

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	電気鉄道における離線アークの影響とその計測ならびに評価指標に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	早坂高雅
Author(English)	Takamasa Hayasaka
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9974号, 授与年月日:2015年9月25日, 学位の種類:課程博士, 審査員:赤木 泰文,安岡 康一,七原 俊也,千葉 明,藤田 英明
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9974号, Conferred date:2015/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

電気鉄道における離線アーケの影響と
その計測ならびに評価指標に関する研究

平成27年8月

早坂 高雅

目次

第1章 序論.....	1
1.1 背景と本研究における課題.....	1
1.1.1 離線アークとその計測ならびに評価指標の背景.....	1
1.1.2 本研究における課題.....	3
1.2 本研究の方針.....	3
参考文献.....	6
第2章 集電システムの誕生と離線に関する技術動向・研究動向.....	7
2.1 集電システム誕生までの過程.....	7
2.2 トロリ線材質の変遷とその形状.....	12
2.2.1 トロリ線材質の変遷.....	12
2.2.2 トロリ線の形状.....	13
2.3 すり板材質の変遷と製造方法.....	16
2.3.1 すり板材質の変遷.....	16
2.3.2 すり板製造方法.....	18
2.3.3 すり板の形状.....	18
2.4 離線測定の変遷と従来の研究.....	23
2.4.1 離線測定の変遷.....	23
2.4.2 離線測定方法.....	25
2.4.3 離線発生の主要因と要因別の対策.....	27
2.4.4 離線が及ぼす影響と影響別の対策.....	28
2.4.5 離線評価指標.....	29
2.4.6 離線に関する従来の研究.....	31
参考文献.....	39
第3章 実験装置の開発と電極材料.....	43
3.1 実験装置の開発.....	43
3.2 電極材料.....	46
参考文献.....	48

第4章 離線アークがすり板へ及ぼす影響.....	49
4.1 緒言	49
4.2 実験方法と条件	49
4.2.1 実験装置	49
4.2.2 高速度カメラ	49
4.2.3 電極質量測定	50
4.3 実験結果.....	53
4.3.1 陽極GT110, 陰極PC78A.....	53
4.3.2 陽極GT110, 陰極BF31	54
4.4 考察	61
4.4.1 PC78A表面の粒状物質.....	61
4.4.2 PC78AとBC31の質量現象の違い.....	61
4.4.3 陽極質量の増加	63
4.4.4 実際の電気鉄道における現象との比較.....	63
4.5 結言	65
参考文献.....	66
第5章 離線アークがトロリ線へ及ぼす影響.....	67
5.1 緒言	67
5.2 実験方法と条件	68
5.2.1 実験装置	68
5.2.2 測定波形の例	68
5.2.3 接触力と電極の変形	69
5.2.4 凹部の測定.....	69
5.2.5 高速度カメラ	69
5.3 実験結果.....	73
5.3.1 アーク継続時間と凹部半径の関係	73
5.3.2 アーク継続時間と凹部体積の関係	74
5.3.3 回路電流と溶融ブリッジの長さの関係.....	74
5.3.4 溶融ブリッジの形成と破壊	74

5.4	考察	80
5.4.1	溶融ブリッジを形成する物質.....	80
5.4.2	電極表面の溶融金属質量, 凹部質量, 溶融ブリッジ質量の関係.....	80
5.4.3	溶融金属の蒸発	82
5.4.4	モデル化	83
5.5	電気鉄道への応用	86
5.6	結言	87
	参考文献.....	88
第6章	紫外線検出離線アーク測定装置の開発	89
6.1	緒言	89
6.2	離線アークとその測定装置.....	90
6.2.1	離線アーク光の特徴.....	90
6.2.2	離線アーク光の測定装置.....	90
6.3	波長変換ユニットの開発.....	92
6.3.1	波長変換方法.....	92
6.3.2	波長変換ユニット.....	92
6.4	波長変換ユニットを用いた離線アーク測定装置の出力測定.....	95
6.4.1	微小なアーク放電の検出.....	95
6.4.2	光の入射角度と出力の関係.....	96
6.4.3	光源からの距離と出力の関係.....	97
6.5	電気鉄道への応用	102
6.5.1	トロリ線位置の範囲	102
6.5.2	受光部の設置箇所.....	102
6.6	結言	105
	参考文献.....	106
第7章	離線評価指標の目安値策定とその計測手法の提案	107
7.1	緒言	107
7.2	紫外線検出離線アーク測定装置を用いた通過電気量とすり板摩耗量の推定手法.....	108
7.3	離線評価指標の目安値策定.....	110

7.4 結言	113
参考文献	113
第8章 結論	114
8.1 本研究の成果	114
8.2 今後の課題	116
研究業績	117
謝辞	120

第1章 序論

1.1 背景と本研究における課題

1.1.1 離線アークとその計測ならびに評価指標の背景

電気鉄道の誕生以降、トロリ線とすり板間の機械的な離れにより生じる離線ならびに離線アーク現象は、材料の摩耗抑制、戦時中の灯火管制、騒音ならびに電波雑音抑制などのために研究が進められてきた。特に離線対策として進められたパンタグラフ数の削減やパンタグラフ間の母線接続は大きな効果を収めてきた。そのため、現在の新幹線では、2つのパンタグラフを母線で接続する方法が一般的に採用されている。ただし、東北新幹線では、320 km/h 走行にともなう集電系騒音低減のために、E5 編成と E6 編成の連結時において、各編成に2つあるパンタグラフのうち1つを使用して走行が行われている。そのため、この場合は母線が接続されていない2つのパンタグラフを使用して走行している。

パンタグラフ数が削減される一方で、走行に必要となる電流（パンタグラフを介して得る電流を集電電流と呼ぶ）は、それほど減少していないため、パンタグラフ当たりの集電電流が増加する傾向にある。加えて、離線発生時はトロリ線から離れる最後のパンタグラフで集電電流を遮断するため、より大きな電流が流れることになる。このような離線アーク発生時の電流の増加はトロリ線やすり板の摩耗を増加させることがわかっている。

電気鉄道では、トロリ線やすり板の摩耗をある想定以内に収めるために評価指標として、ある区間の離線時間の総和とその区間を走行した時間の比で表わされる離線率とその目安値を設定している。目安値は、1964年の東海道新幹線開業前後から策定が始まった。現在使用されている目安値は1986年頃から1993年頃で確立しており、離線対策が行われる前の8個パンタグラフを使用した0系新幹線の集電電流に基づいて策定されている。したがって、現在の集電電流が増加した状況においても同じ目安値が適用でき

るかはわかっていない。他方、パンタグラフの母線接続を行わない欧州においても離線率が使用されているものの、集電電流が定格電流の 30% 以上の場合に発生した離線アークのうち、アーク継続時間が 5 ms 以上のものについてのみ計算対象としている。したがって、これまでのところ集電電流を加味した評価指標や目安値が策定されていない状況である。

これら離線の計測手法に光学式離線測定が用いられている。離線時に発生する離線アーク光は広い波長域を有する電磁波であり、特に紫外線領域では太陽光よりも強いスペクトルを有する特徴を持つ。日本の光学式離線測定装置では、離線アーク光の伝送路に、安価で取扱い易いプラスチック光ファイバが用いられている。しかし、プラスチックが紫外線を遮断する特性を有することから、この測定装置は可視光線領域の光を検出する。そのため、外乱光の影響を受けやすい特徴がある。一方、欧州においては伝送路に、高価で取扱い難い石英光ファイバが用いられている。これは石英光ファイバの持つ広い波長域の透過特性を利用して、離線アーク光の紫外線領域を検出するために用いられている。したがって、この測定装置は外乱光の影響を受けにくい特徴がある。

1.1.2 本研究における課題

アーク放電による材料の損耗は、通過電氣量に応じて変化することがわかっており、近年の集電電流の増加傾向を反映するために、離線率に代わって通過電氣量で評価する考え方も以前からあった。一方、これまでの研究や開発では、主としてトロリ線とすり板のしゅう動試験が行われていたため、離線アーク自体がすり板やトロリ線に及ぼす影響を明らかにしてきたとは言えず、通過電氣量に基づいた目安値を策定するためには、十分な実験結果が得られていなかった。

また、通過電氣量を評価指標として電気鉄道に応用することを考えると、その測定にはアーク継続時間の測定と集電電流の測定が必要となる。したがって、光学式離線測定のみの場合より測定がやや煩雑となるため、通過電氣量の簡便な測定もしくは推定が必要となる。その方法として、光学式離線測定で得られる結果から通過電氣量を推定する手法が考えられるものの、光学式離線測定には、外乱光に対する影響や光ファイバの価格面および取扱い面での課題があり、これらの解決が必要である。

1.2 本研究の方針

離線の評価指標として集電電流を加味することができる通過電氣量に着目し、その目安値ならびに計測手法を提案することは、1.1.2 項の課題を解決するとともに、電気鉄道の安定した運行ならびに保守業務に欠かせないものと考えられる。そこで、本研究では、以下に示す4点の研究ならびに開発を進めることとした。なお、図 1.2.1 に本論文の構成を示す。

- ① 離線アークがすり板に及ぼす影響^{1.1)}
- ② 離線アークがトロリ線に及ぼす影響^{1.2)}
- ③ 離線アーク測定装置の開発^{1.3)}
- ④ 離線評価指標の目安値策定とその計測手法の提案^{1.4)}

第1章（本章）では、本研究の背景と課題ならびに方針を述べる。

第2章では、鉄道誕生から電気鉄道へ至る経緯と、電気鉄道誕生後の集電システムの

変遷を述べる。また、集電システムの中でも欠かすことのできない、トロリ線とすり板ならびに離線測定の変遷や従来の研究について述べ、本研究の位置付けを示す。

第3章では、本研究で主として使用する実験装置ならびに供試材料を示す。

第4章では、通過電気量とすり板損耗量の関係や離線アークがすり板に及ぼす影響を実験で明らかにする。

第5章では、アーク継続時間を任意に変えることにより、離線アークがトロリ線に及ぼす影響を実験で明らかにする。

第6章では、石英光ファイバを用いることなく、離線アークに含まれる紫外線を検出することのできる手法ならびにその手法を用いた測定装置の基礎特性について述べる。

第7章では、第4章の結果に基づいて離線評価指標の目安値を策定するとともに、第6章で開発した測定装置を用いた評価指標の計測手法を提案する。

第8章では本研究の成果と今後の課題をまとめる。

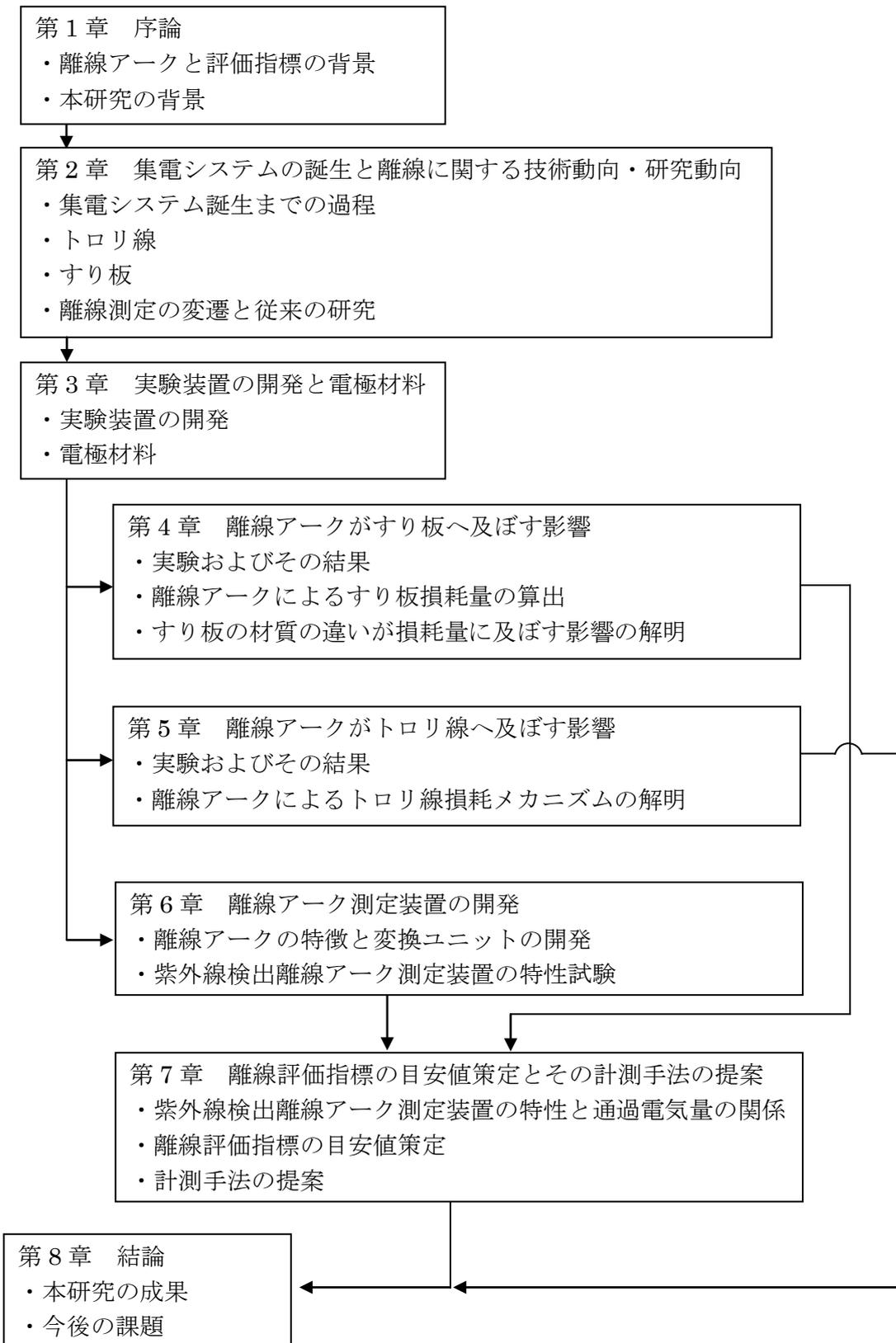


図 1.2.1 本論文の構成

参考文献

1.1) 早坂高雅, 久保田喜雄 : 「開離時アーク放電が集電系材料の質量と表面状態に及ぼす影響」, 電学論 D, Vol.132, No.2, pp.163-169 (2012)

1.2) 早坂高雅, 赤木泰文 : 「開離時アーク放電がトロリ線表面に及ぼす影響」, 電学論 D, Vol.135, No.4, pp.327-334 (2015)

1.3) 早坂高雅, 清水政利, 赤木泰文 : 「離線アーク光の検出を目的とした波長変換ユニットの開発」, 電学論 D, Vol.134, No.6, pp.618-624 (2014)

1.4) Takamasa Hayasaka, Masatoshi Shimizu and Hirofumi Akagi : An Estimation Method of Contact Strips Wear by Measurement of Arc Light, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, DOI: 10.1177/0954409715589619, June 11, (2015)

<http://pif.sagepub.com/cgi/reprint/0954409715589619v1.pdf?ijkey=1nz3rnjHTi916IF&keytype=finite>

第 2 章 集電システムの誕生と離線に関する

技術動向・研究動向

2.1 集電システム誕生までの過程

鉄道の動力は、蒸気によるものから電気によるものへと時代とともに変化してきた。また、電車線路ならびにパンタグラフなどの集電装置も時代とともに変化してきた。表 2.1.1 に諸外国と日本の鉄道の動力および集電システムの変遷を示す^{2.1)-2.4)}。なお、本論文では電車線路と集電装置を総称して集電システムと呼ぶ。

1825 年にイギリスのストックトン・ダーリントン間で馬車鉄道がジョージ・スチーブンソン考案の蒸気機関車に変更されている。これが世界初の蒸気機関による鉄道の誕生と言われている。ただし、この頃の鉄道は石炭輸送に用いられ、馬が旅客をけん引していた。鉄道が旅客を輸送するようになったのは、1830 年のリバプール・マンチェスター間の開業以降である。

日本においては 1869 年 12 月 12 日の廟議にて次のような決定がなされている。

幹線ハ東西両京ヲ連絡シ、枝線ハ東京ヨリ横浜ニ至リ、又琵琶湖辺ヨリ敦賀ニ達シ、
別ニ一線ハ京都ヨリ神戸ニ至ルヘシ

これにより、東京と京都を結ぶ幹線鉄道と、東京・横浜間、琵琶湖近傍から敦賀間、京都・大阪・神戸間の支線を敷設することが決定された。

その後、1872 年に新橋・横浜間で鉄道が開業している。なお、この区間の運賃は上等 1 円 12 銭 5 厘、中等 75 銭、下等 37 銭 5 厘であった。当時の白米 10 キロが約 35 銭であったとのことであるから、その運賃は決して安くない。一方で、利用客は増え続け、1873 年度に 140 万人、1880 年度に 200 万人を超えた。この需要の増加は後の電化へと繋がる。

その後、1879 年にドイツで開催されたベルリン工業博覧会で旅客の輸送に電気鉄道が用いられており、これが世界で初めて旅客を乗せて営業運転を行った電気鉄道である。このときの電力供給は、2 本のレール間に送電用のレール 1 本を敷設し、車両側では集

電靴と呼ばれる集電装置を送電用のレールに接触させて行っていた。このような電車線を第三軌条方式と呼ぶ。なお、帰線には2本のレールを用いたとのことである。

一方、日本においては、1883年に上野・熊谷間で日本初の私設鉄道（日本鉄道）が開業し、1885年には同じく私設鉄道の阪堺鉄道が開業した。加えて、1888年には水戸鉄道、両毛鉄道、山陽鉄道、伊予鉄道が、1889年には、甲武鉄道、関西鉄道、大阪鉄道、讃岐鉄道、九州鉄道、北海道炭鉱鉄道が開業するなど、多くの私設鉄道が設立された。

1890年には、上野で開催された第三回内国博覧会の会場内で電気鉄道が一般公開され、その後、1895年に、京都電気鉄道伏見線で日本初の電気鉄道が営業運転を開始した。なお、このときの電車線路は直接ちょう架式、集電装置はトロリポールである。その後、名古屋、川崎、大阪、東京で路面電車が開業している。図 2.1.1 に集電装置であるトロリポールと集電靴を有する車両を示す^{2.5)}。

1903年には新宿・立川間で蒸気運転をしていた甲武鉄道が、お茶の水方面への延伸工事を完成させ、1904年には飯田町・中野間を電化した。その後、1906年に鉄道国有法が成立し、甲武鉄道を含む私設鉄道17社が国に買収されている。

1907年にはスイスでシンプル方式の電車線路が用いられており、1912年には信越線の電化の際に横川駅構内と軽井沢駅構内でシンプル方式が用いられている。図 2.1.2 に当時の軽井沢構内の様子を示す^{2.6)}。シンプル方式と第三軌条方式が確認できる。

また、1914年には増え続ける需要に対応するため、輸送力増強と経済的観点から京浜線の電化が行われた。このときの電車線路は東京・品川間がコンパウンド方式で、品川・横浜間がシンプル方式である。集電装置は、当初、接触部がローラであるパンタグラフが採用されていたものの、不具合が多発したため、現在のようなすり板を用いたものに変更された。したがって、現在のような集電システムは、この頃から使用されている。図 2.1.3 にコンパウンド方式の例を、図 2.1.4 に現在使用されているパンタグラフとすり板を模式的に示す。

表 2.1.1 鉄道ならびに集電システムの変遷

西暦	国名	動力	集電システム	内容
1825	イギリス	蒸気	—	ストックトン・ダーリントン間 開業
1830				リバプール・マンチェスター間 開業
1872	日本			新橋・横浜間 開業
1879	ドイツ		第三軌条方式 集電靴	ベルリン工業博覧会での旅客輸送
1890	日本	電気	直接ちょう架方式 トロリポール	第三回内国博覧会で公開
1895				京都電気鉄道 伏見線
1904			甲武鉄道電化	
1912			一部にシンプル方式 トロリポール	信越線電化
1914			シンプル方式と コンパウンド方式 パンタグラフ	京浜線電化

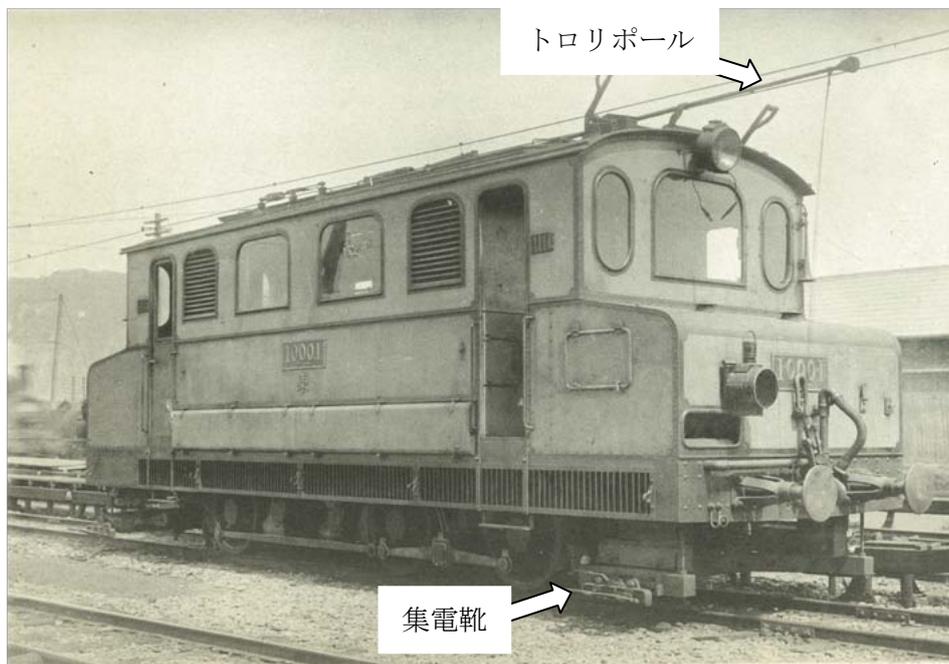


図 2.1.1 トロリポールと集電靴^{2.5)}

出典：鉄道省「日本鉄道史（下）」

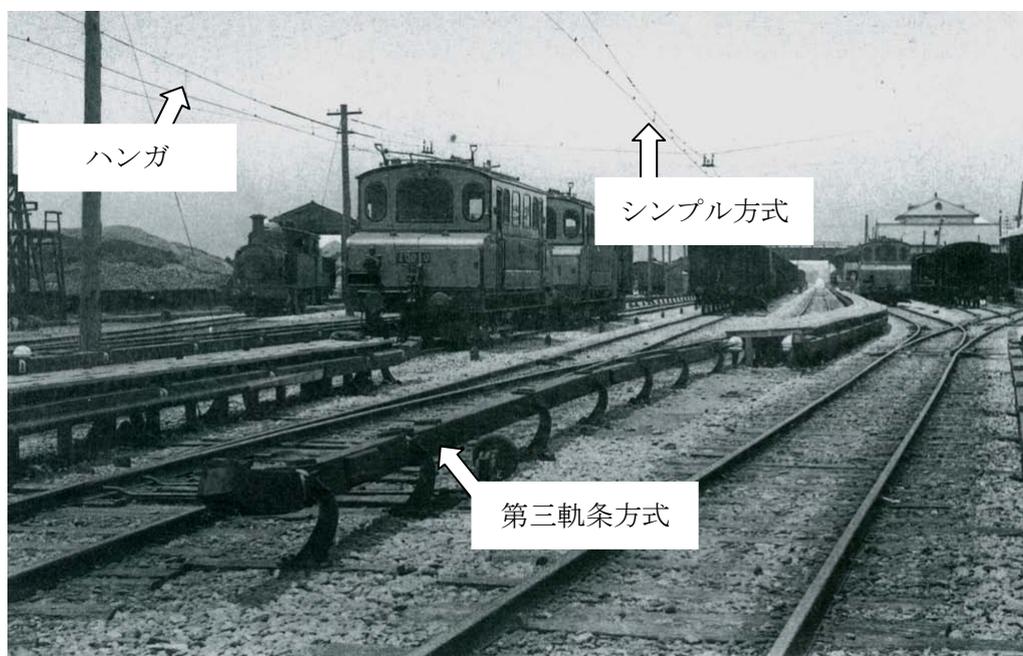


図 2.1.2 シンプル方式と第三軌条方式^{2.6)}

出典：ネコ・パブリッシング「国鉄アプト式電気機関車」三宅俊彦所蔵絵葉書



図 2.1.3 コンパウンド方式

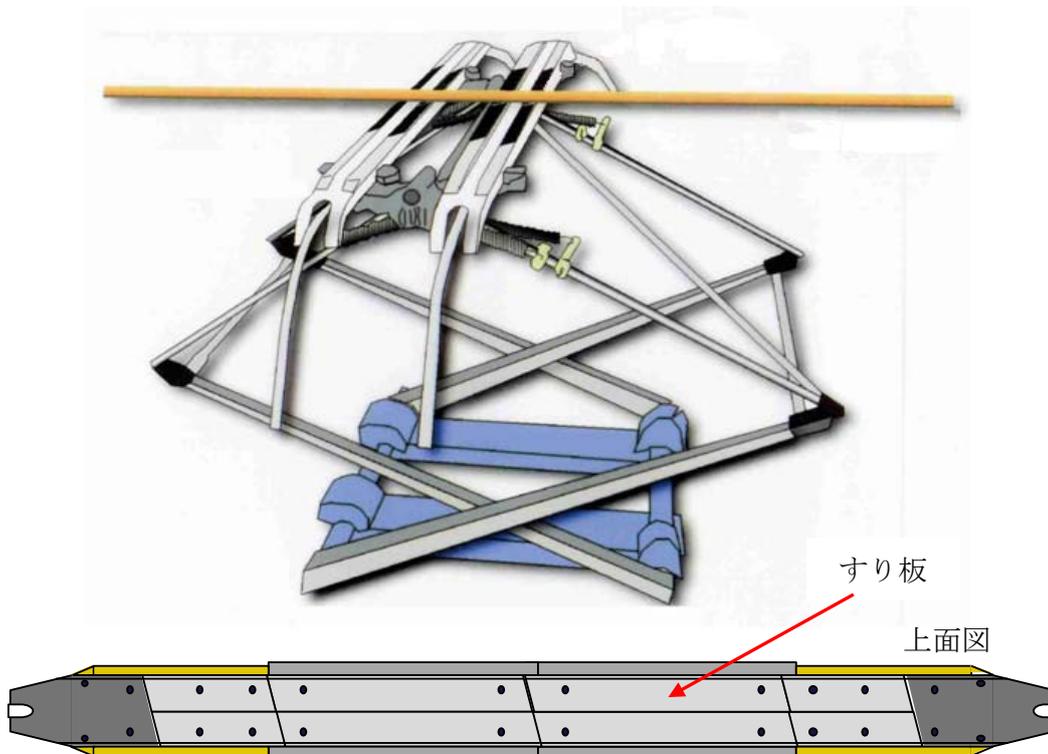


図 2.1.4 パンタグラフとすり板

2.2 トロリ線材質の変遷とその形状

2.2.1 トロリ線材質の変遷

トロリ線に求められる要件としては、電気抵抗が小さいこと、引張強度が大きいこと、耐摩耗性が優れていること、耐熱性が優れていることなどである。したがって、材料選択の自由度はそれほど大きくなく、一般的には純銅を加工硬化させて強度を向上させた硬銅が用いられている。一方で過去には経済的な理由により、その材質に鉄やアルミニウムが用いられたこともある。表 2.2.1 にトロリ線材質や形状の変遷を示す^{2.7)-2.8)}。

1890 年にイギリスで硬銅トロリ線にちょう架金具（図 2.1.2 に示したハンガと呼ばれる金具）を取り付けるための溝が付いたみぞ付硬銅トロリ線が規格化されている。

日本では、1895 年に京都電気鉄道が営業を開始しており、このときに津田電線がトロリ線を納入している。このトロリ線は溝の無い丸線だと言われている。

1914 年の京浜線の電化の際に、現在でも広く用いられているみぞ付き硬銅トロリ線が使用された。1924 年にはカドミウム銅トロリ線が試作され、中央本線や山手線などに架設された。ただし、このトロリ線は社会情勢を反映して、現在では使用されていない。また、1925 年にメートル法が制定され、トロリ線の公称断面積 110 mm²、170 mm²などが使用されるようになった。

1942 年には第二次世界大戦にともなう銅資源保護のためにアルミ合金トロリ線が開発され赤羽線十条・赤羽間に架設された。また、1943 年には鉄トロリ線、鉄覆アルミトロリ線も銅資源保護の目的で開発され、同じく赤羽線十条・赤羽間に架設された。しかし、現在ではいずれのトロリ線も使用されていない。

1955 年には耐熱性向上を目的として開発された銀入りトロリ線が、1978 年には耐熱性、耐摩耗性向上を目的として開発されたすず入りトロリ線、鉄-アルミトロリ線が実用化されている。

近年では、1993 年に銅覆鋼トロリ線（CSトロリ線）が、2010 年には析出強化型銅合金トロリ線が実用化されている^{2.9)-2.10)}。

海外においても硬銅トロリ線、銀入りトロリ線、すず入りトロリ線が広く用いられている。また、日本では使用していないマグネシウム入りトロリ線も広く使用されている。

2.2.2 トロリ線の形状

表 2.2.2 にみぞ付硬銅トロリ線の標準的な寸法を示す。なお、みぞ付硬銅トロリ線は GT (Grooved Trolley) と呼ばれ、その後ろに公称断面積を記して、区別することが一般的である。したがって、公称断面積 170 mm²のみぞ付硬銅トロリ線はGT170 と標記される。

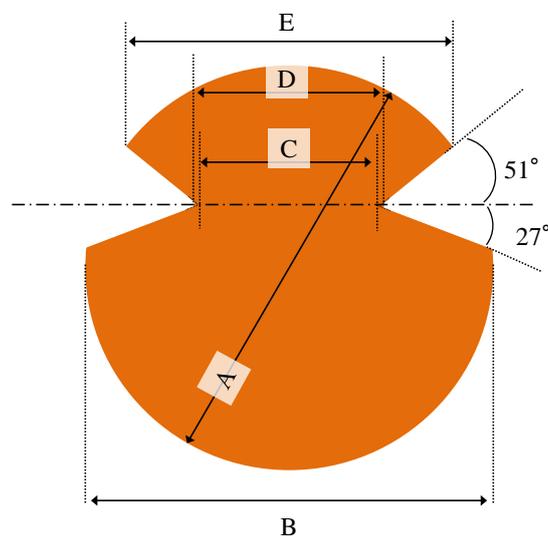
公称断面積が 170 mm²のものうち、C, D, E寸法が公称断面積 110 mm²と同じものをGT-M170 と標記している。これは 110 mm²のトロリ線を使用している線区で、架線金具の変更を行うことなく 170 mm²のトロリ線へ変更ができるように開発されたものである。

表 2.2.1 トロリ線材質や形状の変遷

西暦	国名	材質, 名称等	形状等	内容
1890	イギリス	銅	みぞ付	みぞ付硬銅トロリ線の規格化
1895	日本	銅	丸型	京都電気鉄道開業
1914		銅	みぞ付	京浜線電化
1924		カドミウム銅トロリ線		中央線, 山手線などへの導入
1925			—	メートル法の採用
1942		アルミ合金トロリ線	みぞ付	赤羽線などへの導入
1943		鉄トロリ線		赤羽線などへの導入
		鉄覆アルミトロリ線		
1955		銀入りトロリ線		鉄—アルミトロリ線を除いて, 現在でも多くの箇所で使用されている
1978		すず入りトロリ線		
		鉄—アルミトロリ線		
1993	銅覆鋼トロリ線			
2010	析出強化型銅合金トロリ線			

表 2.2.2 みぞ付硬銅トロリ線の標準的な寸法

呼称	公称断面積 mm ²	重量 kg/m	各部の寸法 mm				
			A	B	C	D	E
GT85	85	0.774	11.0	11.1	5.70	6.12	8.50
GT110	110	0.988	12.34	12.34	6.85	7.27	9.75
GT170	170	1.511	15.49	15.49	7.32	7.74	11.43
GT-M170	170	1.531	15.30	15.30	6.85	7.27	9.75



2.3 すり板材質の変遷と製造方法

2.3.1 すり板材質の変遷

すり板の材料には、トロリ線の摩耗低減を目的としたものだけでなく、当時の時代背景に影響を受けたものが用いられてきた。表 2.3.1 にすり板の変遷を示す^{2.11)-2.13)}。

1914 年にパンタグラフが導入されて以降、すり板には純銅が用いられてきた。トロリ線にも銅が用いられていたため、同種金属のしゅう動により凝着摩耗の生じやすい状態で、摩耗が激しかったと言われている。

1940 年代の第 2 次世界大戦中は銅資源節約のため、すり板に純カーボンが使用された。しかし、当時のカーボンは脆く、すり板の破損が多かったようである。また、純カーボンすり板の電気抵抗率が高いため、車両の停車中や起動直後にジュール熱による架線断線事故が多発していた。一方、純カーボンすり板が軽いこと、トロリ線の摩耗を低く抑えることができることから、私設鉄道の一部では、電車線に溶断対策を施して純カーボンすり板の使用を続けている。

1940 年後半から、純カーボンすり板の課題を解決するために、国鉄では銅系焼結合金すり板の開発を進め、1946 年頃からフィールドでの試験を始めた。そのような中で 1951 年 4 月 24 日に桜木町で純カーボンすり板を使用していた電車の電車火災事故が発生した。このときの事故原因と純カーボンすり板の使用に関連性は無いものの、架線を溶断する可能性のあるすり板の使用が全面的に見直され、国鉄のすべてのすり板が銅系焼結合金すり板に変更された。

1960 年代に入ると新幹線の開業に向けたすり板の開発が始まった。既にフランスでは 1950 年 3 月 29 日に当時の世界最高速度 (331 km/h) を記録していた。そのときの資料に「激しい離線とアーク放電によりパンタグラフは完全に破壊されていた」との記録があり、新幹線のすり板においてもアーク放電によるダメージが予想されていた。このような状況を背景に銅系焼結合金、銅系鑄造合金、鉄系焼結合金のすり板が試作され、京都・鳥飼間、東京・新大阪間で試験が行われた。当時の開発目標は走行距離（すり板期待寿命）で 5000 km～7000 km であった。この条件を満たしたすり板は、鉄系焼結合金のみであり、これ以降、新幹線ではこのすり板が用いられている。

既述したように純カーボンすり板は機械的強度が低く、電気抵抗率が高いという欠点がある一方で、トロリ線の摩耗を低減できる可能性があった。そこで、1980年代に入ると、この欠点を改良する目的で、カーボン基材に純銅を含浸するタイプとカーボンと銅の粉末を混ぜて作るタイプのすり板（これらを総称してカーボン系すり板と呼ぶ）の開発が始まり、北海道地区の交流区間でフィールド試験が始まった。その後、直流区間でも使用可能なカーボン系すり板が開発され、1990年代からJRの直流区間で使用され始めた。また、最近では炭素繊維強化炭素複合材（以後、C/C複合材と呼ぶ）に銅チタン合金を含浸したすり板が開発され、一部の鉄道事業者で使用されている。

海外においては、高速鉄道、在来線の多くで純カーボンすり板やカーボン系すり板が用いられている。例えば、フランスの交流25 kV区間では高速鉄道、在来線ともに純カーボンすり板が用いられており、直流1.5 kV区間では銅鉄合金すり板が用いられている。また、スペインの在来線では銅系焼結合金すり板と純カーボンすり板が、オランダの在来線ではカーボン系すり板が用いられている²⁻¹⁴⁾。

2.3.2 すり板製造方法

2.3.1 項で述べたようにすり板は、いくつかの種類があるが、それらを大別すると図 2.3.1 のように3種類に分けることができる。また、図 2.3.2 に各すり板の製造工程を示す^{2.15)-2.16)}。

金属系すり板は原料として、主成分となる銅や鉄の他に潤滑性を高めるための化合物（二硫化モリブデン、黒鉛など）、硬さを高めるための硬質金属粒子（クロム、フェロモリブデン、フェロチタン）を混合、成形し、融点よりも低い温度で焼結している。

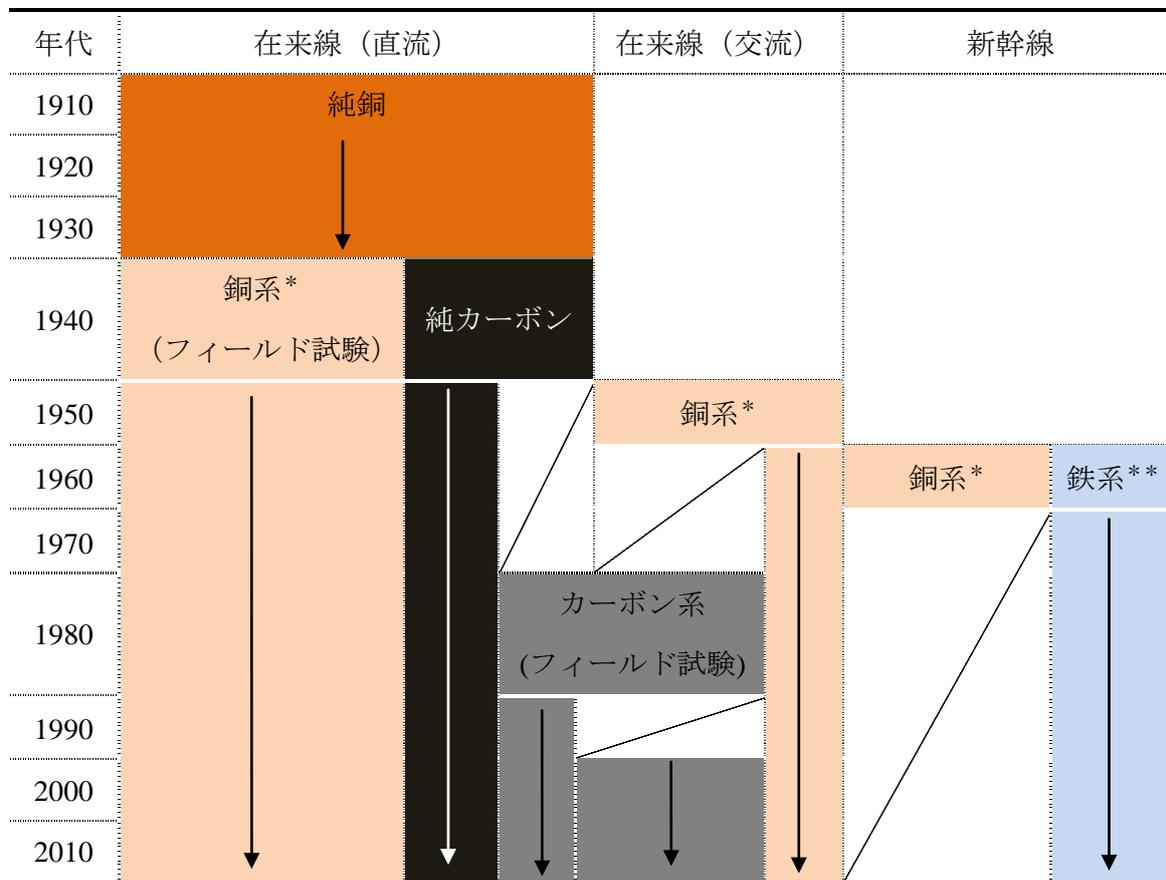
カーボン系すり板のうち、純カーボンすり板は、コークスなどの炭素粉末を成形し、1000～1500℃程度で焼成したものである。この焼成した炭素材に対して銅を含浸させることで、含浸タイプのカーボン系すり板が得られる。なお、日本のカーボン系すり板ではこの含浸タイプが最も広く使われている。

また、C/C複合材すり板は、炭素繊維で織った布を積層、圧縮ならびに成形した後に焼成し、さらに銅チタン合金を含浸させたものである。

2.3.3 すり板の形状

すり板の形状は鉄道事業者によって様々であるが、270 mmの長さで25～40 mm幅のすり板を、鉄道車両の集電電流に応じて2～4列使用する場合が多い。例として図 2.3.3 にJR西日本683系車両に搭載されているパンタグラフ上のすり板配列および形状を示す^{2.17)}。

表 2.3.1 日本におけるすり板材質の変遷



*銅系：銅系焼結合金

**鉄系：鉄系焼結合金

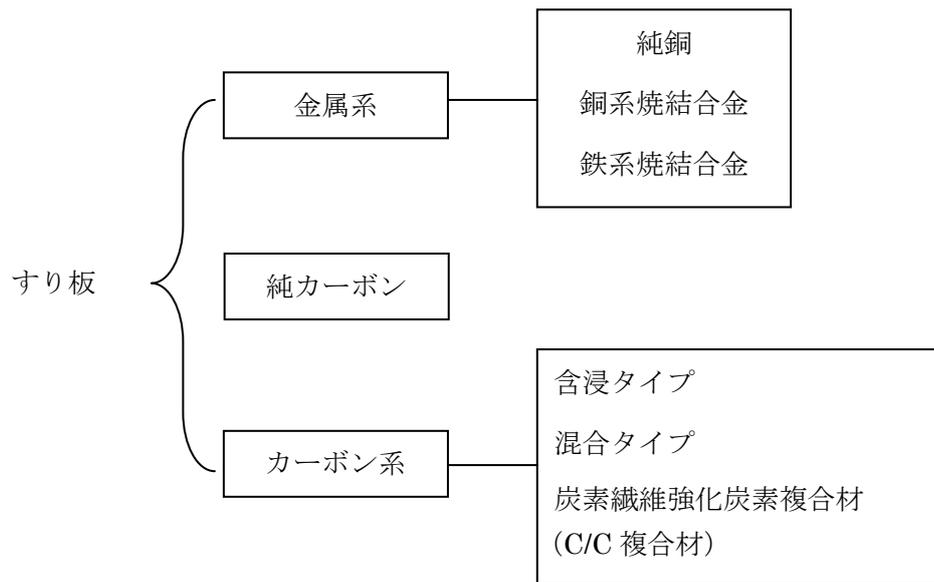


図 2.3.1 すり板の種類

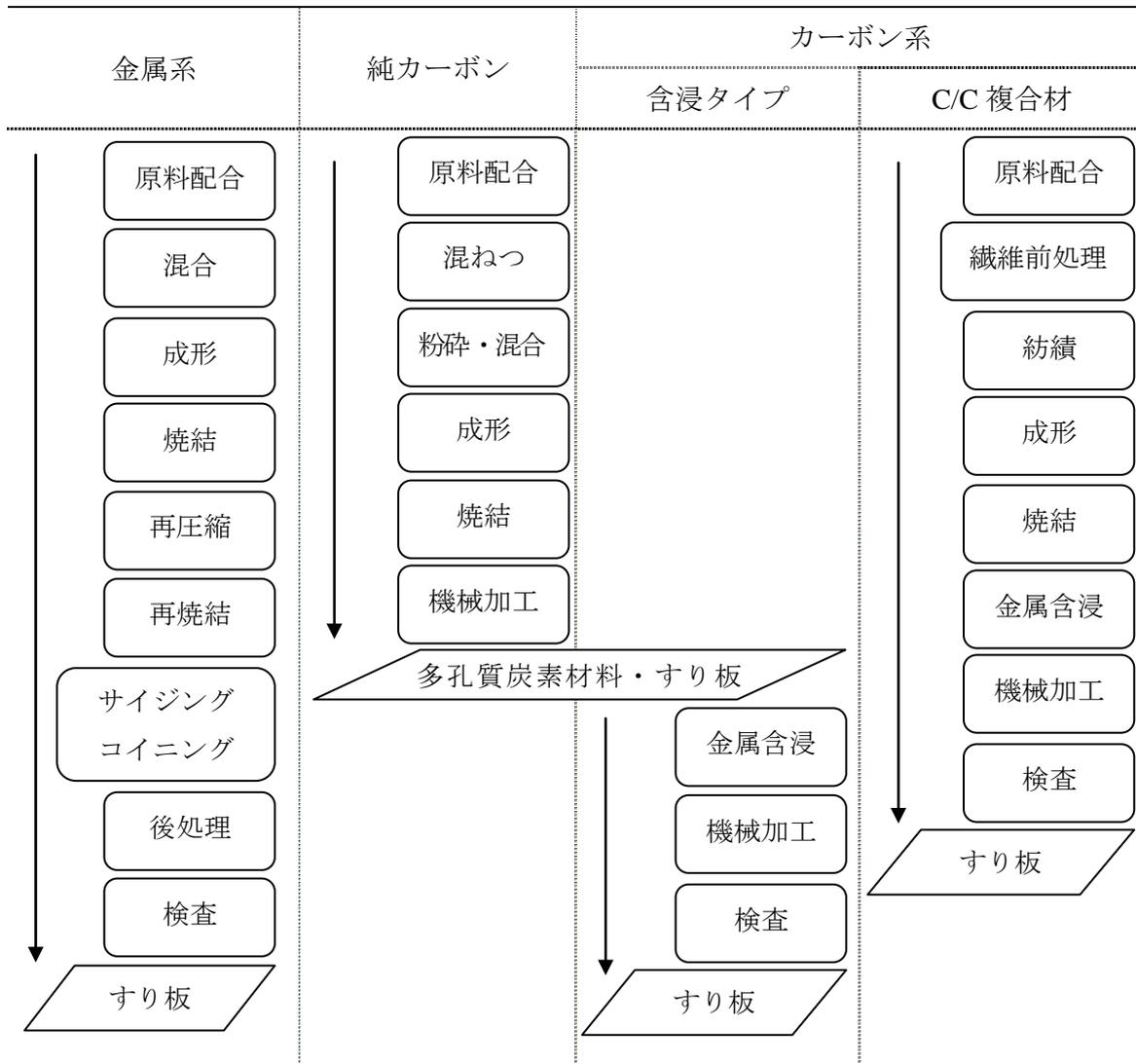


図 2.3.2 すり板の種類

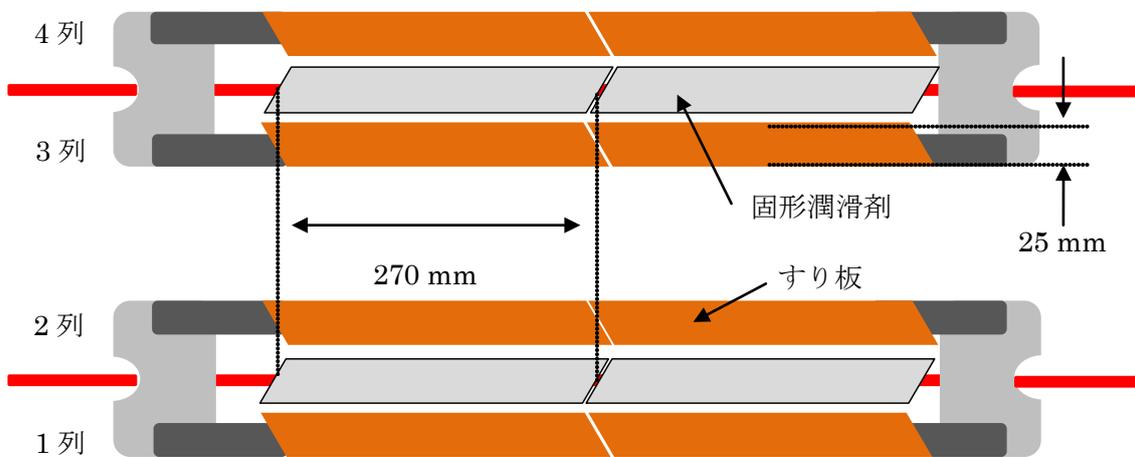


図 2.3.3 すり板の配置 (JR 西日本 683 系車両 WPS27D)

2.4 離線測定の変遷と従来の研究

日本では既設線区において営業速度を向上させる場合や新たな車両を導入する場合または新たな鉄道を敷設した場合に、集電性能と呼ばれる離線、架線金具とパンタグラフの離隔（パンタグラフによるトロリ線押上量）、トロリ線偏位の測定が行われる^{2.18)}。一方、欧州において集電性能は、離線、接触力、トロリ線押上量を指し、離線と接触力についてはどちらか一方を測定すれば良いこととなっている^{2.19)}。

日本において、離線とはトロリ線とすり板との機械的な離れを指す。また、その測定方法は、鉄道の電気方式、車両の母線の有無に応じて3種類に分けることができる。

パンタグラフに流れる電流を測定する手法を電流式離線測定、パンタグラフ電圧を測定する手法を分圧式離線測定、離線時に発生するアーク光を測定する手法を光学式離線測定と呼び、測定している物理量もしくは現象が異なるものの同じ評価指標ならびに目安値を用いている。

他方、欧州においては離線に該当する用語を **Arcing** と明確に述べているため、その測定に対しては光学式離線測定のみが用いられている。

本研究はトロリ線とすり板間の離線にともない発生するアーク放電現象ならびにその計測手法等を論じるものである。そこで、本項では主として離線測定の技術動向を述べる。

2.4.1 離線測定の変遷

離線が発生すると、同時に離線アーク光が発生するため、離線現象自体はおそらく電化間もないころから認識されていたものと思われる。また戦時中は離線アーク光が防空上厳禁であったとの記録もある。一方で、離線測定について記載された公表文献はそれほど多くない。表 2.4.1 に、以下に示す所内資料等に基づいて作成した離線測定の変遷を示す。

1937 年の鉄道大臣官房研究所（現在の鉄道総合技術研究所の前身）の所内資料「木製区分碍子附近に於けるパンタグラフの鄴電状況」に、電車内の主電動機ブラシで発生していた閃絡原因を調査する目的で、中央線 東京・立川間で試験列車を走らせたとの

記録がある。このときに架線・パンタグラフ間での離線アークの発生状況が測定されており、その方法は同資料内に記載されていなかったものの、試験車両として示されていた図のパンタグラフ近くに観測ドームが記載されていることから判断して、おそらく目視で行われたものと考えられる。

1940年頃になると、戦争の長期化に伴う輸送量の増大と資源不足を背景に、鉄道省内において、その根本的解決策が求められるようになってきた。その解決策として、高速度長大列車運転の計画が持ち上がった。特に電力設備としては銅資源の節約とアーク放電防止を直接的な機運として1940年12月に新幹線電気設備研究会が設立された。この研究会では1942年に、現在では廃線となっている下河原線（現在の中央線 国分寺から京王線 中河原駅付近を結ぶ線）で電車の試験走行が行われ、このときに電流計を用いた集電電流の測定が行われている。また、架線とパンタグラフ間で発生するアーク放電の状況とそのときの集電電流の大きさを目視で観察したとの記述もある^{2.20)}。

1953年の鉄道技術研究所の所内資料「関門隧道内トロリー線集電状況その他調査」において、パンタグラフ接触力測定^{2.21-2.22)}と離線率測定が行われたとの記載がある。図2.4.1に当時のパンタグラフ接触力圧力の測定手法を示す。パンタグラフのばね部にコンデンサを挿入し、共振条件のずれによる直流分の変化を観測したとのことである。

離線率測定については、試験用のパンタグラフすり板からわずかな電流を流し、電流計でそれを測定したとの記録があり、分圧式離線測定に近い方式である。

1955年の鉄道技術研究所の所内資料「列車高速度化試験報告」において、離線率測定を行ったとの記載がある。詳細な測定方法が記載されていないものの、複数パンタグラフを用いた車両で測定を行っていることから、現在行われている電流式離線測定法とほぼ同じ手法が用いられたものと考えられる。

1968年には、495系交直流架線試験車の走行試験が行われている。このとき直流区間においては無集電のパンタグラフに1.5 M Ω の分圧器を接続する分圧式離線測定が行われている。この測定手法は、現在行われているものとほぼ同じである^{2.23)}。また、交流区間においては架線・パンタグラフ間で発生するアークの高周波インピーダンスが高いと言う性質を利用して、パンタグラフに直列に接続したコンデンサへ高周波電圧を印加して、その高周波電圧の有無で離線を検知する手法が用いられた。同測定方法は、後に改良が加えられ、C-R式離線測定装置^{2.24)}として東海道新幹線ならびに山陽新幹線

の新幹線電気軌道総合試験車に採用されている。ただし、測定装置を設置するために専用の測定スペースである高压室が必要となるため、同線区以外では用いられていない。

1975年頃には、離線アーク光を測定するために露出計を改造したものや一眼レフカメラを改造したものが開発された^{2.25)}。1979年には、光ファイバの端部をパンタグラフの舟体に取り付け、検出部にフォトダイオードを使用した方式も開発されている^{2.26)}。1995年にはパンタグラフから数m離れた箇所に光ファイバ端子を取り付け、車内に検出部を設置する離線アーク測定装置が開発され、現在でもこれが光学式離線測定に用いられている^{2.27)}。

1978年ごろにはアーク放電消滅時に生じる負の音圧パルスを検出する音検知式離線測定^{2.28)}が行われている。また、1980年ごろにはアーク放電開始初期の電流変化ならびにアーク放電消滅直後に起きる火花放電にともなうパルス的な電流変化により生じる電波雑音を測定する電波雑音式離線測定^{2.29)}が行われている。しかし、いずれも現在では用いられていない。

2.4.2 離線測定方法

2.4.1項で述べたように離線測定として用いられる手法には、電流式離線測定、分圧式離線測定、光学式離線測定がある。測定に際してどの手法を用いるかは、鉄道の電気方式、車両の母線の有無などを勘案して決定される。

図2.4.2に離線発生時のパンタグラフ電流の変化を模式的に示す。パンタグラフがトロリ線から離れると、点Aから点Bにかけて電流が減少する。このときトロリ線とパンタグラフはアークによって繋がっているため、電圧降下はそれほど大きくない。その後、アーク放電の消孤によって、電流がゼロとなる。再びパンタグラフがトロリ線に接触することでパンタグラフに電流が流れる(点C)。したがって、光学式離線測定はAB間で、電流式離線はBC間で、分圧式離線はAB間の一部とBC間で測定を行っている。なお、パンタグラフ間を接続する母線が無い場合での離線は、アークが消孤しにくいためABの状態が多く占めることとなる。

表2.4.2に各測定手法の適用範囲を示す^{2.30)}。電流式はパンタグラフ間を接続する母線がある場合に採用できるため、交流の在来線では用いられていない。分圧式は直流区

間で、パンタグラフを無集電にして測定する方法である。ただし、集電パンタグラフを用いて測定することも可能であるが、測定精度が低下する。光学式についてはアーク光を測定するため、すべての電気方式に適用可能である。各離線測定手法の原理を以下に示す(2.30)・(2.31)。

(1) 電流式離線測定

電流式離線測定は、複数パンタグラフが高圧母線で接続されている場合に有効な手法である。図 2.4.3 に電流式離線測定方法を模式的に示す。例えば、パンタグラフ 2 が離線したと仮定すると、瞬間的にアーク放電が発生するものの、ただちに電流がパンタグラフ 1 から供給されることとなる。したがって、クランプメータ A～C の出力をモニタすることでパンタグラフ 1, 2 の離線を測定することができる。

(2) 分圧式離線測定

図 2.4.4 に分圧式離線測定方法を模式的に示す。分圧式離線測定は、無集電パンタグラフ（無負荷のパンタグラフ）に分圧器を取り付けて測定を行うものである。パンタグラフが高圧母線で接続されていると、母線を通じてパンタグラフが加圧されるため測定ができない。また、高圧母線で接続されていない集電パンタグラフで測定する場合は、離線時にパンタグラフとトロリ線がアークで繋がるため、精度が低下する。

(3) 光学式離線測定

図 2.4.5 に光学式離線測定方法を模式的に示す。光学式離線測定は離線発生時に生じる離線アーク光を検出する手法であり、パンタグラフの数、母線の有無に寄らない。なお、離線アーク光の観測は車両走行方向に対して後方が適している。一方、車両の進行方向が適宜変わるため、測定は、あらかじめパンタグラフの前後に受光部を設置し、使用する受光部を車両の進行方向に応じて変更することで行われている。

2.4.3 離線発生の主要因と要因別の対策

離線の発生要因は多岐にわたるものの、主として(1)～(5)に分類できる。

(1) トロリ線の波状摩耗

カテナリちょう架式のトロリ線に発生する波状摩耗は、すり板間隔の整数分の1である場合が多く、新幹線高速区間で機械的な摩耗に起因するもの^{2.32)}、在来線の直流電化区間で離線アークに起因するものがある^{2.33)}。また、剛体電車線区間では上記に加えて、電車の運転速度とパンタグラフの振動特性に起因するものがある^{2.34)-2.35)}。

新幹線の波状摩耗は、パンタグラフを母線で接続する対策が施されるとともに1997年頃からの500系新幹線(のぞみ)以降、原理的に波状摩耗が発生しないように1列すり板の導入を進めたことでほぼ消滅した。またその他の波状摩耗に対しては、図2.3.3に示した2列の固形潤滑剤のうち1列を取り外す方法、カーボン系すり板の使用、パンタグラフの改良などの対策が提案されている。

(2) 多数パンタグラフ走行にともなう共振

多数パンタグラフの共振は一定周期で到来するパンタグラフによって架線の固有振動が励振されることで生じる。特に、新幹線に多数のパンタグラフが搭載されていた頃に問題となっていた現象である。その共振速度は、パンタグラフ間隔と架線全体の波動伝播速度に比例し、径間長に反比例する^{2.36)}。現在では編成当たりのパンタグラフ数が削減されてきたため、あまり問題となっていない。

(3) ハンガ間隔のトロリ線凹凸

ハンガ間にはトロリ線の弛度があり、それを起因とした離線が発生する。トロリ線の波動伝播速度を向上することやパンタグラフの軽量化などの対策が提案されている^{2.37)}。

(4) トロリ線のくせ、重量金具などで生じるトロリ線上の硬点

トロリ線は工場からドラムに巻かれて架設場所へと運搬される。このときの巻き方として、すり板が接触する面を下(縦巻き)にするか、横巻きにするかでトロリ線とすり板の接触状況にも影響が生じる。現在、すべての新幹線では横巻きが使用されている。また、架線には金具が取り付けられており、そのような箇所では架線上を伝播する波動が反射する。このような箇所を硬点と呼ぶ。このような箇所でも離線が発生しやすい。

(5) トロリ線への異物の付着

しゅう動面には、経年劣化に伴う酸化被膜、冬の早朝に発生する霜や氷の付着などが発生する。このような場所を電車が走行すると、離線アークが発生する。このような状況下での離線アークは、パンタグラフを破損させることもある。酸化被膜に対しては定期的な除去が、トロリ線への霜などの付着に対しては特に新幹線で速度制限による集電電流の抑制が行われている。

2.4.4 離線が及ぼす影響と影響別の対策

離線による影響を (a) ～ (e) に列挙する。

- (a) すり板やトロリ線の溶損および摩耗の増大
- (b) 騒音の発生
- (c) 無線雑音の発生
- (d) 主電動機の閃絡
- (e) 主変圧器の偏磁とそれに伴うコンバータの動作停止

(a) については前項で述べた対策の実施、新しい材料の研究開発が今もなお進められている。

(b) の主電動機の閃絡については、2.4.1 項の 1937 年頃に問題となっていた事象であると考えられるが、これはその後の主電動機的设计変更にもなう端子間電圧の低下によってほとんど問題とならなくなった。

(c) , (d) の騒音や無線雑音の発生についてはパンタグラフの母線接続によって改善した。その経緯は以下のとおりである。

1964 年の東海道新幹線開業時、パンタグラフは 1 編成に 8 個が搭載されていた。そのため、前項で述べたように多数パンタグラフの共振、波状摩耗などにもなう離線アークの発生による騒音ならびに電波雑音の問題により、営業速度の向上が長い間できなかった。そこで 1981 年ごろからパンタグラフ数の半減化試験がスタートし、1983 年には東北新幹線でパンタグラフ数半減ならびにパンタグラフ間の母線接続の試験が行われ、速度向上を行っても騒音、電波雑音を現状レベルに維持できることがわかった。これにより、1985 年に東北新幹線へ導入された 200 系からパンタグラフ数の削減とパン

タグラフ間の母線による接続が行われている。また、東海道新幹線では 1991 年のき電方式の変更によりパンタグラフ数の削減と母線接続が可能となった。

(e) については、1987 年の 300 系新幹線の開発に向けた試験走行で車両に搭載されているコンバータの起動失敗により顕在化した。このトラブルの原因は、同一き電区間内を走行する電車の離線によるものと考えられている。この対策としてコンバータの制御方式の変更、ギャップ鉄心の採用などが行われた^{2.38)-2.39)}。

2.4.5 離線評価指標

離線は、トロリ線やすり板の摩耗を増加させるとともに、周辺環境に対する騒音や電波雑音の問題を発生させるため、少ない方がよい。また、離線時間が長くなると、車内停電の発生が懸念されるため、望ましくない。本項では日本および欧州や国際規格に採用されている離線評価指標ならびにその目安値について述べる。

(1) 日本における離線時間の目安値

電車線電圧が一定限度以下になり、電動発電機の発電電圧が著しく低下すると、主回路スイッチの接続の乱れ、制御機器の不安定動作が生じ、重大な事故となる恐れがある。そこで、電車には主回路を自動的に開放する低電圧継電器が備えられている。

パンタグラフが離線した場合、パンタグラフの電圧低下は補助電源用の電動発電機の回転慣性による逆き電力のため、直ちに生じず、ある程度の余裕時間がある。在来線における電動発電機タイプの車両において、その余裕時間は 200 ms 以下とされている。一方、近年導入が進められているインバータタイプの車両では、10~20 ms 以下とされている^{2.40)}。ただし、コンデンサを搭載することで、約 60 ms 以下まで許容している例もある。新幹線については、パンタグラフが母線で接続されているため、それほど長い時間の離線が生じないと考えられており、明確な値は決められていない。ただし、切替セクションと呼ばれる電源系統の変更箇所では 300 ms 程度の無電圧時間が発生するため、それを 1 つの目安とする場合もある。

(2) 日本における離線率の算出方法と目安値

離線率は、ある区間の走行時間に対する離線時間の総和の百分率で表わされる。通常、架線の切れ目が約 1.5 km 毎（以後、ドラムと呼ぶ）にあるため、このドラム毎に離線

率を算出することが多い。

2.4.1 項で述べたように「離線率」という用語は 1953 年頃には既に使用されている。一方で、その目安値が使われだしたのは、1964 年の東海道新幹線の開業前後であると思われる。

1960 年の資料「東海道新幹線に関する研究（第 1 冊）各論，鉄道技術研究所」の pp.159～pp.163 において、実験結果と実験式から図 2.4.6 を得ている。ただし、明確な目安値は決められていないようで、1964 年の文献 2.41 では「東京・大阪間の数回の往復運転ですり板を交換しない程度の摩耗量を目標としていること、離線率の限度として経験的に交流 20 kV で 3%以内，直流 1.5 kV で 1%以内を考えていること」が示されている。なお、この頃の離線率の測定方法が、現在の分圧式離線測定に近い方法であったことから、上記離線率の値はこの測定をベースにした値であると考えられる。

1986 年頃になると、離線率の目安値が示されるようになってくる。文献 2.42 では機械的離線で 10%以下，アーク発生率で 3%以下と示されている。同文献は新幹線について述べているものであり、これら目安値は交流区間での値であると考えて間違いない。

表 2.4.3 に日本で使用されている現在の離線率の目安値を示す^{2.40)}。直流区間と交流区間で異なる値が用いられているのは、一般的に直流電車と交流電車で、集電電流が異なるためであると言われている。

(3) 欧州ならびに国際規格における離線率の算出方法と目安値

2.4 節で述べたように欧州における集電性能は、離線、接触力、トロリ線押上量を指し、離線と接触力についてはどちらか一方を測定すればよい。特に離線の評価指標については、 NQ (percentage of arcing) が設定されており、それを式 (2.4.1) のように定義している。

$$NQ = \frac{\sum t_{\text{arc}}}{t_{\text{total}}} \times 100 \cdots (2.4.1)$$

なお、 t_{arc} : 5 ms以上の継続時間を有する離線アーク、 t_{total} : 定格電流の 30%以上を集電した時間である^{2.19)}。

国際規格では、離線の評価指標として NQ に加えて、考慮すべきアーク継続時間が NQ と異なる AQ や CQ も設定されている^{2.43)}。 AQ は NQ と同様にpercentage of arcingであり、その算出式 (2.4.2) の形は、前式と同じである。

$$AQ = \frac{\sum t'_{\text{arc}}}{t'_{\text{total}}} \times 100 \cdots (2.4.2)$$

なお、 t'_{arc} ：可視光線で検出されるすべての離線アーク、 t'_{total} ：定格電流の30%以上を集電した時間である。

CQ はpercentage of contact lossである。なお、算出式は式(2.4.1)～式(2.4.2)と同じ形で、次式となる。

$$CQ = \frac{\sum t_{cl}}{t'_{total}} \times 100 \cdots (2.4.3)$$

なお、 t_{cl} ：パンタグラフの無集電時間、 t'_{cl} ：定格電流の30%以上を集電した時間である。

表2.4.4に NQ 、 AQ 、 CQ の目安値を示す。 NQ と AQ で大きな差があるものの、これは考慮すべき離線アークの継続時間がそれぞれ異なるためである。また、 NQ が欧州由来の、 AQ が日本由来の光学式離線測定を用いることを、 CQ が日本の電流式離線測定を用いることを想定した指標となっていることも目安値の相違の背景となっている。

2.4.6 離線に関する従来の研究

離線の影響の中でもすり板やトロリ線の損耗および摩耗の増大に関する研究、その計測手法に関する研究、評価方法に関する研究は従来から進められてきている。本項ではこれらの研究についてまとめる。

(1) 離線によるトロリ線ならびにすり板損耗に関連する研究

岩瀬は、すり板の摩耗量 W を式(2.4.4)のように表し、 W_1 が非常に少ないことから、 W_2 、 W_3 について詳細な研究を進めている^{2.44)}。

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \cdots (2.4.4)$$

W_1 ：アーク放電をとまなわなないときの摩耗で、主として機械的な摩耗量

W_2 ：アーク放電のみによる損耗量

W_3 ：アーク放電の影響により増大する機械的な摩耗量

W_2 は通過電気量当たりの損耗量を係数に持ち、これを求めるためにトロリ線とすり板をしゅう動させないでアーク放電を発生させる実験を行っている。ただし、当時のすり板と現在のすり板では成分が異なるものがあるうえ、カーボン系すり板についてはこの当時まだ開発されていなかったため、実験が行われていない。また W_3 については、しゅう動摩耗試験等を行い、その結果として W へ及ぼす影響が大きいと述べている。

式 (2.4.4) については、 W_1 と W_3 を実験室もしくはフィールドで得られたデータで算出し、 W_2 を走行中に何らかの方法で測定することによって、すり板摩耗 W を予測ができることを示していると考えられ、本研究のヒントとなっている。

織田は、実験室内でトロリ線とすり板をしゅう動集電させ、通過電気量とすり板質量の変化について実験結果を得ている^{2.45)}。ここで用いられているすり板は、現在、新幹線で使用されているものとほぼ同じである。ただし、ここでの実験はアーク損耗を含むしゅう動による摩耗 (W_2+W_3) が測定されており、アークのみによる損耗量が示されていない。

アーク損耗については、超高压送電系統における一線地絡故障を想定した研究がある^{2.46)}。ここではアーク放電を発生させるために離れた電極間に発弧線を使用し、通過電気量が数kCの実験を行っている。これに対して、トロリ線とすり板間で生じる離線アークは、発弧線でアーク放電を発生させる方法と異なり、通電された2つの接点が開離することで発生する。また発弧線の使用は銅蒸気が陽光柱に混入することで、そこでの電子密度が大きく変わるとの報告^{2.47)}から考えると、アーク電流やアーク継続時間に影響を与える可能性もある。加えて直流電気鉄道における離線発生時の通過電気量は数百Cのオーダーである。通過電気量当たりのアーク損耗量が数Cオーダーの実験と数百Cオーダーの実験で異なる結果^{2.48)}が得られており、数kCの実験結果と数百Cの実験結果が異なる可能性もある。したがって、一線地絡故障を模擬した実験結果をトロリ線とすり板におけるアーク損耗に適用することができない。

岩瀬は文献 2.49 においてフィールドにおけるトロリ線の摩耗は離線アークが発生する箇所で進行する傾向にあることを報告している。これは、通電された静接点のアーク放電発生直前で、電極間に熔融ブリッジが形成されること^{2.50)}、動接点においても、熔融ブリッジの破壊とアーク放電による材料の蒸発^{2.51)}の発生が実験的、解析的に示されていることから、トロリ線の離線アークによる損耗に熔融ブリッジが深く関係していることを示唆しているものと考えられる。しかし、トロリ線とすり板間での現象について具体的な観察や損耗量の算出などは行われていない。

(2) 計測手法に関する研究

日本では 1995 年に開発された離線アーク測定装置が現在でも使用されている。フランスでは 1989 年に石英光ファイバを用いた測定装置が開発されている^{2.52)}。

日本とフランスにおいて使用されている離線アーク測定装置には、次のような特徴がある。日本の離線アーク測定装置は、プラスチック光ファイバを用いているため、後述するフランスの石英光ファイバを用いた測定装置に比べて安価で、光ファイバの取扱いも容易である。一方、プラスチック光ファイバが主として可視光線を透過するため、測定装置は離線アーク光を可視光線で検出する。そのため、測定は太陽光の影響を受けやすい。フランスの離線アーク測定装置は、石英光ファイバを用いているため高価である。例えば、石英光ファイバの価格は、プラスチック光ファイバの約 10 倍であり、測定装置全体の 2/3 を占める。しかし、石英光ファイバは、広範囲の波長域の電磁波を透過する特長がある。加えて、離線アーク光の放射強度は、300 nm 以下において太陽光よりも大きい。そこで、フランスの離線アーク測定装置は、石英光ファイバと光電素子の間に紫外線を透過する干渉フィルタを設置して、太陽光の下での離線アーク光の測定を可能としている。

近年、走行試験や専用車両を用いた検査は、夜間の保守作業に影響を及ぼさないようにするために、昼間の時間帯に行われるようになってきた。そのため、日本においても離線アークの測定に太陽光の影響を受けにくい紫外線を検出する手法が求められている。しかし、上述したように石英ファイバの使用にはいくつかの課題がある。

(3) 評価指標に関する研究

式 (2.4.4) に示したように、以前より離線アークによるすり板の損耗がすり板全体の摩耗に影響を及ぼすことがわかっていた。また、図 2.4.6 にもあるように集電電流に応じて離線率の目安値を変える試みもあったようである。

離線の評価指標に通過電気量を用いる試みも過去になされている。寺田らは通過電気量をフィールドで測定した結果を報告している。彼らは試験列車を走らせて光学式離線測定でアーク継続時間を、クランプメータで離線アーク発生時の電流を測定したうえで、それらから通過電気量を算出している^{2.53)}。また、走行後のすり板摩耗量も測定しており、通過電気量とすり板摩耗量の関係も示している。一方で、目安値の策定にまでは至ってなく、加えて、この通過電気量の算出方法は従来の光学式離線測定と集電電流の測定（いわば電流式離線測定）を同時に行う必要があり、計測が煩雑になるうえアークのみを測定する欧州でこの評価指標が受け入れられない可能性もある。

表 2.4.1 離線計測手法の変遷

西暦	光学式離線測定	分圧式離線測定	電流式離線測定	その他
1937	目視			
1942	目視			
1953		△		
1955			○	
1968		○		
1975	露出計 一眼レフカメラ			
1978				音検知式離線測定
1979	△			
1980				電波雑音式離線測定
1995	○			

△：現在の測定方法に近い手法

○：現在の測定方法

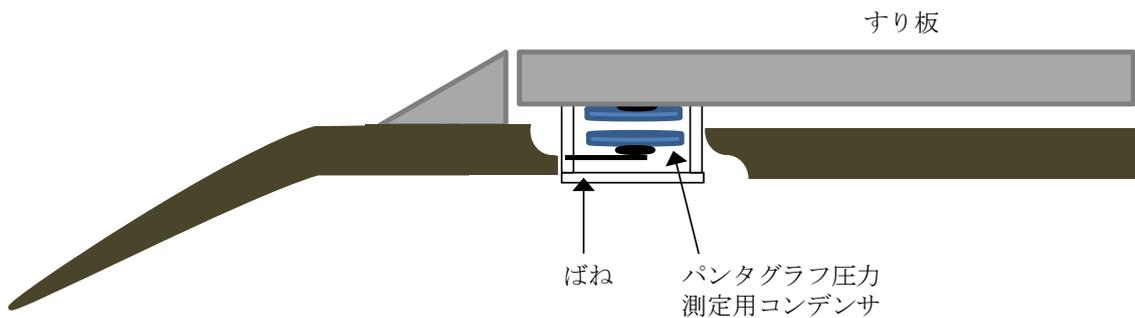


図 2.4.1 パンタグラフ接触圧力測定方法

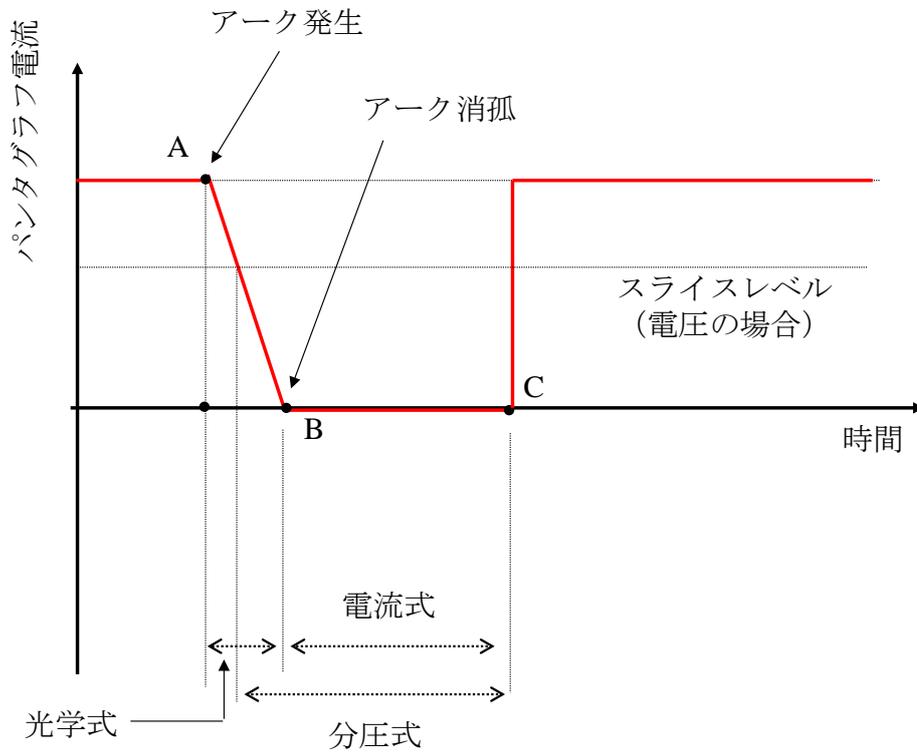


図 2.4.2 離線発生時のパンタグラフ電流の変化

表 2.4.2 離線測定の適用範囲

電気方式	電流式	分圧式	光学式
新幹線 (交流)	○		○
在来線 (直流)	○	○	○
在来線 (交流)			○
集電ならびに母線の有無	電流式	分圧式	光学式
集電, 母線有り	○		○
集電, 母線無し		△ (精度低下)	○
無集電, 母線無し		○	

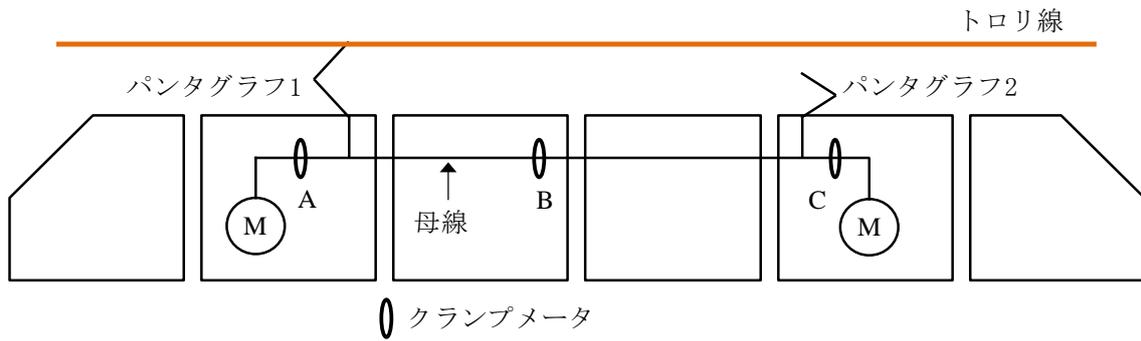


図 2.4.3 電流式離線測定

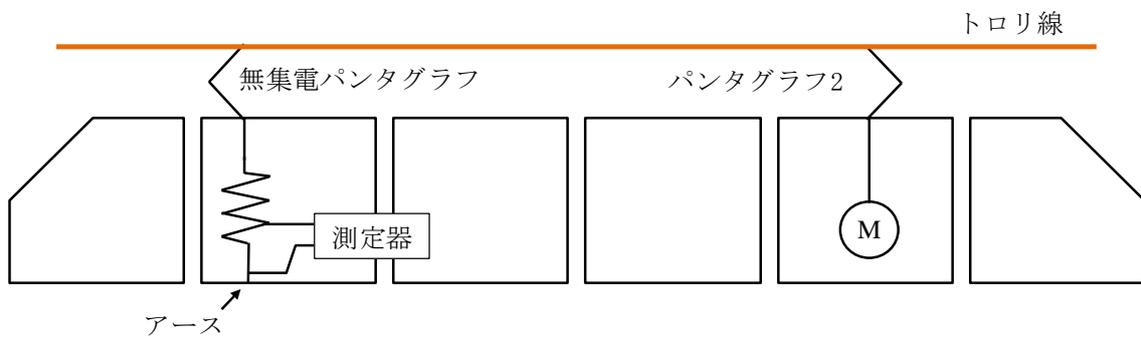


図 2.4.4 分圧式離線測定



図 2.4.5 光学式離線測定

表 2.4.3 日本における離線率目安値

電気方式	良好な集電	通常許容される集電	やむを得ぬときの集電
直流	1%	3%	5%
交流	10%	20%	30%

- (1) 車両速度 100 km/h で、パンタ 1 個で 500gr を
 摩耗限度とす。
 (2) スリ板はプロイメツト (B. B.) で、パン圧 5.5
 kg とす。

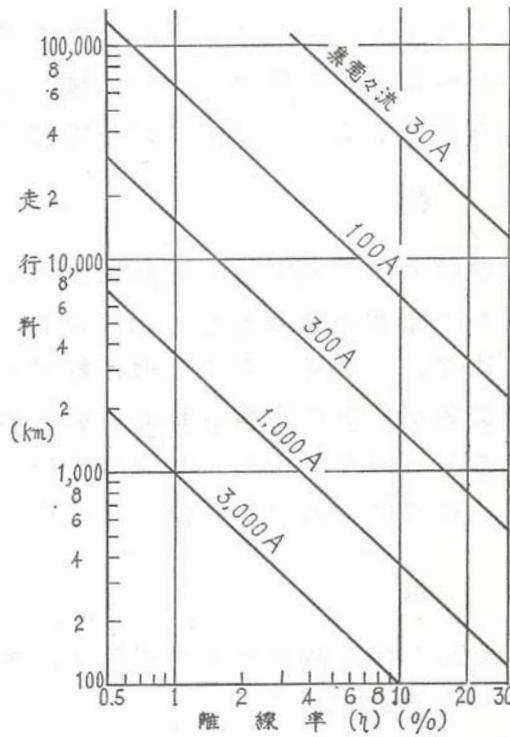


図 2.4.6 離線率と走行距離の関係

(東海道新幹線に関する研究 (第 1 冊) 各論, 鉄道技術研究所, 1960, p.160
 第 2 図より)

表 2.4.4 国際規格における離線率の目安値

評価指標		速度		
		160 km/h 以下	160~250 km/h 以下	250 km/h 超
<i>NQ</i>	直流	0.1%以下		0.2%以下
	交流	0.1%以下	0.2%以下	
<i>AQ</i>		5%以下		
<i>CQ</i>		30%以下		

参考文献

- 2.1) 鉄道建設業協会編：「日本鉄道請負業史 明治篇」，鉄道建設業協会（1967）
- 2.2) 老川慶喜：「日本鉄道史 幕末・明治編」，中公新書（2014）
- 2.3) 持永芳文宮本昌幸編著：「鉄道技術 140 年のあゆみ」コロナ社（2012）
- 2.4) 電気鉄道技術変遷史編纂委員会：「電気鉄道技術変遷史」，オーム社（2014）
- 2.5) 鉄道省：日本鉄道史（下），pp.352-353（1921）
- 2.6) 小林正義：国鉄アプト式電気機関車（上），ネコ・パブリッシング，Vol. 147, p.24,（2011）
- 2.7) 槇島正三，大間武，杉本芳香，松井一三，荻原正雄，小寺昇：「電車線路金具の歴史」，三和新聞社（1972）
- 2.8) 電車線技術進展のあゆみ編集委員会編：「電車線技術進展のあゆみ」，電車線工業協会（1996）
- 2.9) 長沢広樹，小比田正，青木純久，片山信一：「銅被覆鋼線のトロリ線への適用」，鉄道総研報告，Vol. 5, No. 5（1991）
- 2.10) 原田智，清水政利，池田国夫，佐藤純一，小谷野昭一，近成健二：「PHC トロリ線を用いた新幹線用シンプル架線の開発」，鉄道総研報告，Vol. 21, No.10（2007）
- 2.11) 久保田喜雄：「パンタグラフすり板」，RRR，Vol. 71, No. 9, pp.28-pp.31（2014）
- 2.12) 松山晋作：「パンタグラフすり板とトロリー線」，金属，Vol. 70, No. 2, pp.42-50（2000）
- 2.13) 寺岡利雄，土屋広志：「パンタグラフすり板材料の開発動向」，JREA，Vol. 32, No.2, pp.46-49（1989）
- 2.14) 鉄道における環境に配慮した電車線のメンテナンスに関する調査専門委員会編：「鉄道における環境に配慮した電車線のメンテナンスに関する調査報告」，電気学会，No.1235, pp.14-15（2011）
- 2.15) 久保俊一：「パンタグラフ用カーボンすり板」，セラミックス，Vol. 42, No.12, pp.970-972（2007）
- 2.16) 鉄道総合技術研究所：「電車線とパンタグラフ」，研友社，第 7 章，pp.1-9（2010）
- 2.17) 最近の集電技術動向に関する調査専門委員会編：「最近の集電技術動向に関する調査報告」，電気学会，No.984, p.69（2004）

- 2.18) 鉄道総合技術研究所編, 運輸省鉄道局監修:「在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説」, 研友社, pp. 46-50, (1993)
- 2.19) CENELEC: "EN50317 Railway applications- Current collection systems- Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line", European Committee for Electrotechnical Standardization, (2012)
- 2.20) 乙部實:「架空電車線の特性試験」, 電気学会雑誌, Vol.63, No. 661, 1943
- 2.21) 前鶴英示, 堀木健次:「容量型パンタグラフ動圧力測定装置」, 電気三学会 第26回連合大会講演予稿
- 2.22) 前鶴英示, 堀木健次, 南山芳文:「パンタグラフの接触圧力に関する試験」, 鉄道業務研究資料, Vol. 9, No.12, 1952
- 2.23) 堀木健次, 市川松太郎, 安松栄作:「495系交直流架線試験車」, 鉄道技研速報, No.68-1014, 1968
- 2.24) 根津一嘉, 久須美俊一, 福谷隆宏, 長沢広樹:「C-R式離線測定装置の開発」, 鉄道総研報告, Vol. 15, No.6, (2001)
- 2.25) 仲摩文雄, 市川松太郎, 長沢広樹:「アーク検出による離線測定」, 鉄道技研報告, No.1251, (1983)
- 2.26) 渡辺邦美, 藤田豊志:「光ファイバー方式離線測定法の開発」, 鉄道技研速報, No.79-73, (1979)
- 2.27) 清水政利:「光ファイバ型離線アーク測定装置の開発」, 平成8年電学全大, No. 5, pp.395-396 (1995)
- 2.28) 真鍋克士, 森川武雄, 智野貞弥:「新幹線集電系騒音の実態調査」, 鉄道技研速報, No. 78-11, (1978)
- 2.29) 新幹線総合試験線高速試験推進グループ:「319km/h速度向上試験結果概要」, 鉄道技研速報, No. 80-109, pp.54-59 (1980)
- 2.30) 根津一嘉:「現地・現車試験における測定と評価(1)」, 鉄道と電気技術, Vol. 19, No. 4, pp.55-58, (2008)
- 2.31) 根津一嘉:「現地・現車試験における測定と評価(2)」, 鉄道と電気技術, Vol. 19, No. 5, pp.50-54, (2008)

- 2.32) 真鍋克士：「トロリ線波状摩耗の発生機構解明」，鉄道総研報告，Vol.13, No.7, pp.13-18 (1999)
- 2.33) 網干光雄，長沢広樹：「トロリ線波状摩耗対策の開発（在来線）」，鉄道総研報告，Vol.6, No.7, pp.37-44 (1992)
- 2.34) 網干光雄，中谷浩，東海林博行：「剛体電車線における波状摩耗の発生機構」，電学論 D，Vol.126, No.2, pp.109-115 (2006)
- 2.35) 網干光雄，小山達弥，早坂高雅，松村周：「剛体電車線における波状摩耗の発生機構とその抑制策」，電学論 D，Vol.133, No.8, pp.852-858 (2013)
- 2.36) 真鍋克士，藤井保和：「多数パンタグラフ走行に伴う共振現象と対策」，鉄道総研報告，Vol.2, No.12, pp.8-14 (1988)
- 2.37) 真鍋克士：「ハンガ間隔周期的離線現象とその対策」，鉄道総研報告，Vol.6, No.9, pp.33-42 (1992)
- 2.38) 石川栄，稲玉哲：「新幹線“スーパーひかり”の AC ドライブシステム」，電学誌，Vol.110, No. 2, pp.105-112 (1990)
- 2.39) 石川栄：「高速鉄道車両あらたな時代へⅡ “のぞみ” に結実した誘導電動機駆動システム」，電学論 D，Vol. 114, No.6, pp.604-607 (1994)
- 2.40) 鉄道総合技術研究所編：「電車線とパンタグラフの特性」，研友社，p.92 (1993)
- 2.41) 桑沢郁郎：「架線と集電」，電気学会雑誌，pp.35-42 (1964)
- 2.42) 藤田敏，望月旭：「鉄道の近代化—新幹線の今後の技術開発動向—」，電気学会雑誌，pp.31-38 (1986)
- 2.43) IEC：”IEC 62486 Railway applications- Current collection systems- Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access)” ， International Electrotechnical Commission, (2010)
- 2.44) 岩瀬勝：「パンタグラフすり板の摩耗（1）—アーク発生の影響—」，鉄道技研報告，No.327 (1962)
- 2.45) 織田修：「新幹線における集電系摩耗についての考察」，鉄道技研報告，No.1323 (1986)
- 2.46) 渋谷正豊：「棒電極端面に形成された大電流交流アーク放電による電極溶損」，電学論 B，Vol.113, No.4, pp.327-334 (1993)

- 2.47) 作田忠裕, 鬼頭幸生, 宮地巖:「銅蒸気混入による高温空気中の電子密度の増大」, 電学論 A, Vol.98, No.4, pp.209-214 (1978)
- 2.48) 早坂高雅:「硬銅トロリ線とカーボン系すり板で形成された接点における開離時アークの諸特性と損耗量の関係」, 電気学会交通・電気鉄道研資, TER-09-25, pp.51-55 (2009)
- 2.49) 岩瀬勝:「パンタグラフすり板の摩耗 (II)」, 鉄道技研報告, No.217 (1961)
- 2.50) 森正美, 河野彰夫:「通電開離面に形成する溶融ブリッジの材質特性」, 電学論 D, Vol.125, No.5, pp.432-437 (2005)
- 2.51) 柳田憲史, 岩田健, 加藤達朗, 土谷撰, 藤垣哲朗, 飯塚元信:「摺動通電時におけるブラシ摩耗解析モデル化の基礎検討」, 電学論 D, Vol.132, No.12, pp.1097-1103 (2012)
- 2.52) Michel JUTARD, Marc FITAIRE, Émile LE DUC:”Moyens d’ étude des arcs de rupture du contact pantographe-caténaire”, REVUE GÉNÉRALE DES CHEMINS DE FER, Vol. 108, pp.5-15, 1989 (in French)
- 2.53) 寺田泰隆, 藤井保和, 久須美俊一:「現車試験によるすり板摩耗量とアーク量の測定結果」, 平成 13 年電気学会産業応用部門大会, 予稿集, pp.849-850 (2001)

第3章 実験装置の開発と電極材料

3.1 実験装置の開発

離線アークがトロリ線やすり板に及ぼす影響を明らかにするためには、2.4.6項に示したようにしゅう動による影響、発弧線による影響などを排除した実験を行う必要がある。そこで、本研究を始める前に実験装置を開発することとした。以下に実験装置を開発する上で行った検討を示す。

(1) アーク放電の発生方法に関する検討

しゅう動せず、発弧線も用いずに離線アークを発生させる実験装置としては、以下に示す①～③を挙げることができるが、実際の電気鉄道における離線アークの発生を模擬することを考え、③の方法による実験装置を開発することとした。

- ① 開いた接点にアーク放電の励起のために高周波電圧を印加し、そこに直流もしくは商用周波数の電流を通電する実験装置^{3.1)}
- ② 開いた接点に大きな電圧を印加する実験装置^{3.2)}
- ③ 閉じた接点に電流を流した状態で、その接点を開放する実験装置^{3.3)}

(2) 電極配置に関する検討

電極の配置に関しては鉛直方向もしくは水平方向が考えられる。しかし、陽光柱は高温であり、周囲の室温ガスよりも比重が小さいという特徴を有するため^{3.4)}、電極配置が水平方向の場合、浮力の影響を受けて電極間で弧を描くこととなる。このような場合、電極間距離と陽光柱の長さは一致しない上、場合によっては電極上のアーク発生箇所が移動することも考えられる。

一方、電極配置が鉛直方向の場合、浮力の影響を考える必要が無いが、電極に流れ込む電流が磁界を形成して陽光柱の動きに影響を及ぼす可能性はある。その影響を可能な限り小さくすることができれば、アーク放電の発生位置をコントロールしやすくなり、電極間距離と陽光柱の長さもほぼ一致させることができる。そこで、実験装置の電極配置を鉛直方向とし、電極への電流の供給方法と電極形状に工夫を加えることとした。

(3) 接点开離方法に関する検討

接点の開離には、アクチュエータを用いる方法が一般的であり、実験装置も簡単に構成することができると考えられた。しかし、次項で述べるが高電圧を使用すること、アーク遮断距離を確保する必要があることから、大きながいしで電極を支持した上で、電極開離時のストロークを十分に確保する必要があった。また、これに加えて、アーク継続時間が数 ms～数百 ms の実験を行うことを考えると、十分な初速度を確保する必要もあった。

そこで実験装置の電極開放機構にクラッチを用い、実験スタートと同時にクラッチを繋いで電極を開離させることで質量の大きな可動部に十分なストロークと初速度を与えることとした。

(4) 実験装置内での加圧部と非加圧部間の離隔等に関する検討

実験装置は直流 1.5 kV のアーク放電実験ができるように加圧部と接地部との離隔を、直流 1.5 kV の電気鉄道において一般的に用いられているアーク遮断距離である 250 mm 以上とした^{3,5)}。なお、将来的により大きな電圧で試験ができるように実験装置のがいしやケーブルには 6.6 kV 用の部材を採用した。

図 3.1.1 に陽極に約 1m の長さのトロリ線と陰極に 270 mm の長さのすり板をセットした実験装置を示す。電流は A, B からトロリ線ならびにすり板へ流れ、A', B' で電源に戻る。これにより陽光柱へ加わる電磁力の影響を小さくした。

図 3.1.2 に電極の開離速度を 10 mm/s に設定した場合の電極間距離の時間変化を示す。電極間距離は、実験結果を見易くするために、実験開始前の接点が閉じている状態を基準とし、そこから鉛直下向きを負として示している。開離速度は、設定値である 10 mm/s より大きく、約 14 mm/s であった。なお、以後、開離速度は設定速度を示すものとする。

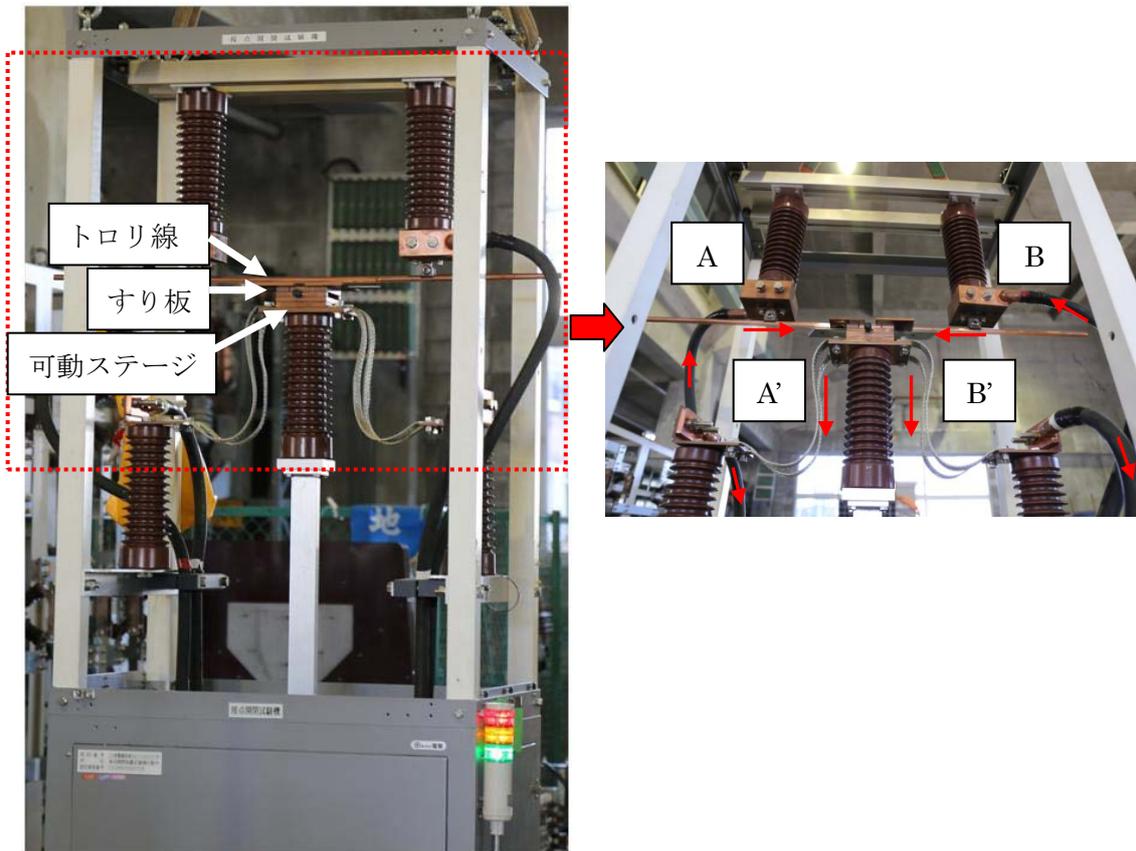


図 3.1.1 実験装置

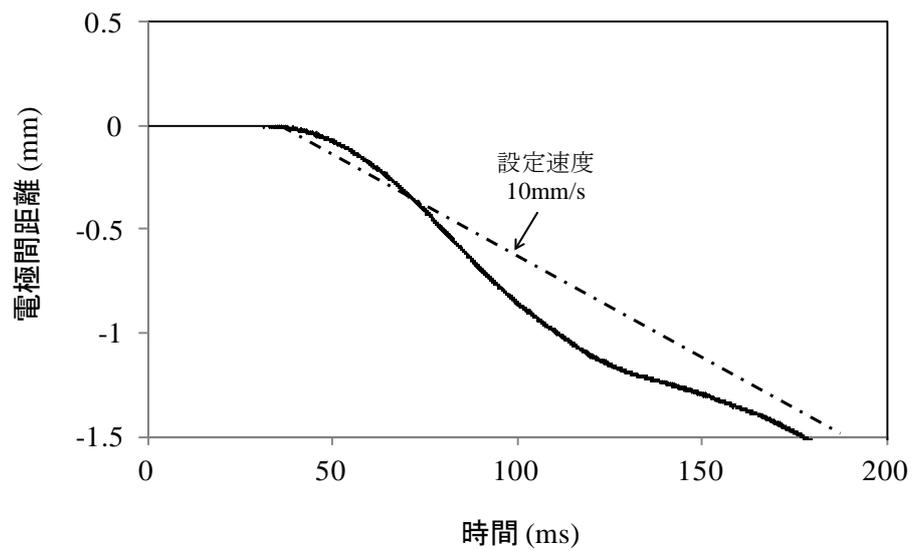


図 3.1.2 電極間距離の時間変化

3.2 電極材料

表 3.2.1 に各電極に用いた材料の種別と成分を示す。実験に用いた電極は、陽極にみぞ付き硬銅トロリ線 110 mm²、陰極に在来線で一般的に使用されているカーボン系すり板の一種である PC78A ならびに新幹線で使用されている鉄系金属すり板の一種である BF31 を使用した。PC78A は 2.3.2 項で述べたカーボン系すり板のうち、含浸タイプのすり板である。

図 3.2.1 に、使用した電極の形状とアーク放電を発生させた箇所を示す。電極は 20～30 mm の長さのトロリ線と約 20×25×10 mm のすり板に加工している。アーク放電を発生させる面は、トロリ線側が大弧面と呼ばれる通常の使用においてすり板がしゅう動する箇所とすり板側が平らな面である A の箇所とした。

通電状態にあるトロリ線とすり板を開離すると、アーク放電はトロリ線とすり板の不特定の箇所で生じる。特に陽光柱は、すり板の角部に移動しやすく、このような状況が発生すると、アーク放電による損耗と直接的に関係のない、すり板の欠損などが生じる。これは後の実験結果にばらつきを生ずる要因となる。

そこで、アーク放電の発生箇所を A の箇所にコントロールするために、トロリ線を半径 1 m 前後で曲げている。これにより陽光柱の動きを抑えることができ、結果としてデータのばらつきも抑えることができる。

トロリ線とすり板は、実験前に 200 番の紙やすりで接触面を研磨したうえで、エタノールで脱脂し、固定ステージにトロリ線を、可動ステージにすり板をセットした。

表 3.2.1 電極材料の種別と成分

電極	種別	成分 (重量%)
陽極	GT110	Cu (99.96%)
陰極	PC78A	Cu (50%) , C (50%)
	BF31	Fe (85~95%) , Ni (3%)

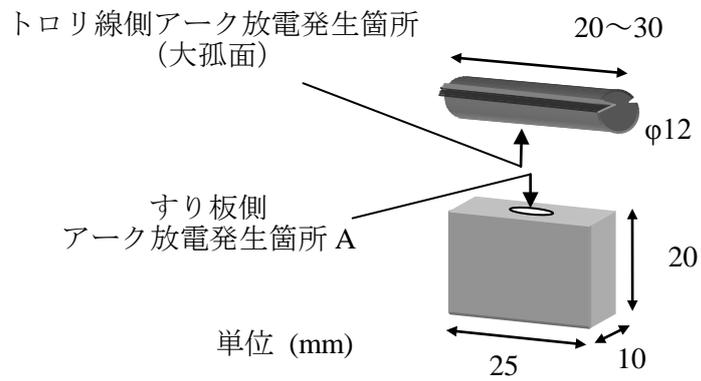


図 3.2.1 電極の形状

参考文献

- 3.1) 島田健夫三, 小比田正 : 「アーク集電の基礎的検討」, 鉄道総研報告, Vol. 9, No. 9, pp.43-48 (1995)
- 3.2) J. L. Smith, W. S. Boyle : 「Fundamental Processes of the Short Arc with Applications to Contact Erosion and Percussion Welding」, The Bell System Technical Journal, Vol. 38, pp. 537-552 (1959)
- 3.3) J. Sekikawa, T. Kubono : 「Voltage-Current Characteristics of Breaking Arc at Constant Opening Speed in the Air」, IEEE Trans. Compon. Packag. Technol., Vol. 27, No. 1 (2004)
- 3.4) 安藤弘平, 長谷川光雄 : 「溶接アーク現象」 p.38 産報 第5版 (1973)
- 3.5) 電車線技術進展のあゆみ編集委員会編 : 「電車線技術進展のあゆみ」, pp.142-143 電車線工業協会 (1996)

第4章 離線アークがすり板へ及ぼす影響

4.1 緒言

しゅう動集電における材料の摩耗は式(2.4.4)で表わされる。式中の W_2 は通過電気量当たりの損耗量を係数に持つ。そこで、本章では、アーク放電が発生した際の通過電気量と電極材料の質量変化の関係や電極の表面状態について述べる。

4.2 実験方法と条件

4.2.1 実験装置

実験装置は図3.1.1に示したものを、電極は表3.2.1の材料を図3.2.1の形状に加工して使用した。図4.2.1に実験装置ならびに測定装置を模式的に示すとともに、図4.2.2に回路図を示す。

本実験における通過電気量は、すり板1列当たり600A前後を通電できるように開発が進められていること、ならびにトロリ線とすり板の離線(機械的な離れ)時間が直流電気鉄道において最大でも200 msecであることを考慮して、数百Cのオーダーとした^{4.1)}。通過電気量の変更は、印加電圧、通電電流をそれぞれ50~75 V、100~150 Aで変えるとともに、可動ステージの開離速度を5~20 mm/sで変えることで行った。

4.2.2 高速度カメラ

GT110とPC78Aのアーク放電実験の際に高速度カメラによる撮影を行った。実験はトロリ線とすり板を上下対にして行っているため、アーク放電が発生している面のすり板の状態を観察することが難しい。そこで、本来であれば、図3.2.1のAの箇所でアーク放電を発生させるものであるが、高速度カメラの撮影のときのみ、図4.2.3に示すB

の箇所とトロリ線の大孤面とでアーク放電を発生させた。なお、高速度カメラは PC78A から 300 mm 程度離れた箇所に 25×20 mm の面が撮影できるように設置した。撮影時の高速度カメラの設定は、1 秒当たり 2000 フレーム、シャッタースピード 1/10000 秒である。

4.2.3 電極質量測定

アーク放電が発生すると、電極表面にはアーク痕としてクレータ状の窪みが形成されるとともに電極の質量変化が生じる。電極の質量変化量の算出には、クレータ状の窪みの体積を測定し、それに電極の密度を乗じる方法がある。しかし、この場合、アーク放電によってクレータ状の窪み箇所やその周囲において、密度変化が生じると、正確な質量変化の値を得ることができなくなる。そこで、電極の質量変化量は、アーク放電前後の電極の質量を測定することで求めた。測定には 0.1 mg まで計測可能な電子天秤を使用した。

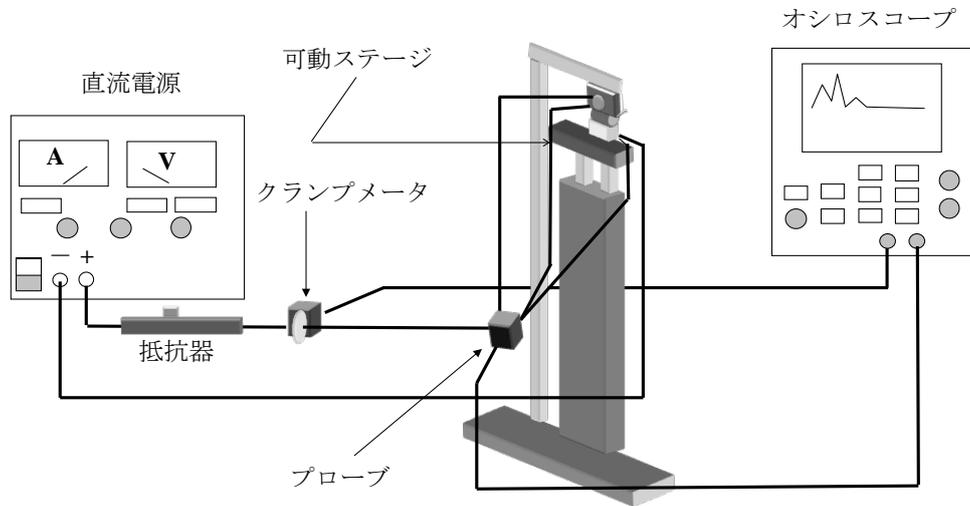


図 4.2.1 実験装置ならびに測定装置

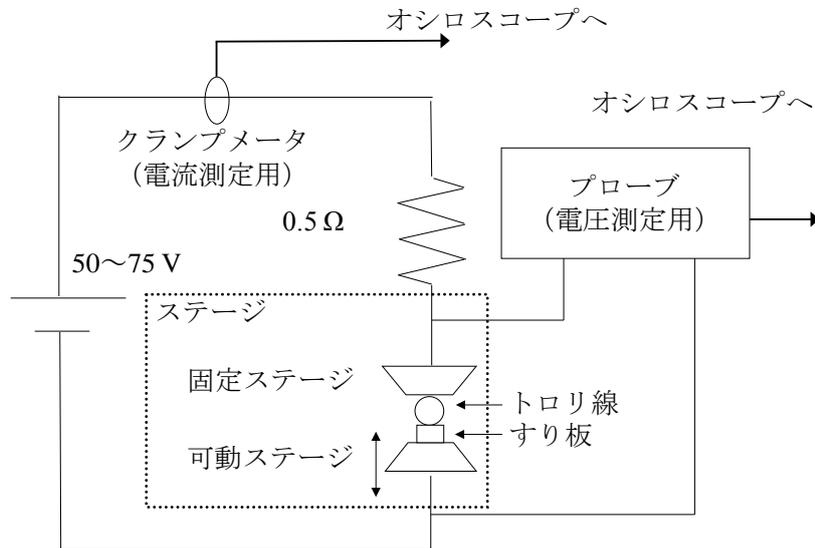


図 4.2.2 回路図

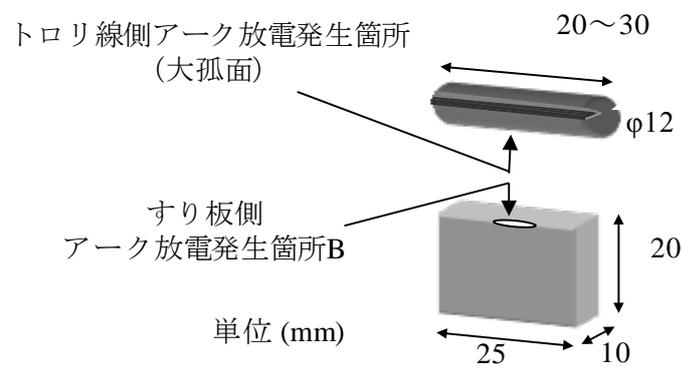


図 4.2.3 高速度カメラ撮影時のアーク放電発生箇所

4.3 実験結果

4.3.1 陽極 GT110, 陰極 PC78A

図 4.3.1 にGT110 とPC78Aを電極に用いて 1 回のアーク放電を発生させた際の通過電流量と電極の質量変化量の関係を示す。なお、図中には通電電流の値も示している。この結果から切片を 0 とした最小二乗法で陽極GT110 の質量変化量 M_{GT-PC} (g)と陰極PC78Aの質量変化量 M_{PC} (g)を通過電流量 Q (C)の関数として表すと次式となる。

$$M_{GT-PC} = 2.0 \times 10^{-5} Q \quad \dots (4.3.1)$$

$$M_{PC} = -7.0 \times 10^{-5} Q \quad \dots (4.3.2)$$

なお、本実験条件である 100~150 A の通電電流の範囲において、質量変化量の電流依存性は、観測されなかった。図 4.3.2~4.3.3 に約 170 C のアーク放電を発生させた後に各電極の表面をデジタルマイクロスコープで観察した結果を示す。図中の数値は、デジタルマイクロスコープの計測機能を用いて計測した値である。GT110 の表面には同心円状に直径約 1700 μm と 450 μm のアーク痕が形成されている。また、PC78A の表面には粒状物質が確認でき、黒色の直径 1250 μm 、茶色の直径 4500 μm のアーク痕も認められる。粒状物質は黒色の箇所であって少なく、その周辺で多く形成されていた。なお、デジタルマイクロスコープの 3 次元凹凸計測の結果、GT110 の表面には、約 100 μm の窪みが観測された。一方で、PC78A の表面には、粒状物質を除いて数 μm 以上の窪みは観測されなかった。

図 4.3.4 (a) ~ (d) に高速度カメラを用いてアーク放電発生中の PC78A の側面を観察した結果を示す。なお、PC78A に発生したアーク放電の陽光柱が完全に消えた瞬間を 0 msec としている。同図 (e) にアーク放電終了後に同じ箇所をデジタルマイクロスコープで観察した結果を示す。また、このときの平均アーク電流、通過電流量は約 49 A, 46 C である。陽光柱が消える直前である (a) では、PC78A に半円状の輝点を確認できる。また輝点の周囲に粒状物質も確認できる。その後、(b) でアーク放電が終了し、(c) ~ (d) と時間の経過とともに (b) の輝点が小さくなる。(c) ~ (e) の白い実線は (b) における輝点の縁である。白い実線内では粒状物質が形成されて、その後、落下するもの (図中 A) や落下せずにより板に付着するもの (図中 B) が確認できる。(e) に示す

ように輝点の内側に黒色の箇所があり、その直径は 1650 μm である。粒状物質は黒色箇所ほとんど確認できず、550 μm の範囲に多く確認できる。

4.3.2 陽極 GT110, 陰極 BF31

図 4.3.5 に GT110 と BF31 を電極に用いて 1 回のアーク放電を発生させた際の通過電流量と電極の質量変化量の関係を示す。式(4.3.1), (4.3.2)と同様にして最小二乗法で陽極 GT110 の質量変化量 $M_{\text{GT-BF}}$ (g) と陰極 BF31 の質量変化量 M_{BF} (g) を通過電流量 Q (C) の関数として表すと次式となる。

$$M_{\text{GT-BF}} = 0.9 \times 10^{-4} Q \quad \dots (4.3.3)$$

$$M_{\text{BF}} = -2.0 \times 10^{-4} Q \quad \dots (4.3.4)$$

図 4.3.6~4.3.7 に約 170 C のアーク放電を発生させた後に各電極の表面をデジタルマイクロスコープで観察した結果を示す。GT110 の表面には蛇行したアーク痕があり、その中にいくつかの凸状の物質も確認できる。このうち最も大きな凸状物質の形状は、直径約 1880 μm , 高さ 285 μm であった。また、その周囲には直径約 4000 μm の円形のアーク痕が形成されている。BF31 の表面には直径約 4500 μm の円形で中が窪んでいるクレータ状のアーク痕が形成されている。またその深さは最大で約 600 μm であった。

図 4.3.8 に GT110, アーク放電終了後に確認された GT110 表面の凸状物質, BF31 の X 線エネルギースペクトル測定結果を示す。測定には EDS を用いている。また各測定結果は比較を容易にするために, GT110 が 0.93 eV, GT110 の凸状物質と BF31 が 0.52 eV の X 線強度で規格化されている。GT110 の凸状物質と BF31 のスペクトルは、強度の違いがあるものの、ピーク位置が一致している。したがって、GT110 の凸状物質は BF31 の一部であり、アーク放電によって付着したものと考えられる。

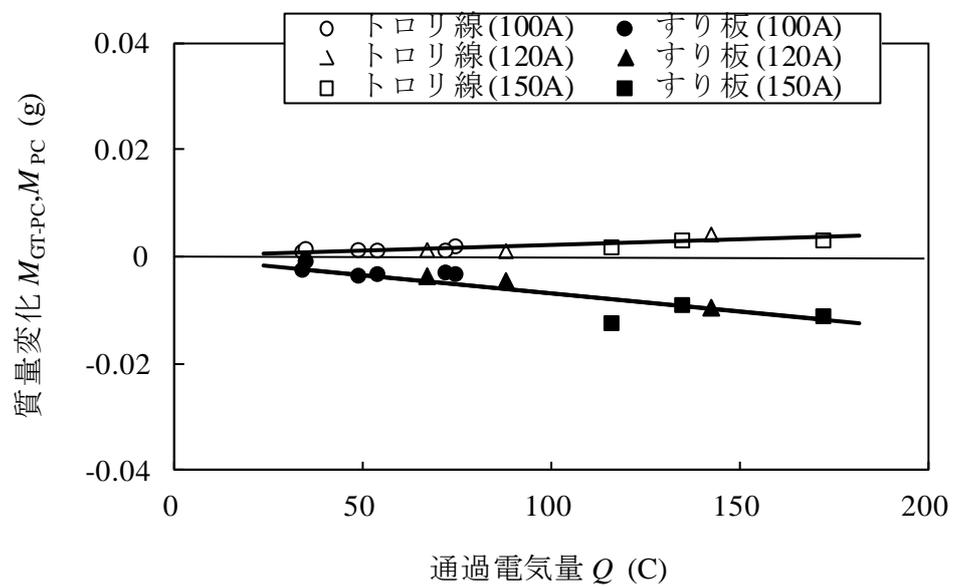


図 4.3.1 通過電気量と質量変化の関係 (陽極 : GT110, 陰極 : PC78A)

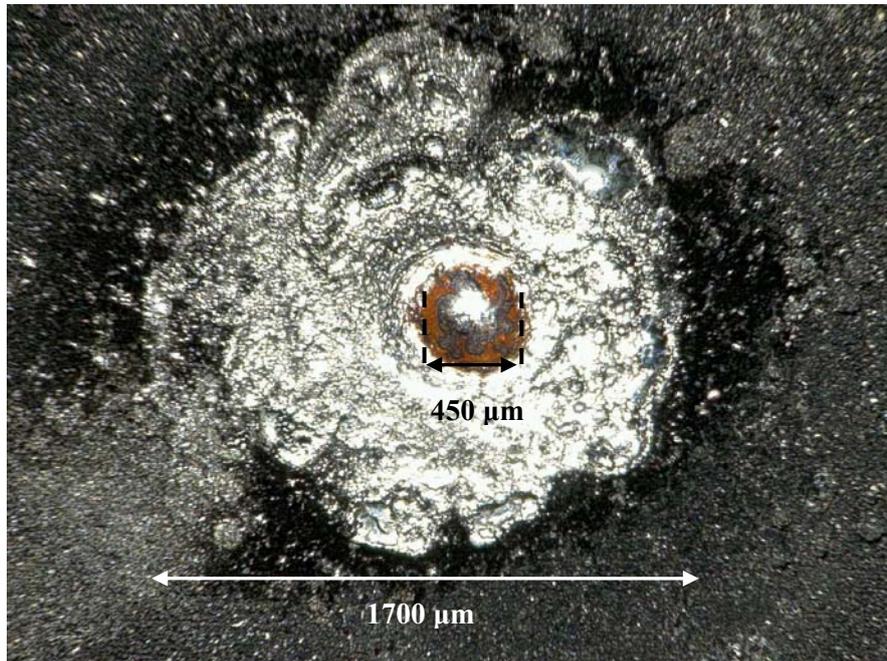


図 4.3.2 アーク放電後の GT110 の表面（倍率 100，通過電気量 170 C）

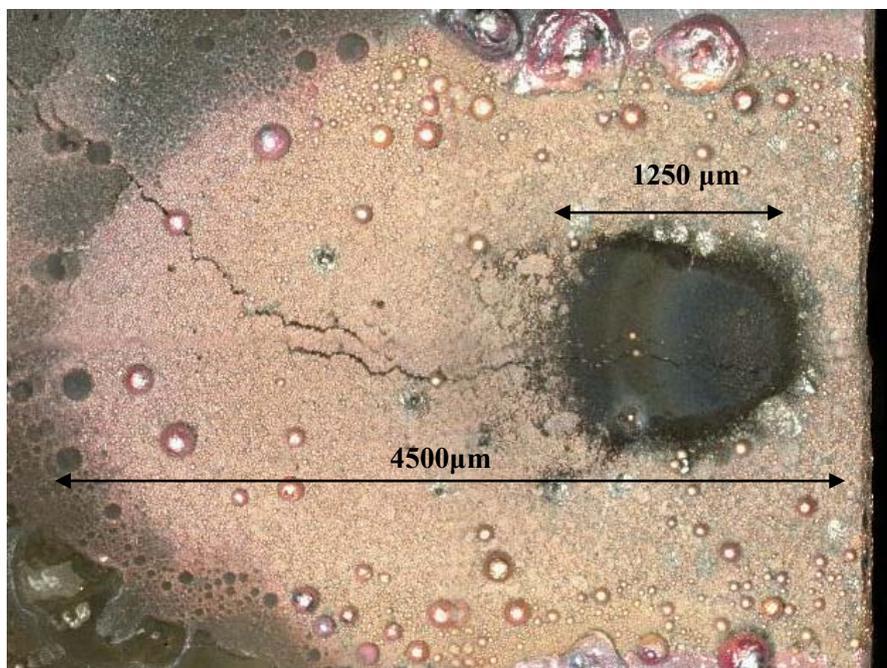
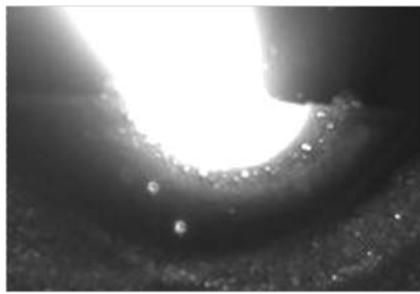
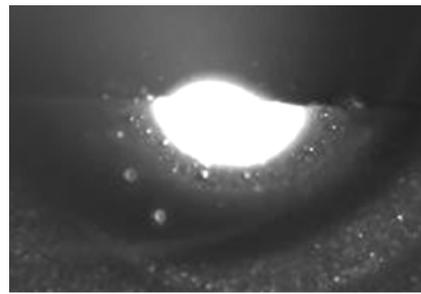


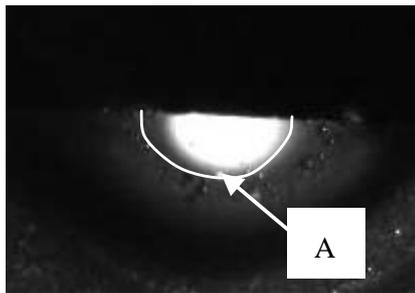
図 4.3.3 アーク放電後の PC78A の表面（倍率 100，通過電気量 170 C）



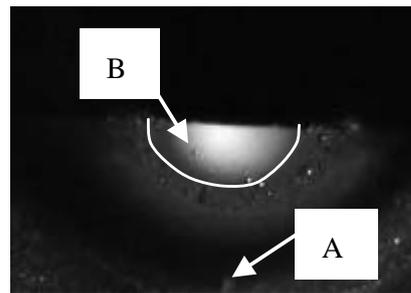
(a) -1 msec



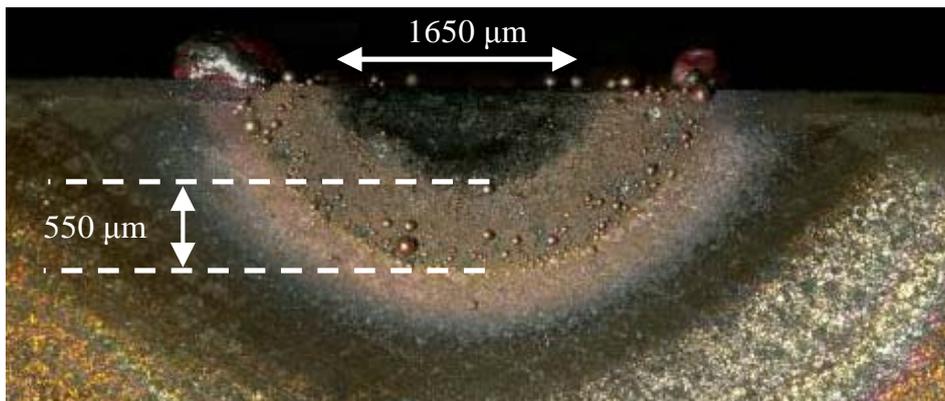
(b) 0 msec



(c) 16 msec



(d) 26 msec



(e) アーク放電後の PC78A の側面 (倍率 100)

図 4.3.4 アーク放電終了前後の PC78A 側面の状態

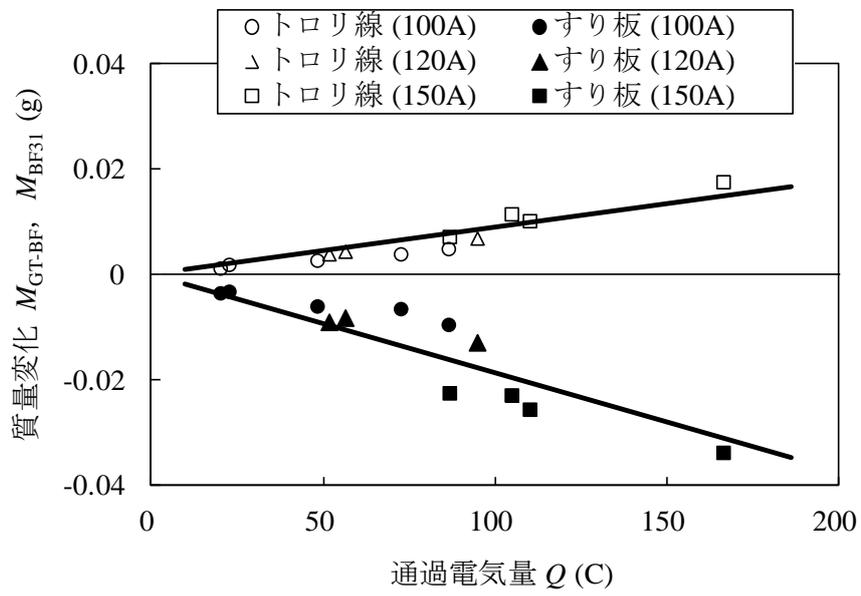
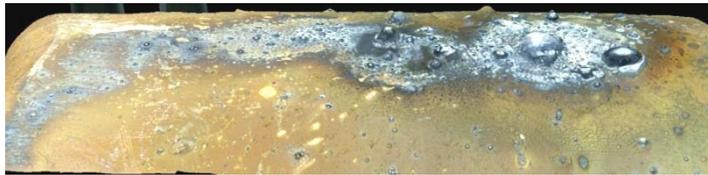


図 4.3.5 通過電氣量と質量変化の関係 (陽極 : GT110, 陰極 : BF31)

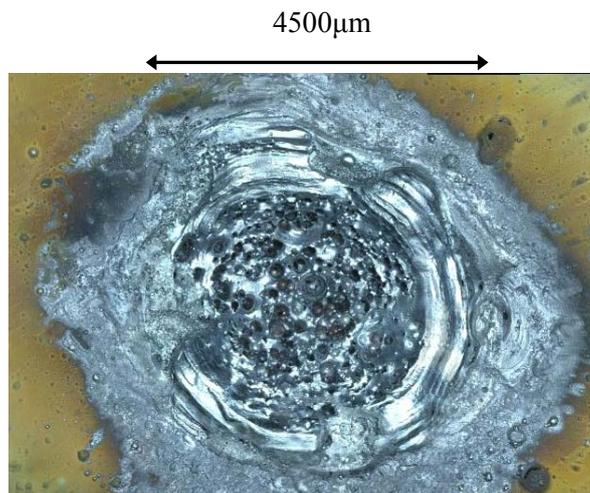


(a) トロリ線表面のアーク痕（上面図）

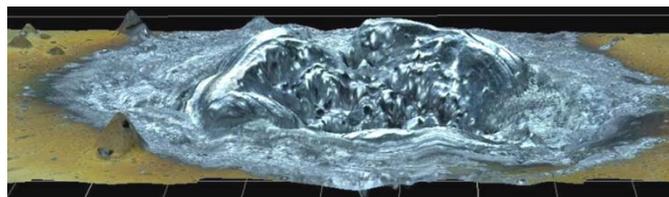


(b) トロリ線表面のアーク痕（鳥瞰図）

図 4.3.6 アーク放電後の GT110 の表面（倍率 100, 通過電気量 170 C）



(a) アーク痕の上面図



(b) アーク痕の鳥瞰図

図 4.3.7 アーク放電後の BF31 の表面（倍率 100, 通過電気量 170 C）

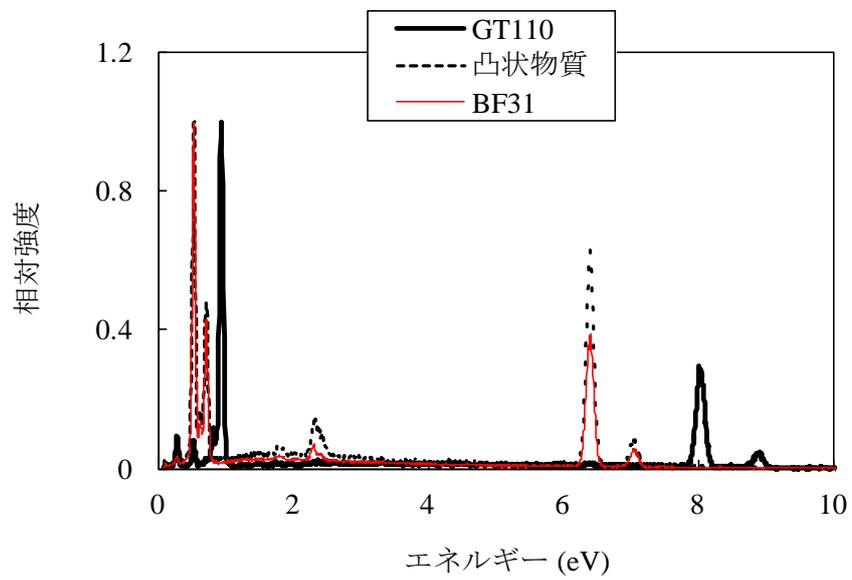


図 4.3.8 GT110, 凸状物質, BF31 の X 線エネルギースペクトル

4.4 考察

トロリ線とすり板のアーク放電実験の結果から、アーク放電終了後の PC78A の表面に粒状物質が観測されたこと、PC78A より BF31 の方が通過電気量当たりの質量変化量が大きいこと、陽極であるトロリ線の質量が通過電気量に比例して増加することがわかった。それぞれについて以下で考察するとともに、本実験結果と実際の電気鉄道で観測される現象との比較も行う。

4.4.1 PC78A 表面の粒状物質

アーク放電が発生している陰極近傍には、高温の陰極点が形成されると考えられている⁴²⁾。これにより輝点やその周辺も高温になると考えられる。高速度カメラの映像からアーク放電終了後に時間の経過とともに輝点が小さくなり、その周辺で粒状物質の形成が確認できた。これをEDSで測定した結果、銅であることがわかった。一方で、銅は陽極のGT110 ならびに陰極のPC78Aの両方に含まれている。したがって、この測定結果を用いて粒状物質がGT110 のものであるのか、PC78Aのものであるのかを決定することができない。しかし、これがGT110 の材料の一部でないことは、アーク放電終了後でGT110 の質量が減少していなかったことから推察できる。したがって、この粒状物質はアーク放電の発生により、高温となった輝点周辺でPC78Aに含まれた銅が溶出し、アーク放電終了後に凝固したものであると考えられる。

4.4.2 PC78A と BC31 の質量現象の違い

アーク放電の発生による陰極質量の減少は、陰極点が高温・高電流密度であること、高エネルギーの正イオン流が陰極点に突入すること、陰極点前面気圧と陽光柱に圧力差があることなどの影響を受けて発生する陰極からの蒸気ジェットによって生じると考えられている⁴²⁾。しかし、これだけではPC78AとBF31 の通過電気量当たりの質量減少量の違いを説明することができない。そこで、この質量減少量の違いが生じるメカニズムについて以下で考察する。

PC78Aで観測された黒いアーク痕は、高速度カメラとその後の表面状態の観察から、輝点の内側に形成されている。ここにアーク放電が発生したと仮定して電流密度を計算すると約 23 A/mm^2 である。この値は文献 4.3 で示されているアークスポットと仮定された箇所で見られた電流密度とほぼ一致している。またこのアークスポットでは炭素の含有率に変化がないものの、銅の含有率の低下が生ずるとの実験結果が報告されている^{4.3) 4.4)}。したがってPC78Aの質量減少は黒いアーク痕に含まれていた銅がPC78Aの外へ放出されることで生じると考えられる。

アーク放電が発生している面について考えると、ここでは高温の陰極点や輝点の影響に加えて陽光柱からのふく射熱の影響も受ける。したがって、温度の高い領域が広範囲に及ぶと考えられる。図 4.3.3 において、 $4500 \mu\text{m}$ の範囲で粒状物質が確認できた。これはこの範囲の温度が銅の融点以上であったことを示している。また図 4.3.7 においても図 4.3.3 と同じ通過電流量で同じ $4500 \mu\text{m}$ の大きさのアーク痕が確認できる。

図 4.4.1 に PC78A と BF31 にアーク放電が発生している際の輝点ならびにその周囲における銅、炭素、鉄の動きを模式的に示す。溶融領域は図 4.3.3、図 4.3.7 の $4500 \mu\text{m}$ に相当する陽光柱のふく射熱を受ける箇所と仮定する。(a) においてアーク放電が発生すると、PC78A の輝点において PC78A に含まれる銅の蒸発が生じる。また溶融領域において PC78A に含まれる銅が輝点や陽光柱のふく射熱の影響を受けて溶融する。溶融した銅は PC78A の溶融領域を覆う。このとき、一部が輝点から PC78A の外へ放出されるものの、輝点に炭素が固体として残っているため、大部分が溶融領域に残る。また溶融領域の温度はアーク放電終了後の表面に粒状物質が残っていたことを考えると、銅の沸点 (約 $2600 \text{ }^\circ\text{C}$) までしか上昇していないと考えられる。すなわち、ここでの温度は炭素の沸点 ($3570 \text{ }^\circ\text{C}$) 以下に抑えられていたと考えられる。これにより溶融領域においても炭素が固体として残る。したがって、PC78A における銅の消失は輝点からの銅の蒸発が主となり、正イオンの流入による銅の飛散が輝点や溶融領域における炭素の存在でほとんど生じない。BF31 の溶融領域も PC78A の溶融領域と同様に高温になり、その温度は PC78A と同じ温度である $2600 \text{ }^\circ\text{C}$ まで上昇したと仮定すると、鉄の融点 (約 $1500 \text{ }^\circ\text{C}$) を超える。溶融した BF31 は、その動きを阻害するものが無いため、輝点から蒸発もしくは正イオンの流入により溶融領域から飛散すると考えられる。このように同じ通過電流量を受けた PC78A と BF31 は、同じ大きさのアーク痕が残るものの、PC78A

の基材である炭素が銅の減少を抑制するため減少量に違いを生じる。

4.4.3 陽極質量の増加

アーク放電実験の結果から、陽極側の質量増加が確認された。GT110 と PC78A の実験結果では、アーク放電発生後の GT110 の表面に明確な凹凸が見られなく、GT110 の質量増加の理由を明らかにすることができなかった。しかし、GT110 と BF31 の実験結果から、アーク放電発生後の GT110 の表面に多数の凸状物質が確認できた。GT110、GT110 の凸状物質、BF31 の X 線エネルギースペクトル測定結果から、GT110 の凸状物質と BF31 のスペクトルが、ほぼ一致していた。したがって、アーク放電発生後の陽極 GT110 の質量増加は、陰極 BF31 の材料の一部が付着することで生じると考えられる。

筆者の実験よりも電圧や電流が低く、電極材料も異なるものの、電気接点においても同様の現象に関する報告がある^{4,5)}。これによると陰極ならびに陽極の質量変化の傾向は、アーク長（もしくはアーク継続時間）によって変わるとされている。筆者の実験でのアーク放電終了時の電極間距離は約 10~40 mm であり、文献 4.5 におけるアーク長が 100 μm 以上で生じる陽極の質量増加と一致する。

なお、陽極へ付着する陰極材料は、GT110 と PC78A の実験結果ならびに GT110 と BF31 の実験結果から陰極材料の質量変化量の 30~45% である。

4.4.4 実際の電気鉄道における現象との比較

ここでは一例として、新幹線で測定されたすり板のアーク損耗を含むしゅう動摩耗の値と本実験結果の比較を示す。

文献 4.6 は、鉄系金属すり板を使用した実際の新幹線におけるアーク損耗を含むしゅう動摩耗が約 400 $\mu\text{g}/\text{C}$ であったと報告している。これは本章で示した鉄系金属すり板のアーク損耗の値である 200 $\mu\text{g}/\text{C}$ とオーダーで一致している。なお、本実験では、トロリ線とすり板のアーク損耗のみを扱っている。したがって、この実験結果を実際のトロリ線とパンタグラフ間で生じる現象に適用し、すり板摩耗量を推定するためには、しゅう動による摩耗量を何らかの形で測定もしくは推定する必要がある。

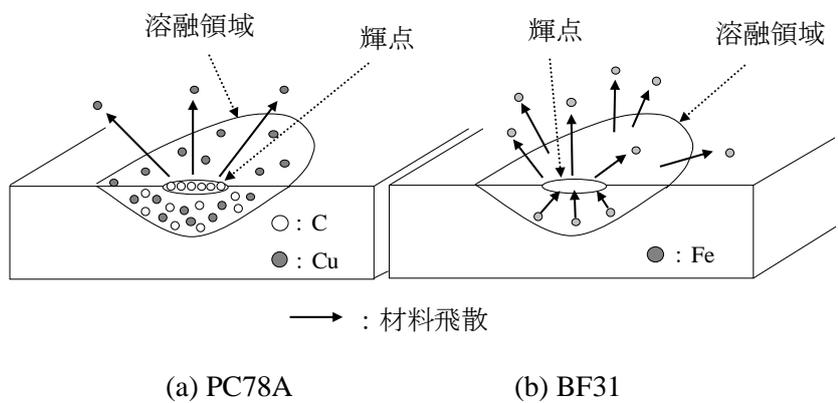


図 4.4.1 アーク放電時の輝点周辺における材料の動き

4.5 結言

アーク放電がトリ線とすり板の損耗にどのような影響を及ぼすのかを明らかにするために、硬銅トリ線と銅ならびにカーボンが約 50%の組成を持つカーボン系すり板および鉄が主成分の鉄系金属すり板を電極に用いてアーク放電実験を行った。その結果を考察することで以下のことが明らかになった。

- (1) 陽極に硬銅トリ線，陰極にカーボン系すり板を用いてアーク放電実験を行った結果，硬銅トリ線の質量は $20 \mu\text{g/C}$ で増加し，カーボン系すり板の質量は $70 \mu\text{g/C}$ で減少した。
- (2) 陽極に硬銅トリ線，陰極に鉄系金属すり板を用いてアーク放電実験を行った結果，硬銅トリ線の質量は $90 \mu\text{g/C}$ で増加し，鉄系金属すり板の質量は $200 \mu\text{g/C}$ で減少した。
- (3) カーボン系すり板と鉄系金属すり板の質量変化の違いは，カーボン系すり板の基材である炭素がアーク放電による銅の飛散を防ぐために生じる。
- (4) 陰極の質量減少に対して陽極の質量増加が観測された。陽極の質量増加量は，陰極の質量減少量の 30～45%である。

参考文献

- 4.1) (財) 鉄道総合技術研究所：「電車線とパンタグラフ」, (2010)
- 4.2) 電気学会：「放電ハンドブック 上巻」, オーム社 (2003)
- 4.3) 林屋均, 萬代毅, 中島等, 出野市郎：「直流電気鉄道における定常アークがパンタグラフ材料に与える影響」, 電学論 B, 127 巻, 6 号, pp.718-724 (2007)
- 4.4) 久保俊一：「特別号 銅または銅鉛錫合金を溶浸した炭素製パンタグラフすり板のアーク放電下の摩耗機構の研究」, 鉄道総研報告, 35 号, p.175 (2000)
- 4.5) Koichiro SAWA, Makoto HASEGAWA: “Recent Research and New Trends of Electrical Contacts”, IEICE TRANS. ELECTRON , Vol.E83-C, No.9, pp1363-1376 (2000)
- 4.6) 寺田泰隆, 藤井保和, 久須美俊一：「現車試験によるすり板摩耗量とアーク量の測定結果」, 平成 13 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2 巻, pp.849-850 (2001)

第5章 離線アークがトロリ線へ及ぼす影響

5.1 緒言

4章において、アーク放電後の陽極であるトロリ線表面には陰極であるすり板の一部が付着すること、アーク放電前後でトロリ線の質量が増加することを実験で明らかにした。一方で、トロリ線表面にはクレータ状の凹部が観測されており、陽極の質量増加は、凹部の形成によって失われた質量よりも多い陰極材料の付着によって生じているものと考えられる。

2.4.6項(1)で述べたように、通電された静接点のアーク放電発生直前で、電極間に熔融ブリッジが形成されること、動接点においても、熔融ブリッジの破壊とアーク放電による材料の蒸発の発生が実験的、解析的に示されている。筆者も静接点において、接点開離時に電極から熔融ブリッジを形成する材料が供給され、その破壊とともにアーク放電が発生すること、アーク継続時間とともに材料が蒸発すること、熔融ブリッジの破壊と材料の蒸発によりトロリ線表面上にクレータ状の凹部が形成されることを実験的に確認した。

特に、クレータ状の凹部やアーク放電による材料の蒸発がトロリ線の摩耗と関連があると考え、アーク継続時間を任意に変えることで、凹部形状の時間変化について詳細な実験を行った。実験ならびに解析を進める中で、実験結果から算出された熔融ブリッジの質量とアーク継続時間が短いときのアーク放電によって失われた電極の質量がほぼ一致することがわかった。一方で、アーク放電の発生直前までに電極間へ入力したエネルギーから算出される電極表面の熔融金属の質量は、熔融ブリッジの質量よりも最大で100倍程度大きかった。これらに着目することで、アーク放電発生直前から数十msの間に電極間と陽極表面で生じている現象を考察し、直流電気鉄道におけるトロリ線のアーク放電による損耗メカニズムを明らかにした。

5.2 実験方法と条件

5.2.1 実験装置

実験装置は図 3.1.1 に示したものを、電極は表 3.2.1 の材料を図 3.2.1 の形状に加工して使用した。また、図 5.2.1 に実験装置ならびに測定装置を模式的に示すとともに、図 5.2.2 に回路図を示す。

実験では、直流電源から 50 V の電圧を印加し 80~410 A (抵抗値 0.12~0.63 Ω) の電流を流した状態で、すり板を鉛直下向きに移動させてアーク放電を発生させた。その後、0.2~100 ms でサイリスタを点弧してアーク放電を消弧した。また、接点の開離にともない変化する電極間距離を、レーザ変位計で測定するとともに、そのデータと電極間電圧、電流をデジタルオシロスコープで記録した。

本実験における電流値は、電源容量および実験装置の制約から、最大値で 400 A 前後としている。また、接点降下速度は 10 mm/s に設定した。

5.2.2 測定波形の例

図 5.2.3 に、デジタルオシロスコープで記録された測定波形の例を示す。この例は、約 400 A の電流を流した状態で電極を開離させた実験結果である。50 ms でアーク放電が発生し、図 5.2.3 (a)に示されているように電極間電圧が 10 V 以上へ上昇している。また、図 5.2.3 (b)に示されているように、その瞬間に電流波形の変化も確認できる。なお、本章では電極間電圧が 10 V 以上になった瞬間をアーク放電が発生した瞬間とした。その後、100 ms 経過してサイリスタが点弧し、電極間電圧が 10 V 以下となることで、アーク放電が終了している。図 5.2.3 (c)の電極間距離は、実験結果を見易くするために、実験開始前の接点が閉じている状態を基準とし、そこから鉛直下向きを負として示している。この実験条件において、アーク放電発生直前の電極間距離は、80 μm であった。以後、この電極間距離を溶融ブリッジの長さと呼ぶ。

5.2.3 接触力と電極の変形

電極間の接触力は最大で 19.6 N とした。円柱と平板が 19.6 N の接触力でヘルツ接触をしている場合の電極の変形量は約 4 μm である。本実験においても、同程度の電極の変形が生じていると考えられるが、筆者はこの変形量が既述した熔融ブリッジの長さの 5% 程度であり、以後の計算や考察に与える影響が小さいと考えた。

5.2.4 凹部の測定

図 5.2.4 に、PC78A および BF31 を陰極に用いてアーク放電を発生させた後のトロリ線表面の例を示す。いずれの表面にも円形状のアーク痕が確認できる。

トロリ線表面に形成される凹部の形状は、3次元計測可能なデジタルマイクロスコープで測定した。しかし、BF31 を用いた場合、アーク痕の大部分が凸部で覆われた状態で、凹部の形状を確認できないものが多数あった。そこで、これらのトロリ線については、アーク痕の中心で切断し、その切断面を観察することで凹部の大きさを測定した。また、これらのうち一部のトロリ線に対しては、電子線マイクロアナライザーを用いて、凹部と凸部の境界を決定した。

図 5.2.5 に、BF31 を陰極に用いた場合のトロリ線のデジタルマイクロスコープと電子線マイクロアナライザーの観察結果を示す。この図では中心付近にすり板材である鉄が付着しており、その両側の A 箇所と B 箇所に凹部がある。この場合、それぞれの半径の二乗和の平方根を凹部半径とした。

5.2.5 高速度カメラ

GT110 と PC78A のアーク放電実験において熔融ブリッジの形成、およびその破壊を高速度カメラで観測した。撮影時の高速度カメラの設定は、1 秒当たり 20000 フレーム、シャッタースピード 1/20000 秒とした。

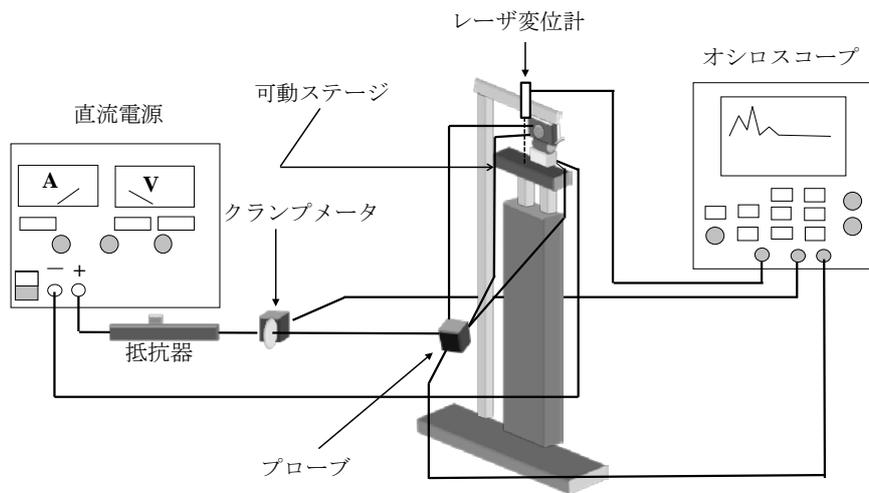


図 5.2.1 実験装置ならびに測定装置

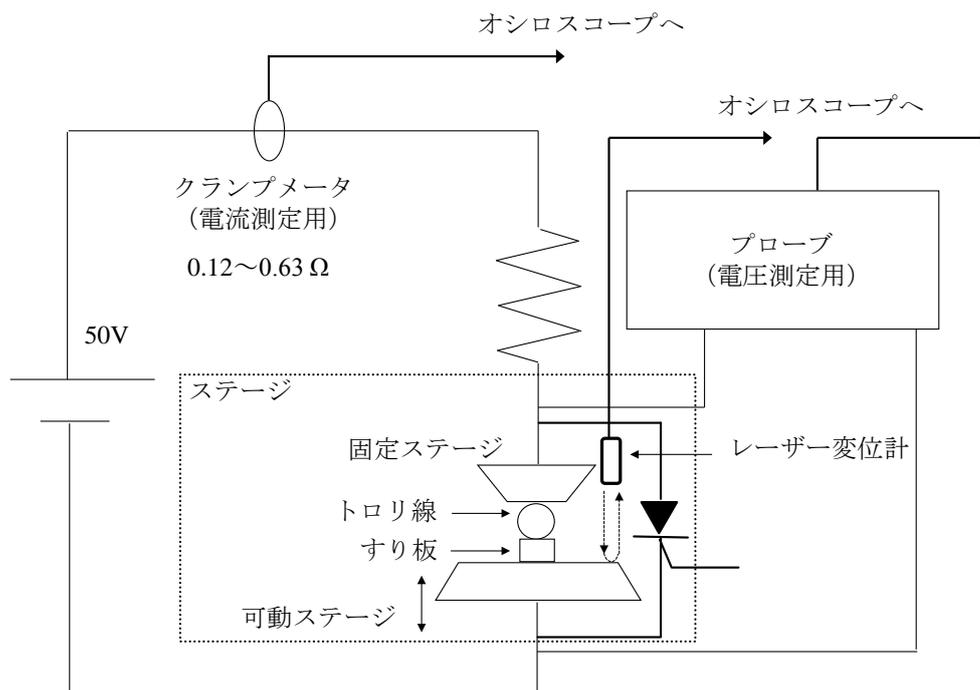
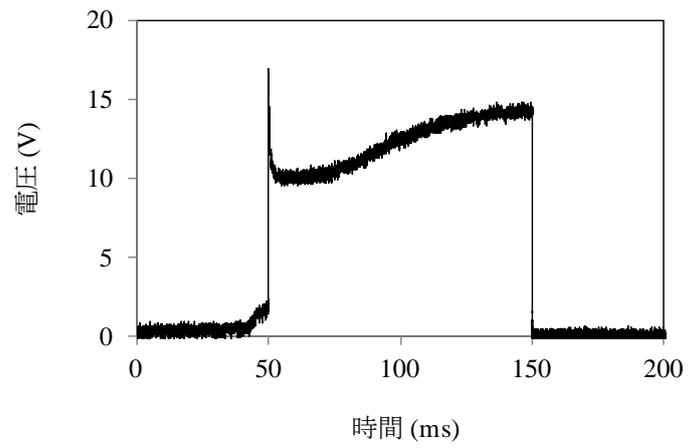
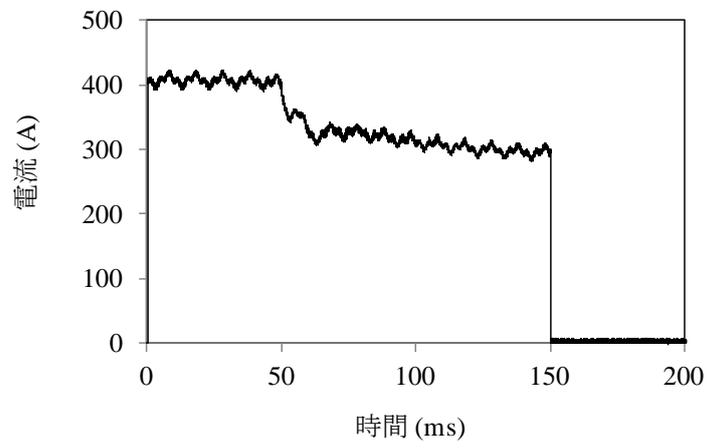


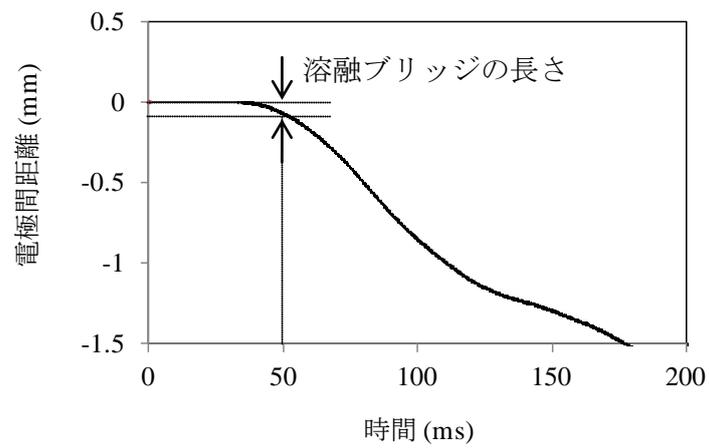
図 5.2.2 回路図



(a) 電極間電圧

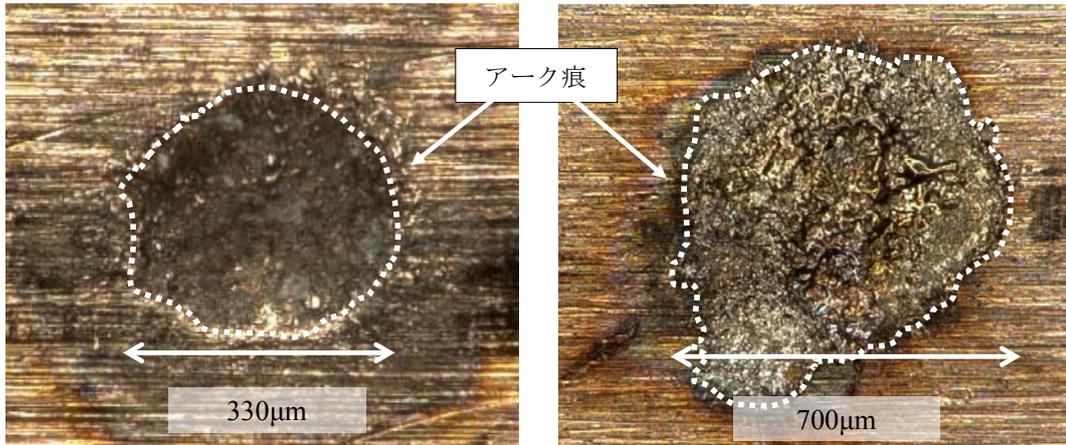


(b) 電流



(c) 電極間距離

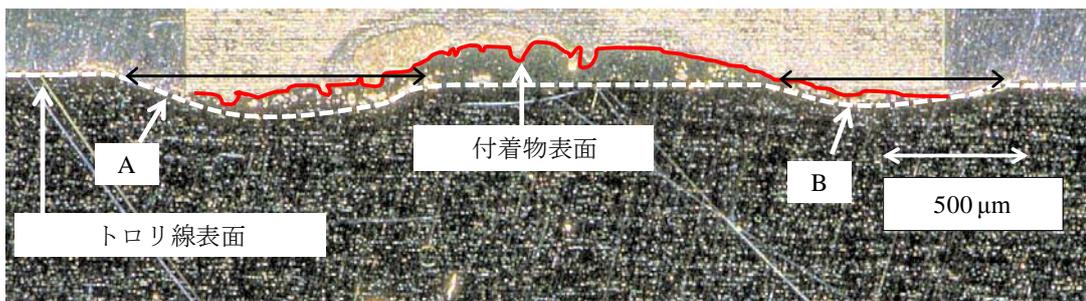
図 5.2.3 測定波形



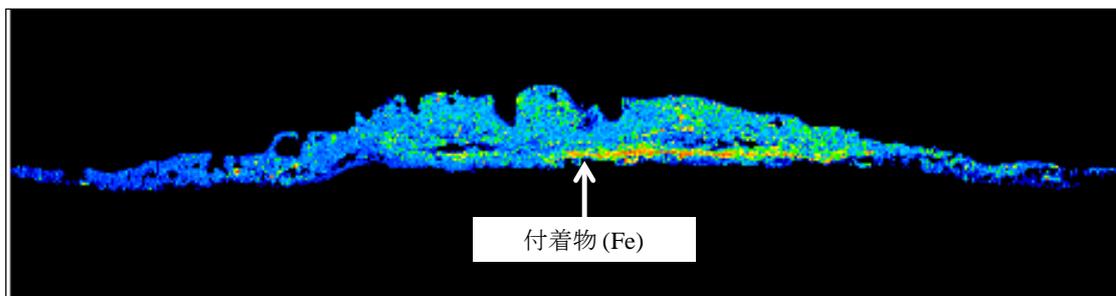
(a) PC78A (陽極)

(b) BF31 (陰極)

図 5.2.4 アーク痕 (80A, 0.5ms)



(a) アーク放電後のトロリ線断面



(b) 付着物の分析結果

図 5.2.5 トロリ線断面の測定と分析 (411A, 100ms)

5.3 実験結果

5.3.1 アーク継続時間と凹部半径の関係

図 5.3.1 に、アーク放電発生直前で回路に流れていた電流（以後、回路電流と呼ぶ）をパラメータにしたアーク継続時間と凹部半径の関係を示す。なお、実験結果はすべて 1 回の実験によって得られた値を示している。PC78A を陰極に用いた場合、凹部半径の増加傾向は、アーク放電発生後、5～10 ms 程度で抑えられることがわかる。また、BF31 を陰極に用いた場合においても、凹部半径の増加傾向は、10 ms 程度で抑えられることがわかる。

BF31 を陰極に用いた場合のアーク継続時間が短い条件では、トロリ線の凹部の観測結果にばらつきがみられた。これは電極間の介在物の有無が影響しているものと考えられる。文献 5.1 の銅と鉄を電極に用いた際の接点温度のシミュレーションにおいて電極間に介在物がない条件では、鉄が融点に達する一方で、銅が融点に達しないことが示されている。また、介在物の抵抗率が $3.5 \times 10^{-2} \mu\Omega\text{m}$ （銅の抵抗率の 2 倍）以上になると銅が融点に達する条件が現れることも示されている。筆者は実験前に電極の研磨と脱脂を行っている。しかし、GT110 と BF31 ではトロリ線の凹部形成に介在物の影響が顕著に現われ、その結果として凹部の観測結果にばらつきが生じたものと考えられる。

図 5.3.2 に、回路電流とアーク継続時間 0.2 ms 後の凹部半径および凹部半径の増加傾向が抑えられた後の凹部半径の平均値の関係を示す。それぞれ、最小二乗法で凹部半径 R (μm) を電流 I (A) の関数として表すと式(5.3.1)～(5.3.3)となる。

<陽極GT110, 陰極PC78A>

$$\text{アーク継続時間 } 0.2 \text{ ms} \quad R = 0.8 I \quad \dots \dots \dots (5.3.1)$$

$$\text{アーク継続時間 } 5 \text{ ms 以上} \quad R = 2.5 I \quad \dots \dots \dots (5.3.2)$$

<陽極GT110, 陰極BF31 >

$$\text{アーク継続時間 } 10 \text{ ms 以上} \quad R = 1.2 I + 462 \quad \dots \dots \dots (5.3.3)$$

PC78A を陰極に用いた場合の凹部半径は、アーク継続時間が 0.2 ms および 5 ms 以上の平均値のどちらにおいても回路電流に比例する。また、BF31 を用いた場合の凹部半径は、アーク継続時間が 10 ms 以上の平均値において電流の 1 次関数として表すことがで

きる。

5.3.2 アーク継続時間と凹部体積の関係

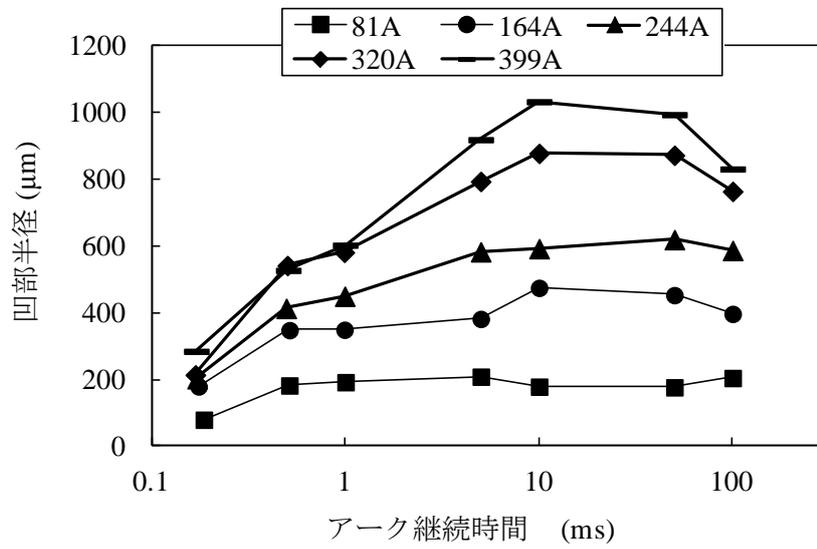
図 5.3.3 に、回路電流をパラメータにしたアーク継続時間と凹部体積の関係を示す。凹部体積の大きさは、回路電流によって異なるものの、アーク継続時間が 0.2 ms で、 $10^4 \sim 10^2$ mm³、アーク継続時間が 100 ms で $10^3 \sim 10^0$ mm³ のオーダーである。また、図 5.3.3(b) の回路電流 411 A、アーク継続時間 0.5～5 ms において、その増加傾向が他の実験結果よりも大きくなっているが、これは、図 5.3.2 (b) に示したようにトリ線表面の凹部の観測結果にばらつきがあるために生じているものと考えられる。

5.3.3 回路電流と溶融ブリッジの長さの関係

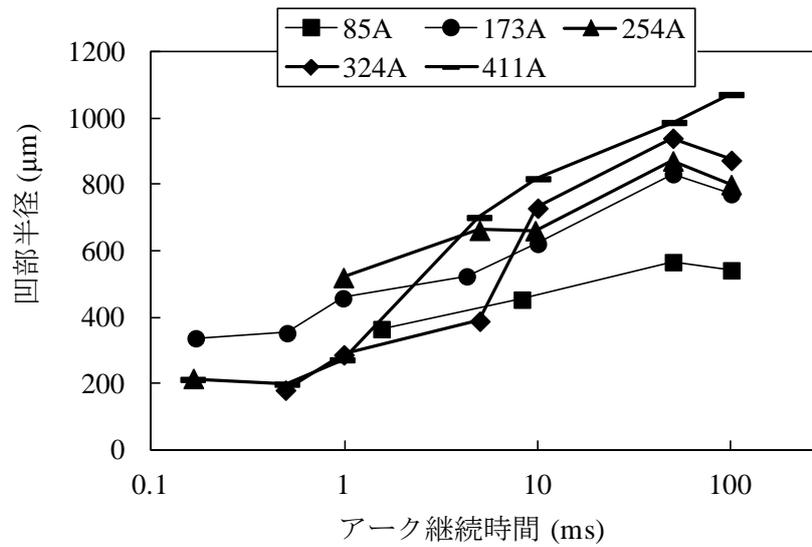
図 5.3.4 に回路電流とアーク放電発生直前に観測された溶融ブリッジの長さの関係を示す。溶融ブリッジの長さは、陰極に PC78A を用いた場合で平均 80 μm、陰極に BF31 を用いた場合で平均 100 μm であった。

5.3.4 溶融ブリッジの形成と破壊

図 5.3.5 に、GT110 と PC78A の組み合わせにおいて、高速度カメラのモニタ上で、溶融ブリッジの破壊が観測される直前を基準として、それが破壊し、材料の飛散が少なくなるまでを時系列で示す。0 ms において弱い光を放っている箇所が、0.05 ms で強い光を放ちながら急激に大きくなる。その後、0.35 ms で溶融ブリッジの中心部付近から外へ向けて飛散する多くの物質が観測された。材料の飛散は約 4.6 ms 程度まで断続的に観測されるものの、その量は、0.05～0.35 ms で観測される飛散物の量に比べて少ない。

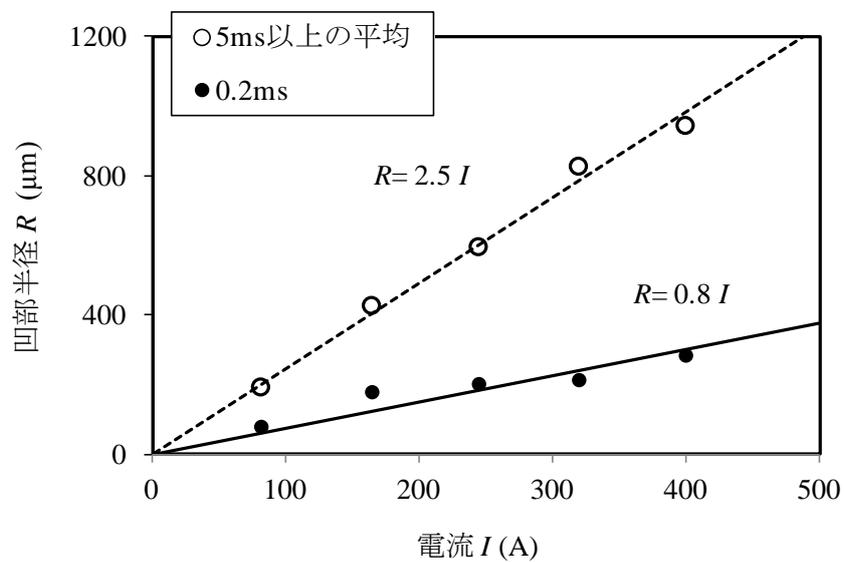


(a) GT110 の凹部半径 (陰極 : PC78A)

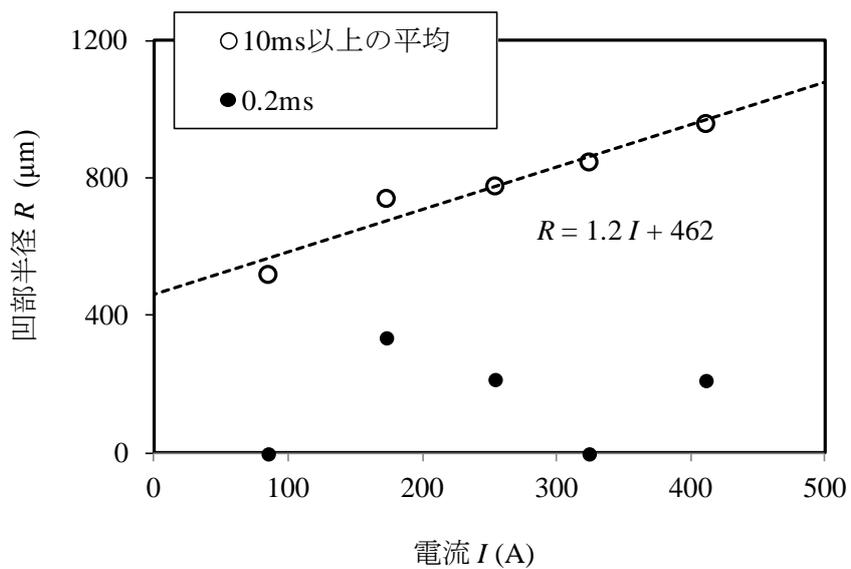


(b) GT110 の凹部半径 (陰極 : BF31)

図 5.3.1 アーク継続時間と凹部半径の関係

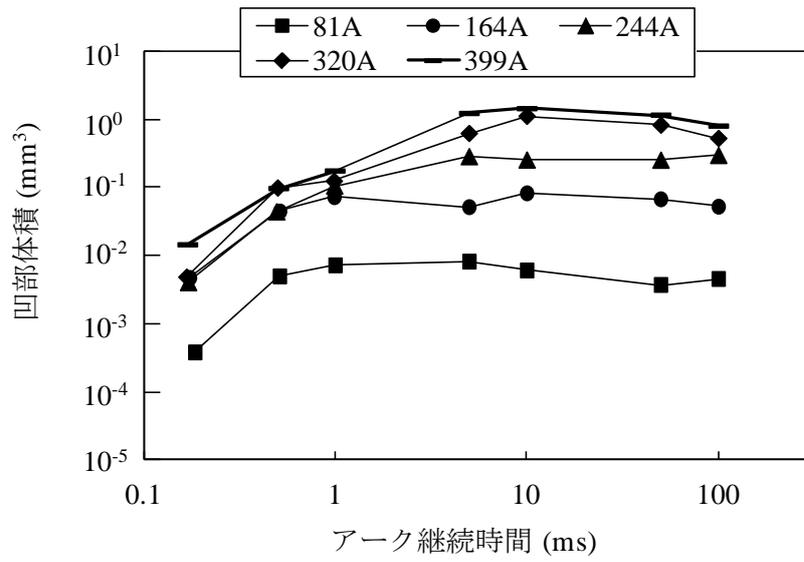


(a) GT110 の凹部半径 (陰極 : PC78A)

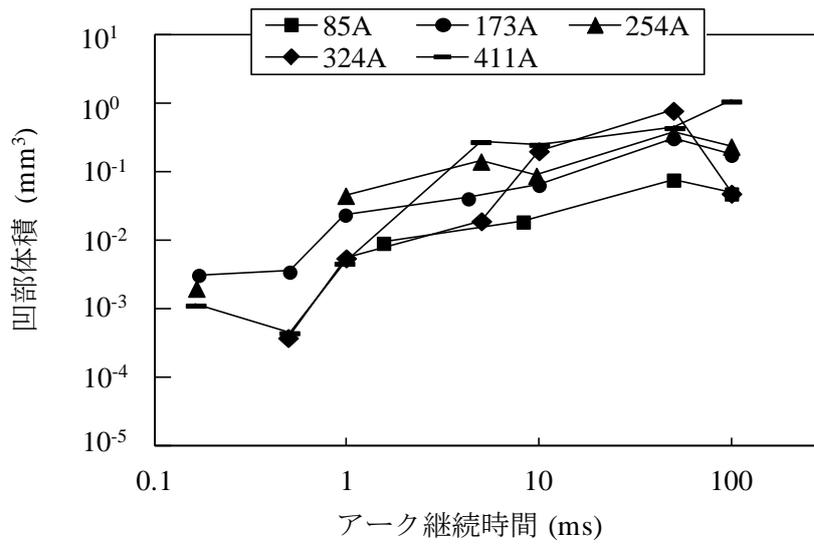


(b) GT110 の凹部半径 (陰極 : BF31)

図 5.3.2 回路電流と凹部半径の関係

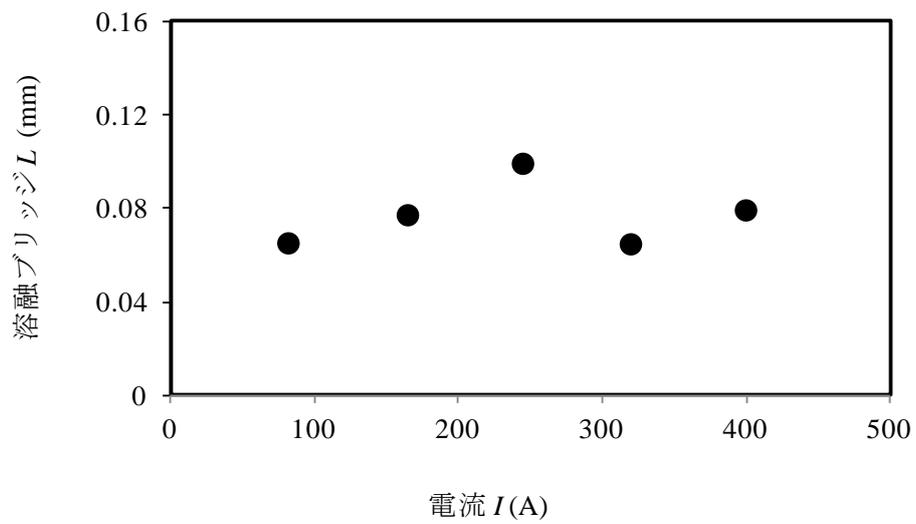


(a) GT110 の凹部体積 (陰極 : PC78A)

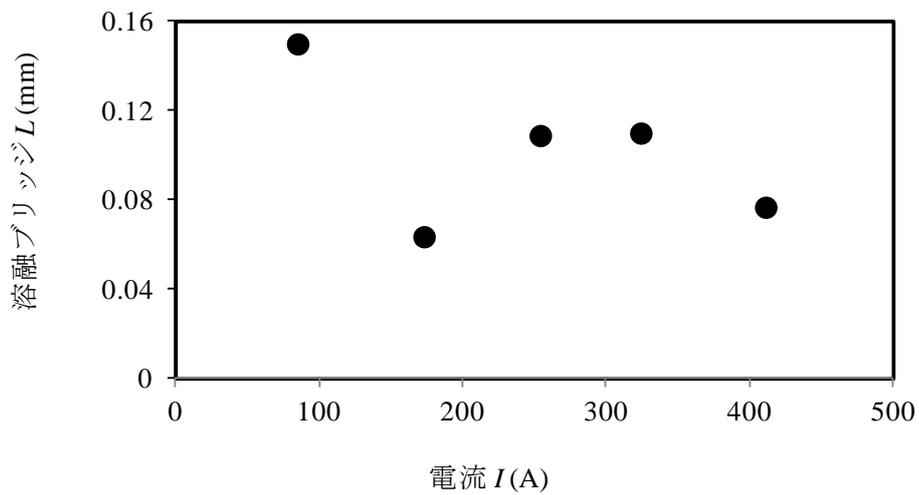


(b) GT110 の凹部体積 (陰極 : BF31)

図 5.3.3 アーク継続時間と凹部体積

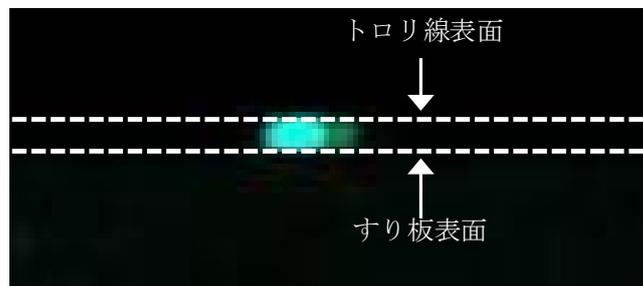


(a) 陰極 PC78A

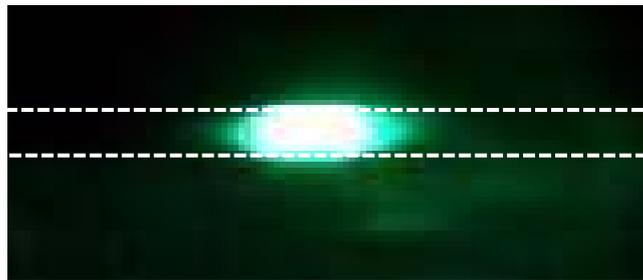


(b) 陰極 BF31

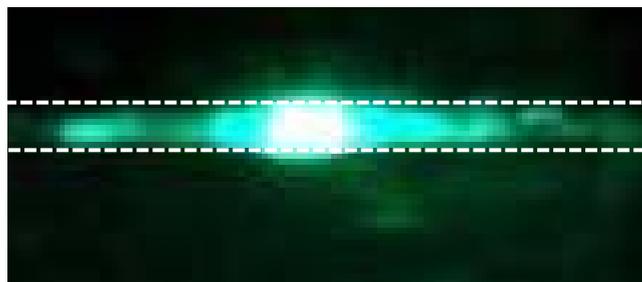
図 5.3.4 回路電流と溶融ブリッジの長さ



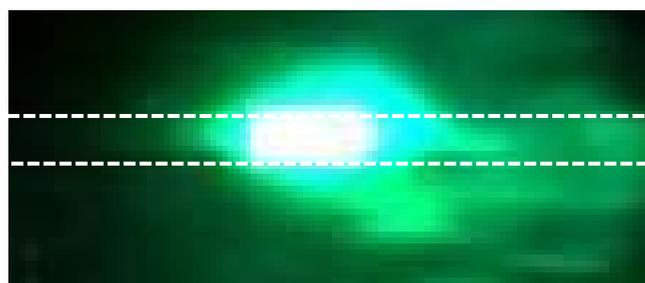
(a) 0 ms



(b) 0.05 ms



(c) 0.35 ms



(d) 4.6 ms

図 5.3.5 熔融ブリッジの破壊

5.4 考察

5.4.1 熔融ブリッジを形成する物質

本実験においてアーク継続時間が最も短い 0.2 ms の実験結果を用いて熔融ブリッジを形成する物質について考察する。GT110 と PC78A の組み合わせにおいて、熔融可能な材料は銅のみである。したがって、この時の熔融ブリッジを形成する物質は、銅である。

一方、GT110 と BF31 の組み合わせにおいて、熔融可能な材料は銅、鉄、ニッケルがあるが、主成分は、銅と鉄である。したがって、この組み合わせにおいて熔融ブリッジを形成する物質は、銅もしくは鉄であると考えられる。このことから、図 5.3.2 のアーク継続時間が 0.2 ms の条件において、トロリ線表面に凹部が観測された場合の熔融ブリッジを形成した物質は、トロリ線やすり板の主成分である銅や鉄からなる混合物であると考えられる。しかし、トロリ線表面に凹部が観測されなかった場合の熔融ブリッジを形成した物質は、すり板の主成分の鉄であると考えられる。

5.4.2 電極表面の熔融金属質量，凹部質量，熔融ブリッジ質量の関係

図 5.2.3 に示したようにアーク放電が発生する直前では、電極間電圧のわずかな上昇が観測される。このとき、電極表面の一部の熔融とそこからの材料供給によって熔融ブリッジが電極間に形成されるものと考えられる。また、接点へ入力したエネルギーは、熔融箇所である電極表面の一部と熔融ブリッジで消費されるものと考えられる。これらの考え方に基づいて、電極表面の熔融金属の質量，アーク放電によって失われた金属質量（以後、凹部質量と呼ぶ），熔融ブリッジの金属質量を以下で算出する。ただし、計算式に関しては GT110 と PC78A に関してのみ示す。

GT110 と PC78A の組み合わせでは、入力したエネルギー E (J) を求めたうえで、その 1/2 が陽極と陰極に供給され、それぞれの電極表面を熔融させたと仮定した。入力したエネルギー E (J) ならびにトロリ線表面の熔融金属 W_s (g) の算出式をそれぞれ式(5.3.4)、式

(5.3.5)に示す。なお、トロリ線表面の熔融金属は半球と仮定した。

$$E = V \cdot I \cdot t \quad \dots \dots \dots (5.3.4)$$

$$W_s = \frac{E}{2 \cdot \{C_{Cu} \cdot (T_{Cu} - T_R) + T_{MCu}\}} \quad \dots \dots \dots (5.3.5)$$

ただし、 V, I, t を電極の開離が始まってから 10 Vに達するまでの電極間の平均電圧(V), 平均電流(A), 時間(s)とし、 T_{Cu} (=1358 K) を銅の融点、 T_R (=293 K) を室温、 C_{Cu} (= 0.38 J/g K) を銅の比熱、 T_{MCu} (=201 J/g) を銅の融解熱とした。また電極の開離が始まった瞬間は、例えば図 5.2.3(c)にあるように電極間距離が 0 からマイナス方向へ変化した瞬間を測定波形から判断した。

また、アーク継続時間が 0.2 msのときの凹部質量 W_c (g)は、図 5.3.3 の値に銅の密度 ρ_{cu} (=8.94 g/cm³)を乗ずることで算出した。さらに、熔融ブリッジの質量 W_a (g)は、アーク継続時間 0.2 msの凹部半径と熔融ブリッジの長さから熔融ブリッジの体積を求めたうえで、そこに銅の密度を乗じて算出した。ただし、熔融ブリッジへの金属の供給は各電極から等しく行われるものと仮定する。

図 5.4.1 に GT110 と PC78A の組み合わせにおける回路電流とトロリ線表面の熔融金属の質量、凹部質量、熔融ブリッジの質量の 1/2 の関係を示す。この結果から、トロリ線から供給される熔融ブリッジの金属質量は、トロリ線表面の熔融金属質量の 1/100 程度であること、アーク継続時間が 0.2 ms のときの凹部質量が熔融ブリッジの質量とほぼ等しいことがわかる。

GT110 と BF31 の組み合わせでは、トロリ線表面に凹部が観測されない場合があり、熔融ブリッジの材質を一意的に決めることができない。そこで、供給したエネルギーのすべてがトロリ線もしくはすり板の熔融に使われたと仮定した。また、トロリ線表面に凹部が観測された条件では熔融ブリッジへの金属の供給がすべてトロリ線から行われたと仮定し、トロリ線表面に凹部が観測されなかった条件では熔融ブリッジへの金属の供給がすべてすり板から行われたと仮定した。

図 5.4.2 に、GT110 と BF31 の組み合わせにおける回路電流とトロリ線表面の熔融金属質量、すり板表面の熔融金属質量、凹部質量、熔融ブリッジの金属質量の関係を示す。凹部質量が熔融ブリッジの質量よりも 1/10 程度小さく、熔融ブリッジへの熔融金属の供給がすり板から行われている可能性がある。また、熔融ブリッジの金属質量はトロリ線やすり板表面の熔融金属質量の 1/5～1/100 であることもわかる。

が発生した後、数十 ms の間でトロリ線表面に残った熔融金属が蒸発し、このときにトロリ線凹部の大きさが増加するものと考えられる。

一方、本研究では熔融金属の蒸発後、凹部大きさの増加傾向が抑えられる現象を解明するに至らなかった。今後、熱損失等を加味したうえで、詳細な計算を進める必要がある。

5.4.4 モデル化

図 5.4.4 に、アーク放電直前からアーク継続時間 10 ms 前後までの間において、電極間ならびにトロリ線表面で生じている現象を模式的に示す。ただし、ここでは GT110 と PC78A の組み合わせを例とした。

アーク放電直前に熔融ブリッジが形成され (図 5.4.4 (a))、それが破壊するとともに、アーク放電が発生し、陽光柱から熔融金属が飛散する (図 5.4.4 (b))。その量は、GT110 表面の熔融金属の 1/100 程度である。したがって、ここでアーク放電が終わると、GT110 表面には小さな凹部が残る。一方、アーク放電が継続すると、GT110 の表面の熔融金属の蒸発が進み、凹部が大きくなる (図 5.4.4 (c))。

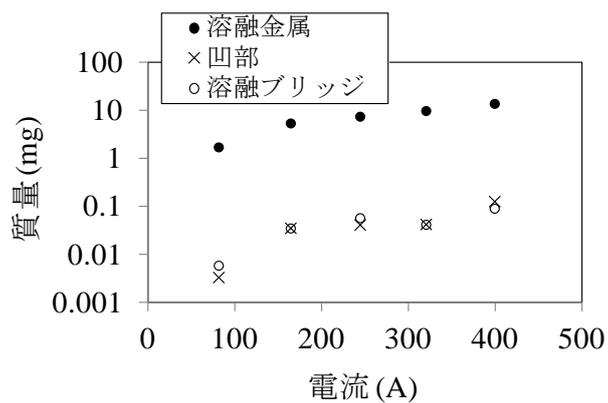


図 5.4.1 回路電流と溶融金属，凹部ならびに溶融ブリッジの質量
(陽極：GT110，陰極：PC78A)

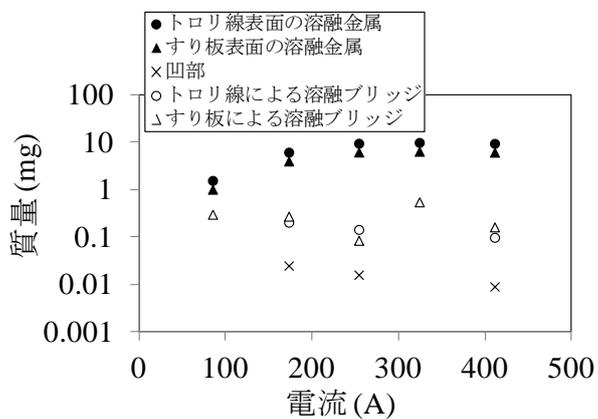


図 5.4.2 回路電流と溶融金属，凹部ならびに溶融ブリッジの質量
(陽極：GT110，陰極：BF31)

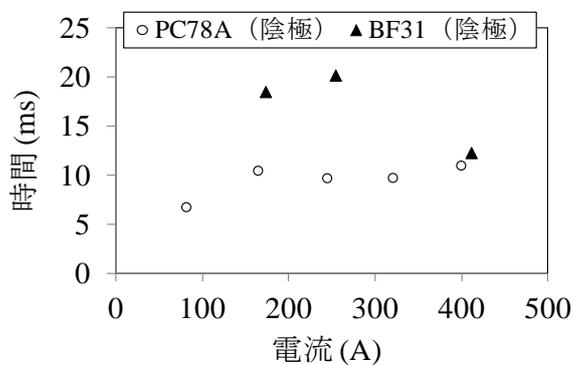
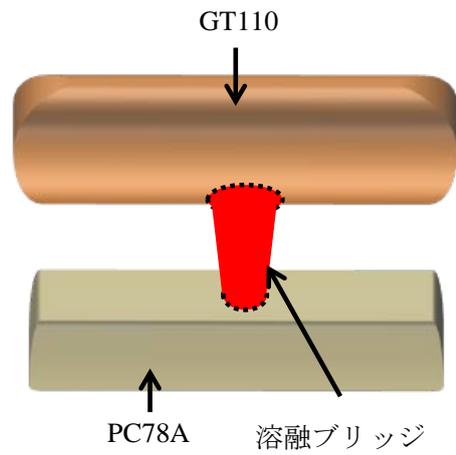
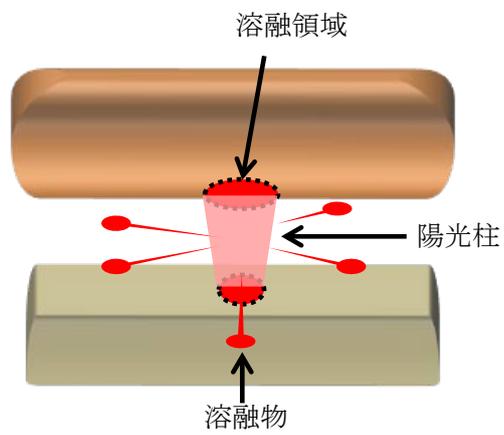


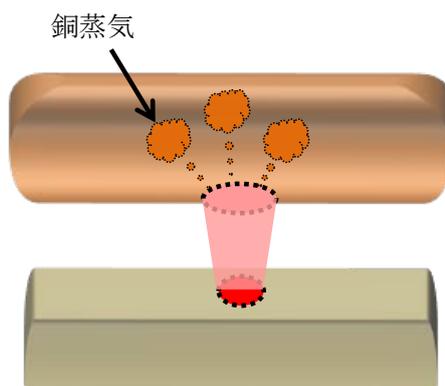
図 5.4.3 トロリ線の溶融金属の蒸発時間



(a) 熔融ブリッジ



(b) 熔融ブリッジの破壊



(c) 熔融金属の蒸発

図 5.4.4 凹部形成のメカニズム

5.5 電気鉄道への応用

電気鉄道におけるトロリ線とすり板の上下方向の相対速度は、100 mm/s 程度である。これに車両の移動速度が加わると、トロリ線から見たすり板の移動速度は数十 m/s となる。

直流電気鉄道において、車両が走行している際に、トロリ線とすり板の接触状態が悪くなると、熔融ブリッジの形成、破壊が生じ、続いて陽光柱が発生する。しかし、車両とともにすり板が移動するため、陽光柱のトロリ線側の端部は、一点に留まることができずに、トロリ線上を移動するものと考えられる。既述したように静接点におけるトロリ線の凹部の形成は、熔融ブリッジの破壊と熔融金属の蒸発が主であるものの、熔融金属の蒸発には 5~20 ms の時間を要する。したがって、電気鉄道におけるトロリ線のアークによる損耗は、熔融ブリッジの破壊による材料の飛散が主であると考えられる。

また、陽光柱の移動先のトロリ線表面は、熔融金属が無い状態である。図 5.3.3 の実験結果において、凹部半径の増加が抑えられる現象は、熔融金属が蒸発した後の現象であると考えられ、熔融金属が無い状態と見なすことができる。したがって、陽光柱の移動先のトロリ線の金属蒸発量は、熔融ブリッジの形成、破壊が生じた箇所における凹部質量よりも小さいと考えられる。

このことから、走行中の直流電気鉄道車両のトロリ線とすり板間でアーク放電が発生したと仮定すると、トロリ線のアーク放電による摩耗は、すり板がトロリ線から離れた点で最も大きくなり、陽光柱の移動先で小さくなるものと考えられ、離線アークの発生回数が深く関係する。これは 2.4.6 項に示したトロリ線の摩耗が離線アークの発生する箇所で大きくなることとも一致する。

5.6 結言

本章では、トロリ線とすり板を電気接点に用いたうえで、アーク継続時間を任意に変更し、陽極であるトロリ線表面の凹部を測定した結果を示した。特に、この実験において、アーク放電直前までに電極間へ入力したエネルギーから算出される材料の熔融金属質量に対して、実験結果から算出された熔融ブリッジの金属質量やアーク放電によって失われた電極表面の金属質量間に大きな相違が確認された。そこで、この相違に着目して、凹部の形成過程を考察し、アーク放電直前から 10 ms 前後までで電極間ならびにトロリ線表面で生じている現象をモデル化した。本実験条件で得られた結果ならびに考察結果を以下にまとめる。

- (1) トロリ線表面に形成される凹部半径は、陽極に硬銅トロリ線を、陰極にカーボン系すり板を使用した場合で、回路電流に比例する。また、陰極に鉄系すり板を使用した場合には、アーク継続時間が 10 ms 以上において電流の 1 次関数で表される。
- (2) 本実験において、熔融ブリッジの長さは、硬銅トロリ線とカーボン系すり板の組み合わせで平均 80 μm 、硬銅トロリ線と鉄系すり板の組み合わせで平均 100 μm であった。
- (3) アーク放電発生直前までに電極表面に熔融金属が形成されるとともに、電極間に熔融ブリッジが形成される。熔融ブリッジは、アーク放電の発生により飛散するが、その質量は電極表面の熔融金属質量の 1/5~1/100 である。
- (4) 熔融ブリッジの飛散後も電極表面に熔融金属が残るものの、その熔融金属の蒸発は電極間へ入力したエネルギーに応じて進み、本実験条件で 5~20 ms を要した。
- (5) 直流電気鉄道におけるトロリ線のアーク放電による摩耗は、熔融ブリッジの形成、破壊が生じた点で大きく、陽光柱の移動先で小さいと考えられる。したがって、トロリ線の離線アークによる損耗量は離線アークの発生回数が大きく関係している。

参考文献

- 5.1) 山下主税, 足立幸志 : 「介在物を考慮した温度分布解析による集電系材料の通電摩耗機構の解明」, トライボロジスト, Vol. 59, No. 5, pp.302-309 (2014)
- 5.2) Z. K. Chen and K. Sawa: “Effect of arc behavior on material transfer; a review”, IEEE. Trans. Components, Packaging & Manufacturing Technology, Part A, Vol.21, No.2, pp.310-322 (1998)
- 5.3) N. Ben Jamaa, L. Morin, L. Lehfaoui and L. Nedelec: “Effect of parameters on the transition from anodic to cathodic arc”, Proc. Intl. Conf. on Electrical Contacts, Electromechanical Components and their Application, pp.173-179 (1999)
- 5.4) K. Sawa and M. Hasegawa: “Recent Researches and New Trends of Electrical Contacts”, IEICE Trans. Electron. Vol.E83-C, No.9, pp.1363-1376 (2000)
- 5.5) 林屋均, 阿部泰久, 萬代毅, 濱田貴弘, 中島等, 根岸英雄 : 「架線ーパンタグラフ間アークによるトロリ線断線の基礎特性」, 電学論 D, Vol.127, No.9, pp.927-934 (2007)

第6章 紫外線検出離線アーク測定装置の開発

6.1 緒言

2.4.6 項 (2) で述べたように日本で使用されている離線アーク測定装置にはプラスチック光ファイバが用いられており、フランスで使用されているものには石英光ファイバが用いられている。石英光ファイバは高価であるうえ、その取扱いにも難がある。一方で、紫外線の透過が可能であり、光学フィルタを用いることで、太陽光の影響を受けにくい離線アーク光の測定が可能となる。

そこで筆者はプラスチック光ファイバを用いた離線アーク測定装置で、離線アーク光に含まれる紫外線を検出することができるように、受光部に取付ける波長変換ユニットを開発した。

本章では、波長変換ユニットの構造、それを取付けた離線アーク測定装置の特性に関する実験結果を述べる。

6.2 離線アークとその測定装置

6.2.1 離線アーク光の特徴

離線アーク光はトロリ線とすり板の離線にともない発生する強い光である。図 6.2.1 に、離線アーク光と太陽光のスペクトル分布を示す。離線アーク光は、陽極に硬銅トロリ線 (GT110) を、陰極に新幹線や在来線で使われているすり板 (BF31, PC78A) を用いて発生させた。また、スペクトル分布の測定は、離線アーク光の発生点から約 1.1 m 離れた点に分光器を設置して行った。

離線アーク光の特徴として、広い波長域の電磁波を含むこと、220 nm 付近 (Cu II)、320 nm 付近 (Cu I)、520 nm 付近 (Cu III) にピークを持つこと、在来線と新幹線で、強度の違いがあるものの、両者のスペクトル分布に大きな違いがないことがわかる。また、太陽光の放射強度は 300 nm 付近から増加することもわかる。

6.2.2 離線アーク光の測定装置

図 6.2.2 に、プラスチック光ファイバを用いた離線アーク測定装置の使用例を模式的に示す。受光部をパンタグラフから 2~5 m 離れた場所に設置するとともに、光電子増倍管などからなる検出器を車内に設置する。加えて、受光部から検出器まではプラスチック光ファイバを敷設する。離線アーク光は、受光部からプラスチック光ファイバをとり、検出器内部の光電子増倍管で電圧に変換され、記録装置へ伝送される。

プラスチック光ファイバのコア材料に、有機ポリマが用いられている。有機ポリマは赤外領域に分子振動吸収特性、紫外領域に電子遷移吸収特性を有する^{6.1)}。したがって、プラスチック光ファイバを用いた離線アーク測定装置は、可視光線に反応する。図 6.2.1 に示したように、太陽光は可視光領域の強度が強い。このため、プラスチック光ファイバを用いた離線アーク測定装置の測定精度は、屋外が明るい時間帯では低下する。なお、離線アーク測定装置で使用している光電子増倍管は、浜松ホトニクス製の R212UH である。また、プラスチック光ファイバは、コア径が 486 μm 、減衰率が 400~550 nm の平均値で、約 2.5% である。

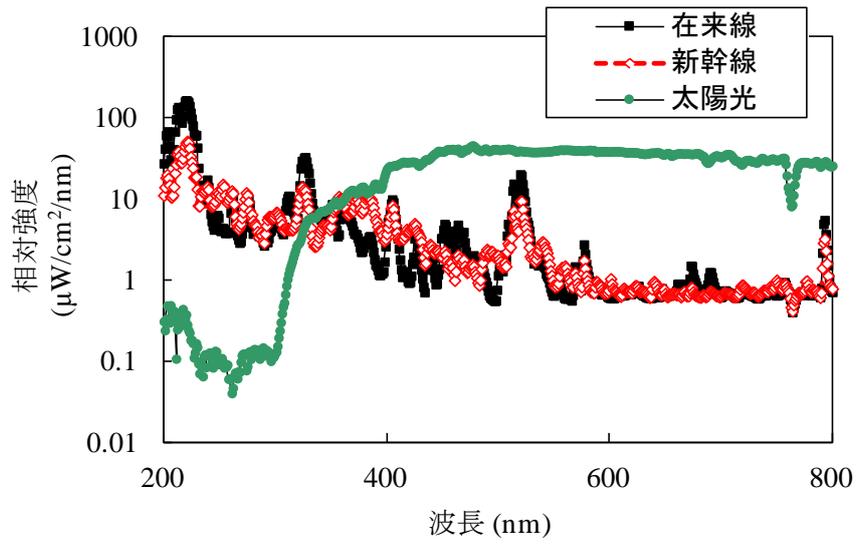


図 6.2.1 アーク光と太陽光のスペクトル分布

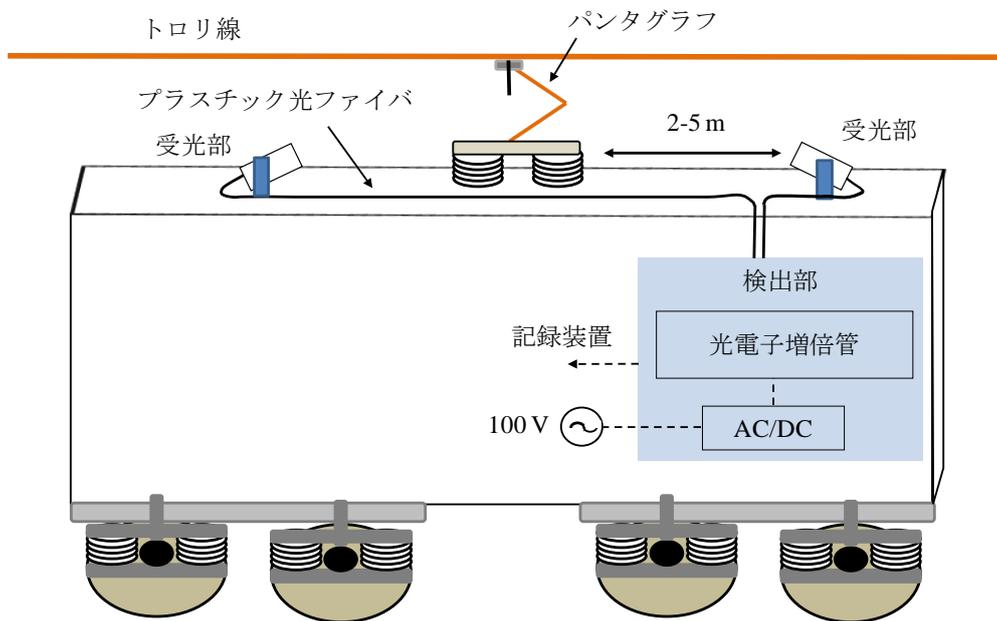


図 6.2.2 離線アーク測定装置の使用例

6.3 波長変換ユニットの開発

離線アーク光のスペクトルは、220 nm 付近、320 nm 付近、520 nm 付近にピークを持つ。一方、太陽光のスペクトル分布は 300 nm 付近から増加する。そのため、太陽光の影響を受けにくい離線アーク光の測定を行うためには、220 nm 付近の光を検出すればよい。

プラスチック光ファイバを用いた離線アーク測定装置は、可視光線を検出する。そのため、この測定装置を用いて直接的に紫外線を検出することは不可能である。しかし、受光部でアーク光に含まれる紫外線を可視光線に変換し、それをプラスチック光ファイバで検出器まで伝送することで、間接的な紫外線の検出が可能である。以下では紫外線から可視光線への波長の変換方法について述べる。

6.3.1 波長変換方法

図 6.3.1 に波長変換方法を模式的に示す。干渉フィルタはアーク光に含まれる紫外線を透過する。その透過した紫外線は、けい光ガラスで可視光線に変換される。

図 6.3.2 に、この波長変換のために設計ならびに製作した干渉フィルタの透過率の測定結果を示す。なお、測定には分光光度計を用いた。この干渉フィルタは半値幅が 22 nm (透過帯 198~220 nm) である。また、けい光ガラスは、文献 6.2 のうち、けい光強度が入射光遮断後、約 2 μ s で 1/10 以下に減衰するルミラス B を使用しており、紫外線を約 380~550 nm の可視光線に変換する。

6.3.2 波長変換ユニット

受光部は屋外に設置されるので、干渉フィルタやけい光ガラスも屋外で使用するようになる。そこで、JIS C 0920 の保護等級 IP67 (Internal Protection 6 : 耐じん形, 7 : 水中への浸漬に対する保護) を有するハウジングを製作し、これに干渉フィルタとけい光ガラスを収納した。ここでは、このハウジングに干渉フィルタとけい光ガラスが収納されたものを波長変換ユニットと呼ぶことにする。図 6.3.3 に離線アーク測定装置の受光部

に波長変換ユニットを装着した状態を模式的に示す。光が通る直径 D (mm)の開口部のみ、石英ガラスが用いられ、その他はアルマイト処理を施したアルミニウムが用いられている。また、開口部からプラスチック光ファイバの先端までの距離は L (mm)である。

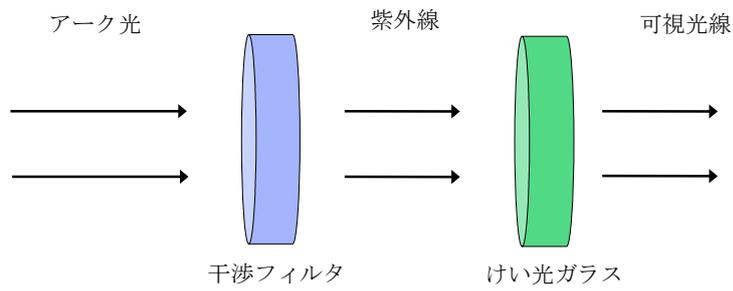


図 6.3.1 紫外線から可視光線への波長変換方法

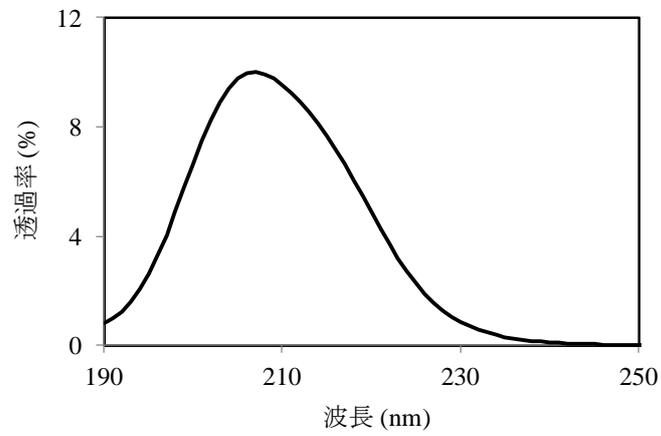


図 6.3.2 干渉フィルタの透過率

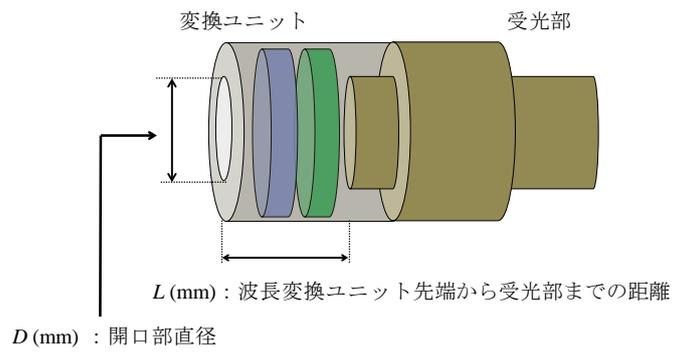


図 6.3.3 受光部への波長変換ユニット取付状態

6.4 波長変換ユニットを用いた離線アーク測定装置の出力測定

6.4.1 微小なアーク放電の検出

国際規格において、離線アーク測定装置は 100 μsec 以下の離線アーク光に反応することが求められている^{6.3)}。そこで、受光部に波長変換ユニットを装着した離線アーク測定装置（以後、紫外線検出離線アーク測定装置と呼ぶ）の 100 μsec 以下のアーク放電に対する反応を測定することとした。なお、アーク放電を発生させるうえでのアーク電流は、文献 6.3 に記載されていないため、以下のように決めた。

アーク放電の検出は、印加電圧が一定であれば、電流が小さいほど難しくなる。また、実際のフィールドを走行する電車のすり板に流れる電流は、電車の走行中に大きく、停車中に小さくなる傾向にある。停車中の電流量は、車両によって異なるものの 100 A 前後である^{6.4)}。そこで、微小なアーク放電は、実際にトロリ線とすり板に用いられている材料を接点材料に用いて、その継続時間を 100 μs 以下、電流を 100 A 以下として発生させることにした。接点に用いた材料は、陽極がみぞ付き硬銅トロリ線 GT110 と陰極がカーボン系すり板 PC78A である。

図 6.4.1 に、アーク放電を発生させた電極開閉装置と測定システムの回路を示す。微小なアーク放電の検出実験は、アーク継続時間 100 μs 、電圧 50 V、電流 70 A、抵抗 0.7 Ω に設定して行った。この実験では、電極間の電圧、電極間に流れる電流、ならびに紫外線検出離線アーク測定装置から出力される電圧をデジタルオシロスコープで測定した。なお、受光部は、測定装置の微小なアーク放電に対する反応を観測するために、電極開閉装置の接点から、40 mm 離して設置した。

図 6.4.2 に微小なアーク放電を発生させたときの紫外線検出離線アーク測定装置の出力の変化と、電極間電圧ならびに電極間電流の変化を示す。この測定結果から、紫外線検出離線アーク測定装置は 100 μsec 以下のアーク光を検出できること、ならびにアーク光が無い場合、0.1 V オーダーの出力のばらつきを持つことがわかった。

6.4.2 光の入射角度と出力の関係

離線アーク光の測定において、受光部の向きは、パンタグラフの中心で、かつトロリ線の標準的な高さ（レール面から新幹線で 5.0 m、在来線で 5.1 m）の方向である。しかし、トロリ線は場所によって水平方向にその位置が変化するように、ジグザグに架設されているうえ、その高さも変化する。したがって、アーク光の発生箇所は電車の走行位置で変化する。この変化は、受光部に対する光の入射角度の変化になり、これにともない紫外線検出離線アーク測定装置の出力変化も生じる。そこで、光の入射角度と紫外線検出離線アーク測定装置の出力の関係を測定することとした。

図 6.4.3 に測定方法を模式的に示す。光源から 3000 mm 離れた箇所に受光部を設置し、受光部の向きを変化させた。そのときの受光面の法線と入射光のなす角、ならびに紫外線検出離線アーク測定装置の出力を測定した。なお、受光面の開口部に対して、光は約 0.4° の広がりをもつもの、ほぼ平行であると見なした。

図 6.4.4 に光が受光面に対して垂直に入射した時の出力を基準とした場合の入射角度と出力の関係を示す。なお、図中の破線は、入射光量の比を式 (6.4.1) で求めた値である。

式 (6.4.1) は、図 6.4.5 に示した楕円の面積と円の面積の比に対して、光の入射角度の変化 ($-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) を乗ずることによって得られる式である。第一項は光の入射角度の変化による光量の変化を、第二項が入射角度の変化にともない光が波長変換ユニットのハウジングによって遮られることによる光量の変化を、 $\theta=0^\circ$ を基準として近似的に表している。

$$\gamma = \cos \theta - \frac{L}{D} |\sin \theta| \cdot \cdot \cdot \cdot (6.4.1)$$

ここで、 L 、 D は図 6.3.3 に示した箇所の長さであり、 $L=15$ mm、 $D=21$ mm である。なお、 $L=15$ mm は、保護等級 IP67 を満たすために必要な大きさであり、 $D=21$ mm は、光の受光面を大きくするために、プラスチック光ファイバの直径の 2 倍として設定した値である。

実験結果から、光の受光部に対する入射角度の変化は、紫外線検出離線アーク測定装

置の出力変化として観測されることがわかる。

6.4.3 光源からの距離と出力の関係

受光部が電車の屋根上に設置されるため、パンタグラフと受光部の位置関係は、電車毎に異なる可能性がある。異なる電車で測定結果を比較するためには、パンタグラフと受光部の距離に応じて、紫外線検出離線アーク測定装置の出力を補正する必要がある。そこで、光源から受光部までの距離と、出力の関係を測定するために、光源からの距離 200～700 mm の範囲で紫外線検出離線アーク測定装置の受光部の位置を変更し、そのときの出力の測定を行った。図 6.4.6 に光源からの距離と紫外線検出離線アーク測定装置の出力変化の測定方法を示す。なお、光源からの距離 200～700 mm は実験の利便性のために設定した条件である。

図 6.4.7 に光源と紫外線検出離線アーク測定装置の受光部の距離を 200～700 mm で変化させた場合の紫外線検出離線アーク測定装置の出力の変化を、距離が 300 mm のときの出力を基準として示す。また距離の 2 乗の逆数についても、距離が 300 mm のときの値を基準として示している。放射束は、距離の 2 乗に反比例することが知られており、紫外線検出離線アーク測定装置の出力も、放射束の変化に応じて変化していることがわかる。

この結果を用いると、例えば図 6.4.2 のような微小なアーク放電を検出可能とする受光部と電極開閉装置の接点間の距離は、出力のばらつきが 0.1 V オーダーであることを考えると、約 160 mm 以下と算出される。

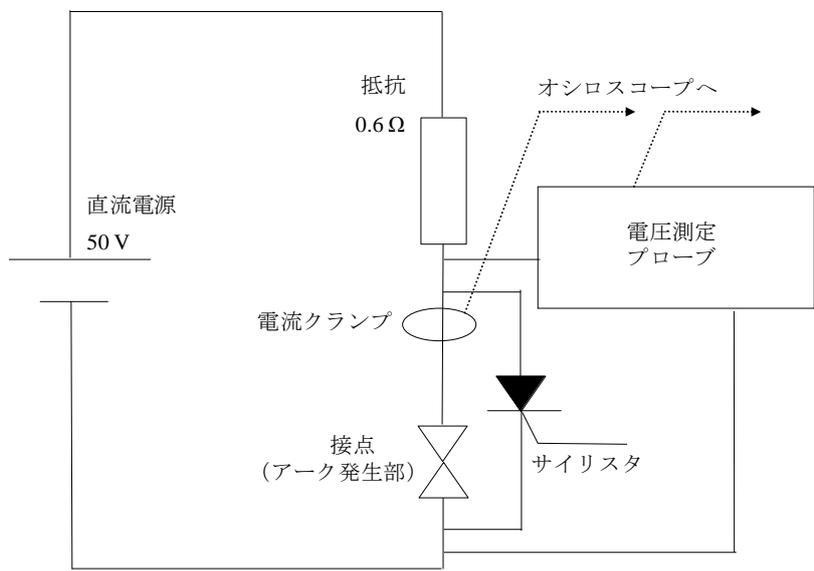
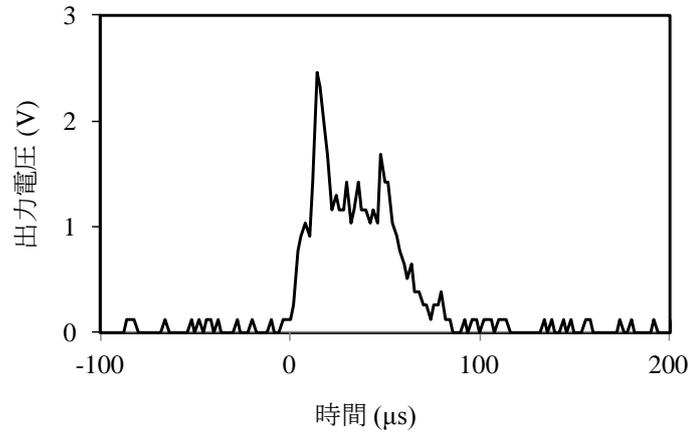
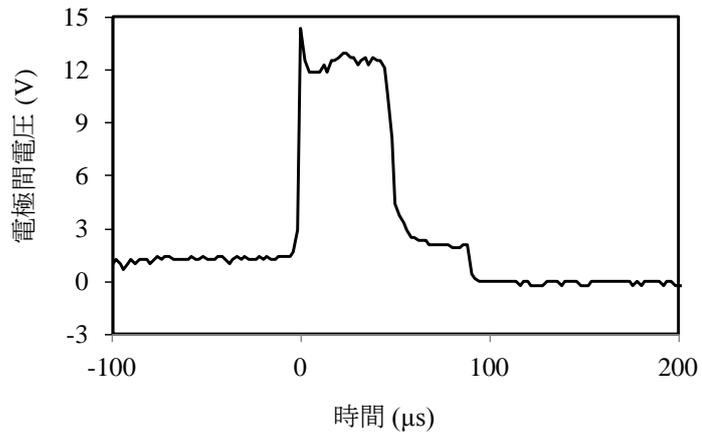


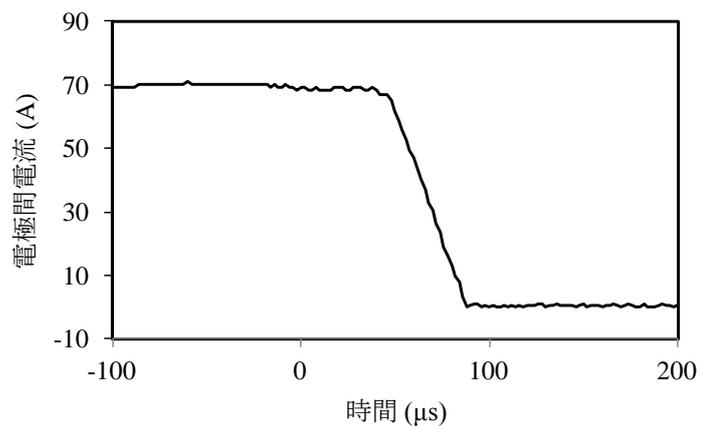
図 6.4.1 回路図



(a) 出力電圧



(b) 電極間電圧



(c) 電極間電流

図 6.4.2 測定装置の出力電圧の変化と電極間の電圧，電流の変化

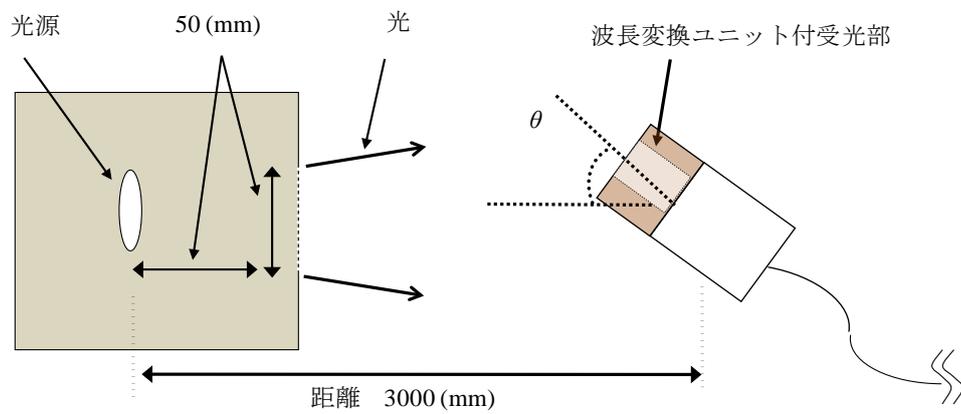


図 6.4.3 角度特性の測定方法

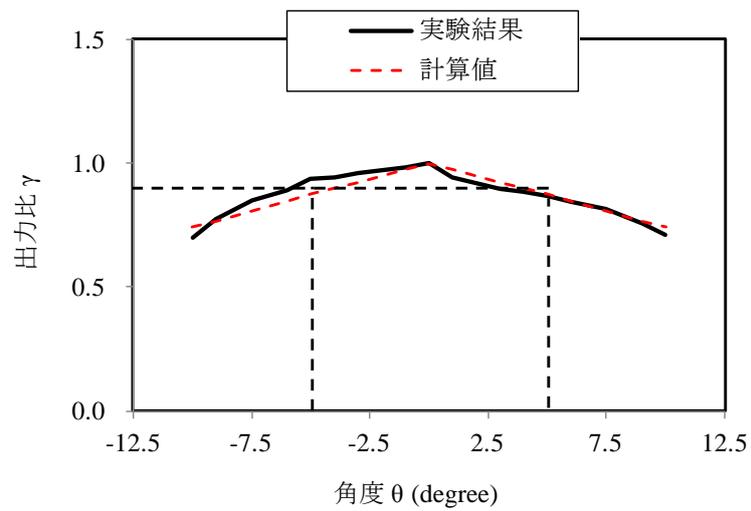


図 6.4.4 入射角度と出力比の関係

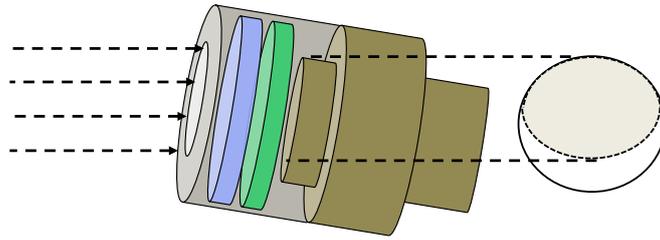


図 6.4.5 波長変換ユニット先端から光ファイバまでの入射光の様子

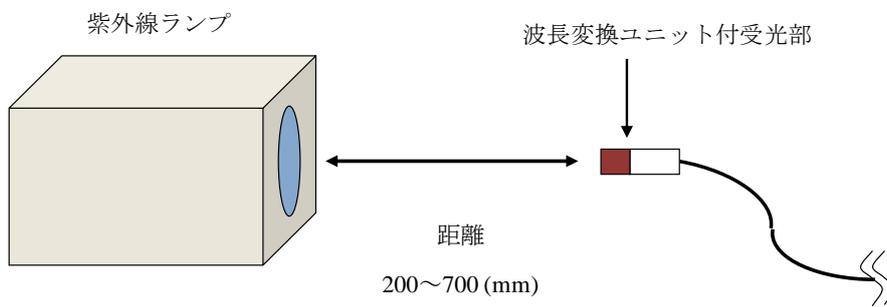


図 6.4.6 距離特性の測定方法

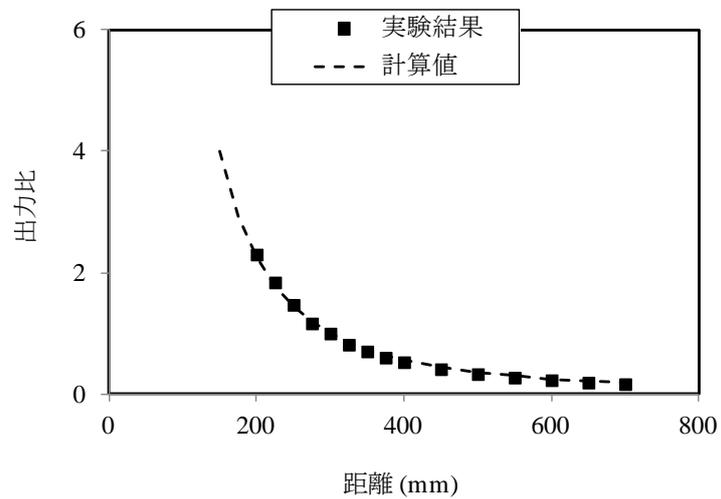


図 6.4.7 光源からの距離と出力比の関係

6.5 電気鉄道への応用

離線アークの測定のために電車の屋根へ測定装置を取付ける場合、受光部の取付け位置としてパンタグラフからの距離を示す必要がある。文献 6.3 では離線アーク光が受光部の視野内の任意の箇所でも発生してもその出力の差異が 10%以内になるように求めている。

ここでは、離線アーク光が受光部の視野角内の任意の箇所でも発生しても、紫外線検出離線アーク測定装置からの出力の差異が 10%以内になる受光部の設置箇所について検討する。

6.5.1 トロリ線位置の範囲

トロリ線は、レール面から新幹線で 5 m、在来線で 5.1 mの高さを標準として架設されている^{6.4)}。しかし、トンネル内、こ線橋、こ道橋の箇所ではトロリ線の高さを低くせざる得ない場合がある。また、すり板の局所的な摩耗を防ぐ目的で、トロリ線は水平方向に、ジグザグに敷設されている。一方、トロリ線の位置は場所によって異なるものの、保守管理を適切に行うために、ある範囲内に収められている。表 6.5.1 に新幹線と在来線のトロリ線位置として、ジグザグ偏位もしくはトロリ線の高さの範囲のうち大きい値を示す^{6.5)}。なお、新幹線のトロリ線の位置範囲は、本線上のオーバーラップやエアセクション箇所を除いたジグザグ偏位の値から算出し、在来線のトロリ線の位置範囲は、架設されているトロリ線の高さの範囲から算出した。

6.5.2 受光部の設置箇所

図 6.4.4 から出力の誤差が 10%になるのは、入射光と受光面の法線が $\pm 5^\circ$ のときである。一方、受光部を電車の屋根上へ取付ける場合、受光部が固定されているため、その法線は動かないものの、光源となる離線アーク光の位置は変化する。したがって、図 6.4.4 の実験と、電車の屋根上における離線アーク光の位置変化には、受光部の法線の変化と光源の位置変化という相対的な違いがあるだけである。ゆえに、出力の誤差を

10%以下とするためには、入射光と受光面の法線±5°を受光部の視野角と見なして、この中にトロリ線位置の範囲を含めなければならない。表 6.5.2 に出力の差異を 10%以内に収めるための新幹線ならびに在来線における受光部の設置箇所を、パンタグラフの中心から車両進行方向に対して後方への距離として示す。

表 6.5.1. トロリ線の移動範囲

幹在別	トロリ線移動範囲 (m)
新幹線	0.4
在来線	0.9

表 6.5.2. 受光部のパンタグラフからの距離

幹在別	パンタグラフからの距離 (m)
新幹線	2.3
在来線	5.2

6.6 結言

集電性能の評価に離線が用いられ、離線アーク光が測定されている。その測定には、電車の屋根上に受光部を、電車の車内に検出器を設置する装置が用いられている。受光部から検出器の間では、光ファイバが用いられており、フランスの場合、石英光ファイバが、日本の場合、プラスチック光ファイバが用いられている。

筆者は、アーク光に含まれる紫外線を可視光線に変換することで、日本の離線アーク測定装置でも離線アーク光を間接的に紫外線で検出することのできる波長変換ユニットを開発した。この波長変換ユニットを用いた離線アーク測定装置の特性について測定を行った結果を以下にまとめる。

- (1) 波長変換ユニットを取付けた離線アーク測定装置は 100 μ sec, 70 A のアーク放電を、アーク光と受光部の距離が 160 mm 以内の条件下において、検出することが可能である。
- (2) 波長変換ユニットを取付けた離線アーク測定装置の出力は、光源から 3000 mm 離れた箇所、光の入射角度に応じて変化する。
- (3) 波長変換ユニットを取付けた離線アーク測定装置の出力は、光源と受光部が 200～700 mm の距離において、2 乗に反比例する。

参考文献

- 6.1) 大越孝敬, 西原浩, 岡本勝就: 光ファイバセンサ, p.25, オーム社 (1986)
- 6.2) 沢登成人: 「蛍光ガラスの開発」, マテリアルインテグレーション, Vol. 17, No. 3 (2004)
- 6.3) IEC: ”IEC 62486 Railway applications- Current collection systems- Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access)”, International Electrotechnical Commission, (2010)
- 6.4) 日本鉄道電気技術協会: 「電車線 [I]」, pp. 13-16 (2008)
- 6.5) 鉄道総合技術研究所: 電車線とパンタグラフの特性, 研友社 (1993)

第 7 章 離線評価指標の目安値策定とその計測手法 の提案

7.1 緒言

集電性能評価に、離線測定が用いられており、その評価指標として離線率が用いられている。式 (2.4.1) ~ (2.4.2) に示したように NQ , AQ は、離線時間をベースに算出されるうえ、 NQ に至っては離線アークの継続時間が 5 ms 以上のものだけが算出対象となっている。

第 4 章~5 章で示したように、これまでの実験結果からすり板の離線アークによる損耗は通過電気量に応じて変化すること、トロリ線の損耗は離線回数に深く関係することがわかってきた。したがって、離線評価指標としては、すり板に対する評価として通過電気量を用いること、トロリ線に対する評価として離線回数を用いることが適当である。

日本の離線率は、すり板の摩耗量に基づいて決められているものであるが、近年のパンタグラフ数の削減はパンタグラフ当たりの集電電流を増加させる傾向にある。このような観点から、通過電気量を評価指標に設定し、その目安値を策定する必要がある。一方、通過電気量を算出するためには、離線アークの測定に加えてトロリ線とすり板間を流れる電流を測定する必要もある。

光学式離線測定では、光の検出に光電素子が用いられるのが一般的である。光電素子は入力した光の強度に応じてその出力電圧を変化させる。筆者はこの点に着目して、通過電気量と光電素子からの出力の関係を詳細に調べた。その結果、通過電気量を離線アーク測定装置の出力電圧の積分値から推測可能であることがわかってきた。

本章では、離線の評価指標に通過電気量を設定したうえで、その計測に第 6 章で開発した紫外線検出離線アーク測定装置を用いる手法を述べる。さらにすり板に期待する走行距離（すり板期待寿命）に応じた通過電気量の目安値策定方法も述べる。

7.2 紫外線検出離線アーク測定装置を用いた通過電気量とすり板摩耗量の推定手法

通過電気量を算出するためには、アーク継続時間と離線アーク発生時にトロリ線とすり板間に流れる電流を測定する必要がある。したがって、紫外線検出離線アーク測定装置に加えて、電流を測定するクランプメータなどが必要となる。

一方、紫外線検出離線アーク測定装置に用いられている光電変換素子は、入力される光の強さに応じて出力電圧が変化する。加えて、電極間へ入力される通過電気量は、電極の損耗や離線アーク光の放出へ用いられる。したがって、紫外線検出離線アーク測定装置の出力結果から電極間へ入力された通過電気量を推定することができると考えられる。

図 7.2.1 に、第 3 章の実験装置の陽極に GT110、陰極に BF31 を用いて離線アークを発生させた際の通過電気量と紫外線検出離線アーク測定装置の出力電圧積分値の関係を示す。なお、異なる通過電気量のアーク放電を発生させるために、電流を 250～520 A、アーク継続時間を 30～300 msec で変更して実験を行った。この結果から紫外線検出離線アーク測定装置の出力結果から通過電気量を推定することが可能であることがわかる。さらにこの結果と式 (4.3.4) を用いることで、すり板損耗量を紫外線検出離線アーク測定装置の出力結果から推定することも可能である。

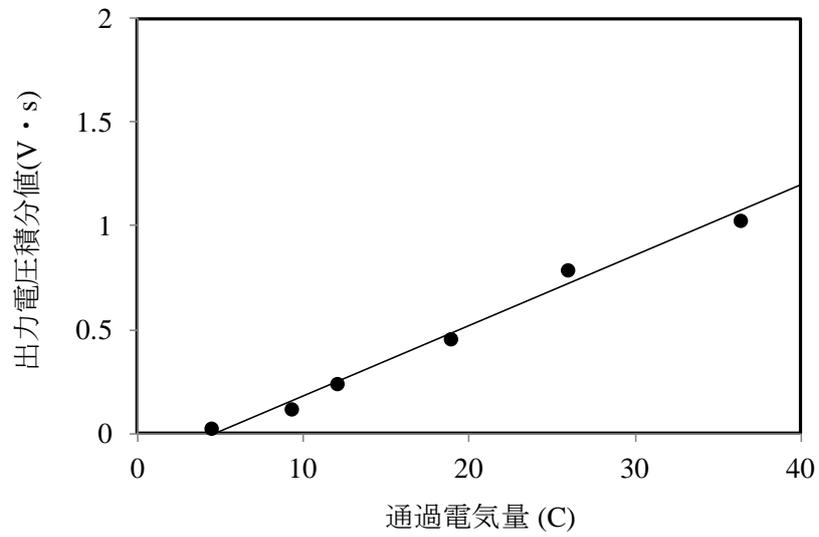


図 7.2.1 通過電気量と紫外線検出離線アーク測定装置の出力電圧積分値の関係

7.3 離線評価指標の目安値策定

すり板は、摩耗量が管理値に達すると交換される。その摩耗量は、式(2.4.4)で表わされるが、その各項を大きく分けると、しゅう動による機械的な摩耗である W_1 、 W_3 とアークによる損耗である W_2 に分けることができる。したがって、 W_1 と W_3 は走行距離の関数である。そこで、この走行距離を、すり板に期待する走行距離として以後、すり板期待寿命と呼ぶ。

すり板の摩耗量から W_1 と W_3 の和を除いた値は、アークによる損耗に等しく、この関係から、通過電気量とすり板期待寿命の関係を算出することができ、すり板期待寿命に応じた通過電気量の目安値を決定することができる。以後にその算出方法を示す。

すり板の摩耗量 W_C (g)が式(7.3.1)で与えられると仮定する。

$$W_C = W_M + W_A \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (7.3.1)$$

ただし、しゅう動による機械的な摩耗量を W_M (g)、アークによる損耗量を W_A (g)とする。

W_A はアークによるすり板の損耗量であるから、式(7.3.2)で与えられる。

$$W_A = k Q \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (7.3.2)$$

ただし、すり板のアークによる損耗係数を k (g/C)、通過電気量を Q (C)とする。これにより、通過電気量 Q は式(7.3.3)で与えられる。

$$Q = \frac{W_C - W_M}{k} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (7.3.3)$$

すり板の摩耗形状がトロリ線の偏位分布に従うことから、すり板の摩耗量 W_C はその線区のトロリ線偏位の分布とすり板の摩耗管理値 D_L (mm)を用いて算出することができる。しかしここでは、計算を進めるためにトロリ線の偏位分布が正規分布に従うと仮定すると、その摩耗形状関数 $f(x)$ が式(7.3.4)で表わされる。

$$f(x) = D_L \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (7.3.4)$$

ただし、偏位を x (mm)、トロリ線偏位の平均値を μ (mm)ならびに標準偏差を σ とする。

以上より、すり板の摩耗量 W_C はすり板の幅 ℓ (mm)とすり板の密度 ρ (mg/mm³)とすると式(7.3.5)で与えられる。

$$W_C = \rho \cdot \ell \cdot \int f(x) dx \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (7.3.5)$$

W_M はしゅう動によるすり板の摩耗量であり、比摩耗量を W_R (mm³/Nm)とすると、式

表 7.3.1 パラメータの値

パラメータ		値	パラメータ		値
すり板摩耗管理値	D_L	3 mm	すり板密度	ρ	7.8 mg/mm ³
トロリ線 偏位	平均値	μ	比摩耗量	W_R	5×10 ⁻⁵ mm ³ /Nm
	標準偏差	σ	損耗係数	k	200 μg/C 式(4.3.4)より
すり板幅	ℓ	75 mm	平均押上力	U	100 N

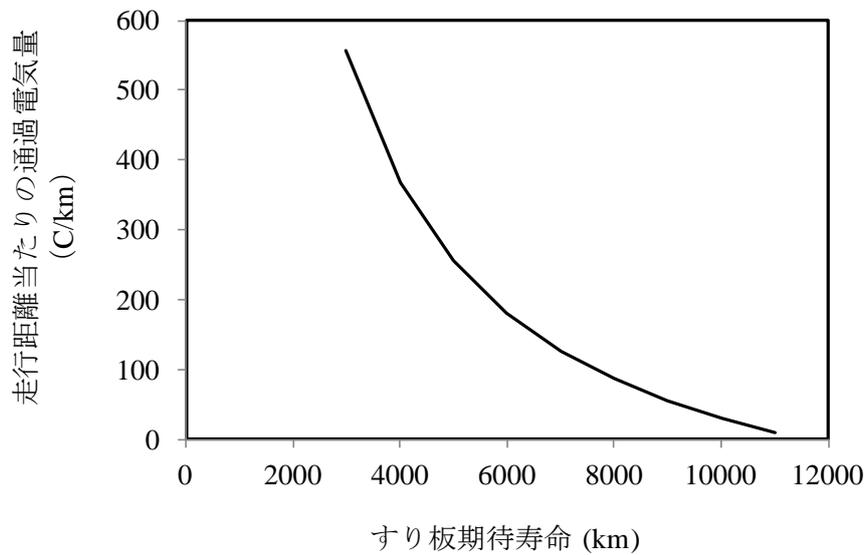


図 7.3.1 すり板期待寿命と通過電気量の関係

7.4 結言

本章では、離線の評価指標に通過電氣量を設定したうえで、その計測に第6章で開発した紫外線検出離線アーク測定装置を用いるとともに、第4章の結果を用いてすり板期待寿命に応じた通過電氣量の目安値策定手法を示した。結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 光電素子を用いた離線アーク測定装置の出力電圧積分値は、通過電氣量に応じて変化する。
- (2) 通過電氣量と離線アークによるすり板の損耗量の関係を用いることで、離線アーク測定装置の出力電圧積分値からすり板の損耗量を推定することが可能である。
- (3) すり板期待寿命に応じた通過電氣量の目安値ならびにその設定手法を明らかにした。

参考文献

- 7.1) 久保俊一, 土屋広志, 久保田喜雄:「新幹線用鉄系焼結合金すり板の性能向上」, 鉄道総研報告, Vol.20, No. 9, pp.47-51 (2006)
- 7.2) Nagasawa H, Aoki S, Katayama S. Application of Precipitation-hardened Copper Alloy Contact Wire. QR of RTRI, pp.142-146, Vol.39, No.3 (1998)

第 8 章 結論

8.1 本研究の成果

離線アークの抑制のために、パンタグラフ数の削減やパンタグラフ間の母線接続が進められてきた。加えて、東北新幹線の 320 km/h 走行にともなう集電系騒音を低減するために、1 パンタグラフ走行が始まっている。そのため、近年ではパンタグラフ当たりの集電電流が増加する傾向にある。

集電性能を評価する指標として、日本だけでなく、海外においても離線率が用いられている。特に、日本の離線率の目安値は 8 個パンタグラフを使用した 0 系新幹線の集電電流をベースにして設定されているため、現在の集電電流より小さな値を想定して策定されている。一方で、アーク放電による材料の損耗は、通過電気量に応じて変化することがわかっており、近年の集電電流の増加傾向を反映するために、離線率に代わって通過電気量を評価指標に用いる考え方も以前からあった。しかし、その目安値が明確となっていなかったこと、計測が煩雑になることなどの課題により、実用化までに至っていなかった。加えて、離線の測定には光学式離線測定が用いられており、離線アーク光の伝送路である光ファイバの材質と測定精度も課題であった。

本研究では、これら課題を解決すべく実験および開発を進めた。本研究の成果を以下にまとめる。

第 4 章 離線アークがすり板へ及ぼす影響

- (1) 陽極に硬銅トロリ線，陰極にカーボン系すり板を用いてアーク放電実験を行った結果，硬銅トロリ線の質量は 20 $\mu\text{g}/\text{C}$ で増加し，カーボン系すり板の質量は 70 $\mu\text{g}/\text{C}$ で減少した。
- (2) 陽極に硬銅トロリ線，陰極に鉄系金属すり板を用いてアーク放電実験を行った結果，硬銅トロリ線の質量は 90 $\mu\text{g}/\text{C}$ で増加し，鉄系金属すり板の質量は 200 $\mu\text{g}/\text{C}$ で減少した。

(3) カーボン系すり板と鉄系金属すり板の質量変化の違いは、カーボン系すり板の基材である炭素がアーク放電による銅の飛散を防ぐために生じる。

(1) ならびに (2) は第 7 章の離線評価指標として設定する通過電気量の目安値を策定するうえで重要な実験結果である。また、(3) の結果にあるようなカーボン系すり板と金属すり板の離線アークによる損耗メカニズムが実験を通して明らかになったことはこれまでにない。

第 5 章 離線アークがトロリ線へ及ぼす影響

(1) アーク放電発生直前までに電極表面に熔融金属が形成されるとともに、電極間に熔融ブリッジが形成される。熔融ブリッジは、アーク放電の発生により飛散するが、その質量は電極表面の熔融金属質量の 1/5～1/100 である。

(2) 熔融ブリッジの飛散後も電極表面に熔融金属が残るものの、その熔融金属の蒸発は電極間へ入力したエネルギーに応じて進み、本実験条件で 5～20 ms を要した。

(3) 直流電気鉄道におけるトロリ線のアーク放電による損耗は、熔融ブリッジの形成、破壊が生じた点で大きく、陽光柱の移動先で小さいと考えられる。したがって、トロリ線の離線アークによる損耗量は離線アークの発生回数が大きく関係している。

ここで得られた結果はフィールドで確認されていた離線発生箇所でのトロリ線の摩耗増大とも現象面で一致しており、離線アークがトロリ線に及ぼす影響が明らかになった。

第 6 章 紫外線検出離線アーク測定装置の開発

アーク光に含まれる紫外線を可視光線に変換することで、プラスチック光ファイバを使用した離線アーク測定装置でも離線アーク光を間接的に紫外線で検出することのできる波長変換ユニットを開発した。また波長変換ユニットを装着した離線アーク測定装置（本研究では紫外線検出離線アーク測定装置と呼ぶ）の特性を明らかにした。その結果は以下のとおりである。

(1) 紫外線検出離線アーク測定装置は 100 μ sec, 70 A のアーク放電を、アーク光と受光部の距離が 160 mm 以内の条件下において、検出することが可能である。

(2) 紫外線検出離線アーク測定装置の出力は、光源から 3000 mm 離れた箇所では、光の

入射角度に応じて変化する。

- (3) 紫外線検出離線アーク測定装置の出力は、光源と受光部が 200～700 mm の距離において、2 乗に反比例する。

第 7 章 離線評価指標の目安値策定とその計測手法の提案

第 4 章、第 6 章で示した通過電氣量に応じてすり板の質量が変化すること、離線アークの測定に使用している装置が光電変換素子を使用していることに着目して、離線評価指標に通過電氣量を設定したうえで、その目安値の策定手法を示すとともに、通過電氣量の計測手法を提案した。結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 光電素子を用いた離線アーク測定装置の出力電圧積分値は、通過電氣量に応じて変化する。
- (2) 通過電氣量と離線アークによるすり板の損耗量の間を用いることで、離線アーク測定装置の出力電圧積分値からすり板の損耗量を推定することが可能である。
- (3) すり板期待寿命に応じた通過電氣量の目安値ならびにその設定手法を明らかにした。

8.2 今後の課題

本研究では、直流の電源設備を用いて、陽極にトロリ線を、陰極にすり板を用いて一連の実験を行った。一方、直流電氣鉄道ではエネルギー効率向上のため、回生ブレーキを用いており、そのような場合、極性が反転する。また、新幹線は交流であるから、極性が常に変化している。本研究では、これら極性の変化が材料に与える影響を明らかにするに至らなかった。今後、さらに研究を進める予定である。

トロリ線の離線アークによる損耗は、溶融ブリッジの破壊ならびに飛散と、その後、10 ms～20 ms 程度まで続くトロリ線表面の溶融物の蒸発によって生じることを明らかにした。しかし、20 ms 以降で生じる現象については十分に明らかにすることができなかった。これについても今後、さらに研究を進める予定である。

紫外線検出離線アーク測定装置については、さらなる小型と低廉化が求められており、現在もなお開発を進めているところである。また離線評価指標として設定した通過電氣量とその目安値策定手法についても、今後、実用化を進めていきたいと考えている。

研究業績

論文

- (1) 早坂高雅, 久保田喜雄 : 「開離時アーク放電が集電系材料の質量と表面状態に及ぼす影響」, 電学論 D, Vol.132, No.2, pp.163-169 (2012)
- (2) 早坂高雅, 清水政利, 赤木泰文 : 「離線アーク光の検出を目的とした波長変換ユニットの開発」, 電学論 D, Vol.134, No.6, pp.618-624 (2014)
- (3) 早坂高雅, 赤木泰文 : 「開離時アーク放電がトロリ線表面に及ぼす影響」, 電学論 D, Vol.135, No.4, pp.327-334 (2015)
- (4) Takamasa Hayasaka, Masatoshi Shimizu and Hirofumi Akagi : An Estimation Method of Contact Strips Wear by Measurement of Arc Light, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, DOI: 10.1177/0954409715589619, June 11, (2015)
<http://pif.sagepub.com/cgi/reprint/0954409715589619v1.pdf?ijkey=1nz3rnjHTi916IF&keytype=finite>

国際会議

- (1) Takamasa Hayasaka and Masatoshi Shimizu : Development of a contact-loss measuring system using ultraviolet ray detection, IEEE pacific (2011)
- (2) Takamasa Hayasaka and Masatoshi Shimizu : Development of Japanese Measurement System for Arc Detection, WCRR (2013)

学会発表等

- (1) 早坂高雅, 清水政利 : 「離線アークの分光測定結果」, 平成 17 年電気学会全国大会講演論文集, No. 5, pp.216-217 (2005)
- (2) 早坂高雅 : 「光学式離線測定における紫外光検出方法の検討とその適用結果」, 平成 20 年電気学会全国大会講演論文集, No. 5, pp.156-157 (2008)

- (3) 早坂高雅：「現地・現車試験における測定と評価(5)」，鉄道と電気技術，Vol.19, No.8, pp.59-62 (2008)
- (4) 早坂高雅，清水政利，根津一嘉：「紫外線検出式離線測定装置の開発」，鉄道総研報告，Vol.22, No.12, pp.17-22 (2008)
- (5) 早坂高雅，清水政利，根津一嘉：「集電系材料におけるアーク放電時の発光エネルギー，損耗量，通過電気量の関係」，平成 21 年電気学会全国大会講演論文集，No.5, pp.130-131 (2009)
- (6) 早坂高雅：「硬銅トロリ線とカーボン系すり板で形成された接点における開離時アークの諸特性と摩耗量の関係」，電気学会交通・電気鉄道研資，TER-09-25, pp.51-55, (2009)
- (7) 早坂高雅：「紫外線を用いた車上用離線測定装置」，RRR，Vol.66, No.19, pp.52 (2009)
- (8) T.HAYASAKA, M.SHIMIZU and K.NEZU : Development of Japanese Measurement System for Arc Detection, Quarterly Report, Vol. 50, No.3, pp.131-136 (2009)
- (9) 早坂高雅：「集電系材料を用いて形成された開離時アーク放電における通過電気量と接点の質量変化の関係」第 17 回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集，pp.145-148 (2010)
- (10) 早坂高雅：「開離時アーク放電によりトロリ線表面が受ける影響」，平成 23 年電気学会産業応用部門大会講演論文集，No.3, pp.205-206 (2011)
- (11) 早坂高雅：「鉄道総研における試験・計測・測定装置について—離線測定装置—」，鉄道車両と技術，Vol. 180, pp. 8-10 (2011)
- (12) 早坂高雅：「アーク継続時間と集電系材料の表面状態の関係」，第 18 回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集，pp.207-210 (2011)
- (13) 早坂高雅：「アーク放電発生時のすり板溶損メカニズム」，平成 24 年電気学会全国大会講演論文集，No. 5, pp.102-103 (2012)
- (14) 早坂高雅，久保田喜雄：「アーク放電が集電系材料の質量と表面状態に及ぼす影響」，鉄道総研報告，Vol. 26, No.6, pp.35-40 (2012)
- (15) 早坂高雅：「紫外線検出式離線測定装置の基礎特性」，平成 24 年電気学会産業応用

部門講演論文集, No.5, pp.215-218 (2012)

(16) 早坂高雅 : 「アーク継続時間ならびに電極間距離がトロリ線表面に及ぼす影響」,
第 19 回鉄道技術・政策連合シンポジウム講演論文集, pp.571-574 (2012)

(17) 早坂高雅 : 「アーク放電がトロリ線表面に及ぼす影響」, 第 20 回鉄道技術・政策連
合シンポジウム講演論文集, pp.633-636, (2013)

(18) 早坂高雅 : 「アーク放電が集電系材料へ与える損傷の過程」, 平成 25 年電気学会全
国大会講演論文集, pp.237-238 (2014)

(19) 早坂高雅, 清水政利 : 「離線測定を目的とした紫外線の波長変換ユニットの開発」,
鉄道総研報告, Vol. 28, No.10, pp.17-22 (2014)

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京工業大学大学院理工学研究科 赤木泰文教授に、終始懇切丁寧なご指導ご鞭撻を賜りましたことに深く感謝の意を表します。また、有益なご討論ならびに助言を賜りました東京工業大学大学院理工学研究科 藤田英明准教授、安岡康一教授、七原俊也教授、千葉明教授に深く感謝の意を表します。

本研究は離線測定装置の開発に端を発し、そのきっかけを与えていただいた上司である島田健夫三氏（現三和テッキ、前鉄道総研）、清水政利氏に深く感謝の意を表します。また、同測定装置の開発に際して、佐久間利明氏（山田光学工業）、佐藤勇輔氏（現電業、前鉄道総研）、山崎高広氏（電業）に有益なご意見、ご協力を賜りました。深く感謝の意を表します。

離線アークの研究を進める上で上司、先輩、同僚のご支援を賜りました。特に、2008年～2010年の間に合計31回にも亘って開催され、活発な議論が行われたアーク研究会設立者である中道好信氏（現JR総研電気システム、前鉄道総研）およびそのメンバーのみなさまには深く感謝の意を表します。また、林屋均氏（JR東日本）には同研究会にてご講演をいただき、本研究を進める上で有益な知見を賜りました。加えて、長谷伸一氏（現新陽社、前鉄道総研）には同研究会の場だけでなく、実験装置や実験方法に関してもご意見、ご助言を受け賜りました。深く感謝の意を表します。

博士課程に進学する上で、上司である奥井明伸氏、兎東哲夫氏には有益なご助言を受け賜りました。深く感謝の意を表します。