

自動車エンジン用 Al-Sn-Si 合金の潤滑摩耗機構の解明

Elucidation of the lubrication and wear mechanism of Al-Sn-Si alloys for automobile engines

福井大・工（院）\*佐橋 潤 福井大・工（正）本田 知己 福井大・工（正）今 智彦

Jun Sahashi, Tomomi Honda, Tomohiko Kon

University of Fukui

1. 緒言

カーボンニュートラル社会の実現に向けて自動車の電動化が急速に進められており、日本では 2035 年までに乗用車新車販売で電動車 100 %を実現することを掲げている<sup>1)</sup>。しかしながら、バッテリーの材料であるレアメタルの資源問題や LCA などの視点から電気モータだけを搭載する自動車が必要しも環境に良いとは言えない。したがって、低コストで高効率なエンジン搭載車の開発が望まれている。エンジンの高効率化のためには摩擦損失の低減が重要な課題となる。特に摩擦損失の割合が多いクランク部分では、主に Al 合金を用いたすべり軸受が使用されている。しかしながら、Al 合金の摩耗に関する研究は途上であり、そのメカニズムは十分に解明されていない。特に焼付きに関しては現象理解も十分ではなく、将来の表面設計のためにも焼付き進行プロセスを解明していく必要がある。先行研究では Al 合金を対象として実機エンジンオイルと同様の添加剤が処方された潤滑油中で摩擦試験を行い、理論と実験の両方から検証した焼付き進行プロセスが提案されている<sup>2)</sup>。しかしながら、初期の表面粗さが焼付きに及ぼす影響は検討されていない。本研究では、Al 合金の摩耗形態に基づく自動車用すべり軸受の開発指針を提示することを目的とし、初期の表面粗さが焼付きに及ぼす影響を調査し、焼付き進行プロセスのさらなる解明を目指す。

2. 試験方法および供試材料

2.1 試験機および試験方法

摩擦摩耗試験には本研究室で独自に作製された摩擦摩耗試験機を用い、ブロック・オン・リング方式のすべり摩擦試験を行った。試験機の概略図と試験片部の拡大図を Fig. 1 に示す。すべり速度は 0.3 m/s で一定とし、初期荷重 500 N から 200 m ごとに 500 N ずつ 3000 N まで荷重を増加させた。荷重は油圧シリンダにより負荷され、試験片の摩耗により荷重が減少する場合は、可能な限り一定となるようにその都度調節した。潤滑油は試験温度が 80±2 °C になるようにオイルバスの温度を調節した。本試験では摩擦係数、接触電気抵抗、試験片温度、摩耗粉の粒径および粒子数を測定した。接触電気抵抗の測定では、接触する二面間に十分な油膜がない完全接触の場合は電気抵抗が 0 Ω、十分な油膜がある電氣的絶縁状態の場合は約 156 kΩ となるように電気回路を構成した。試験片温度は熱電対をブロック試験片のしゅう動面から 2 mm 離れた位置に取り付けることで測定した。試験終了後、試験片の摩耗面について走査型電子顕微鏡(SEM)による観察、エネルギー分散型 X 線分析装置(EDX)による元素分析を行った。

2.2 供試材料および供試油

実機環境に基づいて、ブロック試験片には Al-Sn-Si 合金を、リング試験片には S55C を用いた。ブロック試験片には摩耗面の算術平均粗さ Ra=0.10 μm のブロック試験片(以下 Block A と表記)と Ra=0.02 μm のブロック試験片(以下 Block B,C と表記)の 3 種類の試験片を用いた。供試材料の材料特性を Table 1 に示す。潤滑油には SAE 粘度グレード 0W-8 の実機潤滑油を用いた(40 °C で動粘度が 20.9 mm<sup>2</sup>/s, 100 °C で動粘度が 4.7 mm<sup>2</sup>/s, 粘度指数 152)。この潤滑油の基油は鉱油であり、MoDTC が摩擦調整剤として、ZnDTP が耐摩耗剤として添加されている。

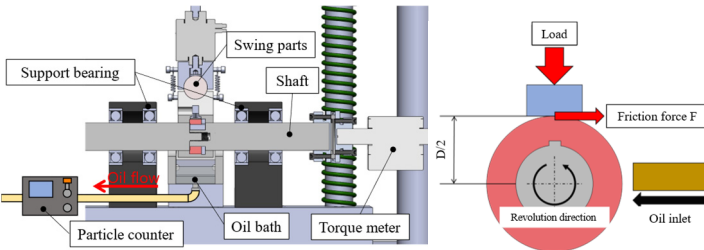


Fig. 1 Schematic of test apparatus and enlarged view of test section

Table 1 Surface roughness of specimens

| Material |                | Roughness, μm      |                     |
|----------|----------------|--------------------|---------------------|
|          |                | Arithmetic mean Ra | Root mean square Rq |
| Ring     | S55C           | 0.02               | 0.03                |
| Block A  | Al-Sn-Si alloy | 0.10               | 0.13                |
| Block B  |                | 0.02               | 0.03                |
| Block C  |                | 0.02               | 0.02                |

3. 試験結果および考察

3.1 測定データおよび摩耗面観察

Figure 2 に各試験片における摩擦係数、荷重、接触電気抵抗の変化を示す。また、Fig. 3 に試験終了後のブロック試験片の二次電子像と元素マッピングを示す。Block A を用いた試験では、摩擦係数は 0.03 以下の低い値となった。荷重増加の時点で摩擦係数がスパイク状に上昇し、同じタイミングで接触電気抵抗が低下している点が観察された。ま

た、摩耗痕からは添加剤由来と考えられる Mo や Zn などの成分が検出された。Block B を用いた試験では、摩擦係数は 0.03 以下の低い値をとるが、接触電気抵抗が常に低い値となった。摩耗痕からはしゅう動方向に沿って Fe が検出され、添加剤由来と考えられる成分が検出された。Block C を用いた試験では 2000 N 荷重増加時点で接触による音を伴う大きな振動が発生したため試験を中断した。摩擦係数は試験開始直後から上昇し約 0.12 で一定値を取り、接触電気抵抗は振動的に変化した。摩耗痕全体からリング試験片由来と考えられる Fe が検出され、Si 粒子の検出量が減少した。また、添加剤由来と考えられる成分が検出された。

### 3.2 考察

Block A を用いた試験では、摩擦係数と接触電気抵抗の関係から、荷重増加時に一部で固体接触が生じ、ミクロな焼付きが起きていたと推察される。Block B ではしゅう動方向にそって Fe が付着していることや、面が常に接触していることから、境界膜の部分的な剥離が生じていると考えられ、より高荷重、長距離の条件では Fe が付着し焼付きに至る可能性があると考えられる。Block C ではブロック試験片に Fe が付着しており、初期から Fe 同士の接触が起きたことが、摩擦係数が高くなった原因の一つと考えられる。また、Si 粒子の検出量が減少していることから摩耗が進む中で Si 粒子の脱落が生じているか、Fe がブロック試験片表面に堆積することにより Si 粒子が埋没していると考えられる。

### 3.3 高摩擦型摩耗進行プロセス

Block C で見られた、高摩擦における摩耗メカニズムを Fig. 4 に示す。(1)はなじみ前の状態を表している、通常は添加剤の吸着後、固体接触などにより添加剤由来の境界膜が形成される。Ra=0.02  $\mu\text{m}$  の試験片では鏡面同士の接触になっており、単一突起の接触面積が大きくなることや、潤滑油が供給されにくくなることから、境界膜が十分に形成されず、(2)のように Al 合金表面に凝着・移着により Fe が付着し、初期から Fe 同士の接触が起きやすい状況が発生し、高摩擦の状態になると考えられる。その後、Fe の付着物により接触面の表面粗さが増加し、境界膜が形成されやすくなり、(3)のように摩耗面が境界膜に覆われると考えられる。面全体が境界膜に覆われても Fe の付着物による突起が多く存在するため、境界膜の剥離と形成が生じ、接触状態が不安定な状態が続くと考えられる。その後、荷重増加時には摩擦力によるせん断応力が境界膜の臨界せん断応力を上回ると境界膜の大規模な剥離が生じ、Fe と境界膜由来の成分が混在する(4)のような状態に至ると考えられる。再び境界膜の形成が可能である場合は Fe の移着物が表面に残る形で(3)の状態に戻ると考えられ、Fe 同士の摩耗が支配的になると焼付きに至ると考えられる。

## 4. 結言

初期の表面粗さが焼付きに及ぼす影響について調べた結果、以下の結言を得た。

- (1) 試験開始直後から Al-Sn-Si 合金表面に Fe が付着し、Si 粒子が減少することで摩擦係数が急増する現象が生じる。
- (2) Ra=0.02  $\mu\text{m}$  のブロック試験片では単一突起の接触面積が大きくなるため、境界・混合潤滑条件では良好な潤滑状態を維持しにくい。

## 文献

- 1) 経済産業省：2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(本文)，(2021) 66-71。
- 2) 鈴木・本田：すべり軸受材料 Al-Sn-Si 合金の摩耗形態遷移過程および境界膜の影響，自動車技術会論文集，54，5 (2022) 957-963。

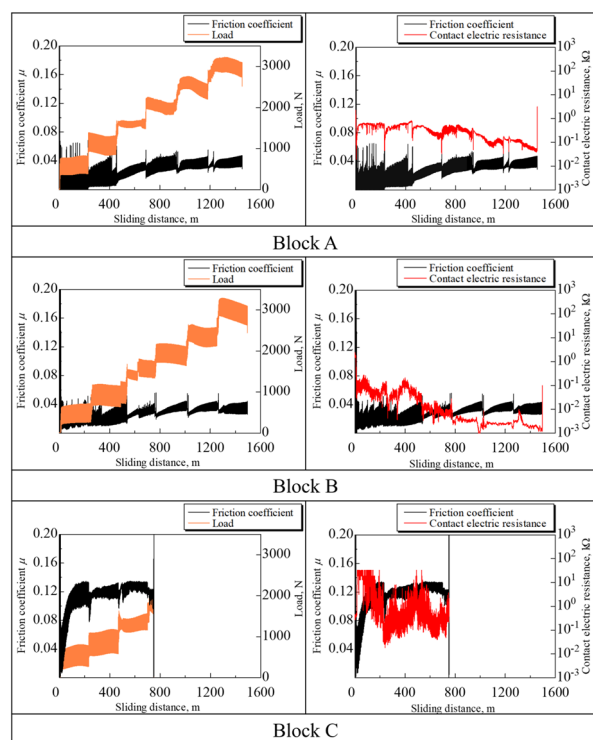


Fig. 2 Variation of friction coefficient, load and contact electric resistance as a function of sliding distance

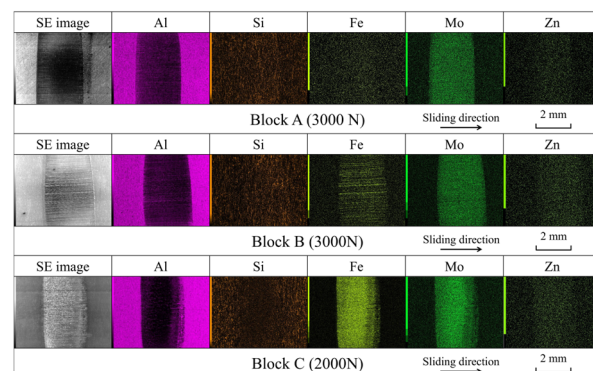


Fig. 3 SE image and EDX mappings

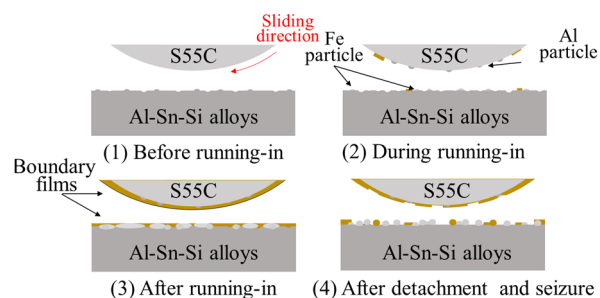


Fig.4 Model of wear process