

タケナカ キョト

氏 名 竹中 清人

学位の種類 博士（工学）

学位記番号 博第1198号

学位授与の日付 2021年3月31日

学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士

学位論文題目 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)

論文審査委員 主査 教授 水野 幸男
教授 竹下 隆晴
教授 安井 晋示
教授 早川 直樹
(名古屋大学)

論文内容の要旨

工場等の生産現場や商業施設、一般家庭などの様々な環境において、電気設備機器に衝撃・振動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。東京消防庁管内における総火災件数は減少傾向にある一方、電気設備機器を発生源とする火災の総火災件数に占める割合は増加傾向にあり、2015年以降は最も多い出火原因となっている。一方、地震に伴う火災においても、電気設備機器を起因とする割合が最も高く、東日本大震災においては60%を超えている。このように災害時における防災の面からも、電気設備機器の火災兆候検出技術の確立が喫緊の課題となっている。

このような状況に鑑み、本論文では電気機器火災の主原因となる電源コードの半断線状態、分岐回路用ブレーカの導体接続部の緩み状態を対象とし、電圧波形解析やAIによる検出手法を提案している。

本論文はこれらの成果を取りまとめたものであり、5章で構成される。各章の概要は以下の通りである。

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た。この試料に負荷を接続して通電したところ、強い発光を伴うアーク放電が起き、断線に至った。この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確にした。また、半断線箇所に可燃物を置いた場合に、素線断線時の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た。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が明らかになったため、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。電圧波形の歪みは、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生じる可能性がある。提案手法では、このような過渡現象と素線断線と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。電源コードの 2 箇所 JIS に基づく曲げ試験を加え、絶縁被覆の外見上は損傷が見られないが、内部の素線が半断線している試料を用いた。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たところ、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り、短絡に移行する現象を明らかにした。この時、激しいアーク放電が発生して可燃物に着火し、断線する現象を確認した。また、電圧波形に歪みが生じるため、第 2 章の検出条件により断線を有効に検出できることを示した。

第 4 章では、分岐回路用ブレーカの導体接続部の緩み検出法を提案している。ねじを緩めることで導体接続部に生じる間隙で発生する放電により、電源ケーブルを伝わる伝導性ノイズが生じることを明らかにした。この伝導性ノイズの周波数スペクトルの利得は幅広い帯域で増加するが、周波数に規則性を見出すことは困難であることが判明した。また、負荷である電気機器からも伝導性ノイズが発生するため、有効に識別する必要がある。そこで、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た。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、本研究で得られた知見と今後の課題をまとめている。本研究で提案する半断線電源コードの断線検出手法と分岐回路用ブレーカの導体接続部の緩み検出手法により、火災の早期検出や未然防止が可能となり、社会的問題解決に多大な貢献ができることを示している。今後は、製品化へ向けた現場適用性の検討が必要であると指摘している。

以上

論文審査結果の要旨

工場等の生産現場や商業施設、一般家庭などの様々な環境において、電気設備機器に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。東京消防庁管内における総火災件数は年々減少傾向にある一方、電気設備機器を発生源とする火災の総火災件数に占める割合は逆に増加傾向にあり、2015年以降は最も多い出火原因となっている。また、大地震発生時にも電気設備機器を発生源とする火災の割合が最も高くなっており、災害時における防災の面からも、電気設備機器の火災兆候検出技術の確立が喫緊の課題となっている。

このような状況に鑑み、本論文では電気機器火災の主原因となる電源コードの半断線状態および導体接続部の緩み状態を対象とし、着火・過熱に至るメカニズムを解明するとともに電圧波形やAIによる火災兆候検出手法を検討した結果を取り纏めている。

本論文はこれらの成果を取りまとめたものであり、5章で構成されている。

第1章では、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・短絡や緩み検出法の概要や課題を整理し、本研究の背景および目的を明確にしている。

第2章では、電源コードの過酷な半断線状態を模擬した試料に負荷を接続して通電した際に、強い発光を伴うアーク放電が起き、導体素線が断線に至る現象を解明している。半断線箇所には可燃物を置いた場合には、導体素線断線時のアーク放電により溶融した高温の素線が周囲に飛散し、着火することを確認している。アーク発弧および消弧時に生じる電圧波形の歪みに着目し、半波長毎の電圧波形の比較による導体素線断線検出法を提案し、過渡現象により生じる電圧波形の歪みとの識別ができる有効な検出法であることを示している。

第3章では、絶縁被覆の外見上は損傷が見られないものの内部の導体素線が半断線している状態を、曲げ試験により電源コードの2箇所を導入した試料を作製し、より現場に近い状態で検討を行っている。試料に負荷を接続して通電と無通電を断続的に繰り返すと、半断線箇所の絶縁被覆が熱膨張と熱収縮する際に発生する応力により断線した導体素線が絶縁被覆を突き破り、短絡ひいては全導体素線の断線に移行する過程を明らかにしている。この時、激しいアーク放電が発生して可燃物に着火する現象が生じるが、電圧波形に歪みが生じるため、第2章で提案した手法により導体素線の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の緩みによる接触抵抗の増加と放電により、亜鉛の融点以上の高温が発生して接続部が過熱することを確認するとともに、電源ケーブルを伝わる伝導性ノイズが生じることを明らかにしている。伝導性ノイズの周波数スペクトルに着目して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提案している。この手法では、緩みによる伝導性ノイズと負荷である電気機器から発生する伝導性ノイズとの識別が可能であり、高精度の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、得られた知見と今後の課題・展望を述べている。

以上、本論文では、電気機器火災の主原因となる電源コードの半断線状態および導体接続部の緩み状態における可燃物着火あるいは過熱を再現してそのメカニズムを解明するとともに、これらの現象の検出手法を提案して有効性を明らかにしており、学術的・工学的価値は高い。本研究の成果により、火災の早期検出や未然防止が可能となり、社会的問題解決に多大な貢献ができると考えられる。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分に価値を有するものと認める。