

新幹線車内騒音の快音化

藤原 達郎* 古川 瑞樹 菊池 善基 白木 直樹 藺田 秀樹 (JR 東日本)

齋藤 浩司 (日本線路技術)

The Reduction of discomfort sound in bullet trains

Tatsuro Fujiwara*, Mizuki Furukawa, Yoshiki Kikuchi, Naoki Shiraki, Hedeki Sonoda, East Japan Railway Co. Ltd
Kouji Saito, Japan Railway Track Consultants Co., Ltd

The discomfort level of noise inside bullet trains can be effectively reduced by reducing the sound pressure level 1 kHz or over. We measured this discomfort level in Series E5, where the interior materials to absorb sound in 1 kHz or over were installed. In this paper, we report the evaluation result the discomfort level of noise in E956 test bullet train with the sound-absorbing interior materials in order to apply to the commercial trains.

キーワード：鉄道車内騒音，騒音低減，音質評価，多孔質吸音材

(noise inside trains, noise reduction, sound quality evaluation, porous materials for sound absorption)

1. はじめに

鉄道車両の車内騒音における評価方法として公益財団法人鉄道総合技術研究所（以下、鉄道総研）において不快感推定式が提案された。先行研究で、この式を用いることにより新幹線の車内騒音は 1kHz 以上の音圧レベルを低減させることで効率的に不快感を下げられることが分かった。また、1kHz 以上の音を吸収する材料を E5 系新幹線電車（以下、E5 系）に仮設し、走行試験で車内騒音の不快感を低減できることを確認した。本研究では、営業列車への適用を見据えて E956 形新幹線高速試験電車（以下、E956 形）に吸音材を内蔵した内装材を仮設して車内騒音の不快感を評価した。

2. 不快感推定式

本研究では、鉄道総研にて提唱されている式(1)の鉄道車両の車内騒音の不快感推定式を用いて新幹線の車内騒音の不快感を評価した。この不快感は、人間の耳の構造や聴覚神経の働きを考慮し、多くの人間に聴覚実験を行った結果から導き出された音質指標（心理音響評価量）から求められる。この式に用いられる音質指標は、表 1 の通りとなる。

$$(\text{不快感}) = 0.1N + 1.7S + 2.1T - 1.4 \quad (1)$$

ここで、N はラウドネス、S はシャープネス、T はトーンリテティを表す。この式により求められる不快感の尺度は、1: まったく不快でない、2: それほど不快でない、3: やや不快、

4: だいぶ不快、5: 非常に不快、となる。

表 1 不快感の算出に用いる音質指標

項目	単位	指標の見方	説明
ラウドネス	sones	大：うるさい 小：静か	人間が知覚した音の大きさを示す。
シャープネス	acum	大：甲高い 小：低い	音の中の高調波成分（甲高き）を示す。
トーンリテティ	tu	大：澄んだ音 小：濁った音	音に含まれる純音性を示す。

先行研究で、E5 系が明かり区間（トンネル以外の区間）とトンネル区間を走行しているときの車内騒音を基準音とし、その 2 種類の基準音に対して 300Hz 以下と 1kHz 以上の音圧レベルをそれぞれ下げた音を 9 種類作成するとともに 15 秒ずつ被験者に提示し、前述の 5 段階の尺度で不快感を回答する実験を行った。この実験で被験者が回答した不快感の平均値と不快感推定式から算出した不快感との相関を求めた結果、相関係数は 1 に近い値となり、この式は新幹線車内騒音の不快感を評価することに適しているといえる。また、基準音に対して 1kHz 以上の音圧レベルのみを下げた音は、騒音レベルが大きく減少していなくても不快感を効率的に低減できることが分かった。これにより、1kHz 以上の音を吸収する多孔質の材料を新幹線車内に用いることで車両重量を大きく増加させることなく車内騒音の不快感を低減（快音化）できる見通しが立った。

3. 吸音材の選定

先行研究で、1kHz 以上の音圧レベルを下げることで、新幹線車内騒音の不快感を効率的に低減できることが分かり、その後の研究で 1kHz 以上の垂直吸音率が大きい材料を E5 系客室内に仮設し、不快感の低減効果を確認した。しかし、一部の材料で不燃性や耐溶融滴下性を有さないことが課題であった（鉄道車両の内装材に使用する材料は、日本鉄道車両機械技術協会の「鉄道車両用材料燃焼性試験」の不燃性の判定を取得する必要がある、さらに天井部に使用する材料は耐溶融滴下性を有する必要がある）。そこで、本研究ではこれらの性質を有しつつ、現行の新幹線で使用されている吸音材よりも 1kHz 以上の音に対して垂直吸音率が優れた材料を選定した（表 2）。また、表 2 で示した吸音材の垂直入射率を図 1 に示す。

表 2 本研究で選定した吸音材

製品名	メーカー	材質	厚さ [mm]	面密度 [kg/m ²]
吸音材 a	A 社	PP/PET 樹脂	45	1.04
吸音材 b	B 社	メラミンフォーム	50	0.80
吸音材 c	C 社	アルミニウム合金	2	3.04
吸音材 d	D 社	グラスウール	50	1.60

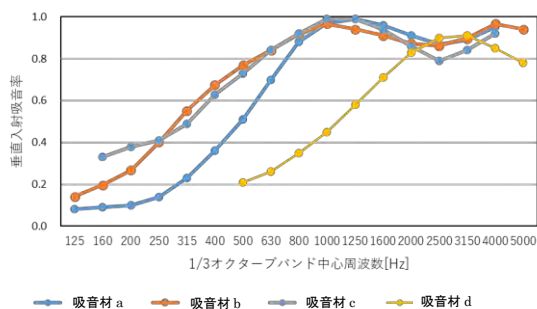


図 1 吸音材の垂直入射吸音率

4. 内装材の設計・製作

本研究では、営業列車への適用を見据え、吸音材を筐体に内蔵した構造の内装材の設計と製作を行い、E5 系と同等の内装構造となる E956 形 4 号車客室の上り側の座席 4 列分の空間に搭載した。図 2 に E956 形 4 号車客室の内装材の様子を示す。内装材を取り付けた部位は天井、側天井（天井の角 R 部）、荷棚下および内妻（客室内端部の壁）とした。

内装材は、内部に吸音材を搭載できる直方体の箱形状とし、原状復帰できるように既存の内装材へ丘付け可能な構造とした。内装材の客室側の表面の板（以下、表面板）は、客室内で反射した音を吸収することを目的に直径 3mm のパンチング穴を空けた形状とし、吸音と吸音材保護の両立を図った。また、内装材の表面板と筐体はねじ止めとし、簡単に吸音材および表面板を交換できる構造とした。筐体厚

さは一律 50mm とし、吸音材の厚さも 50mm 程度の寸法とした。ただし、吸音材 c は裏面に 50mm 程度の空気層を設けることで吸音効果を発揮するため、吸音材 c 使用時は、表面板を撤去して吸音材 c をそのまま筐体にねじ止めた。



図 2 E956 形 4 号車客室の内装材の様子

5. 走行試験における不快感の評価

〈5・1〉 概要

本研究では、走行試験における不快感の評価を 2 ステップに分けて実施した。まず、ステップ 1 として表 2 の吸音材を内蔵した内装材を 4 部位（天井、側天井、荷棚下、内妻）に取り付け、走行中の車内騒音測定により不快感を評価した。次に、ステップ 2 として不快感低減効果が最大となる内装材の組合せ条件で走行中の車内騒音を測定し、不快感を評価した。走行速度は 320km/h、340km/h、360km/h の 3 条件で、区間は明かりとトンネルの 2 条件でそれぞれ不快感を評価した。

走行試験における車内騒音の再現性を確認するため、振動加速度も併せて測定した。また、吸音材有無による不快感の低減効果を視覚的に確認するため、最も不快感の低減効果の確認できる吸音材なしの条件とステップ 2 の条件で音源分布を測定した。

〈5・2〉 測定条件

図 3 に E956 形 4 号車前位側客室の騒音測定点を、図 4 に 3 列腰掛断面の騒音測定点と振動測定点を示す。旅客が着座したときの耳位置における不快感低減効果の評価するため、腰掛頭頂部でも騒音測定を実施した。また、内妻の内装材による不快感低減効果を検証するため、腰掛頭頂部の騒音測定点は 1 と 3 列席 A~E 席を設定した。なお、騒音測定は、空気調和装置および放送装置を「切」とし、カーテンをすべて閉めた状態で行った。なお、連続換気装置は常時「入」とした。



図 3 E956 形 4 号車前位側客室の騒音測定点

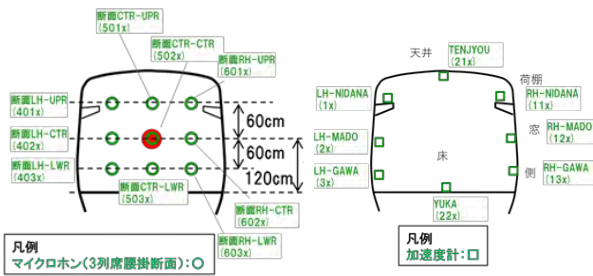


図 4 3 列席腰掛断面の騒音測定点と振動測定点

〈5・3〉 ステップ 1 での測定および結果

ステップ 1 における吸音材の組合せ条件は表 3 と通りとし、3 回の走行試験で車内騒音の測定を実施した。3 回の走行試験の振動加速度データを比較した結果、いずれも同様の振動特性を示し、ほぼ同じ振動が車両構体に入力されていることを確認した。これにより、3 回の走行試験における条件の違いは表 3 に示した吸音材のみとなり、結果を比較することで吸音材による不快感低減効果を評価できる。

表 3 吸音材の組合せ条件 (ステップ 1)

内装材部位	吸音材条件①	吸音材なし	吸音材条件②
天井	吸音材a	なし	吸音材b
側天井	吸音材a	なし	吸音材b
荷棚下	吸音材a	なし	吸音材c
内妻	吸音材c	なし	吸音材d

代表して図 5、図 6 にそれぞれ明かり区間とトンネル区間の 360km/h 下り走行時 1B 席および 3B 席の腰掛耳元の車内騒音の周波数分析結果を示す。吸音材なしと吸音材条件①ないし吸音材条件②を比較すると、各測定点で約 400Hz~10kHz の周波数領域で吸音材の吸音効果が確認できる。本研究で対象とする 1kHz 以上の周波数の騒音だけでなく、低い周波数領域においても吸音効果が得られた。

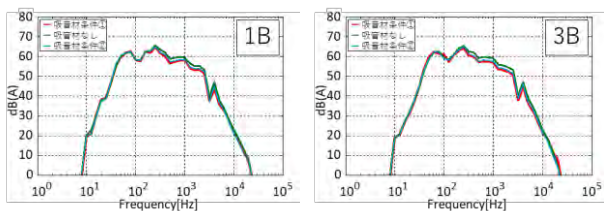


図 5 360km/h 下り走行時明かり区間の 1B 席および 3B 席腰掛耳元車内騒音周波数分析結果

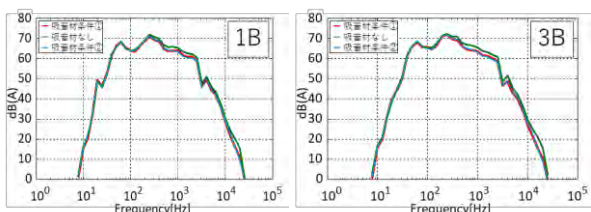


図 6 360km/h 下り走行時トンネル区間の 1B 席および 3B 席腰掛耳元車内騒音周波数分析結果

代表して図 7、図 8 にそれぞれ下り明かり区間とトンネル区間の 1B 席および 3B 席の腰掛耳元の不快感を示す。吸音材条件①ないし吸音材条件②と吸音材なしを比較すると、吸音材条件①および吸音材条件②ともに吸音材なしと比較して最大 0.3 程の不快感低減効果があることが分かる。

吸音材ごとの不快感低減効果の差として、明かり区間、トンネル区間ともに吸音材条件①および②に明確な差が認められなかった。この傾向は 1 列席および 3 列席においても同様で、内妻を含めた内装材各部位に仮設した吸音材による効果の差も認められなかった。そこで、表 4~表 7 のように不快感低減効果を面密度で除して単位面密度あたりの不快感低減効果を求め、吸音材ごとの有意差を確認した。

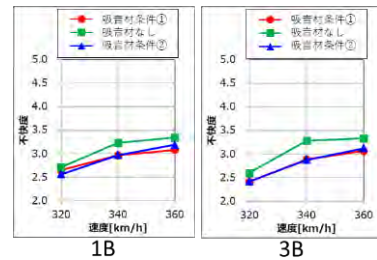


図 7 下り明かり区間 1B 席、3B 席腰掛耳元不快感

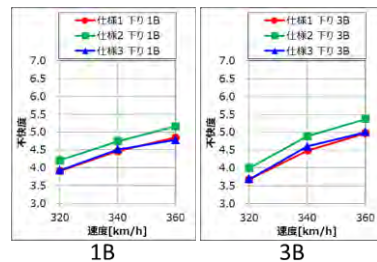


図 8 下りトンネル区間 1B 席、3B 席腰掛耳元不快感

表 4 吸音材判定表 (天井)

天井	面密度 [kg/m ²]	不快感低減効果	不快感低減効果/面密度
吸音材 a	1.04	-0.542	-0.521
吸音材 b	0.8	-0.556	-0.695

表 5 吸音材判定表 (側天井)

側天井	面密度 [kg/m ²]	不快感低減効果	不快感低減効果/面密度
吸音材 a	1.04	-0.426	-0.410
吸音材 b	0.8	-0.479	-0.599

表 6 吸音材判定表 (荷棚下)

荷棚下	面密度 [kg/m ²]	不快感低減効果	不快感低減効果/面密度
吸音材 a	5.04	-0.233	-0.046
吸音材 c	3.04	-0.289	-0.095

*吸音材 a の面密度はパンチングの表面板の面密度 4kg/m² を含む

表 7 吸音材判定表 (内妻)

内妻	面密度 [kg/m ²]	不快感低減効果	不快感低減効果/面密度
吸音材 c	3.04	-0.335	-0.110
吸音材 d	5.6	-0.378	-0.068

*吸音材 d の面密度はパンチングの表面板の面密度 4kg/m² を含む

〈5・4〉 ステップ 2 での測定および結果

ステップ 1 の結果から、ステップ 2 の吸音材の組合せ条件は表 8 の通りとし、1 回の走行試験で車内騒音の測定を実施した。ステップ 1 とステップ 2 の計 4 回の走行試験の振動加速度データを比較した結果、いずれも同様の振動特性を示し、ほぼ同じ振動が車両構体に入力されていることを確認した。これにより、吸音材なしと吸音材条件③の違いは吸音材のみとなり、結果を比較することで吸音材による不快感低減効果を評価できる。

表 8 吸音材の組合せ条件 (ステップ 2)

内装材部位	吸音材条件③
天井	吸音材b
側天井	吸音材b
荷棚下	吸音材b
内妻	吸音材c

代表して図 9、図 10 にそれぞれ下り明かり区間とトンネル区間の 1B 席および 3B 席の腰掛耳元の不快感を示す。吸音材条件③と吸音材なしを比較すると、吸音材条件①および吸音材条件②と同様に、吸音材なしと比較して最大で 0.3 ほど不快感低減効果があることがわかる。

しかしながら、吸音材なしと同程度の不快感である測定点も存在することが分かる。吸音材条件③の不快感が想定よりも低い点が存在する理由は、ステップ 1 から 3 か月程度離れた日程で試験を実施しており、走行条件や速度を可能な限り揃えても他の仮設等が異なり、これらが影響したと考えられる。

以上より、一部でステップ 1 と傾向が異なる測定点もあるが、多くの測定点で定性的に吸音材条件③も吸音材なしと比べて不快感低減効果があるといえるため、ステップ 2 で選定した吸音材条件でも不快感低減効果があることが明らかとなった。

また、音源分布測定を走行速度 320km/h、340km/h、360km/h で実施した。代表として、図 11、図 12 に 360km/h 明かり区間とトンネル区間上り走行時の騒音分布 (吸音材なしおよび吸音材条件③) を示す。明かり区間とトンネル区間ともに吸音材なしに比べ吸音材条件③の方が、車内騒音が小さいことが分かる。これは、320km/h および 340km/h でも同様の傾向を示し、吸音材を内蔵した内装材を設置する事で走行時の客室内における騒音を吸収できることが明らかとなった。

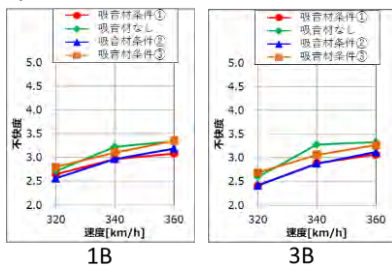


図 9 下り明かり区間 1B 席、3B 席腰掛耳元不快感

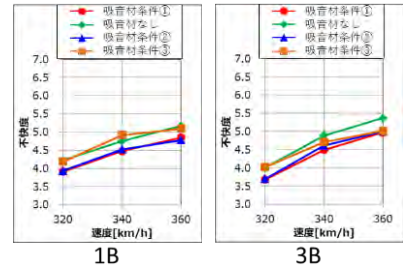


図 10 下りトンネル区間 1B 席、3B 席腰掛耳元不快感

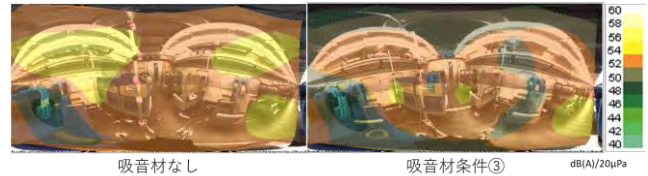


図 11 360km/h 明かり区間上り走行時の音源分布

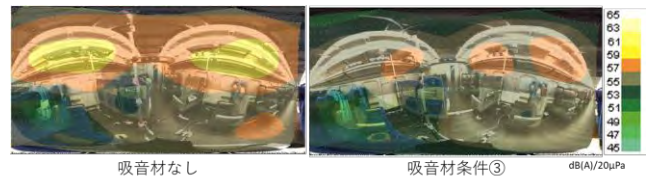


図 12 360km/h トンネル区間上り走行時の騒音分布

6. 結果

本研究では、吸音材を筐体で保護、内蔵した営業車で想定される構造の内装材の設計を行い、同時に新幹線車両の天井部に使用可能な不燃性を有する吸音材の選定を行い、E956 形に内装材を仮設して車内騒音測定を行うこと本研究の営業車への適用可能性を評価した。

その結果、現在の営業最高速度である 320km/h から、次世代新幹線が将来的に目指す営業最高速度である 360km/h までの速度域で一定の不快感低減効果が得られた。

今回製作した内装材は、吸音材を保護するために表面にパンチング穴を有する構造であり、吸音材を挟んで内装材が二層構造となるため、同様の構造を営業車に適用すると質量が増加することが課題である。また、パンチング穴を空けた内装材は、車内デザインとして意匠性の課題がある。

本研究により、先行研究と比較してより営業車に近い構造による内装材を用いても不快感低減に一定の成果があることが明らかとなったため、今後は上記のような営業車への課題を解決し、営業車への実用化を目指す。

文 献

(1) 岩宮眞一郎, 音質評価指標 —入門とその応用—, 日本音響学会誌, Vol.66, No.12, pp.603 (2010)