

# 車上測定による波状摩耗モニタリング手法

田中 博文\* 猿木 雄三\* 清水 惇\*

芳賀 昭弘\*\* 福山 幹康\*\*\*

## Monitoring Method for Rail Corrugation by On-board Measurement

Hirofumi TANAKA Yuzo SARUKI Atsushi SHIMIZU

Akihiro HAGA Motoyusu FUKUYAMA

Appropriate maintenance and control of rail corrugations is requested since they cause noise and vibration. However, the management of corrugations is generally carried out by a simple inspection during the track patrol. In this research, we examined an efficient evaluation technique for corrugations based on the on-board measured data. Analyzed on-board measured data include internal noise and car body acceleration, in addition to axle-box accelerations. As a result of analysis, we showed that the location of generated corrugation was able to be detected by processing signal data on the distance axis. We also executed the site measurement in the section where the corrugation was detected by the proposed method. As a result, it was also shown that the degree of the corrugation size could be estimated by this technique.

キーワード：波状摩耗，車上モニタリング，軸箱加速度，車体加速度，車内騒音，信号処理

### 1. はじめに

鉄道の軌道を構成するレールは、繰返し走行する列車からの荷重によって摩耗あるいは損傷する。その一例として「波状摩耗」と呼ばれる、レールが周期的に摩耗し、凹凸を形成する現象がある。その中でも、曲線の内軌頭頂面に発生する「内軌波状摩耗」は、国内外を問わず最も発生例の報告が多く、また騒音・振動の観点から好ましくないものとなっている。この波状摩耗の検査は線路巡回時の簡易的な測定が一般的であり、この結果に基づいて必要に応じてレール削正やレール交換が実施され、波状摩耗の凹凸が除去されている。しかし、線区全体を目視検査によって管理するのは困難であり、また、波状摩耗は列車の走行に伴って日々成長するので、波状摩耗を効率的に管理する手法が求められている。

ここで、線路長手方向に分布する波状摩耗を検出するには、線路上を走行する列車による車上からのモニタリングが効率的で良いと考えられる。車上モニタリングによる波状摩耗や溶接部凹凸等のレール凹凸の検出法としては、従来から軸箱上下振動加速度（以下、軸箱加速度という）による手法が提案されている<sup>1)~6)</sup>。これは、レール凹凸と軸箱加速度の相関が高いことを利用した手法である。また、レール凹凸上を走行すると通常よりも大きな転動音が発生することから、床下騒音<sup>1~4), 6)</sup>や

車内騒音<sup>6)</sup>を用いる手法もある。ここで、軸箱加速度は、レール・車輪間で発生する振動を測定するので、高い精度で波状摩耗を検出可能であるが、車両の床下にセンサを設置するために、測定に当たって制約がある。一方、車内騒音は車内にセンサを設置するため、軸箱加速度よりも容易に測定できるようになると考えられるが、モーター音や車内機器からの音等、その他の音源からの成分を如何にして分離するのかについての詳細な検討は行われていない。また、車体上下振動加速度（以下、車体加速度という）によって波状摩耗を検出する手法の検討も行われているが、こちらも波状摩耗以外の振動源からの成分の分離が課題となる<sup>6)</sup>。

そこで、本研究では、軸箱加速度に加えて車上で比較的容易に測定可能な車内騒音および車体加速度の3種類のデータを同時に測定し、それぞれの波状摩耗検出精度について比較検討を行った。まず、測定データを周波数分析することによって波状摩耗に起因する成分を特定し、バンドパスフィルタ処理によって必要な成分のみを抽出した。その際、波状摩耗は空間軸上での現象であることから、従来は時間周波数上で行われていたフィルタ処理について<sup>1)~6)</sup>、空間周波数上で行う新たな処理手法を提案した。次に、その処理波形を空間軸上でレベル化処理して、波状摩耗の程度を数値化する手法を提案した。合わせて、提案した処理手法で検出された波状摩耗区間において詳細な現地調査を実施し、前記3種類のデータそれぞれと波状摩耗の波高と波長を測定し、検出精度を検証した。

\* 軌道技術研究部（軌道管理）

\*\* 車両構造技術研究部（車両運動）

\*\*\* 九州旅客鉄道株式会社（施設部）

特集：軌道技術

2. 車上測定の概要

測定は、在来線を走行する特急電車の車上で実施した。図1に、車上に仮設した測定装置の概要を示す。軸箱加速度は先頭車最前軸の左右の輪軸端で、車内騒音および車体加速度は先頭車の前車直上でそれぞれ測定した。軸箱加速度測定用の加速度センサは、抵抗線型の定格容量50G、応答周波数帯域1500Hzのものを用いた。車体加速度測定用の加速度センサは、通常車両動揺の測定とは異なり百数十Hz程度の波状摩耗に起因する振動成分を測定するため、抵抗線型の定格容量10G、応答周波数帯域500Hzのものを用いた。車内騒音の測定には普通騒音計を用い、周波数重み特性はC特性とした。その際、床下からの音を効率的に収録するために、マイクは下向きに設置し、さらに内部反響の小さな木製の箱を固定治具として用いた。なお、速度発電機パルス（以下、速発パルスという）および地点検知パルスを、サンプリング周波数12000Hzでデータレコーダーに収録した。

3. 車上測定データによる内軌波状摩耗の検出

車上では、さまざまな周波数成分を含んだデータを時間サンプリングで収録している。本章では、まずこれらのデータに対し周波数分析を行い、波状摩耗に起因する成分を特定し、バンドパスフィルタ処理によって必要成分のみを抽出する。次に、その処理波形をレベル化処理して、波状摩耗の程度を数値化する手法を検討する。図2に、車上で収録したデータの処理フローを示す。以降、このフローに沿って車上測定データの処理を行う。

3.1 事前処理

車上で時間サンプリングされたデータを、軌道の保守・管理に用いるには、地上での位置を把握するために距離サンプリングのデータに変換する必要がある。その際、測定データに含まれる様々な周波数情報が欠落しないように、エイリアジングに注意しながら処理しなければならない。

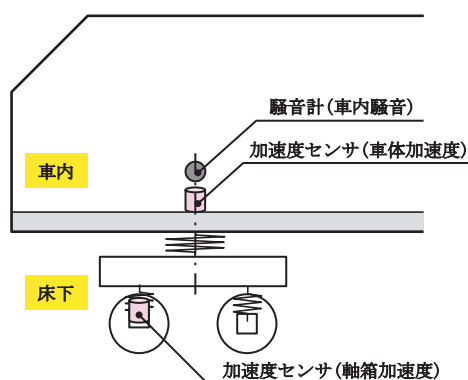


図1 車上測定装置の概要

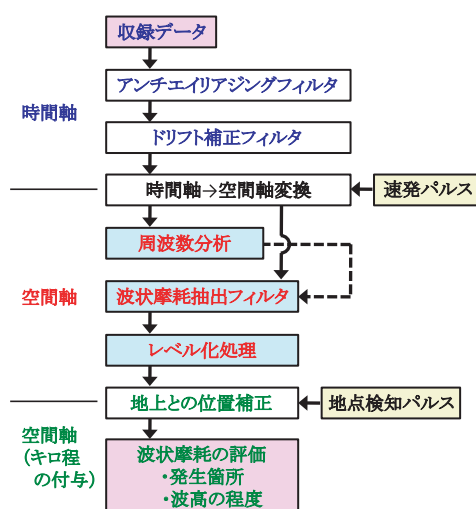


図2 車上測定データの処理フロー

まず、今回対象としている内軌波状摩耗の波長は、一般的に10～15cm程度とされている。したがって、1cm間隔で距離サンプリングすれば、十分にその凹凸形状を把握できる。次に、試験を行った列車の最高速度は、130km/hであることから、式(1)の関係を用いて700Hzのローパスフィルタ（以下、LPFという）でアンチエイリアジング処理すれば、1cm間隔で距離サンプリングしてもエイリアジングを起こさない。なお、距離サンプリングの間隔はさらに短くすることも可能であるが、波状摩耗の波長とデータ処理時間を考慮して1cmとしている。

$$f \leq \frac{1}{\lambda} \times \frac{V}{3.6} \times \frac{1}{\alpha} \tag{1}$$

ここで、 $f$ ：LPFの周波数 [Hz]

$\lambda$ ：サンプリング間隔 [m]

$V$ ：列車の走行速度 [km/h]

$\alpha$ ：係数（2.5～5.0程度）

また、軸箱加速度や車体加速度では、測定時に温度ドリフト等の影響でデータのゼロ点がずれる場合がある。これを補正するために、0.5Hzのハイパスフィルタ処理も合わせて行った。

この時間軸上の処理波形に対して、速発パルスを用いて、空間軸上のデータに変換した。なお、速発パルスとは、車輪の回転に伴って発生するパルス信号であり、空間軸上で等間隔なパルスを刻む性質を持つものである。

3.2 周波数分析による波状摩耗成分の特定

図3に、A、B、Cの3区間で測定した左右車輪の軸箱加速度のパワースペクトル、図4に同じく3区間の車体加速度および車内騒音のパワースペクトルの例を示す。区間Aは左レールが内軌、区間Bは右レールが内軌となる半径250mの曲線であり、区間Cは波状摩耗の無い直線である。いずれの区間も、列車の走行速度は約60km/hである。両図より、いずれのパワースペクトルにおいて

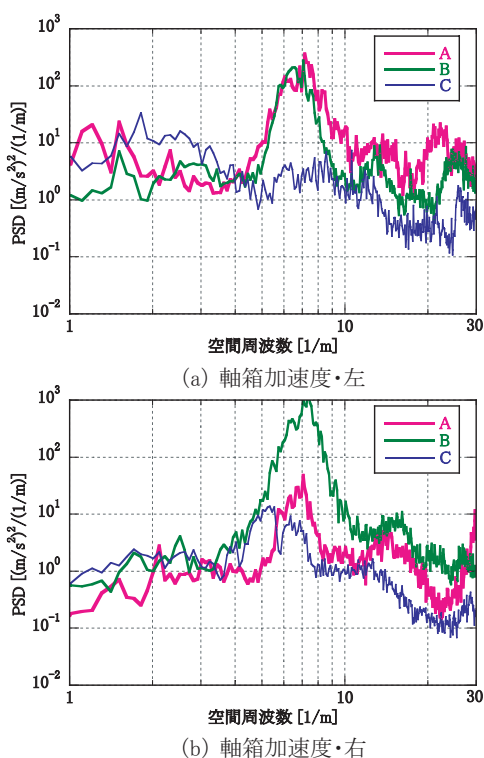


図3 軸箱加速度的パワースペクトルの例

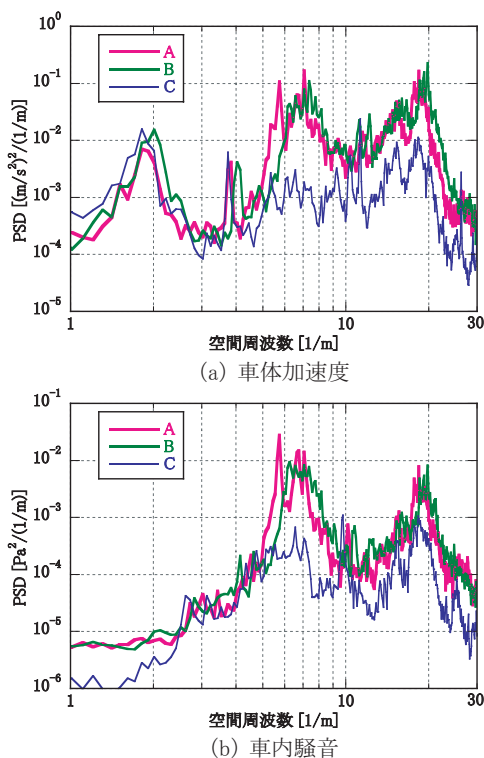


図4 車内測定データのパワースペクトルの例

も、区間AおよびBでは空間周波数で6~7[1/m]程度(波長0.15m程度)の帯域にピークが見られるが、区間Cでは顕著なピークは見られない。したがって、区間AおよびBに波長0.15m程度の波状摩耗が存在していると考えられる。また、それ以外の帯域では、その他の要因による考えられる複数のピークが見られる。なお、軸箱加速度では外軌側のパワースペクトル(左の区間Bおよび右の区間A)でもピークが見られるが、区間Bでは内軌側のピークに比べてそのパワーは1/10程度と小さい。また、パワーのピークは区間Bの方が区間Aよりも大きい。しかし、車体加速度や車内騒音では両区間のピークは同程度であることから、右端の軸箱の方がギアボックス等の影響により加速度が大きく出ている可能性が考えられる。

### 3.3 BPF処理による波状摩耗成分の抽出

過去の多くの研究では、波状摩耗に起因する周波数成分の抽出に時間周波数軸上でフィルタ処理を行っていた<sup>1)~6)</sup>。しかし、波状摩耗はレールに形成される空間軸上の周期的な凹凸であることから、時間周波数軸上でのフィルタ処理では列車の走行速度によっては波状摩耗成分をカットオフする可能性がある。それを回避するためには遮断周波数を広く設定すればよいが、この場合は波状摩耗以外の周波数成分も含まれる可能性がある。これらを回避するためにも、空間周波数軸上でバンドパスフィルタ(以下、BPFという)処理する方が、列車の走行速度の変化にも対応でき合理的である。

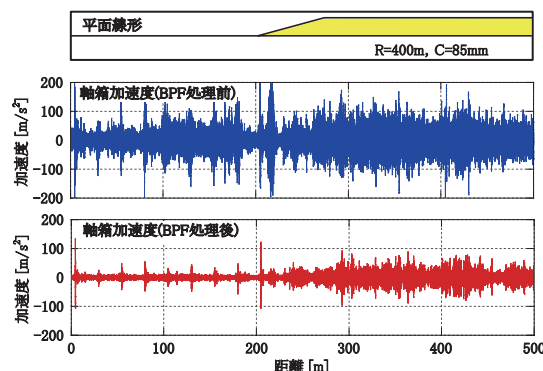


図5 BPF処理前後の軸箱加速度の波形例

そこで、本研究では、波状摩耗に起因する周波数成分のみを抽出するため、波長0.10~0.25mでBPF処理することとした。図5に、車上測定データのBPF処理波形の一例として軸箱加速度の例を示す。この処理によって、軸箱加速度、車体加速度、車内騒音ともに、波状摩耗以外の周波数成分が除去され、曲線区間と直線区間の振幅の差が顕著になり、波状摩耗の検出精度が向上した。

なお、このBPF処理の後に、車輪の空転や滑走による位置ずれを補正するために、約1km間隔で地上に敷設されている地上子の信号を用いて、空間軸上のデータに保線の分野で一般的に用いられている「キロ程」を付与している<sup>7)</sup>。この処理は、車上データと地上との位置ずれを解消するとともに、線路付け替え等に伴う重キロおよび断キロの補正を行っている。この処理によって、位置

特集：軌道技術

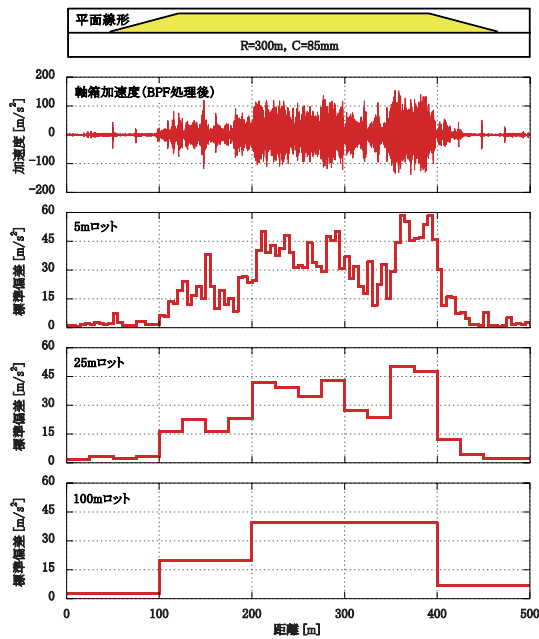


図6 軸箱加速度の区間標準偏差の例

補正が適切に行われると、測定時期の異なるデータの経時変化の分析等が可能となる。

3.4 区間標準偏差による波状摩耗の検出

ここまでの処理によって、図5に示したように、波状摩耗に起因する成分を抽出するBPF処理した波形の振幅の大小によって波状摩耗の発生区間を検出できることが示された。ここで、波状摩耗はある区間にわたって発生するので、標準偏差に代表される区間統計量で評価する方法が考えられる<sup>8)</sup>。図6に、ロット長を5m、25m、100mと変化させた場合の区間標準偏差の算定結果の例を示す。この手法では、波状摩耗発生区間の標準偏差が大きくなるので、しきい値を設けて管理することが可能である。同図より、ロット長が短いほど発生区間の分解能が高いが、継目や溶接部等の局所的なレール凹凸の影響を受けやすくなる。このように、区間標準偏差による手法は、ロット長の影響を大きく受けることがわかる。同図より、波状摩耗の状態を区間標準偏差で評価する場合には、レールの基本長さが25mであることも考慮すると、ロット長は25mとするのが適当であると考えられる。

3.5 レベル化処理による波状摩耗の検出

標準偏差に代わる波状摩耗の検出手法として、レベル化処理を提案する。レベル化処理とは、騒音や振動の分野で多用される処理手法であり、既に軸箱加速度への適用例がある<sup>4)、5)</sup>。この処理は、通常は時間軸上で処理が行われるため「時間重み付きレベル」と呼ばれる。なお、レベル化処理の利点としては、加速度波形のように連続量として表示できながらも、LPF処理によるデータ圧縮が可能になる点にある。データ圧縮が可能になると、サ

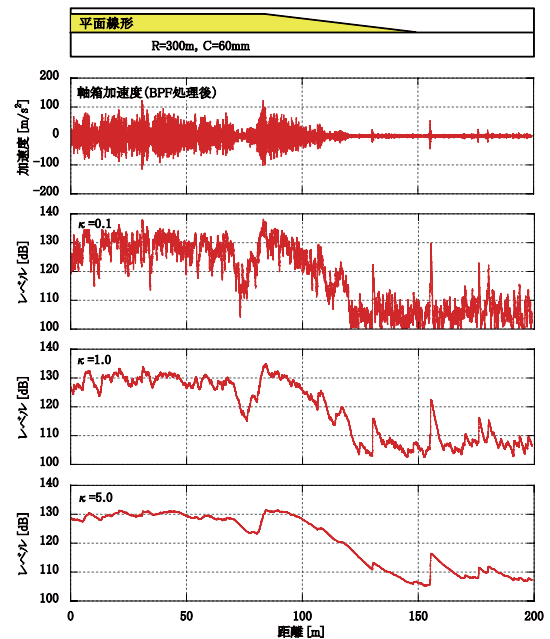


図7 空間重み付きレベルのレベル波形の例

ンプリング間隔を広く設定することができ、システム上で軌道検測データ等と同様に扱うことが可能となる。

この時間重み付きレベルの概念を、空間軸上のデータに適用するため、式(2)に示す「空間重み付きレベル」を定義した。ここで、空間定数  $\kappa$  は、時間軸上の時定数  $\tau$  に相当し、空間軸上での重み付けを行うための定数である。

$$L(x) = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{\kappa} \int_{-\infty}^x a^2(\zeta) e^{-(x-\zeta)/\kappa} d\zeta \right\} / a_0^2 \quad (2)$$

ここで、 $L(x)$ ：観測位置  $x$  における空間重み付きレベル [dB]

$\kappa$ ：空間重み付けのための空間定数 [m]

$\zeta$ ： $-\infty$  で表すある手前の位置から観測位置  $x$  までの積分変数

$a_0$ ：レベル化のための基準値

(加速度の場合： $a_0 = 10^{-5}$  [m/s<sup>2</sup>])

騒音の場合： $a_0 = 10^{-5}$  [Pa])

図7に、空間定数  $\kappa$  を0.1、1.0、5.0と変化させた場合の、空間重み付きレベルの軸箱加速度のレベル波形の例を示す。同図より、 $\kappa$  が小さいと波形の変動が大きくなり、継目等の衝撃的な振動の影響が大きくなることがわかる。一方、 $\kappa$  が大きいと波形の変動が小さくなり、波形も平滑化されることがわかる。このことから、波状摩耗の発生区間を表わすには、 $\kappa = 1.0$ 程度が適切であることがわかる。これは、波長1mの1次のLPF処理をしていることに相当する。以上の結果より、これ以降、 $\kappa = 1.0$ として検討を進める。

図8に、レベル化処理による波状摩耗発生区間の検出例を示す。同図は、図7と同じ区間のデータである。軸箱加速度が曲線部と直線部のレベル差が最も大きく波状摩耗の検出精度は高いと考えられる。しかしながら、車

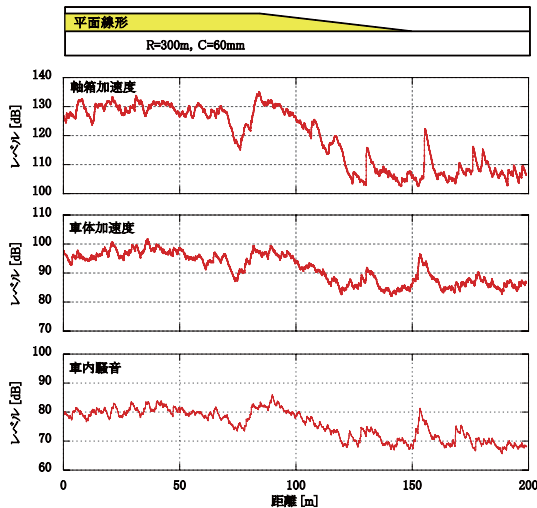


図8 レベル化処理による波状摩耗の検出例

体加速度および車内騒音においても曲線部と直線部で明確なレベル差が得られており、本手法を適用することにより、いずれのデータを用いても波状摩耗の発生区間を検出可能なことがわかる。

#### 4. 現地調査による検出手法の精度検証

##### 4.1 波状摩耗の凹凸測定の概要

3章に示した車上測定データを用いた手法で波状摩耗が存在すると判断された区間に対して、その検出精度を検証するために、詳細な現地調査を行った。現地調査では、波状摩耗の波長と波高を把握するために、凹凸測定を実施した。波状摩耗の凹凸測定には、レールに固定するタイプの測定器が用いられることが多い。この装置は、レール凹凸を接触式変位計で直接測定するので1m間の正確な形状を得ることができる。その一方で、可搬性に乏しく、測定箇所が制約される。

しかしながら、この度、図6や図7に見られるように、同一曲線内であっても車上測定データから推定される波状摩耗の程度にばらつきが見られたことから、レール凹凸を連続的に測定可能なCAT (Corrugation Analysis Trolley)<sup>9)</sup> と呼ばれる装置を用いて測定を行った。CATとは、トロリー形式の装置で、軌道上を人力で推進移動させながらレール凹凸測定が可能である。慣性測定の原理を用いており、装置内に内蔵されたサーボ型の加速度センサの出力を、2回積分してレール凹凸の波形を得ている。

##### 4.2 CATによる波状摩耗の連続凹凸測定結果

図9に、CATによる内軌波状摩耗の測定波形の例を示す。車上測定データと同様に、波長0.10～0.25mの凹凸成分を抽出するBPF処理を行っている。図には、比較のためBPF処理した内軌側の軸箱加速度の波形も示している。同図より、直線部から緩和曲線を経て、曲線区間に

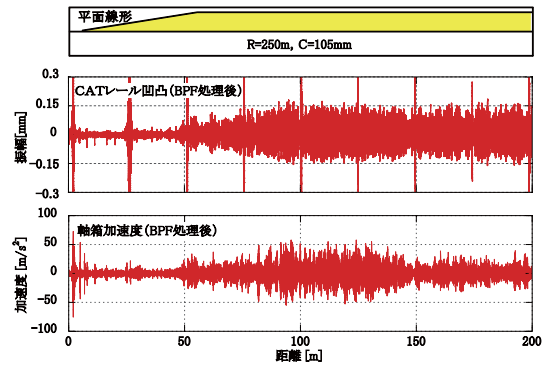


図9 CATによる波状摩耗の測定結果の例

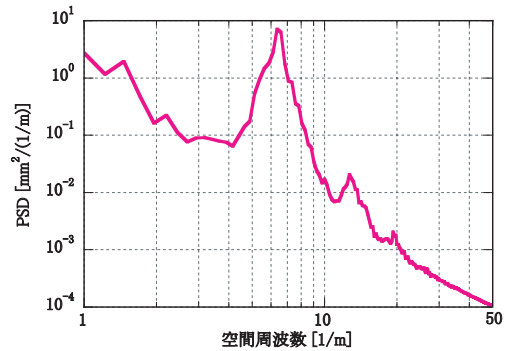


図10 CATによる波状摩耗凹凸のパワースペクトルの例

なるに従って振幅が大きくなっている。また、軸箱加速度の測定結果とも概ね一致している。なお、CATの測定データに見られる25m間隔の著大値は、継目通過時の衝撃的な加速度によるノイズである。このため、今回の測定では、連続測定ながらも継目前後2m程度は、データ処理上、欠測区間としている。

図10に、CATによる内軌波状摩耗の凹凸測定結果のパワースペクトルの例を示す。図3および図4に示した車上測定データのワースペクトルと同様に、空間周波数6.5[1/m]程度（波長0.15m程度）の帯域にピークが見られ、内軌波状摩耗の凹凸を検出していることがわかる。

##### 4.3 車上データと波状摩耗の波高の比較

図11に、CATによって測定された波状摩耗の波高と同一区間の車上で測定された各データの空間重み付きレベルとの比較を示す。なお、各プロットはそれぞれ5m間の平均値で、波状摩耗の波高が0.05mm以下の区間と継目前後の値は除去してある。同図より、いずれの車上測定データにおいても、波状摩耗の波高が高いほど、レベルも大きくなっており相関も高いことがわかる。このことから、車上測定データの空間重み付きレベルから、波状摩耗の波高を推定できる見通しが得られた。なお、回帰式の傾きは、軸箱加速度が最も急になっており、相関係数も大きいことから、波状摩耗の検出精度が最も高いと考えられる。また、車内騒音では、軸箱加速度とほぼ同等の相関係数が得られており、実用上は十分な検出精

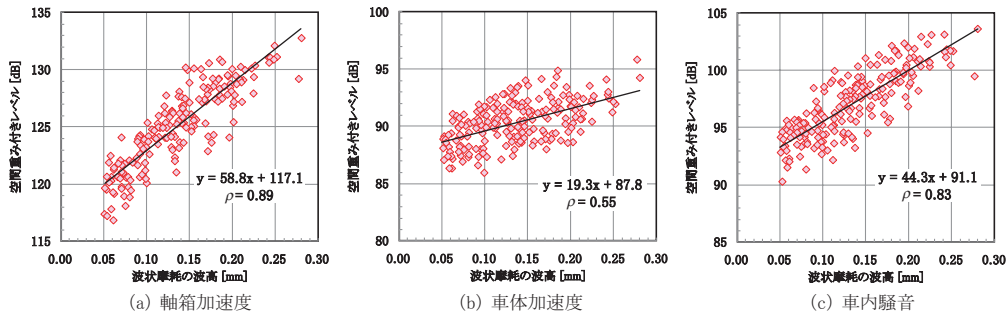


図 11 波状摩耗の波高と空間重み付きレベルの関係

度を有していると考えられる。車体加速度では、軸箱加速度や車内騒音と比較して相関係数は小さいが、他の車上測定データと同様に、波状摩耗の波高に比例してレベルが大きくなる傾向にあることがわかる。

なお、車上測定データは走行速度に比例して大きくなることが容易に想像されるため、今回の検討では列車の走行速度が概ね一定の区間のデータを用いて分析を行った。軌道検測車で測定されたデータを用いる場合は、走行速度の変化が大きいため、速度補正は必須となる。しかし、営業車で測定されたデータを用いることができれば、軌道検測車と比較して測定頻度も高まり、かつ走行速度も比較的安定していると考えられる。その際、線区を最高速度で走行する列車で測定するのが望ましい。さらに、複数の測定結果での最大値で評価を行う等の工夫をすれば走行速度の影響は概ね無視できるものと考えられる。

## 5. まとめ

本論文では、車上測定データを用いた波状摩耗の検出手法について検討を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 内軌波状摩耗発生区間を走行した際の軸箱加速度、車体加速度および車内騒音のいずれにおいても、周波数分析の結果、波状摩耗に起因する成分が見られた。内軌波状摩耗は、空間軸上の凹凸であるので、空間軸上でその波長を抽出するバンドパスフィルタ処理を行うことによって、波状摩耗の発生区間を検出できることがわかった。
- (2) 空間重み付きレベルを定義し、(1) で得られた処理波形に対し、空間定数 1.0 程度で処理を行うことによって、波状摩耗の発生区間に加えて、波高についてもそのレベル値から推定できることがわかった。

以上の検討結果より、地上測定を行わなくとも、車上で測定されたデータを用いることによって、波状摩耗の発生区間を検出し、おおよその波高を推定できることがわかった。さらに、波状摩耗の検出に関して、従来一般的であった軸箱加速度に加えて、車上で比較的容易に測定可能な車体加速度および車内騒音からも比較的高い精度で検出でき

ることがわかった。ただし、いずれの指標のしきい値も車両形式に依存することが予想されるので、今後、異なる車両形式においても同様の測定を実施する予定である。

## 6. おわりに

本論文では、車上測定データを用いた内軌波状摩耗の検出手法について述べた。しかし、波状摩耗には、今回検討を行った波長 100～150mm 程度の内軌波状摩耗の他にも、曲線外軌や直線区間に発生する波長 250～500mm 程度のもの等、数種類が確認されている。これらについては、バンドパスフィルタの波長をそれぞれの波状摩耗の波長に応じて選定すれば、同じ処理手法で検出が可能である。この結果については、別途報告する予定である。

## 文 献

- 1) 椎名公一, 須永陽一: 転動音の立場から見たレール頭頂面凹凸の管理手法, 鉄道総研報告, Vol.4, No.11, pp.9-16, 1990
- 2) 須永陽一, 内田雅夫: 輪重変動の立場から見たレール頭頂面凹凸の管理手法, 鉄道総研報告, Vol.6, No.11, pp.49-57, 1992
- 3) 須永陽一, 井出寅三郎, 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
- 4) 須永陽一, 成毛将利: 在来線における転動音低減のためのレール凹凸管理手法, 鉄道総研報告, Vol.16, No.4, pp.11-16, 2002
- 5) 田中博文, 福山幹康, 三和雅史: レール凹凸評価指標と削正車最適運用計画策定システム, 鉄道総研報告, Vol.23, No.10, pp.5-10, 2009
- 6) 小島崇, 網島均, 松本陽, 緒方正剛: 車上データによる軌道の異常検出, 日本機械学会論文集 (C 編), 第 72 巻, 720 号, pp.107-114, 2006
- 7) 吉村彰芳, 吉田康夫, 細川岳洋, 菊池勝浩: 軌道保守管理データベースシステム: マイクロ LABOCS-II+ の開発, 鉄道総研報告, Vol.6, No.11, pp.69-78, 1992
- 8) 田中博文, 古川敦: 軸箱上下加速度の区間統計量を用いたレール頭頂面凹凸の評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 62 回, No.4-290, pp.579-580, 2007
- 9) S. L. Grassie: Rail corrugation: advances in measurement, understanding and treatment, Wear, No.258, pp.1224-1234, 2005.