

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06299

研究課題名（和文）電源コードの半断線に起因する火災防止手法確立と現場適用性の検討

研究課題名（英文）Elucidation of Short-Circuit Phenomena of Element Conductors in AC Power Supply Cord and Establishment of Its Detection Method

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） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：電源コードの半断線に起因する可燃物発火を実験室で再現し、半断線部の導体素線短絡が原因であることを明らかにして現象を解明した。素線短絡発生時の電圧および電流波形から特徴を抽出し、素線短絡判定条件を考案した。素線短絡判定回路とブレーカ機能を有する壁付コンセントを試作し、素線短絡判定条件を満たせば100%に近い正解率でブレーカが作動して電力供給を遮断すること、家電製品の電源入切時に生じる過渡現象による誤作動はないことを実験で明らかにした。さらに、導体素線の溶融・断線を電圧波形に基づいて検出する手法も考案し有用性を確認した。提案手法は、電源コードの半断線に起因する火災防止に極めて有効と考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電源コードの半断線（導体素線の一部断線）は電気機器火災の主原因の一つであり、家電製品の電源コードにも生じる身近な問題であるにもかかわらず、現象の詳細は不明で火災防止手法も確立されていない。

本研究では可燃物への着火を実験室で再現し、半断線部の導体素線短絡が原因であることを明確にして現象を解明した点に学術的価値がある。短絡時の電圧・電流波形の特徴に基づいて電力供給を遮断するブレーカを試作し、優れた性能を有することを実証した。さらに、導体素線の溶融・断線を電圧波形に基づいて検出する手法も考案し、有用性を確認した。電源コードの半断線に起因する火災を大幅に低減させ得ると考えられ、社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）： Broken element conductors in AC power cords and in extension cords are one of the main causes of fire accidents originating from electric equipment, which are observed when cords are subjected to external mechanical force.

The present research revealed that short-circuit in such cords resulted in ignition of combustibles and that it was characterized by distortion of voltage and current waveforms from the sinusoidal shape. A novel detection method was proposed based on the waveforms, which enables to distinguish short-circuit from transient phenomena observed when household appliances are turned on/off. A prototype wall outlet combining short-circuit detector and circuit breaker was developed. It was confirmed in laboratory that the detector performed as designed. Furthermore, a detection method of breakage of element conductors was also proposed based on characteristic voltage waveform.

研究分野：電気絶縁工学、高電圧工学

キーワード：電源コード 半断線 火災防止 電圧波形 電流波形 素線短絡検出 素線断線検出

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 工場や家庭で電気設備・機器火災が多く発生している。例えば、東京消防庁管内では図1に示すように年間1,000程度の電気火災が発生し、全火災件数に対する割合は増加傾向にある^[1]。コードや配線などに関連する火災が電気火災の約2割を占める。

[1] 東京消防庁：令和元年版火災の実態
<https://www.tfd.metro.tokyo.lg.jp/hp-cyouyosaka/kasaijittai/h31/data/02CauseOfFire.pdf>



図1 東京消防庁管内の電気火災件

(2) 電源コードの半断線（導体素線の一部が切断された状態）は、電気設備火災の主原因のひとつである。重量物の下敷きになった場合や繰り返し曲げ伸ばしした場合など電源コードに外力が加わると半断線が生じるが、電源コードの絶縁被覆には損傷が認められず外観による判別は難しいことが多い。大地震に伴う外力により電源コードが半断線状態になって停電すると、復電直後に火災が発生する事例も多く報告されている。

(3) 半断線電源コードから可燃物に着火する現象の詳細は、明らかになっていない。

(4) 地震活動が活発化しており、また高齢化が進む現状において、電源コードの半断線に起因する火災による人的・物的被害を最小限にするための技術確立が、社会的に強く要望されている。

2. 研究の目的

(1) 半断線に起因する電源コードの発火再現と現象解明

電源コードの半断線が原因と推定される火災は多いが、火災に至るまでの現象は明らかにされていない。電源コードの導体素線が短絡すると可燃物に着火するとの仮説を実証する。そのために実験室で半断線電源コードから可燃物への着火を再現し、可燃物着火に至るまでの現象を解明する。

(2) 素線短絡検出法の提案

測定の容易な電圧および電流波形の変化に着目し、導体素線短絡を判定する条件を提案する。家電製品のスイッチを入切した場合にも波形が変化するが、このような過渡現象を素線短絡と誤判定しないことを最優先に考える。

(3) 素線短絡検出ブレーカの試作と評価

(2)で得られた素線短絡判定のための回路を内蔵し、素線短絡判定条件を満たした場合に電力供給を遮断するブレーカを試作し、種々の条件下で性能評価を行う。さらに、実用化に向けて現場適用性の検討を行う。

(4) 素線断線検出法の提案

半断線が進行し導体素線が数本のみ導通状態にある場合には、素線に流れる電流により素線温度が上昇し最終的には素線が溶融して断線に至る（素線断線）。断線時にアーク放電が発生するため、近くに可燃物があれば着火する可能性がある。火災による被害を最小限に抑えるため、電圧波形の歪みに着目して素線断線を検出するための条件を提案し、評価する。

3. 研究の方法

(1) 試料

素線短絡実験では、導体素線数30本の100V用VFF電源コードにJIS C 3005 4.27に準拠した曲げ試験を行い、導体素線の一部を断線させた半断線試料を作製した。外見上は半断線箇所の絶縁被覆に亀裂などの異常は認められなかったが、図2に示すX線CT写真により半断線状態になっていることを確認した。半断線模擬試料をより簡単に作製するため、電源コードの絶縁被覆にカッターナイフで幅1mmの切込みを入れ、その箇所の導体素線の一部を断線させた試料も実験に供した。



図2 半断線部のX線CT写真



図3 半断線部の可燃物

一方、素線断線の実験には、導体素線数50本の100V用VFF電源コードを用い、導体素線1本だけを残して残りを切断して半断線状態を模擬した。半断線箇所の長さは1cmであり、この部分の絶縁被覆は除去されている。

(2) 実験方法

素線短絡実験では、屋内配線を模擬した400mΩの抵抗を通して試料に200W電球8個を負荷

として接続した。電源コードの半断線箇所の上に可燃物（クッションの一部）を置いた場合と置かない場合について実験を行った。可燃物を置いた場合の様子を図 3 に示す。13.5A の通電 45 分間および無通電 15 分間の計 60 分間を 1 サイクルとし、このサイクルを素線短絡が発生するまで断続的に繰り返した。コンセント電圧および回路電流の波形をオシロスコープ（Tektronix 製 DP04104）で記録した。

素線断線実験の場合には、試料に 1050W の電気ヒータを接続し、11.1A の電流を素線断線が生じるまで連続的に通電した。電圧および電流波形は、オシロスコープ（Agilent 54832B）で記録した。

4. 研究成果

(1) 半断線に起因する電源コードの発火再現と現象解明

半断線試料上に置いた可燃物への着火の再現に成功した。短絡発生時には必ずしも可燃物に着火する訳ではないが、着火した例を図 4 に示す。短絡はサイクル開始（通電開始）直後に発生することがほとんどであることから、着火メカニズムを次のように推定した。(i) 導体素線の一部が断線すると、電流は残りの素線に流れるためジュール発熱が大きくなる (ii) ジュール発熱により素線温度が上昇し、絶縁被覆が軟化する (iii) 通電を停止すると絶縁被覆は温度の低下とともに収縮する (iv) 収縮時の応力により片方のケーブルの断線素線が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 (v) 再通電直後に素線短絡が発生する (vi) 短絡電流により素線温度が急上昇し、最終的にはアーク放電が発生し素線が溶断する (vii) 電源コードに接触する可燃物の発火温度以上になった場合には可燃物にすることがある。

なお、実験に使用した市販の 20A ブレーカは、素線短絡発生時に作動することがなかった。素線短絡による電流の大きさおよび持続時間を解析した結果、可燃物の有無にかかわらず図 5 に示すようにブレーカの作動する領域外にあることがわかり、素線短絡検出用ブレーカ開発の必要性が確認できた。



図 4 半断線部に置いた可燃物への着火

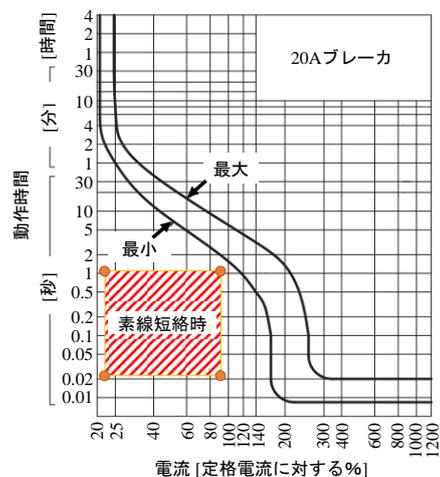


図 5 素線短絡電流の大きさと持続時間

(2) 素線短絡検出法の提案

素線短絡発生時の電圧および電流波形の例を図 6 に示す。通電開始後約 30ms で素線短絡が発生し、それ以降は次に述べる波形の特徴が現れる。コンセント電圧は瞬時値が 60V より大きくならない。また、60V 付近には高調波成分が現れて波形が歪むが、60V より小さいところでは波形に顕著な歪みは認められない。一方、電流は短絡後に急増してピーク値付近が尖り、ゼロクロス付近では 0V に近い値となり横軸に平行な波形が数 ms 持続する。このような波形が 560ms まで持続した後、導体素線が溶断して電流が 0A に落ち着いた。

他の試料で得られた電圧・電流波形においても、素線短絡発生時には同様の特徴が認められた。この結果に基づき、素線短絡時の電圧・電流波形の歪みの特徴に基づく半断線の素線短絡判定条件を考案した。

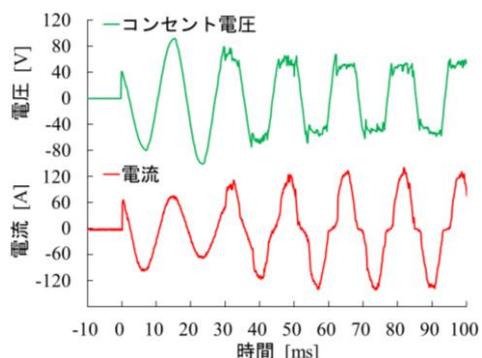


図 6 素線短絡時の電圧・電流波形の例

(3) 素線短絡検出ブレーカの試作と評価

素線短絡判定条件を判断するプログラムを作成し、市販のプレトラッキングコンセントを改造して、素線短絡判定条件を満たした場合に電力供給を遮断するブレーカを試作した。素線短絡判定回路から遮断信号を受け取ると、ブレーカの遮断機構が作動する仕組みである。

試作ブレーカの特性評価を、半断線試料を用いて評価した。電流供給直後に素線短絡が発生した時の様子を図 7 に示す。図 8 は、ブレーカ作動時の電圧および電流波形の例である。素線短絡発生から約 20ms 後に電流が零になり電圧が復帰していることから、素線短絡判定条件を満たした場合には約 1 サイクルで電力供給を遮断できることがわかる。電源コードの長さが 4m の場



図 7 試作ブレーカ性能評価の様子

合、判定条件を満足した74回のうち73回作動し、正解率は73/74=98.65%であった。

素線短絡検出器の現場適用を考える上で最も重要なことは、誤作動（素線短絡が発生しない状態でブレーカ作動して電力供給遮断）を起こさないことである。白熱電球、掃除機等の家電製品素線短絡検出器内蔵壁付コンセントに接続し、ON/OFFを30回繰り返して過渡現象による電圧・電流波形の歪みを生じさせたが、ブレーカは一度も作動しなかった。すなわち、過渡現象で生じる電圧・電流波形の歪みは素線短絡判定条件を満足せず、電力供給遮断しないことを確認できた。

以上のことから、素線短絡検出器は素線短絡判定条件に従って正確に作動しており、素線短絡時の電圧・電流波形に着目して提案した素線短絡検出法は有効であることが示された。

なお、分電盤における素線短絡検出の検討も行ったが、ブレーカの作動正解率は壁付コンセントでの検出に比べて若干低下した。分電盤には多数の負荷が接続されており、素線短絡検出が難しくなるためと推定される。また、電力供給遮断時には素線短絡を生じていない負荷への電力供給も遮断されて不具合が生じることから、壁付コンセントでの素線短絡検出と電力遮断が妥当と考えられる。

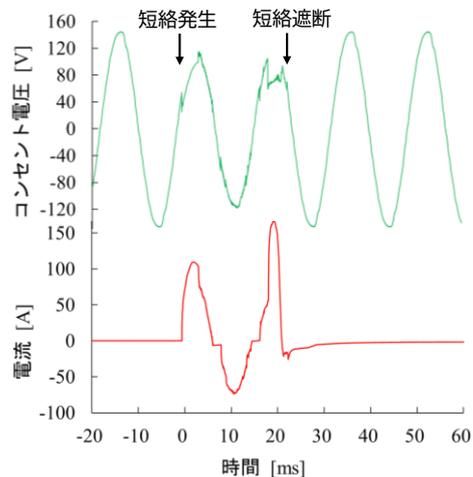


図8 ブレーカ作動時の電圧・電流波形

(4) 素線断線検出法の提案

負荷を1050Wの電気ヒータとした場合の素線断線に至る過程を図9に示す。通電前は銅色であった素線（図a）が、通電による発熱により温度が上昇して赤色になる（図b）。さらに通電を続けると強い発光を伴いアーク発弧し（図c）、やがて消弧（図d）して断線に至り、電流が流れなくなる。半断線部に可燃物があると図10のように着火することがあるが、この場合は導体素線が1本であるため(3)の素線短絡に比べて電流が小さく着火確率は低い。

アーク発弧・消弧前後の電圧波形および電流波形の例を、図11に示す。アーク発弧および消弧時に波形に歪みが生じる。消弧後には素線が溶断するため電流はゼロとなり、電圧波形の歪みは無くなり正弦波に戻る。アーク放電に伴う電流の急激な変化により放電ノイズが発生し、電圧および電流波形にスパイクノイズとして重畳され波形に歪みが生じると考えられる。

この歪みを特徴付け素線断線検出に用いる物理量を、図11に示す歪み時間（発弧から消弧までの時間：この場合は約2.2ms）を対象として検討した結果、照査電圧波形と実験電圧波形との差に着目した素線断線判定条件を提案する。ここで、照査電圧波形はアーク発弧する1周期前の

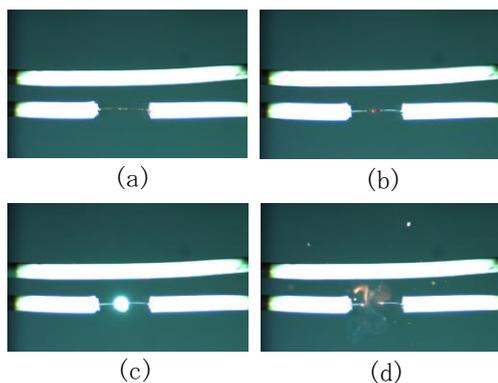


図9 素線断線時の様子



図10 素線断線時の可燃物への着火

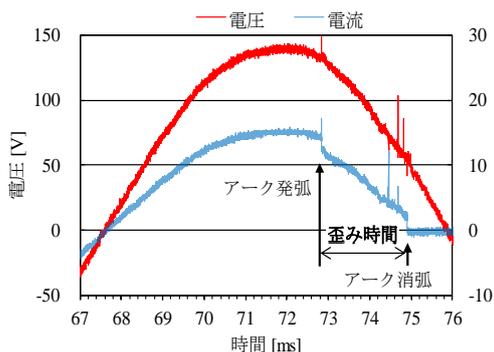


図11 アーク発生時の電圧・電流波形素

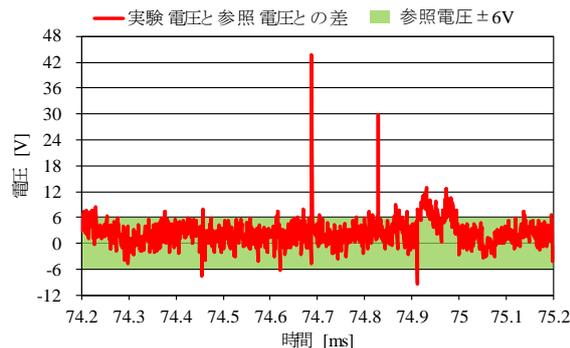


図12 逸脱時間を求める波形の例

1/2 サイクル分の電圧波形を、実験電圧波形は素線断線時に観測された歪みのある電圧波形をそれぞれ意味する。

電圧の差を特徴付ける量として、実験電圧波形が照査電圧波形の $\pm 6V$ の幅から逸脱する時間の総和を逸脱時間とする。図 11 に示す素線断線時(74~75msの範囲)の波形において、実験電圧と照査電圧の差を求め、照査電圧 $\pm 6V$ と比較した結果を図 12 に示す。この差は照査電圧 $\pm 6V$ の幅にほとんど収まっているが、パルス状の部分などではその幅を逸脱している。逸脱している箇所の持続時間の合計は $184\mu s$ であり、これが逸脱時間となる。種々の条件下で実験を行った結果、逸脱時間にばらつきはあるものの、 $70\mu s$ 以上となる割合がおおよそ80%となることが判明した。

そこで、(i) 逸脱時間が $70\mu s$ 以上でありかつ(ii)次サイクルにて電流がゼロとなることを素線断線判定条件とする。 $\pm 6V$ の幅および $70\mu s$ は、実験結果に基づいて決定している。家電製品などのスイッチを入れた際の過渡現象によっても電圧波形の歪みが生じるが、負荷に電流が流れ続けるため(2)の条件により素線断線と識別することができる。また、負荷を増減した場合にも過渡現象が生じるが、この際の電圧波形の歪みも同様に除くことができる。

掃除機、ドライヤ、電気ヒータなどの家電製品使用時に生じる過渡現象で逸脱時間が $70\mu s$ 以上となることは、ほとんどなかった。また、これらの家電製品使用時に素線断線が生じた場合には、家電製品により多少の違いはあるものの、80%以上の場合に素線断線判定条件を満足することを確認した。すなわち、負荷に起因する電圧波形の歪みが生じる場合でも、電源コードで素線断線が発生すれば、提案する判定条件により両者を識別して素線断線のみを検出できる可能性が高い。

なお、素線断線が起きるが判定条件を満たさない事例では、ほとんどの場合において電流値がゼロ付近でアークが発生しており、電圧波形の歪みが極めて小さいことがわかった。目視観察では、アーク発弧に伴う発光が弱く感じられた。現場適用を考える際には、さらに多くの条件下で同様の実験を行い、統計的手法を用いて素線短絡判定条件における逸脱時間や参照電圧の幅の最適値を検討する必要がある。

(5)まとめ

最後に、研究成果を要約する。

- ①半断線電源コードに起因する可燃物着火を実験室で再現し、断線した導体素線の短絡により可燃物に着火するメカニズムを明らかにした。
- ②素線短絡時の電流の大きさおよび持続時間は市販のブレーカの作動範囲外にあり、市販のブレーカでは素線短絡の検出はできないため、新たなブレーカの開発が必要不可欠であることを示した。
- ③素線短絡時の電圧波形および電流波形の特徴を抽出し、これに基づく素線短絡判定条件を提案した。さらに、素線判定条件を満足した場合に電力供給を遮断するブレーカを試作し、素線短絡発生時にはほぼ100%の正解率で遮断できること、家電製品などの負荷接続時の過渡現象に起因する誤作動は全く生じないことを示した。
- ④素線断線時には電圧波形が歪むことを示し、この歪みを特徴付ける逸脱時間を導入した。さらに、逸脱時間と電流持続時間に閾値を設定した素線断線判定条件を提案し、家電製品を負荷として使用した場合に80%以上の正解率で素線断線を検出できることを明らかにした。
- 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、本研究で提案する素線短絡検出法と素線断線検出法により、電源コードの半断線に起因する火災を大幅に低減し得る可能性が高いと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 1件）

1. 著者名 竹中清人、水野幸男、吉田敦至	4. 巻 139
2. 論文標題 火災未然防止のための電源コードの導体素線断線判定法の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌D	6. 最初と最後の頁 76～82
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejias.139.76	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 Takenaka Kiyoto, Ishikawa Yusuke, Mizuno Yukio, Lin Wenyi	4. 巻 13
2. 論文標題 Arc Discharge-Induced Ignition of Combustibles Placed on a Damaged AC Power Supply Cord	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en13030681	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 竹中清人、水野幸男、吉田敦至
2. 発表標題 電源コードの素線断線判定法の検討
3. 学会等名 平成30年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、名城大学（名古屋市）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石川由祐、小松一輝、水野幸男、吉田敦至
2. 発表標題 電源コードの半断線に起因する可燃物着火現象の検討（第2報）
3. 学会等名 平成30年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、名城大学（名古屋市）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takenaka Kiyoto, Mizuno Yukio, Yoshida Atsushi
2. 発表標題 Condition Monitoring of Damaged AC Power Supply Cord Using Voltage Waveform
3. 学会等名 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Perth, Australia (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ishikawa Keisuke, Takenaka Kiyoto, Mizuno Yukio, Yoshida Atsushi
2. 発表標題 Discharge-Induced Ignition of Combustibles on Ac Power-Supply Cords
3. 学会等名 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Cancun, Mexico (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石川由祐、竹中清人、水野幸男、河合智成、吉田敦至
2. 発表標題 半断線電源コードの短絡発生現象の基礎検討
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会、北海道科学大学（札幌市）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹中清人、水野幸男、吉田敦至
2. 発表標題 電源コードの導体素線断線判定法の基礎検討
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会、北海道科学大学（札幌市）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川由祐、山本真弘、水野幸男、吉田敦至
2. 発表標題 電源コードの半断線に起因する可燃物着火の基礎検討
3. 学会等名 平成29年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、名古屋大学（名古屋市）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石川由祐、水野幸男、吉田敦至
2. 発表標題 電源コード半断線に起因する可燃物着火現象の検討
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会、九州大学（福岡市）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石川由祐、竹中清人、水野幸男、河合智成、吉田敦至
2. 発表標題 電源コードの半断線に起因する火災発生過程の検討（2報）
3. 学会等名 2019年度日本火災学会研究発表会、早稲田大学（東京都）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹中清人、水野幸男、林 文移
2. 発表標題 電源コードの導体素線断線判定法の基礎検討（第2報）
3. 学会等名 令和元年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、大同大学（名古屋市）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川由祐、小松一輝、水野幸男、吉田敦至
2. 発表標題 電源コードの半断線による短絡発生の基礎検討
3. 学会等名 令和元年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、大同大学（名古屋市）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takenaka Kiyoto, Ishikawa Keisuke, Mizuno Yukio, Kawai Tomonari, Yoshida Atsushi
2. 発表標題 Fundamental Investigation of Discharge-Induced Fire from Damaged Ac Power Supply Cord
3. 学会等名 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Richland, U.S.A. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹中清人、水野幸男、林 文移
2. 発表標題 半断線電源コードの着火現象と検出手法の検討
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会、東京電機大学（東京）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石川由祐、水野幸男、林 文移
2. 発表標題 半断線電源コードの短絡遮断器の試作と評価
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会、東京電機大学（東京）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 コード短絡検出回路及び検出方法	発明者 石川由祐、水野幸 男、林 文移	権利者 名古屋工業大 学、河村電器産 業株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-035192	出願年 2020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)	あいち産業科学技術総合センター	
研究 協力 者	林 文移 (Lin Wenyi)	河村電器産業株式会社	