

放射光X線回折を利用した摩擦面焼付き現象のその場観察



八木 和行

Yagi Kazuyuki

(九州大学大学院工学研究院機械工学部門)

1 はじめに

自動車のエンジンなどの機械は多数の部品で構成されているが、並進運動、回転運動を円滑に支持するしゅう動面が数多く存在する。しゅう動面には潤滑油が通常供給されており、表面同士の直接的な接触が妨げられ、摩擦や摩耗が低減される。しかし、潤滑油が不足するなどして表面同士が接触すると、しゅう動面では数多くの損傷が起こる。数多くの損傷形態の中でも、焼付き (scuffing) と呼ばれる現象は、摩擦力、摩耗、振動などが急激に増大し、しゅう動面での円滑な運動が不可能となる破局的な損傷である。焼付きは物理的、化学、材料科学の現象が複雑に絡み合った複雑な現象であり、そのメカニズムは十分に分かっていない。しかしながら、近年要求度の高まる機械の高性能化、高効率化のためには、その最大の障壁となる焼付き現象の理解を進めていく必要がある。

筆者らは、しゅう動面で起こる焼付き現象を理解するために、しゅう動面を構成する2つの表面のうち、片側の材料に透過材料を用い、顕微鏡で観察することにより、焼付き現象のその場観察を行ってきた^{1,2)}。そして、その場観察手法を更に発展させ、放射光を利用したX線回折 (X-ray diffraction, XRD) 法³⁾と組み合わせ、焼付き中におけるしゅう動面材料の結晶構造をその場で捉えることに成功した^{4,5)}。本報では、焼付き中におけるその場XRD観察システムを紹介する。

2 その場XRD観察システム

図1に摩擦実験装置の概略図を示す。摩擦面は、ACサーボモータにより駆動されるサファイア製の回転リングと、直径4mmの鋼製のピンにより構成される。鋼製ピンの先端には曲率があり、頂点部から深さ方向に4本の熱電対が埋め込まれている。実験装置上部には、レンズが設置されており、サファイアリング越しに摩擦面の状態がカメラで撮影される。なお、この顕微鏡システムは、可視光カメラと近赤外光カメラが設置されており、可視光像の撮影と、近赤外光像による高温測定が可能である。

本実験で使用した放射光X線は、SPring-8によるものである。ビームラインについては、豊田ビームラインBL33XU^{6,7)}を使用した。X線ビームは図1(b)の左側から入射される。摩擦面にビームが入射されるよう、試験機は水平面から9°傾けられる。摩擦面に入射されたX線はリング状の回折光を生み出すが、回折リングを一度に検出するために、図の右側に2次元検出器が設置されている。

本実験で使用したX線のエネルギーは30 keVである。X線ビームの摩擦面への照射面積は、すべり方向に約1mm、その直交方向に約0.4mmである。表面への侵入深さは、約7μmである。X線回折角の検出角度範囲は、摩擦面と2次元検出器との幾何学的距離によって決定されるが、本実験では、鋼製 (高炭素クロム軸受鋼SUJ2, ビッカース硬さ約800 Hv) ピンの母材であるマルテンサイトの(110)

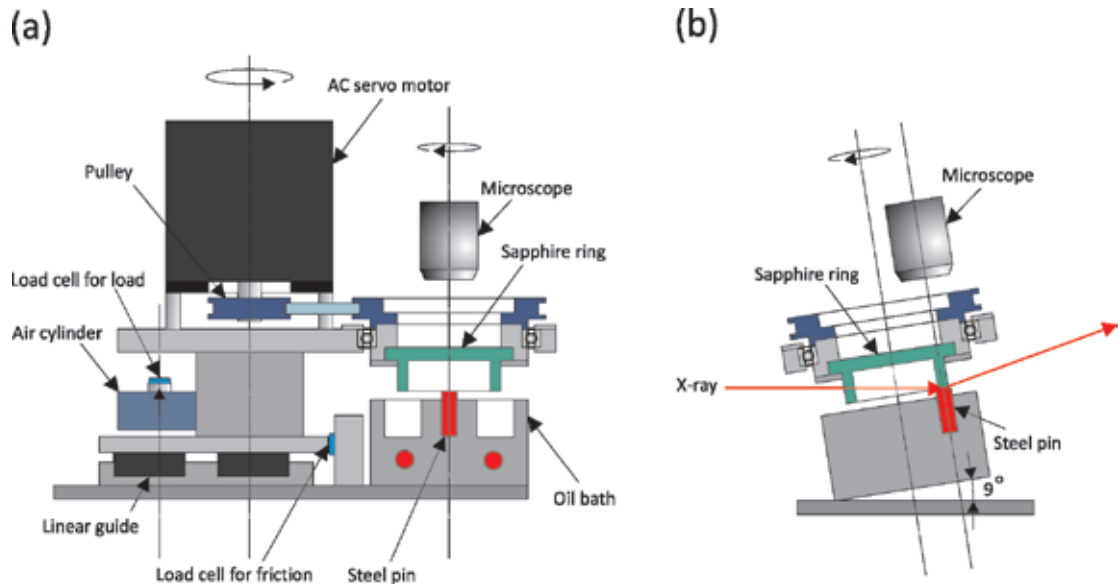


図1 摩擦面その場 XRD 観察システムの概略図⁵⁾

面とオーステナイトの(111)面及び(200)面の回折角が範囲内に収まる9.5°から14.7°である。

以上の可視光, 近赤外光, X線回折リング, そして摩擦力の測定システムはすべて同期されており, 本システムではX線回折リングを含めて秒間30回の撮影が可能である。

3 実験結果

本実験は, 荷重 270 N, すべり速度 2.38 m/s, 温度 50°C, 無潤滑の条件で行われた。図2に焼付き実験を行った際の, 摩擦係数とピンに埋め込まれた熱電対による温度計測結果を示す。図2(b)中にある凡例は, ピン頂点からの熱電対の埋込位置を示している。実験中, 摩擦係数が変動しているが, この挙動の特徴から, 焼付き(scuffing)現象は2種類に大別される。1つ目は, 実験開始直後と開始60秒から90秒あたりの時間で観察されるパルス状の摩擦係数の上昇を指し, micro scuffing と呼ばれる。もう一方は, 90秒過ぎに摩擦係数が上昇し, その後およそ0.4あたりで一定値となる区間を指し, こちらは macro scuffing と呼ばれる。ピンの温度も, 摩擦係数の変動に伴って変化していることが分かる。特に macro scuffing が発生すると, 温度は単調増加を示し, 最終的には800°C以上にまで到達する。

図3に実験開始直後に起こった micro scuffing 中の可視光像, 近赤外光像, そして XRD スペクトル

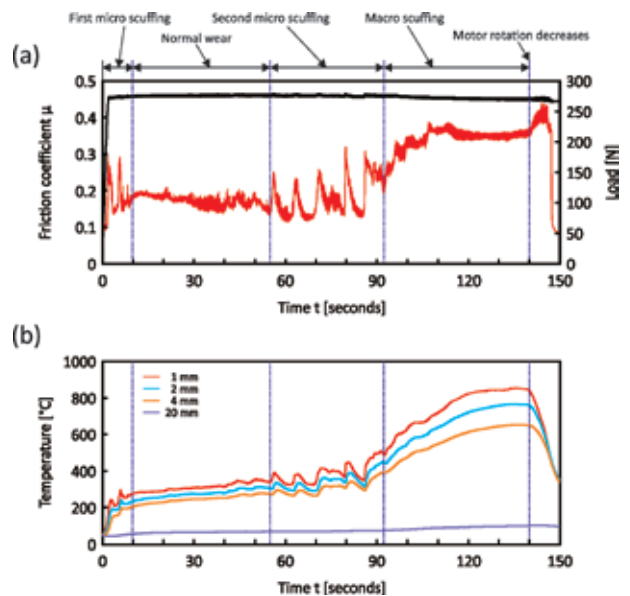


図2 焼付き試験における摩擦係数及び摩擦面温度⁵⁾

を示す。画像中のサファイアリングの滑り方向は左から右である。XRD スペクトルについて, 回折角が11.3°あたりのピークはオーステナイトの(111)面, 11.6°あたりのピークは鋼の母材であるマルテンサイトの(110)面, そして13.2°あたりにあるピークはオーステナイトの(200)面を意味している。可視光像を見ると, 表面の色が均一となっている領域が存在しているが, これは表面が塑性流動している様子を表している。この部分と同じ場所では近赤外光が強い強度を有しており, 1,000°C以上の高温

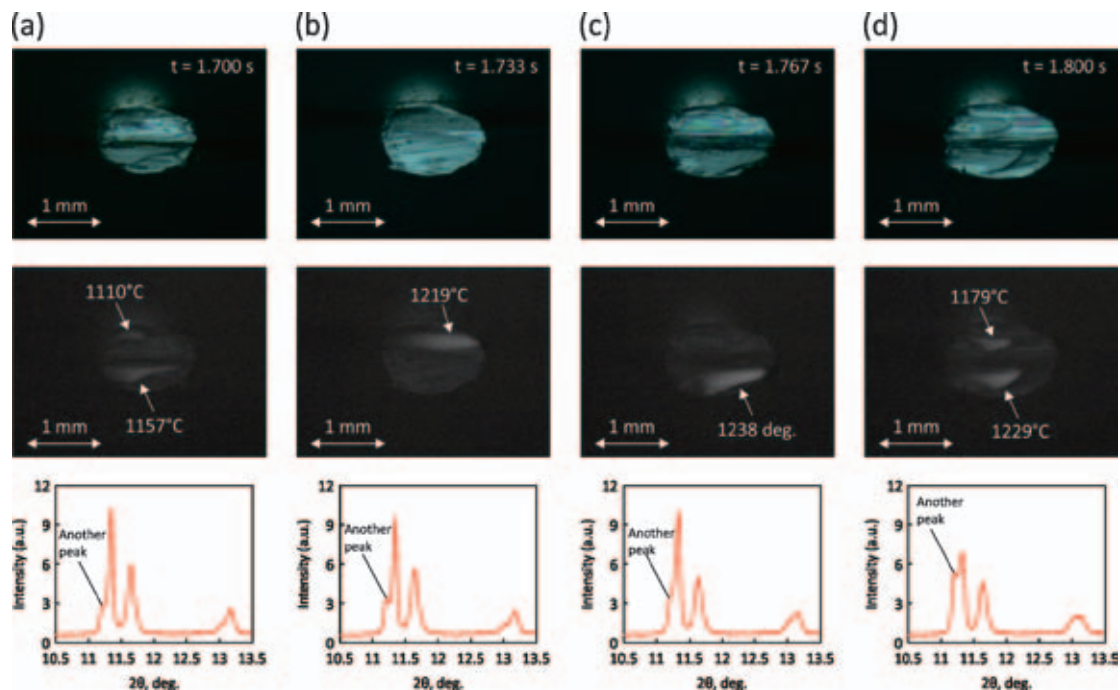


図3 Micro scuffing 中における摩擦面可視光像，近赤外光像及び XRD スペクトル⁵⁾

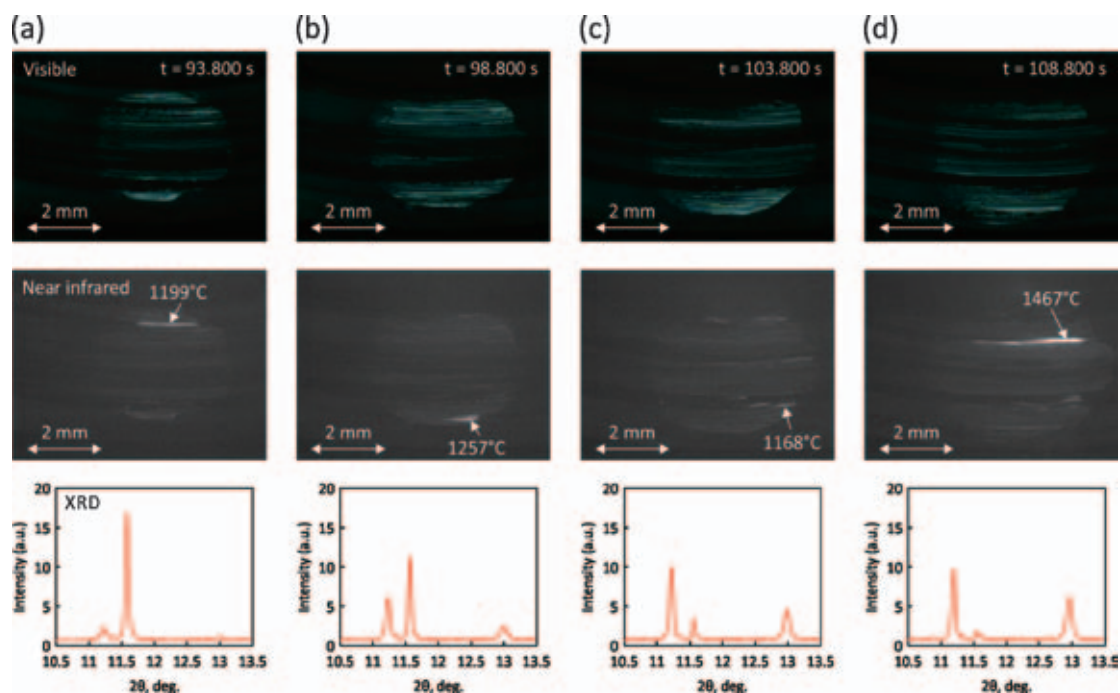


図4 Macro scuffing 中における摩擦面可視光像，近赤外光像及び XRD スペクトル⁵⁾

になっている。この塑性流動の現象速度は、本実験の観察システムの時間分解能（秒間 30 枚撮影）よりも大幅に速く、その挙動の詳細を追うことができず、フレームごとに発生場所や形状が全く異なっている。XRD スペクトルを見ると、母材であるマル

テンサイトよりも、オーステナイトのピークが高くなっている。FCC (Face-Centered Cubic) 構造であるオーステナイトの変態開始温度は 750°C あたりであるが、図 2 (b) に示す熱電対の温度は、300°C にも到達していない。また、この区間で変態したオー

ステナイトは、1度目の micro scuffing が取まるとマルテンサイトへと戻るため、このオーステナイトへの変態は、塑性流動部での瞬間的な温度上昇に起因するものと考えている。図中のオーステナイトのピークの低角側にショルダーが確認されるが、これは塑性流動部での瞬間的な温度上昇を示していると考えている。

図4に macro scuffing 中における可視光像、近赤外光像、そして XRD スペクトルを示す。実験開始90秒過ぎの macro scuffing 開始直後では、鋼表面の結晶の大部分はマルテンサイトであるが、macro scuffing 開始に伴い、オーステナイトへと変態していく。この変態要因は、近赤外光像で観察される瞬間的な高温発熱も関係しているのは明らかであるが、熱電対が示す温度が単調的に上昇していることから、ピン全体の温度が変態温度にまで到達したためであると考えられる。この macro scuffing 中は、摩擦面が連続的に拡大し、表面が軟化している様子が可視光及び近赤外光像からも分かる。

以上のように、放射光 X 線回折を可視光、近赤外光画像の撮影システムと組み合わせた焼付き現象のその場観察の結果、micro scuffing と macro scuffing の2種類に大別できる焼付き現象が起こると、表面では鋼の相変態が起こっていることが明らかとなった。パルス状の摩擦係数の上昇が起こる micro scuffing では、瞬間的表面塑性流動に伴う高温発熱及びそれに伴う相変態が起こり、連続的な摩擦係数の上昇が意味する macro scuffing では、瞬間的な塑性流動だけでなく、摩擦面全体が拡大する軟化現象が起こっていることが分かった。

4 おわりに

以上のように、本報では著者らの研究グループが

開発した放射光による摩擦面その場 XRD 観察システムの紹介を行い、焼付き発生中における摩擦面の状態を説明した。しゅう動面での焼付き現象は、物理的、化学、材料科学の現象が複雑に絡み合った現象であるが、本その場分析により、表面材料の降伏過程を詳細に明らかにすることができた。本報では説明を割愛したが、本その場 XRD 観察システムでは、XRD スペクトルから、しゅう動面の温度を計測をすることや、鋼中に含まれている炭化物の分解を識別することも可能である⁴⁾。詳細は、原著を参照されたい。XRD のスペクトルはこの他多くの情報を有する可能性を秘めているため、今後も本観察方法を発展させていく予定である。

謝辞

本報で紹介しました研究成果は、トヨタ自動車(株)及び(株)豊田中央研究所との共同研究によって行われたものです。本研究に参画いただきました関係各位に深くお礼申し上げます。また、放射光を用いた実験は(公社)高輝度光科学研究センターの承認の元で、SPring-8 BL33XU で実施しました(課題番号 2013B7021)。

参考文献

- 1) Yagi, K., *et al.*, *Tribol Lett.*, **43**, 361-368 (2011)
- 2) Li, H., *et al.*, *Tribol Online.*, **8**, 285-294 (2013)
- 3) Cullity, B. D., *Elements of X-ray diffraction*, 2nd edn. (Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, Massachusetts, 1978)
- 4) Kajita, S., *et al.*, *Tribol Lett.*, **57**, 6 (2015)
- 5) Yagi, K., *et al.*, *Tribol Lett.*, **61**, 19 (2016)
- 6) Hirose, Y., TOYOTA beamline BL33XU. In: *SPring-8 Research Frontiers* 2009. 170 (2010)
- 7) Nonaka, T., *et al.*, *AIP Conf Proc.*, **1741**, 030043 (2016)