

信号設備の振動耐久試験における加振加速度の提案

押味 良和* 潮見 俊輔* 神谷 剛志* 一色 竜杜*

Proposal for Excitation Acceleration in Vibration Endurance Testing of Signaling Equipment

Yoshikazu OSHIMI Shunsuke SHIOMI Tsuyoshi KAMIYA Ryuto ISSHIKI

Signaling equipment is installed at a place where vibrations occur during the passage of trains over rails, sleepers, and roadbeds. It is therefore necessary to design signaling equipment taking into account the influence of vibration to avoid damage due to vibration. In recent years, the installation environment of signaling equipment has changed due to the speedup of trains and changes in tracks and structures. However, the details of vibration propagation to signaling equipment have not been investigated so far. In addition to current issues, this paper reports on a guideline for vibration acceleration amplitude in vibration endurance testing.

キーワード：信号設備，振動，加速度，振動耐久試験，加速度測定

1. はじめに

鉄道の信号設備は，列車通過時の振動をレールやまくらぎ，路盤等を介して受ける位置に設置されることから，その機能を損なわないために使用環境における振動の影響を考慮して設計する必要がある。信号設備の振動試験に関する日本産業規格 JIS E 3014（鉄道信号保安部品－振動試験方法，以下，JIS E 3014）では，設備の設置箇所ごとに実施すべき試験項目と加振方向，試験時間，振動数や振幅等の試験条件が定められているが，1976年に制定されて以来，当該規格の試験項目や試験条件の大きな見直しは，行われていない^{1) 2) 3)}。

その一方で，近年の列車速度の向上や新工法の軌道や構造物の導入等により，列車通過時の振動に影響しうる環境は変化しているが，信号設備に対する影響は明らかにされていない状況である。

そこで，現在の信号設備の使用環境に基づく振動耐久試験条件を示すため，信号設備が受ける振動加速度を調査し，その実態把握を行った。本報告では，現状の一般的な使用環境下で晒される振動加速度を明らかにし，今後の JIS 規格改定の検討に必要となるデータを示すとともに，振動耐久試験における正弦波加振試験の加振加速度振幅の在り方を示す。また，国内の使用環境と海外の状況を比較するため，欧州の鉄道沿線における振動加速度の周波数特性が示されている国際規格 IEC 62498-3（以下，IEC）と，今回，取得した国内の信号設備使用環境における周波数特性の比較を行った。

2. 信号設備の振動耐久試験規格とその課題

2.1 振動設備の振動耐久試験規格の制定と改定経緯

JIS E 3014 は，1972 年度に社団法人信号保安協会に設置された原案作成委員会の審議を経て，1976 年 12 月に制定された¹⁾。その後，1992 年に SI 単位系への移行と規格票様式の改定を行い²⁾，1999 年には，振動試験の際，加振装置に ATS 地上子を固定している部分が，摩擦等により発熱してしまうという課題に対して，振動耐久試験の際に温度上昇が生じる場合には，試験を断続させる等の処置を可能とする内容に改定を実施している³⁾。制定から 2 度の改定が行われているが，試験方法および試験条件に関しては，制定時と同一の内容である。

2.2 過去の振動環境調査とその課題

JIS E 3014 が制定された際の振動環境を調査するため，振動加速度測定を実施した箇所の条件を表 1 に示す⁴⁾。これらの測定は，バラスト軌道のみであり，主として新幹線と在来線の土構造区間で行われた。高架橋区間での調査は，新幹線，在来線ともに 1 箇所であった。また，測定された新幹線の最高速度は，土構造区間で 188km/h，高架橋区間で 205km/h であり，在来線の最高速度は，土構造区間で 112km/h，高架橋区間で 47.5km/h であった。

これに対して，制定後の列車速度の向上やバラスト軌道以外の新工法の軌道や構造物の導入等により，信号設備の設置環境は変化していると考えられるが，設備に伝播する振動の変化やその影響が現行の JIS E 3014 の試験条件には反映されていないという課題がある。この課題に対して，現在の信号設備の実使用環境の実態を把握するための調査が必要であると考え，様々な使用環境における振動加速度の測定を実施した。

* 信号技術研究部 信号システム研究室

表 1 過去の振動環境調査における測定条件

	レール	構造物種別		最高速度 (km/h)
		土構造	高架橋	
新幹線	50T	○	—	188
	50T	—	○	205
在来線	50N	○	—	112
	50N	○	—	75
	50N	○	—	70
	50N	○	—	65
	40N	○	—	66
	40N	○	—	43
	40N	○	—	20
	37	○	—	65
	37	○	—	54
	37	○	—	47
	37	○	—	20
	50N	—	○	47.5

3. 現地における信号設備の振動調査

3.1 振動加速度調査の箇所選定

現在の新幹線および在来線では、過去に振動環境調査が行われた土構造物や高架橋に敷設されたバラスト軌道の区間に加えて、スラブ軌道や直結軌道などの軌道構造が採用されている線区がある。

また、営業最高速度については、新幹線で320km/h、一部在来線で130~160km/hに向上している。本調査では、現在の振動環境の実態を把握することを目的とし、信号設備が設置される箇所で振動加速度の調査を行った^{5) 6)}。調査箇所は、過酷側の使用条件箇所として、新幹線では高速走行を行う区間、在来線では、貨物列車や特急列車が走行する区間を抽出し、これらの区間において構造物種別が異なる箇所で調査を行った。

3.2 現地振動調査の測定項目および測定方法

測定は、各調査箇所においてレール底部、まくらぎ上を必須とし、近隣に器具箱が設置されている場合は、器具箱を含めた3点で実施した。測定には、圧電型の加速度センサ（リオン PV-93）およびチャージアンプ（リオン UV-15、UV-16）を使用し、測定開始のトリガとして、車軸検知器（近接センサ：コプト R004-MK II）を設置した。レール底部への加速度センサの取り付けは、レール底部のテーパにあわせた取付治具を使用して接着剤で固定し、まくらぎ、器具箱については、直方体の取付治具を使用して対象物に絶縁用のアクリル板を介した状態で接着剤により固定した。以下、3軸の加速度の測定方向は、レール長手方向を前後、垂直方向を上下、まくら

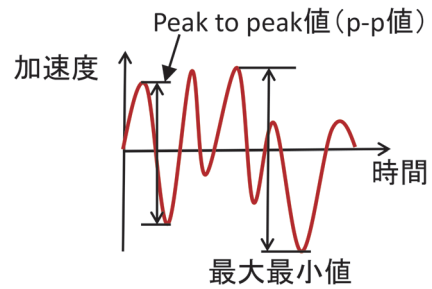


図 1 Peak to peak 値 (p-p 値)

ぎ方向を左右とする。なお、本測定におけるサンプリング周波数は10kHzとした。

3.3 測定データの処理方法

測定した振動加速度の結果は、振動加速度の時間変化波形として記録される。この波形に対して、以下の処理を実施した。

- ① ローパスフィルタによる高周波成分の除去
- ② Peak to Peak 値の算出

列車の走行による振動を原因とする信号設備の機械的な損傷は、構成部材の共振による疲労破壊が原因として考えられる。また、構成部材の重量や弾性特性から、その共振周波数は1kHz以下であることが知られており、JIS E 3014における共振周波数探査では1kHzを上限に実施しているほか、従来行われてきた振動加速度測定後のデータ処理では、1kHz以上の信号は減衰させる処理を行っている。本調査においても同様に各測定で取得した振動加速度について、数値演算ソフト上に構築したカットオフ周波数1kHzのローパスフィルタ（チェビシェフⅡ型、10次、阻止帯域減衰量80dB）により高周波成分の除去を行った。また、振動加速度の大きさを示す指標として、最大最小値ではなく、加速度の時間変化波形のうち局所的な1波の山と谷の差（Peak to peak 値、以下 p-p 値、図1）が一般的に用いられている。本測定では、ローパスフィルタ処理後の波形について、p-p 値の列車ごとの最大値（以下、最大 p-p 値）を算出した。

4. 現地測定結果の全体傾向

4.1 測定箇所

新幹線と在来線の計44箇所で列車通過時の振動加速度を測定した。構造物種別、軌道種別等の内訳は、表2に示す通りである。

4.2 沿線における振動加速度の傾向

4.2.1 列車通過時の加速度波形

列車通過時のレール、まくらぎ、器具箱各部の加速度

表 2 振動加速度の測定箇所数

	構造物 種別	軌道 種別	線形	測定 箇所数
新幹線	土構造	バラスト	分岐	1
		高架橋	バラスト	分岐
			直結	分岐
在来線	土構造	バラスト	直線	8
			曲線	6
			分岐	6
	高架橋	バラスト	直線	3
			曲線	1
			分岐	4
		直結	直線	2
			分岐	4
			スラブ	直線
	分岐	4		
橋梁	直結	直線	2	

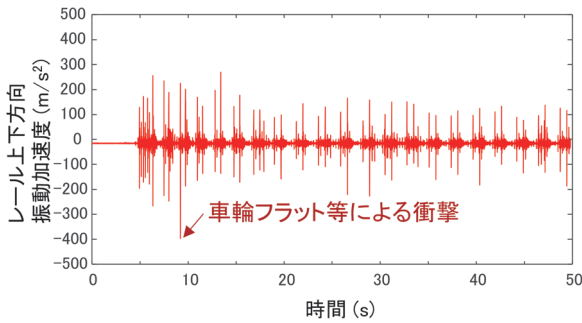


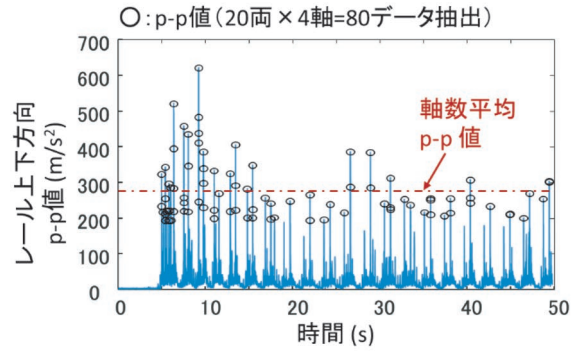
図 2 列車通過時の振動加速度（レール上下）

の測定結果のうち、例として列車通過時のレール上下方向の波形を図 2 に示す。加速度は列車通過時に大きく変動し、p-p 値は概ね輪軸が通過する瞬間に大きな値を示した。JIS E 3014 の振動耐久試験の加振加速度振幅に関する試験条件の制定を行った際の考え方^{4) 7)} を踏襲し、各測定箇所の列車通過時の p-p 値を基に現在の使用環境に即した加振加速度振幅の試験条件を定めることとした。

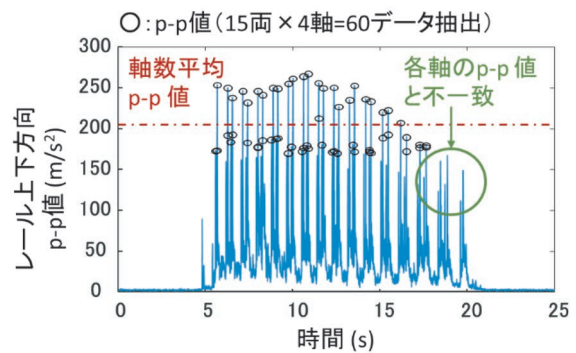
一部の輪軸が通過した際に、レールにおいて JIS E 3014 の試験条件（4 種 C）である 981m/s^2 を上回る著大な振動加速度が観測された。特定の輪軸において観測されるこのような著大な加速度の変化は、車輪フラット等による車輪の形状不整が作用したものであると考えられる。

4.2.2 最大 p-p 値と軸数平均 p-p 値

輪軸通過時の振動加速度は、概ね 1 輪軸通過ごとに大きな p-p 値が計測される。この p-p 値は、図 3 (a) に示すように列車の輪軸ごとにその大きさが異なる。これは、車種や乗車人数による軸重の違い、コンテナや積荷



(a) 抽出した p-p 値と各軸 p-p 一致



(b) 抽出した p-p 値と各軸 p-p 不一致

図 3 軸数平均 p-p 値算出時に抽出した p-p 値の例（○印部分が算出に採用した p-p 値）

の積載状況、輪重のバランス、車輪フラット等の形状不整などが影響していると考えられる。車輪フラットによる衝撃のような大きな変動がなく、1つの輪軸が通過した際に得られるピークが1個であると仮定した場合には、1編成 N 軸の列車であれば 1 編成分の測定データから上位 N 個の p-p 値を抽出することで、輪軸ごとの p-p 値を得たことになる。したがって、各輪軸の p-p 値の平均に相当する指標として、上位 N 個の p-p 値の和を N で除した平均値（以下、軸数平均 p-p 値）を算出してこれを用いることとした⁸⁾。

最大 p-p 値は前述の車輪フラットなどの影響を受ける一方、軸数平均 p-p 値は個々の輪軸の状態に係わるばらつきをある程度排除できると考えられる（図 3 (a) 中に示した赤色の一点鎖線）。しかし、両者の値に大きな乖離がある場合、軸数平均 p-p 値を振動耐久性の評価指標とすることはできず、最大 p-p 値で評価する必要がある。

そこで、最大 p-p 値と、軸数平均 p-p 値をそれぞれ算出し、両者の結果について比較を行った。軸数平均 p-p 値算出の際には、1 編成通過時の全ての p-p 値から軸数分のデータ数を大きい方から順に抽出するため、車輪フラット等により同一軸で高い p-p 値が複数観測された場合には、抽出した p-p 値が輪軸通過時の p-p 値と必ずし

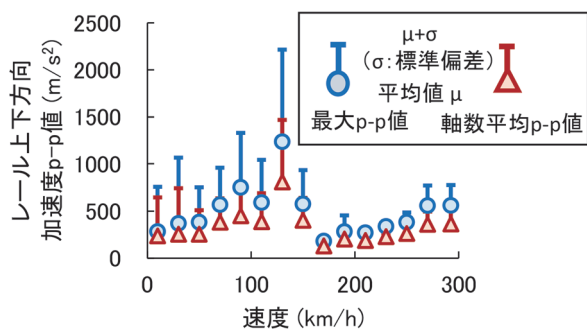


図4 最大 p-p 値と軸数平均 p-p 値の速度段別平均値、標準偏差

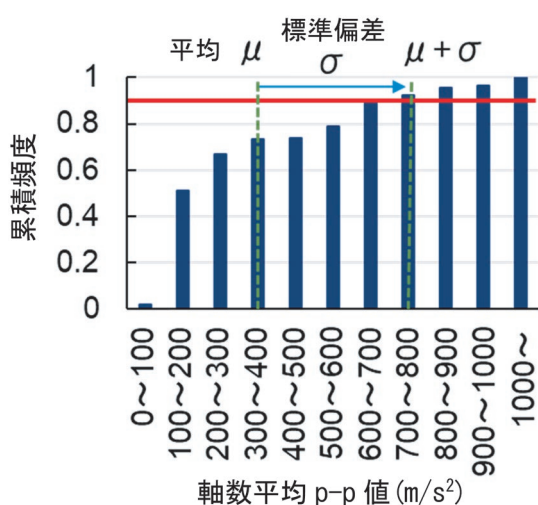


図5 レール上下方向振動加速度の発生頻度 (速度段：105～115km/h)

も一致しない場合がある (図3 (b))。しかし、算出した軸数平均 p-p 値は、各輪軸が通過した部分のみ切り出した際に最大となる p-p 値の全軸数 (1 編成) 分の平均を取った値よりも大きい値であるため安全側の評価となる。また、データ処理の自動化が容易なため今回の分析では上記の方法で算出した軸数平均 p-p 値を用いた。

測定結果の最大 p-p 値と軸数平均 p-p 値について、速度段ごとの平均値 μ 、および標準偏差 σ の算出を行った。算出の結果、各測定点の 3 軸方向において上下方向の振動加速度が最も大きい結果であったため、例として図4にレール上下方向の最大 p-p 値と軸数平均 p-p 値を示す。軸数平均 p-p 値と最大 p-p 値の速度段ごとの平均値の差はレール上下方向で概ね 200m/s^2 以下に留まる。また、軸数平均 p-p 値の標準偏差 σ は最大 p-p 値のそれに比べて小さい。

この結果から、散発的に発生する車輪フラット等による著大な加速度 (以下、衝撃) の影響は別途議論を行っている⁸⁾が、列車通過に伴う定常的な振動の加速度の傾向については軸数平均 p-p 値を用いて評価を行っても列

車ごとの最大値との差は概ね 200m/s^2 以下に留まり、大きく乖離はしないと考える。そこで、列車通過による定常振動に対する耐久試験条件を定めるための分析については、この軸数平均 p-p 値を適用することとした。

4.3 通過列車の速度段ごとの振動加速度分布

列車速度を 5km/h を基準として 10km/h 単位の世界に別けた際の軸数平均 p-p 値の分布について述べる。例として、列車速度 $105\sim 115\text{km/h}$ におけるレール上下方向の軸数平均 p-p 値の累積頻度分布を図5に示す。各速度段の軸数平均 p-p 値の分布は、正規分布とは異なるが、平均値 μ と標準偏差 σ を算出したところ、 $\mu+\sigma$ の範囲 (図5の例では、軸数平均 p-p 値 $0\text{m/s}^2\sim 800\text{m/s}^2$) までの階級に含まれるデータ数の測定データ全体に対する割合を示す累積相対度数は、 0.9 となった。このことから、各速度段の測定データの 90% が含まれる値として $\mu+\sigma$ を用いて評価することとした。

5. 測定結果の分析

測定結果から得られた各測定点、各方向の加速度の軸数平均 p-p 値について、速度段ごとに平均値 μ と標準偏差 σ を算出した。例としてレールの結果を図6に示す。図中の各点は速度段ごとの平均値 μ 、エラーバーの先端は $\mu+\sigma$ の値を示す。なお、各測定点の 3 軸方向において上下方向の振動加速度が最も大きい結果であったため、以下、例として 1 軸方向のみを示す場合には、上下方向について述べる。

レールの軸数平均 p-p 値の $\mu+\sigma$ の大きさは、在来線の一部 (130km/h 付近の速度段の上下方向) を除いて、上下、左右、前後方向共に現行 JIS (4 種 C) の 981m/s^2 以下であった。 981m/s^2 を超過した在来線 130km/h 付近の速度段のレール上下方向についても、特定の測定箇所の整備状態に起因して加速度が著大となった影響を受けたものであった。レール左右方向と前後方向については、新幹線の速度域 (300km/h 付近) においても、 $\mu+\sigma$ の値は 500m/s^2 程度である。また、列車速度が増加するにつれて、軸数平均 p-p 値も概ね増加する結果が得られた。

6. 信号設備の振動耐久試験条件の在り方

6.1 現地測定結果に基づく加振加速度振幅の在り方

本節では、今回の測定結果と JIS E 3014 の振動耐久試験条件を比較し、現状の使用環境を考慮した際の加振加速度振幅の在り方について述べる。JIS E 3014 では、供試体に対して 3 軸方向全て同じ条件の正弦波加振の振幅が規定されており、レール設置の設備 (4 種 C) では 981m/s^2 、まくらぎ設置の設備 (3 種 C) では 147m/s^2 、

器具箱設置の設備（2種C）では 9.81m/s^2 で加振することとなっている。また、加振周波数は、供試体の共振周波数とすること（1kHzまでに共振点がない場合は、100Hz）を条件としている。

現状の一般的な使用環境下で晒される振動加速度の目安値として、レール、まくらぎ、器具箱各部の $\mu+\sigma$ の最大値とJIS E 3014規定の加振加速度振幅と比較した。その結果、図6に示すようにレールの場合には、JIS規定の加振振幅 981m/s^2 に対して $\mu+\sigma$ の最大値は、前後方向 550m/s^2 、左右方向 450m/s^2 程度であった。また、実際の設置状態で晒される振動加速度は、様々な周波数成

分が含まれており、共振周波数のみで加振される状態ではないことを考慮すると実使用環境を想定した正弦波加振試験の場合、レール前後方向、左右方向に関しては、振動耐久試験時の加振速度振幅緩和の可能性を裏付ける結果を得た。なお、レール上下方向、および、まくらぎと器具箱の3軸方向についても同様の検討をした結果、測定データから得られた $\mu+\sigma$ の最大値は、概ねJIS規定の加振加速度振幅程度であることに加え、測定箇所によっては、設備の整備状態に起因して加速度が著大となる場合も確認されたため、これらの項目は、現行の加振振幅が妥当であると考え⁶⁾。

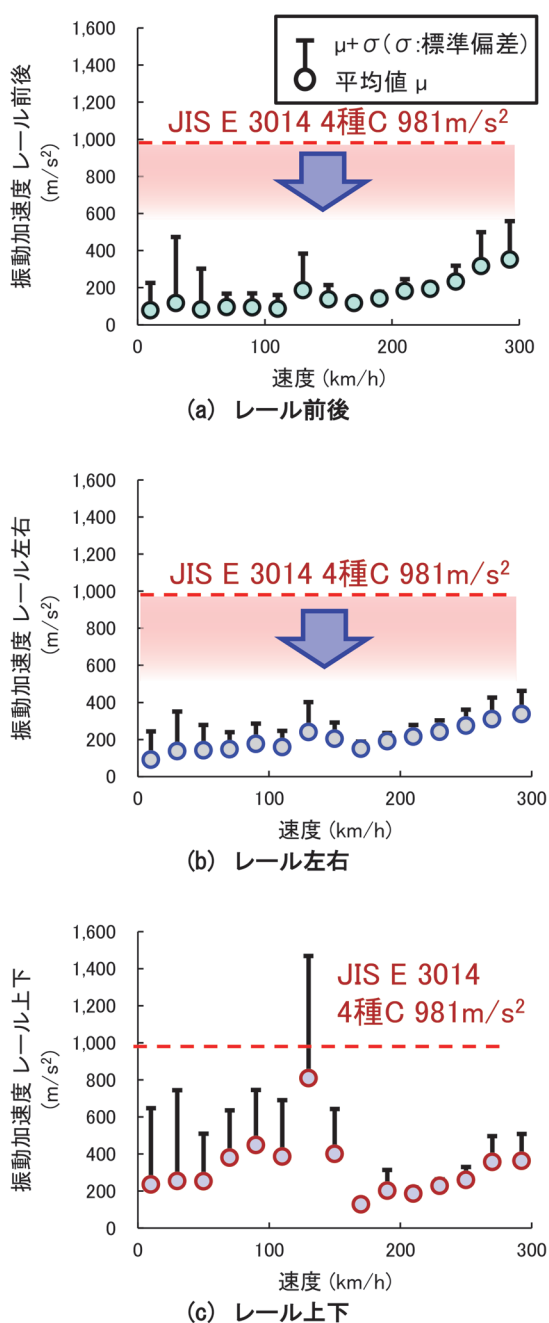


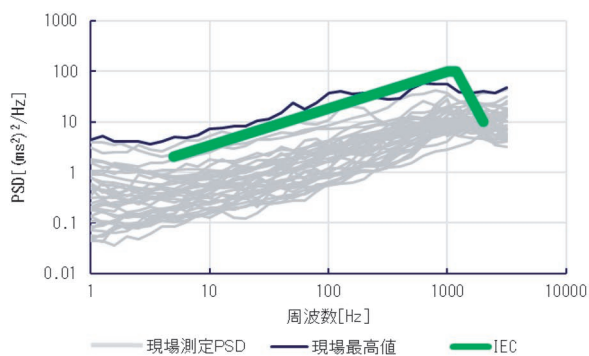
図6 振動加速度測定結果

6.2 周波数特性の国際規格との比較

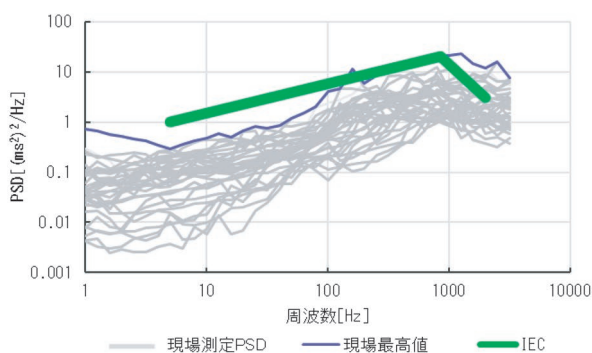
近年、車両などの分野では、より実使用環境に近い加振状態を再現するため、これまでの正弦波加振による振動耐久試験の他にランダム波による加振が試験条件として新たに加えられ、加振方法の選択が可能となっている⁹⁾。また、IECでは沿線の使用環境について、ランダム波を想定したパワースペクトル密度（以下、PSD）によって特性を示している。そのため、国際規格との比較を行うにあたり、取得した振動加速度の時間変化データに対してFFT（Fast Fourier Transformation、高速フーリエ変換）を行い、周波数に対するPSDを算出した。

今回の測定項目のうちレールとまくらぎの振動加速度に関するPSDについては、IECにおいて、欧州における鉄道沿線の振動の周波数特性が示されている。測定結果については、IECと同様に1/3オクターブバンドを適用した結果としてとりまとめた。なお、1/3オクターブバンドは、1オクターブ（2倍の周波数）の1/3となる周波数を中心周波数とした帯域ごとのPSDを求めたものであり、振動評価で一般的に用いられている。

測定データから算出したPSD（以下、現場測定PSD）を重ね合わせた結果を図7に示す。図中の紫線は、現場測定PSDにおける周波数ごとの最高値を包絡したものであり、全測定結果におけるPSDの周波数ごとの最高値を示している（現場最高値）。このPSDが、全測定結果を包含したPSDとなる。また、緑線はIECで示されているPSDである。欧州の鉄道沿線の振動環境に基づいて制定されたIECと今回の測定結果を比較すると、レールおよびまくらぎに関しては、ある特定の周波数域に突出したPSDのピークは認められず、1kHzまでは、周波数が高くなるにつれてPSDが高くなるなど国内と欧州の分布は類似している。なお、1kHz以上の領域では国内の現場環境のPSDが高い結果を示したが、この要因は現時点では不明である。



(a) レール上下方向



(b) まくらぎ上下方向

図7 振動加速度のPSD

7. まとめ

本報告では、列車通過時に信号設備が受ける振動加速度の傾向を把握するため、新幹線と在来線の列車通過時の定常振動を対象として、計44箇所にて振動加速度を測定し、現状の一般的な使用環境下で晒される振動加速度を明らかにした。その結果から、今後のJIS規格改定の検討に必要なデータを示すとともに、振動耐久試験における正弦波加振試験の加振加速度振幅の在り方を示した。なお、今回の検討対象としなかった散発的に発生する車輪フラット等による衝撃の影響については、別途、JIS E 3015（鉄道信号保安部品－衝撃試験方法）¹⁰⁾で定める試験方法を改定する際に議論が必要であると考えており、継続して検討を進める予定である。

また、取得した振動加速度データから、IECと同一尺度で比較可能な国内のPSDを導出した。この結果とIECで示されているPSDを比較すると、レールおよびまくらぎに関しては、特定の周波数域に突出したPSDのピークは認められず、1kHzまでは、周波数が高くなるにつれてPSDが高くなるなど国内と欧州の分布は類

似したものとなった。なお、1kHz以上の領域では国内の現場環境のPSDが高い結果を示した。IECが定めている分布との差異については、今後さらに国内におけるPSDの特性データを蓄積して要因を明らかにしていく必要があると考える。

今後は、今回得られたPSDの特性を基に、時間領域に変換することにより実使用環境を再現した振動加速度波形（ランダム波）を用いて、振動耐久試験を実施する際の加振時間の検討を行う予定である。

謝辞

本報告における現地調査の実施にあたり、北海道旅客鉄道株式会社、東日本旅客鉄道株式会社、東海旅客鉄道株式会社、西日本旅客鉄道株式会社、四国旅客鉄道株式会社、九州旅客鉄道株式会社の関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文献

- 1) 日本工業規格：鉄道信号保安部品の振動試験方法，JIS E 3014:1976，日本規格協会，1976
- 2) 日本工業規格：鉄道信号保安部品一振動試験方法，JIS E 3014:1992，日本規格協会，1992
- 3) 日本産業規格：鉄道信号保安部品一振動試験方法，JIS E 3014:1999，日本規格協会，1999
- 4) 鈴木貞夫：信号設備の環境調査と使用材料，信号保安，28巻，7号，pp.7-15，1973
- 5) 押味良和，潮見俊輔，高崎建，神谷剛志：信号設備の使用環境下における振動加速度調査，第29回鉄道技術連合シンポジウム，J-RAIL2022，講演論文集，No.S7-4-4，pp.348-351，2022
- 6) 一色竜杜，押味良和，潮見俊輔，高崎建，神谷剛志，会田直矢：構造物・軌道の種類に対する信号機器が受ける振動の分析，電気学会 交通・電気鉄道研究会資料，TER-23-036，2023
- 7) 日本工業規格：鉄道信号保安部品の振動試験方法（解説），JIS E 3014:1976，日本規格協会，1976
- 8) 潮見俊輔，会田直矢，押味良和，神谷剛志，一色竜杜：レール直結の信号設備が受ける車両通過時の衝撃に関する調査，電気学会 交通・電気鉄道研究会資料，TER-23-035，2023
- 9) 日本産業規格：鉄道車両用品一振動及び衝撃試験方法，JIS E 4031:2013，日本規格協会，2013
- 10) 日本工業規格：鉄道信号保安部品一衝撃試験方法，JIS E 3015:1992，日本規格協会，1992