

# レインフロー法による硬銅トロリ線疲労寿命推定

電力技術研究部 集電管理研究室  
副主任研究員 山下 主税

## 1 はじめに

パンタグラフはすり板をトロリ線に接触させることで集電しており、トロリ線には上向きの接触力が負荷される。この接触力によってトロリ線は局所的に押し上げられ、曲げ変形による曲げひずみが発生する。高速走行時の支持点やイヤーなどの硬点、あるいはセクションインシュレータ近傍などの特殊箇所では著大な曲げひずみが発生することもあり、最悪の場合は金属疲労によってき裂が発生し、破断に至ることもある。

現状では、一般的に使用されている硬銅トロリ線については、疲労寿命  $10^7$  回に対する疲労限度に若干の余裕を加味したひずみ振幅(=  $500 \times 10^{-6}$ )を管理目安値としている。トロリ線のひずみ振幅が目安値未満であれば疲労の懸念がないとし、目安値以上の場合には疲労寿命管理、即ち疲労破断に至る通過パンタグラフ数(疲労寿命)の推定および管理が必要となる。実際に測定されるトロリ線曲げひずみ波形を図1に示す。従来の方では、ひずみ波形の最大値を以てトロリ線の疲労寿命を推定しているが、推定精度を向上するための研究として平均引張応力の影響を考慮する提案<sup>1)</sup>や、レインフロー法によってひずみ波形から疲労寿命を推定する提案<sup>1)2)</sup>がされている。ただし、レインフロー法によるトロリ線疲労寿命推定については理論のみ提案されており、実験的検証は行われていなかった。

そこで、硬銅トロリ線についてレインフロー法適用可能性の実験的検証を行ったので報告する。

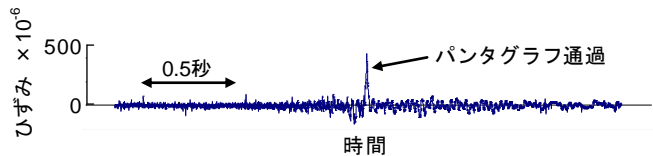


図1 トロリ線ひずみ波形の例(上面での測定)

## 2 レインフロー法

レインフロー法は対象とする波形が「どの程度の振幅が何回作用したか」を計数する方法である。図2にレインフロー法の概要を示す。計数するひずみ振幅は屋根を流れる雨水に例えられる。

ただし、レインフロー法はひずみ振幅の計数法に過ぎず、計数結果から疲労寿命を推定するためには、後述する修正マイナー則とトロリ線の疲労寿命特性によって疲労損傷度を算出する必要がある。ここで、疲労寿命特性は平均応力依存性があるとされている。トロリ線の張力による平均応力は摩耗によって変化し、また図2に示すように計数されたひずみ振幅要素も異なる平均応力を有するため、疲労寿命推定に平均応力を考慮しなければならない。

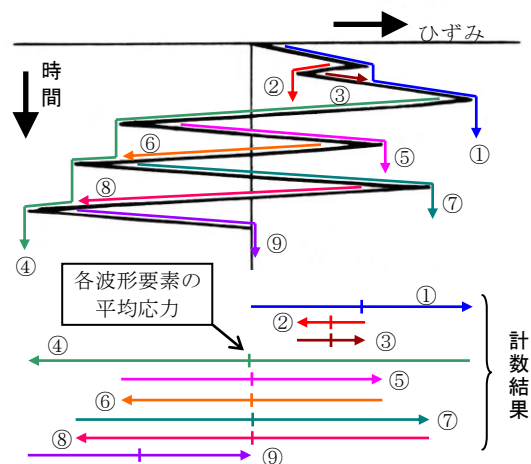


図2 レインフロー法による計数

したがって、レインフロー法によるトロリ線疲労寿命推定の可能性を検証をするために、①ト

ロリ線への修正マイナー則適用可能性の検証、②平均応力を考慮した疲労寿命曲線作成を行った。

### 3 修正マイナー則適用可能性検証試験

レインフロー法により分割されたひずみ振幅から疲労寿命を推定するものとして、修正マイナー則がある。修正マイナー則の基であるマイナー則は、さまざまな振幅が混在する場合の疲労寿命に関する経験的法則である。応力振幅 $\sigma_i$ 一定の場合の疲労寿命が $N_{fi}$ であるとき、 $\sigma_i$ で $N_i$ 回のくり返し負荷を受けた場合の疲労損傷度 $D_i$ は、

$$D_i = N_i / N_{fi} \quad (1)$$

とし、各振幅における疲労損傷度の総和(累積疲労損傷度) $\sum D_i$ の逆数を疲労寿命とする考え方である。マイナー則では、鉄鋼など明確な疲労限度を示す材料において疲労限度以下の $\sigma_i$ に対し $N_{fi}$ は無量大、即ち疲労損傷度への影響はないと見なす。一方、疲労限度以下の応力を無視せず、トロリ線などの非鉄金属の疲労寿命特性には明確な疲労限度はなく、疲労寿命曲線の傾斜部を長寿命側に外挿して小振幅の影響を考慮するよう修正した考え方が修正マイナー則である。

#### 3.1 試験方法

試験装置の概略を図3に示す。本試験では加振部にリニアサーボモータを採用することで、図4に示す任意波形での加振を行った。なお、図4の各波形は1サイクル分とし、疲労寿命はサイクル数で評価するものとする。疲労試験は公称断面積 $110\text{mm}^2$ の硬銅トロリ線を用い、張力は $\sigma_m = 154\text{MPa}$ を負荷した。

#### 3.2 検証試験結果

修正マイナー則による推定疲労寿命と疲労試験結果を表1に示す。なお、修正マイナー則の(1)式における疲労寿命 $N_i$ とひずみ振幅 $\varepsilon_a$ の関係は、以前作成した疲労寿命曲線(図5)より次式で表わされる。

$$\log N = 17.51 - 3.73 \log \varepsilon_a \quad (2)$$

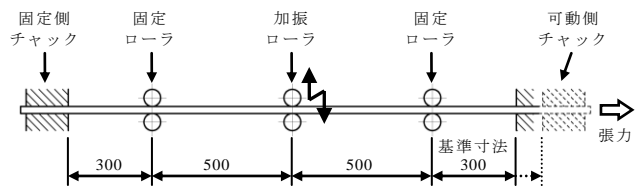


図3 線条・金具振動試験装置概略

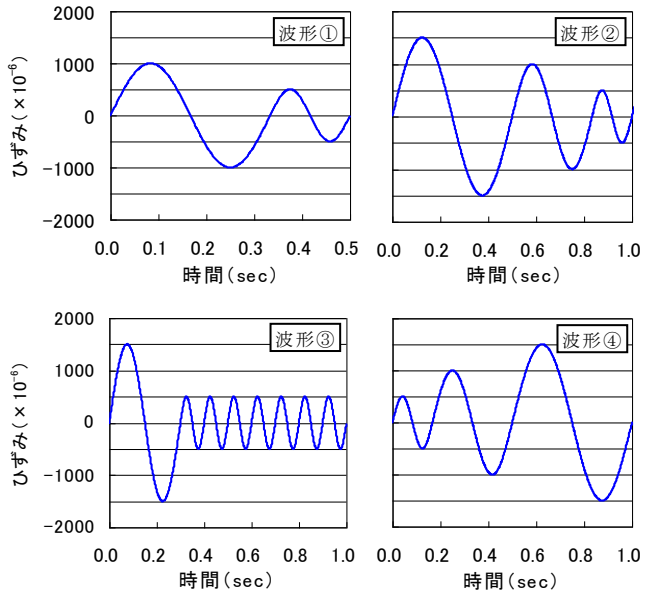


図4 修正マイナー則適用可能性検証試験試験波形(1サイクル分)

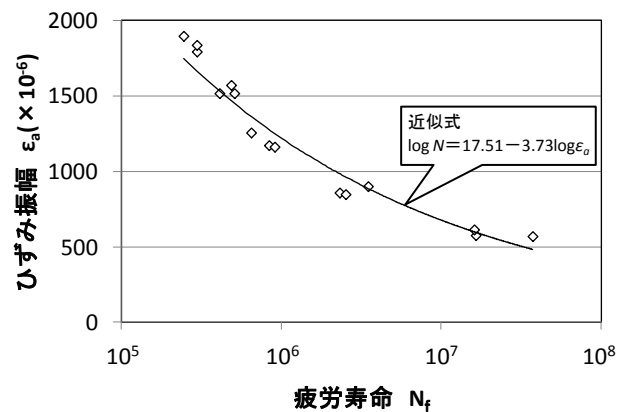


図5 硬銅トロリ線の疲労寿命特性<sup>1)</sup>  
(平均引張応力 $\sigma_m = 154\text{MPa}$ )

表1に示すとおり、波形①～④のいずれも推定疲労寿命は試験結果とよく一致し、相違は10%未満であった。厳密にはさらに多くの波形について試験を重ねるべきであるが、硬銅トロリ線に対して修正マイナー則は概ね適用可能と考えられる。

表1 修正マイナー則適用可能性検証試験結果

	推定疲労寿命 (サイクル)	疲労試験結果 (サイクル)	試験結果と 推定寿命の比
波形①	$1.99 \times 10^6$	2052492	103.2%
波形②	$3.82 \times 10^5$	373136	97.8%
波形③	$4.23 \times 10^5$	458138	108.4%
波形④	$3.82 \times 10^5$	387810	101.6%

#### 4 平均応力を考慮した疲労寿命曲線の作成

様々な平均応力が混在する実動ひずみ波形に対して修正マイナー則を適用する場合、使用する疲労寿命曲線も様々な平均応力に対応しなければならない。筆者らは以前に、疲労過程の(最大応力×応力振幅)<sup>1/2</sup>というパラメータを用いて、異なる平均応力に対する硬銅トロリ線疲労試験結果を統一的に整理可能であると報告した<sup>1)</sup>。ただし、当時筆者らが参考とした疲労試験結果の一部は、試験条件、試験状況の詳細が不明であり、再考の余地があった。そこで、硬銅トロリ線について改めて異なる平均引張応力条件での疲労試験を行い、疲労寿命特性の(最大応力×応力振幅)<sup>1/2</sup>による整理を行った。

##### 4.1 試験方法

使用した試験装置の概略は図3と同様であるが、加振機構はモータとクランクによるもので、加振波形は正弦波である。加振周波数は5Hzとした。この試験に用いた硬銅トロリ線は公称断面積110mm<sup>2</sup>である。試験での残存寸法と張力、即ち平均引張応力の条件を表2に示す。

表2 疲労寿命特性の平均引張応力依存性検証試験トロリ線残存寸法および張力の条件

残存寸法 (mm)	断面積 (mm <sup>2</sup> )	張力 (kN)	平均引張応力 $\sigma_m$ (MPa)	備考
12.34	111.1	9.8	88.2	(新線)
10.0	95.3	14.7	154	文献1)のデータを引用

##### 4.2 試験結果

試験結果を(最大応力×応力振幅)<sup>1/2</sup>で整理したものを図6に示す。同図には文献1)で引用したデータもあわせて示す。(最大応力×応力振幅)<sup>1/2</sup>は平均引張応力を $\sigma_m$ 、応力振幅を $\sigma_a$ とすれば $\{(\sigma_m + \sigma_a)\sigma_a\}^{1/2}$ と表すことができる。ただし、疲労試験で設定するパラメータはひずみであり、ひずみ振幅を $\varepsilon_a$ 、ヤング率を $E$ として $\sigma_a = E\varepsilon_a$ で求めた。

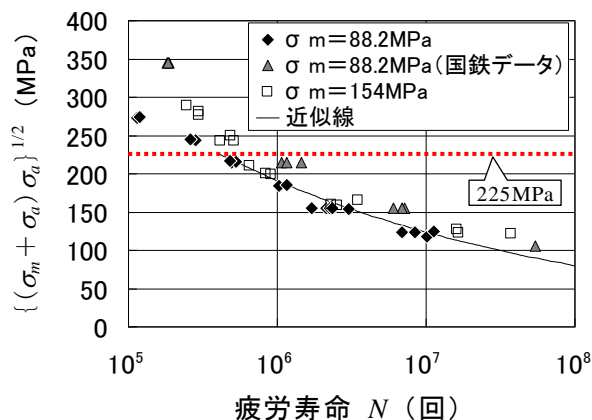


図6 硬銅トロリ線疲労試験結果  
( $\{(\sigma_m + \sigma_a)\sigma_a\}^{1/2}$ による整理)

図6より、 $\{(\sigma_m + \sigma_a)\sigma_a\}^{1/2} \leq 225\text{MPa}$ の範囲では、異なる平均応力に対して同一曲線で整理できることがわかる。ここで、 $\{(\sigma_m + \sigma_a)\sigma_a\}^{1/2} = 225\text{MPa}$ の値は新線時 $\sigma_m=88.2\text{MPa}$ における $\varepsilon_a=1583 \times 10^{-6}$ 、摩耗限度時 $\sigma_m=154\text{MPa}$ における $\varepsilon_a=1375 \times 10^{-6}$ に相当し、トロリ線のひずみ管理目安値が $500 \times 10^{-6}$ であることを鑑みると、実際にトロリ線が受ける曲げひずみの範囲をカバーしているといえる。整理された曲線の近似式は

$$\log N = 18.9 - 5.67 \log \{(\sigma_m + \sigma_a)\sigma_a\}^{1/2} \quad (3)$$

となる。

## 5 レインフロー法適用可能性検証試験

本章では、4章で作成した疲労寿命曲線を用いて、より実際に近いひずみ波形について、修正マイナー則を適用し、レインフロー法の適用可能性を検証する。

### 5.1 試験方法

使用した試験装置は図3に示したリニアサーボモータ式のものである。供試トリ線はいずれも公称断面積 $110\text{mm}^2$ で、張力の調整によって $\sigma_m$ を設定した。ひずみ波形と $\sigma_m$ を組み合わせた入力波形を図7に示す。試番1と3は支持点、試番2と4はハンガ点におけるひずみ波形を想定した。なお、図7の各波形は1サイクル分とし、疲労寿命はサイクル数で評価するものとする。

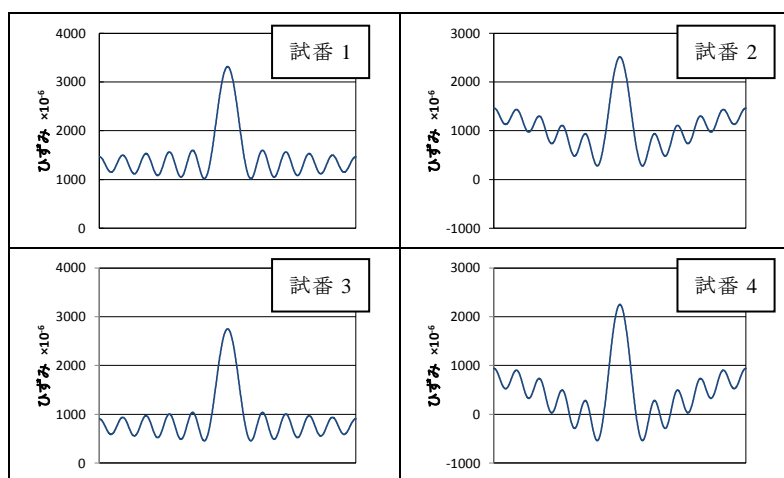


図7 レインフロー法適用検証試験波形

### 5.2 試験結果

試験結果とレインフロー法による推定疲労寿命、および従来の方法で推定した疲労寿命の比較を図8に示す。この図より、従来の方法（最大ひずみによる推定）よりもレインフロー法の推定精度は向上しており、概ね安全側の推定であることを確認した。

今後、レインフロー法によるトリ線疲労寿命推定のさらなる精度向上に向けて、疲労寿命曲線(図6)の高精度化や、修正マイナー則に適用するひずみ振幅に対して、無視できるひずみ振幅の閾値設定などの課題について取組む予定である。

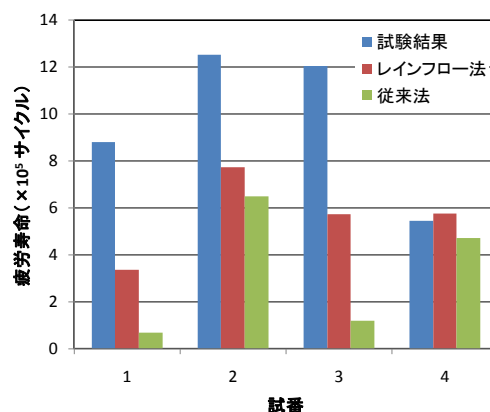


図8 試験結果とレインフロー法および従来法による推定結果の比較

## 6 まとめ

本稿では、硬銅トリ線の疲労寿命推定に対する修正マイナー則の適用可能性の検証、および平均応力を考慮した疲労寿命曲線の作成を行い、実際に近いひずみ波形に対してレインフロー法の適用可能性を検証した。その結果、従来の方法よりもレインフロー法の推定精度は向上しており、概ね安全側の推定であることを確認した。

## 参考文献

- 菅原淳、山下主税：硬銅トリ線の疲労寿命に及ぼす諸要因の影響評価、鉄道総研報告、Vol. 20、No. 9、p. 17、2006
- 貴志俊英、藤井保和：トリ線疲労評価に対するレインフロー法適用の検討、電気学会研究会資料、TER-04-29、2004