

# 鉄道の曲線区間におけるきしり音・高周波音の発生条件

末木 健之\* 清水 康博\* 新田 琢磨\*\* 高井 健太郎\*\*

## Study on the Occurrence Conditions of Squeal Noise and High frequency Noise in a Railway Curved Section

Takeshi SUEKI Yasuhiro SHIMIZU Takuma NITTA Kentarou TAKAI

When a train passes through a curved track, squeal noise (below 10 kHz) and high frequency noise (above 10 kHz) are often observed. Measurements of these noises were carried out on commercial lines to understand the generation of the noises. It is found that these noises vary from wheel to wheel, having large dispersion. The analysis results showed that these noises are prominent when the outer wheel flanges contact the outer rail at specific passing velocities. In contrast to that, these noises become lower when a train is running at balancing speed in curves.

キーワード：鉄道騒音，曲線部騒音，きしり音，高周波音，フランジ接

### 1. はじめに

鉄道車両が曲線区間を通過する際に、車輪・レールから高い周波数の騒音が発生することがある。在来線であれば、直線区間における転動音は主に500~2kHz程度<sup>1)</sup>の範囲で比較的広帯域な成分となることにに対し、曲線区間においてはそれ以上の周波数で純音に近い成分が観測される。これは、一般的にはきしり音として認知されている(きしみ音と表記される場合もあるが、本報告ではきしり音とする)。また、場合によっては10kHzを超える非常に高い周波数(以下、高周波音と表記する)が観測される場合もある。

これらは沿線騒音の評価値に影響を及ぼす場合があるほか、住民からの苦情の原因となりうる。曲線区間での騒音に関する研究例は多く存在している<sup>2) 3) 4)</sup>ものの、その発生条件について研究された例は少ない。

本報告では、曲線通過時に発生するきしり音と高周波音について、営業線(在来線および新幹線)における発生状況を実測により調査するとともに、その発生条件について検討を行った。

### 2. きしり音と高周波音の区分けについて

直線区間では発生せず、曲線区間のみにおいて発生するきしり音や高周波音は、車輪とレールの複雑な接触によって生じる。本報告では、卓越周波数に応じてきしり音と高周波音を次のように分類した。発生頻度や発生傾向は異なるが、第3章や第4章で述べるようにどちら

も在来線と新幹線両方で発生する。なお、これらについては厳密に区分けできるものではなく、混在することも考えられる。

#### ・きしり音(踏面きしり音)

車両が曲線を通過する際に生じる卓越周波数2k~10kHz程度の騒音である。きしり音は曲線通過時に車輪踏面とレールが相対的に滑ることで発生すると考えられており、主に曲線内軌側で顕著に発生する<sup>5)</sup>。

#### ・高周波音(フランジきしり音)

車両が比較的緩い曲線を通過する際に発生する、卓越周波数10kHz程度以上の騒音である。高周波音は曲線通過時に車輪フランジがレールに接触することで発生すると考えられており、主に曲線外軌側で卓越する傾向にある<sup>6)</sup>。

### 3. 在来線におけるきしり音・高周波音の発生状況

#### 3.1 測定の概要

本報告で対象とした在来線での騒音等の測定点の概要を図1に示す。本測定点は半径404m、カント98mm、スラック0mmの曲線である。軌道条件はバラスト軌道、50kgNレール、PCまくらぎ、軌道パッドあり(公称値110MN/m)である。当該曲線の均衡速度は68.7km/hである。

測定に際しては、無指向性マイクロホンを入軌側と外軌側の両方に軌道を挟んで概ね対称となるように設置した。設置高さは車軸が見通せる高さ程度とし、外軌側がレールレベル(以下、R.L.)+450mm、内軌側がR.L.-130mmである。以下、これらのマイクロホンで測定した騒音を「近傍音」と表記する。また、レーザー変位

\* 環境工学研究部 騒音解析研究室

\*\* 西日本旅客鉄道株式会社

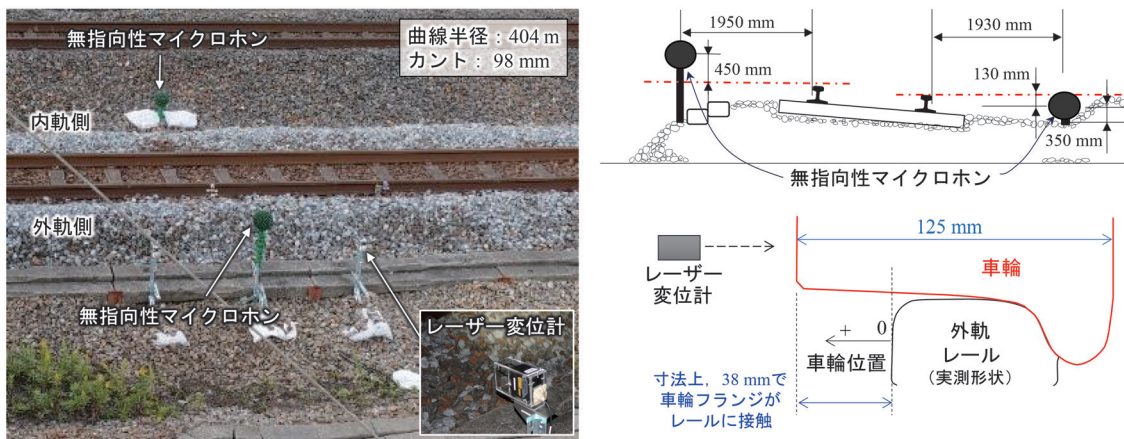


図1 在来線における騒音等測定点

計を設置し、列車通過時の車輪のまくらぎ方向の変位を測定した。

本試験で測定対象とした列車は通勤形電車4形式であり、4, 6, 7, 8両編成が存在する。測定区間は駅から約100mに位置しており、駅に停車後に測定区間を加速しながら通過する列車（均衡速度以下で通過）と、駅を通過した後はほぼ一定速度で測定区間を通過する列車（概ね均衡速度以上で通過）が存在する。以下では、それぞれを停車列車と通過列車と称する。

なお、本章の測定データは、全て晴れまたは曇り時に測定した結果であり、レール表面は乾燥状態である。

### 3.2 列車通過時の騒音（代表例）

図2および図3に、停車列車と通過列車それぞれ1列車の近傍音のスペクトログラムを示す。図中下部の黒線は列車が測定点を通過中の範囲を示している。これらの図では、外軌側近傍マイクロホンで測定した音圧データから得られた各車輪通過時の周波数分析結果のオーバーオール値を、全列車の全車輪について算術平均した値を0dBとした。

#### 3.2.1 停車列車の結果

図2は、4形式のうち1形式8両編成が停車列車として通過した際の結果であり、通過速度は先頭が40km/hで最後尾が60km/h（平均速度51km/h）である。全車両が均衡速度以下で通過する。

図2では、列車通過中は内軌側、外軌側ともに1kHz以下の成分の音圧レベルが高い。これは転動音に対応する成分である。また、5秒付近および8秒付近では6k~9kHz、9秒付近から13秒付近にかけては19kHz付近の音圧レベルが高い。これらは車輪が通過するタイミングであり、それぞれきしり音、高周波音に対応する。19kHzの成分で周波数が右下がりとなっているのは、ドップラー効果の影響である。

これらの成分を内軌側と外軌側で比較すると、きしり音は内軌側で大きく、高周波音は外軌側で大きい傾向にある。ただし、10秒から13秒については約5kHzから15kHzの音圧レベルは外軌側の方が大きい傾向にあり、きしり音および高周波音の発生傾向が他の位置とはやや異なる。

また、13秒付近から列車通過後にかけて、車輪通過時に比べると値は小さいが、16kHz付近の音圧レベルが継続的に高い。これは車輪通過後にレールが音源となって放射された高周波音であると考えられる。

#### 3.2.2 通過列車の結果

図3は停車列車と同形式の8両編成が、通過列車として測定点を通過した際の測定結果である。通過時の列車速度は76km/hである。駅を通過する列車であるため、全車両ほぼ一定の速度であり、均衡速度以上である。

図3より、通過列車では1kHz以下の成分が停車列車に比べて顕著である。内軌側と外軌側で比較すると、1kHz以下の周波数域は外軌側でより大きい傾向にある。きしり音は6秒付近（4kHz以上）と8秒付近（8kHz付近）で発生している。

18kHz付近の高周波音は、発生源と考えられる車輪通過に対応して6秒付近で顕著になる。周波数が右下がりとなっているのは、ドップラー効果の影響である。当該車輪通過後の値は小さくなるものの、列車通過中は音圧レベルがやや高い状態が継続している。これは、停車列車と同様に、レールが音源となって放射された高周波音である。また、6秒付近に発生したきしり音、高周波音のうち、13kHz以下の周波数域では内軌側の方が大きい傾向にある。

### 3.3 在来線における発生状況

前節の結果より、同一列車内であっても位置によりきしり音や高周波音の発生状況が異なることは明らかであ

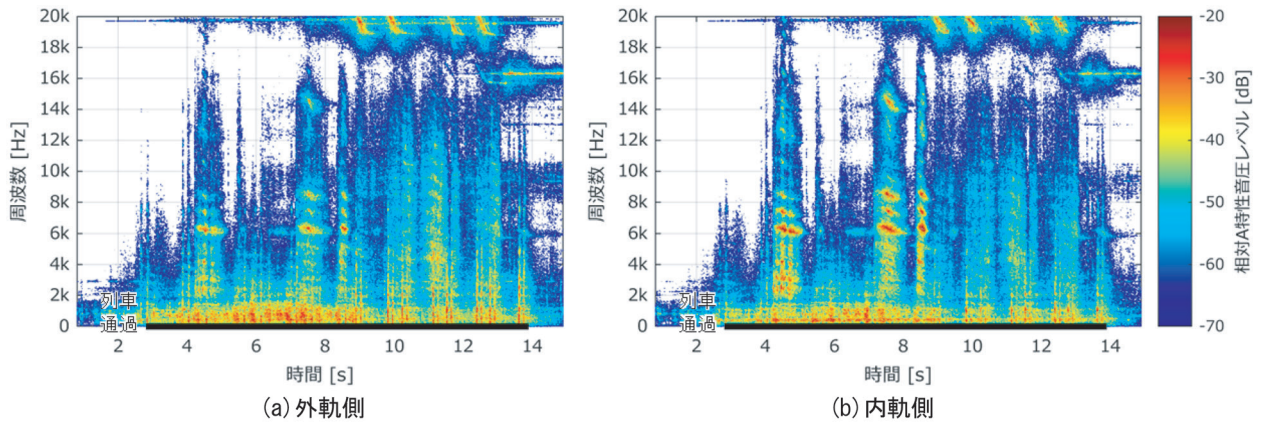


図2 近傍音の周波数分析結果（停車列車，8両編成，40～60km/h）

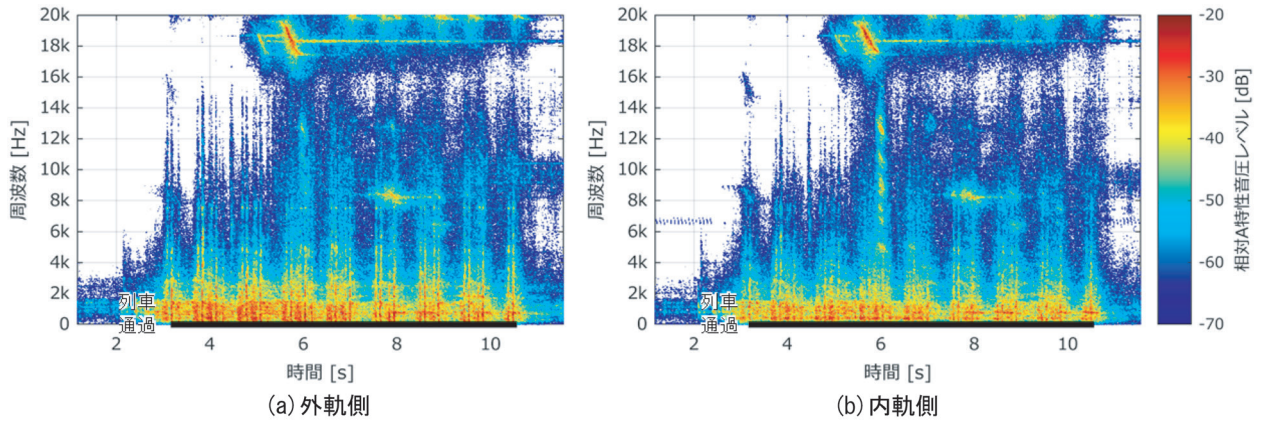


図3 近傍音の周波数分析結果（通過列車，8両編成，76km/h）

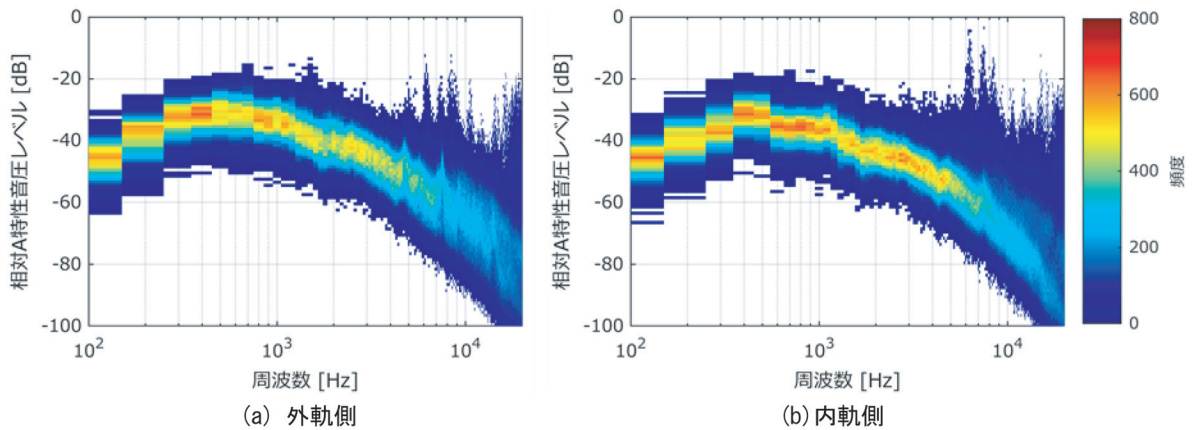


図4 近傍音の周波数分布のヒストグラム（30km/h～90km/h）

る。他の列車の測定結果も含めるとばらつきが大きく、単純な平均処理等では傾向を掴むことが困難と考えられる。そこで、本節では、ヒストグラムによる測定データの分布の確認と、きしり音や高周波音の発生状況を表すと考えられる上位データ（本報告では上位10%）を使用して発生状況を検討する。

図4に、測定した全列車の各車輪通過時の近傍音の周

波数スペクトルの2次元ヒストグラムを示す。全140列車・3332車軸の測定結果である。図4より、内軌側、外軌側ともに約4kHz以下の周波数では、最頻値が概ね中央値付近にあり、頻度自体も高い。これは、当該周波数域において通過車軸ごとの音圧レベルのばらつきが比較的少ないことを意味している。これに対し、4kHz以上の場合、レベルの分布の幅が広がり、最頻値が分布の

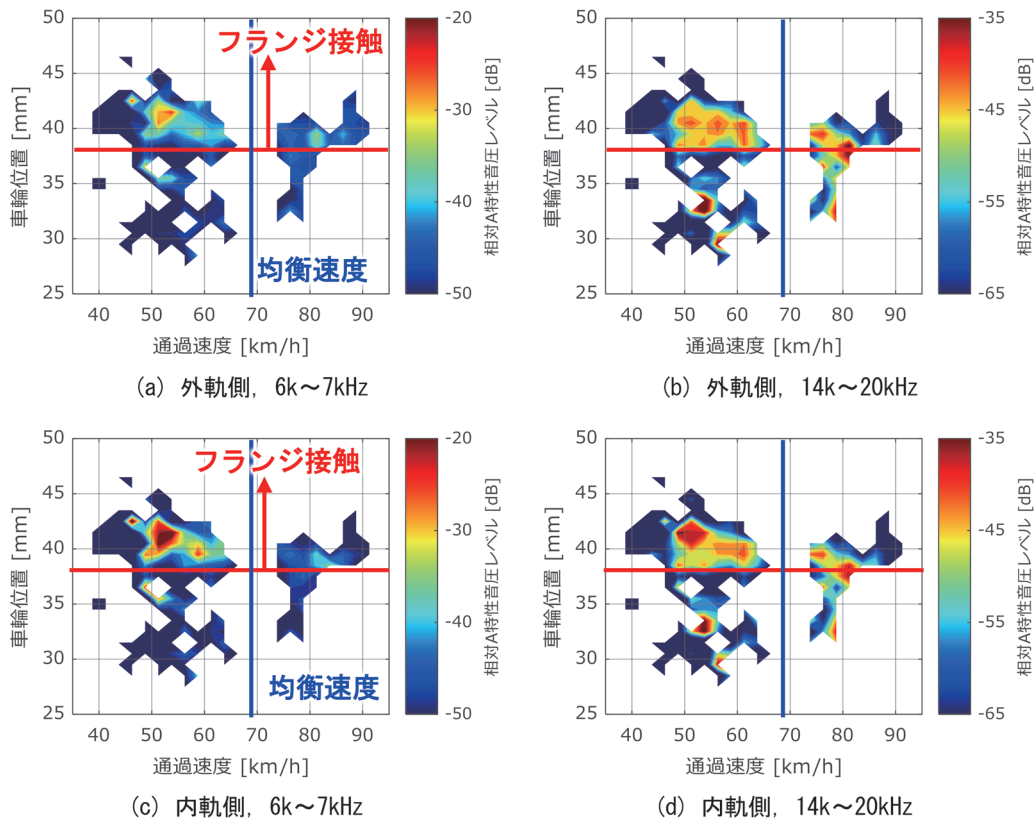


図5 車輪位置および通過速度ごとの前軸車輪の音圧分布

下側に偏る。また、最頻値となる時の頻度は4kHz以下と比べて低くなる。これは、きしり音や高周波音が一部の車輪でのみ発生し、著大な音圧レベルが計測されること、またそのときの卓越周波数での音圧レベルのばらつきが大きいことを示している。

図5に、レーザー変位計で測定した前軸外軌側車輪の車輪位置（図1に示すようにレール頭部側面を基準とした車輪リム部側面までのまくらぎ方向の距離）および車軸通過速度の両者をパラメータとして、きしり音および高周波音に対応する周波数領域の音圧レベル（上位10%）をプロットした結果を示す。なお、図5中の白い領域についてはデータが無いことを示している。図5では、主にきしり音である6k~7kHzの成分と、主に高周波音である14k~20kHzの成分について記載した。

図5より、きしり音である6k~7kHzの成分については、外軌側の車輪フランジがレールに接触（車輪位置：約38mm以上）し、通過速度が均衡速度よりやや低い52km/h付近で顕著に増大する。また、内軌側の方が外軌側よりも音圧レベルが高く、外軌側でフランジ接触した影響が内軌側にも現れている。一方で、その速度帯以外では、外軌側の車輪フランジがレールに接触する場合であっても6k~7kHzの成分は小さい。外軌側の車輪フランジがレールに接触しない場合は、どの通過速度であっても6k~7kHzの成分は概ね小さい。

高周波音である14k~20kHzの成分については、外軌側の車輪フランジがレールに接触する場合、50km/hを超えると音圧レベルが増大する。ただし、均衡速度付近では音圧レベルがやや低下する傾向にある。均衡速度を超えた場合であっても高周波音が発生する点が、きしり音と異なる点である。高周波音が発生する場合の内軌側と外軌側の音圧レベルを比較すると、速度によって大小関係が異なる。

#### 4. 新幹線におけるきしり音・高周波音の発生状況

##### 4.1 測定の概要

本報告で対象とした新幹線での騒音等の測定点の概要を図6に示す。この曲線は、半径3500m、カント180mm、スラック0mmの高架区間である。軌道条件は、スラブ軌道、60kgレール、軌道パッドあり（公称値60MN/m）である。当該曲線の均衡速度は236km/hである。

測定試験に際しては、無指向性マイクロホンを内軌側と外軌側の両方に設置した。設置高さは外軌側がR.L.-180mm、内軌側がR.L.+455mmである。新幹線においても図1の在来線の位置と同じ考えで軌道を挟んで対称にマイクロホンを設置するべきであるが、設置上の

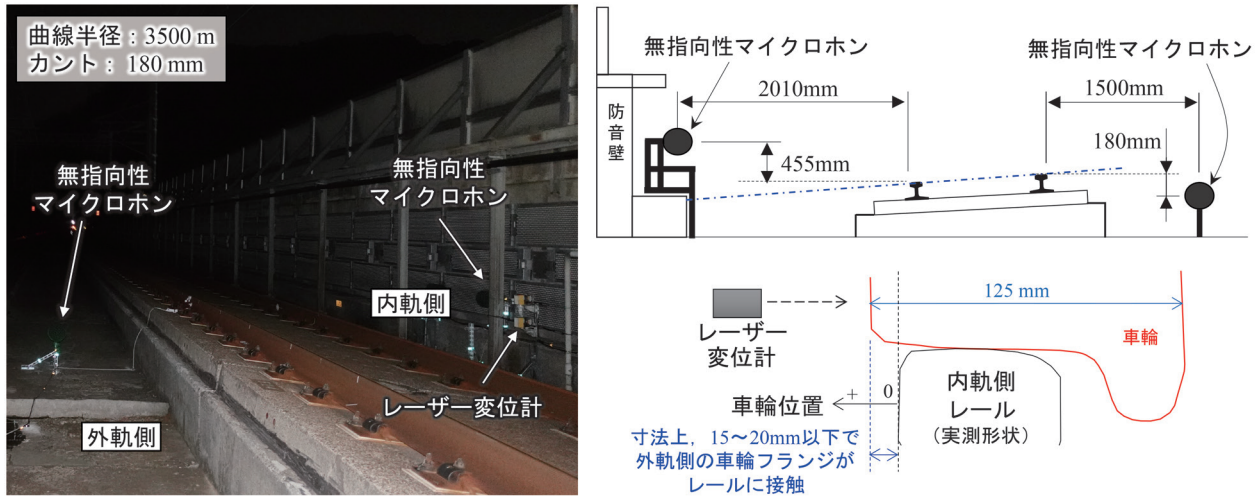


図6 新幹線における騒音等測定点

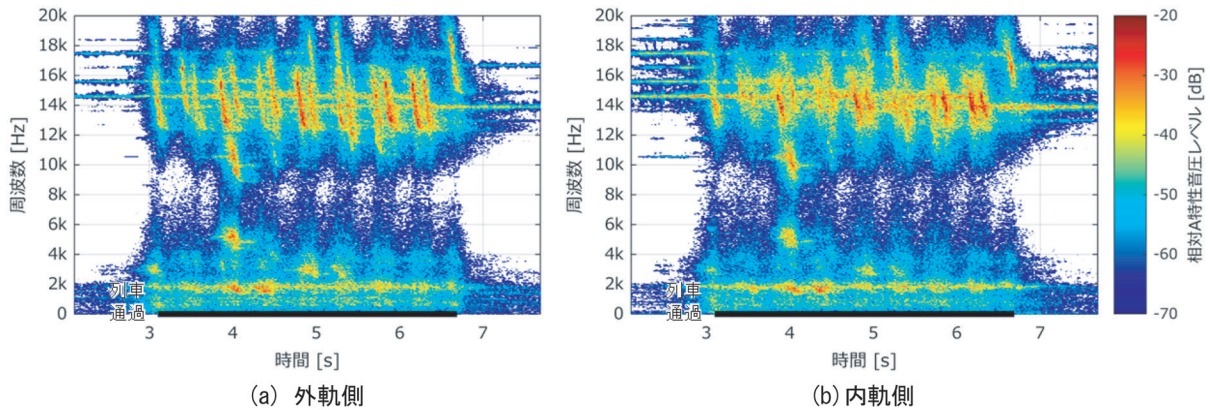


図7 近傍音の周波数分析結果（低速列車，8両編成，195km/h）

都合によりこの位置とした。また，新幹線における測定においてもレーザー変位計を設置し，列車通過時の車輪のまくらぎ方向の変位を測定した。

本試験では新幹線電車5形式を測定対象とした。うち3形式は8両編成，2形式は16両編成である。測定点を走行する列車は，列車種別等の違いにより通過速度に差異がある。本試験では，均衡速度以上で通過する列車を高速列車（通過速度：240～256km/h），それ以下の列車を低速列車（通過速度：154～221km/h）とする。

なお，本章の測定データも，全て晴れまたは曇り時に測定した結果であり，レール表面は乾燥状態である。

#### 4.2 列車通過時の騒音（代表例）

図7および図8に，低速列車と高速列車それぞれ1列車の近傍音のスペクトログラムを示す。図中下部の黒線は列車が測定点を通過中の範囲を示している。これらの図では，外軌側近傍マイクロホンで測定した音圧データから得られた各車輪通過時の周波数分析結果のオーバーオール値を，全列車の全車輪について算術平均した

値を0dBとした。

##### 4.2.1 低速列車の結果

図7は，8両編成，速度195km/hの低速列車の結果である。図7より，列車通過中において，4kHz以下および12k～17kHzの範囲の成分の音圧レベルが高い。4kHz以下の成分は，転動音や空力音で構成される。4kHz以下の成分のうち，2kHz付近のレベルがやや高い。これは，別途行った測定によりレール削正痕（波長約30mm，195km/hで1.8kHzに対応）が存在することが判明しており，2kHz付近は主に削正痕に起因した転動音であると考えられる。ただし，4秒付近では他の時間に比べてやや音圧レベルが高く，同時に5kHz付近，10kHz付近の音圧レベルも高い。これは，転動音以外にきしり音も発生していると考えられる。車輪凹凸が一樣である場合，転動音は概ね一定になると考えられるが，車輪通過に対応して音圧レベルが増加する事例が他にも多数確認された。

12k～17kHzの成分については，高周波音である。周波数が右下がりとなっているのは，ドップラー効果の影

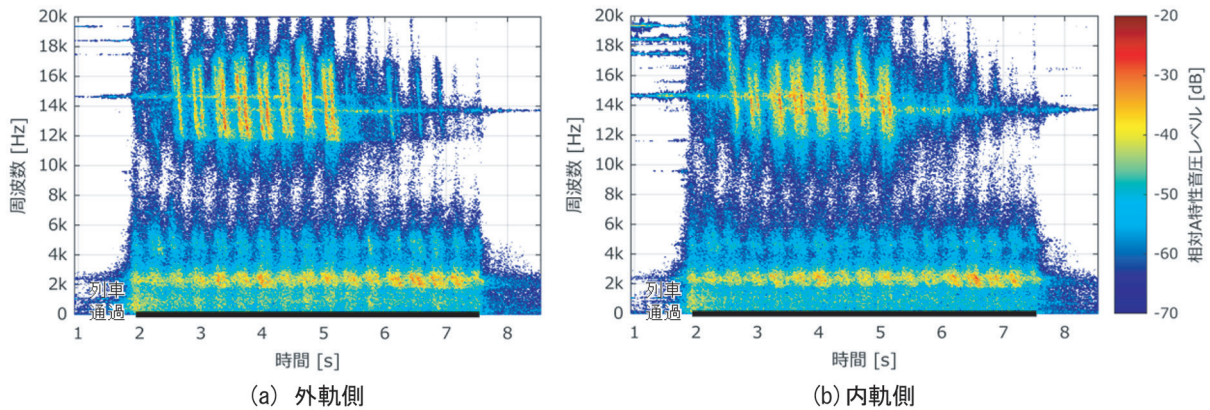


図8 近傍音の周波数分析結果（高速列車，16両編成，255km/h）

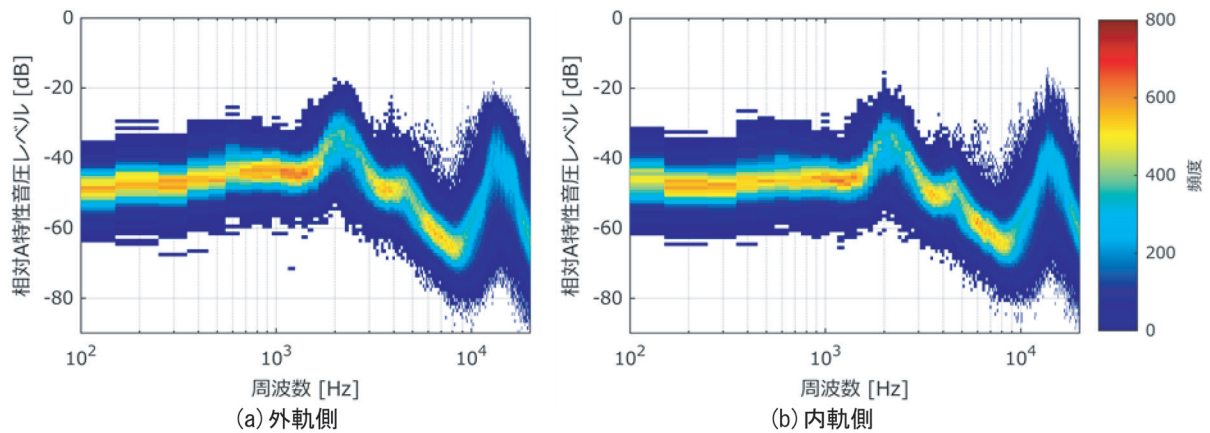


図9 近傍音の周波数分布のヒストグラム（154km/h～256km/h）

響である。音源と考えられる車輪通過前後においてレベルが高い領域が存在するが、これは在来線の結果と同様にレールが音源となっていると考えられる。

内軌側と外軌側で観測される騒音の差については、4.1節で述べたようにマイクロホン設置位置が対称ではないため直接的な比較はできない。ただし、過去の研究結果では、高周波音は外軌側で卓越する結果が得られている<sup>6)</sup>ことから、今回の場所においても外軌側が卓越していた可能性は高い。

#### 4.2.2 高速列車の結果

図8は、16両編成、速度255km/hの高速列車の結果である。

図8より、列車通過中に概ね4kHz以下の成分の音圧レベルが高く、特に2.5kHz付近で顕著である。削正痕は250km/hで約2.4kHzに対応することから、この主成分は削正痕に起因した転動音である。

高周波音は編成の途中で観測され、先頭や後尾側ではほぼ発生しないことが確認できる。発生する高周波音の卓越周波数はほぼ14kHz付近である。周波数が右下がりとなっているのは、低速列車と同様にドップラー効果の影響である。また、高周波音が発生している台車ごと

の発生状況のばらつきは、低速列車と比較すると小さい。

#### 4.3 新幹線における発生状況

新幹線においても、きしり音や高周波音の発生状況は同一列車内であっても位置によって異なり、他の列車の測定結果も含めるとばらつきが大きく単純な平均処理等では傾向を掴むことが困難と考えられる。そこで、3.3節と同様に、本節においてもヒストグラムによる測定データの分布の確認と、きしり音や高周波音の発生状況を表すと考えられる上位データ（本報告では上位10%）を使用して発生状況を検討する。

図9に、測定した全列車の各車輪通過時の近傍音の周波数スペクトルの2次元ヒストグラムを示す。全119列車・5435車軸の測定結果である。図9より、2kHz、4.5kHz付近、および10kHz以上を除き、最頻値が概ね中央値付近にあり、かつ最頻値となる時の頻度が高い傾向にあることから、これらの周波数領域では列車ごとのばらつきが小さいと考えられる。2kHz付近については削正痕に起因する転動音の周波数が速度に依存して変化するため、4.5kHz付近については発生状況にばらつきがあるきしり音の影響により、最頻値となる時の頻度が

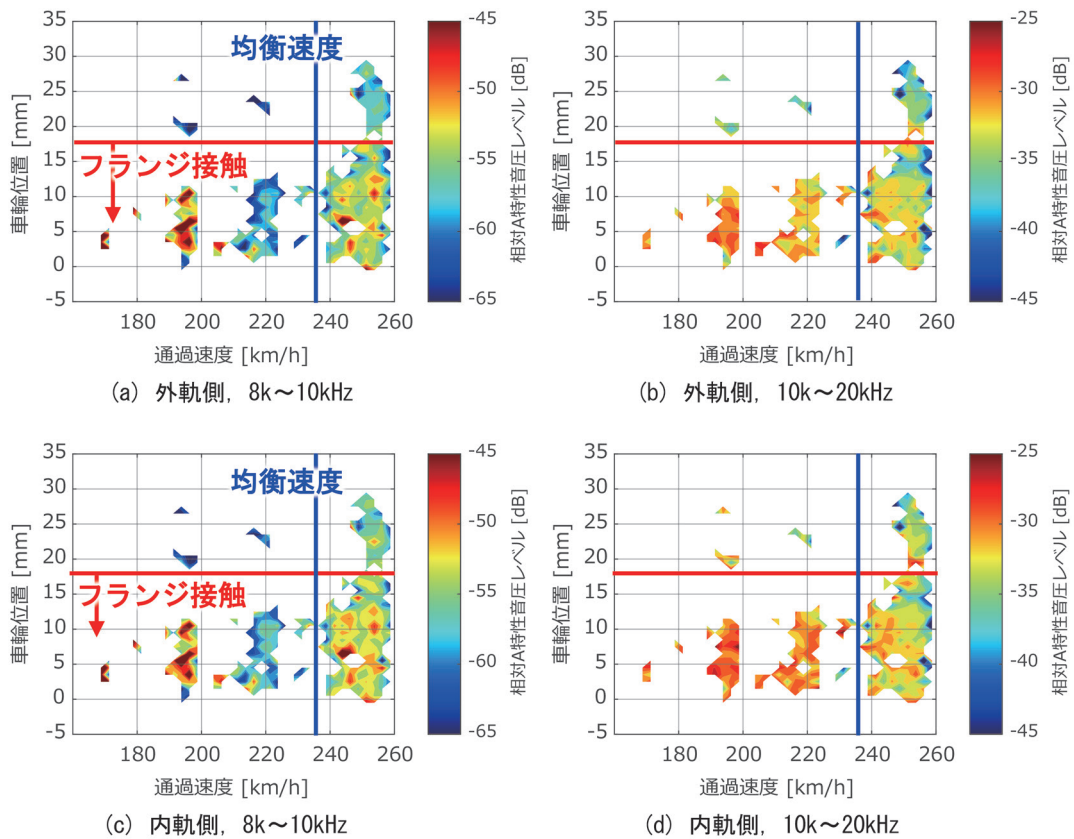


図 10 車輪位置および通過速度ごとの前軸車輪の音圧分布

低くなったと考えられる。また、10kHz 以上はレベル分布の幅が大きく、かつ最頻値となる時の頻度が低い傾向にある。これは高周波音の発生状況が台車ごとにばらつくことに起因すると考えられる。一方で、最頻値が分布の比較的上側に位置していることから、通過した多くの列車で高周波音が発生したと考えられる。

図 10 に、レーザー変位計で測定した前軸内軌側車輪の車輪位置（図 6 に示すようにレール頭側面を基準とした車輪リム部側面までのまくらぎ方向の距離）、および車軸通過速度の両者をパラメータとして、きしり音および高周波音に対応する周波数領域の音圧レベル（上位 10%）をプロットした結果を示す。なお、図 10 中の白い領域についてはデータが無いことを示している。図 10 では、主にきしり音である 8k~10kHz の成分と、主に高周波音である 10k~20kHz の成分について記載した。

新幹線においてはレーザー変位計を曲線の内軌側に設置したため、フランジ接触の条件が在来線の結果（図 5）と逆転する。ここで、図 10 では、均衡速度以下では多くの前軸外軌側車輪のフランジがレールに接触すると推定（車輪位置：15~20mm 以下）されるのに対し、均衡速度以上では接触が発生しないと推定される場合があることが特徴である。

図 10 より、きしり音である 8k~10kHz の成分につい

ては、外軌側車輪のフランジがレールに接触すると推定され、通過速度が均衡速度より低い 195km/h 付近で顕著に増大する。一方で、220km/h 付近から均衡速度付近では、8k~10kHz の成分が小さい。均衡速度を超えると 8k~10kHz の成分は再度増大するが、195km/h 付近よりは音圧レベルが小さい。また、外軌側車輪のフランジがレールに接触しないと推定される場合は、どの通過速度であっても 8k~10kHz の成分は概ね小さい。

高周波音である 10k~20kHz の成分については、外軌側車輪のフランジがレールに接触すると推定され、均衡速度より通過速度が低い場合に音圧レベルが大きい。一方で、均衡速度を超えると音圧レベルは均衡速度以下の時よりもやや低減する。また、外軌側車輪のフランジがレールに接触しないと推定される場合、高周波音は低い傾向にある。図 7 や図 8 において示したように、低速列車ではほぼ全ての台車で高周波音が観測されたのに対し、高速列車では高周波音が発生しない台車が存在したのは、列車速度が均衡速度を超えるとフランジ接触しない場合があるためと考えられる。

## 5. きしり音・高周波音の発生条件

第 3 章と第 4 章の結果を踏まえると、きしり音や高

周波音の発生条件は、在来線・新幹線に関係なく、以下の傾向にあると考えられる。

- ・きしり音は、列車が曲線における均衡速度よりやや低い速度で走行し、かつ、外軌側車輪のフランジがレールに接触する場合に特に発生しやすい。内軌側、外軌側両方で観測されるが、内軌側の方が卓越する。なお、今回測定を行った曲線区間においてきしり音が特に発生しやすい速度（在来線：52km/h 付近、新幹線：195km/h 付近）について、在来線、新幹線のそれぞれの曲線条件から超過遠心加速度を算出すると、両者ともに $-0.39\text{m/s}^2$ 程度である。
- ・高周波音は、外軌側車輪のフランジがレールに接触する場合に、内軌側、外軌側両方で観測される。
- ・列車通過速度が均衡速度付近である場合や、外軌側車輪のフランジがレールに接触しない場合には、きしり音、高周波音ともにあまり発生しない。

## 6. まとめ

列車が曲線区間を通過する際に発生するきしり音および高周波音に関し、在来線および新幹線における発生状況を調査し、その特徴を整理した。また、得られた特徴から、きしり音や高周波音の発生条件を提示した。

本報告で述べた発生条件は、2箇所での測定結果から推定した結果であり、あらゆる曲線で同様の結果が得られ

るかについてはサンプル数を増やして検証する必要がある。また、この発生条件におけるメカニズムの解明も進める必要がある。今後、これらに取り組む予定である。

## 文 献

- 1) 北川敏樹：鉄道騒音の特性と防止策，日本音響学会誌，Vol.64, No.10, pp.629-634, 2008
- 2) A.D. Monk-Steel, et al.: An investigation into the influence of longitudinal creepage on railway squeal noise due to lateral creepage, Journal of Sound and Vibration, Vol. 293, pp.766-776, 2006.
- 3) F.G. de Beer, et al.: Squeal noise of rail-bound vehicles influenced by lateral contact position, Journal of Sound and Vibration, Vol.267, pp.497-507, 2003.
- 4) P. J. Remington: Wheel/rail squeal and impact noise: What do we know? What don't we know? Where do we go from here?, Journal of Sound and Vibration, Vol. 116, No.2, pp.339-353, 1987.
- 5) 末木健之，川口二俊，清水康博，北川敏樹，金元啓幸，葛田理仁：台上試験と実車走行試験によるきしり音の特性評価，鉄道総研報告，Vol.36, No.9, pp.25~32, 2022
- 6) 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音源別寄与度評価，鉄道総研報告，Vol.34, No.3, pp.41-46, 2020