

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686022

研究課題名(和文)超高速長時間連続撮影システムによる摩擦面のその場観察

研究課題名(英文) In-situ Observation of Frictional Area by Ultra High Speed and Long Period Observation System

研究代表者

八木 和行 (Yagi, Kazuyuki)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50349841

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、長時間かつ超高速に撮影できる観察システムを構築し、瞬間的現象である摩耗粉の生成挙動、表面の塑性流動、そして焼付きなどの観察を行うことを目的としている。

本研究で構築した撮影システムは、4台のCCDカメラおよびフラッシュランプの光源から構成されており、各カメラ間の撮影タイミング独立に制御することにより、撮影スピードを飛躍的に向上させることに成功した。

本撮影システムを用いて焼付き実験を行った結果、焼付き時に発生する塑性流動のようすが明らかになった。塑性流動の進展速度は、すべり速度とともに増加するが、その進展速度はすべり速度よりも一桁以上小さいものであった。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to develop an in situ observation system for frictional areas that could capture at a high frame rate for long time. The developed observation system is used for observing instantaneous phenomena such as wear debris generation, plastic flow behavior and occurrence of scuffing.

The developed observation system comprises of four CCD camera and flashing light. The observation system controls independently the capturing timing of each camera to succeed in increasing the frame rate of four capturing images.

Plastic flow behavior during scuffing can clearly be observed by the present observation system. The plastic flow speed increased with increasing sliding speed. However, the plastic flow speed was more than one-digit smaller than the sliding speed.

研究分野：トライボロジー

キーワード：トライボロジー その場観察 焼付き 摩耗粉 塑性流動

1. 研究開始当初の背景

摩擦面の状態はたとえ「場」としては定常状態であっても、必ず表面や潤滑油の移動といった時間経過が生み出す作用により成り立っている。したがって、この時間経過中における現象の過程を捉えることができれば、摩擦面での現象がより明らかになると考えている。これを表す一例に潤滑油中の摩擦粉などの異物の挙動がある。流体潤滑状態では、摩擦損失は潤滑油のせん断抵抗のみであるため、摩擦は生じないとされている。しかし、潤滑油中に異物が存在すると、摩擦面への流入により表面との接触が起き、そこを起点とする摩擦、損傷が発生する。この異物の大きさは、流体膜の厚さが μm から nm オーダであることを考えると、それが我々の認識としては微小なものであっても、摩擦面にとっては影響の大きいものであることは容易に想像できる。そして、それを除去するためには高度な環境制御を必要とするため、異物が完全に排除されれば完全非接触状態が成り立つと考えるより、程度の差はあれ、流体潤滑状態であっても異物を介した固体接触は起こりうるものだと考える方が、世にある大部分の摩擦面にとっては自然であろう。

一方、摩擦面の観察手法として、摩擦面の状態をそのままの状態捉える「その場」観察が盛んに行われている。これまで可視像[1,2]、赤外線像[3]および FT-IR[4]や Raman 分光法[5]を用いた潤滑面のその場観察が数多く行われてきた。その結果、潤滑面の油膜厚さ、温度、圧力などの状態が詳細に明らかになったが、潤滑面のその場観察の結果は、定常条件における結果である。これに対し、摩擦面で起こる現象には、上述したような異物の混入のような非定常的な現象が数多くある。高速な現象を撮影するには、高速度カメラなどが現存しているが、撮影時間が数秒と極めて短い。このため、いつ、どこで起こるかわからないような現象の観察には不適である。このため、このような問題を克服できるその場観察システムの構築が待たれている。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、長時間かつ超高速に撮影できる観察システムを構築し、いつ、どこで起こるか事前に予測できず、かつ瞬間的に起こる摩擦粉の生成挙動、表面の塑性流動、焼付きなどの観察を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

図1に本その場観察システムの概略図を示す。カメラには画素数 $1,024 \times 768$ 画素の CCD 素子が1台に2枚内蔵されているものを選定する。この2台のカメラを顕微鏡に取り付ける。光源には、それぞれの CCD 素子用にフラッシュライトを4台顕微鏡に取り付ける。画像撮影には、1台のフラッシュライトを点灯させた際、1枚の CCD 素子のみを露光させ、

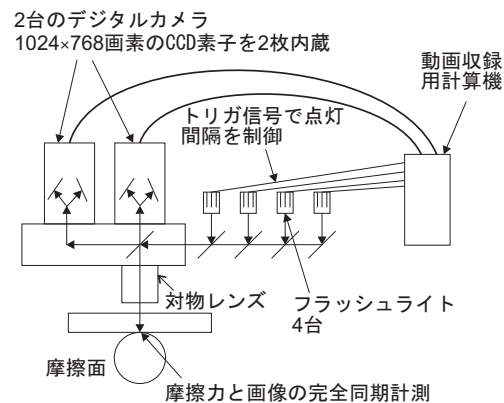


図1 超高速長時間連続その場観察システムの概略図

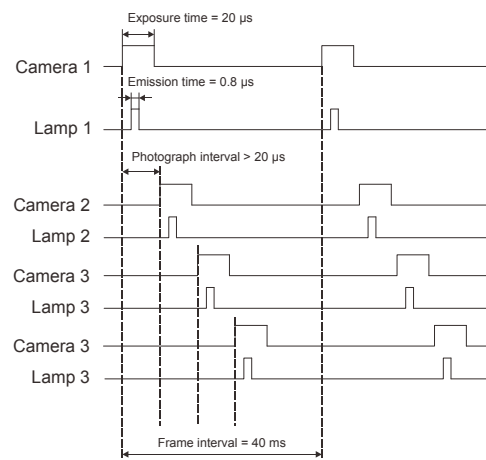


図2 各カメラの撮影タイミングチャート

残りの3枚の露光は閉じた状態にする。この CCD 素子の撮影が終了後に別の CCD 素子の露光を開始し、それと合わせて別のフラッシュライトを点灯させる。この動作を連続させ、トリガで制御することにより短時間間隔の画像を撮影することが可能となる。この4枚の画像取得を秒間 25 回繰り返して行い、長時間撮影を可能にする。撮影した画像の保存については、長時間撮影のために、複数台のハードディスクからなる RAID システムに連続的に記録する。また、このその場観察システムは、荷重、摩擦力、振動量などの他の測定対象と完全に同期して撮影するものであるため、たとえば摩擦力上昇時における摩擦面での状態変化といった他の物理量との関係も明らかにすることができる。

実験装置の概略図を図3に示す。本装置は回転するサファイアディスクの下からアタッチメントに固定された鋼球を押し付けるボール・オン・ディスク型の摩擦試験機である。本試験で使用した軸受用鋼球は SUJ2 を熱処理したものであり、結晶構造はマルテンサイトである。アタッチメントの下部にはボールスプラインが取り付けられており、上下運動が可能になっている。さらにその下に荷

重測定用のロードセルが空気圧シリンダに取り付けられており、下から荷重から荷重を作用させる。サファイアディスクはタイミングベルトを介してサーボモータで回転できるようにしている。モータの下側にはボールベアリングが取り付けられており、ディスクが取り付けられた鋼板をボールベアリングの軸中心に回転方向に動かすことができる。摩擦力は、ボールベアリング付近のロードセルによって計測することができる。

4. 研究成果

実験条件については、荷重を 50 N、周囲温度を 50°C とし、潤滑油を使用しない乾燥摩擦条件で実験を行った。図 4 に摩擦力の実験結果を示す。接触が開始してから摩擦係数が変化していくようすが確認できる。試験開始後 2 秒ほどまでは摩擦係数が 0.1 ほどで安定しているが、その後、2 秒から 4 秒まで摩擦係数が急激に上昇していき、再び値が 0.3 ほどで一定値となる。

図 5 に摩擦係数が上昇するまでの摩擦面の可視像の変化を示す。図中の画像 c, d, e は図 4 の摩擦係数 c, d, e に対応している。摩擦開始直後(a: 0.04 s)摩擦面に微細な摩耗粉が堆積しており、その後(b: 0.80 s)摩耗粉が堆積していく。その後も、特に摩擦面入口側に摩耗粉が堆積していくが、この時までには接触面積の変化はほとんどなく摩擦係数の変化も小さい。しかし、摩耗粉が堆積していた領域から塑性流動が発生(c: 2.00 s)し、さらに他の摩耗粉が堆積していた場所からも塑性流動が発生して、接触面積が急激に拡大する(d. 2.20 s)。その後は摩耗粉の堆積に関係なく塑

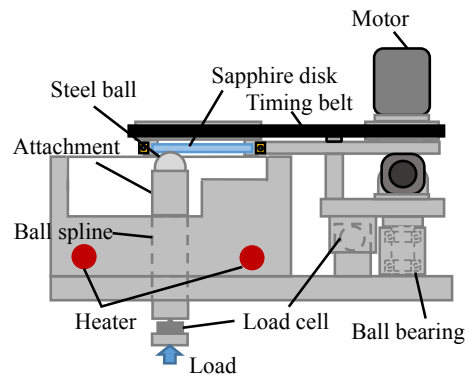


図 3 実験装置概略図

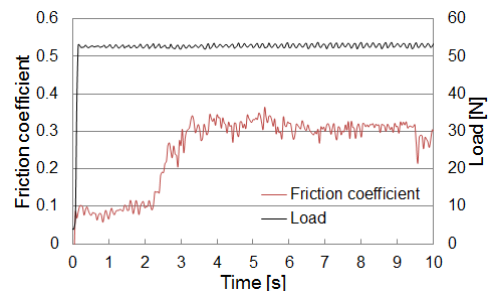


図 4 焼付き中の摩擦係数の変化

性流動が発生していき、摩擦面は拡大し続ける(e. 2.80 s)。摩擦面が急激に拡大するようになると、画像 d で示すように薄片型の摩耗粉が生成されるようになる。以上の c から e の区間において摩擦係数は急激に上昇している。

Sliding direction →

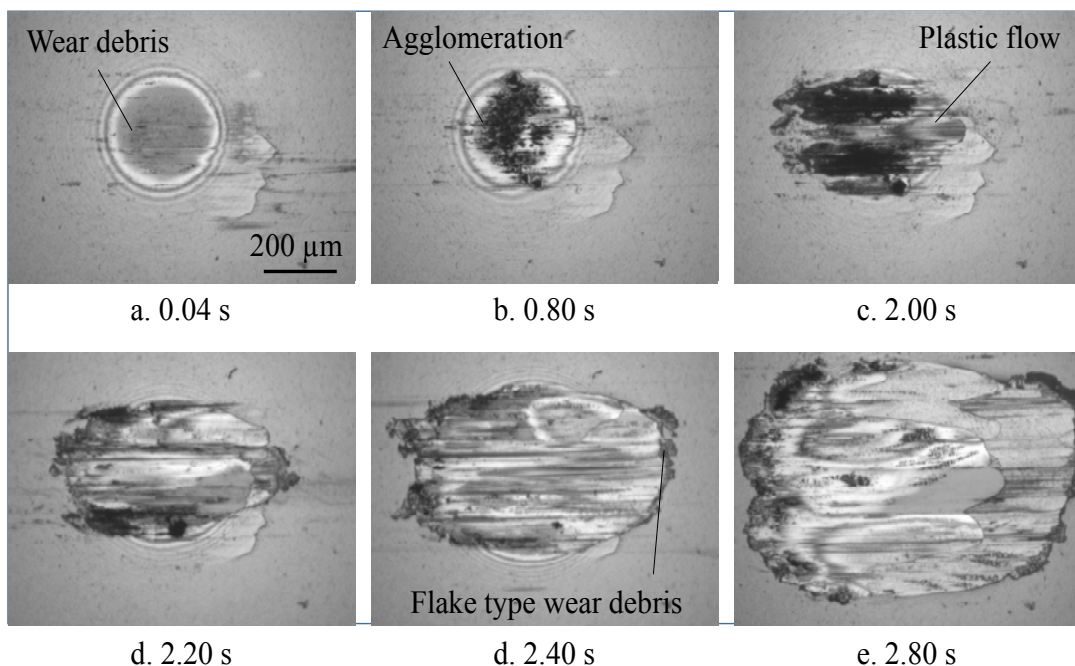


図 5 摩擦面が拡大するようす

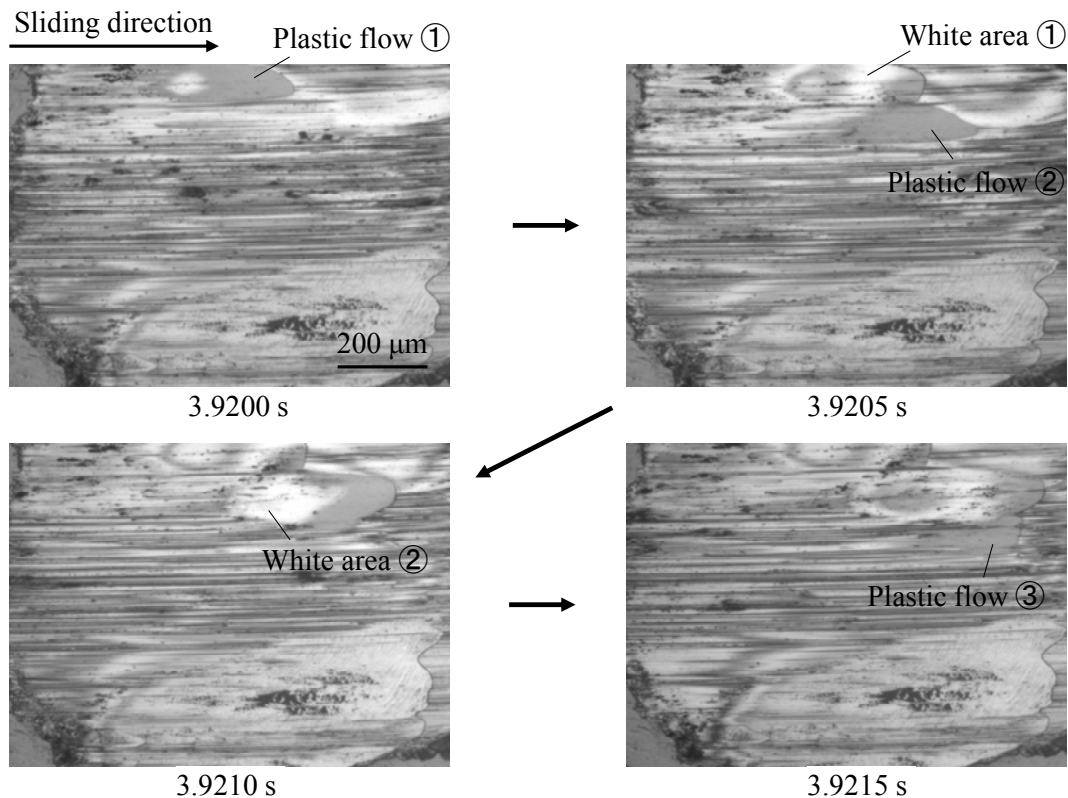


図6 塑性流動が進行するようす

図6に塑性流動の短時間間隔での挙動を観察したものを示す。4つのカメラ間の撮影間隔は0.5msである。まず、3.9200sのときに上部で塑性流動が観察されており、これを塑性流動①とする。その0.5ms後に塑性流動①の領域が白くなっているのがわかる。これを白色領域①とする。さらに、白色領域①の下に塑性流動②が発生している。その0.5ms後、塑性流動②の領域が白色領域②に変形する。その0.5ms後に白色領域②のあった領域の下に塑性流動③が発生しているのがわかる。塑性流動領域は平坦な面であるが、白色化した領域ではスクラッチが確認できる。また、白色になった領域に関して、3.9205sのときの白色化領域①と、3.9215sのときの塑性流動③の上にある白色化領域②の両方で干渉縞が見られる。

この塑性流動の速度の計測を行った結果を図7に示す。すべり速度については、2m/s、3m/s、4m/sと3種類変えて行った。横軸は、接触開始してからの時間である。塑性流動速度の値はプロットされており、左軸と対応し、摩擦係数は実線で表され、右軸に対応する。また、各すべり速度における流動速度の平均と、流動速度をすべり速度で割った値を表1に示す。これらの結果から、流動速度はすべり速度が増加した場合、そして摩擦面が拡大していく際に大きくなるが、すべり速度よりも一桁以上遅い速度で流動していることがわかった。

以上のように、塑性流動の進展のようすを本撮影システムで観察することができた。塑性流動の発生だけでなく、塑性流動の進行速度まで計測することができた。塑性流動中の変形過程は焼付きのモデル化を行うにあたって重要な知見である。今後の展開については、計測システムの有用性を生かすために、転がり疲れやフレッチングなどの損傷発生の正確な予測が難しい現象の観察への展開などが期待される。

<引用文献>

- [1] 三科博司, 笹田直, 野呂瀬進, 蒔田裕之: 移着粒子の“のしつぶし”による鱗片状摩耗粉の形成, 潤滑, 24 (1979) 585-591.
- [2] K.Yagi, Y. Ebisu, J. Sugimura, S. Kajita, T. Ohmori and A. Suzuki, In Situ Observation of Wear Process Before and During Scuffing in Sliding Contact, Tribology Letters, 43, 3 (2011) 361-368.
- [3] K. Yagi, K. Kyogoku & T. Nakahara, Relationship between Temperature Distribution in EHL Film and Dimple Formation, Trans. ASME, J. Tribol., 127, 3 (2005) 658-665..
- [4] P. M. Cann & H. A. Spikes, In Lubro Studies of Lubricants in EHD Contacts Using FTIR Absorption Spectroscopy, Tribology Transactions, 34, 2 (1991) 248-256.

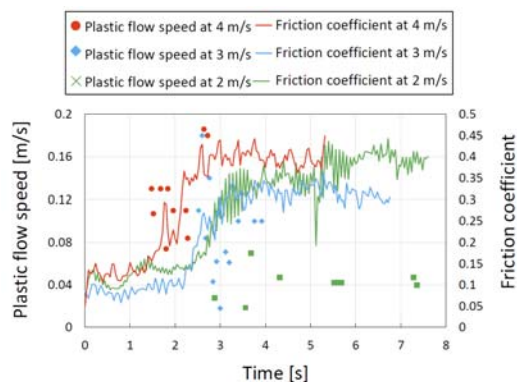


図 7 焼付き中における塑性流動速度の時間経過

表 1 塑性流動速度

すべり速度 [m/s]	1.0	2.0	3.0
塑性流動速度 [m/s]	0.04	0.1	0.13
すべり速度と塑性流動速度の比	0.02	0.033	0.033

- [5] K. Yagi, P. Vergne and T. Nakahara, In Situ Pressure Measurements in Dimpled Elastohydrodynamic Sliding Contacts by Raman Microspectroscopy, Tribology International, 42, 5 (2009) 724-730.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 3 件)

- [1] Y. Matsuzaki, K. Yagi & J. Sugimura, In-situ Observation of Plastic Flow Behaviour During Scuffing by Long Time and Short Interval Observation System, Proceedings of 3rd Malaysia-Japan Tribology Symposium (2014) 3-1.
- [2] 松崎康男, 市來智之, 八木和行, 杉村丈一, 長時間超高速その場観察システムを用いた塑性流動速度の測定, トライボロジー会議 2014 秋 盛岡 (2014) F18.
- [3] 市來智之, 八木和行, 杉村丈一, 時間超高速摩擦面観察システムの構築, トライボロジー会議 2013 秋 福岡 (2013) C46.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

八木 和行 (YAGI KAZUYUKI)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50349841