

台車前後軸での軸箱上下振動加速度を用いた 軌道状態モニタリング手法

坪川 洋友* 水野 真敏*
芳賀 昭弘** 石田 誠***

**Track Monitoring Based on Both the Axle Box Vertical Acceleration
of the Leading Axle and That of the Trailing Axle**

Yosuke TSUBOKAWA Masatoshi MIZUNO
Akihiro HAGA Makoto ISHIDA

Checking track deterioration and/or picking up the location of deteriorated track where maintenance work is due are generally carried out based on the track irregularities measured by track inspection car and/or the inspection report on track materials/components implemented by track patrol. If an appropriate on-board measurement system can take the place of the above mentioned track patrol, it can be expected that track maintenance work related to inspecting track condition can be greatly reduced. In this paper, focusing on vertical axle box acceleration to assess track condition, computer simulation and on-board measurements were carried out to evaluate the proposed system which is based on vertical axle box accelerations measured for both a leading axle and a trailing axle. As a result, it has been found out that some track conditions can be evaluated by suitably filtering vertical axle box acceleration or by taking due consideration on the difference between the axle box acceleration of the leading axle and that of the trailing axle of the same bogie.

キーワード：軸箱上下振動加速度，軸差，軌道状態モニタリング

1. はじめに

軌道の変状や保守対象箇所のうち、波長 6m より長い軌道変位は在来線では軌道検測車から得られる 10m 弦正矢法による軌道検測データによって把握され、保守投入の判定が行われる。一方、波長 6m より短い、レール頭頂面凹凸、レール継目落ち、浮きまくらぎ等の把握は、徒歩巡視や巡回検査における目視検査によるのが一般的であり、これを車両で取得可能なデータによってモニタリングができれば線路検査に要する労力が軽減される。

既往の研究では、波状摩耗等のレール凹凸の検出法として、営業車両で測定される軸箱上下振動加速度（以下、「軸箱上下加速度」という）による手法が提案されている^{1) 2) 3)}。これは、噴泥やレール凹凸等の変状箇所でも軸箱上下加速度が大きくなることを利用した手法であり、台車の 1 軸（主に進行方向前軸）で測定されたデータを用いるのが一般的である。ただし、ローカル線に適

用する場合、単線が多くまた列車組成が変更される場合も多いため、進行方向、編成両数、連結位置によって測定軸の列車編成上の相対的な測定位置が変わるが、その影響は検討されていない。

また近年では、道床や材料の状態の把握方法として、2 台車検測車による検測軸の組み合わせが異なる高低変位の差（高低検測差）を用いた方法が検討されている⁴⁾。これは、例えば噴泥等で軌道支持剛性が大幅に変化する箇所において、それぞれの検測軸通過時の軌道沈下量の違いにより演算される高低変位に差が生じることを利用した手法である。そこで、上記箇所を通過する場合の台車の前後輪軸の挙動に着目すると、台車のピッチングによる軌道変位の変化（浮きまくらぎ等による動的変位）あるいは台車前後軸で測定した軸箱上下加速度の差により軌道劣化状態を評価することが考えられる。

ここでは、軸箱上下加速度を用いて軌道状態をより正確に把握するために、軸箱上下加速度の測定軸位の違い、進行方向や編成組成の差を評価するとともに、前後軸の軸箱上下加速度の位相差の活用を図った結果について報告する。

* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

** 車両構造技術研究部 車両運動研究室

*** 鉄道力学研究部

特集：軌道技術

2. 車両／軌道動的応モデルによる状態監視法の評価

レール端部の落ち込みや噴泥が確認された箇所では実際の軌道状態を測定し、そのデータを車両／軌道動的応モデル⁵⁾に適用して、このような箇所における台車の前後輪軸の挙動をシミュレーションによって把握することにより、軸箱上下加速度の前後軸の差を用いた軌道状態評価法の適用可能性を検討した。

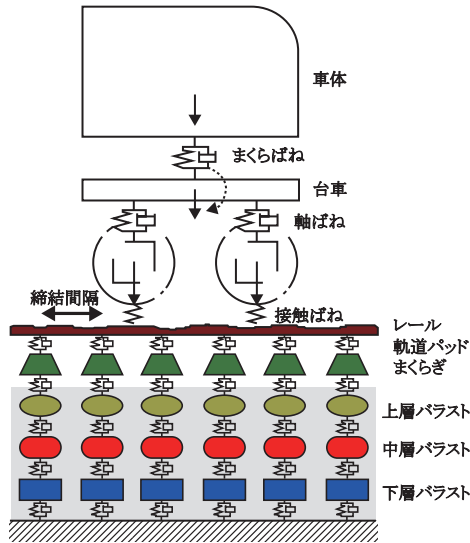


図1 車両／軌道動的応モデル

表1 車両／軌道動的応モデル計算諸元

車	半車体質量 (kg)	8656
	まくらばね係数 (kN/m)	354.76
	まくらばね減衰係数 (kN・s/m)	19.6
	台車枠質量 (kg)	760
	軸ばね係数 (kN/m)	1391.6
	軸ばね減衰係数 (kN・s/m)	40
	台車枠ピッチング慣性モーメント (kg・m ²)	1955
	台車軸距 (m)	2.1
	輪軸質量 (kg)	784.5
両	車輪径 (mm)	860
	レール種別	50kgN
	レール頭頂面半径 (mm) - 摩耗考慮	600
	レール単位質量 (kg/m)	50.4
	レール曲げ剛性 (kN・m ²)	4.05 × 10 ³
	軌道パッドばね係数 (kN/m)	1.1 × 10 ⁵
	軌道パッド減衰係数 (kN・s/m)	98
	締結間隔 (m)	0.6
	まくらぎ等価質量 (kg)	30
道	まくらぎ支持ばね係数 (kN/m)	1.187 × 10 ⁶
	まくらぎ支持減衰係数 (kN・s/m)	980
	上層バラスト等価質量 (kg)	52.5
	上層バラストばね係数 (kN/m)	0.593 × 10 ⁶
	上層バラスト減衰係数 (kN・s/m)	980
	中層バラスト等価質量 (kg)	52.5
	中層バラストばね係数 (kN/m)	0.54 × 10 ⁶
	中層バラスト減衰係数 (kN・s/m)	980
	下層バラスト等価質量 (kg)	90.3
	下層バラストばね係数 (kN/m)	1.667 × 10 ⁶
	下層バラスト減衰係数 (kN・s/m)	980
路盤ばね係数 (kN/m)	5.00 × 10 ⁴	
路盤減衰係数 (kN・s/m)	980	

2.1 車両／軌道動的応モデル

本シミュレーションで用いる車両／軌道動的応モデルの概要を図1に示す。本モデルは、レールをティモシェンコ梁とし、まくらぎ、バラスト道床3層の質点をばねとダンパーで結合する軌道モデルに、1台車と半車体で構成するモデルを組み合わせたものである。ここで、車輪とレール間のばねにはHertz接触ばねを用いている。シミュレーションに用いた各パラメータの計算諸元を表1に示す。モデルの軌道延長は90mとし、解析にはその中央付近約30m間において得られた結果を用いた。

このモデルを用いて、噴泥、レール端部の落ち込み、軌道パッドが抜けた状態を走行した場合の輪重変動を算定した。噴泥については、路盤等のバラスト軌道の下部工の剛性を軟らかい状態を想定するのではなく、浮きまくらぎ状態を想定し、まくらぎと道床バラスト間に隙間(実測値の最大値に基づき7mm)を設定することとした。ここで、まくらぎ種別は木まくらぎで、まくらぎ間隔は0.6mとした。また、レール端部の落ち込みについては現地で測定したレール頭頂面形状(1m弦で最大2.3mmの落ち込み量)を用いた。更に、軌道パッド抜けの検討においては、1締結分のパッドがない状態を設定した。

なお、これらの設定条件における列車進行方向の違いが挙動に与える影響も検討した。

2.2 シミュレーション結果

浮きまくらぎの連続する本数と動的輪重の関係を図2に示す。浮きまくらぎの本数が多くなるほど前軸の動的輪重の最大値が大きくなる傾向を示すが、後軸はそれほど明確

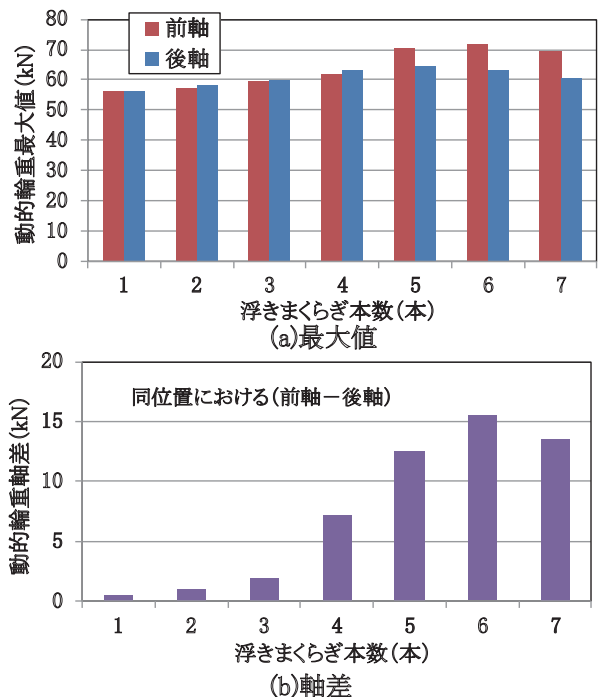


図2 浮きまくらぎ本数と動的輪重

な増大傾向を示していない。一方で、同位置における前軸と後軸の動的輪重最大値の差（以下、「軸差」という）に着目すると、浮きまくらぎが4本以上の場合に顕著に大きくなっている。

ここで、浮きまくらぎが5本連続する箇所を、90km/hで走行した場合の動的輪重の計算例を図3に示す。図から、前軸・後軸の応答の違いが確認できる。これは、浮きまくらぎが5本の場合はその範囲が約3mになり、速度90km/hで走行する場合に励起される応答の振動数が7～9Hz程度の台車枠のピッチングの固有振動数（表1の車両諸元の場合8.7Hz）に近くなることによるものと考えられる。したがって、軸差に着目することで、噴泥箇所を精度良く抽出できる可能性があると考えられる。

次に、レール端部の落ち込み箇所を、90km/hで走行した場合の動的輪重の計算例を図4に示す。レール端部付近での輪重は前軸・後軸共に150kN程度の大きな応答となっている。また、進行方向を変えた場合もほぼ同等の結果が得られた。よって、レール端部の落ち込みについては、前軸または後軸のいずれも十分に大きな応答が得られるため、その検出は前軸あるいは後軸のみの応答で可能と考えられる。

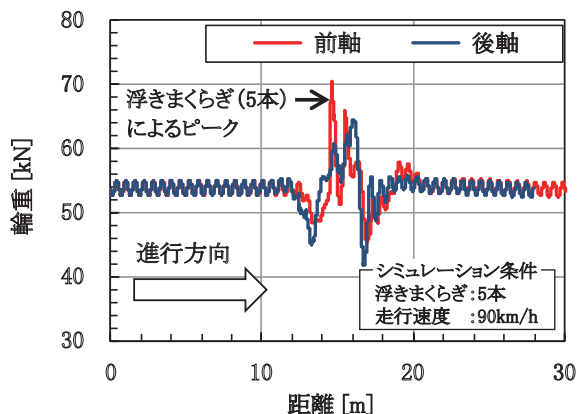


図3 浮きまくらぎ箇所走行時の動的輪重

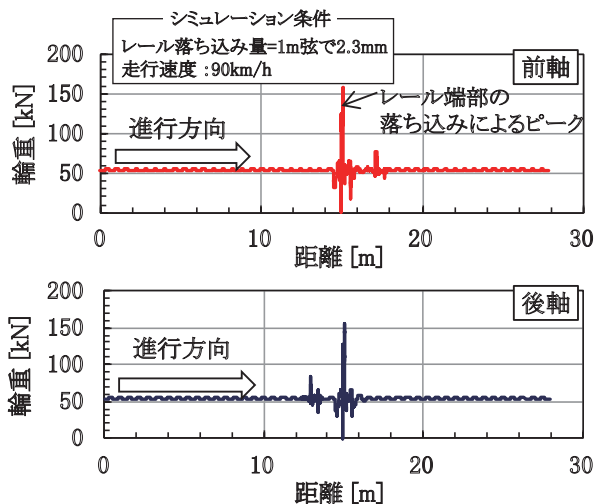


図4 レール端部の落ち込み箇所走行時の動的輪重

また、軌道パッド（厚さ7mm）を1締結分のみ抜き取った状態を模擬して動的輪重を計算したが、軌道パッドを抜いた箇所付近での輪重の応答値は、前軸・後軸共に57kN程度であり、軌道パッドを抜いていない箇所との差は3kN程度と微小であった。この程度の差異では、軌道パッド抜け以外の要因による短波長軌道変位が存在する場合、軌道パッドの抜けだけを検出することは難しいと考えられる。

以上の結果から、軸差を活用することで、1軸のみの場合よりも噴泥箇所とその程度を正確に把握できることや、レール凹凸については軸差はあまり有効ではないことなどがわかった。

3. 車上測定

シミュレーション結果から、台車内の前後軸で生じる輪重変動の傾向は、軌道状態に応じて異なる可能性を確認した。そこで、営業列車を用いて輪重変動と高い相関がある軸箱上下加速度の測定を行い、軌道状態の把握法を検討した^{6) 7)}。

3.1 測定概要

測定車両は一般型気動車を用い、同一台車の片側の前後軸箱およびその直上の台車枠に加速度センサを設置し、データレコーダにより収録を行った。測定項目は軸箱上下加速度、台車枠上下加速度とし、サンプリング周波数は2kHzとした。また、速度および位置情報を補完するために、GPS速度、車体ヨー角速度を同時収録し（表2）、線路台帳の曲線位置等を利用して、測定データと軌道データの位置照合を行った⁸⁾。なお、加速度センサは1台車のみを設置しているため、進行方向や編成により軸位が図5に示すように3通りに分けられる。そこで、この軸位の変化が軸箱上下加速度および軸差に与える影響について、同じ日に測定した上り方向・下り方向の加速度データを用いて検証した。

図5において「1両」および「2両(A)」は共に列車編成の端部台車にセンサを設置した場合である。一方、「2両(B)」は編成中間の台車にセンサを設置した場合である。

表2 車上測定項目

No.	測定項目	部位 (図5)	センサの離れ (水平方向)
1	軸箱上下加速度	①	0mm
2	軸箱上下加速度	②	2,100mm
3	台車枠上下加速度	③	210mm
4	台車枠上下加速度	④	1,160mm
5	GPS速度	⑤	1,900mm
6	車体ヨー角速度	(車内)	—
7		(車内)	—

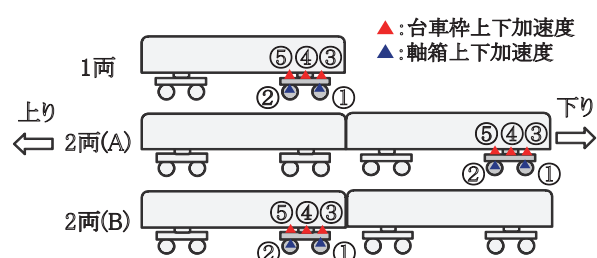


図5 加速度センサの設置位置

3.2 軌道状態

走行試験線区の主たる軌道構造は50kgNレール、普通継目、木まくらぎ(37～41本/25m)であり、道床は採石、道床厚は200～250mmである。締結装置はF形タイププレートもしくは犬くぎであり、非電化単線で年間通過トン数は約100万トンである。

この試験線区について、軌道変位の測定と道床状態等の調査を事前に行った。ここで、動的軌道変位は軌道検測車により測定し、静的軌道変位はトラックマスターにより測定した。道床状態等の調査は、列車巡視および現地調査により噴泥の有無を確認した。さらに、これらに合わせて、まくらぎの浮き量(レール締結装置を緩解した際のまくらぎとレールの隙間)や1m弦のレール踏面粗さ測定器を用いてレール端部の落ち込みを測定した。以下に調査結果を記す。

(1) 軌道変位の動的値と静的値の差

軌道検測車により測定された試験区間の軌道延長(約60km)における区間P値(高低、動的値)は25.6であった。また、トラックマスターによる測定結果(計10.5km分)と比較すると、動的値と静的値の10m弦高低変位の差は最大で0.4mm程度と小さかった。試験区間においては、道床状態等が不良な箇所が散見されたが、軌道検測車から得られる動的値には5m以下の波長成分の変位が含まれておらず、この波長域の変位については把握できていない。

(2) 道床状態

道床状態は全般的に土砂混入が認められ、目視でまくらぎ1～3本分程度の延長の噴泥が数箇所確認された。噴泥

箇所の多くは継目部であり、一部の箇所では列車通過時において軌きょうの沈下を目視で確認できた。なお、噴泥部3箇所(継目部2箇所、一般部1箇所)でまくらぎの浮き量を測定したところ、継目部で最大7mm、一般部で最大6mmであることを確認した。また、これらの箇所についてはまくらぎ下面に水・泥が滞留していることも確認した。

(3) レール端部の落ち込み

レール端部の落ち込みは、噴泥が認められ、道床状態の悪い2箇所を選択して測定した。その結果、落ち込み量の最大値は2.3mmであり、この箇所には目視によりバッターおよび継目落ちがあることを確認した。なお、バッターについては道床不良箇所に散見された。

3.3 軌道状態と軸箱上下加速度の関係

(1) 道床劣化・浮きまくらぎ

道床劣化・浮きまくらぎを検出するため、軸箱上下加速度データにバンドパスフィルタ処理を行った。ここで、まくらぎ配置間隔が約0.4～0.9mの範囲であり、仮に浮きまくらぎが1本存在する場合にはまくらぎ間隔3本(2間)の波長の高低変位が生じること、車両の軸距が2.1mであることを考慮して、フィルタの通過帯域は0.5～2.5mとした。噴泥箇所において、進行方向で最大の乖離を生じた箇所の、上り方向、下り方向で測定した時の軸箱上下加速度および軸差の波形を図6に示す。

噴泥箇所の軸箱上下加速度は、シミュレーション結果のとおり、後軸に比べて前軸で大きな値となる。しかし、進行方向の比較を行うと、下り方向の走行では前軸・後軸共に大きな加速度値であるが、上り方向の走行では後軸で非常に小さな値であり、台車の1軸にのみ加速度センサを設置した場合、測定軸が後軸になる条件では噴泥等の道床異常の検出が難しいと判断できる。

次に軸差に着目すると、進行方向によらず前軸・後軸で応答の差が見られるため、噴泥箇所では前後の区間と比較して大きな値となっている。ただし、下り測定での後軸は上り測定での前軸と挙動が似ている一方で、前軸はマイナ

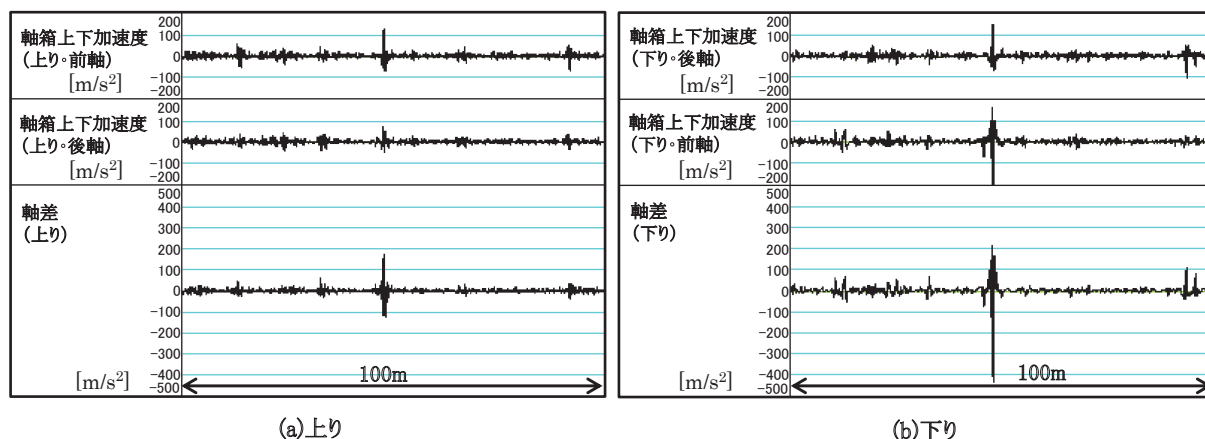


図6 進行方向で最大の乖離を生じた箇所の軸箱上下加速度と軸差の波形(走行速度90km/h)

ス側に大きな振幅を示しているため軸差がマイナス側に大きな振幅となっており、進行方向により軸差の結果には違いが生じている。この箇所は近傍に踏切があったことから、踏切と一般区間の構造境界で励起された輪重変動が軸箱上下加速度の波形に大きく影響したと考えられる。

以上のことから、軌道支持状態の変化に対しては、軸差は大きな応答を示すため、軸差による道床不良・浮きまくらぎ箇所の検出法は有効であると考えられる。ただし、特に構造物等が近傍に介入する場合、上下走行時の軸差データ間において差異が生じる可能性がある点に留意する必要がある。

(2) バッター

バターはレール端部踏面の局部的凹みであり、通過車輪によって次第にレール表面が叩き潰され、へたり変形したものである。この波長は数十 cm 以下であることから、軸箱上下加速度に波長 0.2m のハイパスフィルタ処理を行い分析した。なお、遊間の影響については考慮していない。

バターが確認された箇所の前軸と後軸の軸箱上下加速度の波形を図7に示す。前軸、後軸ともバターの付近において最大で 300m/s² 程度と大きな値である。また、図4に示したシミュレーションによる動的輪重の結果でもみられたように、前後 2.1m の地点ではバターによる前軸（後軸）の応答が台車枠を介して後軸（前軸）に影響し、100m/s² 程度の値が測定された。本試験では、バターのような短い波長に起因する軸箱の振動は、走行方向に関わらず同じ箇所では同程度の値が発生することが確認できており、台車位置や進行方向に関わらず、どの軸で軸箱上下加速度を測定しても検出可能と考えられる。

(3) 継目落ち

継目落ちは、道床沈下やレールくせによるレール継目部の不整の一つであり、レール頭頂面の落ち込みのことである。また、継目落ち箇所では、輪重変動が大きいいためさらなる継目落ちを助長し、浮きまくらぎの原因にもなる。ここでは、「道床劣化・浮きまくらぎ」および「バター」と区別することを意図し、通過帯域 0.2 ~ 0.5m のバンドパスフィルタ処理をして分析を行った。

継目落ち箇所における軸箱上下加速度の波形例を図8

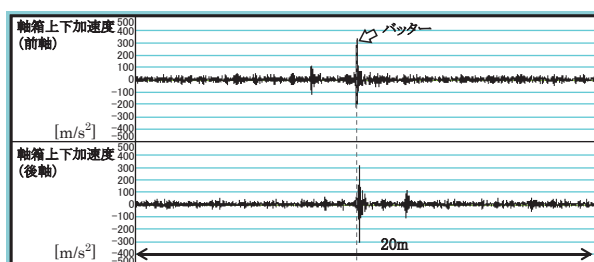


図7 バッター箇所の軸箱上下加速度波形 (走行速度 90km/h)

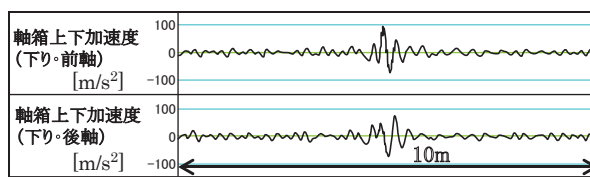


図8 継目落ち箇所の軸箱上下加速度波形 (走行速度 90km/h)

に示す。図に示す継目落ち箇所では、前軸、後軸とも前後の区間と比較して大きな値である。しかし、進行方向や編成内での台車の位置の違いにより測定値間のばらつきが大きい箇所も確認された。また、前軸と後軸ではほぼ同様の挙動を示すことが多いことから、道床劣化や浮きまくらぎの検出に用いた軸差は、継目落ちの場合効果が小さい。よって、台車の前軸、後軸の双方で測定を行い、いずれかで大きな加速度が生じた場合は、前回値との比較を行うなどの管理方法が考えられる。

(4) 内軌波状摩耗

軸箱上下加速度による波状摩耗の検出は、管理対象とする曲線ごとにパワースペクトル密度を算出し、バンドパスフィルタの通過帯域を設定するのが好ましいが、一般的には内軌は 0.1 ~ 0.2m 程度、外軌は 0.1 ~ 0.5m 程度の通過帯域を用いれば検出は可能である。ここでは、内軌波状摩耗の検出を目的として、0.1 ~ 0.2m のバンドパスフィルタ処理を行い分析した。

図9に曲線半径 320m の急曲線区間で、波状摩耗が発生している区間における軸箱上下加速度の波形を示す。波状摩耗はバターと同様に短波長の凹凸であるため、前軸、後軸共に大きな応答が見られる。ただし、内軌側の前輪と後輪のレール接触位置が異なることにより、前軸の振幅が後軸より大きくなっている。このように、前後軸の振幅差はあるものの、波状摩耗はバターと同様に、台車位置や進行方向に関わらず、どの軸で軸箱上下加速度を測定しても検出できる⁹⁾。

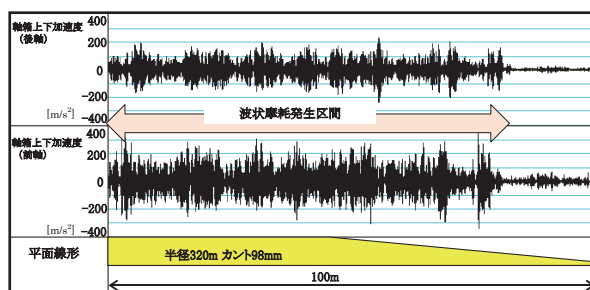


図9 波状摩耗発生区間における軸箱上下加速度の波形 (走行速度 70km/h)

4. 軸箱上下加速度を用いた管理法の提案

ここまで述べてきた軌道状態に応じた軸箱上下加速度

特集：軌道技術

の活用法をまとめると、表3のとおりとなる。ここで、軸箱上下加速度や軸差といった指標を用いて軌道状態を管理する際には、以下の2つの方法が考えられる。

(1) 閾値（目安値）による管理

各指標と軌道状態の関係に基づいて予め閾値を設定し、これを超える値が観測された場合には、現場確認を行い、必要に応じて保守を行う方法である。例えば、在来線については既往の研究において、溶接部などでのレール凹凸や波状摩耗管理の閾値として、各々軸箱上下加速度 100m/s^2 、 60m/s^2 といった値が提案されている。この考え方を適用する場合、軸箱上下加速度と軸差はバッテリーを除き、軸位及び進行方向の影響があったことから、これらの影響を考慮して閾値を設定する必要がある。そのため、閾値を測定条件別に設定することになり、指標の運用が若干煩雑になる可能性が高い。また、指標の速度依存性についても考慮する必要がある、速度域に応じた閾値の設定も必要である。

(2) 傾向変化による管理

軸位および進行方向が同一条件での測定頻度が高く、また評価する区間における列車速度が毎回の測定において概ね同じであれば、前回またはそれ以前の測定値と比較することで、急進的な軌道状態および軌道部材の変状を検知できる可能性がある。この場合、測定値と軌道状態とを明示的に関連づけることはできないが、傾向の急変箇所を現場確認するという運用が可能であり、管理法としては(1)と比較して容易になる。

表3 軸箱上下加速度の活用法と軸位の影響

軌道状態項目	軸箱上下加速度の活用法	フィルタ帯域	軸位の影響
道床劣化・浮きまくらぎ	軸差	0.5～2.5m	あり
バッテリー	前軸または後軸	～0.2m	なし
継目落ち	前軸または後軸	0.2～0.5m	あり
内軌波状摩耗	前軸または後軸	0.1～0.2m	あり

5. まとめ

営業列車で測定した軸箱上下加速度を活用した軌道状態の把握手法について、車両／軌道動的応答モデルを用いたシミュレーションと実車両による走行試験データで検証を行った。その結果、以下の知見を得た。

(1) バッテリー、継目落ち、波状摩耗の検出は、前軸または後軸で測定した軸箱上下加速度に適切なフィルタ処理を行うことで、一定の精度で検出が可能であった。ただし、継目落ちは、車両の進行方向や測定

軸の位置の影響が表れることがあることから、台車の前軸、後軸の双方で測定を行い、各軸の位置等を考慮して管理する必要がある。

- (2) 道床劣化、浮きまくらぎについては、前軸と後軸で測定した軸箱上下加速度の差をとることで、その劣化状態を特定できる精度を高められると考えられる。ただし、構造物等が近傍に介在する場合、上下走行時の軸差データ間において差異が生じる可能性がある点に留意する必要がある。
- (3) 軸箱上下加速度を用いた軌道状態の管理法については、目安値による管理を行う場合には、測定軸の位置および進行方向を考慮する必要がある。また、軸箱上下加速度は列車の走行速度の影響をうけるため、速度域に応じた値の設定が必要となる。一方、営業列車を活用した測定を前提とすると、評価区間における列車速度が毎回の測定でほぼ同じであることが予想されるので、前回または過去の測定値との比較を行うことで、急進的な軌道状態の変化や軌道部材の変状の検出が行えると考えられる。

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, 第9巻第2号, pp35-40, 1995.2
- 2) 須田義大, 奥村幹夫, 小峰久直, 銭麗, 岩佐崇史, 曄道佳明: 軸箱振動加速度を用いたレール波状摩耗検出手法の提案, 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 1998.11
- 3) 小島崇, 綱島均, 松本陽, 緒方正剛: 車上測定データによる軌道の異常検出, 第13回鉄道技術連合シンポジウム, 2006.12
- 4) 森本勝: 偏心矢測定による軌道状態の把握, 第9回鉄道技術連合シンポジウム, 2002.11
- 5) 小野重亮, 石田誠, 内田雅夫: 軌道動的応答解析による軌道狂い進みシミュレーション, 鉄道総研報告, 第15巻第4号, pp.39-44, 2001.4
- 6) 須田正規, 田中博文, 芳賀昭弘, 板東茂己, 中祐介: 前後軸の軸箱加速度の差を用いた軌道状態の評価, 第17回鉄道技術・政策連合シンポジウム, 2010.12
- 7) 水野真敏, 坪川洋友, 芳賀昭弘, 板東茂己, 須田正規: 軸箱および台車枠上下加速度による軌道状態の評価, 第18回鉄道技術・政策連合シンポジウム, 2011.12
- 8) 田中博文, 猿木雄三, 芳賀昭弘, 福山幹康: 可搬式軌道状態モニタリング装置のための車上測定データ距離化手法, 第17回鉄道技術・政策連合シンポジウム, 2010.12
- 9) 田中博文, 猿木雄三, 清水惇, 芳賀昭弘, 福山幹康: 車上測定による波状摩耗モニタリング手法, 鉄道総研報告, 第24巻第12号, pp.35-40, 2010.12