

夏季の通勤列車内の温熱快適性予測手法

遠藤 広晴* 伊積 康彦** 林 伸明***

Method for Predicting Thermal Comfort in Commuter Trains in Summer

Hiroharu ENDOH Yasuhiko IZUMI Nobuaki HAYASHI

The aim of this study is to develop a method for predicting thermal comfort in commuter trains in summer. At first, to clarify the characteristics of thermal environment in commuter trains, temperature and humidity were measured during commercial service from the morning to evening commute. Then, to understand the factors influential in the passenger's thermal comfort, a subjective experiment was conducted. By the proposed method, the percentage of passengers dissatisfied can be predicted, and it is composed of two calculation parts: one is a part for calculating sensory temperature based on a human thermoregulation model, and the other is a part for calculating the percentage of passengers dissatisfied based on a statistical model derived from experimental data. The predicted value agrees well with the experimental results.

キーワード：車内温熱，快適性，通勤列車，PMV，PPD，SET*

1. はじめに

夏季の通勤列車内の温熱環境に対する、乗客からの「暑い」、「寒い」といった不満の声は毎年多く寄せられている。これに対し、鉄道事業者は、冷房能力や空調制御性能の向上、近年では、シミュレーション技術を活用した快適性要因の検討など、現状の改善に向けた様々な取り組みを行っている^{1) 2)}。一方、通勤列車内の乗客の温熱快適性に関しては、関連する知見が少なく、現状あるいは対策後の改善効果を「乗客の快適性」の観点から予測・評価する手法は未だ確立されていない。

既存の温熱快適性指標に、ISO7730で採用されている「予測平均温冷感申告（以後、PMV）」および「予測不満足率（以後、PPD）」がある³⁾。同指標は一般室内のような定常的な温熱環境を対象としているのに対し、夏季の通勤列車内は、外気の影響や車内乗客の発熱・水分蒸発等により湿度が変動するため、通勤列車内の温熱環境への適用にあたっては妥当性の検証が必要である。

本研究の目的は、夏季の通勤列車内の温熱快適性を適切かつ定量的に予測・評価する手法を開発することである。本研究では、まず、営業列車内の温湿度測定調査を実施し、その実態を把握した。次に、一般の鉄道利用者を対象に、営業列車の温熱環境を模擬した被験者実験を実施し、温熱快適性に関する知見を得た。さらに、PMV・PPDの予測精度を検証し、誤差の原因を考察したうえで、より精度の高い温熱快適性予測手法を開発した。

* 人間科学研究部 人間工学研究室

** 構造物技術研究部 建築研究室

*** 東日本旅客鉄道株式会社

2. 営業列車の温湿度測定調査

2011年および2012年の夏季に、営業運転中の通勤列車内の温湿度を測定した。測定対象車両は都市部の通勤列車で、測定時間帯は朝の通勤時間帯（例：7:50乗車，8:55降車）から夜の帰宅時間帯（例：18:15乗車，19:25降車）にかけてであった。1回あたりの乗車時間は約1時間で、測定日数は計8日間、乗車回数は計30回であった。

2.1 測定対象車両の空調設備

図1に本研究で対象とした通勤列車の空調設備の概要を示す。冷却空気は、屋根上の車体中央部付近に配置された空調装置から天井内のダクトを車両長手方向（レール方向）に流れ、同方向に等間隔に設けられた穴（スリット）から吹き降りてくる。対象車両には長手方向の両側2列につき革が設置されており、スリットはその上部付近にある。また、天井部にはサーキュレーターの役割を果たす横流ファンが設置されている¹⁾。

2.2 測定方法

温湿度計を携帯した測定者が営業列車に乗り込み、車端部から車体中央部の複数箇所に立ち、それぞれの周囲の温湿度を同時に測定した。温度はK熱電対（LR9692，日置）により1秒間隔でデータロガー（LR5021，日置）に記録した。測定高さは、床上0.1m，0.6m，各測定者の腰部（1.0～1.1m程度）および肩部（1.4～1.5m程度）、荷棚部（1.7m程度）とした。湿度はサーミスタ（TR-3110，T&D）により2秒間隔でデータロガー（TR72Ui，T&D）に記録した。測定高さは各測定者の腰部とした。

特集：人間科学

2.3 測定結果

温湿度測定結果の例を図2に示す。乗車後B駅までは、車内に大きな温湿度変動は生じておらず、車端部では22℃程度の比較的低い温度が20分程度継続していた。B駅～E駅間（約17分間）では温度4℃程度、湿度20%rh程度の温湿度上昇、E駅～F駅間（約8分間）では同程度の温湿度下降が車内全体で生じていた。このような温湿度の上下変動は他の乗車時にも観測された。

図3に、駅間走行中の腰部での温湿度観測領域を示す。図中の各点は、1分間ごとの平均温湿度、楕円はその95%信頼領域である。今回の測定調査では、車内温湿度は概ね20～29℃、40～78%rhであった。なお、観測領域の内、22℃付近の低温側の領域は、車端部における緩やかな変動として観測されることが多かった。上

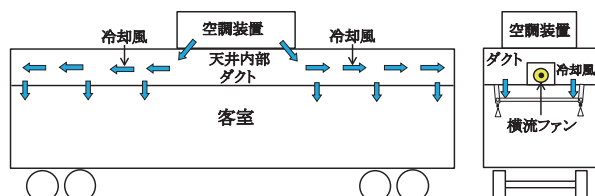


図1 通勤列車の空調設備の概要

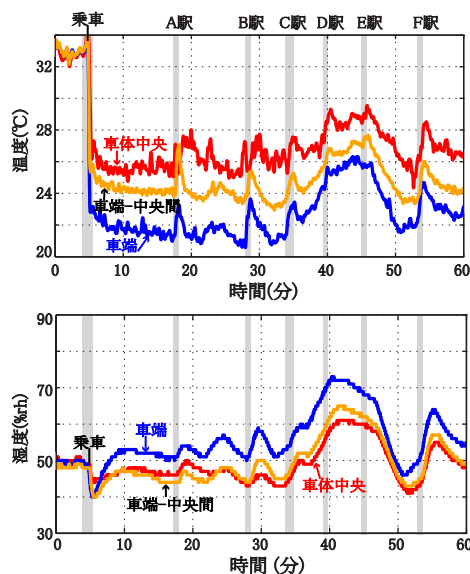


図2 営業列車内の温湿度測定結果例

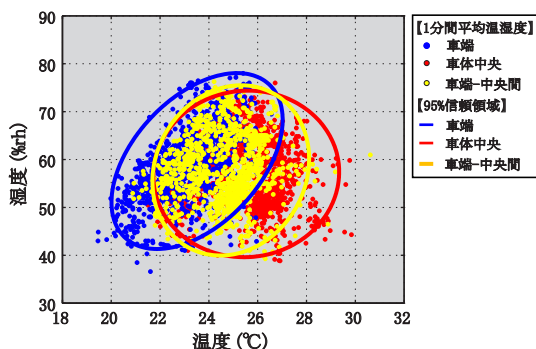


図3 温湿度観測領域（腰部記録）

下温度差に関しては、3℃を超えると不均一感による不快感の発生が指摘されているが³⁾、本調査では、床上0.1m～荷棚部(1.7m程度)間の温度差は概ね3℃以内であった。

3. 実車両を用いた被験者実験

実験は2012年9月4日の午後（以後、「第1回試験」）および9月7日の午後（以後、「第2回試験」）に、留置された通勤用車両内で実施した。当該車両の空調設備は、営業列車調査での測定対象車両と同一であった。両日も天気は晴れで、30℃を超える真夏日であった。参加した被験者は、一般の鉄道利用者で、第1回試験は男性29人、女性26人の計55人（年齢18～63歳、平均43.9歳）、第2回試験は男性27人、女性20人の計47人（年齢21～63歳、平均45歳）であった。被験者には、実験の目的、内容を十分に説明し、インフォームドコンセントを得た。

3.1 実験方法

3.1.1 実験条件

図2のB駅～F駅でみられたような温湿度の上下変動を模擬した「温湿度変動条件」と、乗車後からB駅間の車端部でみられたような、比較的低い温度の継続を模擬した「低温持続条件」を実施した。

温湿度変動条件では、初期温度27℃程度から4～5℃下降させ、その後再び30℃程度まで温度を上昇させた。また、図4に示すように被験者の滞在領域を調整して、第1回試験では混雑率70%と180%、第2回試験では混雑率140%の混雑環境を模擬し、混雑率が温熱快適性に及ぼす影響を調べた。混雑率180%は、図5に示すような被験者同士が接触しないぎりぎりの混雑環境である。なお、0.35m²/人を混雑率100%と仮定した。

低温持続条件では、第1回、第2回試験とも、混雑率70%の混雑環境において、22℃程度の比較的低い温度を継続させた。

各条件の温度調節は冷房強度の手動設定により行い、横流ファンは停止状態とした。

3.1.2 環境測定方法

被験者の一部に温湿度計を携帯させ、被験者周囲の温湿度を測定した。温度センサーおよび湿度センサーは営業列車の測定調査と同じものを使用した。温度センサーは被験者の腰部および肩部、湿度センサーは腰部位置とした。風速計はクリモマスター風速計 Model 6551（カノマックス）を使用し、1秒間の移動平均値を記録した。測定高さは床上1.1mおよび1.7mとした。測定器配置を図4に示す。なお、本実験では、被験者が受ける日射の影響を軽減するため、窓部をカーテン等で覆った。

3.1.3 主観評価方法

被験者は条件開始から1.5分間隔で、温冷感、温度要求、

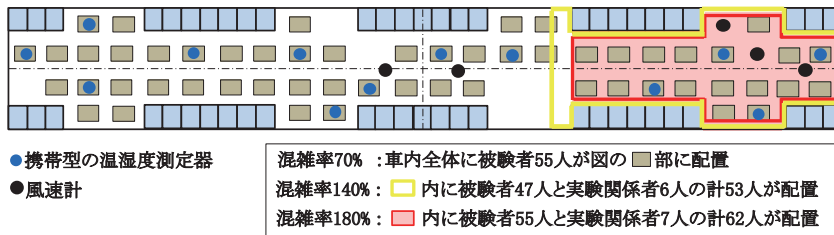


図4 実験車両内での被験者・測定器配置図（車両を上から見る）



写真は混雑率180%時

図5 被験者実験の様子

表1 実験で使用した主観評価尺度

温冷感	【9段階】-4:寒い, -3:やや寒い, -2:涼しい, -1:やや涼しい, 0:中立, +1:やや暖かい, +2:暖かい, +3:やや暑い, +4:暑い
温度要求	【3段階】もっと温度を上げて欲しい, このままでよい, もっと温度を下げて欲しい
満足度	【2段階】満足できる, 満足できない

表2 PMV尺度³⁾

PMV	【7段階】-3:cold, -2:cool, -1:slightly cool, 0:neutral, +1:slightly warm, +2:warm, +3:hot
-----	---

および通勤列車の温熱環境としての満足度について主観評価を行った。評価中の姿勢は立位とした。主観評価尺度は既往研究⁴⁾を参考に表1のようにした。

3.2 実験結果と考察

3.2.1 環境測定結果

温湿度の測定結果の例を図6に示す。第1回試験の温湿度変動条件では21～29℃、40～85%rh程度、低温持続条件では20～22℃、40～50%rh程度となり、営業列車で観測された温湿度環境を概ね模擬できたといえる。風速はいずれの条件においても平均0.3m/s程度の定常的な風速であった。

3.2.2 主観評価結果

温冷感、満足度の評価結果の例を図6に示す。ただし、「寒い不満足率」は、「不満足」かつ「もっと温度を上げて欲しい」と回答した割合、「暑い不満足率」は、「不満足」かつ「もっと温度を下げて欲しい」と回答した割合、「不満足率」は両者の和である。

温湿度変動条件では、温湿度下降時には温冷感の低下、および寒い不満足率の増加がみられ、温湿度上昇時には温冷感の上昇、および暑い不満足率の増加がみられた。また、温湿度の下降時と上昇時とで、同様の温湿度でも温冷感と不満足率が異なる傾向を示しており、温湿度変動が温熱快適性に影響を及ぼしていることが示唆された。例えば、図6の時刻5.5分(4回目評価)の温湿度下降時と時刻20.5分(14回目評価)の温湿度上昇時は、両者とも温湿度は概ね24℃、50%rhであるが、前者の平均温冷感「やや涼しい」、暑い不満足率は13%程度であるのに対し、後者の平均温冷感「中立」、暑い不

満足率は30%程度となり、温湿度上昇時の方が温冷感により暑い側の評価となり、暑い不満足率が高かった。

低温持続条件では、「涼しい」から「やや寒い」への緩やかな温冷感の低下、および、寒い不満足率の増加がみられた。

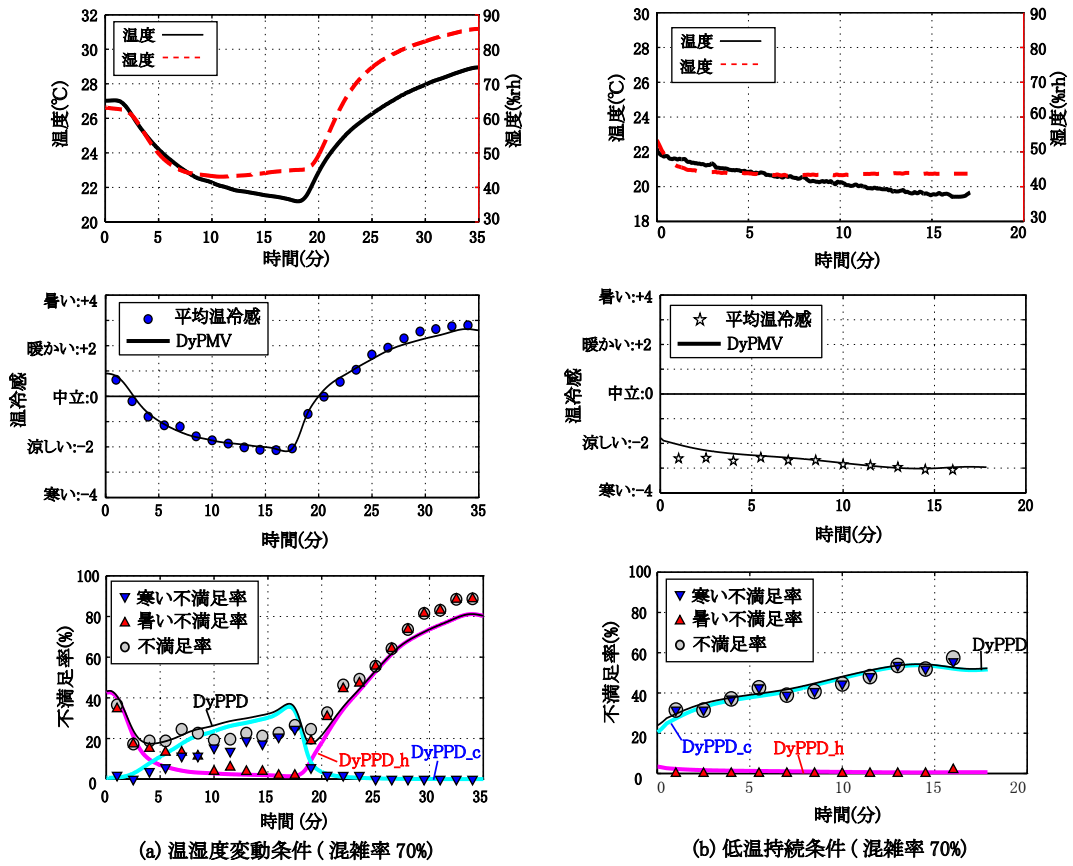
3.2.3 PMV・PPDと主観評価結果の比較

PMVは表2に示す7段階尺度の温冷感の予測値である。周囲温熱環境による人体の熱負荷量を熱平衡式により計算し、さらに、その熱負荷量と被験者実験での温冷感申告値とを結びつけた回帰式により計算される。人体の熱負荷量に影響を与える主要素には、環境側では温度、湿度、放射温度、気流、人側では、代謝量、着衣量の計6要素(以後、「温熱6要素」)があるが、PMVはこれら全ての要素を用いて計算される。PPDは、あるPMVに対して何%の人が不満足に感じるかという割合であり、図7(a)に示す曲線で表わされる。なお、PMV・PPDの回帰式の基となった被験者実験は、変動のない定常的な環境下で行われた。

図7(c)に本実験でのPMVと実測平均温冷感の関係を示す。PMVの計算はISO7730のプログラム³⁾を使用し、温湿度は各被験者近くの測定値、放射温度は気温と等しいとし、被験者の着衣量は夏の軽装時の0.6clo(cloは衣服の熱抵抗の単位で1clo=0.155(℃・m²)/W)、代謝量は静止立位時の1.2met(metは単位体表面積あたりのエネルギー消費量の単位で1met=58.2W/m²)とした。風速は空調設備配置の対称性を考慮したうえで、各被験者に測定値を割り当てた。

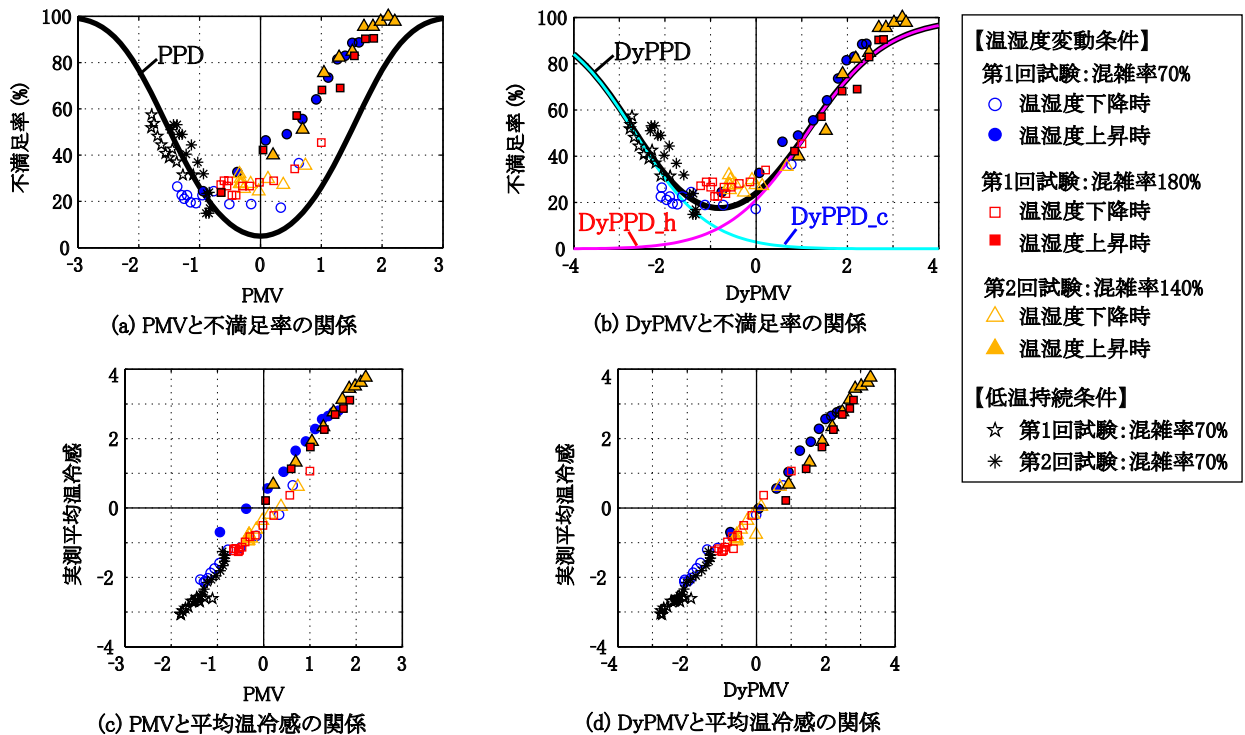
PMVと実測平均温冷感には高い相関があるものの、温湿度上昇時と下降時とでPMVに対する実測平均温冷感の傾向に相違がみられた。この相違は、PMVの人体熱負荷量を計算するモデル(以後、「人体熱モデル」)が定常環境のみを対象としたものであり、また、温冷感予測式の基となった被験者実験の環境が定常環境であったために生じたものと考えられる。したがって、PMVにより温冷感を予測した場合、温湿度変動による系統的な誤差が生じると考えられる。

図7(a)に本実験でのPMVと実測不満足率の関係を示す。全体として、PMVが-1付近で不満足率が小さい傾向を示しており、PPDの最小点と相違している。これは、「夏季は、温冷感が中立よりも涼しい環境において、



注) DyPMV, DyPPD_c, DyPPD_h, DyPPD は 4 章で説明する。

図 6 被験者実験での温湿度測定結果と主観評価結果の例 (第 1 回試験)



注) DyPMV, DyPPD_c, DyPPD_h, DyPPD は 4 章で説明する。

図 7 被験者実験での主観評価結果と温熱快適性予測値の関係

より不快感が小さい」といった夏季の特性が、PMV と PPD の関係式に反映されていないためと考えられる。このような季節による温冷感と快適性の関係の相違は、既往の実験的研究においても報告されている⁴⁾。また、温湿度上昇時と下降時とで、PMV に対する実測不満足率の傾向に相違がみられるが、これは、前述したように、PMV の計算モデルが定常環境のみを対象としていることに起因していると考えられる。結果的に、PPD による予測誤差は最大で 45 ポイント程度も生じていた。

3.2.4 混雑率の影響

混雑率が温熱快適性に及ぼす影響としては、人体発熱や水分蒸発による車内温湿度の上昇のような、温熱環境を通じた影響と、「混雑した様子がより暑く感じさせる」といった、視覚情報を通じた影響などの温熱環境以外の要因による影響が考えられる。しかし、図 7 (a), (c) で確認できるように、PMV と温冷感、不満足率の関係は、実施した全ての混雑率条件間でほぼ同様の傾向を示しており、温熱環境以外の要因が温熱快適性に及ぼす影響は小さいと考えられる。したがって、少なくとも本実験で実施した、人同士の接触が生じない混雑率 180% までは、周囲の温熱環境のみの情報から温熱快適性を予測できると考えられる。

4. 温熱快適性予測モデル

前章において、夏季の通勤列車内の温熱環境に対して PMV・PPD を適用した場合、環境変動による誤差と、季節影響による誤差が生じることを確認した。その誤差の主な原因は、PMV・PPD 計算における、「定常環境のみに対応した人体熱モデル」、「夏季の特性が考慮されていない温冷感と快適性の関係式」、「定常環境下での被験者実験データに基づく回帰式」の使用にあると考えられた。これに対し、本研究では、「変動環境に対応した人体熱モデル」、「夏季の特性を考慮した温冷感と快適

性の関係式」、「通勤列車内の温熱環境（変動環境）下での被験者実験データに基づく回帰式」の利用により、予測誤差の改善を試みた。提案する温熱快適性予測モデルの全体像を図 8 に示す。温熱環境を入力値として人体熱モデルにより生理応答を計算し、次に、被験者実験データに基づいて心理応答を計算する基本的なアプローチは PMV・PPD を踏襲した。これに加え、上記の改善策を導入することで、夏季の通勤列車内の温熱快適性の特性を反映させた。以下に、提案モデルの概要を述べる。

4.1 生理応答の計算モデル

「変動環境に対応した人体熱モデル」として、本研究では田辺らが開発した「65 分割体温調節モデル」のアルゴリズムを利用した⁵⁾。当該モデルは、人体が 16 部位に分割され、さらに各部位はコア、筋肉、脂肪、皮膚の 4 層に分割されている。同じ部位の 4 層は伝導により熱交換し、人体表面の皮膚層は周囲環境と対流、放射、蒸発による熱交換を行う。また、これら 64 部位と中央血液溜まりと呼ばれる 65 番目の部位の間では血流輸送による熱交換がなされる。体温調節系には発汗・血流量調節、震え産熱があり、これらは、部位ごとに仮定された中立温度と現状値との差を制御信号としたフィードバック制御として実装されている。人体熱モデルの各パラメータ値は文献 5 を参照した。

4.2 心理応答の計算モデル

4.2.1 平均温冷感予測モデル

PMV は人体熱負荷量の関数として定義されているが、本研究では、平均温冷感を SET* と呼ばれる体感温度型の温熱指標の関数として定義した。SET* は、前述した人体熱モデルで計算される皮膚温、発汗の程度を表す皮膚ぬれ率、および皮膚表面からの放熱量が同一となるような相対湿度 50% の気温に相当する。SET* と温冷感には線形関係があることが知られている⁴⁾。また、変動環

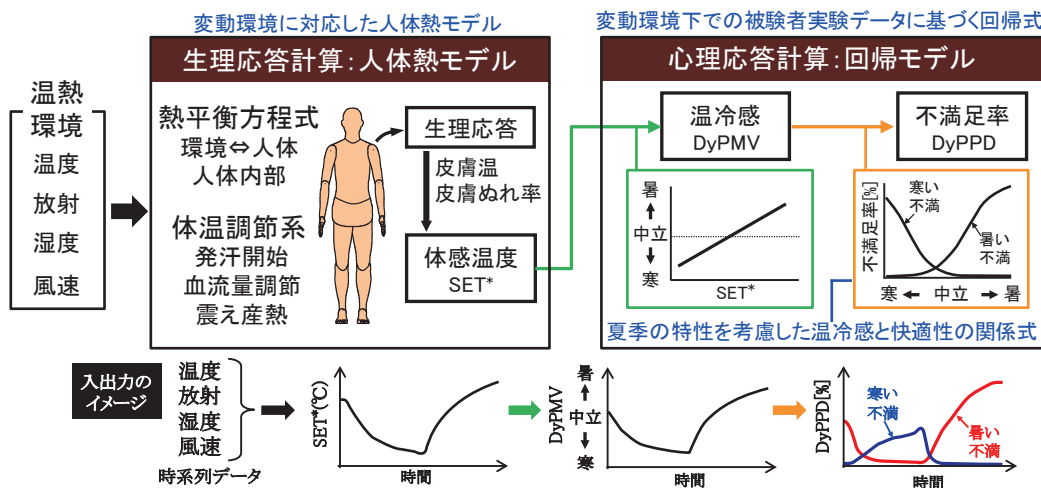


図 8 温熱快適性予測モデルの全体像

特集：人間科学

境下では SET* の変化速度も温冷感に影響すると考えられる。そこで、平均温冷感を以下の線形重回帰モデルで定義した。

$$DyPMV(t) = c + a_0 \cdot SET^*(t) + a_1 \cdot dSET^*(t)/dt \quad (1)$$

ただし、DyPMV は平均温冷感予測値、dSET*/dt (単位は℃/min) は SET* の変化速度、c, a₀, a₁ は回帰係数である。回帰係数は最小二乗法により同定される。なお、DyPMV の尺度は、本研究の被験者実験で使用した表 1 の 9 段階の温冷感尺度とした。

4.2.2 不満足率予測モデル

「夏季の特性を考慮した温冷感と快適性の関係式」として、不満足率を目的変数、温冷感を説明変数とした多項ロジスティックモデルを利用した。当該モデルでは、ある温冷感 DyPMV における、寒い不満足、または、暑い不満足を感じる人の割合を下式で表す。

$$DyPPD_c(t) = \frac{100 \cdot \exp(a_c DyPMV(t) + b_c)}{1 + \exp(a_h DyPMV(t) + b_h) + \exp(a_c DyPMV(t) + b_c)} \quad (2)$$

$$DyPPD_h(t) = \frac{100 \cdot \exp(a_h DyPMV(t) + b_h)}{1 + \exp(a_h DyPMV(t) + b_h) + \exp(a_c DyPMV(t) + b_c)} \quad (3)$$

$$DyPPD(t) = DyPPD_c(t) + DyPPD_h(t) \quad (4)$$

ただし、DyPPD_c は寒い不満足率、DyPPD_h は暑い不満足率、DyPPD は両者の合計で表わされる不満足率、a_c, b_c, a_h, b_h は回帰係数である。回帰係数は最尤法により同定される。上記モデルにより、PPD 曲線のような「温冷感が中立で最小値をとる」といった形状の仮定を設けずに、被験者実験データに基づいた曲線形状が得られる。また、PPD は「暑い不満足」と「寒い不満足」の両者が混合した値であるが、上記モデルでは各々を分離して出力できるため、より詳細な快適性予測が可能となる。

4.3 回帰係数の同定と予測精度の検証

「通勤列車内の温熱環境(変動環境)下での被験者実験データに基づく回帰式」を得るため、本研究で実施した被験者実験データを用いて式(1)～(3)の回帰係数を同定した。同定結果を表3に示す。ただし、同定に使用したのは第1回試験データのみで、第2回試験データは予測誤差の検証用とした。入力値となる温熱6要素はPMV計算時と同一とした。

得られたモデルによる時系列予測の例を図6に示す。平均温冷感、不満足率ともに、予測波形は実際の変動をよく捉えている。

被験者実験で実施した全条件での DyPMV と実測平均温冷感の関係を図7(d)に、DyPMV と実測不満足率の関係を図7(b)に示す。図7(b)には、DyPPD_c, DyPPD_h, および DyPPD 曲線も併せて示した。PMV・PPD と実測値との関係でみられた、温湿度変動による

系統的な誤差、および不満足率の最小点のずれはほぼ解消され、全条件において平均温冷感、不満足率ともに予測値と実測値はよく一致した。また、回帰係数の同定に使用していない第2回試験データに対する予測誤差は、PPDが平均で16.7ポイント、最大で46.5ポイントであったのに対し、DyPPDは平均で7.9ポイント、最大で15.2ポイントであった。これより、DyPPDはPPDに対して平均誤差は8.8ポイント、最大誤差は31.3ポイント改善されたといえる。

表3 回帰係数の同定結果

DyPMV	c	a ₀	a ₁	
	-12.3	0.49	0.53	
DyPPD	a _c	b _c	a _h	b _h
	-1.23	-3.27	1.15	-1.28

5. まとめ

夏季の通勤列車を対象として、温湿度測定調査、および温熱環境の被験者実験を実施した。また、被験者実験で取得した環境データおよび主観評価データを基に、夏季の通勤列車内の温熱快適性予測手法を新たに開発した。当該手法の有効性は、人同士の接触が生じない混雑率180%相当の混雑環境まで確認しており、既存の一般室内環境用の温熱快適性指標であるPPDと比較して、平均誤差は8.8ポイント、最大誤差は31.3ポイント改善された。

今後は、年間を通じた精度の高い温熱快適性予測の実現に向けて、他の季節においても、車内温熱快適性の調査・研究を進めていきたい。

文献

- 1) 白石, 酒井: 車内環境向上を目指した空調システム, 三菱電機技報, Vol.18, No.10, pp.27-30, 2007
- 2) 林, 島宗, 長谷川, 遠藤, 大江: 鉄道車両内の温熱環境の再現と評価, TRANSLOG2013 講演論文集, pp.47-50, 2013
- 3) ISO7730: Ergonomics of the thermal environment—Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, International Standard Organization, 1995.
- 4) 深井, 伊藤, 後藤, 阿久井, 斎藤: 標準新有効温度 (SET*) と日本人の温熱感覚に関する実験的研究 第2報 - 冬季および夏季における温熱感覚の比較, 空気調和・衛生工学論文集, No.51, pp.139-147, 1993
- 5) 田辺, 中野, 小林: 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, No.541, pp.9-16, 2001