

電車線コネクターの断線事象根絶を目指す 耐疲労性向上に関する研究



小原 拓也
Takuya Ohara
電力技術研究部
集電管理研究室
副主任研究員



山下 主税
Chikara Yamashita
電力技術研究部
集電管理研究室長

はじめに

電車線コネクター(図1。以下、「コネクター」)は架線の線条(ちょう架線やトロリー線)間を電氣的に接続する金具です。コネクターには、架線の線条間の電位差を小さくして同線条やほかの電車線金具に不要な電流が流れることを防ぐ役割や、電流経路となる役割があります。コネクターのリード線には軟銅より線などの曲がりやすい電線が使用されていますが、列車通過時の架線振動によって疲労し、最悪の場合は図2のように断線してしまうこともあります。しかし、これまでコネクターが疲労断線に至る詳細

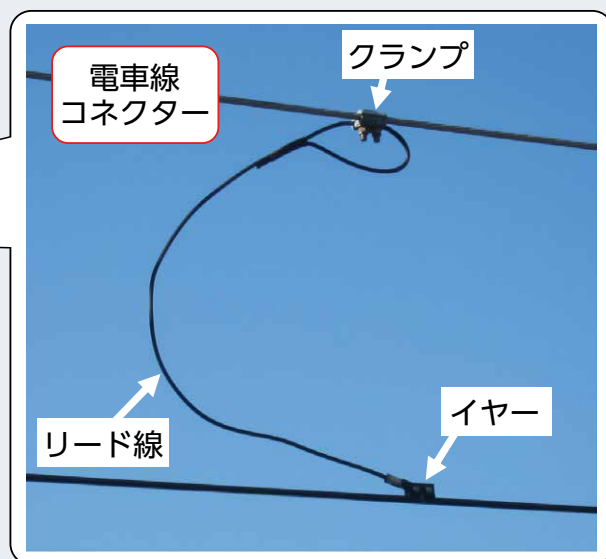
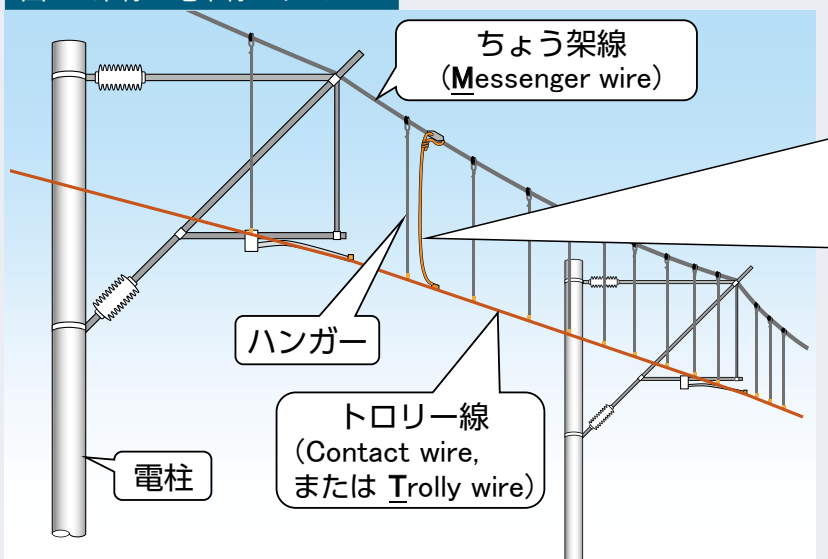
なメカニズムは未解明でした。

そこで鉄道総研では、コネクターの疲労断線根絶を目指した基礎研究を進めています。本記事では、コネクターの設計と保守の両面に向けた取り組みをご紹介します。なお、本記事で扱う架線は**シンプル架線**®とし、ちょう架線(Messenger wire)とトロリー線(Trolley wire)を接続するM-Tコネクターについて述べます。

シンプル架線

ちょう架線とトロリー線の2本の線条で構成された架線の方式のことです。

図1 架線と電車線コネクター



疲労に強いコネクターの設計

コネクターの疲労寿命推定

疲労に強いコネクターを設計するためには、現場でどれだけの疲労損傷が発生し、どれだけの寿命になるか、つまり疲労寿命を推定する必要があります。そのために、まずコネクターの挙動を解析により把握することから始めました。コネクターのリード線には「より線」が用いられていますが、より線を構成する素線を全てモデル化し、かつ素線間の摩擦を考慮することは非常に困難です。そこで、[図3](#)のように有限要素法^①を用いて、より線を単線に置き換えて解析する手法を提案しました¹⁾。この単線の曲がりやすさや質量、減衰の特性は、より線と同等になるように実験で求めたものです。このモデルに実際のトロリー線とちょう架線の振動を入力することで、パンタグラフ通過時のコネクターの挙動や発生する応力が推定可能になりました。

ただし、リード線を単線に置き換えたため、解析で得られる応力は実際とは異なります。そこで、[図4](#)のようにリード線の曲率半径^②に対する疲労寿命を疲労試験により求め、さらにその曲率半径と単線に発生する応力とを結び付けることで、解析上の応力で実際にどれだけの寿

図2 疲労破断したコネクターリード線（所内試験）

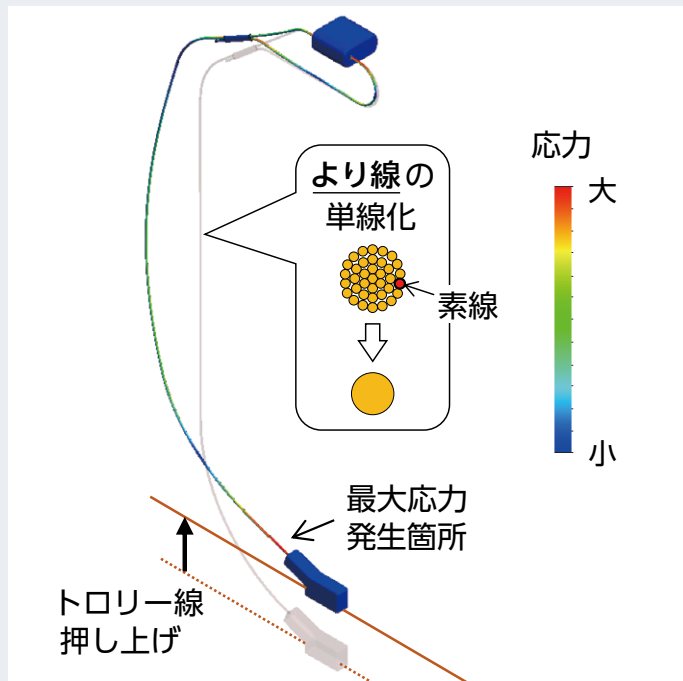
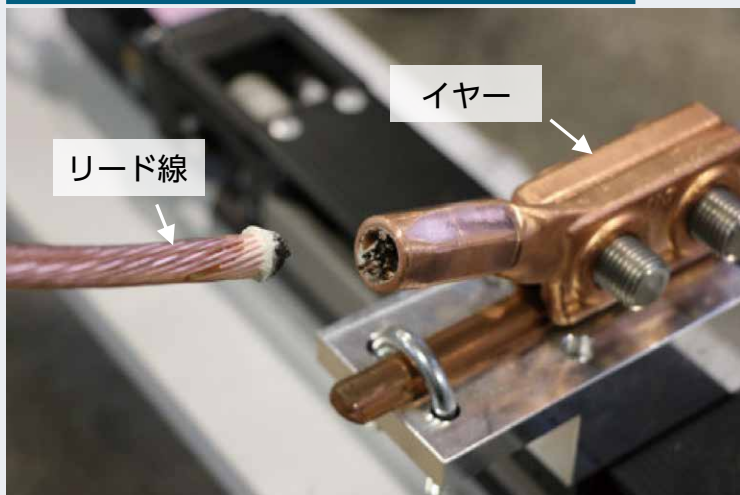
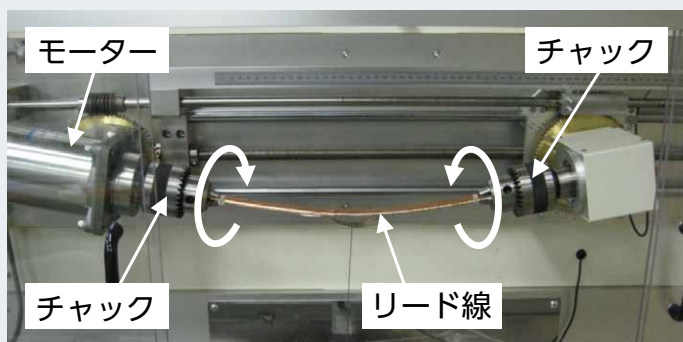
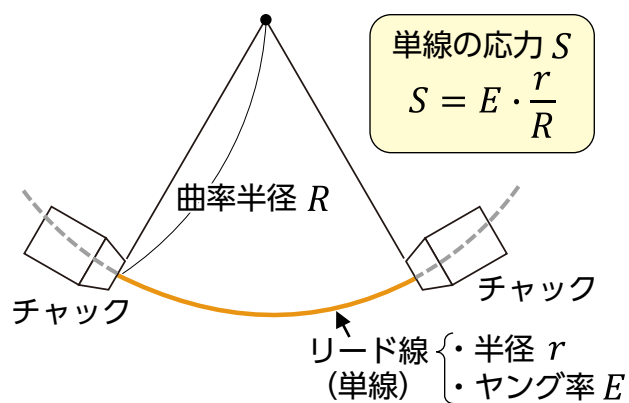


図3 コネクターの有限要素解析



(a) 疲労試験の様子



(b) リード線の曲率半径と応力

図4 リード線の疲労試験

有限要素法

物体を小さな要素に分割し、各要素の特性を単純な数学モデルで近似して計算することで、物体全体の挙動を解析する手法です。

リード線の曲率半径

曲がっているリード線を円弧とみなしたときの、円弧の半径のことです。

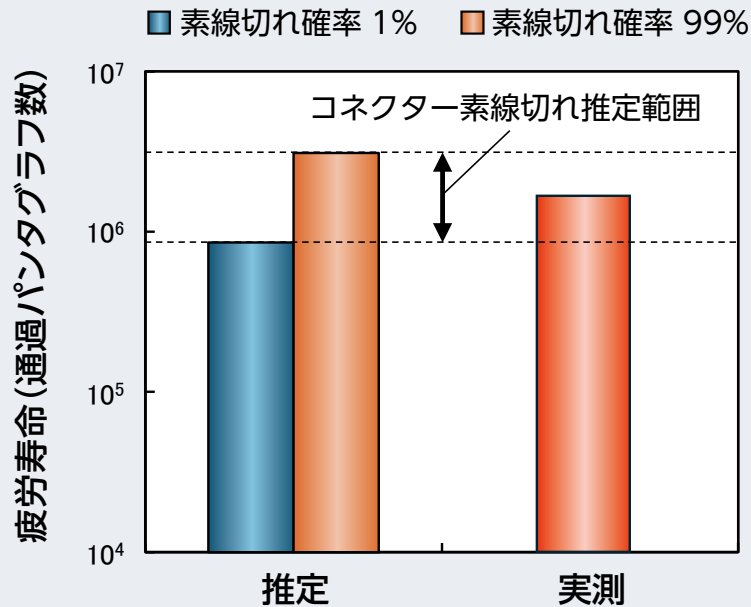


図5 コネクタの疲労寿命推定結果¹⁾

命になるかが推定可能になりました。

提案した手法の妥当性を確認するため、現場でM-Tコネクタの素線切れが発生したケースについて、素線切れ発生までの実際のパンタグラフ通過数と、解析で推定したパンタグラフ通過数の比較を行いました(図5)。図5の左側の2つの棒グラフは、素線切れ発生の統計的な確率が1%および99%の疲労寿命(パンタグラフ通過数)を示しており、素線切れの推定寿命はこれらの疲労寿命の範囲で表されます。この図から、素線切れ推定寿命範囲内に実際の値が入っており、提案した手法が妥当であることが確認できました。

コネクタの2つの疲労形態

パンタグラフ通過時のコネクタの挙動や応力を解析できるようになると、どのような条件で疲労が促進されるかがわかります。解析の結果、コネクタには図6のような2種類の疲労形態があることがわかりました²⁾。

1つ目は、ちょう架線とトロリー線の振動変位の差(以下、「架線相対変位」)により、コネクタが押しつぶされるように変形することに

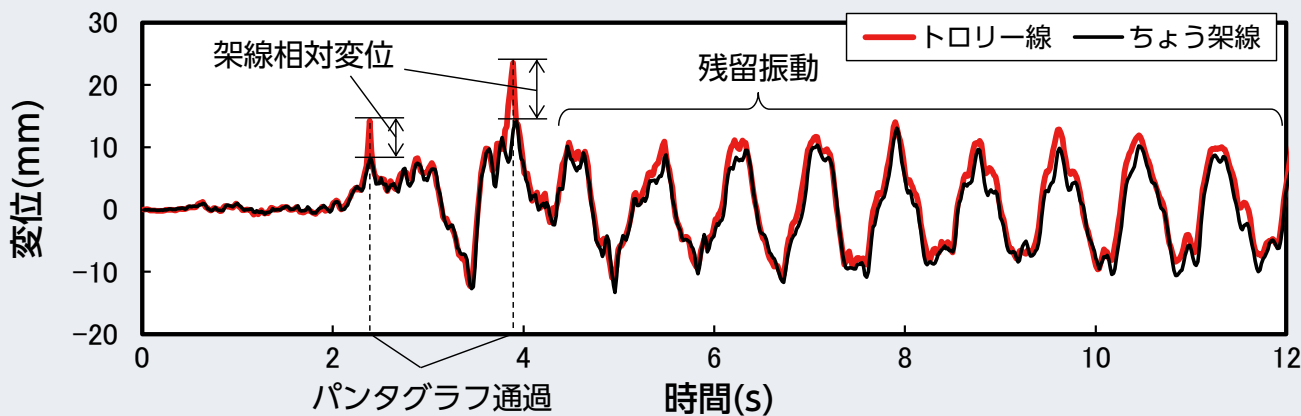
よる疲労です。この変形は主にパンタグラフ通過の瞬間に発生するため、コネクタの変形回数(最大応力の発生回数)はパンタグラフの通過数と等しくなります。[架線・パンタグラフ系シミュレーション](#)[®]の結果、架線相対変位が増加する要因は、列車速度の増加やパンタグラフ押上力の増加などであることがわかりました。また、架線の張力を適切に保つことや、コネクタ近くの[ハンガー浮き](#)[®]を抑制することで、架線相対変位を小さくできることがわかりました。なお、コネクタの設計において、架線相対変位による変形をなるべく小さくする形状とす

架線・パンタグラフ系シミュレーション

列車走行時の架線とパンタグラフの運動をコンピュータ上で模擬する手法のことです。この記事では鉄道総研が開発したシミュレーターを使用しており、列車速度や架線条件などを設定したうえで、架線の変位やパンタグラフの接触力などを算出できます。

ハンガー浮き

架線構成の不良などが原因で、ハンガーにトロリー線の荷重がかかっていない状態のことです。



疲労形態 1

架線相対変位による疲労

発生タイミング：
パンタグラフ通過の瞬間

疲労形態 2

コネクタの共振による疲労

発生タイミング：
残留振動

図6 架線振動変位とコネクタの疲労形態

ることも重要です。2つ目は、コネクタが架線と共振して変形することによる疲労です。コネクタの共振は、パンタグラフ通過後の架線残留振動の周波数(1~5Hz)とコネクタの固有振動数³⁾が一致することで発生します。共振が発生すると、リード線に大きな曲げ応力が繰り返し加わるため、短期間で破断に至るおそれがあります。架線の振動周波数は、電柱や高架橋の振動の影響を受けます。そのため、振動周波数を架線側だけで調節することは困難であり、コネクタの設計で対策する必要があります。

コネクタの設計

コネクタの疲労形態が明らかになったため、以下の点を考慮して疲労に強いコネクタの設計を行いました³⁾。

- (1) 架線相対変位に対するリード線の曲げ応力を小さくする。

固有振動数

ある物体が自由振動するときの振動数のことです。物体をその固有振動数で加振すると大きく振動(共振)します。

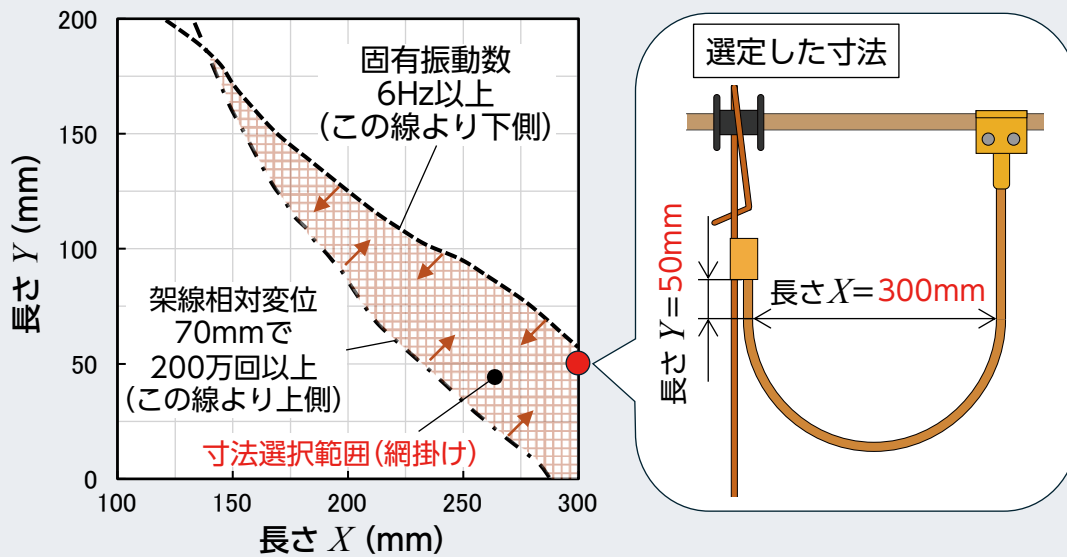
- (2) コネクタの固有振動数と架線振動の周波数を一致させない。

図7(a)は、新幹線用に設計したコネクタの例です。本コネクタは、リード線をトロリー線ではなくハンガーに接続します。これにより、通常よりもリード線を短くでき、コネクタの固有振動数を大きくすることができます。ただし、リード線を短くしすぎると、架線相対変位に対するリード線の応力が大きくなるというトレードオフの関係があります。

そこで、コネクタの有限要素解析を用いて、200万回の架線相対変位に対して十分な疲労寿命を有し、かつコネクタの固有振動数を架線残留振動の主要な周波数(最大5Hz程度)よりも大きくできるリード線の寸法を算出しました(図7(b))。開発したコネクタについて、定置の振動試験で、70mmの架線相対変位に対しても200万回以上の疲労寿命を有することを確認しました。また、営業線において従前ではコネクタに共振が発生していた箇所に開発したコネクタを設置し、共振が発生しなくなることを確認しています。



(a) 外観



(b) リード線寸法の選定

図7 耐疲労性の高いコネクタの例³⁾

コネクタの保守に関する研究

ここからは、コネクタの保守に関する研究についてご紹介します。コネクタ単体では設計上の問題がなくても、取り付け方や架線の流れ¹⁾などによるコネクタ形状の崩れ、高架橋や電柱の振動、ハンガー浮きなど、さまざまな要因が重なって疲労断線しやすい状況になってしまうことがあります。

そこで鉄道総研では、コネクタが架線に取り付けられている状態で、疲労断線の可能性を

架線の流れ

線路勾配や気象条件などが原因で、架線全体が片側の引留区間の端部に偏る現象のことです。

判定する手法の開発に取り組んでいます。この手法では、まず図8のように車両の屋根上に設置したカメラでコネクタを撮影し、画像解析技術により図9のようにリード線の3次元形状を取得します⁴⁾。次に、取得したリード線形状から図10のような疲労に影響するパラメータを抽出し、リード線の応力やコネクタの固有振動数を解析で求めます。最後に、架線・パンタグラフ系シミュレーションによる架線相対変位や残留振動周波数の解析結果、および、電柱や高架橋の固有振動数のデータに基づいてコネクタの疲労損傷を推定し、対象とするコネクタが取替寿命前に断線するかを判定します。

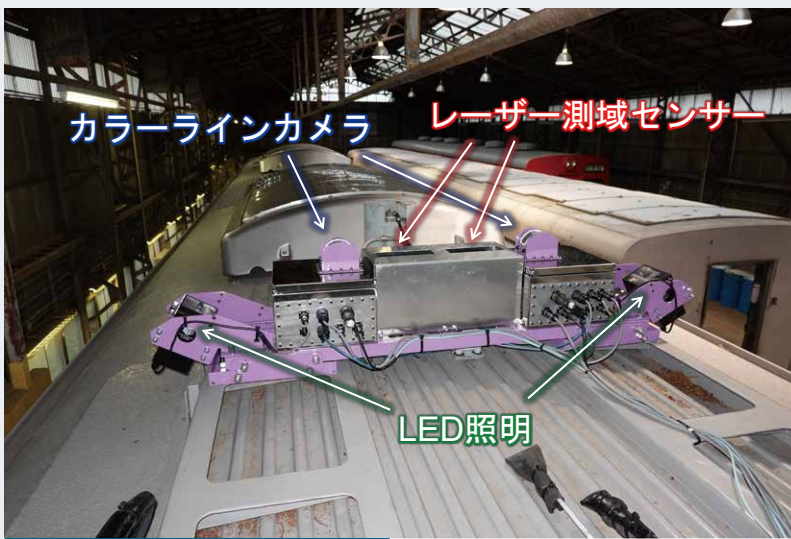


図8 架線の非接触測定装置

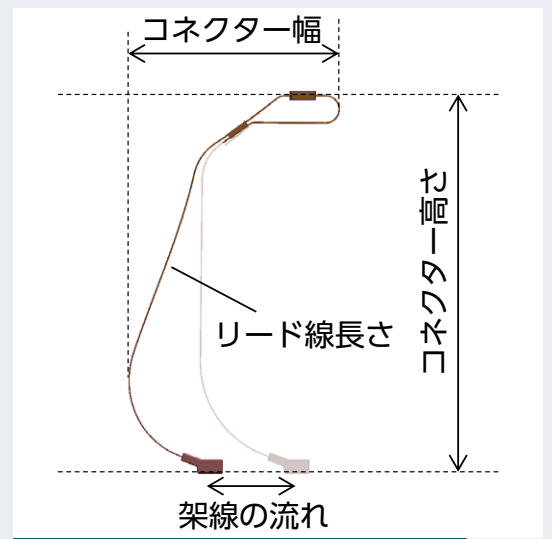


図10 コネクタの疲労に影響するパラメーターの例

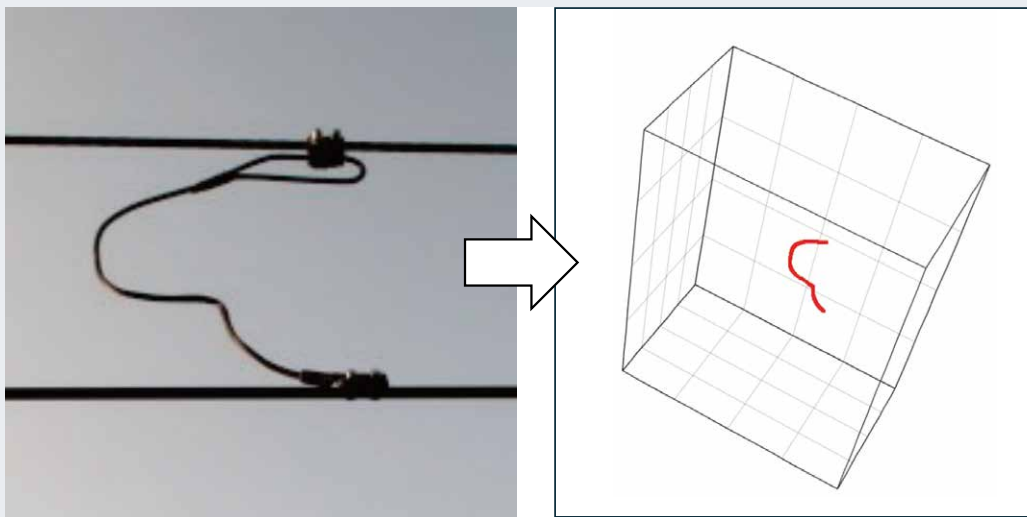


図9 コネクタリード線の3次元形状の取得⁴⁾

この新しい手法のポイントは、リード線形状におけるどのパラメーターが疲労損傷にどれだけ影響するか、という知見です。ここに、コネクタの解析技術や架線振動解析技術など、前章までに紹介した基礎研究が活かされています。

おわりに

本記事では、コネクタの断線事象根絶に向けた取り組みをご紹介しました。近年、コネクタを含む電車線金具の異常検出に関する取り組みは盛んに行われています⁵⁾が、故障リスクを減らすためには、なぜ異常になったのか、どうすれば異常を抑制できるのかを知ることがと

ても重要です。また、電車線設備のさらなる信頼性向上を目指すためには、電車線金具の破損前に対策をする予防保全が必要と考えられます。

これからもコネクタの設計と保守、両面から研究を続けてまいります。RRR

文献

- 1) 山下主税, 小原拓也, 松村周: 有限要素法を用いた電車線コネクタの疲労寿命推定手法, 鉄道総研報告, Vol.28, No.10, pp.23-28, 2014
- 2) 山下主税, 小原拓也, 小林樹幸: 電車線コネクタの疲労対策, 鉄道総研報告, Vol.32, No.4, pp.17-22, 2018
- 3) 小原拓也, 山下主税: 共振による疲労損傷を防止する新幹線用電車線コネクタの開発, 第31回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (J-RAIL 2024), SS2-9-5, 2024
- 4) 松村周, 小原拓也, 山下主税: 車載カメラによる電車線コネクタの3次元形状計測手法, 第31回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (J-RAIL 2024), SS2-9-4, 2024
- 5) 松村周, 根津一嘉: レーザーセンサーと画像解析技術で架線の検査を省力化する, RRR, Vol.78, No.8, pp.4-7, 2021