

軌道弾性材の振動低減特性に対する温度の影響評価

半坂 征則* 佐藤 大悟*
鈴木 実* 間々田 祥吾* 太田 達哉*

Evaluation of the Influence of Temperature on Vibration Reduction Properties of Track Elastic Materials

Masanori HANSAKA Daigo SATO
Minoru SUZUKI Shogo MAMADA Tatsuya OTA

In railway tracks, various elastic materials made of rubber such as rail pad are used to reduce the vibration and impact force. Because there is a concern that their vibration reduction performances might decrease due to the increase in rigidity as the temperature falls, we measured the vibration and noise at the same point on a viaduct on a meter-gauged line in summer and winter. From the measurement, some results such that the vibration of structural parts under the rail pad increased as the temperature fell which agreed with the theory of track vibration were confirmed.

キーワード：軌道弾性材，軌道パッド，温度，振動，騒音，コンクリート高架橋

1. はじめに

鉄道軌道では振動・騒音の低減や衝撃力緩和などを目的として、軌道パッドやスラブマット等のゴム製弾性材が使用されている。一般に金属やコンクリート材料の物性では温度の影響が小さい一方で、ゴム材料は温度の影響を受け、低温時には剛性が増加する¹⁾。ゴム製弾性材の振動低減性能は材料の剛性の増加とともに低下する²⁾と考えられるため、低温時には軌道弾性材の振動低減性能が低下することが懸念される。これまで鉄道沿線において「冬に音・振動が大きくなる」という意見も聞かれる一方で、軌道弾性材の特性に対して温度の影響を定量的に評価した事例は少なく、鉄道沿線の振動・騒音特性に対する環境温度による影響も明確には把握されていない。そこで、在来線のスラブ直結軌道区間において夏と冬に同箇所でも車両走行時の振動および騒音を測定した³⁾。本報ではこの測定結果に基づいて実施した軌道弾性材の特性に対する温度の影響評価について報告する。

2. ゴム物性の温度依存性

図1にゴム材料の物性の温度依存性の一例として、軌道弾性材として汎用的に使用されている天然ゴムの動的弾性率および損失係数 $\tan \delta$ を示す（動的粘弾性測定装置 DDV-25FP (A&D 株) を用いて、 $-80 \sim 60^\circ\text{C}$ 、周波数 10Hz、歪み振幅 $25\mu\text{m}$ で測定）。一般にゴム材料は弾性要素と粘性要素を持ち、弾性要素に起因する弾性率を動的弾性率、粘性要素に起因する弾性率を損失弾性率、

* 材料技術研究部 防振材料研究室

その比（損失弾性率／動的弾性率）を $\tan \delta$ という。図1に示すように、ゴム材料の動的弾性率、 $\tan \delta$ はともに温度の変化に対して大きく値を変化させ、動的弾性率では測定した範囲において温度の低下に伴いほぼ単調に値が増加していることがわかる。一方 $\tan \delta$ は -50°C 付近でピークを示し、この付近では動的弾性率の変化も顕著である。この $\tan \delta$ のピーク温度をガラス転移点といい、この付近では温度の変化に伴いゴムの分子状態が大きく変化することが知られている¹⁾。ただし、ゴム材料の動的弾性率はそれ以上の室温を含む温度範囲においても変化し続けることが図1より確認される。

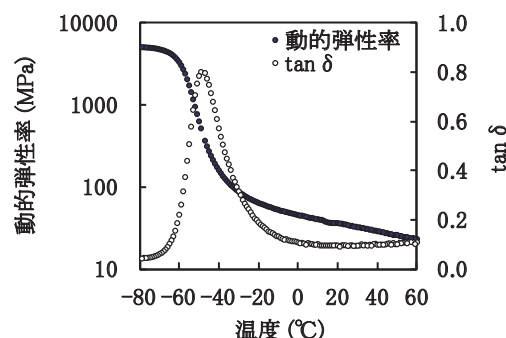


図1 軌道弾性材用ゴムの動的弾性率と損失係数 $\tan \delta$

3. 軌道弾性材の振動低減性能に対する温度の影響に関する考察

本章では、軌道弾性材の振動低減性能に対して温度の与える影響について考察する。温度の変化に伴う軌道弾性材の振動低減性能の変化の要因として、主として弾性材の次の2つの性能の変化が考えられる。

特集：材料技術

- ① 下部に伝わる振動量を低減する（防振）性能
- ② 車両の荷重を分散させる（荷重分散）性能

まず①について考えると、軌道弾性材による防振支持構造は図2(a)に示すような1質点モデルで表わすことができる。軌道弾性材を軌道パッドとした場合、このモデルでは質点はレール（1締結装置当り）、弾性要素と粘性要素は軌道パッド、下部構造は締結装置以下の軌道・構造部材を表わしている。

このモデルにおいて加振力を $F_0 e^{i\omega t}$ の調和加振力で与えると、弾性材の振動伝達率 τ 、即ち、振動低減性能は次式で与えられる²⁾。

$$\tau = \frac{1 + \left(2\zeta \frac{f}{f_0}\right)^2}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right\}^2 + \left(2\zeta \frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (1)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (2)$$

ここに、 m は質点の質量(kg)、 k は弾性材のばね定数(N/m)、 c は弾性材の減衰定数(N・s/m)、 f は加振周波数(Hz)、 f_0 は系の固有振動数(Hz)、 τ は式(2)で変形された弾性材の減衰定数である。

f は車両の走行条件によって定められるため、温度の影響を受けないと仮定できる。また、軌道では一般に f/f_0 が1以上となる範囲で推移する。一方、 f_0 は系の

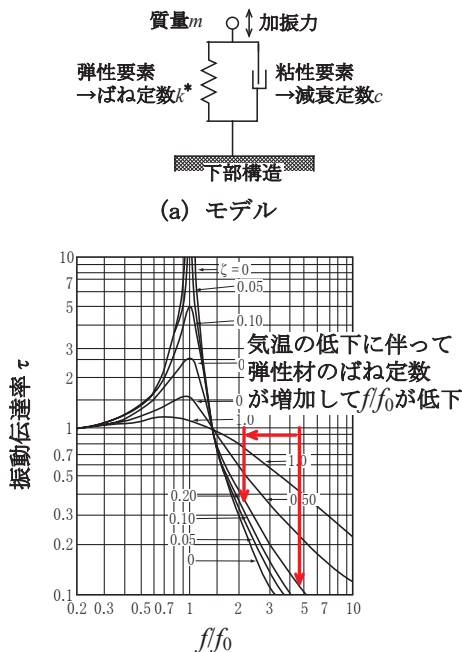


図2 弾性材による支持を示す1質点力学モデルとそれに基づく振動伝達率 τ の計算結果

*) 弾性要素の弾性程度を示す指標は、応力－ひずみの単位系では弾性率だが、荷重－変位の単位系ではばね定数で与えられる。

質量とばね定数によって定められ、温度の影響を受ける。

式(1)により軌道弾性材による振動伝達率を計算すると、図2(b)のように求められる。ここで、気温が低下した場合、弾性材のばね定数は増加するため f_0 が増加し、これに伴って f/f_0 は低下する。したがって、気温の低下に伴って振動伝達率が増大し、下部構造物に伝えられる振動の量が增大すると考えられる。

この際、弾性材より上部の構成物（弾性材を軌道パッドとするとレール）では気温の低下に伴って若干振動が小さくなると考えられる。なぜなら、この系では弾性材を介して上下部の振動は連成しており、下部構造物への振動伝達量が大きくなると系の振動エネルギーの中で下部に移動する量が増加するため、その分だけ上部構成物の振動が小さくなると考えられる。

次に②について述べると、鉄道軌道では柔らかい弾性材が剛なレールを弾性支持するために、レール上を走行する車両の荷重は直下の弾性材のみならずそれに近接する複数の弾性材が担う、即ち、車両荷重の作用は複数の弾性材に分散されることになる。この性能は弾性材が柔らかいほど大きく、その逆に剛性が増加するに伴い低下すると考えられる。

温度の低下に伴い軌道弾性材において①の防振性能、②の荷重分散性能の両方が低下し、それらの影響が相乗して軌道・構造物の振動が増大することが推定される。

4. 現地試験の概要

軌道弾性材の振動・騒音低減性能に対する温度の影響を評価するために行った現地試験の概要について述べる。

4.1 試験箇所

図3に試験箇所の外観を示す。試験箇所の主な軌道・



(a) 軌道構造



(b) 沿線状況

図3 試験箇所の状況

構造物仕様は次のとおりである。

- ・ スラブ直結軌道，高架橋，ほぼ直線の平坦線区。
60kg レールでパンドロール式締結装置。
- ・ レール締結装置間に公称ばね定数 30MN/m（天然ゴム（NR）とスチレンブタジエンゴム（SBR）のブレンド，ソリッドゴム）による鋳付き形状の軌道パッドが使用されている。
- ・ 軌道スラブ／路盤コンクリート間にスラブマット（詳細な情報は不明だが標準的な仕様と考えられる）が使用されている。

4.2 試験日

試験は以下の期日に実施した。

- 夏：2013年9月3日（10:30～12:00），曇りのち雨
9月4日（9:30～16:00）：晴れ時々曇り
- 冬：2014年2月18日（6:00～12:00）：曇り

4.3 測定点

現地試験では複数の地点（測定断面）において振動に関して9点，騒音に関して3点，温度に関して5点の測定点において測定を行ったが，本稿では紙面の都合等により図4および以下に示す代表点について報告する。

- ・ 振動加速度：レール底部（VR1），締結装置（VT），軌道スラブ（VS），床版（VC1），桁直下（VG1）。
- ・ 騒音：レール近傍（SR），桁直下（SG1），近接側軌道中心から12.5m離れた点（SG2）。
- ・ 温度：レール（TR），締結装置（TT），スラブマット（TS），レール近傍の軌道内大気（TA1），測定基地（遠隔側軌道下）付近の大気（TA2）。

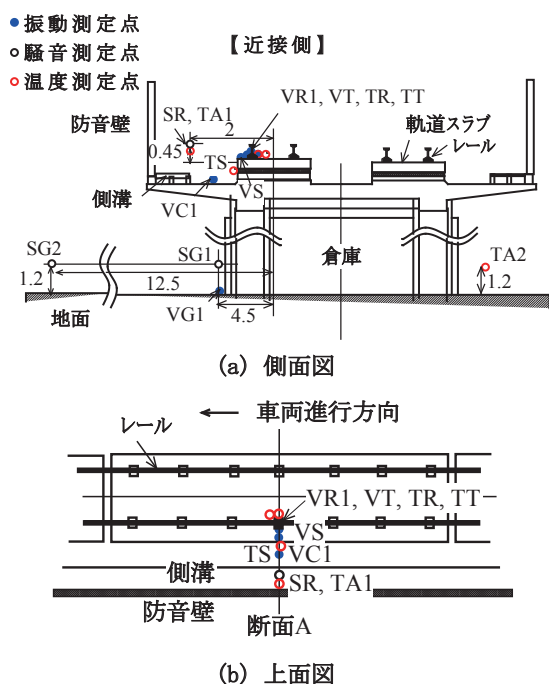


図4 測定点位置の概略

これらは全て A 断面（継目などのない一般の箇所）における測定点である。また，本稿では振動に関して全測定点において鉛直（Z）方向の結果を示す。

4.4 測定方法

主な測定方法は以下の通りである。車両走行時に，圧電型加速度ピックアップ PV-94，PV-84 または振動レベル計 VM-52（いずれもリオン㈱製）を用いて振動加速度を，普通騒音計 NL-21（リオン㈱製）を用いて騒音を測定した。振動加速度のセンサーは過去の測定事例⁴⁾等から高周波数範囲まで値が大きいことが想定される VR1，VT では V-94，中・低周波数成分が卓越することが想定される VS，VC1 では PV-84，地盤振動測定点の VG1 では振動レベル計を用いた。

主な測定条件として，測定の時定数は振動測定点の VG1 および騒音測定点の SG1 と SG2（ともに沿線騒音）を除き Fast とし，VG1 に関しては振動レベル計の動特性，SG1 と SG2 に関しては Slow とした。測定の周波数重み特性については，振動では VG1 を除き F 特性，VG1 では加速度（VAL）レベル特性，騒音ではすべての測定点で A 特性とした。

測定データが得られた全車両走行試番に対して多チャンネル分析器 SA-01（リオン㈱製）を用いて波形解析を行い，振動加速度および騒音レベルのピーク値を求めた。また代表形式（都市近郊通勤型）の車両について，夏，冬ともに3～5データ（車両速度82～107km/h）を選定した上で，SA-01を用いてピーク値付近で1/3オクターブバンド分析を行い，バンドごとにパワー平均値を求めた。

周波数分析の周波数範囲については，PV-94による測定データでは20Hz～10kHz，PV-84による測定データでは1Hz～2.5kHz，振動レベル計による測定データでは1～80Hzとした。

さらに，レール（TR），軌道構造内（TA1）の大気等の温度について K 熱電対を用いて5分おきに記録した。

5. 試験結果および考察

5.1 測定箇所の振動・騒音特性

夏・冬の特長比較を行うのに先立ち，主として夏のデータに基づき行った対象箇所の振動特性解析結果について概説する。図5に夏の測定結果に基づく振動加速度と騒音のレベル値を示す。その結果，以下のことがわかった。

- ① 各測定点の振動加速度の大きさは，おおむね床版（VC1）＜軌道スラブ（VS），締結装置（VT）＜レール（VR1）の順である。また，フィルタ特性が異なるなどの理由から単純な比較は難しいが，レベル値だけを比較すると桁直下（VG1）等の地盤振動の値は床版振動よりさらに10dB以上小さい。

特集：材料技術

- ② 軌道スラブと締結装置の振動加速度の値の間に有意な差はない。
- ③ 各測定点の騒音の大きさは、おおむね桁直下 (SG1) < 12.5m 点 (SG2) < レール近傍 (SR) の順である。

①は、鉄道高架橋における部材振動はレール/車輪間の加振源と部材間の距離が増大するに伴い小さくなることを示している。ここで、レール振動に対する締結装置および軌道スラブの振動の低減には軌道パッドが、軌道スラブ振動に対する床版振動の低減にはスラブマットによる防振性能がそれぞれ寄与していると考えられる。

②は、締結装置と軌道スラブが剛結され、一体的に振動しているためと考えられる。

③について、レール/車輪間騒音や車両機器騒音が直接伝わるレール近傍で騒音が大きくなることは自然な結果であるが、桁直下と 12.5m 点の騒音の大小関係については各音源と受音点の距離の因子だけでは説明し難い。③の理由として、対象箇所の沿線騒音では構造物音よりレール/車輪間騒音や車両機器騒音など橋上で発生する騒音 (以下、橋上騒音とする) のパワーの方が大きいためと考えられる。橋上騒音の寄与は桁直下より 12.5m 点の方が大きい。

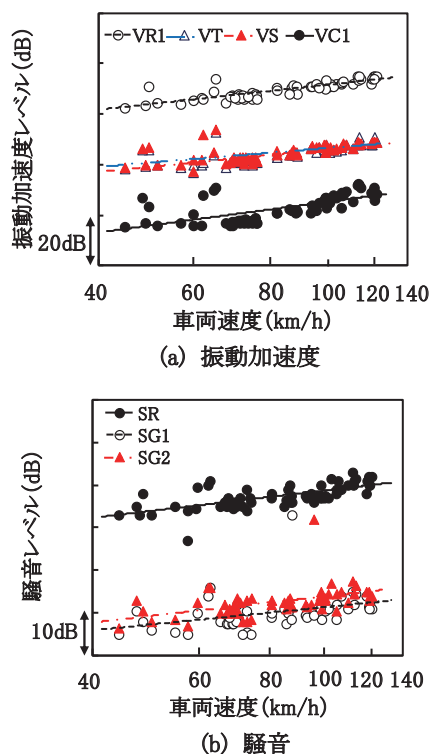


図5 主要測定点の振動加速度および騒音のレベル値

5.2 温度

図6に温度の測定結果を示す。レールの温度は夏では20~40℃、冬では5~10℃の間を推移した。また、気温 (軌道内) は夏では20~30℃、冬では5~10℃の

間を推移し、その差は15~20℃程度である。

2章で述べたように、軌道弾性材用のゴム物性が顕著に変化するガラス転移点はおおむね-40℃以下にあることなどを考慮すると、本試験より冬には低温、夏には高温となる場所・時期での試験が望まれたが、測定準備等の都合上この条件下での測定になった。その一方で図1に示すように、この温度範囲でもゴム材料の動的弾性率は有意に変化しており、本試験からも有意な知見が得られるものと考えられる。

また、スラブマットについては材料の断熱性が高いなどの理由から夏、冬ともに気温の変化に伴う温度変化が小さく、軌道の振動・騒音に対して同材料の特性変化の与える影響は小さいと考えられる。したがって、以下では軌道パッドの特性変化の影響に絞って検討する。

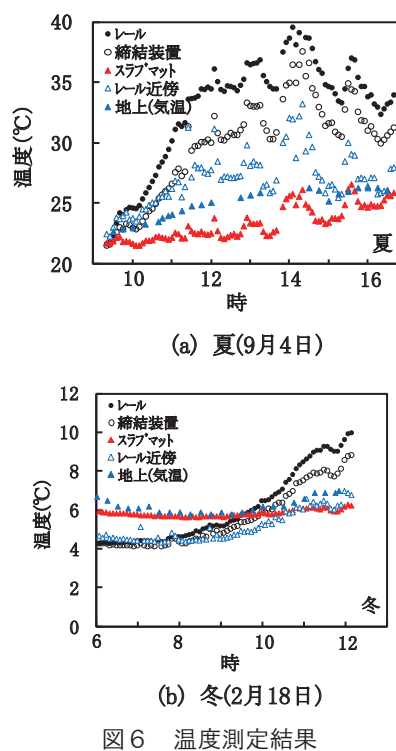


図6 温度測定結果

5.3 夏・冬の振動・騒音特性の比較

夏・冬の測定結果について、図7と図8に振動加速度レベル値、図9と図10に振動加速度の周波数特性を示す。その結果、以下のことが認められた。

- ① レール (VR1) の振動加速度では全体として高速域 (本稿では100km/h以上を高速、100km/h以下を低速とする) では夏・冬の値の差は小さいが、低速域では冬の値の方が夏の値より全体的に若干小さい。
- ② 締結装置 (VT) の振動加速度では全体的に冬の値の方が夏の値より大きい。
- ③ 桁直下 (VG1) の振動加速度では全体的に冬の値の方が夏の値より小さい。
- ④ レール (VR1) の振動加速度のスペクトルでは夏・

冬の差異は全体として明確ではない。

- ⑤ 締結装置 (VT) の振動加速度のスペクトルでは全体的に中・高周波数範囲で冬の値の方が夏の値より若干大きい。
 - ⑥ 桁直下 (VG1) の振動加速度のスペクトルではピーク周辺など値の大きな帯域を中心に冬の値の方が小さい。
- ②について、軌道スラブ (VS)、床版 (VC1) でも同様に冬の振動加速度の方がおおむね夏より大きいことを確認している。

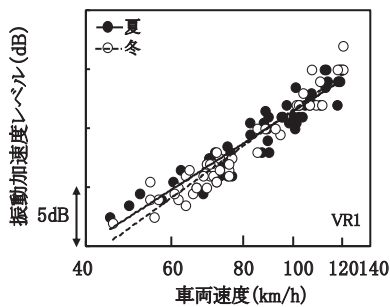
①, ②, ⑤に示したように、軌道・構造部材の振動に関しては冬、即ち気温が低いときにレールではおおむね値が小さく、軌道スラブや床版等軌道パッドより下部の部材では値が大きくなる傾向が認められた。これは、3章で考察したように、気温の低下に伴って軌道パッドのばね定数が増加し、その下部に伝わる振動の低減性能が低下したためと考えられる。ただし、3章で述べたよう

にその要因として防振性能と荷重分散性能の低下が推定されるが、両者の寄与を定量的に分析することは本試験の範囲では難しい。

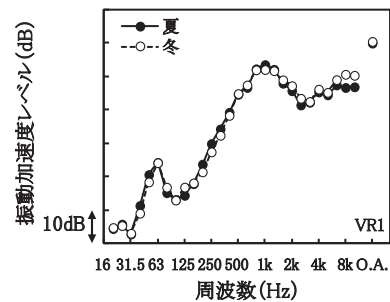
一方、③, ⑥のVG1の地盤振動の変化に関しては締結装置等の軌道・構造物振動と異なる特性を示した。その理由の詳細は不明だが、想定される可能性のひとつとして次のことなどが考えられる。即ち、地盤材料も気温の低下に伴い剛性が増加する。これに伴って地盤における振動自由度が低下することなどが考えられる。

図11に夏・冬の騒音レベルの変化を示す。試験の結果次のことが認められた。

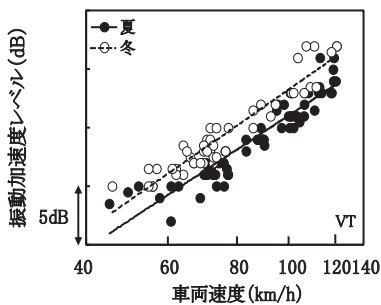
- ① レール近傍 (SR) の騒音について、車両が低速で走行したときには全体的に冬の値の方が夏の値より小さいが、速度の増加とともにその差は小さくなり、車両の高速走行時には両者の差は明確ではない。
- ② 桁直下 (SG1) の騒音については、車両走行の低速域では全体的に冬の値の方が夏の値より小さい



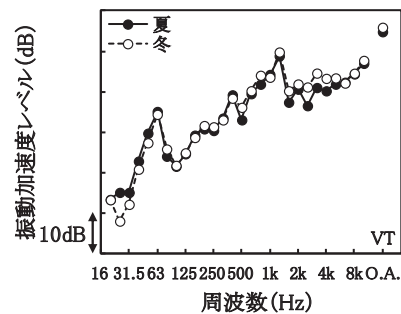
(a) レール(VR1)



(a) レール(VR1)



(b) 締結装置(VT)



(b) 締結装置(VT)

図7 夏と冬の部材の振動加速度値の比較

図9 夏と冬の部材の振動加速度の周波数特性の比較

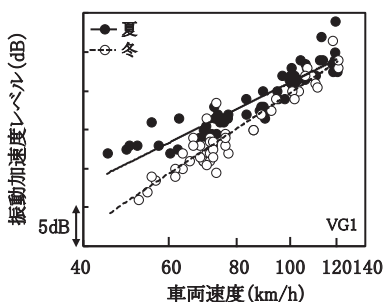


図8 夏と冬の桁直下の地盤振動の比較

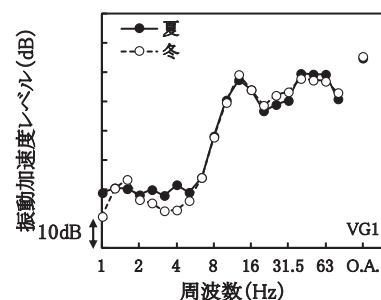


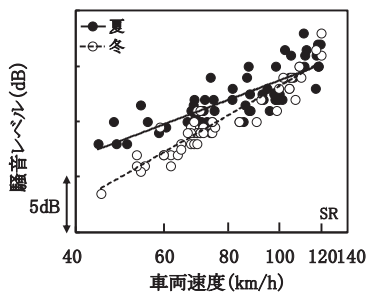
図10 夏と冬の桁直下の地盤振動の周波数特性の比較

特集：材料技術

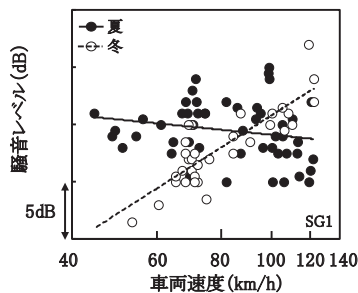
が、冬の値は夏の値より大きな車両速度依存性を持つため、車両走行の高速域では冬の値の方がむしろ若干大きくなっている。

①はレール振動の特性変化におおむね整合する結果といえる。ただし、低速域において騒音での夏と冬の値の差はレール振動での差より大きい。

②について、12.5m点 (SG2) の騒音でも同様の傾向を示すことを確認している。即ち、対象箇所での沿線騒音について、車両走行の高速域では床版等軌道パッドより下部の部材の振動特性の変化に整合し、おおむね冬の値の方が夏の値より大きい。低速域ではその逆の傾向を示している。その理由として、対象箇所においては沿線でも橋上騒音の寄与が大きいことや、床版以下の構造物の振動特性が影響を与えていること等が考えられる。ただし、それらを考慮したとしても対象箇所の沿線騒音において低速域で冬の値が夏の値より小さくなる機構を十分に把握できたとはいえない。①のレール近傍騒音も考え併せると、車両機器騒音が夏と冬で異なるなどの可能性も考えられる。しかしながら、その要因は本試験結果のみでは特定し難く、鉄道沿線騒音に対する環境温度の影響については今後の課題としたい。



(a) レール近傍 (SR)



(b) 桁直下 (SG1)

図 11 夏と冬の騒音レベルの比較

6. まとめ

軌道弾性材の振動・騒音低減性能に対する温度の影響を評価するために、在来線スラブ直結軌道 (高架橋) において夏と冬に同一箇所での軌道・構造物部材の振動加速度、桁周辺の騒音および温度を測定した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 対象箇所において、部材がレール/車輪間の加振源から離れるに伴って振動が小さくなることや、沿線では橋上騒音の寄与が大きい、などの振動・騒音特性を明らかにした。
 - (2) 夏、冬の振動を比較した結果、レール振動では一部の車両速度範囲を除き冬の値の方が小さくなり、締結装置や床版等の軌道・構造物振動では気温の低下に伴い値が概して大きくなるという、軌道弾性材 (パッド) の剛性変化の影響を反映した結果が認められた。
 - (3) その一方で桁直下等地盤振動では全体的に気温の低下に伴い値が小さくなるなど、軌道弾性材の特性からだけでは説明し難い結果も得られた。
 - (4) 車両低速走行したときのレール近傍騒音、および車両が高速走行したときの桁直下や 12.5m 点の騒音では軌道弾性材の特性変化に整合する気温の変化に伴う特性変化が確認される一方、それ以外の場合では対象箇所の沿線騒音は軌道弾性材の特性変化に整合しない特性差異を示すことが認められた。
- (3), (4) についての詳細な解析は今後の課題としたい。

謝 辞

本試験の実施にあたり、九州旅客鉄道株式会社の協力を得た。末筆ながら謝意を表す。

文 献

- 1) 日本ゴム協会編：ゴム技術の基礎，日本ゴム協会，p.43，1983
- 2) 公害防止の技術と法規編集委員会編：公害防止の技術と法規 (振動編)，丸善，p.89，1996
- 3) 半坂征則，佐藤大悟，鈴木実，間々田祥吾：軌道弾性材の特性に対する温度の影響評価試験，日本機械学会環境工学シンポジウム 2014，No.108，pp.24-27，2014
- 4) 善田康雄他：現場実務者のためと設計者のための実用騒音・振動制御ハンドブック，エヌ・ティー・エス，p.676，2000