

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：13903
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21K04023
研究課題名（和文）機械学習による電気火災兆候の汎用検出手法確立および常時遠隔監視システムへの展開
研究課題名（英文）Development of a detection method of electric fire sign and a continuous remote monitoring system
研究代表者
水野 幸男（MIZUNO, Yukio）
名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授
研究者番号：50190658
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）：電気機器火災の3大原因である差込みプラグのトラッキング（絶縁体表面の炭化）、電源コードの半断線（導体素線の一部断線）による短絡、導体接続部の過熱（ねじの緩み）を実験室で再現した。

これらの現象を火災発生前に検出する特徴量として伝導ノイズに着目し、放電発生と関連付けて詳細に検討した。9kHz～10MHz帯域の伝導ノイズレベルが10～20dBm程度上昇すれば火災予兆（火災に至る異常の初・中期段階）を、20～30dBm程度で発火・短絡（火災発生直前・直後の段階）を検出できることを明らかにした。提案手法により火災発生のみならず火災予兆の判定ができる可能性があり、電気機器火災防止に有効と考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

差込みプラグのトラッキング、電源コードの半断線による短絡、導体接続部のねじの緩みによる過熱は電気機器火災の主原因であり、家庭や工場などで身近で生じる現象である。しかしながら、信頼性の高い火災未然防止技術は確立されていない。

本研究ではこれらの現象を実験室で再現し、伝導ノイズに基づく検出手法を示した点に学術的価値がある。正常時に比べた伝導ノイズレベルの上昇程度により、発火・短絡（火災発生直前・直後の段階）のみならず予兆（火災に至る異常の初期・中期段階）の検出が可能であることを明らかにした。伝導ノイズの常時遠隔監視により電気機器火災を大幅に低減させ得る可能性があり、社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：Tracking of attachment plugs, short-circuit of damaged power-supply cords of household appliances, and overheating due to the screw slackening of a circuit breaker are the main causes of fire accidents originating from electrical equipment in domestic and industrial environments. Thus, safety devices for detecting such damages in wiring appliances are required to prevent fire incidents.

In this study, the three phenomena were reproduced in the laboratory, and investigated paying attention to the conducted emission spectrum. An increase in the conducted emission levels in a certain frequency range was observed in experiments, which may be attributed to discharge. A possibility was found that the level of conducted emissions can indicate the initiation and progression stages as well as the final stage of the three phenomena. The proposed technique based on the level has potential for detection of damage in wiring appliances before it results in fire outbreaks.

研究分野：電気絶縁工学

キーワード：電気機器火災 トラッキング 半断線 短絡 ねじの緩み 伝導ノイズ 火災未然防止

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 電気設備機器火災の発生件数は年々増加している。例えば、東京消防庁管内の発生件数は年間約 1,200 件、全火災件数に占める割合は 30%を超える。このうち配線器具類から出火する火災は出火原因の上位にあり、差込みプラグのトラッキング、電線の短絡、金属接続部の過熱が 3 大要因である。

(2) コンセントにプラグを差し込んだ状態で両者の間にほこりが溜まり、結露などにより水分が供給されるとプラグの差し刃間に電流が流れ、ジュール発熱により絶縁体が炭化してトラッキングが生じる。電線の半断線は電線の短絡を生じるひとつの原因であり、電源コードが家具などの下敷きになったり地震時の外力が加わったりして絶縁被覆が損傷する、あるいは导体素線の一部が切断されて半断線状態が生じ、その状態で使用し続けることにより短絡に至る。金属接触部の過熱は、导体の接続部におけるねじの緩みなどにより接触抵抗が増大して発熱することが原因と考えられている。

(3) これらの原因により発火に至るプロセスは必ずしも明らかになっていないが、放電が重要な役割を果たしている可能性があることをこれまでに指摘してきた。トラッキングの進行を遅らせる対症的対策はあるが、信頼性の高い抜本的な火災防止技術は確立されていない。

(4) 高齢化が進んでおり、また地震活動が活発化している現状において、平時のみならず大規模災害時における電気機器火災被害を最小限に止めるためにも、家庭や工場における配電用機器類の状態を監視して火災を未然防止する技術の確立が社会的に強く要望されている。

2. 研究の目的

(1) 現象の再現

差込みプラグのトラッキング (以下、トラッキング)、電源コードの半断線 (以下、半断線)、配電盤のブレーカの导体接続部のねじの緩み (以下、ねじの緩み) の 3 種類の異常を研究対象とする。これらの原因により発火に至る現象を実験室で再現し、発火に至るプロセスを検討する。

(2) 特徴量および判定条件の検討

予備実験の結果に基づき、3 種類の異常を検出できる特徴量として伝導ノイズを候補とする。種々の条件下で伝導ノイズの測定を行い、詳細に解析する。短絡・発火を確実に検出できること、家電製品のスイッチを入切した場合などに生じる過渡現象と識別できること、を特徴量の最低条件とする。必要があれば、伝導ノイズ以外の特徴量も検討する。

特徴量決定後、上述の最低条件を満たす判定条件を検討する。さらに、発火に至る前、すなわちトラッキング、半断線、ねじの緩みという異常存在自体を検出できるか検討し、火災予兆検出の観点からの判定条件の検討も行う。必要に応じて機械学習の利用を考える。

(3) 常時遠隔監視システムへの展開と課題

(2) で検討する手法の現場適用に向けた提案と課題をまとめる。

3. 研究の方法

(1) 試料および現象再現方法

① トラッキング：市販の差込みプラグ付 VFF 電源コード (12A, 125V, 1.25mm²) と壁付コンセントを試料とした。埃に見立てた綿をプラグの差し刃間に詰め、濃度 0.2%あるいは 0.6%の塩化アンモニウム水溶液をコンセントとプラグの間に 5分に 1回、計 50回滴下してトラッキングを発生・進展させた。プラグおよびコンセントは、実験ごとに新品に交換した。

② 半断線：导体素線数 30本、导体断面積 0.823 mm²の 100V用 VFF 電源コードを用いた。JIS C 3005に準拠した曲げ試験により、导体素線 30本中 26本程度を断線させた半断線電源コード (曲げ試料) を作製した。絶縁被覆の損傷は、目視では確認できなかった。これとは別に、電源コードの 2か所で絶縁体を長さ 1mm程度にわたり除去し、露出させた导体素線 30本中 26本を切断して半断線状態を模擬した試料 (カッター試料) を作製した。2か所の半断線箇所の間隔は 10cmとした。いずれの試料においても、45分間の 6A 通電と 15分間の無通電を 1サイクルとして、短絡が生じるまでこのサイクルを断続的に繰り返した。

③ ねじの緩み：1.25mm² LFV 電線に圧着端子を付け、市販の 100~250V用ブレーカ端子にねじで取り付けた。ねじの状態は次の 5通りとした。状態 1：20cNm でねじを締めつけた緩みのない状態。状態 2 および状態 4：状態 1 の状態から、それぞれねじを 1回転 (360°) あるいは 2回転 (720°) 緩めた状態。状態 3 および状態 5：それぞれ状態 2 および状態 4 のねじを緩めた状

態において、電線を2往復/秒程度の速さで上下させた状態。いずれの状態においても負荷を接続してブレーカに通電した。

(2) 実験回路および測定器

①～③のいずれの実験においても電源は実験室の100Vコンセントから取得し、擬似電源回路網(NARDA, L2-16B)を通して試料に接続した。負荷には、抵抗性の電気ストーブ、ドライヤ、オイルヒータをはじめ、負荷電流に高調波成分が含まれる掃除機、扇風機、電子レンジを用いた。伝導ノイズは、スペクトルアナライザ(GW Instek製, GSP-9330VT, 周波数範囲9kHz～3GHz)により測定した。

4. 研究成果

(1) 現象の再現

① **トラッキング**: 水溶液滴下回数とともにトラッキングが進行すること、放電が散発的に発生すること、進行状態は試料により多少のばらつきがあることを確認した。図1は、40滴滴下後のプラグ表面のトラッキングの例であり、放電により絶縁体の炭化が進んでいることがわかる。この状態からさらに水溶液滴下を続けると発火した。



図1 プラグのトラッキング

② **半断線**: 半断線電源コードに通電・非通電のサイクルを繰り返すと、最終的には図2に示すような短絡が発生した。可燃物が半断線箇所近くにあると着火する場合もあった。短絡が発生するサイクル数は、試料により異なった。片方のケーブルの断線導体素線が、通電により軟化したケーブル間の絶縁被覆を突き破り、他方のケーブルの導体素線に接触することにより短絡が発生すると推定される。なお、曲げ試料とカッター試料とでは、短絡に至る現象に顕著な違いは認められなかった。



図2 半断線電源コードの短絡

③ **ねじの緩み**: ねじを緩めて電線を動かさず状態3および5では、図3に示すような放電が発生した。ねじの近くに紙を置くと着火する場合もあった。一方、ねじを緩めただけの状態2および4では、今回の実験の範囲内では放電は発生しなかった。赤外線温度計(キーサイト社製 U5855A、測定範囲: 0～350℃)を用いて測定した、16A 通電時のねじ付近の温度の時間変化の例を図4に示す。ねじを緩めた状態2および4では接触抵抗が大きくなるため、緩みの無い状態1に比べると温度は上昇するものの最高到達温度は100℃程度である。これに対し、状態3および5では顕著な温度上昇が認められ、特に状態5では350℃(温度測定器の測定上限)に達した。放電発生時に温度が上昇し、消滅時に低下するため図4のような温度変動が生じると考えられる。これらの結果から、接触抵抗よりも放電が温度上昇に大きな影響を及ぼすことがわかる。



図3 ねじ緩み部の放電

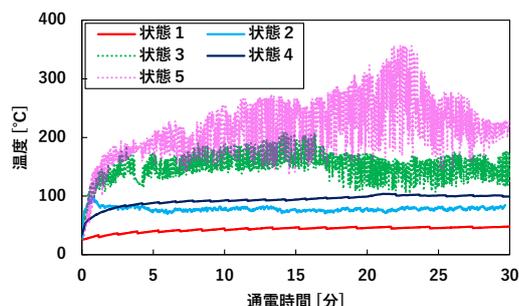


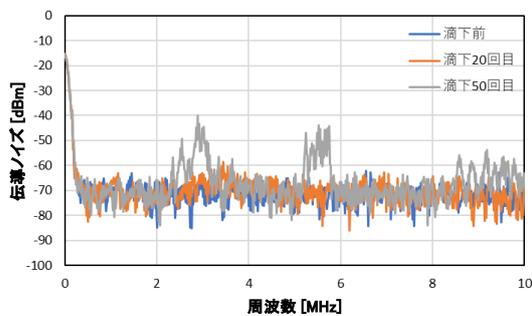
図4 通電によるねじ緩み部の温度上昇

(2) 特徴量および判定条件

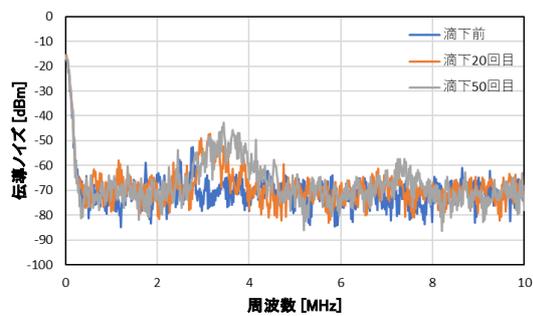
伝導ノイズを特徴量とした。伝導ノイズ測定器の周波数範囲は9kHz～3GHzであり、周波数帯域を変えながら検討した結果、9kHz～10MHzが3種類の現象検出に適切であることが判明した。以下、各現象発生時の伝導ノイズの特徴を記述し、最後に判定条件を示す。

① **トラッキング**: 電気ヒータおよび掃除機を負荷とした場合の伝導ノイズの例を、それぞれ図5(a)および図5(b)に示す。水溶液滴下の繰り返しによりトラッキングが進行すると、トラッキングが無い場合に比べて伝導ノイズレベルが15～20dBm程度上昇することがわかる。レベル上昇は、トラッキングの初期および中期状態(滴下回数10～40回)では断続的に、発火間近の終期状態(滴下回数40回～50回)では連続的に観測された。絶縁体表面で発生する放電がレベル上昇の原因と考えられる。

伝導ノイズレベルが上昇する周波数領域はトラッキングの状態や負荷により異なるが、トラッキングの初期状態においては断続的に、発火直前には連続的にレベル上昇が生じることから、伝導ノイズはトラッキングの初期段階での検出および火災未然防止に有効と考えられる。



(a) 電気ヒータ接続時



(b) 掃除機接続時

図5 トラッキング実験時の伝導ノイズ

② 半断線：半断線部の無い健全電源コードの伝導ノイズの例を図6に示す。パラメータは通電開始後の時間である。通電時間による伝導ノイズの変動はほとんどなく安定している。また、通電・非通電サイクル数の増加に伴う伝導ノイズの変化や、接続する負荷による違いもほとんどなかった。

掃除機を負荷とした場合の半断線試料の伝導ノイズの例を図7に示す。サイクル1では正常電源コードの場合と顕著な違いはなかったが、サイクル27(図7(a))では10dBm程度の伝導ノイズレベル上昇が認められる。サイクル32(図7(b))ではサイクル27と同様のレベル上昇が観測されたのち、短絡が発生して顕著なレベル上昇(黄緑色のスペクトル)が認められた。

短絡発生前の伝導ノイズレベル上昇は、半断線の存在の検出可能性を示唆する。短絡時には全周波数帯域、特に7~10MHz領域のノイズレベルが大幅に上昇していることから、仮に短絡発生前に半断線の存在を検出できない場合であっても、短絡発生は確実に検出できると考えられる。

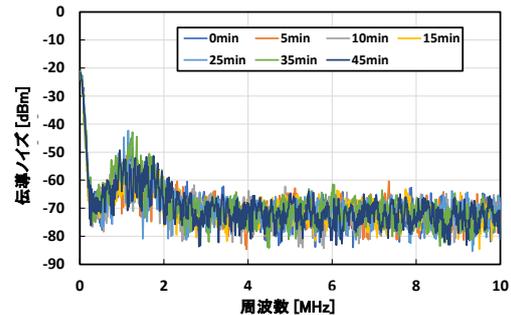
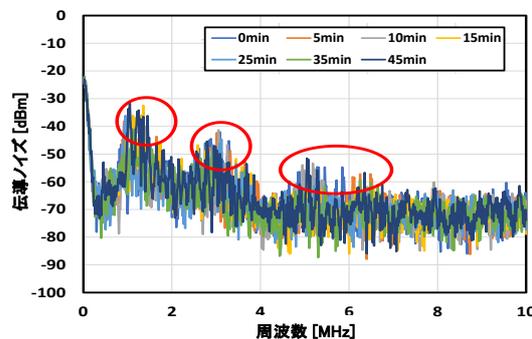
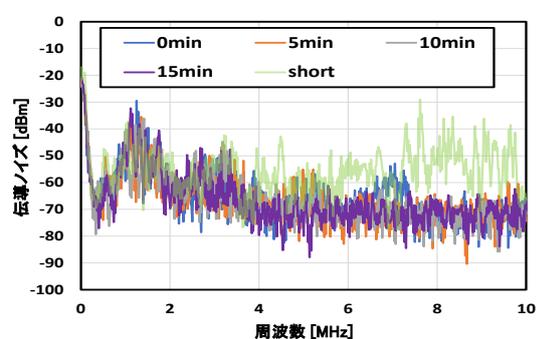


図6 健全電源コードの伝導ノイズ



(a) サイクル27



(b) サイクル32(短絡発生)

図7 半断線電源コードの伝導ノイズ(掃除機接続時)

③ ねじの緩み：掃除機を負荷として接続した場合、ねじの緩みの無い場合の伝導ノイズを図8に示す。ねじの緩みのある状態3および状態5の伝導ノイズを、それぞれ図9(a)および(b)に示す。ねじの緩みがある場合、緩み部に形成される微小空間で放電が発生すると9kHz~10MHzの周波数帯域で伝導ノイズレベル上昇が認められた。

ねじが緩んでいても、放電を発生させなければ伝導ノイズレベルの上昇は観測されなかった。また、放電が発生するのは締め付け状態からねじを60度以上緩めた場合であった。

閾値を適切に設定すれば、ねじの緩み部で発生する放電を検出して火災を未然に防止できる可能性がある。現場においては本実験のように放電が断続的に発生することは無いが、ブレーカに接続される導線に外力が加われば放電が発生すると考えられる。長期にわたり常時伝導ノイズを測定することにより、放電の発生ひいてはねじの緩みを検出できると考えられる。

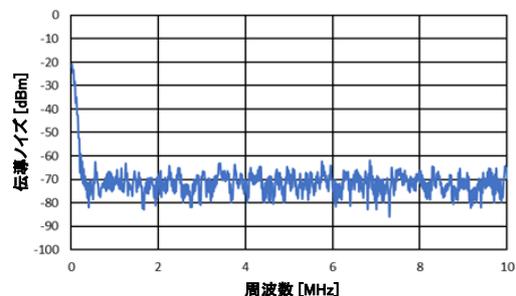
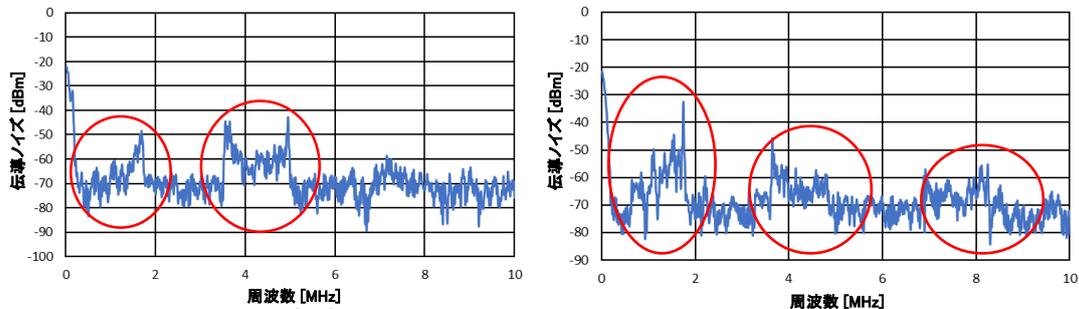


図8 ねじの緩みが無い場合の伝導ノイズ(掃除機接続時)



(a) 状態 3 (360 度の緩み) (b) 状態 5 (720 度の緩み)
 図 9 ねじの緩みがある場合の伝導ノイズ (掃除機接続時)

④判定条件：トラッキング、半断線およびねじの緩みのいずれの現象においても、接続する負荷の種類にかかわらず 9kHz～10MHz の周波数帯域で伝導ノイズレベルが正常時に比べて上昇した。伝導ノイズレベルの上昇程度やレベル上昇が生じる周波数は現象や負荷の種類により異なるものの、家電製品を入切する時に生じる過渡現象とは区別できる。正常状態に比べて伝導ノイズレベルに 10～20dBm 程度の上昇があれば、火災予兆（発火に至る異常の初期・中期段階）の判定ができる可能性が高い。また、20～30dBm 程度の伝導ノイズレベル上昇が、短絡あるいは発火の判定条件として適切と考えられる。

火災予兆検出と短絡・発火検出の 2 段階での判定基準を設定することにより、信頼性の高い火災未然防止が可能と考えられる。また、共通の特徴量で 3 種類の異常現象を検出できることは、火災未然防止システムの実用化の際には小型化や価格の面で大きな利点となる。

9kHz～10MHz の周波数帯域では正常時と異常時の伝導ノイズレベルの違いは大きいため、機械学習を用いなくとも異常を判定できる。周波数帯域を拡大すると正常時と異常時の伝導ノイズレベルの違いが明確ではなくなったが、畳み込みニューラルネットワークなどの機械学習により両者をほぼ 100%の正解率で識別できることを確認した。

(3) 常時遠隔監視システムへの展開および今後の課題

本研究では、壁付コンセントでのトラッキングと半断線の検出を想定した。ひとつの壁付コンセントに接続される負荷は少なく、火災兆候のある負荷を容易に特定できる。周波数帯域 9kHz～10MHz の伝導ノイズを壁付コンセントで測定して集中管理所へ無線通信し、ノイズレベルの解析を行うことで火災予兆を常時遠隔監視するシステムを構築できると考えられる。問題点は、検出回路の実装箇所が多くなることである。

分電盤での検出はひとつの解決策となる可能性があるが、検出する伝導ノイズには複数の壁付コンセントからの情報が含まれることになる。このため、多数の負荷が接続された状態における伝導ノイズの特徴量としての有効性、さらに異常発生箇所の特定手法を検討する必要がある。健全状態と異常状態の検出量の差は小さい場合の異常検出、異常発生箇所特定には機械学習が必要とされる可能性があるが、本研究で検討した機械学習を改良して適用できると考えられる。また、トラッキングに関しては周波数 1MHz 区間毎の伝導ノイズ最大値の時間変化量と継続時間に基づく検出可能性も見出しており、他の現象検出における有効性を検討することにも意義がある。

火災未然防止の確実性および現場適用性の観点から両者を総合的に比較・検討し、適切な監視システムを構築することが今後の課題である。

(4) まとめ

研究成果を要約して示す。

- ①差込みプラグのトラッキング、電源コードの半断線、ねじの緩みの 3 種類の異常に起因する発火や短絡を実験室で再現・解析した。火災発生には放電の寄与が大きいことを明らかにした。
- ②周波数帯域 9kHz～10MHz の伝導ノイズを特徴量とすると、いずれの異常現象においても放電発生時には、接続する負荷に依らず伝導ノイズレベルが正常時に比べて上昇することを明らかにした。
- ③伝導ノイズレベルの上昇程度やレベル上昇が生じる周波数は異常や負荷の種類により異なるものの、過渡現象など他の現象とは区別できる。正常状態に比べて伝導ノイズレベルに 10～20dBm 程度の上昇があれば、火災予兆（発火に至る異常の初期・中期段階）の判定ができる可能性が高い。また、20～30dBm 程度の伝導ノイズレベル上昇が、短絡あるいは発火の判定条件として適切と考えられる。
- ④火災予兆検出と短絡・発火検出の 2 段階での判定条件設定により、信頼性の高い火災未然防止が可能と考えられる。また、共通の特徴量で 3 種類の異常を検出できることは、火災未然防止システムの実用化の際には小型化や価格の面で大きな利点となる。
- ⑤今後、実用化に向けてさらに現場適用性を検討する必要があるが、提案手法により電気機器火災を大幅に低減し得る可能性は高いと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takuma Kondo, Yuki Ito, Yukio Mizuno, Wenyi Lin
2. 発表標題 Feature Analysis for the Detection of Damaged AC Power Supply Cord
3. 学会等名 International Conference of Electrical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水野大貴、竹中清人、平出貴大、水野幸男、林 文移
2. 発表標題 差込プラグのトラッキングに伴う伝導性ノイズの解析
3. 学会等名 電気学会 モータドライブ/家電・民生合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 近藤拓馬、島田美月、水野幸男、林 文移
2. 発表標題 半断線電源コード通電時の伝導ノイズ解析（その3）
3. 学会等名 令和5年 電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉山智嘉等、近藤拓馬、水野幸男、林 文移
2. 発表標題 導体接続部の緩みに起因する伝導ノイズ解析
3. 学会等名 令和5年 電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤悠紀、近藤拓馬、水野幸男、林 文移
2. 発表標題 半断線電源コード通電時の伝導ノイズ解析
3. 学会等名 令和3年度 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮澤柊哉、水野幸男、林 文移
2. 発表標題 ブレーカのねじの緩みに起因する放電発生と導体温度上昇
3. 学会等名 令和3年度 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮澤柊哉、水野幸男、林 文移
2. 発表標題 磁界によるブレーカのねじの緩み検出の基礎検討
3. 学会等名 令和4年 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤拓馬、伊藤悠紀、島田美月、水野幸男、林 文移
2. 発表標題 半断線電源コード通電時の伝導ノイズ解析(その2)
3. 学会等名 令和4年 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林 文移、水野幸男
2. 発表標題 差込みプラグのトラッキング進行過程の解析
3. 学会等名 令和4年 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuma Kondo, Yukio Mizuno, Wenyi Lin
2. 発表標題 Fundamental Study on Detection of Damaged Wiring Appliances for Fire Prevention
3. 学会等名 IEEE Conference of Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 近藤拓馬、島田美月、水野幸男、林 文移
2. 発表標題 半断線電源コード通電時の伝導ノイズ解析(第4報)
3. 学会等名 令和5年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 水野大貴、牧 俊一、平出貴大、竹中清人、水野幸男、林 文移
2. 発表標題 伝導性ノイズによる差込プラグのトラッキング放電検出手法の検討
3. 学会等名 令和6年電気学会全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 近藤拓馬、島田美月、水野幸男、林 文移
2. 発表標題 半断線電源コード通電時の伝導ノイズ解析（第5報）
3. 学会等名 令和6年電気学会全国大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 特許権	発明者 林 文移、水野幸男、 竹中清人、平出貴 大、水野大貴	権利者 名古屋工業大 学、愛知県、河 村電器産業株式
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-025455	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究協力者	竹中 清人 (TAKENAKA Kiyoto)		
研究協力者	水野 大貴 (MIZUNO Daiki)		
研究協力者	林 文移 (LIN Wenyi)		

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
---------	---------