

# 電力・信号設備メンテナンスの高度化

信号技術研究部長  
新井 英樹



## 1. はじめに

鉄道の安全・安定輸送の確保には、メンテナンスが非常に重要である。そのメンテナンスの省力化・省人化を図ることにより、列車運行の低コスト化が実現できる。

本講演では、電力・信号設備の寿命評価や設備の障害発生予兆検出によるCBM化、メンテナンス作業の負荷軽減のためのデジタル技術の活用による自動化・機械化、そして設備の劣化メカニズム解明やその対策

を目指した基礎研究による長寿命化・省メンテナンス化など、メンテナンスの省力化・省人化に向けた研究開発の取り組みを紹介する。また、検査・診断手法を革新し、電力・信号設備メンテナンスの高度化に向けた研究開発の今後の方向として、センシング・データアナリティクス・シミュレーション技術を融合した「デジタルツイン」によるメンテナンスの実現に向けた構想について述べる。

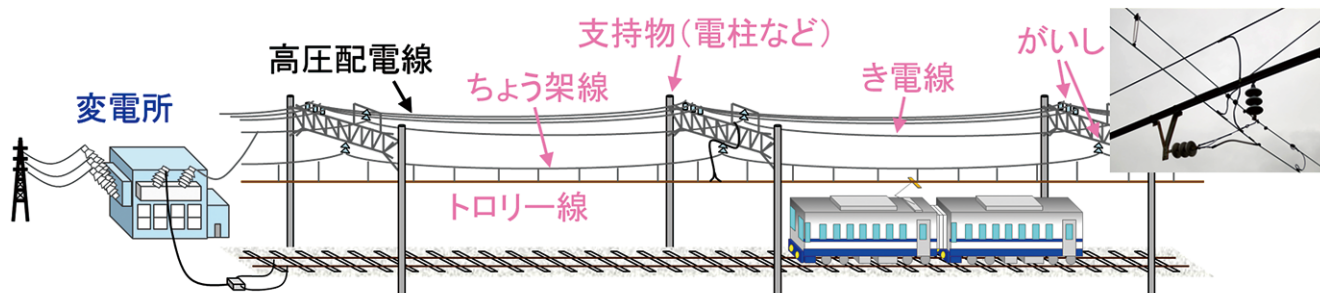


図1 電力設備の概略

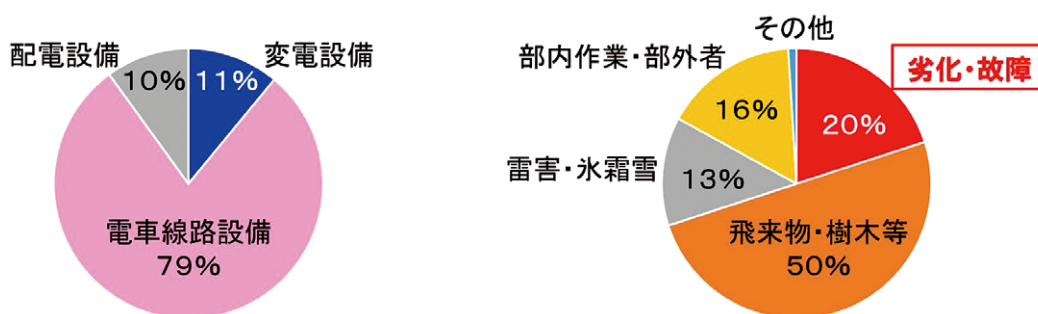


図2 電力設備による輸送障害の分類

## 2. 電力・信号設備メンテナンスの課題

### 2.1 設備の特徴

電力設備は、変電所などの「変電設備」、き電線、トローリー線、がいしなどの「電車線路設備」、そして、高圧配電線などの「配電設備」に分けられる(図1)。特に、電車線路設備など、高所にあり、長大であることが特徴である。図2に、近年の電力設備の障害により、30分以上の輸送遅延を引き起こした設備別の割合と、その障害要因を示す(鉄道安全データベース<sup>1)</sup>から集計)。電車線路設備に起因する輸送障害が8割近くを占めていることがわかる。また、電力設備の障害要因のうち、「劣化・故障」によるものが20%を占めており、これらをメンテナンスにより未然に防ぎ、鉄道の安定輸送につなげる必要がある。

一方、信号設備は、電化区間・非電化区間を問わず、線路沿線に点在して設置されていることが特徴である。また、連動装置や踏切保安装置をはじめとする多くの装置において、電子機器が使用されている(図3)。図4に、近年の信号設備の障害により、30分以上の輸送遅延を引き起こした設備別の割合と、その障害要因

を示す(鉄道安全データベース<sup>1)</sup>から集計)。転てつ装置や軌道回路に起因するものが多いが、その他、電子機器を用いた信号設備の障害によるものも多くを占めている。また、信号設備の障害要因のうち、「劣化・故障」によるものが29%を占めており、これらをメンテナンスにより未然に防ぎ、鉄道の安定輸送につなげる必要がある。

### 2.2 メンテナンスの省力化・省人化に向けて

地上側電気設備のメンテナンスの課題としては、

- ①電気は目に見えない(劣化現象の直接観測が困難)
- ②電力系統では高電圧・大電流を扱う
- ③設備が高所にあり、沿線に点在している

ことが挙げられる。

①については、電気設備には、多くの電子機器、電子部品が使用されているが、機械的可動部がない電子機器の故障予兆検出は非常に難しい課題であり、状態を間接的に把握・予測する技術が必要である。②については、感電・地絡などの防止が必須であり、非接触・リモートでの検査・診断手法が必要である。そして、③については、検査や取替作業自体に労力がかか



図3 信号設備の概略

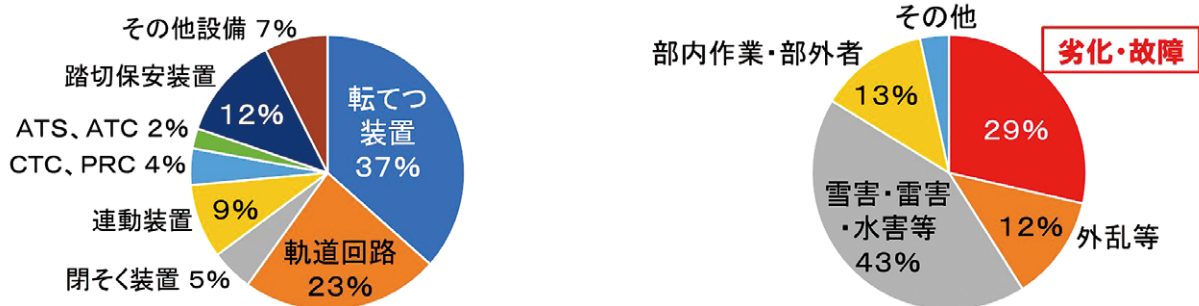


図4 信号設備による輸送障害の分類

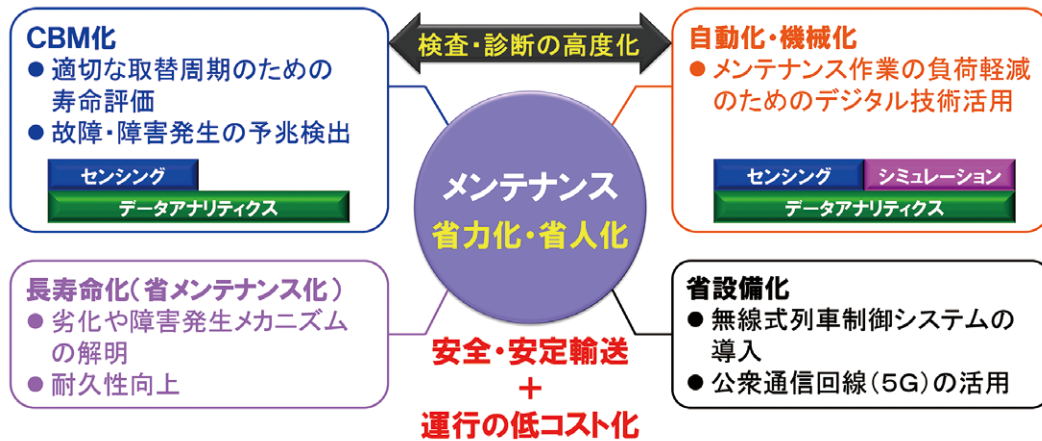


図5 電力・信号設備メンテナンスの省力化・省人化に必要な取り組み

るため、効率的な検査・診断手法が必要である。

メンテナンスの省力化・省人化のためには、検査・診断手法の高度化が必要であり、具体的には以下の取り組みが求められる(図5)。

- ・機器の寿命評価や設備の障害発生予兆検出によるCBM化
- ・メンテナンス作業の負荷軽減のためのデジタル技術の活用による自動化・機械化

なお、高度化を図る上では、センシング・データアナリティクス・シミュレーションといった、近年進展が目覚ましい技術が有用である。また、メンテナンス作業自体を減らすことも重要であり、具体的には以下の取り組みも必要である(図5)。

- ・設備の劣化や障害発生メカニズムを解明し、その対策に基づき交換周期の延伸などを実現することによる長寿命化・省メンテナンス化
- ・無線式列車制御システムによる地上設備の削減や無線に5Gなどの公衆通信回線を活用することによる更なる地上設備の削減といった省設備化

### 3. 省力化・省人化に向けた研究開発

本章では、現在、鉄道総研で取り組んでいるメンテナンスの省力化・省人化に向けた研究開発の例を紹介する。

#### 3.1 機器の寿命評価・障害発生予兆検出によるCBM化

##### (1) 信号用電子機器の寿命評価

信号設備の高機能化および小型化に伴い、従来のリレー制御による継電機器から電子機器への置換えが進んで久しい。一方で、電子機器は劣化傾向の把握が困難であることが多く、電子機器の更新時期の適切な設定が課題となっている。特に、電子連動装置は、他の信号設備と比較して更新に要する人的・経済的負担が大きく、その負担の平準化を図る目的から耐用寿命の合理的な評価が求められている。また、センシングデータを活用した寿命予測が可能となれば、CBM化にもつながる。

電子機器の劣化傾向の把握は難しいため、本研究では発想を転換し、部品の直近の故障予兆を検出するのではなく、電子機器を構成する各電子部品について、当該機器の使用環境を考慮した部品加速計算モデルから長期的な寿命を算出し、寿命評価することとした<sup>2)</sup>。

信号用電子機器を対象とした寿命評価は、以下の5段階のステップで行う。

- ①対象装置の使用環境の把握
- ②主機能に影響する電子部品の抽出
- ③抽出した電子部品の仕様およびストレス要因の把握
- ④部品加速計算モデルによる累積故障確率の計算
- ⑤得られた累積故障確率に基づく寿命の予測・評価

なお、本寿命評価では、部品メーカーで保有している信頼性試験データの活用により、短期間での寿命評価を可能としている。

さらに、電子部品の寿命へのストレス負荷として、温湿度の影響が高いことを特定し、開発した寿命予測手法と温湿度の使用環境センシングから沿線に設置さ

れる信号用電子機器の寿命予測手法を開発した<sup>3)</sup>。

図6に、ケーススタディとして実施した沿線に設置される信号用電子機器の寿命予測結果を示す。温度センシングの誤差が±1℃あった場合の寿命予測範囲も算出可能である。また、機器筐体の温度をセンシングすることが最も寿命予測精度が高いが、機器が設置されている箇所の気象庁データを活用した寿命予測も可能としている。

現在、使用環境センシングに基づき、逐次、残寿命

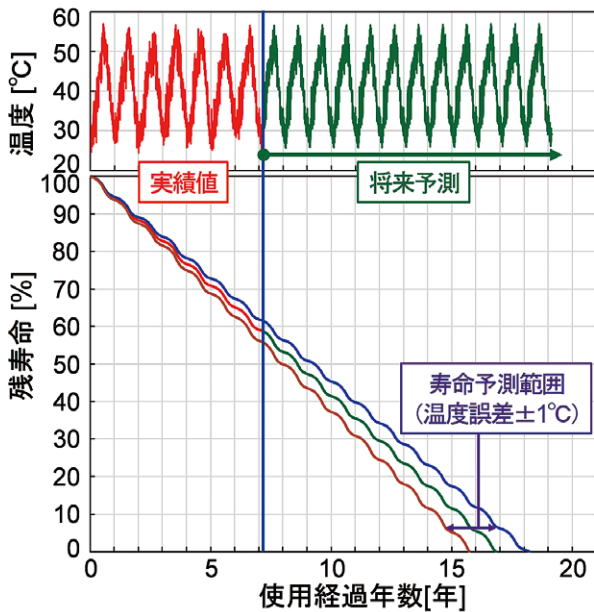


図6 沿線の信号用電子機器の寿命評価例

や劣化度といった寿命予測を計算・表示するツールの開発を行っている(図7)。本ツールの活用により、信号用電子機器の寿命予測に基づく機器の適切な取替更新が可能となり、メンテナンスのCBM化が実現できる。

(2) 転てつ機の転換不能予兆検出

電気転てつ機は、分岐器の可動部を転換させ、列車を安全に通過させられる状態かを照査し、機械的にその位置を鎖錠する機能を有する信号設備である。この電気転てつ機の動作が途中で停止する転換不能が発生すると、列車運行に直接影響を及ぼすため、設備の状態を適切に維持管理して転換不能の発生を抑えるためのメンテナンスが重要である。

通常、転換負荷は、電気転てつ機の転換力よりも十分に小さい状態にあるが、何らかの原因により転換負荷が増加し、転換力との差が小さくなると、電気転てつ機内のクラッチが機能し、モータ側の回転速度と出力側の回転速度に速度差(すべり)が発生する。さらに、転換負荷の増加によりモータやクラッチに作用するトルクが、モータの最大トルクや、クラッチが伝達可能な最大トルクを超過した場合に、転換不能に至る。この転換不能の予兆を検出することができれば、検出後のメンテナンスの実施というCBM化が可能となるが、これまで転換不能の予兆が電気転てつ機から得られるデータにどのように現れるかの指標が不明であった。

本研究では、アクチュエータ(エアシリンダ)により転換負荷を模擬し、電気転てつ機の動作かんに作用する転換負荷を任意に増加させることが可能な模擬負荷装置を考案・製作し、転換不能の再現試験を可能とした。

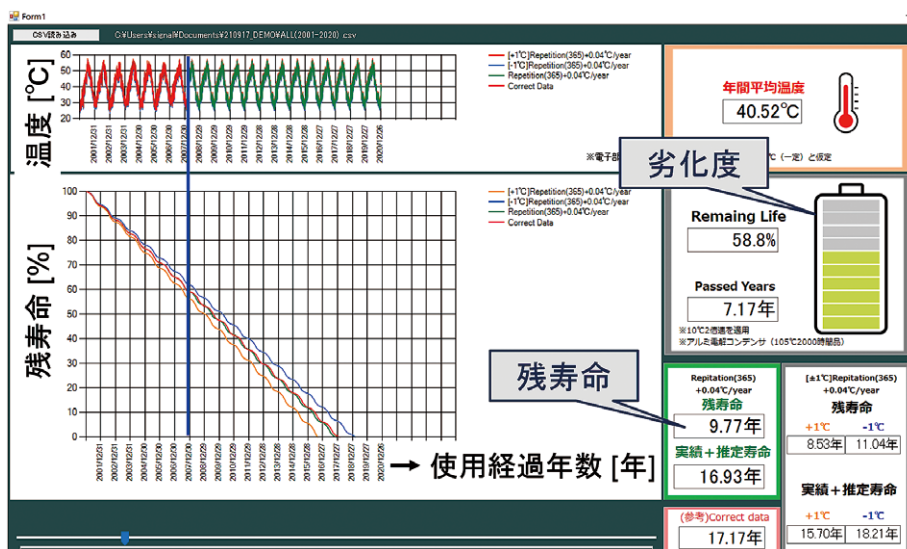


図7 寿命予測計算ツールの表示画面例

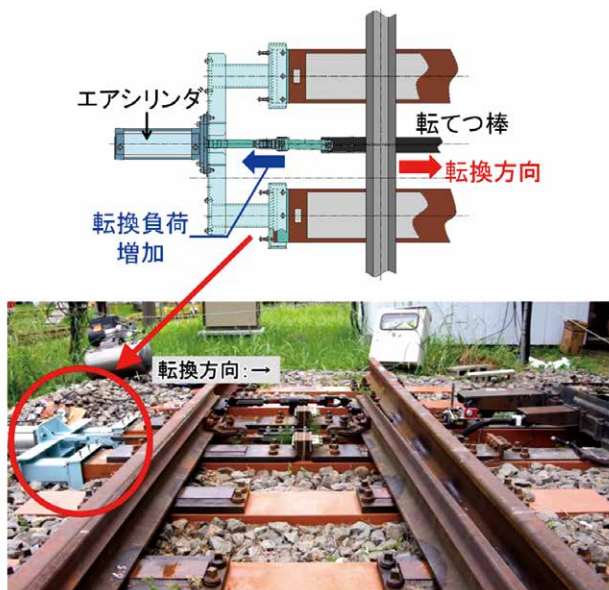


図8 転換不能を再現するための模擬負荷装置

模擬負荷装置の構成と分岐器への実装例を図8に示す<sup>4)</sup>。

鉄道総研所内の分岐器(60kgレール12番弾性片開き)とNS-A形電気転てつ機、模擬負荷装置を用いて、転換不能の再現試験を実施した。その結果、転換不能の条件により、転換不能の予兆が現れる指標が異なるが、モータ軸の停止による転換不能では、転てつ機のモータ電流が増加傾向を示す(図9)。一方、クラッチすべりを伴う転換不能では、転換時間が増加傾向を示す(図10)。

このように、転換不能の再現試験により、モータ電流や転換時間の状態変化から、転てつ機の転換不能の予兆を検出できることを明らかにした。この転換不能の予兆をセンシングし、機械学習により診断することで、転換不能予兆検出後のメンテナンス実施によるCBM化が実現できる<sup>5)</sup>。

### 3.2 メンテナンス作業負荷軽減への自動化・機械化

#### (1) 電車線3Dデジタル計測

電車線路設備は屋外に高所かつ長距離にわたって敷設されているため、そのメンテナンスに多くの労力が必要とされている。これまでの電車線の検測は、架線検測車による測測を除けば、徒歩巡回や列車巡視による係員の目視検査や、架線測定器(ゲージ棒)などによる手測測を中心に行われてきた。

一方、現行の架線検測車によるトロリー線高さの連

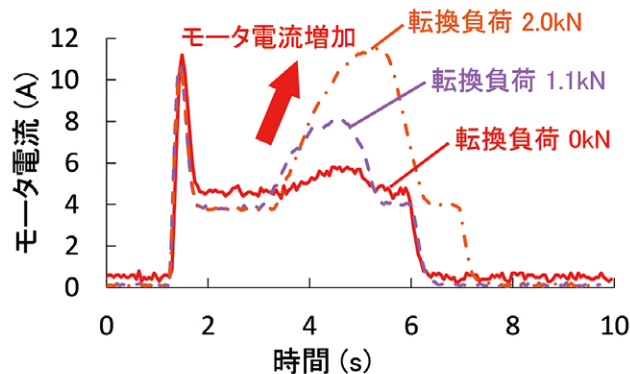


図9 モータ軸停止による転換不能での状態変化

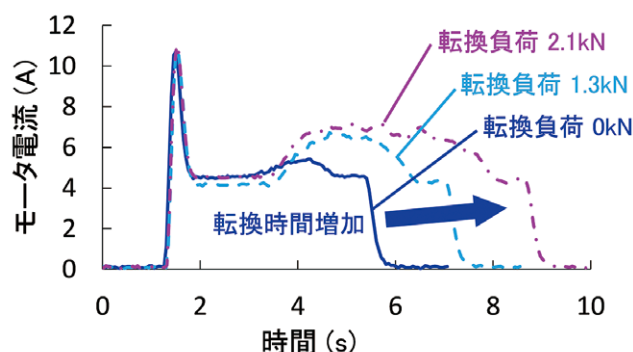


図10 クラッチのすべりを伴う転換不能での状態変化

続測定は、パンタグラフがトロリー線を押し上げた動的状態で行っており、その測定量は速度やパンタグラフ形式などの条件に依存する。そこで、パンタグラフの影響を受けない静的な電車線の3次元(3D)構造を測定することができれば、複数回の測定データの統計的比較から変化の傾向を捉えることや、架線-パンタグラフの動的シミュレーションのモデルとして測定データを活用することが可能となる。このような架線構造の統計的な比較や精緻な動的シミュレーションの実現のためには、トロリー線のみならずちょう架線の静的位置の連続測定を行うとともに、電車線金具の位置を把握することが必要であり、鉄道総研では、非接触での電車線路設備の3D構造計測と画像処理による設備の状態診断に取り組んでいる。

高頻度な電車線3D構造計測と画像収集を実現するためには、営業車に搭載可能な小型の測定装置を実現する必要がある。

本研究では、レーザスキャナとラインカメラを併用するセンサフュージョンを採用し、電車線(線条)を

自動識別した計測と設備の画像収集とを両立できる在来線営業車への搭載が可能な電車線非接触測定装置を開発した(図11)<sup>6)</sup>。

図12に、電車線3D構造計測の測定結果を示す。トロリー線の静高さ測定精度が±50mm以内(軌陸車からの測定と比較)であり、繰り返し測定した際の差異が10mm以内(2日間の走行を比較)であることを確認している。なお、本研究の一部は(株)明電舎との共同研究で実施したものである。

現在、機械学習を用いた画像処理による電車線金具の自動検出、ならびに自動診断に取り組んでおり、引き続き、電車線路設備の検査・診断の自動化を目指す。

**(2) レーザセンサによる建築限界測定**

鉄道においては、列車走行の安全を確保するために、建造物などが支障してはならない領域として、建築限界を定めている。この建造物などの建築限界は、車両動揺などを考慮し、車両の走行や旅客および係員の安

全に支障を及ぼす恐れのないように、定期的な測定・管理が必要となっている。しかし、建築限界の測定対象となる設備点数は膨大であり、手検測では非常に多くの労力と期間を要するという課題がある。一方、専用の建築限界測定車を用いた列車検測では、建築限界測定車の導入コストが課題となる。

本研究では、レーザを利用した測域センサを既存車両上に設置し、建築限界支障の有無を判定する建築限界測定装置および測定された3次元(3D)点群データを設備と対応付けて管理するための建築限界管理システムの開発を行った<sup>7)</sup>。

建築限界測定装置では、測定対象や測定精度、そして走行速度を考慮し、測域センサとしてLiDAR(Light Detection and Ranging)と呼ばれる、レーザビームを用いた距離計測センサを使用している。また、測域センサを列車検測に適用する場合、走行に伴い1次元の情報が付加されるため、2次元センサで3次元計測が

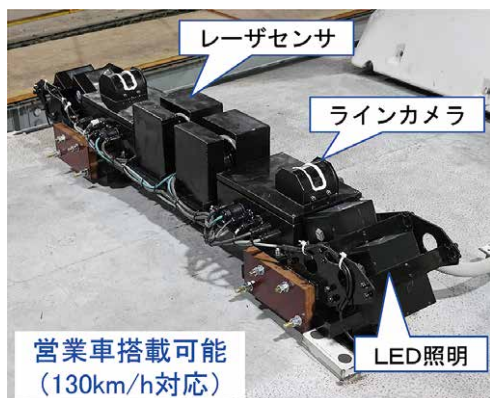


図11 電車線非接触測定装置

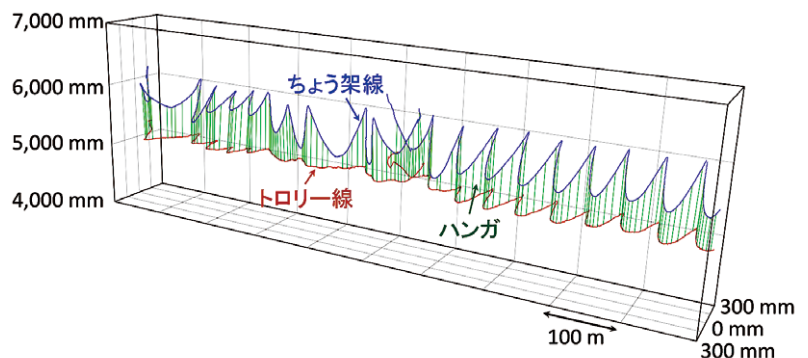


図12 電車線3D構造計測の測定結果例

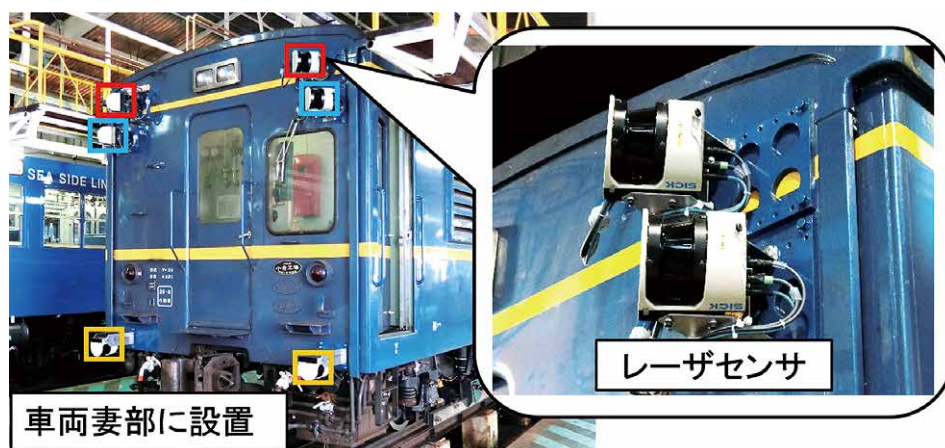


図13 既存車両へのレーザーセンサの設置

可能となる。

選定した測域センサを付随車の妻面に複数台設置することで、建築限界測定のための専用列車を不要とするとともに、測域センサの設置角度や車両動揺の補正方法に関して工夫することにより、高精度な建築限界測定を可能としている。

開発した建築限界測定装置の精度検証のために、本装置を既存の軌道検測車に設置した。図13に供試車両の外観と測域センサの設置状況を示す。牽引車はディーゼル機関車 (DE10形) であり、供試車両の前後両方に連結された。

図14に、列車検測で撮影した前方映像と、本装置で取得した3D点群データを示す。取得点群は、レーザ受信強度が高い点を明るい色、レーザ受信強度が低い点を暗い色で示している。図14の取得点群では、前方映像で撮影された電化柱などが測定されていることが確認できる。建築限界支障の対象物である、踏切遮断機や器具箱などの厚みのある設備では、枕木方向の誤差が50mm以下、標識類などの薄型設備では、枕木方向の誤差が200mm以下で測定できることを確認した。

開発した建築限界測定装置では、3D点群データから建築限界支障を視覚的に確認可能であり、このようなデジタル技術の活用により、建築限界測定のプロセスの省人化・省力化、そして低コスト化が図れる。

### (3) ドローンの活用に向けた磁界影響評価

無人航空機 (ドローン) は、空の産業革命として、新たな産業・サービスの創出、国民生活の利便性や質の向上に資することが期待されている。ドローンの具体的な活用方法として、物流、災害対応、インフラ維持管理、測量、農林水産業などが挙げられているが、鉄道の電力設備のうち電車線路設備や高圧配電線は、高所にあるため、検査デバイスとしての活用が期待されている。

一方で、電力設備の検査に適用する場合、電流が発生する磁界や電停止後の残留磁界により、ドローンの姿勢制御や飛行制御に影響を与える懸念がある。

本研究では、電車線路設備の点検にドローンを利用する場合を想定し、ドローンに許容される直流磁界レベル、すなわちイミュニティレベルを調査した

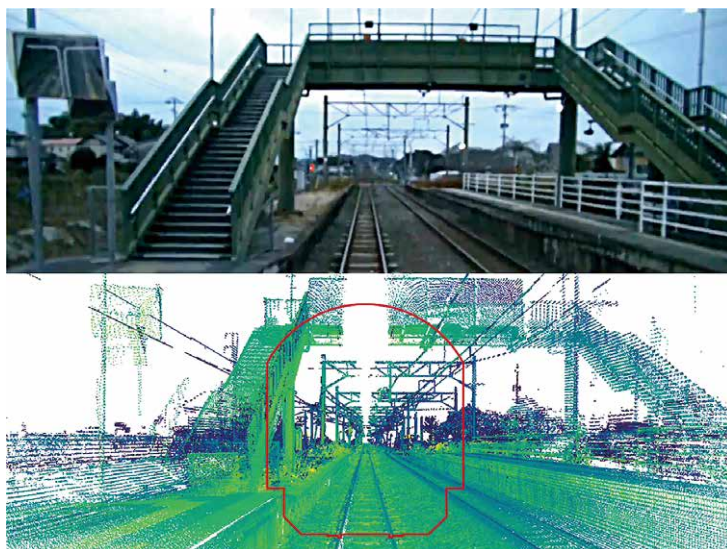


図14 列車前方画像と取得した3D点群データ



図15 ドローンの許容磁界レベルの調査

(図15)。また、直流電車線路近傍の磁界レベルの実測とシミュレーション解析 (図16) を通して、イミュニティレベルとの比較により、鉄道設備固有の磁界の観点からドローンの飛行可能エリアの設定手法を開発した<sup>8)</sup>。

市販されている重量200g未満のドローン2種類について、直流磁界ばく露に対するイミュニティレベルを調査した。調査手法は、図15に示すように、中心部におおよそ一様な直流磁界を発生できるように、周囲に簡易的なヘルムホルツコイルを配置した中に供試ドローンを静置し、コイルに直流電流を通電して、ドローンの姿勢制御や飛行制御に使用される磁気コンパスにエラーが発生する最小の直流磁束密度を測定するものである。直流磁束密度は3軸のフラックスゲート式磁界センサにより測定した。

調査の結果、姿勢制御に影響を及ぼす磁束密度は、機種により大きく異なり、特に鉛直方向で大きな差が

認められた。従って、許容される磁界レベルは機種によって大きく異なると言える。このため、自律飛行を行う場合の最悪条件を想定し、最も磁界への耐性が低い機種を基準として、直流や商用周波数といった低周波の磁界については、10 $\mu$ T程度を許容磁界レベルとすることが妥当と考えられる。

また、図17に、許容磁界レベルとき電停止後の電車線路の残留磁界との比較による、ドローンの飛行可能エリアの例を示す(鋼管柱・鋼管ビームの場合)。このように飛行可能エリアの設定を可能とした。今後、飛行可能エリアからのドローンによる電車線の撮影や計測など、具体的な検査手法の研究開発に取り組む。

### 3.3 劣化メカニズム解明による省メンテナンス化

メンテナンスの省力化・省人化のためには、劣化メカニズム解明の基礎研究により、耐久性向上を目指すといった省メンテナンス化の検討も重要である。ここ

では、一例として、トロリー線の摩耗・断線メカニズム解明のための基礎研究を紹介する。

電気鉄道では、変電所から送られる電力は電車線を介して車両に供給される。電力の授受はトロリー線とパンタグラフのすり板を接触させて行うため、当然ながら双方の集電材料には接触しゅう動による摩耗が発生し、両部材ともに摩耗の進行に伴って取替が必要となる。近年は車両の高速化や集電電流の増大などの要因により、集電材料の摩耗も増大する傾向にありメンテナンスコストを低減するために、摩耗の少ない集電材料が求められている。

従来の研究では、トロリー線とすり板の通電下における摩耗形態は、経験的に機械的摩耗と電氣的摩耗に大別され、特に電氣的摩耗は離線アークに起因し、著大な摩耗を引き起こすと報告されている<sup>9)</sup>。

本研究では、通電接点の発熱による摩耗の低減に向け、通電接点の開離による材料の損耗メカニズムを解明した(図18)<sup>10)</sup>。また、アーク実験により、そのメ

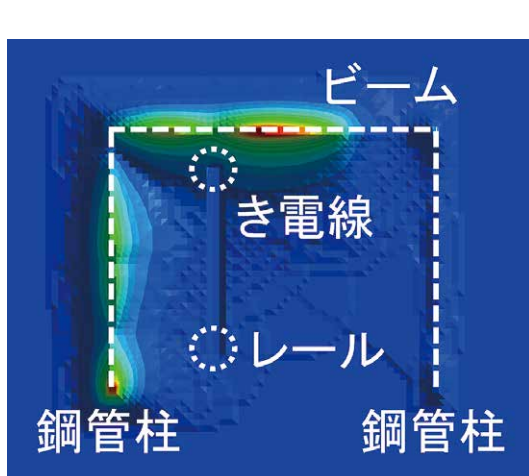


図16 直流電車線路近傍の磁界解析

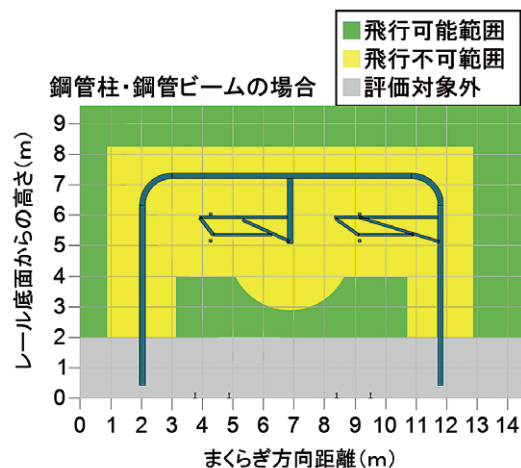


図17 ドローンの飛行可能エリアの設定例

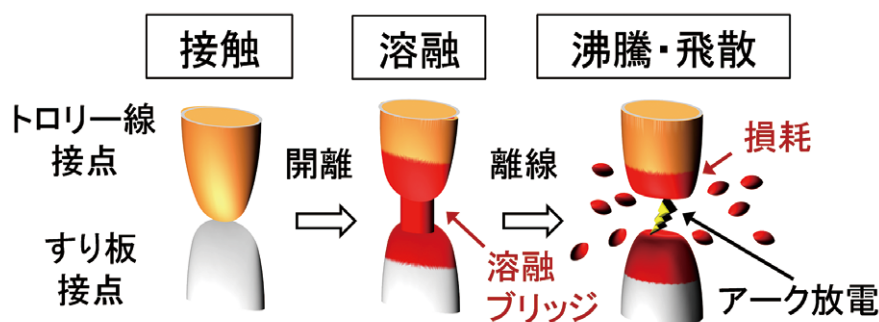


図18 通電接点の開離による材料の損耗メカニズム



図19 アーク実験

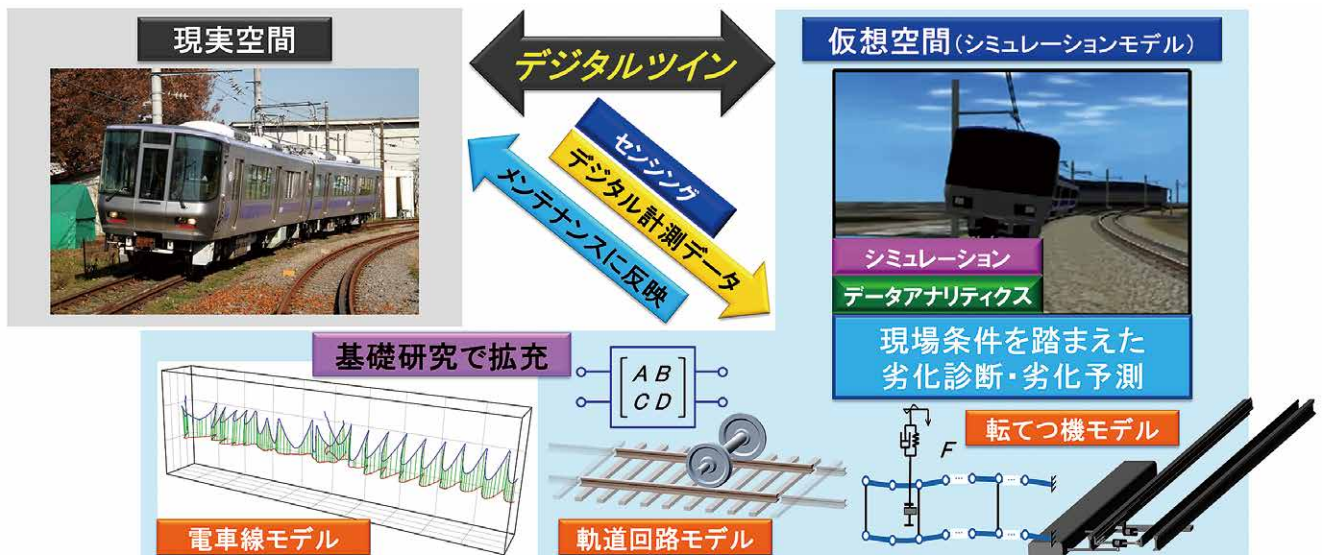


図20 「デジタルツイン」によるメンテナンスの高度化

カニズムの確認を進めている(図19)。

引き続き、摩耗現象解明のための実験やアークのシミュレーション解析を併用した基礎研究により<sup>11)12)</sup>、摩耗の低減が可能な集電材料の設計指針を提案し、耐久性の高い材料選定によるトロリー線やパンタグラフすり板の長寿命化、それによる省メンテナンス化を目指す。

#### 4. メンテナンスの高度化に向けて

本章では、電力・信号設備の検査・診断手法のさらなる高度化に向けて、センシング・データアナリティ

クス・シミュレーション技術を融合した、「デジタルツイン」による新しいメンテナンスを提案する。

図20に、「デジタルツイン」によるメンテナンスの高度化の概念を示す。

鉄道の現場、すなわち「現実空間」があり、それに対し、電車線モデルや軌道回路、転てつ機といった個々の信号設備のモデルから構成されるシミュレーションモデルである「仮想空間」の構築を目指す。シミュレーションモデルは、基礎研究を通して拡充していく。また、モデルの構築にあたっては、特に力学系モデルにおいて、電気設備だけではなく、車両、軌道、構造物など他設備の動きと密接に関係するため、「系統間デー

タ連携」によるセンシングデータを用いることで、モデルの高精度化が期待できる。

「現実空間」から取得されるデジタル計測データを入力とし、「仮想空間」では、個々の現場の条件を踏まえた劣化診断・劣化予測を行う。その結果を、「現実空間」のメンテナンスに反映させる。

このような「デジタルツイン」により、個々の現場に合わせた必要メンテナンスが明確になり、メンテナンスの高度化が図れると考えている。現状の設備毎に一律、一定周期のメンテナンスの変革を目指す。

## 5. おわりに

本講演では、電力・信号設備のメンテナンスの省力化・省人化に向けた研究開発の取り組みとメンテナンスの高度化に向けた研究開発の方向性について述べた。

メンテナンスの高度化のためには、基礎研究をベースとし、検査手法や診断手法の革新が必要である(図21)。革新的技術の源泉である基礎研究により、耐久性向上による長寿命化や劣化が現れる指標の探索を行う。検査手法では、非接触デジタル計測を進め、特に、レーザと画像を活用した3Dデジタル計測やドローン活用による計測を進める。そして診断手法では、「デジタルツイン」によるメンテナンスを目指す。

引き続き、鉄道事業者をはじめとし、先端技術を有する研究機関・大学・メーカ等と連携することにより、メンテナンスの高度化に向けた研究開発を推進する。

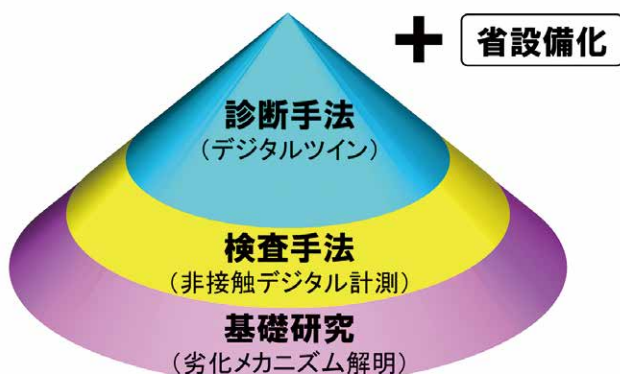


図21 電力・信号設備メンテナンスの高度化の方向性

## 参考文献

- 1) 鉄道技術推進センター：鉄道安全データベース  
<https://www.rtri.or.jp/tecce/mainactivity04.html>
- 2) 藤田浩由, 丹羽順一, 新井英樹：電子連動装置の使用環境を考慮した寿命評価手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.32, No.5, pp.23-28, 2018
- 3) 藤田浩由, 椿健太郎, 高崎建, 往古直之：使用環境センシングによる信号用電子機器の寿命予測手法, 鉄道総研報告, Vol.36, No.8, pp.37-44, 2022
- 4) 遠山喬, 潮見俊輔, 押味良和, 佐藤輝空：遠隔監視データを用いた電気転てつ機と軌道回路の状態推定手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.7, pp.5-10, 2020
- 5) 潮見俊輔, 高崎建, 往古直之, 椿健太郎：電気転てつ機モニタ用の転換負荷推定手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.8, pp.31-36, 2022
- 6) 松村周, 根津一嘉, 薄広歩, 川畑匠朗, 渡部勇介：電車線非接触測定装置の在来線車載試験による性能検証, 鉄道総研報告, Vol.34, No.9, pp.11-16, 2020
- 7) 遠山喬, 長峯望, 大森達也, 北尾憲一, 中曾根隆太：測域センサを用いた建築限界判定装置と管理システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.32, No.5, pp.11-16, 2018
- 8) 森田岳, 樋口靖展, 笹川卓：直流電車線路の点検を想定した無人航空機飛行可能エリアの提案, 鉄道総研報告, Vol.35, No.12, pp.17-22, 2021
- 9) 岩瀬勝：パンタグラフ集電と摩耗(Ⅲ), 鉄道技術研究報告, No.217, 1961
- 10) 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
- 11) 山下主税, 根本公紀：摩擦熱に起因するトロリ線とすり板の機械的摩耗形態の分類, 鉄道総研報告, Vol.35, No.12, pp.11-16, 2021
- 12) 山下主税, 菅原淳：通電条件下におけるトロリ線とすり板の摩耗形態, 鉄道総研報告, Vol.27, No.8, pp.35-40, 2013