

人の感覚特性を考慮した通勤列車内の温熱快適性指標

人間科学研究部 人間工学研究室
副主任研究員 遠藤広晴

1. はじめに

通勤列車の車内空調に対する鉄道利用者からの苦情は毎年多く発生している。鉄道事業者や空調メーカーは、その改善のためのさまざまな検討・対策を行っているが、通勤列車内の温熱環境、および同環境下の人の温熱感覚に関する知見が少ないため、その有効性に関する適切な評価自体が困難な状況にある。

温熱環境の評価指標に関しては、古くから研究がなされており、代表的な指標としてはISO7730でも採用されている予測平均温冷感申告 (PMV) や、建築分野等で広く用いられている標準新有効温度 (SET*) がある。しかし、これらは温湿度変動の無い定常環境を対象としているため、通勤列車への適用可能性については、車内温熱環境の特性や人の温熱感覚の特性を踏まえた上で判断する必要がある。

本研究では、夏季を対象として、通勤列車の車内温熱環境測定、および一般の鉄道利用者を対象とした車内温熱環境の被験者実験を実施した。その上で、取得した温熱環境・主観評価データの特性を反映した、より実態に即した通勤列車内の温熱快適性指標を提案した。

2. 車内温熱環境測定

2.1 留置車両内での風速測定

留置された通勤車両内で風速分布の測定を行った。車内の風速分布に影響する要因としては、主に横流ファンによる送風が考えられる。横流ファンは一定の周期で往復しながら送風するもので、ドア付近等の天井部に設置されていることが多い。測定対象車両に設置された横流ファンの往復周期は13.3秒であり、回転軸は車両長手方向であった。測定箇所は横流ファンの位置を基準として図1のように配置した。

測定結果の例を図2に示す。横流ファン直下の領域 (測点 B-2, C-2。以後、「横流ファン領域」と記述) では2.0m/s程度の風速ピーク値を持つ周期的な風が観測されたが、それ以外の領域 (以後、「非横流ファン領域」と記述) では0.3~0.6m/s程度の変動を伴う風速となっており、横流ファンによる送風の指向性の高さが確認された。

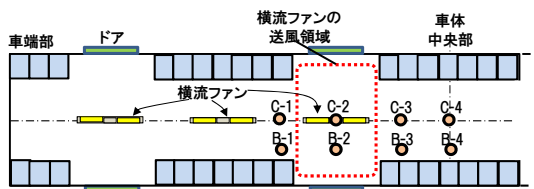


図1 風速計配置図 (車両を上から見る)

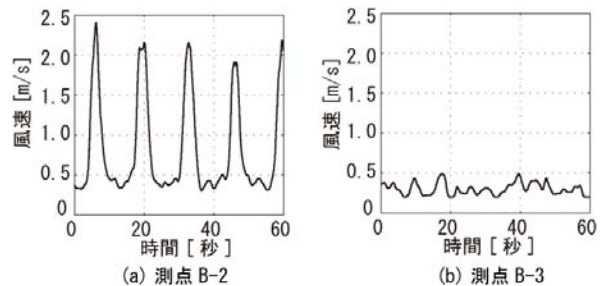


図2 風速測定結果の例 (床上高さ1.7m)

2. 2 営業列車内の温湿度測定

2012年8月21日～26日に、営業運転中の都市部の通勤列車内の温湿度を、通勤時間帯（例：7:50乗車，8:55降車）から帰宅時間帯（例：18:15乗車，19:25降車）にかけて測定した。乗車区間は全ての期間で共通で、測定日数は4日間、期間中の乗車回数は13回で、1回あたりの乗車時間は約1時間であった。調査では、図3に示すように、鉄道関係者が温湿度計を携帯して営業列車に乗り込み、周囲の温湿度を記録した。

温湿度測定結果の例を図4に示す。この例では、車端部と車体中央部共に乗車中4℃程度の温度変動、20%程度の湿度変動がみられた。測定期間中における、駅間走行時の温湿度の観測範囲は22～29℃、40～75%程度であり、車内位置、状況により幅広く分布した。また、温度変化速度の観測範囲は-1.4～+1.0℃/min、湿度変化速度は-6～+6%/min程度であり、通勤列車内の乗客は大きな温湿度変動を体感していることを確認した。

3. 車内温熱環境の被験者実験

3. 1 実験方法

留置された通勤車両内で、一般の鉄道利用者102名（男性56名，女性46名，平均年齢44歳）を対象とした被験者実験を実施した。実験では、営業列車の測定結果を参考に、①27℃→21℃→29℃のように温度変動させた条件、②22℃以下の温度を継続させた条件、③22℃から30℃に温度上昇させた条件、④数分間隔でドアを開閉した条件の4種類の環境条件を実施した。条件①、②では横流ファンを停止状態、条件③、④では横流ファンを稼働状態とした。なお、条件①は混雑率70%、140%、および180%の各混雑状況で行い、その他の条件は混雑率70%で実施した。

被験者が体感した温湿度は、営業列車での温湿度測定と同様に、携帯型の温湿度計により測定した。また、被験者は各環境条件を体感している間、1.5分間隔で温冷感（9段階尺度）、および不快度（4段階尺度）の評価を行った。被験者実験の様子を図5に示す。

3. 2 実験結果

条件①の混雑率70%時を例に温湿度の時系列変化、および不快度の評価結果を図6に示す。被



図3 車内温湿度測定の様子

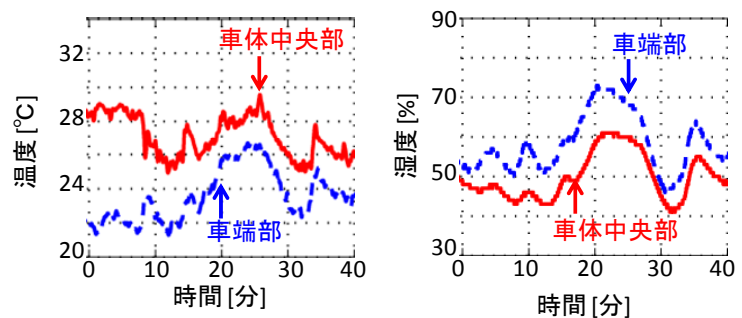


図4 温湿度の測定結果



図5 被験者実験の様子（条件①，混雑率180%時）

験者は営業列車内で見られたような上下変動する温湿度環境下であり、この変動に対応して不快度も変動した。条件①に関して、評価時の温度と不快度の関係を図7に示す。同一温度でも、上昇時か下降時かで不快度に相違がみられた。また、温度に対する不快度の変化は、全ての混雑率でほぼ同様の傾向を示した。なお、本実験で主観評価時に被験者が体感した温湿度は18~31℃、40~85%、温度変化速度は-1.6~+1.6℃/min、湿度変化速度は-6~+6%/min程度であり、営業列車で観測した環境範囲を概ねカバーする領域で主観評価データを取得できた。

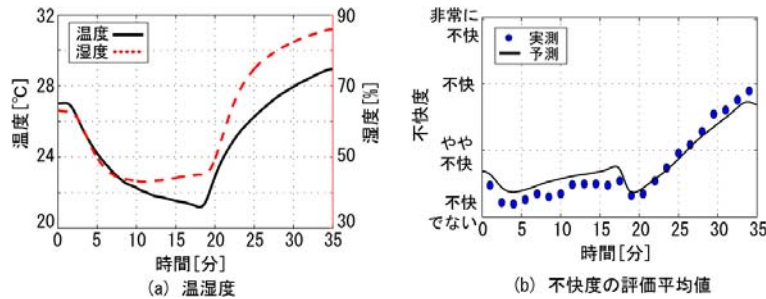


図6 被験者実験の結果例（条件①，混雑率70%時）

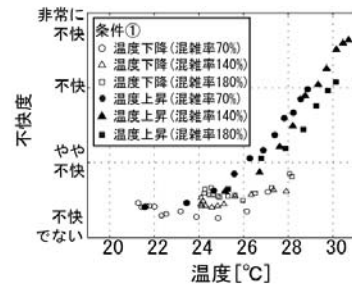


図7 温度と不快度の関係

4. 通勤列車内の温熱快適性指標の提案

営業列車の測定調査では、通勤列車内の温湿度は高い変動性を持つことを確認し、さらに、車内温熱環境の被験者実験では、その変動性が人の温熱感覚に影響することを確認した。したがって、通勤列車内に適用すべき温熱快適性指標は、変動環境下での人の温熱感覚特性が考慮されている必要がある。しかし、従来の温熱指標はこの要件を満たしていない。

従来指標の適用範囲が定常環境に限定されるのは、指標算出に使用される人体熱モデル（人と周囲環境との熱平衡モデル）が変動環境に対応した体温調節系を有していないこと、また、指標算出の基となる主観評価データが定常環境下で取得されたことによる。そこで、本研究では、「変動環境に対応した体温調節系を有する人体熱モデル」、および「通勤列車内の温熱環境（変動環境）下で取得した主観評価データ」を利用することで、変動環境下での人の温熱感覚特性が考慮された、通勤列車に適用可能な温熱快適性指標を作成した。

提案指標の計算方法の全体像を図8に示す。まず、温熱環境の測定値から、変動環境に対応した人体熱モデル¹⁾を利用して、人体の皮膚温度や発汗量等の温熱生理状態を反映した「体感温度」を算出する。次に、車内温熱環境の被験者実験で取得した主観評価データに基づく統計モデルを利用して、人の平均的な温冷感の予測値（以後、「予測平均温冷感」）、および提案指標である人の

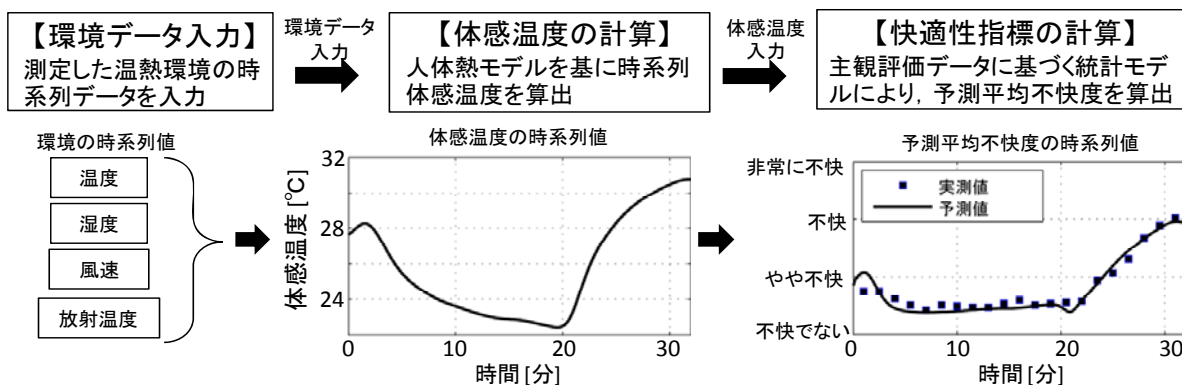


図8 提案指標の計算方法の全体像

平均的な不快度の予測値（以後、「予測平均不快度」）を算出する。前半部の人体熱モデルについては文献 1 を参照されたい。後半部の統計モデルについて、以下に概要を記す。

① 予測平均温冷感の計算部

温冷感は体感温度とその変化速度に比例すると仮定し、以下の線形回帰モデルで表わした。

$$DyPMV(t) = c_0 + c_1 DySET^*(t) + c_2 \frac{d}{dt} DySET^*(t) + cv_1 \cdot Z_1 + cv_2 \cdot Z_2 \quad (1)$$

$DyPMV$ は予測平均温冷感、 $DySET^*$ は人体熱モデルにより算出された体感温度、 $c_0, c_1, c_2, cv_1, cv_2$ は回帰係数である。 cv_1 は横流ファン領域における、横流ファン送風の温冷感への影響に相当し、 Z_1 は予測対象が横流ファン領域である場合は 1、それ以外は 0 となる変数である。同様に cv_2 は非横流ファン領域における、横流ファン送風の温冷感への影響に相当し、 Z_2 は予測対象が非横流ファン領域である場合は 1、それ以外は 0 となる変数である。

② 予測平均不快度の計算部

ある温冷感状態の下で、人が不快度を申告する事象は、多項分布に従う確率的な事象と考えられる。そこで、温冷感が $DyPMV(t)$ において不快度 k を申告する確率 $disc(k, t)$ を、以下の多項ロジスティック回帰モデルで表わした。

$$disc(k, t) = \frac{\exp(a_k \cdot DyPMV(t) + b_k)}{\sum_{k=-3}^3 \exp(a_k \cdot DyPMV(t) + b_k)} \quad (k=-3 \sim 3), \text{ただし, } \sum_{k=-3}^3 disc(k, t) = 1 \quad (2)$$

a_k, b_k は回帰係数、不快度 k は「-3：寒くて非常に不快」、「-2：寒くて不快」、「-1：寒くてやや不快」、「0：不快でない」、「1：暑くてやや不快」、「2：暑くて不快」、「3：暑くて非常に不快」に相当する。本研究で快適性指標として提案する予測平均不快度 ($DyDisc$) は、不快度申告の期待値として以下のように表わされる。

$$DyDisc(t) = \sum_{k=-3}^3 |k| \cdot disc(k, t) \quad (3)$$

上式(1)~(3)により予測平均不快度を算出した例を図 6 に示す。予測波形は、実際の平均不快度の時間変化と同様に変化していることが確認できる。被験者実験の全条件に対して予測平均不快度と実測値とを比較したものを図 9 に示す。予測誤差は、全評価で 0.5 段階以内に収まっており、実測値とよく一致していることが確認できる。

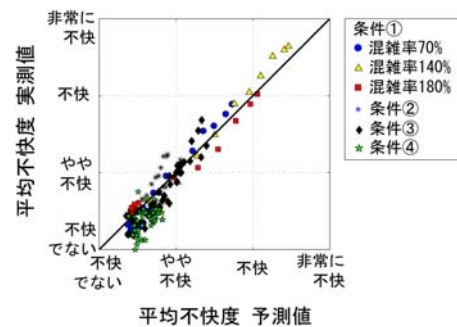


図 9 提案指標の適用結果

5. まとめ

本研究で提案した指標により、夏季の通勤列車内の温熱快適性評価が可能となり、乗客の感覚に合う、より快適な空調制御設計に貢献できると考えている。

今後は、営業列車内で主観評価データを取得し、本指標の妥当性の検証を行う予定である。また、本指標のモデル係数の季節による相違や、横流ファンによる風のような変動風が温熱快適性に及ぼす影響に関しては、今後継続して研究を進める予定である。

参考文献

1) 田辺新一ら：“温熱環境評価のための 65 分割体温調整モデルに関する研究”，日本建築学会計画系論文集，541，pp.9-16，2001