

# 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

早坂 高雅\* 清水 政利\*

Development of Wavelength Converter for Contact Loss Measurement

Takamasa HAYASAKA Masatoshi SHIMIZU

Contact loss measurement system based on arc light detection makes it possible to estimate the current-collecting performance of catenary lines in electric railways before commercial operation, or after the installation of new overhead contact systems and new pantographs. This measurement system consists mainly of a photo acceptor, a photo detector and a plastic optical fiber for connecting them. However, the system performance is affected by sunlight because the system detects only visible rays. Therefore, the authors have developed a conversion system that can change the ultra violet light of emitted from the arc light to the visible rays. This paper describes the operating principles of the wavelength converter and presents the experimental results obtained with the measurement system.

キーワード：電気鉄道，離線，アーク光，紫外線，波長変換ユニット

## 1. はじめに

電車線とパンタグラフ間における離線アークの発生とともに、強い光（以後、離線アーク光と呼ぶ）が発生し、集電系材料の摩擦も発生する<sup>1)</sup>。この離線アーク光に含まれる電磁波の波長は、広い範囲にわたる。

離線アークの測定は、電車線とパンタグラフのしゅう動集電の状況を測定する目的で、開業が予定されている線区、新しいパンタグラフや電車線構造が開発された場合の走行試験、専用車両を用いた営業線の検査に用いられている。また、その測定には、離線アーク光を光電素子で電圧信号に変換し、記録する方法が一般的に用いられる。

日本における離線アークの最初の測定装置は、1975年頃の露出計を改造したものである。その後、光ファイバと無線伝送装置を組み合わせたものや一眼レフカメラを改造したものが開発された<sup>2)</sup>。1995年に、パンタグラフ近傍から車内の光電素子までの間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が開発され、現在もこれが使用されている<sup>3)</sup>。また、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<sup>4)</sup>。

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。これに対して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、離線アークの測定も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。そこで筆者らは、日本の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。

本論文では、主として波長変換ユニットの構造や離線アーク測定装置の特性に関する実験結果<sup>5)</sup>を述べる。また、この測定装置にさらに改良を加え、小型化、低廉化した離線測定装置（UV離線測定装置）の開発状況も一部紹介する。

\* 電力技術研究部 電車線構造研究室

## 2. 離線アークとその測定装置

### 2.1 離線アークの発生要因とその影響

離線アークは、トロリ線とパンタグラフすり板の接触不良によって生じる。その発生要因は多岐にわたるものの、主として①～⑥に分類できる。

- ① トロリ線の波状摩耗<sup>6)</sup>
- ② 多数パンタグラフ走行にともなう共振<sup>7)</sup>
- ③ ハンガ間隔のトロリ線凹凸<sup>8)</sup>
- 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
- ⑤ トロリ線の振動や特殊な架線構造
- ⑥ トロリ線への異物の付着

文献1)にも示されているように離線アークの増加にともない、トロリ線やすり板の摩耗が増加する。そのため、離線アークの発生箇所を鉄道の営業時間帯の中でも朝夕のラッシュアワーを避けた、昼間の時間帯で特定して、鉄道の営業が終わる深夜に対策を施すことが、鉄道の安定した輸送のために求められている。加えて、離線アークの発生箇所の特定を、鉄道車両を用いて容易に行うことも望まれている。

### 2.2 離線アーク光の特徴

図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、陽極にトロリ線として一般的に使用されている硬銅トロリ線を、陰極に新幹線や在来線で使われているすり板を用いて発生させた<sup>9)</sup>。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1.1m離れた点に分光器を設置して行った。なお、新幹線のすり板は鉄を主成分としたものであり、在来線のすり板は銅を主成分としたものである。

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、220nm付近、320nm付近、520nm付近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300nmより長波長の成分が多いこともわかる。

### 2.3 離線アーク光の測定装置

図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2～5m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おり、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は、有機ポリマ

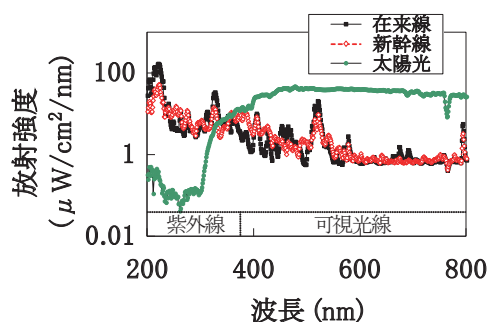


図1 離線アーク光と太陽光のスペクトル分布

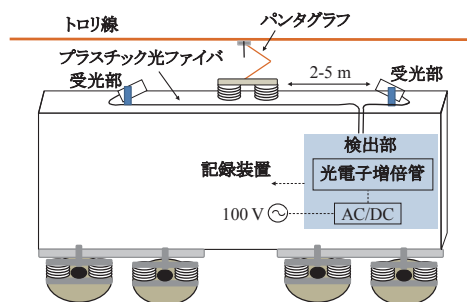


図2 離線アーク測定装置の車両への設置例

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<sup>10)</sup>。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。

## 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、220nm付近、320nm付近、520nm付近にピークを持つ。一方、太陽光のスペクトル分布は300nmより長波長で大きい。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、220nm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。

### 3.1 波長変換方法

図3に波長の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。

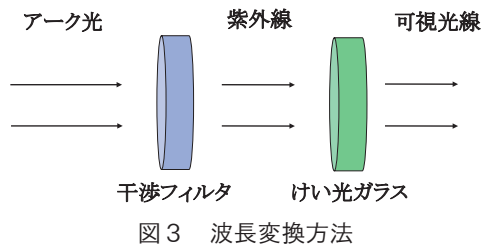


図3 波長変換方法

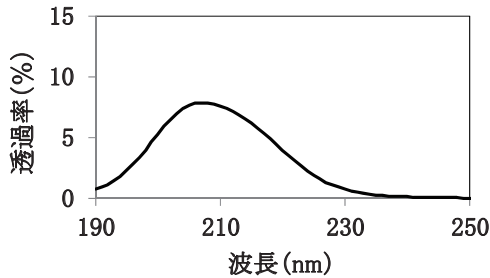


図4 干渉フィルタの透過率

図4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22nm（透過帯198～220nm）である。また、けい光ガラスは、文献11のうち、けい光強度が入射光遮断後、約2 $\mu$ 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380～550nmの可視光線に変換する。

### 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。本論文では、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5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Dmm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Lmmである。

## 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

### 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 $\mu$ s以下の離線アーク光に反応することが求められている<sup>12)</sup>。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 $\mu$ s以下のアーク放電に対する反応を測定す

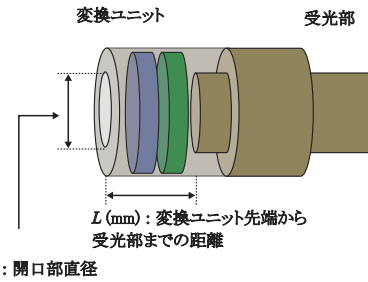


図5 波長変換ユニットの装着状況

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12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100A前後である<sup>13)</sup>。そこで、微小なアーク放電は、実際にトロリ線とパンタグラフ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 $\mu$ s以下、電流を100A以下として発生させることにした。表1に、接点に用いた材料の種類と成分を示す。

図6にアーク放電を発生させるために用いた電極開閉装置の回路を示す。電極開閉装置は、サイリスタを有しており、アーク継続時間の制御を可能としている。アーク継続時間の制御は、アーク放電が発生している電極間をサイリスタの点弧で、短絡させることで行っている。この電極開閉装置を、アーク継続時間100 $\mu$ s、電圧50V、電流70A、抵抗0.7 $\Omega$ に設定して、微小なアーク放電の検出実験を行った。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、40mm離して設置した。

図7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 $\mu$ s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、0.1Vオーダーの出力のばらつきを持つことがわかった。

### 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5.0m、在来線で5.1m）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

表1 電極材料

極性	材料	成分 (体積比)
正極	GT110	Cu (99.96%)
負極	PC78A	Cu (50%), C (50%)

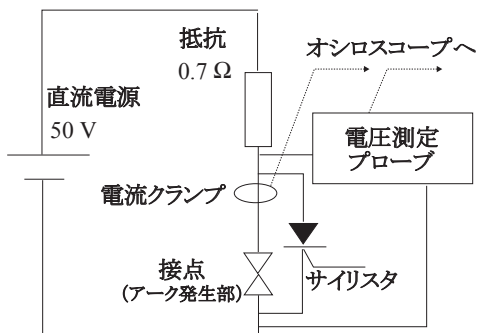
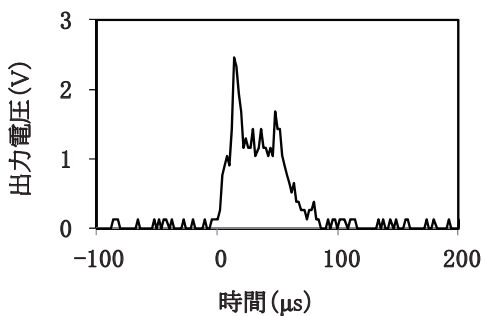
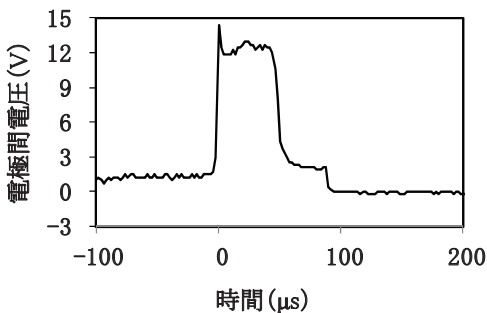


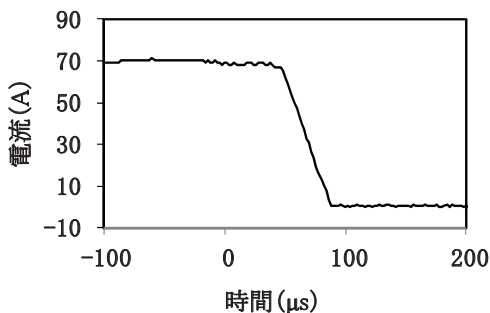
図6 電極開閉装置の回路



(a) 測定装置出力電圧の変化



(b) 電極間電圧の変化



(c) 電流の変化

図7 測定装置の出力電圧の変化と電極間の電圧、電流の変化

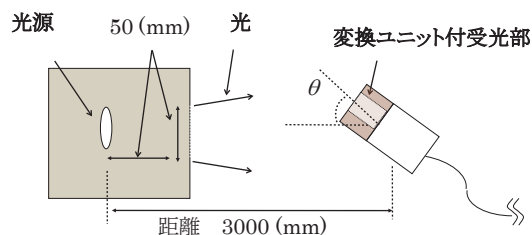


図8 角度特性の測定方法

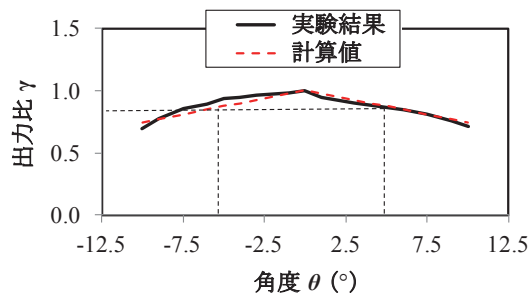


図9 角度特性結果

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によって変化する。

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8に角度特性の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。なお、光源は直径50 mmの開口部を有するハウジング内の開口部から50 mm離れた箇所に収められている。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°の広がりを持つもの、ほぼ平行であると見なした。

図9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(1)で求めた値である。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、 $\theta = 0$ を基準として近似的に表している。

$$\gamma = \cos\theta - \frac{L}{D} |\sin\theta| \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $L$ 、 $D$ は図5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。

### 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。しかし、異なる電車でも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設定するために、光源からの距離 200～700mm 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た際の出力を測定した。図 10 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 200～700mm は実験の利便性のために設定した条件である。

図 11 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。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 7 に示したような微小なアーク放電を検出可能な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 160mm 以下と算出される。

## 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 11) では受光部の視野内の任意の箇所が発生する離線アーク光に対して、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、受光部の視野角内の任意の箇所が発生する離線アーク光に対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。

また、紫外線検出離線アーク測定装置を営業列車へ搭載するためには、測定装置の小型化や低廉化が必要であり、その測定装置（以後、UV 離線測定装置と呼ぶ）の開発状況も述べる。

### 5.1 トロリ線の位置範囲

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<sup>13)</sup>。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

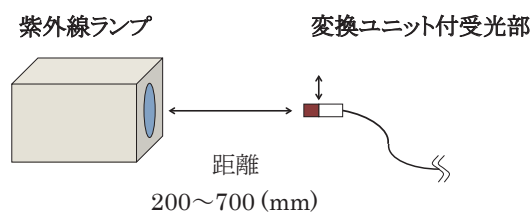


図 10 距離特性の測定方法

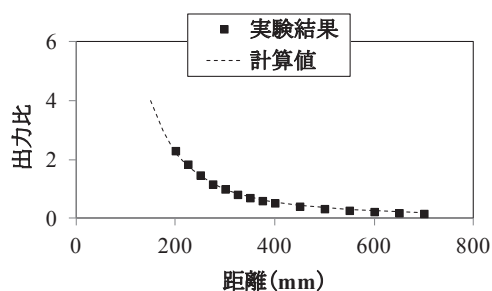


図 11 距離特性結果

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、トロリ線の架設範囲は、保守管理の必要上、ある範囲内に収められている。表 2 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<sup>14)15)</sup>。なお、新幹線のトロリ線の架設範囲は、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。

### 5.2 受光部の設置箇所

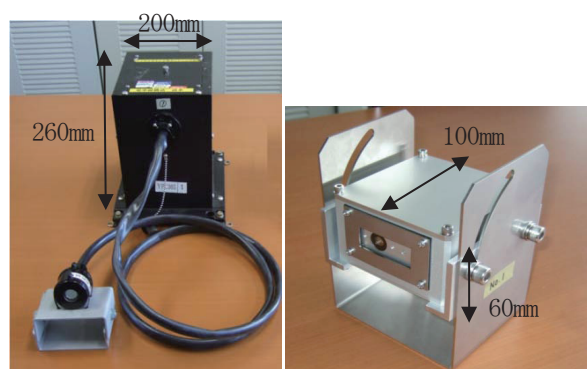
図 9 から出力の誤差が 10% になるのは、入射光と受光面の法線が ±5° のときである。受光部を電車の屋根上へ取付ける場合、受光部が固定されているため、その法線は動かないものの、光源となる離線アーク光の位置は変化する。したがって、図 8 の実験と、電車の屋根上における離線アーク光の位置変化には、受光部の法線の変化と光源の位置変化という相対的な違いがあるだけで

表 2 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 3 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



(a) 紫外線検出離線アーク測定装置 (b) UV 離線測定装置

図 12 離線測定装置

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  $\pm 5^\circ$  を受光部の視野角と見なして、この中にトロリ線の架設範囲が含まれなければならない。表 3 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、パンタグラフすり板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。

### 5.3 UV 離線測定装置の開発状況

紫外線検出離線アーク測定装置は、東急電鉄や台湾新幹線の検測車に採用されている。一方で、同測定装置は検出部が大きく、また価格も高いという課題があり、この解決が求められている。そこで、筆者らは紫外線検出離線アーク測定装置に用いられている光電子増倍管をフォトダイオードに変更した上で、内部回路の大幅な見直しによって、低廉化と小型化を実現した UV 離線測定装置を開発している。現在、試作段階であるものの、その価格は紫外線検出離線アーク測定装置の 1/10、大きさは体積比で 1/9 程度と見込んでいる。図 12 に紫外線検出離線アーク測定装置と UV 離線測定装置を示す。

## 6. 結論

筆者らは、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  $100\mu\text{s}$ 、70A 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 3000mm 離れた箇所では、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 ~ 700mm の距離において、2 乗に反比例する。
- (4) 光の検出を光電子増倍管からフォトダイオードに変更した上で、検出部の内部回路を大幅に見直すことで、測定装置の低廉化と小型化を行った。

## 文 献

- 1) 織田修：新幹線における集電系の摩耗についての考察，鉄道技術研究報告，No.1323，1986
- 2) 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，鉄道技術研究報告，No.1251，1983
- 3) 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
- 4) 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.
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 早坂高雅，清水政利：離線アークの分光測定結果，平成 17 年電学全大，No. 5，pp.216-217, 2005
- 10) 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
- 11) 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
- 12) International Standard：IEC62486 “Railway applications -Current collection systems- Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line (to achieve free access)”，2010.
- 13) 鉄道総合技術研究所：電車線とパンタグラフの特性，pp.184-185，研友社，1993
- 14) 日本鉄道電気技術協会：電車線 [ I ]，pp.13-16, 2008
- 15) 日本鉄道電気技術協会：電車線 [ I ]，pp.19-24, 2008