

人間の不快感と相関の高い車内騒音の評価手法

安部 由布子* 水上 直樹**

**Evaluation Method of Noise inside Railway Vehicles
Closely Related with Unpleasant Feelings of Human**

Yufuko ABE Naoki MIZUKAMI

The unpleasant feelings of some noise for human beings are depending not only on the sound level, but also on the “sound quality”. However, noise inside railway vehicles has been evaluated up to now only by the noise level. So, we carried out a subjective evaluation experiment with focus on the unpleasant feelings of human, and based on the result, we suggest a new evaluation method in which the unpleasantness of human feelings is presented by sound quality indices (loudness, sharpness, tonality, roughness, etc.).

キーワード：車内騒音，音質評価，快適性，不快感，主観評価，人間工学

1. はじめに

一般に、騒音を評価する場合にはその大きさを示す指標である“騒音レベル”や“音圧レベル”が用いられる。鉄道の車内騒音においても同様であり、車内の音環境を評価する場合には“騒音レベル”の時間平均値やピーク値が用いられている。しかしながら、近年では各種の騒音対策が進み、車内の騒音レベルが低減された結果、レベルは小さいにも関わらず、乗客にとって気になる音や不快に感じる音の存在が無視できなくなってきた。

自動車の車内騒音に関しては、その居住環境の向上のためにこのような“人間にとって不快な音”を除去し、心地よい音をつくるための技術、いわゆる音質を考慮した技術開発がなされている¹⁾が、鉄道の車内騒音においては、これまでは騒音対策というとそのレベルを低減することが第一で、快適な音環境についての取り組みはいわば後回しにされてきた。しかし今後、鉄道の車内騒音に関しても車内の快適性が利用者から重視され、“音環境デザイン”という視点からの取り組みが必要となることは想像に難くない。このためには現状の車内騒音に対し、その大きさだけではなく音の質的な側面（音質）から人間の感じる“不快感”を考慮した評価を行う必要がある。この取り組みとして、筆者らは、まず新幹線電車を対象とし、実際の営業車内において収録した音を用いて、被験者がその音に対する印象（“うるささ”の程度や“不快感”の強さ）を回答する主観評価実験を実験室（防音室）内で実施し、得られた主観評価平均値と既存の

音質評価指標値とを比較した。

この結果、いくつかの音質評価指標を組み合わせた重回帰式により、“騒音レベル”単独よりも“不快感”に合致した評価を行うことができることを示した。

2. 音に対する不快感と音質評価指標

2.1 音に対する不快感の要因

これまでに車内の騒音に対する乗客の不快感についての調査を行った例として、騒音に限らず振動、温度、照明等の34項目を対象に車内の快適性に関わるアンケート調査を実施し、心理量（満足度）と30分間実測した物理量とを比較した研究がある²⁾。この研究結果では、車内騒音のうち車両走行音については50%の時間率騒音レベル（ L_{50} ）が心理量との対応がよい物理量であった。

また、別の研究報告^{3), 4)}では、鉄道総研内の車内快適性シミュレータを用いて、騒音と振動、映像の複合環境下での快適性を調査した結果、騒音に対する不快感は振動や視覚情報のほか音の特徴や“文脈”（意味づけ）にも依存しており、特に後者について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、逆に映像のある橋梁通過時の音のように現象が一時的であって被験者にとってやむを得ないとみなされる音に対する不快感は低くなる、とされている。

ある音に対する“快・不快”、“わずらわしさ”といった主観評価は、必ずしも音の大きさにだけによらず、振動や視覚の影響、前述した“文脈”や音に対する慣れや期待感にも依存していることがわかっている。

* 人間科学研究部（人間工学）

** 前 人間科学研究部（人間工学）

特集：ヒューマンファクター

2.2 音質評価

騒音の性質（高低などの周波数分布の特徴や、変動成分）の音質指標値によって騒音を評価し、レベルは小さくとも不快な騒音を除去して利用者にとって快適な音環境を作る試みが、近年主に自動車の車内音や家電、OA機器などの分野で数多く実施されており、『音質評価』とよばれている^{1)・5)}。鉄道の車内騒音についてもこの『音質評価』を適用し、より乗客の不快感に合致した評価手法となるよう多重回帰式を検討した。

ただし、『音質評価』においてどの指標値が人間の主観評価とうまく合致するかは、それがどのような感覚（“うるささ”か“不快感”か）であるかに依存するのはもちろんのこと、評価対象とする音の種類や聴取している環境、評価者の状況によっても異なる。このため、すべての音に対してそれを聞くすべての人間の主観評価と高い相関をもつような、普遍的な評価式といえるものはない。主観評価との相関分析により得られた多重回帰式は、あくまで、特定の設定状況下においての評価に合致したものであることに注意が必要である。

音質評価指標としては、音の大きさのほか、音の甲高さや粗さなどを表す指標などさまざまなものがある。なかでも、もっともよく知られているものは音の大きさや強さに対する人間の感覚を示す“ラウドネス（単位：sone）”や“ラウドネスレベル（単位：phon）”である。ラウドネスは人間が耳で聞いて感じる“うるささ”を示す指標である。音に対する不快感はずは『その音が“うるさい”かどうか』という感覚に強く依存しており、不快感の評価する最も基本的な指標はラウドネスであると考えられる。なお、一般に騒音の評価に用いられている騒音レベル（単位：dB(A)）は、ラウドネスが中程度（40phon = 1sone）での等感曲線に基づいた聴覚補正曲線を用いて算出したものである。

音質評価指標にはラウドネスの他にも様々なものがある^{6)～8)}が、今回、評価手法の検討に用いたのは、ラウドネスと次の4つの評価指標値である。

- ・シャープネス（単位：acum）：
音の甲高さ。周波数分析した結果の重心が高域に偏る割合で示される。
- ・トーンリティ（単位：tu）：
音の成分に純音が含まれている割合。純音感ともいふ。
- ・ラフネス（単位：asper）：
音の粗さ感。ラウドネスが比較的短い変調周期（70Hz）で変動する場合に最も大きい。
- ・変動強度（単位：vacil）：
音の変動感。ラウドネスが長い変調周期（4Hz）で変動する場合に最も大きい。

3. 被験者による主観評価実験

3.1 実験概要

鉄道の車内音に対して乗客が感じる不快感について、鉄道総研内の音響実験室（防音室）において主観評価実験を実施した。実験においては、実際に新幹線の車内で収録した音をスピーカーから再生し、被験者にはその音を聞いた印象をアンケート用紙により回答させた。

被験者は男女21名（男性16名、女性5名、年齢25～54歳、平均年齢39.3歳）であり、1回の実験において1名ずつ主観評価を実施した。被験者は全員新幹線の利用経験があり、これまで聴覚に異常を指摘された者はいない。

スピーカーは防音室内に被験者から見て前方左右に被験者に向けて設置しスピーカーの振動面から被験者の座る椅子までの距離は水平にそれぞれ約1mとした。実験時の室内配置および音響機材の接続概要を図1に、実験風景を図2に示す。音質は再生するスピーカーや部屋自体の特性に大きく影響されるため、オーディオキャプチャーとデジタルアンプとの間にデジタルイコライザー（Accuphase社製、DG-48）を入れ、なるべく原音に近く平坦な再生特性となるように調整した。

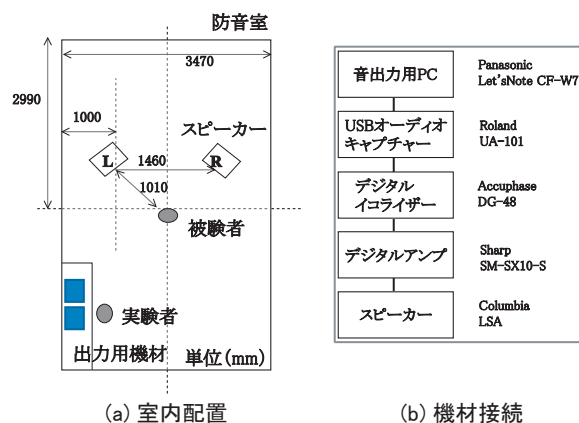


図1 主観評価実験概要

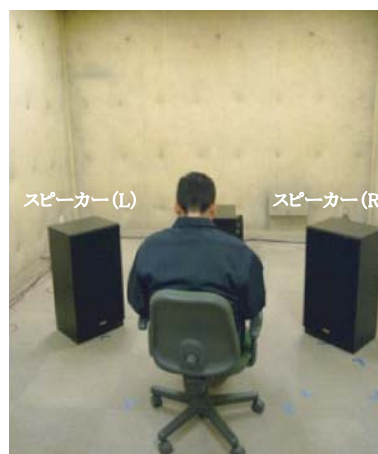


図2 実験風景

3.1.1 評価対象音

評価対象とした音は実際に3形式の新幹線電車の車内で収録したほか、比較のために別途作成した音やノイズを加えて、表1に示す26種類の音とした。

表1 評価対象音一覧

No	車両形式, 音種類		内容 (収録条件)
1	A	定常走行音	明かり区間 (惰行)
2	"	"	明かり区間 (力行) / 空調非作動
3	"	"	明かり区間 (力行) / 空調作動
4	"	"	トンネル走行音
5	A	停車時機器音	条件1 (空調非作動)
6	"	"	条件2 (連続換気装置(連換)のみ)
7	"	"	条件3 (空調のみ (強制))
8	"	"	条件4 (連換+空調 (強制))
9	"	"	条件5 (空調のみ (自動))
10	"	"	条件6 (連換+空調 (自動))
11	B	定常走行音	明かり区間(惰行)
12	"	"	トンネル区間(惰行)
13	B	停車時機器音	条件1 (空調非作動)
14	"	"	条件2 (空調連換作動, 主回路入)
15	"	"	条件3 (空調連換作動, 主回路切)
16	"	"	条件4 (連換のみ作動)
17	"	"	条件5 (空調のみ作動)
18	"	"	条件6 (排気装置のみ作動)
19	C	定常走行音	明かり区間
20	"	"	トンネル区間
21	C	停車時機器音	停車中の車内音のみ
22	A	がたつき音	実車で収録された部材の異音
23	-	ノイズ	ピンクノイズ
24	-	"	A形式の車内音に似せたノイズ
25	-	"	C形式の車内音に似せたノイズ
26	-	走行音+会話音	A形式走行音+会話音

No.1～22までは、実際に車内で収録された車内音である。車内音の収録に際しては車両内中央付近の通路、床からの高さ1.2mにマイクロホンを設置し、走行中の音に加え、停車中の車両搭載機器音(主に空調音)も収録した。定常走行音については、各車種とも最高速度程度ではほぼ等速走行している間の車内音であり、明かり区間とトンネル区間それぞれの音をサンプルとして切り出し、車両形式Aについては力行/惰行の走行条件別にも分類した。停車時機器音(空調音)については、空調の設定パターンを変えると音色が変わるため、各パターンの収録を行った。No.23に示した“ピンクノイズ”とは、オクターブバンドなど定比幅の周波数分析において全バンドのパワーレベルが等しいノイズ音のことである。また、No.24とNo.25のノイズは、ピンクノイズにフィルター処理をし、各形式の車内音の周波数特性に似せたもの、No.26の車内音+会話とは、No.1の走行音に市販効果音CDから雑踏の会話音を合成した音である。

主観評価の対象とする音の出力継続時間は、各15秒間とした。車内音については、同条件での音から、音の

特徴に大きな変化がない部分を15秒間切り出した。他の雑音が入るなどして15秒に満たない場合は安定した部分を繰り返して15秒間再生した。

再生音の大きさ(騒音レベル)は、実際の新幹線車内での騒音レベルを参考に、被験者の耳の位置で約60, 65, 70dB(A)となるように揃えた。したがって、評価対象音は全部で78種類である。主観評価実験ではこれらをランダムな順序で再生した。

比較対象とする音質評価指標値は、主観評価実験の際の被験者の耳の位置(椅子の中心から0.1m後方で床上1.2m高さ)に普通騒音計(RION NL-04)のマイクロホンを設置して音を収録し、これを分析処理することによって得た。各評価値は、再生音の最初と最後を除いた10秒間の平均値とした。

3.1.2 評価対象とする主観軸

主観評価は評価対象音に対してのアンケート回答の形式をとり、他との比較ではなく、あくまでもその音に対する第一印象を答えるものとした。なお、被験者には、評価対象は「新幹線の車内騒音」であると説明しており、15秒間経過しなくても、音に対する主観評価が定まったところで回答票の当てはまる数値に○を記入するように説明した。評価は、“うるささ”については「1. 全くうるさくない」から「5. 非常にうるさい」の5段階、“不快感”についても「1. 全く不快でない」から「5. 非常に不快」の5段階で行うこととした。

次節以降“うるささ”と“不快感”についての主観評価の結果と各音質評価指標との関係を示す。

3.2 主観評価結果

評価対象音について得られた各主観評価点について全回答者の平均値を算出し、別途算出した音質評価指標値との相関を分析した。

“うるささ”、“不快感”の各主観評価点と音質評価指標値との相関をとった結果を表2に示す。なお、表には相関係数の2乗(決定係数R²に相当)を記載した。

表2より、“うるささ”についての主観評価点は、騒音レベルとの相関が高い(R²=0.79)ことが確かめられた。

表2 主観評価と音質評価指標値との相関 (R²値)

音質評価指標値	主観評価	
	うるささ	不快感
騒音レベル	0.79	0.61
音圧レベル	0.32	0.18
ラウドネス	0.85	0.71
シャープネス	0.02	0.07
トーンナリティ	0.01	0.02
ラフネス	0.12	0.19
変動強度	0.11	0.13

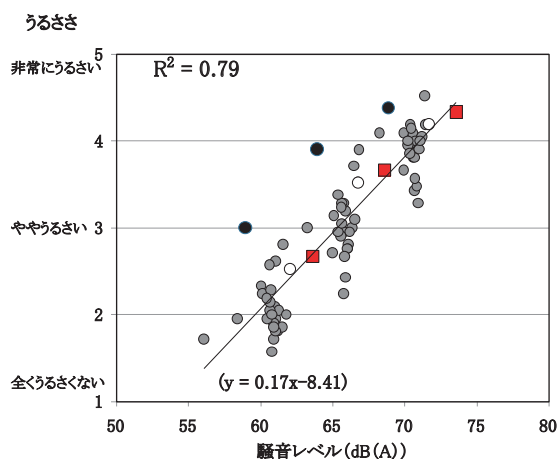
特集：ヒューマンファクター

他の指標値との相関をみると、ラウドネスとの相関が最も高い ($R^2=0.85$) が、騒音レベルとの相関も十分高い値である。つまり人間が“うるさい”と感じるかどうかはその音の大きさに依存しており、“うるささ”を評価する場合には現在用いられている騒音レベルで十分であると考えられる。

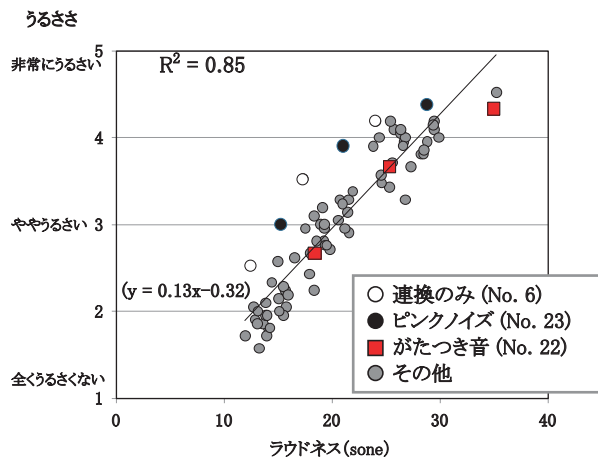
これに対して“不快感”についての主観評価点は騒音レベルとの相関は“うるささ”と比べて比較的低く ($R^2=0.61$)，“不快感”を評価するためには騒音レベルだけでは不十分であることがわかった。

3.2.1 うるささとの相関

図3に全評価音に対する“うるささ”の主観評価点平均値と(a)騒音レベル、(b)ラウドネスとの相関を示す。図3(b)から2種の音に関する“うるささ”の主観評価点がラウドネスとの回帰直線から上方に大きくはずれていることがわかる。このうち1種はピンクノイズ(凡例●、表1のNo.23)、もう1種は、連続換気装置(以下連続という)のみが作動している場合の空調音条件2(凡例○、表1のNo.6)に対する評価点である。前者は鉄道の車内



(a) 騒音レベルとの相関



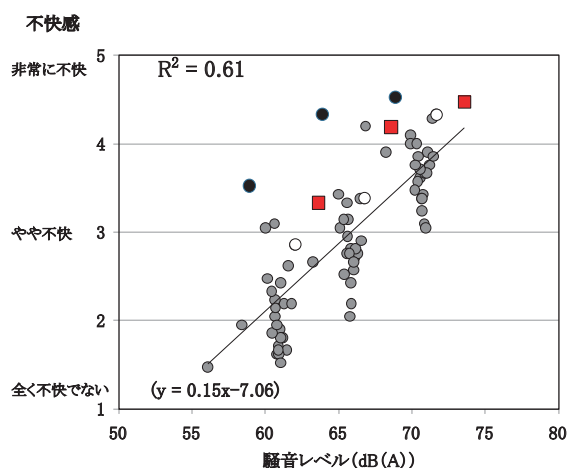
(b) ラウドネスとの相関

図3 “うるささ”と音質指標値との相関

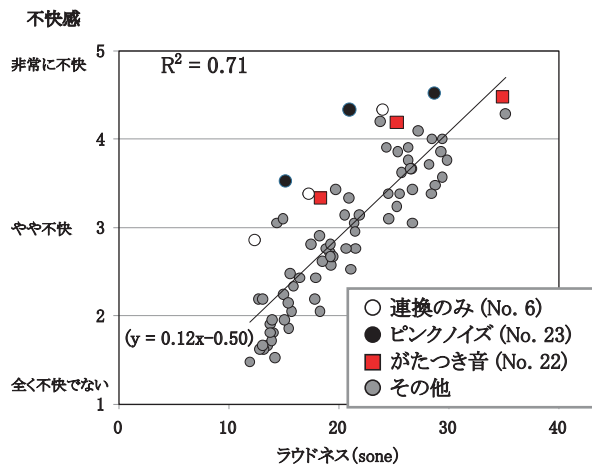
において自然には発生しない音であるため、明らかに他の音とは異質な音であった。また後者は100Hz付近に目立った純音成分を持つ音であった。したがって、この2種類の音に関しては単に耳に感じる大きさだけではなく、車内音として違和感があり「煩わしい」という意味も含めて“うるささ”を判断していたと考えられる。

3.2.2 不快感との相関

“不快感”については、もっとも相関が高い音質評価指標値はラウドネス ($R^2=0.71$) であり、次に相関が高いのが騒音レベル ($R^2=0.61$) であった。図4に“不快感”に対する主観評価点平均値と(a)騒音レベルおよび(b)ラウドネスとの相関を示す。図4(a)から、騒音レベルが同程度であっても、音の種類によって“不快感”には大きく差があることが確かめられた。また、図4(b)から、“不快感”とラウドネスの相関において回帰直線からのずれが最も大きいのは“うるささ”と同様にピンクノイズ(●)と連続のみ作動時の空調音(○)であること、さらに他の音に比べてがたつき音(凡例■、表1のNo.22)に対して“不快感”が増していることがわかる。つまり、音



(a) 騒音レベルとの相関



(b) ラウドネスとの相関

図4 “不快感”と音質指標値との相関(その1)

に対する不快感は単純にその音が耳に聞こえる大きさ（騒音レベルやラウドネス）だけにはよらず、他に要因があると考えられる。これは前述した「車内音としての違和感」や、音質の違いであると考えられる。

3.2.3 主観評価項目間の相関

図5に、代表的な6種類の音について“うるささ”と“不快感”の主観評価点平均値どうしの相関を示す。連換のみの音（凡例○）や走行音に会話を合成した音（惰行走行音+会話、凡例◇）は“うるささ”よりもやや“不快感”を強く感じており、がたつき音（凡例■）やピンクノイズ（凡例●）ではさらに不快感が強くなっている。これに対して惰行走行音（凡例●）や空調（強制モード）（凡例△）など、通常車内騒音といえるものは“うるささ”は感じるが“不快感”はそれほど強くないと言える。以上から、音について感じる“うるささ”と“不快感”はその音の種類や特徴、すなわち音質によって異なる傾向を示していることがわかる。

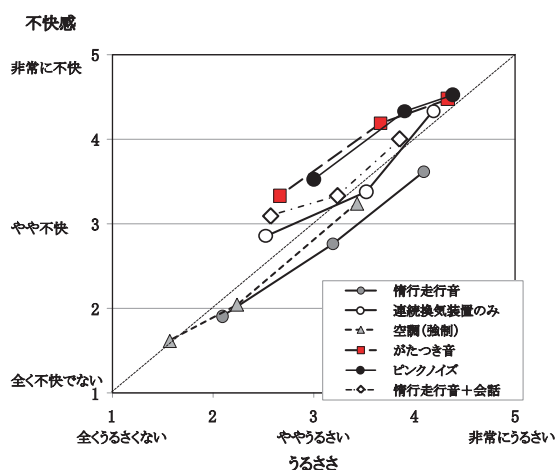


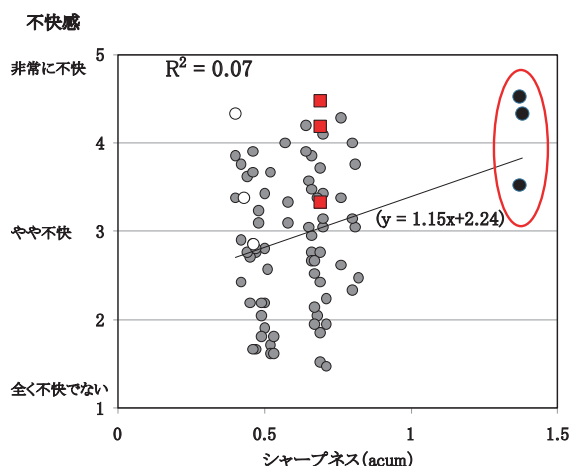
図5 “うるささ”と“不快感”の相関

3.3 不快感に合致した車内音の評価手法の提案

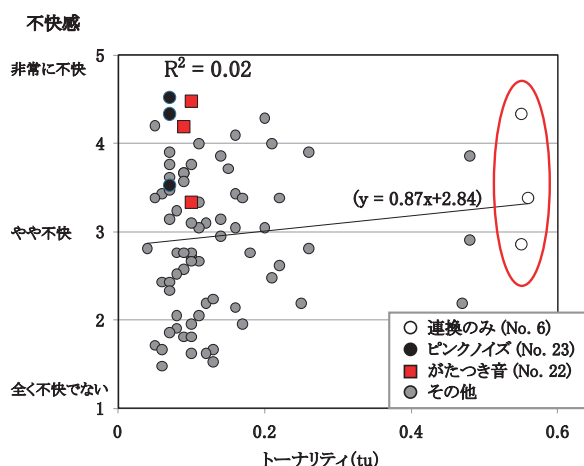
車内騒音について評価するとき、これまででは“うるさいかどうか”の観点から騒音レベルでの評価が行われてきたが、今後、さらに一歩進み“不快かどうか”という観点で評価するには、騒音レベルだけでは不十分であることがわかった。音に対する“不快感”をもたらすものは、音に対する慣れ、期待値など心理的なもの、音の時間的な変化に対する驚き、違和感などのさまざまな要因があるが、ここではその音質に着目し、音質評価指標を用いることで、より人間の感覚に合った評価と考えた。このため、より人間が感じる不快感の大小に合致した評価指標として音質評価指標を用いた多重回帰式を提案した。音に対する“不快感”には慣れや時間変化要因もあると考えられるが、本手法ではあくまでも音の物理的な性質の違いによる要因を検討した。

図6に他の音質評価指標との相関を検討した例として“不快感”の主観評価点平均値と(a)シャープネスおよび

(b) トーナリティとの相関を示す。図6(a)から不快感の高かった音のうちピンクノイズはシャープネス値が他より高く、図6(b)から連換のみの空調音はトーナリティ値が他より高いことがわかる。これらの指標値は騒音レベルの大きさにはよらず、他の音と差別化できると考えられる。



(a) シャープネスとの相関



(b) トーナリティとの相関

図6 “不快感”と音質指標値との相関（その2）

以上のように、車内音に対して感じる不快感については、耳に聞こえている大きさ（騒音レベルやラウドネス）は同程度でも音質に差があることで不快感にも差が生じる。このため、より人間が感じる不快感に合致した評価指標として、音質評価指標を複数導入し、これらの組み合わせによる多重回帰式を提案する。

具体的には、重回帰分析のステップワイズ法を用いて表2で示した7種の変数から相互に相関の高いものを除き、ラウドネス、シャープネス、トーナリティ、ラフネス、変動強度の5変数を説明変数とし、不快感に対する主観評価平均値を従属変数としたときの最適組み合わせを検討した。この結果、ラフネスを除く4変数により、“不快感”ともっとも相関の高い多重回帰式（式(1)）が得ら

特集：ヒューマンファクター

れた。ただし、各変数は実測値であり、正規化はしていない。

$$\text{不快感推定値} = \alpha \times \text{ラウドネス} + \beta \times \text{シャープネス} + \gamma \times \text{トーンリティ} + \delta \times \text{変動強度} + \varepsilon \quad \dots (1)$$

式(1)を用いた不快感推定値の計算結果を横軸に、被験者実験で得られた主観評価点平均値を縦軸にとった相関を図7に示す。

この評価式を用いて不快感を推定した結果と実際的主観評価点平均値との相関は高く ($R^2 = 0.83$)、ラウドネス単独の場合 ($R^2=0.71$) よりも人間が感じる不快感をよく表現できていると言える。

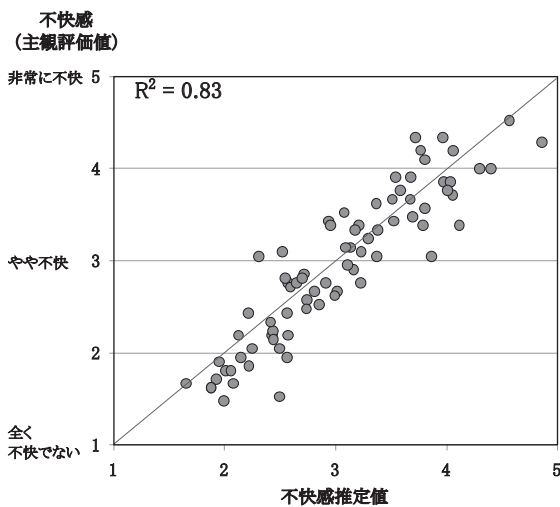


図7 “不快感”推定値と主観評価値の相関

4. まとめと今後の取り組み

鉄道の車内で聞こえる様々な音に対して、これまではその大きさ、すなわち騒音レベルのみで評価されているが、音に対して感じる“不快感”は大きさだけにはならずその『音質』にも依存している。今回、実際の新幹線電車内で収録した音に対して、所内の防音室において被験者による主観評価実験を行い、車内音に対する人間の主観評価がどの音質評価指標と相関が高いかを検討した。この結果、音に対して感じる“うるささ”はその音のラウドネスあるいは騒音レベルとの相関が高かった。“不快感”についてもラウドネスとの相関がもっとも高いが、これにシャープネス、トーンリティ、変動強度といった音質評価指標を組み合わせることで、より人間の主観評価と相関の高い評価指標とすることができると示した。

車内の騒音に対して人間が感じる不快感を低減するには、まず「大きさ(レベル)」を低減することが必要であるが、それでもなお不快感が低減しない場合には『音質』の観点からも評価することにより、不快感の原因を特定

し、効果的な対策を行えるようになると期待される。

ただし、音に対する不快感、単にその大きさや音質等、物理的な特徴だけに依存するのではなく、音を出す原因そのものに対する嫌悪感や、音が生じる状況や聞いている人間の体調、音の文脈(意味づけ)が理解できるものであるか等、非音響的ファクター(心理ファクター)によっても影響される。このように、音に対する主観的な評価は個人的な嗜好にも強く依存していることから、式(1)で示した不快感推定値の計算式はあくまでも「実験室で、スピーカー再生された新幹線電車の車内音に対する不快感を評価した場合」に限定した結果であるとも考えられる。例えば在来線電車の車内騒音に対しては、ラウドネスが新幹線電車のそれより大きくても許容されやすく、実際に動いている車内で評価した場合には実験室での評価よりも音の発生源などその文脈が明らかであるため許容されやすいなど、対象や状況によって異なる不快感評価式が得られることも想像される。

今後、より人間の“不快感”に合った形で鉄道においても車内騒音の評価を検討するためには、式(1)で示したような物理的な要因である音質評価指標を考慮するだけでなく、時間的な要素や心理的な慣れなども検討する必要がある。このため、振動や映像(視覚)等の人間の他感覚も含めて車内環境を再現できる車内快適性シミュレータ等を用いて主観評価実験を実施し、より一層人間の不快感と相関の高い評価手法となるよう、深度化をすすめていく予定である。

文献

- 1) 星野博之：自動車車室内騒音の音質評価，音質フォーラム 2002
- 2) 鈴木浩明，白戸宏明，小美濃幸司：列車の車内快適性に影響する要因の特定，鉄道総研報告，Vol.11, No.11, pp.31-36, 1997
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 高梨彰男，野村誠，森厚夫，道重次郎，杉窪利浩：事務機械音の音質効果—音質評価にあたっての変遷と課題—，音質フォーラム 2002
- 6) 心理音響学，Eberhard Zwicker，山田由紀子訳，西村書店
- 7) 聴覚心理学概論，Brian C.J. Moore，大串健吾監訳，誠信書房
- 8) ㈱小野測器 Oscope ver.2 マニュアル OS-0271 ユーザーズガイド