

# 車内音に対する不快感を調べる

安部 由布子

人間科学研究部(人間工学研究室 主任研究員)



あべ ゆふこ

## はじめに

鉄道や自動車、飛行機などの交通機関でどこかに移動するとき、みなさんはその間どのように過ごしていらっしゃるでしょうか。近頃では移動中の過ごし方や車内環境にも目が向けられ、鉄道の車内も単なる移動の場ではなく、より過ごしやすい、住環境にも匹敵するような、快適な場所にすることが求められています。車内の環境には、振動や温度、明るさなど人間が感じるすべての感覚に対応するさまざまな要素がありますが、ここでは耳に聞こえてくる車内の音を対象とし、「不快かどうか」という観点から調査した結果を紹介します。

音は、一言でいうと空気中の圧力の変化が波として伝わる物理現象です。音によってこの波の混じり合い方がさまざまなため、人間には違った音に聞こえます。波の振幅は音の大きさを、周波数は音の高さを特徴づけていて、耳から入った音が脳に伝わる時に振幅と周波数によって伝わり方が異なるので音を聞き分けることができます。

人間が聞くことのできる音の大きさは、正常な聴力を持った人にギリギリ聞こえる小さな音で $20\mu\text{Pa}$ 程度、これに対して耳が痛くなるくらい大きな音は $20\text{Pa}$ 程度とされています。同様に、人間が聞くことができる音の周波数はだいたい $20\text{Hz}$ から $20\text{kHz}$ の範囲です。音の大きさをあらわすには音圧レベル(単位dB)を用います。これは基準の音圧を $20\mu\text{Pa}$ とし、ある音の音圧が基準音圧に対する比をとり、対数であらわしたもので、音圧が $20\mu\text{Pa}$ のときには $0\text{dB}$ 、 $20\text{Pa}$ のとき $120\text{dB}$ となります。

## どんな音が不快なのか

まず音の大きさについて考えます。一般に、大きな音は不快になるだけではなく、大きすぎると難聴などの健康被害をおこす可能性があります。このため、音は小さければ小さいほど良く、騒音対策といえどとにかく音の大きさ、すなわち騒音レベルを下げれば良いとされてきました。鉄



図1 音に対する不快感

道の車内音でもさまざまな騒音対策がすすんだ結果、騒音レベルはある程度小さくなってきています。

一方、例えば過去に鉄道総研内のシミュレータを用いて、騒音と振動、映像をあわせた複合環境下での車内の快適性を調査した結果では、一般的な走行音に比べて走行と無関係と思われる音はより不快に感じられ、鉄橋を通過する映像と一緒に流した鉄橋の通過音など状況的にやむを得ないと思われる音に対する不快度は逆に低くなるという報告があります<sup>1)2)</sup>。このように、音に対する不快感や煩わしさはその大きさだけでなく、同時に感じる振動や視覚など他の感覚からの影響、その音の特徴や意味づけ(文脈)、音に対する慣れの有無、さらにはその環境全体に感じている「雰囲気」や「期待感」にも依存しています。ヘッドホンから漏れる音など、騒音レベルでは非常に小さい音でもそれが気になり始めると非常に「うるさい」と感じたり、逆に非常に大きなレベルの音でもコンサートやライブなどではそれが気になる音とは感じないのもこれと同様です(図1)。

## 音質での評価

人間の耳は音の大きさ(音圧レベル)と高さ(周波数)によって感度が異なっています。ある周波数の純音(その周波数だけで大きさも変わらない音)を聞かせたときに人間が聞くことができる最も小さい音の大きさを最小可聴レベ

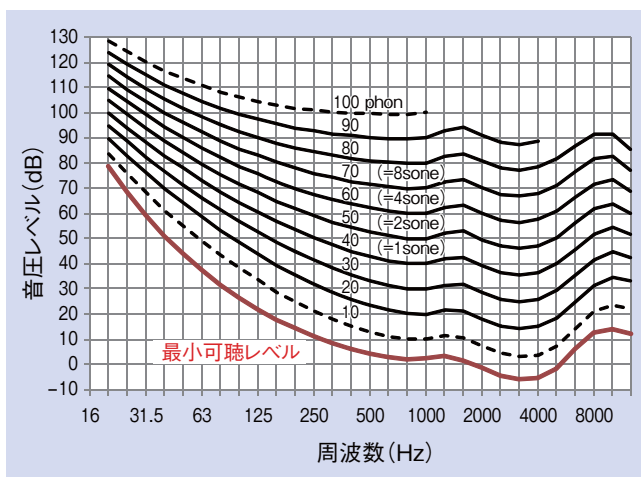


図2 音の等ラウドネス曲線と最小可聴レベル (ISO226:2003)<sup>3)</sup>

ルといいますが、これを周波数ごとに示すと図2の赤線のようになります。このうちもっとも聞こえやすい(感度が低い)のはもっとも小さな音圧レベルでも聞くことのできる周波数が3~4kHz付近の音であり、これよりも高い(周波数が大きい)音や低い(周波数が小さい)音は聞こえにくくなる(感度が低い)ことを示しています。また、図2の黒点線や黒実線は、それぞれの周波数の純音が1kHzの純音と比べて人間が聞いて同じ大きさであると感じるレベルを結んだもので、これを「等ラウドネス曲線」といいます<sup>3)</sup>。ラウドネスレベルは1kHzの純音の音圧レベルの数値で表し単位はphonを用います。全体的に、低い音に対する感度が低いこと、また、音が大きくなるにつれて隣り合う黒実線の間隔が狭くなっていることから、周波数による感度の差が小さくなっていることがわかります。

実際の環境で私たちが耳で聞いている音は周波数や大きさがただ一つに決まる純音だけではなく、さまざまな周波数と大きさの波の重ね合わせです。この混じり合い方が異なることによって音に対する印象も異なります。このような人間が感じる音に対する印象の違いを音の質(高低などの周波数分布の特徴や、変動成分)の違いとして数値であらわすことができるように考えられた指標が「音質指標」と呼ばれるものです。音質指標には表1で示すようなものがあります<sup>4)</sup>。

近年、音を大きさだけではなく音質指標によって評価することで、人間の受ける印象を重視し、レベルが小さくても不快と感じる音を取り除き、快適な音環境を作る試みがいろいろな分野で実施されています。このような音質による音の評価を「音質評価手法」といいます。

表1に示した音質指標のなかでもっともスタンダードなものが「ラウドネス」です。これは図2に示したような周波数毎に人間が同じ大きさに聞こえる等ラウドネス曲線を考慮して計算される量で、人間が耳で聞いて感じる音

表1 音質指標の例<sup>4)</sup>

指標名	単位	内容
ラウドネス	sone	人間の耳に聞こえる「うるささ」
シャープネス	acum	音の甲高さ。周波数分析をした結果、重心が高周波域にどのくらい偏っているかを示す量
トーンリティ	tu	純音感。音の成分中に、純音が含まれている割合
ラフネス	asper	音の粗さ感。ラウドネスが比較的短い変調周期(70Hz)で変動する音が最も大きい。
変動強度	vacil	音の変動感。ラウドネスが比較的長い変調周期(4Hz)で変動する音が最も大きい。
騒音レベル	dB (A)	A特性(40phonの等ラウドネス曲線を元にした聴感)で補正した音の大きさ

の「うるささ」の大小を示しています。ラウドネスは1kHz、40dB(40phon)の音を1(単位:sone)と定義し、うるささを倍に感じるごとにラウドネスの値が倍となるように定義されています。音に対する不快感はまずその音が「うるさい」と感じるかという点に強く依存していると考えられます。このため、不快感を評価する最も基本的な指標はラウドネスであるといえます。

通常、音の評価を行う場合には騒音計を用いて音の大きさを計測します。普通の騒音計に用いられているA特性とよばれる聴感補正回路は、図2に示した40phonの等ラウドネス曲線に近似した曲線をもとに作られています。したがって、音の大きさの違いによる等感曲線の差は騒音レベルでは考慮されていません。このため、ラウドネスと騒音レベルはどちらも耳に聞こえる音の大きさを表す量ですが、単純な比例関係にはありません。

### 鉄道の車内音に対する主観評価実験

音質評価手法を鉄道の車内音にも適用し、車内音に対する印象を代表的な音質指標によって示すことを試みました。鉄道の車内で聞こえてくる音にはさまざまな種類がありますが、ここでは主に新幹線電車を対象として、実際の走行中あるいは停車中の車内において収録した音を実験室で再生し、それを聞いた被験者にその音に対する印象(「うるささ」の程度や「不快感」の強さなど)を回答してもらう主観評価実験を行いました。得られた主観評価の平均値と、音質指標の値とを比較することにより、音に対する主観量を音質指標の組み合わせで表します。これにより、「騒音レベル」など音の大きさだけの評価とはあまり一致しなかった「不快感」にも合致した評価を行うことができると期待できます。

評価の対象とした音は実際の新幹線の車内で収録した音のほか、比較のために車内音に似せて機械的に作成した音や

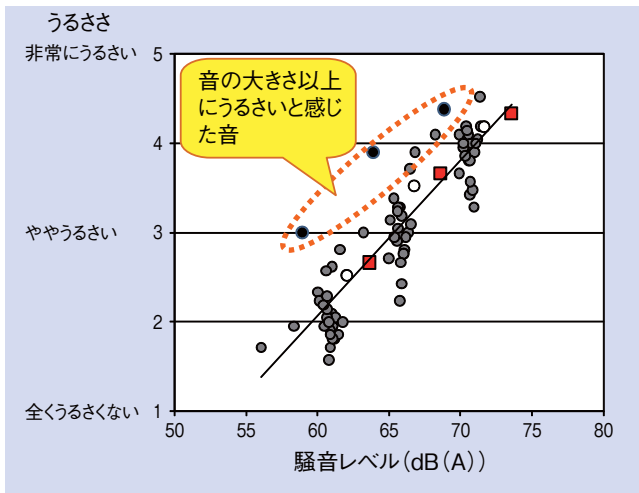


図3 うるささの評価点と騒音レベルとの関係

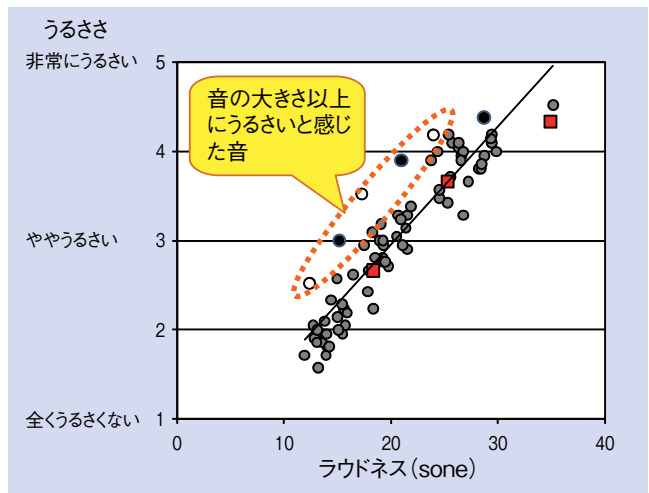


図4 うるささの評価点とラウドネスとの関係

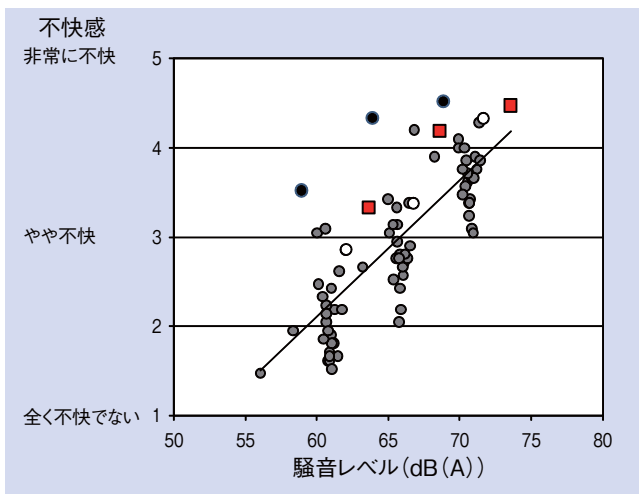


図5 不快感評価点と騒音レベルとの関係

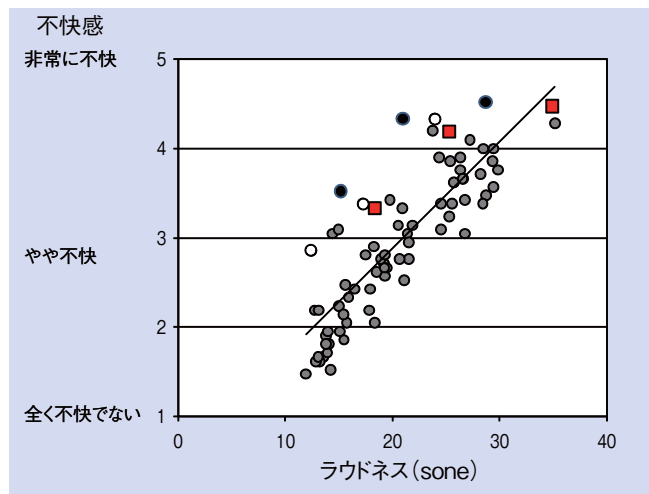


図6 不快感評価点とラウドネスとの関係

ノイズを加えて、全部で26種類としました。このとき、騒音レベルが同じでも不快感が違ってくるかを調べるため、耳の位置での騒音レベルがなるべく同じ大きさになるように調整してから、それぞれの音を60dB、65dB、70dBの3段階の大きさでスピーカーから再生しました。被験者にはその音を聞いて感じた「うるささ」「不快感」などについての印象を5段階評価でアンケート用紙により回答してもらいました。

この結果得られた主観の評価点と音質指標との関係のうち、まず「うるささ」の主観評価点と騒音レベルとの関係を図3に示します。図中の直線は騒音レベルから得られる「うるささ」の近似式を示していますが、全体的にこの直線からのばらつきはあまり大きくなく、音をうるさいと感じるかどうかとその音の騒音レベルとの相関は十分に高いことがわかりました。さらに「うるささ」とラウドネスの関係を調べると図4に示した結果が得られ、ラウドネスのほうが騒音レベルよりもさらに「うるささ」との相関が高く、人間が音の大きさに対して感じる印象をより忠実に示

していることが確かめられました。これらの結果から、人間が車内の音に対して感じる「うるささ」はその音の大きさであらわすことができると考えられます。

ただし、図3や図4で点線で囲った音は近似式からのずれが大きく、音の大きさから推定できる以上にうるささを強く感じている音です。図に●で示した音は機械的に作成した雑音ノイズ、○で示した音はジージーという音が際立って聞こえる機械の音でした。どちらも鉄道の車内の音としてはあまり聞かないタイプの音だったため、被験者にとっては単に耳に感じる大きさだけではなく車内騒音としての違和感を感じて「気になる」「わずらわしい」という意味を含めて「うるさい」と評価することになったのではないかと考えられます。

次に、「不快感」についての主観評価点と騒音レベルおよびラウドネスとの関係を図5と図6に示します。図中の直線は図3と図4と同様に騒音レベルまたはラウドネスから推定される不快感の近似式を示しています。「うるささ」

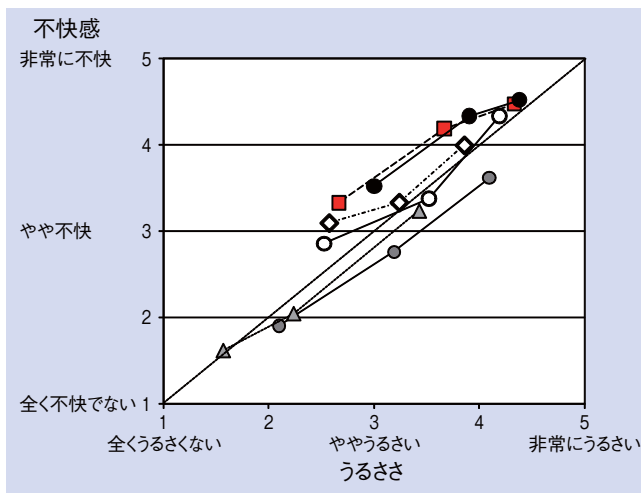


図7 “うるささ”と“不快感”の関係

と傾向は似ていますが、全体的に近似式からのばらつきが大きく、音に対する「不快感」はその音の大きさだけではなく、音の種類によっては「不快感」を強く感じるものがあったことがわかります。例えば、図に■で示した何かギリギリと鳴っているような音は、「うるさい」と感じるよりも強く「不快感」を感じる音であったと思われます。

この実験を行うまでは、音に対して「不快感」を感じるかどうかは「うるさい」と感じることと同じではないかと考えていましたが、このように「うるささ」と「不快感」ではやや結果が異なりました。図7に、今回の評価対象音のうち数種類の音について横軸に「うるささ」の評価点、縦軸に「不快感」の評価点をとったものを示します。この図の対角線よりも上に位置するのは「うるささ」よりも「不快感」を強く感じている音であり、●や■で示した音はこれに該当します。

### 不快感に合致する車内音の評価式

より快適な車内空間を実現するためには、その音が不快かどうかという観点からの検討が必要となります。しかし、音に対する不快感、騒音レベルやラウドネスといった音の大きさだけではなく一致しないことが今回の実験結果からも確かめられました。

音に対する不快感、先に述べたように人間の心理状態や好み、またその音に対するイメージや意味づけなど、物理量では表せないものにも依存しますが、これらは個人差も大きいので、ここでは表1に示した人間が感じる音の印象の違いを示す音質指標を組み合わせて、鉄道の車内の音に対して人間が感じる不快感に合致した指標を提案することを試みました。

統計ソフトウェアを用いて検討した結果、表1のうちラウドネス、シャープネス、トーンリティ、変動強度の4つの音質指標を用いることにより「不快感」ともっとも相関

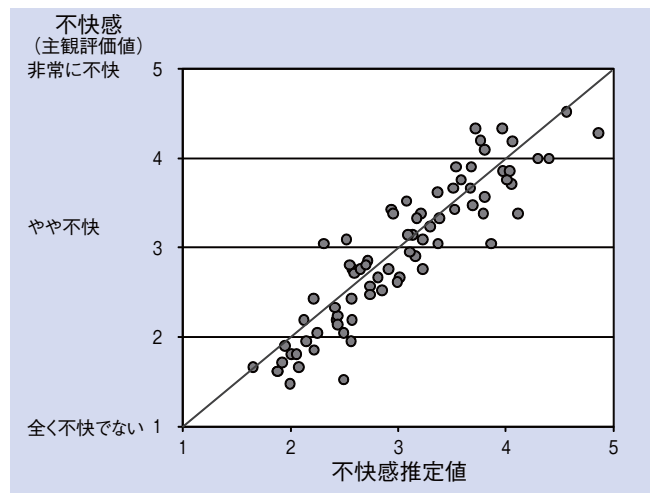


図8 不快感の推定値と主観評価実験結果との相関

の高い多重回帰式が得られました。この多重回帰式を用いて計算した「不快感」の推定値と、主観評価実験での回答による「不快感」の評価値との相関を図8に示します。ばらつきが少なくほぼ対角線上に分布しており、実際に感じる「不快感」をうまく推定できる式となっていると言えます。

### より快適な車内環境にむけて(おわりに)

これまでの音の対策は、騒音レベルを用いてその大きさをあらわし、これをなるべく小さくしていく方法が主流でした。鉄道の車内音に対しても、まずは「大きさ(レベル)」を低減し乗客にとって「うるさい」と感じる音を少なくしていくことが重要です。しかし、今後さらに快適な車内環境を実現するためには、騒音レベルの大きさによらず感じる「不快感」を低減させることも必要と考えられます。このためには、今回示したように周波数別の聞こえ方の違いや変動成分などの音質の観点からも音を評価することが参考になります。このような手法を用いることで、同じ大きさであっても不快感が異なるような音を見つけだすこと、さらにはこのような音に対してより効果的な対策を行うことができるかと期待されます。RRR

### 文献

- 1) 鈴木浩明, 白戸宏明, 中川千鶴: 車内の振動・騒音が快適性評価に及ぼす影響, 人間工学第40巻特別号(日本人間工学会第45回大会講演論文抄録集), pp.538-539, 2004
- 2) 鈴木浩明, 白戸宏明, 中川千鶴, 斎藤綾乃, 大野央人: 車内快適性シミュレータの活用と評価, 鉄道総研報告, Vol.20, No.3, pp.47-50, 2006
- 3) International Standard ISO 226: 2003(E) Acoustics - Normal equal-loudness-level contours
- 4) 小野測器 Oscope ver.2 マニュアル OS-0271 ユーザーズガイド
- 5) 心理音響学, Eberhard Zwicker, 山田由紀子訳, 西村書店
- 6) 聴覚心理学概論, Brian C.J. Moore, 大串健吾監訳, 誠信書房