

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26420231

研究課題名（和文）電源コード短絡の現象解明と検出手法確立

研究課題名（英文）Elucidation of Short-Circuit Phenomena of Element Conductors in Ac Power 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） 3,900,000円

研究成果の概要（和文）：電源コードの素線短絡による発火を再現し、現象を解明した。素線短絡時の電圧波形の歪みに着目し、歪みを特徴付ける検知時間と持続時間に基づく素線短絡判定条件を提案した。素線短絡判定回路とブレーカを有する壁付コンセント（検出器）を試作し、判定条件を満たせばほぼ100%の正解率で作動すること、過渡現象による誤作動はないことを明らかにした。提案手法は、素線短絡による電気機器火災の未然防止に有効と考えられる。

研究成果の概要（英文）：Short-circuit of element conductors in AC power cords of household appliances/extension cords is one of the main causes of fire accidents originating from electric equipment. This kind of short-circuit is observed when a cord is crushed by heavy material, bent and stretched repeatedly, or even the exerted force from earthquake. It is difficult to detect short-circuit with a conventional circuit breaker, because of its smaller current magnitude than the threshold and short duration of short-circuit.

The present research revealed that short-circuit was characterized by distortion of voltage waveform from the sinusoidal shape. A novel detection method was proposed based on the distortion, which enables to distinguish short-circuit from transient phenomena at the time of turning on/off of household appliances. Furthermore, a prototype wall outlet combining short-circuit detector and circuit breaker was made. It was confirmed in laboratory that the detector performed as designed.

研究分野：電気絶縁、故障診断、信頼性評価

キーワード：電源コード 素線 短絡 電圧波形 検出器 壁付コンセント

### 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。図1に示すように、東京消防庁管内では年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約20%であった。
- (2) 電線の導体同士が接触する「電線の短絡」は、電気火災の主要因のひとつである。家具などの重量物を乗せる、繰返し曲げ伸ばしする、地震により引っ張られる、などにより電源コードに外力が加わると、導体素線が断線したり素線の一部が絶縁体から外にはみ出したりする。素線同士が接触して短絡すると、素線が溶断して火災の引き金になり得る。
- (3) 閾値以上の電流を感知した時に作動する市販のブレーカは、このような素線短絡では作動しない。素線短絡時の短絡電流は電流閾値に比べて小さく、素線が溶断するため短絡電流の持続時間が極めて短いことがその理由として考えられる。
- (4) 電源コードの素線短絡に起因する火災による人的・物的被害を根絶するため、火災未然防止を可能とする素線短絡検出技術の確立が強く望まれている。

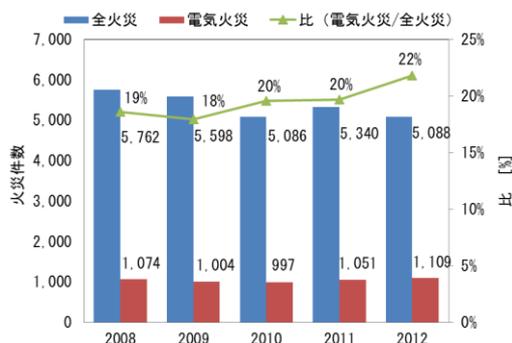


図1 東京消防庁管内の火災発生件数、電気火災件数およびその割合

### 2. 研究の目的

- (1) 電源コードの素線短絡現象の解明  
電源コードの素線短絡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。実験室で素線短絡を再現し、現象を解明する。
- (2) 素線短絡検出に用いる特徴量の提案  
素線短絡再現実験を種々の条件下で実施し、現象を特徴付ける物理量を抽出する。
- (3) 素線短絡判定条件の設定  
(2)で抽出した物理量を詳細に解析し、素線短絡判定条件を設定する。誤判定をしないことを最優先に考える。
- (4) 素線短絡検出器の試作と現場適用性検討  
(3)で設定した素線短絡判定回路を内蔵する素線短絡検出器を試作し、種々の条件下で性能評価を行う。さらに、実用化を視野に入れて現場適用性の検討を行う。

### 3. 研究の方法

- (1) 試料  
市販の100V電源コードを実験に供した。

電源コードは外径3.2mmのビニルコード平角線であり、直径0.18mmの素線50本を束ねた直径1.5mmの導体上に絶縁体が被覆してある。

#### (2) 実験方法

2本の電源コードを用意し、片方は50本の素線導体のうち1本または数本を取り出し、他方は50本の素線を軽く撚った状態とした。両方の電源コードを対向して配置し、素線数の少ない方の電源コードを動かして両者を図2のように接触させ、短絡を発生させた。電圧および電流波形の解析のしやすさの観点から、接触位置はそれぞれの素線先端から約5mmとした。

実験回路を図3に示す。実験室の分電盤から60Hz、100Vを直接供給した。回路の右端に電源コードを置き、素線を接触させることにより短絡を発生させた。屋内配線および家庭用電気製品の電源コードをそれぞれ模擬した抵抗 $R_1$ および $R_2$ を回路に挿入した。 $R_1$ は0.125~2.2 $\Omega$ とした。 $R_2$ は現象解明時には0.5 $\Omega$ とし、素線短絡検出器の特性評価時には電源コードの長さを1~4m(0.00135 $\Omega$ /m)で変えることにより設定した。

Tektronix TDS3034Bにより、電圧波形および電流波形をサンプリング速度100 $\mu$ sで記録した。電圧波形は図2の $V_2$ で、電流波形は $V_1$ を $R_1$ で除して求めた。電圧波形を $V_2$ で記録したのは、壁付コンセントにおける短絡検出を想定したためである。また、高速カメラ(ディテクト HAS-L2C)により現象を撮影した。



図2 素線短絡の状態例

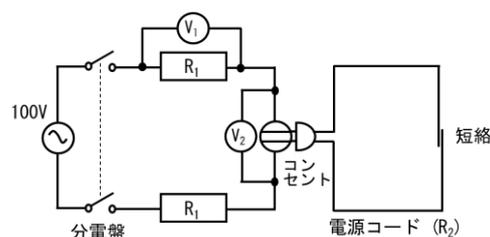


図3 実験回路

### 4. 研究成果

#### (1) 電源コードの素線短絡現象

片側の電源コードの素線を1本とした場合の短絡時の現象を図4に示す。素線接触と同時に電流が流れて接触点で微小発光が観測される(図b)が、すぐに収まる。短絡電流が流れ続けるため、発熱により素線の温度が上昇して赤くなる(図d)。さらに通電が続くと強い発光を伴ってアーク発弧し(図e)、最終的には素線溶断により消弧(図f)して電流は流れなくなる。

この時の電圧および電流波形を、図5に示す。図4(a)から(f)の撮影時点も、図5中に示す。素線が接触すると、電流が流れ始め電圧は低下する。この例では、約4周期の間電流が流れ続けてアーク発弧が始まる。発弧から約半周期後に消弧して電流が流れなくなり、電圧が復帰する。

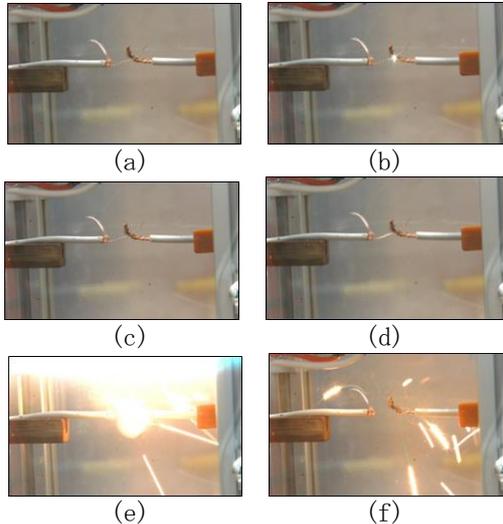


図4 素線短絡の状況 ( $R_1=2.2\ \Omega$ ,  $R_2=0.5\ \Omega$ )  
(a)素線接触直前 (b)素線接触直後 (c)および(d)素線接触中 (e)アーク発生 (f)アーク消弧 (素線溶断)

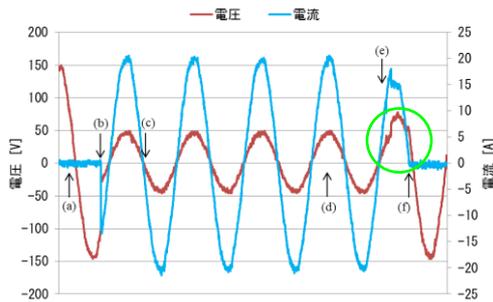


図5 素線短絡時の電圧・電流波形

## (2) 検出に用いる特徴量

図5より、アーク発弧から消弧までの間(緑で囲った部分)で、電圧波形に歪みが生じていることが分かる。このような電圧波形の歪みは、 $R_1$ の値を変えても共通して観測される。

電圧波形の歪みを拡大した例を図6に示す。実験電圧は素線短絡時の電圧である。参照電圧は素線短絡が生じない場合の電圧であり、素線短絡が生じる直前の実験電圧波形を示したものである。素線が接触すると電流が流れ始め、素線溶断とともに零となる。電流が流れている時間を短絡時間とする。短絡時間内で電圧波形が正弦波から歪む時間を歪み時間とする。

$R_1$ の3種類の抵抗値で得られた歪み時間の度数分布を、抵抗値の区別をせず併せて図7に示す。歪み時間はほぼ1~7msの間に分布しており、1/2サイクル(8.3ms)未満である。すなわち、素線短絡時に生じる電圧波形の歪

みの持続時間は1/2サイクル未満であり、短絡発生から1サイクル以内には電圧が復帰して波形の歪みがなくなる。

素線短絡発生時の電圧位相により短絡時間は異なり、この電圧位相は歪み時間の分布の一因となる。各条件下で100回ずつ実験を実施した範囲では、電圧位相にかかわらず電圧波形の歪は認められており、歪み時間に基づく解析は妥当と考えられる。

歪み時間内において実験電圧瞬時値が所定の幅に入る時間を検知時間とすると、検知時間は電圧波形の歪を表す特徴量になる。本研究では、実験電圧瞬時値が28.2~84.6V(参照電圧波高値141Vの20~60%)の間に入る時間を検知時間と定義する。検知時間は $R_1$ にも依存するが、実験に用いた全ての $R_1$ において検知時間が3ms以上となる割合は80%以上であることを確認した。

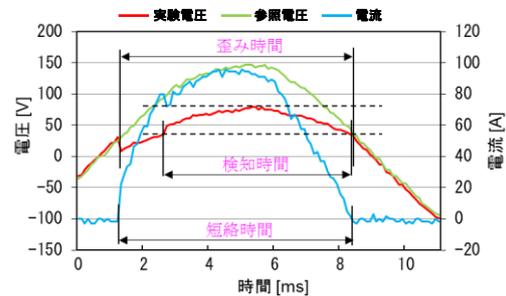


図6 電圧波形の歪みと検知時間の定義

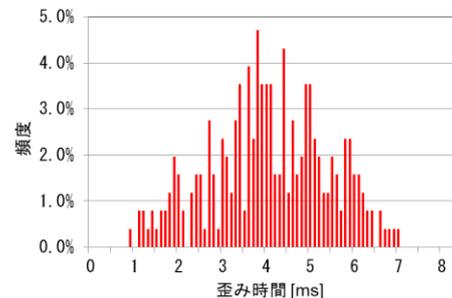


図7 歪み時間の分布

## (3) 素線短絡判定条件

壁付コンセントに接続された家庭用電気製品をON/OFFする際の過渡現象によっても、電圧波形の歪みが生じる可能性がある。素線短絡検出を正確に行うためには、このような過渡現象と素線短絡現象とを区別できる判定条件を設定しなければならない。

図3に示した実験回路のコンセントに各種家庭用電気製品を接続し、スイッチをON/OFFした直後の電圧・電流波形を記録した。例として、1000Wの掃除機をONにした場合の電圧および電流波形を図8に示す。スイッチを入れて電流が流れ始めると、過渡現象により電圧波形が歪むことがわかる。電圧波形の歪みが持続する時間は、数サイクルにわたる。

次に、負荷接続により生じる過渡現象発生時の検知時間を評価する。歪み時間は数サイクルにわたるが、スイッチを入れてから1サ

イクルを対象として解析した結果を図9に示す。図中の①および②は、それぞれ負荷接続時から1/2サイクル(解析範囲①)とそれに続く1/2サイクル(解析範囲②)を意味する。

白熱電球および掃除機の場合は、解析範囲①における検知時間が3ms以上であり、素線短絡との区別ができない。他の機器の場合には検知時間が3msより短く、素線短絡と区別できる。解析範囲②においては、白熱電球および掃除機ではやはり検知時間が3msを超えている。

以上の結果に基づき、素線短絡時の電圧波形の歪みと負荷接続時の過渡現象に伴う電圧波形の歪みを区別し、素線短絡を判別する条件を次のようにした。

素線短絡あるいは負荷接続により電流が流れ始めてから1/2サイクルまでを解析範囲①、その直後の1/2サイクルを解析範囲②として、解析範囲①における検知時間が3ms以上であり、かつ、解析範囲②の終わりまでに電圧が復帰するとき、素線短絡と判定する。

この判定条件では検知時間が3ms未満である素線短絡の検出は難しい。しかしながら、実用化の際に最も重要となる誤判定については検出器の誤作動は、ほぼ完全に回避できると考えられる。

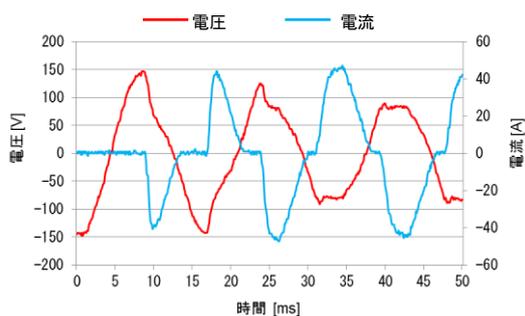


図8 掃除機のスイッチを入れた場合の電圧および電流波形

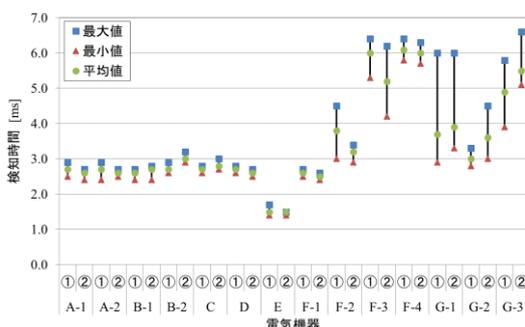


図9 各種家庭用電気製品接続時の検知時間 (A)電子レンジ, (B)ヒータ, (C)ドライヤ, (D)アイロン, (E)電気ポット, (F)白熱電球, (G)掃除機.

(4) 素線短絡検出器の試作と現場適用性検討  
素線短絡判定条件を評価する回路を内蔵し、検出時には電力供給を遮断するブレーカを有する壁付コンセントを試作した。その外観を図10に示す。

図3のコンセントを素線短絡検出回路とブ

レーカのついた壁付コンセントに変更し、検出器の作動を評価した。 $R_1$ と $R_2$ の全ての組合せにおいて、それぞれ100回の素線短絡を発生させ、検出器の作動の有無を確認するとともに電圧および電流波形を記録した。

検出器作動時および未作動時の電圧および電流波形の例を、図11に示す。作動時には素線短絡開始から約1サイクルで電圧が零になり、電力供給を遮断できることがわかる(図(a))。一方、検知時間が3msより短い場合には、素線短絡発生により電圧波形は歪むものの、素線短絡判定条件を満足しないため検出器は作動せず、電力供給は遮断されない。素線短絡とともに電圧は復帰する(図(b))。

検出器の正確性を評価するため、素線短絡判定条件を満足した実験回数に対する検出器動作回数の比を求めた結果を図12に示す。例えば、電源コードの長さが4m ( $R_2=0.50\Omega$ )の場合、判定条件を満足した74回のうち73回作動(正解率 $73/74=98.65\%$ )したことを表す。1つの条件を除いて100%近い正解率が得られており、検出器は素線短絡判定条件に基づいて正しく作動していることがわかる。

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検出器が作動して電力供給を遮断)を起こさないことである。図9に示した検知時間が3ms以上の負荷(白熱電球、掃除機)を素線短絡検出器内蔵壁付コンセントに接続し、ON/OFFを30回繰り返したが、検出器は一度も作動しなかった。検知時間が3ms以上であっても1サイクル以内に電圧復帰しない過渡現象の場合には検出器は作動せず、誤作動は起こらないことが確認できた。

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、素線短絡時の電圧波形の歪みとその持続時間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、検出器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るため素線短絡検出が難しくなる可能性があること、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10 素線短絡検出機能付コンセント

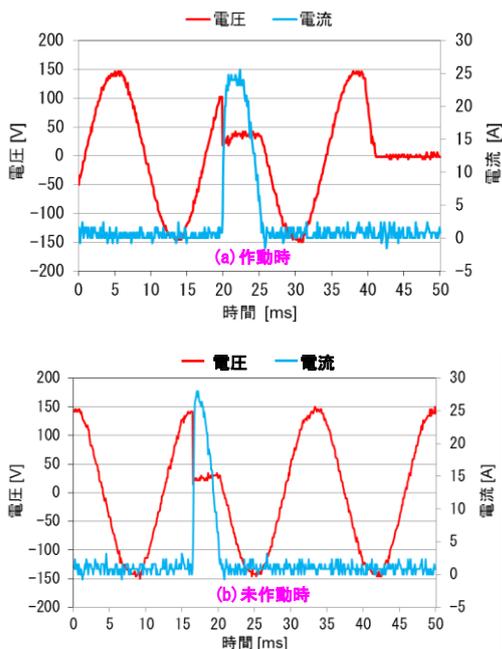


図 11 素線短絡検出器作動時(a)および未作動時(b)の電圧・電流波形

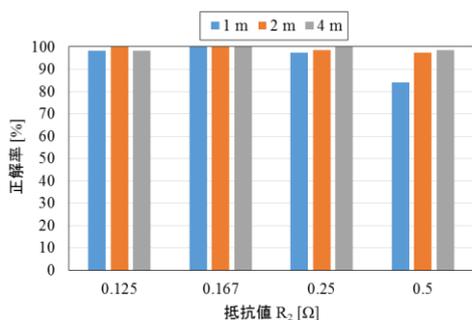


図 12 素線短絡判定条件を満たした場合の検出器の作動正解率

#### (5) まとめ

最後に、研究成果を要約する。

- ①素線短絡時には電圧波形の歪みが観測される。この歪を特徴づける量として、検知時間を導入した。
- ②素線短絡時には、検知時間が 3ms 以上となる割合は 80%を超える。また、短絡開始から 1 サイクル以内に素線が熔断して電圧は復帰し、電圧波形の歪みはなくなる。
- ③家庭用電気製品等の負荷接続・遮断時の過渡現象によっても電圧波形が歪む。検知時間は電気製品により異なるが、3ms 以上となり素線短絡との区別ができない場合もある。一方、電圧波形の歪みが持続する時間は長く、数サイクルにわたる。
- ④素線短絡判定条件を、「検知時間が 3ms 以上、かつ、電流が流れ始めてから 1 サイクル以内に電圧波形の歪みがなくなる」とする。
- ⑤素線短絡判定回路を内蔵した検出器とブレーカを有する壁付コンセントを試作して実験室で作動評価を行い、検知時間が 3ms 以上の素線短絡はほぼ 100%の正解率で検出で

きること、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明らかにした。

素線短絡時間は短く 1 回の素線短絡で火災に至ることは稀と考えられるため、断続的に生じる数回の素線短絡のいずれかを検出すれば火災を未然防止できる可能性が高い。今回の研究の範囲内では、検知時間が 3ms 以下の素線短絡が数回続けて発生する確率は低い。これらのことから、検知時間が 3ms 未満の素線短絡検出には改良の余地はあるものの、提案する素線短絡判定条件により火災の未然防止ができる可能性は高いと考えている。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ①深川健太、小出裕貴、水野幸男、吉田敦至：「電源コードの素線短絡検出器の試作と評価」、査読有、電気学会論文誌 D、137 巻、1 号、pp. 24-29、2017。  
DOI:10.1541/ieejias.137.24

[学会発表] (計 8 件)

- ①Teppei Abe, Kenta Fukagawa, Yukio Mizuno, Atsushi Yoshida: “Arc Discharge Detection Caused by Short-Circuit in AC Power Supply Cord”, 査読有、IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, No. 4B-21, Toronto, Canada, October 18, 2016.
- ②Teppei Abe, Kenta Fukagawa, Yukio Mizuno, Atsushi Yoshida: “Evaluation of Prototype Detector of Short-Circuit of Element Conductors in AC Power Cord”, 査読有、International Conference on Electrical Engineering, ID 90351, Naha, Japan, July 5, 2016.
- ③Kenta Fukagawa, Teppei Abe, Yukio Mizuno, Atsushi Yoshida: “Proposal of Detection Method for Short-Circuit of Element Conductors in AC Power Cord”, 査読有、International Conference on Electrical Engineering, ID 15A-057, Hong Kong, July 7, 2015.
- ④太田秀俊、阿部哲平、深川健太、水野幸男、吉田敦至：「電源コードの素線短絡器の試作と評価 (第 3 報)」、平成 29 年電気学会全国大会、No. 4-216、富山大学五福キャンパス、3 月 15 日、2017。
- ⑤深川健太、阿部哲平、杉本佳、水野幸男、吉田敦至：「電源コードの素線短絡法の現場適用性の評価」、平成 28 年電気学会全国大会、No. 4-243、東北大学川内北キャンパス、3 月 18 日、2016。
- ⑥深川健太、阿部哲平、水野幸男、吉田敦至：「電源コードの素線短絡器の試作と評価 (第 2 報)」、平成 27 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、No. J2-4、名古屋工業大学、9 月 28 日、2015。

- ⑦深川健太、阿部哲平、水野幸男、吉田敦至：  
「電源コードの素線短絡器の試作と評価」、  
平成 27 年電気学会全国大会、No. 4-192、  
東京都市大学世田谷キャンパス、3月25日、  
2015.
- ⑧深川健太、阿部哲平、水野幸男、吉田敦至：  
「電源コードの素線短絡検出回路の評価」、  
平成 26 年度電気・電子・情報関係学会東  
海支部連合大会、No. B3-7、中京大学名古  
屋キャンパス、9月9日、2014.

[その他]

ホームページ等

<http://mizuno-lab.web.nitech.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

水野 幸男 (MIZUNO YUKIO)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50190658

### (2) 研究協力者

吉田 敦至 (YOSHIDA ATSUSHI)

河村電器産業株式会社・研究開発部・主任  
技師