

振動加速度を用いた台車枠の荷重推定手法

車両構造技術研究部 車両強度研究室

室長 八木 毅

1. はじめに

在来線車両の使用線区を幹線からローカル線などに変更した際に、走行時に台車枠各部に作用する荷重（以下「台車枠荷重」という。）が設計時に想定された値を上回る例が見られる¹⁾。そのような場合には、あらかじめ台車枠荷重または応力を把握し、強度評価を行う必要がある。しかし、走行時の台車枠荷重または応力の測定は、ひずみゲージを台車枠に貼付し、走行試験を行う方法であり、測定に多大な労力とコストが必要なため、簡易な測定方法が求められている。ここでは、比較的簡易に測定できる振動加速度（以下「加速度」という。）を用いた台車枠強度評価のための荷重推定手法について紹介する。

2. 従来の強度評価

従来の台車枠強度評価は、JIS E 4207 に基づき、静荷重試験等により台車枠各部の平均応力および変動応力を求め、それらが応力限界図（図 1）の限界内にあることを確認する場合が多い。静荷重試験における負荷荷重と台車枠各部に発生する応力はほぼ比例関係にあり、この負荷荷重が設計条件の一つになることから、台車枠強度評価において台車枠荷重に着目することは重要と考えられる。特に台車枠に取付けられた部品の「受」などの損傷事例は多いため、新製時だけではなく、使用線区や運用条件を変更する場合には、走行時の主電動機受、雪かき受等に作用する荷重等を把握する必要がある。

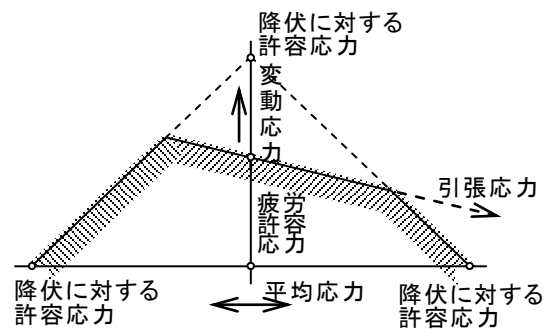


図 1 応力限界図

3. 加速度と台車枠荷重との関係を調査するための試験方法

荷重推定手法を検討するため、代表的な台車の例である軸はり式の電動台車について、A 線、B 線および C 線の在来線 3 線区で走行試験を実施した。走行時の側ばり荷重、主電動機受上下荷重（以下「主電動機受荷重」という。）および雪かき受上下荷重（以下「雪かき受荷重」という。）の台車枠荷重に着目し、走行線区ごとに走行時の軸箱上下加速度（以下「軸箱加速度」という。）、台車枠ばね帽上下加速度（以下「台車加速度」という。）および当該台車直上の車体上下加速度（以下「車体加速度」という。）ならびに台車枠荷重を求めた。

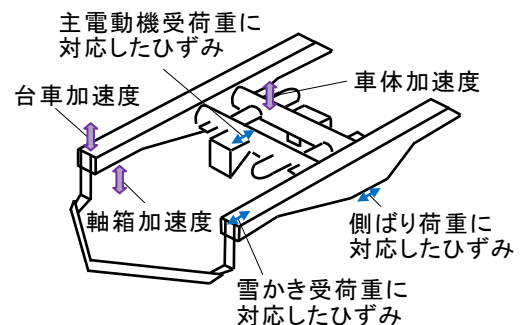


図 2 測点図

着目する各台車枠荷重が負荷されたときに応力の発生が顕著となる位置にひずみゲージを貼付し、測定されたひずみから荷重を計算した。ひずみおよび加速度の測点と測定方向を図 2 に示す。

4. 試験結果に対する検討

4.1 等価荷重

台車枠における疲労被害を推定する際、実働応力頻度分布が重要であり、その分布を特徴付ける値として、一回の作用で等価な疲労被害を与える応力振幅（以下「等価応力」という。）に置き換える方法²⁾がある。等価応力 σ_{eq} は

$$\sigma_{eq} = \left(\sum_i n_i \sigma_i^m \right)^{1/m} \quad (1)$$

σ_i : スライスレベル応力 n_i : σ_i の発生頻度 m : S-N 線図における勾配の逆数の絶対値により求められる。特に 10km あたり等価応力は、JIS E 4207 の応力限界図にプロットすることにより強度評価が可能という考え方が²⁾ある。応力と荷重が比例関係にある場合には、10km あたり等価応力に相当する荷重を 10km あたり等価荷重（以下「等価荷重」という。）として強度評価に利用できると考えられる。

台車枠荷重の実態を把握するため、レインフロー法により計数した荷重振幅の頻度分布の例を図 3 に、荷重頻度分布から各線区の等価荷重を求めた結果を最大荷重と比較して図 4 に示す。

図 4 において、等価荷重はほぼ最大荷重よりも大きくなっており、等価荷重で評価することは、安全側の評価になることを意味している。

使用線区や運用条件を変更する場合に、新たな使用線区や運用条件での等価荷重を推定できれば、台車枠の強度評価に利用できると考えられる。

4.2 加速度と台車枠荷重との関係

走行試験結果から軸箱加速度、台車加速度および車体加速度と側ばり荷重、主電動機受荷重および雪かき受荷重の関係を調査したところ、同一時間の対応においては、明確な相関は見られなかった。これは、本質的な相関がない可能性も考えられるが、むしろ加速度測定位置と荷重推定のためのひずみ測定位置が異なるため、加速度と荷重の応答に時間差が生じていることが一つの要因と考えられる。

一方、振動事象は、固有の周波数特性を持っていることが多く、時間領域での関係だけではなく、周波数領域での関係を検討することが重要である。

A 線の時間波形を等データ数の短い範囲に分割し、各加速度と各台車枠荷重の周波数スペクトルを FFT により求め、1 入力（加速度）1 出力（台車枠荷重）モデルとしてそれぞれの関係を表す

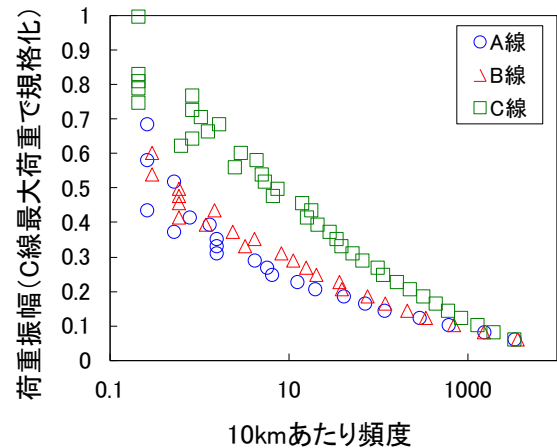


図 3 雪かき受荷重の頻度分布

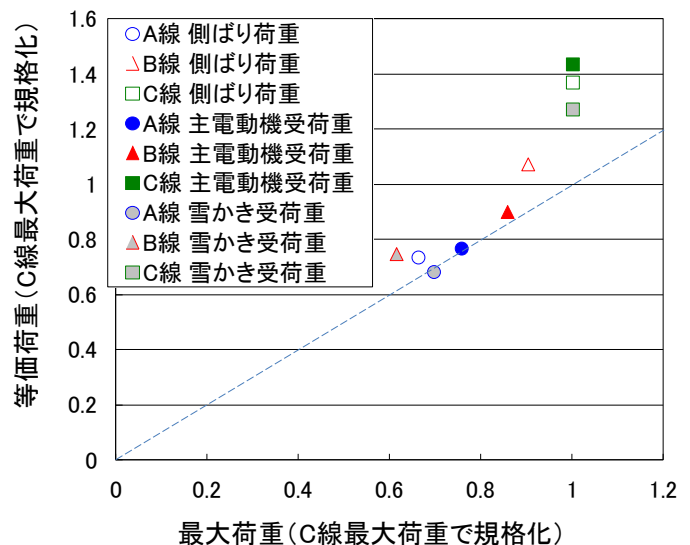


図 4 各線区の最大荷重と等価荷重

伝達関数の平均とコヒーレンスを計算した。ここでいう伝達関数 $H(f)$ は、時間波形の加速度および台車枠荷重の複素スペクトル $A(f)$ およびその共役複素数 $A^*(f)$ ならびに台車枠荷重スペクトル $P(f)$ から

$$H(f) = \frac{P(f) \cdot A^*(f)}{A(f) \cdot A^*(f)} \quad (2)$$

により求めた。また、コヒーレンスとは、二つの信号間の関連の深さを表しており、二つの信号間に高い線形依存の関係がある場合には1に近く、他の信号源からの影響が大きい場合やノイズの影響が大きい場合などには0に近い値となる。例として、A線における各加速度と雪かき受荷重のコヒーレンスを図5に示す。コヒーレンスは周波数に依存するが、3つの加速度の中では、台車加速度と雪かき受荷重のコヒーレンスが比較的高い値となった。

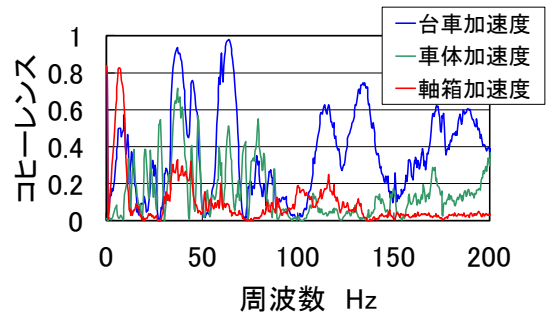


図5 各加速度と雪かき受荷重のコヒーレンス

5. 加速度を用いた荷重推定手法

本研究では車両の使用線区を変更する場合などを想定しているため、A線での走行試験結果から、B線またはC線の走行時における荷重を推定する手法を検討する。前章で記述したような等価荷重および加速度と台車枠荷重との関係から、荷重推定手法として図6に示す手法が考えられる。加速度を用いて荷重を推定する手順は次のようになる。

(1) 台車の新製時などに、コヒーレンスが比較的高い加速度と台車枠荷重について、A線での時間波形の加速度および実働状態で測定された台車枠荷重（以下「実働荷重」という。）の複素スペクトルおよびその共役複素数ならびに実働荷重スペクトルから、式(2)により伝達関数を求めておく（図6①）。

台車固有の伝達関数は唯一に決まるはずであるが、短時間での台車固有の伝達関数を平均していること、時間分解能を高くしたために周波数分解能が低くなっていること、本来は多入力であり他の成分があること、非線形成分が存在する可能性があること、などの要因から実働荷重から求めた等価荷重と本荷重推定手法により求める等価荷重は等しくならない可能性が考えられる。そこで、

(2) A線での実働荷重からレインフロー法により実働荷重頻度分布を求めて等

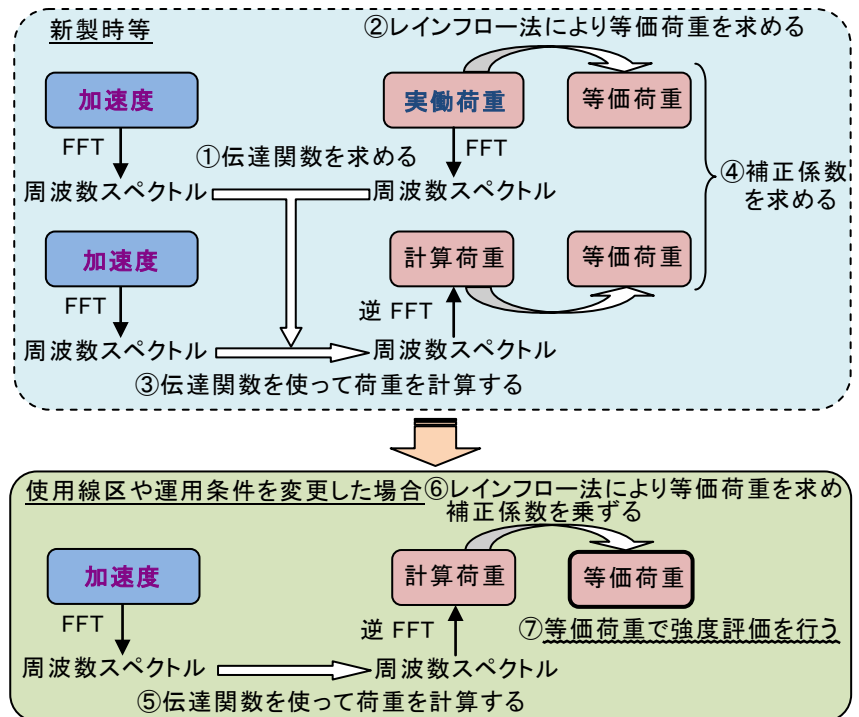


図6 荷重推定手法の概要

価荷重（図 6②）を計算する。

(3) (1)の伝達関数を使って台車枠荷重の周波数スペクトルを求め、逆 FFT により計算した台車枠荷重（以下「計算荷重」という。）（図 6③）からレインフロー法により計算荷重頻度分布を求めて等価荷重を計算する。

(4) (2)および(3)で求めた二つの等価荷重の比である補正係数を求めておく（図 6④）。

この補正係数により，上記の実働荷重から求めた等価荷重と本荷重推定手法により求められた等価荷重の相違を補正できる可能性が考えられる。

車両の使用線区や運用条件を変更した場合，

(5) B 線または C 線における加速度の周波数スペクトルに A 線で求めた伝達関数を乗じて台車枠荷重の周波数スペクトルを求め（図 6⑤），逆 FFT により時間波形の計算荷重を計算する。

(6) 計算した時間波形からレインフロー法により計算荷重頻度分布を求めて等価荷重を計算し，補正係数を乗じたものを強度評価に用いる等価荷重とする（図 6⑥）。

(7) 各台車枠荷重とそれに相当する応力が比例関係にある場合，B 線または C 線の等価荷重に相当する等価応力を求めることが可能となり，等価応力を JIS E 4207 の応力限界図（図 1）にプロットすることにより台車枠の強度評価を行う（図 6⑦）。

上記の荷重推定手法により等価荷重を求めた場合において，A 線の補正係数と，同様に求めた B 線および C 線の補正係数の関係を図 7 に示す。各線区の補正係数が等しければ本荷重推定手法の実用性が高いことを意味している。ばらつきはあるものの，A 線の試験結果から B 線および C 線の等価荷重をほぼ推定できることがわかった。

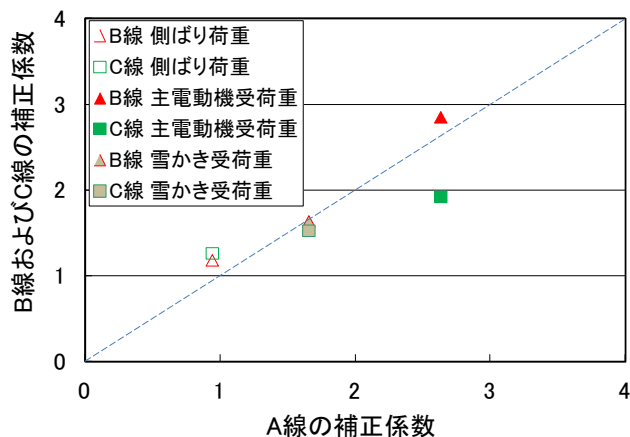


図 7 各線区の補正係数の関係

6. まとめ

加速度と台車枠荷重のコヒーレンスが比較的高い値となる場合において，加速度，伝達関数および補正係数を用いる荷重推定手法を検討した。評価対象台車の伝達関数を新製時等に求めておけば，車両の使用線区や運用条件を変更した場合に，加速度を測定することにより，台車枠強度評価のための等価荷重を推定することが可能と考えられる。

参考文献

- 1) 鈴木和馬，山之口学，石原鋼，織田安朝，八木毅：走行線区の違いが台車枠強度に与える影響に関する研究，鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，Vol. 16，pp. 679-682，2009
- 2) 織田安朝，八木毅，沖野友洋，石塚弘道：実働応力ひん度分布による台車枠溶接止端部の疲労強度評価，鉄道総研報告，Vol. 23，No. 4，pp. 17-22，2009