

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：32410

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820036

研究課題名(和文) AE法を用いた通電トライボロジー現象下の損耗診断・評価に関する研究

研究課題名(英文) Study on Diagnosis and Evaluation of Wear State under Tribological Phenomena with Electric Current Using AE Technique

研究代表者

長谷 亜蘭 (Hase, Alan)

埼玉工業大学・工学部・講師

研究者番号：10552953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、集電材料の通電下トライボロジー現象を拡大観察するとともに、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)信号を計測し、通電下の損耗現象とAE信号の対応関係を調査した。その結果、AE信号の周波数スペクトルの特徴が集電材料の種類によって異なり、周波数の特徴から放電あるいは溶融の主たる通電下トライボロジー特性を判別評価できることを示した。また、通電を伴う長距離摩擦実験を実施し、集電材料のトライボロジー特性が評価できることがわかった。得られた結果をまとめ、AE計測による通電下トライボロジー現象の診断評価に欠かせない損耗モード-AE信号相関マップを作成した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the evaluation of tribological characteristics for current collector materials, e.g., an electric railway and a motor brush, by using an acoustic emission (AE) technique was attempted by an in situ observation experiment and a long distance sliding friction experiment. As an experimental result, it was found that the difference in main phenomenon (discharge or melt) can be identified from the difference in the frequency spectrum of the AE signal waveform. The frequency analysis of the AE signals detected at various deformation and fracture phenomena was conducted in order to apply the AE technique to the identification and the evaluation of phenomena between the sliding surfaces. A correlation map between the wear mode and the AE signal at abrasion under electric current which was created from the results up to now was proposed.

研究分野：トライボロジー、アコースティックエミッション、精密加工

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 可視化 損耗 放電 溶融 状態監視 集電材料

1. 研究開始当初の背景

トライボロジー改善(摩擦・摩耗・潤滑に関する適切な材料設計やメンテナンスなど)による経済効果は、国民総生産(GNP)の数%にも及ぶという調査報告は有名である。また、2009年9月に開催された国際会議 WTC IV において、環境・生物への影響と自然との調和を考えたトライボロジー視点での科学技術である“グリーントライボロジー”が強く提唱されている。したがって、摩耗の進行状態や摩擦界面の状況などのトライボロジー現象(摩擦・摩耗現象)の認識・評価は、省エネルギー・省資源などの経済・環境的な観点からも重要である。本研究で対象とする通電下の摩擦・摩耗現象においては、機械的な摩耗に加え放電・溶融などによる摩擦面の損耗が生じる。特に、摩擦条件や材料のみならず、通電状態、雰囲気、設置状態など多くの因子が関係し、これらが複雑な摩耗増加要因となる。エネルギー的な観点からも、通電下のトライボロジー改善により通電効率を向上させ、グリーントライボロジーに貢献できる。

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)は、変形・破壊現象の変化に対する検出感度が高く、トライボロジー現象の認識・評価への有用性が認められている。特に、摩擦界面の状況を定量的にリアルタイムで調べることができ、摩耗機構によりAE信号の周波数に特徴が現れることが確認されている。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。

各現象の規模とAE信号の対応関係やAE発生源、AE周波数の特徴がもつ意味を明らかにすることで、通電下の摩擦・摩耗における損耗状態をAE信号の計測・解析から定量的に診断評価できることが期待できる。本研究では、顕微鏡下で摩擦界面の現象を拡大観察すると同時にAE信号を計測し、微視的な損耗現象とAE信号との明確な対応付けを行う(図1)。本研究成果は、あらゆる電気接点材料における損耗現象の認識・評価に応用可能である。

AE法を用いた通電トライボロジー現象下の損耗診断・評価に関する研究

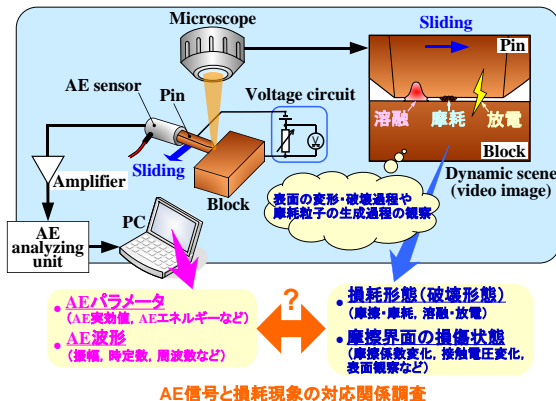


図1 本研究の概要

2. 研究の目的

本研究では、各変形・破壊現象(摩擦・摩耗、溶融・放電)とAE信号との対応関係を調査し、AE法を用いた通電下の摩擦・摩耗現象の診断評価技術の確立を目指す。主な目的は、下記の通りである。

目的1) 摩擦・摩耗、溶融・放電の各現象時に検出される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信号の特徴から、AE信号-損耗現象マップを作成する。これにより、計測されたAE信号の振幅値・周波数から、摩擦界面で生じた現象の特定が可能となる。

目的3) 集電材料および摺動条件(荷重、摩擦速度、水雰囲気など)の違いが、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) 損耗状態(表面粗さ、損耗量など)とAEエネルギー(AE信号の積分値)の定量的関係を見だし、AE波形解析およびAEパラメータによる診断評価方法の検討を行う。

本研究は、今まで未解明のまま残されてきた変形・破壊現象とAE信号の対応付けを明確にし、AE法による診断評価技術分野の発展に寄与することを目的としている。上記の目的を達成するために、顕微鏡に通電摩擦駆動系・AE計測系を組み込んだ実験装置の構築を行い、顕微鏡下での現象再現実験を実施する。通電下の損耗現象を顕微鏡視野内で拡大観察すると同時にAE信号の計測を行う実験研究は、世界的にも例がなく、非常に特色のある研究になると思われる。さらに、体系付けしたAE信号-損耗現象マップの検証・確認のために、実機を想定した長距離の摩擦実験を実施する。

本研究を通してAE法による通電下の摩擦・摩耗現象の診断評価技術が確立できれば、集電摩擦系が組み込まれた機械システム(例えば、鉄道車両パンタグラフすり板やモータブラシなど)の損耗状態監視や集電材料開発における特性評価などの領域で応用発展が期待できる。特に、体系付けようとしているAE信号-損耗現象マップは、AE信号による現象診断評価に有用な指標確立への足がかりになると考え、これを世界に先駆けて発信できると確信している。

3. 研究の方法

図2は、本研究で構築したin situ観察(その場観察)用摩擦試験機である。ピン・オン・

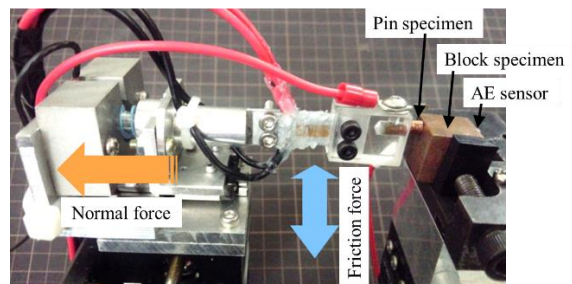


図2 In situ観察用摩擦試験機の外観

ブロック型の摩擦系を顕微鏡視野内に配置することで、摩擦界面の現象を拡大観察できる。ピン固定部の板ばねに貼り付けたひずみゲージにより、摩擦力を計測した。また、ピン固定部はスライダを介してばねで垂直力を与えられるとともに、ロードセルで垂直力の変化を計測できる構造とした。AEセンサは、ブロック試験片に取り付け、観察と同時にAE信号計測を行った。AE計測において通電時の環境ノイズ影響が懸念されたが、ローノイズアンプの利用およびノイズ対策により、十分な感度で計測することが可能となった。また、電圧印加回路を付加したピン・オン・ディスク摩擦試験機を用いて実機を想定した長距離の通電摩擦・AE計測実験を実施した。長距離摩擦実験では、AEセンサはピン試験片に取り付けてAE信号を計測した。両試験片間に、直流20V、4Aの電圧を印加して実験を実施した。これらの微視的実験および巨視的実験アプローチから、通電下における損耗現象とAE信号との明確な対応付けを行う。

4. 研究成果

図3は、通電摩擦時に生じる一連の損耗過程をin situ観察した結果である。まず、(i) 摩擦開始とともに接触部の塑性変形・掘り起こしが生じ、(ii) 縮流抵抗により接触部の溶融が起こる。つぎに、(iii) 溶融部が融着して乖離した空隙において絶縁崩壊が起こり、放電が開始する。最終的に、(iv) 放電によってアブレーションが起こり、完全に接触部が乖離することで放電が止まる。この通電時の融着やアブレーションによって、通電の有無で摩耗量や表面損傷に大きな差が生じることがわかった。

人為的に試験片を乖離させて放電現象と溶融現象を発生させた実験結果から、放電時には白色や青白い発光が生じ、溶融時には橙色や黄色の発光が生じることが確認できた。この各現象時に計測されたAE信号の周波数解析を行い、放電時には高周波のピークが存在し、溶融時には低周波のピークが存在する傾向がみられた。

また、摩擦の繰り返しに伴って摩擦面が機械的な摩耗で荒れることによって、溶融・放電が生じやすくなることがわかった。図4は、

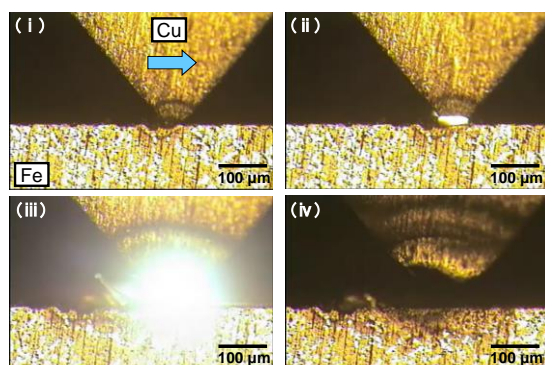


図3 通電摩擦下の損耗過程のin situ観察

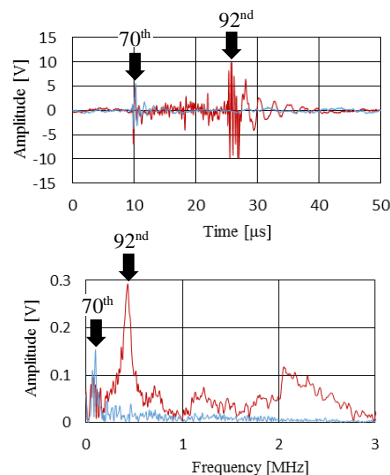


図4 摩擦繰り返し時のAE信号波形(上図)とその周波数スペクトル(下図)

摩擦繰り返し時にみられたAE信号波形とその周波数スペクトルの一例である。In situ観察から、それぞれ70往復時には溶融現象、92往復時には放電現象が観察されていた。溶融時には0.1~0.3 MHzに周波数ピークが分布し、放電時には0.5~1.1 MHzに周波数ピークが分布することがわかった。また、AE信号波形の振幅値は、放電時は溶融時の数倍大きいことがわかった。これらの結果は、人為的に試験片を乖離させて放電現象と溶融現象を発生させた実験結果と一致している。

摺動条件を変化させたin situ観察実験から、押付け荷重が小さく、摩擦速度が大きいほど溶融・放電が起こる頻度が増加し、表面の損傷が大きくなることがわかった。本計測条件下では、溶融発生時のAE平均値電圧変化は1~1.5 mVと小さかったが、放電発生時は250 mVと大きな変化を示した。このとき、試験片同士が触れる瞬間または離れる瞬間に放電現象が連続的に生じ、AE平均値電圧は徐々に上昇していく傾向が多くの実験で確認された。

AE信号波形の周波数スペクトルの特徴を利用して摺動材料の主な損耗モードを評価できることが考えられる。図5および図6は、長距離摩擦実験で得られた銅系および鉄系焼結合金に関する摩擦距離0.5 kmまでのAE信号波形の周波数スペクトル変化を0.1 kmごとに並べた結果である。この結果より、0.1 kmの摩擦初期は機械的な摩耗が主体であり、周波数スペクトルに特徴はみられないが、0.2 km以降になるとそれぞれの特徴がみられた。図5の銅系焼結合金では0.5 MHz付近にピークが現れ、図6の鉄系焼結合金では0.2 MHz付近にピークが現れている。したがって、このAE信号波形の周波数スペクトルの特徴から、銅系焼結合金では放電現象が主体で生じており、鉄系焼結合金では溶融現象が主体で生じていると評価できる。したがって、摺動材料材種による通電下の主たる損耗現象をAE信号解析から診断・評価できることを示唆している。

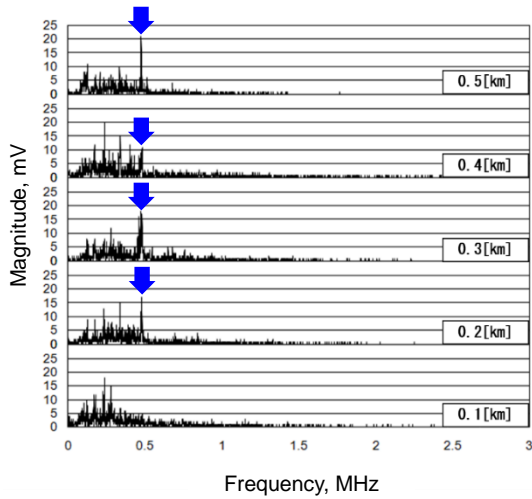


図5 銅系焼結合金におけるAE信号波形の周波数スペクトル変化

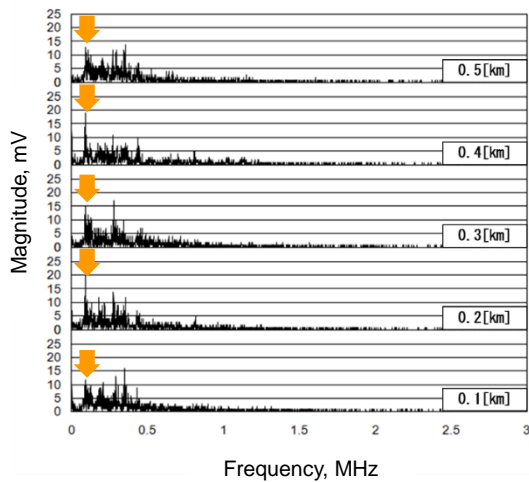


図6 鉄系焼結合金におけるAE信号波形の周波数スペクトル変化

さらに長距離摩擦実験において、試験片間の電圧降下すなわち乖離が生じて放電が開始した地点から、AE信号振幅値の上昇が認められた。これは、アーク放電による摩擦面のアブレーションすなわち破壊で生じたAE波を検出していると考えられる。このAE信号振幅値の上昇から、離線の状態などもインプロセスでモニタリングできるであろう。また、炭素系材料を用いた長距離摩擦実験を実施し、摩擦量、電圧変化、損傷状態すべてにおいて銅系焼結合金と鉄系焼結合金よりも優れており、検出されるAE信号の振幅値も小さいことが確認された。さらに、雨天を想定した水滴下の長距離摩擦実験を行い、雨天では放電や溶融がほとんど起こらないという結果が得られた。

機械的摩擦に関して、表面の損傷状態が変化するアブレイブ-凝着摩擦遷移を検出するための長距離摩擦実験を実施し、1 MHz付近の高周波のAE信号検出から凝着摩擦への遷移点を評価できることがわかった。このとき、粒度の違いによる遷移点の変化も捉えられる

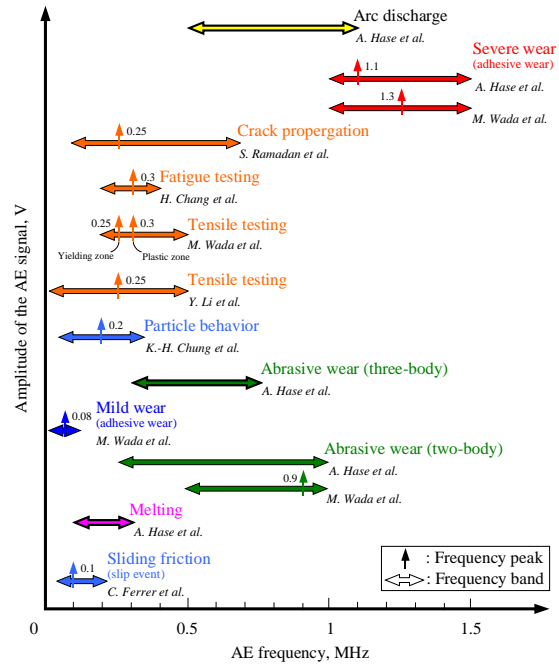


図7 AE信号-損耗現象マップ

ことも確認している。また、異物混入時(砥粒などを混入させた三元アブレイブ摩擦)の長距離摩擦実験を実施し、AE信号の周波数変化から異物混入が把握できる可能性を見いだした。

これまでに得られている放電時に検出される高周波のAE信号と溶融時に検出される低周波のAE信号は、機械的な摩擦で発生する中周波のAE信号と複合的に計測されることがわかった。本実験により新しく得られた知見から、損耗モード-AE信号相関マップを更新すると図7のようになる。ここで、縦軸のAE信号振幅値に関しては、AE計測条件や計測環境等に依存するため、参考として示している。この相関マップを利用して、AE信号をバンドパスフィルタ処理すれば、摩擦界面の現象認識や特定の損耗モードを定量的に評価することが可能になるであろう。

<引用文献>

- ① H.P. Jost: Lubrication (tribology): a report on the present position and industry's needs, Report to the UK Department of Education and Science, 1966
- ② H.P. Jost: Green Tribology, a footprint where economics and environment meet, Address to the Fourth World Tribology Congress-Kyoto, Japan, 2009, p.1
- ③ 長谷亜蘭, 和田正毅, 広田平一: 凝着摩擦における移着現象とAE信号の相関, トライボロジスト, 第50巻, 第11号, 2005, pp. 808-815
- ④ 長谷亜蘭, 和田正毅, 三科博司: アブレイブ摩擦現象とAE信号の相関, トライボロ

- ジスト, 第 51 卷, 第 10 号, 2006, pp. 752-759
- ⑤ 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
5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)
- [雑誌論文] (計 1 件)
- ① 長谷亜蘭, 三科博司: アコースティックエミッション法を用いた通電摩擦下の損耗現象評価, *埼玉工業大学工学部紀要*, 第 24 号, 2014, pp. 11-18, <http://id.nii.ac.jp/1220/00000039/>
- [学会発表] (計 2 1 件)
- ① 船田一樹, 長谷亜蘭: 通電を伴う摩擦界面 in situ 観察とアコースティックエミッション計測, 第 13 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, 2016, pp. 172-173
- ② A. Hase, Y. Takemura, H. Mishina: Detection of Wear Transition Using Change in Frequency of AE Signals, *Proc. of Malaysian International Tribology Conference 2015*, Penang, 2015, pp. 113-114
- ③ A. Hase: Acoustic Emissions during Tribological Processes, *Proc. of the International Tribology Conference, TOKYO 2015*, Tokyo, 2015, pp. 210-211
- ④ A. Hase, Y. Takemura, H. Mishina: Study on Detection of Wear Transition Point Using Acoustic Emission Technique, *Proc. of the 42nd Leeds-Lyon Symposium on Tribology*, Lyon, 2015, p. 9
- ⑤ 加治秀知, 長谷亜蘭: 通電摩擦下の損耗現象の in situ 観察と AE 診断に関する基礎研究, 第 6 回トライボロジー秋の学校 in 愛知, P-01, 2015, p. 9
- ⑥ 加治秀知, 長谷亜蘭: 通電摩擦 in-situ 観察装置の改良, 第 13 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, 2015, pp. 134-135
- ⑦ 長谷亜蘭, 三科博司: 通電損耗時の損耗モード-AE 信号関連マップの作成, 第 13 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, 2015, pp. 120-121
- ⑧ 長谷亜蘭, 竹村洋太, 三科博司: アプレシブ-凝着摩耗遷移時の AE 信号の特徴, *トライボロジー会議予稿集 姫路 2015-5*, B17, 2015
- ⑨ 長谷亜蘭: “機械の臨床医チーム” 研究活動紹介—機械システムで進行する“病”(摩耗現象)の可視化と診断—, *彩の国ビジネスアリーナ 2016 大学・研究機関による技術シーズ発表会*, さいたまスーパーアリーナ, 2016
- ⑩ 長谷亜蘭: In situ 観察・AE 計測法を用いたトライボマテリアルにおける変形・破壊現象の可視化と診断, 第 10 回メンテナンス分野合同研究会, 鉄道総合技術研究所, 2015
- ⑪ A. Hase: Elucidation and Evaluation of Wear Mechanisms by Visualization and Acoustic Emission Technique, *6th Advanced Forum on Tribology Program & Abstract Book*, Wuhan, 2015, p. 6
- ⑫ A. Hase, H. Mishina: Evaluation of Tribological Characteristics for Current Collector Using Acoustic Emission Technique, *The 20th International Conference on Wear of Materials*, Toronto, Pl. 17, 2015
- ⑬ 長谷亜蘭, 三科博司: AE 法を用いた通電摩耗特性の評価に関する研究, *トライボロジー会議予稿集 盛岡 2014-11*, F19, 2014, pp. 490-492
- ⑭ 竹村洋太, 長谷亜蘭, 三科博司: AE による摩耗形態変遷の検出・追跡, *日本機械学会 2014 年度年次大会 DVD 講演論文集*, No. 14-1, S1140201 (2014)
- ⑮ 長谷亜蘭, 三科博司: AE 技術を用いた集電材料の通電下トライボロジー特性評価, 第 12 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, 2014, pp. 164-165
- ⑯ 細田彬史, 長谷亜蘭: 摩擦面顕微鏡 in-situ 観察による通電摩耗現象の可視化—摩擦系および通電回路の製作と通電実験—, 第 12 回埼玉工業大学若手研究フォーラム論文集, 2014, pp. 174-175
- ⑰ 長谷亜蘭: AE 法によるトライボロジー現象の診断評価—摩擦・摩耗の基礎研究から加工状態監視まで—, 2014 年度第 2 回切削加工専門委員会, 精密工学会 切削加

工専門委員会，東京農工大学，2014

- ⑱ 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
- ⑲ A. Hase, H. Mishina: Identification of Tribological Phenomena under Electric Current Using AE Technique, Proc. of the 1st African Conference in Tribology, Marrakech, 2014, p. 50
- ⑳ 長谷亜蘭：AE 技術を用いたトライボロジー現象の認識—摩擦・摩耗素過程の基礎研究と実機への適用事例—，2013 年度第 2 回トライボケミストリー研究会，日本トライボロジー学会 第 3 種 トライボケミストリー研究会，職業能力開発総合大学校，2014
- ㉑ 長谷亜蘭：AE 法を用いた摩耗過程の解析と診断，砥粒加工学会 次世代固定砥粒加工プロセス専門委員会 第 51 回研究会，埼玉大学東京ステーションカレッジ，2013

〔図書〕 (計 0 件)

特になし

〔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〕

埼玉工業大学 長谷研究室 (マイクロ・ナノ工学研究室) ホームページ

http://www.sit.ac.jp/user/alan_hase/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷 亜蘭 (HASE, Alan)

埼玉工業大学 工学部 機械工学科・講師

研究者番号：1 0 5 5 2 9 5 3

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

三科 博司 (MISHINA, Hiroshi)

千葉大学大学院 工学研究科・教授

研究者番号：5 0 1 4 2 6 4 1