

高速パンタグラフ試験装置の開発

小山 達弥*

Development of High-Speed Test Facility for Pantograph/OCL Systems

Tatsuya KOYAMA

Railway Technical Research Institute (RTRI) has developed a new pantograph test system, "High-Speed Test Facility for Pantograph/OCL Systems," to develop pantographs for high-speed train and wear resistant contact strips. This test facility mainly consists of four pieces: a rotating disk with attached contact wire which can rotate at high speed up to 500 km/h, exciters which reproduces lateral arrangement and vertical movement of overhead contact lines, an energizer which applies large current to a pantograph up to 1000 A, and environmental control devices which can control temperature from -20°C to $+40^{\circ}\text{C}$ and humidity from 10% to 90% in test chamber. This paper shows the function, performance, and usage example of this test facility.

キーワード：高速パンタグラフ試験装置，架線，集電，すり板の摩耗，接触電圧，環境雰囲気制御

1. はじめに

電気鉄道において電力を車両に供給するシステムとして架空式電車線（以下、「架線」という）とパンタグラフの組み合わせが国内外を問わず広く用いられている。パンタグラフには、

- (1) 架線の高さ変化や振動に対する追従性
- (2) 必要な電力を車両に送ることができる電流容量
- (3) トロリ線としゅう動するすり板やベアリングなどの耐摩耗性
- (4) 高速走行時の安定した空力特性および低騒音性が求められる。

これらの性能を評価する手段として、①理論解析、②コンピュータシミュレーション、③試験装置を用いた試験、④営業線における試験がある。このうち、③については、(1)～(4)の個々の項目に絞って試験を計画する必要があるが、①に比べて定量的な評価が行えること、②では再現が困難な摩耗などを扱えること、④に比べて現実では設定が困難な条件など様々な条件の試験が容易に行えるといった利点がある。そのため、鉄道総研にはパンタグラフの性能を評価するための試験装置が複数あり、代表的なものとして(1)～(3)を総合的に評価するためのパンタグラフ総合試験装置¹⁾（以下、旧装置という）があった。しかし、旧装置で再現できるしゅう動速度は現在の新幹線の営業速度320km/hよりも低い（300km/h）といった性能面での問題と、老朽化（1977年しゅん功）によるメンテナンスコストの増大といった運用上の問題があった。

そこで、新幹線の更なる高速化に対応した、追従性と

低騒音性を両立するパンタグラフの開発や、大電流通電時のすり板の性能評価、架線・パンタグラフに生じる現象の解明および故障原因の究明を目的として高速パンタグラフ試験装置（以下、本装置という）を開発した。本稿では、本装置の機能等の概要や試験例を示す。

2. 高速パンタグラフ試験装置の概要

2.1 構成

本装置の全体構成を図1に示す。本装置は、架線を模擬する本体装置、パンタグラフを据え付けるパンタグラフ架台、パンタグラフに電気を流す通電装置、試験室の

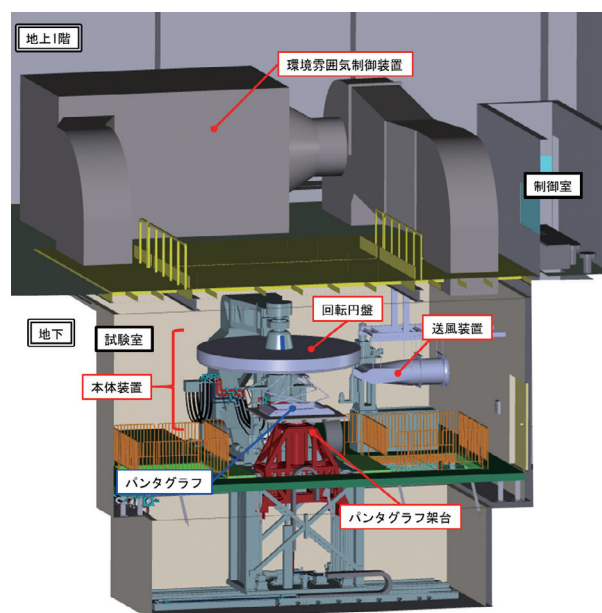


図1 高速パンタグラフ試験装置の構成

* 鉄道力学研究部 集電力学研究室

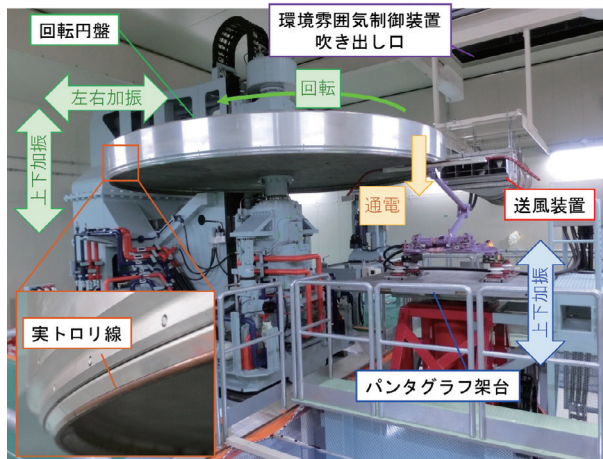


図2 試験室内の機器と各機器の動作

温湿度を制御する環境雰囲気制御装置、送風装置により構成される。本装置は地上階および地下階に設置されており、本体装置およびパンタグラフ架台、送風装置は地下階の試験室内に、環境雰囲気制御装置および通電装置は地上階にそれぞれ設置されている。なお、試験室は断熱材で全周を覆っており恒温室としての機能を有する。また、安全を考慮して本装置の操作および測定データの取得は地上1階の制御室で行い、本体装置等の動力源である油圧装置は試験中の騒音抑制を目的として地下階の油圧室に設置されている。

2.2 主な仕様

試験室内の様子と本体装置の加振方向などを図2に、本装置の主な仕様を表1に示す。なお、旧装置との比較のために、表1の[]内に旧装置の仕様を併記する。本装置は旧装置に比べて回転速度および加振性能、通電性能を向上させているとともに、新たな機能として環境雰囲気制御装置と送風装置を備えている。

2.2.1 本体装置

本体装置は、実設備における架線の配置（左右偏位、高低差）や、振動を再現するための装置であり、円盤、円盤回転装置、上下加振装置、左右加振装置から構成される。円盤にはGT110mm²のイヤー部形状と同じ形状をもつトロリ線（GT110mm²、PHC110mm²、GTM170mm²など）を架設することが可能である（図2）。

円盤の回転速度は最高500km/hであり、500km/h走行時の5m間隔で設置したハンガの到来周波数に相当する27.8Hzの上下加振と、50m径間で1径間半サイクルの左右偏位周期に相当する1.4Hzの左右加振を行うことが可能である。また、左右加振と上下加振を同期させることで、支持点付近で円盤が下に、径間中央付近で円盤が上に位置するような加振を行うことが可能である（図3）。なお、上下加振波形の位相を変えることができ、

表1 高速パンタグラフ試験装置の主な仕様

装置	仕様
本体装置	回転速度：最高500km/h [300km/h] 上下加振：周波数 最大27.8Hz [17Hz] 振幅 100mm ^{※1} [35mm] 波形 任意 [正弦波のみ] 左右加振：周波数 最大5Hz 振幅 300mm ^{※1} [200mm] 波形 任意 [三角波のみ]
パンタグラフ架台	昇降量：1600mm[同左] 上下加振：周波数 最大10Hz [同左] 振幅：35mm ^{※1} [同左] 波形：任意 [正弦波のみ]
環境雰囲気制御装置	温度：-20°C～+40°C ^{※2} [なし] 湿度：10%～90% ^{※3} [なし]
送風装置	風速：60～100km/h [なし]
通電装置	ACまたはDC [同左] 100～600V ^{※4} [100V] 最大1000A（10段階制御） [100～400A]

※[]内は旧装置の仕様

※1 周波数に依存

※2 本体装置起動時（停止時は-25°C～+40°C）

※3 温度10°C以上の場合に制御可

※4 極性反転可

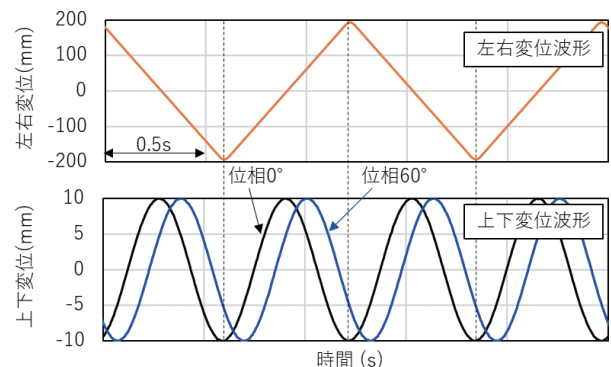


図3 回転円盤の左右加振と上下加振の同期（左右加振周波数0.8Hz、上下加振周波数1.6Hz）

高速走行時のパンタグラフ高さ変化と同じように支持点よりも進行方向前側の位置に最低点を設定することも可能である。さらに後述するハイブリッドシミュレーションへの適用を考慮し、上下加振装置の応答時間（無駄時間）を4ms以下としている。

2.2.2 パンタグラフ架台

パンタグラフ架台は、パンタグラフを据え付けるための装置であり、加振台、上下加振装置、昇降装置、前後移動装置から構成される。

加振台の大きさは前後方向（線路方向）2m、左右方向（線路直角方向）1.9mであり、上面には150mmピッチのボルト穴が設けられており、ほとんどのパンタグラフを設置することが可能である。

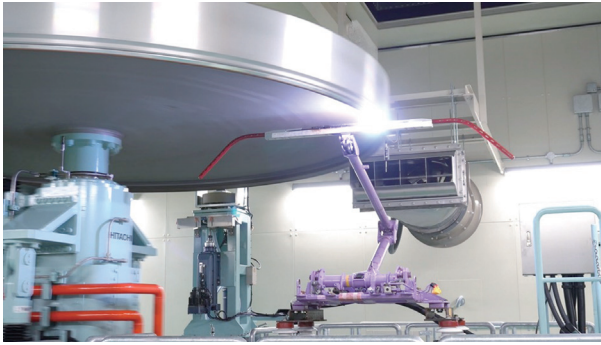


図4 通電試験の様子（円盤とパンタグラフ間の光は離線に伴い発生したアーク）

車両の上下振動は、上下加振装置により再現することが可能である。また、昇降装置によりパンタグラフの上下方向の設置位置を変えることで、トロリ線高さの低い狭小トンネル内のパンタグラフの姿勢を再現した試験を行うことが可能である。

前後移動装置は、舟体と台枠中心の前後方向位置が一致していないパンタグラフに対して、パンタグラフ架台の前後位置を調整し、舟体のしゅう動位置を実設備と同等にするための装置である。これにより、シングルアームパンタグラフを供試体とする場合でも試験を容易に実施することが可能である。

2.2.3 通電装置

通電装置は、PWMコンバータおよびHブリッジチョッパ、抵抗器により構成され、交流もしくは直流の電気をパンタグラフに流すことが可能である。なお、旧装置では交流を全波整流することで直流通電を行っていたが、本装置では上記の構成とすることでリップル率1%未満の直流通電が可能である。通電装置を用いた試験の様子を図4に示す。

通電時の負荷として抵抗器（単基2Ωもしくは6Ω、計10基）を用いており、抵抗器の並列接続台数を増減することで通電電流を10段階に調整することが可能である。通電電流は最大1,000Aで、新幹線のパンタグラフ1基あたりの集電電流をカバーすることができる。本装置では本体装置の絶縁を不要とするため、本体装置を接地極に接続している。そのため、電気鉄道の力行状態と同様に架線（円盤）を正極側、パンタグラフを負極側にする場合は、通電装置によりパンタグラフをマイナスの電位に課電する。なお、通電装置には極性反転機能が備わっており、電気鉄道の回生状態、つまり架線を負極側、パンタグラフを正極側にした試験も実施することができる。

2.2.4 環境雰囲気制御装置

環境雰囲気制御装置は、ヒーター、冷凍機、加湿器、除湿器から構成される。本体装置起動時は-20℃～

+40℃の範囲で気温を制御することが可能で、さらに+10℃以上では湿度の制御も可能である。また、本体装置が停止しているときは、-25℃～+40℃の範囲で制御することが可能で、JISおよびIECに定められているパンタグラフの押上機構の耐候性試験（形式試験）²⁾³⁾を本装置で実施することが可能である。

2.2.5 送風装置

送風装置は、走行時の気流による舟体（すり板を含む）の冷却効果を再現するための装置で、風速は最大100km/hである。送風口は横800mm、縦200mmであり、円盤の左右動範囲をカバーする。

2.2.6 その他の機能

(1) 運転モード

本装置の制御部には、本体装置の円盤回転装置、上下・左右加振装置およびパンタグラフ架台の上下加振装置の条件を設定する下記の方法がある。

・手動運転

個別に条件を設定する方法で試験中に条件を変更できる方法である。これは、摩耗試験のように同一条件で長時間の試験を行う場合や、パンタグラフの追従振幅特性取得などでの使用を想定している。

・自動運転

あらかじめ試験時間や回転速度、速度に応じた加振条件を設定する方法である。これは、同じ速度条件や加振条件の下で、パンタグラフの構成を変更したときの集電性能を比較する試験での使用を想定している。

また、速度や上下・左右変位の時刻歴波形をあらかじめ作成し、その波形を再現するように試験装置を動作させる方法も可能である。これは、シミュレーションや現地試験の再現試験を想定している。

・外部信号入力運転

外部信号入力により試験装置を動作させる方法である。後述するハイブリッドシミュレーションでの使用を想定している。

(2) トロリ線架設装置

電気抵抗率の高いすり板を導入する場合やすり板配列数を少なくする場合などに、トロリ線とすり板の電気抵抗およびその境界の接触抵抗と、列車停止時の補機電流により生じるジュール熱によりトロリ線が断線する可能性がある。このような事象の発生の可能性を確認するために、トロリ線の温度上昇試験が行われる⁴⁾。

本装置の試験室内で環境雰囲気制御装置を用いることで、種々のトロリ線とすり板の組み合わせによる温度上昇試験を効率的に進められるよう、トロリ線を張力25kNで架設可能な金具（トロリ線架設装置）を試験室壁面に据え付けている。これにより前述の通電装置を用いて、架設したトロリ線に課電することで、本装置内でトロリ線の温度上昇試験が実施できる。なお、本装置試験室内

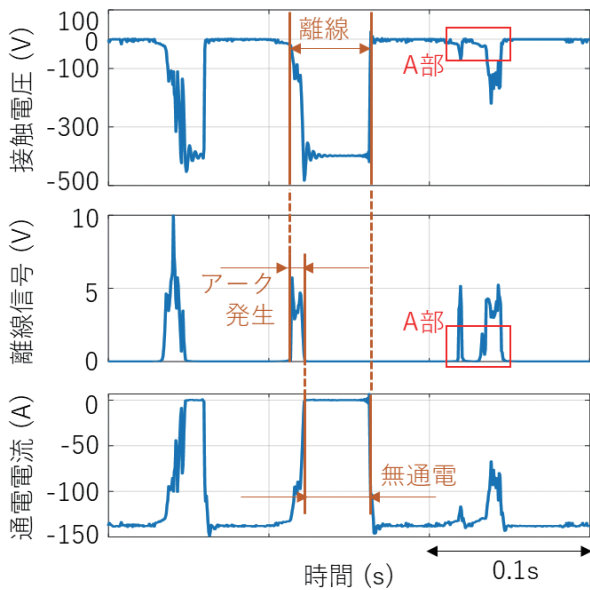


図5 接触電圧波形と離線波形

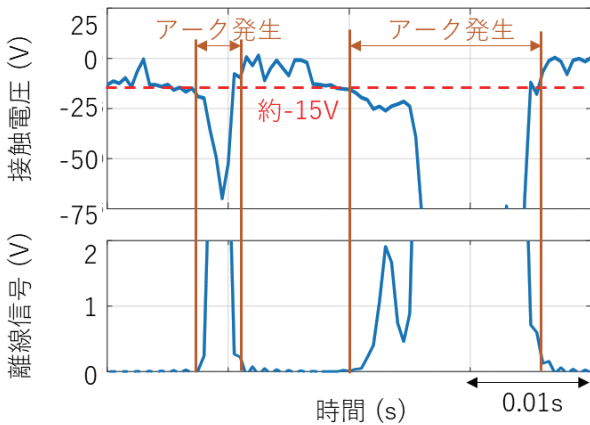


図6 図5A部の拡大図

でトロリ線温度上昇試験を実施する場合は、円盤への通電回路とは別に設けた配電盤からトロリ線に通電を行う。

(3) 接触電圧測定装置

パンタグラフが架線から離れる現象を離線といい、力行中に離線が発生するとトロリ線やすり板の摩耗への影響が大きい高温のアークが発生する⁵⁾。そのため、アークをとらえてその発生時間や頻度を計測することはトロリ線およびすり板の摩耗評価に対して重要なものとなる。旧装置ではアークをとらえるために紫外光式離線測定器⁶⁾を用いていたが、微小なアークや測定器の死角に発生したアークをとらえることができないという問題があった。一方、アークの発生とすり板とトロリ線間の電位差（以下、接触電圧という）に相関があること⁷⁾、さらには、アークが発生しない場合であってもすり板およびトロリ線の摩耗形態を評価する上で、接触電圧が重要な指標となることが報告されている⁸⁾。また、鉄道総研が所有する、すり板単体の摩耗評価が行える高速用集

電材摩耗試験機においては接触電圧測定が実施されており、アーク発生の判定に接触電圧が測定されている⁹⁾。そこで、アーク発生の判定やすり板およびトロリ線の摩耗形態を把握するために、本装置においても接触電圧を測定できるようにした。

接触電圧を測定した試験結果を図5に、図5中のA部拡大図を図6に示す。この試験では回転円盤を300km/h、円盤左右加振の周波数を0.1Hz、振幅を200mmとし、通電条件をDC400V、133Aとした。円盤上下加振についてはアークが多く発生するように周波数を10Hz、振幅を10mmとした。また、トロリ線はGTSN 110mm²を、すり板は鉄系焼結合金すり板をそれぞれ使用した。ここでは接触電圧の他に、紫外光式離線測定器による離線測定と、クランプ電流計による通電電流測定を行っている。なお、図5の電圧および電流が負になっているのは、2.2.3項に記載した理由による。図5から、離線開始直後にアークが発生（離線信号が0V超）し、アークが消弧した後に無通電状態（通電電流が0A）となることがわかる。また、図6より接触電圧がおおよそ-15V以下になった際にアークが観測されていることがわかる。これはアーク発生の瞬間に生じるアーク電圧である⁷⁾。

このように、本装置では接触電圧を測定できることから、接触電圧と通電電流測定によるアーク発生の判定を実施できると考えられる。そこで、前述の試験と回転速度と加振の条件を同一にし、通電条件をDC100～600V、66～200Aの間で変更して、接触電圧および通電電流による離線測定と紫外光式離線測定器による離線測定を行った。図7および表2にこの試験による離線率の集計結果を示す。なお、接触電圧および通電電流による離線測定では、通電電圧が前述の-15V以下になるときをアークが発生している離線、および無通電となる離線状態（以下、アーク+無通電離線）、通電電流が-5A以上となった時間を無通電となる離線状態（以下、無通電離線）、アーク+無通電離線でありかつ無通電離線でない場合をアークが発生している離線状態（以下、アーク離線）としている。ここでは離線の判定として通電電圧の閾値を-15Vとしているが、アーク発生の瞬間に生じるアーク電圧はトロリ線およびすり板材質により変わるため⁷⁾、材質に応じて閾値を変える必要がある。図7の縦軸は接触電圧および通電電流による離線測定の集計結果を、横軸は紫外光式離線測定器により測定した離線（閾値0.01V）の集計結果をそれぞれ示す。アーク離線は紫外光式離線測定器による離線と概ね一致しており、直流通電においては通電電圧と通電電流によりアーク離線を推定できると考えられる。なお、紫外光による検出と接触電圧による検出に相違があるのは、小さなアーク光や死角にあるアーク光が検出できなかった

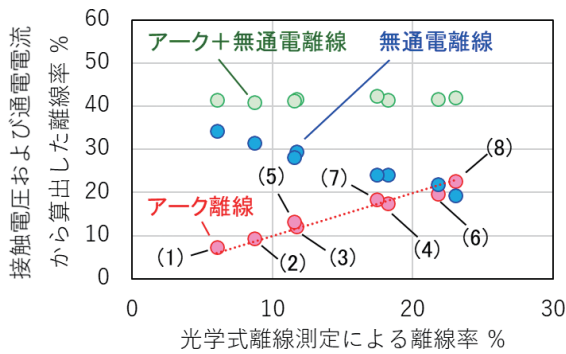


図7 通電条件を変えた試験の離線率（図中の（ ）は表2の試番を示す）

表2 試験の通電条件と離線率

試番	通電電圧 V	通電電流 A	アーク離線率 %	アーク継続時間 ms
Case (1)	DC 100	100	7.2	14
Case (2)	DC 200	100	9.4	22
Case (3)	DC 300	100	12.2	28
Case (4)	DC 400	133	17.4	52
Case (5)	DC 400	66	13.2	36
Case (6)	DC 400	200	19.8	45
Case (7)	DC 500	83	18.4	47
Case (8)	DC 600	100	22.7	51

ためと考えられる。

図7および表2に示す試験結果から、離線率は通電電圧に依存していることがわかる。また、表2からアーク継続時間も通電電圧に依存しており、今回の試験ではアークが最大で50ms程度継続していた。2.2.3項のように、旧装置では全波整流波形で直流通電を行っていたため、アーク継続時間は10ms以下となる。これに対して安定した直流通電を用いる本装置を利用することですり板などの耐アーク性を従来よりも定量的に評価できると考えられる。

3. 試験例

本装置の活用が考えられる試験例を以下に示す。

3.1 パンタグラフの性能評価

本装置では手動運転による追従振幅特性の把握や、自動運転による速度ごとの離線測定といった旧装置と同様の集電性能評価を行うことが可能である。また自動運転により、本装置では一般区間の走行を再現することができるため、新たに開発したパンタグラフの既設線区への適合性評価にも活用できると考えられる。

表3 左右加振周波数および送風条件を変えた試験におけるすり板下面温度

左右加振周波数 Hz	送風 km/h	すり板下面温度 °C	
		舟体中央	200mm位置
0.1	0	平均：113 振幅：8	平均：75 振幅：5
	100	平均：72 振幅：14	平均：45 振幅：2
1.0	0	平均：114 振幅：3	平均：96 振幅：5
	100	平均：80 振幅：4	平均：64 振幅：3

3.2 すり板の性能評価

すり板は走行速度やトロリ線の左右移動速度によって摩耗量が変わることが報告されている¹⁰⁾¹¹⁾。これは、すり板に対するトロリ線の滞留時間や摩擦力によるすり板の温度上昇による影響と考えられており、試験中のすり板温度を営業線における実際の温度に近づけることはすり板の定量的な摩耗評価に重要である。本装置では、旧装置に比べて左右移動速度を向上させており、さらに環境雰囲気制御装置および送付装置を備えていることから、営業線の環境に近い条件ですり板の摩耗評価が可能であると考えられる。表3に、トロリ線移動速度（左右加振周波数）を変え、さらに送風装置を使用した場合のすり板下面の温度を示す。この試験では、円盤回転速度を300km/h、上下加振なし、温湿度を15°C、20%、通電条件をAC100V、400Aとしている。表3から移動速度が高い（左右加振周波数が高い）とすり板端部の温度が上昇すること、送風を行うとすり板全体の温度が低下することがわかる。このように、営業線の環境を再現することで、従来よりも実際に近いすり板の摩耗評価を行うことができると考えられる。

3.3 ハイブリッドシミュレーション

鉄道総研では、定置試験の利便性を有しながら、架線とパンタグラフの動的相互作用を評価可能な試験手法としてハイブリッドシミュレーション（以下、HS）手法を開発している¹²⁾。HSを実現するためには、高速なりアルタイムシミュレータや架線の挙動を再現可能な架線モデルだけでなく、加振指令から実動までのタイムラグが少ない加振器が要求される。本装置は計画当初からHSの実装を計画しており、タイムラグの少ないシステムを構築している。これまでは上下加振のみのHS手法を開発していたが、今後はトロリ線が左右に移動しながらしゅう動する場合でもHSを可能とする手法の開発を進めていく予定である。これにより、パンタグラフ開発の効率化、および低コスト化が期待される。

4. まとめ

鉄道総研の新しい試験設備として高速パンタグラフ試験装置を開発した。本装置は、従来の装置に比べて回転速度や加振性能、通電能力を向上させることで新幹線の更なる高速化に対応するとともに、営業線の環境を再現するための環境雰囲気制御装置や送風装置を備えている。本装置を活用することで、低騒音性能を兼ね備えた高速用パンタグラフの開発や、耐摩耗性を向上させたすり板の開発を進めていく所存である。

なお、本装置の動画を鉄道総研 Web サイト^{ML1)}に掲載しているので参照されたい。

謝 辞

本装置を製作するにあたり、本装置の設計・製作をした株式会社日立インダストリアルプロダクツ、本装置を設置している実験棟を設計したジェイアール東海コンサルタンツ株式会社、および実験棟を建設した東急建設株式会社の各関係者に多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 小山達弥：研究開発七つ道具 パンタグラフ総合試験装置, RRR, Vol.74, No.10, p.40, 2017
 - 2) 日本工業標準調査会：鉄道車両—パンタグラフ JIS E 6302：2015, 2015
 - 3) The International Electrotechnical Commission, “Railway applications - Rolling stock - Pantographs - Characteristics and tests - Part 1: Pantographs for main line vehicles IEC 60494-1:2013,” 2013.
 - 4) 電気鉄道ハンドブック編集委員会編：電気鉄道ハンドブック, コロナ社, p.481, 2007
 - 5) Takamasa Hayasaka, Masatoshi Shimizu, Hirofumi Akagi, “An arc-light-based method for estimation contact strip wear,” Proc IMechE Part F: J Rail and Rapid Transit, Vol. 230, No.4, pp.1227-1233, 2015.
 - 6) 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
 - 7) 林屋均：架線—パンタグラフ間アーク現象, 社団法人日本鉄道電気技術協会, 2007
 - 8) 山下主税：通電下における集電材料の摩耗メカニズム, 鉄道総研報告, Vol.31, No.2, pp.35-40, 2017
 - 9) 久保田喜雄, 早坂高雅, 清水政利：離線アークエネルギー分布とパンタグラフすり板摩耗形状の関係, 第23回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2016) 講演論文集, S8-2-5, pp.627-630, 2016
 - 10) 根本公紀, 久保田喜雄：銅合金トロリ線と鉄系焼結合金すり板の摩擦・摩耗に及ぼすしゅう動速度の影響, 第26回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019) 講演論文集, 2019
 - 11) 森本文子, 久保田喜雄：パンタグラフすり板の摩耗に及ぼすトロリ線左右移動速度の影響, 第25回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL20018) 講演論文集 (講演番号 1312), 2018
 - 12) 小林樹幸, 山下義隆, 白田隆之, David P. STOTEN：多自由度架線モデルを用いた集電系ハイブリッドシミュレーション手法, 鉄道総研報告, Vol.32, No.6, pp.11-16, 2018
- ML1) 高速パンタグラフ試験装置
<https://www.rtri.or.jp/rd/division/rd50/rd5020/rd50200204.html>
(参照日：2021年6月17日)

