

摩擦界面 in situ 観察による鋳鉄のトライボロジー過程の可視化

長谷 亜蘭

埼玉工業大学工学部機械工学科

alan_hase@sit.ac.jp

Visualization of Tribological Process in Cast Iron Using In Situ Observation of Sliding Interface

Alan HASE

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology

Abstract

Although an observation of sliding surfaces and a measurement of the amount of wear are performed generally in order to evaluate tribological characteristics, we don't know how tribological phenomena (friction and wear phenomena) change between sliding surfaces. Especially for tribological phenomena of cast iron under not only unlubricated and grease lubricated condition, the behavior of graphite and grease between the sliding surfaces and the influence of them into friction and wear have not been clarified. This study attempts to visualize and elucidate tribological phenomena for a flake graphite cast iron (FC) and a spheroidal graphite cast iron (FCD) were examined with a frictional surface microscope. It was found from the in-situ observations that the graphite inside the cast iron is extruded to the sliding surface by frictional stress. The frictional force changed by the coagulation of grease and graphite. In addition, wear debris came out from an edge of the surface surrounding graphite and frictional force increased at deformation and fracture of them.

Key Words: tribology, friction and wear mechanism, sliding friction, in situ observation, cast iron

1. 緒言

鋳鉄は、その黒鉛含有状態（黒鉛の大きさ、形状、分布状態）によって、トライボロジー特性が大きく異なる。鋳鉄は機械システム摺動部の機械要素部品としても多く使用されており、そのトライボロジー過程（摩擦・摩耗メカニズム）を明らかにすることは、材料選択するうえでとても重要である。

これまで筆者は、摩擦面顕微鏡¹⁾を用いて

摩擦界面の側方からの in situ 観察（その場観察）を行い、様々な実用材料のトライボロジー過程の可視化調査・解明を行ってきた²⁻⁵⁾。また、in situ 観察とアコースティックエミッション（AE：材料の変形・破壊時に生じる弾性応力波を検出する非破壊検査手法）信号計測⁶⁾を同時に行う in situ 観察・AE計測法を用いて、複合材料などの複雑なトライボロジー過程の可視化とトライボロジー特性評

価への有用性を示している^{7,8)}.

本研究では、鋳鉄の黒鉛含有状態によるトライボロジー過程の違いを調査するため、摩擦界面 in situ 観察（一部、AE 信号も計測）によって片状黒鉛鋳鉄（FC 材）と球状黒鉛鋳鉄（FCD 材）の摩擦・摩耗現象の可視化および評価を試みた。また、潤滑の有無による黒鉛や摩耗粒子の挙動およびそれらの摩擦抵抗に及ぼす影響などについては明確にされていないため、無潤滑およびちょう度が異なるグリース潤滑での実験を実施した。本稿では、FC 材と FCD 材における摩擦表面下の变形・破壊過程、黒鉛の排出過程、その排出された黒鉛および摩耗粒子の摩擦界面での挙動を可視化し、計測した摩擦抵抗変化や AE 信号との関係について得られた知見を述べる。

2. In situ 観察装置および実験方法

図1は、本実験で使用した in situ 観察装置（摩擦面顕微鏡）の外観である。図2は、装置計測システムの概略図であり、in situ 観察と同時に摩擦抵抗および AE 信号計測が可能な構成となっている。摩擦系はピン・オン・ブロック型とし、顕微鏡観察視野内に摩擦系を設置することによって、摩擦界面で生じる摩擦・摩耗現象を拡大観察することができる。本実験では、垂直荷重

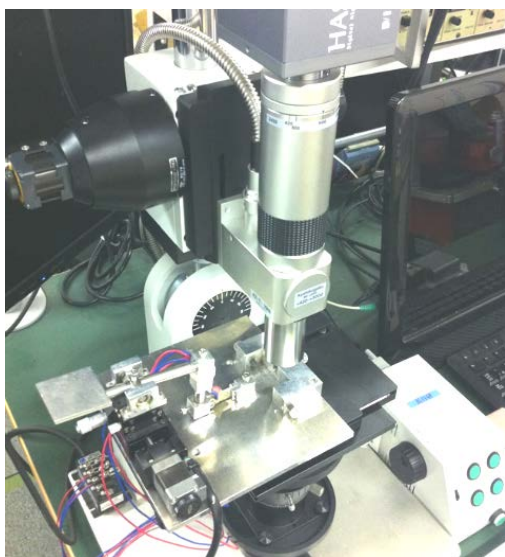


Fig. 1 Appearance of the experimental setup.

をてこ式リンク機構を介して錘によって与え、摩擦抵抗をピン試験片固定部の板ばねに取り付けたひずみゲージにより計測した。AE センサは、広帯域型（周波数特性：1~4 MHz）の AE センサを使用した。AE センサからの出力信号は、AE 増幅率 90dB で増幅後、ノイズ除去および摩擦抵抗に関する信号取得のため 500 kHz のハイパスフィルタ処理を行った。

本実験では、ピン試験片として硬鋼線材（SWRH62A）を用い、アルミニウム合金製のピン先端に取り付けて使用した。ブロック試験片には、片状黒鉛鋳鉄（FC250, 273HV）と球状黒鉛鋳鉄（FCD600, 295HV）を用いた。

両試験片の摩擦面を研磨紙（#2000）で仕上げ、アセトン中で超音波洗浄した後に供試した。垂直荷重 10 N、摩擦速度 10~100 μm/s とし、無潤滑およびグリース潤滑下（0.1 mg を最初に塗布）で往復摩擦させた。グリース潤滑下の実験では、ちょう度の異なるグリース（ちょう度：60, 120）を用いて比較している。表1は、本実験における試験片詳細および摩擦条件である。

3. 実験結果および論議

3.1. 無潤滑下のトライボロジー過程の可視化

図3は、FC 材の 60 回摩擦後の in situ 観察像を示している。この観察結果より、摩擦面直下が塑性変形していると同時に、摩擦応力によって内部の黒鉛が排出している様子が確認できる。この黒鉛の排出は、1 回目の摩擦から観察され、

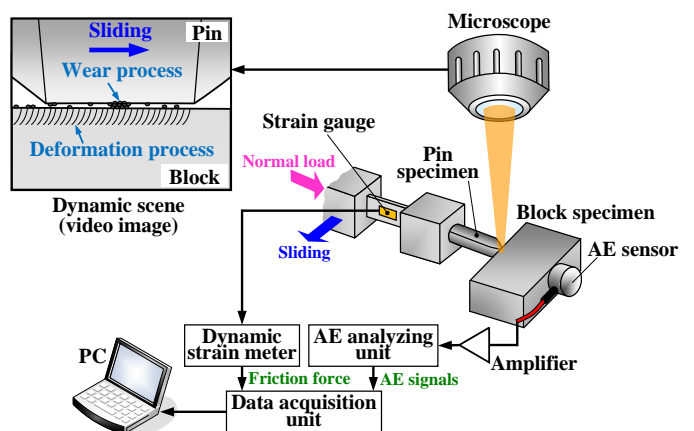

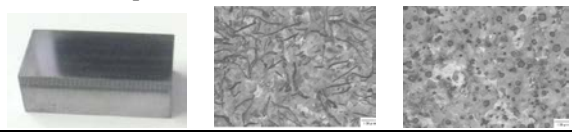


Fig. 2 Schematic diagram of the in situ observation and AE measuring system.

Table 1 Summary of the specimens and sliding condition

Pin specimen	Hard steel wire (SWRH62A) [$\phi 0.8$ mm \times 5 mm] 
Block specimen	Flake graphite cast iron (FC250) and spheroidal graphite cast iron (FCD600) [15 mm \times 30 mm \times 10 mm] 
Normal load	10 N
Sliding velocity	50 ~ 100 μ m/s
Number of sliding	~ 200 times (repeated)
Atmosphere	at room temperature, in open air under unlubricated or grease lubricated condition (0.1 mg)

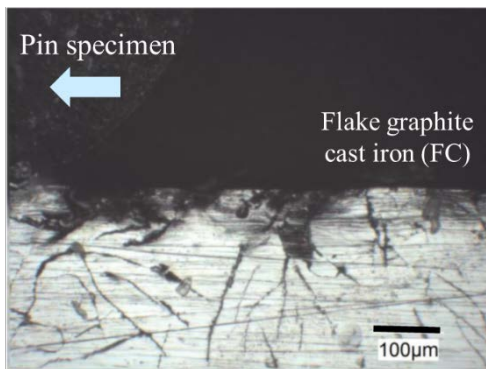


Fig. 3 In situ observation image for the flake graphite cast iron (FC).

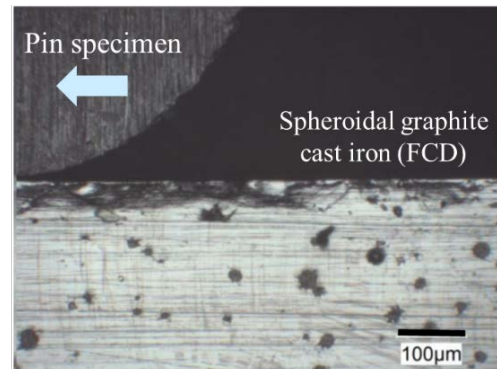


Fig. 5 In situ observation image for the spheroidal graphite cast iron (FCD).

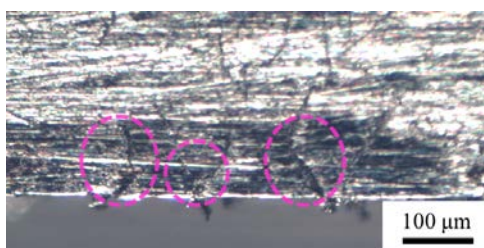


Fig. 4 Micrograph of the worn surface for the block specimen of the flake graphite cast iron (FC): the dotted circles show the parts that the graphite was extruded by frictional stress.



Fig. 6 Micrograph of the worn surface for the block specimen of the spheroidal graphite cast iron (FCD).

排出した黒鉛が摩擦界面に介入していく様子も確認された。図4は、FC材の摩擦実験後の摩擦面を観察した結果である。点線で囲まれた部分は、黒鉛繊維が存在する箇所を示しており、そ

こから排出した黒鉛が摩擦面全体に付着していることがわかる。また、in situ 観察の映像から、黒鉛繊維の上をピン試験片が通過する際に、摩擦力が低下して摩擦速度が上昇する様子も確認された。これは、摩擦面に排出した黒鉛による

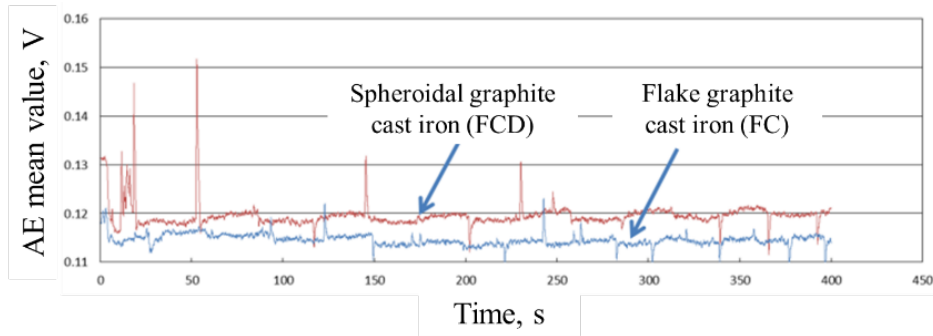


Fig. 7 Comparison of the AE signal level (AE mean value) in two kinds of different cast irons (FC and FCD).

潤滑効果が原因といえる。

図5は、FCD材の60回摩擦後の *in situ* 観察像を示している。FCD材でも同様に、摩擦面直下が塑性変形しているが、その深さはFC材に比べ浅いことがわかる。図6は、FCD材の摩擦実験後の摩擦面を観察した結果である。これより、摩擦中に摩擦表面に接している球状黒鉛部からの黒鉛の排出が観察できる。FCD材における黒鉛の排出量は、図4で示すFC材に比べて少ないことがわかる。また、摩擦面直下の球状黒鉛間にき裂が発生する様子も観察された。

図7は、FC材とFCD材の摩擦実験中に計測したAE信号(AE平均値電圧)の比較結果である。これより、FCD材の方がFC材に比べてAE信号レベルが大きいことがわかる。これは、上で述べたように黒鉛の排出量の違いによる潤滑効果の違いが現れたと考える。摩擦実験後のピン試験片摩擦面を観察したところ、FC材よりもFCD材の方が凝着摩擦による損傷が大きかった。また、摩擦初期において大きな突発型のAE信号が生じているのは、摩擦面直下の球状黒鉛間で発生するき裂の生成を捉えたものと考えられる。

図8は、FC材における往復時の *in situ* 観察像とそれに対応する摩擦係数変化を示している。それぞれ往路(上図)と復路(下図)の変化を細かく示している。ここで、復路に関しては摩擦係数との対応をわかりやすくするため、*in situ* 観察画像を左右反転させている。往路のように

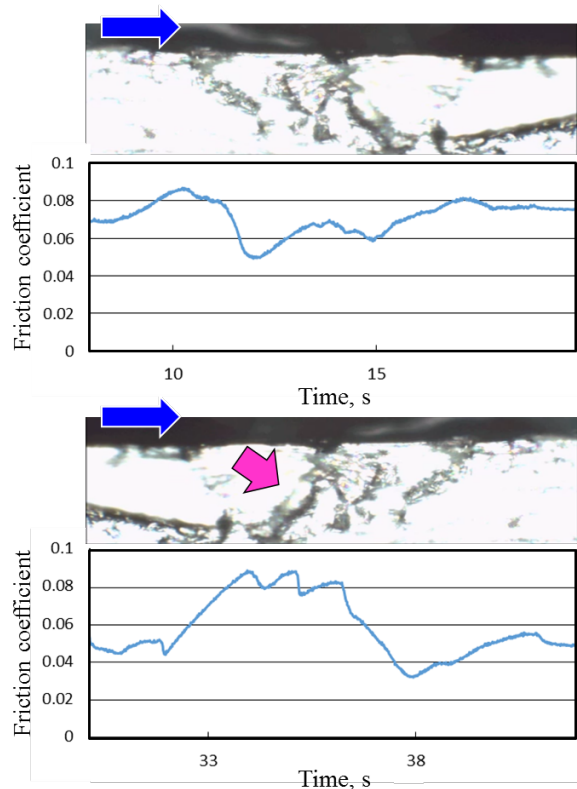


Fig. 8 In situ observation images and changes in friction coefficient for the flake graphite cast iron (FC) in way (upper) and way back (below).

黒鉛繊維が対向している場合は、黒鉛繊維の上を通過する際に摩擦係数が減少し、復路では黒鉛繊維を押し出す際の抵抗が摩擦係数の増加に寄与していることがわかる。黒鉛が排出した後は、先に述べた黒鉛の潤滑効果によって摩擦係数が大きく減少する。したがって、黒鉛繊維の

配向により、摩擦係数の挙動が変化することが確認された。

3.2. グリース潤滑下のトライボロジー過程の可視化

図9は、FC材のグリース稠度120での in situ 観察結果とそれに対応した摩擦係数変化である。無潤滑下で見られる現象と同様、摩擦に伴い黒鉛の排出する様子がグリース潤滑下でも確認された。この排出した黒鉛は、グリース中に分散していくことがわかった。また、黒鉛部周辺から金属片が破壊する様子を確認した。こ

の黒鉛部周辺通過時の摩擦係数変化から、黒鉛粒子および数 μm の金属摩耗粒子の摩擦界面への介入により、摩擦抵抗が上昇することがわかった（摩擦11回目以降）。これらの結果は、FCD材においても同じであった。

図10は、FCD材のグリース稠度60での in situ 観察結果とそれに対応した摩擦抵抗変化を示している。これより、摩擦11回目まで摩擦係数が上昇し、それ以降は一定となっている。摩擦4回目の in situ 観察像からわかるように、硬いグリースの凝集する様子が確認された。こ

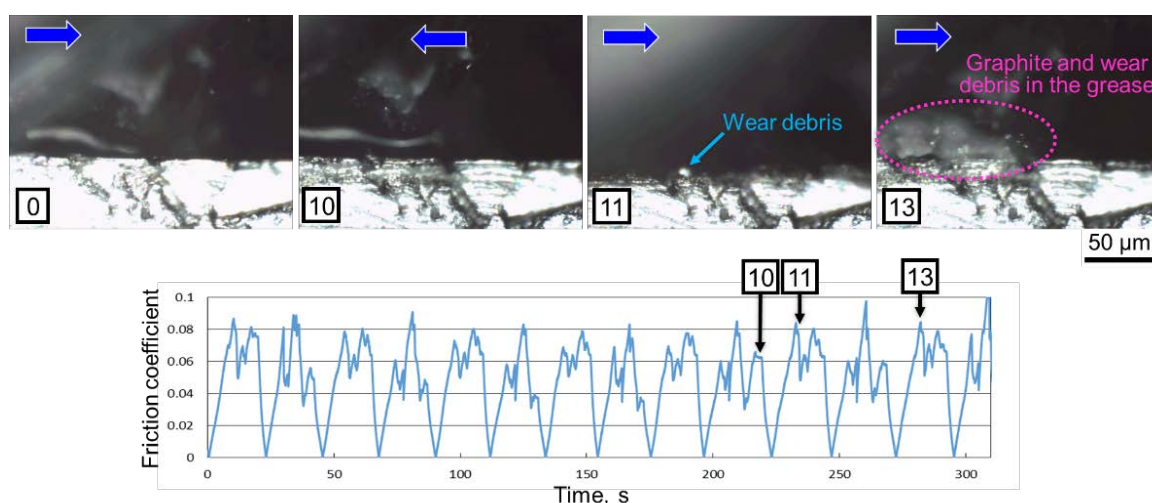


Fig. 9 In situ observation images and the fluctuation of friction coefficient for the flake graphite cast iron (grease consistency: 120).

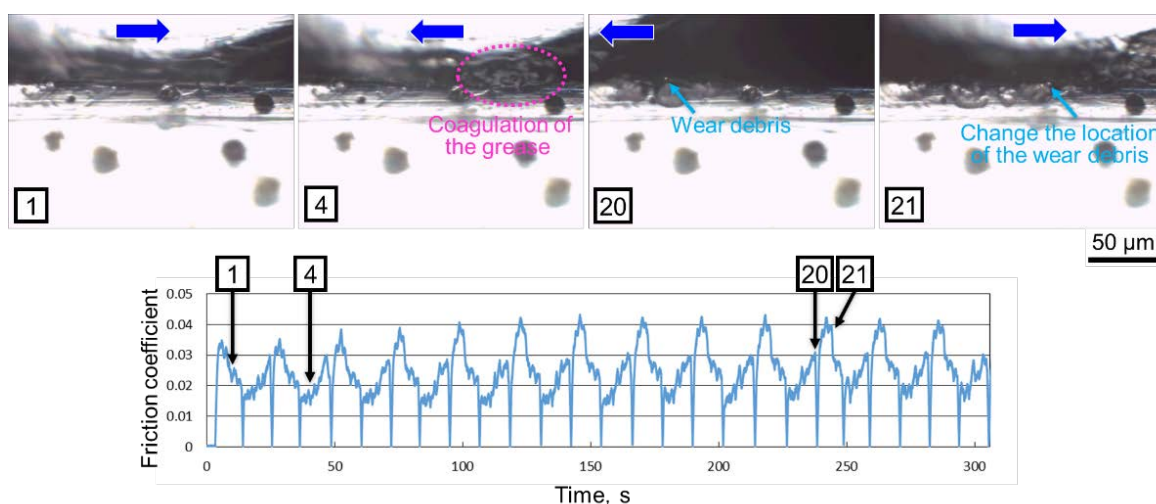


Fig. 10 In situ observation images and the fluctuation of friction coefficient for the spheroidal graphite cast iron (grease consistency: 60).

れに、排出した黒鉛が捕捉されて摩擦部周辺に留まることで摩擦抵抗が上昇する結果を招いたと考える。一方、グリースちょう度 120 では黒鉛がグリース中に分散しやすいことが確認され、摩擦界面に黒鉛が入りにくい状況となることがわかった。

4. 結 言

本研究では、摩擦面顕微鏡を用いた摩擦界面の in situ 観察により、鋳鉄 (FC 材と FCD 材) の黒鉛含有状態および潤滑有無によるトライボロジー過程の可視化・調査を行った。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 組織の違いによる変形・破壊過程 (黒鉛の摩擦面への排出過程とその潤滑効果) を確認した。また、この黒鉛の排出過程と潤滑効果の違いが、摩擦係数および AE 平均値の大きさの違いとして現れることがわかった。
- (2) 摩擦表面直下の黒鉛繊維の配向により、摩擦係数の挙動が大きく変化することがわかった。黒鉛繊維を押し出す際の抵抗が摩擦係数の増加として現れ、黒鉛の上を通過する際に摩擦係数が減少する。
- (3) 表面近傍の黒鉛組織の端部が破壊することで金属摩耗粒子が生成し、その摩耗粒子が摩擦界面に入ることによって摩擦抵抗が上昇することがわかった。
- (4) 摩擦過程で排出した黒鉛がグリース中に分散していく様子を確認した。その黒鉛の分散状態は、黒鉛含有状態やグリースちょう度で異なり、黒鉛の摩擦界面への介入によって摩擦抵抗が変化することを明らかにした。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、供試材料およびグリースをご提供いただきました株式会社日立製作所 佐藤 五郎 氏, 中山 真人 氏, 堂蘭 美礼 氏, 松岡 秀佳 氏, 吉川 敏文 氏, 野口 直昭 氏に御礼申し上げます。また、実験補助いただいた埼玉工業大学工学部機械工学科 池田 泰成 氏, 中村 憲央 氏, 黒沢 義昭 氏, 米田 拓未

氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 長谷亜蘭, 三科博司: トライボロジー現象可視化のための小型摩擦面顕微鏡の設計・製作, 埼玉工業大学工学部紀要, 第 22 号 (2012) pp. 13-16.
- 2) 長谷亜蘭, 和田正毅, 三科博司: 摩擦・摩耗の素過程で生じるアコースティックエミッション (摩擦面の in-situ 観察と AE 信号), 日本機械学会論文集 C 編, 74, 748 (2008) pp. 3042-3049.
- 3) 長谷亜蘭: 摩耗の可視化技術—その場観察による研究事例とその動向—, トライボロジー会議予稿集 東京 2014-5, (2014) pp. 378-380.
- 4) 長谷亜蘭: In situ 観察・AE 計測法を用いた異種 DLC 膜のトライボロジー特性評価, 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「機能的ナノ材料による新規な表面・バイオセンシング技術の創出」平成 27 年度 研究成果報告書, (2016) pp. 14-15.
- 5) 長谷亜蘭: In situ 観察・AE 計測法によるマイクロ切削現象の可視化・評価, 第 14 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, (2016) pp. 144-145.
- 6) 長谷亜蘭: アコースティックエミッション計測の基礎, 精密工学会誌, 78, 10 (2012) pp. 856-861.
- 7) A. Hase, K. Mizuta, Y. Nishizawa, K. Sugimoto, K. Okayama: Visualization and Evaluation of Friction and Wear Phenomena for Brake Pads Using In Situ Observation and Acoustic Emission Measurement Method, Proc. of EuroBrake 2015, Dresden, EB2015-FID-004 (2015).
- 8) A. Hase, K. Mizuta, Y. Nishizawa, K. Sugimoto, K. Okayama: Evaluation of Frictional Properties for Brake Pads Using High-speed In Situ Observation and Acoustic Emission Measurement Method, Proc. of EuroBrake 2016, Milan, EB2016-SVM-060 (2016).