

博士論文

電気設備機器火災の現象解明と  
火災兆候検出手法に関する研究

(Study on Elucidation of Ignition Process of Electric  
Apparatus and Fire Sign Detecting Methods)

2021 年

竹中清人

# 目 次

<b>第1章 序論</b> .....	1
1.1 電気火災の現状.....	2
1.2 火災事例と発火原因.....	5
1.2.1 半断線・短絡が原因とされる火災.....	6
1.2.2 接触部緩みが原因とされる火災.....	7
1.3 従来の研究および検出法の概要と課題.....	8
1.3.1 半断線.....	8
1.3.2 断線.....	9
1.3.3 短絡.....	10
1.3.4 接触部緩み.....	11
1.4 本研究の目的および概要.....	12
1.4.1 本研究の目的.....	12
1.4.2 論文の概要.....	13
<b>第2章 半断線電源コードの導体素線断線検出法</b> .....	15
2.1 はじめに.....	16
2.2 半断線電源コードの抵抗値.....	16
2.3 素線断線時の現象解明.....	19
2.4 素線断線時の歪み時間の検討.....	23

2.5	素線断線検出条件の提案.....	26
2.6	素線断線検出条件の検証.....	31
2.7	まとめ.....	41
<b>第3章</b>	<b>半断線電源コードの短絡現象の解明.....</b>	<b>43</b>
3.1	はじめに.....	44
3.2	半断線電源コード通電時の温度と抵抗値の変化.....	44
3.3	短絡現象と素線断線時の検出.....	51
3.4	まとめ.....	57
<b>第4章</b>	<b>伝導性ノイズによるブレーカの導体接続部緩み検出法.....</b>	<b>58</b>
4.1	はじめに.....	59
4.2	緩み箇所の抵抗値と伝導性ノイズ.....	60
4.3	深層学習を用いた緩み検出法.....	71
4.4	まとめ.....	78
<b>第5章</b>	<b>結論.....</b>	<b>80</b>
5.1	本研究で得られた成果.....	81
5.2	今後の課題および展望.....	86

参考文献.....	88
謝辭.....	94
研究業績.....	95

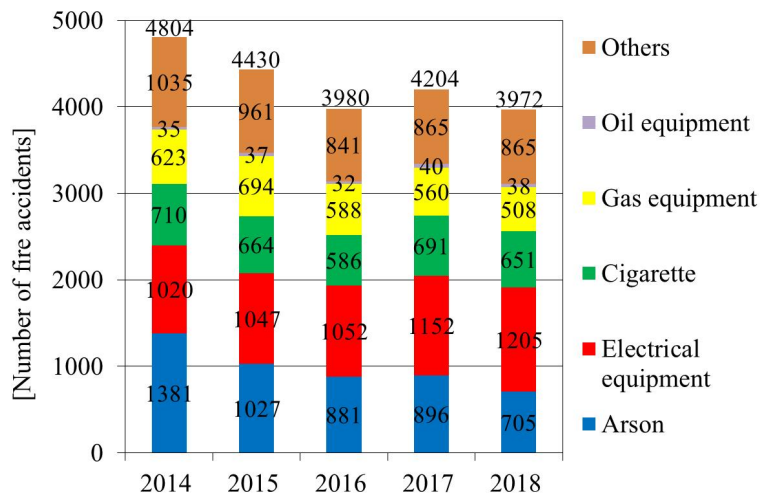
# 第 1 章

## 序論

## 1.1 電気火災の現状

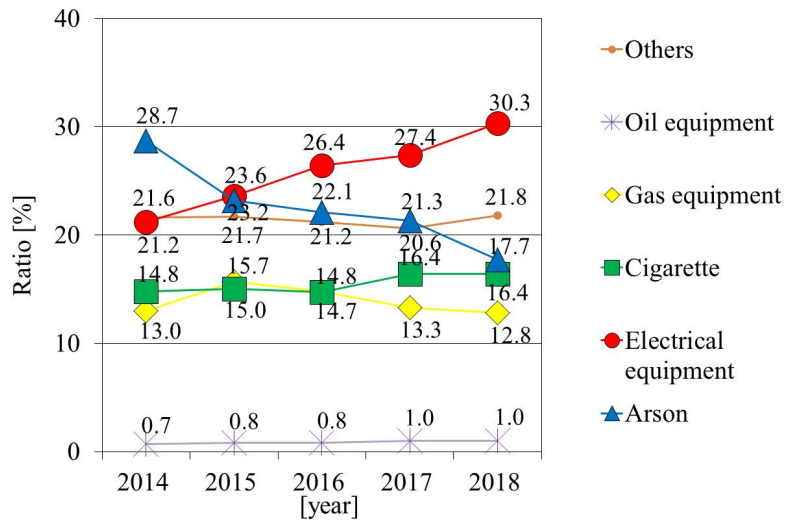
近年、経済の発展とともに生活水準が向上し、より快適な生活が求められるようになった。昭和の時代には冷蔵庫や洗濯機、エアコンのように生活に密着した家電製品が普及し、平成～令和にはスマートフォンやロボット掃除機、スマートスピーカーなど、デジタル家電が普及しており、家庭における電気の役割がますます大きくなっている。また、産業界ではロボットによるオートメーション化が進み、IoT (Internet of Things) や AI (Artificial Intelligence) を組み合わせた新たな需要創出が期待されており、電気機器の重要性が高まっている。その一方で、一般家庭や工場等の生産現場や商業施設などの様々な環境において、電気設備機器に衝撃・振動・荷重等の機械的ストレスや電気・熱・化学ストレス等が加わることにより火災が多く発生している。

東京消防庁が発表した2014年から2018年までの過去5年間に東京消防庁管内で発生した火災について、主要な出火原因別の火災件数と総火災件数に占める割合<sup>[1]</sup>を Fig.1.1 に示す。東京消防庁は昭和35年から都内市区町村の消防事務の受託を逐次開始し、総火災件数が9,000件台<sup>[1]</sup>に達した時期もあるが、近年は減少傾向にあり、2018年は最小の3,972件となった。これは、放火とたばこによる出火が2014年にはそれぞれ1,381件、710件であったが、2018年には705件、651件と大幅に減少したためである。この理由は、それぞれ防犯カメラの設置台数増加と失業率の低下、喫煙者の減少が原因と考えられている<sup>[1]</sup>。



(a)火災件数

(a)Number of fire accidents



(b)火災割合

(b)Ratio of cause to total number of fire accidents

Fig.1.1 主要な出火原因の推移<sup>[1]</sup>

Fig.1.1 Temporal variation of major causes of fire accidents<sup>[1]</sup>.

しかしながら、電気設備機器を起因とする火災は 2014 年には 1,020 件であったが、2018 年には 1,205 件となり、増加傾向にある。総火災件数に占める割合も増加し、2015 年以降は最も多い出火原因となり、2018 年には 30%を超えている。2018 年の電気設備機器火災 1,205 件について、出火要因の内訳<sup>[1]</sup>を Fig.1.2 に示す。最も多い短絡は 304 件 (25%) であり、電源コードやテーブルタップ、機器内の配線で発生している。2 番目に金属の接触部 (以下、接触部) 加熱を起因とする火災が多いが、分電盤内のブレーカや接続端子、配線や圧着端子の接続部が緩むことにより火災に至っている。半断線は 21 件 (2%) で 10 番目に多い要因であるが、半断線状態では発火せず、ジュール熱により絶縁被覆が熔融して短絡に至り発火する場合は考えられるが、現象の詳細について解明されておらず、不明な点が多く存在している。なお、一般的な電源コードの導体は細い軟銅線 (素線) をより合わせた構造で、本論文では素線の一部が切れた状態を半断線という。従って、半断線状態の電源コードや接触部加熱を起因とする火災を減らすことは、社会的要望が極めて高い事項である。

一方、大規模地震に伴う火災においても、出火原因が不明なケースを除くと電気設備機器を起因とする割合が最も高く、1995 年の阪神・淡路大震災や 2011 年の東日本大震災においては 60%を超えている<sup>[2]</sup>。地震発生時の外力が電源コードに加わり、素線が半断線あるいは断線状態になって、電気の復旧に伴い火災に至ったとの報告もある<sup>[3]</sup>。

このような状況に鑑み、日常生活時や地震災害時における電気設備機器火災の早期検出や未然防止に貢献するため、本論文では半断線電源コードとブレーカの接触部加熱を対象とした電気設備機器火災の現象解明と火災兆候検出手法について検討した結果を取りまとめる。



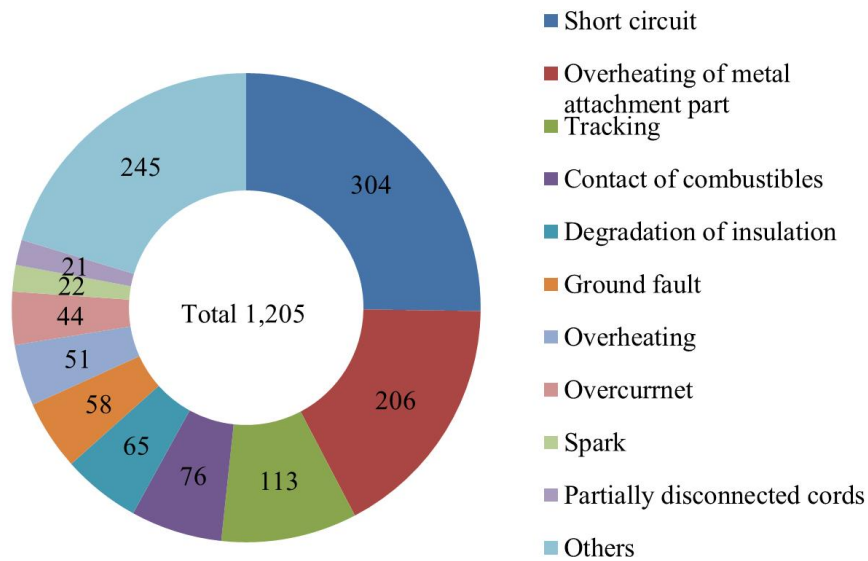


Fig.1.2 電気設備機器火災の出火要因（2018年）<sup>[1]</sup>

Fig.1.2 Origin of fire accidents from electrical equipment<sup>[1]</sup>.

## 1.2 火災事例と発火原因

電源コードの半断線状態や、差込プラグの接触部加熱などを起因とする火災が多く報告されている。また、半断線状態や接触部異常となる原因は多岐にわたるため、地方公共団体等から注意喚起がされているが、依然として火災が発生している。

## 1.2.1 半断線・短絡が原因とされる火災

### (i) 火災事例

#### (1) 電気あんかからの火災<sup>[4]</sup>

就寝中に足元の電気あんかから発火し、布団等が焼け焦げた火災が発生した。発火原因は、電源コードのあんか側の付け根の部分でコードの芯線が半断線したことにより徐々に通電が悪くなり発熱し、短絡に至り布団に着火した可能性が高い。半断線の原因については、使用過程で折り曲げや引っ張り、ねじれにより繰り返し負荷が加わったためと考えられる。

#### (2) 延長コードからの火災<sup>[5]</sup>

住宅内の延長コードから発火し、男性が死亡した。発火原因は、コード内の導体が半断線状態になり、短絡したためである。半断線の原因については、延長コードがたんすの下敷きになり、踏み付けられたことである。

#### (3) 洗濯乾燥機からの火災<sup>[6]</sup>

住宅内の洗濯乾燥機から発火し、洗濯乾燥機が設置されていた部屋が焼ける火災が発生した。発火原因は電線を接続する端子部分で半断線状態になり、局部的に過熱し、絶縁被覆が発火したためである。半断線の原因については、端子のかしめ方が不適正であったことや、機器の振動が考えられる。

## (ii) 注意喚起と発火原因

電気製品を実際に使用する際に電源コードに過度な曲げや引っ張り、ねじり、重量物による踏みつけ、振動等の外力、不適切な配線工事などにより、コードが半断線状態となることで火災が発生する。そのため、電気設備機器を安全に使用するよう地方公共団体や消防本部、独立行政法人製品評価技術基盤機構などから注意喚起や啓発がされている<sup>[7]-[10]</sup>。その中で、半断線状態から発火する原因が、3つ示されている。1つ目は、半断線部分の抵抗が局所的に高くなることによるジュール熱、2つ目は放電による発熱、3つ目は絶縁被覆が溶けることにより短絡に至って過大な電流が流れることによる発熱である。

### 1.2.2 接触部緩みが原因とされる火災

#### (i) 火災事例

##### (1) 差込プラグからの火災<sup>[11]</sup>

住宅兼作業場の壁付けコンセントに差し込まれた延長コードのプラグから火災が発生し、建物が全焼した。発火原因は、プラグ内で電源コードを固定しているねじが緩んだことにより接触抵抗が増加し、発熱したためである。接触部緩みの原因については、長年の使用によるものと考えられる。

##### (2) 分電盤内の銅バーからの火災<sup>[12]</sup>

住宅の分電盤内の銅バーから火災が発生し、建物の壁面などが焼損した。発火原因は、銅バーと配線用遮断器を接続するねじが緩んだことによる放電と、接触

---

抵抗の増加により発熱したためである。接触部緩みの原因については、工事によるねじの締め付け不足もしくは、ドアの開閉に伴う振動などが考えられる。

### (ii) 注意喚起と発火原因

配線や圧着端子, 分電盤内のブレーカのねじなどの接続部への振動, 経年劣化, コンセントの受刃や差込プラグに外力が加わることによる変形, 差し込み不足, 不適切な配線工事などにより, 接触部が緩んだ状態となることで火災が発生する。そのため, 電気設備機器を安全に使用するように地方公共団体や消防本部, 独立行政法人製品評価技術基盤機構などから注意喚起や啓発がされている<sup>[10] [13] [14]</sup>。その中で, 接触部緩みから発火する原因が, 2 つ示されている。1 つ目は, 接触部緩み箇所の抵抗が局所的に高くなることによるジュール熱, 2 つ目は放電による発熱である。

## 1.3 従来の研究および検出法の概要と課題

### 1.3.1 半断線

これまでに, 半断線状態の電源コードに通電した場合の導体素線の温度上昇や発火について, 実験および計算による検討がなされている<sup>[15] [16]</sup>。電源コードの半断線状態, 通電電流と温度上昇の関係について, 実験結果が詳しく報告されており, 断線と接触を繰り返すことによりアーク熱が発生し, 温度が上昇する可能性

があることも指摘されている<sup>[17]</sup>。この熱により絶縁被覆が融け、芯線同士が接触して短絡へ至り、より大きな電流により温度が上昇する可能性が考えられる。

半断線状態の検出法については、絶縁被覆電線に 0.14THz の電磁波を照射した時の反射強度から内部画像を作成して判定する手法<sup>[18]</sup>が提案されている。また、プリント基板と IC の接続部に対してテストプローブにより方形波信号を印加した場合の電流値により判定する手法<sup>[19]</sup>が提案されているが、いずれも半断線が疑われる箇所を直接測定する必要がある、配線してある電源コード全体を検出することは困難である。

### 1.3.2 断線

これまでに、電源コードの片方が断線している箇所から発生するアーク放電について検証されている<sup>[20][21]</sup>。絶縁被覆である PVC (polyvinyl chloride) の表面や断線の間隙が炭化し、アーク放電が発生する。さらに、アーク放電や絶縁被覆の PVC の分解により発生する揮発性ガスが、炭化の進展を助長すると報告されている<sup>[22]</sup>。この断線部分からの着火や、最終的に短絡に至って大電流が流れることによる着火が考えられる。

電源コードの断線状態の検出法に関する報告は、著者が調査した範囲では無いようであるが、プリント基板上の配線の断線について測定プローブと基板間の静電容量の変化から検出する手法が提案されている<sup>[23]</sup>。非接触で測定ができ、測定値から配線を可視化できるため断線箇所が判明しやすいが、断線が疑われる箇所を直接測定する必要がある。プリント基板上の配線と IC のピンの間の断線について電流値の変化から検出する手法<sup>[24]</sup>が提案されているが、事前に断線前の電流値を測定する必要がある。

断線検出器は製品化され、各社から市販されている。LED形信号機、電気炉等のヒータ回路の断線検出<sup>[25][26]</sup>が可能であるが、いずれも正常状態の電流値から外れた場合に検出しているため、電源コードのように負荷が多種多様で電流値が一定でない条件には適していない。

### 1.3.3 短絡

短絡の検出法については、電源コードに対して GFFC (ground-fault-forced cable) を用いて短絡を地絡に変えて検出する手法<sup>[27]</sup>や、短絡時に発生するアーク放電から放射される紫外線により検出する手法<sup>[28]</sup>が検討されているが、実際の現場適用性や精度について検証がされていない。また、電圧値と波形歪み時間による検出法の提案<sup>[29]</sup>や、検出器の試作評価<sup>[30]</sup>がされているが、検出精度に課題がある。電動機の固定子巻線の短絡について逆相電流とアドミタンスから検出する手法<sup>[31]</sup>や、各相の電圧・電流波形から求めた逆相成分を用いた評価式から検出する手法<sup>[32]</sup>が提案されているが、いずれも事前に電動機のアドミタンス値や電圧・電流波形を計測しておく必要があり、電源コードの短絡に応用することは困難である。

高電圧用の短絡検出器は過電流継電器として JIS 規格<sup>[33]</sup>に規定され、電力系統や受配電システムの短絡保護のために製品化<sup>[34][35]</sup>され、広く普及している。これは電流値と時間により動作特性が決められており、保護先に応じて事前に整定値を定める必要がある。

電源コードの短絡保護のため、JIS 規格<sup>[36]</sup>に規定されたコード短絡保護用瞬時遮断機能を有したブレーカが市販されている<sup>[37][38]</sup>。JIS 規格には正弦波の半波の電流を用いて得られる瞬時動作電流が 300A (実効値) 以下でなければならない

と規定されているが、電源コード短絡の実験結果では実効値 100 数十 A 程度<sup>[29] [30]</sup>の報告がある。この電流値は短絡の様態や回路条件により変わるものの、市販のブレーカでは検出できない短絡保護が課題である。

### 1.3.4 接触部緩み

これまでに、導線の絶縁被覆である PVC から発生する熱分解ガスがコンセントの刃受と差込プラグ間の接触抵抗の増加に及ぼす影響<sup>[39]</sup>や、大気中の NO<sub>x</sub> が主因となる配電用遮断器接点の接触抵抗増加のメカニズム<sup>[40]</sup>、温度と微小摺動の複合ストレスによるプリント基板コネクタの接触抵抗増加<sup>[41]</sup>、ねじの緩みによる抵抗値の増加と温度上昇<sup>[42] [43]</sup>について検討されている。導体間の接触状態が不安定な場合にアーク放電が発生し、PVC 分解時に発生するガスやアーク放電時に生じるカーボンにより、放電が継続することが確認されている<sup>[22]</sup>。

接触部緩みの検出法については、低圧開閉器の模擬接点近傍に超音波を加えて電圧波形から接触不良を検出する手法<sup>[44]</sup>や、電源コード間、コードと圧着端子間、コンセントと差込プラグ間を対象に電流波形から離散ウェーブレット変換を用いた解析および変流器とフィルタにより検出する手法<sup>[45]</sup>や、開閉器の接触部の入出力電圧波形の比較により検出する手法<sup>[46]</sup>検討されているが、実用性や検出精度に課題がある。

市販の非接触赤外線放射温度計等を用いて、高圧配電盤や分電盤の過熱状況について点検されることがあるが、手間や人件費のコストが課題となる。

## 1.4 本研究の目的および概要

### 1.4.1 本研究の目的

これまで述べてきたように、電気設備機器を起因とする火災が増加傾向となっているにも関わらず、発生メカニズムに不明な点が多い。また、様々な検出法が検討され、対策製品が市販されているが、現場適用性や検出精度などに課題がある。そこで、本研究では電気設備機器火災の早期検出や未然防止に貢献するため、現象解明と兆候検出手法について検討する。

本論文では、電気設備機器火災の主原因となる3つの現象に着目して実験と検討を行った結果を取りまとめる。

まず、電源コードの半断線状態から素線断線へ至る現象を解明し、素線断線検出法を考案してその有効性について確認する。これにより、火災の早期検出や、断線間で生じるアーク放電火災の未然防止に貢献できる。

次に、電源コードの半断線状態から絶縁被覆が溶融して短絡に至り、アーク放電により可燃物に着火し、断線する現象を解明する。また、先に提案する素線断線検出法の適用について検討する。これにより、従来の短絡検出法では検出できず断線に至るケースが検出可能となり、火災の早期検出や、短絡による火災の未然防止に貢献できる。

さらに、分岐回路用ブレーカの導体接続部を対象とし、ねじ端子が緩んだ際の間隙で放電が生じ、増加した伝導性ノイズの周波数スペクトルからAI (Artificial Intelligence) を用いた緩み検出法を検討する。これにより、接触部加熱による火災の未然防止に貢献できる。



### 1.4.2 論文の概要

本論文は以下の5つの章から構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的を述べている。電気設備機器火災の実態やこれまでに提案されている断線や緩みなどの検出法の概要や課題を整理し、本研究の意義を明確にしている。

第2章では、半断線電源コードの導体素線の断線検出法を検討している。電源コードの絶縁被覆を除去し、導体素線の1本だけを残して切断し、最も苛酷な半断線状態を模擬している。この試料に負荷を接続して通電した場合のアーク放電から断線に至る現象と、アーク発弧および消弧時に電圧・電流波形に歪みが生じることを明らかにしている。また、半断線箇所可燃物を置いた場合に、アーク放電により熔融した高温の素線が周囲に飛散し、着火する現象を再現している。さらに、波形の歪み時間（発弧から消弧までの時間）は電源コードの長さに関わらず半波長以内であることに着目し、半波長毎の電圧波形の比較による素線断線検出法を提案している。使用中の負荷のスイッチを切り、電流を遮断する際の過渡現象によって生じる電圧波形の歪みと、素線断線時の歪みを有効に識別できることを示している。

第3章では、半断線電源コードが短絡し、アーク放電により可燃物へ着火し、断線する現象を解明している。電源コードにJISに基づく曲げ試験を行い、絶縁被覆の外見上は損傷が見られないが、内部導体素線の一部が断線した半断線状態を模擬した試料を用いている。この試料に負荷を接続して通電と無通電を断続的に繰り返し、半断線箇所の絶縁被覆に熱膨張と熱収縮によるストレスが加わり、素線が絶縁被覆を突き破ることにより短絡し、激しいアーク放電が発生して可燃物に着火し、断線する現象を明らかにしている。また、電圧波形に歪みが生じる

---

ため、第2章で提案する検出条件により断線を有効に検出できることを示している。

第4章では、分岐回路用ブレーカの導体接続部を対象とし、ねじ端子が緩んだ際の間隙で発生する放電の状況と化学分析結果を踏まえて、火災に至るメカニズムを検討している。また、放電発生時には伝導性ノイズが増加することを明らかにしている。この伝導性ノイズは、ある特定の周波数で増加するのではなく、幅広い帯域で増加するため、周波数に規則性を見出すことは困難であることを示している。また、負荷である電気機器から発生する伝導性ノイズと緩みに起因するノイズを有効に識別するため、種々の電気製品を対象に端子のねじに緩みがある状態とない状態の周波数スペクトルについて AI の一手法である畳み込みニューラルネットワークを適用し、緩みがある状態を検出する手法を検討している。本手法によれば、高精度に緩み検出が可能であることを明確にしている。

第5章では、本論文で得られた成果と今後の課題について述べている。

## 第 2 章

# 半断線電源コードの 導体素線断線検出法

## 2.1 はじめに

従来、提案されている半断線状態の検出法では、0.14THzの電磁波<sup>[18]</sup>や方形波<sup>[19]</sup>により半断線の疑義箇所を直接測定する必要がある。そのため、屋内外に配線してある電源コードへの適用は非常に困難である。

断線検出法については、プリント基板を対象に静電容量<sup>[23]</sup>や電流値<sup>[24]</sup>の変化から検出する手法が提案されているが、疑義箇所の直接測定や事前に健全状態の電流値測定の必要があり、課題となっている。また、LED形信号機や電気炉等のヒータ回路を対象とした市販の断線検出器<sup>[25][26]</sup>では、電源コードのような複数の負荷による重畳電流や高調波電流が流れる場合には適していない。

そこで、本章では半断線状態の電源コードが素線断線に至る現象を解明し、さらに検出法を考案してその有効性について確認する。

## 2.2 半断線電源コードの抵抗値

半断線により局所的に抵抗が増加してジュール熱により火災に至ると推定されていることから、健全な電源コードと半断線電源コードの抵抗値の違いを明らかにするため、実測により比較検討する。100V用電源コードに半断線状態を導入した試料を作製し、実験に供した。電源コードの導体は直径0.18mmの素線50本を束ねた直径1.5mm、公称断面積1.25mm<sup>2</sup>、定格電流12Aの撚り線であり、外周に絶縁体が被覆してある外径3.1mmのビニル平形コードである。この電源コードは、電気製品のコードとして広く使用されている。

(i) 試料

1対の電源コードを2本に分離した。片方の電源コードは50本の素線のうち1本だけを残して切断し、最も苛酷な半断線状態を模擬した。他方の電源コードは健全な状態のままとした。半断線電源コードの写真と概略図を Fig.2.1 に示す。電源コードの全長  $L$  は 10, 50, 100, 200, 400cm のいずれかとした。半断線箇所長さ  $D$  は 1cm であり、絶縁被覆は除去した。

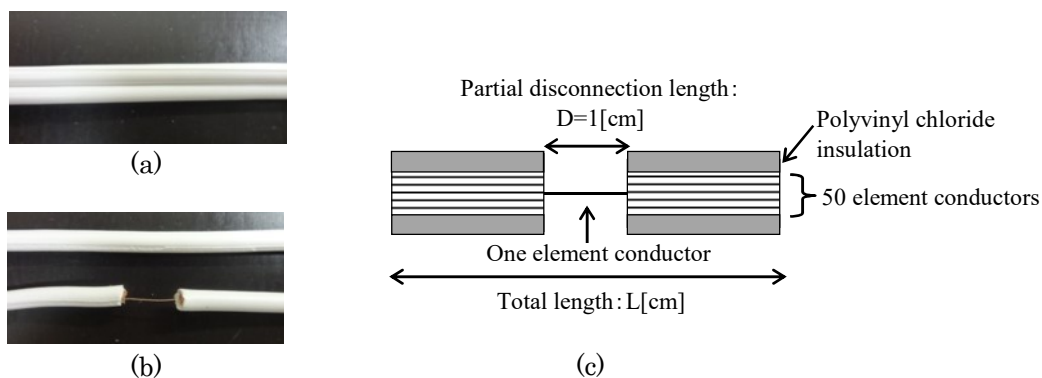


Fig.2.1 実験試料 (a)健全電源コード, (b)半断線電源コード, (c)概略図

Fig.2.1 Sample used for experiments. (a)photograph of healthy cord, (b)photograph of partially disconnected cord, (c)Schematic diagram indicating partial disconnection of element conductors.

(ii) 抵抗値の測定結果

試料長  $L$  を 10, 50, 100, 200, 400cm の 5 通りとして、それぞれの長さの健全な電源コードと、半断線電源コードの抵抗値について、抵抗計（日置電機 RM3545）を用いてそれぞれ 30 回測定した結果を Fig.2.2 に示す。

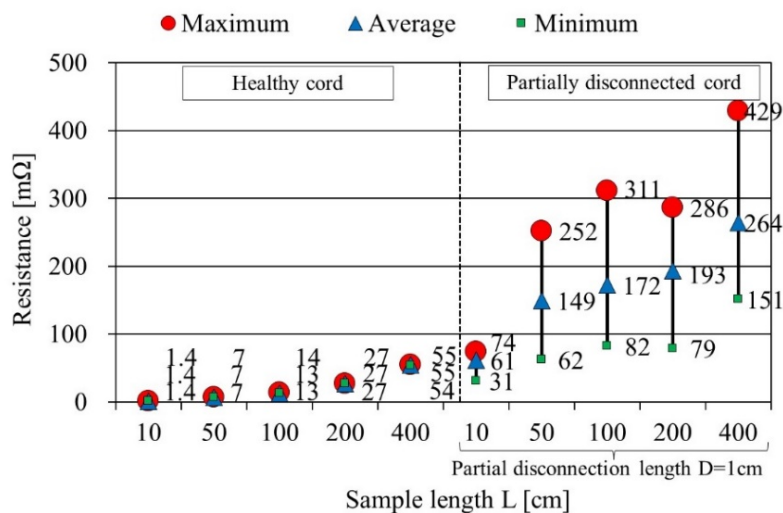


Fig.2.2 電源コードの抵抗値

Fig.2.2 Values of resistance of healthy and partially disconnected cords.

### (iii) 考察

健全な電源コードと比べ、半断線電源コードでは全ての試料長  $L$  において抵抗値が高くなることが明らかとなった。健全な電源コードの抵抗値は  $L$  にほぼ比例して上昇し、サンプル間のばらつきは小さい。一方、半断線電源コードでは、 $L$  が長くなると抵抗値が高くなる傾向があるが、サンプル間のばらつきが大きい。これは、素線 1 本と断線した 49 本との間の接触圧の影響などが考えられる。半断線電源コードの抵抗値は、 $L$  よりも素線 1 本箇所の影響が大きいことが明らかとなった。

以上より、実際の現場では半断線箇所の残素線数やその長さ  $D$ 、撚線の接触圧等の影響により半断線箇所の抵抗が高くなり、ジュール熱やアーク放電により火災に至る可能性が考えられる。

## 2.3 素線断線時の現象解明

従来、半断線電源コードが断線に至るメカニズムや可燃物に着火する現象が明らかにされていないため、実験室にて現象を再現し、断線検出法の手掛かりを得る。Fig.2.1 に示す半断線電源コードに通電した場合の連続写真および電圧・電流波形を測定し、アーク放電を経て素線断線に至る過程の検証を行う。また、半断線箇所に可燃物を置いた場合に、着火に至る現象を明らかにする。

### (i) 実験方法

実験回路を Fig.2.3 に示す。電源は 100V, 60Hz の壁付コンセントから供給し、試料の電源コードには負荷を接続した。通電時の電圧波形および電流波形を、オシロスコープ (Agilent 54832B) を用いて記録した。試料長  $L=10\text{cm}$ 、負荷として 1,050W の電気ヒーターを接続し、通電により素線が半断線状態から断線に至る際の連続写真を高速度カメラ (フォトロン FASTCAM SA1.1) により 10,000fps で撮影した。

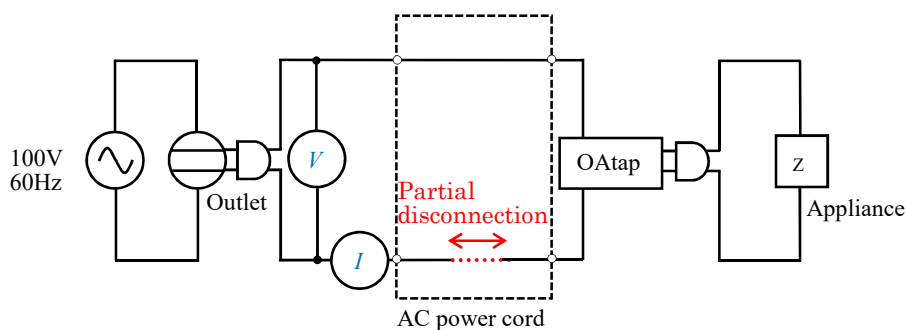


Fig.2.3 実験回路

Fig.2.3 Experimental setup.

(ii) 素線断線時の連続写真および電圧・電流波形

素線が半断線状態から断線に至る際の連続写真を撮影した結果を Fig.2.4 に示す。通電前は銅色であった素線 (図 a) が、通電による発熱で半断線箇所の温度が上昇し、赤く変色する (図 b)。さらに通電を続けると、発光を伴いアーク発弧し (図 c)、やがて消弧して熔融した素線が周囲に飛散して断線に至り (図 d)、電流が流れなくなる。

実体顕微鏡 (ニコン SMZ1500) を用いて、断線後の素線先端を拡大観察した図を Fig.2.5 に示す。0.18mm の素線の先端に直径約 0.7mm の球状の熔融痕が形成されており、アーク放電を伴って素線が高温で溶断したことを示唆している。

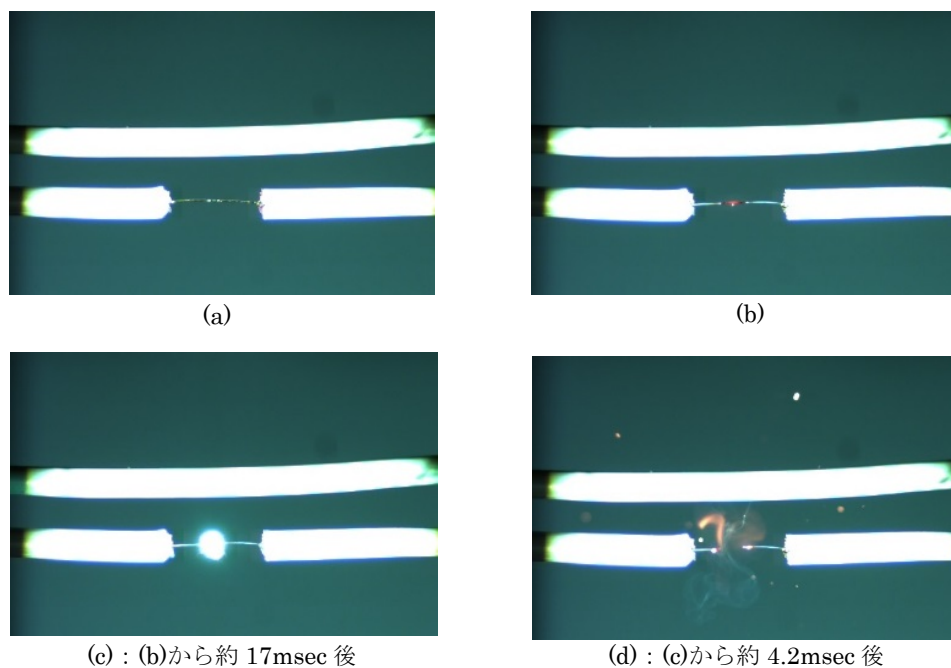


Fig.2.4 素線断線時の写真 (L=10cm, D=1cm, 電気ヒーター1,050W)

(a)通電前, (b)通電中, (c)アーク発弧, (d)アーク消弧

Fig.2.4 Photographs of disconnection phenomenon of element conductor (L=10cm, D=1cm, Electric heater1050W). (a)Before current flow, (b)During current flow, (c)Arc ignition, (d)Arc extinction.



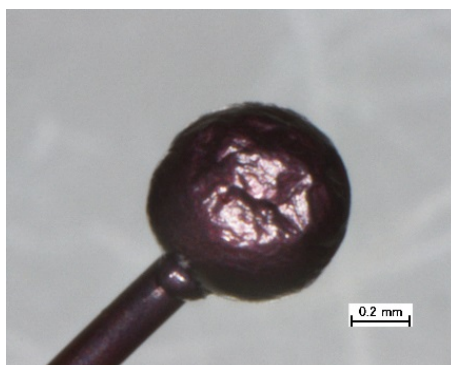


Fig.2.5 断線後の素線先端拡大写真

Fig.2.5 Micrograph of the end of element conductor after disconnection.

アーク発弧・消弧前後の電圧波形および電流波形を、Fig.2.6 に示す。Fig.2.4(b) から(d)に示した写真の撮影時点も、Fig.2.6 中に示す。電気ヒーターは抵抗負荷であるため、アーク発弧直前までは、電圧波形および電流波形は正弦波である。アーク発弧および消弧時に、波形に歪みが生じることが明らかになった。また、消弧後には素線断線し、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った。

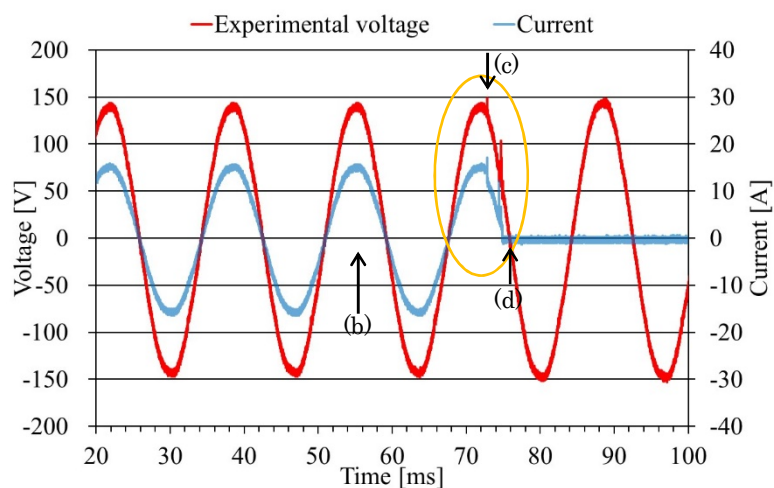


Fig.2.6 断線時の電圧電流波形 (L=10cm, D=1cm, 電気ヒーター1,050W)

Fig.2.6 Example of voltage and current waveforms at disconnection  
(L=10cm, D=1cm, Electric heater 1,050W).

(iii) 可燃物への着火現象

試料長  $L=10\text{cm}$ ，負荷として  $100\text{W}$  の白熱電球 10 個（計  $1,000\text{W}$ ）を接続し，半断線箇所の上に可燃物としてクッションの一部（綿）を置いた。通電により可燃物に着火する過程について，デジタルカメラにて撮影した連続写真を Fig.2.7 に示す。通電中は，負荷の白熱電球により可燃物や電源コードが照らされている（図 a）。断線直後は白熱電球が消え，照度が減少して全体が暗くなるが，可燃物の内部はアーク発弧もしくは飛散した高温素線の着火による発光が観察された（図 b）。その約 9 秒後，火が可燃物全体に燃え広がった（図 c）。

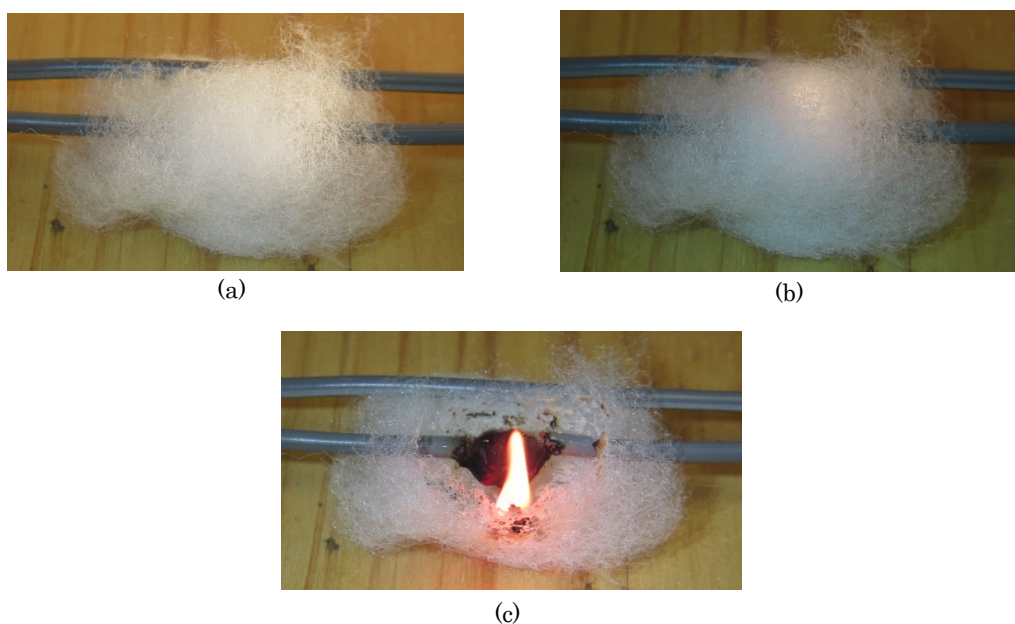


Fig.2.7 素線断線時の写真 ( $L=10\text{cm}$ ， $D=1\text{cm}$ ，白熱電球  $1,000\text{W}$ )

(a)通電中，(b)断線直後，(c)着火

Fig.2.7 Photographs of disconnection phenomenon of element conductor ( $L=10\text{cm}$ ， $D=1\text{cm}$ ，Incandescent bulbs  $1,000\text{W}$ ). (a)During current flow, (b)Immediately after disconnection, (c)Ignition of combustibles.

#### (iv) 考察

半断線電源コードが負荷の通電により断線に至る際に、発光を伴うアーク放電が発生し、熔融した高温の素線が周囲に飛散することを確認した。さらに、可燃物へ着火する現象を確認した。以上より、半断線から断線に至るメカニズムと、可燃物への着火現象を明らかにした。

また、アーク発弧および消弧時に電圧・電流波形に歪みが生じることを明らかにした。これは、アーク放電中の抵抗値が不安定となることにより電流に変動が生じ、電源コード等の誘導性リアクタンスにより電圧波形に歪みが生じると考えられる。また、放電ノイズが発生することによるスパイクノイズの影響も考えられる。以上より、アーク放電による電圧波形の歪みに着目し、次節以降にて断線検出法の検討をする。

## 2.4 素線断線時の歪み時間の検討

前節の実験結果から、電圧波形の歪みにより素線断線検出ができると考えられる。波形の歪みを表す特徴量として歪み時間を新たに導入し、断線検出法への適用可能性を検討する。前項の実験方法により、電源コードの試料長  $L$  の違いによる歪み時間を比較する。

(i) 歪み時間の測定結果

Fig.2.6のアーク発弧から消弧までの波形(黄で囲った部分)を拡大して, Fig.2.8に示す。この歪みを特徴付ける量として, Fig.2.8に示すように歪み時間(発弧から消弧までの時間)を導入する。この例では, 約72.8msでアーク発弧し, 約75msで消弧しているため, 歪み時間は約2.2msである。

試料長Lを10, 50, 100, 200, 400cmの5通りとして, それぞれの半断線電源コードに1,050Wの電気ヒーターを負荷として接続し, 歪み時間をそれぞれ30回測定した結果を Fig.2.9に示す。Lの長さに関わらず, 平均で2msから3msとなっている。

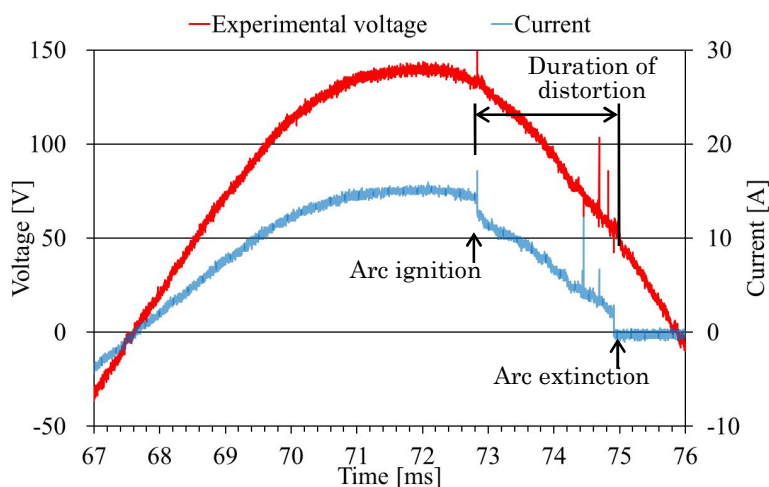


Fig.2.8 断線時の電圧電流波形 (電気ヒーター1,050W)

Fig.2.8 Example of voltage and current waveforms at disconnection (Electric heater 1,050W).

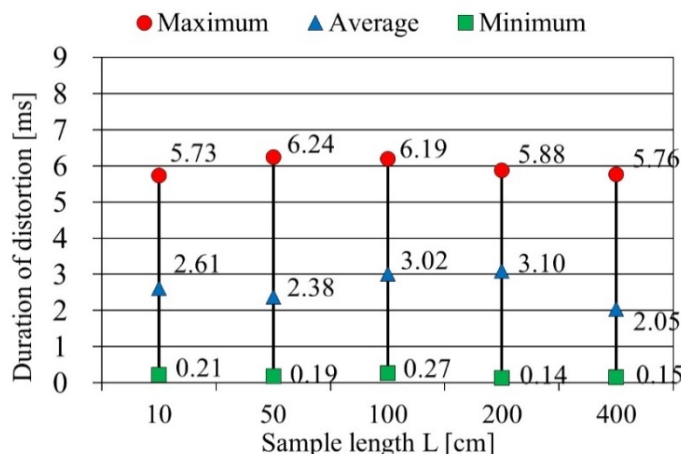


Fig.2.9 歪み時間（半断線箇所長さ D=1cm）

Fig.2.9 Values of duration of distortion (Partial disconnection length D=1cm).

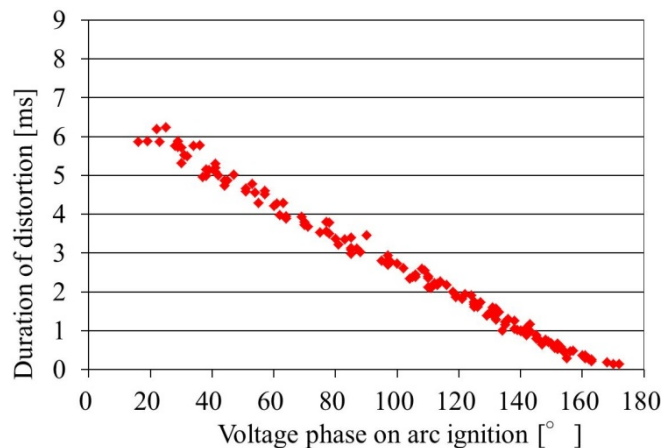


Fig.2.10 歪み時間と電圧位相

Fig.2.10 Relation between duration of distortion and voltage phase at arc ignition.

アーク発弧した時の電圧位相と、歪み時間の関係を Fig.2.10 に示す。電圧の正のサイクルでアーク発弧する場合には電圧位相  $0^\circ$  を、負のサイクルの場合には  $180^\circ$  を、それぞれ Fig.2.10 の位相の基準（横軸の  $0^\circ$ ）としている。電圧位相が  $180^\circ$  に近づくにつれて歪み時間が短くなる傾向が見られたが、これは電流値が小さくなることによりアークが消弧されやすくなるためと考えられる。歪み時間は、アーク発弧時の電圧位相により決まるため、試料長 L が同じ長さの半断線電源コードでも歪み時間にばらつきが生じる。

歪み時間を電源電圧の周期を基準として評価した結果を Table 2.1 に示す。いずれの条件でも、歪み時間は 8.3ms 以内であった。

Table 2.1 歪み時間の分布

Table 2.1 Distribution of duration of distortion.

Duration of distortion [cycle]	Distribution [%]
$\leq 1/8$ (2.1[ms])	45
$\leq 1/4$ (4.2[ms])	76
$\leq 1/2$ (8.3[ms])	100
$\leq 1/1$ (16.6[ms])	100

## (ii) 考察

歪み時間（発弧から消弧までの時間）は試料長  $L$  に依存せず、いずれの条件でも 8.3ms 以内であり、消弧後には電源の 1/2 サイクル以内で電圧波形の歪みがなくなる事が明らかとなった。このため、1/2 サイクル以内での波形解析により、素線断線の検出を行うことは妥当と考えられる。

なお、予備実験では半断線箇所長さ  $D=2, 3, 4\text{cm}$  の試料の歪み時間も同様な傾向が見られたため、 $D$  の長さに関わらず検出できる可能性がある。また、歪み時間は通電時の電流値やアーク放電の強さに関係すると考えられるが、これらの詳細な検証は今後の課題とする。

## 2.5 素線断線検出条件の提案

前項までの結果に基づき、素線断線時に特有な電圧波形の歪みを検出する条件を提案し、有効性を検討する。

### (i) 検出条件の提案

これまでに、電源コードで断線した素線同士が接触することにより生じる素線短絡を検出する手法が提案され<sup>[29]</sup>、検出器の試作と評価がされている<sup>[30]</sup>。素線短絡の検出条件は、次のとおりである。

(1) 歪み時間内の電圧波形の瞬時値が最大値の 20~60%に入る時間が 3ms 以上であり、かつ

(2) 短絡開始から 1 サイクル以内に電圧波形の歪みがなくなる

素線短絡時と、本論文で対象としている素線断線時のいずれにおいても電圧波形に歪みが生じるが、素線断線時の歪みの方が小さい。これは、短絡電流に比べ、負荷電流が小さいことが一因と考えられる。このため、短絡検出条件では、断線を検出することは困難である。

そこで、アーク発弧および消弧時に電圧波形が歪むことに着目し、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検出条件を提案する。照査電圧波形はアーク発弧する 1 周期前の 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。Fig.2.6, 2.8 を例として、照査電圧波形と実験電圧波形について、Fig.2.11 に示す。この両波形を比較することにより、歪みを検出する。Fig.2.11 のように実験電圧波形と参照電圧波形とを位相を揃えて重ね合わせると、両者の違いが明確になる。後述するよう、提案する断線検出法は、実験電圧波形が照査電圧波形 $\pm 6V$ を超える時間の総和に基づくため、Fig.2.11 の最後の図のように照査電圧波形 $\pm 6V$ を両波形と同時に示すと直感的に理解しやすくなる。

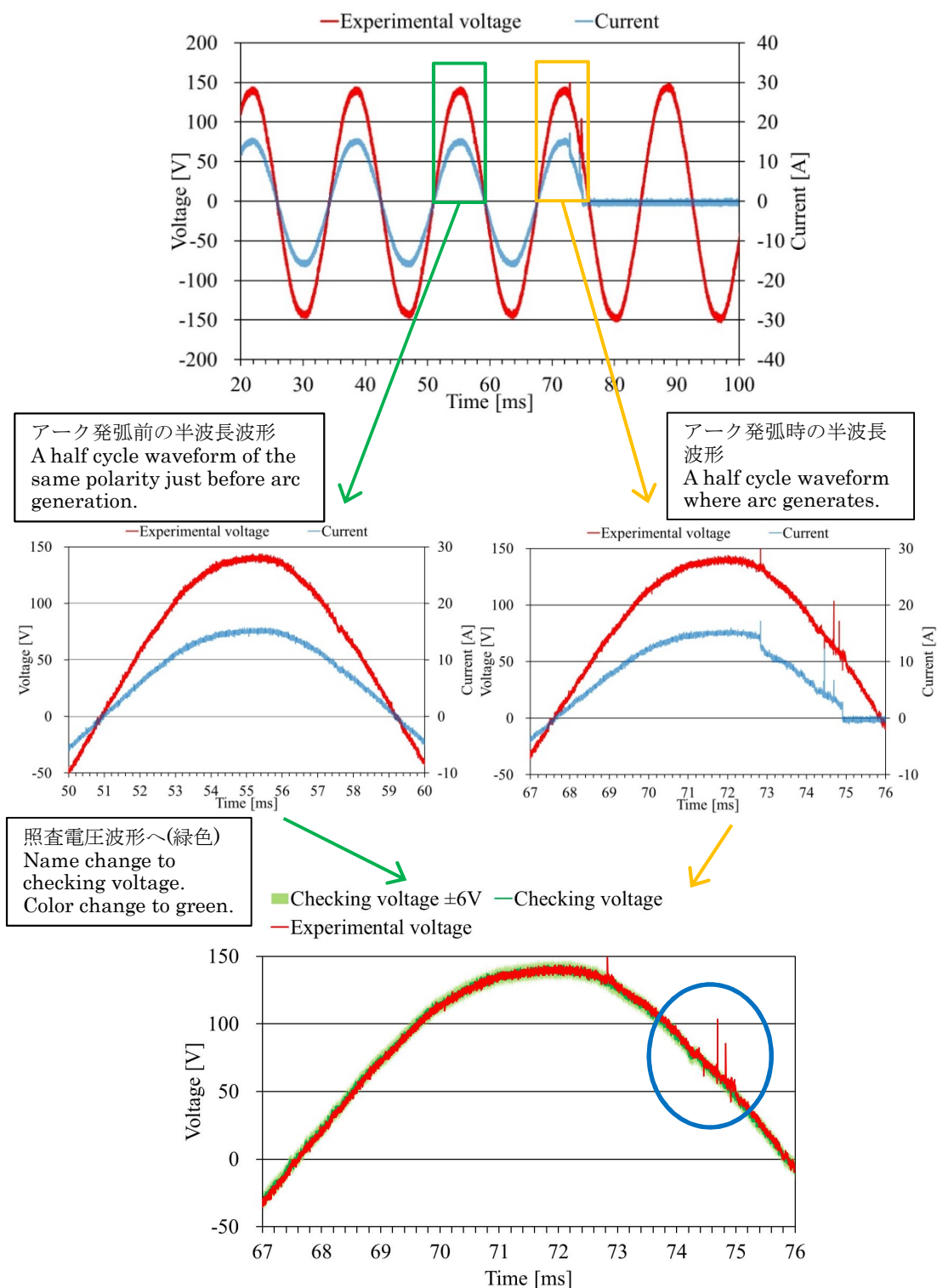


Fig.2.11 照査電圧波形と実験電圧波形

Fig.2.11 Procedures to obtain checking voltage and experimental voltage.



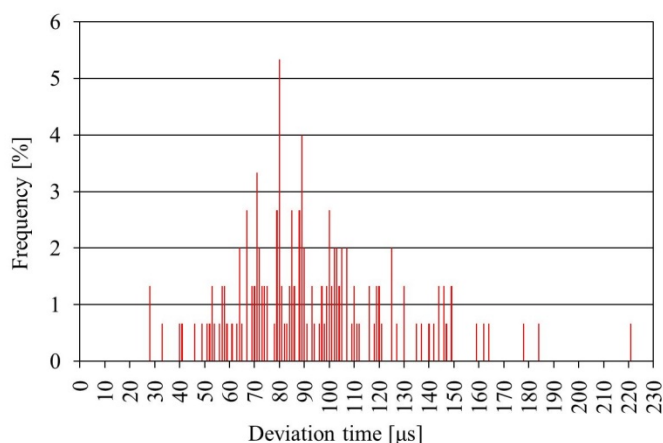


Fig.2.12 逸脱時間の度数分布図

Fig.2.12 Frequency distribution of deviation time.

照査電圧波形と実験電圧波形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 $\pm 6V$ の幅から外れる時間を逸脱時間とする。試料長 $L$ を10, 50, 100, 200, 400cmの5通りとして、半断線電源コードに1,050Wの電気ヒーターを負荷として接続し、逸脱時間をそれぞれ30回測定した結果の度数分布図をFig.2.12に示す。逸脱時間にばらつきはあるが、 $70\mu s$ 以上となる割合がおおよそ80%となる。また、測定した全ての結果において、アーク発弧から消弧までが1/2サイクル以内であり、アーク消弧後は断線して電流ゼロが続いた。

以上より、

- ① 逸脱時間が $70\mu s$ 以上であり、かつ
- ② 条件①を満たした次の1/2サイクル間の電流がゼロとなる

ことを素線断線検出条件とする。 $\pm 6V$ の幅および $70\mu s$ は、後述するように負荷遮断時の過渡現象による電圧波形の歪みと素線断線時との識別を考慮し、決定した。

現場適用するには、Fig.2.11に示した照査電圧波形と実験電圧波形の比較および電流波形の確認を電源の1/2サイクル毎に波形を更新しつつ連続的に行うことにより常時監視し、素線断線検出条件を満たすかをチェックすることになる。

Fig.2.11 において、アーク放電発生時の実験電圧波形と、その 1 周期前の照査電圧波形を比較した結果の青楕円で囲った部分を拡大して Fig.2.13 に示す。Fig.2.13 の実験電圧波形と照査電圧波形の差を Fig.2.14 に示す。アーク消弧の前後において、実験電圧波形が照査電圧波形の $\pm 6V$ の幅から逸脱する波形が見受けられる。この例では、逸脱時間が合計  $184\mu s$  と  $70\mu s$  以上であり、条件①を満たした次の 1/2 サイクル間の電流がゼロとなるため、判定条件を満たす。

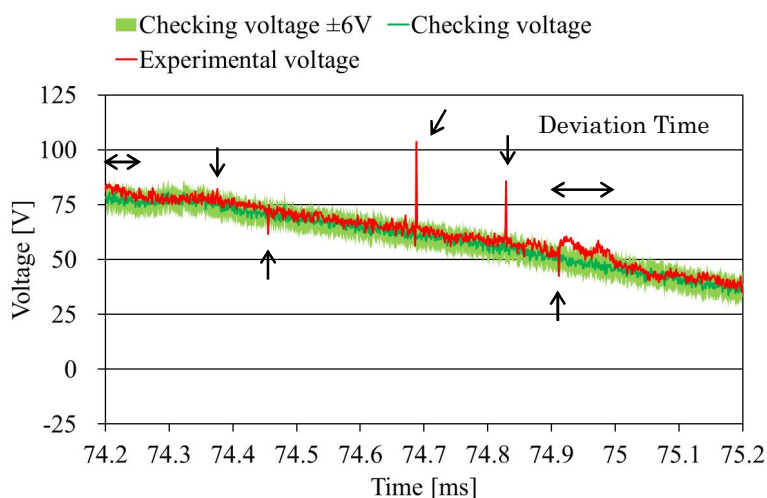


Fig.2.13 拡大図 (Fig.2.11 の青楕円)

Fig.2.13 Magnified view of a part surrounded by blue ellipsoid in Fig.2.11.

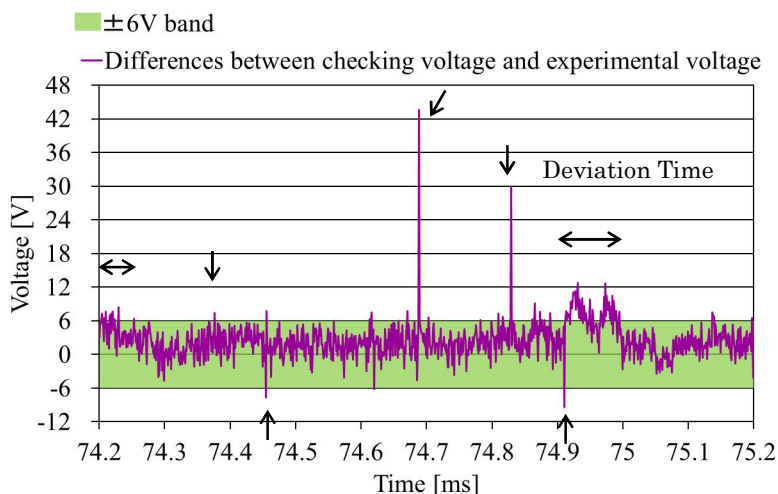


Fig.2.14 照査電圧波形と実験電圧波形の差および $\pm 6V$ の幅 (Fig.2.13 再描画)

Fig.2.14 Deviation of differences between checking voltage and experimental voltage from  $\pm 6V$  of voltage (redraw Fig.2.13).

### (ii) 考察

提案した素線断線検出手法は、一周期前の波形との比較演算の繰り返しになるため、複雑な処理は必要なく、実製品化への展開が期待できる。また、以前に提案され、試作されている短絡検出器<sup>[30]</sup>では検出できない短絡現象についても、短絡による波形の歪みの方が素線断線時よりおおむね大きく、本提案手法により、短絡から断線に至った場合にも検出できる可能性がある。これは、第3章で検討する。

なお、素線断線時以外に、電圧波形に歪みが生じることがある。負荷を接続してスイッチを入れた際の過渡現象により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 条件①を満たした次の1/2サイクル間の電流がゼロとなる」の条件により対象から除くことができる。また、負荷を急激に増減した場合の過渡現象による電圧波形の歪みも同様に除くことができる。

逸脱時間を定義した±6Vの電圧幅は、5Vから11Vの範囲で検討を行い、最も良い結果が得られた6Vとした。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最適値を検討する必要がある。

## 2.6 素線断線検出条件の検証

提案した素線断線検出法の精度について、評価する。抵抗負荷の場合は電圧波形および電流波形が正弦波となるが、負荷によっては電流が正弦波とならず、電圧波形に歪みが生じる。そのため、負荷の違いによる精度について検証する。

また、負荷遮断時にも電圧波形に歪みが生じる可能性があり、提案した検出法による誤検出の恐れがあることから、この時の精度について検証する。

(i) 負荷の影響

試料長  $L=10\text{cm}$ , 半断線箇所の長さ  $D=1\text{cm}$  の半断線電源コードを使用し, Table 2.2 に示す負荷をそれぞれ接続して, 断線に至るまでの電圧および電流波形を計測した。それぞれの負荷について 50 回の実験を実施し, 提案する検出法の評価を行った。

一例として, 家庭用掃除機 (1,000W) を負荷とした場合の電圧および電流波形を Fig.2.15 に示す。この時の照査電圧波形と実験電圧波形を比較した結果を Fig.2.16 に示す。この場合には, 電圧位相が  $90^\circ$  辺りで負荷電流が流れ始めると電圧波形に歪み (緑で囲った部分) が生じ, さらに位相が  $160^\circ$  付近でアーク放電に伴う電圧波形の歪み (黄で囲った部分) が生じていることがわかる。

Table 2.2 家電製品の仕様

Table 2.2 Specification of household appliances.

Appliance	Power consumption [W]
Electric heater	1,050
Vacuum cleaner	1,000
Dryer	1,200
Incandescent bulbs	1,300
Electric griddle	1,100

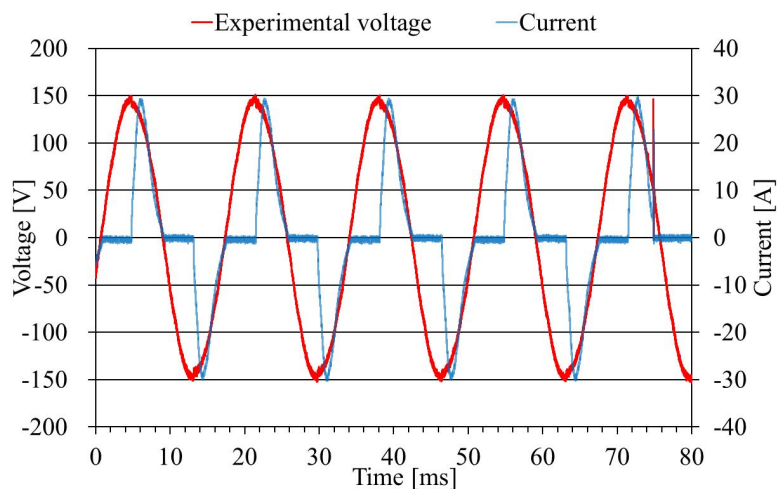


Fig.2.15 素線断線時の電圧・電流波形例 (L=10cm, D=1cm, 掃除機 1,000W)

Fig.2.15 Example of voltage and current waveforms at disconnection  
(L=10cm, D=1cm, Vacuum cleaner 1,000W).

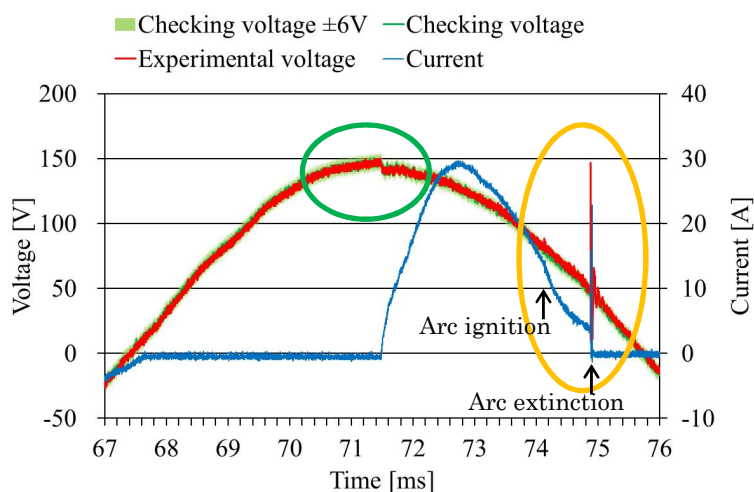


Fig.2.16 照査電圧波形と実験電圧波形の比較例 (掃除機 1,000W)

Fig.2.16 Example of comparison result between checking and experimental voltage  
obtained for vacuum cleaner.

緑で囲った部分の歪みは、健全電源コードでも半断線電源コードでも観察されており、断線による歪みではなく負荷特有の歪みである。このような負荷特有の歪みが、提案している素線断線検出法の誤検出の要因となるか検討を行う。

Fig. 2.16 の緑の部分拡大して、Fig.2.17 に示す。Fig.2.17 の実験電圧波形と照査電圧波形の差を Fig.2.18 に示す。Fig.2.18 からわかるように、この負荷特有の歪みは照査電圧波形 $\pm 6V$ の幅にはほぼ収まっており、逸脱時間としてカウントされない。そのため、提案する素線断線検出条件に影響を及ぼさないことから、負荷特有の歪みが素線断線と誤検出される可能性が低いことがわかる。

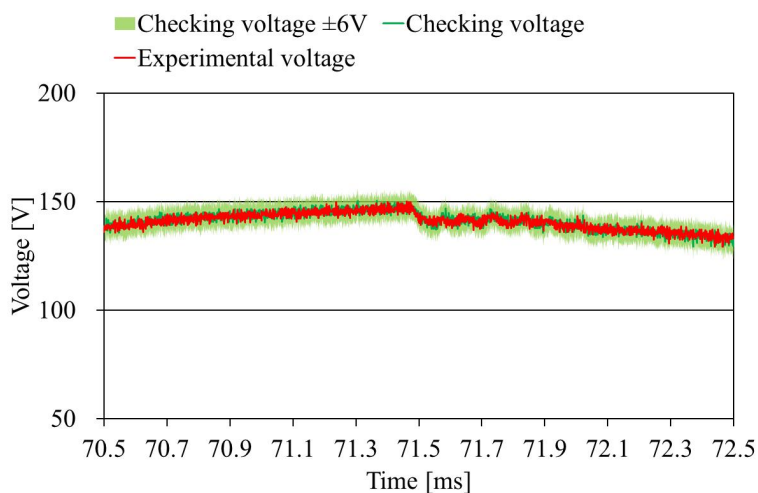


Fig.2.17 拡大図 (Fig.2.16 の緑楕円)

Fig.2.17 Magnified view of a part surrounded by green ellipsoid in Fig.2.16.

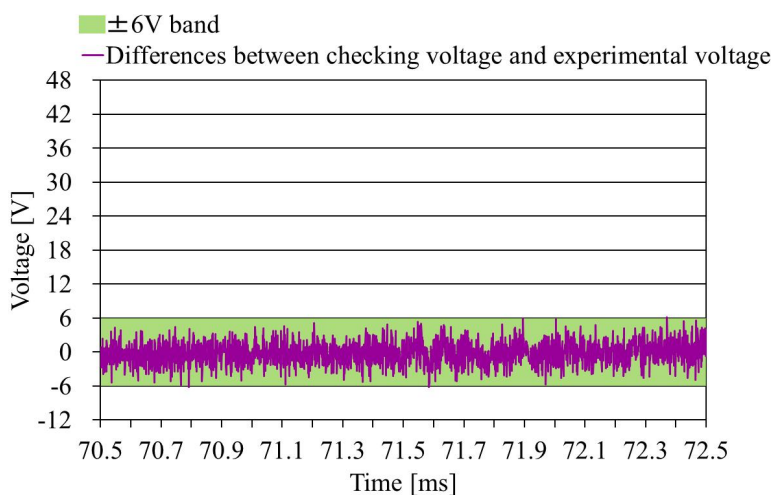


Fig.2.18 照査電圧波形と実験電圧波形の差および $\pm 6V$ の幅 (Fig.2.17 再描画)

Fig.2.18 Deviation of differences between checking voltage and experimental voltage from  $\pm 6V$  of voltage (redraw Fig.2.17).

次に, Fig.2.16 の素線断線が生じる際に発生する電圧波形の歪みの検討を行う。  
 Fig.2.16 の黄で囲った部分を拡大して, Fig.2.19 に示す。素線断線に至る過程で  
 特有な歪みが発生していることがわかる。Fig.2.19 の実験電圧波形と照査電圧波  
 形の差を Fig.2.20 に示す。アーク消弧の前後において, 実験電圧波形が照査電圧  
 波形の $\pm 6V$  の幅から逸脱する場合は認められる。この例では逸脱時間が合計  
 $175\mu s$  となり, 素線断線の検出条件を満たす。

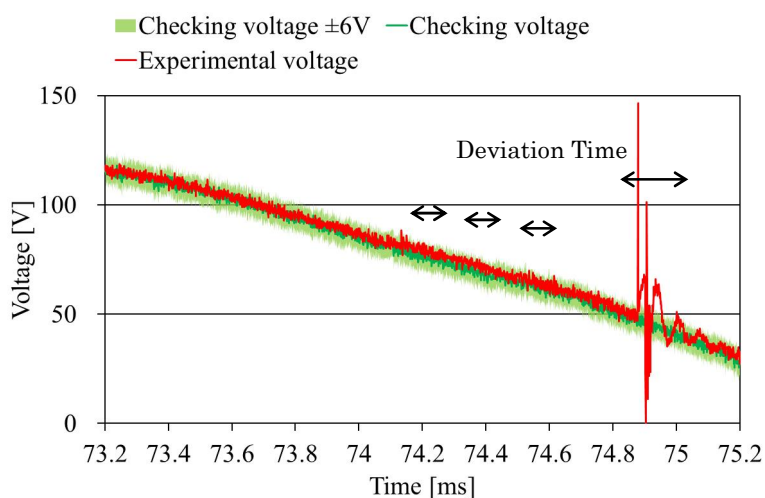


Fig.2.19 拡大図 (Fig.2.16 の黄楕円)

Fig.2.19 Magnified view of a part surrounded by yellow ellipsoid in Fig.2.16.

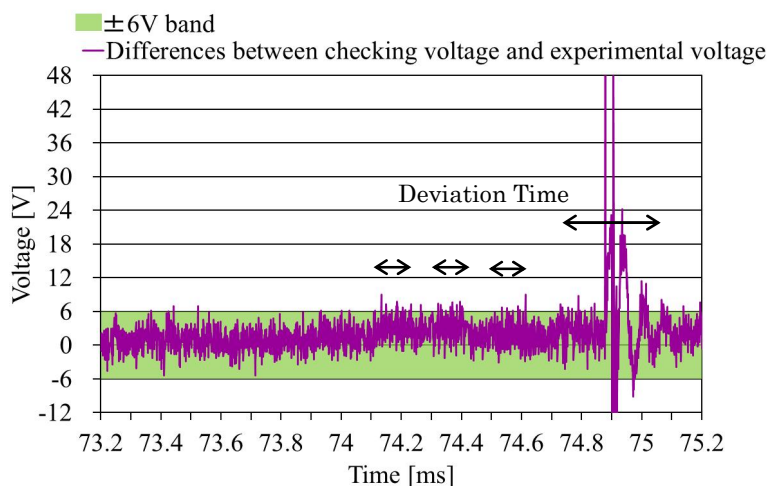


Fig.2.20 照査電圧波形と実験電圧波形の差および $\pm 6V$ の幅 (Fig.2.19 再描画)

Fig.2.20 Deviation of differences between checking voltage and experimental  
 voltage from  $\pm 6V$  of voltage (redraw Fig.2.19).

Table 2.2 に示す各負荷における逸脱時間の分布および素線断線検出条件を満足する割合（逸脱時間が  $70\mu\text{s}$  以上となる割合）を Fig.2.21 に示す。負荷によって逸脱時間にばらつきが見受けられるが、おおよそ80%以上は検出条件を満たす。

Table 2.2 に示す各負荷において、検出条件①の逸脱時間を 50, 60, 70, 80,  $90\mu\text{s}$  以上とした場合の負荷毎の正解率を Fig.2.22 に示す。白熱電球の正解率が最も高い結果となったが、消費電力が最も高く、電流値が大きいため波形歪みが大きくなったと考えられる。検出条件の逸脱時間を小さくすると波形歪みを検出し易くなるため正解率が高まるが、次項に示すように負荷遮断時の歪みを誤検出する割合が高まる。

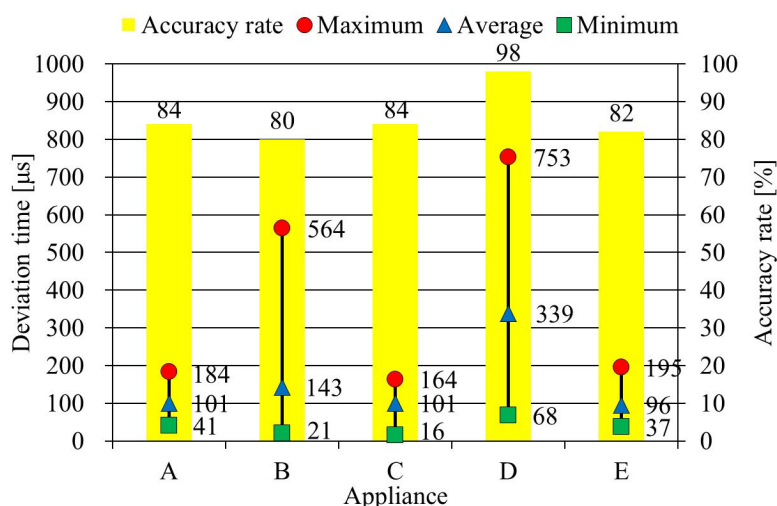


Fig.2.21 逸脱時間と検出手法の正解率 (A)電気ヒーター, (B)掃除機, (C)ドライヤー, (D)白熱電球, (E)ホットプレート

Fig.2.21 Distribution of deviation times and accuracy rate for electric heater(A), vacuum cleaner(B), dryer(C), incandescent bulb(D), and electric griddle(E).



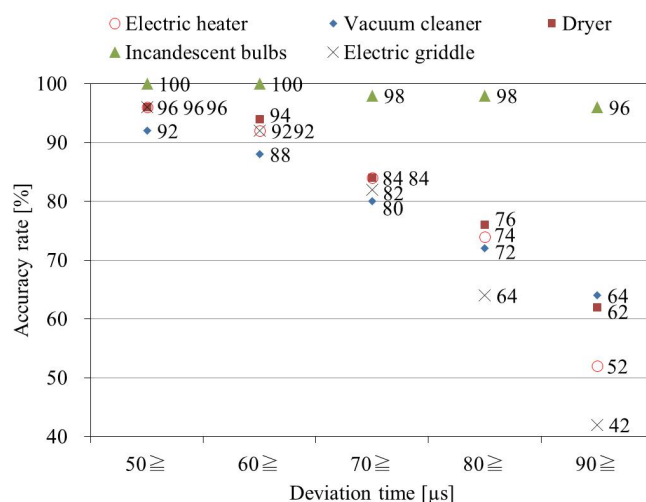


Fig.2.22 逸脱時間と検出手法の正解率

Fig.2.22 Deviation times and accuracy rate.

(ii) 負荷遮断時の影響

使用中の負荷のスイッチを切り、電流を遮断する際の過渡現象によっても、電圧波形に歪みが生じる可能性がある。このような過渡現象と、素線断線とを有効に識別する必要がある。試料長  $L=10\text{cm}$  の電源コードを使用し、Table 2.2 に示す家庭用電気製品のスイッチを切った際の電圧波形および電流波形をそれぞれ 50 回計測した。

各負荷における逸脱時間および検出条件を満たさない割合（逸脱時間  $70\mu\text{s}$  を満たさない割合）を Fig.2.23 に示す。正解率は、過渡現象の歪みを素線断線時の歪みと誤検出せず、正しく区別できる割合を示している。逸脱時間は、負荷によってばらつきが見受けられるが、素線断線時よりもおおむね短くなる。逸脱時間が  $70\mu\text{s}$  未満となる割合が 80%を越え、素線断線時と負荷のスイッチを切る際の過渡現象による電圧歪みをほぼ区別することができ、提案手法により素線断線時の歪みを有効に検出できる。

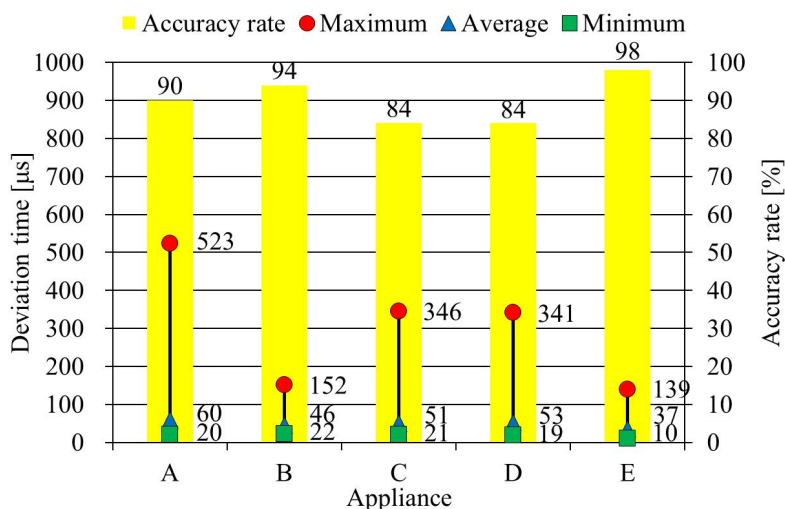


Fig.2.23 負荷遮断時の逸脱時間と検出手法の正解率 (A)電気ヒーター, (B)掃除機, (C)ドライヤー, (D)白熱電球, (E)ホットプレート

Fig.2.23 Distribution of deviation times and accuracy rate for electric heater(A), vacuum cleaner(B), dryer(C), incandescent bulb(D), and electric griddle(E) when appliances are turned off.

Table 2.2 に示す負荷のスイッチを切った場合において、検出条件①の逸脱時間を 50, 60, 70, 80, 90 $\mu$ s とした時に、負荷毎の①を満たさない割合（正解率）を Fig.2.24 に示す。白熱電球の場合の正解率がやや低くなったが、消費電力が最も高く、電流値が大きいため波形歪みが大きくなり、誤検出の原因になったと考えられる。検出条件の逸脱時間を小さくすると波形歪みを検出し易くなるため、負荷のスイッチを切る際の過渡現象による電圧歪みも検出条件①を満たし易くなり、誤検出となる。

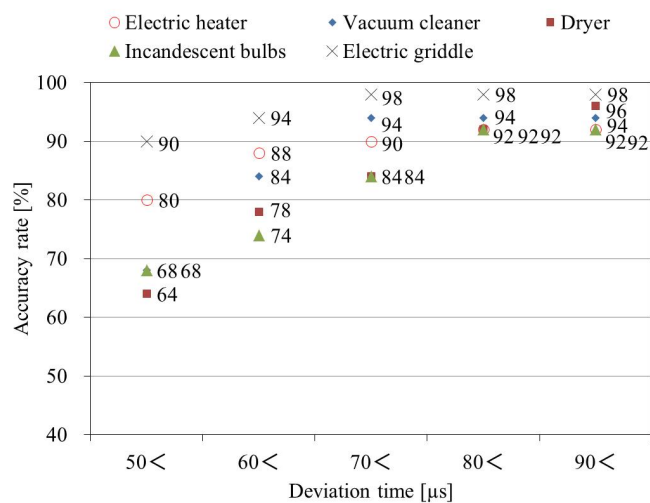


Fig.2.24 負荷遮断時の逸脱時間と検出手法の正解率

Fig.2.24 Deviation times and accuracy rate when appliances are turned off.

### (iii) 考察

提案した素線断線検出法の精度について評価し、その有効性を確認することができた。負荷に起因する電圧波形の歪みが生じる場合でも、検出法に与える影響が小さいことがわかった。このような負荷でも、電源コードで素線断線が発生すれば、提案手法により有効に検出できることを明らかにした。また、負荷の電流を遮断する際の過渡現象による電圧波形の歪みを、提案手法により適切に識別して、素線断線のみを検出できることを明らかにした。なお、検出条件①の逸脱時間は、素線断線時と過渡現象時の歪みを区別できるように  $70\mu\text{s}$  以上としたが、現場適用の際には、より多様な負荷や半断線状態で実験を重ね、詳細に検討する必要がある。

一方、素線断線が起きるが検出条件を満たさない事例を Fig.2.25 に示す。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く短時間となった。目視観察では、アーク発弧に伴う発光が弱く感じられる。このような断線の検出法の考案が今後の課題である。

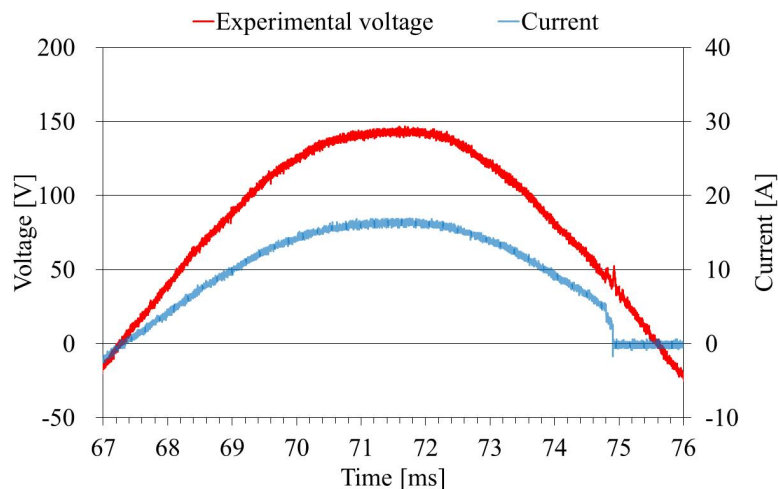


Fig.2.25 素線断線時の電圧・電流波形例 (L=10cm, D=1cm, ドライヤー 1,200W)

Fig.2.25 Example of voltage and current waveforms at disconnection  
(L=10cm, D=1cm, Dryer 1,200W).

また、予備実験で行った素線 2 本とした場合の断線時の電圧・電流波形の一例を Fig.2.26 に示す。歪みが負のサイクルと正のサイクルの 2 箇所で見られるが、これは素線が 1 本ずつ断線したためと考えられる。このような場合でも、2 本目の断線時の歪みと次の 1/2 サイクル間の電流がゼロになるため、断線検出条件を満たし、検出できる可能性がある。しかしながら、素線が複数本残っている場合については、詳細な検討が必要であり、今後の課題とする。

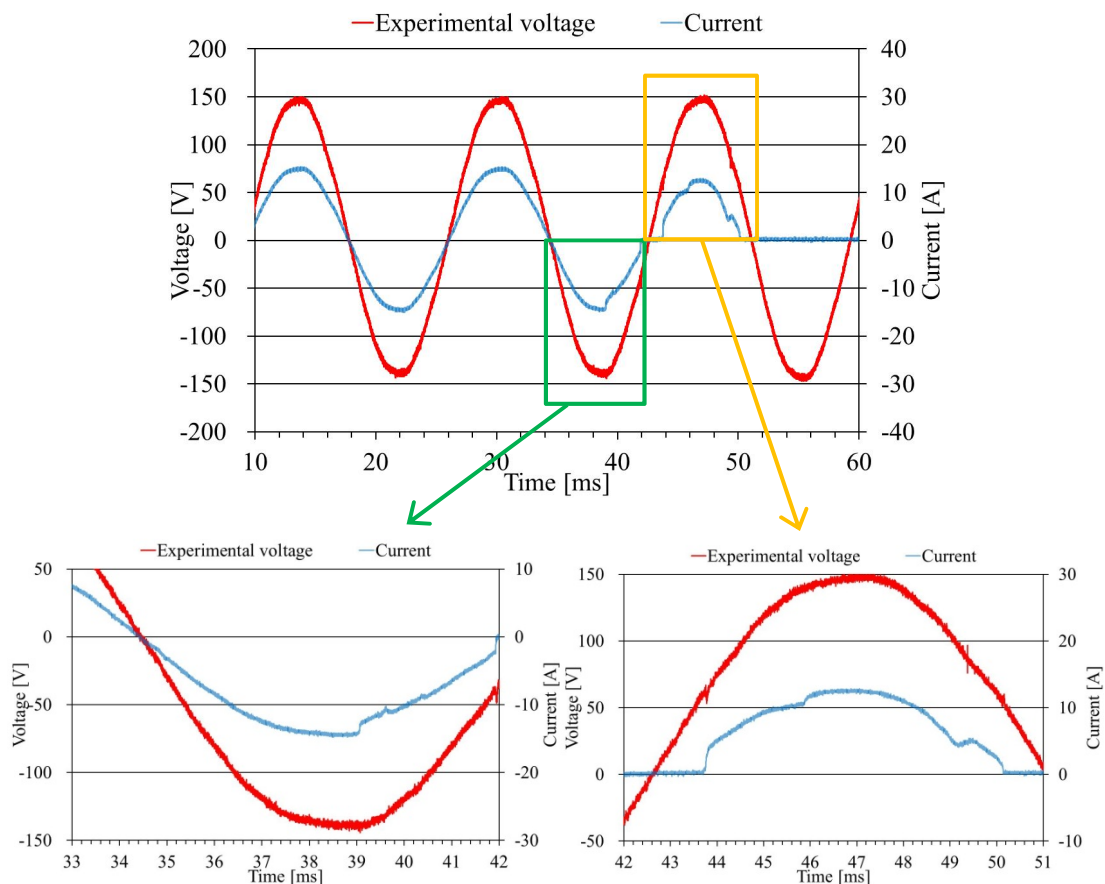


Fig.2.26 素線 2 本断線時の電圧・電流波形例 (L=10cm, D=1cm, 電気ヒーター 1,050W)

Fig.2.26 Example of voltage and current waveforms at disconnection when a sample with two healthy element conductors was used. (L=10cm, D=1cm, Electric heater

## 2.7 まとめ

半断線状態を模擬した 100V 用電源コードに種々の条件下で通電し、素線断線に至る際の電圧波形および電流波形の解析を行い、電源コードの素線断線検出法を検討した。得られた成果を次に示す。

(1) 素線断線時には発光を伴うアーク放電が発生し、高温で熔断した素線が周囲に飛散して可燃物に着火し、火災に至る可能性がある。

(2) 電源コードの長さ（抵抗値）に関わらず、素線断線時にはアーク放電に伴う電圧波形の歪みが生じる。この歪みを特徴づける量として、逸脱時間（実験電圧波形が照査電圧波形の±6V の幅から逸脱する時間）を導入し、

① 逸脱時間が 70 $\mu$ s 以上、かつ

② 条件①を満たした次の 1/2 サイクル間の電流がゼロとなる

ことを素線断線検出条件として提案した。

(3) 負荷特有の電圧波形の歪みが生じる場合もあるが、提案手法では 5 種類の負荷に対して 80%以上の精度で素線断線を検出できた。また、負荷遮断時の過渡現象により生じる電圧波形の歪みを素線断線と誤検出する確率は、20%未満と低いことを示した。

(4) 本提案手法では、従来手法の課題である半断線箇所の直接測定や事前の電流値測定は不要となり、コンセントや分電盤に組み込んだマイコンで 1/2 サイクル毎に電圧波形を比較し続ければ良い。断線検出時に電流遮断や警報出力するシステムを構築すれば、素線断線に起因する火災の早期検出や、断線間で生じるアーク放電火災の未然防止に貢献できる。

(5) 逸脱時間の±6V の幅や 70 $\mu$ s は、半断線箇所の長さや残存導体素線数および負荷に依存すると考えられるため、現場適用に際しては種々の条件下で最適な閾値を検討する必要がある。

## 第 3 章

半断線電源コードの

短絡現象の解明

### 3.1 はじめに

電源コードが半断線状態では発火せず、ジュール熱により絶縁被覆が溶融して短絡に至り発火する場合は考えられるが、現象の詳細について解明されておらず、不明な点が多く存在している。

電源コードの短絡検出法は、短絡を地絡に変えて検出する手法<sup>[27]</sup>や紫外線により検出する手法<sup>[28]</sup>が提案されているが、実際の現場適用性や精度について検証されていない。また、電圧値と波形歪み時間に基づく検出器の試作評価がされているが、検出精度に課題がある<sup>[29] [30]</sup>。電源コード短絡保護用瞬時遮断機能を有したブレーカが市販されているが<sup>[37] [38]</sup>、保護範囲外の短絡現象が報告<sup>[29] [30]</sup>されており、課題となっている。

そこで、本章では半断線状態の電源コードが短絡に至り、アーク放電により可燃物に着火し、断線する現象を実験室で再現し、そのメカニズムを解明する。また、前章で提案した検出法により、短絡から断線に至る場合を有効に検出できることを示す。

### 3.2 半断線電源コード通電時の温度と抵抗値の変化

半断線電源コードに通電した時の温度と抵抗値の変化について検討する。100V用電源コードに半断線状態を導入した試料を作製し、実験に供した。電源コードの導体は直径0.18mmの素線30本を束ねた直径1.1mm、公称断面積0.75mm<sup>2</sup>、定格電流7Aの撚り線であり、外周に絶縁体が被覆してある外径2.7mmのビニル



平形コードである。この電源コードは、電気製品のコードとして広く使用されている。

(i) 試料

半断線状態の電源コードを模擬するため、Fig.3.1（安田精機製作所No.225）に示す多心コード曲げ強度試験機により、JIS C 3005 4.27<sup>[47]</sup>に準拠した曲げ試験を実施した。試験条件は、Table 3.1 に示す。電源コードの一端におもり 500g を取り付け、もう一端を可動辺に固定し、屈曲半径 2.5mm で 180° の屈曲運動を 1 分間に 10 往復の速さで 180 回行った。



Fig.3.1 多心コード曲げ強度試験機

Fig.3.1 A bending tester.

Table 3.1 曲げ試験条件

Table 3.1 Bending test conditions.

Load	500g
Bend radius	2.5mm
Bend angle	180°
Rate of bending	10 times/min
Number of bending times	180 (reciprocation)

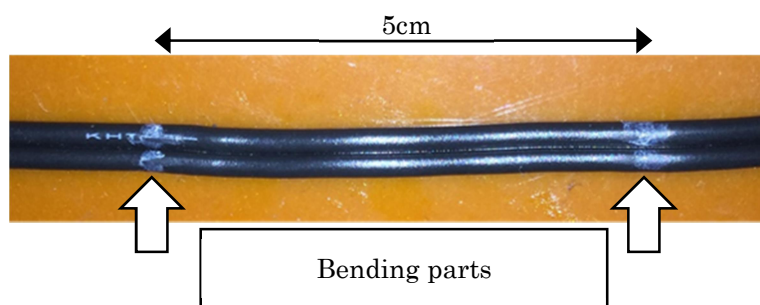


Fig.3.2 曲げ試験後の電源コード

Fig.3.2 A typical power supply cord after bending test.

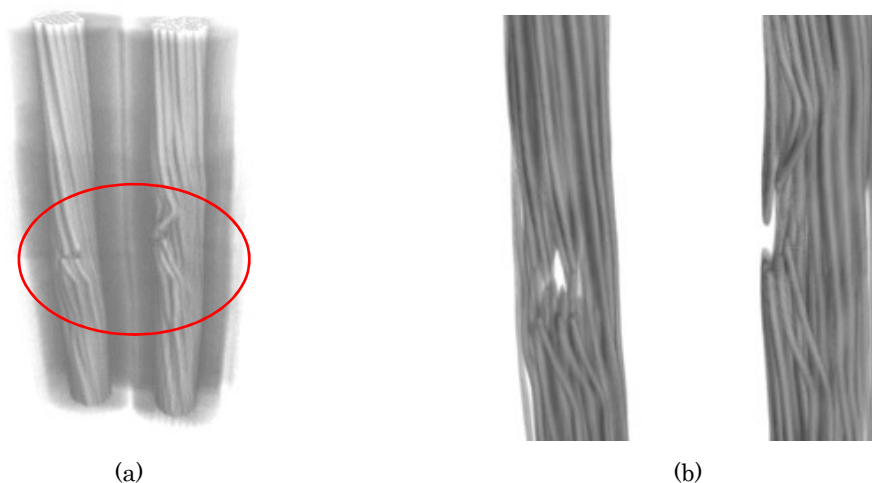


Fig.3.3 X線透過画像 (a)全体図, (b)拡大図

Fig.3.3 Example of X-ray computed tomography image. (a)overall image  
(b)magnified image of circled part in (a).

曲げ試験後の電源コードの外観画像を Fig.3.2 に示す。半断線箇所の過熱を促進させるため、全長 45cm の電源コードを用いて中央付近に 5cm の間隔で 2 箇所に曲げ試験を実施した。矢印で示した電源コード上の白色マーカーは、曲げ試験箇所を示す。電源コードの絶縁被覆は、外見上、亀裂や外傷は見受けられない。

X線CT（島津製作所 SMX-225CT）を用いて、曲げ試験後の内部透過画像を撮影した結果の一例を Fig.3.3 に示す。内部導体で何本かの素線切れが起きており、半断線状態を模擬できている。なお、X線CTは試料の非破壊検査が可能であり、絶縁被覆のPVCを除去することなく、非通電時の内部の状態を観察できる。

#### (ii) 実験方法

実験回路を Fig.3.4 に示す。電源は100V、60Hzの分電盤から供給し、試料の電源コードには負荷として200Wの白熱電球8個（計1,600W）を接続した。半断線箇所の上に、第2章と同じクッションの一部（綿）を可燃物として置いた。

通電時の電圧波形および電流波形を、オシロスコープ（Tektronix MDO3032, DPO3032, DPO4104）を用いて記録した。0.4Ωの抵抗は、分電盤からコンセントまでの抵抗を模擬している。45分間の通電と15分間の無通電を1サイクルとして、断続的に繰り返した。予備実験で通電時は約25分、無通電時では約10分で温度が一定値に収束したことから、上記サイクル時間を決定した。通電中には、赤外線サーモグラフィ（Keysight U5855A）を用いて半断線部付近の絶縁被覆（PVC）上の温度を測定した。また、電源コードの接地側と非接地側の電圧降下の波形と電流波形から、それぞれのコードの抵抗値を算出した。

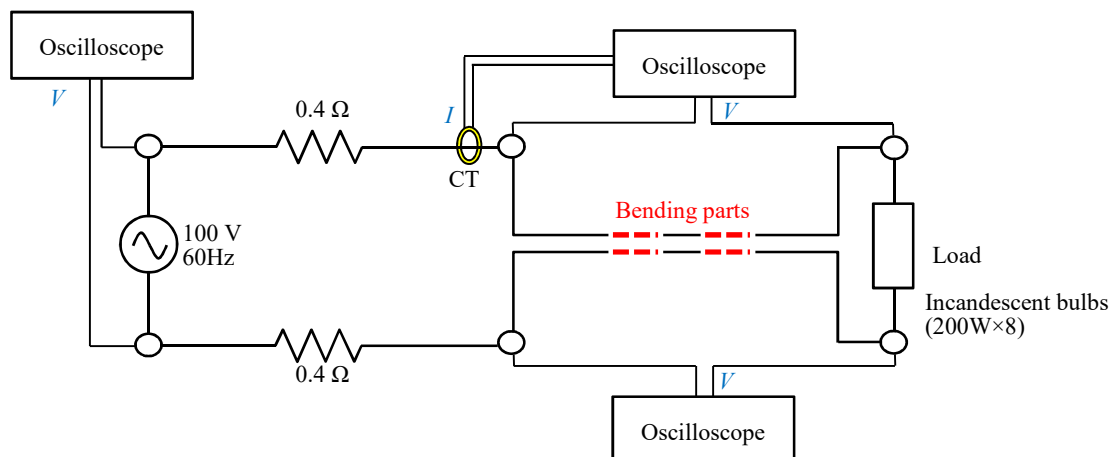


Fig.3.4 実験回路

Fig.3.4 Experimental setup.

(iii) 温度と抵抗値の変化

実験前と、通電と無通電を6サイクル実施した後の電源コードの外観およびX線CTによる透過画像をFig.3.5に示す。外観は変わらないが、実験前の左列(a)に比べ、6サイクル後の右列(b)では半断線箇所に見られた。これは、絶縁被覆が通電による熱膨張と、無通電時の熱収縮をしたことが原因と考えられる。なお、おおよそ同じ箇所の透過画像を撮影しているが、試料固定位置により撮影角度等は異なっている。

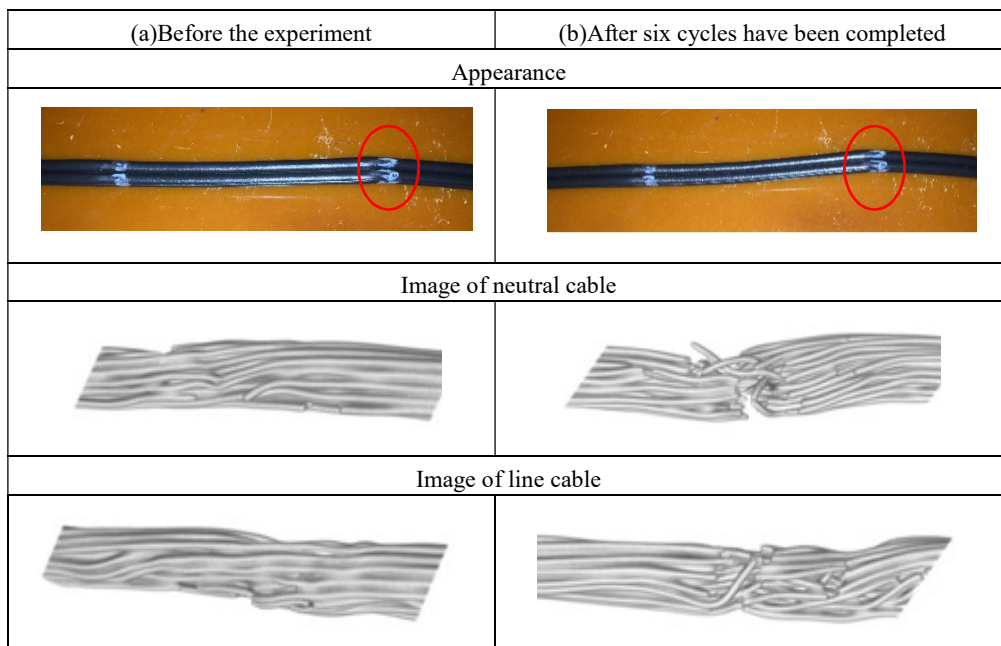


Fig.3.5 電源コードの外観と X 線 CT による透過画像

Fig.3.5 Appearance of partially disconnected cords and images of element conductors in cords obtained with the microfocus X-ray CT system.

数サイクル実施後の半断線部付近の温度分布について、赤外線サーモグラフィを用いて測定した結果の一例を Fig.3.6 に示す。(a), (b)より、可燃物の外側（電源コードと接していない側）は外気温とほぼ同じで、温度上昇していない。しかし、(c)に示すように可燃物を引っ繰り返して内部温度を観察すると、約 160℃に達し、非常に高温になっていることがわかる。また、電源コードは半断線部付近を中心に温度上昇が起きていることがわかる。

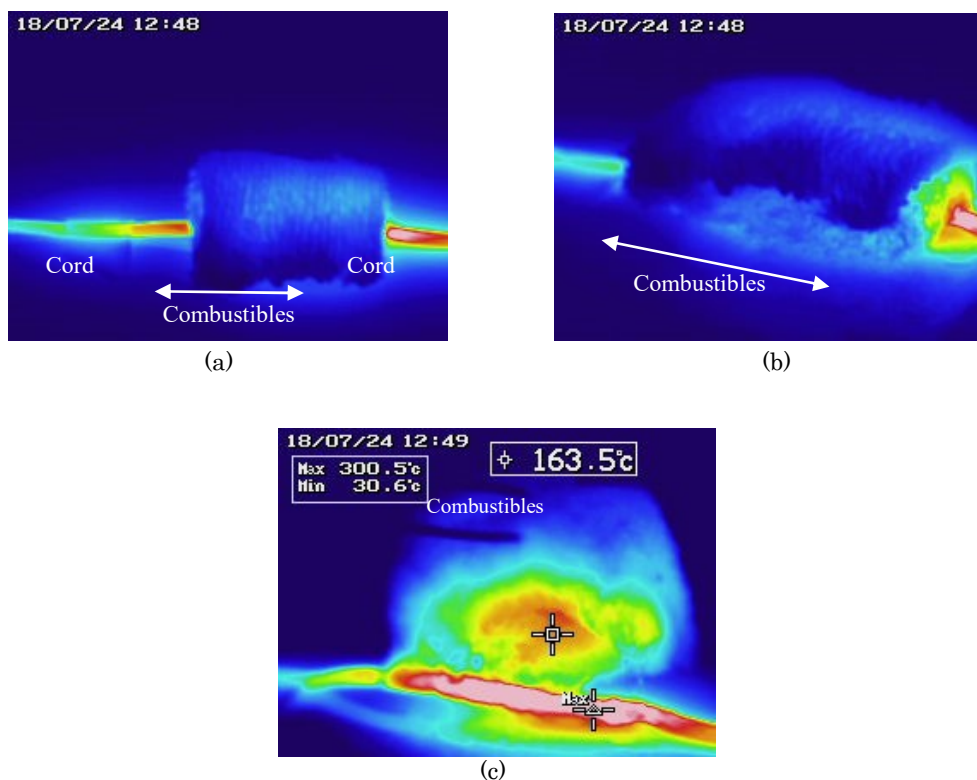


Fig.3.6 半断線部付近の温度分布 (a)正面図, (b)斜視図,  
(c)引っ繰り返した可燃物と電源コードの表面

Fig.3.6 Temperature distribution around partially disconnected part. (a)front view, (b)oblique view, (c)Surface of combustibles and power supply cord (combustibles are removed and turned over).

各サイクルにおける最高到達温度と抵抗値を Fig.3.7 に示す。1 サイクル目の温度は約 80°Cであったが、9 サイクル目までは上昇傾向にあった。10 サイクル目で急激な温度上昇が見られ、約 180°Cに達し、その後は高温が続いた。

抵抗値も温度と同様に 9 サイクル目までは上昇傾向にあり、10 サイクル目で急激な上昇が見られた。このような温度と抵抗の変化は、他の試料においても同様な傾向が見られた。

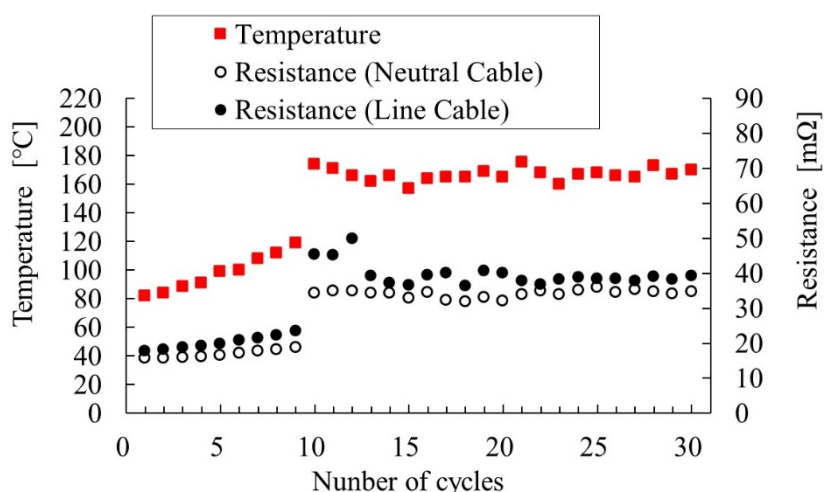


Fig.3.7 半断線部付近の温度と電源コードの抵抗値

Fig.3.7 Temperature on the PVC near the partially disconnected part and the resistances of the cords.

#### (iv) 考察

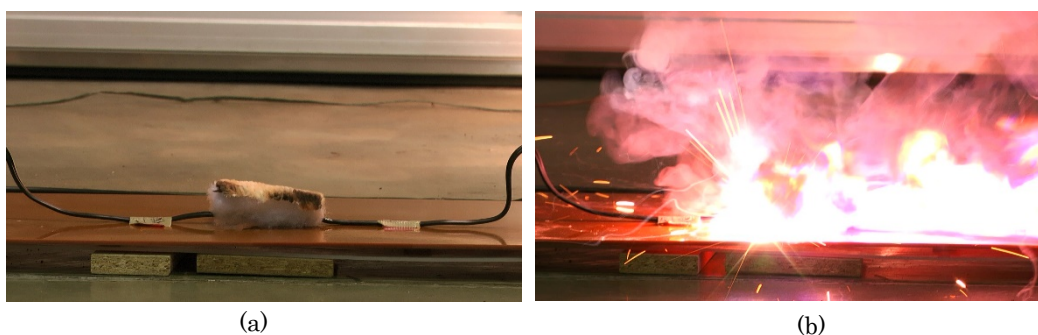
外見上、絶縁被覆の PVC に損傷が見られない半断線電源コードに通電と無通電のサイクルを繰り返すことにより、半断線箇所の間隙が広がることがわかった。これは、PVC のガラス転移温度が  $70-80^{\circ}\text{C}$ <sup>[48]</sup>であることを考慮すると、通電による熱膨張と無通電時の熱収縮による熱ストレスが加わり、PVC が導体素線を締め付ける力が弱まったことが原因と考えられる。この間隙の広がりにより半断線箇所での導体間の接触面積が低下し、抵抗値の増加と温度上昇に繋がると考えられる。

### 3.3 短絡現象と素線断線時の検出

前項の実験方法により、半断線電源コードが短絡し、アーク放電により可燃物へ着火して断線する現象について検討する。また、前章で提案した断線検出法の適用について検討する。

(i) 短絡時のアーク放電による可燃物への着火現象

通電と無通電のサイクルを断続的に繰り返していくと、31 サイクル目に導体素線が絶縁被覆を突き破って短絡に至り、可燃物に着火した。デジタルカメラにて撮影した連続写真を Fig.3.8 に示す。前章の半断線状態から断線時は負荷電流によるアーク放電であったが、短絡時はより大きな電流のアーク放電であるため、発光も火花も強いことがわかる。



(a) (b)

Fig.3.8 短絡時の写真 (a)通電中, (b)着火

Fig.3.8 Photographs of short circuit phenomenon of element conductor.

(a)During current, (b)Ignition of combustibles.

(ii) 短絡時の波形歪みと断線検出条件

通電中から短絡が開始する時の電圧波形および電流波形の一例を Fig.3.9 に示す。通電中は負荷により約 21A のピーク電流が流れるが、短絡開始時には約 128A のピーク電流が流れ、電圧波形に歪みが生じることが分かる。これは、アーク放電中の抵抗値が不安定となることによる電流変動や、放電ノイズの影響が考えられる。



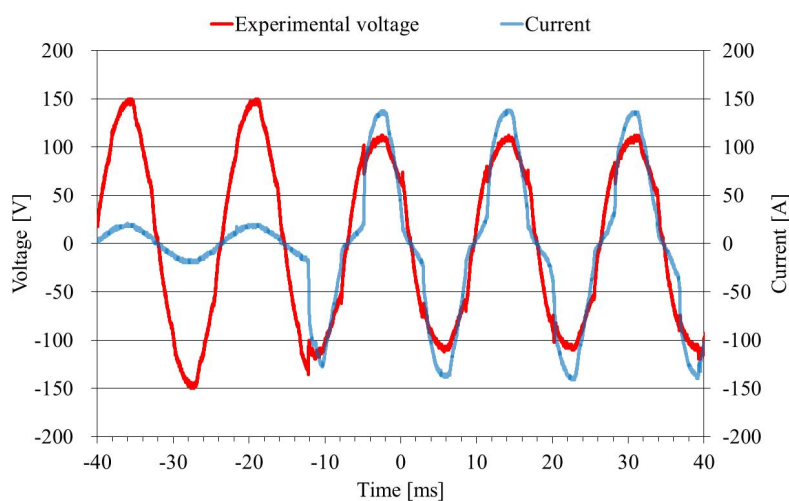


Fig.3.9 通電中および短絡時の電圧・電流波形の例

Fig.3.9 Example of voltage and current waveforms during current flow and at short circuit.

短絡中の電圧波形および電流波形の一例を、Fig.3.10 に示す。短絡中の波形の歪み方が時間ごとに異なることがわかる。これは、アーク放電による素線形状の変化や振動、PVC の締め付け力が不均一などの理由により、素線同士の接触状態が一定ではないことなどが原因と考えられる。前章で提案した素線断線検出法により、照査電圧波形と実験電圧波形を比較したところ、この例では逸脱時間が合計  $4,300\mu\text{s}$  となり、次の  $1/2$  サイクル間の電流がゼロとなるため、判定条件を満たす。

提案した素線断線検出手法は、一周期前の波形との比較演算の繰り返しになるため、Fig.3.10 のように短絡による不規則な電圧波形歪みが続く場合でも、「②条件①を満たした次の  $1/2$  サイクル間の電流がゼロとなる」すなわち、断線が半サイクル以上続く条件を満たし、検出が可能となる。

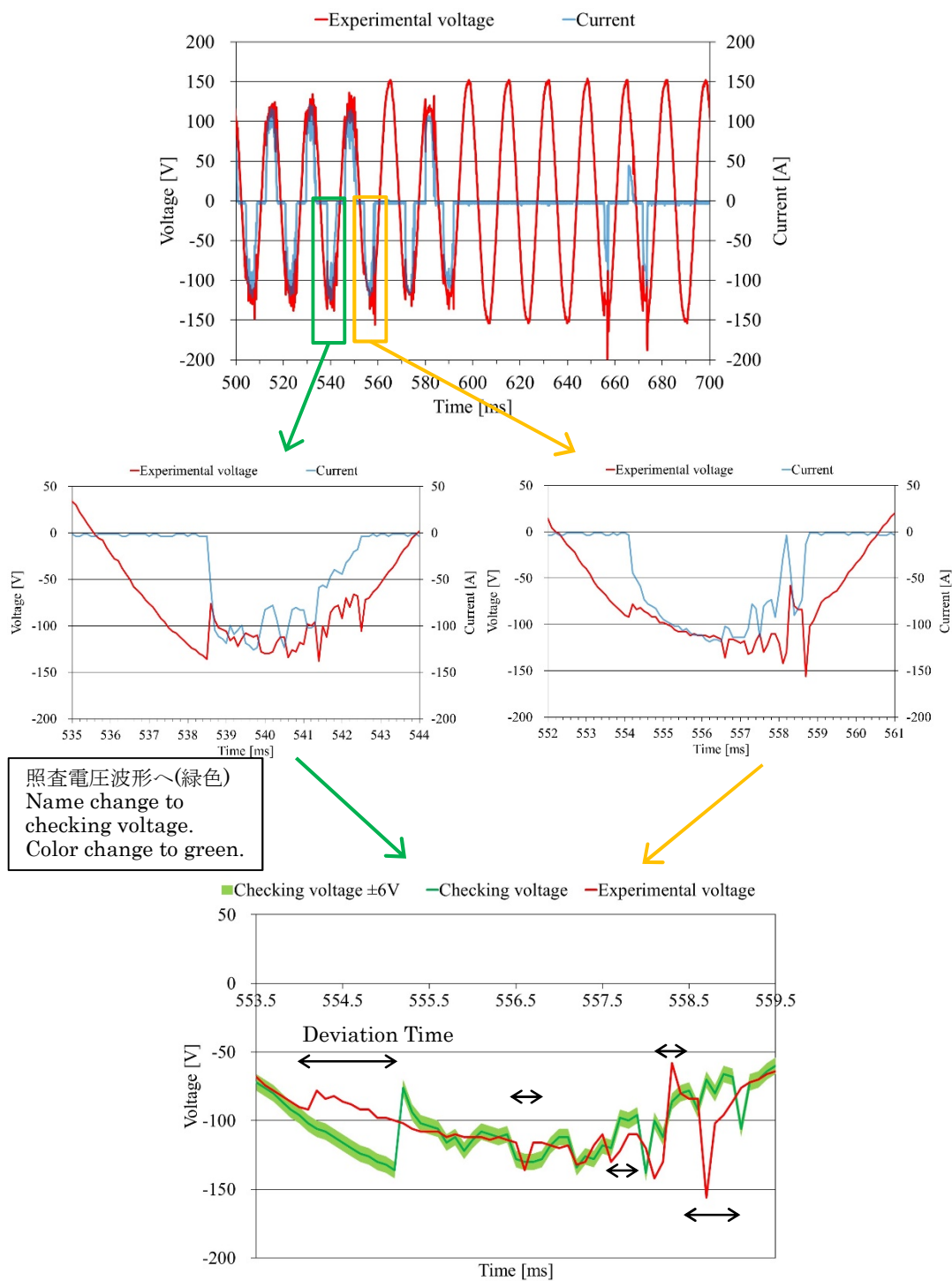


Fig.3.10 短絡時の電圧・電流波形の例

Fig.3.10 Example of voltage and current waveforms at short circuit.

同様の実験を6回行った結果を Table 3.2 に示す。短絡が発生した時のサイクル数、通電から短絡が始まるまでの時間、短絡の継続時間、逸脱時間などをまとめている。通電開始から短時間で短絡に至る傾向があるが、これは直前の無通電サイクル時に PVC が冷却され、ばらけた導体素線が PVC の熱収縮により締め付けられることにより絶縁被覆を突き破って短絡状態が生じているためと考えられる。なお、導体素線が PVC の外部に露出する状態も観察された。短絡の様態は様々であったが、短絡電流と短絡継続時間が分電盤内のブレーカの過電流保護の閾値を下回り、遮断されることなく短絡が続いた。また、いずれも前章の半断線状態から断線時の場合より波形歪みが大きく、提案した検出法の条件を満たした。

また、Fig.3.10 のように短絡が継続した後、一旦、断線して電流が半サイクル以上ゼロとなり、再び短絡する現象が見られた。このような傾向は6回の実験のうち、5回観察された。

Table 3.2 半断線電源コードの短絡時の実験結果

Table 3.2 Experimental results for the partially disconnected cords at short circuit.

Sample No.	Temperature [°C]	Characteristics of the Short Circuit				Deviation Time [μs]
		No. of Cycles	Commencement Time	Current [Arms]	Duration [ms]	
1	225	38	30.0ms	86.1	560	4,320
2	223	5	10min	87.6	850	4,300
3	224	15	Immediately	51.2	80	6,040
4	231	5	Immediately	30.0	21	6,080
5	213	13	25.3ms	93.4	253	2,040
6	187	23	Immediately	44.5	83	1,944

(iii) 考察

半断線電源コードが短絡し、アーク放電により可燃物へ着火して断線する現象を実験室で再現した。短絡時のアーク放電は前章の素線断線時より電流が大きく、強い発光と火花が観察された。短絡中は不規則な電圧波形の歪みが続くが、これはアーク放電や PVC の締め付け力が不均一などの理由により、接地側と非接地側の素線の接触状態が一定にならないことが原因と考えられる。

短絡が継続した後、一旦、断線して電流が半サイクル以上ゼロとなり、再び短絡する現象が見られた。このような断続的な短絡現象は、断線した後の冷却による PVC の収縮や、アーク放電の衝撃による微振動などが原因と考えられる。

Table 3.2 からわかるように、今回の実験の範囲内では半断線電源コード短絡時の電流値は 30~90A 程度、持続時間は 0.02~0.9s 程度であった。Fig.3.11 に示すように、従来の 20A ブレーカでは、このような短絡の検出が不可能である。しかしながら、提案手法では検出が可能となるため、可燃物への着火直前あるいは着火後の極めて短い時間で電力供給遮断ができ、火災防止に有効と考えられる。

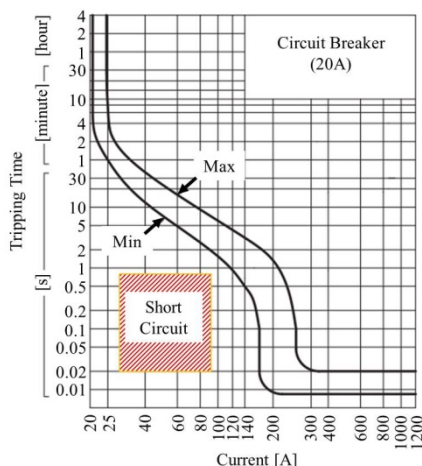


Fig.3.11 20A ブレーカの動作曲線と本実験での半断線電源コードの短絡範囲

Fig.3.11 Performance curves of a conventional 20A circuit breaker and range of magnitude and duration of short circuit current obtained by experiments using partially disconnected cord.

### 3.4 まとめ

絶縁被覆の外見上に損傷が見られないが内部導体素線の一部が断線した半断線状態を模擬した 100V 用電源コードに通電し，短絡してアーク放電により可燃物に着火し，断線する現象を再現してその過程を解明した。また，前章で提案した検出法により，短絡から断線に至る現象を有効に検出できることができた。得られた成果を次に示す。

(1) 通電による熱膨張と無通電時の熱収縮により，絶縁被覆に熱ストレスが加えられ，半断線箇所に隙間が形成されて導体間の接触面積が低下し，抵抗値の増加と温度上昇に繋がると考えられる。

(2) さらにサイクルを繰り返すことにより，半断線電源コードが短絡し，アーク放電により可燃物に着火する現象を解明した。なお，短絡時には不均一な波形の歪みが続き，やがて断線した。短絡と断線が断続的に続く現象が見られたが，この場合は始めの断線時に前章で提案した素線断線検出法の条件を満たすため，検出が可能である。

(3) 市販のブレーカでは，半断線電源コードで生じる電流値や持続時間によっては検出できない短絡現象があるが，提案手法ではこのような短絡の検出が可能となり，火災の未然防止や早期検出に貢献できる。

(4) より実験を重ね，様々な短絡状態に対する検出条件の最適な閾値を検討する必要がある。

## 第 4 章

# 伝導性ノイズによるブレーカの 導体接続部緩み検出法

## 4.1 はじめに

従来、超音波<sup>[44]</sup>、変流器とフィルタ<sup>[45]</sup>、電圧波形の比較<sup>[46]</sup>により接触部緩みを検出する手法が検討されているが、実用性や検出精度に課題がある。

接触部緩みによる温度上昇について、市販の放射温度計等を用いて点検されることがある。工場や商業施設の自家用電気工作物については、適正な維持や保安の確保を目的として保安規程を定め、経済産業省や産業保安監督部に届け出る必要がある<sup>[49]</sup>。その中で、金属接触部の緩みや過熱について点検する旨を定めることが一般的である。日常的な点検では非接触の赤外線放射温度計等を用いて過熱状況を確認し、停電点検では接触部の緩みの確認や増し締めを行うことが多く、手間やコストが掛けられている。また、産業用機械については、開閉器や遮断器、端子台などが機器の内部に格納されていることが多い。この場合、金属接触部の緩みや過熱状況を確認するには、機器の停止や筐体を開けて内部を確認するなどの作業が必要となる。

そこで、本章では分岐回路用ブレーカの導体接続部を対象とし、ねじ端子が緩んだ際の間隙で発生する放電の状況調査および放電痕の化学分析により、火災に至るメカニズムを検討する。また、緩みを通電状態でも検出できる伝導性ノイズ解析と深層学習を用いた識別法を提案する。導体接続部のねじを緩めてブレーカ端子と電源ケーブル導体間の接触抵抗を増加させた場合について、提案手法の有効性を検討する。

## 4.2 緩み箇所の抵抗値と伝導性ノイズ

ブレーカの導体接続部の締め付け状態の違いによる接触抵抗と伝導性ノイズについて検討する。分電盤内で使用されている 100V 用の分岐回路用ブレーカを実験に供した。ブレーカの導体接続部は、ケーブル導体をねじと負荷座（金属板）により締め付ける構造である。

ケーブルは導体が単線であり、外周が絶縁体で被覆してあるビニル絶縁ビニルシースケーブルを実験に供した。このケーブルは、屋内電気配線として広く使用されている。

### (i) 試料

市販の分岐回路用ブレーカ（河村電器産業 SE2P1E15S）と、600V ビニル絶縁ビニルシースケーブル（VVF2.0-2C）を実験に供した。ブレーカとケーブルの接続部を Fig.4.1 に示す。ブレーカの端子部は、ケーブルの導体をねじと負荷座（金属板）により締め付ける構造であり、メーカーによる適正締め付けトルクは  $200\text{cN}\cdot\text{m}$  である。導体接続部の緩みは、ねじを緩めることで再現した。

ケーブルの導体は直径が 2.0mm の単線であり、外周が塩化ビニルを主体とした絶縁体で被覆してあり、絶縁体の周りをビニルシースで覆われた構造である。



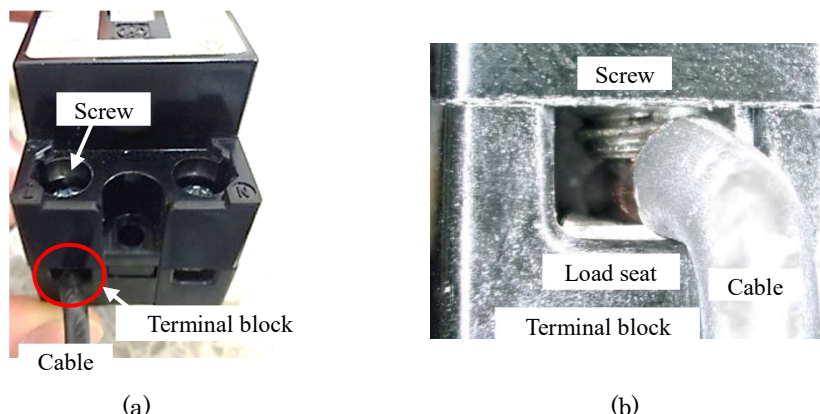


Fig.4.1 分岐回路用ブレーカの導体接続部の状況（トルク：200cN・m）

(a)ブレーカの外觀，(b)導体接続部前面からの拡大図（(a)の赤丸箇所）

Fig.4.1 Appearance of terminal block of circuit breaker (Torque : 200cN・m).

(a)External appearance of circuit breaker, (b)Magnified front view of terminal block (the part surrounded by a red circle in (a)).

## (ii) 伝導性ノイズ

電気機器から放出される電磁ノイズが他の電気機器へ障害を与えないようにするために、限度値や正しく評価するための測定方法が CISPR (International Special Committee on Radio Interference) <sup>[50]</sup>や FCC (Federal Communications Commission) <sup>[51]</sup>などに規定されている。また、静電気や雷サージ、絶縁材料中の欠陥箇所における部分放電などの放電現象からも電磁ノイズが発生することが広く知られている。そこで、導体接触部の緩みによる間隙で微小放電が生じ、電磁ノイズが発生すると考えた。電磁ノイズは、Fig.4.2 に示すように空間に放出される放射性ノイズと、電源ケーブルを伝わる伝導性ノイズに分けられる。放射性ノイズはアンテナで受信して測定する必要がある一方、伝導性ノイズは電源ケーブルに流れる高周波ノイズを抽出して測定するためアンテナは必要とされない。そこで、将来の現場適用性を考え、伝導性ノイズに着目した。

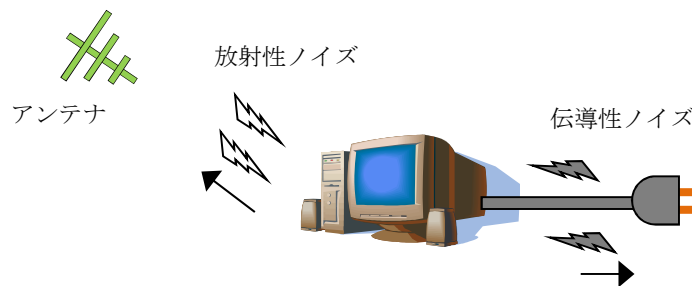


Fig.4.2 電磁ノイズの概要

Fig.4.2 Outline of electromagnetic noise.

### (iii) 実験方法

実験回路を Fig.4.3 に示す。電源装置（エヌエフ回路設計ブロック ES2000S）から 100V, 60Hz を擬似電源回路網 AMN（Artificial Mains Network : PMM L2-16B）に供給した。AMN は二次側の電源ケーブル上の伝導性ノイズを抽出してスペクトラムアナライザへ供給する回路網であり，回路定数は CISPR16-1-2<sup>[52]</sup> で規定されている。

AMN から分岐回路用ブレーカと端子台を経て，負荷を接続した。ブレーカの二次側端子 T2 と端子台の一次側端子 T3 間のケーブル長さ L は 10cm とした。

一次側端子 T1 は適正締め付けトルクである  $200\text{cN}\cdot\text{m}$  とし，二次側端子 T2 のトルクは 200, 50, 10, 1,  $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満のいずれかとした。 $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満については，トルクドライバーにて  $1\text{cN}\cdot\text{m}$  で締め付けた後，ランダムに緩めた。通電前に端子 T1 と T3 間の抵抗値を，抵抗計（日置電機 RM3545）を用いて測定した。通電により発生する伝導性ノイズの周波数スペクトルをスペクトラムアナライザ（Keysight Technologies N9038A）にて測定した。測定周波数域は  $150\text{kHz}$  ～  $30\text{MHz}$ ，測定ポイントは 10,001 点，周波数帯域幅（RBW）は  $9\text{kHz}$  とし，尖頭値検波（Peak Detection）にて測定した。

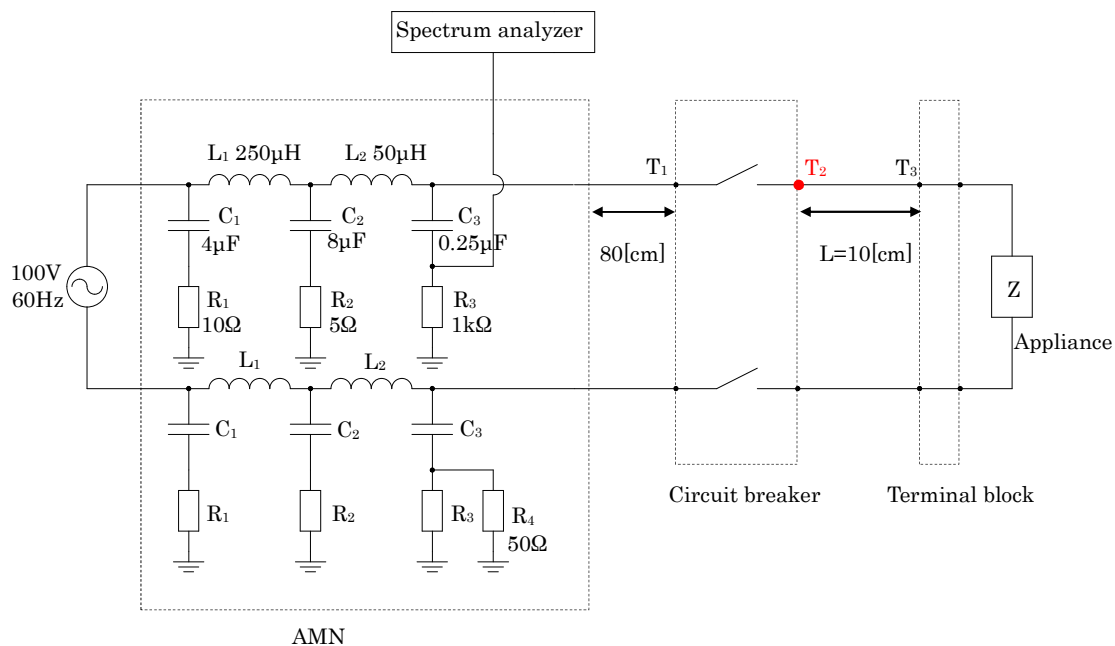


Fig.4.3 実験回路

Fig.4.3 Experimental setup.

(iv) 抵抗値に及ぼす締め付けトルクの影響

端子 T<sub>2</sub> の 5 種類の締め付けトルクにおいて、端子 T<sub>1</sub> と T<sub>3</sub> 間の抵抗値をそれぞれ 50 回測定した結果を Fig.4.4 に示す。200~1cN・m では抵抗値のばらつきが小さく、9~18mΩ であった。特に 200cN・m~10cN・m では抵抗値が 9~10mΩ と安定している。そのため、端子 T<sub>2</sub> の接触部の緩みの影響は小さいと考えられる。

一方、1cN・m 未満では、ばらつきが非常に大きくなることがわかった。そのため、接続部の接触状態が不均一になっていると考えられる。

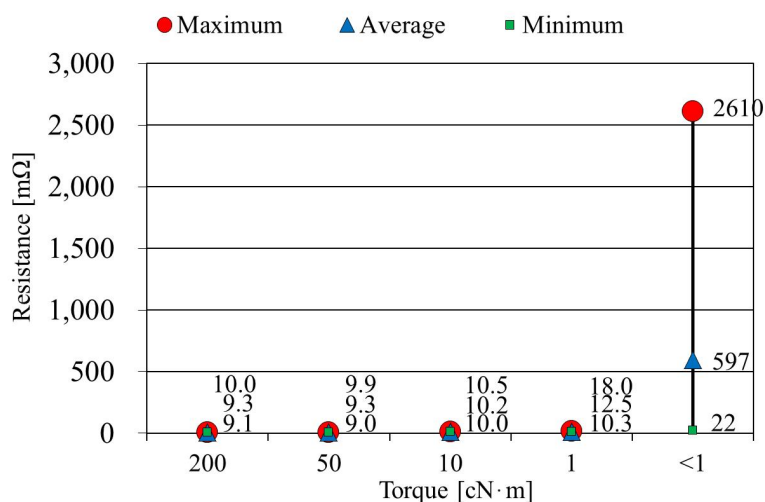


Fig.4.4 端子 T<sub>2</sub> の締め付けトルクと端子 T<sub>1</sub>・T<sub>3</sub> 間の抵抗値

Fig.4.4 Effect of tightening torque of T<sub>2</sub> on resistance between T<sub>1</sub> and T<sub>3</sub>.

(v) 伝導性ノイズに及ぼす締め付けトルクの影響

Fig.4.4 に示した 4 種類 (200~1cN·m) の締め付け状態に抵抗負荷である 1,050W の電気ヒーターを接続し、発生した伝導性ノイズを測定した結果の一例を Fig.4.5 に示す。ここで、縦軸は雑音端子電圧レベルを示しており、1μV を基準量として電圧値の dB 表現をしている。それぞれ 50 回ずつ測定した平均値を Fig.4.6 に示す。200~1cN·m ではほぼ同様な結果となり、明確な違いは見られなかった。この結果は、前述の抵抗値の場合と合致している。これより、1cN·m 以上の場合には、ケーブル導体とブレーカ間は有効に接触していると考えられる。

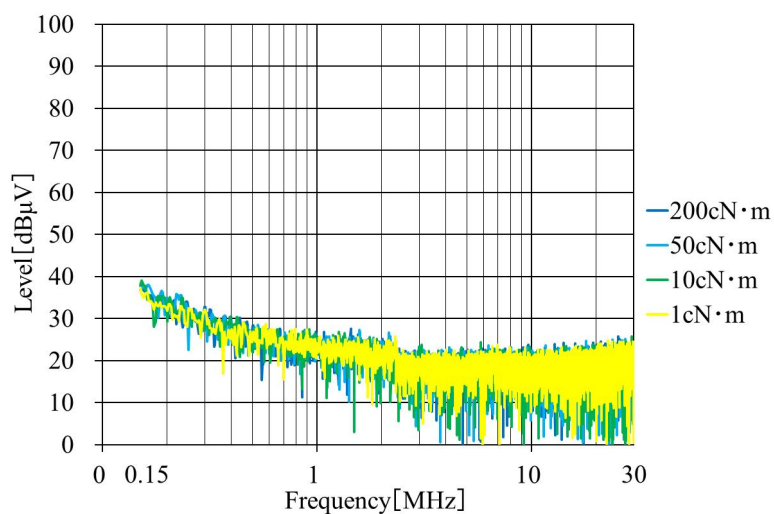


Fig.4.5 端子 T<sub>2</sub> のトルクの違いによる伝導性ノイズの測定例 (電気ヒーター1,050W)

Fig.4.5 Examples of conducted emission spectra obtained for several tightening torque of T<sub>2</sub> (Electric heater 1,050W).

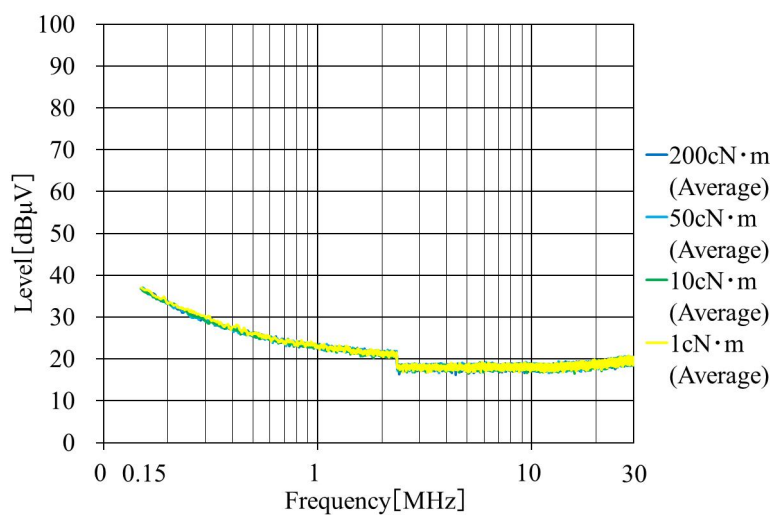


Fig.4.6 端子 T<sub>2</sub> のトルクの違いによる伝導性ノイズの平均値 (電気ヒーター1,050W)

Fig.4.6 Average conducted emission spectra obtained for several tightening torque of T<sub>2</sub> (Electric heater 1,050W).

次に、Fig.4.4 に示した T2 のトルクが  $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満の伝導性ノイズを測定した結果の三例と 50 回測定した平均値を Fig.4.7 に示す。比較として、Fig.4.6 の  $200\text{cN}\cdot\text{m}$  の平均値も示す。トルクが  $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満の場合には、 $200\text{cN}\cdot\text{m}$  の場合に比べて周波数スペクトルの雑音端子電圧レベルが幅広い帯域で増加し、特に  $3\text{MHz}$  以下の周波数帯域では顕著である。

なお、 $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満でも、Fig.4.7 のような周波数スペクトルの雑音端子電圧レベルの増加が観測されないことがあった。これは、端子のねじに緩みがある状態でも導体との接触状態によっては負荷に正常に通電し、放電が発生しないためである。本論文では、放電が発生して Fig.4.7 のような周波数スペクトルが得られるような導体接続部の緩みを検出の対象とする。

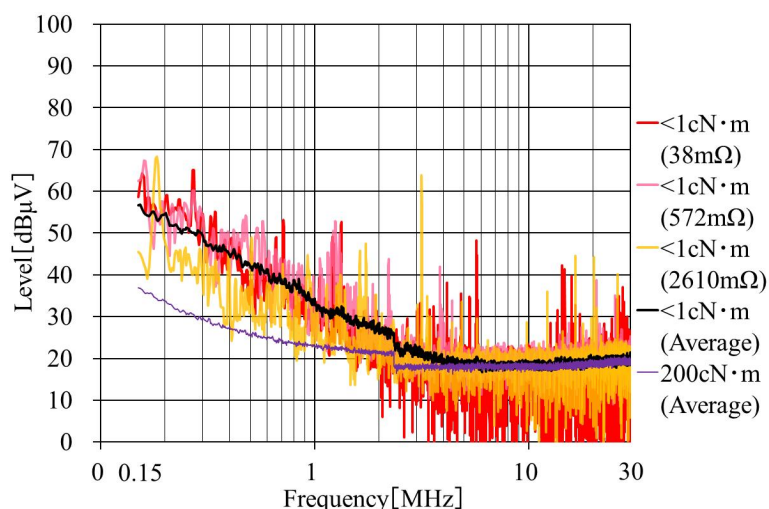


Fig.4.7 端子 T<sub>2</sub> が緩んで端子 T<sub>1</sub>・T<sub>3</sub> 間の抵抗値が異なる状態での伝導性ノイズの測定例と平均値 (電気ヒーター1,050W)

Fig.4.7 Examples and average of conducted emission spectra obtained for loose tightening torque of T<sub>2</sub> with different values of resistance between T<sub>1</sub> and T<sub>3</sub> (Electric heater 1,050W).

(vi) 緩み箇所の温度上昇

放電後の電源ケーブルの表面状態について、デジタルマイクロスコープ（キーエンス VHX-6000）を用いて拡大観察した写真を Fig.4.8 に示す。導体である銅の表面に銀色の付着物が観察されたため、走査型電子顕微鏡（SEM：日本電子 JSM-6510A）に付属しているエネルギー分散型 X 線分析装置（EDX：日本電子 JED-2300）を用いて、加速電圧 20kV、照射電流 1nA により ZAF 法にて元素分析を行った結果を Fig.4.9 に示す。亜鉛が検出されたのは、ブレーカの亜鉛メッキされたねじから溶融したためと考えられる。これは、亜鉛の融点（419.5℃）を超える高温が発生したことを示唆している。



Fig.4.8 放電後の導体先端の拡大図

Fig.4.8 Micrograph of the end of conductor after discharge.

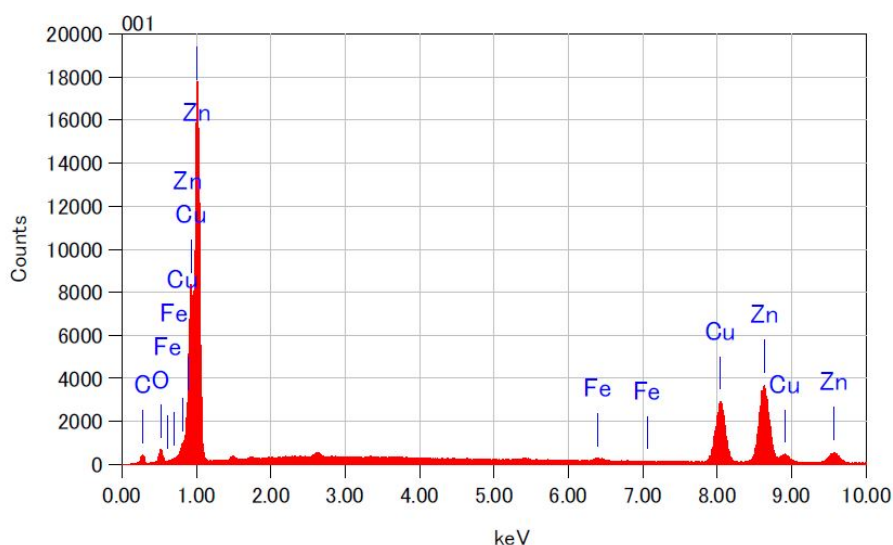


Fig.4.9 元素分析結果

Fig.4.9 Chart of elementary analysis.

(vii) 負荷特有の伝導性ノイズ

モータやインバータ、スイッチング電源などは、高周波の伝導性ノイズを発生することが広く知られている。そこで、1,200W のドライヤーを負荷として接続し、 $T_2$ を  $200\text{cN}\cdot\text{m}$  で締め付けて金属端子のねじの緩みがない状態とし、発生した伝導性ノイズを測定した結果の三例と 50 回測定した平均値を Fig.4.10 に示す。比較として、Fig.4.6 の電気ヒーターを負荷とした場合の平均値も示す。ドライヤーの測定結果は、電気ヒーターに比べて 12MHz 付近および 1MHz 以下の周波数スペクトルの雑音端子電圧レベルが増大しており、負荷特有の伝導性ノイズが発生していることが分かる。

次に、 $T_2$ を  $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満に変えて伝導性ノイズを測定した結果の三例と 50 回測定した平均値を Fig.4.11 に示す。Fig.4.10 で示した負荷特有の周波数スペクトルに加え、Fig.4.7 のように、金属端子のねじの緩みに起因して周波数スペクトルの雑音端子電圧レベルが幅広い帯域で増加していることがわかる。



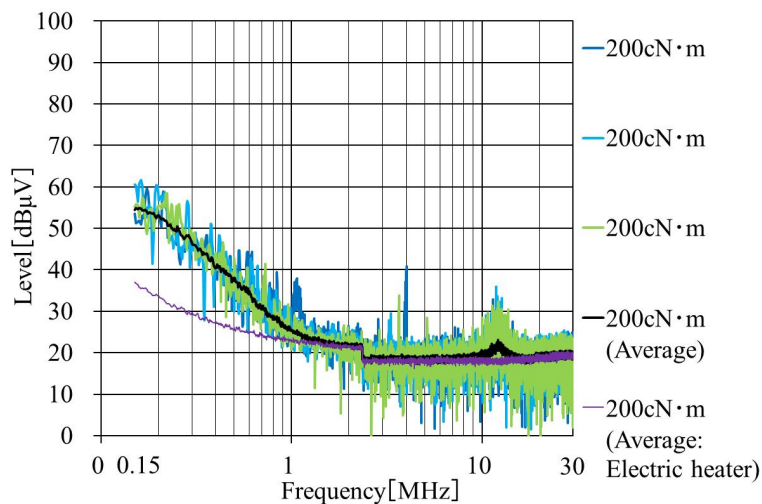


Fig.4.10 端子  $T_2$  が適正締め付けトルク状態での伝導性ノイズの測定例と平均値（ドライヤー1,200W，電気ヒーター1,050W）

Fig.4.10 Examples and average of conducted emission spectra obtained for appropriate tightening torque of  $T_2$  (Dryer 1,200W, Electric heater 1,050W).

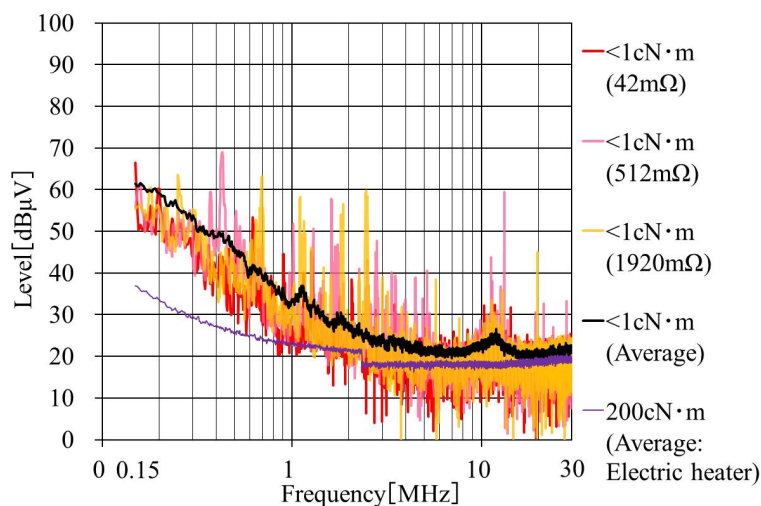


Fig.4.11 端子  $T_2$  が緩んで端子  $T_1$ ・ $T_3$  間の抵抗値が異なる状態での伝導性ノイズの測定例と平均値（ドライヤー1,200W）および電気ヒーター1,050W の平均値

Fig.4.11 Examples and average of conducted emission spectra obtained for loose tightening torque of  $T_2$  with different values of resistance between  $T_1$  and  $T_3$  (Dryer 1,200W), and average of conducted emission spectra (Electric heater 1,050W).

(viii) 考察

分岐回路用ブレーカとビニル絶縁ビニルシースケーブルの接続部の抵抗値は、適正トルクである  $200\text{cN}\cdot\text{m}$  から  $1\text{cN}\cdot\text{m}$  では抵抗値のばらつきが小さいが、 $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満ではばらつきが非常に大きくなる。これは、ブレーカのねじと負荷座に間隙が生じ、ケーブル導体との接触状態が不均一になることが原因と考えられる。

抵抗性の負荷である電気ヒーターを接続すると、 $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満では、放電に伴う伝導性ノイズの増加が確認できた。これは、端子  $T_2$  のねじの緩みによりケーブル導体とブレーカ間で間隙が生じ、微小放電が発生したためと考えられる。

放電後のケーブル導体の元素分析により亜鉛が検出され、融点 ( $419.5^\circ\text{C}$ ) 以上の高温が発生することがわかった。発生箇所が局所的であり、放電が定常的には発生しないため、放電休止中の熱放散の効果も考えられることから、放電による温度上昇により火災に至る可能性は低いと考えられる。放電発生箇所から離れた場所にある電線の絶縁体の溶融は、接触抵抗増加に伴うジュール熱により生じていると推測される。以上から、導体接続部の緩みにより接触抵抗が増加して発熱により電線の絶縁体や端子台が溶融し、発火に至るメカニズムと考えられる。

負荷としてドライヤーを接続すると、 $200\text{cN}\cdot\text{m}$  の伝導性ノイズでは、負荷特有の周波数スペクトルが観察された。また、 $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満では、負荷特有の伝導性ノイズに加え、電気ヒーターと同様に伝導性ノイズの増加が観察された。

導体接続部緩みに伴う伝導性ノイズは、ある特定の周波数における雑音端子電圧レベルが増加するのではなく、広帯域で発生するノイズであり、周波数に規則性を見出すことは困難であることがわかった。また、端子のねじの緩みを検出するには、負荷特有の伝導性ノイズと端子のねじの緩みに起因する伝導性ノイズとを区別する必要があることがわかった。

### 4.3 深層学習を用いた緩み検出法

前項より，導体接続部の緩みに伴う伝導性ノイズの増加が確認されたが，緩み検出法を提案するために2つの課題があることがわかった。1つ目は，緩みに伴う伝導性ノイズの周波数に規則性がないこと，2つ目は負荷特有の伝導性ノイズと有効に区別することである。そこで本章では，AIの一手法である深層学習に着目する。種々の電気製品を対象に端子のねじに緩みがある状態とない状態の周波数スペクトルについて深層学習を使用し，緩みがある状態を識別できる手法を提案する。

#### (i) CNNの概要

近年，深層学習（Deep learning）は画像認識や音声認識，言語処理など様々な分野で応用され，高い精度を実現している機械学習手法である<sup>[53]</sup>。2012年に開催された物体検出と画像分類のコンテスト ILSVRC（ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge）において，Krizhevskyらの多層構造の畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network：CNN）を用いた手法<sup>[54]</sup>では，従来手法に比べて精度が飛躍的に向上し，大きな注目を浴びた。それ以降の ILSVRC では CNN を用いた手法が主流となり，人工知能分野で重要な位置を占めている。

従来のニューラルネットワークや SVM（Support Vector Machine）などの機械学習では，データから事前に特徴量を抽出し，学習に用いる必要があった。そのため，設計者の抽出技術が精度に影響を与えていた。一方，CNN ではデータ

を入力し、学習の中で特徴量の抽出を自動的に行うことができる。Fig.4.12 に CNN の概要を示す。畳み込み層、プーリング層、活性化関数、全結合層を複数組み合わせて構成される。畳み込み層は、入力値にカーネルと呼ばれるフィルタを掛け合わせる処理で、特徴量を抽出する。カーネルをストライド間隔で順に移動させてデータ全体から特徴を抽出するため、特徴がデータのどの位置にあっても抽出ができる。このようにして得られた出力を特徴マップと呼び、カーネルの種類が多いほど特徴マップ数が増える。プーリング層は、カーネルの領域のデータを最大値や平均値に置き換え、データを縮小する処理である。活性化関数は入力値を非線形変換する処理であり、シグモイド関数  $1/(1+\exp(-x))$  や  $\tanh(x)$ , ReLU(Rectified Linear Unit)<sup>[55]</sup>などが使用される。これらの層を複数組み合わせて、入力値を全てのノードと結合して処理をする全結合層を通して出力される。

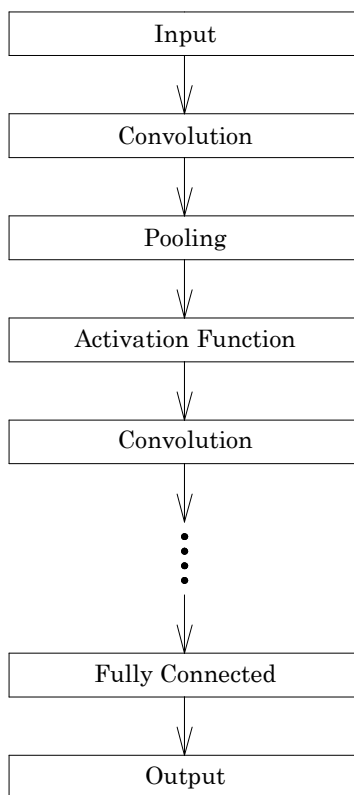


Fig.4.12 CNN の概要

Fig.4.12 Outline of CNN.

## (ii) CNNの学習

本論文では、ソニーネットワークコミュニケーションズ(株)の Neural Network Consoleにより CNNを構築した。Table 4.1に示す5種類の電気製品を負荷とし、端子  $T_2$  のねじの締め付けトルクが  $200\text{cN}\cdot\text{m}$  および  $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満における伝導性ノイズ測定で得られた周波数スペクトルを入力値として用いた。負荷とねじの状態の10通りの組み合わせにおいて、それぞれ70個のスペクトルを用意し、このうち50個分を学習データとして使用し、CNNを構築した。残りの20個分を評価データとして使用し、端子のねじの緩み検出精度を評価した。

Table 4.1 電気製品とトルク  $T_2$  の仕様Table 4.1 Specification of household appliances and torque of  $T_2$ .

Appliance	Power consumption [W]	Torque of $T_2$ [ $\text{cN}\cdot\text{m}$ ]
Electric heater	1050	200 or $<1$
Dryer	1200	200 or $<1$
Incandescent bulb	800	200 or $<1$
Electric griddle	1100	200 or $<1$
Portable air conditioner	950	200 or $<1$

Table 4.2 に CNN の構成を示す。伝導性ノイズのスペクトルは 1 個当たり 10,001 点で表し、それを入力とする。Convolution は畳み込み層、Polling はプーリング層、ReLU と Sigmoid は活性化関数、Fully Connected は全結合層をそれぞれ意味する。

Convolution 1 でカーネル（フィルタ処理を行う重み行列）サイズ 4 のフィルタがストライド（カーネルの間隔）1 で適用される。16 種類のカーネルを使用し、9,998 のデータが格納された 16 枚の特徴マップが生成される。Max Pooling 1 ではカーネルサイズ 2 のフィルタが間隔 2 で適用されて最大値に置き換える処理がされ、データ数が 4999 に縮小された 16 枚の特徴マップが生成される。ReLU 1 では活性化関数 ReLU により変換される。以下、Table 4.2 に示した構成で CNN を構築した。Convolution 1-ReLU 1 から Convolution 6-ReLU 6 まで 6 回の畳み込み処理を行い、154 個のデータが格納された特徴マップ 128 枚が生成される。正解率向上のための Convolution 7-ReLU 7 から Convolution 10-ReLU 10 を経て、畳み込み処理が 10 回された ReLU 10 の出力は、150 個のデータが格納された特徴マップ 128 枚（計 19,200 個のデータ）となる。全結合層 Fully Connected 1 のニューロン 1,000 個の値は、19,200 個全てのデータの重みつき加算された値となる。Fully Connected 3 で 1 つのニューロンに集約され、活性化関数の Sigmoid で変換されて最終出力値が 1 個得られ、緩みがあるか、ないかが判断される。

この CNN の構成は、カーネルサイズ 2~10、特徴マップ 2~512、畳み込み層 4~10、全結合層 2~3、バッチサイズ 4~256 の中から 100 Epoch の学習内でコストおよびエラーが十分に収束するように試行錯誤して決定した。なお、学習の安定化および収束を早めるため、入力値を平均 0 分散 1 に正規化する Batch normalization<sup>[56]</sup>を畳み込み層および全結合層の後に挿入した。

Table 4.2 CNN の構成  
Table 4.2 Architecture of CNN.

Layer	Kernel Shape	Strides	Sizes
Input	—	—	10001
Convolution 1	4	1	16×9998
Max Pooling 1	2	2	16×4999
ReLU 1	—	—	16×4999
Convolution 2	4	1	32×4996
Max Pooling 2	2	2	32×2498
ReLU 2	—	—	32×2498
Convolution 3	4	1	64×2495
Max Pooling 3	2	2	64×1247
ReLU 3	—	—	64×1247
Convolution 4	4	1	128×1244
Max Pooling 4	2	2	128×622
ReLU 4	—	—	128×622
Convolution 5	4	1	128×619
Max Pooling 5	2	2	128×309
ReLU 5	—	—	128×309
Convolution 6	2	1	128×308
Max Pooling 6	2	2	128×154
ReLU 6	—	—	128×154
Convolution 7	2	1	128×153
ReLU 7	—	—	128×153
Convolution 8	2	1	128×152
ReLU 8	—	—	128×152
Convolution 9	2	1	128×151
ReLU 9	—	—	128×151
Convolution 10	2	1	128×150
ReLU 10	—	—	128×150
Fully Connected 1	—	—	1000
ReLU 11	—	—	1000
Fully Connected 2	—	—	100
ReLU 12	—	—	100
Fully Connected 3	—	—	1
Sigmoid	—	—	1
Output (Binary Cross Entropy)	—	—	1

学習はバッチサイズを 10, 最大 Epoch 数を 100, 最適化アルゴリズムを Adam<sup>[57]</sup>, ロス関数をバイナリ交差エントロピーとして, 重みの最適化を行った。バイナリ交差エントロピーは, 学習結果と正解値が近似すると数値が小さくなる性質がある。学習結果を Fig.4.13 に示す。縦軸は, ロス関数の値を示す。コストは最適化段階で算出されるロス関数の 1 Epoch 内の平均値, エラーは Epoch 終了時での学習データおよび評価データそれぞれにおけるロス関数の平均値を示している。なお, 1 Epoch は学習データをバッチサイズ分の 10 個に分割し, 学習を 10 回行っている。Epoch の増加に従いコストおよびエラーの値が低下しているため, 最適化が実行され, 学習が行われていることが分かる。

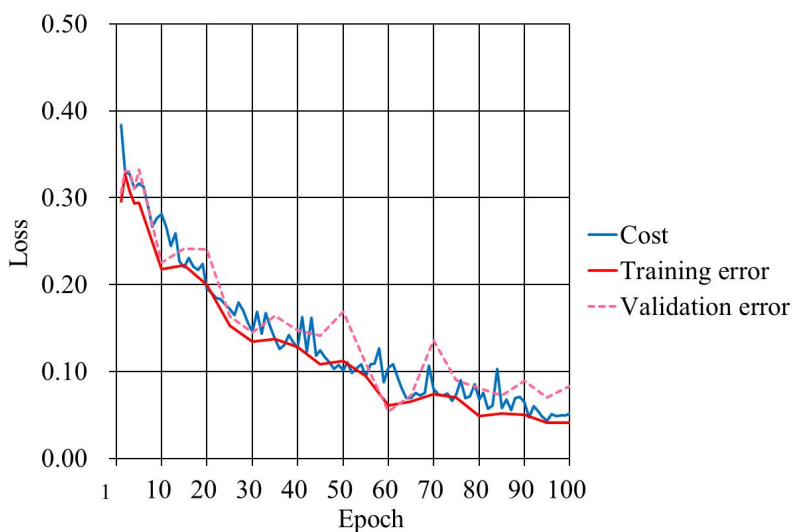


Fig.4.13 CNN の学習曲線

Fig.4.13 Learning curve of CNN.



(iii) CNN の検出精度

学習後の CNN に対して、評価データにより検出精度を評価した結果を Table 4.3 に示す。評価データは前述したように、端子 T<sub>2</sub> のねじの締め付けトルクが 200cN・m (緩みなし) および 1 cN・m 未満 (緩みあり) の状態でそれぞれ測定した 5 種類の電気製品×20 個分の周波数スペクトルを用いた。

端子のねじの緩みがない状態 (y : label=0) とある状態 (y : label=1) の正解値に対して、評価データ (y') を全て有効に分類できている。そのため、再現率、適合率、正解率ともに 100%の精度を得ることができた。

Table 4.3 CNN の評価  
Table 4.3 Validation of CNN.

	y' = 0	y' = 1	Recall
y : label = 0 (200cN・m)	100	0	100%
y : label = 1 (<1cN・m)	0	100	100%
Precision	100%	100%	
Accuracy	100%		

#### (iv) 考察

5種類の電気製品を負荷とし、端子 T<sub>2</sub>のねじの締め付けトルクが 200cN・m および 1 cN・m 未満における伝導性ノイズ測定で得られた周波数スペクトルを用いて CNN の学習を行い、ねじの緩み状態を有効に検出できることを確認した。畳み込み層やプーリング層、全結合層の数や、カーネルサイズ、ストライド間隔、特徴マップ数などの各種パラメータの選定の仕方は一義的に決まっておらず、試行錯誤により決定した。CNN の構成によっては検出精度が大きく変わり、今回の実験データにおいても畳み込み層の数、全結合層の数、特徴マップ数が少ない時に正解率が 50%になる場合もあった。そのため、学習データに応じた最適な CNN の構成を検討する必要がある。

## 4.4 まとめ

ブレーカとケーブルの導体接続部を対象とし、ねじ端子が緩んだ際の間隙で発生する放電の状況調査および放電痕の化学分析結果を踏まえて、火災に至るメカニズムを検討した。また、放電発生時に増加する伝導性ノイズの周波数スペクトルに基づき、深層学習を用いた緩み検出法を提案した。得られた成果を次に示す。

(1) 締め付けトルクが 1cN・m 未満の状態では電気ヒーターを接続した場合には、伝導性ノイズが幅広い帯域で増加し、放電現象が観察された。なお、接続部に緩みがある状態でも、導体の接触状態によっては放電が発生しない場合もある。

(2) 放電により高温が発生するが、発生箇所が局所的であることや放電が定常的には発生しないため、放電による温度上昇により火災に至る可能性は低いと考えられる。接触抵抗が増加して発熱により電線の絶縁体や端子台が溶融し、最終的に発火に至るメカニズムと考えられるが、実証が課題である。

(3) 5種類の電気製品を負荷とし、締め付けトルクが  $200\text{cN}\cdot\text{m}$  および  $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満における伝導性ノイズ測定で得られた周波数スペクトルを用いて CNN の学習を行い、緩みの検出精度を検証したところ、適切な CNN の構成をすれば極めて良好な結果が得られることがわかった。

(4) 本提案手法によれば、分電盤に組み込んだマイコンに CNN の学習結果を搭載して導体接続部の緩みを遠隔で高精度に検出できる可能性がある。緩み検出時に警報出力するシステムを構築すれば、従来手法の課題である点検コストや手間の削減が期待でき、接触部加熱による火災の未然防止に貢献できる。

(5) 今回の実験は、電源の電圧および周波数に変動がほとんどない状態で実施したが、実際の現場では、電源系統に様々な負荷が接続されており、多様な周波数スペクトルが観察されることが考えられる。このため、種々の条件で実験を行い、実験データに応じた最適な CNN の構成を検討する必要がある。

# 第 5 章

## 結論

## 5.1 本研究で得られた成果

本論文は、火災のうち発生件数が最も多い電気設備機器火災の現象解明と火災兆候検出手法を確立することを目的として、電気設備機器火災の主原因となる 3 つの現象に着目して実験と検討を行った結果を取りまとめたものである。

まず、電源コードの半断線状態から素線断線に至る現象を解明した。さらに、素線断線検出法を考案してその有効性について確認した。

次に、電源コードの半断線状態から絶縁被覆が熔融して短絡に至り、アーク放電により可燃物に着火し、断線する現象を解明した。また、先に提案した素線断線検出法の適用について検討した。

さらに、分岐回路用ブレーカの導体接続部を対象とし、ねじ端子が緩んだ際の隙間で放電が生じ、増加した伝導性ノイズの周波数スペクトルから AI を用いた緩み検出法を検討した。

以下に、本研究で得られた知見や成果について整理する。

### (i) 第 1 章で得られた知見

電気設備機器火災の主原因である電源コードの半断線・短絡、接触部緩みの火災事例や発火原因と、これまでに提案されている検出法の概要や課題についてまとめている。これらの電気火災を減らすことは、社会的要望が極めて高いことを示している。

(1) 半断線電源コードから火災に至る場合には、従来、提案されている検出法では、屋内外に配線してある電源コードの半断線状態を検出することは困難である。

(2) 半断線電源コードが放電により発熱し、やがて断線する現象には、詳細なメカニズムに不明な点が多い。また、電源コードの断線検出法が確立されていない。

(3) 電源コードが半断線状態では発火せず、ジュール熱により絶縁被覆が熔融して短絡に至って発火し、やがて断線する現象には、詳細なメカニズムに不明な点が多い。また、コード短絡保護用瞬時遮断機能を有したブレーカが市販されているが、検出できない短絡現象の報告があり、検出精度に課題がある。

(4) 接触部緩みにより火災に至る例があり、過熱状況を確認するなどの点検が行われ、手間やコストが掛けられている。従来、提案されている検出法では、実用性や検出精度に課題がある。

## (ii) 第2章で得られた知見および成果

半断線状態を模擬した 100V 用電源コードに種々の条件下で通電し、可燃物の着火現象を再現するとともに、素線断線に至る際の電圧波形および電流波形の解析を行い、電源コードの素線断線検出法を考案し、その有効性を確認した。

(1) 素線断線時には発光を伴うアーク放電が発生し、高温で熔断した素線が周囲に飛散して可燃物に着火する現象を解明した。また、アーク放電に伴い電圧波形に歪みが生じることを明らかにした。電源コードの長さ(抵抗値)に関わらず、この歪みの持続時間は 8.3ms 以内、すなわち、電源の 1/2 サイクル以内であることを示した。

(2) アーク消弧時の実験電圧波形と、1サイクル遡った照査電圧波形を比較し、素線断線時特有の波形歪みを特徴づける量として、逸脱時間（実験電圧波形が照査電圧波形の±6Vの幅から逸脱する時間）を導入した。

① 逸脱時間が70μs以上であり、かつ

② 条件①を満たした次の1/2サイクル間の電流がゼロとなる

ことを素線断線検出条件として提案した。

(3) 負荷によっては電流が正弦波とならず、電圧波形に特有なひずみが生じる場合があるが、提案手法ではこの歪みの影響を受けず、5種類の負荷に対して電源コードの素線断線を80%以上の精度で検出できた。また、使用中の負荷を遮断する際の過渡現象によっても電圧波形の歪みが発生するが、検出条件を満たす割合は20%未満であることから、誤検出を抑え、素線断線を有効に検出できることを示した。

本提案手法は、従来手法の課題である半断線箇所の直接測定や事前の電流値測定は必要なく、コンセントや分電盤での電圧・電流波形から検出できる可能性がある。そのため、半断線電源コードが断線する際の火災の早期検出や、断線間で生じるアーク放電火災の未然防止に貢献できる。

### (iii) 第3章で得られた知見および成果

絶縁被覆の外見上に損傷が見られないが内部導体素線の一部が断線した半断線状態を模擬した100V用電源コードに通電し、短絡してアーク放電により可燃物に着火し、断線する現象を解明した。さらに、先に提案した素線断線検出法の適用について検討した。

(1) 通電と無通電のサイクルを繰り返すと、電源コード内部の半断線箇所に隙間が形成された。これは、通電による熱膨張と、無通電時の熱収縮により、絶縁被覆に熱ストレスが加えられたことが原因と考えられる。

(2) さらにサイクルを繰り返すことにより、断線した素線が絶縁被覆を貫通して半断線電源コードが短絡し、アーク放電が発生して可燃物に着火するメカニズムを解明した。短絡時には不均一な波形の歪みが続き、やがて断線した。短絡と断線が断続的に続く現象が見られたが、この場合は始めの断線時に前章で提案した素線断線検出法の条件を満たすため、検出が可能である。

今回の実験の範囲内では、従来の電源コード短絡保護用ブレーカでは検出できない短絡現象が確認されたが、本提案手法では検出が可能となるため、可燃物への着火直前あるいは着火後の極めて短い時間で電力供給遮断ができ、火災防止に大きな貢献ができると考えられる。

### (iv) 第4章で得られた知見および成果

分岐回路用ブレーカとケーブルの導体接続部を対象とし、ねじ端子が緩んだ際の間隙で発生する放電の状況調査および放電痕の化学分析結果を踏まえて、火災に至るメカニズムを検討した。また、放電発生時には伝導性ノイズが増加することを明らかにし、解析した伝導性ノイズの周波数スペクトルに基づき、深層学習を用いた緩み検出法を提案した。

(1) ねじ端子が適正締め付けトルクの  $200\text{cN}\cdot\text{m}$  から  $1\text{cN}\cdot\text{m}$  の状態で抵抗負荷である電気ヒーターを接続して伝導性ノイズを測定すると、明確な違いは見られないことを明らかにした。一方、締め付けトルクが  $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満の状態で測定すると、接続部で放電現象が観察され、周波数スペクトルの雑音端子電圧レベル



が幅広い帯域で増加した。なお、 $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満でも周波数スペクトルの雑音端子電圧レベルの増加が観測されないことがあり、これは、端子のねじに緩みがある状態でも導体との接触状態によっては負荷に正常に通電し、放電が発生しない場合もあることを示唆する。

(2) 放電により、亜鉛の融点 ( $419.5^{\circ}\text{C}$ ) 以上の高温が発生するのは間違いがないが、発生箇所が局所的であることや放電が定常的には発生しないため、放電休止中の熱放散の効果も考えられることから、放電による温度上昇により火災に至る可能性は低いと考えられる。放電発生箇所から離れた場所にある電線の絶縁体の溶融は、接触抵抗増加に伴うジュール熱により生じていると推測される。以上のことから、導体接続部の緩みにより接触抵抗が増加して発熱により電線の絶縁体や端子台が溶融し、最終的に発火に至るメカニズムと考えられる。

(3) 5種類の電気製品を負荷とし、ねじ端子の締め付けトルクが  $200\text{cN}\cdot\text{m}$  および  $1\text{cN}\cdot\text{m}$  未満における伝導性ノイズ測定で得られた周波数スペクトルを用いて CNN の学習を行い、緩みの検出精度を検証したところ、適切な CNN の構成をすれば極めて良好な結果が得られることがわかった。

本手法によれば導体接続部の緩みを遠隔で高精度に検出できる可能性があり、従来手法の課題である点検コストや手間の削減が期待でき、接触部加熱による火災の未然防止に貢献できる。

以上の成果により、半断線電源コードの断線、短絡およびブレーカの導体接続部の緩みに起因する火災発生現象をほぼ解明あるいは推測できた。また、これらの現象を検出する手法を提案し、検出精度について基礎検討を行った。第2章と第3章の検出手法については、コンセントや分電盤に組み込むことにより主に家庭での半断線電源コードからの火災未然防止や早期発見に貢献できる。第4章の

検出手法については、高圧配電盤や分電盤に組み込むことにより主に工場や商業施設での金属接触部緩みからの火災未然防止や早期発見に加え、従来の赤外線放射温度計を用いた点検の手間やコスト削減に貢献できる。よって、火災の未然防止技術および早期発見技術確立に向け大きな前進が期待でき、電気設備機器火災低減に対する社会的要望に応えることができる。

### 5.2 今後の課題および展望

本論文で提案する素線断線検出法および緩み検出法は、いずれも実験室において有用性が確認されたが、実用化にあたっての課題を以下に整理する。

第2章および第3章で提案した素線断線検出法の検出条件である逸脱時間の±6Vの幅や70 $\mu$ sは、負荷や半断線状態に依存すると考えられる。インバータ搭載機器の負荷遮断時の波形歪みや、半波長以上続く波形歪みに対する検出精度が低下する可能性がある。そのため、種々の家庭用電気製品や半断線状態での実験を行い、最適な閾値を検討する必要がある。また、提案手法は連続的な波形歪みの検出であるため、アーク発弧・消弧時に発生する短時間の波形歪みも検出条件に組み込むことにより、火災兆候検出により有効な検出手法を検討する必要がある。

第4章で、導体接続部の緩みから発火に至るメカニズムは放電よりも接触抵抗増加の影響が大きいと推測したが、実証が課題である。また、提案した導体接続部の緩み検出法は、電源の電圧および周波数に変動がほとんどない状態で実施したが、実際の現場では電源系統に様々な負荷が接続されており、多様な周波数スペクトルが観察されることが考えられる。さらに、CNNの構成によって、検出

精度に差が出る。このため、種々の条件で実験を行い、実験データに応じた最適な CNN の構成を検討する必要がある。

第 2 章から第 4 章の現象に加え、トラッキング現象や絶縁低下による放電現象など、電気設備機器火災の原因となる多様な現象を一括で検出できるような手法を検討し、より広い範囲で火災未然防止や早期発見に貢献する必要がある。

# 参考文献

- [1] 東京消防庁, “火災の実態,”  
<https://www.tfd.metro.tokyo.lg.jp/hp-cyousaka/kasaijittai/index.html> (参照 2020.9.29)
- [2] 内閣府, “大規模地震時の電気火災の発生抑制対策の検討と推進について (報告),”  
[http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/denkikasaitaisaku/pdf/guideline\\_houkouku.pdf](http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/denkikasaitaisaku/pdf/guideline_houkouku.pdf) (参照 2020.9.29)
- [3] 消防防災センター, “地震時における出火防止対策のあり方に関する調査検討報告書,” 消防防災博物館, pp.65-66, 1998.
- [4] 伊予消防等事務組合消防本部, “電気あんかの取り扱いに注意!,”  
<http://119iyo.jp/news/8283/> (参照 2020.9.29)
- [5] 独立行政法人製品評価技術基盤機構, “電源コード「3.断線したコードの発火」,”  
<https://www.nite.go.jp/jiko/chuikanki/poster/kaden/01120204.html> (参照 2020.9.29)
- [6] 田村 裕之, “電気火災の動向と火災事例,” 安全工学, 48 巻, 6 号, pp.413-418, 2009.
- [7] 大阪市, “火災調査担当の現場レポート「火事を知り!身を守る!」,”  
<https://www.city.osaka.lg.jp/shobo/page/0000149237.html> (参照 2020.9.29)
- [8] 岐阜市消防本部, “電気を正しく安全に使って火災を防ぎましょう!,”  
<https://www.city.gifu.lg.jp/20789.htm> (参照 2020.9.29)
- [9] 独立行政法人製品評価技術基盤機構, “電源コード断線による事故,”  
<https://www.nite.go.jp/data/000004256.pdf> (参照 2020.9.29)

- [10] 横須賀市消防局, “電気関係の火災編,”  
<https://www.city.yokosuka.kanagawa.jp/7425/syoubou/adbice/documents/04dennki.pdf> (参照 2020.9.29)
- [11] 横須賀市消防局, “電気プラグからの出火,”  
[https://www.city.yokosuka.kanagawa.jp/7425/syoubou/kasai/documents/4jirei\\_denki.pdf](https://www.city.yokosuka.kanagawa.jp/7425/syoubou/kasai/documents/4jirei_denki.pdf) (参照 2020.9.29)
- [12] 川崎市消防局, “オール電化工事に伴う火災事例,”  
[https://www.isad.or.jp/pdf/information\\_provision/information\\_provision/no115/64p.pdf](https://www.isad.or.jp/pdf/information_provision/information_provision/no115/64p.pdf) (参照 2020.9.29)
- [13] 逗子市, “電気火災を防ぐ,”  
<https://www.city.zushi.kanagawa.jp/syokan/syoubou/Seikatu21.html> (参照 2020.9.29)
- [14] 独立行政法人製品評価技術基盤機構, “配線器具による事故,”  
<https://www.nite.go.jp/data/000077654.pdf> (参照 2020.9.29)
- [15] 長田正義, “素線切れビニルコードの着火電流と流入エネルギー,” 日本火災学会論文集, 33 巻, 1 号, pp.1-7, 1983.
- [16] 三橋信雄, 横井良秀, 長田正義, 伊坂勝生, “絶縁被覆電線の劣化履歴と火災危険について,” 火災, 31 巻, 1 号, pp.11-19, 1981.
- [17] 東京都消費生活総合センター, “電源コード・テーブルタップの正しい使い方,” 事故防止テスト・シリーズ 14-1, 2003.
- [18] 高橋星也, 中村悠太, 田邊匡生, 前田健作, 中嶋かおり, 浜野知行, “テラヘルツ波方式による絶縁被覆電線の素線断線可視化技術,” 電子情報通信学会技術研究報告, ED2013-104, 2013.
- [19] 小野安季良, 四柳浩之, 高木正夫, 橋爪正樹, “QFP IC の半断線故障に対する電流テスト検査法,” 第 26 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 8C-06, 2012.

- [20] J. Swart, J. Loud and D. Slee, “Arcing and Fires – Case Studies,” In Proceedings of the IEEE Symposium on Product Compliance Engineering, Toronto, ON, Canada, 26-28 October, 2009.
- [21] J. J. Shea, “Conditions for Series Arcing Phenomena in PVC Wiring,” IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol.30, Issue3, pp.532-539, 2007.
- [22] J. J. Shea, “Identifying Causes for Certain Types of Electrically Initiated Fires in Residential Circuits,” Fire and Materials, 35, pp.19-42, 2011.
- [23] 野口祐智, “静電容量型プローブによる欠陥配線のイメージング,” 第 27 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 13B-10, 2013.
- [24] 口井敏匡, 橋爪正樹, 為貞建臣, “プリント回路板上の TTL 組み合わせ回路の電源電流による断線故障検出法,” エレクトロニクス実装学会誌, 1 巻, 4 号, pp.284-293, 1998.
- [25] 株式会社三工社, “11.1 断線検出器,”  
<https://www.sankosha-s.co.jp/product/detail/105/> (参照 2020.9.29)
- [26] オムロン株式会社, “デジタルヒータ断線警報器,”  
<https://www.fa.omron.co.jp/products/family/1508/> (参照 2020.9.29)
- [27] G. Parise and L. Parise, “Unprotected Faults of Electrical and Extension Cords in AC and DC Systems,” IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.50, No.1, pp.4-9, 2014.
- [28] W. -S. Moon, J. -C. Kim, A. Jo, S. -B. Bang and W. -S. Koh, “Ignition Characteristics of Residential Series Arc Fault in 220V HIV Wire,” IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.51, No.3, pp.2054-2059, 2015.
- [29] 小出裕貴, 水野幸男, 吉田敦至, “電源コードの素線短絡検出に関する基礎検討,” 電気学会論文誌 D, 134 巻, 10 号, pp.884-889, 2014.
- [30] 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,” 電気学会論文誌 D, 137 巻, 1 号, pp.24-29, 2017.

- [31] 加藤利次, 井上馨, 吉田圭亮, “逆相電流の直接検出による誘導機の固定子巻線の短絡故障診断法,” 電気学会論文誌 D, 131 巻, 11 号, pp.1346-1353, 2011.
- [32] 金丸誠, 森貢, 月間満, 宮内俊彦, 大西健司, 林和史, “逆相電流電圧解析による電動機固定子巻線短絡検出の高精度化,” 電気学会論文誌 D, 137 巻, 1 号, pp.17-23, 2017.
- [33] 日本工業規格, “高圧受電用過電流継電器,” JIS C 4602, 1986.
- [34] 三菱電機株式会社, “保護継電器 (MELPRO-A シリーズ) ,”  
[https://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/products/mvd/pror/pmerit/a\\_series/index.html](https://www.mitsubishielectric.co.jp/fa/products/mvd/pror/pmerit/a_series/index.html) (参照 2020.9.29)
- [35] 東芝産業機器システム株式会社, “保護継電器 N シリーズ) ,”  
[https://www.toshiba-tips.co.jp/products/powersupply/highvoltage\\_8.html](https://www.toshiba-tips.co.jp/products/powersupply/highvoltage_8.html)  
(参照 2020.9.29)
- [36] 日本工業規格, “住宅及び類似設備用配線用遮断器,” JIS C 8211, 2004.
- [37] 河村電器産業株式会社, “ブレーカ・開閉器,”  
[https://www.kawamura.co.jp/catalog/ebook/l\\_pdf/SK41-breaker\\_h.pdf](https://www.kawamura.co.jp/catalog/ebook/l_pdf/SK41-breaker_h.pdf) (参照 2020.9.29)
- [38] テンパール工業株式会社, “配線用遮断器,”  
<http://www.tempearl.co.jp/products/mccb/> (参照 2020.9.29)
- [39] 芦澤清美, 和田正人, 土方忠道, “差込プラグとプラグ受における接触不良に関する研究－PVC から発生する熱分解ガスの影響－,” 日本火災学会研究発表会概要集, pp.344-347, 2002.
- [40] 三木伸介, 梅村園子, 伏見征浩, 山崎悟, “配線用遮断器接点の接触抵抗増加メカニズム,” 電子情報通信学会論文誌 C, J92-C 巻, 2 号, pp.47-54, 2009.
- [41] 中村国臣, “コネクタの微小摺動と温度の複合環境試験とその劣化メカニズム,” 電子情報通信学会論文誌 C, J65-C 巻, 7 号, pp.561-568, 1982.
- [42] 松崎崇史, 田村裕之, “ねじの緩みと接触部過熱に関する基礎的研究,” 日本火災学会研究発表会概要集, pp.248-249, 2018.

- [43] 松崎崇史, 田村裕之, “ねじの緩みと接触部過熱に関する基礎的研究(その 2),” 日本火災学会研究発表会概要集, pp.240-241, 2019.
- [44] 原英喜, 中村光一, “超音波法による低圧開閉器接触不良検出時の接点間電圧の検討,” 電気学会論文誌 B, 122 巻, 9 号, pp.1010-1015, 2002.
- [45] H. K. Ji, G. Wang, W. H. Kim and G. S. Kill, “Optimal Design of a Band Pass Filter and an Algorithm for Series Arc Detection,” *Energies*, Vol.11, Issue4, pp.992-1004, 2018.
- [46] 中野弘伸, 木島均, 高橋久, 伊藤公一, “銅導体接続部の赤熱現象と接続不良部の検出法,” 電気設備学会論誌, 22 巻, 2 号, pp.144-150, 2002.
- [47] 日本工業規格, “ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法,” JIS C 3005, 2014.
- [48] Polymer Properties Database, “Poly (vinyl chloride) ,” Available: <http://polymerdatabase.com/polymers/polyvinylchloride.html>
- [49] 経済産業省, “電気設備の申請・届出等の手引き ,” [https://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/sangyo/electric/detail/tebiki\\_index2.html](https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/sangyo/electric/detail/tebiki_index2.html) (参照 2020.9.29)
- [50] CISPR11 Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement, 2015.
- [51] FCC Code of Federal Regulations Title 47 Part15, 2017.
- [52] CISPR16-1-2 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part1-2 : Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Coupling devices for conducted disturbance measurements, 2014.
- [53] Y. LeCun, Y. Bengio and G. Hinton, “Deep learning,” *Nature*, Vol.521, No.7553, pp.436-444, 2015.
- [54] A. Krizhevsky, I. Sutskever and G. Hinton, “ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks,” *International Conference on Neural Information Processing Systems*, Vol.1, pp.1097-1105, Nevada, USA, 2012.



- [55] V. Nair and G. E. Hinton, “Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines,” International Conference on Machine Learning, pp.807-814, Omnipress, USA, 2010.
- [56] S. Ioffe and C. Szegedy, “Batch normalization : Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift,” International Conference on Machine Learning, pp.448-456, Lille, France, 2015.
- [57] D. P. Kingma and J. Ba, “Adam : A method for stochastic optimization,” International Conference on Learning Representations, San Diego, USA, 2015.

# 謝辞

本研究の遂行ならびに論文作成に関し、終始熱心にご指導、ご教授を賜りました名古屋工業大学大学院ながれ領域電気・機械工学専攻教授 水野幸男先生に心より謝意を表し、厚く御礼申し上げます。

本論文作成に当たり貴重なご意見、ご助言を賜りました名古屋工業大学大学院つくり領域電気・機械工学専攻教授 竹下隆晴先生、同教授 安井晋示先生、名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻教授 早川直樹先生に深く感謝いたします。

また、本研究に際し、実験材料・試料の提供と実験結果のご検討並びにご助言をいただいた河村電器産業株式会社研究開発部の小西功次氏、林文移氏に深く感謝いたします。曲げ試験による半断線試料を作製していただきました一般社団法人電線総合技術センターの斎藤秀路様に深く感謝いたします。

更に、実験を進めるにあたり、ご協力いただいた石川由祐氏（現：本田技研工業株式会社）、Shrinathan Esakimuthu Pandarakone 氏（現：株式会社豊田中央研究所）をはじめ、水野研究室の皆様に深く感謝いたします。

最後に、大学生活および研究活動に専念することに際し、あらゆる面で協力をしてくれた妻 優希と子供たちに感謝します。

2021 年

名古屋工業大学大学院 電気・機械工学専攻

竹中 清人

# 研究業績

## 【学術論文】

1. 竹中清人, 水野幸男, 吉田敦至, “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”, 電気学会論文誌 D, 139 巻, 1 号, pp.76-82, 2019.
2. Kiyoto Takenaka, Yusuke Ishikawa, Yukio Mizuno and Wenyi Lin, “Arc Discharge-Induced Ignition of Combustibles Placed on a Damaged AC Power Supply Cord”, *Energies*, Vol.13, Issue 3, pp.681-695, 2020.
3. 竹中清人, 水野幸男, 林文移, “伝導性ノイズによるブレーカの導体接続部緩み検出に関する基礎検討”, 電気学会論文誌 D, 141 巻, 1 号 (掲載予定)

## 【国際会議論文】

1. Kiyoto Takenaka, Yukio Mizuno and Atsushi Yoshida, “Condition Monitoring of Damaged AC Power Supply Cord Using Voltage Waveform”, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis(CMD), paper no.P47, Perth, Australia, September 23-26, 2018.
2. Yusuke Ishikawa, Kiyoto Takenaka, Yukio Mizuno and Atsushi Yoshida, “Discharge-Induced Ignition of Combustibles on Ac Power-Supply Cords”, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric

Phenomena(CEIDP), paper no.6A-13, Cancun, Mexico, October 21-24, 2018.

3. **Kiyoto Takenaka**, Yusuke Ishikawa, Yukio Mizuno, Tomonari Kawai and Atsushi Yoshida, “Fundamental Investigation of Discharge-Induced Fire from Damaged Ac Power Supply Cord”, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP), paper no.2B-14, Washington, USA, October 20-23, 2019.

### 【国内学会口頭発表】

1. **竹中清人**, 水野幸男, 吉田敦至, “電源コードの素線断線判定法の検討”, 平成30年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, 論文番号 F3-1, 名城大学, 2018年9月3-4日.
2. **竹中清人**, 水野幸男, 吉田敦至, “電源コードの導体素線断線判定法の基礎検討”, 平成31年 電気学会 全国大会, 論文番号 4-302, 北海道科学大学, 2019年3月12-14日.
3. 石川由祐, **竹中清人**, 水野幸男, 河合智成, 吉田敦至, “半断線電源コードの短絡発生現象の基礎検討”, 平成31年 電気学会 全国大会, 論文番号 4-301, 北海道科学大学, 2019年3月12-14日.
4. 石川由祐, **竹中清人**, 水野幸男, 河合智成, 吉田敦至, “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)”, 2019年度日本火災学会, 論文番号 B-18, 早稲田大学, 2019年5月25-26日.

5. 竹中清人, 水野幸男, 林文移, “電源コードの導体素線断線判定法の基礎検討 (第2報)”, 令和元年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, 論文番号 B3-2, 大同大学, 2019年9月9-10日.
6. 竹中清人, 水野幸男, 林文移, “半断線電源コードの着火現象と検出手法の検討”, 令和2年 電気学会 全国大会, 論文番号 4-207, 東京電機大学, 2020年3月11-13日.
7. 竹中清人, 石川由祐, 水野幸男, 林文移, “アーク放電による半断線電源コード上の可燃物着火現象”, 令和2年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会, 論文番号 K4-1, 愛知県立大学, 2020年9月3-4日.

### 【特許】

竹中清人, 水野幸男, 林文移, “接続異常検出装置および分電盤接続異常検出システム”, P2020-189, 2020年10月6日出願.

### 【受賞】

竹中清人, 水野幸男, 吉田敦至, “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”, 総務省消防庁 2019年度消防防災科学技術賞 奨励賞, 2019年11月21日.