

鉄道の安全性、信頼性向上に資する電気分野の基礎研究

電力技術研究部長
重枝 秀紀



1.はじめに

安全・安定輸送の確保は鉄道に課せられた重要な使命であり、電気分野においても列車衝突事故等を防止する保安システムや、電気火災事故につながる異常を早期に検出する変電所の保護装置などを対象として、安全性の向上に向けた研究開発に取り組んでいる。また、電気設備に障害が発生すると長時間の列車運転見合わせとなり、社会的に大きな影響を及ぼすケースもあることから、信頼性の向上も重要な研究開発目標となる。本講演では、電力分野、信号・通信分野の各々における、上記の目標に対する基礎的な研究開発の取り組み事例と成果活用の方向性を紹介する。

なお、本講演では鉄道固有の諸課題解決に資する研究のうち、現象の解明・予測に基づく取り組みを基礎

研究とする。また、現象を解明する上で必要な分析・実験・評価方法の構築、および革新的な技術の源泉につながる新しい技術・材料・研究手法の導入への取り組みも基礎研究として扱う。

2.安全性向上に資する基礎研究

2.1 安全性に関する課題例

電気分野における、安全性に関する鉄道固有の課題例として、信号保安装置ではコンピュータによる保安制御を行う上で、安全性理論や信頼性工学に基づいてフェールセーフな設計とした専用の機器を用いているが、近年のデジタル技術の進歩に対応する上で、そのような専用機器による構成は開発期間やコストの面で制約となっている。このため、鉄道総研ではタブレッ

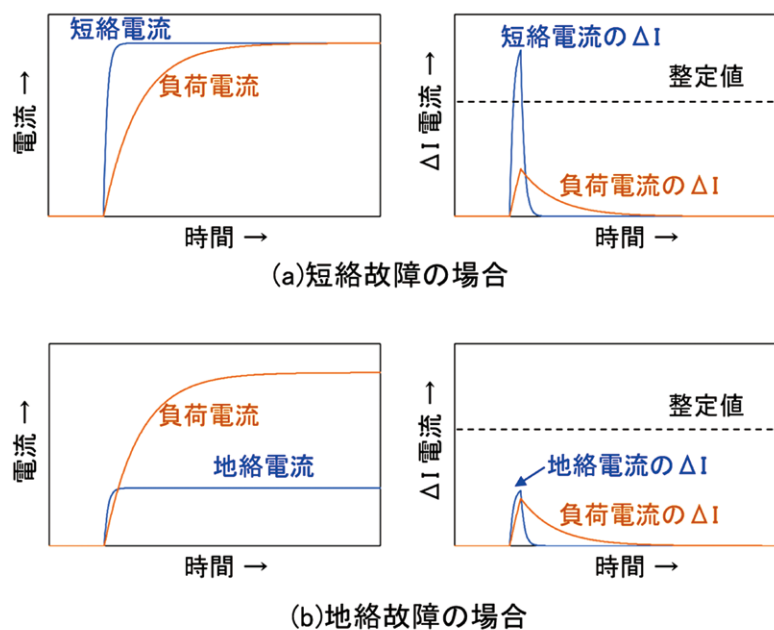


図1 故障電流と負荷電流の関係

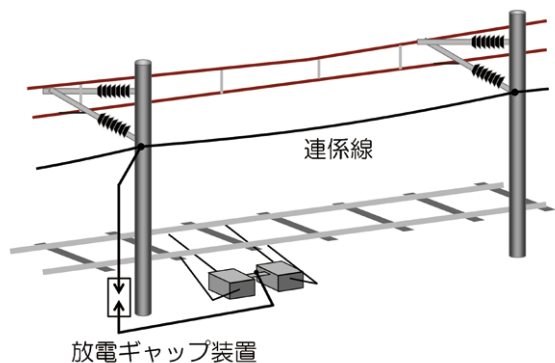


図2 放電ギャップ方式

ト端末のような汎用コンピュータ機器を、安全性を損なうことなくシステムに組み入れるための研究を行っている¹⁾。また、さらなる安全性の向上と省力化を目的として、列車の自動運転や列車運行の自律化に向けた研究開発にも取り組んでいる。

また、き電回路で短絡故障等が発生した場合の変電所の保護システムでは、直流き電回路における地絡故障保護が大きな課題である。本講演では、この課題に対して現象の分析から新たな保護手法を提案した取り組みについて紹介する。

2.2 直流き電回路における地絡故障保護²⁾

(1) 地絡故障保護の課題

直流き電回路において、断線した電車線がレールに接触するなどして短絡故障が発生した場合、短絡電流の大きさは変電所と故障点との距離にもよるが、列車の負荷電流と同じ数千アンペア程度となる場合がある。しかしながら、負荷電流と比較して短絡電流は短時間(例えば0.1秒)あたりの電流増加(これを ΔI という)が大きいという特徴があり、これを利用した ΔI 形保護継電器によって変電所で故障を検出することが可能である(図1(a))。 ΔI 形保護継電器の整定値は路線の輸送密度等によるが、都市圏の通勤路線では2000A~3000A程度となることが多い。

一方、電車線が支持物に接触するなどして大地に電流が流れる地絡故障の場合は、一般に支持物から大地を介してレールに戻るまでの電気抵抗が短絡故障より大きく、図1(b)に示すように地絡電流は負荷電流より小さくなる(これを高抵抗地絡故障という)。この場合、地絡電流の ΔI は ΔI 形保護継電器の整定値よりも小さくなるため変電所では故障を検出できず、地絡の際に支持物等で生じる火花(アーク)を乗務員等が目撃して通報し、指令所から送電を停止することとなる。

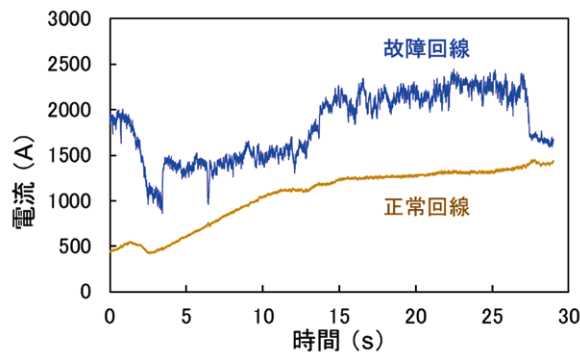
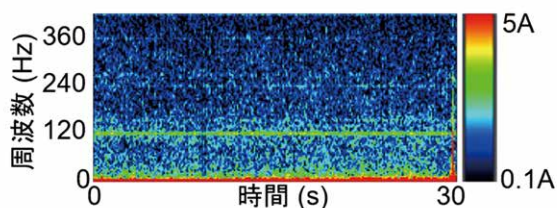
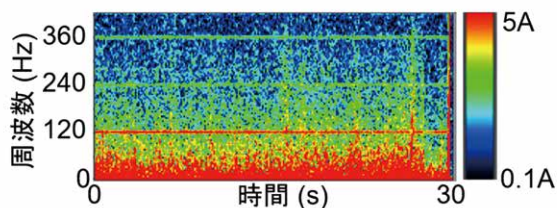


図3 地絡故障時の電流波形



(a) 正常回線



(b) 故障回線

図4 周波数分析結果

高抵抗地絡保護は長年の課題であり、これまでに様々な研究開発が行われている。図2に示す放電ギャップ方式は、支持物に地絡した場合に、支持物とレールとの間に設けた放電ギャップを放電させることで、地絡故障を短絡故障に移行させて変電所の ΔI 形保護継電器を動作させるものである³⁾。ただし、複数の支持物を関係線で接続しても数百メートルにつき1台の装置が必要であり、大規模駅構内など重要箇所保護手法として実用化されているが、全線をカバーするには相応の設備投資を要する。このため、変電所における計測データのみを用いて、数秒以内の短時間で地絡故障を検出可能な保護手法が望まれていた。

(2) 現象分析に基づく保護手法の提案

地絡故障時の電流波形例を図3に示す。正常回線の電流波形と比較して、故障回線の電流には細かな振動が認められる。これは、地絡中に支持物等で発生していたアークの影響と考えられる。この電流波形に含まれる周波数成分を分析した結果を図4に示す。図より、地

絡電流には、おおむね200Hz以下の帯域の振動成分が多く含まれるという特徴があることが明らかになった。

この分析に基づき新たに考案した検出手法を図5に示す。本手法では、変電所で計測する電流波形をフィルタリングして特徴的な周波数成分のみを抽出し、一定時間(例えば4秒間)の中でその電流の大きさが事前に設定したしきい値を超えた回数をカウントして、それを評価値とする。評価値が、別途設定する判定基準値を超えた場合に故障として検出する。

本手法を図3の電流波形に適用した結果を図6に示す。地絡電流に対しては評価値が増加するのに対し、正常時の電流に対しては評価値が変化せず、適切な判定基準値を設定することで、地絡故障を短時間で検出する可能性が示唆された。ただし、正常時であっても負荷電流の振動等によって評価値が増加する場合があります。複数の路線および変電所で正常時の評価値を計測した結果、最大値は69であった。不要動作を避けるためにこの2倍の値を判定基準値とした場合、図6のケースでは3秒程度で故障検出が可能と考えられる。

本手法は地絡時に発生するアークによる電流の揺らぎを利用するものであり、従来のΔI形保護継電器で検出困難な領域のうち、アークを伴う概ね1000A以上の地絡故障に適用可能と考えられる。本手法でも検出が困難と想定される小電流領域の故障検出手法として、デジタル技術を活用した検出手法の研究に取り組んでいる。これは、変電所と列車の電流データ等を照合して故障検出を行うものであり、さらなる安全性の向上が期待される。

3. 信頼性向上に資する基礎研究

3.1 信頼性に関する課題例

電気分野における、信頼性に関する鉄道固有の課題

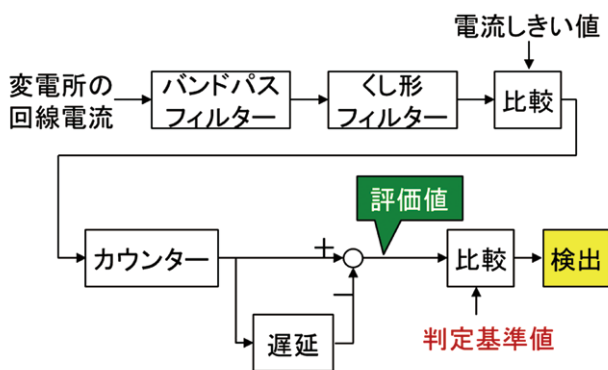


図5 提案する地絡故障検出手法

例として、電車線とパンタグラフから成る集電システムがある。これは1重系の設備であり、高い信頼性が求められることから断線等の障害防止が命題であり、メンテナンス低減の観点からも集電系材料の摩耗メカニズム解明と摩耗の抑制が課題となる。また、信号保安装置では、連動装置を始め踏切制御装置等の沿線設備にも電子機器の適用が普及しているが、信頼性と低コスト化を両立するために電子機器の適切な寿命評価が課題である。

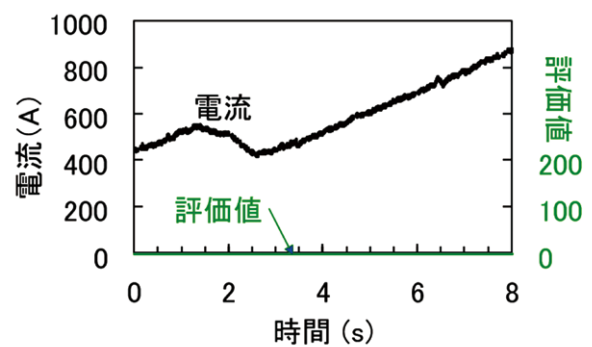
本講演では、これらの課題に対する基礎研究の取り組みを紹介する。

3.2 集電系の摩耗に関する取り組み

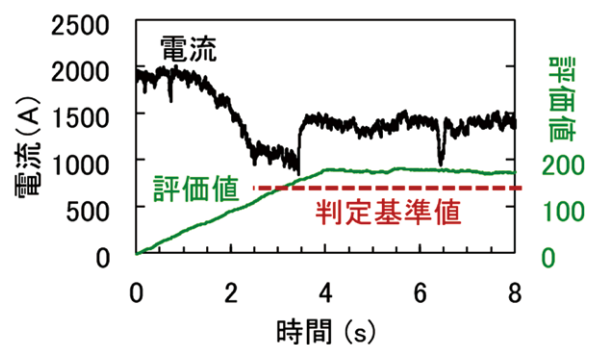
(1) トロリ線波状摩耗対策⁴⁾

JR発足後、新幹線、在来線ともに高速化が進められたが、特に新幹線の高速走行区間において、0.2m程度の規則的間隔でトロリ線が摩耗する波状摩耗がパンタグラフの離線や騒音の原因となっていた。この摩耗は、機械的摩耗が主体であると考えられたため、図7のようにパンタグラフを2列のすり板間隔と同じ間隔の2個の質点で表し、トロリ線はパンタグラフの接触力に比例して摩耗すると仮定した理論モデルに基づいて、パンタグラフ通過による波状摩耗の成長メカニズムを解析した。

図8は、トロリ線凹凸の増加比を波数と無次元化速



(a)正常回線



(b)故障回線

図6 故障電流と負荷電流の関係

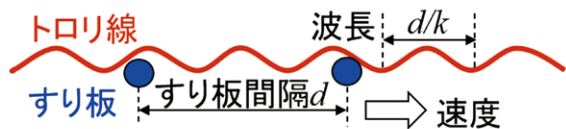
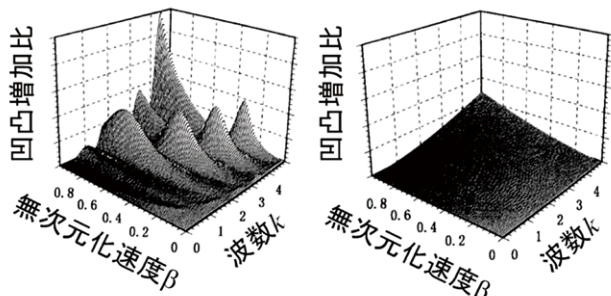


図7 理論モデル



(a) 2列すり板 (b) 1列すり板

図8 トロリ線凹凸成長の解析結果

度で示した解析結果の例である。2列すり板の場合は、パンタグラフのすり板間隔の整数分の1の波長が成長しやすいことが明らかになった。さらに、パンタグラフのすり板を2列から1列にすることで、特定の波長だけが成長することはないことも予測された。

この解析に基づいて、パンタグラフのすり板幅変更、すり板間隔混用、さらにはパンタグラフの空力音低減も兼ねた1列すり板の採用などの対策を実施した結果、図9に示すように波長約0.2mの波状摩耗の振幅は徐々に減少し、現在では消滅するに至っている。

(2) 集電系の摩耗メカニズム解明

トロリ線の波状摩耗は解決したが、メンテナンスコストの低減のためには集電材料の摩耗低減が課題となる。トロリ線のしゅう動面の様子を図10に示すが、場所によってしゅう動痕や溶融痕が見られるなど、運転条件によって摩耗形態が異なり、摩耗量が大きい箇所では保守上の注意を要する。また、摩耗には凝着、摩擦熱、通電接点の発熱など多くの要因が考えられ、摩耗メカニズムは十分解明されているとは言えない状況である。このため、要因毎の摩耗メカニズム解明に向けた基礎研究に取り組んでいる⁵⁾。

通電接点の発熱による摩耗現象を解明するため、通電しながら接触力一定のしゅう動試験が可能な直動式の摩耗試験機を考案した(図11)。この試験機では、トロリ線とすり板間の接触電圧を精密に測定することが可能であり、接触電圧から接点の温度を推定してトロリ線やすり板の表面状態と比較することで、摩耗形

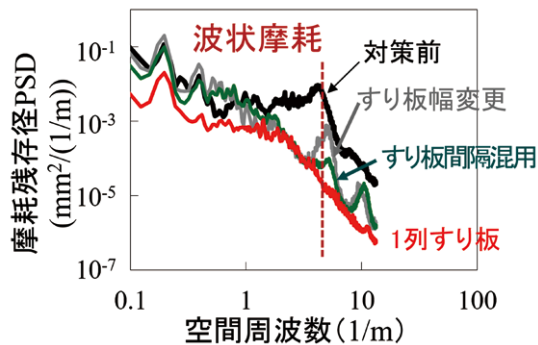
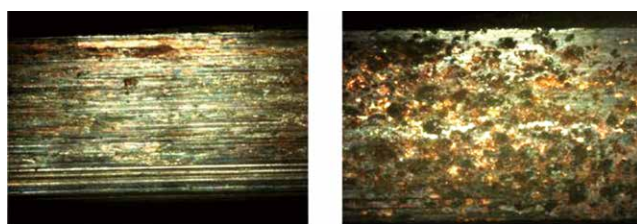


図9 波状摩耗対策の効果



(a)しゅう動痕 (b)溶融痕

図10 トロリ線しゅう動面の様子

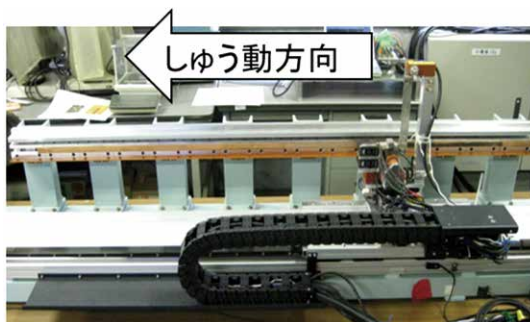


図11 直動式摩耗試験機

態を特定しようとするものである。摩擦熱による影響を排除するため、しゅう動速度は約0.2m/sとしている。試験と並行して通電接点の温度解析を実施し、小さな接点を通じて流れる電流によるトロリ線やすり板の温度上昇を予測した。図12に示す解析例は、トロリ線やすり板の表面に被膜抵抗を想定した場合の計算結果であり、すり板表面の温度が1000Kを超える状態になることを示している。

これらの取り組みの結果として作成した、集電系材料の通電摩耗形態マップを図13に示す。図において縦軸はトロリ線とすり板間の接触電圧を、横軸の接触境界係数はトロリ線とすり板の表面被膜抵抗を含む電

気抵抗の比を示す。この図は、通電接点の発熱による摩耗形態が、接点条件によって明確に異なること、すなわち、すり板のみが溶融する摩耗形態、トロリ線のみが溶融する摩耗形態、これらが混合する摩耗形態、機械的に摩耗する形態に区分できることを示している。これらの摩耗形態の違いは、トロリ線とすり板の融点や電気抵抗率の違いから生じるものである。

引き続き、しゅう動する際の摩擦熱や、すり板部材の内部温度、トロリ線のジグザグ偏位、列車風の影響などを考慮した摩耗メカニズムの解明に取り組んでおり、しゅう動速度を上げられる回転摩耗試験機を製作した(図14)。この試験機では回転状態でも熱起電力を精密に測定でき、熱起電力から接点の温度を推定することが可能である。また、新たに導入する高速パンタグラフ試験装置において、実物のパンタグラフを用いた高速しゅう動試験を行う予定である。

これらの基礎研究の成果を基に、著大摩耗の抑制策や集電系材料の設計指針を提案したいと考えている。

3.3 電子機器の寿命評価に関する取り組み⁶⁾⁷⁾

(1) 寿命管理上の課題

信号保安装置の電子機器は様々なストレス環境下で使用され、劣化の主要因や劣化の傾向が不明であること

から、従来は環境や機器によらず一律に寿命を設定しており、使用環境を考慮した寿命評価手法の確立が課題であった。このため、各機器の故障実態と環境ストレス要因を詳細に調査するとともに、機器の構成要素毎に各環境ストレスに対する劣化モードと期待寿命を分析した結果に基づいて、電子機器の寿命評価を行うこととした。

(2) 電子機器の故障実態調査

電子機器を構成する電子部品の故障分布は、故障率と経過年数との関係で見ると、一般にバスタブカーブとよばれる初期故障期、偶発故障期、摩耗故障期の3期間に大別され(図15)、摩耗故障期が訪れる前に機器の更新を行う必要がある。電子機器の故障実態を把握するため、劣化に起因する10年分の故障データを装置製作メーカーより収集し、空調の完備された機器室内で使用される屋内電子機器と、線路沿いの器具箱内で使用される沿線電子機器を区別して分析した結果、図16に例示するように半導体部品に関する故障傾向に大きな差異が認められた。すなわち、屋内電子機器では累積故障件数が経年とともに線形的な増加傾向となる一方、沿線電子機器では指数関数的な増加傾向となっている。これは、使用期間中に摩耗故障期に至っ

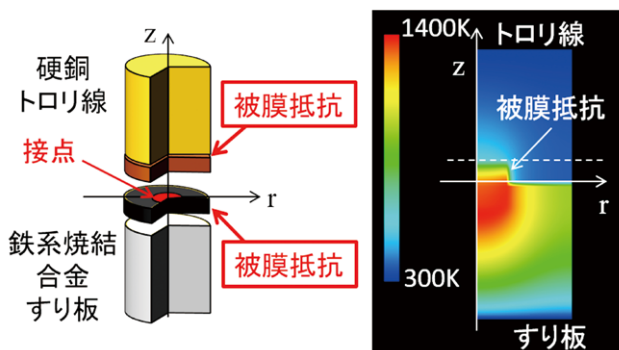


図12 通電接点の温度上昇解析例

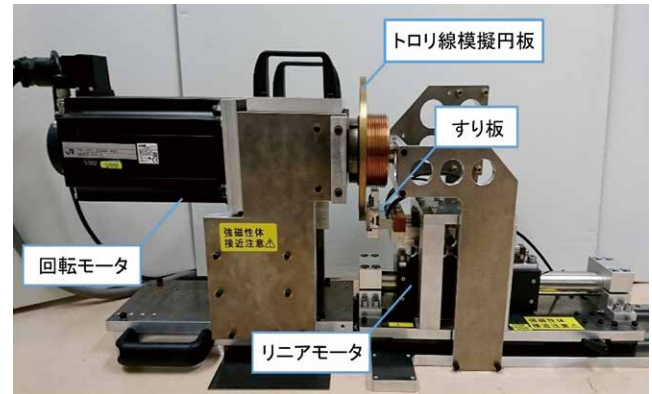


図14 回転摩耗試験機

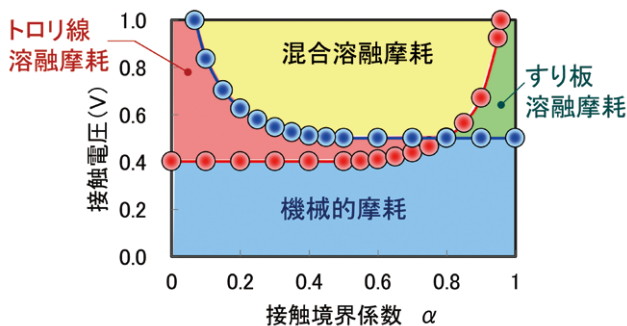


図13 通電摩耗形態マップ

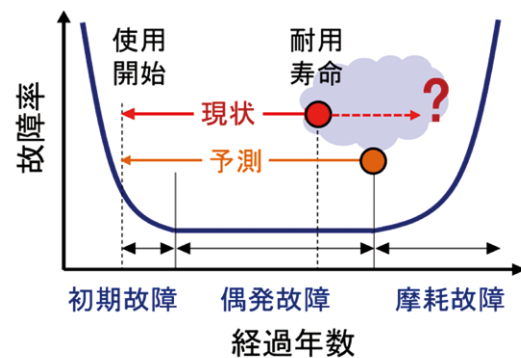


図15 バスタブカーブ

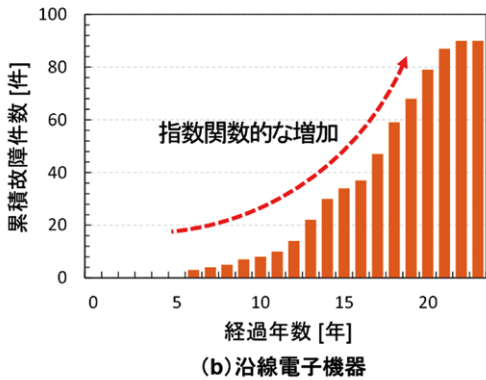
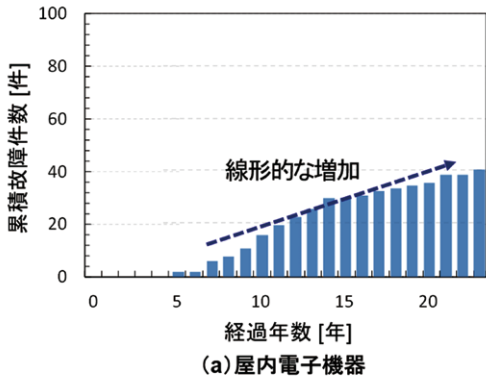


図16 半導体部品の故障傾向

ている可能性を示唆している。

(3) 電子機器のストレス要因調査

屋内電子機器は、安定した環境下での使用となるため、主なストレス要因は定常温度と機器の電圧・電流負荷となる。一方、沿線電子機器のストレス要因として、国内の寒冷地、中間地、温暖地にて器具箱内外の温湿度、腐食性ガス、振動などの使用環境を調査した。器具箱内温度は、直射日光による温度上昇を防ぐ遮蔽板の有無により異なり、最高温度と温度変化量に大きな差がみられること、また、湿度は器具箱の密閉度合いにより異なることを確認した。一方、腐食性ガスは、濃度測定の結果、基準値以下の良好な環境であることを確認した。また、器具箱内の振動加速度もJIS規格(JIS E 3014)の基準値内に収まることを確認した。

以上より、器具箱内におけるストレス主要因は、定常温度、温度変化、湿度の環境ストレスと、電圧・電流負荷の動作ストレスであると考えられる。

(4) 寿命評価手法の提案

鉄道事業者が実施した撤去品調査結果より、温度変化にともなう熱膨張・収縮に起因する電子部品と基板との接合部(はんだ)のクラック(以下、はんだクラック)が観測されている。そのため、電子機器の寿命予

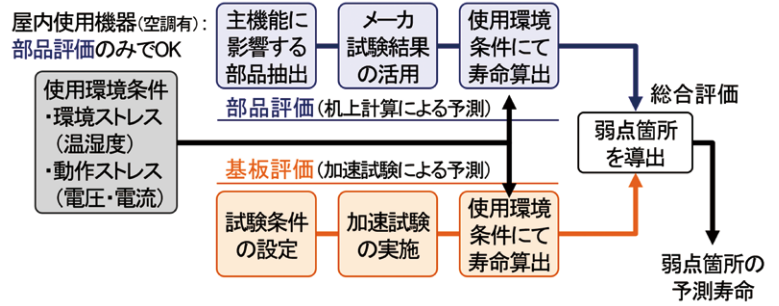


図17 提案する寿命評価手法

測は図17に示す電子部品の寿命予測(以下、部品評価)と接合部を含む基板の寿命予測(以下、基板評価)の二つのアプローチで実施することとした。

部品評価では、部品メーカー実施の信頼性試験結果を活用し、実使用環境下での累積故障確率を推定する。一方、基板評価では、はんだクラックを再現するため温度サイクル試験を実施し、修正コフィン・マンソン則を適用することで実時間への換算を行う。

これら部品評価と基板評価で構成した寿命評価手法により、電子機器の使用環境に応じて、最短で故障となる箇所・部品・要因を導出する。

(5) ケーススタディ

鉄道総研所内試験線にある遮蔽板あり器具箱内と遮蔽板なし器具箱内に収容された踏切用列車検知装置に、寿命評価手法を適用した。

部品評価では、主機能への影響が推定される部品を抽出し、部品メーカーより信頼性試験結果を入手して、累積故障確率1%に至る寿命時間を推定した結果、寿命最短部品はCPU用の半導体となり、遮蔽板ありの場合29.5年、なしの場合27.5年となった。

基板評価では、 $-20^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ の温度サイクルを8時間ごとに実施し、100サイクル経過ごとに供試体を取り出し、機能検査とはんだ面の外観観察を行った。はんだ厚さに対してクラックが50%以上進展した時点を寿命と定義し、図18の試験結果から500サイクルを寿命の目安とした。ここで、修正コフィン・マンソン則を適用し、実使用条件に換算すると、500サイクルは遮蔽板ありで41年相当、遮蔽板なしで17年相当となる。

部品評価と基板評価の結果、遮蔽板ありの器具箱内で使用している場合、最短は半導体寿命となり29.5年、遮蔽板なしの器具箱内の場合、最短は基板寿命となり17年が目安の寿命といえる。

(6) 寿命評価手法の活用方針

機器のライフサイクルにおける寿命評価手法の活用

方針を示す。

設計・開発段階では、設計上の耐用寿命を設定する上で、要注意部品の特定や有寿命部品の削減／集約に反映する。また、使用環境の改善策も考慮する。

運用段階では、直接センシングによる故障予兆監視に加えて、使用環境の監視による設計耐用寿命予測値のトレース・補正を行うことを目指す。

こうした監視を行いながら、線区重要度や劣化進行度を考慮した計画的な更新・延命措置を実施することで、信頼性を確保しつつ低コスト化が図られると期待される。

4. 今後の基礎研究課題

電気分野における研究開発の方向性として、安全性・信頼性の向上は第一の目標であり、障害の未然防止、異常の早期検出に資する現象の解明・予測とともに、デジタル技術の導入による更なる安全性・信頼性の向上にも取り組む必要がある。一方、今後加速する少子高齢化に加えて、昨今のコロナ禍による経済環境や人の流動の変化に伴い、省力化を中心とする低コスト化に資する研究開発、また、利便性の向上を始めとする鉄道の魅力向上に資する研究開発において、これまで以上のスピード感で成果を出すことが求められる。さらに、地球温暖化防止に向けCO₂など温室効果ガスの排出量削減に資する取り組みに対する社会的要請も大きい。これらの状況を踏まえて我々が考える基礎研究課題をいくつか例示する。

障害の未然防止等に資する現象の解明・予測への取り組みとして、数値解析に基づくアークの現象解明がある。通電中の接点が開離する際に生じるアークは、集電材料の溶融摩耗に影響する要因の一つである。また、電車線を電氣的に区分するために設けるエアセクション箇所において、停車した列車のパンタグラフとトロッコ線の間にはアークが発生すると、トロッコ線の断線

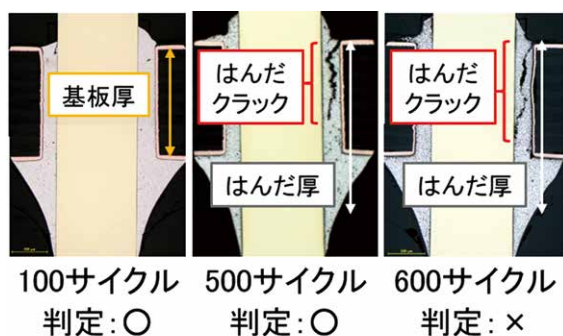


図18 温度サイクル試験結果

に至る場合がある。アークの発生・消滅条件やアークによる温度上昇などの現象解明は、従来実験に基づいて行われているが、目的によっては高電圧・大電流の条件が必要となり、全てを実験で解明するのは困難である。このため、シミュレーションによるアークの挙動、温度分布等の解析に着手している(図19)。

デジタル技術の導入による安全性・信頼性の向上への取り組みとして、列車の自動運転等を行う上で必要となる、現在乗務員が行っている列車前方の監視と線路内の異常検知の自動化がある。これまで、カメラ画像をAIで認識する手法の精度向上に取り組んでいるが、夜間など視界不良の状況では性能が低下する課題があり、可視画像以外の様々なセンサと組み合わせることで、2022年度までに昼夜を問わず300m先の支障物を検知する技術を確認することを目指している。また、安全システムにAIを適用するには、万が一AIの判断によって事故が生じた場合に、判断のプロセスや根拠などを明らかにできることが求められる。このため、AIによる判断の検証・評価手法の研究にも取り組む予定である。

その他、異常検知などにAIを適用する際に、測定データからAI用の学習データを手動で生成する必要があり、多くの労力を要する。このため、鉄道に適した学習データを自動的に生成する手法の研究に着手している。

また、鉄道におけるデジタル技術の活用を進めるうえで重要な課題の一つに、通信リソースの確保がある。特に走行中の列車と地上間の無線通信に対しては、センシングデータや動画などの大容量のデータの伝送や、列車の制御など高信頼のデータ伝送へのニーズが高まっており、より広い帯域で多くのチャンネル数確保が期待できるミリ波帯の活用を検討している⁸⁾。さらに、間もなくサービス開始となる5Gなど、新しい公衆網や汎用の無線通信技術も、より安全で安定した列車の

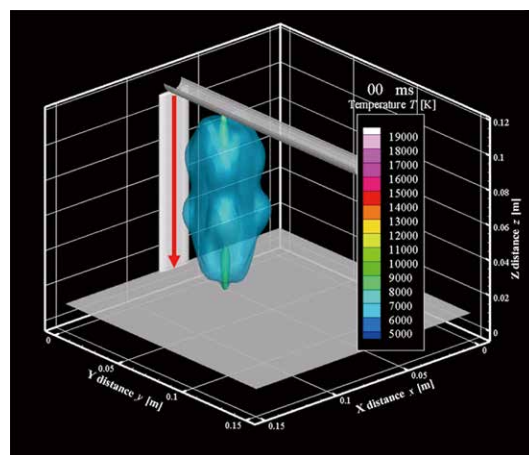


図19 シミュレーションによるアークの解析例

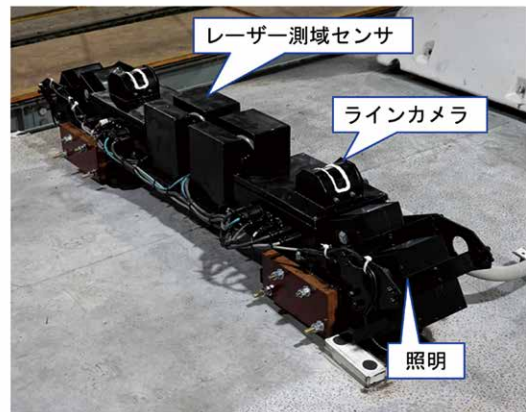
運行を実現するためのツール・手段として積極的に活用していく必要があると考えられる。ただし、高い信頼性・安全性が要求される情報を必要な時に確実に伝送するためには、耐妨害性や通信品質の安定性に関する基礎的な課題を克服していく必要があり、5G活用に関する研究開発にも取り組む予定である。

低コスト化に資する研究課題としては、デジタル技術を活用した検査・診断の自動化による保守の省力化がある。例えば、電車線設備についてはカメラやレーザーセンサを用いた非接触測定装置(図20)を既に開発し⁹⁾、そこで取得した画像データ等に基づきAIによる設備診断を行う技術の確立を目指している。また、光切断法を適用したトロリ線摩耗計測の高精度化にも取り組んでいる¹⁰⁾。これらは主に画像認識技術によるものであるが、電気設備で従来計測している電圧・電流等の他、他の地上設備や車両でも様々なデジタル計測が行われており、それらを集約・照合して電気設備の状態監視や異常・予兆の検知につながる新たな指標を抽出する研究にも取り組む。

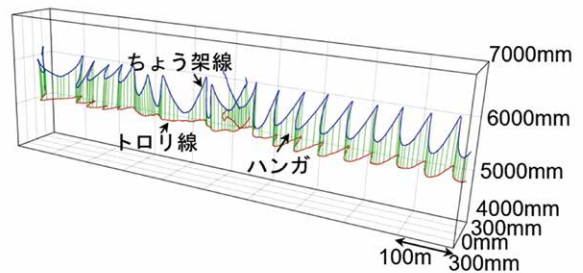
最後に、鉄道の更なる低炭素化に向けた取り組みを紹介する。エネルギー消費の低減は低炭素化の基本であり、電力料金の削減など経済的メリットもあるが、再生エネルギーの有効利用を目的とした蓄電装置など設備投資を要する施策は、導入に際して費用対効果を考慮する必要がある。一方、低炭素化には使用する電気エネルギーのCO₂排出係数低減も必要であり、再生可能エネルギーを含む非化石エネルギーによる発電量は増加傾向にある。しかし、太陽光発電などの発電量の変動が電力システムの安定性に及ぼす影響が懸念されており、電力需給を調整する手段の多様化が求められる。このため、従来の省エネルギー化に向けた取り組みに加えて、再生可能エネルギーの積極的利活用に向けて蓄電装置を含む鉄道の電力ネットワークを需給調整に利用する研究に着手している。

参考文献

- 1) 祇園昭宏, 岩田浩司: 高い安全性を要する用途への汎用モバイル端末の適用, 鉄道総研報告, Vol.33, No.7, pp.35-40, 2019
- 2) 森本大観, 樋口靖展, 赤木雅陽: 大電流のアークを伴う直流高抵抗地絡の検出手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.9, pp.41-46, 2020
- 3) 田中裕, 伊東利勝, 出野市郎, 筋野健吾: 放電ギャップを用いた直流き電回路保護方式, 鉄道総研報告, Vol.2, No.8, pp.47-52, 1988



(a)外観



(b)測定データ例

図20 電車線非接触測定装置

- 4) 藤井保和, 久須美俊一, 網干光雄, 真鍋克士: 新幹線のトロリ線波状摩耗, 鉄道総研報告, Vol.6, No.9, pp.5-12, 1992
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 国崎愛子, 藤田浩由, 野村拓也, 石井琢: 鉄道沿線信号設備における電子機器の寿命予測手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.7, pp.11-16, 2020
- 8) 川崎邦弘, 中村一城: ミリ波技術の鉄道応用に関する動向, 鉄道総研報告, Vol.30, No.1, pp.51-54, 2016
- 9) 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.29-34, 2014
- 10) 薄広歩, 根津一嘉, 松村周: 光切断法を適用したトロリ線断面形状測定的基础研究: 鉄道総研報告, Vol.33, No.6, pp.29-34, 2019