

紫外線検出式離線測定装置の開発

早坂 高雅* 清水 政利* 根津 一嘉**

Development of Contact Loss Measuring System Using Ultraviolet Rays

Takamasa HAYASAKA Masatoshi SHIMIZU Kazuyoshi NEZU

The optical contact loss measuring system to detect arcing photons has used visible rays in measurement, but its measurement has been executed only at night because the accuracy is affected by environmental light. This problem can be solved by change to a new system to detect ultraviolet rays that would be adopted by The International Electrotechnical Commission in future, but the system has a fault that it is very expensive. This paper reports development of a low-priced measurement system to solve the problem.

キーワード：紫外線，検出，離線，測定装置，開発

1. はじめに

架線・パンタグラフ系の円滑な集電のためには、トロリ線とパンタグラフのすり板が常に接触していることが望ましい。しかし、列車速度が上昇するにつれてトロリ線とすり板が機械的に離れ（離線）、トロリ線とすり板の間で強い光をとまうアーク放電が発生する。このアーク放電は、騒音、すり板およびトロリ線の摩耗進行の原因となる。したがって、アーク光の検出は、集電性能を判断するための重要な測定項目の1つになっており、この検出のために光学式離線測定器¹⁾が開発され、その後、測定精度向上のためにプラスチック光ファイバを使用した光ファイバ型離線アーク測定装置²⁾が開発された。

しかし、これらの離線測定器は、可視光線域の光を検出する測定器であることから、周囲の明るさにより、その測定精度が左右される。したがって測定は夜間やトンネル内が望ましいものの、駅照明などが点灯している状況ではアーク放電の検出がほとんどできない欠点がある。一方、海外における離線測定では、アーク放電に含まれる紫外線を検出する方式での測定³⁾が行われており、EN規格でもこの方式を用いた離線測定装置の要件が記載されている⁴⁾。この紫外線を検出する離線測定は、周囲の明るさの影響をほとんど受けないことから、離線測定の精度が格段に向上するものと考えられる。

紫外線を検出する離線測定装置の開発において、上記した従来の離線測定装置をベースに考えた場合、プラスチック光ファイバは、紫外線を透過しないことから石英光ファイバに変更する必要がある。この石英光ファイバは、プラスチック光ファイバに比べて高価であり、長尺

のファイバを必要とする離線測定には不向きである。そこで、この問題点を解決するために離線検出波長の検討、およびこれまで用いられてきた測定系統の再検討を行いコスト削減を目指した。これにより石英光ファイバを用いない紫外線検出式離線測定装置として、光ファイバ自体を用いないUltraviolet rays（以下UV）センサモジュールタイプ⁵⁾と、従来から用いられてきたプラスチック光ファイバを使用することが出来るように紫外線・可視光線変換ユニットをプラスチック光ファイバ先端に装着する紫外線・可視光線変換タイプ⁶⁾の2種類の測定機器を開発したので報告する。

2. アークの特徴

2.1 離線時のアーク光発生メカニズム

離線は、列車速度、架線構成、硬点の存在など様々な原因で発生し、この離線と同時にトロリ線とすり板間では、強い光をとまうアーク放電が発生する。このアーク放電の内部は電子および金属蒸気などで満たされており、これらが相互に衝突しエネルギーを交換している。この衝突の際に原子あるいは分子が有する電子が励起され、さらにその電子が下準位または基底状態に転位する際に、ある波長を持った光量子が放出される。これがアーク光として観測される光であり、原子あるいは分子が有する電子のエネルギー準位が、その物質特有であることから、放出される光の波長もその物質特有となる。したがって、アーク放電を高精度に検出する方法としてある特定の波長だけを検出する方法が考えられる。

* 電力技術研究部（電車線構造）

** 電力技術研究部（集電管理）

特集：電力技術

2.2 アーク光に含まれる光の波長

架線やすり板に使用される材料は、銅、アルミニウム、鉄および炭素がほとんどである。例えばトロリ線は銅が主成分であり、在来線のすり板は銅または炭素が主成分である。それぞれの材料を用いた場合のアーク光のスペクトル線に関しては、発光分光分析に用いられるスペクトル線⁷⁾を参考にすることができるものの、異なる材料を組み合わせるとアーク放電を発生させた場合のスペクトルの定量的な値に関する報告は見受けられない。そこで、アーク光と太陽光の分光測定を実施し、アーク光を精度良く検出することができる波長について調べた⁸⁾。図1は分光測定の概要であり、陰極側が上下に可動できるような機構とし、対向する側に陽極を設置して、この間にアークを発生させた。アーク発生にともなうアーク光は分光器の受光部を通して検出器に送られ、パソコンにそのスペクトルが出力される構成になっている。アーク放電発生箇所と受光部の距離は1100mmとし、直流電源の出力は電流330A、電圧50Vに設定した。またこの分光器を用いて太陽光のスペクトルも測定し、アーク光のスペクトルと比較した。この分光測定で使用した陽極および陰極の材料を表1に示す。

図2はアーク光および太陽光の分光測定結果である。アーク放電をCuとBF, BC, C間で発生させた場合のアーク光から発せられるスペクトル線は、すり板の種類によって異なることがわかるものの、紫外線領域である200～240nm付近(A)や320～340nm付近(B)ではどの組み合わせにおいてもある程度の強度を持つスペクトルが観測された。また太陽光のスペクトルは約350nm付近から徐々に高くなっていることがわかり、350nm以下のスペクトルは太陽光にほとんど含まれていないことがわかる。このように離線の際に発生するアーク光には紫外線領域に特定のスペクトル線が含まれ、これらを検出することで、太陽光の影響を最小限にした測定が可能である。

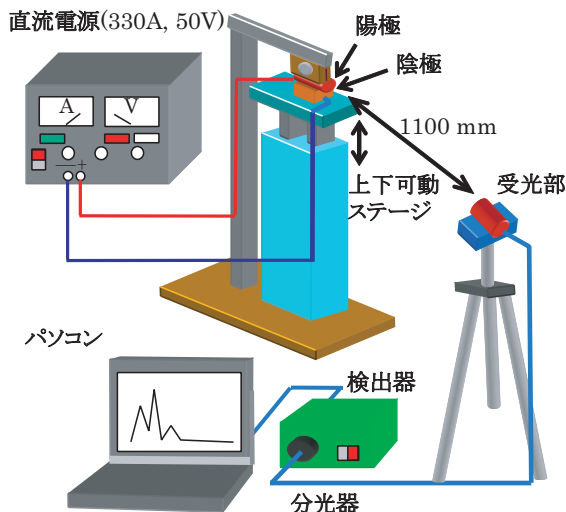


図1 アーク光分光測定概要

表1 アーク光分光測定で使用した材料

極性	使用材料：標記
陽極	硬銅トロリ線 : Cu
陰極	鉄系焼結合金すり板：BF
	銅系焼結合金すり板：BC
	純カーボンすり板：C

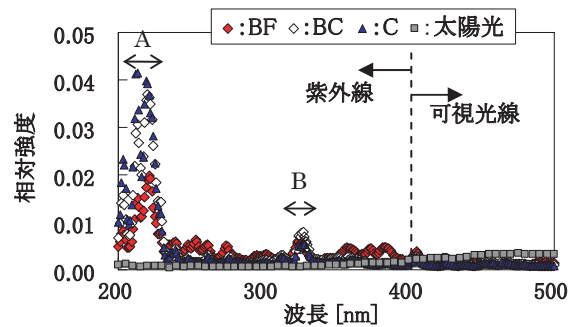


図2 陽極 (Cu)、陰極 (BF, BC, C) 間のアーク光のスペクトルと太陽光のスペクトル

3. 従来のアーク光検出方式の離線測定装置

現在使用されている離線測定装置は、図3に示すような光ファイバ型離線アーク測定装置、およびUV光ファイバ型離線測定装置⁹⁾である。最近の現車試験で用いられる測定装置は、ほとんどが光ファイバ型離線アーク測定装置であり、可視光線領域を検出する測定装置である。またUV光ファイバ型離線測定装置は、紫外線を検出する離線測定装置として開発されているが、機器設置に制約があるため用いられることは少ない。

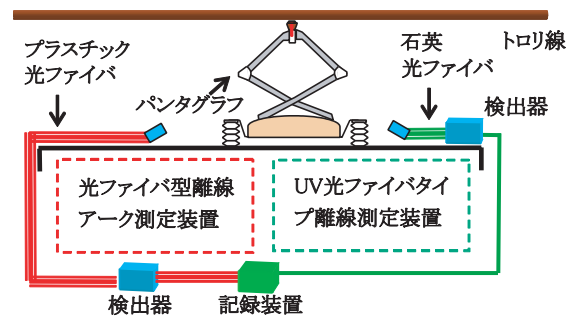


図3 従来のアーク光検出方式の離線測定装置

3.1 光ファイバ型離線アーク測定装置

表2は光ファイバ型離線アーク測定装置を構成するセンサ等の特徴であり、図4は測定装置の概要である。トロリ線・すり板間で発生したアークは、車両の屋根上から車内まで配線されたプラスチック光ファイバによって車内の検出器へ送られ、検出器内部の光電子増倍管で電気信号に変換される。なお、この測定器で検出しているアーク光の波長は可視光線である。したがって、アーク光以外の光、例えば太陽光、駅照明なども検出するため、これらの光が無い状態での測定が望ましい。

表2 光ファイバ型離線アーク測定装置の構成と特徴

構成機器	特徴
光ファイバ	プラスチック
検出器	可視光線検出 光電子増倍管

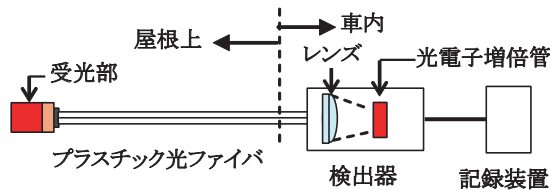


図4 光ファイバ型離線アーク測定装置

3.2 UV光ファイバタイプ離線測定装置

表3はUV光ファイバタイプ離線測定装置を構成するセンサ等の特徴であり、図5は測定装置の概要である。この測定装置では紫外線を検出するために光ファイバを従来のプラスチック製から石英製に変更している。これはプラスチック光ファイバが紫外線を通さないためである。また石英光ファイバがプラスチック光ファイバに比べて非常に高価であるため、石英光ファイバの長さを短くしており、スペースの制約がなければ検出器を屋根上に置くこともある。なお検出器には323～329nmの波長の光を通す干渉フィルタが取り付けられており、フォトダイオードで電気信号へ変換している。

表3 UV光ファイバタイプ離線測定装置の構成と特徴

構成機器	特徴
光ファイバ	石英
検出器	紫外線検出 干渉フィルタ 323～329 nm フォトダイオード

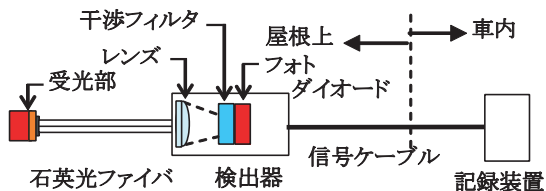


図5 UV光ファイバタイプ離線測定装置

4. 新しい紫外線検出式離線測定装置

光ファイバ型離線アーク測定装置は、検出器を車内に置けるものの、検出波長が可視光線であるため、上記したように太陽光、駅照明などの影響を受けやすい。一方でUV光ファイバタイプ離線測定装置は、紫外線を検出するため周囲の明るさの影響を受けないものの、石英光ファイバが高価なためコストの観点からファイバの長尺

化は難しく、検出器を屋根上に設置する場合もあり、屋根上のスペースの制約を受ける。したがって、これらの問題を解決するために石英光ファイバを用いない紫外線検出式離線測定装置の開発を実施した。開発におけるコンセプトは、新たな測定装置の開発、または従来の光ファイバ型離線アーク離線測定装置の改良の2つの観点とした。また開発した測定装置に対しては、EN規格(EN50317)⁴⁾における紫外線検出式離線測定装置の要件のうち、下記(1)～(3)の条件に対する試験も実施した。

- (1) 検出器の検出波長は220～225nmまたは323～329nmを含むこと
- (2) 検出器はパンタグラフの最小および最大作動範囲の全てに対し感度を有し、その感度公差は10%以内とすること
- (3) 検出器が検出可能な最小アーク光のパワー密度を示すこと

なお(2)に関しては在来線の架線最低高さ4600mmから架線最高高さ5400mmの間の800mm(±400mm)について考えるものとし、この範囲をセンサにより測定する場合において感度公差として、視野角度の変化による出力公差が10%以内となる測定機器設置箇所を求めることとした。また(3)に関しては、直射日光が検出器に入射した場合でも、それを離線と判定しないような出力電圧をスライスレベルに設定した場合を仮定して、その値から得られるパワー密度を最小アーク光のパワー密度とした。

4.1 UVセンサモジュールタイプ離線測定装置

UVセンサモジュールタイプ離線測定装置(以下、UVセンサモジュールタイプ)は離線測定システム全体を見直して、光ファイバを用いない新たな測定システムとしたものである。図6はUVセンサモジュールタイプの概要であり、検出器としてハウジングの中に光電管が組み込まれたモジュールを格納して、これを屋根上に設置する。電源や記録装置は車内に設置され、これらと検出器は信号ケーブルと電力ケーブルで接続される。図7(a)～(c)にUVセンサモジュールタイプの特徴として検出器の波長毎の感度、角度による出力公差、および出力特性を示す。図7(a)に示すようにUVセンサモジュールタイプは紫外線領域のみに感度を有し、太陽光に対する影響を極力抑えることが可能である。また図7(b)に示すように出力公差に関しては±10°で10%の公差を有しており、パンタグラフ・検出器の距離を2.3m以上離すことで、±400mmを出力公差10%以内に収めることが可能である。さらに図7(c)は紫外線領域のみを放射する光源に対する出力電圧であり、光源強度に比例した出力電圧が得られている。なお、UVセンサモジュールに直射日光が入った場合の出力電圧は、0.012Vであったことから、UVセンサモジュールタイプの検出可能な最小アーク光のパワー密度は、約60μW/cm²である。

特集：電力技術

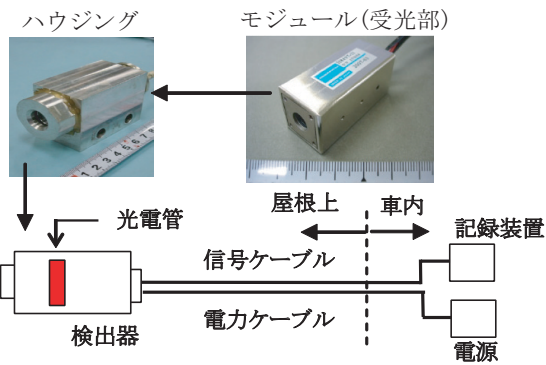


図6 UVセンサモジュールタイプ離線測定装置概要

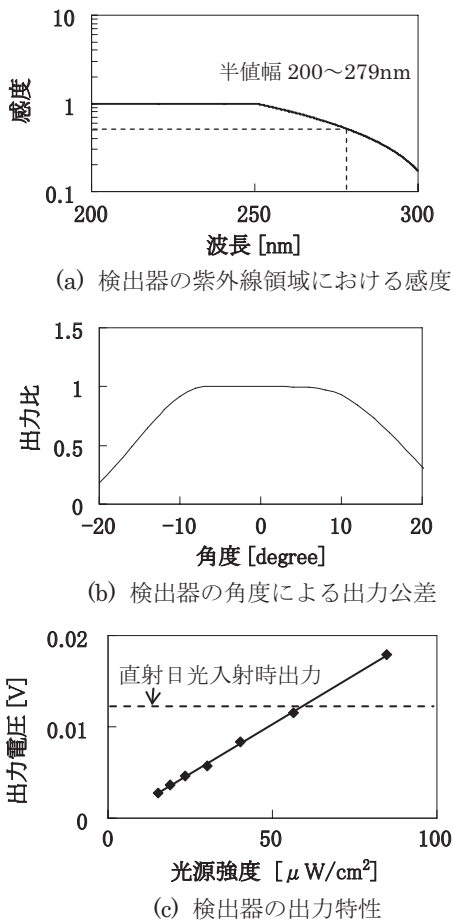


図7 UVセンサモジュールタイプの特徴

4.2 紫外線・可視光線変換タイプ離線測定装置

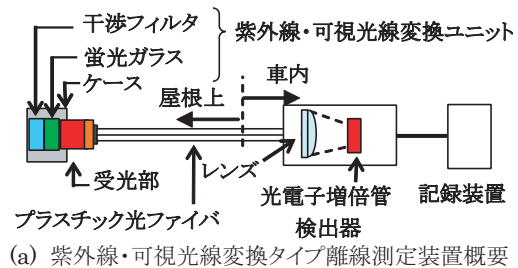
紫外線・可視光線変換タイプの離線測定装置(以下、紫外線・可視光線交換タイプ)は、3.1で述べた光ファイバ型離線アーク測定装置に紫外線を可視光線に変換するユニットを取り付けることで、紫外線検出式離線測定装置として使用可能としたものである。図8(a)～(c)に紫外線・可視光線変換タイプの概要、構造、および概観を示す。紫外線・可視光線変換タイプは、図8(a)のように紫外線を可視光線に変換することのできる変換ユニットをプラスチック光ファイバ受光部に取り付けることで、従来の光ファイバ型離線アーク測定装置を用いて紫外線の検出が可能である。したがって、高価な石英光

ファイバを用いる必要がなく、さらに検出器を車内に設置することができる。図8(b)は受光部に取り付ける紫外線・可視光線変換ユニットの構造を示しており、ケース内に干渉フィルタおよび蛍光ガラスが格納されている。なお、紫外線・可視光線の変換は次のように行われる。

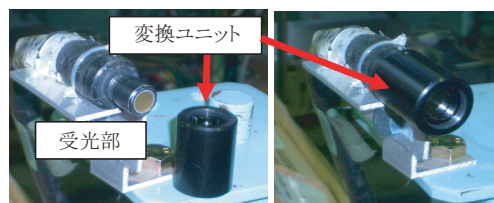
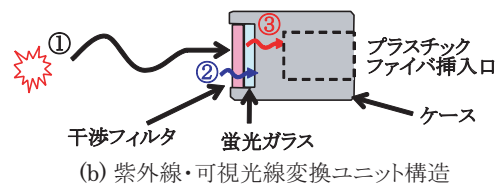
- ① 離線により発生したアーク光がユニットに到達
- ② 干渉フィルタによって紫外線を抽出
- ③ 紫外線量に応じた可視光線量を放出する蛍光ガラス¹⁰⁾による紫外線・可視光線の変換

このように紫外線から可視光線に変換されたアーク光は、プラスチック光ファイバを通ることが可能となり検出器へと導かれる。なお図8(c)は変換ユニットの外観であり、取り付け、取り外しが簡単に行えることがわかる。

図9(a)～(c)に紫外線・可視光線変換タイプの特徴として干渉フィルタ透過率、角度による出力公差、および出力特性を示す。図9(a)の干渉フィルタは、図2で示したアーク光に含まれる特定の波長のうち、200～240nmを透過するように設計し、半値幅で206～226nmを透過する。また図9(b)の出力公差に関しては約±7°が10%の公差となっているため、パンタグラフ・検出器間の距離を約3.3m以上離すことで±400mmを出力公差10%以内に収めることが可能である。図9(c)は紫外線領域のみを放射する光源に対する出力電圧であり、この紫外線・可視光線変換タイプに直射日光が入った場合の出力は0.03Vであったことから、この装置の検出可能な最小アーク光のパワー密度は、5 μW/cm²程度であり、太陽光の影響をほとんど受けないことがわかる。

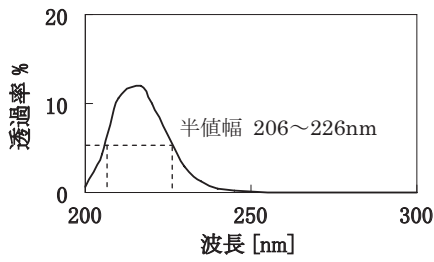


(a) 紫外線・可視光線変換タイプ離線測定装置概要

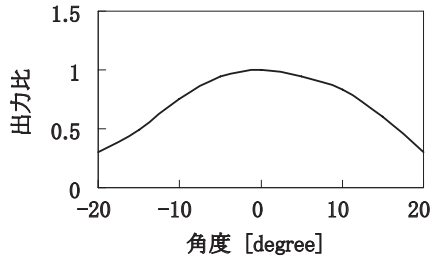


(c) 紫外線・可視光線変換ユニット外観(左:取付前, 右:取付後)

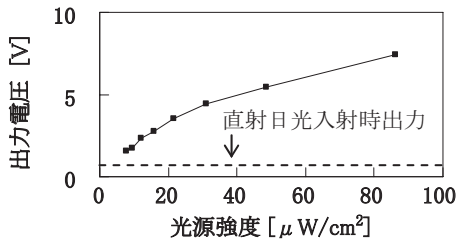
図8 紫外線・可視光線変換タイプ離線測定装置



(a) 干渉フィルタの透過率



(b) 紫外線・可視光線変換タイプによる出力公差



(c) 紫外線・可視光線変換タイプの出力公差

図9 紫外線・可視光線変換タイプの特徴

4.3 各測定装置の比較

従来および今回開発した各離線測定装置の特徴を表4に示す。光ファイバ型離線アーク測定装置やUV光ファイバ型離線測定装置に関しては、最小感度が定義されていないため斜線となっている。また紫外線・可視光線変換タイプの価格は、紫外線・可視光線変換ユニットの価格と光ファイバ型離線アーク測定装置の価格の合計であるため、光ファイバ型離線アーク測定装置より若干割高となる。全体の測定装置を比較すると価格の面において、UVセンサモジュールタイプが最も有利となっているものの、最小感度に関しては紫外線・可視光線変換タイプが有利となっている。

表4 各離線測定装置の特徴

測定装置名	特徴		
	検出波長域	最小感度	価格
光ファイバ型離線アーク測定装置	可視光線	/	△
UV光ファイバ型離線測定装置	紫外線 323 ~ 329nm	/	×
UVセンサモジュールタイプ	紫外線 200 ~ 279nm	60 μw/cm ²	○
紫外線・可視光線変換タイプ	紫外線 206 ~ 226nm	5 μw/cm ²	△

5. 検証試験

UVセンサモジュールタイプおよび紫外線・可視光線変換タイプの離線測定装置に対し、屋内試験と現車試験を実施した。なお試験結果の比較のために光ファイバ型離線アーク測定装置も同時に測定を行った。屋内試験ではトロリ線を取り付けた回転円盤にパンタグラフを接触させてアークを発生させることができる摩耗試験機を用い、現車試験では試験車両に試験機器を仮設して測定を実施した。

5.1 屋内試験

屋内試験は図10のような摩耗試験機内にUVセンサモジュールタイプ、紫外線・可視光線変換タイプ、光ファイバ型離線アーク測定装置を設置して実施した。ただし、光ファイバ型離線アーク測定装置には光の強度を減少させるND (Neutral density) フィルタを取り付けて、アーク光強度を弱めたうえ、さらに試験中は摩耗試験機の扉を閉めてアーク光以外の光が入らないようにした。図11に屋内試験結果を示す。UVセンサモジュールタイプおよび紫外線・可視光線変換タイプのどちらも光ファイバ型離線アーク測定装置とほぼ同じ測定結果が得られている。ただしUVセンサモジュールタイプの出力電圧のスケールは、0.01V/divであり紫外線・可視光線変換タイプの出力電圧に比べて大幅に小さいこともわかった。

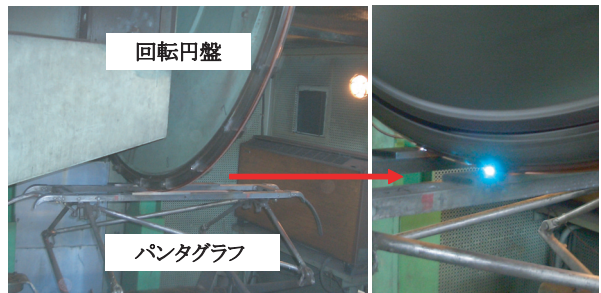


図10 摩耗試験機 (左：円盤停止, 右：円盤回転)

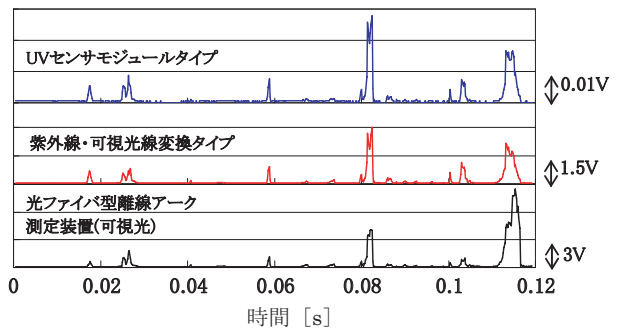


図11 屋内試験結果

5.2 現車試験

現車試験は取り付け箇所の制約があり、パンタグラフから約4.8m離れた箇所にUVセンサモジュールタイプ、

特集：電力技術

紫外線・可視光線変換タイプ、光ファイバ型離線アーク測定装置を設置して実施した。図12は現車試験結果である。ここで図中の矢印箇所注目すると、この箇所には可動ブラケットやビームがあり、パンタグラフ監視のための照明などの明かりがこれらで反射し、光ファイバ型離線アーク測定装置が反応しているが、紫外線・可視光線変換タイプは反応していない。また矢印以外の箇所では、光ファイバ型離線アーク測定装置と同じ箇所紫外線・可視光線変換タイプが反応している。UVセンサモジュールタイプに関しては、センサの設置箇所がパンタグラフから離れていることもあり、大きな離線だけを検出している。

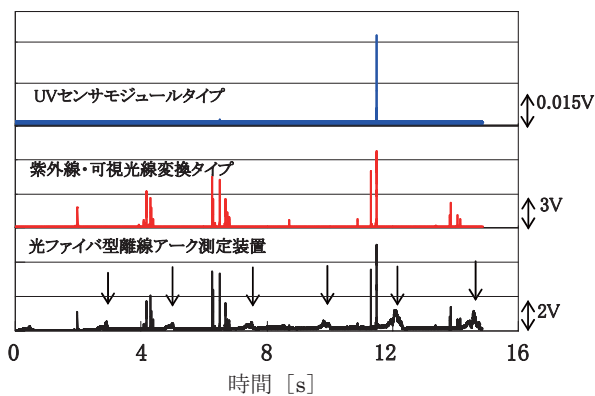


図 12 現車試験結果

6. まとめ

現在使用されているアーク光を検出する離線測定装置のうち、光ファイバ型離線アーク測定装置は、検出波長が可視光線であるため、測定精度が周囲の明るさの影響を受けてしまう。またUV光ファイバタイプ離線測定装置は、検出波長が紫外線であるため、周囲の明るさに影響を受けないものの、高価な石英光ファイバを用いるため、コストの関係からファイバの長尺化が難しく、検出器を屋根上に置く場合もあり、屋根上スペースの制約を受けていた。そこで、この問題点を解決するために石英光ファイバを用いない紫外線検出式離線測定装置として、光ファイバ自体を用いないUVセンサモジュールタイプと、従来から用いられてきたプラスチック光ファイバを使用することが出来るように紫外線・可視光線変換ユニットをプラスチック光ファイバ先端に装着する紫外線・可視光線変換タイプの2種類の測定装置を開発した。結果をまとめると以下となる。

1. アーク光の波長は、陽極に硬銅トロリ線、陰極にBC, BF, Cのすり板を使用している場合、200～240nm付近や320～340nm付近に強いスペクトル線を持つことがわかった。
2. これらの波長域を検出できるような測定装置として、

UVセンサモジュールタイプと紫外線・可視光線変換タイプの離線測定装置を開発した。

3. UVセンサモジュールタイプは、価格面で最も有利であるものの、最小感度が $60 \mu \text{W}/\text{cm}^2$ および出力電圧が小さいことがあり、さらなる改良が必要である。
4. 紫外線・可視光線変換タイプは、価格面でUVセンサモジュールタイプに劣るものの、最小感度が $5 \mu \text{W}/\text{cm}^2$ であり、出力電圧も十分な値を有している。

7. おわりに

従来の離線測定は、アーク光の有無を検出するものであり、アーク光の強度に物理的な意味づけをしていなかった。しかし紫外線を検出する離線測定は、アーク光が発生した箇所に用いられている材料特有のスペクトル線を検出しているため、その強度とアーク光が発生した箇所の材料の状態に相関性があると考えられる。今後はこれらについて研究を進め、電車線やすり板の保守・保全に活かしたいと考えている。

文献

- 1) 仲摩文雄, 市川松太郎: 光学式離線測定器の開発, 鉄道技術研究所, 鉄道技術研究所速報, No.77-1017, 1977
- 2) 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年電気学会全国大会, No.5-1263, pp.395-396, 1996
- 3) Michel JUTARD, Marc FITAIRE, Emile LE DUC: Moyens d'etude des arcs de rupture du contact pantographe-catenaire, REVUE GENERALE DES CHEMINS DE FER, Vol. 108, pp.5-15, 1989.
- 4) Railway applications, Current collection systems, Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line, EN50317-2002.
- 5) 根津一嘉, 早坂高雅, 清水政利, 池田国夫, 鈴木公一郎, 棚本文仁: 紫外線検出による離線アーク検出方法の検討, 電気学会研究会, TER-08-13/LD-08-13, pp.1-6, 2008
- 6) 早坂高雅, 清水政利: 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, No.5-097, pp.156-157, 2008
- 7) 日本化学会編: 化学便覧 基礎編II 改訂2版, 丸善株式会社, pp.1541-1548, 1975
- 8) 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, No.5-155, pp.216-217, 2005
- 9) 根津一嘉, 早坂高雅, 棚本文仁: UV光学式離線測定装置の基礎的検討, 平成20年電気学会全国大会, No.5-098, pp.158-159, 2008
- 10) 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, pp51-56, 2004