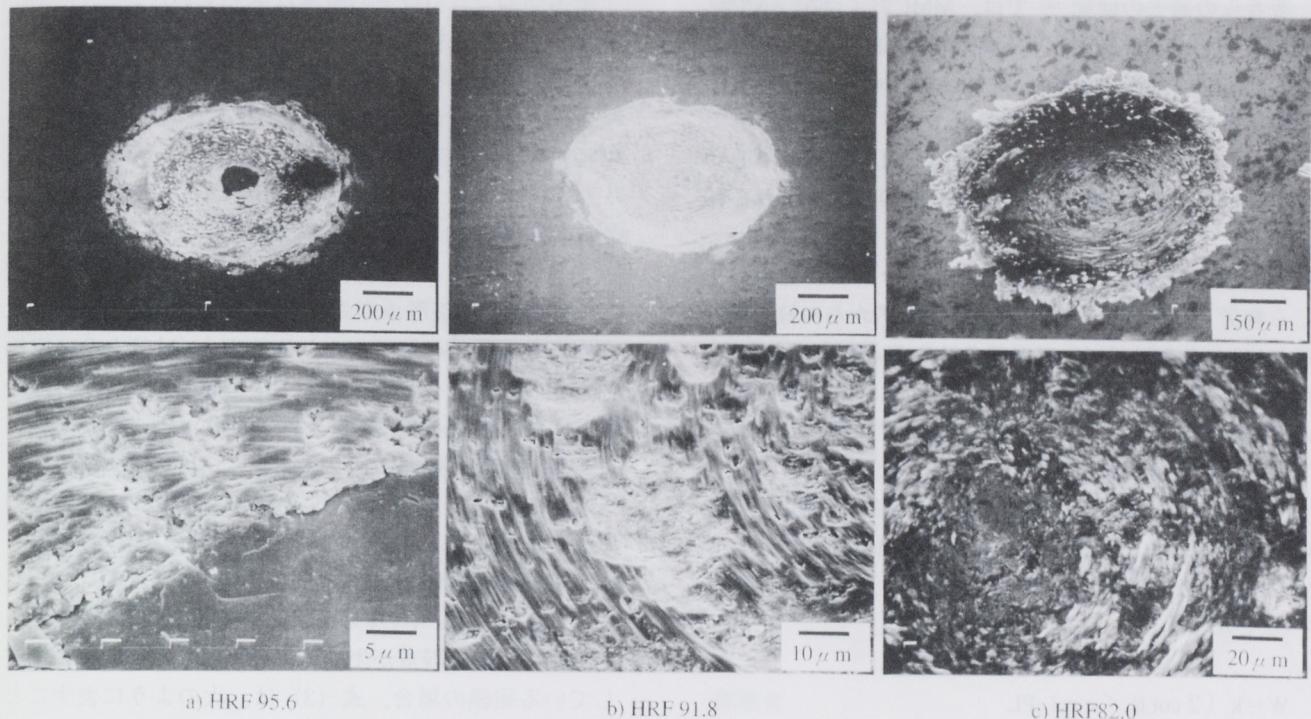


図5 フレッチング摩耗痕のSEM観察結果

## 4 考察

### 4.1 試験片接触状態と摩耗痕面積

室温および523Kでの摩耗痕面積は、硬さの増大に従い減少した(図3)。この摩耗痕面積の差が、耐摩耗性の差によるものか、ライダとロータの初期の接触部面積の違いによるものか検討する。

ライダとロータの接触は弾性接触であるから、接触部の大きさはHertzの弾性接触理論<sup>(6)</sup>から式(1)により推定される。

$$a = (3/4 r P ((1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2))^{1/3} \quad (1)$$

ここで、 $a$ はHertz接触円半径、 $r$ はライダ接触面の曲率半径、 $P$ は荷重、 $\nu_1$ はライダのポアソン比、 $\nu_2$ はロータのポアソン比、 $E_1$ はライダの綫弾性係数、 $E_2$ はロータの綫弾性係数である。接触部面積は、ライダおよびロータの綫弾性係数、ポアソン比により決まる。熱処理によりロータの硬さは変化しても、綫弾性係数およびポアソ

ン比は変化しない。したがって、硬さが変化しても接触部面積は変化しない。式(1)により、室温におけるHertz接触円半径および接触部面積を計算すると、それぞれ0.28mm、0.46mm<sup>2</sup>となる。室温における接触部面積計算値を図3中に破線で示す。この接触部面積と摩耗痕面積の差が、摩耗による接触部面積の増加分である。したがって、本実験の条件範囲においては、摩耗試験後の摩耗痕面積の違いが、耐摩耗性の差を示す。

### 4.2 耐摩耗性の硬度依存性

本実験では硬さの増加に伴い、摩耗痕面積は減少した。このとき、AC9BとAC8Aの摩耗痕面積と硬さの関係は同様の傾向を示し、摩耗痕面積のプロットはほぼ同一の直線上にのっている。図2に示すように、AC9BとAC8Aは組織中のSi粒子の分散状態が大きく異なっているにもかかわらず、耐摩耗性が組織の影響を受けず、硬さにのみ依存する。この理由について、摩耗メカニズムの考察を通じて検討する。

著者らの過去の研究<sup>(3)</sup>では、MMCおよびAC8Aのフレッチング摩耗進行過程の初期（繰返し数 $1.25 \times 10^3$ 回）において、マトリックスと金属組織中に含まれる粒子（SiCまたはSi粒子）の界面に疲労クラックが観察されている。このとき、振動角は $1.7 \times 10^{-2}$ rad（摩耗痕中心から半径0.3mmの円周上における接触面の相対すべり振幅は $5\mu\text{m}$ ）であった。

本実験の場合にも、Si粒子とマトリックスの界面に生じる疲労クラックを起点にマトリックスからSi粒子が脱落し、ロータをアブレシブ摩耗させることが考えられる。AC9BおよびAC8Aの摩耗が、マトリックスから脱落したSi粒子によるアブレシブ摩耗であると仮定すると、以下のことが考えられる。

アブレシブ摩耗として、半頂角 $\theta$ を持つ円すい形の硬い突起が、軟らかい面に深さ $d$ だけ食い込んですべるというモデルを用いると、摩耗体積 $W$ は、次のように表す<sup>(7)</sup>ことができる。

$$W = k (2 \cot \theta / \pi p_f) PL \quad (2)$$

ここで、 $k$ は摩耗粉の生成確率、 $p_f$ は軟らかい摩擦面の塑性流動圧力、 $P$ は荷重、 $L$ は摩擦距離である。 $p_f$ は押し込み硬さに近似できるため、アブレシブ摩耗による摩耗量は摩擦面の押し込み硬さに反比例することになる。したがって、摩耗形態として摩擦面間にかみ込んだSi粒子によるアブレシブ摩耗が支配的であれば、硬さの増加に伴い摩耗が減ることが予想される。また、アブレシブ摩耗量は、硬質粒子の粒径の増加と共に増加する<sup>(8)</sup>ことが知られている。したがって、組織の異なるAC9BとAC8Aは、異なる摩耗痕面積と硬さの関係になることが予想される。

図3でAC9BとAC8Aの摩耗痕面積は硬さの増加に伴い減少し、AC9BとAC8Aは同様の摩耗痕面積と硬さの関係を持っており、組織の違いによる影響は認められなかった。また、AC9Bの摩耗痕をSEM観察した（図5）ところ、初晶Siとマトリックスの界面にクラックが生じている様子は認められず、摩耗痕のすべり域全面にマトリックスの塑性流動が認められ、所々表面層がはく離していた。したがって、本実験におけるAC9BおよびAC8Aの摩耗形態は、マトリックスから脱落したSi粒子によるアブレシブ摩耗ではないと考えられる。

摩擦面間ではSi粒子の脱落は生じていないことから、マトリックス（組織中のSi粒子以外の部分）の凝着摩耗が支配的であると仮定すると、以下のことが考えられる。凝着摩耗の機構がHolmの凝着理論<sup>(9)</sup>に従うとすれば、摩耗量 $W$ は式（3）により表される。

$$W = Z (P / p_f) L \quad (3)$$

ここで、 $Z$ は接触面間の真実接触点で両面の原子の出会いごとに原子の取り去られる確率、 $p_f$ は軟らかい摩擦面が塑性流動を生じる圧力、 $P$ は荷重、 $L$ は摩擦距離である。 $p_f$ は押し込み硬さに近似できるため、凝着摩耗による摩耗量は摩擦面の押し込み硬さに反比例することになる。したがって、摩耗形態としてマトリックスの凝着摩耗が支配的であれば、アブレシブ摩耗の場合と同様に、硬さの増加に伴い摩耗が減ることが予想される。

また、式（3）中の $P / p_f$ は真実接触部の面積を示す。真実接触部内に凝着が生じる部分と生じない部分が混在している組織の場合、式（3）は、次のように表すことができると考えられる。

$$W = Z (P / p_f) fL \quad (4)$$

ここで、 $f$ は真実接触部に占める、凝着が生じる部分の割合とする。

凝着は、真実接触部内のマトリックスの部分で生じ、Si粒子の部分では生じないと考えると、組織中に占めるマトリックスの面積割合は、AC9BおよびAC8Aでほぼ同じであるため、 $f$ の値も同等であると考えられる。したがって、AC9BとAC8Aは同様の摩耗痕面積と硬さの関係を持つことが予想される。

この考察は実験結果と一致する。したがって、本実験の条件範囲においてAC9BおよびAC8Aの摩耗は凝着摩耗機構が支配的で、耐摩耗性はマトリックスの硬さにより決まり、組織中のSi粒子の分散状態の影響は受けなかったものと考えられる。

#### 4.3 耐摩耗性におよぼす温度の影響

523Kにおける摩耗痕面積は、室温の場合に比べて大きい。523Kにおけるロータの塑性流動圧力 $p_f$ は、室温に比べ低下していると考えられる。したがって523Kでは、式（4）中の $P / p_f$ すなわち真実接触部面積が室温に比べて大きくなり、凝着による摩耗量が増大し、摩耗痕面積も大きくなつたと考えられる。

## 5 おわりに

繰返し荷重と微小すべりを同時に加えることができるフレッチング摩耗試験機を用い、熱処理条件で硬さを変化させた過共晶組成のAl-Si合金（JIS-AC9B）および共晶組成のAl-Si合金（JIS-AC8A）の硬さと摩耗量の関係を調べ、硬さおよび組織が耐摩耗性に及ぼす影響を検討した。

- (1) 室温および523Kでの摩耗痕面積は、硬さの増加に伴い減少した。AC9B、AC8Aとも、摩耗痕面積と硬さの関係は同一の直線上に乗っていた。
- (2) 凝着摩耗が支配的形態で、耐摩耗性はマトリックの硬さによって決まり、組織中のSi粒子の分散状態の影響は受けないものと考えられた。

## ■参考文献

- (1) 鮎谷清司：金属, 65 (1995), 295.
- (2) A.W.J.De Gee, C.P.L.Commissaris & J.H.Zaat : Wear, 7 (1964), 535.
- (3) 栗田洋敬, 山縣 裕：トライボロジスト, 42 (1997), 477.
- (4) 笹田 直：潤滑, 4 (1959), 127.
- (5) 佐藤準一：油圧と空気圧, 18 (1987), 259.
- (6) H.R.Hertz : Gesammelte Werke, 1 (1895), 174.
- (7) E.Rabinowicz : Friction and Wear of Materials, John Wiley and Sons (1965), 168.
- (8) 日本潤滑学会編：潤滑ハンドブック, 養賢堂, (1987), 64.
- (9) R.Holm : Electric Contacts, Hugo Gebers Forlag, (1946), 214.

## ●著者



栗田 洋敬

山縣 裕