

軸箱加速度と軌道検測波形を用いた 著大輪重・横圧の管理手法

田中 博文* 古川 敦*

The Management Method for Large Wheel Load and Lateral Force
Applying Axle-box Acceleration and Track Irregularity

Hirofumi TANAKA Atsushi FURUKAWA

A very large wheel load and lateral force are frequently due to track irregularities of a short wavelength. These large loads are undesirable, for instance, they have great influence on deterioration to the track material and an additional volume of track maintenance. In this study, we paid attention to the axle-box acceleration, which can estimate a wheel load, a lateral force, and a correlation of the short wavelength. First, we analyzed the frequency characteristics of the relation between wheel load, lateral force, axle-box acceleration and track irregularities. In addition, we proposed a prediction technique for the wheel load and the lateral force, which contained a short wavelength component by using the axle-box acceleration and the track irregularities.

キーワード：軸箱上下加速度，軸箱左右加速度，著大輪重，著大横圧，周波数応答法，短波長軌道変位

1. はじめに

レール溶接部や継目部の落ち込み、波状摩耗といったレール頭頂面の凹凸による著大輪重や転動音、あるいはレール継目部の角折れ等による著大横圧の管理には、図1に示す軸箱支持装置で測定された加速度（以下、「軸箱加速度」という。）が用いられている^{1)~4)}。この理由は、著大輪重や著大横圧、転動音の発生原因が非常に短い波長の軌道変位であり、軌道検測車で測定される軌道変位では把握困難であること、加えて、経験的に輪重や横圧と軸箱加速度との間に相関があることが知られているためである。なお、軸箱加速度のうち、上下方向加速度のみを指す場合は「軸箱上下加速度」、左右方向加速度のみを指す場合は「軸箱左右加速度」という。

また、軸箱加速度を用いて輪重・横圧の著大値を管理する技術上の理由として、従来は輪重や横圧の測定法として、間欠法⁵⁾が用いられてきたことがある。この方法では輪重・横圧の連続波形が得られないため、軸箱加速度との関係は点データ同士の回帰式（一般には一次式）で表現される。輪重や横圧に対する軸箱加速度の応答倍率が周波数にかかわらず一定であればこの方法でも両者の関係を表現できるが、現実には一定ではない。さらに近年では速度向上試験等で新連続法⁶⁾による輪重・横圧測定がしばしば行われるようになり、輪重・横圧と軸箱加速度を波形レベルで結びつけることが可能となっている。

以上の背景に対し、本研究では、新連続法で測定された輪重・横圧、および同時に測定された軸箱加速度の関係进行分析し、軸箱加速度から波長1～6mの波長の短い輪重・横圧変動を推定する手法を検討した。さらに、同時期に軌道検測車で測定された10m弦正矢法による軌道変位から波長6～数十m程度の比較的波長の長い輪重・横圧変動を推定し、波長帯の異なる2つの推定波形を重ね合わせることによって、軌道変位のみを用いる従来法⁷⁾よりも短い変動成分を含んだ輪重・横圧変動を推定する手法を検討した。また、従来から行われている軸箱加速度の著大値を用いた著大輪重・横圧の推定手法^{2), 4)}の妥当性と精度についても検証を行った。そして最後に、著大輪重・著大横圧の管理手法をとりまとめた。

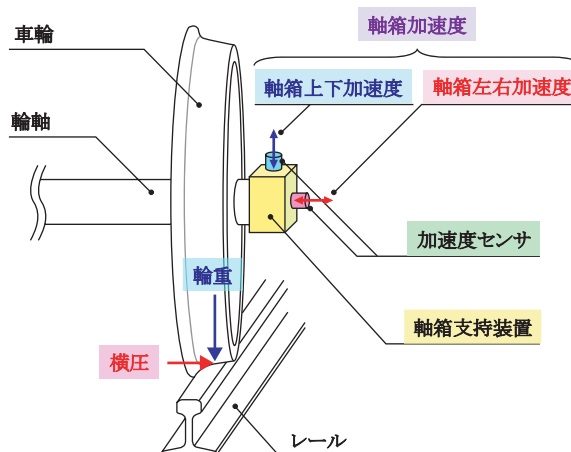


図1 輪重・横圧と軸箱加速度の関係

* 軌道技術研究部（軌道管理）

特集：軌道技術

2. 輪重・横圧変動と軸箱加速度・軌道変位の関係

2.1 輪重・横圧変動と軸箱加速度・軌道変位の相関

図2に在来線特急用車両で測定した輪重変動と軸箱上下加速度、当該区間の高低変位、水準変位とのコヒーレンスを示す。検討した区間は直線で、列車の走行速度は110km/hである。空間周波数0.1[1/m]以下で水準変位と輪重変動との相関が高く、0.03～0.05[1/m]では高低変位と輪重変動との相関が高い。また、0.167[1/m]以上では軸箱上下加速度と輪重変動の相関が高い。なお、0.15～0.25[1/m]では軌道変位、軸箱上下加速度ともに輪重との相関は低い、この帯域はもともと輪重変動のパワーが小さい帯域である。

図3に同じく在来線特急用車両で測定した横圧変動と軸箱左右加速度、当該区間の通り変位とのコヒーレンスを示す。検討した区間は半径400mの曲線で、列車の走行速度は85km/hである。空間周波数0.167[1/m]以下で通り変位と横圧変動との相関が高い。また、0.1[1/m]以上では軸箱左右加速度と横圧変動との相関が高い。

よって、10m弦正矢法による軌道検測波形からは把握できない波長6m以下の輪重・横圧変動は、軸箱加速度で把握できると考えられる。

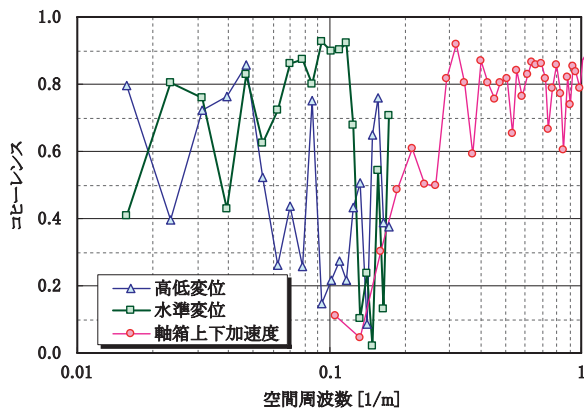


図2 輪重変動と軸箱上下加速度、水準変位および高低変位のコヒーレンス（直線、110km/h 走行時）

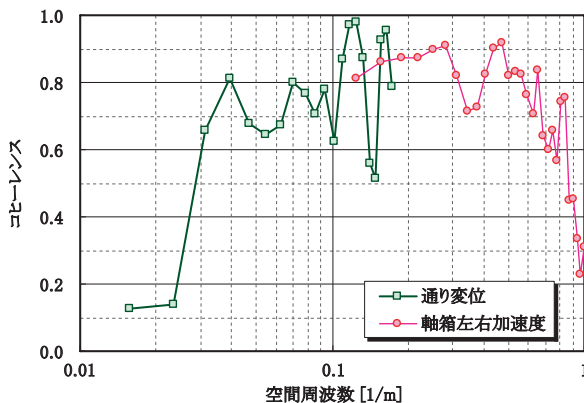


図3 横圧変動と軸箱左右加速度および通り変位のコヒーレンス（曲線、85km/h 走行時）

2.2 輪重・横圧変動と軸箱加速度・軌道変位の振幅特性

図4に図2と同じ区間における輪重変動と軸箱上下加速度、高低変位および水準変位との周波数応答関数を示す。高低変位は、波長6m以上の復元波形である。水準変位および高低変位による輪重変動は、空間周波数の増加とともに振幅利得が大きくなっている。軸箱上下加速度と輪重変動との関係については、空間周波数0.167[1/m]以上で平坦な振幅利得を示している。

図5に図3と同じ区間における横圧変動と軸箱左右加速度、通り変位との周波数応答関数を示す。通り変位は、波長6m以上の復元波形である。通り変位による横圧変動は、空間周波数の増加とともに振幅利得が大きくなっている。軸箱左右加速度と横圧変動との関係については、空間周波数の増加とともに振幅利得が小さくなっている。

よって、波長6m以上の成分については、軌道変位の波長が短いほど、輪重・横圧変動に与える影響が大きい。

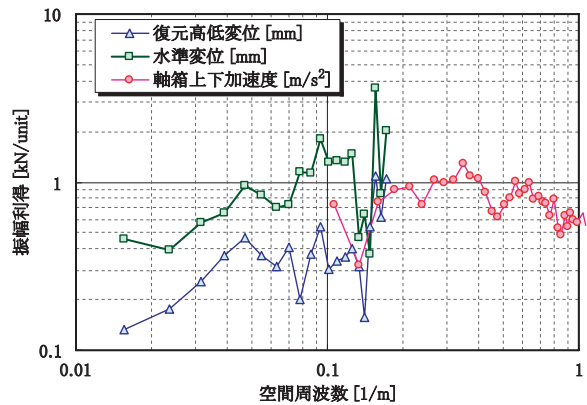


図4 輪重変動の周波数応答関数（直線、110km/h 走行時）

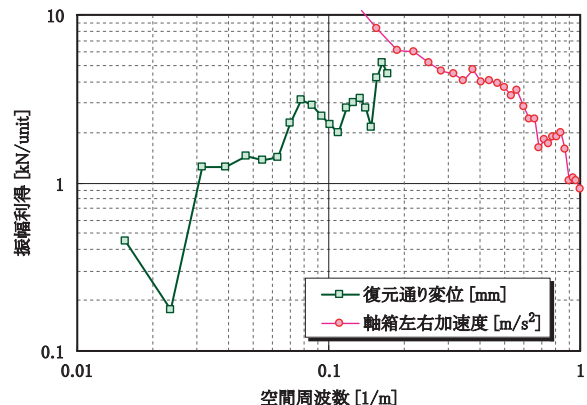


図5 横圧変動の周波数応答関数（曲線、85km/h 走行時）

3. 周波数応答法による輪重・横圧変動の推定手法

3.1 軸箱加速度と軌道変位を併用した推定手法

本章では、周波数応答法⁸⁾を用いて、輪重・横圧変動を推定する手法を検討する。周波数応答法とは、高速フーリエ変換で求めた入出力波形の周波数応答関数を逆フーリエ変換してインパルス応答を求め、これを FIR

フィルタとして用いて入力波形から出力波形の推定を行うことをいう。従来からこの手法を用いた検討が行われてきたが、入力波形に軌道変位のみを用いていたため、波長6m以上の変動成分の推定しかできなかった⁷⁾。そこで、本手法では、入力波形として軌道変位に加え、波長6m以下の帯域で輪重・横圧変動と相関の高かった軸箱加速度を用いることとした。

図6に軸箱加速度と軌道変位を併用した輪重・横圧変動の推定手法の概要を示す。波長6m以上の変動成分の推定には従来どおり軌道変位を用いる。それぞれ輪重・横圧変動と相関の高かった軌道変位を入力波形として用いることとし、輪重には水準変位、横圧には通り変位を用いる。波長6m以下の変動成分の推定には、輪重には軸箱上下加速度、横圧には軸箱左右加速度を入力波形として用いる。そして、輪重・横圧変動ともに、波長帯の異なる2つの推定波形を重ね合わせることで、最終的に従来の推定手法よりも短波長の変動成分を含んだ推定波形を得ることができる。このとき、実際にはデジタルフィルタの特性として、カットオフ周波数に遷移帯域を設ける必要があり、本手法では波長5~6m(空間周波数0.167~0.2[1/m])をそれぞれ遷移帯域として、全帯域で重ね合わせ後の波形の振幅利得が1となるようにしている。

なお、通常得られる軌道検測データは車上で0.25mの等間隔に処理された距離サンプリングのものである。これに対して、軸箱加速度は車上で距離パルスとともに数千Hzの時間サンプリングで収録された後に、地上処理によって数cmの距離サンプリングのデータを得ている。

よって、両波形のサンプリング間隔が異なるので、エイリアジングに注意しながらサンプリング間隔を一致させる必要がある。

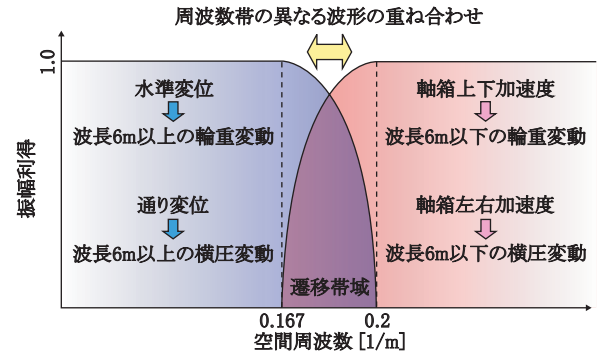


図6 軸箱加速度と軌道変位を併用した輪重・横圧変動推定手法の概要

3.2 周波数応答法による輪重・横圧変動の推定結果

図7に輪重変動の推定結果を示す。推定した区間は直線で、列車の走行速度は110km/hであり、周波数応答を求めた区間とは異なる。水準変位および水準変位による推定波形は波長6~25mのバンドパスフィルタ(BPF)を施し、軸箱上下加速度および軸箱上下加速度による推定波形は波長1~6mのBPFを施している。水準変位からの推定波形は、波長の長い緩やかな輪重変動が推定できている。軸箱上下加速度からの推定波形は、25m間隔のレール継目部の継目落ちによる波長の短い衝撃的な輪重変動をよく表わしている。そして、両波形を重ね合わ

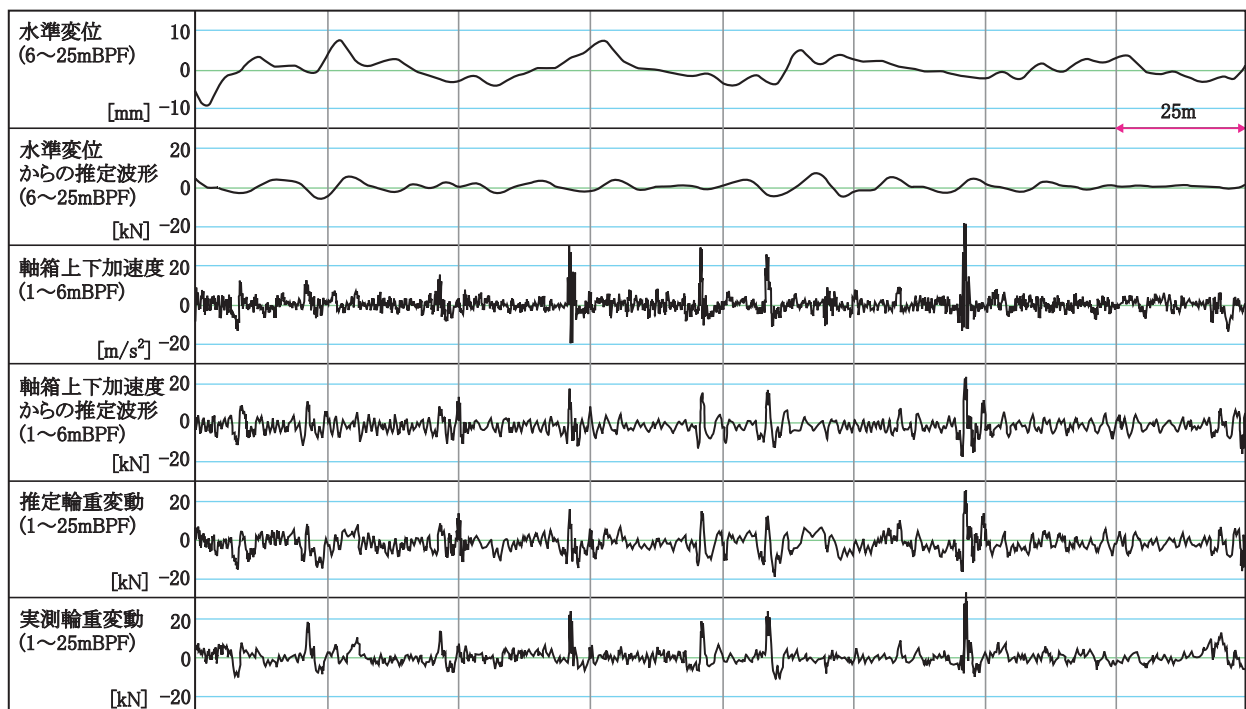


図7 輪重変動の実測波形と推定波形の比較(直線, 110km/h 走行時)

特集：軌道技術

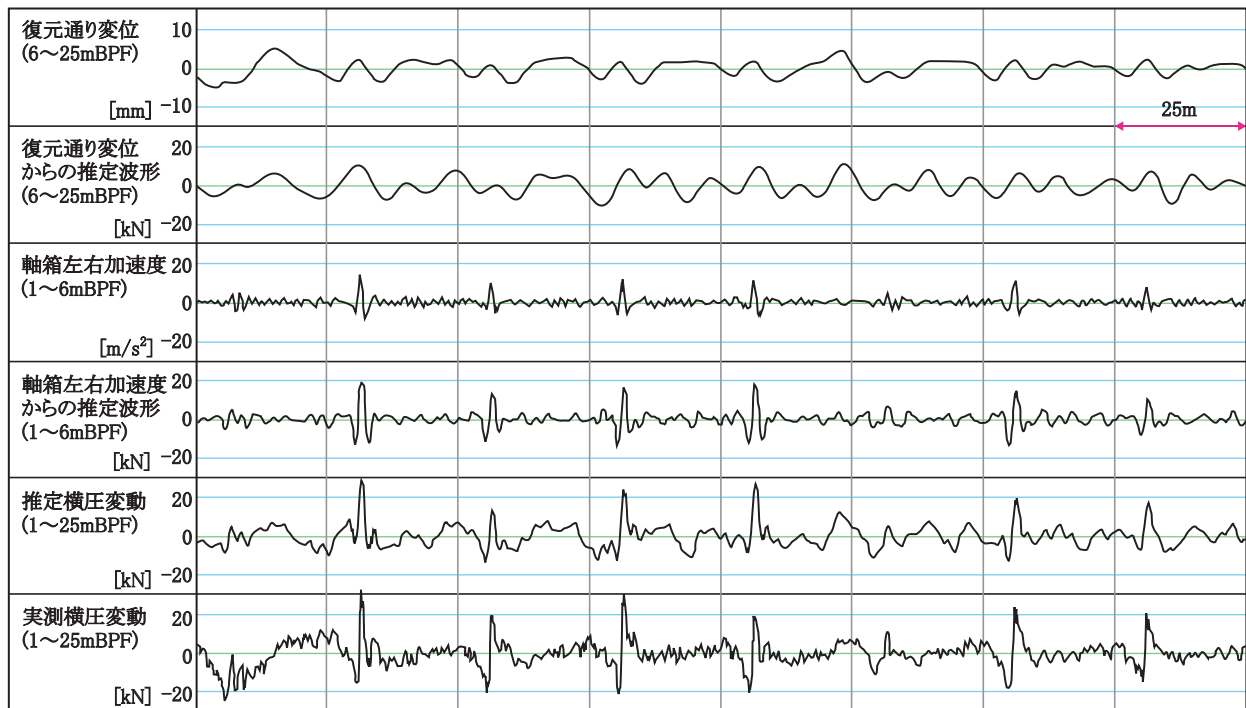


図8 横圧変動の実測波形と推定波形の比較（曲線，85km/h 走行時）

せた推定波形は実測の輪重変動とよく一致している。

図8に外軌の横圧変動の推定結果を示す。推定した区間は半径400mの曲線で，列車の走行速度は85km/hであり，輪重の場合と同じく，周波数応答を求めた区間とは異なる。通り変位および通り変位による推定波形は波長6～25mのBPFを施し，軸箱左右加速度および軸箱左右加速度による推定波形は波長1～6mのBPFを施している。通り変位からの推定波形は波長の長い横圧変動を，軸箱左右加速度からの推定波形は25m間隔のレール継目部の角折れによる波長の短い衝撃的な横圧変動をよく表わしている。そして，両波形を重ね合わせた推定波形は実測の横圧変動とよく一致している。

図9に軸箱上下加速度から推定した輪重変動と実測輪重変動の著大値の比較を示す。両波形ともに波長6m以下の変動成分であり，著大値は25m間隔のレール継目部で生じることが多いので，25mロット最大値として求めた。輪重変動の実測波形と推定波形の著大値の相関は非常に高い。

図10に軸箱左右加速度から推定した波長6m以下の横圧変動と実測した波長6m以下の横圧変動の著大値の比較を示す。著大値は，同じく25mロット最大値として求めた。横圧変動の実測波形と推定波形の著大値の相関は非常に高い。

よって，本手法は短波長の輪重・横圧変動のみならず，著大値の推定についても精度が高いことがわかる。なお，推定波形による著大値の方が輪重，横圧ともに多少大きくなる傾向にあるが，これは著大輪重や著大横圧の管理上は安全側の推定結果である。

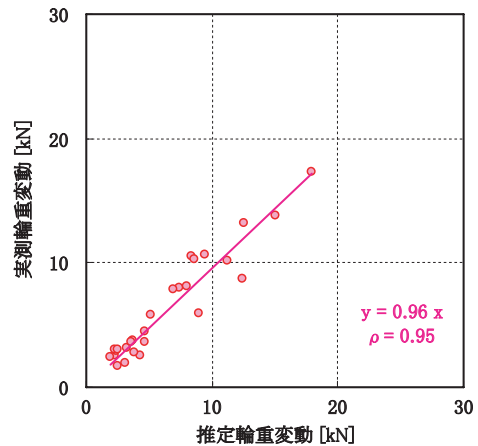


図9 輪重変動の実測波形と推定波形の著大値比較（波長1～6mのBPF処理）

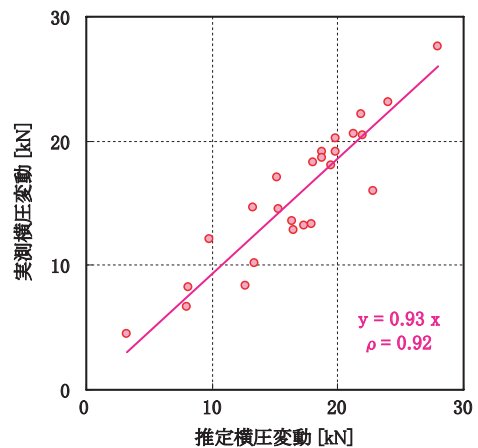


図10 横圧変動の実測波形と推定波形の著大値比較（波長1～6mのBPF処理）

4. 軸箱加速度の著大値による著大輪重・横圧の推定

4.1 簡易法による著大値推定の工学的意味

前章で、軸箱加速度および軌道変位を入力波形とする周波数応答法によって、短波長の変動成分を含んだ輪重・横圧変動を高い精度で推定できることを示した。しかし、これらの処理を行うには、時系列データの処理環境と知識が必要となる。ここで一般的に、波長の長い緩やかな輪重・横圧変動よりも、波長の短い衝撃的な輪重・横圧変動の方がその振幅は大きい。このことは、図7や図8に示した推定波形においても、軌道変位から推定した輪重・横圧変動と比較して、軸箱加速度から推定した輪重・横圧変動の絶対値が大きいことから明らかである。

一方、冒頭で述べたように軸箱加速度の著大値から、著大輪重や著大横圧を推定する簡易的な手法の検討が行われてきた^{2), 4)}。これは、図7や図8に示したように、輪重・横圧と軸箱加速度の波形が類似していることから、その著大値同士を比較し、1次式で近似することによって両者の関係を求めるものである。この方法は、軸箱加速度に対する輪重・横圧の周波数応答関数の振幅特性が周波数に関わらず一定であれば良いが、図4や図5に示したように、実際の周波数応答関数の振幅特性は周波数に対して完全に一定とはいえないので、1次式による推定（以下、「簡易法」という。）の妥当性を確認しておく必要がある。

そこで本章では、前章で述べた周波数応答法を用いて推定した輪重・横圧変動波形による著大輪重・横圧の推定結果と、簡易法による推定結果を比較し、両手法による著大値の推定精度を検証するとともに、簡易法の適用範囲について検討した。

4.2 軸箱加速度と輪重・横圧の著大値の比較

図4の輪重変動と軸箱上下加速度の周波数応答関数において、振幅利得が平坦なことを述べた。このことは、輪重の著大値と軸箱上下加速度の著大値を1次式で近似し、軸箱上下加速度の著大値から著大輪重を推定できることを示唆している。図11に輪重と軸箱上下加速度の著大値の比較を示す。検討した区間は、図9と同じである。各々の著大値は、25m ロット最大値として求めた。輪重、軸箱上下加速度ともに、波長1～6mのBPFを施し、衝撃的な変動成分のみを抽出している。両者には高い相関があることがわかる。回帰式の傾きは0.77となっており、図4に示した周波数応答関数の波長1～6mの帯域の振幅利得の平均値とほぼ等しい。

一方、図5の横圧変動と軸箱左右加速度の周波数応答関数では、振幅利得は空間周波数が増大するにつれて振幅利得が小さくなっていることを述べた。図12に横圧と軸箱左右加速度の著大値の比較を示す。検討した区間

は、図10と同じである。各々の著大値は、同じく25m ロット最大値として求めた。横圧、軸箱左右加速度ともに、波長1～6mのBPFを施している。両者は輪重の場合と比較して、僅かながらばつきが大きくなっているものの高い相関があることがわかる。回帰式の傾きは3.52となっており、図5に示した周波数応答関数の波長1～6mの帯域の振幅利得の平均値とほぼ等しいことがわかる。よって、振幅利得は平坦ではないが、衝撃的な著大値のみに着目すれば輪重の場合と同様に、横圧の著大と軸箱左右加速度の著大値を1次式で近似してよい⁴⁾。

これらの結果より、輪重・横圧と軸箱加速度の著大値を比較し、1次式で近似した場合の相関係数は、周波数応答法による推定結果の相関係数より低くなっているが、両者の著大値を線形近似し、その回帰係数を用いることによって軸箱加速度の著大値から著大輪重・著大横圧を簡易的に推定しても、大局を誤らないことがわかった。特に輪重については、周波数応答関数の振幅特性が平坦で、かつ振幅利得が簡易法の回帰係数とほぼ一致していることから、簡易法を用いても十分な精度で推定できるといえる。

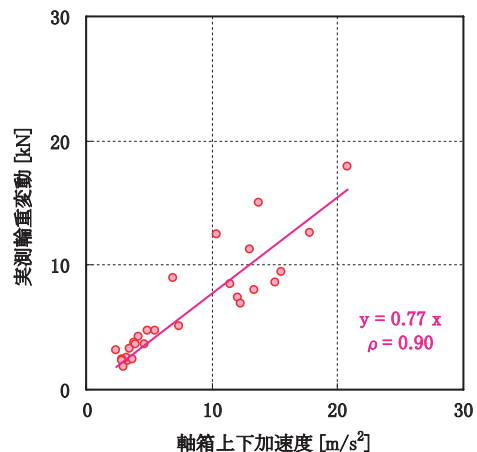


図11 輪重変動と軸箱上下加速度の著大値比較
(波長1～6mのBPF処理)

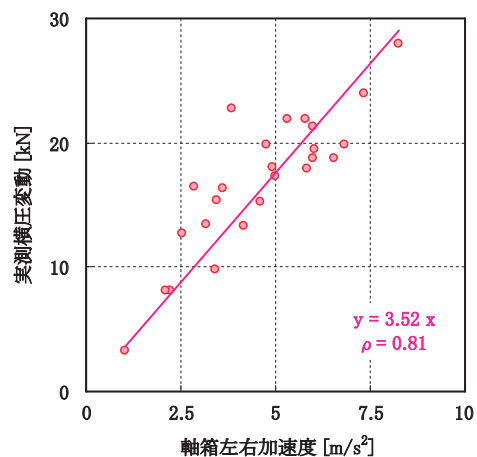


図12 横圧変動と軸箱左右加速度の著大値比較
(波長1～6mのBPF処理)

特集：軌道技術

5. 著大輪重・著大横圧の管理手法

軸箱加速度を測定することによって、短い波長成分を含んだ輪重変動および横圧変動を推定でき、それに伴って発生する著大輪重および著大横圧の発生箇所の抽出、ならびにその著大値を推定できることがわかった。しかし、軌道保守を効率的に行うためには、著大輪重や著大横圧の発生原因となる短波長の軌道形状を把握できた方がよい。これには、2台車検測車による偏心矢検測波形の利用が考えられる。偏心矢法では、10m弦正矢法とは異なり、波長5mよりも短い軌道変位についても検出できる。しかし、実際の軌道管理を行うには偏心矢での管理は難しいので、偏心矢の軌道検測波形を短弦の正矢波形に変換するのがよい。このとき、変換精度を考慮すると、4mあるいは5m弦の正矢に変換するのが妥当である。

図13に、軸箱加速度と偏心矢軌道検測波形を用いた著大輪重・著大横圧管理手順の概念図を示す。まず、3章に示した方法で著大輪重や著大横圧の発生位置を抽出する。なお、管理値は、推定結果のばらつきを考慮して設定する必要がある。これによって管理値を超える著大値が発生すると推定された箇所には、短波長軌道変位が存在すると考えられるので、偏心矢波形から変換した短弦正矢波形による軌道検測波形を用いて、著大値の発生原因となる短波長軌道変位を特定し、軌道整正を行う。静的に測定された2m弦正矢波形でも短波長の軌道変位の把握は可能であるが、2台車検測車による偏心矢波形を用いると、定期検測の結果から著大輪重・著大横圧の発生箇所の軌道変位の把握が可能となり、適切な管理・保守が可能となるという利点がある。

なお、短波長軌道変位によって発生する著大輪重や著大横圧は、走行する列車の走行速度によって大きく変化するので、従来の軌道整備基準値のように軌道変位の振幅に基準値を設けて管理するよりも、軌道材料の耐久性から定まる著大輪重や著大横圧を管理の目安として保守を行うのが妥当である。また、輪重・横圧変動の周波数

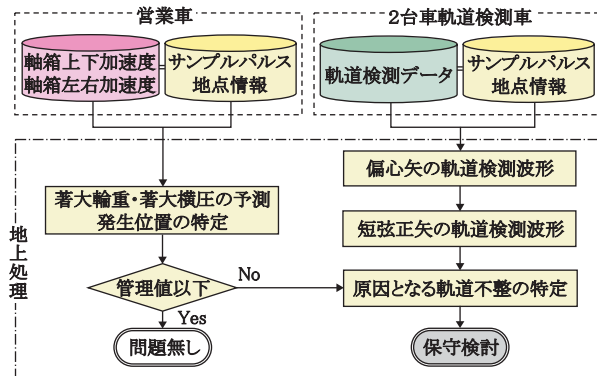


図13 軸箱加速度と偏心矢検測波形を用いた著大輪重・著大横圧の管理手法の概念図

応答法で用いたインパルス応答や、著大輪重・横圧の推定に用いた簡易法の係数は、ここで用いた車両形式のみに当てはまるものである。ここで述べた推定手法を著大値管理の実務に適用するためには、自社線区の代表的な車両で輪重・横圧と軸箱加速度の関係を求めておく必要がある。

6. まとめ

本研究では、輪重・横圧と軸箱加速度、軌道変位の関係を分析し、以下の結果が得られた。

- (1) 軌道変位と軸箱加速度を入力とする周波数応答法を用いた輪重・横圧変動推定手法を構築し、輪重・横圧変動を推定した。その結果、軌道変位だけを入力とした手法では把握できなかった波長6m以下の変動成分を含んだ輪重・横圧変動、そして著大輪重・著大横圧についても推定できることを示した。
- (2) 軸箱加速度の著大値から、輪重・横圧の著大値を推定する簡易法の妥当性を検証した。その結果、複雑な信号処理を行わずとも、軸箱加速度の著大値から著大輪重・著大横圧を推定できることを示した。
- (3) 軸箱加速度を用いて推定された著大輪重・著大横圧発生箇所に対し、偏心矢を短弦正矢に変換した軌道変位を用いて、その発生原因となる短波長軌道変位を整備するという管理手順を示した。

文献

- 1) 須永陽一, 井手寅三郎, 金尾稔: 軸箱加速度を活用した短波長軌道狂いの管理手法, 鉄道総研報告, Vol.9, No.2, pp.35-40, 1995
- 2) 須永陽一, 佐野功, 井手寅三郎: 高速新幹線における短波長軌道狂いの検出法, 鉄道総研報告, Vol.13, No.5, pp.11-16, 1999
- 3) 須永陽一, 吉田眞, 内田雅夫: 軸箱左右加速度による著大横圧検出法, 土木学会年次学術講演会, Vol.47, IV-380, pp.802-803, 1992
- 4) 田中博文, 古川敦: 軸箱左右加速度を用いた著大横圧の管理手法, 鉄道技術連合シンポジウム, J-Rail2007, pp.635-638, 2007
- 5) 林成行, 宮石源基: 輪重・横圧データ自動処理装置の開発, 鉄道技術研究報告, No.1008, 29p., 1976
- 6) 石田弘明, 松尾雅樹, 手塚和彦, 植木健司: 鉄道の新しい輪重, 横圧, 脱線係数連続測定法 (測定装置の開発), 日本機械学会論文集 (C編), Vol.63, No.614, pp.97-103, 1997
- 7) 例えば, 古川敦: 軌道狂いによる輪重変動の推定手法と軌道管理への応用, 鉄道総研報告, Vol.19, No.2, pp.35-40, 2005
- 8) 例えば, J.S. Bendat, A.G. Piersol: ランダムデータの統計的处理, 培風館, 401p., 1976