

曲線区間で発生する高周波音の車上測定による音源特性評価

中川 隼* 川口 二俊 佐原 孝紀 小方 幸恵 (鉄道総合技術研究所)

Characteristics of high-frequency noise above 10kHz generated in curved track by on-board measurement

Hayato Nakagawa*, Tsugutoshi Kawaguchi, Takanori Sawara, Yuki Ogata, (Railway Technical Research Institute)

When a train runs on a gently curved track, the noise due to wheel and rail vibrations above 10kHz (referred as high-frequency noise) may significantly contribute to the wayside noise. Previous studies found that the dominant sources of high-frequency noise on high-speed railway lines are the outside leading wheel of each bogie. In this paper, based on the measurement results using under-floor microphones of high-speed vehicles, we investigated the characteristics of the dominant sources under various train speeds and rail conditions.

キーワード：鉄道騒音，高速鉄道，高周波音，車輪・レール間音
(Railway noise, High-speed train, High-frequency noise, Wheel and rail noise)

1. はじめに

鉄道の曲線区間では列車通過時に 10kHz 以上の周波数域の音（以下，高周波音）が発生し，沿線騒音に対して大きな寄与をもつ場合がある。川口ら⁽¹⁾⁽²⁾は，高速鉄道沿線での振動・騒音の測定結果から，高周波音の音源特性について以下の知見を得た。

(1) 曲線半径 2500m (R2500)，カント 200mm の円曲線区間における高周波音の主要な音源は，台車前側（列車進行側）の外軌側車輪である。

(2) 220km/h～274km/h の列車速度域においては，低速度であるほど高周波音が大きい傾向である。

(3) 雨天時には，10kHz 帯以上の成分は晴天時の結果よりも大幅に小さく，高周波音はほぼ発生しない。

この高速鉄道沿線での測定結果により，曲線区間における高周波音の主要な音源の位置や速度依存性を示した。しかしながら，限られた区間の結果に基づく知見であるため，高周波音発生条件には不明な点が多い。そこで，本研究では，大局的に高周波音の発生を把握することを目的に，列車の車両床下に設置したマイクロホンによる騒音測定（以下，車上測定）を行い，上記の知見に対する車上測定による検証ならびに様々な軌道，列車条件での高周波音の発生状況を調査した。なお，文献[2]での高速鉄道沿線において，騒音測定を実施した曲線区間を区間 A と称す。

2. 車上測定概要

〈2・1〉 測定方法 車上測定には 1/2 インチマイクロホンを用いることとし，高速列車の付随車 1 両における車両床下の各台車キャビティ内に 1 点ずつ設置した。図 1 に

マイクロホンの設置位置を示す。マイクロホンは，車端側輪軸上の車体に設置し，車両中央側に向けた。また，マイクロホンの設置位置を 2 箇所とした理由は，上下走行時ともに同一の条件とするためである。ここでは，列車進行方向に対して前側・後側のマイクロホン位置ならびに前側・後側マイクロホンで測定される騒音をそれぞれ SL, SF と称す。なお，本稿では，図 1 に示す列車進行方向に対する前側の車軸を第 1 軸とし，後側の車軸を第 4 軸とする。

〈2・2〉 測定区間および測定回数 車上測定対象は，上下線の曲線区間（曲線半径 R1500～R8000，カント 50mm～200mm）であり，各区間において列車速度 108km/h～265km/h の範囲である。また，測定は表 1 に示す間隔日数により，下り走行測定を 3 回，上り走行測定を 5 回行った。

〈2・3〉 測定データの整理方法 測定データは，1 つの曲線区間に対して，進入する側の緩和曲線区間，円曲線区間，退出する側の緩和曲線区間の 3 区間に分けた。また，それぞれの区間をマイクロホン搭載車両が通過する時間における 1/3 オクターブバンド周波数ごとの等価騒音レベル L_{Aeq} (A 特性音圧のエネルギー平均値，63Hz 帯～20kHz 帯) を求めた。なお， L_{Aeq} は，SL・SF を区別し，測定回ごとに求めた。本稿における高周波音は， L_{Aeq} における 1/3 オク

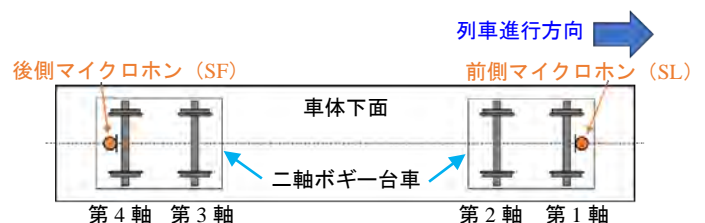


図 1 車上測定におけるマイクロホン設置位置

表 1 測定回数と間隔日数

下り走行測定	上り走行測定
1 回目	1 回目
↕ 間隔 9 日間	↕ 間隔 8 日間
2 回目	2 回目
↕ 間隔 9 日間	↕ 間隔 8 日間
3 回目	3 回目
—	↕ 間隔 2 日間
—	4 回目
—	↕ 間隔 6 日間
—	5 回目

※上りは4.2節のみ使用

タープバンド周波数の 10kHz 帯～20kHz 帯の周波数成分を指す。列車速度については、進入と退出それぞれの緩和曲線区間、円曲線区間毎の平均速度（以下、通過速度）で整理した。

3. 高周波音の主要な音源位置の検証

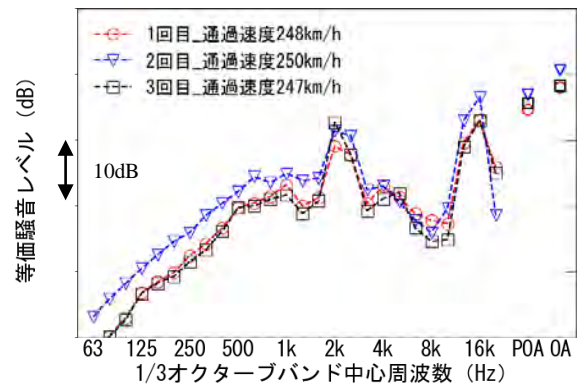
〈3・1〉 高周波音の評価基準 騒音に対する高周波音の寄与を判断する指標として、20kHz 帯以下のオーバーオール（以下、OA）と 8kHz 帯以下の周波数成分のパワー和をとったパーシャルオーバーオール（以下、POA）の差（OA - POA）を求めた。この差が 1dB 以上となった場合に高周波音の寄与があると判断する。

〈3・2〉 沿線騒音測定での高周波音発生箇所に対する車上測定結果 車上測定での区間 A における測定結果として、図 2 に下り走行測定の円曲線区間に対応する周波数分布を示す。なお、同図は、測定 3 回分の結果を整理したものであり、図 2(a)と図 2(b)の縦軸に示す値は同値である。SL（図 2(a)参照）に関して、測定 3 回分のスペクトルの概形は概ね同じであり、OA に対し、2kHz～2.5kHz 帯および 12.5kHz～16kHz 帯の周波数成分による寄与が大きい。この 2kHz～2.5kHz 帯は、レール頭頂面の凹凸に起因した転動音と考えられる。また、SF（図 2(b)参照）については、同様に 2kHz～2.5kHz 帯に対応する周波数成分の寄与が大きい。10kHz 帯以上の成分は、SL よりも 10dB 以上小さい傾向にある。POA については、SL と SF でほぼ同値である。一方、OA と POA の差を見てみると、SF では 0.3dB 程度であるのに対し、SL は 3～4dB であり、SL の方が高周波音の寄与が大きいことがわかる。これは、文献[2]での知見のとおり、高周波音の主要な音源が台車前側の外軌側車輪であり、第 1 軸付近に設置した SL が顕著に高周波音を捉えていることが示唆される。SF において高周波音の寄与が小さい要因は、SF に対して、高周波音の主要な音源である台車前側の外軌側車輪（第 3 軸の外軌側車輪）からの音を、台車が遮る位置にあるためと考えられる。これらから、SL において高周波音の発生をより感度よく捉えていることが確認された。したがって、高速鉄道沿線での騒音測定において、高周波音の発生が確認された区間に対し、車上測定においても同様に高周波音を捉えられることを確認した。

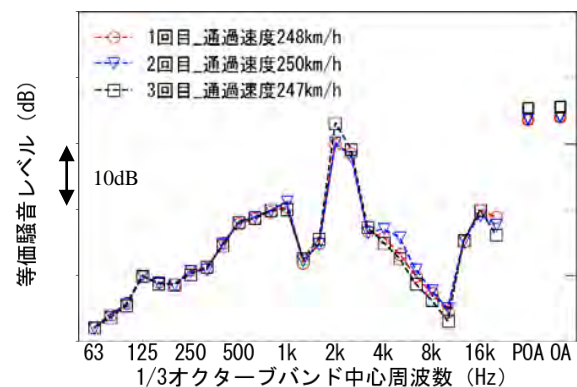
〈3・3〉 雨天時における高周波音の発生状況 文献[2]

において、高周波音が発生しない条件の一つとして、雨天時には発生しないことが確認されている。これに関して、降雨があった箇所（以下、区間 B）における車上測定の結果を用いて検証する。区間 B の平面線形および曲線半径は、円曲線・R3000 である。

図 3 に測定 3 回分の周波数分布を示す。なお、3 回の測定のうち、測定 2 回目において降雨が確認された。スペクトルの概形を比較すると、晴天時は OA に対して、2kHz 帯～2.5kHz 帯に加え 16kHz 帯の周波数成分の寄与が大きい。雨天時は、2kHz 帯～2.5kHz 帯の周波数成分の寄与が大きい。ただし、16kHz 帯の周波数成分に小さなピークを形成するのは、測定時の降雨量が少ない可能性が考えられる。また、OA と POA の差についても、雨天時はほぼ 0dB であるのに対し、晴天時は、1～4dB であった。これにより、雨天時には高周波音がほぼ発生しない文献[2]の知見と一致することが確認された。



(a) SL（前側マイクロホン）



(b) SF（後側マイクロホン）

図 2 車上測定結果（区間 A，円曲線）

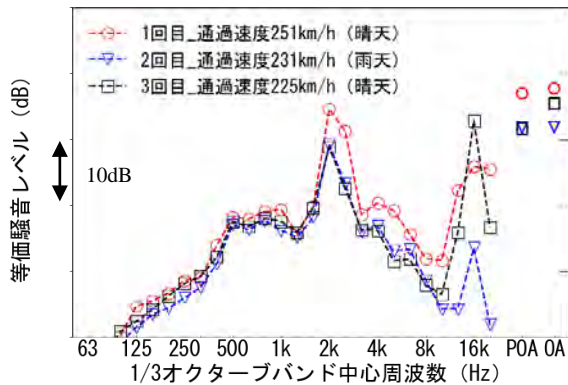


図 3 車上測定結果 (区間 B, 円曲線, SL)

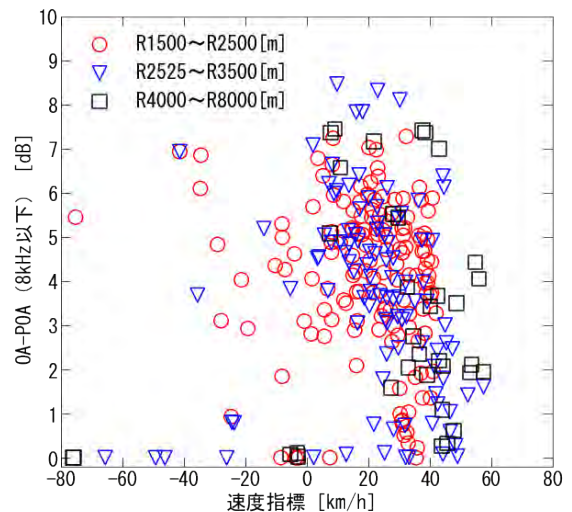
4. 高周波音の音源特性および発生条件

〈4・1〉 SL と SF の比較 車上測定結果に基づき、複数の曲線区間に対応する SL・SF を比較する。比較対象とするサンプル数 N は、96 箇所の円曲線区間における下り走行測定 3 回分とし、288 とする。また、通過速度と曲線中を走行する車両にかかる超過遠心加速度が 0 になる列車走行速度 (以下、均衡速度) との差 (通過速度 - 均衡速度) を用いて列車速度の指標 (以下、速度指標) とした。図 4 は、 L_{Aeq} における OA と POA の差と速度指標の対応を示したものである。なお、曲線半径[m]が R1500~R2500, R2525~R3500, R4000~R8000 の大きさの範囲で 3 つに区分した。

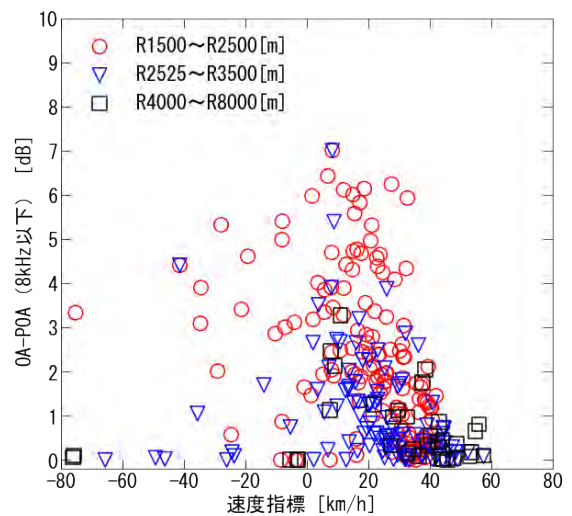
また、図 5 は、図 4 に用いたデータに対して、速度指標の 10km/h 毎 (± 5 km/h) に OA と POA の差の算術平均の対応を示したものである。なお、図中に示す誤差範囲は、標準偏差を表している。

図 4 では、SL・SF 共に速度指標が 0 km/h 以上の領域に測定データが多くあることがわかる。これは、均衡速度に対して通過速度の方が大きい箇所の割合が多いことを表す。SL (図 4(a)参照) に関しては、速度指標が 0km/h から 30km/h の範囲では、OA と POA の差が 3dB~7dB の範囲に集中して分布する。また、速度指標が 30km/h より大きい範囲では、速度指標が大きくなるにつれ OA と POA の差は小さくなる傾向がある。このことから、SL での高周波音の発生は速度指標に相関があると考えられる。また、SF (図 4(b)参照) に関しては、速度指標が 0km/h から 40km/h の範囲において、曲線半径が R1500~R2500 では、OA と POA の差が 0dB~6dB の範囲に多く分布する。同様に R2525~R3500・R4000~R8000 では、0~3dB の範囲に多く分布し、速度指標が大きくなるにつれ、その値は小さくなる傾向がある。また、速度指標が 40km/h より大きい場合は、いずれの曲線半径においても OA と POA の差は 0~1dB の範囲に分布する。このことから、SF での高周波音の発生は曲線半径および速度指標の両方に相関があると考えられる。SL・SF 共に、速度指標が大きくなるにつれ OA と POA の差が小さくなる傾向は、既往の研究の知見 (1 章(2)) に対応する。また、高周波音の発生には、曲線半径とも相関があることが考えられる。

図 5 より、各速度指標における OA と POA の差を SL と SF で比較すると、ほとんどの場合で SF より SL の値が大きい。また、SL (図 5(a)参照) における速度指標+10km/h および+20km/h では、いずれの曲線半径の場合でも、OA と POA の差が 4dB 以上と大きい。このことから高周波音は、通過速度が均衡速度より 10~20km/h 程度大きい場合の前側台車付近において顕著に発生する傾向がある。また、SF (図 5(b)参照) の曲線半径毎の OA と POA の差を比較すると、R1500~R2500 場合では、速度指標が-30km/h から+30km/h において高周波音が発生している。また、速度指標 0km/h 以上においては、ほとんどの場合で曲線半径が大きくなるほど OA と POA の差が小さくなる。これは、文献[2]の知見から第 1 軸と第 3 軸における高周波音の発生状況が同じと考えると、第 3 軸外軌側車輪の音源から SF への伝搬経路過程において台車部による遮蔽および回折の影響があり、曲線半径に応じてその影響が異なることが可能性として考えられる。



(a) SL



(b) SF

図 4 高周波音の発生傾向 ($N=288$, 円曲線区間)

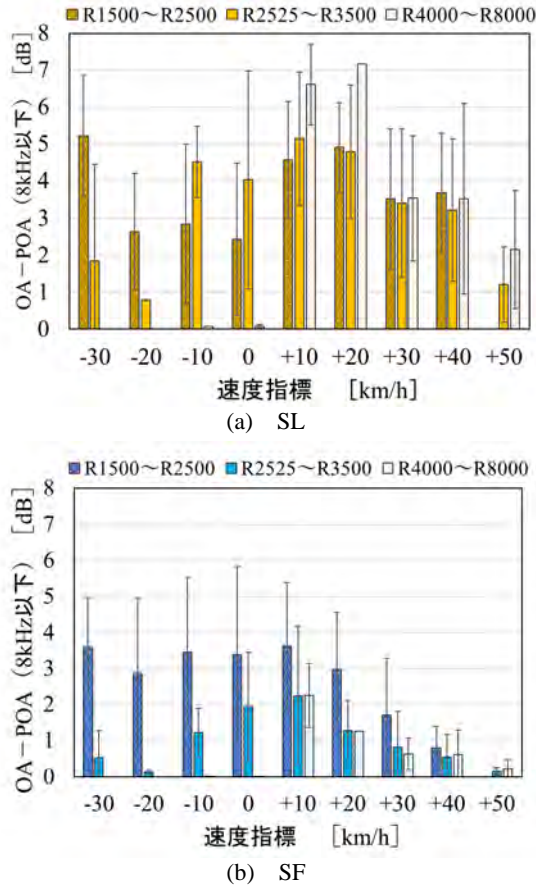


図 5 速度指標別の高周波音の発生傾向 (円曲線区間)

〈4.2〉 レール交換による高周波音の低減期間の検証

一部の曲線区間の外軌側レールは、走行する列車の車輪とレールの接触点において、レール側摩耗 (以下、側摩耗) が発生する⁽⁹⁾。また、通過トン数が増加するにつれて、側摩耗が進行する箇所においては、側摩耗の進行に従って車輪とレールの接触位置が変化することが考えられる。この車輪とレールの接触状態の変化が高周波音の発生に影響を及ぼすと仮定し、レール交換後の経過日数に伴う高周波音の発生状況を調査した。この調査は、前節までに確認した高周波音の音源特性や発生傾向から以下の条件で整理した。

- (1) 晴天時に測定したデータのみを採用
- (2) 高周波音を感度よく捉えている SL により検証
- (3) 速度指標が+10km/h から+40km/h のデータを採用

また、これまで等価騒音レベル (L_{Aeq}) は曲線区間の延長を通過した時間における A 特性音圧レベルのエネルギー平均値を求めたが、曲線区間の延長に対して、レール交換延長が短い場合は、レール交換の影響を適切に評価することができない。そのため、 L_{Aeq} を求める区間を、曲線区間の延長ではなく、レール交換区間の延長とした。また、高周波音の発生に影響しうる事項として、レール削正によるレール頭頂面の形状の変化が考えられる。そこで、レール削正による影響を含めないため、車上測定日から起算して 100 日前以内にレール削正が実施された箇所を除外した。図 6 は、レール交換からの 50 日間毎の経過期間と SL の OA と

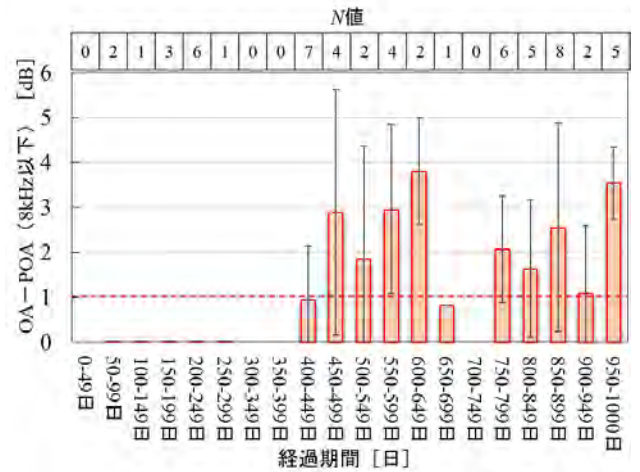


図 6 レール交換後の経過期間に対する高周波音の発生傾向 POA の差 (算術平均) の対応を示す。なお、図中の上部にある数値は、算術平均したデータ数を示しており、各項目の誤差範囲は標準偏差を表す。

図 6 より高周波音は、レール交換後 50 日から 299 日までに対応する OA と POA の差 (算術平均) は、ほぼ 0dB である。これは、レール交換後概ね 300 日以内は L_{Aeq} の OA に対し、高周波音の寄与がほぼ無いことを示している。また、高周波音は、レール交換から 450 日以上経過すると発生する傾向を示している。ただし、交換後 300 日から 399 日における測定結果が無かったため、データ数を増やして検証する必要がある。また、レール交換から 450 日以上経過した場合における誤差範囲の標準偏差は、ばらつきが大きい。これは、高周波音が発生する場合と発生しない場合の差は、車輪とレールの接触状態のわずかな違いが影響することが考えられる。

5. まとめ

高速鉄道の曲線区間において、走行する列車の車両床下に設置したマイクロホンによる騒音測定により、10kHz 以上の周波数域の高周波音の発生状況を把握できることを確認した。また、この測定方法で得られた測定結果に基づき、レール交換後の経過期間に対する高周波音の発生傾向を調査した。その結果、レール交換後概ね 300 日以内は高周波音が発生しないことを確認した。本研究の車上測定を用いることで、10kHz 以上の周波数域に対応する成分により騒音が増加している区間を大局的に把握することが可能になる。今後は、データ数を増やすことによって、高周波音発生条件をより細分化し、検証を行う予定である。

文 献

- (1) 川口二俊, 北川敏樹, 熊倉孝雄: 曲線区間で発生する 10kHz を超える高周波音の現象解明, 鉄道総研報告, Vol.29, No.5, pp.29-34, 2015
- (2) 川口二俊, 末木健之, 北川敏樹: 高速鉄道の曲線区間で発生する高周波音の現象解明, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.883, pp.1-14, 2020
- (3) 新版軌道材料, 鉄道現業社, pp.59-66, 2011