

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

車内の快適さを測る

生活レベルの向上や環境の制御技術の発達に伴い、鉄道などの公共交通機関に対しても、「より快適に」「より便利に」というニーズが高まっています。「快適」とは日常生活でもよく用いられる言葉ですが、研究対象としては多義的で曖昧な概念です。ここでは、鉄道車両の車内快適性を考える上で重要な概念や定義を概説します。また、いくつかの視点から快適研究のターゲットを分類し、代表的な評価指標、シミュレーターの活用、期待値の影響など、車内の快適性を論じる上で抑えておきたいポイントを概観します。



鈴木 浩明
Hiroaki Suzuki
研究開発推進部
主管研究員
【専門分野】人間工学、
実験心理学

「快」と「適」

快適という言葉は文字通り、「快 (pleasantness)」と「適 (neutral)」の二つの意味から成り立っています。不快な刺激がない状態が「適」、より積極的に心地よく感じる状態が「快」です。

たとえば、嫌な匂いを消臭剤で消すと、人は心地よく感じるのでしょうか？ そうではありません。「不快な匂いを感じなくなった」だけです。人が不快さを感じない状態が「適」環境です。振動、騒音、悪臭などは刺激の強さが増すにつれ、不快感も増えます。このため、振動や騒音の強さを抑えて、乗客が不快さを感じないようにする必要があります。

一方、温度、湿度、照度などの要因

は、高すぎても低すぎても不快なため、多くの人が高すぎても低すぎても不快な範囲内に制御することが求められます。車内が暑すぎたり寒すぎたりすれば、乗客の不快感が増えますが、「適温」であれば、人は温度そのものを意識しません。

快適性の研究では、振動、騒音、悪臭などを低減要因、温度、湿度、照度などを最適化要因と区別します(図1)。どちらの要因でも、利用者がその刺激を意識しないように制御するのが理想です。

一方、利用者が心地よさを積極的に意識できる環境が「快」です。香りのよい芳香剤を活用して悪臭を打ち消したり、車内のデザインやBGMを工夫して心地よさを演出する手法もしばし

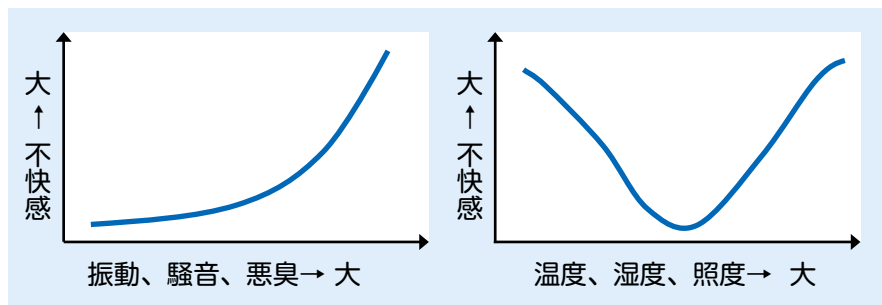


図1 低減要因(左)と最適化要因(右)
※線の傾きや形状は刺激の種類により異なる

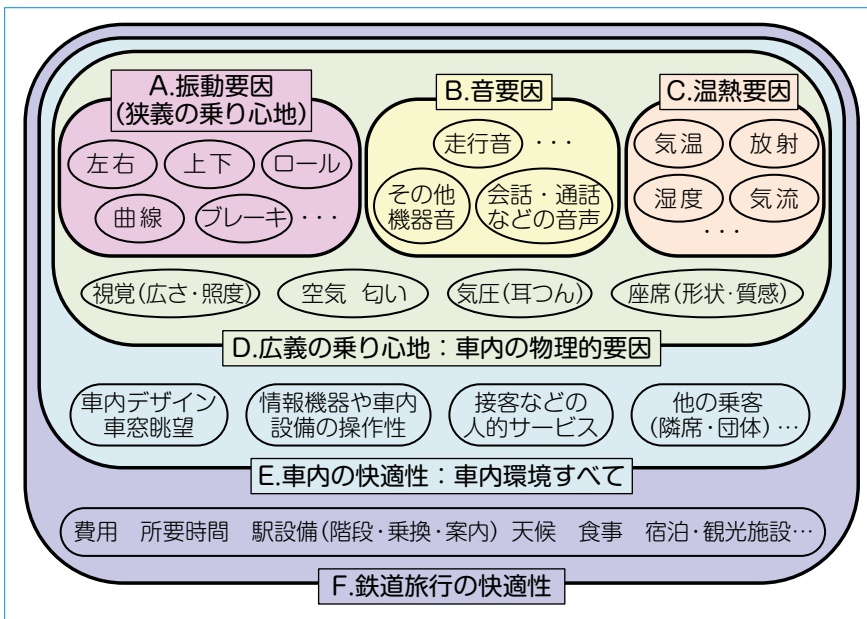


図2 列車利用時の快適性を構成する主な要因

ば用いられます。

「快」環境の実現にあたっては、好みの個人差が大きいことが最大の問題です。芳香剤でも、香りの好みはさまざまです。BGMも同様で、曲の好みや適切な音量は人によってさまざまです。

衣服や日用品であれば、その人が心地よく感じる商品を選んで購入してもらえばよいのですが、鉄道のような公共交通機関では、そうもいきません。「適」環境の実現を基本としつつ、可能な範囲で「快」環境の実現を目指す必要があります。

広義の快適・狭義の快適

車内の快適性にはさまざまな要因が影響します。振動、音、温熱、明るさ、匂いなどの物理的要因はもちろん、座席の質感、デザイン、眺望、さらには乗務員の接客などの要因も無視できません(図2)。

最も狭義の乗り心地研究(図2のA)では振動要因が対象です。乗り物は移動に伴い振動が発生し、一般に速度の増加とともに振動も増すため、振動の低減が常に大きな課題でした。

つぎに騒音(B)や温熱(C)、さらに視覚(照度など)、空気、気圧変動、

座席の形状・質感など、車内の物理的要因が課題となります(D)。昔も今も振動研究の比率が高いのですが、最近ではさまざまな物理的要因を対象にした研究が活発になっています¹⁾³⁾。

もう少し広く車内の快適性を考える場合には、客室内のデザインや車窓眺望、車内設備の使い勝手、乗務員の接客、ほかの乗客の話し声などが含まれます(E)。定量化が非常に難しかったり、鉄道事業者側で制御できない要因です。最近では、タブレット端末やスマートフォンなどの電子機器を扱う乗客が急増しています。機器の使い勝手の良し悪しが車内の満足度に大きく影響するため、快適な無線環境の重要性が増しています⁴⁾。さらに広義には、費用、所要時間、駅設備の利便性から天候、食事、施設の満足度など、幅広い要因が旅行の快適性に影響します(F)。以下では物理的要因を中心に述べます。

複数要因の相互影響

振動、音、温熱などの物理的要因が車内の快適性に及ぼす影響はある程度加算的です。つまり、振動と音の一方が大きくなるより、双方が大きくなった方が不快感も増大します。しかしな

がら、加算が成り立つのはある一定の範囲内のみで、一つの要因が極度に過大になると、ほかの要因へ注意が向きにくくなります。

たとえば、車内の音があまりに大きいと、音の不快感のみに意識が集中してしまいます。また、夏場にクーラーの効かない車両に乗れば、「暑い!」という不快感のみが突出して感じられます。一般に、同行者の話し声が聞き取りにくいほど大きくなると、騒音が支配的になり、汗がだらだらと流れたり、寒気や冷えを感じるような気温だと、温熱要因が支配的になります。

つぎに、曲線走行時に生じる遠心力に相当する左右定常加速度と、乗客の不快感(「列車の乗り心地として許容できない」という評価)との関係を図3に示します⁵⁾。立位の乗客では、左右定常加速度が 1m/s^2 を超えるあたりから、急激に「許容できない」との評価が増えます。これは、 1m/s^2 を超える遠心力が作用すると、姿勢のバランスを崩したり、足をとられたりする乗客が急に増えるためです。

以上のように、会話や姿勢の維持が困難、もしくは体温調節負荷の増大といった極端な条件でない範囲においては、各種の要因はある程度加算的に作用します。

何のための快適研究か

快適研究の目的は次の二つに大別されます。

①評価手法(評価指標)の開発

刺激強度の変化と乗客の不快感の変化との対応関係を見だし、評価手法(または、許容限度値などの指標)を開発する。

②改善方法の開発

前述の評価指標を満足するレベルまで、刺激強度を低減する(もしくは、制御する)ための技術を開発する。

たとえば、振動要因の場合、乗客は上下、左右、ロールなどの要因を個別に評価しているわけではなく、全体としての振動（複合振動）を体感しています。このため、乗客の体感と合致した指標を開発（上記①）するには、複合振動の重みづけ和が適しています。

一方、上下の振動と左右の振動では、低減するための技術的対策が異なります。このため、上記②の立場からすると、「複合振動の重みづけ和では、何を改良すればよいかのわかりにくく、方向別の振動による指標が使いやすい」といった声があります。

このような背景から①と②の立場によって、有用な指標が異なるということもありました。しかし最近では、車両、軌道、人間工学などの共同研究により、乗客の体感との相関が高く、しかも車両や軌道側での対策に活かしやすい指標の開発が進められ、その指標を活用した対策提案も行われるようになっていきます⁶⁾⁷⁾。

評価指標が技術開発に役立つ

上記①と②の連携の例として、つぎに、列車がトンネルを高速で走行する際に生じる不快感（いわゆる「耳つん」）の研究を紹介します。気圧変動と耳つんの関係を定量化できれば、新しい車両を設計する際の目標標準が明確になります。こうした観点から、車両と人間工学の研究者が共同で試験を実施し、筆者らは図4に示すようなガイドラインを提案しました⁸⁾。

気圧変動は低減要因ですので、瞬時的な気圧変動を0.3kPa（キロパスカル、気圧の単位）以下に抑えられれば、耳つんをまったく生じない車両を作れます。しかし、技術的にもコスト的にも非常に困難な目標値です。

そこで、乗客に許容してもらえらる気圧変動はどの程度までであるかという

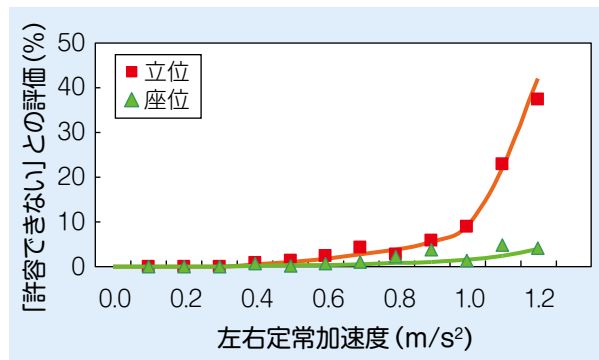


図3 曲線中の左右定常加速度と乗客の不快感の関係⁵⁾

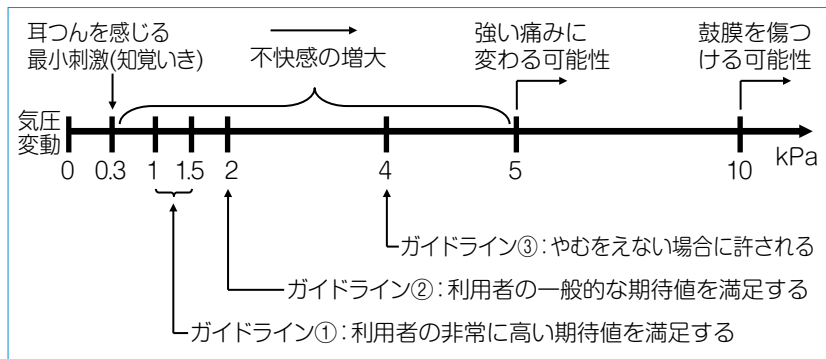


図4 気圧変動に起因する耳つんの許容限度値⁸⁾

視点から検討しました。宇宙や航空機も含めた海外文献を調べた結果、瞬時変動が5kPaを超えると、耳つんというより痛みを感じる人が増え始め、10kPaを超えると鼓膜を傷つける恐れがあることがわかりました。

このため、不快感というレベルでの耳つんの許容限度は5kPa未満で検討する必要があります。試験の結果、気圧変動の許容限度値は2kPa程度と結論されました。ただし、乗客の期待値が高く、高品質の輸送サービスを提供する新幹線のような高速列車では、1.0～1.5kPa以下程度に気圧変動を抑えるのが理想的です。一方、上り下りの列車がトンネル内で高速ですれ違うような「例外的ケース」では、多少緩和しても許されると判断しました。

人の感覚は個人差も大きいですし、体調にも左右されますが、図4のようなガイドラインを示すことができれば、その後の技術開発の具体的な目標値として役立ちます。

快適さの指標

快適性の研究では、人の「快適度」を何らかの数値で表す必要があります。快適度の定量的な指標にはさまざまなものがありますが、一般には以下の3つに大別できます。

①心理的指標（言語報告）

利用者（被験者）が感じる主観的な快-不快の程度を、アンケート調査や押しボタン反応などを用いて数値化したものです。比較的試験の実施が容易で、多くのデータを集めやすいのですが、アンケートの作成・実施に際し十分な注意を払わないと、結果の信頼性が保証されません。

②生理的指標（生体情報、生理反応）

脳波、心拍、呼吸、筋電、眼球運動などの生理的な反応を利用するものです。従来は計測に手間がかかる割に、結果を客観的に示すのが簡単でなく、補助的に使われることが多かったのですが、計測機器の飛躍的な発達により活用可能性が高まっています。

③行動的指標（パフォーマンス）



図5 車内快適性シミュレーター

振動によってどれだけ身体バランスを崩したか、書きにくさ、歩きにくさが変化したか、また、騒音下でどれだけ正しく聞き取れたかなど、ある環境下での成績（誤反応）や身体の動き、動作などの情報を用いるものです。

上記の3指標は対立的なものではなく、組み合わせることで試験や調査の信頼性が向上します。

シミュレーターの活用

実際の車内で快適性の評価試験を実施するのはもちろんですが、環境制御技術の発達に伴い、実環境を模擬したシミュレーターを使って試験を行うケースが増えています。

列車の客室内環境を模擬した「車内快適性シミュレーター（図5）」を例に、その特色を考えてみたいと思います⁹⁾。この装置は列車振動を模擬するための6軸電動モーション装置と、12名が着席可能な模擬客室などから構成されています。走行時の振動、騒音、温度、照明環境などのコントロールはもちろん、コンピュータグラフィクスを用いて車窓風景を自由に生成・制御することが可能です。

快適性の研究でシミュレーターを用いる利点は次のように整理できます。

①刺激環境を自由に設定できる

在来線特急列車を利用中の約4,000

名の乗客への調査の結果、0.25~0.3Hzの低周波左右振動が多い区間で、乗り物酔いを訴える乗客が多いことがわかりました¹⁰⁾。これを受け、この周波数成分を増やしてシミュレーターで試験をしたところ、酔うという被験者が増えました。実際の特急列車で得られた「疫学的な」データの正しさを、刺激

を自由に設定できるシミュレーターを使って証明できたのです。

②繰り返し同一環境で試験できる

実際の列車で「同じ揺れを10回提示して」といわれても困難ですが、シミュレーターでは、繰り返し同一の刺激環境を再現することが可能です。通勤列車のつり手や手すり形状を対象に、使いやすい条件を検討した際には、大勢の被験者に同一の振動環境を体験してもらえるシミュレーターのメリットが最大限生かされました⁹⁾。

ただし、シミュレーターの活用はよいことばかりというわけではありません。私たちが乗り物を利用する目的は通常何らかの目的地に到達するためです。この目的の重要性との相対比較の上に振動や騒音への評価は成立しています。「混んでいて座れないし、揺れも少し大きいけれど、早く着けるから快速電車に乗り換えよう」といった判断を私たちは日常的に行っています。しかし、シミュレーター試験の場合、被験者は移動を伴わずに振動や騒音のみを体験します。したがって、その意味が実際の利用状況と本質的に異なることに留意しつつ、試験を実施し、結果を解釈する必要があります。

とはいえ、シミュレーターの性能向上は目覚ましく、今後もシミュレーター活用研究は増加すると思われます。

期待値との比較

JRグループの発足から四半世紀が経過し、この間、車内の快適性は格段に向上しました。にもかかわらず、鉄道事業者や車両メーカーはさらなる改善を目指して、努力を重ねています。それは、車内の快適性が振動、騒音などの物理的強度の絶対値のみで決まるものではなく、乗客の期待値との相対的な比較で定まるためです。

期待値は、技術の発達とともに上昇します。したがって、絶えず上昇していく乗客の期待値を的確にとらえつつ、常にそれを上回るサービスの提供が求められます。快適性の向上は永遠の課題であり、私たちはそのレベルアップに可能な限り貢献すべく、努力を続けたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 朝比奈峰之他：車内の騒音を低減する，RRR, Vol.73, No.4, pp.16-19, 2016
- 2) 潮木知良：車内のにおいを調べる，RRR, Vol.73, No.4, pp.20-23, 2016
- 3) 遠藤広晴他：夏季の通勤列車内の温熱快適性予測手法，鉄道総研報告, Vol.29, No.7, pp.27-32, 2015
- 4) 中村一城他：車内で電波を利用する，RRR, Vol.73, No.4, pp.24-27, 2016
- 5) 鈴木浩明他：曲線区間の乗り心地の許容限度，鉄道総研報告, Vol.14, No.12, pp.19-24, 2000
- 6) 中川千鶴他：車内の乗り心地を評価する，RRR, Vol.73, No.4, pp.12-15, 2016
- 7) 菅原能生：車内の振動を低減する，RRR, Vol.73, No.4, pp.8-11, 2016
- 8) 鈴木浩明：トンネル内で生じる耳つんの評価，RRR, Vol.59, No.6, pp.12-15, 2002
- 9) 鈴木浩明他：車内快適性シミュレーターの活用と評価，鉄道総研報告, Vol.20, No.3, pp.47-50, 2006
- 10) 鈴木浩明他：低周波振動が列車酔いに及ぼす影響，鉄道総研報告, Vol.18, No.2, pp.9-14, 2004