高速すべり条件における焼付き過程の直接観察

In-situ observation of scuffing process under high sliding speeds

池田 直也・九州大学

八木 和行・九州大学

杉村 丈一・九州大学

Naoya IKEDA, Kyushu University

Kazuyuki YAGI, Kyushu University

Joichi SUGIMURA, Kyushu University

梶田 晴司・豊田中央研究所

大森 俊英・豊田中央研究所

鈴木 厚・トヨタ自動車

Seiji KAJITA, Toyota Central R&D Labs

Toshihide OHMORI, Toyota Central R&D
Labs

Atushi SUZUKI, Toyota Motor Corporation

Key Words: Scuffing, Direct observation, High sliding speeds, Wear, Friction

1. 緒言

焼付きは、高速・高荷重など過酷な条件下で接触する摩擦面で発生し、機械要素に破局的な表面損傷をもたらす現象である。これまで、焼付きの発生防止の観点から様々な研究が行われてきたが、いまだにその発生原因は明らかになっていない。その原因として、これまでの研究では焼付き発生後の表面観察や摩擦係数の変化など間接的な情報から現象の解明が行われており^[1]、焼付き過程を直接観察した例^[2,3]が少ないことがあげられる。

そこで著者らは、これまでに摩擦面に透過ガラスであるサファイアと軸受用鋼球を使用し、焼付き過程の直接観察を行った^[4]。本報では、さらに速いすべり速度における摩擦面の直接観察を行うと共に画像の収録と同期した摩擦係数の測定を行った。

2. 実験方法

実験で使用したボールオンディスク試験機をFig.1に示す。試験片としてサファイアディスク（直径51.0mm、厚さ3.25mm）と軸受用鋼球SUJ2（直径25.4mm）を用い、固定した鋼球へ回転するサファイアディスクを押し付けることで焼付きを発生させた。試験機の上部には顕微鏡および2台のデジタルカメラ（それぞれ秒間25枚撮影）が取り付けられており、前報^[5]で紹介した撮影システムによって摩擦面の観察を行った。顕微鏡の光源には閃光時間約2.5 μ sのフラッシュライトを使用し、秒間25枚の画像の収録と同期させて摩擦係数の収録を行った。また本実験では2台のデジタルカメラの撮影間隔は3msに設定した。試験機内のヒータによりバルク温度を50 $\pm$ 1 $^{\circ}$ Cに制御し、すべり速度3m/s、荷重20N、無潤滑条件にて実験を行った。

Fig.1 Experiment apparatus

なお実験時の室温および湿度は、それぞれ20.5 $^{\circ}$ C、42%であった。実験後、鋼球の摩擦面硬度をビッカース試験器にて測定した。

3. 実験結果

3-1 摩擦面の直接観察

Fig.2は試験開始から終了までの摩擦係数のグラフである。摩擦係数は実験開始直後から荷重の増加とともに上昇を始め、実験開始後3sまでに焼付き現象が観察された。焼付き発生後、摩擦係数は0.4~0.5で一定となった。

Fig.2 Variations in load and coefficient of friction

Fig.3は急激な摩擦係数の上昇が観察された実験開始後5秒までの摩擦係数のグラフである。またFig.4はFig.3の各点における摩擦面の観察画像を示す。

Fig.3 Variation in load and coefficient of friction (0~5s)

実験開始直後、Fig.4(a)に示すように摩耗粉が接触面前方に堆積すると同時に接触面内に侵入を開始した。このとき鋼球表面ではアブレーション摩耗による線状摩耗痕が観察された。Fig.4(b)では接触面後部で鋼球表面が塑性変形し、表面が流動を始めた。鋼球表面での塑性流動発生後、摩擦係数の変動が

大きくなり、サファイアディスク側にクラックが発生した。Fig.4(c)で発生した塑性流動はその領域を拡大し、Fig.4(d)に見られるように摩擦面は後方へと引き伸ばされた。また、表面が流動した部分において干渉縞の発生が見られた。Fig.4(e)以降、塑性変形領域は起点を次々に変え、干渉縞を伴いながら接触域全体に拡大し、摩擦係数は急激に上昇した。このとき凝着力の増大によりサファイアディスクのクラックがさらに進展し、脆性破壊特有のシェブロンパターン^[6]を示した (Fig.4(f))。Fig.4(g)で摩擦係数は0.44に達し摩擦係数の急激な上昇は止まったが、その後、Fig.4(h)のように摩擦面は大きな摩耗粉の発生・脱離を繰り返しながら急激に拡大し、摩擦係数は0.4-0.5で一定となった。

Fig.5(a),(b)に塑性変形領域が摩擦面全体に拡大する際に見られた干渉縞を3ms間隔で捉えた連続写真で示す。接触部が後方へと流動し、その流動した部分で干渉縞が観察された。干渉縞が発生する原因としては、サファイアディスクの光弾性^[7]、ディスクと鋼球間のすき間における光干渉および酸化膜の形成が考えられるが、これらについてはさらなる研究が必要である。

Fig.5 Continuous snapshots of contact area with 3ms interval

3-2 摩擦面の硬さ測定

実験後、鋼球側摩擦面の硬さをビッカース試験機にて測定した。焼付き発生後の摩擦面 (Fig.6) の各位置における硬さ測定の結果を Tab.1 に示す。その結果、接触域外の硬さ 747Hv に対して実験後の摩擦面では総じて硬さが低下していた。

特に、焼付きの起点となった摩擦面出口付近は入口付近よりも硬さの低下が大きかった。

Tab.1 Hardness of SUJ2 after test

Fig.6 Photograph of SUJ2 contact surface after test

	Hardness of SUJ2 (Hv)
1	621
2	584
3	539
4	585
Original surface	747

4. 結言

無潤滑、高速すべり条件 (3m/s) にて焼付き過程の直接観察および実験後の硬さ測定を行った結果以下のことが分かった。

- 1) 摩耗粉は摩擦面入口に堆積することなく、実験開始と同時に摩擦面へ流入しアブレッシブ摩耗を引き起こした。また摩擦係数も接触と同時に上昇を開始した。
- 2) 摩擦面出口付近から鋼球表面で塑性流動が発生し、起点を次々に変えながら接触面全体へ拡大した。またその過程で摩擦係数は急激に上昇した。
- 3) 焼付き過程の摩擦面では干渉縞が観察された。しかし、その発生原因についてはさらなる研究が必要である。
- 4) 実験後の鋼球摩擦面では摩擦熱の流入による硬さの低下がみられた。特に、焼付きの起点となった摩擦面出口付近では入口付近よりも硬さの低下が大きかった。

参考文献

- [1] Salomon, G.:Wear 36(1), 1-6,1976.
- [2] Enthoven, J., Spikes, H.A.: Tribol. T. 39(2), 441-447, 1996.
- [3] Yagi, K., Ebisu, Y., Kajita, S., Ohmori, T and Suzuki.: Tribology Letters, 2011.
- [4] 胡, 八木, 杉村, 梶田, 大森, 鈴木: トライボロジー会議予稿集, 福井,2010-9,pp205-206.
- [5] 池田, 八木, 杉村, 梶田, 大森, 鈴木: 機械学会予稿集, 東京,2011-9,講演番号 S116015.
- [6] R. W. Wilson: The conference on lubrication and wear, London, 1957-10, pp625-641.
- [7] 水谷, 田中, 井戸, 谷先: 材料 32(361),1983-10,pp-34-39.