

# 電力設備のメンテナンスに関わる最近の研究開発

池田 充\*

Recent Research and Development Activities of Maintenance Technologies for Electric Railway Power Supply System

Mitsuru IKEDA

In order to ensure reliability and stability of the electric railway systems, adequate maintenance operation for the electric power supply system is an essential matter. On the other hands, its maintenance operation involves high cost, because this system has a huge spatial scale. Furthermore, working population in Japan has been decreasing today, resulting in high demands on improving efficiency of the maintenance operation. RTRI has therefore been tackling the issue of improving in quality, efficiency and cost of the maintenance operation for the electric power supply system. This paper describes recent RTRI's research and development activities on the maintenance technologies for the power supply system in order to overcome these issues.

キーワード：電力設備，メンテナンス，予知保全，プロアクティブ保全，CBM，RBM，デジタルツイン

## 1. はじめに

電気鉄道はエネルギー効率がよく、地球環境に対して優しい交通機関であるとともに、大量輸送や高速運転に適しているなど、多くの利点を有していることから、新幹線に代表される高速鉄道や幹線鉄道、大都市圏内の都市鉄道をはじめとして、多くの路線が電化されている。ただし、電気鉄道において電力供給を担うき電回路（電車線路、帰線路、き電用変電所の総称）は長大なインフラ設備であることから、その機能維持には適切なメンテナンスが不可欠であり、多くの費用と要員とを要している。その一方、日本の労働力人口はここ十年間ほぼ横ばいであるものの、2025年以降には急速な減少が予測されていることから、鉄道電力設備のメンテナンスの省力化、効率化は鉄道経営にとって極めて重要な課題である。

鉄道総研の電力技術に関わる研究グループは、省エネルギー・省メンテナンスで信頼性の高い電力設備の実現を研究の目標として定め、その実現に向けた研究活動を行っている。本稿では、こうした研究開発のなかから、特に電力設備のメンテナンスに関わる最近の研究開発について紹介する。なお、以下に取り上げる具体的な研究事例のなかには、もともとメンテナンスに関する研究として取り組んだものではないものも含まれるが、これは俯瞰的にみてメンテナンスの省力化、効率化に寄与すると著者が判断した結果であり、ご承知おきいただきたい。

## 2. 電力設備のメンテナンス戦略

一般的な社会インフラや生産設備などに関わるメンテナンスと同じく、電力設備のメンテナンスについても時

\* 電力技術研究部長

代とともに変化している。これを概観したものを図1に示す。一般に、大規模設備のメンテナンスは故障後の修繕作業を業務の中心とする事後保全から、定期的な検査・保守作業を中心とする予防保全へと移行し、現在では予知保全へ、さらにはプロアクティブ保全へと移行するための取り組みが様々な分野でなされている。

予防保全は不具合の有無に関係なく、決められた時間周期で点検、保守を行う時間基準保全をベースとしている。これに対して予知保全は、設備の健全度や性能を監視し、これらの低下が認められた時点でメンテナンスを行う。状態基準保全がベースとなるため、状態監視技術と、監視データをもとにメンテナンスの適切なタイミングを判断する技術とがポイントである。電車線においてはトロリ線の摩耗進行が比較的早く、なおかつ摩耗が一定以上進行すると断線に至って大きな輸送障害につながることから、電気検測車による検測を定期的の実施してトロリ線の摩耗進展を把握・予測し、これに基づいてトロリ線張替計画をたてる方式が早い段階から実施されている。近年のICTの発展に伴い、IoTやAIを活用して高頻度もしくはリアルタイムで状態監視を行うことが期

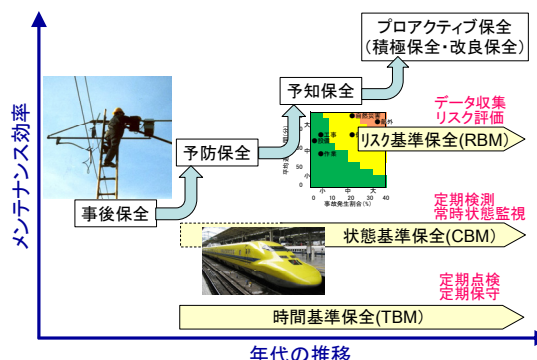


図1 電力設備のメンテナンス方法の変遷と展望

特集：電力技術

待されているが、高い電圧が常時印加される電力設備に関しては、状態監視を効率よく、なおかつ低コストで行うこと自体にまだ課題も多い。一方、プロアクティブ保全は不具合が発生する根本的な原因・要因を可能な限り排除したうえで、排除できないものについてはこれを監視して状態基準保全を行うという考え方であり、予知保全に対してより上位の概念といえる。

さらに最近では、設備状態を基準としてメンテナンスを行う状態基準保全に加え、検査データや不具合情報をもとに設備故障に伴い発生するリスクの大小を評価し、これに基づいてメンテナンスの優先度や検査項目の見直しを柔軟に行う、リスク基準保全の考え方も普及しつつある。この考え方は、有限のリソース（要員、予算）をリスクが最小となるように配分する仕組みであり、長大インフラである電力設備への適用が期待されている。

鉄道総研では、電力設備のメンテナンスを予防保全から予知保全、さらにはプロアクティブ保全へと移行させるための研究開発を進めている。以下の章において、その具体的な事例を紹介する。

### 3. メンテナンスのデジタル化

#### 3.1 デジタルツイン

既に述べたように、状態基準保全が有効に機能するためには、状態監視技術と、監視データをもとにメンテナンスの適切なタイミングを判断する技術の両方が求められる。しかしながら、電車線設備のように長大で、なおかつ高電圧が印加される設備については、状態監視用センサの電源確保やセンシングデータの伝送に対して特殊な技術が必要となるため、大量のセンサを密に設置することは現実的とはいえない。そこで、走行する車両から電車線設備のモニタリングを行うことが有効と考えられるが、設備の健全度を評価するうえで重要となる電車線設備の動的状態量（変位、応力など）については、車両条件や走行速度、気象条件（気温、風）などの影響を受けるため、最悪条件における動的状態量を把握することは簡単ではない。

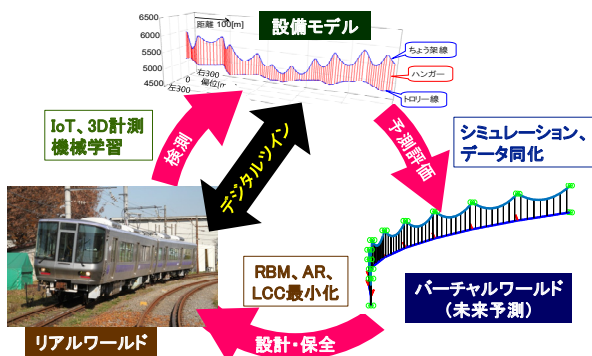


図2 メンテナンスのデジタル化（デジタルツイン）

そこで、メンテナンスのデジタル化を進めることにより、こうした課題を克服できるものと考えられる。そのためのベースとなると考えられるのが、図2に示すデジタルツインである。以下、架空電車線（以下、架線）設備を例に挙げてデジタルツインを説明する。まず、走行車両において架線の静的な3次元構造を精度よく計測し、これをもとに架線の精緻なデジタルモデルを構築する。次に、架線・パンタグラフ系の動的挙動シミュレーションを様々な条件に対して行い、架線設備の動的状態の推定、評価を行う。さらに、必要に応じて将来の状態変化を予測するシミュレーションを行い、設備の時系列変化を予測する。また、当然ながら静的なデジタルモデルを定期的に更新することにより、静的な構造変化も容易に把握できる。これらの情報に基づき、メンテナンスの具体的なメニューやタイミングを提示する。さらに、架線のデジタルモデルを活用すれば、金具の位置や種別の変更、張力の向上、などといった設備改良の効果を定量的に予測できることから、プロアクティブ保全にも有効である。

#### 3.2 デジタルツインを実現するための技術開発

デジタルツインを実現するためには、次のような技術が重要である。

- ① 設備状態の高度なモニタリング技術
- ② 実設備の挙動を精度よく再現可能なシミュレーション技術
- ③ 設備の挙動から劣化進展を予測・評価する技術

以下、これらを実現するための技術開発について簡単に紹介する。

##### 3.2.1 高度な設備状態モニタリング技術

設備の精緻なデジタルモデルを構築するためには、設備状態を精度よく、なおかつ効率的にモニタリングする技術が不可欠である。ここでは、架線のデジタルモデルを効率よく構築可能な電車線非接触測定装置について紹介する。

図3に示すように、電車線非接触測定装置<sup>1) 2)</sup>は、車両屋根上に設置し、架線の静的な3次元構造を計測する装置である。センシングはレーザセンサとラインカメラにより行い、営業速度で架線設備のステレオ画像を取得し、画像処理により架線の3次元デジタルモデルを構築する。その特徴は、トロリ線だけでなく、これをちょうど架しているちょう架線や補助ちょう架線の架設位置を同時に測定できることにある。さらに、ハンガやコネクタ等の電車線金具の取り付け位置の特定も行う。電車線金具の抽出方法にはいくつかの方法があるが、現在は機械学習によって電車線金具の検出と種別特定、さらには状態良否診断までを自動で行うシステム<sup>3)</sup>を(株)明電舎と共同で開発中である(図3)。現時点では、速度130km/hで取得した画像データに対して90%以上の精度で電

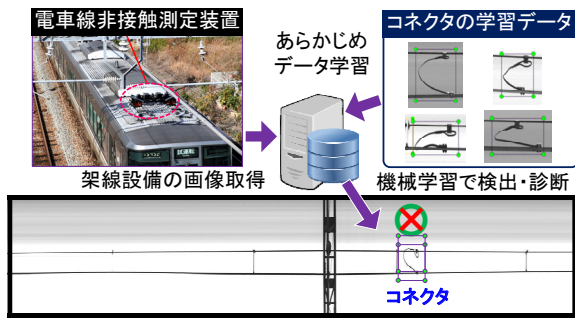


図3 電車線非接触測定装置による電車線金具の自動認識・種別判定・良否診断

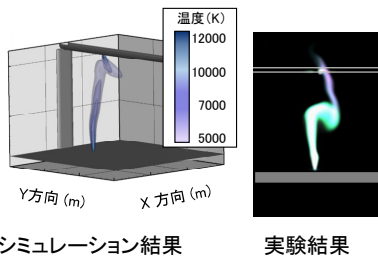


図4 直流アークのシミュレーション

車線金具の自動抽出が可能な段階であり、検出精度のさらなる向上に取り組んでいる。

### 3.2.2 実設備の挙動を再現するシミュレーション技術

鉄道総研では、鉄道システムを構成する各分野の挙動を再現するシミュレータ群と、これらを組み合わせた統合的解析ツールである鉄道シミュレータの構築を進めている。電力設備に関連するものとしては、架線・パンタグラフ系の動的挙動を精緻に再現する架線・パンタグラフシミュレータ<sup>4)</sup>の開発を進めており、前項で紹介した電車線非接触測定装置と組み合わせることによりデジタルツインの実現を目指している。

また、電力設備の損耗に大きく影響するアーク現象についても、その動的挙動を再現する3次元電磁熱流体シミュレーション(図4)の開発を東京都市大学 岩尾教授と共同で実施している。現時点ではアーク柱の動的挙動を再現できるようになった段階であるが、将来的にはアークによる設備損耗の予測を可能としたいと考えている。詳細は本号の特集論文<sup>5)</sup>を参照頂きたい。

### 3.2.3 設備の挙動から劣化進展を予測・評価する技術

電力設備のメンテナンスは、主として腐食、摩耗・摩滅、疲労等の劣化による重大なトラブルを未然に防止することを目的として実施されるが、これらの進行を定量的に予測・評価することは未だに容易ではない。そのため、こうした劣化現象の解明は、メンテナンスの効率化を実現するうえで極めて重要である。ここでは、こうした研究の一例として、現在鉄道総研が取り組んでいるトロリ線とすり板とのしゅう動に伴う摩耗現象に関わる研究<sup>6)</sup>について紹介する。

トロリ線の摩耗に対し、すり板とトロリ線との間の電

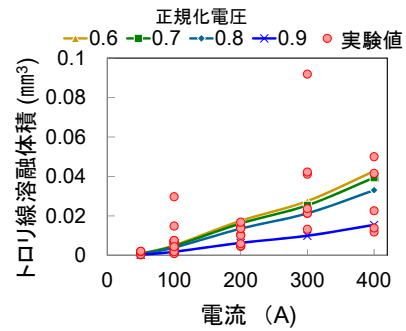


図5 鉄系焼結合金すり板のしゅう動によるトロリ線の溶融体積の推定

流は大きな影響を与える。これは、すり板とトロリ線との間の接触が良好であったとしても、電流が大きいと接触面における温度が上昇してトロリ線が溶融するためである。こうした現象を定量的に評価するため、鉄系焼結合金すり板使用時の集電電流とトロリ線溶融体積の理論式を導出するとともに、実験を行い、両者の比較を行った。その結果を図5に示す。実験結果のばらつきがやや大きいものの、理論的な推定結果と実験結果とはほぼ同様の傾向を示すことがわかる。

このほか、変電所の変圧器の余寿命評価法の研究<sup>7)</sup>、がいしピン部の腐食、塩害環境の定量化に向けた研究<sup>8)</sup>など、劣化予測に関わる多くの基礎研究を実施している。

## 4. 電力設備のプロアクティブ保全，リスク基準保全にむけて

### 4.1 プロアクティブ保全

すでに述べたように、プロアクティブ保全の本質は不具合の根本的な原因・要因の排除である。こうしたことを念頭に実施している研究開発をいくつか紹介する。

現在、変電所は基本的に遠隔操作で運用されている。そのため、変電所構内には様々な機器の制御、監視を行うためのメタルケーブルが敷設されているが、その本数が500～1000本と膨大なため、ケーブルの点検、交換作業には大きな手間を要している。これらの情報伝送をデジタル化してケーブル数を減らすことができれば、メンテナンスの容易化が期待できるため、デジタル伝送についての検討を行った。その結果、無線伝送は信頼性の面で課題があるが、イーサネット方式、電力線搬送方式については、従来のメタルケーブルと比べて80～300ms程度の伝送遅延が発生するものの伝送速度は安定しており、機器の制御、監視が目的であれば十分な信頼性で適用可能であることを確認した。詳細は本号の特集記事<sup>9)</sup>を参照頂きたい。

一方、電車線に関しては設備そのものの簡素化を行うこと、いいかえればメンテナンス対象となる部材の数そのものを減らすことが保守省力化につながる。そこ

特集：電力技術

で在来線においては、JR 東日本のインテグレート架線<sup>10)</sup>に代表される架線の簡素・統合化(き電線の省略、高圧配電線の地上ケーブル化、など)が多くの鉄道事業者において進められている。新幹線においても、コンパウンド架線から高速用ヘビーシンプル架線<sup>11)</sup>への更新による線条数の削減(3本から2本へ)がすでに東海道新幹線において進められている。鉄道総研でも、JR 東日本と共同で320km/h用ならびに360km/h用の2種類の高速シンプル架線<sup>12)</sup>を開発しており、従来のコンパウンド系架線の補助ちよう架線更新にあわせて導入することにより、メンテナンスの省力化が期待できる。

4.2 リスク基準保全

リスク基準保全の基本は、設備に内在するリスクをコストにより評価することである。鉄道総研では現在、電車線設備を対象として、不具合により生じるリスクの定量化に関わる研究<sup>13)</sup>を進めている。

電車線設備の検査データをもとに、部材毎の不具合発生頻度とその損失を評価してリスクマトリクス上にプロットした例を図6(a)に示す。この図を用いることにより、メンテナンスの優先度について定量的に検討することが可能となる。また、電車線設備のライフサイクルコスト(LCC)を、メンテナンスの複数のシナリオに対して評価した例を図6(b)に示す。

このような電力設備に対するリスク評価の研究はまだ緒に就いたばかりであり、定量的な事故データ、検査データを蓄積・収集する方法そのものにもまだ課題があるが、リスク基準保全の実現に向けて引き続き検討を進めていく予定である。

5. おわりに

本稿では、電力設備のメンテナンスに関わる最近の研究開発の方向性について紹介した。鉄道総研では、メンテナンスの省力化、効率化を図るため、今回紹介したものの以外にも様々な研究開発を行っている。鉄道の持続的発展にむけ、革新的な研究成果の創出を目指した研究活動を行っていく所存であり、引き続き鉄道事業者をはじめとする関係各位のご指導・ご協力をお願いする次第である。

文 献

1) 根津一嘉, 松村周, 網干光雄, 庭川誠, 川畑匠朗, 田林精二: ステレオ画像計測とレーザー測距を併用した架線の非接触位置測定手法, 鉄道総研報告, Vol.28, No.10, pp.29-

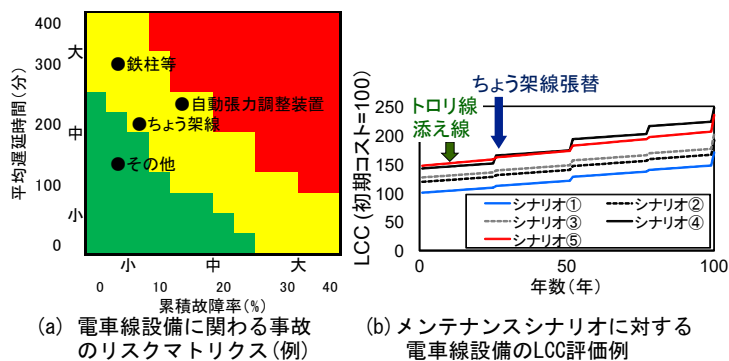


図6 電車線設備に関するリスクとライフサイクルコスト(LCC)の評価例

34, 2014

2) 松村周, 根津一嘉, 薄広歩: 電車線非接触測定装置の車両への搭載によるトロリ線静高さを測定, 電気学会交通・電気鉄道リニアドライブ合同研究会, TER-17-044, 2017

3) 北澤源基, 渡部勇介, 松村周: 深層物体検出モデルの架線金具検査への応用, 平成31年電気学会全国大会, 第5分冊 p.410, 2019

4) 小山達弥, 長尾恭平, 池田充: 任意の線形に対応した架線およびパンタグラフモデルの開発, 鉄道総研報告, Vol.32, No.6, pp.5-10, 2018

5) 以倉慶子, 早坂高雅, 岩尾徹: 接点分離時のアーク長およびその挙動解明のための基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.33, No.6, pp.35-40, 2019

6) 山下主税, 小原拓也: ジュール熱による集電材料の溶融体積推定手法, 平成29年電気学会全国大会, 第5分冊, pp.331-332, 2016

7) 赤木雅陽, 吉井剣, 今村英樹: 鉄道の運用環境を考慮した変圧器余寿命評価, 鉄道総研報告, Vol.31, No.2, pp.5-10, 2017

8) 白木理倫, 柴田直樹, 平川慎太郎, 近藤優一, 茵田洋平, 白水義人: 電車線路設備における腐食・塩害環境の定量化に向けた基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.32, No.4, pp.23-28, 2018

9) 小西武史, 森田岳, 平川慎太郎, 竹内恵一, 山口大介, 岩本功貴: き電用変電所制御回線のデジタル化における方式提案, 鉄道総研報告, Vol.33, No.6, pp.5-10, 2019

10) 相原政美, 吉田武, 大塚節二: 電路設備のインテグレート化, 第1回鉄道電気技術研究発表会論文集, pp. III 63- III 68, 1991

11) 小西弘, 小峯裕史, 安藤元, 寺田泰隆: 東海道新幹線用次世代架線の開発, 鉄道と電気技術, Vol.26, No.3, pp.9-12, 2015

12) 常本瑞樹, 清水政利, 森本大観, 山下主税, 入倉佳祐: 速度300km/h超に対応した高速シンプル架線の開発, 鉄道総研報告, Vol.33, No.6, pp.17-22, 2019

13) 早坂高雅: 電車線路設備のリスク評価に関する一考察, R&M, Vol.27, No.3, pp.39-42, 2019