公益財団法人鉄道総合技術研究所
鉄道総研報告
RTRI REPORT
Vol.40, No.11, 2026

光切断法を用いた剛体電車線摩耗計測装置の開発

薄　広歩*　松村　周*　山下　主税**　清水　政利***

Development of a Wear-Measuring Device for Rigid Overhead Conductor Rails Using the Light Section Method

Hiromu SUSUKI　Itaru MATSUMURA　Chikara YAMASHITA　Masatoshi SHIMIZU

Wear measurement is essential for maintenance of rigid overhead conductor rails. In some cases, issues such as reduced measurement accuracy from advancing wear or an inability to conduct continuous and automatic measurement may arise. Therefore, this report proposes a new non-contact continuous wear measurement device for rigid overhead conductor rails that acquires cross-sectional profile using the light section method. Using our newly developed algorithm, this device measures residual heights from the contact surface to both the fittings and the top surface of the rigid overhead conductor rail. We validated the performance of the proposed device through both static and continuous measurement tests.
キーワード：剛体電車線，摩耗，光切断法，ICP マッチング，断面形状，導電鋼レール

1. はじめに

架空式剛体電車線（以下，剛体電車線）は，地下鉄や狭小トンネル区間で採用されており，主に架台とイヤーでトロリ線を把持する方式と導電鋼レールの 2 種類に分類される．

トロリ線を把持する方式は，カテナリちょう架式電車線と異なりトロリ線に張力が印加されていないため，摩耗が進行してトロリ線の断面積が減少しても引張荷重による破断が生じない．そのため，原理的には摩耗が進行してもパンタグラフとトロリ線把持部が接触しなければ使用可能である．しかし，トロリ線のしゅう動面幅を計測して摩耗量を算出する現行の手法では，トロリ線直径の半分以上が摩耗した場合，摩耗が進行するほどしゅう動面幅が小さくなる，いわゆる反転現象が生じる（図 1）．このため，パンタグラフとトロリ線把持部が接近する前の早い段階でトロリ線の張替えが実施されることがあり，設備の長寿命化の面で合理的ではない．さらに，摩耗面がレール面に対して傾斜していた場合も，本来のしゅう動面幅よりも小さく計測され，本来の摩耗量より小さく見積もられるという課題がある．また，円断面ではない梯形トロリ線が使用されている線区も多数あり，この場合もしゅう動面幅を計測して摩耗量を算出する手法を適用することは困難である．

導電鋼レールを使用する方式では，しゅう動面からレール上面までの「残存高さ」を手計測し，これを摩耗の計測値としている．しかし，カテナリ式電車線やトロリ線を把持する方式のように連続的な自動計測をする技術がないため，係員の手による定点測定が行われており，局部摩耗箇所や摩耗が著しく進行している箇所を見逃す恐れがある．

以上のように，剛体電車線においては，トロリ線把持方式・導電鋼レール方式のいずれにおいても摩耗計測精度や連続計測に関する課題がある．

一方，筆者らは既に，カテナリ式電車線のトロリ線を対象に，光切断法を用いてトロリ線断面形状を計測

＊　電力技術研究部　電車線メンテナンス研究室
＊＊　旧　電力技術研究部　集電管理研究室（現　総務部　人事）
＊＊＊　日本電設工業株式会社

することで，偏摩耗などレール面に対してしゅう動面が傾斜していた場合でも高精度な摩耗計測が可能な手法を提案している[1]．この手法を剛体電車線に適用すれば，剛体電車線の断面形状を取得し，剛体電車線に適した摩耗計測アルゴリズムを用いることで，高精度な摩耗計測が可能になると考えられる．

そこで本研究では，剛体電車線に適した摩耗計測アルゴリズムを構築し，図 2 のような装置構成により高精度かつ連続的に摩耗を計測可能な装置を開発したので報告する．

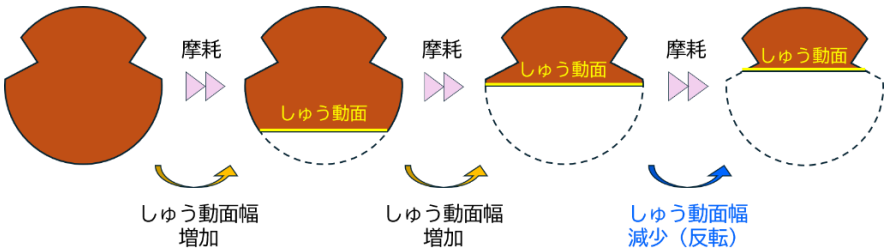


図 1　トロリ線しゅう動面幅計測の反転現象

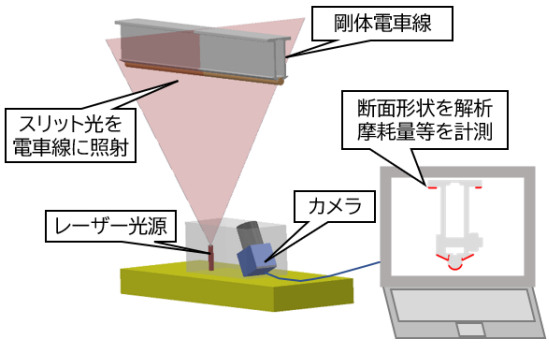


図 2　光切断法による剛体電車線断面形状の取得

2．剛体電車線摩耗計測装置の概要

本研究で開発した剛体電車線摩耗計測装置の概観を図 3 に，主な仕様を表 1 に示す．レーザー光源とカメラからなる装置本体と，データ収録用の PC，電源供給や制御信号の授受を行うアンプから構成される．本研究では狭小トンネル用アルミ架台トロリ線複合方式（以下，Π 形），T 形アルミ架台トロリ線複合方式（以下，T 形），導電鋼レール方式の 3 種類の剛体電車線に対応した摩耗計測アルゴリズムを開発し，本装置に実装した．3 章の図 4 に示す残存高さの計測精度はいずれの種類においても±0.5 mm 以内である．計測間隔は 30 km/h 走行時に最小 20 mm である．本装置は保守用車等に容易に搭載可能とするため，軽量・可搬型とした．

3．剛体電車線の摩耗計測指標

パンタグラフとトロリ線把持部の離隔を適切に把握するため，下記に示す残存高さを摩耗計測指標として設定した．

Π 形および T 形に対しては，パンタグラフとトロリ線把持部の離隔を評価するため，しゅう動面からトロリ線把持部下面の最下点までの残存高さを摩耗計測指標とする（図 4(a)，(b)）．

導電鋼レールに対しては，従来から保守係員が手計測により残存高さを評価してきた背景に基づき，これを踏襲してしゅう動面からレール上面までの残存高さを摩耗計測指標とする（図 4(c)）．

いずれの計測指標についても偏摩耗などのしゅう動面の傾斜に対応するため，残存高さの最小値を摩耗計測指標とした．

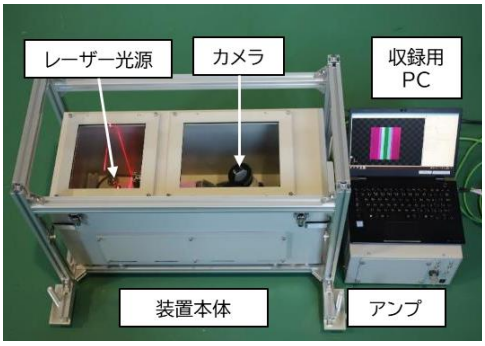
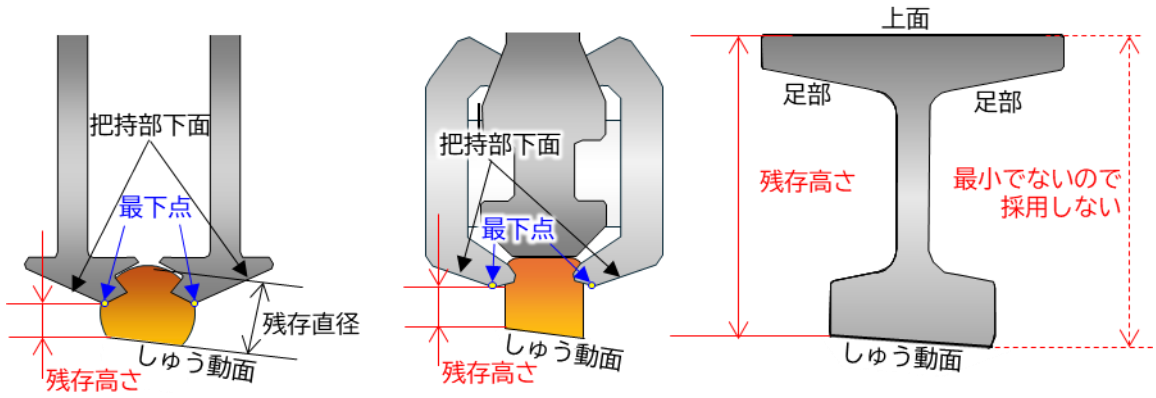


図 3　剛体電車線摩耗計測装置

表 1　剛体電車線摩耗計測装置の主な仕様

計測原理		光切断法
計測性能	計測精度	± 0.5 mm（残存高さ）
	計測間隔	20 mm（30 km/h 走行時）
対応剛体電車線方式		・狭小トンネル用アルミ架台トロリ線複合方式（Π 形） ・T 形アルミ架台トロリ線複合方式（T 形） ・導電鋼レール方式
装置寸法（本体）	幅	600 mm
	奥行	800 mm
	高さ	500 mm
	重量	約 25 kg



（a）Π 形　　（b）T 形　　（c）導電鋼レール

図 4　各剛体電車線の摩耗計測指標

4. 計測アルゴリズム

4.1　アルゴリズムの概要

本章では，光切断法で得られた剛体電車線の断面形状データから，3 章で設定した各剛体電車線の摩耗計測指標を計測するアルゴリズムについて述べる．アルゴリズムのフローチャートを図 5 に，残存高さ算出手法を図 6 に示す．ここでは，断面形状データの 1 つずつをフレームと呼び，動画として連続する画像を順に処理する．

はじめに，取得した断面形状データに含まれるノイズを除去する．断面形状データは点の集合であるが，多くの場合ノイズは孤立点（周囲のいずれの点からも一定以上の離隔がある点）であるため，これを除去する．ノイズ除去により，最も下にある点の集合をしゅう動面とみなすことができるため，これを基準として剛体電車線の断面全体を含むと考えられる領域を抽出できる．この領域内の点について，ICP（Iterative Closest Point）マッチングにより位置・角度を推定（4.2 節で後述）したのち，幾何学的に残存高さを算出（4.3～4.5 節で後述）する． 以下，フローチャートの各ステップ（ICP マッチング以降）についての詳細を述べる．

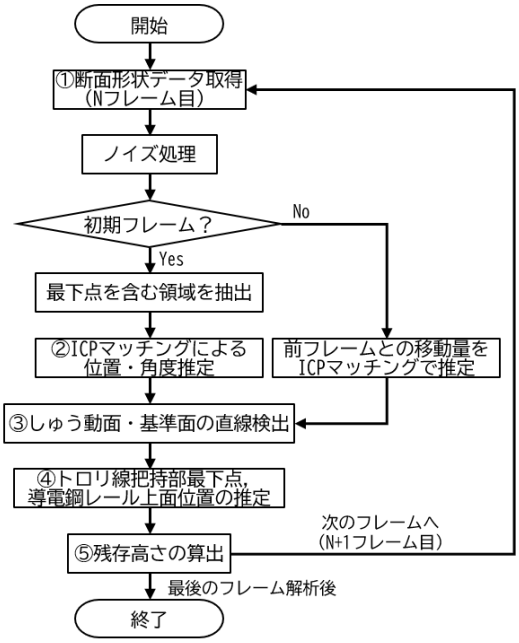
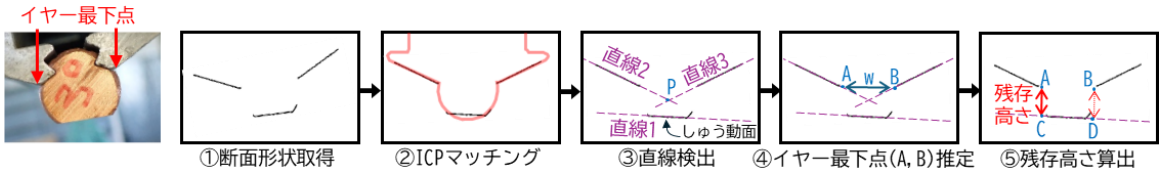
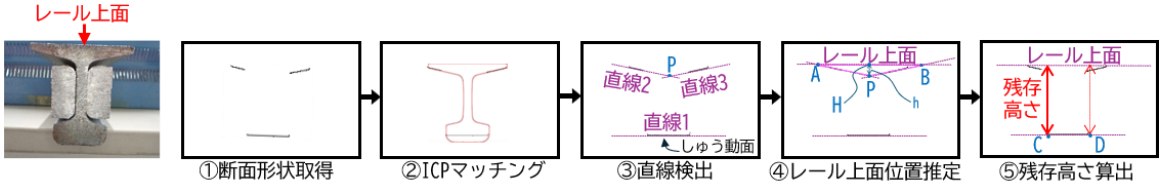


図 5　残存高さの計測アルゴリズム　フローチャート



(a) Π 形，T 形



(b) 導電鋼レール

図 6　各種剛体電車線の残存高さ算出方法

4.2　剛体電車線の位置・角度推定

カメラ画角内の剛体電車線の位置および角度は，カントや車体動揺，ジグザグ偏位により一定ではないため，前処理として，剛体電車線の位置および角度を補正する必要がある．

位置および角度補正には ICP マッチングを用いる．ICP マッチングとは撮影位置の異なる 2 つの点群データから撮影した点群同士の位置関係を推定し，対応点間の距離の合計が最小となるように反復計算して位置関係を推定し，点群を合成する処理である [2)]．本研究の場合，図 7 のように計測対象のテンプレートとして事前に準備した点群を測定点群に重ね合わせることで，テンプレートの移動ベクトル T および回転行列 R を計算し，求めた T，R から剛体電車線の位置および角度を補正する．また，T，R より，剛体電車線の架線高さ，偏位を求めることができる．

なお，ICP マッチングは，2 つの点群データのずれが大きい場合に局所解に陥りやすく，良好にマッチングできない場合がある．そのため本研究では，初期フレーム以外は，1 つ前のフレームと現在フレームの差

分（**ΔT**，**ΔR**）のみに着目することで，安定的なマッチングを実現している．

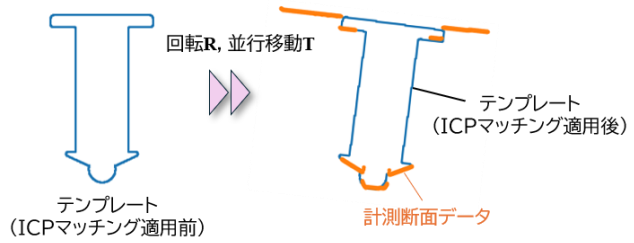


図 7　ICP マッチングによる位置・角度推定

4.3　しゅう動面・基準面の直線検出

次に，しゅう動面および基準面の直線検出を行う．ここでいう基準面は，4.4 節で後述するトロリ線把持部最下点またはレール上面の位置推定に利用するものであり，剛体電車線の種類により異なるが，寸法が既知かつ直線を多く含む箇所を選出している．Π 形，T 形はトロリ線把持部下面，導電鋼レールはレール足部についてそれぞれ直線を基準面として検出する．いずれの剛体電車線についても，図 6(a)③，図 6(b)③のように，しゅう動面付近の点群から検出した直線を直線 1，基準面付近の点群から検出した直線を直線 2，直線 3 とする．なお，新品状態に近い円形断面トロリ線では，しゅう動面付近の断面形状が曲線状となるため，直線 1 の近似精度が低下する場合がある．ただし，実際の使用状態ではパンタグラフとの接触によって速やかに平坦な摩耗面が形成されることから，摩耗の進行に伴い精度が向上する．

4.4　トロリ線把持部最下点，導電鋼レール上面位置の推定

次に，4.3 節で検出した基準面の直線 2，直線 3 からトロリ線把持部最下点（Π 形，T 形）もしくは導電鋼レール上面の位置を推定する．

Π 形，T 形については，寸法上の左右のトロリ線把持部最下点間の距離を w（既知の値）とする．図 6(a)③のように直線 2，直線 3 の交点を P とし，点 A，B がそれぞれ直線 2，直線 3 上かつ AB の長さが w となるような二等辺三角形 ABP をとる．このときの A，B がトロリ線把持部最下点となる．

導電鋼レールについては，寸法上のレール足部の最大高さを h とする．図 6(b)③のように直線 2，直線 3 の交点を P とし，P から AB に下ろした垂線の足を H とする．点 A，B がそれぞれ直線 2，直線 3 上かつ PH の長さが h となるような二等辺三角形 ABP をとる．このときの AB を結んだ線分がレール上面位置に相当する．

4.5　残存高さの算出

はじめに Π 形および T 形について，しゅう動面からトロリ線把持部までの残存高さを算出する方法について述べる．図 6(a)⑤のように点 A，B から線分 AB の垂線を引き，直線 1 と交わる点を C，D とする．AC と BD を比較し，小さいほうが求める残存高さである．なお，ツイン架線の場合は左側のトロリ線に対しては AC，右側のトロリ線に対しては BD を残存高さとする．

次に導電鋼レールについて，しゅう動面からレール上面までの残存高さを算出する方法について述べる．直線 1 に近接する測定点をしゅう動面とし，その両端の点を C，D とする．線分 AB（レール上面）と C，D の距離を比較し，小さいほうが求める残存高さである．

5. 定置における精度検証試験

5.1 試験条件

4 章で提案した計測アルゴリズムの計測精度を検証するため，図 8 に示す計測系により表 2 に示す条件で試験を行った．図 3 に示した装置と概ね同様の構成である．レーザー光源とカメラをレール長手方向の水平距離 650 mm で配置し，高さ約 0.9 m（カメラ基準）の位置に剛体電車線を設置した．レーザー光源とカメラは剛体電車線直下および偏位方向に約 140 mm ずらして設置し，偏位による計測精度への影響を検証した．計測対象は Π 形，T 形，導電鋼レールの 3 種類とした．

Π 形については摩耗を模擬した切削トロリ線（GT-M-SN-170）を架設した．残存直径やしゅう動面の傾斜，偏位が計測精度に及ぼす影響を検証するため，寸法値との誤差を比較した．T 形は新品の梯形断面トロリ線を架設し，手計測（ノギスでの計測）との誤差を比較した．導電鋼レールは摩耗のない新品のものを架設し，寸法値との誤差を比較した．

なお，各試験条件について静止状態で断面形状を 1000 枚撮影し，データのばらつきを評価した．

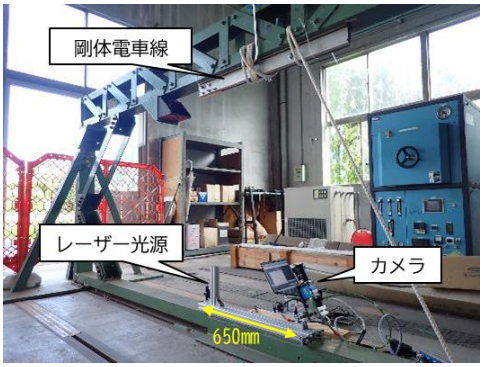


図 8　定置計測試験の概観

表 2　定置計測試験における試験条件

全般	試験対象	Π 形	摩耗模擬トロリ線を架設 残存直径：6.3 mm～15.3 mm，1 mm 刻み （残存高さ：0.9 mm～9.9mm，1 mm 刻み） しゅう動面の傾斜角：0°および 6°
		T 形	梯形トロリ線(新品)を架設
		導電鋼レール	新品を架設
	電車線高さ	約 900～1000 mm（カメラ基準）	
	電車線偏位	0mm(カメラ直上)および約 140mm	
カメラ	計測周波数	750 Hz	
	露光時間	1200 μs	
レンズ	焦点距離	50 mm	
	絞り	F1.8（開放）	
レーザー光源	波長	660 nm	

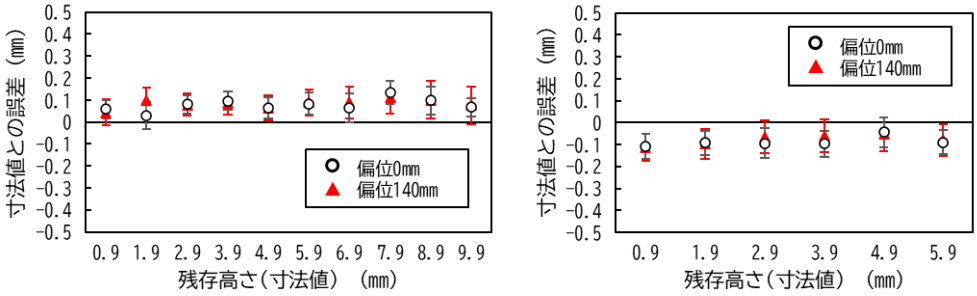
5.2 試験結果

Π 形について，残存高さの寸法値に対する計測誤差を図 9 に示す．エラーバーは標準偏差を σ としたときの誤差平均±3σ を表す．従来手法では反転現象により計測できなかった摩耗領域である，寸法上の残存高さ 0.9 mm（残存直径 6.3 mm に相当）や 1.9 mm（残存直径 7.3 mm に相当）の場合を含め，しゅう動面の傾斜の有無や剛体電車線の偏位によらず±0.2 mm の精度で計測できていることがわかった．これにより，新

たな摩耗評価指標と本研究で開発したアルゴリズムを適用すれば，従来，反転現象により計測困難だった摩耗領域においても高精度な計測が可能であることが確認できた．また，4.3 節においてしゅう動面の直線検出精度が懸念された新品状態に近い条件（残存直径 15.3 mm に相当）に対しても±0.2 mm の精度で計測できることを確認した．

T 形について，図 10 より，偏位によらず手計測との誤差は最大 0.3 mm 程度であることがわかる．誤差の理由は，新品時の梯形トロリ線はしゅう動面付近の断面形状が緩やかな曲線であり，しゅう動面の直線検出にばらつきが生じたためだと考えられる．したがって，摩耗が進むほどしゅう動面の直線成分が増大するため精度が向上すると考えられる．

導電鋼レールについて，図 11 より，偏位によらず寸法値との誤差±0.5 mm 以内で計測可能であることが確認できた．誤差の理由は，T 形と同様に新品のレール頭頂面の断面形状が緩やかな曲線であるためだと考えられる．



（a）しゅう動面傾斜 0°　　（b）しゅう動面傾斜 6°

図 9　残存高さの計測値と寸法値（IT形）の誤差

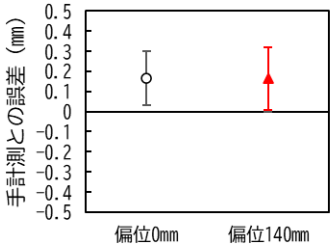


図 10　残存高さの計測値と手計測との誤差（T 形）

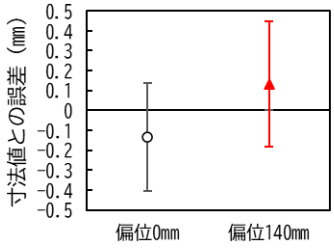


図 11　残存高さの計測値と寸法値（導電鋼レール）の誤差

6．営業線における連続計測試験

導電鋼レールが導入されている営業線において，保守用車の作業台に開発した剛体電車線摩耗計測装置を設置して連続測定を実施した（図 12）．保守用車の走行速度は最大 30 km/h，計測間隔は 20 mm 一定として，導電鋼レールのレール面上高さ，軌道中心からの偏位および残存高さを計測した．

図 13 に計測結果を示す．図 13 は 20 mm 間隔で導電鋼レールの摩耗が進行している箇所の各計測値を連続的にプロットしたものである．なお，高さ・偏位の計測基準点は，導電鋼レールの取得形状の最下点である．図 13 内の定点（赤丸箇所）での手計測との誤差は 0.4 mm であり，実用上十分な精度であることを確認した．



図 12　営業線での計測試験の概観

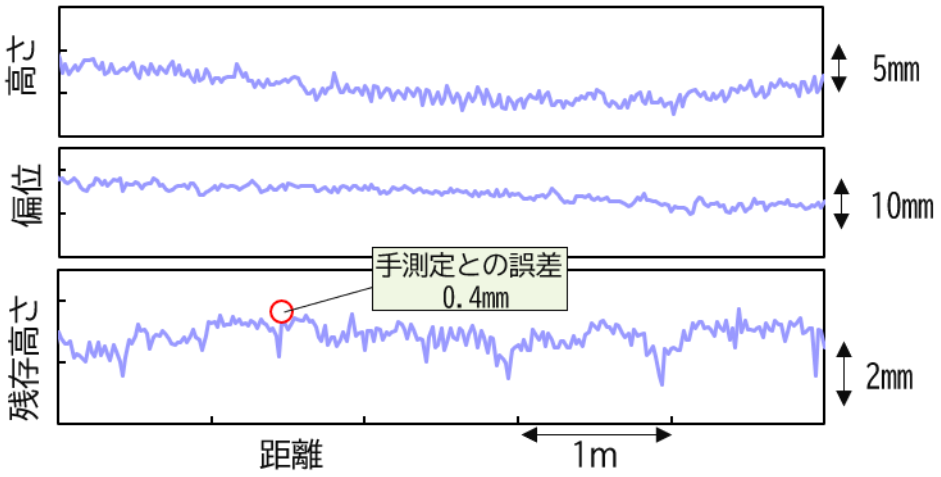


図 13　営業線での計測試験の結果

7. まとめ

剛体電車線の摩耗が進行しても，高精度かつ連続的に摩耗を自動計測可能とするため，剛体電車線の残存高さを摩耗計測指標とし，これを光切断法により取得した断面形状データから計測可能なアルゴリズムを構築した．この手法を用いて定置試験を実施した結果，摩耗の進行具合やしゅう動面の傾斜の有無，偏位によらず残存高さの誤差を±0.5 mm 以内で計測可能であることを確認した．さらに，営業線での計測試験により，剛体電車線の高さ，偏位，摩耗が連続的に計測可能であること，かつ，手測定との摩耗計測誤差が 0.4 mm であり，高精度に計測可能であることを確認した．

本装置は鉄道総研と日本電設工業株式会社との共同研究により開発されたものである．

文　献

1)　薄広歩，根津一嘉，松村周：高速測定および外乱光に対応した光切断法によるトロリ線摩耗形状測定手法の検討，電気学会 交通・電気鉄道研究会，TER-19-013，pp.1-6，2019
2)　増田健：ICP アルゴリズム，研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア（CVIM），情報処理学会研究報告，Vol.2009-CVIM-168，2019