

第84回

車内騒音

はじめに

音とは媒質中を伝搬する波で、一般的には空气中を伝搬する粗密波のことです。人間は一般に20Hz～20kHzの周波数の音を聴覚で感じることができますが、その中でも人間が不快な、または望ましくない音とを感じる音を騒音といいます。

鉄道に関する騒音は、車両の内外で車内騒音と車外騒音(沿線騒音)に分類されます。車内騒音は、乗客の快適性にかかわる物理的要因(振動, 温熱, 明るさ, においなど)の一つであり、近年では新幹線をはじめとする高速車両で低減のニーズが高まっています。また、車外騒音は、公害対策基本法(1967年施行)に基づき、新幹線に関する環境基準「新幹線鉄道騒音に係る環境基準について」(1975年環境庁により公示, 1993年改正)があるのに対して、車内騒音にはとくに基準などはありません。そのため、車内騒音については各鉄道事業者や車両メーカーによって、

乗客の快適性向上を目的に、独自に目標値や対策が取られてきました。

車内騒音には騒音源と、そこから車内に伝わる経路(伝搬経路)が多く存在し、さらに車両の位置(たとえば、車両中央と車端部など)によって音響特性が異なります。これは車内静粛性の研究開発が進められている自動車と比較して非常に複雑です。

ここでは、車内騒音の騒音源と伝搬経路、車内騒音の測定方法、これまでの車内騒音の低減に関する取り組みについて紹介します。さらに、鉄道総研における最近の車内騒音に関する取り組みも紹介します。

騒音源、伝搬経路による分類

鉄道車両の主な騒音源を図1に示します。台車やパンタグラフ、床下機器などで発生する振動や台車の駆動装置(モーターやギヤなど)から発生する機器音、車輪とレール間で発生する転動音、パンタグラフと架線間で発生す

るしゅう動音、車両が高速で走行することで車体の凹凸や車両間隙、パンタグラフなどで生じる空力音、さらに高架橋などの振動により発生する構造物音など多岐にわたります。

また、車内騒音を騒音源から車内への伝搬経路によって分類すると、主なものとして、図2に示すように台車や床下機器、パンタグラフなどの騒音源から振動として車体に伝搬し、車内に音として放射される固体伝搬音と、車外の音が床や窓、屋根などの車体構体を透過して車内騒音となる透過音があります。また、そのほかに側扉や窓などの隙間から直接車内に侵入する空気伝搬音があります。新幹線をはじめとする高速車両では、車内の気密を高めているため、「固体伝搬音」と「透過音」がほとんどです。

車内騒音の測定方法

音の測定には一般に騒音計(図3)を用います。騒音計は空气中を伝搬する音波の音圧(大気圧からの圧力変動)を

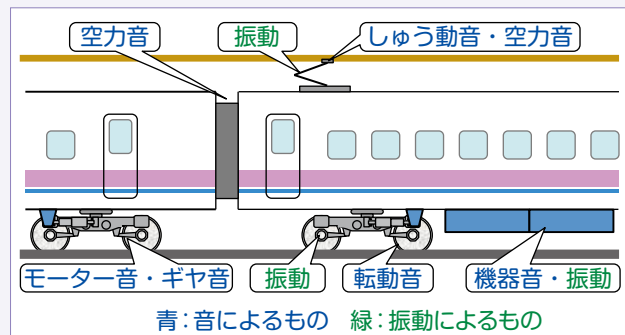


図1 鉄道車両の主な騒音源

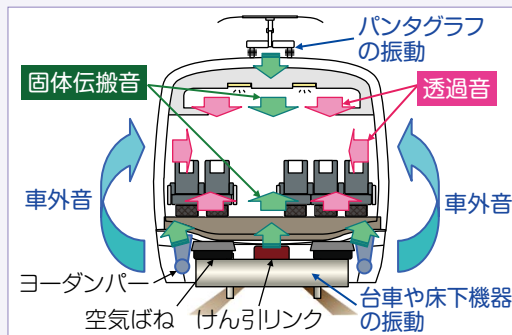


図2 固体伝搬音と透過音



図3 騒音計

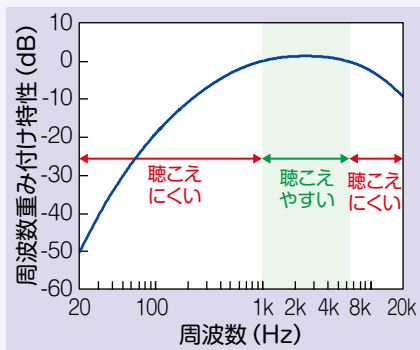


図4 A特性周波数重み付け

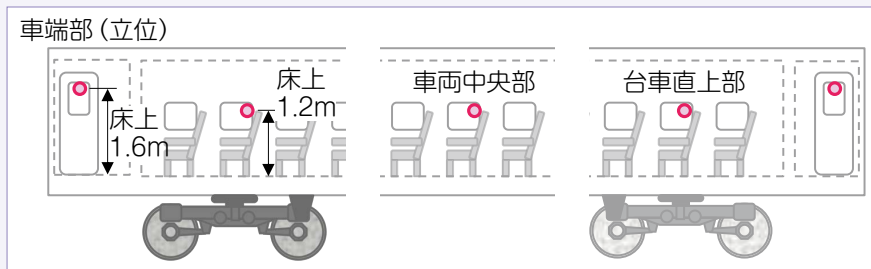


図5 車内騒音測定点の例

表1 新幹線車両の主な車内騒音低減対策^{2)~13)}

年代	1960	1970	1980	1990	2000	2010
新幹線車両 (カック内は 営業開始年)	・0系(1964)		・200系(1982) ・100系(1985)	・300系(1992) ・400系(1992) ・E1系(1994)	・500系(1997) ・E2系(1997) ・E3系(1997) ・E4系(1997) ・700系(1999)	・800系(2004) ・N700系(2007)
主な低減対策 (実用化および 提案、重複する 対策については 最初に実用化し た車両を表示)	・浮床構造 (技研、量産車には不採用)		・遮音性能の高い車体 構造の提案(技研) ・床全面じゅうたん張り (200系) ・車内歩行音低減 (クッション材の裏張り) (200系)	・誘導電動機の制御 の変更(300系) ・床上部への鉄板設置 (300系) ・車体の平滑化 (300系, 400系)	・側構体・床構体へのアルミハ ニカム材の採用(500系) ・ダブルスキン構造 (E2系, 700系) ・浮床構造(700系) ・窓の板厚・空気層の最適化 (700系) ・パンタグラフの改良 (500系, 700系)	・デインプル床板(800系) ・静音リンク(N700系) ・全周ホロ(N700系) ・たわみ継手の改良 (N700系) ・歯車装置の改良 (N700系)
						・床下機器の弾性支持 (E5系, E6系) ・消音空調ダクト (E5系, E6系) ・窓構造の小型化 (E5系, E6系)

検知するマイクロホンと周波数補正回路や実効値レベル化回路などを備えた回路部で構成されています。人間の聴覚は、周波数によって同じ大きさの音でも感度が異なります。車内騒音レベルは、マイクロホンで測定した音圧に図4に示す人間の聴覚を考慮した周波数重み付け特性であるA特性の聴感補正を行い、単位はdB(デシベル)で表します。A特性周波数重み特性は1kHzよりも低い周波数になるとともに聴こえにくくなり、1kHz~6.3kHzまでは聴こえやすく、さらに高周波になると聴こえにくくなるという人間の聴覚に近い補正を行うものです。

日本における鉄道車両の車内騒音の測定方法は日本工業規格(JIS)で規定されています。この規格では試験条件、試験方法、測定装置、マイクロホン位置、車両および軌道条件などが規定されています。車内騒音は図5のように車両の中央および端部のほかに台車直上を含む5~7か所の座席では床面から高さ1.2m、立席では床面から高さ1.6mの乗客の耳の高さにあたる位置で測定します。

これまでの車内騒音の低減に対する取り組み(新幹線車両)

これまで車内騒音については、おもにその大きさ(車内騒音レベル)を低減する研究開発が連続と行われてきました。まず、騒音源と伝搬経路を特定する研究が行われ、音源の寄与度(騒音全体に占める割合)を解析するさまざまな手法が提案されてきました。騒音源や伝搬経路が明らかになることで、それらに対応する騒音低減対策が開発されてきました。

一方、快適性に関わる人間科学分野の研究では、振動や音、温熱、明るさなどの刺激強度と乗客の不快感との対応関係について、心理的(主観的)評価手法、生理的評価手法などの開発が進められてきました¹⁾。その中で、車内騒音に関しては、振動と騒音の複合環境が車内快適性に及ぼす影響の検討や人間の不快感と相関の高い車内騒音の評価手法の提案などが車内快適性シミュレーターを活用して行われてきました²⁾³⁾。

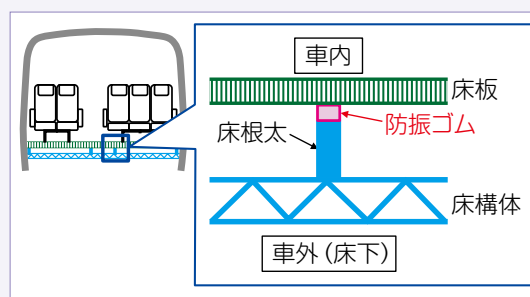


図6 浮床構造(断面図)

ここでは、これまでの新幹線車両の車内騒音の低減に関する主な取り組みを紹介します。表1に1960年代から現在までの新幹線車両の車内騒音の低減対策を示します。まず、0系の車両の設計にあたって、旧国鉄の鉄道技術研究所(以下、技研)では車内騒音に大きく寄与するのは透過音によるものと考えられたことから、その対策の基本的な考え方として、音源は床下であり床構造を「音を透過しないもの」にすることで進められました⁵⁾。この考え方にしたがって、数種の浮床構造の騒音低減効果の検証が行われました。浮床構造は、図6のように床板と床構体(床根太)の間に防振ゴムや発泡材などを挿入して床板を弾性支持するこ

とにより、床板からの放射音を低減するものです。浮床構造は振動絶縁効果を期待するもので、現在は固体伝搬音対策として採用されていますが、当時は透過音対策として低減効果の検証が行われました。検証の結果、その有用性は実験的に確認されましたが、量産車の設計時には経費などの点で採用されず、床板を床根太に直接固定する固定床が用いられました。

1980年代に入ると、技研では車両の乗り心地について基本的な見直しが行われ、その中で車内騒音改善のため、在来線車両および新幹線車両の車内騒音特性に関するさまざまな調査、研究が行われました⁶⁾。その結果、東北・上越新幹線向けの200系の開発においては、通常の高速走行時の主音源は転動音であると結論づけ、車内騒音に対する透過部位を走行区間別（明かり、トンネル、バラスト軌道、スラブ軌道）に特定し、遮音性能の良い車体構造（床

構造、側板、窓、天井など）が提案されました。

国鉄の分割民営化以降、新幹線車両の高速化および軽量化が進むとともに車内騒音低減のニーズが高まり、さまざまな低減対策がとられてきました。1990年代後半になると、500系では側構体と床構体にアルミハニカム材（ハチの巣状の構造を2枚の板で挟んだもの、**図7**）が用いられ、E2系、700系では車体構体にアルミの中空押出型材を用いたダブルスキン構造が採用されました^{5)、6)}。これらはともに二重構造のため、透過音の低減を図ることができます。中空押出型材は、**図8**に示すように外板2枚とトラス状形材が一体化しているもので、**図8下**のように中空部に発泡材を充填することにより、さらに遮音特性を向上させました。2000年代以降の新幹線車両の車両構体には中空押出型材が採用されています。

また、音源や寄与度に関する解析の

深度化や測定器やコンピューターの飛躍的な性能向上により、台車直上部では台車からの固体伝搬音が支配的であることが明らかになってきました^{11)、12)}。この固体伝搬音対策として、浮床構造が新幹線車両では700系で初めて採用されました⁶⁾。

浮床構造以外にも台車からの固体伝搬音対策として、台車と車体を結合しているけん引装置である一本リンクの内部に複数の粒状体を封入した「静音リンク」があります¹³⁾。これは、台車からの振動エネルギーを、封入した粒状体の運動エネルギーに変換するとともに、粒状体どうしや粒状体とリンク内の側壁との摩擦制振を促進させることにより、車体に伝わる振動エネルギーを低減させるものです。走行試験において、約3dBの車内騒音低減効果が確認され、現在、N700系およびN700A系新幹線で採用されています。

鉄道総研における車内騒音に関する最近の取り組み

ここでは、鉄道総研における車内騒音に関する最近の取り組みを紹介いたします。先にも述べましたが、車内騒音の低減を図るうえで必要なことは、騒音源および伝搬経路を正確に把握することです。また、騒音低減対策を車両の適切な位置に効率よく適用するためには車内騒音に対する車内各部位の寄与度を明らかにすることも重要です。そこで、**図9 (a)**に示すように多数のCCDカメラとマイクロホンが埋め込まれた球型センサーと処理装置からなる全方位音源探査システムを用いて、車内における騒音の侵入方向の可視化を行いました¹⁴⁾。一例を**図9 (b)**に示し

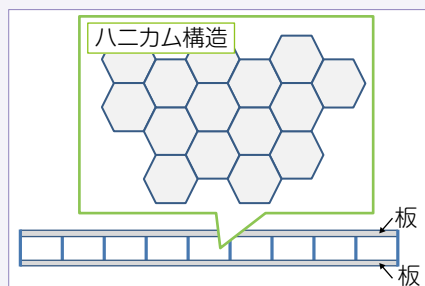


図7 アルミハニカムパネル

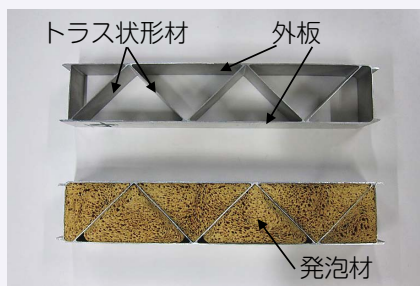


図8 中空押出型材（カットモデル）

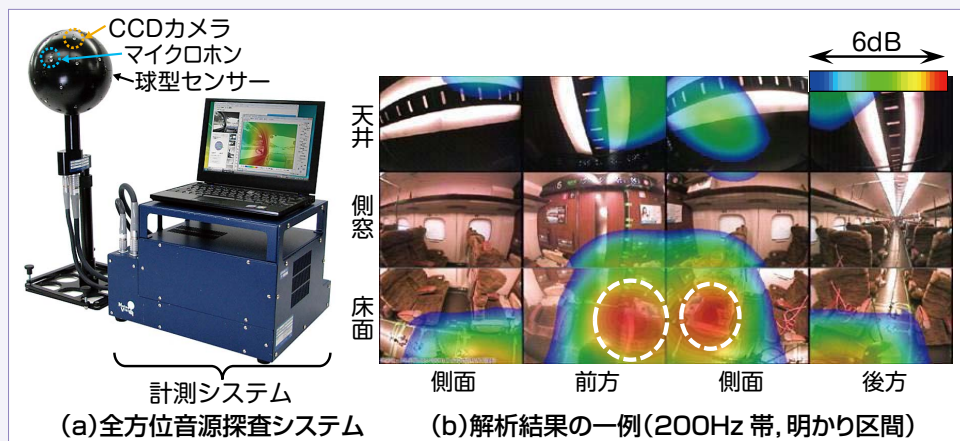


図9 車内騒音における音の侵入方向の可視化

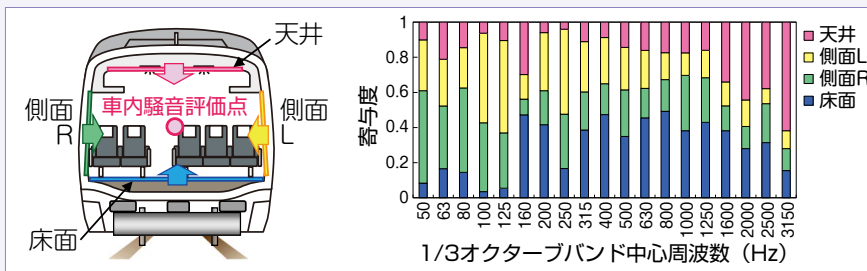


図10 車内騒音に対する車内各部振動の寄与度の一例
(新幹線, 台車直上部, 明かり区間)

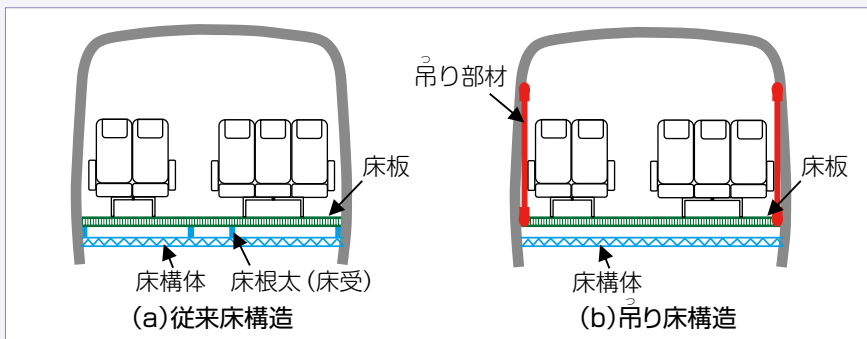


図11 従来床構造と吊り床構造

ます。明かり区間における台車直上床上1.2m位置の200Hzバンドの騒音の結果で、白破線で囲んだ箇所から到来する音が強いことを示しています。台車直上では床方向から到来する音の大きいことがわかります。

また、寄与度解析手法の一つとして、自動車の低騒音・低振動分野で普及している伝達経路解析 (Transfer Path Analysis : TPA) を、騒音源 (台車や主変圧器) から車内各部 (床面, 側面, 天井) 振動, 車内各部振動から車内騒音のそれぞれの伝搬経路について適用し、寄与度が把握できる新たな手法を提案しています¹⁴⁾。図10に車内騒音に対する車内各部振動の寄与度の一例を示します。周波数によって寄与度が異なることが確認できます。

床板から放射される台車からの固体伝搬音を低減する新たな手法の一つとして、台車直上部の床板を側構体から吊り下げる「吊り床構造」を考案しました¹⁵⁾。吊り床構造の概要図を図11に示します。これまで、図11(a)のように床根太を介して床構体に固

定されていた床板を、図11(b)のように側構体から「吊り部材」によって吊り下げることにより、床板は床構体から浮いた状態になり、床構体から伝搬する振動が完全に絶縁されます。その結果、床板への振動入力は側構体からのみとなり、床板の振動が低減されることで放射音が小さくなります。吊

り部材としては、棒状の部材あるいはワイヤーなど、側構体と内装パネル間に配置可能な構造を検討する必要があります。

おわりに

ここでは、新幹線車両を中心に車内騒音を低減させるためのさまざまな取り組みを紹介しました。一方で、近年各地で増えている観光列車では、乗客は移動手段としての利用だけでなく、その列車に乗ること自体を目的としており、車内騒音に対する感じ方や評価はこれまでとは異なると予想されます。このように、多様化が進む車内騒音に対して、引き続き車内騒音レベルの低減に取り組むとともに、今後は車内騒音レベルだけでは評価できない「不快な音」の評価 (音質評価) や自動車分野で進んでいるサウンドデザインの考え方を取り入れられる可能性もあります。

(朝比奈峰之/車両構造技術研究部
車両振動研究室)

文献

- 1) 鈴木浩明 : 車内の快適さを測る, RRR, Vol. 73, No. 4, pp.4-7, 2016
- 2) 日本国有鉄道 鉄道技術研究所編 : 高速鉄道の研究, pp.402-405, 1967
- 3) 智野貞弥, 善田康雄 : 車内騒音の現状, 鉄道技術, Vol. 43, No. 4, pp.126-130, 1986
- 4) 松田和夫 : より良いアコモデーションを求めて - 200系新幹線電車の場合 -, JREA, Vol. 23, No. 12, 1980
- 5) 古江則彦 : 次世代新幹線営業車両500系の概要, JREA, Vol. 38, No. 5, 1995
- 6) 鳥居昭彦 : 700系新幹線電車の快適性向上, JREA, Vol. 42, No. 11, 1999
- 7) 伊藤順一 : 700系に至る新幹線車体の主要技術, JREA, Vol. 45, No. 5, 2002
- 8) 川上章吉 : 九州新幹線800系車両の開発, JREA, Vol. 47, No. 5, 2004
- 9) 藤井忠, 鈴木正徳 : N700系新幹線電車の車内快適性, JREA, Vol. 53, No. 5, 2010
- 10) 堀川重成, 藤片義博, 栗田健 : 新幹線車両の車内騒音低減に向けた研究開発, JR EAST Technical Review, No. 53, pp.19-22, 2015
- 11) 塩幡宏規, 根本佳奈子, 武市通文, 岩壺卓三 : 実規模車両構体における大規模振動放射音の解析法と低減に関する研究, 日本機械学会論文集C編, Vol. 66, No. 649, pp.56-61, 2000
- 12) 堀内雅彦, 橋本克史, 白石仁史, 秋山悟, 南元康文 : 高速鉄道車両用窓の遮音性能, 日本機械学会第12回交通・物流部門大会講演論文集, pp.37-40, 2003
- 13) 瀬畑美智夫, 牧野俊昭, 平石元実, 上林賢治郎, 大石達哉 : 粒状体を用いた高速鉄道車両用静音リンクの走行試験, 平成13年鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.203-206, 2001
- 14) 朝比奈峰之, 山本克也 : 鉄道車両の車内騒音特性および伝搬特性の把握, JREA, Vol. 60, No. 4, 2017
- 15) 山本克也, 朝比奈峰之, 秋山裕喜, 石森章純 : 吊り床構造による鉄道車両の固体伝搬音低減対策, 第21回鉄道技術・政策連合シンポジウム, No.S5-1-4, 2014