

火災調査のための電氣的溶融痕形成機序に関する研究

工学・マネジメント専攻 岩下 友安
指導教員 須川 修身

論文著者：工学・マネジメント研究科
工学・マネジメント専攻
学籍番号：GH13701
氏名： 岩下 友安

目次

1 緒論	5
1.1 序論	5
1.2 研究の必要性	5
1.3 研究の背景	6
1.3.1 火災原因調査の必要性	6
1.3.2 電気火災の現状と火災原因調査への活用	8
1.3.3 火災原因調査への電氣的熔融痕の活用	10
1.3.4 出火場所推定のアークマッピング法の活用と問題点	13
1.3.5 アメリカにおける火災調査	16
1.3.6 これまでの研究	17
1.4 研究の目的	19
1.5 第一章の参考文献	21
2 電気ケーブルの短絡性状	24
2.1 序論	24
2.2 実験方法	25
2.2.1 実験資材	25
2.2.2 実験方法	26
2.3 実験結果	32
2.3.1 各熱流束と短絡性状	39
2.3.2 各熱流束と短絡までの時間	39
2.4 接触短絡について	40
2.5 アーク短絡について	41
2.6 芯線間隔を固定した時の短絡性状	41
2.6.1 セラミックピンを使用した実験	41
2.6.2 芯線の間耐火パテを入れた実験	45
2.7 芯線間の温度測定	48
2.8 考察	49

2.8.1 短絡前の前駆現象	49
2.8.2 接触短絡とアーク短絡	52
2.8.3 芯線間隔変動の影響	52
2.8.4 熱流束と試料ケーブル芯線間の温度の関係	53
2.8.5 熱流束と漏洩電流及び短絡までの時間の関係	55
2.8.6 100W 電球が実験結果に与える影響	56
2.8.7 加熱時における試料ケーブルの挙動について	58
2.9 結果	62
2.10 第二章の参考文献	64
3 電氣的溶融痕の形成機序の解明	67
3.1 序論	67
3.1.1 電氣的短絡痕の火災鑑識における現状と問題点	67
3.1.2 研究の現状と今回の報告	67
3.2 絶縁材料の異なる電気ケーブル（日米）の短絡実験	68
3.2.1 実験方法	70
3.2.2 実験結果	75
3.2.3 短絡前の前駆現象の漏洩電流	88
3.2.4 漏洩電流と電氣的溶融痕の関係	89
3.2.5 漏洩電流と短絡形態象の関係	94
3.3 考察	98
3.3.1 短絡時におけるアーク短絡と接触短絡の違い	98
3.3.2 接触短絡とアーク短絡の時の発生機序	99
3.4 結果	101
3.5 第三章の参考文献	102
4 実規模実験による短絡性状	104
4.1 序論	104
4.2 実験方法	104
4.3 実験結果	109

4.4 考察	117
4.4.1 実規模実験での電氣的溶融痕の形状と発生位置	117
4.4.2 実規模実験の短絡性状の推察	118
4.5 結果	119
4.6 第四章の参考文献	120
5 総括	121
5.1 まとめ	121
5.2 今後の課題	123
5.3 投稿論文等と章立て	124
5.3.1 投稿論文	124
5.3.2 海外発表	124
5.3.3 国内発表	125
5.4 謝辞	126

1 緒論

1.1 序論

出火場所を推定することは、火災原因を調べる上で最も重要なことである。しかしながら、火災現場では、多くの証拠物が焼失してしまうため、原因調査が困難なことが多い。そのような中、電気ケーブルの熔融痕は、ケーブル被覆が焼損しても銅線部分が残っていることが多いため、出火原因調査の重要な手掛かりや証拠物となる。

そのため、本論文では、火災原因調査に寄与することを目的として、電気ケーブルの熔融痕の形成機序に関する研究を行った。

第一章では本研究を行うにあたっての研究の背景を示した。

第二章では、火災にさらされた電気ケーブルがどのような経緯をたどり短絡するのか電気ケーブルの短絡機序を解明した。

第三章では、第二章の電気ケーブルの短絡の機序を解明したことによる短絡の形態と電氣的熔融痕形成を解明した。

第四章では、実規模実験による短絡性状として、第二章及び第三章において解明した電氣的熔融痕の形成機序に基づき、実物大の建物内で火災を発生させ、その時に室内にできる電氣的熔融痕の発生状態を観察した。

第五章では、これらの総括を行った。

1.2 研究の必要性

アメリカでは、火災原因調査の進め方と判断基準が国家基準(NFPA921)として定められている。その中には、同一配線上に生じた複数の電気痕から出火場所を推定する方法(アークマッピング)などが記載されている。しかしながら、電気による熔融痕(電気痕)と火災熱による熔融痕(熱痕)との識別方法については、一般的な外観特徴の違いが述べられているにとどまり、形成過程との関係については言及されていない。

従来からの研究においても，接続不良による発熱や絶縁材料の劣化などの異常現象に関する基礎分野と，溶融痕の識別方法やアークマッピングなどの実務応用分野という両極の研究ばかりが先行し，両者の橋渡しとなるべき電気溶融痕の形成過程に関する研究は非常に少ない。

そのため，電気的出火原因となった箇所に形成される溶融痕（一次痕）の識別はもとより，火災の進展に伴って形成される電気的溶融痕（二次痕）の識別すら，溶融痕形成環境の違いに基づいた明確な判断基準が確立されておらず，火災原因調査の証拠物として十分に活用されていないのが現状である。それゆえ，この研究を行うことに大きな意義がある。

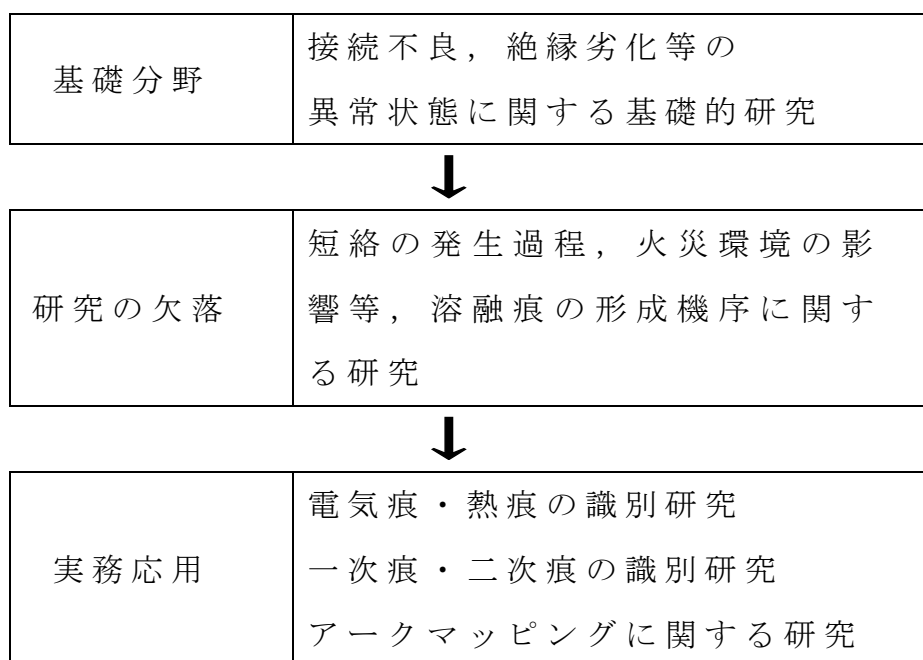


Figure 1.1. Necessary to my research.

1.3 研究の背景

1.3.1 火災原因調査の必要性

日本国民の生命，財産，安全を脅かす火災。消防白書平成 28 年版 [1.1] によると，平成 27 年中に日本全国で 39,111 件の火災が発生

している。この中で、建物火災は 22,197 件であり、その出火原因は、表 1.1 のとおりである。

Table 1.1. Reasons for fires in 2015

原因別	件数
こんろ	3,421
たばこ	2,200
放火	1,848
ストーブ	1,208
放火の疑い	1,003
配線器具	995
電灯電話等の配線	935
電気機器	810
灯火	449
たき火	420
電気装置	387
マッチ・ライター	333
火あそび	268
溶接機・切断機	221
風呂かまど	193
煙突・煙道	192
取灰	185
焼却炉	169
火入れ	156
炉	87
ボイラー	62
かまど	57
排気管	51
こたつ	48
交通機関内配線	38
内燃機関	9
衝突の火花	1
その他	3,485
不明・調査中	2,966
計	22,197

これらの火災原因を究明することは、安心、安全な社会を構築す

るために，重要なことである．

1.3.2 電気火災の現状と火災原因調査への活用

これらのうち，電気配線等の電気が起因する火災は 3,576 件である．

平成 27 年中の建物火災における電気火災の占める割合を Fig.1.2. に示す．電気火災は建物火災の約 16% を占める．

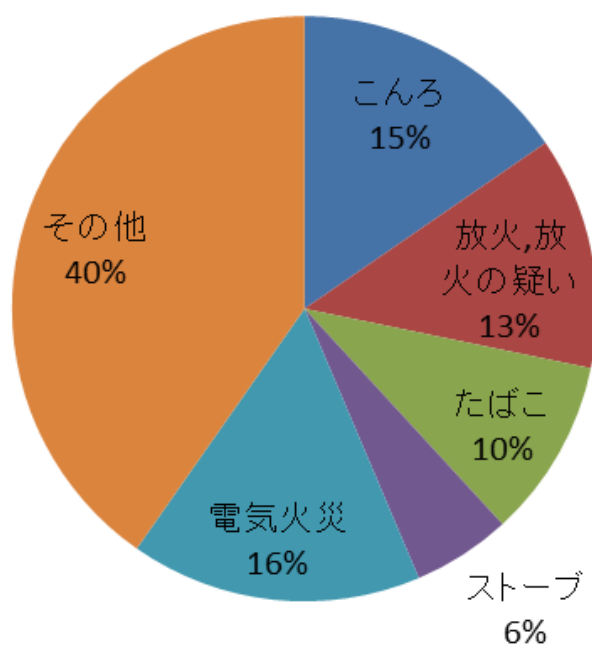


Figure 1.2. Breakdown of reasons for fires in buildings in 2015.

16% of fires in buildings attributed to electrical fires.

平成 20 年からの建物火災における電気火災の割合を Fig.1.3 に，電気火災の原因を Fig.1.4 に示す．

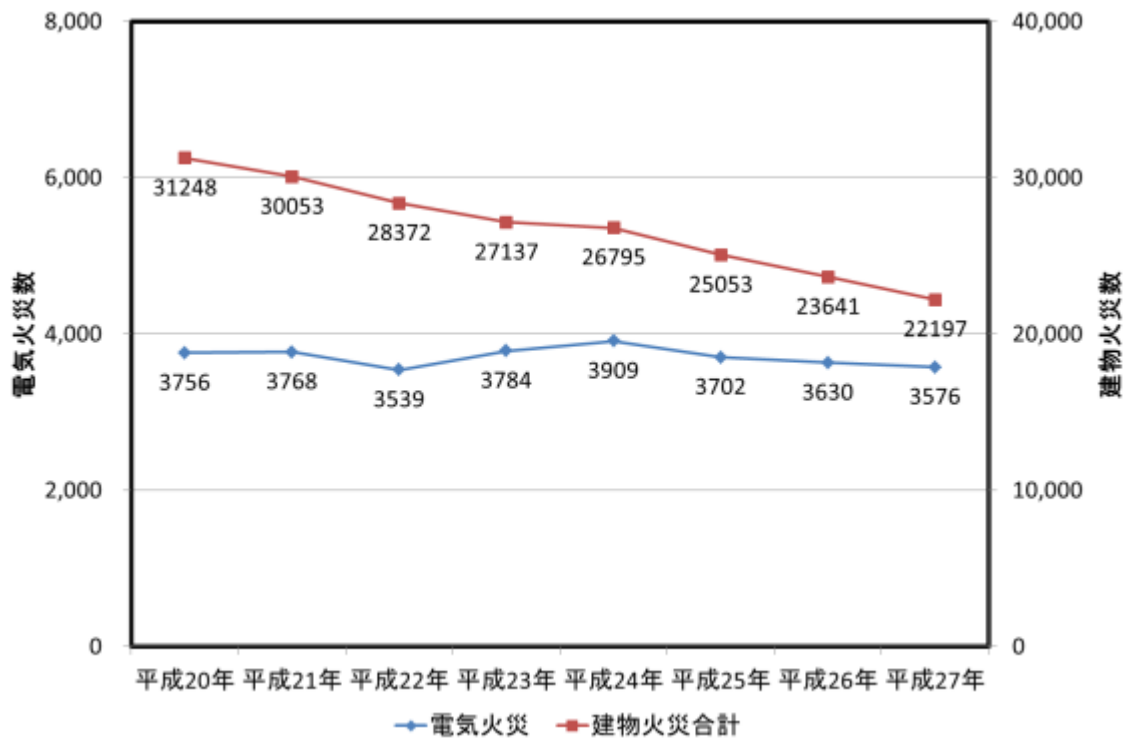


Figure 1.3. The relationship between building fires and electrical fires since 2008.

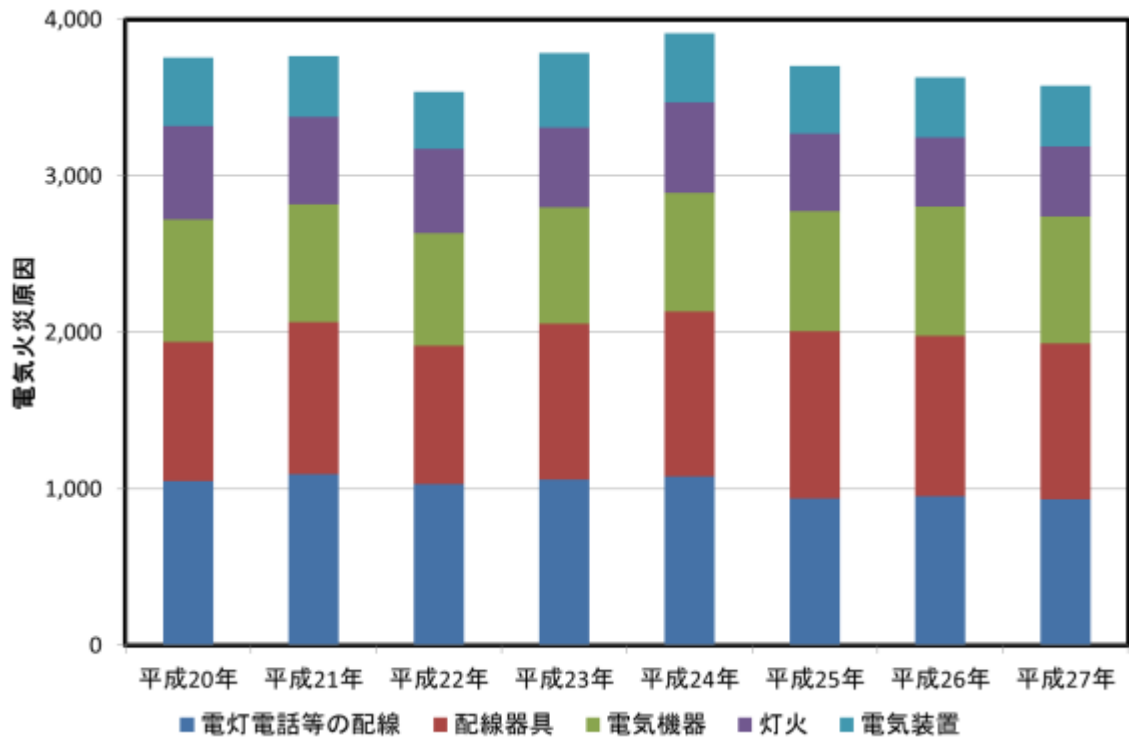


Figure 1.4. Attributed reasons for electrical fires since 2008.

電気配線や電気器具が起因する火災において、電気配線や電源コードに電氣的溶融痕ができる場合がある。

火災現場で発見する電氣的溶融痕は火災原因調査においても、出火場所を推定する方法について研究が行われている。

1.3.3 火災原因調査への電氣的溶融痕の活用

日本では、建物火災や林野火災の区別を問わず全ての火災において、その火災原因調査は、公の機関では警察および消防が行っている。火災発生直後から火災現場へ急行し、火災原因調査を行う。

警察は犯罪捜査のために、火災原因調査を行う。日本では、民家などに放火した場合は刑法第 108 条 [1.2] などの現住建造物放火罪などにより処罰される。また、天ぷら鍋から目を離した隙に火災が発生したなどの重大な過失によって火災を出した場合などの重失火の場合は、刑法第 116 条 [1.2] の失火罪などによって、処罰される。放火、失火いずれの場合も、刑事訴訟法第 189 条 [1.3]、第 218 条 [1.3] 及び犯罪捜査規範第 104 条 [1.4] などの法律に基づいて、警察は火災原因調査を行う。

一方、消防は失火、放火いずれの場合にあっても、その火災が次に起きないように対策を講じるために火災原因調査を行う。つまり、予防のための火災原因調査である。これも消防法第 7 章第 31 条など [1.5] により、法律に基づいて火災予防による火災原因調査を行う。

また、民間では保険会社が火災保険支払いの損害調査のために、火災原因調査を行っている。

火災原因調査において、出火場所の特定は一番重要である。しかし、火災現場の建物は、火災による焼損や消火作業により、出火前の原型をとどめていない場合がある。それゆえ、出火場所の推定は、困難なことが多い。火災原因調査を行う調査員は、豊富な知識と経験が必要とされている。

出火場所の特定手段として、いくつかの方法がある。

その中のひとつとして、火災の目撃者の情報がある。火災発生の初期の目撃者および火災の第一発見者の目撃情報は、出火場所推定に重要な要素となり、鎮火後に行われる火災現場での調査活動に有効である。しかし、火災発生直後の目撃ならば、おおむね出火場所を特定できるが、「発見した時は、すでに家全体が燃えていた」等の場合には、出火場所を特定できない。また、目撃者の見間違い等もあるため、火災の目撃者の証言は、客観性がなく、必ずしも出火場所特定には至らない場合がある。

119番通報や110番通報によって、火災発生から比較的早い時期に火災現場に到着する警察や初期消火活動に従事した消防職員の証言や目撃情報についても、出火場所推定の根拠となり得る。

一般木造家屋の場合は、出火から火盛りまで、4分から14分程度と言われている[1.6,1.7]。しかし、平成28年度版警察白書[1.8]によると、110通報からパトカーが火災現場へ到着するまでの時間、いわゆるレスポンスタイムは7分6秒とされている。

110番通報によって火災現場へ初期臨場した警察官も、建物は既に火盛りを過ぎている可能性もあり、火災初期の状況を見ているとも限らず、必ずしも出火場所特定には至らない場合がある。

上記のような目撃者の情報以外に出火場所を見出すのに役立つ根拠として、火災現場における柱や垂木などの建物の建築材や木製のタンスやテーブルなどの家具の焼けの方向性がある。

柱や板壁など建物の木製建築材及び家具は、一般に出火場所に近いほど、長時間火炎にさらされるため焼損が激しく、出火場所を推定する要素となる。また、柱、梁等の木製の建物構造材は、火炎に暴露されると、その表面に亀甲模様ができ、長時間火炎に晒される程、その亀甲模様は深くなるため、出火場所を推定する要素となる。

これは木材に限らず、鉄板などの金属製品や石こうボード、コン

クリートの壁などの変色も同様に、出火場所を推定する要素となる。

前述の第一発見者の証言に基づく出火場所の推定は、人間の感覚も入るため客観性に欠ける場合があるが、木材の焼損状況や鉄板などの変色状況から出火場所を推定する方法は、火災現場の残焼物からの推定であり、客観性がある。しかし、この方法は建物の窓などの開口部の影響（空気の流通が大きく焼損が進行する）や灯油などの助燃剤による強い高温流体に曝されるなどの影響を受けることがある。

また、フラッシュオーバーが発生すれば、室内の温度が一気に上がり、室内が一様に燃えるため、出火場所の推定が困難になり、また、焼損が激しい場所が必ずしも出火場所にならないことがある [1.9].

Steven W. Carman は、模擬家屋内で火災を発生させ、フラッシュオーバーが起きた後に消火し、アメリカの火災調査員に出火場所の推定を行わせたところ、正解率が 10% 以下だったことを述べている [1.10].

フラッシュオーバー等の二次的焼損の影響を受けにくく、焼けの方向性の判断に役立つ方法として、屋内配線や電気器具の電源コードに発生する電氣的溶融痕の位置から出火場所を推定するアークマッピング法がある。

電気ケーブルに発生する電氣的溶融痕は、それが直接火災原因になったものを一次痕と呼ぶ。また、火災発生後に火災の火熱によって電気ケーブルの絶縁被覆が焼損し、電氣的溶融痕が発生したものを二次痕と呼ぶ。これら一次痕と二次痕の識別に関する研究も、行われている [1.11].

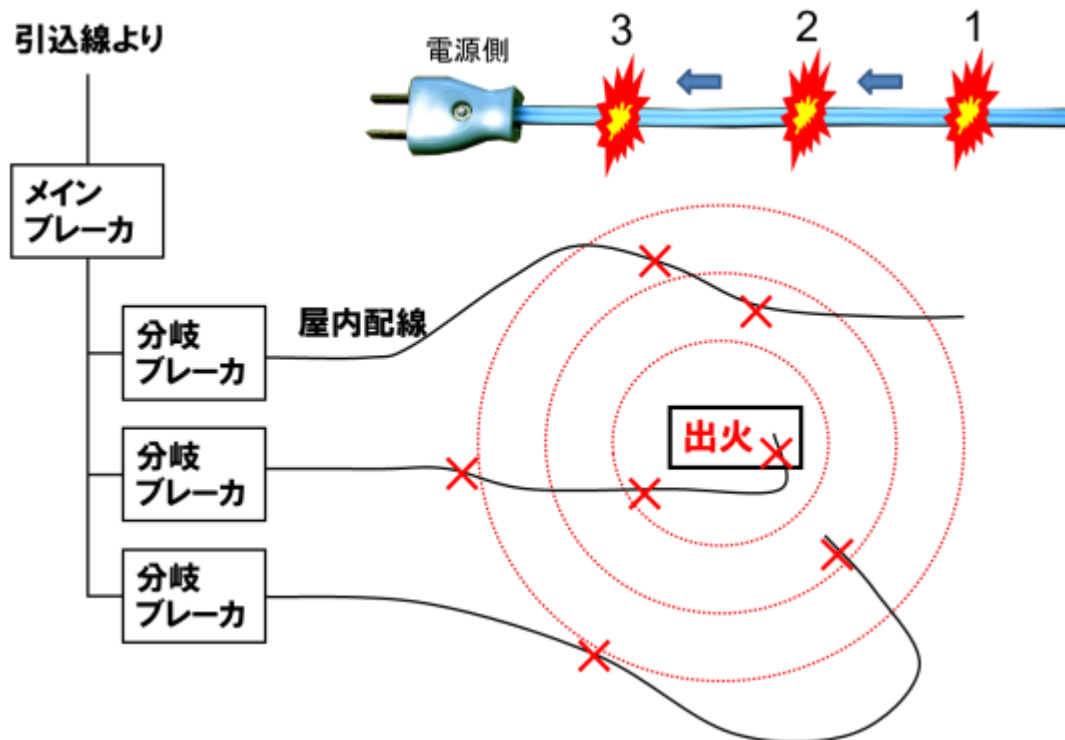


Figure 1.5. Arc mapping method

一次痕にせよ二次痕にせよ，いずれの場合も，電気ケーブルが通電状態であれば出火場所直近の電気ケーブルに，電気的溶融痕が発生するため，この電気的溶融痕の位置から出火場所を推定する方法をアークマッピング法と言う（Fig.1.5 参照）。

1.3.4 出火場所推定のアークマッピング法の活用と問題点

室内の照明器具やコンセントなどは，配電盤のブレーカから系統立って電気ケーブルを用いて配線されている．室内で火災が発生した場合，室内の配線も火災の火熱に暴露される．室内で発生した火炎は，壁などに立ち上がり，天井を這って火炎が拡大していく．火炎の拡大の時間経過によって，照明器具やコンセントへ結線されている電気ケーブルも時間の経過によって火災の火熱に暴露される箇所が変わる．

日本で一般的に使用されている室内の電気ケーブルの絶縁被覆の

材質は、ポリ塩化ビニル（polyvinyl chloride, 通称 PVC）などの合成樹脂である。また、電気ケーブルの芯線は銅である。これらの電気ケーブルが火災の火熱に暴露されると、絶縁被覆の燃焼に伴う絶縁破壊によって、芯線の銅が短絡を起こし、アーク放電の熱によってその箇所に電氣的溶融痕が出来る。このときのアーク放電は間欠的に発生するため、短絡が起きても必ずしもブレーカが作動するとは限らない。電気ケーブルの芯線が短絡箇所で断線すると、そこから先の負荷側の電気ケーブルには電気が流れなくなるが、ブレーカが作動していないうちは電源側の電気ケーブルに新たな電氣的溶融痕ができることがある。大きな短絡電流が流れると、その電気ケーブルが結線されているブレーカが作動する。ブレーカが作動した以降は、その系統の電気ケーブルに電流が流れないため、火災の火熱に暴露されても電氣的溶融痕が出来ることはない。これら室内全ての各電気ケーブルを系統だてて図面に記録し、その電気ケーブルに発生した電氣的溶融痕の位置を正確に記録する。この電氣的溶融痕の位置を調べることによって、出火場所を推定する方法が、アークマッピング法である。

アークマッピング法は、配電盤から遠い箇所に出来た電気ケーブルの電氣的溶融痕の位置が出火場所に近いとされている。その電氣的溶融痕は、火災の初期段階で発生する。建物内の木材の焼損が火災の時間経過に伴い、建物内の開口部や助燃剤の影響を受けて変遷するため、焼けの強い場所が必ずしも出火場所にならないことがあるのに対して、アークマッピング法による出火場所の推定は、火災の初期段階に発生する電気ケーブルの電氣的溶融痕から判断するため、これらの影響を受けにくいと考えられる。また、木材は火災の時間経過の焼損にともない、焼失するのに対し、電気ケーブルの芯線は金属（銅）であり、火災直前の状況を留めたまま、火災鎮火後もそのままの形状で残るので、発見しやすい。そして電氣的溶融痕

の位置を正確に記録に留めれば、客観性もある。

火災原因調査を行う調査員は、豊富な知識と長年の経験が必要とされているが、アークマッピング法は、火災現場において電気ケーブルの電氣的溶融痕の位置を探す方法なので、ベテランの火災調査員も初心者の火災調査員も、同じ基準で出火場所を推定することができる利点がある。

Larry West は、アークマッピング法の有効性を確認するため、実際の建物の室内において、天井に PVC ケーブルを配置し、室内で火災実験を行っている [1.12]。これによると、出火場所と PVC ケーブルに発生する電氣的溶融痕の位置関係について考察しており、出火場所の近くから延焼方向に従って電氣的溶融痕が順にできると述べられており、特にフラッシュオーバーが起きた場合の火災において、アークマッピング法が有効と述べている。

Nicholas Carey は、実際の建物内の天井に PVC ケーブルを配置して室内で火災を発生させ、PVC ケーブルにできる電氣的溶融痕の位置を統計的に検討して、アークマッピング法の妥当性と PVC ケーブルの電氣的溶融痕の形状について考察している [1.13,1.14]。

James M. Finneran [1.15] は、実際の火災現場において、アークマッピング法を実施し、アークマッピング法の手法およびその有効性を述べている。また、William B. Johnson [1.16] は、実際の火災現場で行ったアークマッピング法について、火災現場を再現した室内で火災を発生させ、比較検証した結果、アークマッピング法の有効性について述べている。

アークマッピング法の問題点として、火災の最高温度は 1200℃程度 [1.6] と言われており、電気ケーブルの芯線である銅の融点 (1083℃) [1.17] を超えるため、火災の火熱によっても溶融し電氣的に発生した溶融痕か、火災の火熱によって溶融したものか、判定が困難な場合がある。

この問題点について、James M. Finneran[1.15]も、同様に電氣的溶融痕と火災熱による痕跡の識別について、困難である場合があると述べている。

1.3.5 アメリカにおける火災調査

欧米ではアークマッピング法を、官民を問わず、多くの火災調査員が活用しており、米国防火協会（National Fire Protection Association, 略して NFPA と称す）から、アークマッピング法の手法や注意点などが記載されたガイドブック NFPA921（Guide for Fire and Explosion Investigations）[1.18]が発刊され、その活用方法の書かれたマニュアル[1-19]も発刊されている。

アークマッピング法の活用方法の書かれた文献も火災調査の主要なテキストとして参照されてきた[1.20]。

ガイドブック NFPA921 は多くの国の言葉に翻訳されている。中国や韓国でも、それぞれの母国語に翻訳されて使用されている。しかし、日本には NFPA921 を日本語に翻訳されたものはなく、また、火災原因調査に関する明確なガイドブックやマニュアルは存在しない。

欧米で火災原因調査及びアークマッピング法によるマニュアルが発刊されている背景には、科学的な根拠に基づく判断と調査人に依らず同じ判断が行えること（reliability）を目指した火災原因調査を行うという考えによるものである。ベテランの火災調査員が勘と経験で出火場所を推定するのではなく、科学的根拠に基づいて、火災現場を調査し、科学的根拠に基づいて火災原因調査を行う必要があるからである。日本とは保険制度が異なることに留意しなければならないが、アメリカ合衆国では、国際放火調査員協会(International Association of Arson Investigators, 通称 IAAI)や全米火災調査員協会(National Association of Fire Investigators, 通称 NAFI)が、火災調査に関する高度の学識経験を有するものに与える公認火災調査員

(Certified Fire Investigator , 通称 CFI) の資格がある. これらの資格も制度も日本にはない.

日本との法的な適合性の違いも, その背景にあると考えられる. 日本では, 前述のとおり, 火災は放火, 失火を問わず警察及び消防で原因調査を行い, 放火罪やその過失の度合いによって失火罪で処罰される場合がある. しかし, アメリカの場合は, 放火の場合は警察が捜査し処罰されるが, 失火の場合は処罰されない. したがって, 放火の場合は, 警察と消防が火災原因調査を行うが, 失火は警察も消防も火災原因調査を行わない. 失火の場合は, 民間の保険会社が保険金支払いのために火災原因調査を行うのである. 保険金支払いのための火災原因調査となると, 各保険会社間で利害関係が発生するため, それぞれの保険会社が自社に都合のいいように現場の焼損状況を判断する恐れがある.

このために, アメリカでは, 火災原因調査について, 警察も消防も保険会社も官民も, ベテランの火災調査員も, 初心者の火災調査員も全ての火災調査員が科学的な根拠に基づく同じ基準で火災現場を調査し, 同じ基準で出火場所を推定する必要があるのである.

1.3.6 これまでの研究

火災現場において, 室内配線の電気ケーブルや家電製品の電気コードに発生する電氣的溶融痕の位置から出火場所を推定する方法をアークマッピング法という. このアークマッピング法に関し, その活用法に関する研究やアークマッピング法に基づく電気ケーブルに発生する電氣的溶融痕に関する研究も多く行われている [1.21].

日本でも, 同様の研究が数多く行われている [1.22,1.23]. 岩下らの研究 [1.24,1.25]によると, 放射熱による絶縁材の材質の異なる電気ケーブルの短絡性状に関する研究では, 日米の屋内配線に使用されている芯線の太さが同じ (素線径 1.6mm) の一般的な電気ケーブル

ルをコーンヒータや ICAL (Intermediate Scale Calorimeter) を使用して加熱し，そのときに発生する電氣的溶融痕の形状や短絡時のエネルギーを測定し，これらの材質の異なる電気ケーブルの短絡性状の違いや日本の電気ケーブルが NFPA921 に基づくアメリカの電気ケーブルとの判断基準に適合しているか否かについて述べている．

これによると，日本の電気ケーブルとアメリカの電気ケーブルを比較すると，短絡時のエネルギーは，アメリカの電気ケーブルの方が小さいこと．日本の電気ケーブルの方が電氣的溶融痕が大きく，アークマッピング法には適していることなどが述べられている．

しかし，芯線の材質が同じで，同じ太さの電気ケーブルを実験で使用しているにもかかわらず，短絡時に発生する電氣的溶融痕の大きさが，なぜ違うのか，なぜエネルギーの大きさが違うのか，明確に示されていない．

Babrauskas によると，電気ケーブルの短絡現象として，接触短絡 (metal to metal contact) と，絶縁被覆の絶縁劣化によるアーク短絡 (arc through char) の二種類の現象が起きると述べているが，電氣的溶融痕が発生する直前の現象が，電気ケーブルの素線同士の接触による，接触短絡なのか，アーク短絡なのか示されていない[1.26]．

電気ケーブルに発生する電氣的溶融痕が出来る原因は芯線の「短絡現象」や「アーク」と呼ばれているが，実際にどのようにして，これらの現象が起きているのか，これまでのところ判然としていない．

電氣的溶融痕の形成機序を解明することは，出火原因を推定する一次痕，二次痕の研究，電氣的溶融痕を火災原因調査におけるアークマッピング法に活用して出火場所を推定するためにも，また，電気ケーブルからの電気火災を予防する観点からも，重要であり必要なことである．

1.4 研究の目的

火災現場において、出火場所を推定することは火災原因を調査する上で最も重要なことである。

一般に火災によって通電中の電気配線が焼損すると絶縁が破壊されて短絡が起こり、アーク放電を生じて銅芯線が溶融する。一方で、建物内には天井裏に照明回路やコンセント回路などの電気ケーブルが、また、室内には家電製品の電源コードが多数存在する。そのため、火災現場では電気配線の短絡による溶融痕が必ずといってよいほど発見される。証拠物の多くが焼失してしまう。火災現場において、この溶融痕は火災の拡大方向に関する重要な手がかりを与えてくれることから、火災現場調査に活用されており、アークマッピング法と呼ばれている。

アークマッピング法の活用に関係した研究の歴史は長い。これまでに、電氣的溶融痕の形状に関する研究、電氣的溶融痕の発生場所を統計的に考察して出火場所を推定する研究等が行われている。また、電気ケーブルの短絡に関する研究も多く行われており、電気ケーブルを短絡させ、その時の電圧を変動させて電流値をまとめた研究、短絡時に発生する電圧電流波形に関する研究等が行われている。

これまでの研究は、いずれも人工的に発生させた短絡現象の研究や、短絡の結果のみを捉えた研究ばかりであり、電気ケーブルが短絡に至る経過、すなわち受熱履歴の違いや絶縁被覆材の違いが溶融痕形成に及ぼす影響についての研究は行われてこなかった。そのため、実際の火災現場調査では、ケーブルの種類、敷設場所、火災環境などの影響や時間経過との関連にまで踏み込んで検討考察することが困難であった。

そこで、本研究では、一般的な電気ケーブルが火災現場において、どのようなメカニズムで短絡し、電氣的にどのような経過をたどり芯線に電氣的溶融痕が発生するか、短絡によって、どのようなメカ

ニズムで電氣的溶融痕が発生するのか，電氣的溶融痕の発生機序を解明し，科学的根拠に基づく火災原因調査に活用することを目的とし，研究を実施した．

1.5 第一章の参考文献

- 1.1 消防白書，平成 28 年度版，総務省消防庁，
- 1.2 刑法 第 2 編 第 9 章「放火及び失火の罪」第 108 条～第 118 条，
- 1.3 刑事訴訟法 第 2 編 第 1 審 第 1 章「捜査」（第 189 条～第 246 条），
- 1.4 犯罪捜査規範 第 4 章「任意捜査」 第 104 条（実況見分），
- 1.5 消防法 第 7 章 「火災の調査」，
- 1.6 日本火災学会編，火災便覧 新版，共立出版，pp.440-445，1984.
- 1.7 科学警察研究所所長高取健彦編，捜査のための法科学 第二部 法工学・法化学，令文社，2005
- 1.8 警察白書，平成 28 年度版，警察庁
- 1.9 塚本孝一著，火災原因調査ノート，東京法令出版，1986.
- 1.10 Steven W. Carman, IMPROVING THE UNDERSTANDING OF POST-FLASHOVER FIRE BEHAVIOR, 2008 International Symposium on Fire Investigation and Technology 2008 pp.221-232
- 1.11 三橋信雄，“電氣的熔融こんの気孔分布による 1 次こんと 2 次こんの識別” 科学警察研究所報告法科学編，Vol.48, No.1, pp.20-26, (1995).
- 1.12 West, L, Reiter, D.A., “Full-Scale Arc Mapping Tests,” Fire and Materials International Conference, pp. 325-339, (2005).
- 1.13 Nicholas Carey and Niamh Nic Daeid. Arc mapping. Fire and Arson Investigator 2010; 61 (2).
- 1.14 Nicholas Carey and Niamh Nic Daeid. The metallic damage to electrical conductors at fire scenes. Proceedings of the Interflam 2007 Conference, pp.1-12.
- 1.15 James M. Finneran. FIRE FINDINGS SPECIAL REPORT ARC MAPPING. Fire Findings, Vol. 13, No. 2, Spring 2005.

- 1.16 William B. Johnson, P. E., and Lester V. Rich. FIRE FINDINGS SPECIAL REPORT ARC MAPPING FOLLOW UP. Fire Findings, Vol. 15, No. 3, Spring 2007.
- 1.17 東京消防庁予防部調査課監修, 火災調査ポケットブック 必携現場で役立つ実務資料, 東京法令出版, pp. 457, pp. 518, .
- 1.18 NFPA921 Guide for Fire and Explosion Investigations. National Fire Protection Association. 2014.
- 1.19 User's Manual for NFPA 921. 2003. NFPA /IAAI, Quincy, Massachusetts.
- 1.20 John D. DeHaan. Kirk's Fire Investigation sixth edition. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey. pp.415-430. 2004
- 1.21 Cameron J.Novak, Stanislav I.Stoliarov, Michael R.Keller and James G.Quintiere: An analysis of heat flux induced arc formation in a residential electrical cable. Fire Safety Journal, Vol. 55, pp. 61-68, 2013.
- 1.22 萩本安昭, 渡邊憲道, 岡本勝弘, 放射熱による電気配線の短絡, 日本火災学会論文集, Vol. 54(2), pp. 25-31, 2004.
- 1.23 Hagimoto, Y., Watanabe, N., and Okamoto, Arcing Faults on PVC-covered Electrical Cords, pp. 221-224 in Proceedings of 1st Conference of the Assn. of Korean-Japanese Safety Engineering Society, Kyongju, Korea (1999).
- 1.24 岩下友安, Michael R. Keller, 放射熱による日米ケーブルの短絡性状, 平成 24 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 208-209, 2012.
- 1.25 岩下友安, Michael R. Keller, 萩本安昭, 須川修身, 放射熱による日米ケーブルの短絡性状 (第 2 報), 平成 25 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 314-315, 2013.
- 1.26 Babrauskas, V., How Do Electrical Wiring Faults Lead to Structure

Ignitions? pp. 39-51 in Proceedings of Fire and Materials 2001 International Conference, Interscience Communications Ltd., London (2001).

2 電気ケーブルの短絡性状

2.1 序論

火災原因を調査する上で出火場所の推定は重要なことである。しかし、焼損状況は建物の開口部や可燃物などの影響を受けるため、焼損の強い場所が必ずしも出火場所であるとは限らない[2.1]。さらにフラッシュオーバーが起きると、出火場所の推定は一層困難なものとなる[2.2]。

出火場所推定のための手がかりの一つとして、電氣的溶融痕の位置を調べる方法があり、米国ではアークマッピング法と呼ばれ、焼損状況の変化や調査員の経験などに左右されにくい客観的判断基準として注目されている[2.3-2.5]。

アークマッピング法に関する研究も多く、Cameron J. Novak[2.6]は、PVCケーブルでの熱流束によるアーク形成の解析を行っており、Nicholas Carey[2.7,2.8]は、実際の家屋を再現し、実大火災実験によるアークマッピング法の信頼性の検証を行っている。

しかし、電線種別や周囲環境条件などによる溶融痕の形成過程への影響が予想されるにもかかわらず、そのための研究はほとんど行われていない。アーク短絡(Arcing short)や接触短絡(Physical short)が起きた後の電圧、電流特性に関する研究にとどまっているのが現状である[2.9-2.12]。

また、米国には火災調査手法の国家的規格 NFPA 921 (2014 Ed.)[2.3]があり、科学的指針として実務に活用されている。同書は、電気ケーブルに発生する溶融痕の調査に関して、外観的な特徴に基づいた電氣的溶融痕と火災熱による溶融痕の識別方法を示している。しかし、溶融痕の形成過程に関する記述はほとんどなく、2014年改訂の最新版において電線の種類によって影響が生じる可能性を示唆する記述が加えられたものの、その理由については言及されていない。

い.

そこで、筆者らは、電気ケーブルが火災の初期に暴露される放射熱をコーンヒータや ICAL (Intermediate Scale Calorimeter) を用いて再現し、絶縁被覆の材質や芯線の形状が異なる電気ケーブルの短絡性状や電氣的熔融痕の形状及び短絡時のエネルギー特性について報告してきた[2.13-2.15].

今回の研究では、アークマッピング法に活用するための熔融痕の特徴に関する研究の前段として、アーク短絡と接触短絡における短絡発生前の電圧、電流波形に着目し、電気ケーブルが火災の放射熱に暴露される状況をコーンヒータを用いて模擬的に再現する実験を行った。その結果、短絡前の前駆現象として、芯線間に微小な漏洩電流が発生することが確認され、その電流値がアーク短絡と接触短絡の発生形態と密接に関連していることが明らかになったので報告する。

2.2 実験方法

2.2.1 実験資材

JIS C3342[2.16]に基づく、600V ビニル絶縁ビニルシースケーブル (600 V Polyvinyl chloride insulated and sheathed cables, VVF ケーブル) 平形 2 芯 (矢崎電線株式会社製) を使用した。VVF ケーブルの仕上外径は約 6.2mm×約 9.4mm である。芯線の直径は 1.6mm、芯線の材質は JIS C 3102[2.17]に基づく電気用銅線である。また、絶縁被覆の材質は、ポリ塩化ビニル (polyvinyl chloride, 通称 PVC) である。

この電気ケーブルは、家屋やビルの屋内配線に、一般的に使用されている電気ケーブルである。

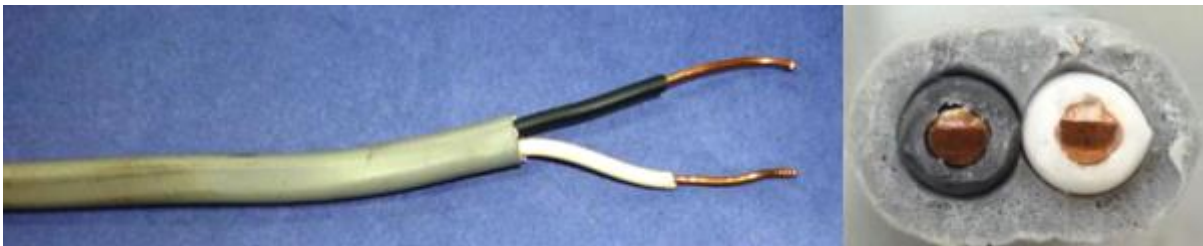


Figure 2.1. Sample cable.

Table 2.1. Dimensions and materials of the sample cable.

Conductor diameter	Insulating materials	Remarks
1.6 mm	Each conductor is covered with PVC insulation and PVC sheathing.	Japanese VVF cable See Figure 2.1.

2.2.2 実験方法

試料ケーブルに 60Hz, AC100V を印加し, コーンヒータにより, 55kW/m^2 , 45kW/m^2 , 35kW/m^2 , 25kW/m^2 , 15kW/m^2 で加熱した. 熱流束は, ISO (国際標準化機構) 着火性試験を用いた木材の着

火試験によると，木材が着火する最低の熱流束が 15kW/m^2 と記載されており [2.18]，この最低の熱流束を参考にして，実験の熱流束を決定した．試料ケーブルの短絡までの時間，短絡前後の電圧，電流波形を測定した．各実験とも 10 回データが取れるまで実施した．実験時間は 20 分とし，20 分経過した時点で，燃焼も短絡もしなかった場合は，実験を終了した．

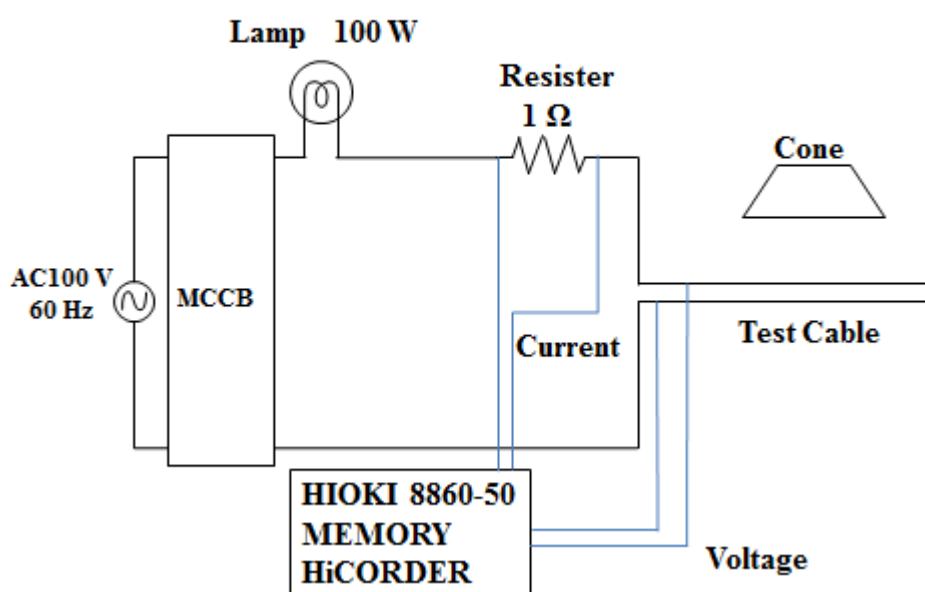


Figure 2.2. Experimental setup for the measurement of a leakage current.

実験回路を Fig.2.2 に示す．この実験では，試料ケーブルが火災初期の放射熱に暴露されたときに起きる短絡の発生原因が芯線間の接触短絡なのかアーク短絡なのかを判別するため，実験回路に 100W の白熱電球を入れ，回路に流れる短絡電流を 1A に制限した（この実験で観測事象とする周波数の範囲内では白熱電球のインダクタンスは無視することができる）．実験回路には，一般的な定格 20A の

熱動電磁式ノーヒューズブレーカ（MCCB）を使用し，短絡時の電圧，電流波形の測定はメモリーハイコーダ（HIOKI 8860-50）を使用した．サンプリング周波数は，10kHz とした．電圧は，試料ケーブル間の電圧を測定した．電流の測定は，実験回路に 1Ω の抵抗を直列に入れ，その電圧を測定して電流に換算した．

100W の白熱電球を入れることにより，短絡後の電流を 1A に制限したことで短絡による短絡箇所の破壊が抑制され，短絡発生時の状態（芯線が物理的に接触した状態または炭化物を介した導電状態）が短絡後も維持される．白熱電球は，短絡前の電氣的な前駆現象を測定するには影響がない．したがって，波形から短絡時の状態を推測することができる．

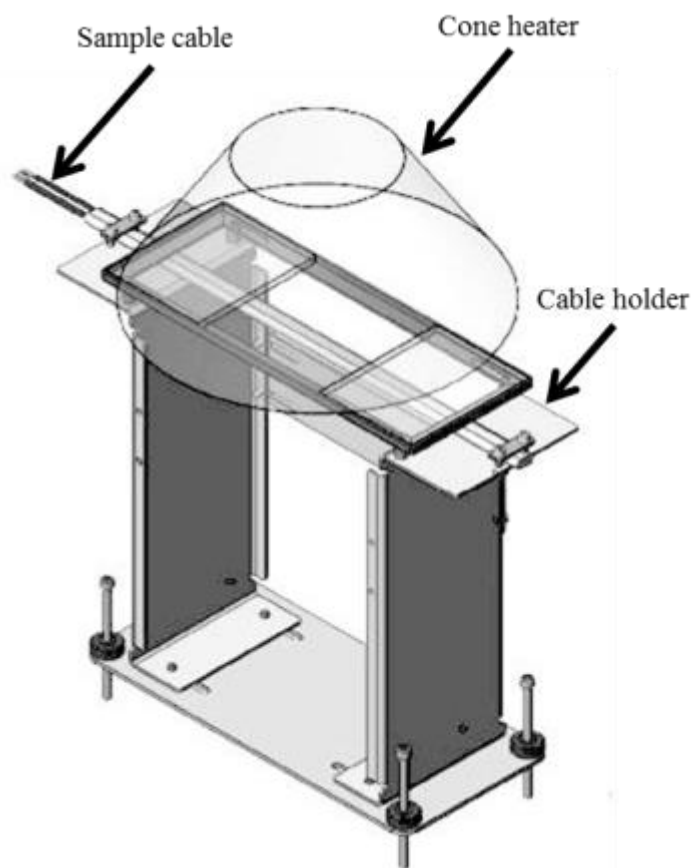
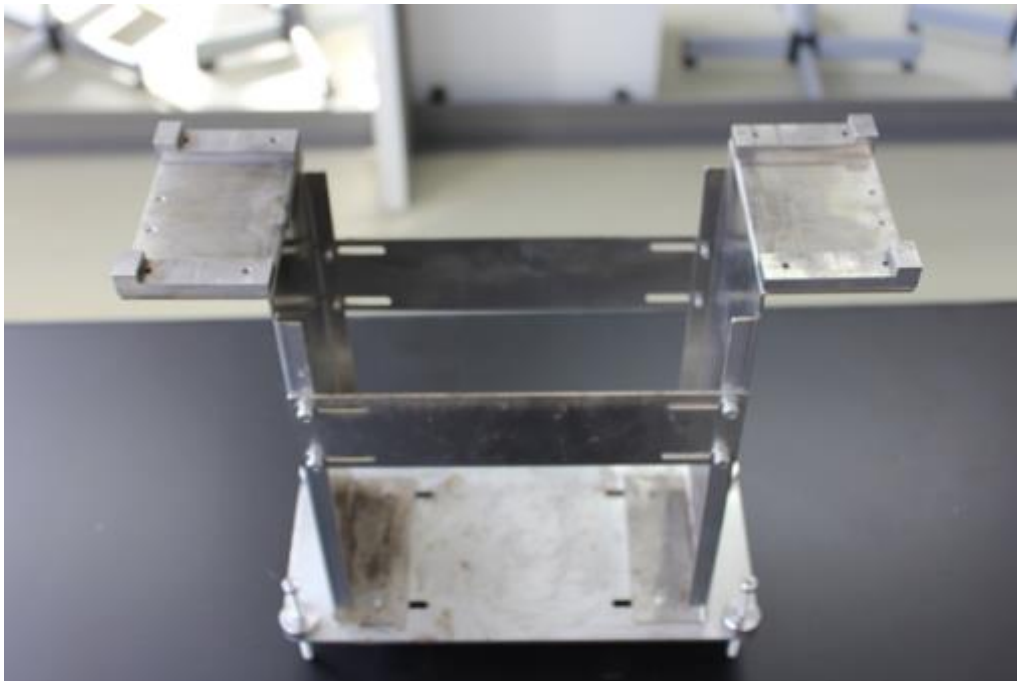
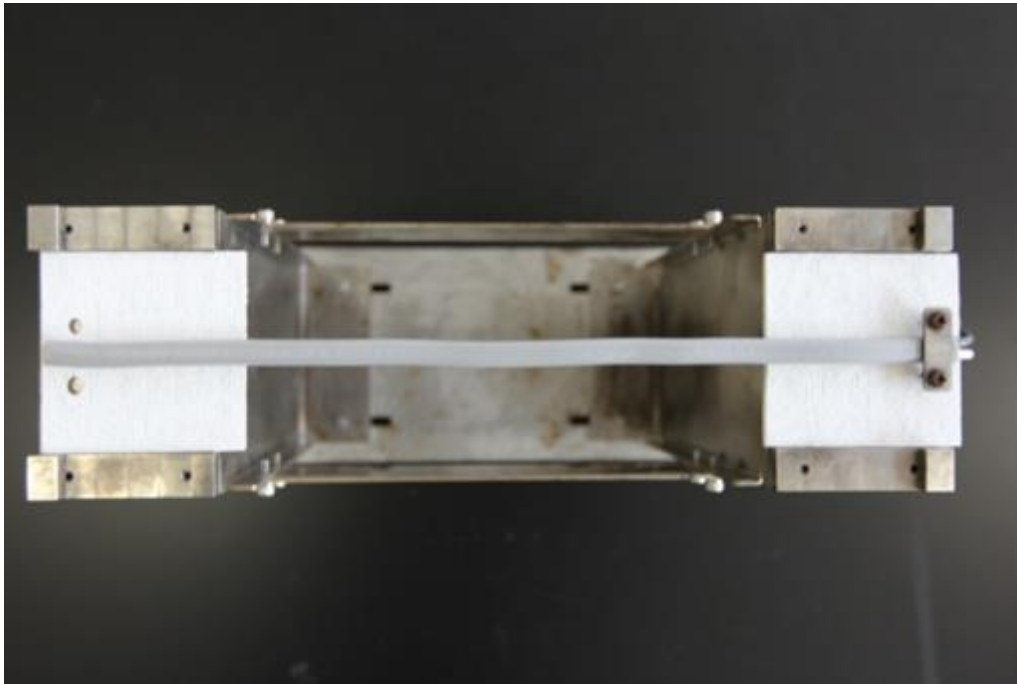


Figure 2.3. Figure of the experimental setup of the cable.

コーンヒータで試料ケーブルを加熱するために、試料ケーブルを固定するための治具を Fig.2.3 に示す. 治具と試料ケーブルの間には、絶縁を保つため厚さ 5mm の珪酸カルシウム板を用いた. 試料ケーブルの固定は、片側（電源側）を固定し、もう片側（負荷側）をフリーの状態にした. 試料ケーブルを固定する際はトルクレンチを用いて約 $25\text{cN}\cdot\text{m}$ の力で留め金をネジで締め付けた. この時の治具と留め金との距離は、約 4.5mm になるようにした. 試料ケーブルを固定し、コーンヒータからの距離を 2.5cm となるようにした. 治具に試料ケーブルを固定し、コーンヒータに暴露する箇所を約 20cm になるように、試料ケーブルの両側に耐熱性のグラスウールを置き、試料ケーブルの両端を保護した (Fig.2.4).



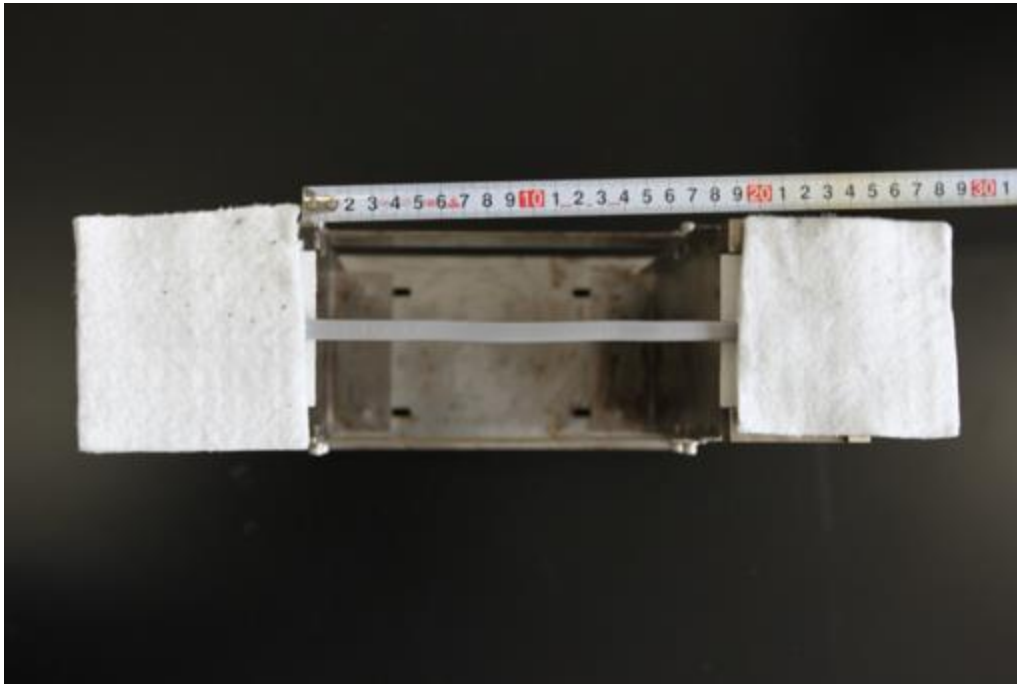
(a) Cable holder.



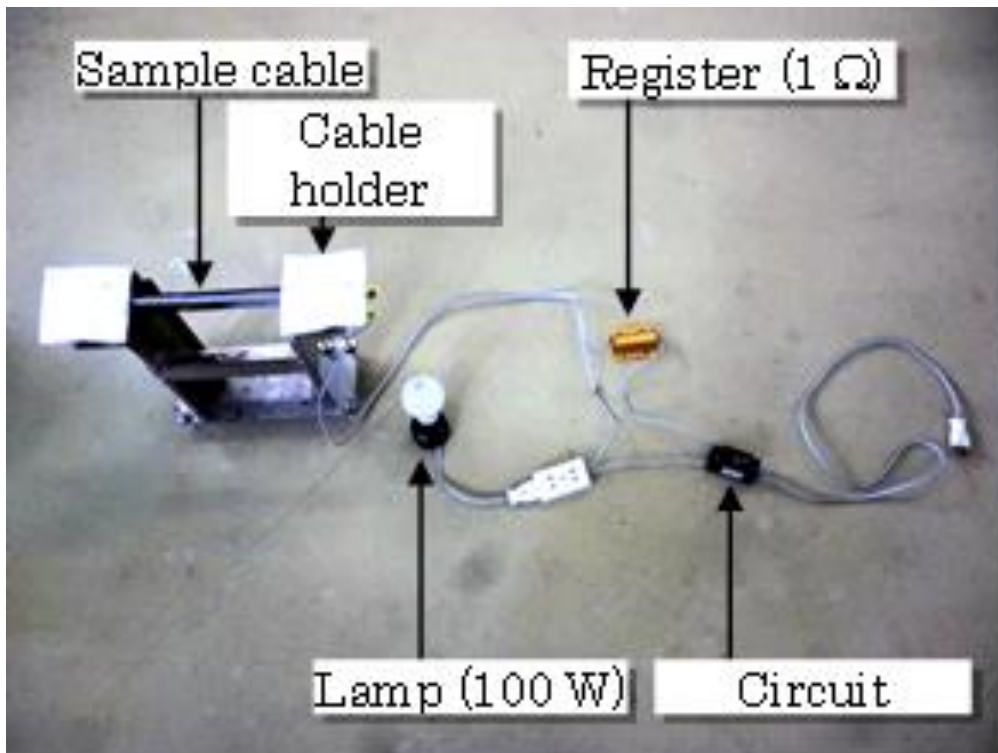
(b) The cable is attached to the cable holder.



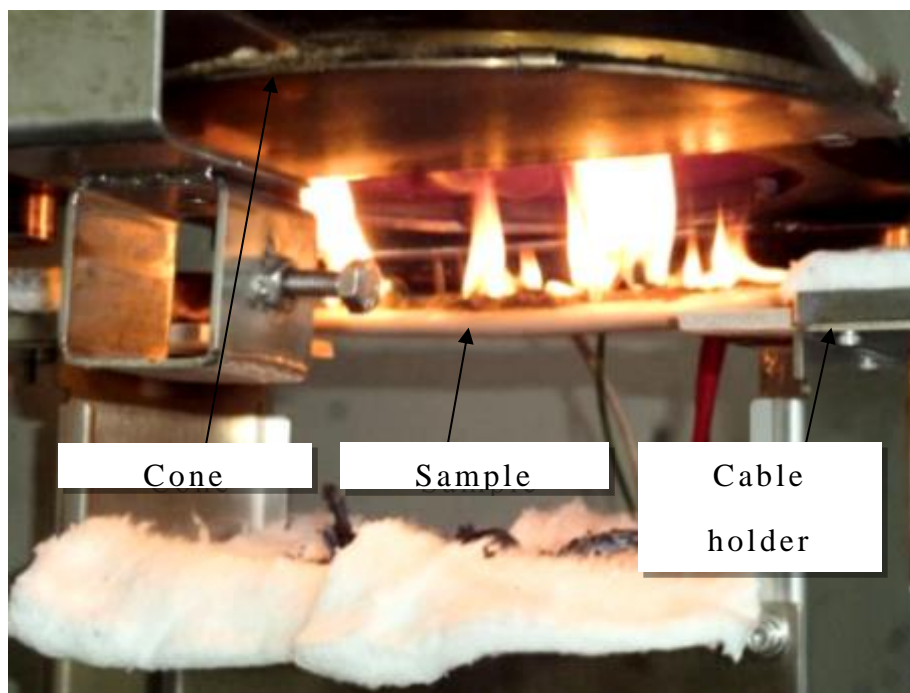
(c) The cables are fixed at a height of 4.5 mm using a torque wrench.
The wrench is torqued to 25 cN·m.



(d) Glass wool is used to protect the attached cable and expose 20 cm of cable.



(e) Experimental setup.



(f) During the experiment.

Figure 2.4. Photo of the experimental setup of the cable.

2.3 実験結果

各実験結果から，試料ケーブルの短絡時における挙動は，電圧，電流波形から直ちに芯線同士が接触短絡して，電圧が 0V になったもの（Physical short, 以後，接触短絡とする，Fig.2.5 および Fig.2.5 の短絡時を拡大したものを Fig.2.6）および持続的にアーク電圧が発生したもの（Arcing short, 以後，アーク短絡とする Fig.2.7 および Fig.2.7 の短絡時を拡大したものを Fig.2.8）の 2 種類に大別することが出来た．接触短絡の時には，接触短絡する瞬間の半サイクル程度でアークスパークが発生し，接触短絡へと移行する場合もあった．各熱流束における接触短絡およびアーク短絡の回数を Table.2.2 に示す．

なお，短絡時の電流が 10A を超えている理由は，100W の白熱電球が点灯する時の始動電流（突入電流）である．また，熱流束が 15kW/m^2 の時は実験を 10 回実施したが，アーク短絡も接触短絡も起

きなかった。試料ケーブル，熱流束が 55kW/m^2 ， 45kW/m^2 及び 35kW/m^2 の時は，いずれも燃焼し，熱流束が 25kW/m^2 及び 15kW/m^2 の時は，いずれも燃焼しなかった。

各実験において，短絡前の電流値に着目したところ，短絡前に数ミリアンペアから最大で 200 ミリアンペア程度の漏洩電流が流れる場合が認められた。この漏洩電流は，アーク短絡の時に多く発生する状況が認められた。

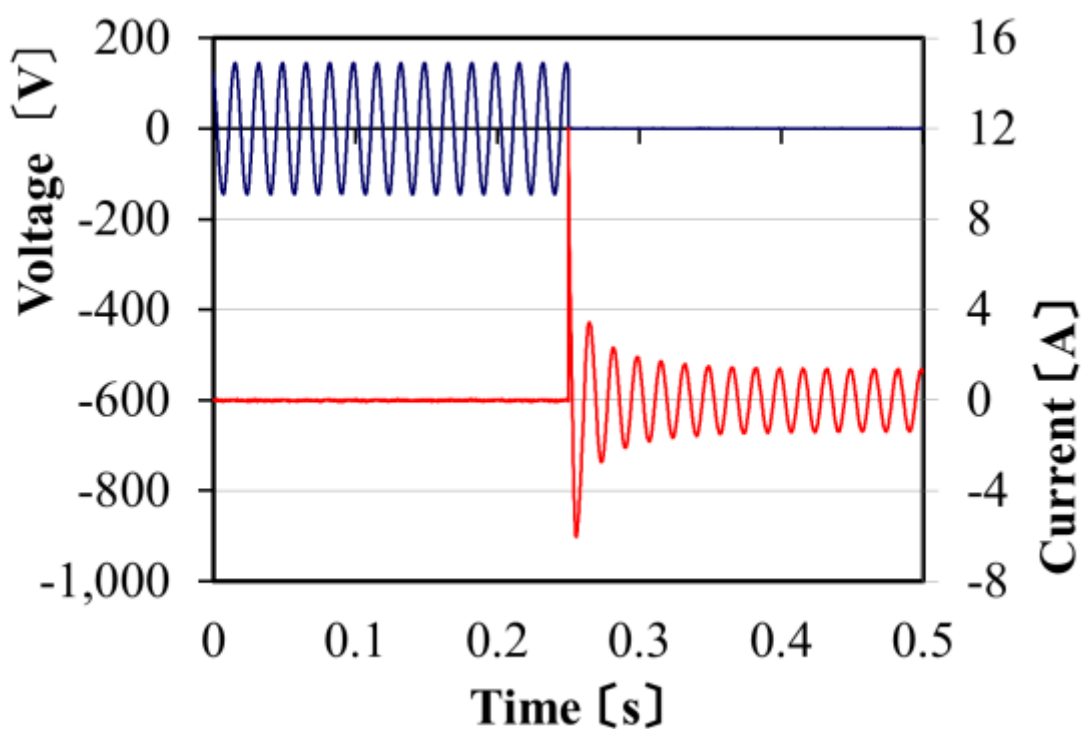


Figure 2.5. Typical voltage and current waveforms of a physical short (100 V, 55 kW/m^2 , Upper: Voltage, Lower: Current).

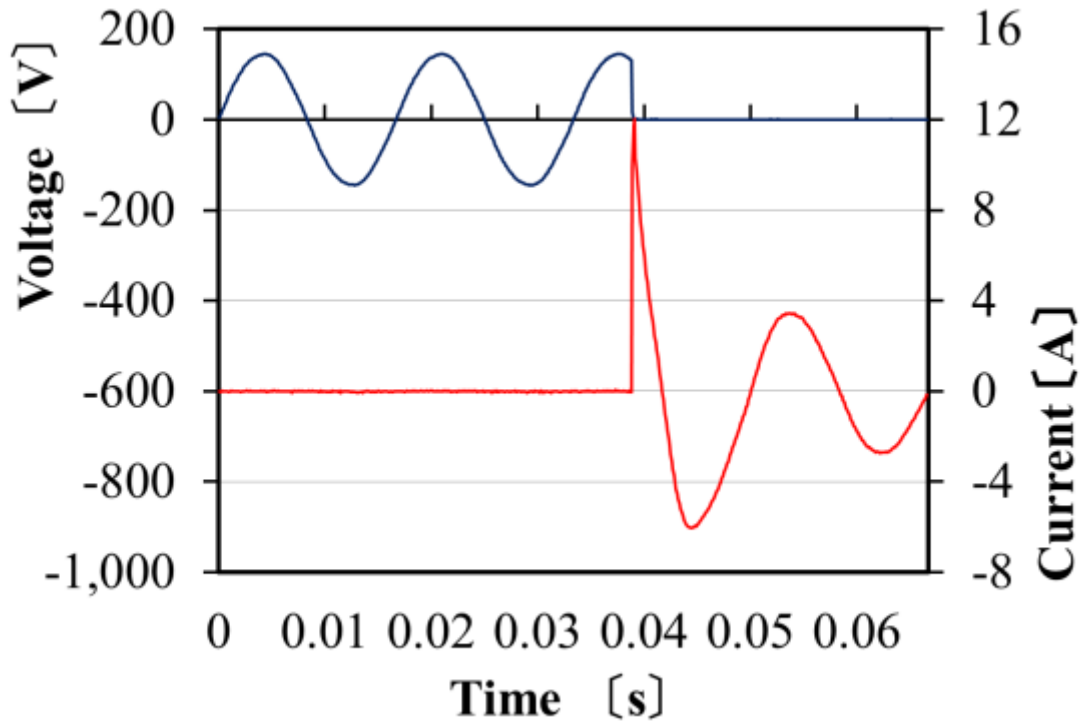


Figure 2.6. Typical voltage and current waveforms of a physical short (100 V, 55 kW/m², Figure 2.5. is enlarged. Upper: Voltage, Lower: Current).

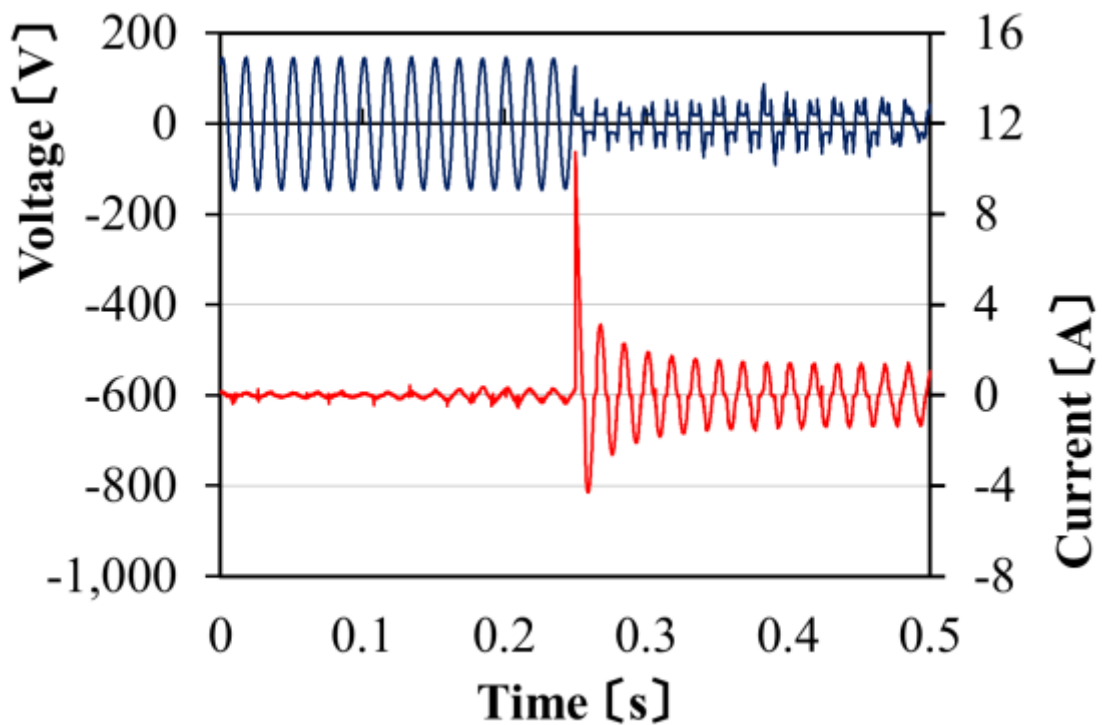


Figure 2.7. Typical voltage and current waveforms of arcing short (100

V, 55 kW/m², Upper: Voltage, Lower: Current).

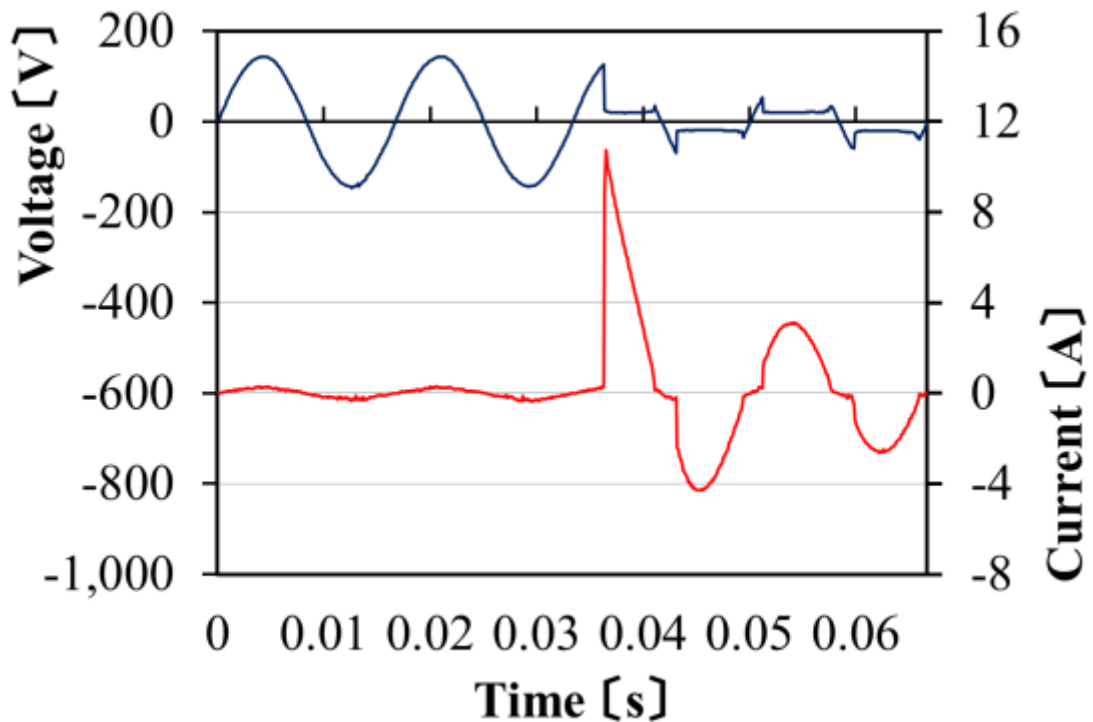


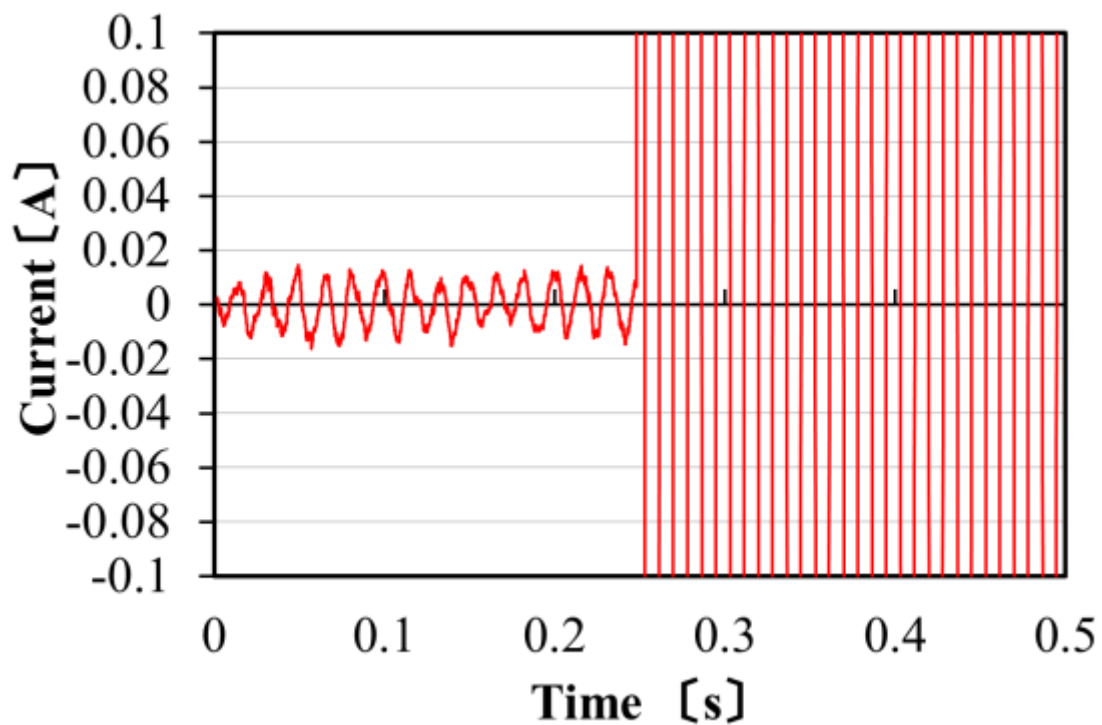
Figure 2.8. Typical voltage and current waveforms of arcing short (100 V, 55 kW/m², Figure 2.7. is enlarged. Upper: Voltage, Lower: Current).

Table 2.2. Number of shorts or arcing events with related results.

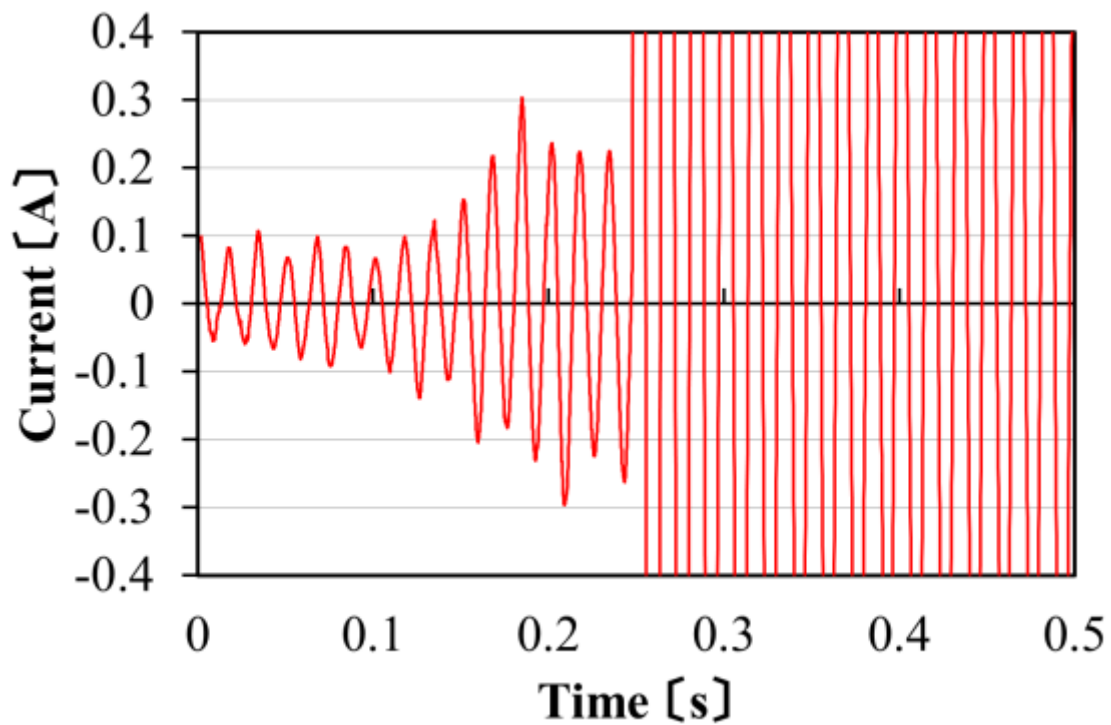
	15 kW/m ²	25 kW/m ²	35 kW/m ²	45 kW/m ²	55 kW/m ²
Physical short without arc sparks	0/10	3/33	0/10	3/10	2/10
Physical short with arc sparks	0/10	1/33	4/10	5/10	6/10
Arcing short	0/10	6/33	5/10	2/10	2/10
No short circuit	10/10	23/33	1/10	0/10	0/10

アーク短絡の場合は，短絡前に漏洩電流が認められた．アーク短絡の場合，漏洩電流は最大で 0.2 A 程度であった．一方，接触短絡の場合は，漏洩電流がほとんど認められなかった．Fig.2.5, 2.7 の漏洩電流の波形を Fig.2.9 に示す．

なお，漏洩電流は電流値を移動平均して，短絡前の 3 サイクルの実効値を平均して計算した．



(a) Current waveform in Figure 2.5. is enlarged in vertically to show minimal leakage current.



(b) Current waveform in Figure 2.7. is enlarged in vertically to show large leakage current.

Figure 2.9. Leakage current preceding a short circuit.

それぞれの実験結果で得られた漏洩電流と熱流束の関係および漏洩電流と短絡までの時間を Fig.2.10,2.11 に示す.

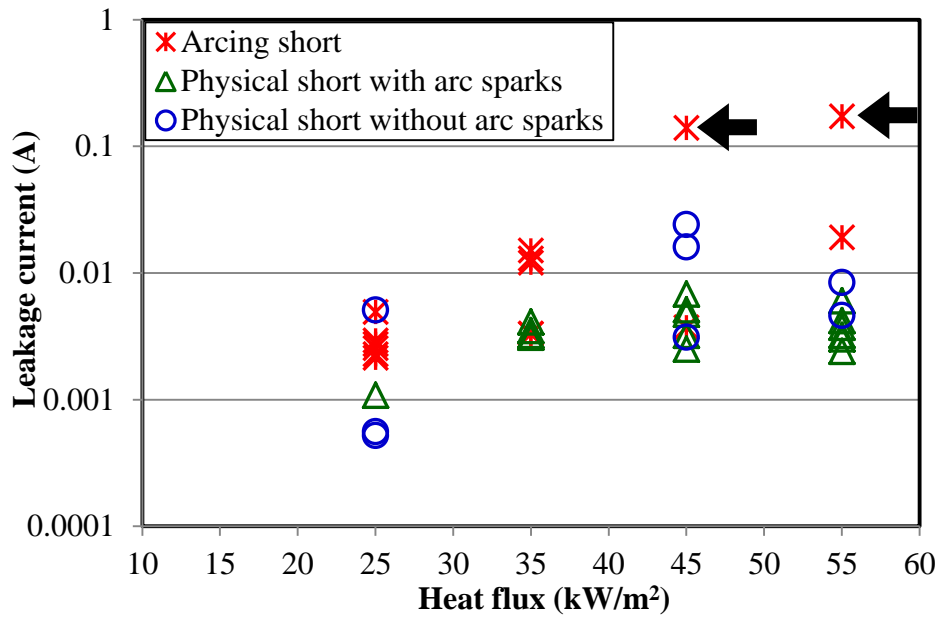


Figure 2.10. Leakage current in a PVC-insulated cable exposed to radiant heat.

The same data are plotted in different vertical scales below. Short circuiting did not occur at a heat flux of 15 kW/m² within 20 minutes during the tests. Leakage currents exceeding 0.1 A are indicated with arrows.

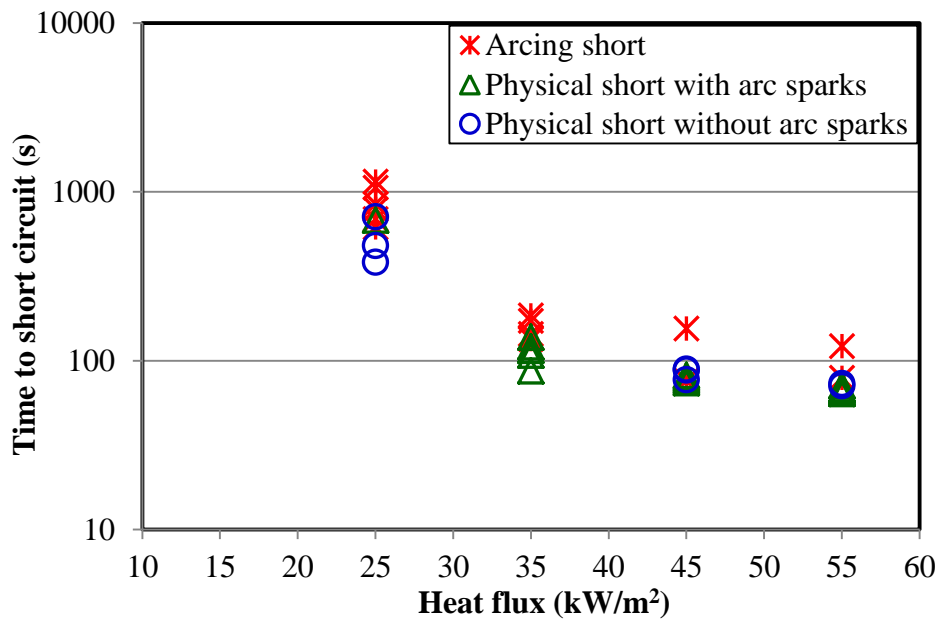


Figure 2.11. Time taken for a PVC-insulated cable exposed to radiant heat to short circuit.

The same data are plotted in different vertical scales below. Short circuiting did not occur at a heat flux of 15 kW/m^2 within 20 minutes during the tests.

2.3.1 各熱流束と短絡性状

各熱流束における短絡性状は，以下のとおりである．

熱流束が 15 kW/m^2 の時は，実験を 10 回実施したが，いずれの場合も接触短絡もアーク短絡も起きなかった．

熱流束 25 kW/m^2 の時は，実験を 33 回実施し，そのうち 23 回は接触短絡もアーク短絡も起きなかった．短絡が起きた 10 回のうち，接触短絡が 4 回，アーク短絡が 6 回であった．

熱流束 35 kW/m^2 の時は，実験を 10 回実施し，そのうち 1 回は接触短絡もアーク短絡も起きなかった．短絡が起きた 9 回のうち，接触短絡が 4 回，アーク短絡が 5 回であった．

熱流束 45 kW/m^2 および 55 kW/m^2 の時は，それぞれ実験を 10 回実施し，それぞれ接触短絡が 9 回，アーク短絡が 1 回であった．

図 8 の中に黒色矢印で示したように，アーク短絡のうちの 2 回が漏洩電流 10 A を超えた．

2.3.2 各熱流束と短絡までの時間

短絡までの時間は，各熱流束で比較した場合は，熱流束が 55 kW/m^2 および 45 kW/m^2 の方が，短絡までの時間が 70 秒から 120 秒程度と短く，熱流束が 35 kW/m^2 および 25 kW/m^2 の方が，短絡までの時間が 100 秒から 670 秒程度と長い傾向にあった (Fig.2.11).

また、各熱流束のアーク短絡までの時間と接触短絡までの時間を比較した場合は、アーク短絡の方が接触短絡より時間がかかる傾向にあった。

2.4 接触短絡について

コーンヒータの放射熱に暴露された試料ケーブルの絶縁被覆は熱によって絶縁劣化が進んで電気抵抗が低下した。このとき、接触短絡およびアーク短絡が起きる。これらの短絡挙動は、それぞれ次のとおりである。

接触短絡の場合は、試料ケーブルの芯線が物理的に接触する。このため、短絡後の電圧はゼロになる。接触短絡のうち、アークスパークが入る接触短絡は、芯線が近づきながら絶縁材が劣化するため、芯線が接触する直前でアークが発生し、その直後に芯線同士が接触する。

接触短絡が発生する場合は、芯線間の絶縁材の絶縁抵抗が保たれた状態で芯線が接触するため、短絡前に漏洩電流がほとんど流れない。

試料ケーブルを加熱すると発泡し、被覆が変形する。試料ケーブルの加熱による被覆の変形と試料ケーブルを実験治具へ設置する際の屈曲、ねじれ、たわみなどのケーブルの癖によって芯線間に潜在的な力が働いていることがあり、加熱によって絶縁被覆が熔融すると、この力が開放されて芯線が動く場合があると考えられる[2.19, 2.20]。

芯線間に接触方向の力が働いた場合には、絶縁被覆が軟化熔融することによって接触短絡に至るが、被覆は熔融した段階であって、絶縁劣化はほとんど進行していないため、芯線間に生じる漏洩電流は小さいと考えられる

2.5 アーク短絡について

コーンヒータの加熱により，接触短絡の時と同様に，試料ケーブルのねじれ，たわみ等によって芯線が動く．この時，試料ケーブルの芯線間の絶縁材の絶縁が劣化し，芯線が直接接触する前に，芯線間の劣化した絶縁材を介して，芯線間に漏洩電流が流れる．

アーク短絡では，試料ケーブルの芯線同士が接触することなく，芯線間の PVC 絶縁被覆が熱によって絶縁劣化し，試料ケーブルの芯線間の絶縁被覆が炭化してできた導電路に電流が流れる．

2.6 芯線間隔を固定した時の短絡性状

2.6.1 セラミックピンを使用した実験

各種実験結果から接触短絡の場合は，芯線の絶縁材の絶縁が保たれた状態で芯線が接触し，アーク短絡の場合は，芯線間の絶縁が劣化し，芯線が直接接触する前に，芯線間の絶縁材を通して，漏洩電流が流れると考えられたので，芯線が直接接触しないように，セラミック製のピン（直径 1.3 ミリのセラミック製マイナスドライバー）を芯線の間に入れ，短絡実験を実施した．セラミック製のピンは，試料ケーブルの加熱部分の 20cm の中央から左右 3cm の場所に挿入した（Fig.2.12）．



(a) 1.3 mm ceramic drivers.



(b) In order to promote an arcing short conductors in the cable arc held apart using ceramic pins. The pins are 3 cm apart from the center of the

exposed cable.



(c) Ceramic pins are inserted into the cable.

Figure 2.12. Experiment using ceramic pins.

実験は前述と同様の方法で実施し，熱流束は 55kW/m^2 ， 45kW/m^2 および 35kW/m^2 で各 10 回実施した．

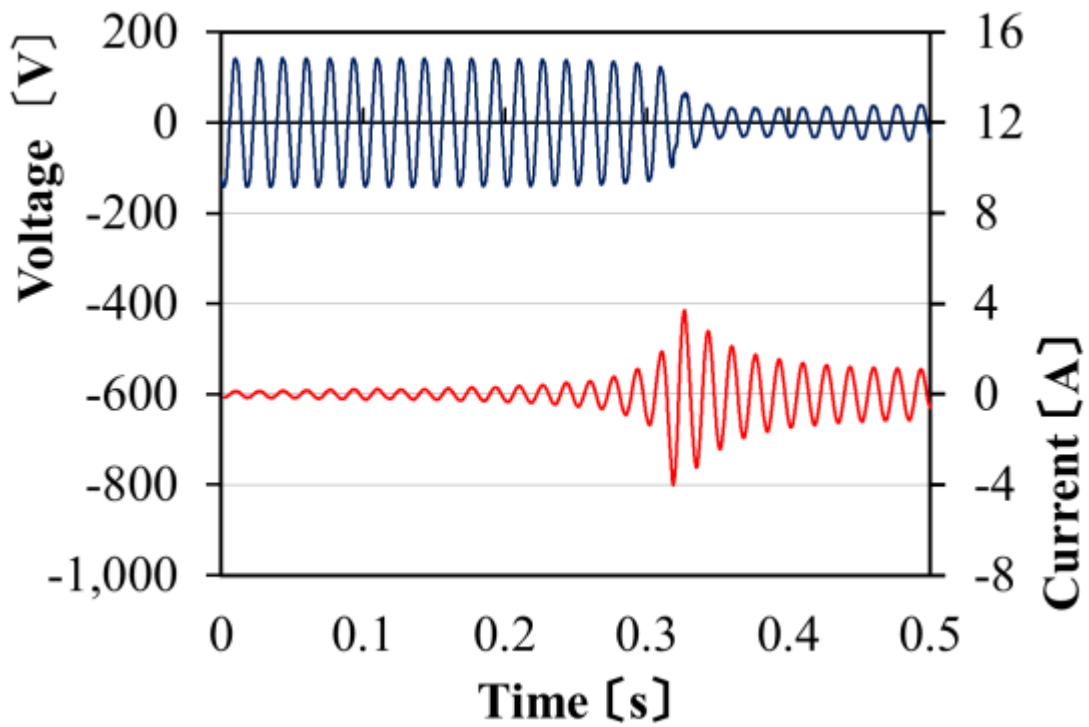


Figure 2.13. Typical voltage and current waveforms before a short circuit. (Used ceramic pin. Upper: Voltage, Lower: Current)

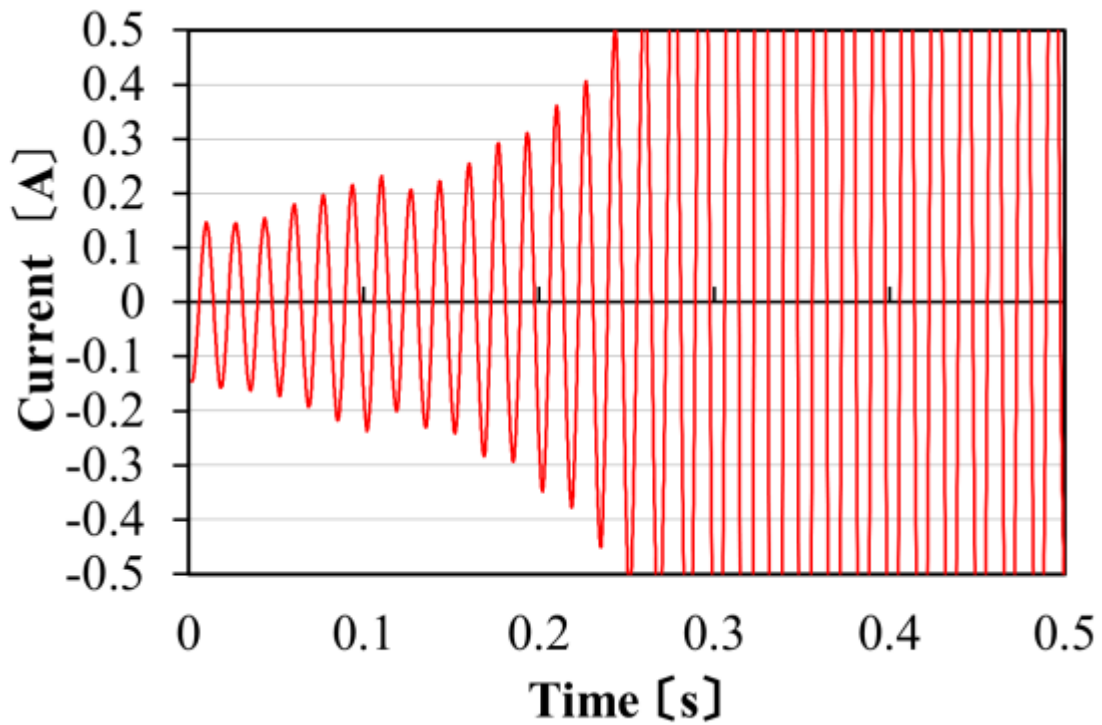


Figure 2.14. Current waveform in Figure 2.13. is enlarged vertically to

show large leakage current.

その結果，セラミック製ピンを使って芯線が接触しないようにした状態で短絡させた場合には接触短絡が起こらなかった．試料ケーブルの芯線は，接触せずに一定距離を保つため，芯線間の絶縁被覆（PVC）が絶縁破壊を起こし，アーク短絡が発生することが証明された．

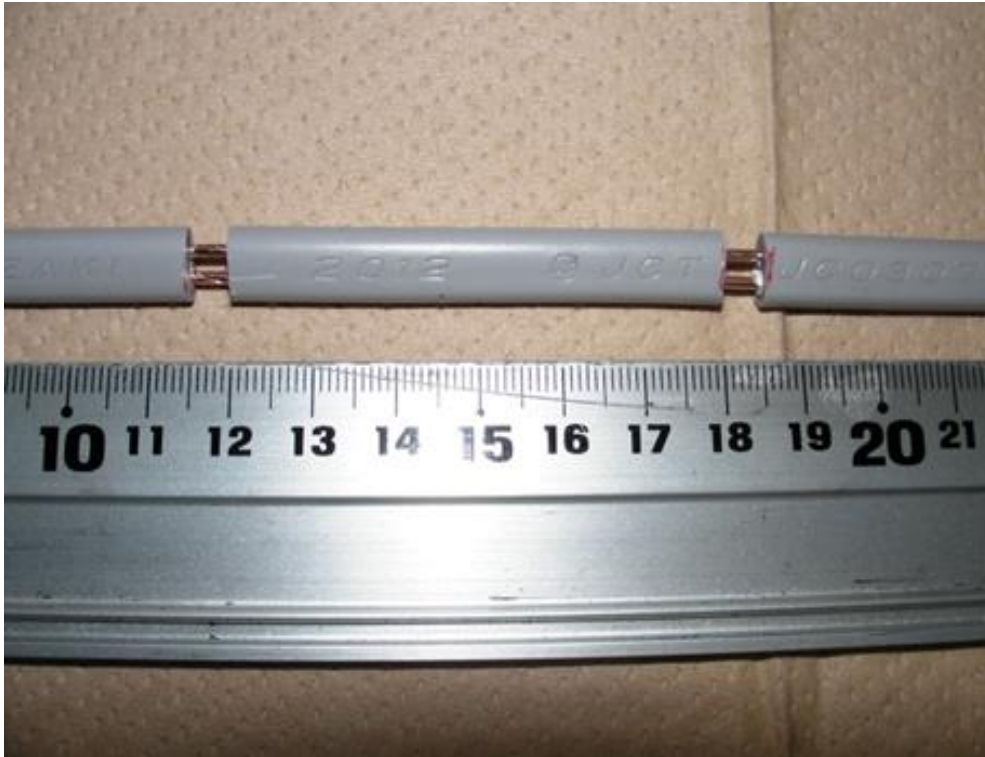
この時の短絡前に次第に増加する漏洩電流が観測された．また，短絡後の電圧電流波形はアーク短絡と同様であった．

2.6.2 芯線の中に耐火パテを入れた実験

セラミック製のピンを使用した実験では，芯線が接触する方向においてはセラミック製のピンがあるために，防御可能であるが，芯線が離れる（広がる）方向は，防ぐことができない．そこで，アーク短絡の現象を確認するために，耐火パテを使用して芯線間を動かさないように固定した同様の実験を行った．

実験は，試料ケーブルの加熱部分の 20cm の中央から左右 3cm の場所に幅約 5mm の範囲の絶縁被覆を削除し，芯線を露出させた．

芯線の露出箇所に耐火パテを入れ，コーンヒータに暴露した時に，芯線間隔が変化しないように固定した（Fig.2.15 参照）．



(a) The test cable is cut to expose the conductors.



(b) To ensure no movement of the conductors, fire resistant putty is used

Figure 2.15. Tested cable

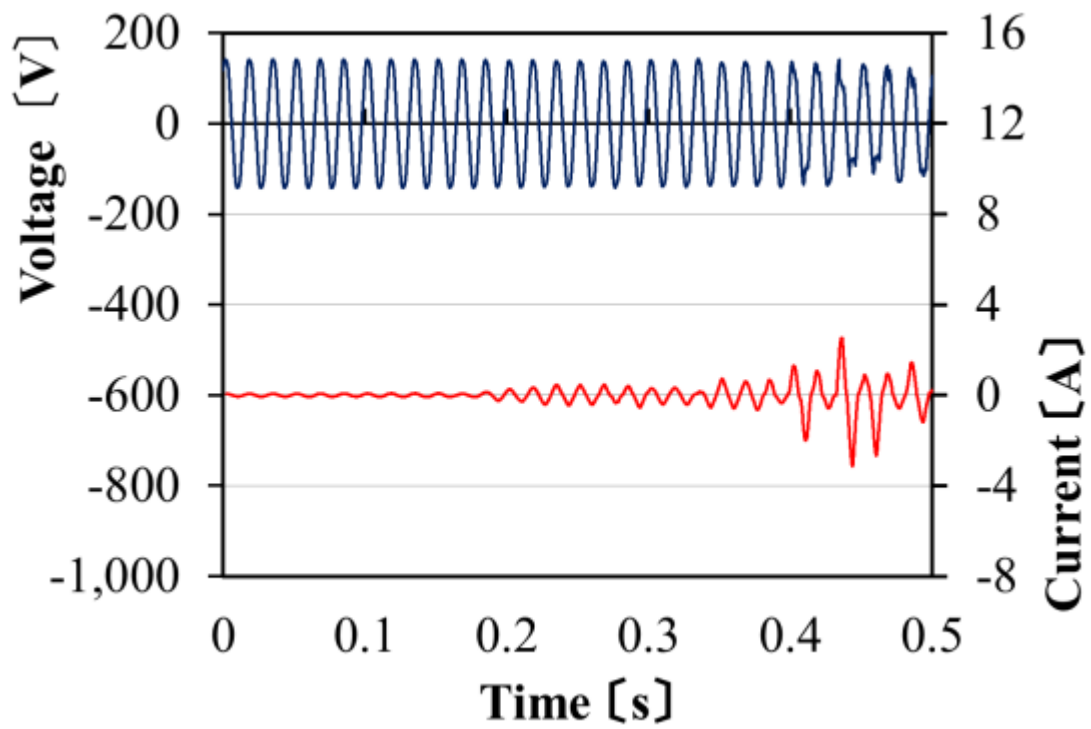


Figure 2.16. Typical voltage and current waveforms before a short circuit. (Used putty. Upper: Voltage, Lower: Current)

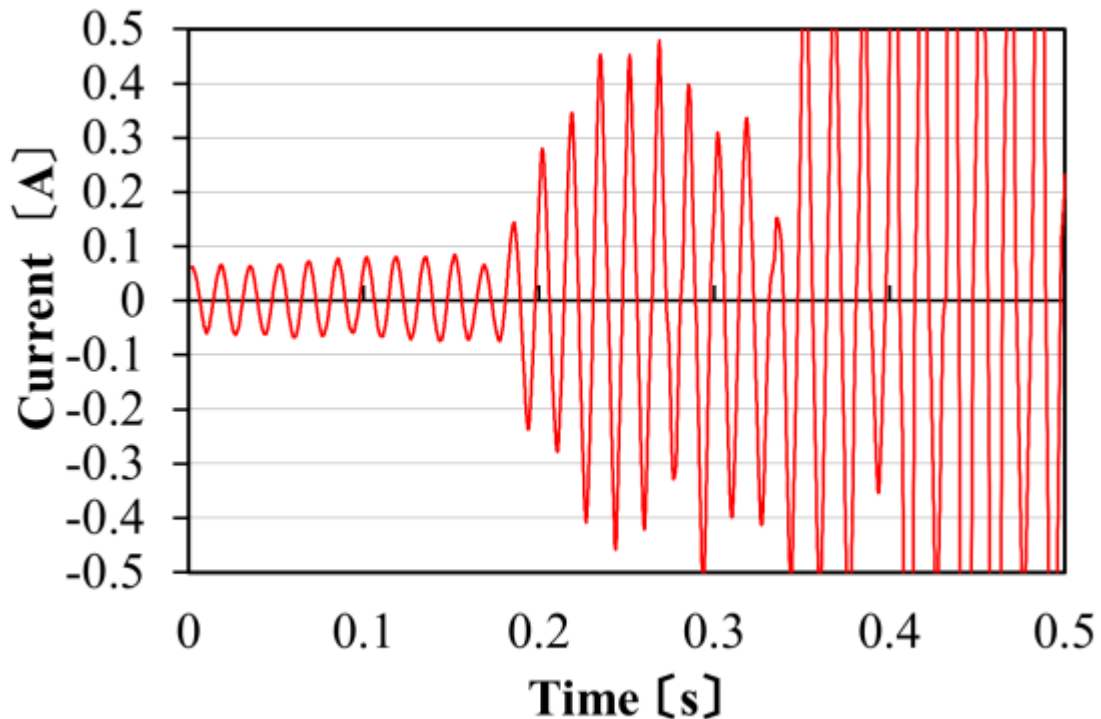


Figure 2.17. Current waveform in Figure 2.16. is enlarged vertically to show large leakage current

この実験は、熱流束 55kw/m^2 の場合のみ 32 回実施した（耐火パテを大きめにした場合を 12 回、あまりはみ出さないように埋めた場合を 20 回）。実験結果を Fig.16 および 17 に示す。実験の結果、セラミック製のピンを使用した時と同様に、短絡前に徐々に増加する漏洩電流が観測された。また、短絡後の電圧電流波形は、アーク短絡の場合と同様の波形を示した。

耐火パテを使って芯線を動かないように固定した状態で短絡させた場合には接触短絡が起こらなかった。試料ケーブルの芯線は、耐火パテで固定されているため、接触せずに近づきもせず、また、離れもしないで、一定距離を保つため、芯線間の絶縁被覆（PVC）が絶縁破壊を起こし、アーク短絡が発生することが証明された。

2.7 芯線間の温度測定

加熱による芯線間の絶縁材料の温度変化を測定した。線径 0.18mm の K 型熱電対を試料ケーブルの芯線間中央に挿入して、5 秒ごとに温度を記録した。この時、試料ケーブルに電圧は印可せずに、加熱のみ行った。

各熱流束における、芯線間の温度測定結果を Fig.18 に示す。熱流束 55kW/m^2 、 45kW/m^2 、 35kW/m^2 の時は試料ケーブルが燃焼し、最高温度のピークが、それぞれ約 600°C 、約 570°C 、約 500°C であった。また、熱流束 25kW/m^2 及び 15kW/m^2 の時は試料ケーブルが燃焼せず、温度は単純増加して最高温度約 320°C 及び約 230°C に達した。

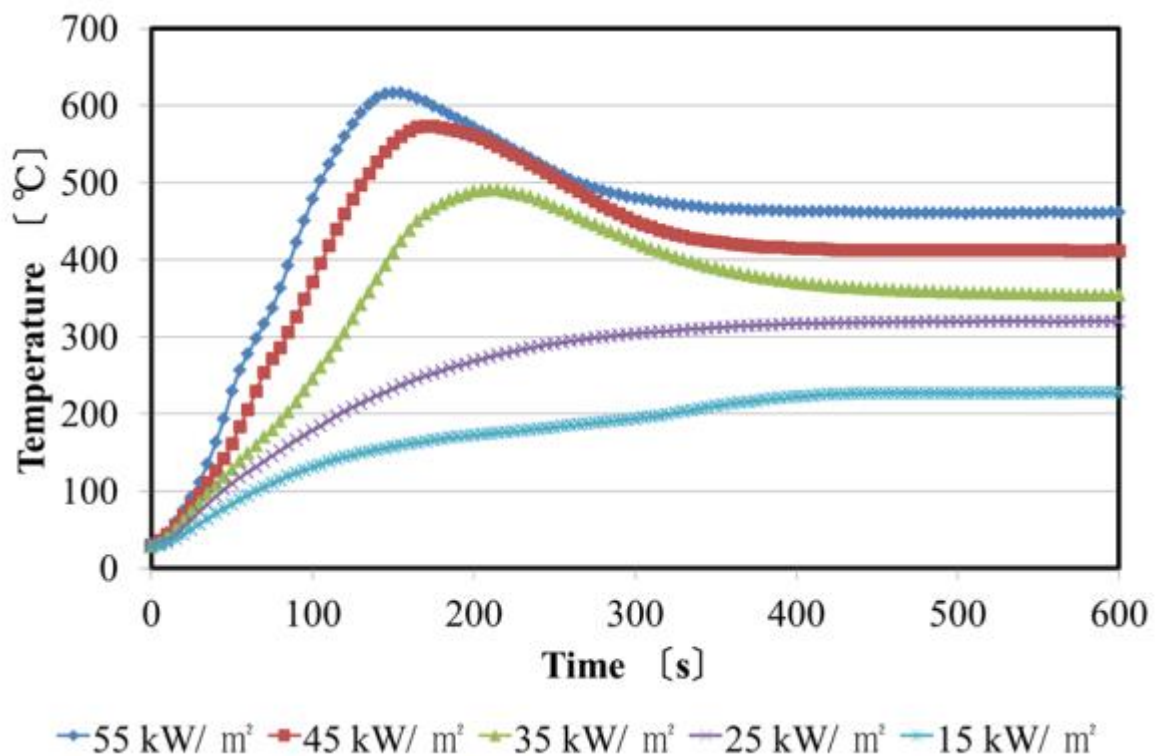


Figure 2.18. Relationship between heat flux and temperature in a cable.

2.8 考察

2.8.1 短絡前の前駆現象

実験結果から得られた電流波形について移動平均して、電流波形

を精査したところ、短絡前に次第に増加する漏洩電流が確認される場合があった。

実験結果の漏洩電流の電流波形から漏洩電流の実効値を求めた。その結果、漏洩電流は、接触短絡の時は、数 mA が多く 20mA を超えることはなかった。アーク短絡の時は、数 mA から 100mA 以上流れることがあった。また、アーク短絡の漏洩電流は、200mA を超えることはなかった。

短絡前に観測された漏洩電流は、試料ケーブルの絶縁被覆である PVC がコーンヒータの熱により絶縁劣化したため、芯線間に漏洩電流が流れたものである。

漏洩電流は、時間と共に次第に増大する傾向があった。その大きさは、数 mA から、100mA 流れる場合まであり、100mA 以上は、アーク短絡の時に発生し、急速に増大してアーク短絡に移行した。

漏洩電流が 100mA 以上流れる場合は、短絡後の現象がアーク短絡になる傾向であった。また、数 mA 以下の場合は、短絡後の現象が、接触短絡になる傾向であった。

漏洩電流の電流値の違いは、コーンヒータに暴露された試料ケーブルの熱劣化した PVC の抵抗率および芯線間の距離に依存しており、次のような経過を経ることによって漏洩電流の違いや接触短絡およびアーク短絡の違いが生じたと考えられることができる。

試料ケーブルを加熱すると発泡し、被覆が変形する。試料ケーブルの加熱による被覆の変形と試料ケーブルを実験治具へ設置する際の屈曲、ねじれ、たわみなどのケーブルの癖によって芯線間に潜在的な力が働いていることがあり、加熱によって絶縁被覆が熔融すると、この力が開放されて芯線が動く場合があると考えられる [2.19,2.20]。

芯線間に接触方向の力が働いた場合には、絶縁被覆が軟化熔融することによって接触短絡に至るが、被覆は熔融した段階であって、

絶縁劣化はほとんど進行していないため、芯線間に生じる漏洩電流は小さいと考えられる。

一方、芯線間に力が働かない場合は、絶縁被覆が溶融しても接触短絡に至ることはなく、被覆が加熱され続けることによって炭化および導電化が進行し、漏洩電流が大きくなると考えられる。

また、漏洩電流が数 mA の時に、アーク短絡や接触短絡が起きる場合があったが、この理由は、試料ケーブルの加熱による発泡での変形と実験治具へ設置する際の屈曲、ねじれ、たわみなどのケーブルの癖によって芯線間に芯線同士が接近する方向に力が働いたためであり、熱によって芯線間の絶縁材が劣化し、絶縁抵抗が低下し、漏洩電流が流れ、芯線が完全に接触した場合が接触短絡になり、芯線が完全に接触に至らない場合が、アーク短絡になる。

これら、アーク短絡と接触短絡の発生メカニズムを Fig.19 に示す。

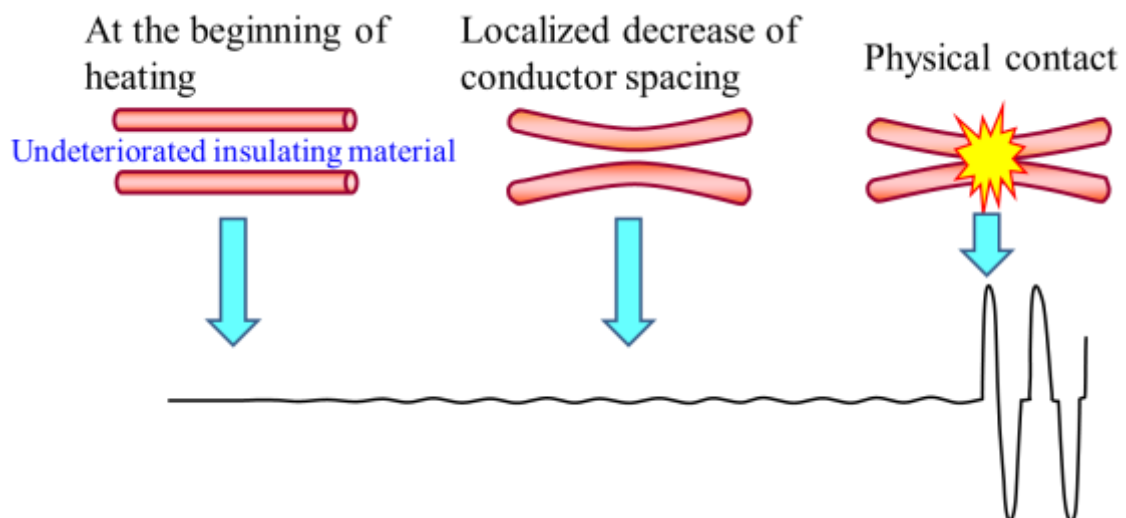


Figure 2.19. (a) Outbreak mechanism of a physical short.

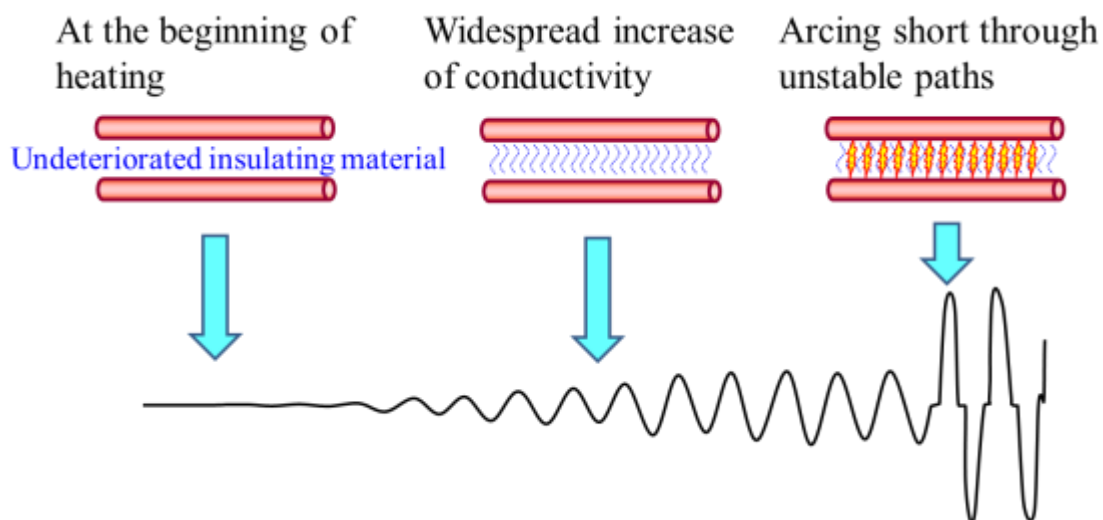


Figure 2.19. (b) Outbreak mechanism of an arcing short.

2.8.2 接触短絡とアーク短絡

コーンヒータの放射熱に暴露された試料ケーブルの絶縁被覆は熱によって絶縁劣化が進んで電気抵抗が低下した。このとき、接触短絡およびアーク短絡が起きる。これらの短絡挙動は、それぞれ次のとおりである。

接触短絡の場合は、試料ケーブルの芯線が物理的に接触する。このため、短絡後の電圧はゼロになる。接触短絡のうち、アークスパークが入る接触短絡は、芯線が近づきながら絶縁材が劣化するため、芯線が接触する直前でアークが発生し、その直後に芯線同士が接触する。

一方、アーク短絡では、試料ケーブルの芯線同士が接触することなく、芯線間のPVC絶縁被覆が熱によって絶縁劣化し、試料ケーブルの芯線間の絶縁被覆が炭化してできた導電路に電流が流れる。

2.8.3 芯線間隔変動の影響

アーク短絡の場合は加熱後に芯線が接触しない状態で発生するものと考えられた。アーク短絡の現象を確認するために、芯線が接触

しないようにセラミック製のピンを使用した実験と、芯線間隔を接触もしない、広がりもしないように、動かないように耐火パテを使用して固定した実験を行った。

実験の結果、セラミック製のピンを使用した実験においても、耐火パテを使用した実験のいずれの場合においても接触短絡は起きずに、アーク短絡が起きた。

これは、芯線間の絶縁材が劣化し、炭化した状態になったため、芯線が直接接触しない状態で、芯線間に電流が流れたためである。短絡前の電流に着目すると、短絡前に漏洩電流が流れた。また、短絡前後の電圧波形に着目すると、短絡後の電圧波形は、アーク波形を示した。

この時の電圧電流波形は、芯線間を固定しないで実施した実験のアークの波形と同様の波形であった。したがって、芯線を動かないように固定した実験で得られた結果は、アーク短絡の発生経過を裏付けるものであった。

2.8.4 熱流束と試料ケーブル芯線間の温度の関係

加熱による芯線間の絶縁材料の温度変化を測定した。線径 0.18mm の K 型熱電対を試料ケーブルの芯線間中央に挿入して、5 秒ごとに温度を記録した。

各熱流束における、芯線間の温度測定結果を Fig.2.18. に示す。熱流束 55kW/m^2 、 45kW/m^2 、 35kW/m^2 の時は最高温度のピークがあり、それぞれ約 600°C 、約 570°C 、約 500°C であった。また、熱流束 25kW/m^2 及び 15kW/m^2 の時は単純増加して最高温度約 320°C 及び約 230°C に達した。

まず、温度の観点から接触短絡の発生条件について考える。加熱を受けて芯線間の PVC が熔融したときに、もし芯線間に外力が加わっていた場合には、芯線同士が接触する可能性、すなわち接触短絡

が起きる可能性がある．ここでいう外力とは，ケーブル芯線の屈曲等で生じたる，再現性のない力である．F.P.Reding[2.21]によると，PVC は約 80℃でガラス転移すると述べている．PVC ケーブルは Hagimoto[2.22,2.23]は，170℃で熔融による短絡の可能性があると述べている．

ここで，Fig. 2.18 の温度測定結果を見てみると，各熱流束ともガラス転移の温度や熔融短絡可能性のある温度を超えている．したがって，いずれの熱流束の場合も，短絡の可能性があったと考えられる．

次に，温度の観点から漏洩電流の発生機構について考える．Babrauskas[2.24,2.25]は，200℃から 300℃で炭化すると述べている．また，Soma[2.19] は PVC コード（公称断面積 1.25mm²，素線径 0.18×50 本）を一定温度に保った電気炉に入れて長さ 5cm 当たりの芯線間の電気抵抗の変化を測定しており，200℃では約 4 分後には 10⁸Ωまで低下，300℃では 10⁶Ω以下まで著しく低下し，600℃では，わずか 3Ωまで低下したと述べている．このことから，約 300℃を超えると PVC の抵抗の著しい低下によって芯線間の漏洩電流が急速に増大し，約 600℃ではさらに大きな電流になると予想される．

このことを，本研究の実験結果に当てはめて考えてみる．本研究の実験結果では，熱流束 15kW/m²の時は，アーク短絡が起きず，熱流束 25kW/m²の時はアーク短絡が起きる場合と起きない場合があった．また，アーク短絡前に発生する漏洩電流は，熱流束が 25kW/m²から 55kW/m²へ次第に大きくなる傾向にあった（Fig. 2.18 参照）．

一方，Fig.2.18 の温度測定結果では，熱流束 25kW/m²の時は 300℃を超えているが，熱流束 15kW/m²のときは超えていない．すなわち，300℃を境にして，アーク短絡が起きる場合と起きない場合が分かれていることがわかる．また，Fig. 2.10 の矢印に示した熱流束 55kW/m²及び熱流束 45 kW/m²の時のアーク短絡の漏洩電流が 0.1A を超えて

いるのは、PVCの温度が600℃程度となったためと考えられる。

これらの結果は、上記の電気抵抗の変化に関する文献からの予想と一致しており、アーク短絡の発生における温度条件の関与を示唆するものと考えられる。

2.8.5 熱流束と漏洩電流及び短絡までの時間の関係

短絡までの時間は、アーク短絡の場合は、芯線間の絶縁が劣化し、芯線間に導電回路が形成されてからアーク短絡が起きるため、芯線間の絶縁が劣化するまでの時間が必要である。そのため、接触短絡より時間がかかる。接触短絡の場合は、芯線間の絶縁が劣化せず、芯線間の絶縁が保たれた状態で芯線が接触するため、アーク短絡より短い時間で発生する。

各熱流束におけるアーク短絡及び接触短絡の漏洩電流の関係はFig. 2.10に示したとおりである。各熱流束におけるアーク短絡の漏洩電流は、熱流束が大きくなると漏洩電流も大きくなる傾向を示した。これは、熱流束が大きくなると、加えられた熱流束の熱により、芯線間の絶縁が劣化し、芯線間の絶縁抵抗が小さくなるためと考えられる。

接触短絡の場合は、熱流束の大きさに顕著な違いが認められなかった。この理由は、PVCの絶縁被覆が200℃で熔融するため、接触短絡は、芯線間の絶縁が保たれた状態、すなわち熱によるPVC絶縁被覆の劣化が進まない状態で、芯線同士が接触するため、熱流束の大きさに関係なく、加熱による被覆の変形および芯線が屈曲、ねじれ、たわみなどによって接触し、熱流束の影響を受けにくいものと考えられる。

各熱流束におけるアーク短絡および接触短絡までの時間の関係はFig. 2.10に示したとおりである。熱流束が小さい方が短絡までの時間が長く、熱流束が大きい方が短絡までの時間が短い傾向にある。

これは、熱流束が小さい方が芯線間の絶縁劣化に時間がかかるためであり、熱流束が大きい方が芯線間の絶縁が早く劣化するためと考えられる。

実験結果において、熱流束 25kW/m^2 の場合は、短絡が起きた 10 回のうち 6 回、アーク短絡が起きた。熱流束 15kW/m^2 の場合は、実験 10 回のうち 10 回、アーク短絡も接触短絡も起きなかった。

この原因は、熱流束が 55kW/m^2 から 35kW/m^2 の場合は、Fig. 18 にも示すように、加えられた放射熱により急激に芯線間の温度が上昇する。温度が上昇する時間経過において、温度が 200°C を超えると接触短絡が発生する可能性がある。さらに 200°C を超えても芯線が接触せずに熱による PVC 絶縁被覆の劣化が進むと、アーク短絡が起きると考えられる。アークスパークが入る接触短絡は、芯線が接触短絡の時と同様に接近しながら PVC の絶縁が熱によって劣化し、芯線が接触する直前にアーク短絡し、その後、芯線が接触する。

接触短絡が起きる過程とアーク短絡が起きる経過の間で発生するものと考えられる。

熱流束が 25kW/m^2 および 15kW/m^2 の場合は、芯線間の温度の上昇が緩やかであり、PVC 絶縁被覆の劣化もゆっくりと進むため、熱流束が 55kW/m^2 から 35kW/m^2 の時と比べて、短絡までの時間がかかる。また、熱流束が 25kW/m^2 および 15kW/m^2 の時は加熱による温度が、熱流束が 55kW/m^2 から 35kW/m^2 の時と比べて低いので、PVC 絶縁被覆の絶縁劣化が進まずにアーク短絡も接触短絡も起きなかった場合があったと考えられる。

2.8.6 100W 電球が実験結果に与える影響

これまでの実験では、100W の電球を使用して、短絡時の電流を 1A に制御して行ってきた。100W の電球には、コイル状のフィラメントが使用されているため、このフィラメントのインダクタンス

の値を計算し，実験結果に与える影響を検討した．

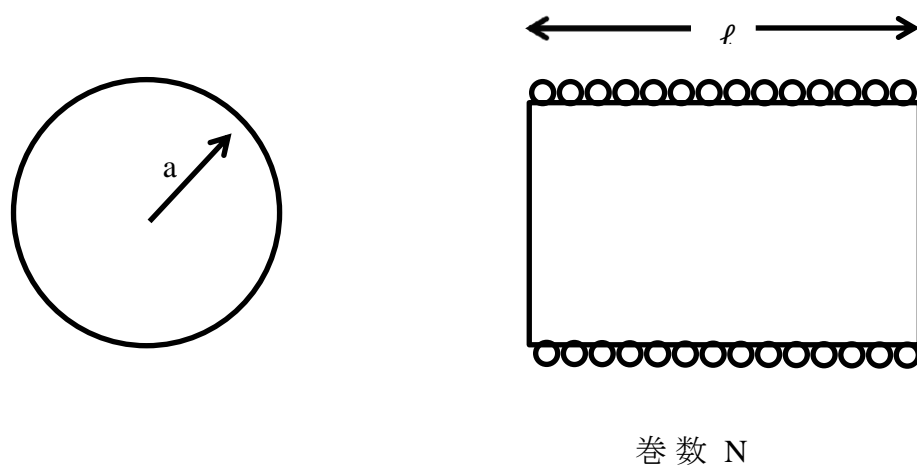


Figure 2.20. Finite length solenoid.

有限長ソレノイドの図を Fig.2.20 に示す．このコイルのインダクタンス L は，以下の式で示される．

$$L = \mathcal{L}4\pi^2\mu_s a^2 \frac{N^2}{l} 10^{-7} \quad [H]$$

\mathcal{L} は長岡係数， μ_s は，比透磁率である．また，長岡係数は，

$$\frac{2a}{l}$$

を計算すると，換算できる．

実験で使用したタングステンフィラメントは，2重らせんであり，外側のらせんを基準として考えると，素線の外形 a （二次巻きの外形の半径），長さ l （二次巻き長さ），巻き数 N （二次巻き数）を，電球メーカーから教示された値を使用して，電球のインダクタンス L を計算すると

L は、約 $0.089 \mu \text{H}$ となる。

なお、この数値からコイルのインピーダンスを計算すると、

$$\begin{aligned} X_L &= \omega L \\ &= 2\pi f L \\ &= 2 \times 3.14 \times 60 \times 0.089 \\ &= 33.5 \mu \Omega \end{aligned}$$

となる。

計算の結果、電球の製造メーカーから教示された数値から、フィラメントのインダクタンスを計算したところ、約 $0.089 \mu \text{H}$ であった。

さらに、実験室の周波数 60Hz で点灯した時のインピーダンスは、約 $33.5 \mu \Omega$ であった。

実験で使用した電球のフィラメントのインダクタンス及びインピーダンスを計算したが、いずれも「マイクロオーダー」の数値であり、短絡実験の実験結果及び漏洩電流の計算値には、まったく影響しない。

2.8.7 加熱時における試料ケーブルの挙動について

実験結果から、接触短絡及びアーク短絡とも試料ケーブルの芯線が過熱によって接触方向に力が働き、芯線同士が寄って接触した現象と考えられる。芯線が接触する理由として、前述のとおり芯線のねじれやたわみの影響が考えられる [2.19,2.20].

その他の理由として、PVC 絶縁被覆および芯線がコーンカロリー

メータの加熱により，熱膨張して接触した場合などが考えられる．

一般的に長さ L_a [m] の金属が，温度変化 t [K] に上昇した時の熱膨張した長さ L_t [m] は，次式で示されている [2.26]．

$$L_t = L_a \times (1 + \alpha t)$$

ここで， α は線膨張係数で，試料ケーブルの芯線の材質である銅の場合は 16.5×10^{-6} [1/K] である．コーンカロリメータでの試料ケーブルの加熱範囲は 20cm (0.2m) であるので， L_a は 0.2 [m]，また実験時の各熱流束の温度は，Fig.2.18 に示した最高温度とし，実験室の室温を約 25°C として，これらの温度と上記式にから熱膨張した銅の長さを計算し，表 2.3 に示す．

Table.2.3. Thermal expansion of copper

熱流束[kW/m ²]	温度 [°C]	銅の膨張 [m]
55	617	0.2020
45	573	0.2019
35	491	0.2016
25	320	0.2011
15	227	0.2008

計算上，熱膨張によって銅は，熱流束 55kW/m² の時で，約 2.0mm 伸びる．この熱膨張が芯線の接触に影響していると考えられる．

また，試料ケーブルの絶縁被覆である PVC が燃焼すると，PVC が発泡し，芯線の接触に影響する可能性も考えらえる．

熱流束 55kW/m²，45kW/m² で加熱した場合は，比較的短時間で PVC に着火するため，着火後に PVC は外側から燃焼し，発泡して変形した．対して，熱流束 35kW/m² で加熱した場合は，熱に曝された PVC が着火するまでに加熱開始から概ね 1 分以上の時間を要し，PVC の

発泡が進んだ後に着火した。熱流束 15kW/m^2 で加熱した場合には燃焼しなかった。PVC の発泡の状況を Fig.2.21 に示す[2.27].

文献によると、PVC は 100°C を超えると H_2O 及び CO_2 の気体が生じると記載されており、比較的小さい熱流束でも気体によって発泡すると考えられる[2.28]. また、 200°C から 300°C において、分解して塩化水素を発生すると記載されている[2.29]. これらより、PVC は比較的小さな熱流束においても、発泡することが推察される。



Figure 2.21.(a) Formed PVC sheathing at 55 kW/m^2 .



Figure 2.21.(b) Formed PVC sheathing at 20 kW/m².

(See reference 2.27)



Figure 2.21.(c) Formed PVC sheathing at 10 kW/m².

(See reference 2.27)

試料ケーブルの短絡時に、接触短絡が発生する為には芯線が直接接触する必要がある。またアーク短絡が発生する為には、絶縁被覆の炭化によって、芯線と芯線の間で電流が流れる経路が形成されている必要がある。

実験結果からは、熱流束 55kW/m^2 及び 45kW/m^2 のように熱流束が高いほど接触短絡が発生しやすいが、これは PVC が十分に炭化する前に着火したことで、被覆の炭化が芯線間に及ぶより先に、PVC が外側から燃焼することによって、外側から内側へ力が働いたと考えられ、PVC の発泡膨張により動かされた芯線同士が接触し短絡したものと考えられる。対して熱流束 35kW/m^2 以下で加熱した場合は接触短絡の回数が減りアーク短絡が発生することが多かった。加熱開始から着火までに十分な時間があったことで、その間に PVC の炭化が芯線間にまでおよび、アーク短絡が発生したと考えられる。

2.9 結果

一般家庭で使用されている PVC 絶縁の電気ケーブルが、火災初期の放射熱に暴露されると接触短絡あるいはアーク短絡が発生するが、本研究によりその前駆現象として絶縁劣化した芯線間の絶縁被覆を通して流れる漏洩電流の存在が確認され、短絡の発生と密接な関係のあることが明らかになった。アークマッピング法に活用するための熔融痕の特徴に関する研究の前段として、漏洩電流を観測することによって、アーク短絡と接触短絡が発生するメカニズムが明らかとなった。このことは、アーク短絡および接触短絡による電氣的熔融痕の発生メカニズムの解明にも役立つものであり、アークマッピング法による、電氣的熔融痕発生の科学的根拠に基づく火災原因調査に役立つものである。

また、電気ケーブルに起因する電気火災には、コンセントやネジ

止め箇所などの接続不良による発熱，亜酸化銅の増殖反応，トラッキング火災など様々な種類があるが，これらはいずれも芯線間の絶縁被覆が絶縁劣化を伴うことから，本研究で確認された漏洩電流を伴うと考えられる．よって，本研究成果は短絡痕の識別に関する研究だけでなく，短絡前の前駆現象を検知することにより電気火災の未然防止にも活用できるものである．

本研究で得られた主な結果は次のとおりである．

1) 一般家庭で使用されている電気ケーブルが火災初期の放射熱に暴露された時，接触短絡およびアーク短絡を発生するメカニズムの端緒として，漏洩電流の存在が明らかになった．

2) 短絡前に次第に増加する 100mA 以下の電気ケーブル芯線間の漏洩電流が観測された．

3) 接触短絡の場合は，漏洩電流は数 mA から 20mA 程度と小さかった．これは，加熱によって，電気ケーブルの絶縁被覆が熔融して軟化するが，絶縁被覆がまだ十分に絶縁劣化しておらず，炭化・導電化するには至っていないためと考えられた．

4) アーク短絡の場合は，漏洩電流は数 mA から 100mA 以上と大きく，100mA 以上で急速に増大して，アークに発展する傾向にあった．これは，加熱によって電気ケーブルの絶縁被覆が熔融しても芯線が接触するほど動かず，芯線間の絶縁材が炭化・導電化するためと考えられた．

5) 電気ケーブルの芯線を動かないように固定した実験では，アーク短絡の時と同様に，短絡前に，100mA 以上の漏洩電流が観測された．これは，アーク短絡の発生経過を裏付けるものであった．

2.10 第二章の参考文献

- 2.1 塚本孝一，火災原因調査ノート，東京法令出版，1986.
- 2.2 Steven W. Carman: Improving the understanding of post-flashover fire behavior. Proceedings of International Symposium on Fire Investigation and Technology 2008 Conference, pp. 221-232, 2008.
- 2.3 NFPA921, Guide for Fire and Explosion Investigations, National Fire Protection Association, 2014Ed.
- 2.4 User's Manual for NFPA 921, 2003, NFPA /IAAI, Quincy, Massachusetts.
- 2.5 John D. DeHaan, Kirk's Fire Investigation, sixth edition, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, pp.415-430, 2004..
- 2.6 Cameron J. Novak , Stanislav I. Stoliarov, Michael R. Keller and James G. Quintiere : An analysis of heat flux induced arc formation in a residential electrical cable. Fire Safety Journal, 55, pp.61-68, 2013.
- 2.7 Nicholas Carey and Niamh Nic Daeid : Arc Mapping. Fire and Arson Investigator, 61(2), pp.34-37, 2010.
- 2.8 Nicholas Carey and Niamh Nic Daeid : Confocal Laser Scanning Microscopy of Electrical Conductors at Fire Scenes. MICROSCOPY AND ANALYSIS, SEPTEMBER 2010, pp.5-7, 2010.
- 2.9 BERNARD BELAND: Arcing phenomenon as related to fire investigation. Fire Technology, 17(3), pp.189-201, 1981.
- 2.10 電気学会通信教育会編集，放電現象，社団法人電気学会出版，pp. 144-146, 1968.
- 2.11 Vytenis Babrauskas : Ignition Handbook , Chapter 11(pp. 498-577),
- 2.12 Vytenis Babrauskas, "Mechanisms and modes for ignition of low-voltage PVC-insulated electrotechnical products," Fire & Materials,

30, pp.150-174, 2006.

2.13 萩本安昭, 渡邊憲道, 岡本勝弘, 放射熱による電気配線の短絡, 日本火災学会論文集, 54(2), pp.25-31, 2004.

2.14 岩下友安, Michael R. Keller, 放射熱による日米ケーブルの短絡性状, 平成 24 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.208-209, 2012.

2.15 岩下友安, Michael R. Keller, 萩本安昭, 須川修身, 放射熱による日米ケーブルの短絡性状 (第 2 報), 平成 25 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.314-315, 2013.

2.16 JIS C 3342, 日本工業規格, 2012.

2.17 JIS C 3102, 日本工業規格, 2012.

2.18 田中哮義, 改訂版建築火災安全工学入門, 財団法人日本建築センター情報事業部, pp.299-300, 2002.

2.19 萩本安昭, 渡邊憲道, 岡本勝弘, 落合聡, 火災現場の電氣的溶融痕識別における課題と検討, 日本鑑識科学技術学会第 9 回学術集会講演要旨集, pp.129, 2003.

2.20 相馬重信, 八幡康男, 加熱によるビニルコード被覆の電気抵抗の変化, 日本火災学会論文集, 13(2), pp.42-48, 1965.

2.21 F. P. REDING, E. R. WALTER, and F. J. WELCH, Glass Transition and Melting Point of Poly (vinyl Chloride), JOURNAL OF POLYMER SCIENCE 56, pp.225-231(1962).

2.22 萩本安昭, 渡邊憲道, 岡本勝弘, ビニルコードの接続不良による電気火災危険, 平成 14 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp.348-351, 2002.

2.23 Hagimoto, Y., Watanabe, N., and Okamoto, K., Electrical fault of PVC-insulated cords and loose connection within rated current, Proceedings of Asia Pacific Symposium on Safety, pp.293-296, (2001).

2.24 Vytenis Babrauskas, How do electrical wiring faults lead to

structure ignitions? , Fire and Materials 2001 International Conference, pp. 39-51, (2001)

2.25 Vytenis Babrauskas, Ignition Handbook, pp. 774-777, (2003).

2.26 飯田修一，大野和郎，神前熙，熊谷寛夫，沢田正三 編，新版物理定数表，朝倉書店，pp. 124, 1978.

2.27 Hagimoto Y., Watanabe N., Okamoto K., SHORT-CIRCUIT FAULTS IN ELECTRICAL CABLES AND CORDS EXPOSED TO RADIANT HEAT, Fire and Materials 2003 International Conference, pp. 215-226, (2003).

2.28 大谷英雄，川村健太郎，PVC プラグの電気絶縁性の熱劣化に関する研究，安全工学，42（4），pp. 216-221, 2003.

2.29 安東毅，プラスチックゴミの危うさ，自治体研究社，pp. 36-43, 2000.

3 電氣的溶融痕の形成機序の解明

3.1 序論

3.1.1 電氣的短絡痕の火災鑑識における現状と問題点

火災現場における電気ケーブルに発生する電氣的短絡痕が火災原因か否かの識別に関して、いわゆる電氣的溶融痕が直接火災原因になったものであるか否か、一次痕であるか二次痕であるかに関し、多くの研究が行われてきた。しかし、現場の実際の短絡痕に関しては十分な識別ができない。

研究のさらなる発展には、電氣的短絡痕形成過程の解明が不可欠である。

火災現場における電氣的溶融痕の位置から出火場所を推定する方法、いわゆるアークマッピングへの活用が有効であると提唱されている。

しかし、実際の現場の短絡痕の形状は Nicholas Carey[3.1-3.3]によると、多様であり、ケーブル種類の影響があること（NFPA921）も指摘されているなど、現場の短絡痕を適切に評価するための知識・情報が不足している。

Michael R. Keller[3.4]と Cameron J. Novak[3.5]は、PVC ケーブルをコーンヒータで加熱し、短絡時の電圧電流波形を測定しているが、電氣的溶融痕の形状と電圧電流波形との関係を明らかにしていない。

Nicholas Carey[3.1-3.3]及び Larry West[3.6]は、実規模の建物内で火災を発生させ、PVC ケーブルを短絡させ、その時の電氣的溶融痕の形状を観察している。しかし、電氣的に、どのような経過をたどり、電氣的溶融痕ができるか明らかにしていない。

3.1.2 研究の現状と今回の報告

そこで、著者らはコーンヒータを用いて PVC 絶縁ケーブルを加熱

し、短絡痕発生前後の電気波形を捉える研究を行ってきた。

前報[3.7]では、PVC被覆の炭化物を介した「芯線間絶縁材の絶縁性低下（炭化・導電化）による短絡」が起こる場合には、短絡前に漏洩電流（ここでは、線間絶縁物を通して流れる電流を「漏洩電流」と呼ぶ）が観測され（第一のグループ）、一方で短絡前の漏洩電流が観測されない場合（第二のグループ）は、PVC被覆の熔融により「芯線間隔の接近に基づく短絡」に至る傾向があることを報告した（このことは、Babrauskas[3.8]も論文の中で同様のことを述べている）。

短絡前の電流計測から短絡形態が推定できることがわかったので、短絡前電流の変化を熔融痕の大きさとの観点から、分類・検討した。またさらに、実規模実験を行ったところ、Nicholas Carey[3.1-3.3]がアーク短絡によって生じた腐食のような痕跡と言っている特徴的な広範囲熔融痕が形成されたので、短絡前の電流計測結果から形成されるメカニズムを推察したところ、上記分類結果から判断して、短絡直前まで漏洩電流がほとんど観測され接触短絡が起こっていると考えられた。

3.2 絶縁材料の異なる電気ケーブル（日米）の短絡実験

火災現場において、火災の原因調査に携わる調査員は、多くの場合、電気ケーブルに電氣的熔融痕を見つけることができる。火災調査員は、この電氣的熔融痕の発生場所を図化することによって、出火場所をするために有用な情報を得ることができる。

電氣的熔融痕の位置から出火場所を推定する方法を、アークマッピング方式と呼んでいる。

米国では火災調査技術の国際標準ガイドブック NFPA 921[3.9]がある。このガイドブックには、アークマッピング方法の活用方法が記載されており、出火場所推定の科学的なガイドラインとして、官民間問わず、多くの火災調査員に利用されている。

電気ケーブルに発生する電氣的溶融痕の活用に関し、NFPA921は、その外観の特徴に基づいて電氣的溶融痕を識別する方法について説明している。NFPA921は、火災の熱によって芯線が溶融して生ずる溶融痕（熱痕）と電氣的な短絡によって生ずる電氣的溶融痕を区別している。

しかし、NFPA921は電氣的溶融痕の形成に関するプロセスを説明していない。

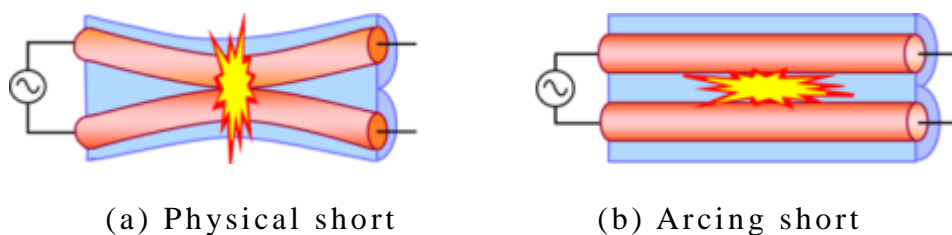


Figure 3.1. Mode model for physical short and arcing short.

Fig.3.1に示すように、電気ケーブルの短絡現象は、芯線同士が接触する接触短絡（Physical short）、いわゆる metal-to-metal contactと、電気ケーブル内の芯線間の絶縁材の劣化によって絶縁材料を介して短絡するアーク短絡（Arcing short）、いわゆる arc through charの2種類に分類される。Babrauskas[3.8]は、短絡は、これら2つのグループに分けられると述べている。

Nicholas Careyは、[3.1-3.3]の区画火災で電氣的溶融痕の位置を考慮し、データを統計的に分析している。Larry West [3.6]の区画火災で発生する電氣的溶融痕の場所と時間を検討している。

電気ケーブルの短絡原因に関する研究[3.10-3.13]もある。これらの研究は、電気ケーブルが短絡時に大量のエネルギーを解放し、火災につながる理由を明らかにしている。また、火災調査のための電氣的溶融痕の活用に関する研究も発表されている[3.14,3.15]。しかし、短絡の前駆現象の調査は行われていない。短絡がどのようなメ

カニズムで発生し,どのような経過をたどり,接触短絡になるのか,アーク短絡になるのか知られていない.これらの電気ケーブルの短絡に関する研究は, Fig. 3.1 に示す 2 つのタイプの短絡現象を区別せずに行われている.

この章では,絶縁材の材質が異なる日本製の PVC 絶縁ケーブル,アメリカ製の PVC NM ケーブルとアメリカの 1920 年代の古い布製絶縁被覆の NM ケーブルを用いて短絡実験を実施し,短絡前の発生する前駆現象としての漏洩電流と電氣的熔融痕の関係を明らかにし,さらに接触短絡とアーク短絡の発生メカニズムに関し,知見を得られた.

さらに, NFPA 921 の [3.9] (9.10.3.1 (3)) で,アメリカ製布ケーブルには,電氣的熔融痕が小さいか,見つけられないことがあったと記載されているが,その理由に関しては,同ガイドブックで明確にされていない.

この研究において,その理由に関し知見を得られたので報告する.本研究の結果は,電氣的熔融痕を用いた出火場所の推定(アークマッピング法)の,科学的な火災調査[3.16,3.17]のための研究のためだけでなく,電気ケーブルから発生する電気火災の防止のための技術の基礎となり得るものである.

3.2.1 実験方法

実験で使用したケーブルを Fig.3.2,3.3.およびその仕様を Table 3.1 に示す.

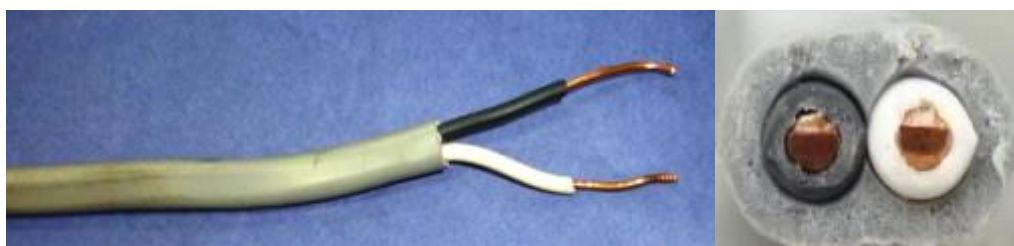


Figure 3.2. Sample cable JP1.

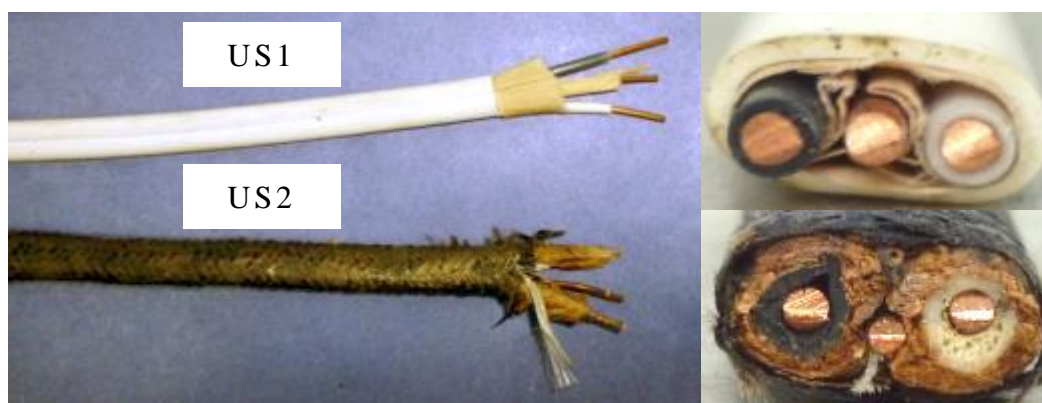


Figure 3.3. Sample cables US1 and US2.

Table 3.1. Dimensions and materials of sample cables, JP1, US1 and US2.

No.	Conductor diameter	Insulating materials	Remarks
JP1	1.600 mm	Each conductor is covered with PVC insulation and PVC sheathing.	Japanese VVF cable See Figure 3.2.
US1	AWG14 1.628 mm	Two conductors covered with PVC insulation and one ground conductor is wrapped in paper. All are covered with PVC sheathing.	PVC NM cable See Figure 3.3.
US2	AWG14 1.628 mm	Two conductors are covered with rubber insulation and wrapped in wax paper. These are wrapped in wax paper together with a ground conductor and are sheathed in cloth.	Cloth NM cable commonly used in the mid-1920s See Figure 3.3.

試料ケーブルに 60Hz, AC100V およびを AC120V 印加し, コーンヒータにより, 55kW/m^2 , 45kW/m^2 , 35kW/m^2 で試料ケーブルを約 20 cm の範囲で加熱した. 各実験とも 5 回実施した. 実験時間は 20 分とし, 20 分経過した時点で, 燃焼も短絡もしなかった場合は, 実験を終了した.

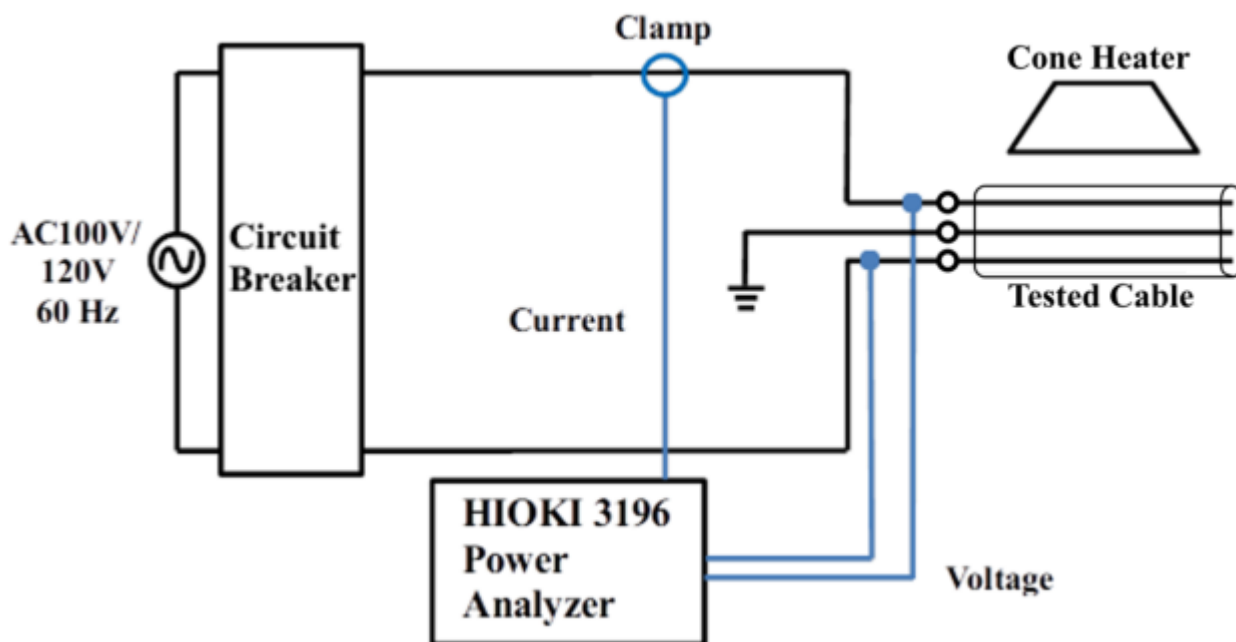


Figure 3.4. Short circuit experiment using a cone heater. (diagram)

実験回路を Fig.3.4 に示す．実験回路には，アメリカ製の定格 20A の熱動式ノーヒューズブレーカ（MCCB）を使用し，短絡時の電圧，電流波形の測定はメモリーハイコーダ（HIOKI 3196）を使用した．サンプリング周波数は，15.36kHz とした．電圧は，試料ケーブル間の電圧を測定した．電流の測定は，クランプ（HIOKI クランプオンセンサ AC500A 9661）を使用した．

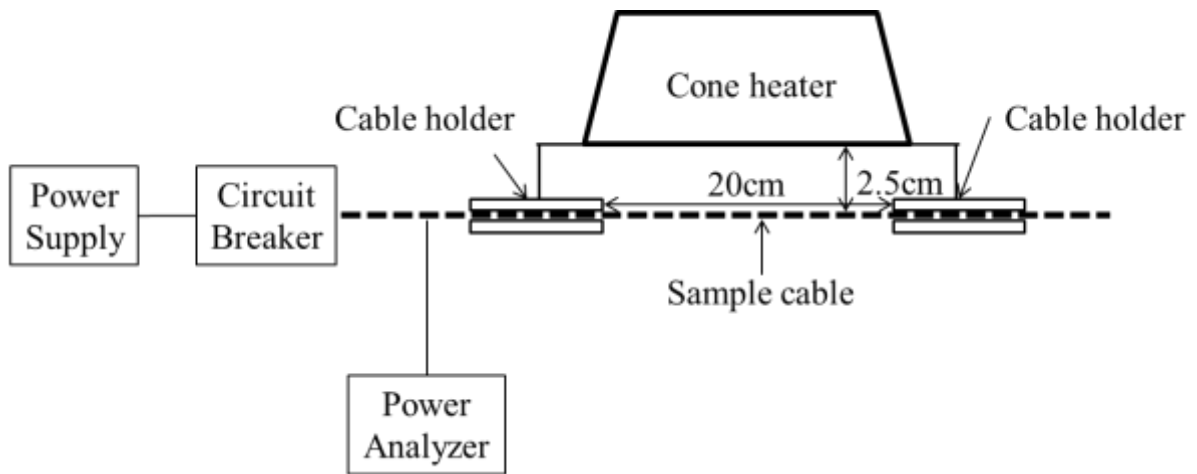
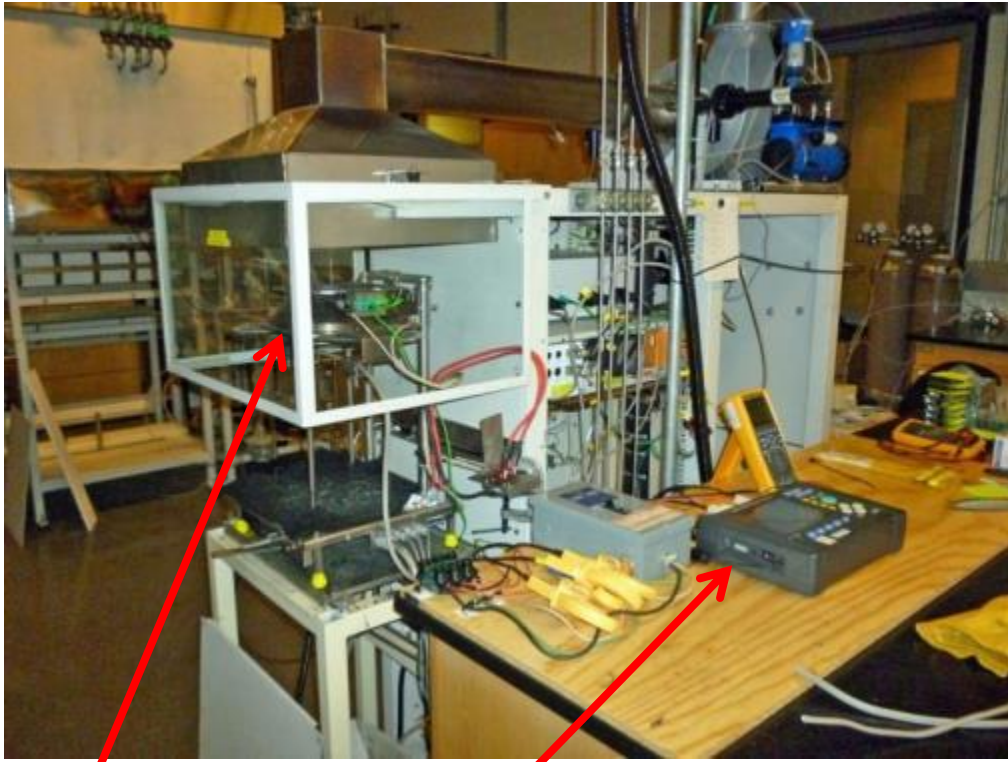


Figure 3.5. Experimental setup

コーンヒータで試料ケーブルを加熱するために、試料ケーブルを固定するための治具を Fig.3.5 に示す。資料ケーブルをコーンヒータからの距離を 2.5cm となるようにした。実験中の状況を Fig.3.6 に示す。

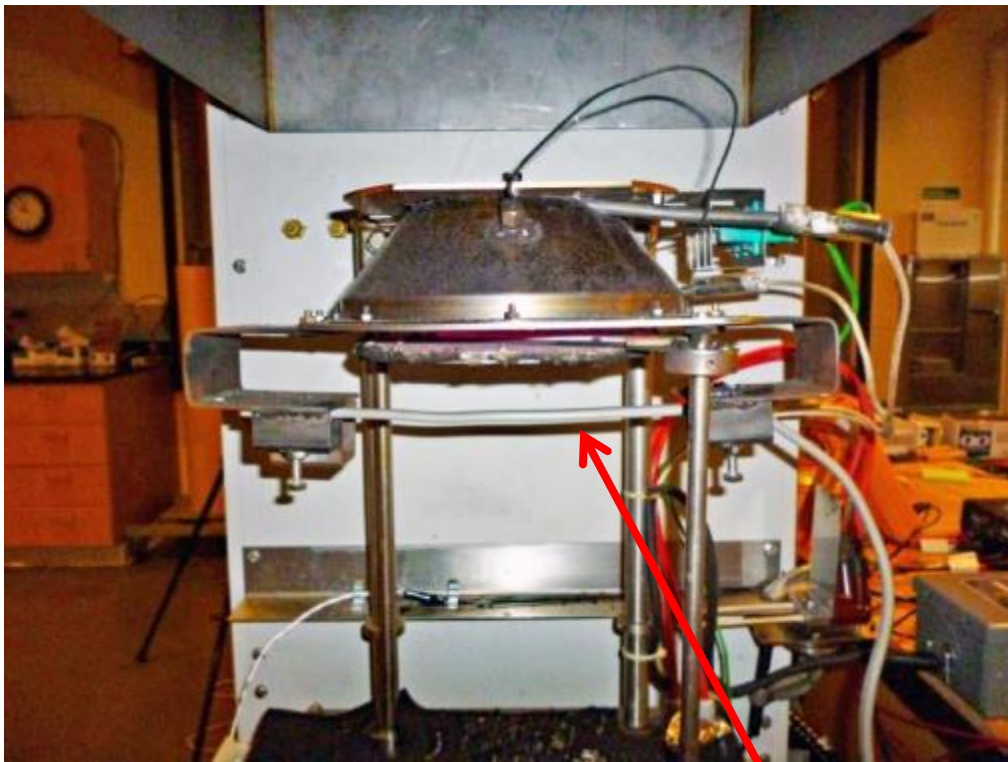
なお、この実験はアメリカ司法省 ATF (The Bureau of Alcohol, Tobacco, Firearms and Explosives) 火災研究所で実施した。



Cone heater

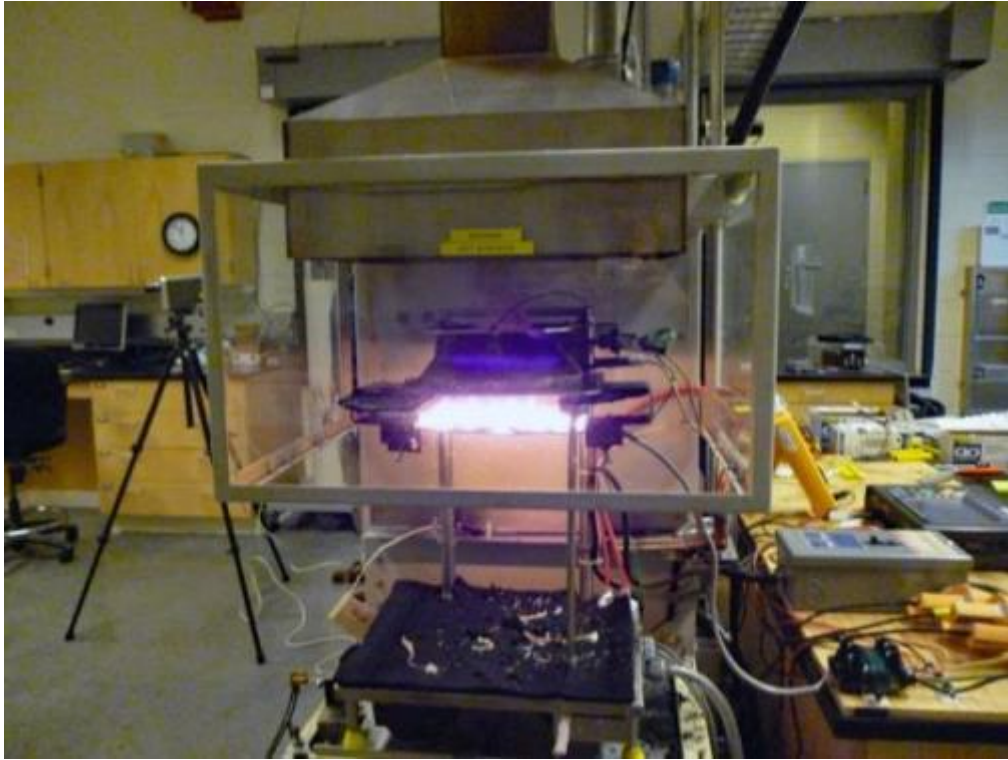
Power analyzer

(a) Actual experimental setup.



Sample cable

(b) Cone heater and sample cable actual setup.



(c) During experimental phase.

Figure 3.6. Experimental setup

3.2.2 実験結果

各ケーブルの代表的な電圧電流波形と電氣的溶融痕の形状を示す。また、第二章で述べたとおり、短絡前の前駆現象として漏洩電流が流れていることが考えられ、その漏洩電流が短絡現象と密接に関係していると考えられたので、短絡前の電流波形を拡大した。

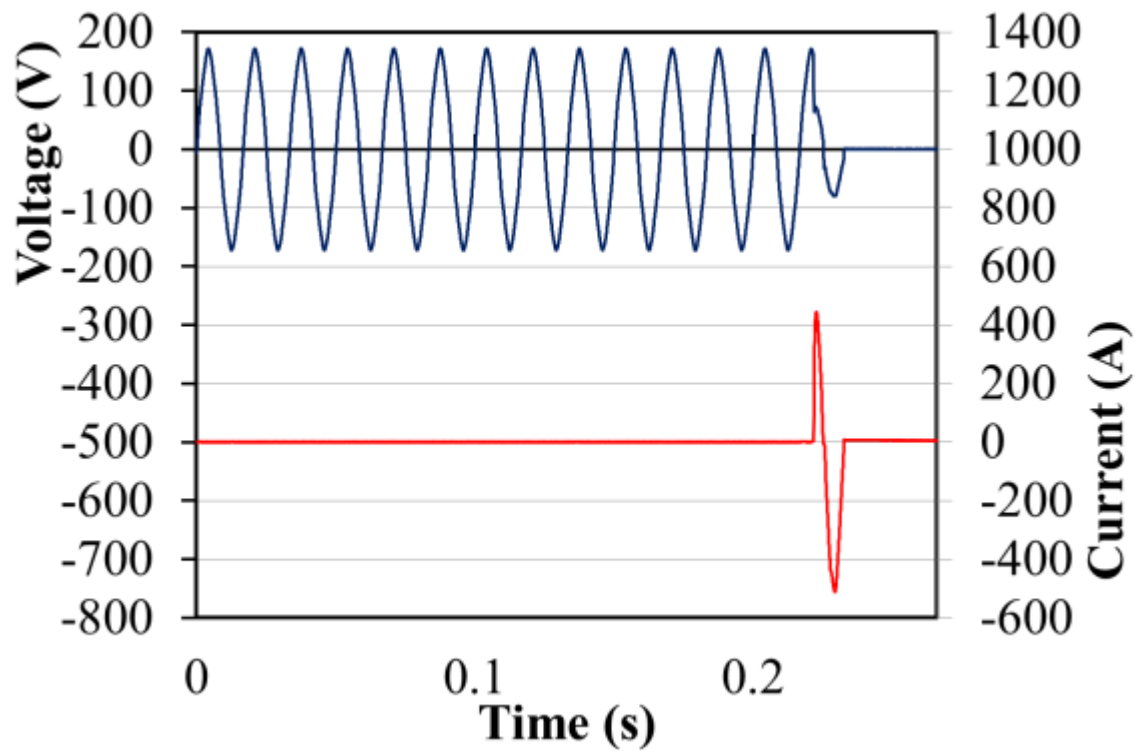


Figure 3.7. (a) JP1, 120 V, 45 kW/m²

Typical voltage and current waveforms.(Upper: Voltage, Lower: Current)

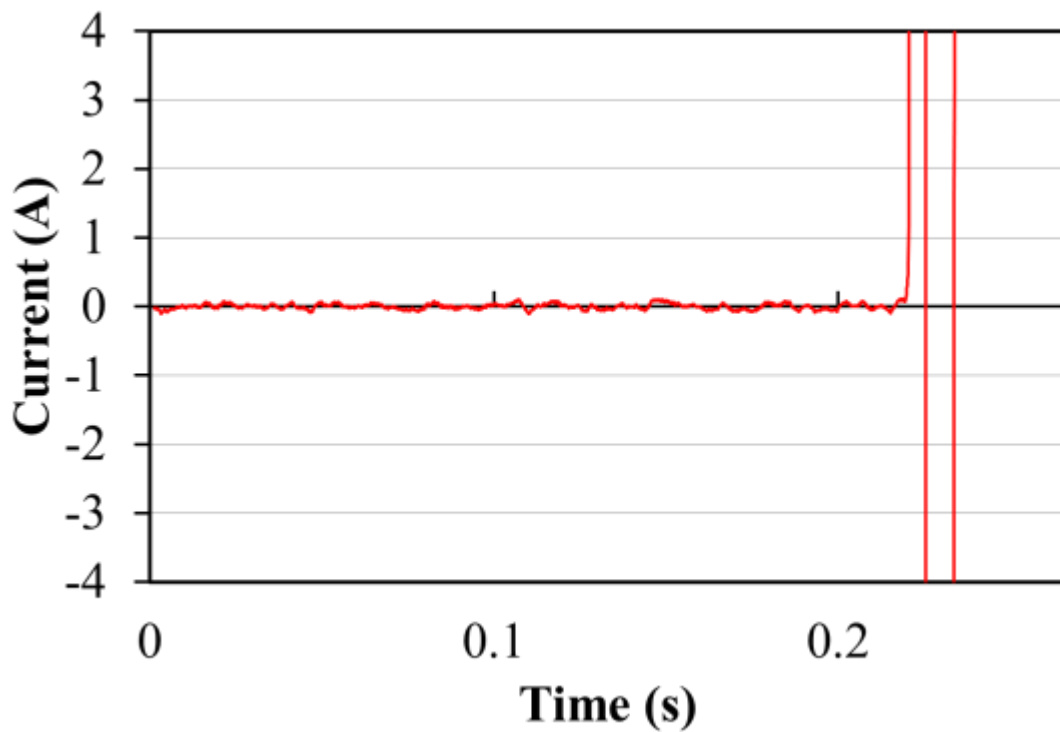


Figure 3.7. (b) Current waveform in Figure 3.7.(a) is enlarged vertically

to show leakage current.

(Current waveforms are smoothed by a moving average method. Upper: Voltage, Lower: Current)



Figure 3.7. (c) JP1, 120 V, 45 kW/m²

The line conductor is at the top of the figure.

The conductor diameter is 1.6 mm.

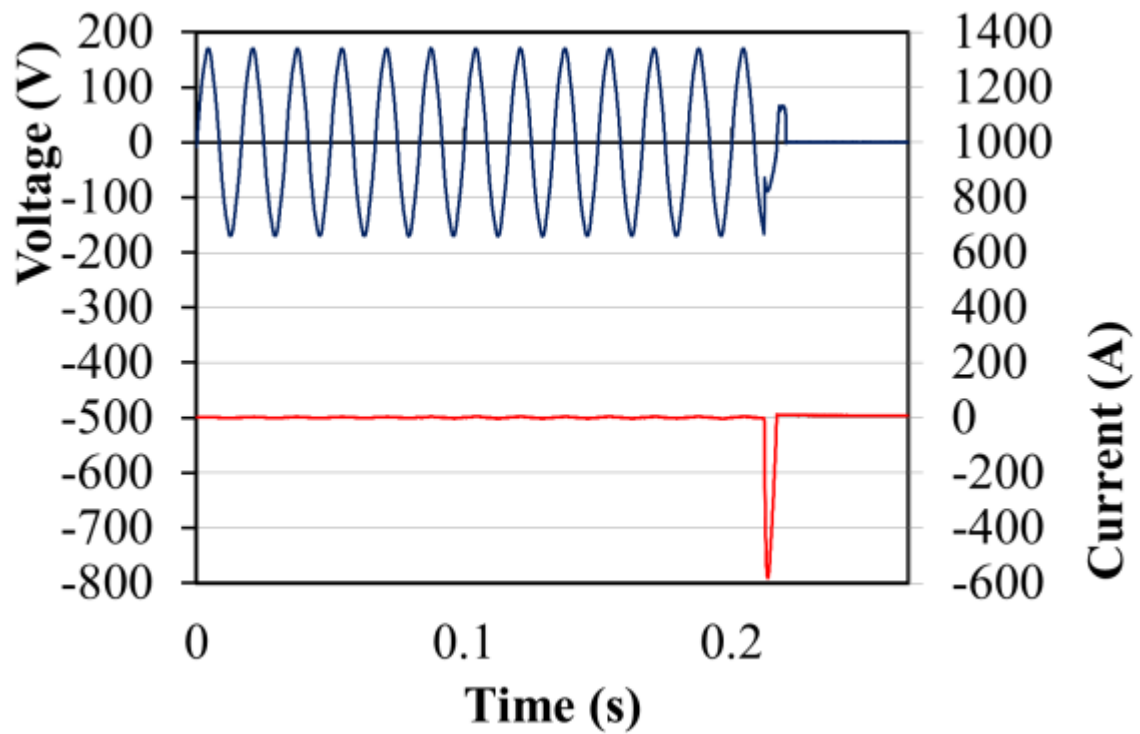


Figure 3.7. (d) JP1, 120 V, 55 kW/m²

Typical voltage and current waveforms. (Upper: Voltage, Lower: Current)

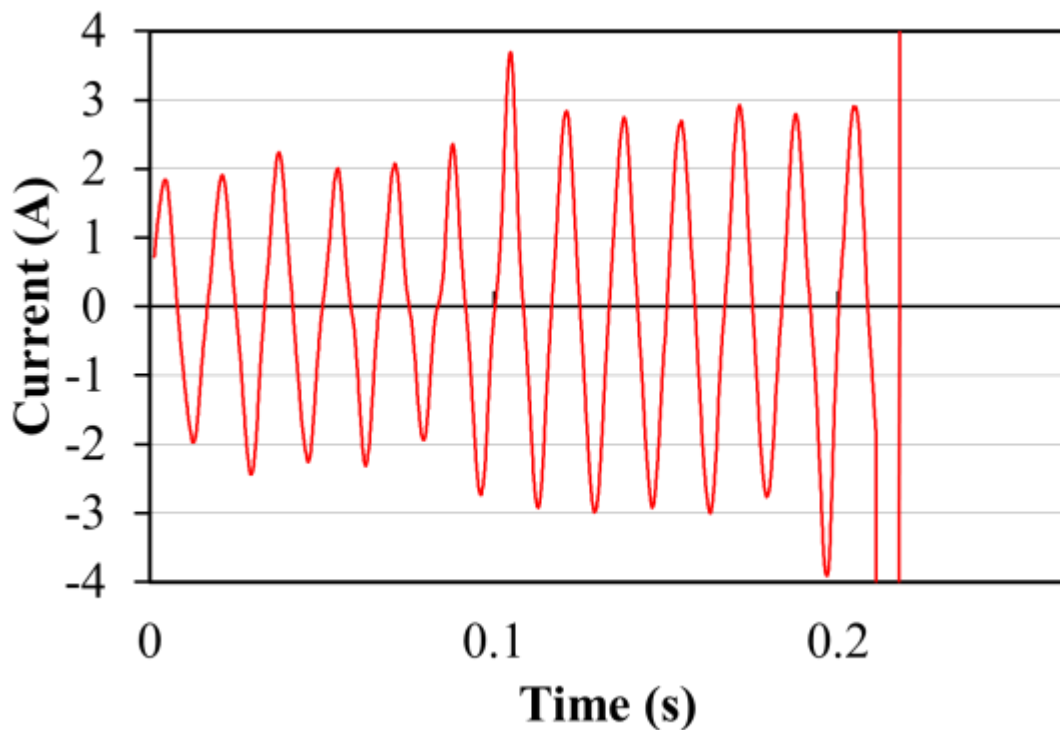


Figure 3.7. (e) Current waveform in Figure 3.7.(d) is enlarged vertically

to show leakage current.

(Current waveforms are smoothed by a moving average method. Upper: Voltage, Lower: Current)



Figure 3.7. (f) JP1, 120 V, 55 kW/m²

The line conductor is at the top of the figure.

The conductor diameter is 1.6 mm.

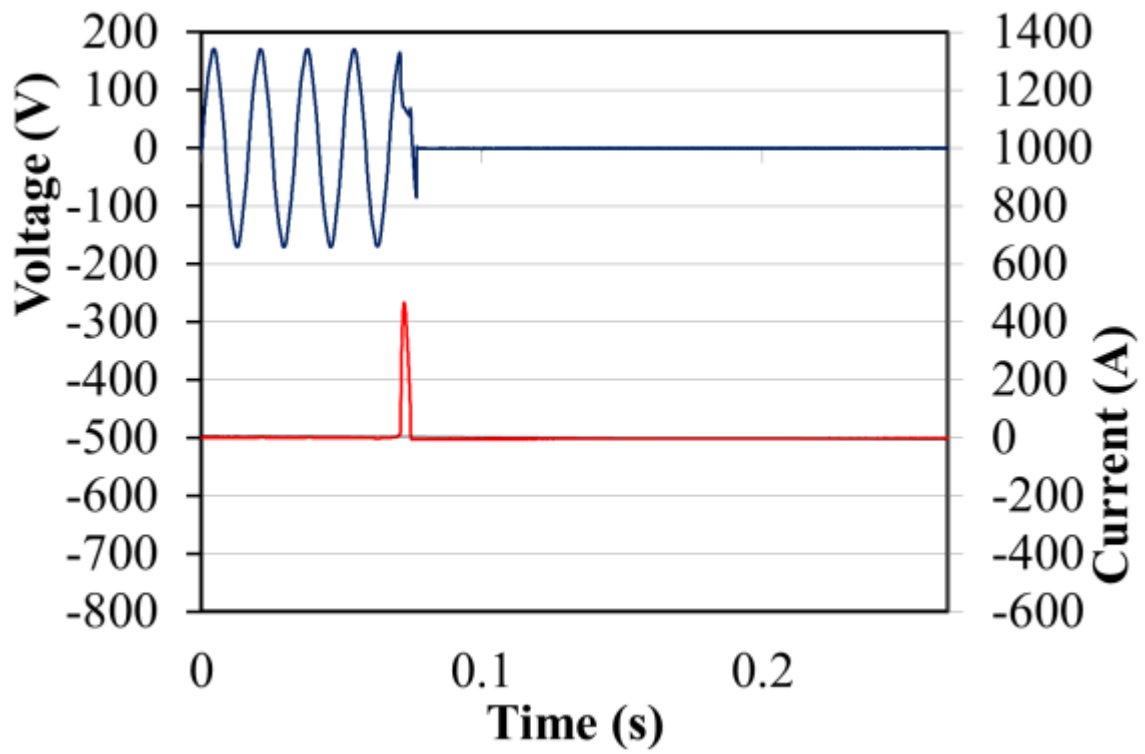


Figure 3.8. (a) US1, 120 V, 55 kW/m²

Typical voltage and current waveforms. (Upper: Voltage, Lower: Current)

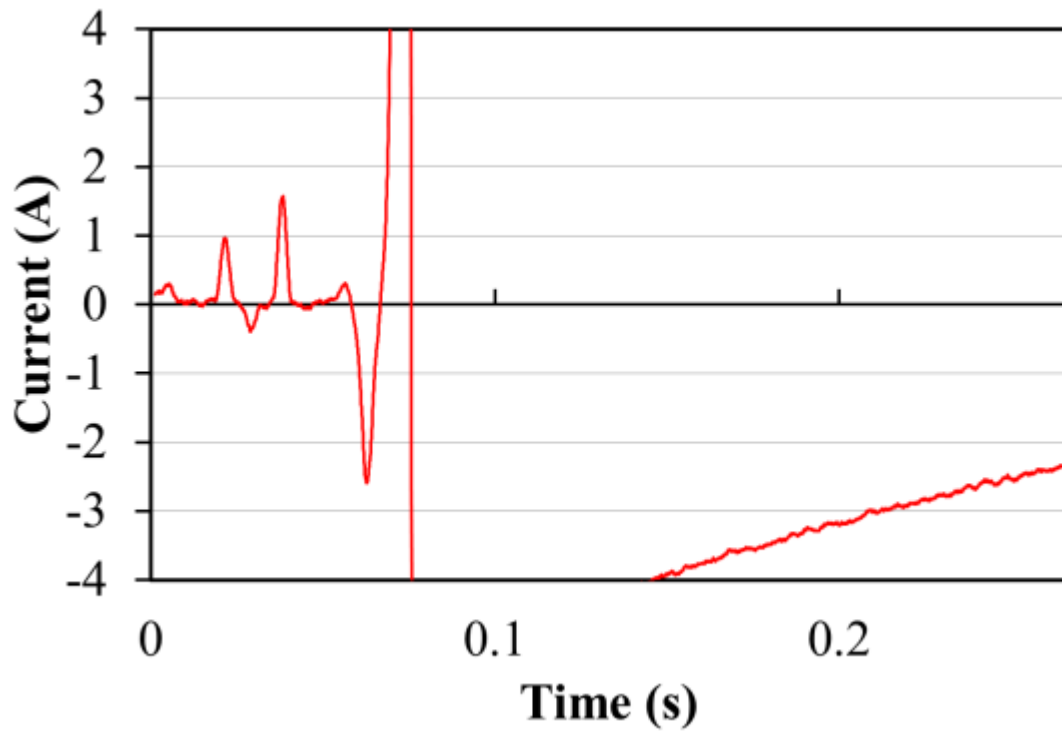


Figure 3.8. (b) Current waveform in Figure 3.8.(a) is enlarged vertically to show leakage current.

(Current waveforms are smoothed by a moving average method.)

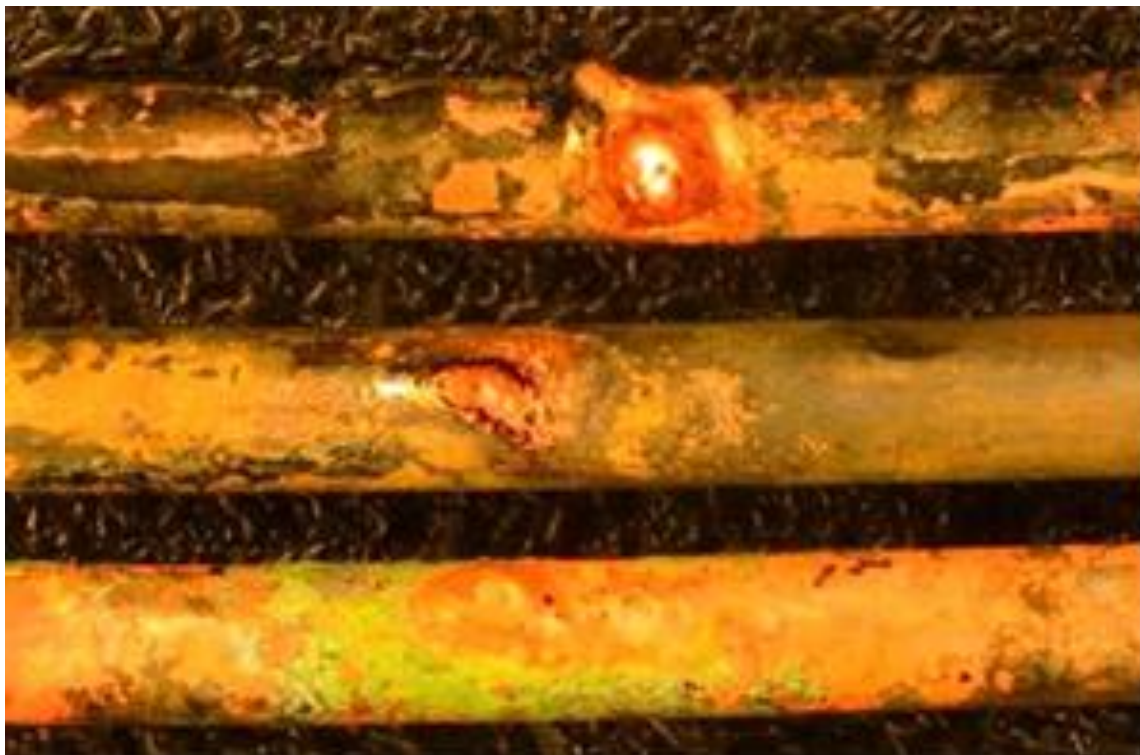


Figure 3.8. (c) US1, 120 V, 55 kW/m²

The line conductor is at the top of the figure.

The conductor diameter is 1.6 mm.

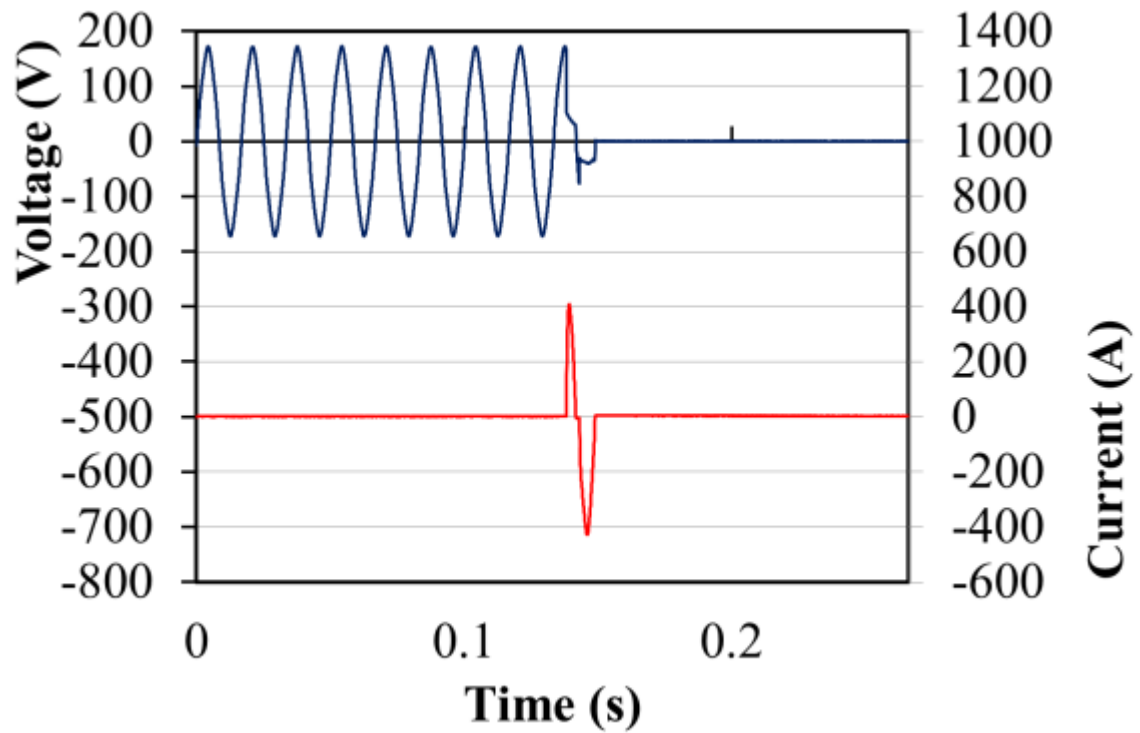


Figure 3.8. (d) US1, 120 V, 35 kW/m²

Typical voltage and current waveforms.(Upper: Voltage, Lower: Current)

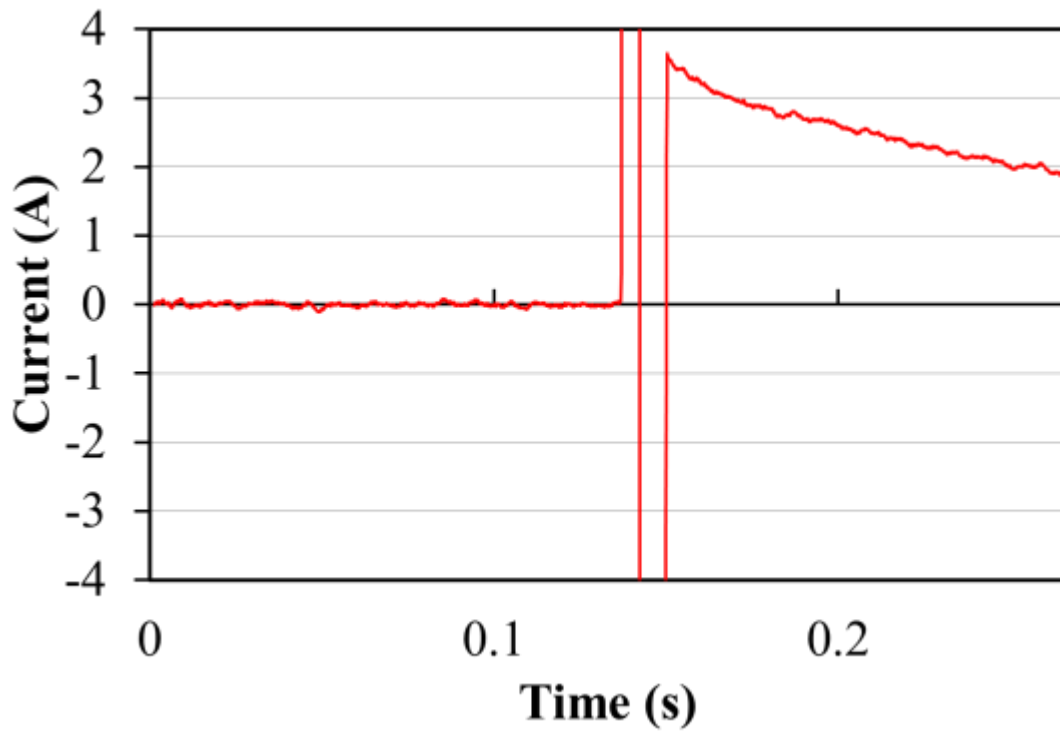


Figure 3.8. (e) Current waveform in Figure 3.8. (d) is enlarged vertically to show leakage current.

(Current waveforms are smoothed by a moving average method.)

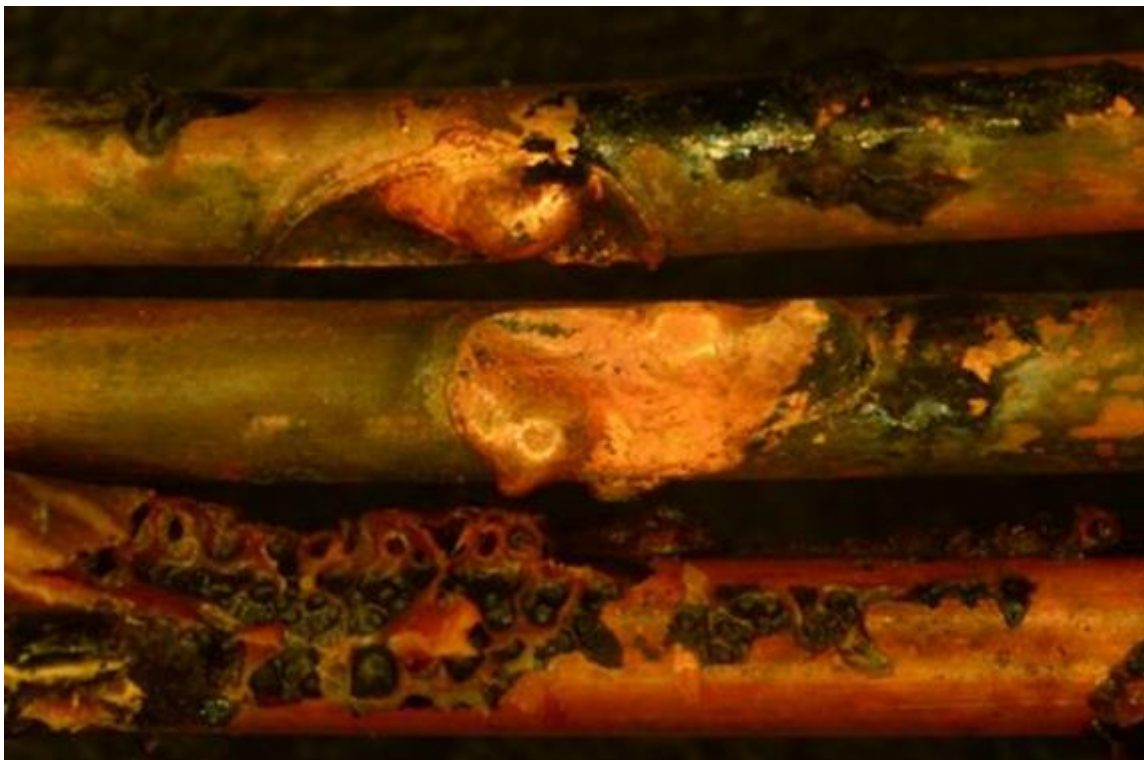


Figure 3.8. (f) US1, 120 V, 35 kW/m²

The line conductor is at the top of the figure.

The conductor diameter is 1.6 mm.

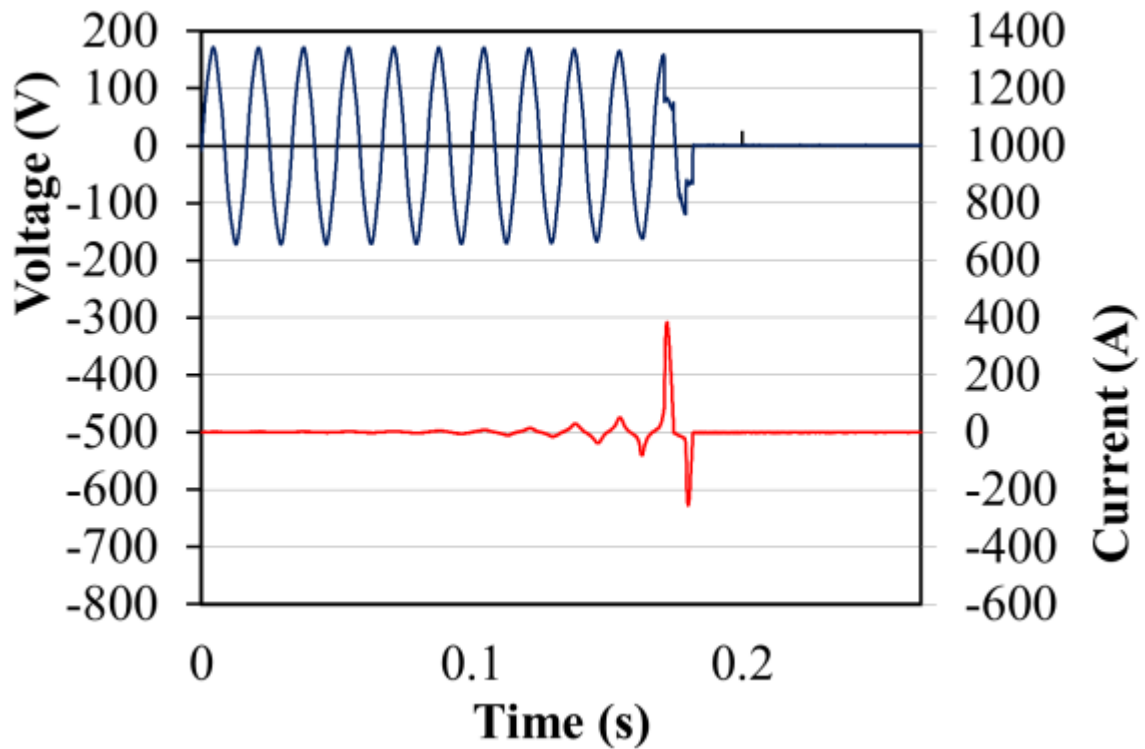


Figure 3.9. (a) US2, 120 V, 55 kW/m²

Typical voltage and current waveforms. (Upper: Voltage, Lower: Current)

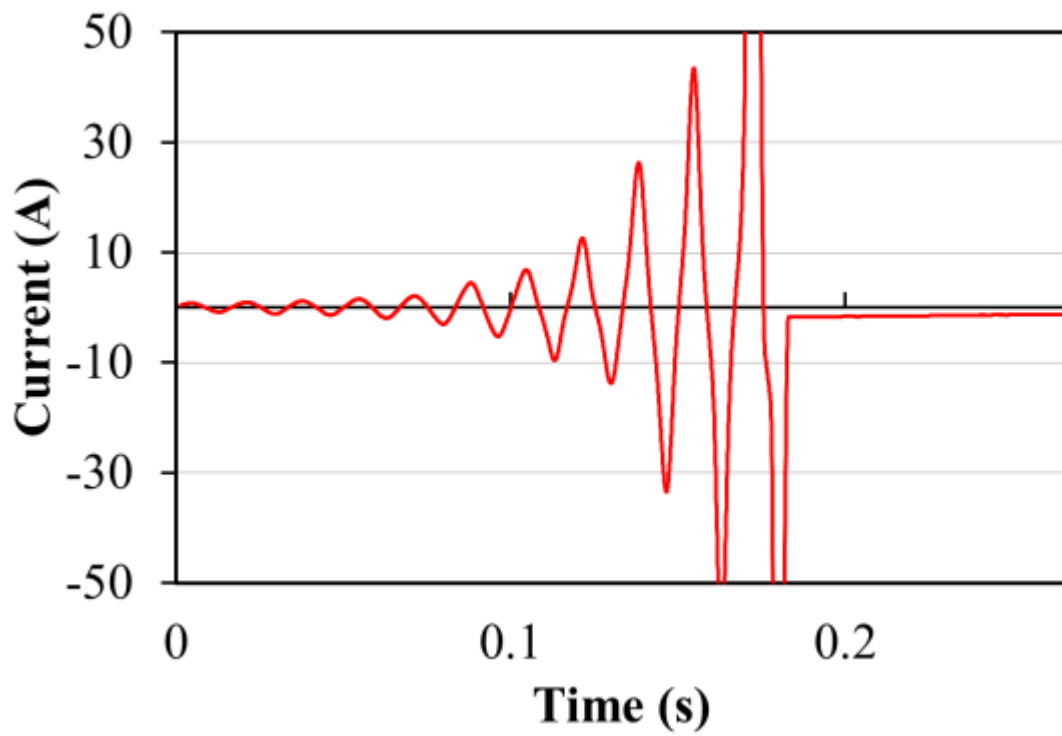


Figure 3.9. (b) Current waveform in Figure 3.9.(a) is enlarged vertically to show leakage current.

(Current waveforms are smoothed by a moving average method.)

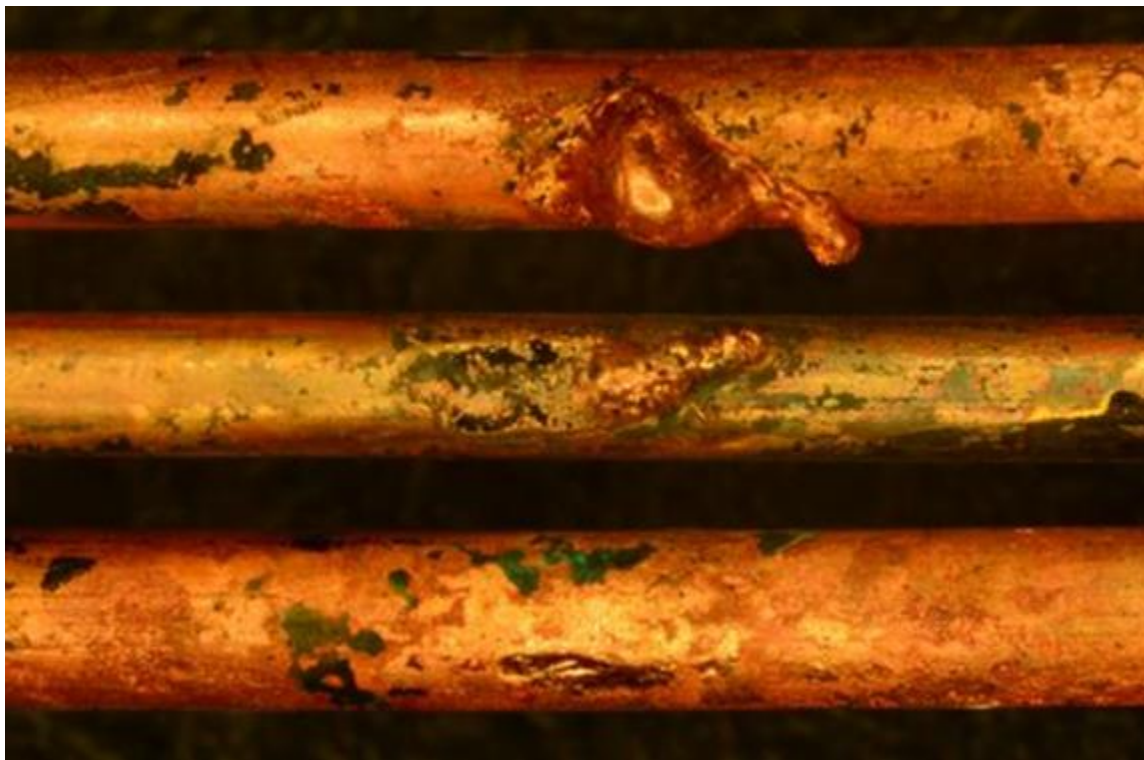


Figure 3.9. (c) US2, 120 V, 55 kW/m²

The line conductor is at the top of the figure.

The conductor diameter is 1.6 mm.

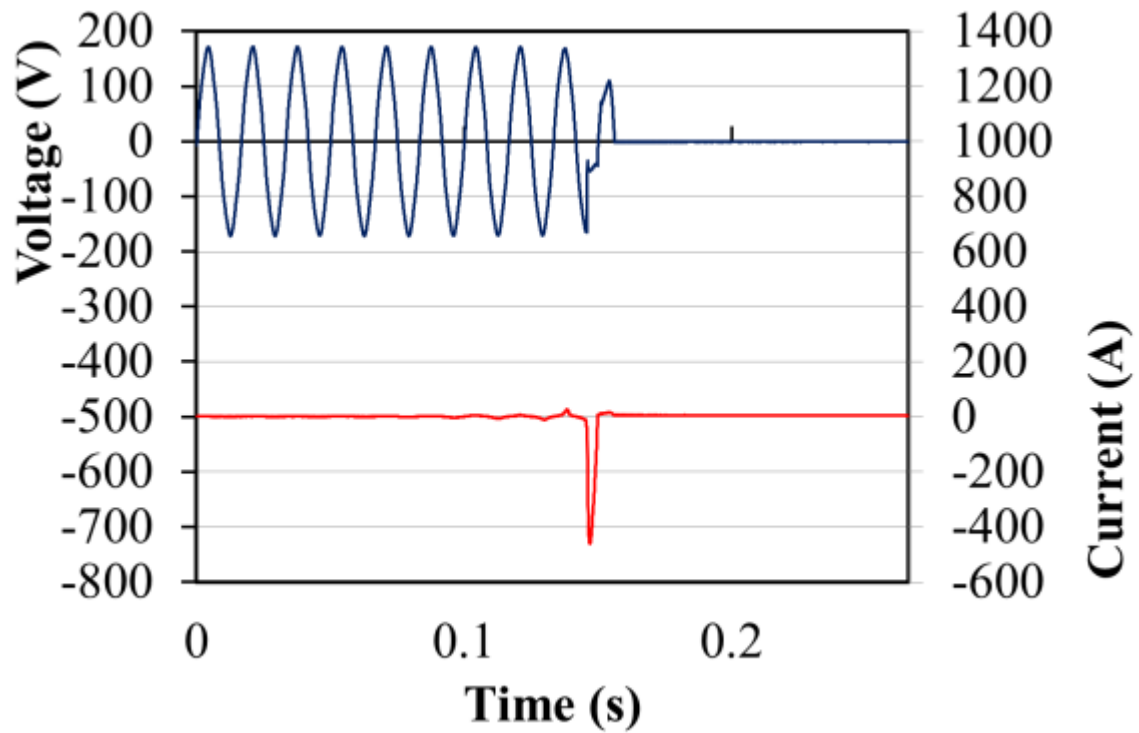


Figure 3.9. (d) US2, 120 V, 45 kW/m²

Typical voltage and current waveforms.(Upper: Voltage, Lower: Current)

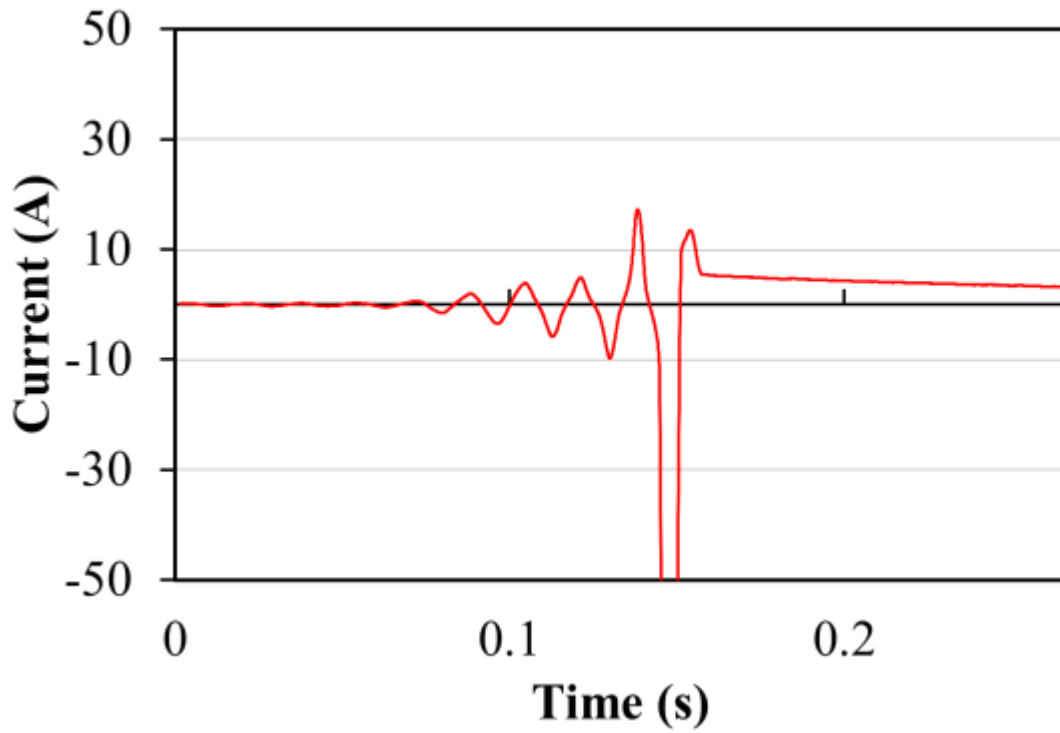


Figure 3.9. (e) Current waveform in Figure 3.9.(d) is enlarged vertically to show leakage current.

(Current waveforms are smoothed by a moving average method.)

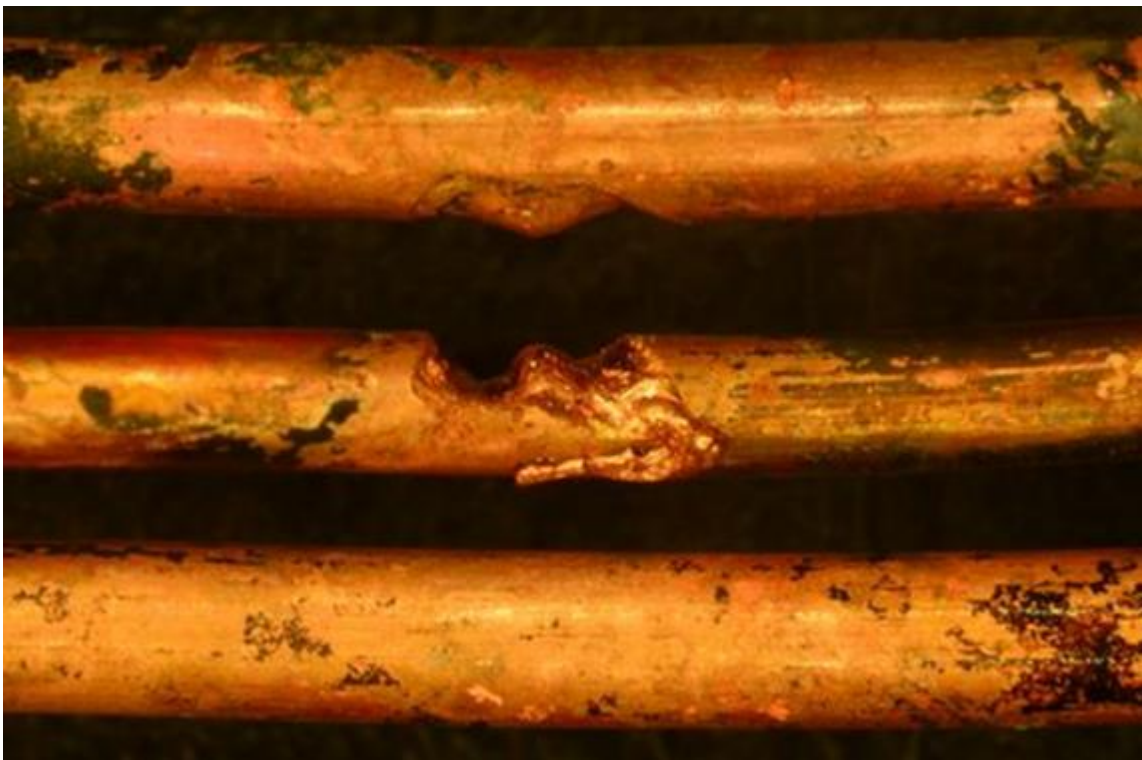


Figure 3.9. (f) US2, 120 V, 55 kW/m²

The line conductor is at the top of the figure.

The conductor diameter is 1.6 mm.

3.2.3 短絡前の前駆現象の漏洩電流

実験結果の各図の(a)によると、短絡後の電流が各実験結果として約 1000 A を超える場合があった。第 2 章の実験結果から短絡前の前駆現象の漏洩電流に着目すると、漏洩電流はミリアンペアオーダーである。短絡電流の測定レンジは 1000 アンペアオーダーであるため、漏洩電流を確認するためには、電流の測定レンジを拡大する必要がある。

短絡実験で測定した電流のレンジを数アンペアオーダーから数十アンペアオーダーに拡大して、電流波形を観察したところ、これまでの実験結果では見過ごされてきたが、漏洩電流があることが認められた。

漏洩電流について、移動平均して波形の平滑化を行ったところ、図に示した US1 および US2 ケーブルは、短絡前に徐々に増大する漏洩電流が認められた。

第 2 章で述べたとおり、これら徐々に増大する電流波形は、試料ケーブルの芯線間の絶縁材の絶縁が劣化し、芯線同士が接触する前に、芯線間の劣化した絶縁材を介して、電流が流れるためであり、アーク短絡が起きたことを示している。

一方で、JP1 ケーブルの漏洩電流を観察すると、ほとんど流れていないことが分かる。これは第 2 章で述べたとおり、試料ケーブルの芯線間の絶縁材の絶縁が保たれた状態で、芯線同士が接触するためであり、接触短絡が起きていることを示している。

各実験結果から、短絡前の漏洩電流を確認することによって、接触短絡が起きているのか、アーク短絡が起きているのか識別が可能

と考えられた。

3.2.4 漏洩電流と電氣的溶融痕の關係

実験結果から、短絡実験においても漏洩電流が確認できたので、漏洩電流と電氣的溶融痕の關係を考察した。

漏洩電流は、短絡前の3サイクル分の電流の実効値を求めた。また、短絡時に発生した電氣的溶融痕の大きさを表す指標として、幅と長さの積（面積）を求めた（Fig. 3.10）。面積の求め方は、電氣的溶融痕の幅と長さから求めた。

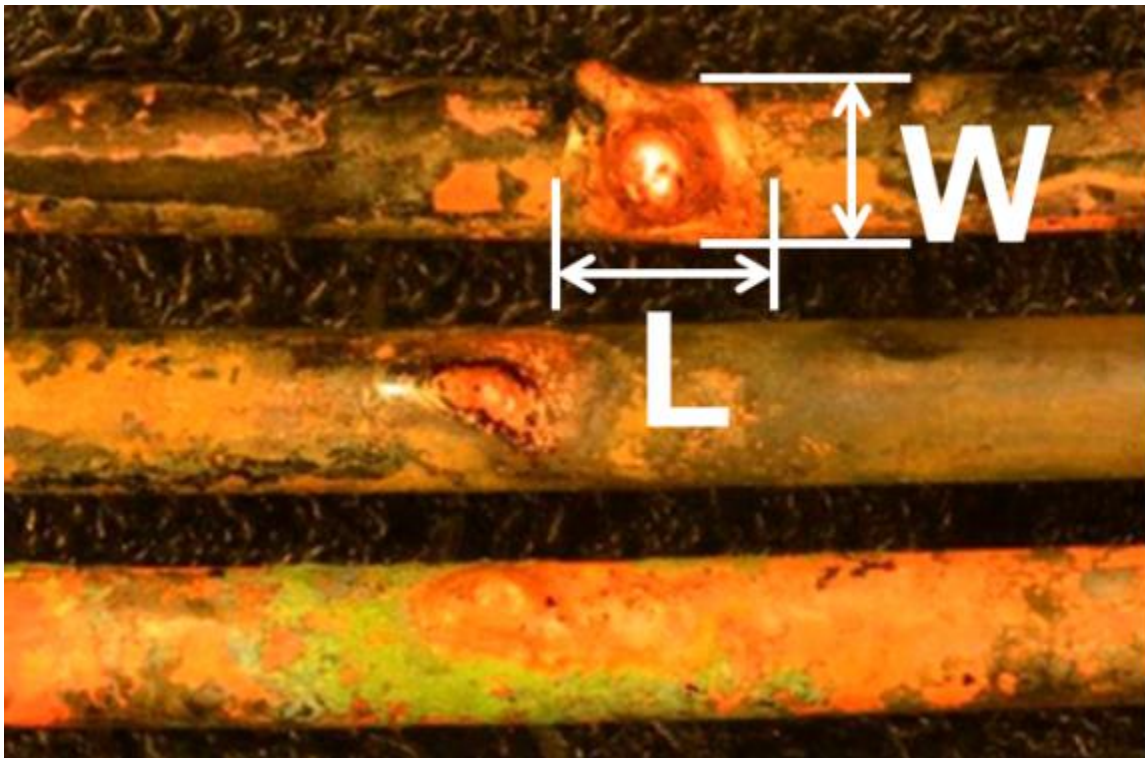


Figure 3.10. Using width and length to calculate the area of arc marks in mm^2

電氣的溶融痕の面積と漏洩電流の実効値の關係を Fig.3.9 に示す。Fig.3.11 のうち、US2 ケーブルの場合、漏洩電流が 20A を超える場合もあった（図中、黒矢印で示す）。

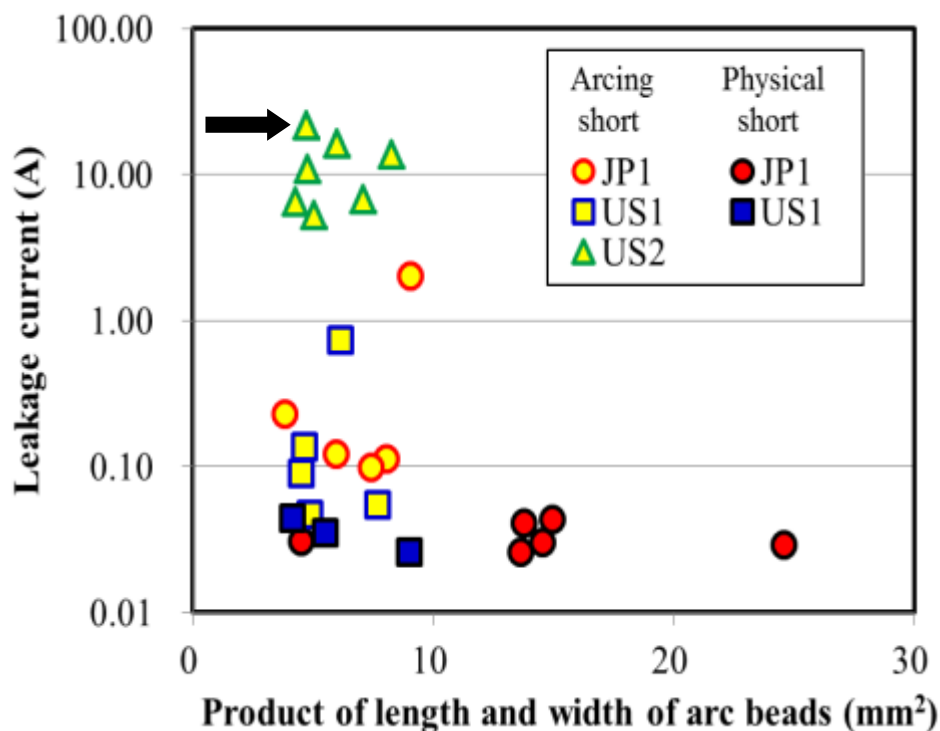


Figure 3.11. Arc bead size and leakage current.

Data points indicated with arrows exceeded 20 A of leakage current.

No physical short was observed in the #US2 cable.

Fig. 3.11 に示すように、漏洩電流が大きいケーブルでは電氣的溶融痕が小さい傾向にあることが判明した。

漏洩電流が小さい場合は、芯線間の絶縁材の絶縁が保たれた状態で芯線が接触するため、短絡電流が狭い範囲に集中して流れ、電氣的溶融痕が大きくなったものと考えられる。これは、接触短絡が起きたためと考えられる。

また、漏洩電流が大きい場合は、芯線が接触するよりも前に、芯線間の絶縁材を介在した電流が広範囲に流れる状態になるため、電氣的溶融痕が小さくなったものと考えられる。これは、アーク短絡

が起きたためと考えられる。

Fig. 3.11 に示すように，JP1 ケーブルはアメリカのケーブルと比較して短絡痕が大きいという結果であった。その理由として，外装及び芯線被覆とも PVC で出来ており，PVC が約 200℃で溶融するため，芯線間の絶縁が完全に炭化しないうちに，芯線の 1 箇所接触し，接触短絡が起きやすかったということが考えられる。

一方，US1 及び US2 ケーブルは短絡痕が小さいという結果であった。US1 ケーブルは外装が PVC であるが，被覆に一部紙が使われている。US2 ケーブルは外装が布とワックスペーパーであり，被覆が天然ゴムである。これらの絶縁材料が芯線の接触を妨げるとともに，短絡電流を分散し，アーク短絡に移行しやすかったことがその理由として考えられる。

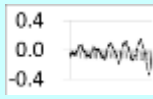
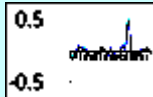
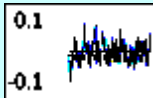
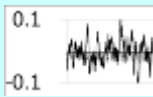

また，NFPA921 には布ケーブル（US2 ケーブル）に関して，短絡時に電氣的溶融痕が小さいか，分からない時があったと記載されている。その理由に関しては，明確な回答がなかった。





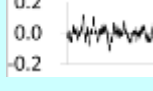
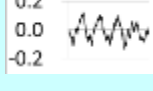

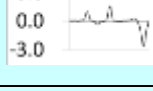
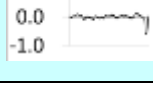
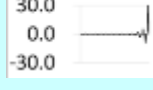
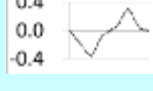
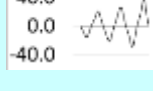

本研究において，US2 ケーブルの電氣的溶融痕は小さい傾向にあることが判明した。この結果は，NFPA921 の記載内容に追従するものである。US2 ケーブルは外装が布とワックスペーパーであり，被覆が天然ゴムである。これらの絶縁材料が芯線の接触を妨げるとともに，短絡電流を分散し，アーク短絡に移行しやすかったことがその理由として考えられる。





また，US2 ケーブルの短絡前の漏洩電流は，20A を超える場合も認められた。このことは，一般家庭に使用されているノーヒューズブレーカの定格容量が 20A の場合は，短絡する前の漏洩電流によって，ノーヒューズブレーカーが作動する可能性があり，NFPA921 に記載されている「理由は判然としないが，電氣的溶融痕ができない時がある」の理由が，この漏洩電流によって説明が可能と考えられる。

これら実験結果を表 3.2 に示す.

Table.3.2. Experimental result

番号	実験番号	溶融痕の 大きさを表 す指標(溶 融痕の長 さ×幅) (mm ²)	短絡前3サイクル分の漏洩電流の平 均実効値(mA)				短絡性状
			JP1	US1	US2	計算範囲の 波形	
1	JP1_100V_55_01	6.0	122				アーク 短絡
2	JP1_100V_55_02	8.0	113				アーク 短絡
3	JP1_100V_55_03	13.6	26				接触短絡
4	JP1_120V_35_01	24.6	29				接触短絡
5	JP1_120V_35_04	13.8	41				接触短絡
6	JP1_120V_35_05	14.6	30				接触短絡
7	JP1_120V_45_01	7.4	98				アーク 短絡
9	JP1_120V_45_02	15.0	43				接触短絡
9	JP1_120V_55_01	3.8	227				アーク 短絡
10	JP1_120V_55_02	4.5	31				接触短絡

11	JP1_120V_55_03	9.0	2020				アーク 短絡
13	US1_120V_35_01	9.0		26			接触短絡
14	US1_120V_35_03	4.1		44			接触短絡
15	US1_120V_35_04	4.9		47			アーク 短絡
16	US1_120V_45_02	5.5		35			接触短絡
17	US1_120V_45_04	7.7		55			アーク 短絡
18	US1_120V_45_06	4.5		90			アーク 短絡
19	US1_120V_55_01	6.1		729			アーク 短絡
20	US1_120V_55_03	4.6		137			アーク 短絡
21	US2_120V_35_02	7.1			6760		アーク 短絡
22	US2_120V_40_02	5.3			なし		アーク 短絡
23	US2_120V_45_01	6.0			16100		アーク 短絡
24	US2_120V_45_02	4.3			6460		アーク 短絡

25	US2_120V_45_03	5.1			5260		アーク 短絡
26	US2_120V_55_01	4.7			21400		アーク 短絡
27	US2_120V_55_02	4.8			16800		アーク 短絡
28	US2_120V_55_03	8.3			13700		アーク 短絡

3.2.5 漏洩電流と短絡形態象の関係

実験結果の漏洩電流をさらに精査し、短絡形態について検討した。漏洩電流 I_L については、徐々に増大して短絡に至る場合、短絡直前に急増する場合、あるいは不規則に大きな電流が出現しながら短絡に至る場合などがあり、それぞれの大きさを単純には比較できない。そこで、ここでは、短絡直前の漏洩電流ピーク値 I_{L0} 、短絡 3 サイクル前の漏洩電流ピーク値 I_{L3} 、及び短絡前 3 サイクル分の漏洩電流の平均実効値 $I_{L_{av}}$ を漏洩電流の目安として、実験結果相互の比較を行った。

その結果、以下に示す 3 種類の特徴を持つ漏洩電流があることが判明した。

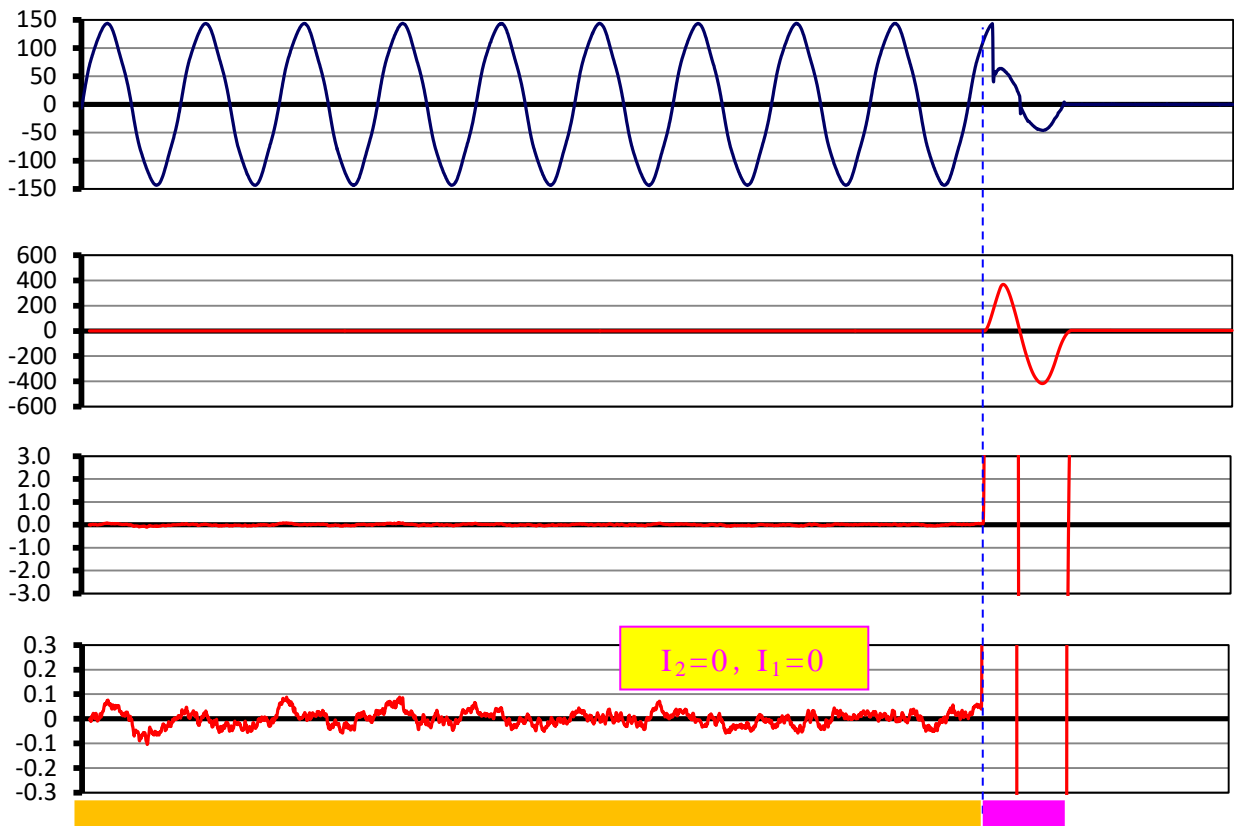


Figure 3.12. Typical waveform 1 JP1_100V_55_03 ● Physical short

漏洩電流がほとんど観測されない状態から，突然に大電流が流れ，これに続いてアーク放電が発生しており，典型的な接触短絡を示す電流の変化と考えられる．

代表的な溶融痕の形状と短絡前後の電圧電流波形を Fig. 3.12 に示す．短絡前電流が最も小さいグループである．その短絡前電流は，高い周波成分を含んだ振幅が±約 0.1A 以下のノイズとみられ，商用周波数の波形が認められない．

特徴 1 は，芯線間の絶縁が保たれた状態で，芯線が接触するため，短絡前の漏洩電流はほとんど流れない．芯線間の絶縁が保たれた状態で，芯線が面接触に近い状態で接触し，その接触した前後でアークが発生す

る場合がある。接触した箇所の前後で放電が起きるため、電氣的溶融痕が1センチ程度の広範囲に発生する場合がある。その時は、接触した前後にも溶融痕が発生して、その各溶融痕は小さい。

JP1 と US1 は絶縁物の主体が塩ビであるため、芯線間隔の接近に基づく短絡が起こりやすく、短絡前の漏洩電流が比較的小さかったと考えられる。

これらは接触短絡が起きたものと考えられる。

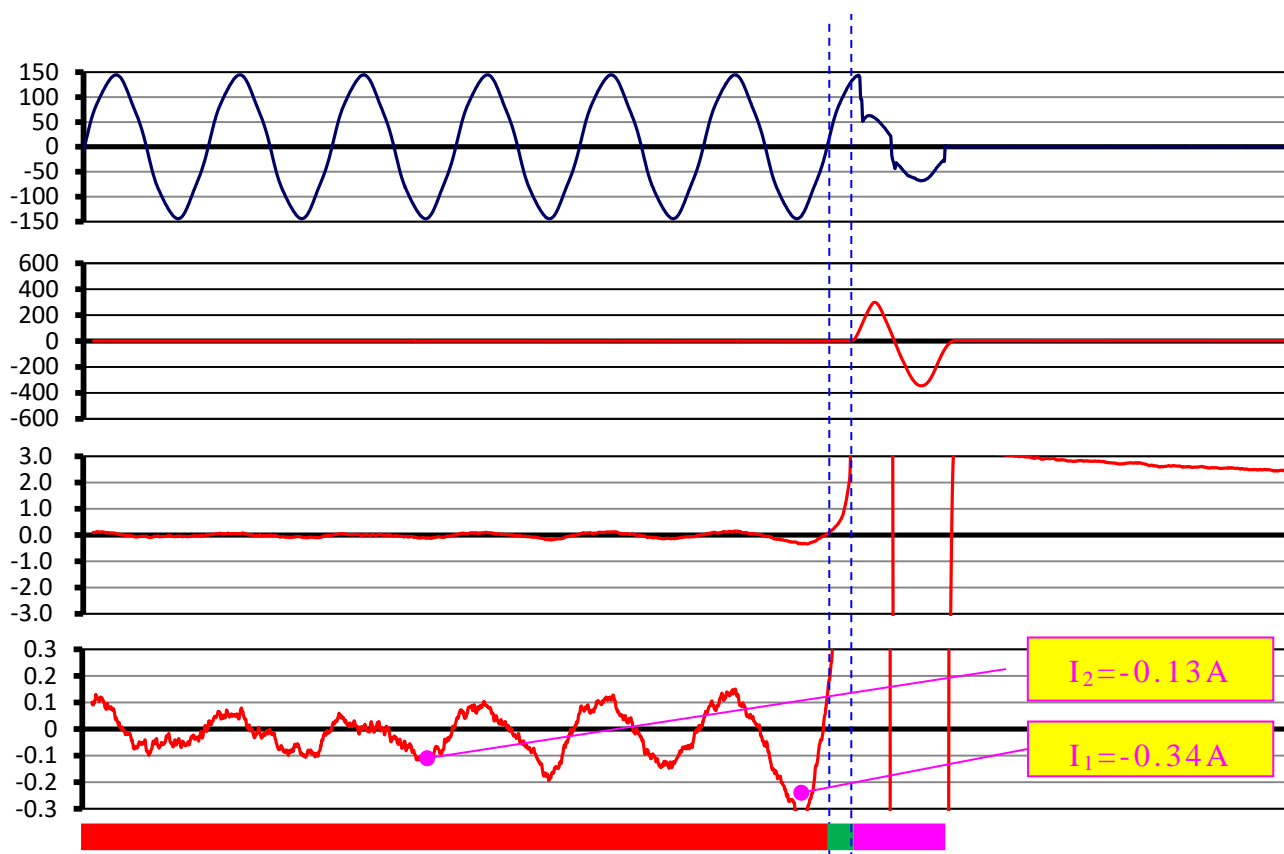


Figure 3.13. Typical waveform 2 JP1_100V_55_01 ○ Arcing short

0.1A程度（商用周波数成分が認められる）から突然大電流に変わるのではなく、若干の時間（緑色）を経てから大電流に変わっている。

代表的な溶融痕の形状と短絡前後の電圧電流波形を Fig. 3.13 に示す。このグループは、ノイズ成分の重畳があるものの、商用周波数の交流波形が明確に認められ、線間絶縁物を通して漏洩電流が流れたことが確認

される。漏えい電流はピーク値で約 0.3A 以下である。電流値は安定しないが、短絡に向かって徐々に増大する傾向にある。わずかに短絡前に漏洩電流が流れる。電氣的溶融痕は特徴 1 のように広範囲に分布せず、全体に小さい傾向にある。

特徴 2 の電圧電流波形を観察すると、短絡前にピーク値で 0.3A 以下の漏洩電流が流れていることが分かる。芯線が接触しない状態で電流が芯線間に流れるため、電氣的溶融痕は小さい傾向にある。芯線間の絶縁材の絶縁が劣化するため、短絡前に漏洩電流が流れる。漏えい電流は、明らかな正弦波でなく半サイクル程度の短時間であり、持続的ではない。

短絡直前の短時間のみ、絶縁物を通した導電電流が流れたと考えられる。この導電電流は、絶縁物の炭化ではなく、むしろ芯線間の距離が接近したことに起因して起きたのではないかと推察される。

これらは、アーク短絡が起きたものと考えられる。

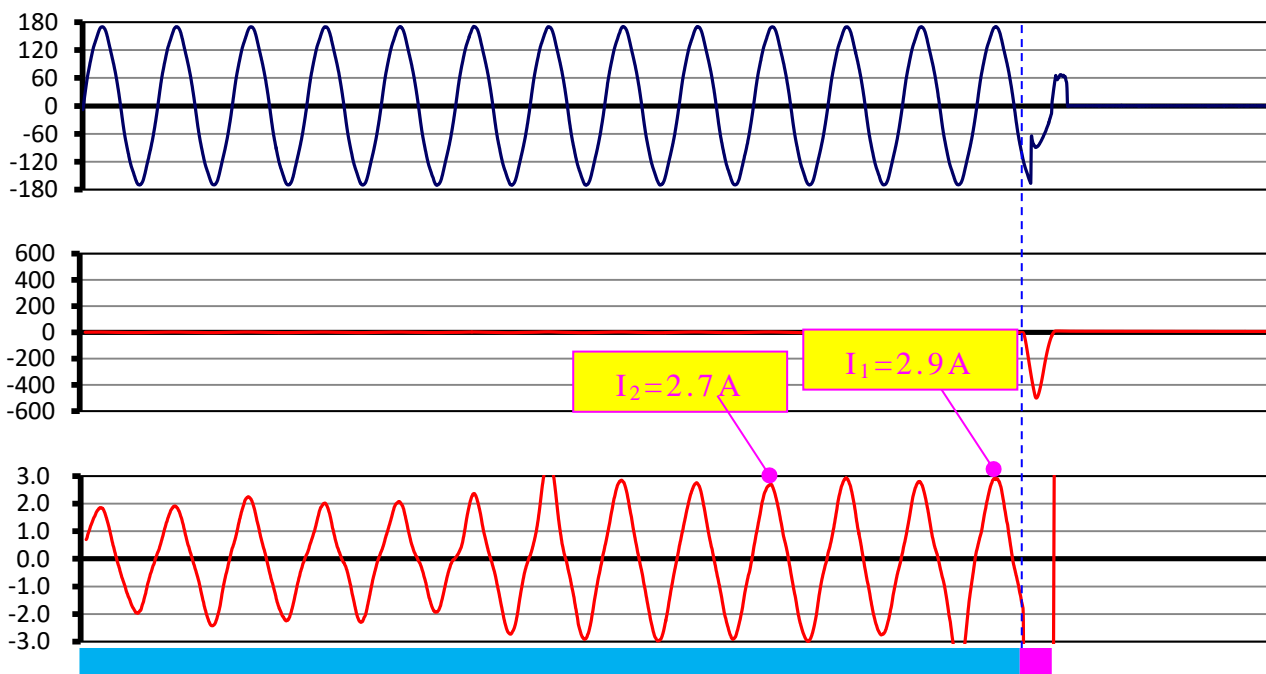


Figure 3.14. Typical waveform 3 JP1_120V_55_03 ○ Arcing short
徐々に増大する 3A 程度の電流が続いた後に大電流に変わる。

代表的な溶融痕の形状と短絡前後の電圧電流波形を Fig.3.14 に示す。短絡前の漏洩電流の波形は、商用周波数の、ほぼ正弦波である。漏洩電流は 0.3A を超え、短絡が近づくにつれて徐々に増大する傾向がある。短絡直前の漏洩電流ピーク値は数 A から 20A を超える場合もある。電氣的溶融痕は特徴 2 と同程度であり、小さい傾向にある。これらはアーク短絡が起きたものと考えられる。

特に、US2 ケーブルにおいては、この漏洩電流が大きく、20A を超える場合も認められた。

3.3 考察

3.3.1 短絡時におけるアーク短絡と接触短絡の違い

アーク短絡と接触短絡の違いは、短絡前に正弦波の漏洩電流があるか否かによって識別できると考えられる。

アーク短絡は、芯線が接触しない状態で芯線間の絶縁が劣化し、炭化した状態になるため芯線間に連続的に正弦波の漏洩電流が発生するはずである。しかし、これまでの実験に加え実大実験の電流波形を精査したところ、漏洩電流が増大してアーク短絡に発展する傾向は、0.2~0.3A 以上のときであった。したがって、接触短絡とアーク短絡を分類する閾値としては、約 0.3A が最も適当(reasonable)な値と考えられ、短絡前に 0.3A 以上の交流電流波形の存在が明確に認められた場合はアーク短絡と分類した。

JP1 と US1 は絶縁物の主体が塩ビであるため、芯線間隔の接近に基づく短絡が起こりやすく、短絡前の漏洩電流が比較的小さかったと考えられる。US1 と比較して JP1 では電氣的溶融痕の面積が大きい傾向があったのは、JP1 が塩ビのみであったために広範囲で平行状態を保ったまま芯線が接近し、1 箇所短絡が起きたときに広範囲に波及しやすかったが、US1 では紙があったために広範囲に波及

することはなかったと考えられる。US2 は塩ビではないので芯線が接近することなく、導電化による短絡しか起こらなかったと考えられる。

3.3.2 接触短絡とアーク短絡の時の発生機序

実験結果から、US1 および US2 ケーブルの電氣的溶融痕は、JP ケーブルの電氣的溶融痕よりも小さい傾向にあった。US1 および US2 ケーブルでは、電氣的溶融痕は小さい傾向にあり、漏洩電流は大きい傾向にあることが判明した。特に US2 ケーブルは、漏洩電流が大きく、20A を超える場合があった。JP1 ケーブルは、電氣的溶融痕が大きく、漏洩電流が小さい傾向があった。

実験結果から、漏洩電流が大きい場合には、アーク短絡が発生し、漏洩電流が小さい場合には、接触短絡が発生していることが判明した。

アーク短絡の場合、電気ケーブルの芯線間の絶縁材の絶縁が劣化し、短絡前に劣化した絶縁材料を通して流れる漏洩電流が観察される。これは、*arcing through char* として知られている。

物理的な短絡は、電気ケーブルの芯線が直接接触するときに発生する。短絡前の漏洩電流は小さく、芯線間の絶縁材の劣化はない。この直接的な *metal to metal contact* として知られている。

US1 ケーブルは、芯線間の絶縁材として PVC と紙を使用している。US2 ケーブルは、芯線間の絶縁材として布、紙および天然ゴムを使用している。JP1 ケーブルは芯線間の絶縁材として PVC のみを使用している。

芯線間の紙の絶縁は芯と芯が直接接触するのを妨げると考えられるが、布と紙は火災の熱によって劣化する。US1 および US2 は、短絡するときには、アーク短絡が発生するものと考えられる。

アーク短絡が発生する時、芯線間の炭化した絶縁材を通して芯線

間に電流が流れるため、電流は芯線の一点に集中しない。したがって、アーク短絡が発生すると、電流が芯線間に分散するため、電氣的溶融痕が小さくなる傾向があると考えられる。

この現象を確認するため、JP1 ケーブルの上半分の絶縁材である PVC を削除して、芯線を露出させた。その芯線間に、炭化した PVC を入れ、100V、50Hz の電圧を印加し芯線間に流れる電流を観測した。

その結果を Fig.3.15 に示す。電流が炭化した PVC を介して、分散して芯線間に流れている状況を確認できる。

アーク短絡の場合は、電流が分散して芯線間に流れるため、短絡時の電氣的溶融痕が小さい傾向にあるものと考えられる。



Figure 3.15. A typical occurrence during an arc through char is the spreading out of the leakage current.

JP1, 100 V. The line conductor is at the top of the figure.

The conductor diameter is 1.6 mm

3.4 結果

絶縁材の材質の異なる電気ケーブルを使用して、コーンヒータで電気ケーブルを加熱し、短絡実験を実施した。その結果、第2章で報告したものと同様に、短絡前に漏洩電流が流れることが判明した。

さらに、漏洩電流と短絡時に電気ケーブルの芯線にできる電氣的溶融痕の大きさを調べたところ、漏洩電流が小さいほうが、電氣的溶融痕が大きい傾向にあり、漏洩電流が大きいほうが、電氣的溶融痕が小さい傾向にあることが判明した。

また、漏洩電流、電氣的溶融痕および短絡形態との関係を考えてみると、漏洩電流が小さい時と接触短絡が起き、漏洩電流が大きいとアーク短絡が起きる。

布ケーブルにおいては、NFPA921に「理由は判然としないが、電氣的溶融痕が小さいか、見つからない時があった」と記載されている。

布ケーブルを使用した実験では、漏洩電流が大きく、20Aを超える場合も認められた。また、電氣的溶融痕は小さい傾向にあることが判明した。

このことから、NFPA921には記載されていなかったが、布ケーブルは漏洩電流が大きく流れるため、アーク短絡が起き、その時の電氣的溶融痕は小さいと考えられる。また、漏洩電流が20Aを超える場合があり、一般家庭に使用されている分岐回路のノーヒューズブレーカーが短絡前に動作する可能性があり、そのために電氣的溶融痕が見つからない場合があると考えられる。

3.5 第三章の参考文献

- 3.1 Nicholas Carey, Niamh Nic Daeid, The metallic damage to electrical conductors at fire scenes, Proceedings of the Interflam 2007 conference, pp 1-12
- 3.2 Nicholas Carey and Niamh Nic Daeid : Arc Mapping. Fire and Arson Investigator, 61(2), pp.34-37, 2010.
- 3.3 Nicholas Carey and Niamh Nic Daeid : Confocal Laser Scanning Microscopy of Electrical Conductors at Fire Scenes. MICROSCOPY AND ANALYSIS, SEPTEMBER 2010, pp.5-7, 2010.
- 3.4 Michael R. KELLER, Arc melting research, Annual Technical Conf., International Association of Arson Investigators 2014.
- 3.5 Cameron J. Novak , Stanislav I. Stoliarov, Michael R. Keller and James G. Quintiere : An analysis of heat flux induced arc formation in a residential electrical cable. Fire Safety Journal, 55, pp.61-68, 2013.
- 3.6 Larry West, David A. Reiter, FULL-SCALE ARC MAPPING TESTS, Proceedings of the Fire and Materials 2005 conference, pp 325-339
- 3.7 Tomoyasu Iwashita, Michael R. KELLER, Yasuaki Hagimoto and Osami Sugawa: Leakage currents precede short circuits in PVC-insulated cable when exposed to external radiant heat. Journal of Fire and Materials (Accepted 31 May 2016)
- 3.8 Vytenis Babrauskas. How do electrical wiring faults lead to structure ignitions? Proceedings of the Fire and Materials 2001 Conf.: 39-51.
- 3.9 NFPA921, Guide for Fire and Explosion Investigations, National Fire Protection Association, 2014Ed.
- 3.10 Bernard Beland. Arcing phenomenon as related to fire investigation. Fire Technology 1981; 17 (3): pp.189-201.
- 3.11 IEEJ, Electrical Discharge Phenomena, IEEJ. pp.144-146, 1968. (In

Japanese)

3.12 Vytenis Babrauskas, Ignition Handbook, pp.498-577. 2003.

3.13 Vytenis Babrauskas. Mechanisms and modes for ignition of low-voltage PVC-insulated electrotechnical products. Fire & Materials 2006; 30: pp.150-174.

3.14 Y. Hagimoto, N. Watanabe and K. Okamoto. Short-circuit faults on electrical wires exposed to external radiant heat. Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering 2004; 54 (2): pp.25-31.

3.15 Y. Hagimoto, N. Watanabe and K. Okamoto. Arcing faults on PVC-covered electrical cords. Proceedings of the 1st Conference of the Association of Korean-Japanese Safety Engineering Society 1999: pp.221-224.

3.16 User's Manual for NFPA 921. 2003. NFPA /IAAI, Quincy, Massachusetts.

3.17 John D. DeHaan, Kirk's Fire Investigation, sixth edition, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, pp.415-430, 2004.

4 実規模実験による短絡性状

4.1 序論

火災現場において，出火場所を推定することは，火災原因を調査する上で最も重要なことである．その出火場所を推定する手がかりとして，電気ケーブルが火災の火熱によって短絡する時に発生する電氣的溶融痕の位置を調べる方法，いわゆるアークマッピング法があり，前述のとおり多くの研究も行われている[4.1-4.6]．

しかし，これまでの研究はいずれも結果として得られた短絡痕の観察を行うにとどまっており，電気現象の観点からの波形観測に基づいた検討が行われていない．

そこで，今回の研究では，実物大の建物室内で火災を発生させて，電気ケーブルをその火熱に暴露させ，電氣的溶融痕の発生場所，発生時間，短絡前後の電圧，電流波形を観察した．

その結果，予想されたアーク短絡は発生せず，接触短絡のみが発生した．実験結果については，これまでに筆者らが行ってきたコーンヒーターを用いた研究成果も踏まえて考察した．

4.2 実験方法

実験装置を Fig. 4.1,4.2 及び 4.3 に示す．四畳半の室内を作成し，室内の天井に VVF ケーブルを Fig. 4.4 のように 3 本，いずれも天井の石膏ボードの室内側に設置した．



Figure 4.1. Test compartment (actual setup)



Figure 4.2. Inside the test compartment.

家具の配置

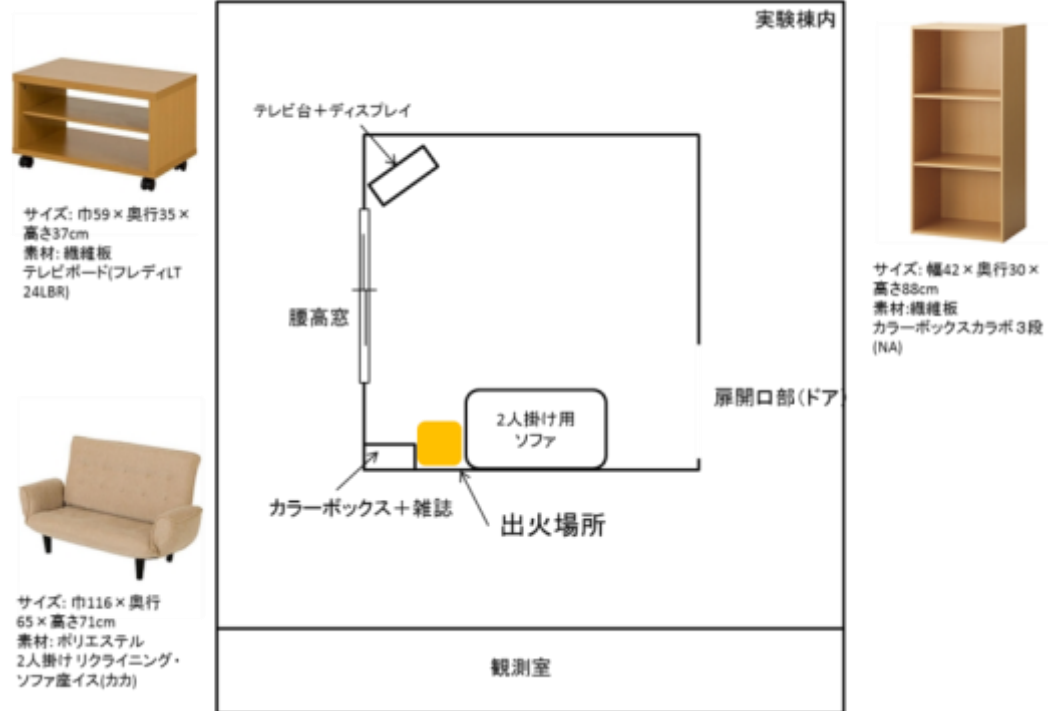


Figure 4.3. Test compartment (diagram)

実験室内には，2人掛け用ソファ，カラーボックス及びテレビ台を設置した。

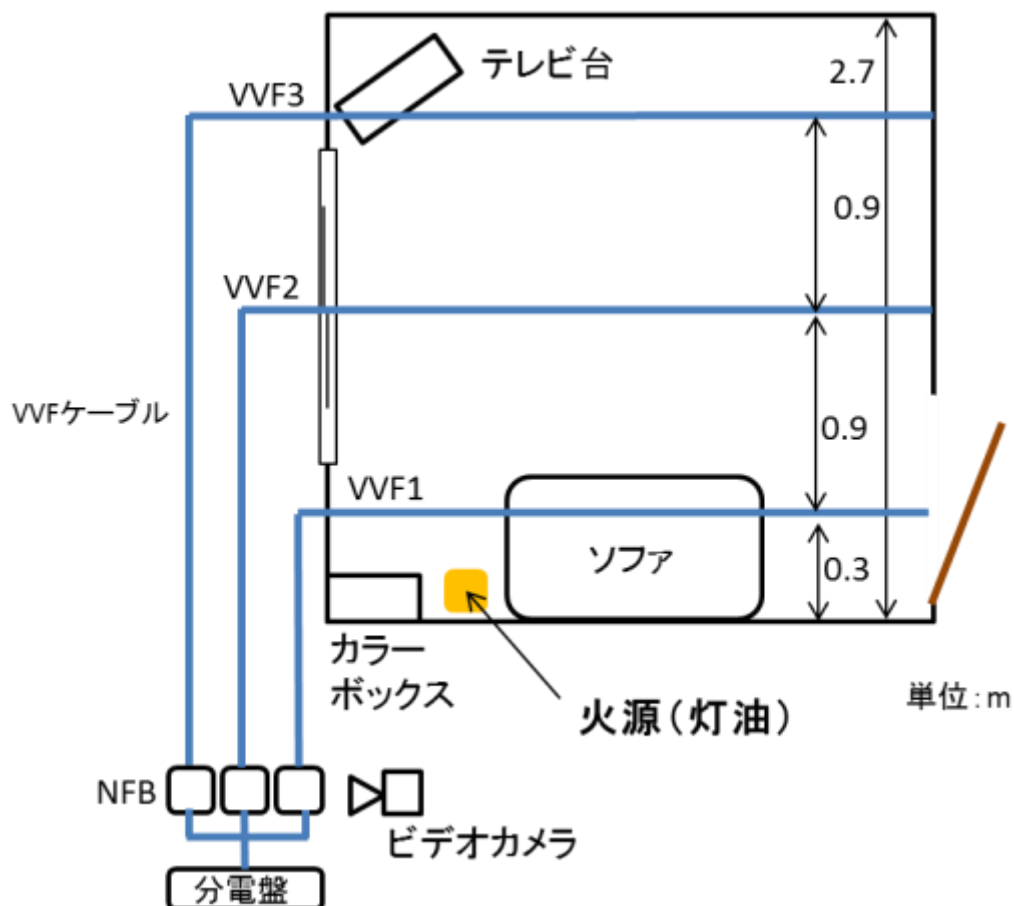


Figure 4.4. Test setup inside test compartment.

実験で使用した VVF ケーブルは、これまで使用した PVC ケーブルと同様のものを使用した。

VVF ケーブルの天井への固定は金具を使用し、金具と VVF ケーブルの間に石膏ボードの切れ端を入れ、金具と VVF ケーブルの短絡を防止した (Fig.4.5 参照)。



Figure 4.5.(a) Cable fixing method.



Figure 4.5.(b) Cable fixing method.

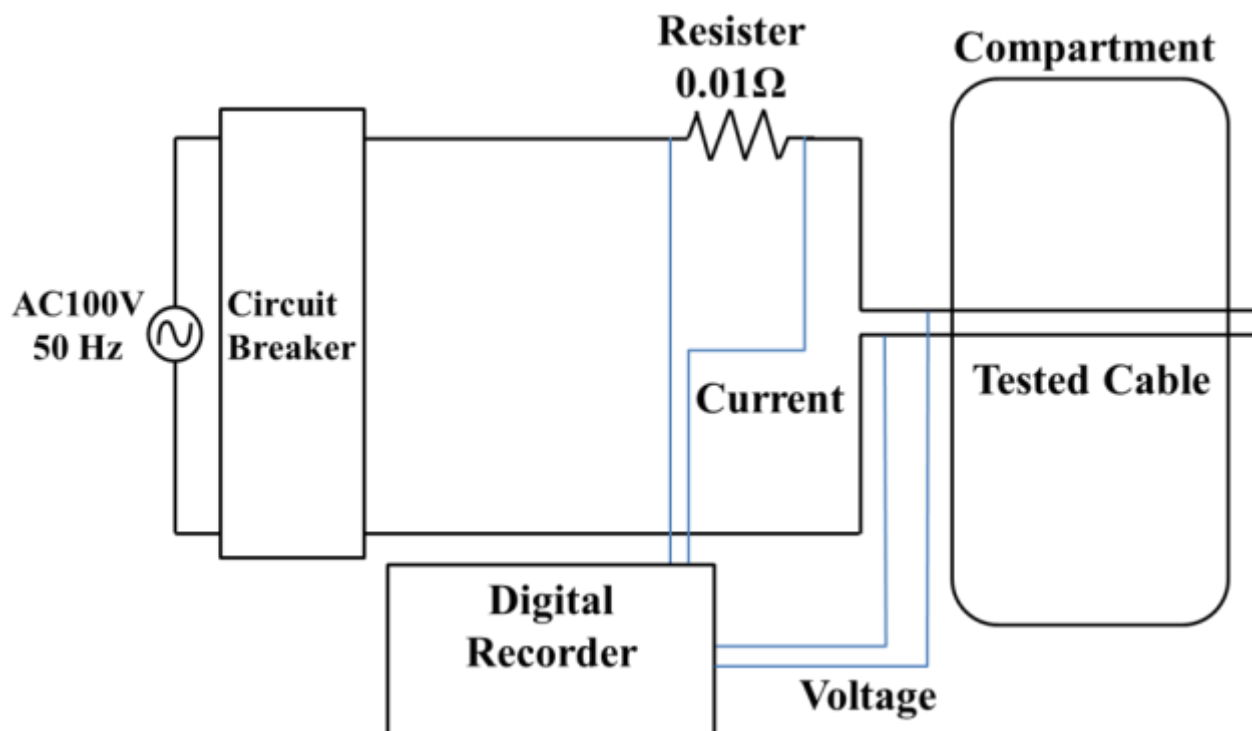


Figure 4.6. Experimental setup.

点火方法は、室内のソファ直近にクリブを組み、灯油を撒いて点火した。各 VVF ケーブルには、熱動電磁式のノーヒューズブレーカ (定格 20A 用) を設置した。そのノーヒューズブレーカをビデオで撮影し、点火からノーヒューズブレーカが作動するまでの時間を計測し、ノーヒューズブレーカが動作した時間を、電氣的溶融痕が発生した時間とした。

室内の 3 本の VVF ケーブルの短絡前後の電圧、電流波形を、それぞれデジタルレコーダで測定した。電流の測定は、 $0.01\ \Omega$ の抵抗間の電圧を測定し、電流に換算した (Fig. 4.6 参照)。

消火後、各 VVF ケーブルに生じた電氣的溶融痕の形状及び位置を測定した。

4.3 実験結果

実験結果、VVF1、VVF2 及び VVF3 の電圧電流波形、電氣的溶融

痕の形状を Fig. 4.7 から 4.16 に示す. また, 各ケーブルに発生した電氣的溶融痕の発生場所及び発生時間等を Fig. 4.16 に示す.

なお, VVF2 及び VVF3 の拡大後の電流波形が 1A を超える場合があるが, これは正弦波でないことや短絡後してブレーカが作動した後も波形が認められることから, 測定中のノイズの影響と考えられる.

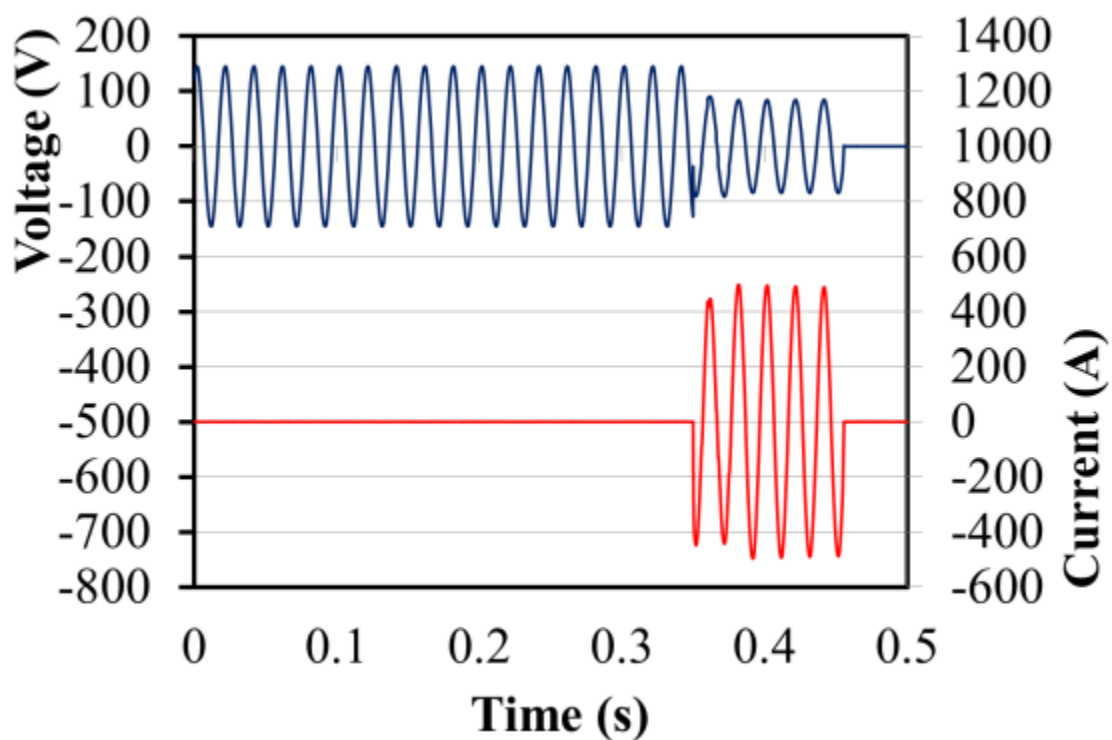


Figure 4.7. VVF1 cable waveform in a compartment fire. (Upper: Voltage, Lower: Current)

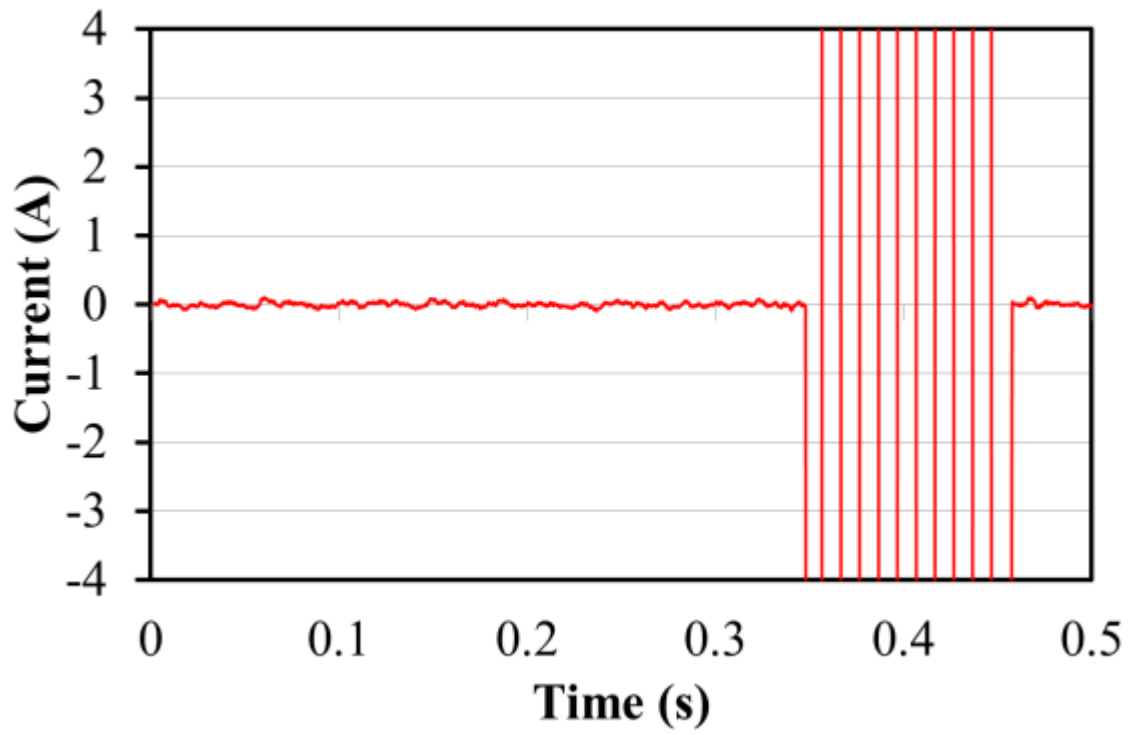


Figure 4.8. Current waveform enlarged Figure 4.7.



Figure 4.9.(a) Arc marks on VVF1 conductor.



Figure 4.9.(b) Arc marks after conductor has been separated.

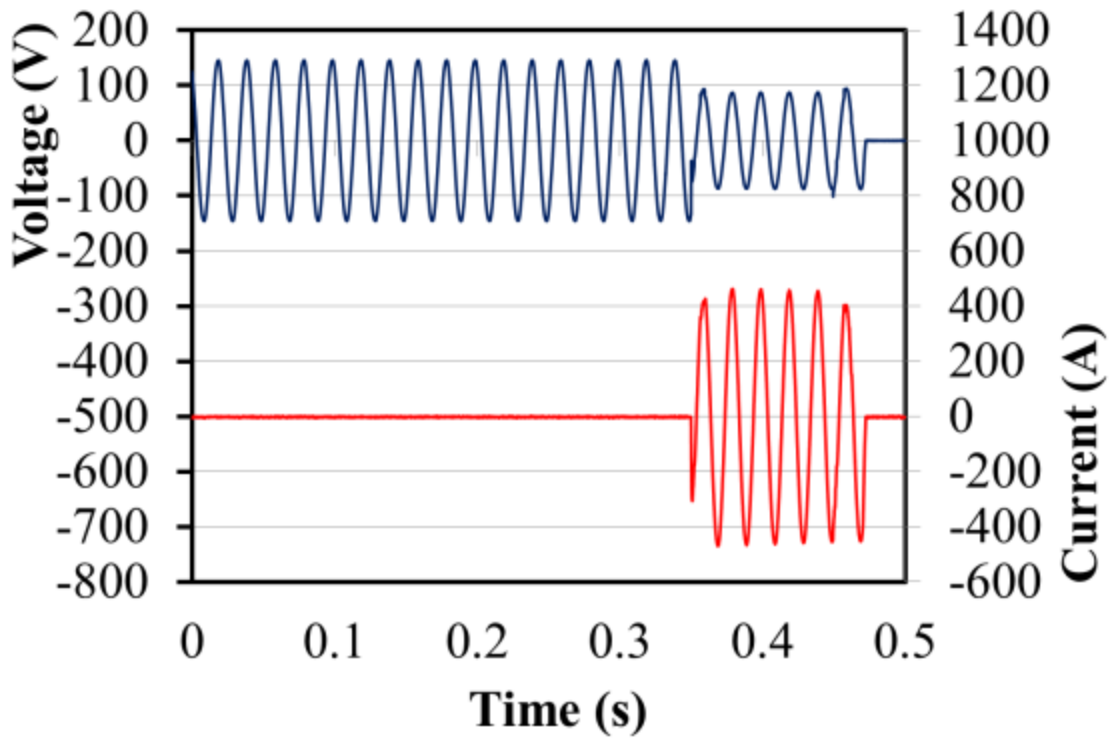


Figure 4.10. VVF2 cable waveform in a compartment fire. (Upper: Voltage, Lower: Current)

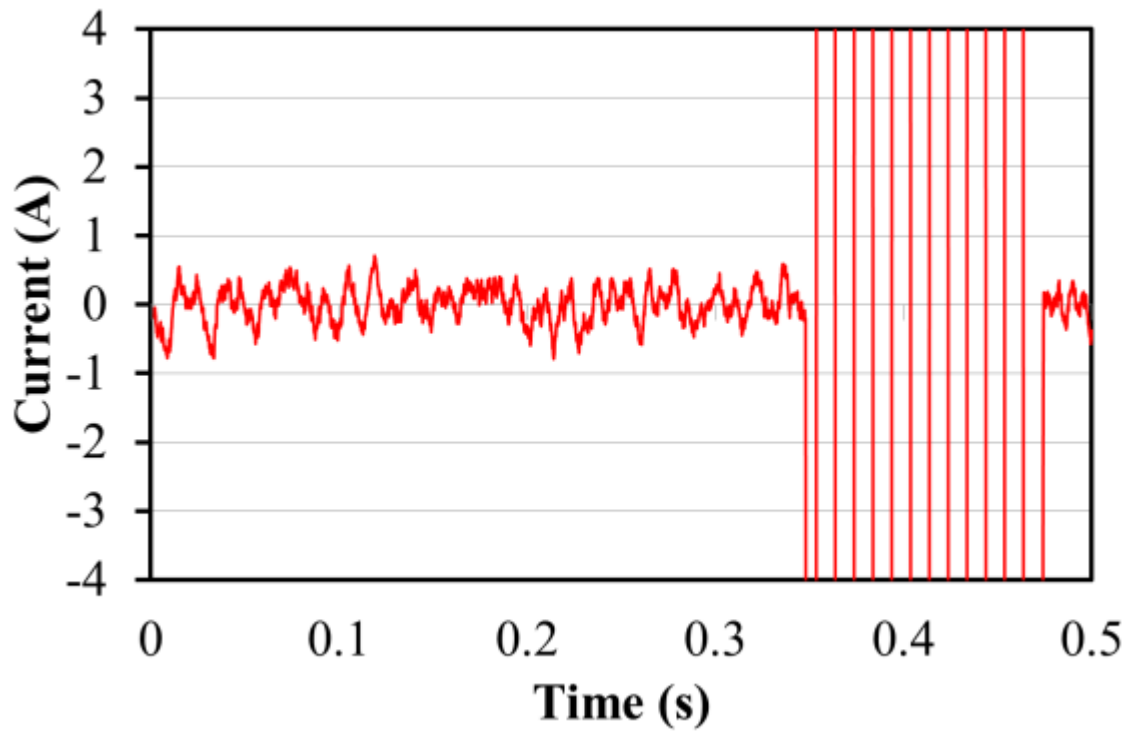


Figure 4.11. Current waveform enlarged Figure 4.10.



Figure 4.12.(a) Arc marks on VVF2 conductor.

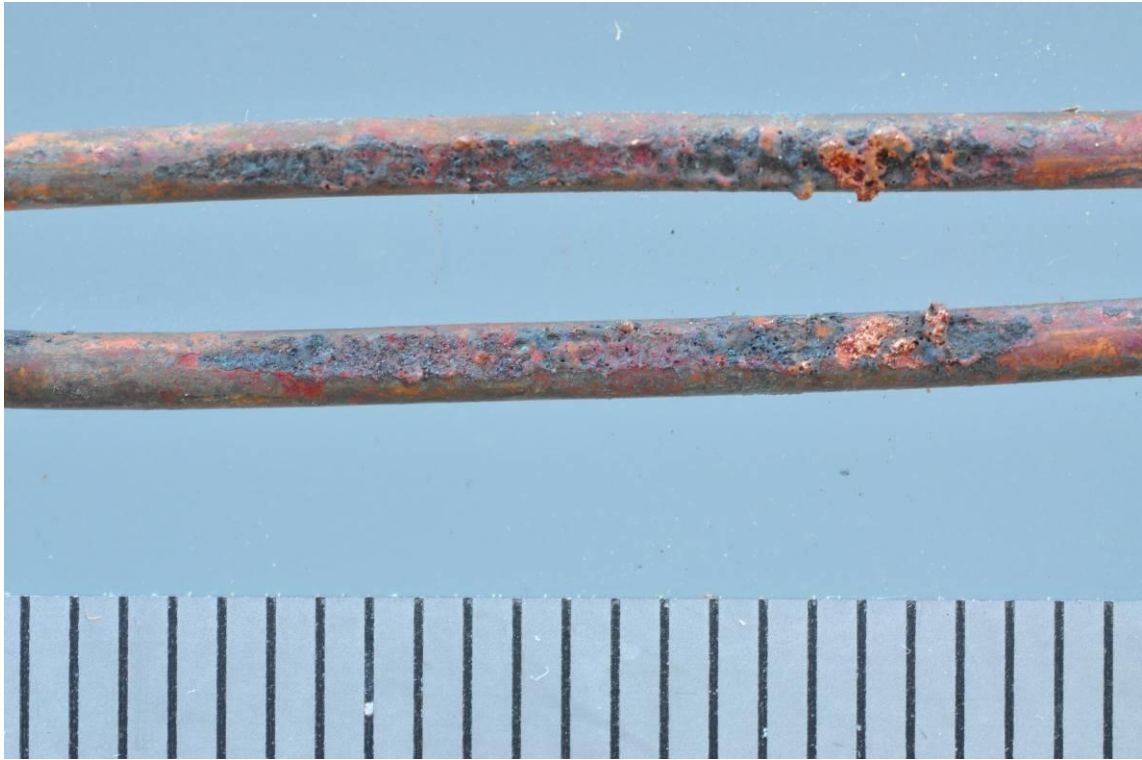


Figure 4.12.(b) Arc marks after conductor has been separated.

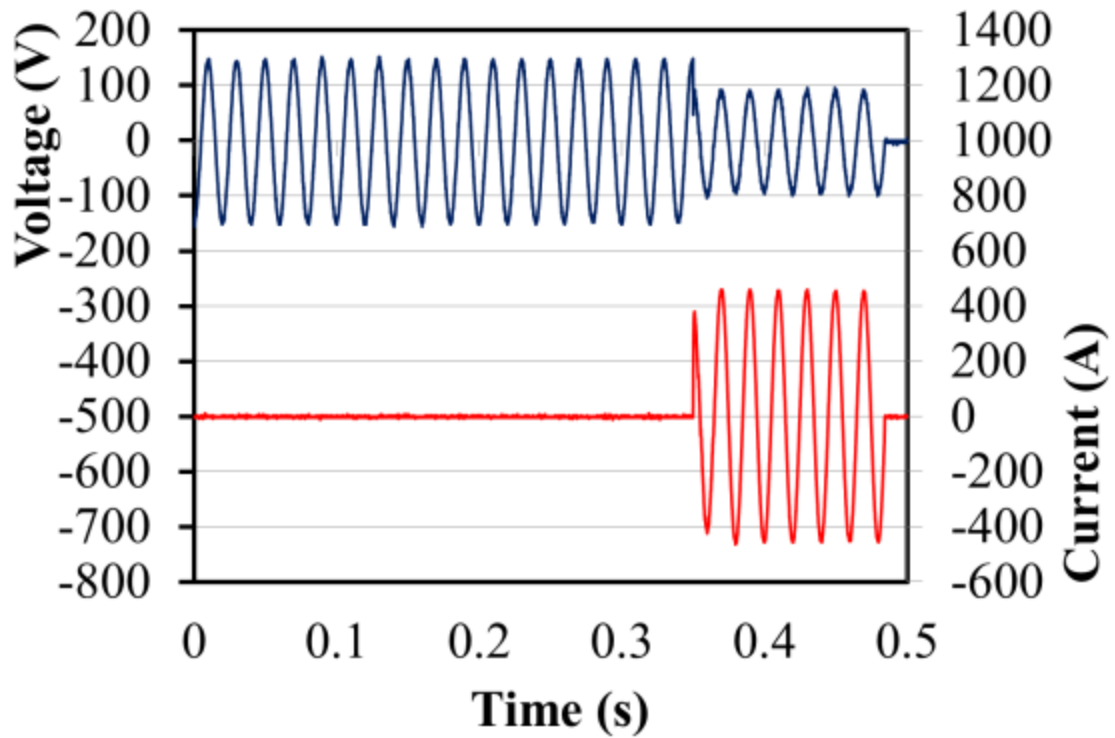


Figure 4.13. VVF3 cable waveform in a compartment fire. (Upper: Voltage, Lower: Current)

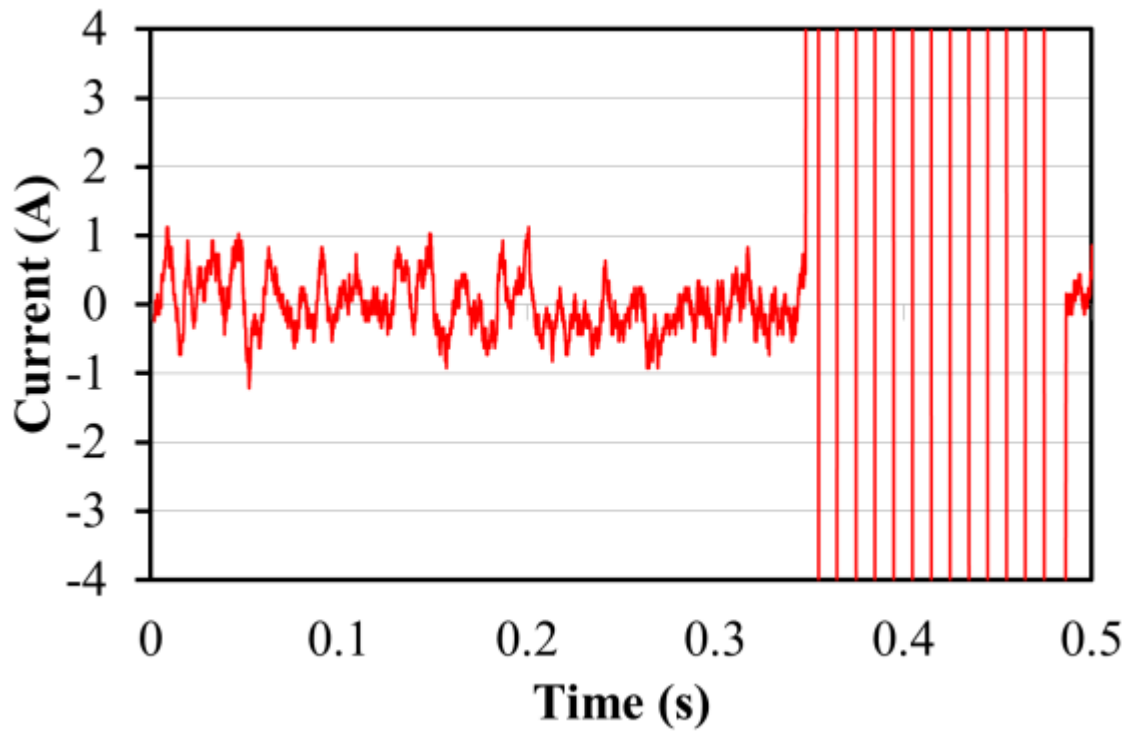


Figure 4.14. Current waveform enlarged Figure 4.13.

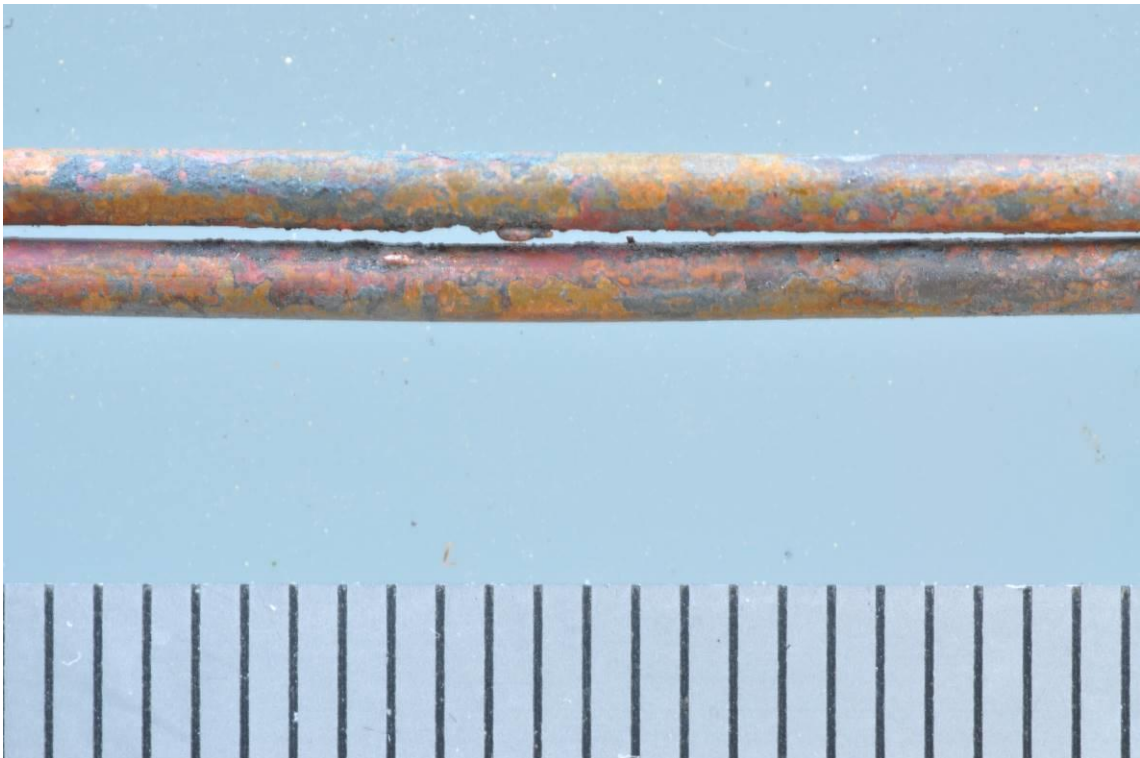


Figure 4.15.(a) Arc marks on VVF3 conductor.



Figure 4.15.(b) Arc marks after conductor has been separated.

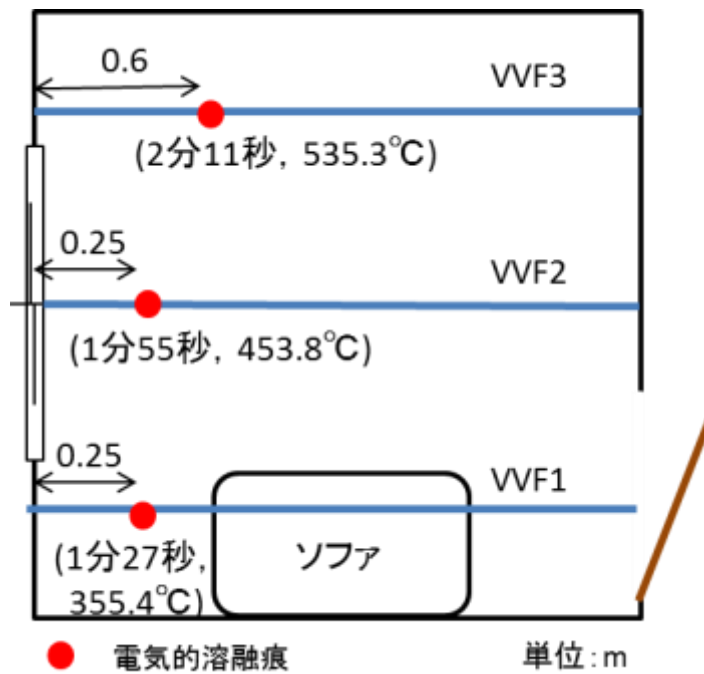


Figure 4.16. Time, position, and temperature data recorded when arc marks occurred.

これまでの研究から、短絡前後の電圧電流波形を確認することによって、短絡時の形態が推察され、さらに電氣的溶融痕の形状が推察されると考えられる。

したがって、電圧電流波形を観測することによって、電気現象の観点から電氣的溶融痕の発生形態を推察することができる。

4.4 考察

4.4.1 実規模実験での電氣的溶融痕の形状と発生位置

電氣的溶融痕は、VVF1, VVF2, VVF3とも出火場所の近くに生じることが分かった。また、電氣的溶融痕の生じる順番は、VVF1, VVF2, VVF3の順であり、これは出火場所の近くから火炎の拡大に伴って電氣的溶融痕が生じることを示していた。

NFPA921において、電氣的溶融痕は出火場所に近いところででき、炎の拡大によって進展すると記載されており、今回の実験結果はその記載事項と矛盾のないものであった。

電氣的溶融痕は、Fig. 22のようにいずれも芯線が2cm程度接触し、一部が溶着した。また、計測した電圧電流波形と電氣的溶融痕の形状からは、短絡形態はいずれも「接触短絡」と判断された。

また、これまでの研究結果[4.7,4.8]から、短絡前に漏洩電流が流れる場合は、芯線間の絶縁材であるPVCが火災の熱によって劣化し、その劣化した絶縁材を介して電流が流れるためであり、いわゆるアーク短絡である。一方、漏洩電流がほとんど流れない場合は、芯線間の絶縁材の絶縁が保たれた状態で芯線同士が接触して短絡する、いわゆる接触短絡であることがわかっている。

今回の実験結果については、短絡前に漏洩電流がほとんど流れていないことから、VVF1, VVF2, VVF3とも接触短絡が起きたと判断された。

実験結果から、短絡電流のピーク値は VVF1 が 486A, VVF2 が 470A, VVF3 が 464A であった。また、電氣的溶融痕は、いずれも芯線が電線の軸方向の長さ 2cm 程度接触し、一部が溶着した。

4.4.2 実規模実験の短絡性状の推察

実規模実験の時の電氣的溶融痕の形状と波形は、上記に示したとおりである。これらの結果から実規模実験における短絡形態は、接触短絡が起きたと考えられる。接触短絡が起きた理由について推察した。

今回の実験では、点火から 2 分前後で室内のガラスが割れてフラッシュオーバーが起きている。VVF ケーブルに接触短絡が起きた時間も 2 分前後となっている。室内でフラッシュオーバーが起きたことが、VVF ケーブルに接触短絡が起きた原因と考えられる。

文献[4.9]によるとフラッシュオーバーが起きた時の室内の温度が 600°C 程度で熱流束は 50kW/m² と記載されている。フラッシュオーバーが起きた室内温度を、第二章で測定した試料ケーブルの芯線間の温度測定結果 (Fig.2.18 参照) と比較すると、今回の実験で VVF ケーブルが短絡した時の室内の熱流束は、50kW/m² 程度と考えられる。

第二章で述べたとおり、熱流束が 55kW/m² 及び 45kW/m² の時は、接触短絡が多く起きており、今回の実規模実験において、接触短絡が起きた理由として考えられる。

実規模実験の電圧短絡前にほとんど漏洩電流が流れていない。短絡が起きてからブレーカが落ちるまで 5 サイクル程度の時間がかかる。また、電氣的溶融痕の形状は、いずれも広範囲に溶融痕が発生している。実規模実験では接触短絡の形態が何度も確認された。よって実際の火災でも、この短絡形態がかなり起きていると思われる。最初に溶着が起き、その前後でアークが発生したものと推察される

(個々のアークで生じた溶融痕は小さい).

接触短絡の短絡形態は、短絡前に漏洩電流がほとんど流れないために、接触短絡と類似した形態であるが、2本の芯線が極めて平衡に近い状態で接近するので、最初に1点で芯線同士が接触しても、その前後の位置においてアーク放電が容易に広域に拡大する.

Hagimoto の論文[4.10]でも、芯線の接触からアークが伝搬すると述べている. 今回の実験のように電氣的溶融痕が広範囲にできるのは、Hagimoto の論文で十分説明できる. これは、電氣的溶融痕が広範囲にできることで説明できる.

実規模実験の結果の電氣的溶融痕の形状は、Nicholas Carey[4.3,4.4]が論文の中で述べているものと類似している. Nicholas Carey は論文の中で、*arcing through char* (アーク短絡) による電氣的溶融痕であると述べているが、正確にはアーク短絡ではなく、接触短絡後のアークの痕跡 (*arcing resulting from contacting*) と考えられる.

実規模実験の短絡形態は、ケーブルのPVC絶縁被覆の熱劣化によるアーク短絡より先に接触短絡が起きるので、新たな短絡形態として説明した方が、合理的である.

4.5 結果

実規模実験では、いずれも接触短絡が起きた. 電氣的溶融痕は約2cmが接触する広範囲にわたり発生した.

実規模実験において、実際には第三の短絡形態として、これまではアーク短絡ではないかと考えられてきた局所的な溶融ではなく広範囲に表面が荒れた溶融痕が、じつは接触短絡によって生じるものであると考えられることが判明した.

4.6 第四章の参考文献

4.1 Steven W. Carman, IMPROVING THE UNDERSTANDING OF POST-FLASHOVER FIRE BEHAVIOR, 2008 International Symposium on Fire Investigation and Technology 2008 pp.221-232

4.2 West, L, Reiter, D.A., “Full-Scale Arc Mapping Tests,” Fire and Materials Conference, pp. 325-339, (2005).

4.3 Nicholas Carey and Niamh Nic Daeid. Arc mapping. Fire and Arson Investigator 61(2), pp.34-37, 2010.

4.4 Nicholas Carey and Niamh Nic Daeid. The metallic damage to electrical conductors at fire scenes. Proceedings of the Interflam 2007 Conference pp.1-12.

4.5 James M. Finneran. FIRE FINDINGS SPECIAL REPORT ARC MAPPING. Fire Findings, Vol. 13, No. 2, Spring 2005.

4.6 William B. Johnson, P. E., and Lester V. Rich. FIRE FINDINGS SPECIAL REPORT ARC MAPPING FOLLOW UP. Fire Findings, Vol. 15, No. 3, Spring 2007.

4.7 岩下友安, Michael R. Keller, 萩本安昭, 須川修身, 放射熱による PVC ケーブルの短絡性状, 平成 26 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp 138-139, 2014

4.8 岩下友安, Michael R. Keller, 萩本安昭, 須川修身, 絶縁材料の異なる電気ケーブルの短絡性状, 平成 27 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp 320-321, 2015

4.9 James G. Quintiere, Principles of Fire Behavior, Delmer Publishers, pp 47-64, 1997.

4.10 萩本安昭, 渡辺:憲道, 木下勝博, 短絡痕跡に及ぼす電源方向の影響, 平成 6 年度鑑識科学研究発表会火災・爆発部会講演要旨集, pp. 54

5 総括

5.1 まとめ

一般に火災によって通電中の電気配線が焼損すると絶縁が破壊されて短絡が起こり、アーク放電を生じて銅芯線が溶融する。一方で、建物内には天井裏に照明回路やコンセント回路などの電気ケーブルが、建物内には家電製品の電源コードが多数存在する。そのため、火災現場では電気配線の短絡による溶融痕が必ずといってよいほど発見される。この溶融痕は火災の拡大方向に関する手がかりを与えてくれることから、火災現場調査に活用されており、アークマッピング法と呼ばれている。

アークマッピング法の活用に関係した研究の歴史は長い。これまでに、電氣的溶融痕の形状に関する研究、電氣的溶融痕の発生場所を統計的に考察して出火場所を推定する研究等が行われている。また、電気ケーブルの短絡に関する研究も多く行われており、電気ケーブルを短絡させ、その時の電圧を変動させて電流値をまとめた研究、短絡時に発生する電圧電流波形に関する研究等が行われている。

しかし、これまでの研究は、いずれも人工的に発生させた短絡現象の研究や、短絡の結果のみを捉えた研究ばかりであり、電気ケーブルが短絡に至る経過、すなわち受熱履歴の違いや絶縁被覆材の違いが溶融痕形成に及ぼす影響についての研究は行われてこなかった。そのため、火災現場調査では、火災環境の影響や時間経過にまで踏み込んだ検討考察が困難であった。

そこで、本研究では、一般的な電気ケーブルが火災現場において、どのようなメカニズムで短絡し、電氣的にどのような経過をたどり芯線に電氣的溶融痕が発生するか、短絡によって、どのようなメカニズムで電氣的溶融痕が発生するのか、電氣的溶融痕の発生機序を解明することによって、電氣的溶融痕から出火原因や出火場所を推

定し，さらには電気ケーブルからの電気火災を予防する安全性に活用することを目的とし，研究を実施した．

一般的に電気ケーブルが短絡すると，短絡電流が 1000A 近くに達するため短絡直前の微小電流変化の観測が困難なこと，さらにはアーク放電によって短絡箇所が熔融して失われてしまうため接触状態を目視確認できないことから，既存の実験方法では，短絡時にどのような現象が起きているか詳細な観察が困難であった．そこで，本研究では，実験回路に 100W の電球を入れ，短絡電流を 1A に制御した．この方法によって短絡後の大電流アーク放電の影響のみを抑制することにより，短絡箇所の芯線の接触状態や短絡直前の電気現象を観察することが可能となった．

実験の結果，電気ケーブルが短絡する前の電流に着目したところ，電気ケーブルの芯線間に漏洩電流が流れていることが判明した．そして，その漏洩電流に着目したところ，漏洩電流によって短絡現象が 2 つのグループに大別できることが判明した．

第一のグループは，芯線同士が直接接触して短絡する接触短絡である．実験で使用した絶縁材がポリ塩化ビニル (polyvinyl chloride, 通称 PVC) の電気ケーブルにおいて，芯線間の絶縁材の絶縁が保たれた状態で，芯線間の絶縁が熔融して芯線同士が接触する，いわゆる metal to metal contact が起きる．この時，短絡前の漏洩電流に着目すると，接触短絡の前に，漏洩電流はほとんど流れないことが判明した．

第二のグループは，芯線が直接接触せずに，芯線間の絶縁材の絶縁が劣化し，その劣化した絶縁材を介して短絡するアーク短絡である．火災の熱によって，芯線間の PVC 絶縁被覆が絶縁劣化し，電気ケーブルの芯線間の絶縁被覆が炭化してできた導電路に電流が流れる．いわゆる arc through char が起きる．この時，短絡前の漏洩電流に着目すると，接触短絡の前に，100mA を超える漏洩電流が流れる

場合があることが判明した。

この漏洩電流に着目して、短絡実験を実施した。実験で使用した電気ケーブルの絶縁材は、上記 PVC に加え、布、紙等を使用したもの（アメリカ製ケーブル）を用いて実施した。

その結果、短絡電流の測定域を 1000A オーダーから 1A 程度に精度を変え、微細な電流量に注目して、短絡前の現象に着目したところ、漏洩電流が認められた。この時も、接触短絡の時は、漏洩電流がほとんど流れないことが判明し、アーク短絡の時は漏洩電流が 1A を超える場合もあった。

さらに、短絡現象、漏洩電流および電氣的溶融痕の関係を明らかにするため、電氣的溶融痕の大きさを面積として計算し、これらの関係を調べたところ、接触短絡の時は、漏洩電流が小さく、電氣的溶融痕が大きい傾向にあり、アーク短絡の時は、漏洩電流が大きく、電氣的溶融痕が小さい傾向にあることが判明した。

実規模実験においては、漏洩電流が小さく、電氣的溶融痕が大きい傾向にあり、接触短絡が起きたと考えられる。

これらの知見を活用することによって、火災現場で電気ケーブルに発生する電氣的溶融痕の形状を観察することにより、その時に起きた短絡現象を推察することができる。これにより、従来の手法より詳細で、科学的な火災原因調査が可能となる。

本論文で明らかになった知見は、火災現場での活用にのみならず、短絡現象を知ることにより、電気安全・火災安全の向上にも寄与するものと考えられる。

5.2 今後の課題

試料ケーブルは芯線同士が寄って接触短絡及びアーク短絡が起きると考えられる。この時の短絡時にケーブルの芯線が寄る理由を明らかにする必要がある。

今回の実験ではケーブルのみを使用しているが、実際の家庭にはコードもあり、コードの短絡性状も調べる必要がある。

5.3 投稿論文等と章立て

5.3.1 投稿論文

1 Tomoyasu IWASHITA, Michael R. KELLER, Yasuaki HAGIMOTO and Osami SUGAWA, How PVC-insulated cables exposed to radiant heat fluxes cause short circuits and arc beads, Proceedings of the Fire and Materials International Conference, Interscience Communications Ltd. London, pp.933-945, 2015. (第二章, 第三章)

2 Tomoyasu IWASHITA, Michael R. KELLER, Yasuaki HAGIMOTO and Osami SUGAWA, Leakage currents precede short circuits in PVC-insulated cable when exposed to external radiant heat, Journal of Fire and Materials. (Accepted 31 May 2016, 第二章)

3 Tomoyasu IWASHITA, Yasuaki HAGIMOTO and Osami SUGAWA, Characterization of arc beads on energized conductors exposed to radiant heat, Journal of Fire and Materials. (査読中, 第三章)

5.3.2 海外発表

1 Tomoyasu IWASHITA, Michael R. KELLER, Yasuaki HAGIMOTO and Osami SUGAWA, Short Circuits on American and Japanese Electrical Cables Exposed to External Radiant Heat, Asia Pacific Symposium on Safety 2013. (第一章)

2 Tomoyasu IWASHITA, Michael R. KELLER, Yasuaki HAGIMOTO and Osami SUGAWA, How PVC-insulated cables exposed to radiant heat

fluxes cause short circuits and arc beads, 14th International Conference Fire and Materials 2015. (第二章)

5.3.3 国内発表

1 岩下友安, Michael R. Keller, 放射熱による日米電気ケーブルの短絡性状, 平成24年度日本火災学会研究発表会概要集, pp208-209 (第一章)

2 岩下友安, Michael R. Keller, 萩本安昭, 須川修身, 放射熱による日米電気ケーブルの短絡性状(第二報), 短絡時の電圧電流波形に基づく比較検討, 平成25年度日本火災学会研究発表会概要集, pp314-315 (第一章)

3 岩下友安, Michael R. Keller, 萩本安昭, 須川修身, 放射熱によるPVCケーブルの短絡性状, 平成26年度日本火災学会研究発表会概要集, pp138-139 (第二章)

4 岩下友安, Michael R. Keller, 萩本安昭, 須川修身, 絶縁材料の異なる電気ケーブルの短絡性状, 平成27年度日本火災学会研究発表会概要集, pp320-321 (第三章)

5 岩下友安, 須川修身, 上矢恭子, 萩本安昭, 渡邊憲道, 実物大建物内における電気ケーブルの短絡性状, 平成28年度日本火災学会研究発表会概要集, pp284-285 (第四章)

5.4 謝辞

本研究を進めるにあたり，終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜った諏訪東京理科大学 須川修身教授に対し，深甚の謝意を表します．また，ご多忙中にもかかわらず，本論文の審査をしてくださり，有益なご教示をいただきました諏訪東京理科大学 松江英明教授，竹増光家教授，大島政英教授，内海重宜准教授，松岡隆志教授，東京大学新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻 小野亮准教授に深く感謝し，厚くお礼を申し上げます．

実験の計画，実施およびデータの解析を行うにあたっては，元科学警察研究所法科学第二部部長 萩本安昭氏にご指導とご鞭撻を賜りました．本研究の前段であるアメリカ司法省 ATF 火災研究所での法科学研修所平成 23 年度在外研修の時から，これまでご指導とご鞭撻を賜りました．改めて感謝の意を表します．

本研究を行うにあたり，終始ご協力とご指導をいただいた諏訪東京理科大学須川研究室の共同研究者の日本法医工学株式会社 上矢恭子博士（工学）および学生の皆様に心より感謝いたします．

本研究に取り組む機会を与えてくださり，ご支援とご配慮をくださいました，山梨県警察本部刑事部科学捜査研究所所長 大竹潤氏をはじめ，同研究所の皆様に厚くお礼申し上げます．

最後に私事ですが，これまで私を精神的に支えてくれた両親，妹家族，さらに，本研究に取り組む私のことを，常に理解をもって暖かく見守ってくれた家族に，心より感謝し，お世話になりました多くの方への謝辞の結びとさせていただきます．