

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04093

研究課題名（和文）火花放電における火花チャネルのインピーダンス推定

研究課題名（英文）Estimation of Spark Channel Impedance in Spark Discharge

研究代表者

高 義礼（Taka, Yoshinori）

釧路工業高等専門学校・創造工学科・教授

研究者番号：80335091

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：火花抵抗則については人体からの静電気放電に対していずれが妥当であるか不明な点が多かった。本研究ではこの疑問を解消するために火花チャネルのインピーダンス推定をおこなうことを目指した。高速度カメラの火花放電画像と既存の実験結果とを組み合わせることで推定できないかを探った。火花放電という超高速現象を撮影するためのトリガ方法を考案し火花画像を取得した結果、毎回の放電経路（長）が変化し、かつ明暗の箇所比較的再現性があることがわかった。一方、いずれの火花抵抗則を用いればよいかの検討を別途おこなってきたが、充電電圧1000V～7000Vの範囲ではRompe-Weizel則が比較的合致することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では火花放電が電極の移動速度や温度・湿度といった諸条件にどのように左右されるかを明らかにすることを狙っているが、放電の状態を定量的に示す方法として火花チャネルのインピーダンス（火花抵抗）を導出できないか試みた。放電状態を定式化できれば、気象条件や電極（帯電物体）の移動速度などがわかる場合にどのような放電が発生し、どのような電磁界が放射されるかといったことが明らかになり、機器誤動作等の発生頻度の予測などに役立つ可能性がある。本研究では火花経路が放電ごとに変化すること（これによりインピーダンスが変化すること）などが明らかとなり、今後のインピーダンス推定により、より実用化に近づくと考えている。

研究成果の概要（英文）：In order to estimate the impedance of spark channel, we conducted the fundamental experiment of spark and took the images of spark channel. In this study, we newly developed picture shooting method was using external trigger signal. As a results, clear images were taken and found that spark channel was not uniform luminance and not same filament length in every sparks. Furthermore, we have researched which spark resistance formula should be used, and we found that the Rompe-Weizel's spark resistance formula can better explain the charge voltage dependence of spark characteristics in the charging voltage range of 1000V to 7000V.

研究分野：電磁環境工学

キーワード：火花放電 火花チャネル インピーダンス 火花抵抗則 推定

1. 研究開始当初の背景

近年の電子機器は、ICの高集積・低消費電力化に伴い、高性能化が進んできている。しかしながらその結果、電子機器の電磁雑音に対する耐性の低下が深刻な問題となってきた。機器の誤動作・破壊を引き起こす電磁雑音の発生原因は様々だが、特に帯電した人体からの静電気放電^[1-5]によるものが主原因となる場合が多い。このことから、電子機器の静電気放電に対する耐性を調べるための試験法^[6,7]が国際電気標準会議(IEC: International Electrotechnical Commission)によって定められてきた。しかし、この試験法は不十分であり、試験をパスしてもなお誤動作が発生する事例が後を絶たない。その原因は、当試験法では接触放電が用いられるが、実際の人体等からの放電は気中放電(火花放電)であり、両者の放電メカニズムが異なるからである。このため、気中放電(火花放電)の放電特性を明らかにし、それらの知見を静電気耐性試験法にフィードバックすることが期待されている。

2. 研究の目的

この様な背景から、筆者は気中放電(火花放電)の放電特性を明らかにし、これを電子機器の電磁雑音対策に役立てることを目指している。その一つとして、静電気耐性試験法の改良もあり、気中放電(火花放電)の放電特性を考慮した試験法の提案ができないかを目指している。本研究では、火花放電画像を高速度カメラで撮影し、火花チャネルの形状測定からそのインピーダンス推定(火花抵抗^[8-14]推定)につなげられないかを検討しているが、本報告では筆者らが考案した火花画像取得法(火花放電によるインパルス電界を外部トリガ信号として利用する手法)について示すとともに、取得火花画像から明らかになった事項について述べる。

3. 研究の方法

図1に実験装置を示す。全体の構成は、直流高電圧電源、円板電極、顕微鏡とこれに接続された高速度カメラからなる。顕微鏡のステージ上に直径21mmの2つの円板電極を1mmの間隔をあけて設置し放電させる。高電圧直流電源は+7.2kVに設定し、電極間の容量と高抵抗(1GΩ)で決まる時定数に従って、絶縁破壊電界に達するたびに火花放電が発生する(充放電を繰り返す)ようになっている。顕微鏡に高速度カメラ(Photoron製)を設置し、撮影は毎秒1000フレーム(1000fps)とし、1フレームの撮影時間は約1ms(996μs)、画素数は最大の1024×1024として火花画像を撮影した。撮影は1セットで約5秒間おこなわれ、およそ5,000枚の画像を撮影できる。しかし、火花放電発生のタイミングは予見不可能であり、しかも放電の持続時間は1μsよりも短い。このため、適切なトリガ設定をおこなわなければ1フレームにその様子を写しこむことが出来ない。そこで、使用した高速度カメラの”外部トリガ”機能を利用することとした。この際、外部トリガ信号に何をを用いるかが問題であるが、火花放電から発せられる過渡電界をモノポールアンテナに見立てた導線(同軸線の中心導体)で受信し、この導線に誘起されるインパルス電圧波形をトリガ信号とした。この電圧波形は同軸ケーブルを経由してカメラの外部トリガ入力端子(TTLレベル)に入力される。この手法が今回新たに考案した撮影法である。ところで、高速度カメラの仕様では、トリガ信号が入った時点のフレームは撮像されない仕様になっていることから、トリガ信号を遅延させなければ火花波形をトリガ発生時刻のフレームに写しこめない。このため、トリガ信号のカメラへの入力に1.1ms遅延させた。火花放電の継続時間はおよそ数百nsであることから、上記処理にてトリガ信号が入った時点より1つまたは2つ前のフレームに火花放電画像を確実に撮影できるようになった。トリガ機能を用いた撮影法の模式図を図3に示す。ここでは、

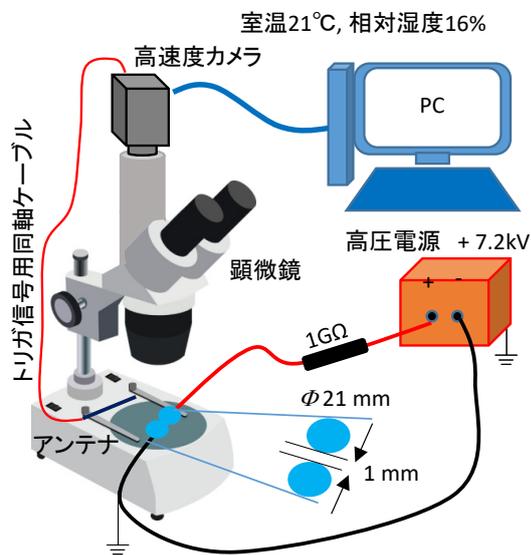


図1. 火花放電の撮影システム

図1に実験装置を示す。全体の構成は、直流高電圧電源、円板電極、顕微鏡とこれに接続された高速度カメラからなる。顕微鏡のステージ上に直径21mmの2つの円板電極を1mmの間隔をあけて設置し放電させる。高電圧直流電源は+7.2kVに設定し、電極間の容量と高抵抗(1GΩ)で決まる時定数に従って、絶縁破壊電界に達するたびに火花放電が発生する(充放電を繰り返す)ようになっている。顕微鏡に高速度カメラ(Photoron製)を設置し、撮影は毎秒1000フレーム(1000fps)とし、1フレームの撮影時間は約1ms(996μs)、画素数は最大の1024×1024として火花画像を撮影した。撮影は1セットで約5秒間おこなわれ、およそ5,000枚の画像を撮影できる。しかし、火花放電発生のタイミングは予見不可能であり、しかも放電の持続時間は1μsよりも短い。このため、適切なトリガ設定をおこなわなければ1フレームにその様子を写しこむことが出来ない。そこで、使用した高速度カメラの”外部トリガ”機能を利用することとした。この際、外部トリガ信号に何をを用いるかが問題であるが、火花放電から発せられる過渡電界をモノポールアンテナに見立てた導線(同軸線の中心導体)で受信し、この導線に誘起されるインパルス電圧波形をトリガ信号とした。この電圧波形は同軸ケーブルを経由してカメラの外部トリガ入力端子(TTLレベル)に入力される。この手法が今回新たに考案した撮影法である。ところで、高速度カメラの仕様では、トリガ信号が入った時点のフレームは撮像されない仕様になっていることから、トリガ信号を遅延させなければ火花波形をトリガ発生時刻のフレームに写しこめない。このため、トリガ信号のカメラへの入力に1.1ms遅延させた。火花放電の継続時間はおよそ数百nsであることから、上記処理にてトリガ信号が入った時点より1つまたは2つ前のフレームに火花放電画像を確実に撮影できるようになった。トリガ機能を用いた撮影法の模式図を図3に示す。ここでは、

フレーム1からフレーム4の順番に新フレームが撮影されていく。今、フレーム2の露光中(撮影中)に火花放電が発生したとすると、その時刻でトリガ信号が発生する。本カメラの仕様ではトリガ信号を入力した時刻のフレームは撮影されないため、このままだと火花の写真が撮れない。このため、トリガ信号の遅延処理の機能を使うことにした。表1に外部トリガ入力と遅延処理の手順についてまとめた。以上の処理により、持続時間が短く($< 1\mu\text{s}$)不規則に発生する火花放電の画像を確実にとらえることができるようになった。これにより、従前まで数千枚のフレームから偶然映り込んだフレームを抜き出していたが、効率的にデータ収集ができるようになった。

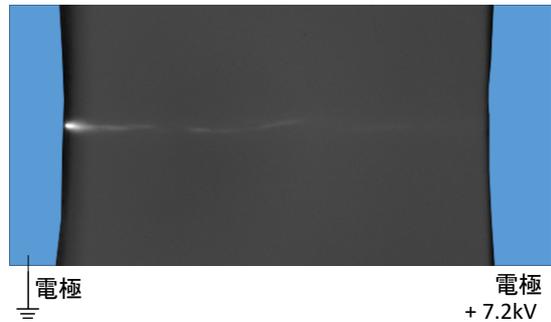


図2. 火花放電の様子

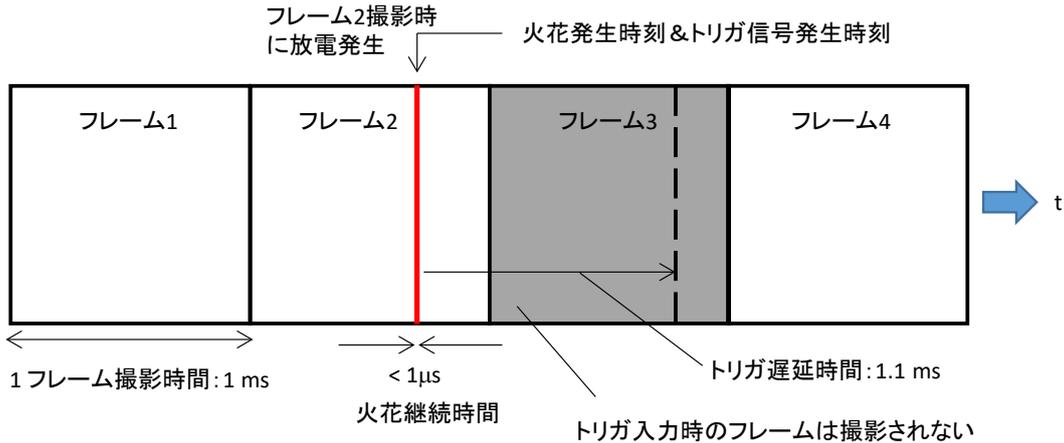


図3. トリガ機能を用いた撮影

表1. トリガ機能の実行手順

手順項目	実行方法
1)外部トリガ信号発生	火花放電時の放射過渡電界を利用
2)トリガ信号の受信方法	放電電極の近傍(数cm)に同軸ケーブルの中心導体をアンテナ代わりに配置。インパルス電圧波形をカメラの外部トリガ入力端子へ入力
3)トリガ信号の遅延処理	トリガ入力時の画像は撮影されないため、カメラのトリガ信号遅延機能を利用し、後続のフレームでトリガをかける

4. 研究成果

何度かテスト撮影を繰り返してみたが、事前の予測通りのタイミングで火花画像を取得することが確かめられた。研究開始時はトリガのかけ方において上述のような手法がとられなかったため、数千枚の画像から偶然火花放電が映り込んだフレームを取り出していた。このため、非効率であったが、最終的には大幅な効率化を図ることが実現できた。図4に撮影された火花画像の一例を示す。画面右手が+7.2kVの電極側、左手がグラウンド電極側である。結果から、グラウンド側に輝度が一段と高い部分があること、それに続いてフィラメント上の発光部が+側の電極に向かって伸びていることなどが見てとれる。これはプラズマ状の火花チャンネルが見えているものと推察されるが、直線的ではなく、その長さは必ずしも電極間のギャップ長(最

短距離)と一致するわけではないことがわかる。すなわち、概ね電界強度の高いところに沿って放電するが、火花通路はこれに完全に一致しないことを示している。また、よく見ると、輝度が高い部位と低い部位があり、かつ、それらの出現する部位がどの画像においてもおおよそ一致していることがわかる。ここでは3例しか示していないが、他の画像でもおおよそこの傾向になることを確かめた。その傾向とは、グラウンド側には強い発光点があり、それに続き+側電極に向かって一旦暗い部位があったのちに再び明るい部位が見られ、+側電極付近では明るい部位は見られない。この結果から、明るい発光部分がプラズマ密度の高い部分、暗い部分がプラズマ密度の低い部分だとすれば、火花チャネルの導電率やインダクタンスの違いに影響することが示唆される。また、画像から火花チャネルはきれいな円柱状ではなく、途中縊れたり捻じれたりしているようにも見えるので、そのことも火花チャネルのインピーダンスに影響を与えるのではないかと推察される。本実験では気温 21℃、相対湿度 16%でおこなったが、今後異なる条件で撮影をおこない、火花画像に変化が現れるかどうか確かめてみる必要がある。

火花放電の放電特性を調べるために、高速度カメラを用いた火花画像の撮影システムを構築した。本研究では効率的な画像取得を目指して外部トリガの設定方法について考案し、トリガ信号受信直前のフレームに火花画像を確実に取得できるようにした。さらにこのシステムを使って、火花画像を撮影してみた。その結果、グラウンド側には強い発光点があり、その後+側電極に向かって一旦暗い部位があったのちに再び明るい部位が見られ、+側電極付近では明るい部位は見られないことがわかった。また、火花チャネルはきれいな円柱状ではなく、途中縊れたり捻じれたりしているようにも見えることがわかった。これらは、火花チャネルの導電率やインダクタンスに影響を与えると思われる。今後は電極形状、充電電圧を変えるなどしてさらなる実験を続ける予定である。

一方、上記取組と並行しておこなった研究成果についても報告する。筆者を含む研究グループでは、電気双極子モデルの放電回路に Toeppler と Rompe-Weizel の火花抵抗則を適用し、火花電流の理論式を解析的に導出することで火花放電の理論特性を比較した。その結果、両法則から誘導される火花電流波形は、異なった関数で示されるが、放電前のギャップ間の電圧と「火花定数×火花長」だけで決定される公称継続時間に支配されること、これが両法則で同じならば、火花電流のピークは一致するものの、立ち上がり勾配は Rompe-Weizel 則のほうが Toeppler 則よりも 1.2 倍ほど大きいこと、などが明らかとなった。これらの火花抵抗則の妥当性検証を目的として、300 V から 7000 V に充電した平行平板電極間の火花放電に伴う火花電流と火花長を充電電圧との関係において同時測定した。その結果、火花抵抗則で火花の電圧測定波形にフィットさせて求めた火花定数は、1000 V 以上では火花長とは独立で両法則とも対応する文献値に近いこと、火花電流波形の公称継続時間とピークは、1000 V 以上では Rompe-Weizel 則のほうが Toeppler 則よりも測定結果に概ね一致すること、5000 V 以上では両法則が測定結果に共に近づくこと、などが判明した。これらの成果は以下の参考文献(12)「高 義礼、藤原 修：「ふたつの異なる火花抵抗則から導出される火花放電の特性測定と妥当性のさらなる実験検証」, 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門), Vol. 140, No. 2, pp. 72-79 (2020-2)」で報告した。

参考文献

- (1) S. Minegishi : “Recent Topics on Electrostatic Discharge ESD from Viewpoint of EMC”, IEEJ Trans. FM, Vol.132, No.5, pp.335-338 (2012-5) (in Japanese)
嶺岸茂樹：「静電気放電 ESD の EMC に関する研究動向」, 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門), Vol.132, No.5, pp.335-338 (2012-5)
- (2) G. P. Fotis, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos : “Measurement of the electric field radiated by electrostatic discharges”, Measurement Science and Technology, Vol. 17,

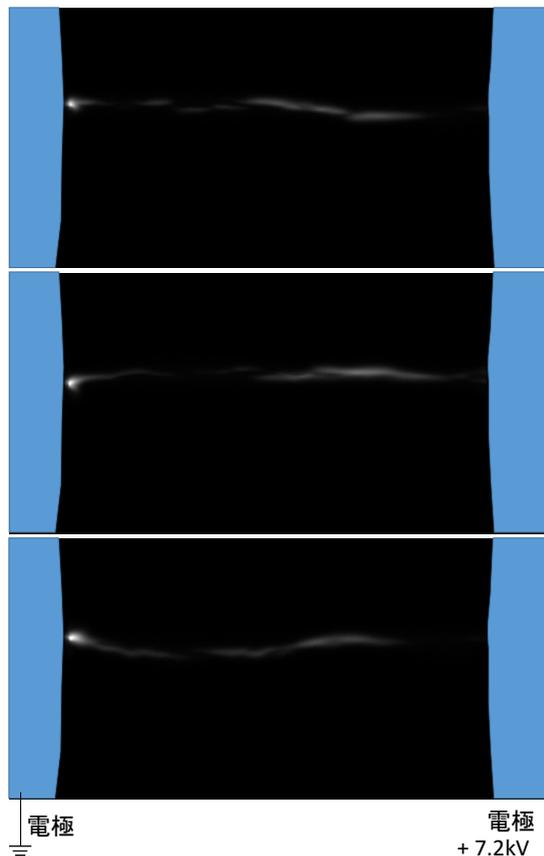


図4. 火花放電画像

pp. 1292-1298 (2006)

(3) R. Jobava, D. Pommerenke, D. Karkashadze, P. Shubitidze, R. Zaridze, S. Frei, and M. Aidam : “Computer simulation of ESD from voluminous objects compared to transient fields of humans” , IEEE Trans. EMC, Vol.42, No.1, pp.54-65 (2001)

(4) G. Cerri, R. De Leo, and P. V. Mariani : “Theoretical and experimental evaluation of electromagnetic fields radiated by ESD” , Proc. 2001 IEEE EMC International Symposium, Montreal, Canada, pp.1269-1272 (2001)

(5) O. Fujiwara : “An analytical approach to model indirect effect caused by electrostatic discharge” , IEICE Trans. COMMUN., Vol.E79-B, No.4, pp.483-489 (1996)

(6) IEC (International Electrotechnical Commission) : “IEC 61000: Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4 : Testing and measurement techniques - Section2: Electrostatic discharge immunity test” , Edition 1.2 (2001-4)

(7) IEC (International Electrotechnical Commission), “IEC 61000: Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4 : Testing and measurement techniques - Section2: Electrostatic discharge immunity test,” Edition 2.0, Dec. (2008)

(8) Yoshinori Taka, Osamu Fujiwara: “Verification of Spark-Resistance Formulae for Micro-Gap ESD,” IEICE Transactions on Communications, Vol.E93-B, No.7, pp.1801-1806 (2010-7).

(9) Yoshinori Taka, Osamu Fujiwara: “Measurement of Discharge Current caused by Spark Between Micro-Gap of Parallel Disc Electrodes and Experimental Verification based on Spark-Resistance Formula,” IEEJ, Transactions on Fundamental and Materials, Vol.137, No.10, pp.598-599 (2017-10).

高義礼, 藤原修:「平行円板電極におけるマイクロギャップ間の火花放電に伴う放電電流の測定と火花抵抗則に基づく実験検証」, 電気学会論文誌 A, Vol.137, No.10, pp.598-599 (2017-10).

(10) Yoshinori Taka, Osamu Fujiwara: “Applicability of Spark resistance Formulae to Micro-gap Spark in Parallel Disc Electrodes,” IEEJ, Transactions on Fundamental and Materials, Vol.138, No.1, pp.42-43 (2018-1).

高義礼, 藤原修:「平行円板電極のマイクロギャップ間の火花放電に対する火花抵抗則の適用性」, 電気学会論文誌 A, Vol.138, No.1, pp.42-43 (2018-01).

(11) Yoshinori Taka, Osamu Fujiwara: “Validity and Applicability of Spark-Resistance Formulae for Micro-Gap Sparks in Parallel Disc Electrodes,” IEEJ, Transactions on Fundamental and Materials, Vol.138, No.6, pp.316-321 (2018-6).

(12) 高 義礼、藤原 修 :「ふたつの異なる火花抵抗則から導出される火花で放電の特性測定と妥当性のさらなる実験検証」, 電気学会論文誌 A (基礎・材料・共通部門), Vol.140, No.2, pp.72-79 (2020-2)

(13) M. Toepler, “Zur Kenntnis der Gesetze der Gleit-funkenbildung,” Ann. Physik 21, 12, 193 (1906).

(14) R. Rompe and W. Weizel, “Über das Toepplersche Funkengesetz,” Z. Physik 122, 636 (1944-01).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 高義礼, 川又憲, 石上忍, 嶺岸茂樹, 藤原修	4. 巻 139
2. 論文標題 球電極間の低電圧衝突ESDで生ずる放射電界の充電電圧依存性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門)	6. 最初と最後の頁 695 - 696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.139.695	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 高義礼, 藤原修	4. 巻 140
2. 論文標題 ふたつの異なる火花抵抗則から導出される火花で放電の特性測定と妥当性のさらなる実験検証	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A (基礎・材料・共通部門)	6. 最初と最後の頁 72 - 79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.140.72	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 高 義礼	4. 巻 52
2. 論文標題 静電気放電における火花抵抗則の適用範囲についての検証	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 釧路工業高等専門学校「紀要」	6. 最初と最後の頁 81-84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 高 義礼	4. 巻 54
2. 論文標題 火花放電における火花ギャップのインピーダンス推定に向けた基礎検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 釧路工業高等専門学校「紀要」	6. 最初と最後の頁 55-58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Yoshinori Taka and Osamu Fujiwara
2. 発表標題 Verification of Spark Constants for Spark-resistance Formulae applied to Micro-gap ESD
3. 学会等名 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, June 3-7, 2019 / Sapporo Japan
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高義礼, 藤原修
2. 発表標題 平行平板電極間の火花放電に対する火花抵抗則の系数値推定と実験検証
3. 学会等名 令和元年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------