

令和元年6月15日現在

機関番号：32410

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18003

研究課題名(和文) 高速in situ観察・AE計測によるブレーキ摩擦材料のトライボロジー特性評価

研究課題名(英文) Evaluation of Tribological Properties for Brake Friction Materials by High-speed In Situ Observation and AE Measurement

研究代表者

長谷 亜蘭 (Hase, Alan)

埼玉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：10552953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ブレーキ摩擦界面で起こる複雑なトライボロジー(摩擦・摩耗)現象を直接観察した映像と同時計測した定量データを紐付けし、配合の違いによって現れる現象に対応したアコースティックエミッション(AE：材料の変形・破壊で生じる弾性波)信号の特徴を明らかにした。また、水および固体潤滑剤の介在時や高温環境下のブレーキ摩擦界面で起こる変形・破壊過程を可視化し、トライボロジー特性(摩擦・摩耗特性)とAE信号の相関関係を整理した。さらに、ブレーキ摩擦材料におけるAE信号-トライボロジー特性マップを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

摩擦中のブレーキ摩擦材料の摩擦・摩耗特性を左右する諸因子(ブレーキパッド材料表層部の硬質粒子や金属繊維、ブレーキロータ材料内部の黒鉛および組織、摩擦界面に介在する水や潤滑剤など)の実挙動を可視化して得られた知見は、今後のブレーキ摩擦材料の開発に有用な情報となる。

本研究で得られたAE信号-トライボロジー特性マップなどの相関関係を活用することにより、AE計測を用いたブレーキ摩擦材料のインプロセスでの評価が可能になり、最適な配合比の決定やNV(騒音・振動)の問題解決などに応用できる。

研究成果の概要(英文)：By linking the directly observed video images of the complex tribological phenomena (friction and wear phenomena) that occur at the brake friction interface with the measured quantitative data, the features of the acoustic emission (AE: elastic waves resulting from deformation and fracture of materials) signals corresponding to the phenomenon that appears due to the composition were clarified. In addition, the correlations between tribological properties and AE signals were revealed by visualizing the deformation and fracture processes that occur at the brake friction interface in the presence of water and lubricant or at high temperature environment. Furthermore, the correlation map of AE frequency spectra for brake friction materials was proposed.

研究分野：トライボロジー

キーワード：トライボロジー アコースティックエミッション ブレーキパッド 可視化 in situ観察 摩擦・摩耗特性 潤滑 高温環境

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

ブレーキパッド材料は複合材料であり、その配合によって摩擦界面で起こるトライボロジー（摩擦・摩耗）現象は大きく変化する（図1）。その複雑さから、トライボロジー特性に対する最適な配合比などに関しては明確にされていない。特に、安全な制動力を確保しながら安定した摩擦特性が要求されるとともに、高い耐摩耗性が要求される。ブレーキパッド材料の組成によっては、使用状況や環境によりトライボロジー現象が大きく変化するため、これらの要求を十分に満たす配合の最適化は困難とされている。そこで、最適な配合比を見いだすためにも、配合の違いがトライボロジー現象にどのような影響を与えているかを的確に評価する手法が必要である。

本研究では、アコースティックエミッション法（AE法：材料の変形・破壊時に生じる弾性波を検出して材料の評価診断を行う非破壊検査手法の一つ）を利用し、ブレーキパッド材料のトライボロジー特性を評価することを考えた。AE法は変形・破壊現象で生じたAE波から直接情報を得るため、摩擦力や振動加速度の変化で捉えることのできない微視的なトライボロジー現象の情報が得られる。しかしながら、変形・破壊現象とAE信号の詳細な対応関係に関しては明らかにされていない部分が多く、実用化への課題として残されている。

ブレーキ摩擦材料の摩擦界面では、アブレイブ現象（削り取られる摩耗）や凝着現象（くっついて千切れる摩耗）、摩擦被膜のはく離などが起こり、これらの現象によって様々なAE波が発生している（図1中の①～③AE）。過去の研究から、アブレイブ現象では低周波に周波数のピークが現れ、凝着現象では高周波に周波数ピークが現れることが様々な実験で確認されている。この知見を応用すれば、AE信号の周波数解析・信号弁別から複雑なブレーキ摩擦材料のトライボロジー特性を評価できると期待し、本研究を遂行した。

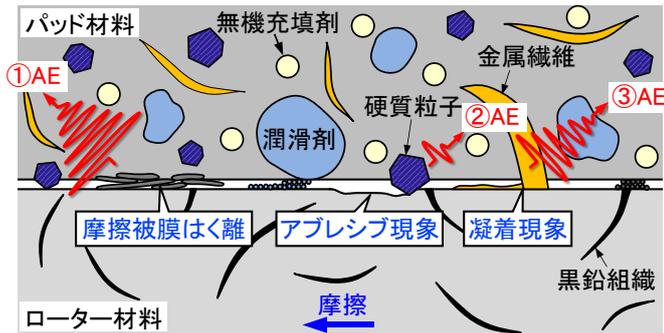


図1 ブレーキ摩擦材料におけるトライボロジー現象とAE信号原の概略図

### 2. 研究の目的

本研究では、ブレーキ摩擦界面で起こる各変形・破壊現象をその場観察（in situ 観察）した映像と同時計測したAE信号の対応関係を詳細に調査し、AE法を用いたブレーキ摩擦材料のトライボロジー現象の評価技術の確立を目指した。主な目的は、下記の通りである。

- 目的 1) ブレーキ摩擦材料のアブレイブ現象時、凝着現象時、摩擦被膜の形成・はく離時に検出されるAE信号波形の特徴を見だし、その理論的裏付けを明らかにする。
- 目的 2) 各現象で検出されるAE信号の特徴をまとめ、AE信号-トライボロジー特性マップを作成する。これより、計測されたAE信号の特徴から、摩擦界面で生じた現象の特定が可能となる。
- 目的 3) 摩擦条件（荷重、摩擦速度、摩擦面温度、水雰囲気など）の違いが、トライボロジー現象およびAE信号へ及ぼす影響について明らかにする。
- 目的 4) 摩擦特性（摩擦係数）や摩耗特性（表面粗さ、摩耗量など）とAEパラメータ（AE平均値電圧やAEエネルギーなど）の定量的関係を見だし、AE波形解析およびAEパラメータによる評価方法の検討を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 摩擦面顕微鏡を用いた in situ 観察実験

図2は、ピン・オン・ブロック型の摩擦系を顕微鏡観察視野内に設置した摩擦面顕微鏡（in situ 観察装置）の概略である。ピン試験片にブレーキロータ材料の鋳鉄を使用し、ブロック試験片に単純配合のブレーキパッド材料を使用した。また、ブロック試験片に鋳鉄を使用した実験も一部で実施した。広帯域型AEセンサをブレーキパッド材料側（一部の実験で鋳鉄側）に設置し、摩擦中のAE信号（AE信号原波形およびAE平均値電圧）の計測を行った。摩擦力は、ピン試験片固定部の板ばねに貼り付けたひずみゲージを用いて計測した。ピン先端形状を半球状や平坦に成形することで、点接触に近い状態での巨視的な変形・破壊現象や接触面積を増やした実機に近い状態での微視的な変形・破壊現象を対象とした実験を実施した。顕微鏡に搭載した高速カメラによって摩擦中の様子を録画し、それに同期させて計測データとの対応を調査した。

#### (2) ピン・オン・ディスク型摩擦試験機を用いた長距離摩擦実験

図3は、長距離摩擦実験に使用したピン・オン・ディスク型摩擦試験機の概観である。ピン試験片にブレーキパッド材料を使用し、ディスク試験片にブレーキロータ材料の鋳鉄を使用した。広帯域型AEセンサをブレーキパッド材料摩擦面の反対側に設置し、摩擦中のAE信号の計測を行った。さらに、摩擦界面側方から高速カメラを用いて摩擦中の様子を録画できるようにした。ここでは、摩擦力、変位、ディスク摩擦面温度、振動加速度、AE信号を同時計測し、総合的な評価を行った。

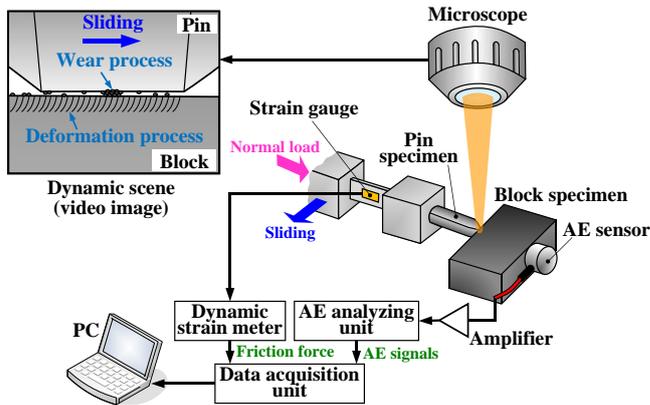


図2 In situ 観察・AE 計測実験装置の概略図

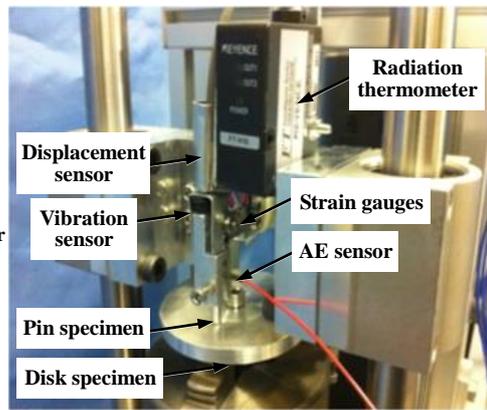


図3 ピン・オン・ディスク型摩擦試験機の概略図

上記の二つの実験では、単純配合の7種類のブレーキパッド材料〔基本的な材料のみで構成されたベースパッド材 (R)、硬質粒子を配合した3種類のアブレシブ系 (Ab1 : ZrO<sub>2</sub> 10 μm、Ab2 : ZrO<sub>2</sub> 45 μm、Ab3 : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 12-13 μm)、金属繊維を配合した3種類の凝着系 (Ad1 : Fe、Ad2 : Cu、Ad3 : Fe 多量)] を使用した。両試験片の摩擦面は、試験ごとに2000番の研磨紙で表面を整えて供試した。AE信号に関しては、AEセンサからの信号をプリアンプとディスクリミネータにより総合利得で50~90 dB増幅した。さらに、摩擦・摩耗現象に関係しないノイズ信号を除去するため、AEフィルタによりハイパスフィルタ処理を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) ブレーキパッド摩擦面におけるトライボロジー過程とAE信号変化

図4および図5は、摩擦履歴の違いによって生じるトライボロジー過程とAE信号変化を調査した結果である。実機を模擬した摩擦試験における安定時と不安定時のアブレシブ系パッド材 (Ab3) をそれぞれ切り出し、比較のためのin situ観察実験を実施した。

図4の安定時には、摩擦開始とともに摩擦係数は上昇し、すべり摩擦が進行していく。相手材料のピン先端が通過する際、図4の点線部で示す摩擦面直下の材料組織内でき裂(すべり変形)が生じ、変形が進行していく様子が確認された。その過程で、摩擦面直下の材料組織の変形に伴って摩擦係数が上昇する傾向がみられた。また、材料組織にき裂(すべり変形)が進展し、その変形・破壊時の応力解放によって摩擦係数が降下することがわかった。これと同時に、摩擦面表層部では数十μmの摩耗粒子の生成も確認されている。摩擦応力に対して、材料組織の黒色・茶褐色部および繊維部は強く、弱い白色部ですべりが進展し、変形・破壊していく様子が全体の傾向として観察された。この一連の変形・破壊過程は、ベースパッド材や凝着系パッド材、他のアブレシブ系パッド材を用いた場合でも、基本的なトライボロジー現象として観察される。

また、鋳鉄の摩擦時にその摩擦表面下から黒鉛が排出され、摩擦

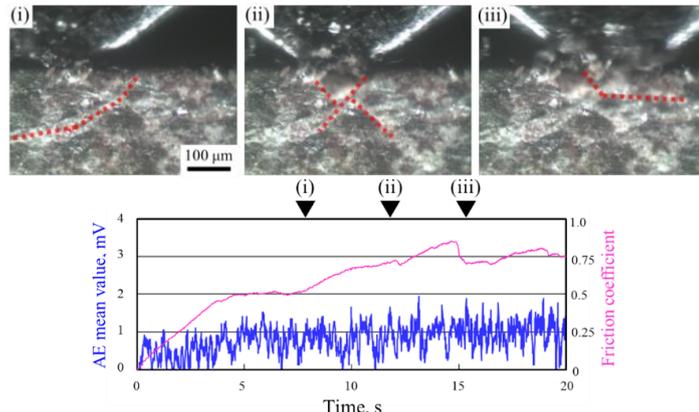


図4 ブレーキパッド安定時の摩擦界面 in situ 観察像およびAE 平均値電圧と摩擦係数の変化

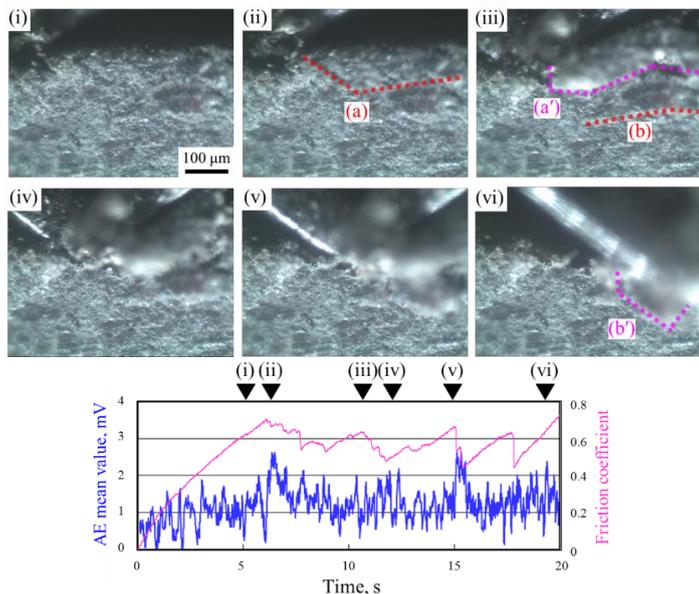


図5 ブレーキパッド不安定時の摩擦界面 in situ 観察像およびAE 平均値電圧と摩擦係数の変化

面上に残留することで摩擦係数が低下し、摩擦が安定化することが確認されている。

図5の不安定時では、パッド材の摩擦面が硬く変形しにくいことが確認された。実機を模擬した摩擦試験においても微細な摩耗粒子が集合・圧縮した摩擦面が観察されていることから、安定時に生成する微細な摩耗粒子が摩擦表面で堆積・圧縮されることで硬質のトライボ被膜が形成されたと考える。このトライボ被膜が、図5の点線部で示す境界からはく離していく様子が観察された。実機を模擬した摩擦試験では、このトライボ被膜の破壊過程による変化が摩擦係数に現れない。しかし、図5のAE平均値電圧の変動が図4と比較して大きくなっているように、トライボ被膜の破壊過程をAE計測によって

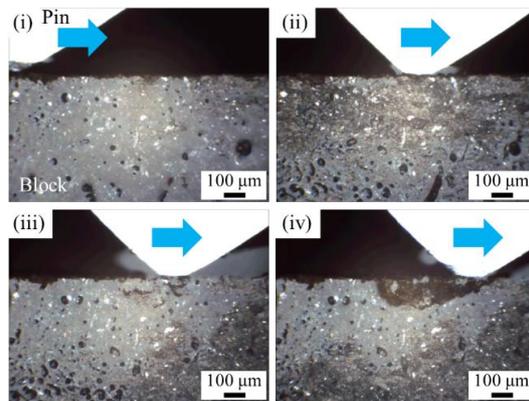


図6 水介在時の in situ 観察像

検知できることがわかった。したがって、摩擦係数で検知できない微視的なブレーキ摩擦界面のトライボロジー過程をAE計測によってインプロセスで認識できることが明らかになった。

図6は、アブレイブ系パッド材 (Ab1) の水介在時のその場観察の結果である。上述したように、無潤滑時には摩擦応力の作用によってブレーキパッド摩擦表面下の弱い部分ですべり変形が生じる。水介在時も摩擦初期は無潤滑時と同様の変形過程が確認された [図6 (i)、(ii)]。その後、変形が生じた部分で大きな変形に進展していく様子がみられた [図6 (iii)、(iv)]。これは、すべり変形が生じたすき間に水が浸透し、表層部が軟化した影響と考える。この際、摩擦力が上昇して摩耗も増加することが確認され、AE平均値電圧の変動が大きくなることがわかった。一方、潤滑剤使用時には摩擦応力が小さくなるため、摩擦力およびAE平均値電圧の変化が小さくなることがわかった。

## (2) ブレーキパッド配合材の違いによるAE信号波形周波数スペクトルの特徴

トライボロジー現象下で発生するAE波は、摩擦表面の様々な変形・破壊で生じるAE波が重畳している。AE信号原波形の周波数解析により、複雑なAE信号成分の特徴抽出が可能となる。

図7は、ベースパッド材 (R)、アブレイブ系パッド材 (Ab2)、凝着系パッド材 (Ad3) に関する特徴的な in situ 観察結果である。また図8は、その現象が観察された際に検出されたAE信号波形の周波数解析結果である。ベースパッド材では、基本的に摩擦中は、パッド内部において弾性的な変形が生じる様子が観察されるが、このときは大きな振幅のAE信号は検出されないことがわかった。他の材料に関しても、破壊を伴わないすべり摩擦時には、同様の結果が確認されている。摩擦を繰り返す過程で、ベースパッド材では摩擦表層部の組織の微視的な破壊が確認される [図7 (R) 円部分]。図8 (R) からわかるように、ベースパッド材の変形・破壊時には低周波のAE信号が計測される。アブレイブ系パッド材では、硬質粒子と思われるパッド表層部がローター摩擦面を掘り起こしていく様子が確認される [図7 (Ab2) 円部分]。このとき、図8 (Ab2) からわかるように、中周波領域に周波数ピークが現れるのが特徴といえる。凝着系パッド材では、金属繊維とピンの摩擦によって凝着摩耗が生じる過程が観察された [図7 (Ad3) 円部分]。このとき、図8 (Ad3) に示すように高周波領域に高い周波数ピークを確認することができた。さらに、先に述べた硬質トライボ被膜のはく離時には、高調波が発生することも確認されている。これら周波数の違いは、接触部で生じる変形・破壊の速度およびスケールによるAE波の立ち上がりの違いと考える。



図7 ベースパッド材 (R)、アブレイブ系パッド材 (Ab2)、凝着系パッド材 (Ad3) における in situ 観察結果

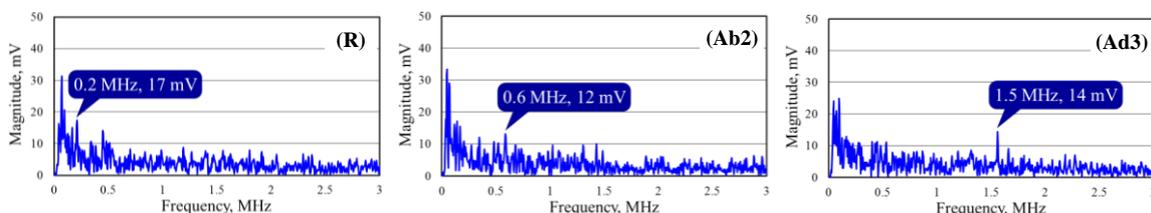


図8 ベースパッド材 (R)、アブレイブ系パッド材 (Ab2)、凝着系パッド材 (Ad3) における AE 信号波形の周波数解析結果

(3) ブレーキパッド材料におけるトライボロジー特性と AE 信号の相関

図 9 は、各計測データの平均値をブレーキパッド材料ごとに整理した結果である。青はベースパッド材 (R)、赤はアブレイブ系パッド材 (Ab1、Ab2、Ab3)、緑が凝着系パッド材 (Ad1、Ad2、Ad3) を示している。摩擦量において、濃い色がピン試験片、淡い色がディスク試験片の重量減となっている。まず、摩擦係数と AE 平均値に注目すると、凝着系パッド材 (Ad1) と (Ad2) で多少の違いはみられるが相関があるように思われる。つぎに摩擦量を比較すると、凝着系パッド材よりアブレイブ系パッド材の方がピン試験片からディスク試験片への攻撃性が高い傾向にあるが、凝着系パッド材 (Ad3) は例外であった。凝着系パッド材 (Ad3) に関しては、金属繊維の含有量が多いため、摩擦表面への金属繊維の露出面積が大きく、金属同士の摩擦・摩擦が激しくなったと考えられる。

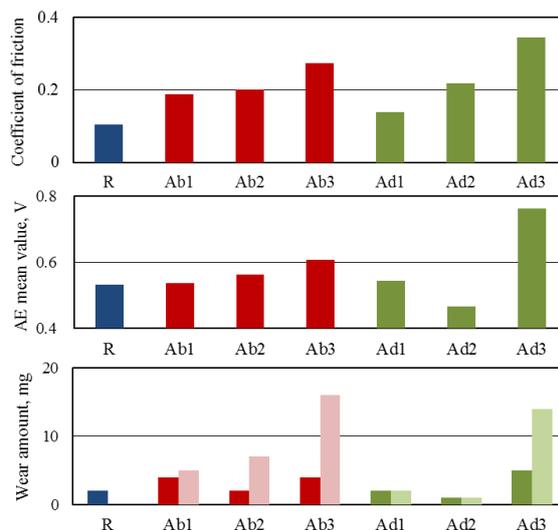


図 9 摩擦・摩擦特性と AE 信号振幅値の相関

図 10 は、摩擦係数と AE 平均値電圧の関係をプロットした結果である。この相関から、配合の異なるブレーキパッド材料の摩擦特性の評価が AE 信号計測によって可能になると考える。この摩擦係数と AE 平均値電圧の相関は、大規模の変形や摩擦が生じた結果として摩擦抵抗が大きくなるため、よい相関を示したといえる。最初にも述べたように、AE 信号には変形のみならず破壊に関わる情報も含まれるため、AE 計測ではブレーキ材料のトライボロジー特性を総合的に評価可能といえる。

図 11 は、本研究から得られた知見を基に作成した AE 信号-トライボロジー特性マップの一例である。ブレーキパッド配合材の違いや摩擦履歴の違いで得られた AE 信号波形周波数スペクトルの特徴を整理した。この特性マップを利用して AE 信号成分の弁別計測・評価を行うことによって、トライボロジー特性に寄与している摩擦界面の現象をインプロセスで認識・評価できるようになり、さらなる材料開発への活用が期待される。

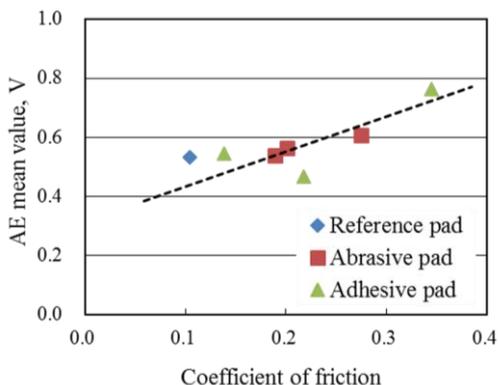


図 10 摩擦係数と AE 平均値電圧の相関

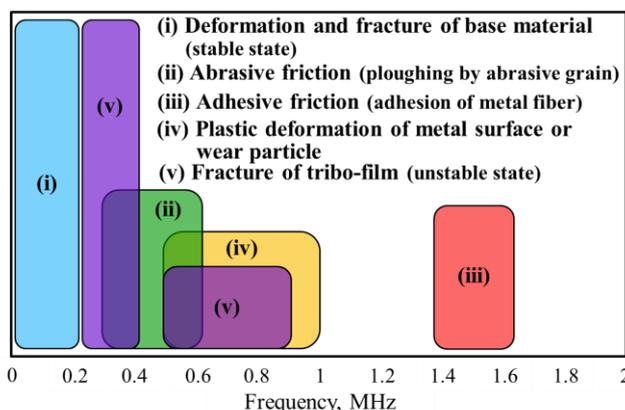


図 11 AE 信号-トライボロジー特性マップ

<引用文献>

- ① A. Hase、M. Wada、H. Mishina、Acoustic Emission Signals and Wear Phenomena on Severe-Mild Wear Transition、Tribology Online、Vol. 3、No. 5、2008、pp. 298-303
- ② A. Hase、M. Wada、H. Mishina、Scanning Electron Microscope Observation Study for Identification of Wear Mechanism Using Acoustic Emission Technique、Tribology International、Vol. 72、2014、pp. 51-57
- ③ A. Hase、H. Mishina、M. Wada、Correlation between Features of Acoustic Emission Signals and Mechanical Wear Mechanisms、Wear、Vol. 292-293、2012、pp. 144-150
- ④ K. Mizuta、Y. Nishizawa、K. Sugimoto、K. Okayama、A. Hase、Evaluation of Friction Phenomena of Brake Pads by Acoustic Emission Method、SAE Int. J. Commer. Veh.、Vol. 7、Issue 2、2014、2014-01-2484

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① A. Hase、Visualization of the Tribological Behavior of Graphite in Cast Iron by In Situ Observations of Sliding Interfaces、Tribology International、査読有、Vol. 138、

2019、pp. 40-46

DOI:10.1016/j.triboint.2019.05.031

- ② A. Hase, K. Mizuta, Y. Nishizawa, K. Sugimoto, K. Okayama, Relationship between Acoustic Emission Signals and Frictional Properties in Automotive Brake Pad Materials, Proc. of EuroBrake 2017、査読有、Dresden、2017、EB2017-VDT-005
- ③ 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、2016、EB2016-SVM-060

[学会発表] (計 27 件)

- ① 高橋明良、長谷亜蘭、In situ 観察・AE 計測法を用いた水分がブレーキパッド摩擦界面に与える影響の可視化、2018 年度自動車技術会関東支部学術研究講演会、2019
- ② 長谷亜蘭、摩擦界面のその場観察による摩擦・摩耗メカニズムの可視化、2018 年度第 1 回高分子材料のトライボロジー研究会、2018
- ③ 長谷亜蘭、ブレーキ摩擦面で起こるトライボロジー現象の可視化と AE 計測による評価、第 19 回摩擦振動を中心とした談話会、2018
- ④ 長谷亜蘭、摩擦雰囲気の違いによるブレーキパッド表面のトライボロジー現象変化、第 16 回埼玉工業大学若手研究フォーラム、2018
- ⑤ 鎌田一輝、長谷亜蘭、高温環境下での摩擦界面の高速 in situ 観察の試み、第 16 回埼玉工業大学若手研究フォーラム、2018
- ⑥ 佐々木佑、長谷亜蘭、潤滑状態の異なるブレーキパッド材料摩擦界面の in situ 観察と AE 信号計測、2017 年度自動車技術会関東支部学術研究講演会、2018
- ⑦ A. Hase, H. Mishina, M. Wada, Correlation Map for Wear State Monitoring by Acoustic Emission Technique, The 21st International Conference on Wear of Materials, 2017
- ⑧ A. Hase, Visualization of Tribological Behavior of Graphite in Cast Iron by In Situ Observation of Sliding Interface, The ITS-IFTOMM 2017 & K-TIS 2017, 2017
- ⑨ 半田裕也、長谷亜蘭、摩擦面顕微鏡 in situ 観察によるブレーキパッド摩擦・摩耗メカニズムの可視化調査、2016 年度自動車技術会関東支部学術研究講演会、2017
- ⑩ 長谷亜蘭、水田和甫、西澤幸男、杉本考司、岡山勝弥、アコースティックエミッション計測による自動車用ブレーキ材料の摩擦特性評価、日本機械学会 第 25 回 交通・物流部門大会 (TRANSLOG2016)、2016
- ⑪ 長谷亜蘭、水田和甫、西澤幸男、杉本考司、岡山勝弥、高速 in situ 観察・AE 計測法を用いたブレーキパッド材料のトライボロジー現象の可視化、日本機械学会第 16 回機素潤滑部門講演会、2016

[図書] (計 1 件)

- ① 長谷亜蘭 他、株式会社テクノシステム、数値解析と表面分析によるトライボロジー現象の解明とその制御、2018、pp. 57-69

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

特になし

○取得状況 (計 0 件)

特になし

[その他]

ホームページ等

[https://www.sit.ac.jp/user/alan\\_hase/](https://www.sit.ac.jp/user/alan_hase/)

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名： 半田 裕也                      佐々木 佑                      高橋 明良

ローマ字氏名： (HANDA, yuya)                      (SASAKI, tasuku)                      (TAKAHASHI, akira)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。