

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# 電車線コネクタの疲労寿命を予測する

電車線のトロリー線やちょう架線などの線条間を電氣的に接続するコネクタには、電車線の振動に伴い疲労損傷が蓄積します。コネクタの疲労破断を防ぎ、設備信頼性を向上させるためには、疲労寿命の予測や耐疲労性の向上が重要になります。本稿では、コネクタリード線の疲労寿命特性を把握するための疲労試験方法や、有限要素法解析によるコネクタ疲労寿命の推定手法について紹介します。

## コネクタの役割

電気鉄道では、車両に電力を供給するために、電車線とパンタグラフが接触しながら走行しています(図1)。高速走行時でもトロリー線とパンタグラフの接触を維持するためには、トロリー線の架設高さをなるべく一定にする必要があります。そこで、図1のようにちょう架線からハンガーを介してトロリー線をつる、いわゆるカテナリー方式が一般に使われています。

電車線を構成するトロリー線やちょう架線には大きな電圧が加わっています。しかし、両者の電位に差があると、ハンガーやほかの部材を通して大きな電流が流れてしまいます。この電流を

「循環電流」と呼んでいます。循環電流によってハンガーの接続部などが加熱されると、ハンガーの折損や電線の溶断などの事故が発生する恐れがあります。

この循環電流を抑制するため、電車線を構成する線と線を電氣的に接続し、電位差を生じさせない目的で設置されている金具が「コネクタ」です。ちょう架線がき電線の役割を兼ねている場合は、コネクタはちょう架線からトロリー線に電流を分流する役割も担います。

ちょう架線 (Messenger wire) とトロリー線 (Trolley wire) を接続する、通称MTコネクタ(図2)は、一般的



**山下 主税**  
Chikara Yamashita  
電力技術研究部  
集電管理研究室  
主任研究員  
【専門分野】 トライボロジー、金属疲労



**小原 拓也**  
Takuya Ohara  
電力技術研究部  
集電管理研究室  
研究員  
【専門分野】 機械工学

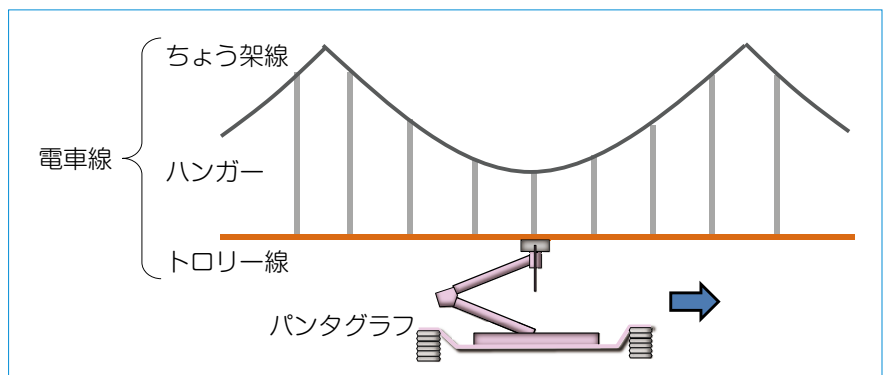


図1 電車線とパンタグラフ

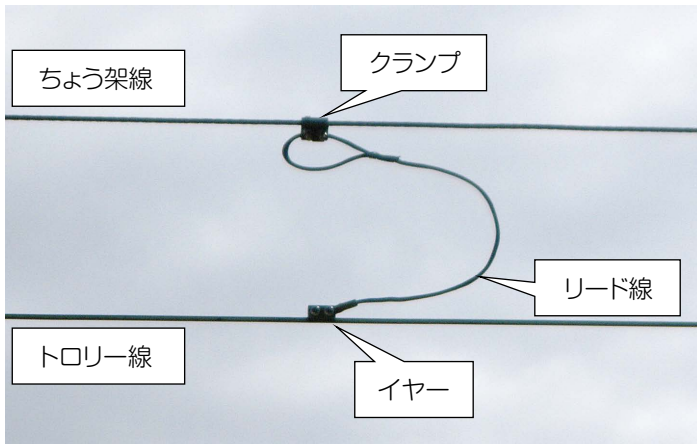


図2 コネクター構成例



図3 コネクターリード線素線切れの例

に交流区間では250m毎、直流区間では125m毎に設置されています<sup>1)</sup>。

### コネクターの性能と課題

コネクターは電線間を電氣的に接続する、もしくは電流を流すためのものなので、接続箇所の通電状態が良好であることが求められます。そのほかにコネクターが備えておくべき性能は以下のとおりです<sup>1)</sup>。

- ・振動による金具のゆるみがないこと
- ・軽量であること
- ・腐食に強いこと
- ・取付け施工時間が短いこと
- ・振動疲労に耐えること

これらを考慮して、コネクターは図2のようにトロリー線と接続するイヤー、ちょう架線と接続するクランプ、導線としてのリード線で構成されています。なお一般的にリード線には、直径1.2mmの素線を37本より合わせた軟銅より線40mm<sup>2</sup>が用いられています。

しかしながら、実際には図3のようなリード線の素線切れが発生することがあります。この素線切れの原因は、パンタグラフ通過時の電車線振動によって蓄積される疲労損傷と考えられています。疲労によるリード線断線事故を未然に防ぐためには、疲労寿命を予測することや、耐疲労性を向上させることが重要になります。

### 従来のコネクター評価試験

コネクターやほかの電車線金具の振動耐久性を評価する試験方法は、JIS E 2002「電車線路用金具試験方法」やJIS E 2201「電車線路用架線金具」で規定されています。これらの規格では、コネクターを取り付けたトロリー線のみを3~5Hz、振幅20mmの正弦波で振動させ、200万回振動後にイヤーのゆるみなどがいないかを確認します。コネクターの開発では、この振動試験で素線切れがないかを確認することで、耐疲労性を評価しているのが現状です。

ただし、コネクターはリード線の取り回し形状や線種によって、共振周波数などの動特性が異なります。また、パンタグラフ通過時の電車線振動は、さまざまな周波数や振幅が合成されており、JIS規格のように単一の振幅や周波数での正弦波振動試験で、現場におけるコネクター振動耐久性を評価するのは困難です。

さらに、実際の電車線はトロリー線だけでなく、ちょう架線も振動するため、トロリー線のみを振動させるJIS規格では、実際の振動条件を再現していないこととなります。

このように、従来のコネクターの評価試験では、実際の疲労寿命を評価することや、予測することはできません。そのため、どのようにすれば耐疲労性

を向上できるかも解明されていませんでした。

### コネクター疲労寿命予測手法

実際のコネクター疲労寿命を予測するためには、リード線に蓄積される疲労損傷を推定する必要があります。電車線の振動に対する疲労損傷は、

- ①リード線に発生するひずみ波形
  - ②ひずみ対するリード線疲労寿命
- によって求められます。

鉄道総研では、有限要素法を用いてコネクターをモデル化し、実際の振動条件を再現することで、リード線のひずみを推定する手法を提案しています<sup>2)</sup>。また、リード線の素線切れを検知できる疲労試験を行うことより、リード線の疲労寿命特性を求めています。以降では、これらの手法について、具体的に紹介します。

### コネクターの有限要素モデル化

ここでは、有限要素法を用いたコネクター振動解析について紹介します。有限要素法を用いることの利点は、大きく2つあります。

- ①トロリー線やちょう架線の振動波形を入力できる
  - ②リード線の取り回し形状や線条特性の変更が容易となる
- 一方で、コネクターを有限要素モデル

化するには課題もあります。リード線であるより線の素線を全てモデル化し、かつ素線間の摩擦を再現することは非常に困難です。そこで鉄道総研では、**図4**のように軟銅より線を仮想単線と呼ぶ1本のより要素でモデル化し、仮想単線の諸特性を実リード線と整合させることを提案しています。

振動解析を行うときに必要な仮想単線の特性は、曲げ剛性（ヤング率と半径）、密度、および減衰係数です。

### (1) 仮想単線のヤング率と半径

リード線の曲げ剛性が変化すると、コネクタ全体のばね定数が変化します。つまり、実際のコネクタのばね定数を測定することで、リード線の曲げ剛性を求めることができます。

軟銅より線40mm<sup>2</sup>をリード線とする実物コネクタのばね定数は、トロリー線のみを静的に押し上げ、その時のトロリー線変位と荷重を測定することで求めることができます。**図4**上に示す3種類のコネクタのばね定数の測定結果を**表1**に示します。ばね定数はリード線の取り回し形状によって変化することがわかります。

**図4**下の各コネクタモデルについても、トロリー線のみを静的に押し上げる解析を行い、ばね定数を求めました。ヤング率を銅の123GPaで固定し、解析で求めたばね定数と**表1**に示した実物のばね定数が一致するよう仮想単線の半径を同定した結果、リード線の取り回し形状によらず、半径は1.45mmとなりました(**表2**)。

### (2) 仮想単線の密度

リード線の密度はコネクタの共振周波数に大きな影響を与えます。**図4**上に示す実物コネクタの共振周波数の測定結果を**表1**に示します。コネクタの共振周波数は、リード線の取り回し形状によって変化することがわかります。

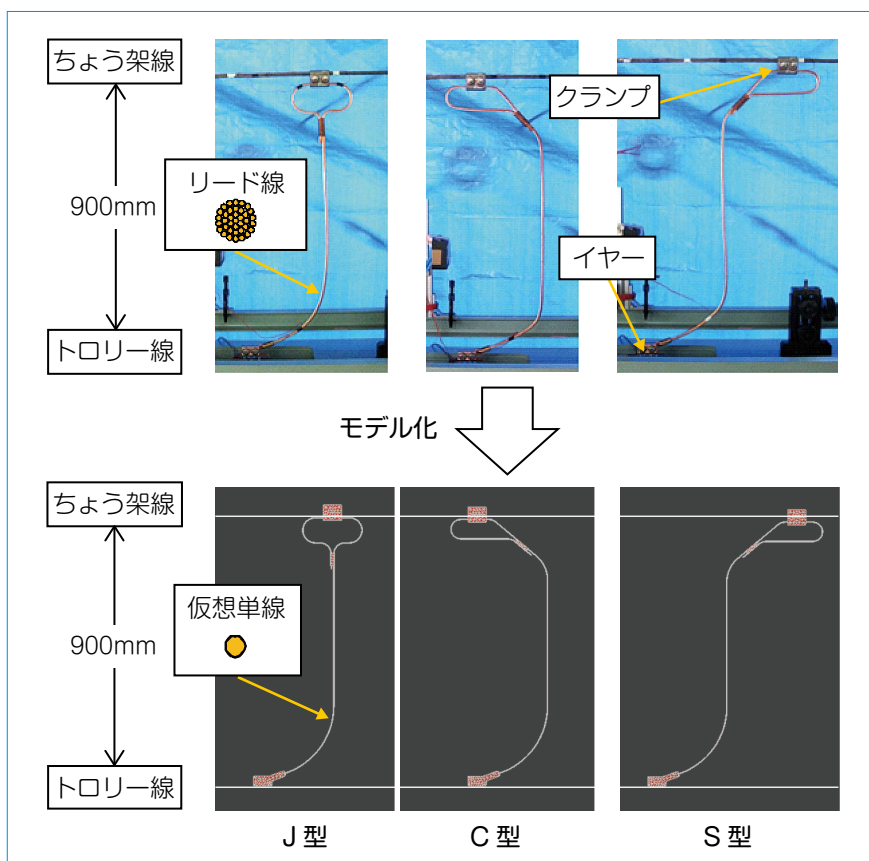


図4 コネクタの有限要素モデル化(リード線：軟銅より線40mm<sup>2</sup>)

表1 実物コネクタの諸特性測定結果

	J型	C型	S型
ばね定数 (N/mm)	0.58	0.29	0.45
共振周波数 (Hz)	10.0	10.0	5.7

表2 軟銅より線40mm<sup>2</sup>に対する仮想単線の諸特性

ヤング率 (GPa)	123
半径 (mm)	1.45
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	45.3
減衰係数	$\alpha = 0$ $\beta = 0.0045$

**図4**下の各コネクタモデルの共振周波数が**表1**と一致するように、仮想単線の密度を同定した結果、リード線の取り回し形状によらず、密度は45.3g/cm<sup>3</sup>となりました(**表2**)。

### (3) 仮想単線の減衰係数

コネクタリード線であるより線は、素線間の摩擦によって大きな減衰特性を持ちます。実物リード線の減衰特性は、リード線の一方を固定した片持ちはりを用意し、自由端を振動させ、減少していく振幅を測定することで求められます。

実物リード線の減衰特性を振動解析で再現するため、レイリー減衰係数(☞

参照)を用い、**表2**のように設定しました。

以上のようにして作成したコネクタの有限要素モデルに、トロリー線やちょう架線の振動波形を入力し、振動解析を実施することで、仮想単線に生じるひずみ波形を取得することができます。

#### ☞ レイリー減衰係数

レイリー減衰係数とは、実際の減衰を再現するものではなく、数値計算を安定させるために考案された仮想的な減衰係数です。

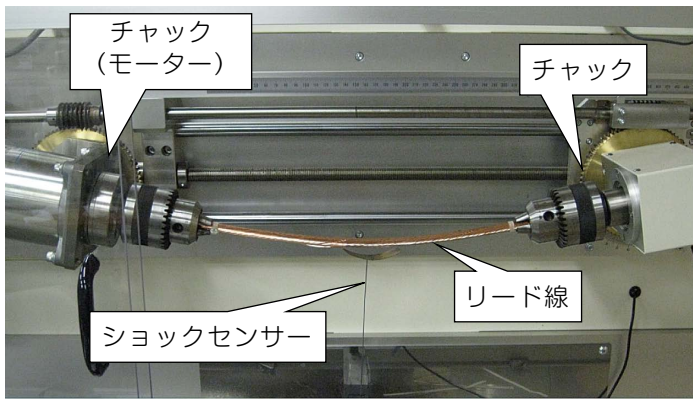


図5 リード線回転曲げ疲労試験機

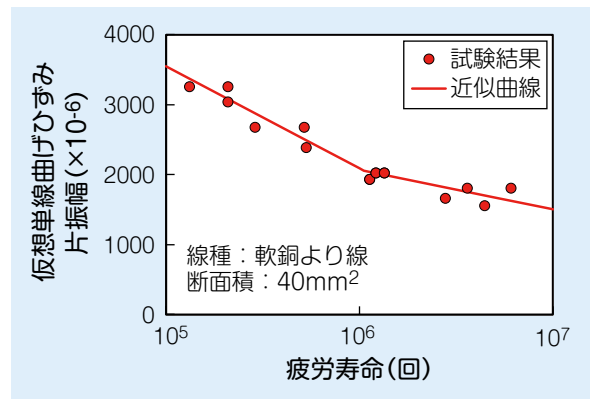


図6 仮想単線の疲労寿命特性

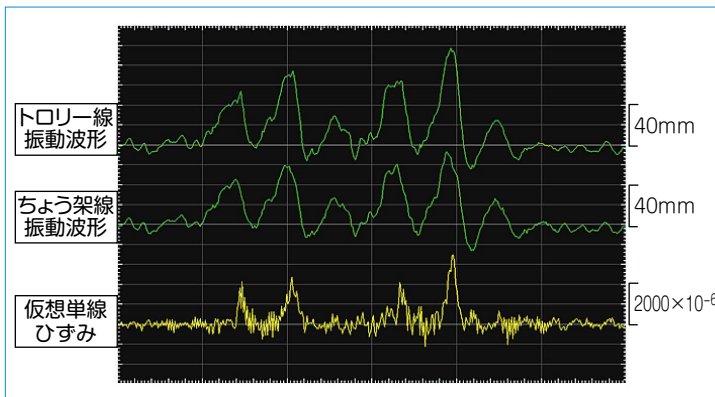


図7 電車線振動波形およびひずみ波形例

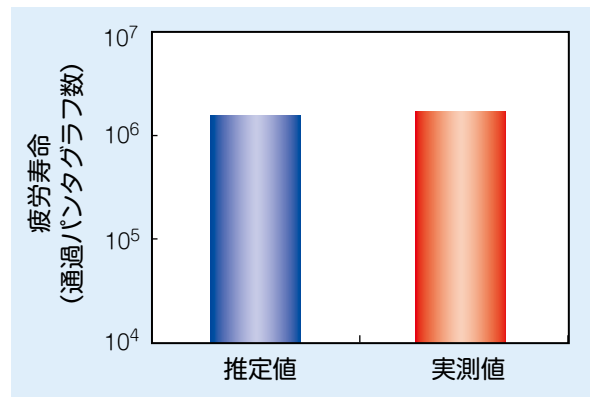


図8 C型コネクタ疲労寿命の比較

### リード線の疲労試験

コネクタリード線はより線であるため、設備保全上の寿命は素線切れが発生したときと考えるのが妥当です。そこで、実リード線の素線切れを検知できる疲労試験機として、図5に示す回転曲げ疲労試験機を導入しました。リード線をチャックで固定し、曲げ変形を与えた状態で回転させます。素線切れが発生すると、遠心力によって素線がショックセンサーに接触し、試験機が停止します。

コネクタの振動解析では、仮想単線のひずみ波形が得られるため、実リード線の疲労寿命を仮想単線の疲労寿命に変換する必要があります。そこで、疲労試験時に実リード線に与えた曲げ曲率半径から仮想単線のひずみを算出しています。

図6に軟銅より線40mm<sup>2</sup>に対する仮想単線の疲労寿命特性を示します。

### コネクタ疲労寿命推定結果

実際の営業線において、C型コネクタのリード線に素線切れが発生した箇所について、疲労寿命の実測値と推定値の比較を行いました。

振動解析に使用するトロリー線およびちょう架線の振動波形は、現地のビデオカメラ動画から画像処理によって求めました(図7上)。この振動波形を図4に示すC型コネクタモデルに入力し、振動解析を行うことで、イヤ近くの仮想単線に発生するひずみ波形を求めました(図7下)。この振動解析から、ひずみのピークはパンタグラフ通過時に発生しており、パンタグラフによるトロリー線の急激な押し上げによって、疲労損傷が促進されることがわかりました。

振動解析で得られたひずみ波形と、図7の疲労寿命特性より算出したコネクタ疲労寿命の推定値と実測値の比

較を図8に示します。この図より、推定値と実測値がほぼ一致し、現場のコネクタ疲労寿命を精度よく予測できることがわかりました。

### おわりに

現場におけるコネクタの振動を再現することで、疲労損傷を促進させる要因の解明が大きく進むと考えます。今後は本手法を活用して、耐疲労性を向上させたコネクタの開発に取り組む予定です。[RRR]

### 文献

- 1) 日本鉄道電気技術協会：鉄道技術者のための電気概論—電車線—, pp.102-111, 2003
- 2) 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