

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# トロリー線の摩耗形状を光で測る

電車に電力を供給するトロリー線は、つねにパンタグラフとの接触により摩耗します。摩耗の進行によるトロリー線の破断を未然に防ぐためには摩耗量を正確に測定し、破断する前に新しいトロリー線に取り替えることが必要です。今回、光切断法とよばれる形状測定手法を用いたトロリー線の断面形状の測定により、従来では正確な測定が困難であった摩耗形状のトロリー線に対しても正確に摩耗量を測定できる方法を開発したので紹介します。

## はじめに

電気鉄道では、線路上空に張られたトロリー線の底部に、車両屋根上に搭載したパンタグラフを押し当てることで電気回路を構成し、電力を得て走行する方式が多く用いられています。このトロリー線はパンタグラフのしゅう動（すりながら移動すること）により徐々に摩耗するため、トロリー線の底部には「しゅう動面」が形成され、断面積は減少していきます（図1）。また、トロリー線には9.8kN～24.5kN程度の張力が与えられていますが、摩耗により断面積が許容値以下まで減少すると断線する可能性があります。

この断線を防止するためには、摩耗量が許容値を超える前に新品のトロリー線に取り替える必要があることから、定期的な摩耗量測定が行われています。トロリー線がどれだけの張力に耐えられるかは、摩耗により減損した部分を除いたトロリー線の断面積である「残存断面積」に依存します。しかし、トロリー線の残存断面積を直接測定することは困難であるため、一般にトロリー線の摩耗量は、しゅう動面からトロリー線頭頂部までの高さである「残

存直径」により管理されています。

トロリー線の残存直径は、ドクターイエローなどの検測車により定期的に測定されています。測定方法は、しゅう動面に下方からレーザーやLEDの光を照射して、その正反射光の幅、すなわちしゅう動面幅を検出する手法が用いられています。トロリー線の断面は円形が一般的ですから、しゅう動面幅が計測できれば、簡単に残存直径や残存断面積が求められます。

しかし、しゅう動面が検測車から見て斜めになっていたり、丸まっていたりすると、その部分の正反射光をとることができず、しゅう動面幅が正しく測定できない場合があります<sup>1)</sup>（図2）。そうすると、残存直径や残存断面積が正しく測定できず、たとえば



**薄 広歩**  
Hiromu Susuki  
電力技術研究部  
集電管理研究室  
研究員  
【専門分野】計測システム



**根津 一嘉**  
Kazuyoshi Nezu  
電力技術研究部  
集電管理研究室長  
【専門分野】計測システム



**松村 周**  
Itaru Matsumura  
電力技術研究部  
集電管理研究室  
副主任研究員  
【専門分野】計測システム

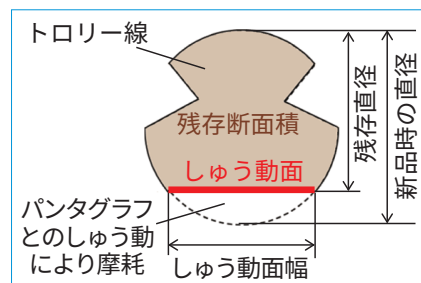


図1 パンタグラフのしゅう動によるトロリー線の摩耗

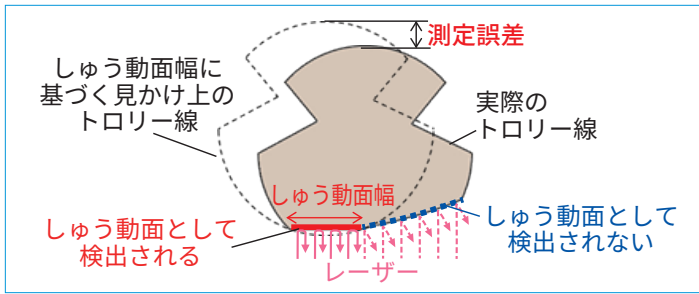


図2 しゅう動面が平滑でない場合に従来手法で生じる測定誤差

図2のように実際よりトロリー線が摩耗していないという過小評価をしてしまう場合もあります。

この課題に対処するため、トロリー線の断面形状を光切断法で直接測定し、その形状から残存断面積を計算することで、しゅう動面の形状によらず高精度なトロリー線摩耗測定手法を開発しました<sup>2)</sup>。本開発にあたっては、表1に示す測定性能目標を設定しました。

### 光切断法をトロリー線の測定に適用する

光切断法とは、薄い帯状の光であるスリット光を、測定対象に照射し、その反射光をカメラで撮影することで対象物の形状を測定する手法であり、電子基板の外形検査など、高精度な形状測定手法として用いられています。光切断法によるトロリー線断面形状測定の装置構成を図3に示します。車両の屋根上にカメラとスリット状レーザー光源を搭載します。光切断法では一回の測定でスリット光が照射されたひとつの断面の形状を測定します。車両の走行にあわせてこれを繰り返し行うことによって、トロリー線下部形状を連続的に求めることができます。

光切断法を用いた測定では、一般にカメラの性能（画素数、感度、測定周波数、レンズ焦点距離）と、レーザー光源の性能（波長、出力、線幅）が全体の測定性能を大きく左右します。このため、カメラとレーザー光源に必要な性能を次のように選びました。

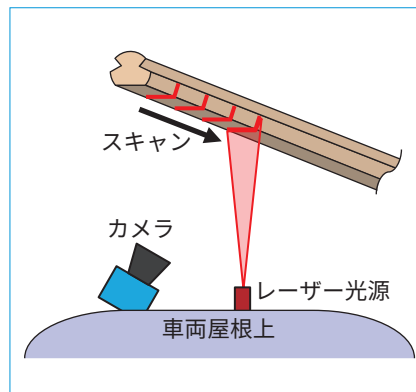


図3 光切断法によるトロリー線断面形状測定の概要

#### (1) カメラの選定

現在、新幹線用の検測車では走行速度275km/h、50mm間隔でトロリー線の摩耗を測定しています。将来のスピードアップを見越して、360km/hの走行でも50mm間隔で測定しようとする、2kHzの測定周波数が必要です。今回は、市販品の光切断法用カメラの中から、測定周波数が最大7kHzのものを選定しました。これにより、走行速度360km/hにおいて50mm間隔で測定することが十分可能です。

また、トロリー線はカメラから見て高さ方向にも左右方向にも位置が変動するため、いわゆる「ピンぼけ」が起きてしまいます。そこで、カメラの撮

表1 測定性能目標

測定精度	残存直径換算±0.1mm以下
測定周波数	2kHz以上（360km/hで50mm間隔）
トロリー線測定範囲	レール面上高さ 4800～5300mm 左右偏位 ±400mm
測定環境	全時間帯、晴天／曇天で測定可能

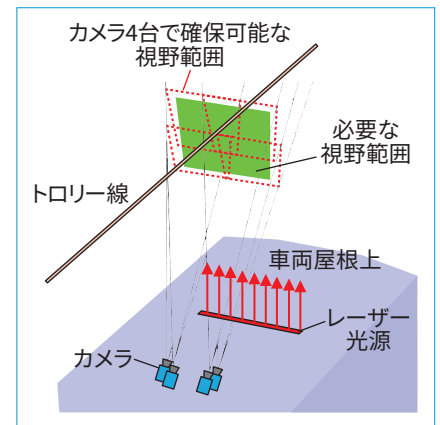


図4 カメラとレーザーの配置の一例

像面に対してレンズを適切に傾けることで、トロリー線がどの位置にあってもピントを合わせることができる、シャインブルーフの原理<sup>3)</sup>（※参照）を適用しました。

次に、カメラと光源の配置を検討しました。カメラと光源の配置は、測定範囲と測定精度に影響を及ぼします。「シャインブルーフの原理」を適用すると、「レンズの焦点距離」、「カメラと光源の水平距離」が制約を受けるため、この制約の中で、表1の仕様を満たす、カメラと光源の配置条件を算出しました。算出した組み合わせの一例を図4に示します。カメラ1台では視野範囲が不足しますが、図4のように最低4台のカメラで所望の測定範囲を

#### ※ シャインブルーフの原理

レンズを傾けると撮像素子の面とレンズの面がある直線で交わりますが、ピントがあう面もまた同じ直線で交わるという原理です。ピントがあう面とスリット光の面を一致させることで、スリット光のどの位置にトロリー線があってもピントを合わせることができます。

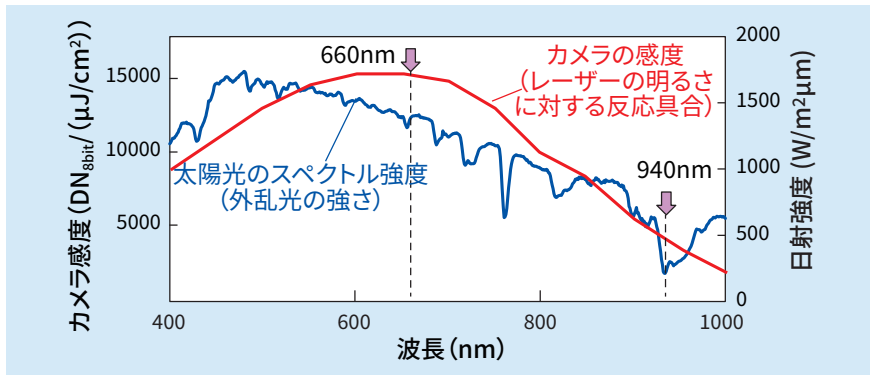


図5 カメラの感度特性と太陽光のスペクトル強度 (文献4,5の掲載データを元に作成)

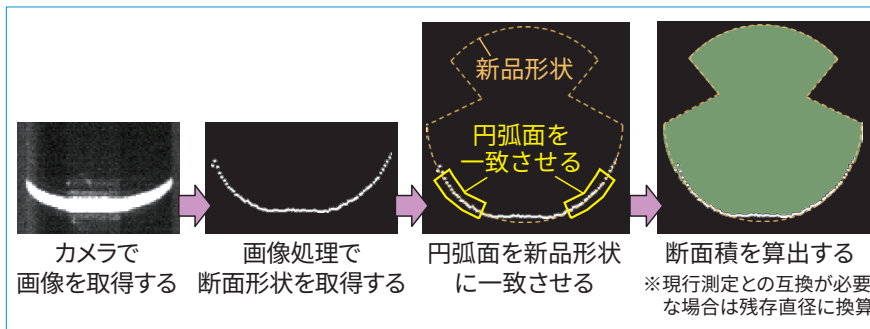


図7 トロリー線残存断面積算出手順

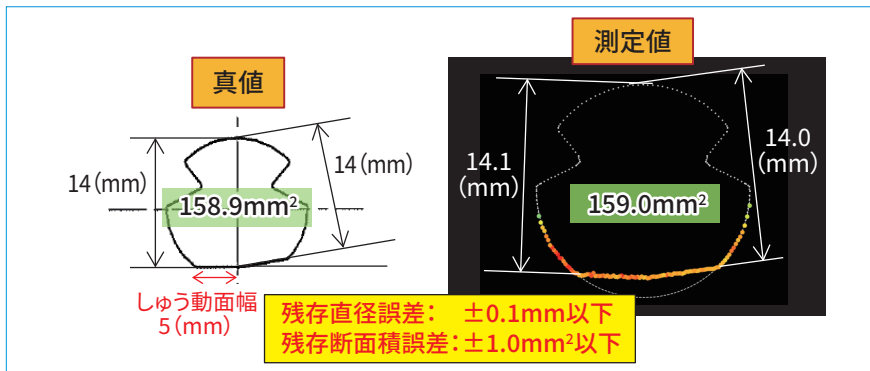


図8 トロリー線残存断面積測定の精度検証結果

高さ方向の分解能 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下で測定可能であることがわかりました。

## (2) レーザー光の波長の選定

太陽光などの外乱光が多い環境で正確な測定を行うには、トロリー線に当たったレーザー光が背景の外乱光よりも明るい必要があります。

太陽光による外乱光強度が少ない赤外線 (たとえば940nm) のレーザーと、それに適合した光学フィルターを用いれば、外乱光の影響を抑えられます。しかし、一般的なイメージセンサー (CCDやCMOS) では、外乱光強

度とカメラ感度はトレードオフの関係にあります (図5)。そこで、比較的入手が容易な660nmの赤色レーザーと、940nmの赤外線レーザーをそれぞれ使用した際の、(1)で選定したカメラの出力性能を実験により比較しました。

はじめに、日中・屋外で、トロリー線の背景 (外乱光) となりうる、空や電柱、建物 (太陽光の反射の影響があるため) などを撮影し、外乱光強度 (外乱成分) を調べました。

つぎに、外乱光の少ない屋内においてトロリー線に照射したレーザー光を

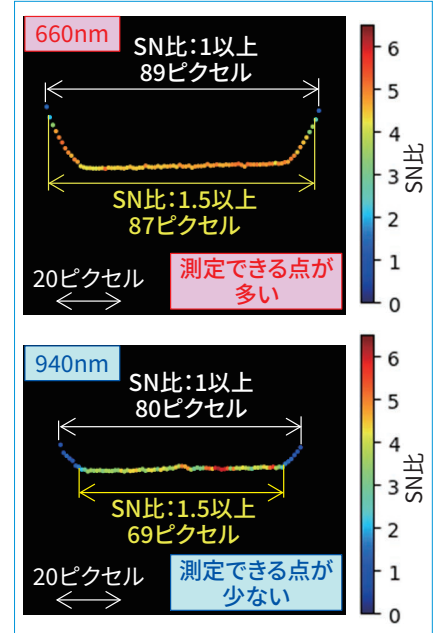


図6 レーザー波長の違いによるトロリー線の見え方の違い

カメラで撮影し、その出力 (信号成分) を調べました。

前述した信号成分と外乱成分の強度の比を「SN比」といいます。トロリー線の形状測定では、これが1より大きい必要があります。さらにSN比が1.5以上であればより安定した測定が可能です。SN比が1以上、1.5以上になるピクセル数を比較したものを図6に示します。SN比1以上、1.5以上いずれも、660nmレーザーの方が940nmレーザーに比べ測定可能なピクセル数が多く、これは660nmレーザーの方がより高精度に断面形状を測定できることを意味します。以上より、レーザー光の波長は660nmを採用しました。

## トロリー線の断面積を求める

光切断法により得られたトロリー線の下半分の断面形状を、新線のトロリー線断面形状と比較することにより、トロリー線の残存断面積を算出する手法を開発しました。トロリー線残存断面積の算出手順を図7に示します。まず、画像処理によりトロリー線の下半分の断面形状を得ます。次に、得ら

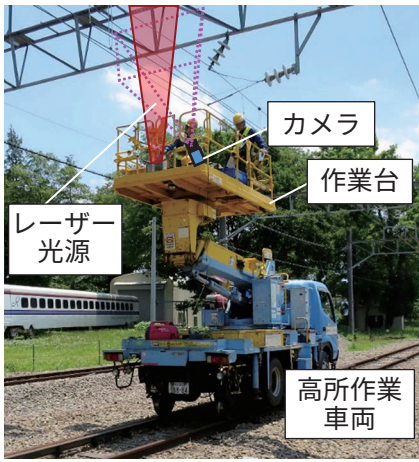


図9 測定試験の様子

れた断面形状のうち、しゅう動面両側の円弧部分が新線の形状（真円）と一致するように合わせます。新線のトロリー線下半分の断面形状と、測定したトロリー線下半分の断面形状により囲まれる領域が、しゅう動により摩耗した断面積となり、新線の断面積と摩耗断面積の差分が残存断面積となります。

トロリー線残存断面積の測定精度を検証するため、断面積が既知のトロリー線の形状を測定し残存断面積と残存直径を求めました。結果を図8に示します。このトロリー線の残存断面積は158.9mm<sup>2</sup>ですが、従来手法では原理的に、これを167.3mm<sup>2</sup>と評価してしまいます。これに対し、新たに開発した測定手法では、残存断面積の誤差は±1.0mm<sup>2</sup>以下、残存直径の誤差も±0.1mm以下でした。

### 実際のトロリー線を測定する

実際の架線に対する測定精度を検証するため、鉄道総研の所内試験線でトロリー線断面形状測定試験を実施しました。試験は、太陽光による外乱光の影響をもっとも受ける夏季日中に実施しました。カメラやレーザーを、線路を走行可能な軌陸車の高所作業台に搭載し、約5km/hの走行速度で測定を実施しました（図9）。直射光がカメラに入射しないよう、カメラの向きが北

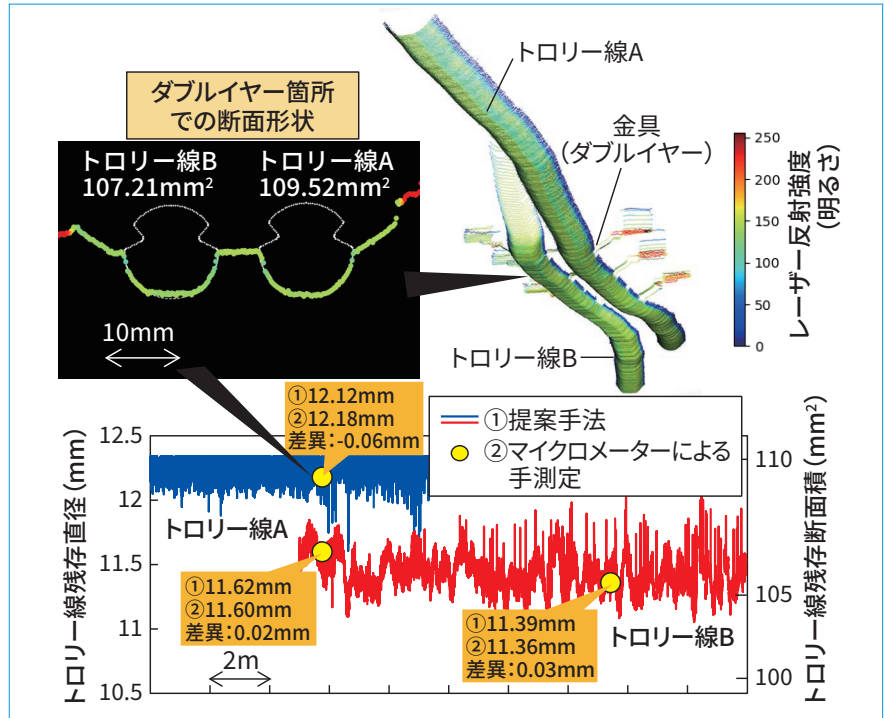


図10 トロリー線の形状と摩耗量の測定結果

向きとなるように設置しました。

試験結果を図10に示します。夏季日中の太陽光による影響を受けやすい環境においても、トロリー線断面形状が精度よく測定可能であることが確認できました。また、トロリー線どうしを並べて接続する金具（ダブルイヤー）が取り付けられた箇所においても、並んだ2本のトロリー線の断面積をそれぞれ算出可能であることが確認できました。提案手法とマイクロメーターで測定した残存直径の差異は±0.1mm以下でした。さらに、図10に示すように、ダブルイヤーの金具の形状の測定も可能であることから、金具状態の

診断など、従来目視で実施している検査への適用も期待できます。

### おわりに

トロリー線の断線を防ぐためには、いかなる摩耗形状のトロリー線でも正確に摩耗量を測定することが重要です。そこで、トロリー線の断面形状を光切断法で直接測定し、残存断面積を計算する測定手法を開発しました。

今後は高速度で走行する車両に搭載して測定試験を行うほか、測定視野の拡大などの、検討を実施し、トロリー線の新しい検査装置として実用化を目指します。[RRR]

### 文献

- 1) 入倉佳祐, 常本瑞樹, 清水政利, 池田国夫, 本田誠彦: トロリー線の摺動面状態に対応した摩耗測定精度の向上手法, 平成27年電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp.V-201-204, 2015
- 2) 薄広歩, 根津一嘉, 松村周: 光切断法を適用したトロリー線断面形状測定の基礎研究, 鉄道総研報告, Vol.33, No.6, pp.29-34, 2019
- 3) H.M.Merklinger: FOCUSING the VIEW CAMERA, Seaboard Printing Ltd, pp.3-4, 1993
- 4) SICK AG: Ranger3 OPERATING INSTRUCTIONS 2017-12, p.62, 2017
- 5) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO): 日射スペクトルデータベース, 2015年6月4日12:00, つくば市における測定値, [http://app0\\_2.infoc.nedo.go.jp](http://app0_2.infoc.nedo.go.jp) (入手日:2019年3月4日)