

優等列車内において乗客が感じる 温熱快適性の季節差の研究

遠藤 広晴* 菊地 史倫* 斎藤 綾乃*
伊積 康彦** 林 伸明***

The Study on the Seasonal Characteristics of Thermal Comfort Felt by Passengers in a Main Line Vehicle

Hiroharu ENDOH Fumitoshi KIKUCHI Ayano SAITO
Yasuhiko IZUMI Nobuaki HAYASHI

In this study, the seasonal characteristics about the relation between the thermal environment and the thermal comfort felt by passengers in a main line vehicle were investigated. First, to understand the characteristics of the thermal environment in a main line vehicle, field surveys were conducted by measuring the temperature and humidity in regular passenger services. Then, to obtain the fundamental data about the thermal comfort felt by passengers, subjective experiments were carried out. As a result, it was indicated that in order to evaluate the thermal comfort felt by passengers correctly all the year around, the seasonal characteristics of thermal comfort should be taken into account.

キーワード：車内温熱，快適性，季節差，優等列車，PMV/PPD

1. はじめに

優等列車内の温熱環境は、乗客が感じる快適性の重要な要因の一つである。他の快適性要因である振動や騒音は、その低減が課題となるのに対し、温熱環境の要素である温度や湿度は、高すぎても低すぎても不快となるため、多くの乗客が不快と感じない最適な温熱環境の実現が課題となる。そのためには、車内温熱環境と乗客の快適性の関係を的確に把握することが第一に重要となる。

温熱環境と快適性の関係については、建築分野で古くから研究が行われており、居住者の温冷感や温熱快適性を予測・評価する指標として「予測平均温冷感申告 (Predicted Mean Vote)」（以後、「PMV」）および「予測不満足率 (Predicted Percentage of Dissatisfied)」（以後、「PPD」）が提案されている¹⁾。現在、PMV/PPDは、建物室内の最適な温熱環境の実現のために広く利用されている。一方、列車内の温熱環境と快適性の関係に関しては、関連する知見が少なく、乗客の快適性の観点から車内温熱環境を予測・評価する指標は未だ確立されていない。

筆者らは先行研究において、夏季の通勤列車内および冬季の優等列車内の温熱環境と快適性の関係を被験者実験により調査した^{2) 3)}。両実験結果の比較により、季節による服装の違いを考慮しても、温熱環境と快適性の関

係には季節差があることが示唆された。ただし、両実験結果の相違には、季節差の他、車種の相違（通勤列車と優等列車の各々の温熱環境に対して乗客が持つ期待値の相違等）も影響している可能性があり、同一車種での実験による検証が課題であった。

そこで、本研究では、夏季の優等列車内の温熱環境と快適性の関係を被験者実験により新たに調査し、冬季の優等列車内の被験者実験³⁾の結果と比較することで、温熱快適性の季節差を検証した。また、両実験結果とPMV/PPDとの比較により、PMV/PPDの優等列車への適用可能性を検証した。さらに、夏季における優等列車内および通勤列車内の被験者実験²⁾の結果を比較することで、温熱快適性への車種の影響を検証した。

2. 営業列車の温熱環境測定調査⁴⁾

調査対象とする夏季の優等列車内の温熱環境に関する知見を得るために、2013年、2014年および2015年の夏季に、営業運転中の優等列車内の温湿度を測定した。測定時間帯は朝一昼間（例：9:50乗車，12:20降車）、昼一夕方間（例：12:40乗車，16:00降車）、ター夜間（例：19:40乗車，23:00降車）とし、様々な外気環境での車内温熱環境を測定した。乗車時間は1走行あたり2～3.5時間程度、走行回数（測定回数）は計30回（2013年：14回，2014年：8回，2015年：8回）であった。

* 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

特集：人間科学

2.1 測定方法

事前調査として、車両基地の検修庫内に留置された車両内（営業列車と同一の車両形式）において、温熱環境の空間分布を測定した。その結果、車内温度の最低値は車両中央付近で、最高値は車端付近で観測された。本調査では、測定対象車両内で生じ得る温湿度範囲を効率的に把握するため、これら2箇所を主に測定した。

測定者は温湿度計を測定箇所分用意し、営業運転中の優等列車に乗車した。車端と車両中央部の座席に着座し、乗客の胸部高さ付近を測定するために座席テーブル上（床上高さ約0.8m）、足元付近を測定するために床上高さ約0.1mに温湿度計を設置した。また、座席卓上の風速も測定した。車内温度は熱電対（sensor：LR9692, logger：LR5021, Hioki）、湿度は高分子膜抵抗（sensor：TR-3110, logger：TR72Ui, T&D）、風速は熱線式風速計（sensor：6542, logger：6500, Kanomax）により記録した。

2.2 測定結果

車内温湿度の測定結果の例を図1に示す。1走行中ほぼ一定の温湿度が継続するか、または、1時間に2～3℃、10～20%程度の緩やかな変動となることが多かった（例1、車端部）。ただし、外気温や車内混雑度の状況により、20～30分間に3～4℃程度の比較的速い温度変動が生じる状況も観測された（例2、車両中央部）。

乗車中に座席卓上で記録した温湿度範囲を図2に示す。図中の楕円は車端および車両中央部に関して、1分間平均温湿度の95%信頼区間（以後、「95%CI」）を描いたものである。車両中央部の温度範囲は、車端と比較して1～2℃低く、湿度範囲は両者ともほぼ同様であった。車内全体でみると、車内温度は概ね23～28℃、車内湿度は38～68%であった。

上下温度差（足部～頭部間の気温差）に関しては、3℃を超えると不均一感による不快感が生じることが知られているが¹⁾、本調査で観測された車内の上下温度差はほぼ3℃以内であった。なお、卓上で測定した風速は0.15～0.20m/sで概ね一定であった。

3. 実車両を用いた被験者実験⁴⁾

3.1 実施時期・被験者・装置

実験は2014年8月25日の午後（以後、「第1回試験」）および9月3日の午後（以後、「第2回試験」）に実施した。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11人、女性11人の計22人（年齢20～53歳、平均33.5歳）、第2回試験は男性10人、女性12人の計22人（年齢20～57歳、平均32.6歳）であった。被験者は第1回試験または第2回試験のいずれかに参加し、重複して

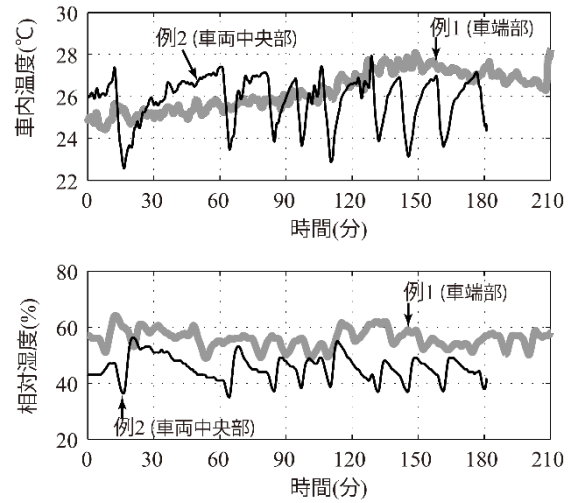


図1 温湿度測定結果の例（座席卓上）⁴⁾

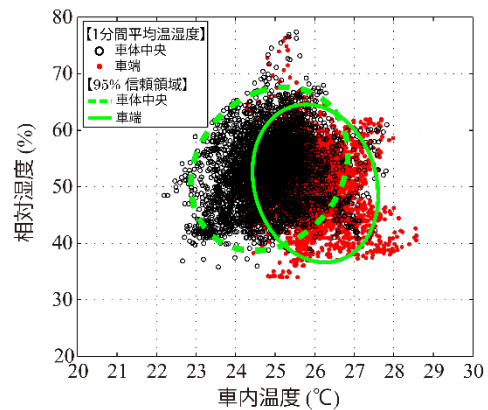


図2 温湿度観測領域（座席卓上）⁴⁾

参加することはなかった。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。

実験で用いた車両は、車両基地の検修庫内に留置され、直射日光が当たらない環境にあった。当該車両は2章の営業列車調査と同一の車両形式であり、空調設備も同一であった。

3.2 方法

3.2.1 実験方法

(1) 環境条件

本実験では、営業列車調査時と同様に約3時間の乗車を想定し、その時間内に図2で確認した温度範囲を被験者が体感するように、車両空調の設定温度を調節した。初期温度は、被験者が平均的に暑くも寒くもない温冷感になるように、既往研究⁵⁾を参考に24℃付近に設定した。前半は初期温度から段階的に28℃程度まで上昇させ、後半は初期温度から20℃程度まで段階的に下降させた。前半と後半の間には、車内での休憩を10分程度設けた。

(2) 被験者配置・姿勢・着衣

被験者は3人座席の中央部または2人座席の通路側に着座し、座席背もたれの角度等を各自で調整して、実際の優等列車利用時と同様の姿勢となるようにした。また、着衣量を統一するため、下着以外は同じ服（半袖Tシャツ、長袖シャツ、長ズボン、靴下）および靴（スニーカー）を着用した。実験中の被験者の様子を図3に示す。

(3) 環境測定

各被験者周囲の温湿度環境を把握するため、3人座席の通路側席、床上高さ1.1m（両脇に被験者が着座した11箇所）の気温と湿度を熱電対（sensor：LR9692, logger：LR5021, Hioki）および高分子膜抵抗（sensor：TR-3110, logger：TR72Ui, T&D）により記録した。また、車内中央部と車端部付近で、床上高さ0.1m, 0.6m, 1.1mの気温と風速をサーミスタ（sensor：TR1106, logger：TR71, T&D）および熱線式風速計（sensor：6542, logger：6500, Kanomax）により記録した。

(4) 主観評価

被験者は、3分間隔で温冷感、発汗感、満足度等に関する主観評価を行った。主観評価項目と評価尺度は、既往研究⁵⁾を参考に表1のようにした。主観評価にあたり、被験者には音やにおい等の温熱環境以外の要因を評価対象にしないよう教示した。また、満足度に関しては、優等列車内の温熱環境として満足できるかできないかを回答するように教示した。



図3 被験者実験の様子⁴⁾

表1 主観評価項目と尺度の例

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
発汗感	【4段階】0：感じない，1：やや感じる，2：感じる，3：非常に感じる
満足度	【2段階】満足できる，満足できない

表2 PMV尺度¹⁾

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

3.2.2 PMV/PPDの概要と算出方法

人の温熱感覚に影響を及ぼす環境側の要素には「気温」、「湿度」、「放射温度」、「気流」があり、人側の要素には「代謝量」、「着衣量」がある。PMVは、これら6つの温熱要素（以後、「温熱6要素」）の全てを考慮した指標であり、表2に示す7段階尺度の温冷感の予測値である。温熱6要素による人体の熱負荷を熱平衡式により計算し、さらに、その熱負荷と被験者実験での温冷感評価値とを結びつけた回帰式により計算されるものである⁶⁾。したがって、周囲環境から人体が受ける熱負荷が等しければ、温熱6要素の組み合わせが異なる環境でも同一のPMVとなる。

PPDはPMV尺度での「-3: cold」、「-2: cool」、または「+2: warm」、「+3: hot」の回答者を合わせて「不満足者」と定義した上で、全体に対する「不満足者」の割合を予測するものである。PPDはPMVにより式(1)で表される。

$$PPD=100-95 \cdot \exp\{-(0.03353PMV^4+0.2179PMV^2)\} \quad (1)$$

上式は、PPDがPMV=0（中立）で最小（5%）となり、そこから暑い側／寒い側へ離れるほど不快が増大する特徴を表している（PMVに対するPPDの曲線形状は図6参照）。なお、PMV/PPDが導出された被験者実験は、温熱環境が全身均一かつ定常環境下で行われ、また、実施された主な季節は秋季～冬季であった⁶⁾。

PMV/PPDの計算はISO7730のプログラム¹⁾を使用した。入力となる温熱環境要素は、主観評価時の各センサーの測定平均値とした。被験者の代謝量は着座安静時に相当する1.0met（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）、着衣量は0.66clo（cloは衣服の熱抵抗の単位で1clo=0.155°C m²/W）で統一した¹⁾。

3.2.3 温熱快適性の季節差・車種の影響の検証方法

本研究および先行研究で実施した実験では、季節により着衣量が異なり、また、車種により被験者の姿勢が異なるため（優等列車は着座、通勤列車は立位）、同一車内温度でも、実験により被験者が受ける熱負荷は異なる状況にあった。温熱快適性への季節および車種の影響を検証するためには、異なる季節・車種で行われた実験結果を比較する必要があるが、この比較においては、被験者への熱負荷が同等な条件で主観評価結果を比較すべきである。そこで、本研究では、温熱6要素により人体が受ける熱負荷に基づくPMVを利用して、異なる実験間の温熱環境と快適性の関係を比較する。

3.3 結果

3.3.1 環境測定結果

各センサーで測定した、温湿度の時系列波形の平均値を図4に示す。被験者は営業列車調査で観測した車内温

特集：人間科学

度範囲 (23 ~ 28℃付近) を含む, 21 ~ 29℃付近の車内温度を実験中に体感した。なお, 被験者滞在領域での同一時刻の車内温度差は 1 ~ 2℃程度, 湿度差は 5% 程度であった。また, 床上 0.1m, 0.6m, 1.1m 間の上下温度差は, 営業列車調査と同様ほぼ 2℃以内であった。風速に関しても上下位置による相違は小さく, 0.20m/s 程度の定常的な風速であった。

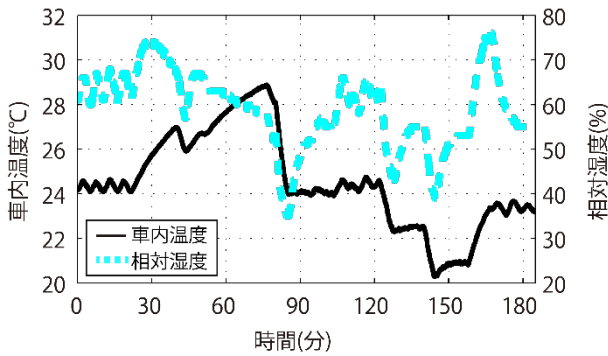


図4 温湿度測定結果例 (第2回試験)

3.3.2 主観評価結果

(1) 時系列変動

温冷感評価における被験者平均値 (以後, 「平均温冷感」) を図 5(a) に, 発汗感評価における「感じない」以外の回答率 (以後, 「発汗感率」) を図 5(b) に, 温冷感評価における「-3: やや寒い」, 「-4: 寒い」または「+3: やや暑い」, 「+4: 暑い」を合わせた回答率 (以後, 「寒暑感率」) を図 5(c) に, 満足度評価における「満足できない」の回答率 (以後, 「不満足率」) を図 5(d) に示す。図 5(a) には PMV, 図 5(c), 図 5(d) には, PPD も併せて示した。

平均温冷感に関しては, 試験開始時に「0: 中立」付近だったものが, 前半の温度上昇では「+2: 暖かい」程度, 後半の温度下降では「-3: やや寒い」程度まで車内温度変化に対応して変化した。なお, PMV は前半, 後半共に平均温冷感と変動傾向がよく一致した。発汗感率に関しては, 試験開始時に 10% 程度だったものが, 前半の温度上昇では 60 ~ 70% 程度まで増大したが, 後半の温度下降では 0% となった。寒暑感率に関しては, 開始時は 0 ~ 10% 程度で, 前半の温度上昇では 40 ~ 50%, 後半の温度下降では, 60 ~ 70% 程度まで増大した。なお, 前半の温度上昇, 後半の温度下降で共に, PPD は寒暑感率の 95%CI 内となる状況が多くみられた。不満足率に関しては, 開始時は 20% 程度で, 前半の温度上昇では発汗感率, 後半の温度下降では寒暑感率と類似した変動を示し, 共に 60% 程度まで増大した。なお, 前半の温度上昇において, PPD は不満足率の 95%CI 下限から外れる状況が多くみられた。これらの特徴は第 1 回および第 2 回試験で共通し, 再現性があった。

(2) PMV との関係

図 6(a) に PMV と平均温冷感との関係を示す。両者には高い相関 ($r=0.96, p<0.01$) がみられた。同図には, PMV を説明変数, 平均温冷感を応答変数として回帰分析した結果も併せて示した。回帰直線はほぼ原点を通り (切片 = 0.00, 95%CI [-0.07, 0.08]), PMV=0 は平均温冷感が「0: 中立」となる環境によく対応していた。

図 6(b) に PMV と発汗感評価における「感じない」以外の回答率 (以後, 「発汗感率」) の関係を示す。同図には, PMV を説明変数, 発汗感率を応答変数としてロジスティック回帰分析を行った結果も併せて示した。発汗感率は PMV=-0.5 付近から立ち上がり, PMV=0 では被験者の 20% 程度が発汗を感じる傾向がみられた。

図 6(c) に PMV と寒暑感率との関係を示す。同図には, 式 (1) の PPD 曲線を併せて示した。寒暑感率は PPD と同様, PMV=0 に対して対称的に分布する傾向がみられ, 比較的良好に一致した。寒暑感率に対する PPD の平均二乗誤差の平方根 (以後, 「RMSE」) は 9.8%pt であった。

図 6(d) に PMV と不満足率との関係を示す。同図には, 式 (1) の PPD 曲線を併せて示した。PPD が PMV=0 で最小値を取るのに対し, 不満足率は PMV が -1 ~ 0 の間で最小となる傾向がみられた。また, PMV<0 では寒暑感率, PMV>0 では発汗感率と類似した傾向を示した。不満足率に対する PPD の RMSE は 20.4%pt であり, 特に PMV>0 で誤差が大きく, 最大で 44.3%pt となった。

3.4 考察

3.4.1 温冷感および温熱快適性の季節差

冬季の優等列車内での被験者実験³⁾ で得られた PMV と主観評価の関係を図 6 に示す。図 6(a) より, PMV と平均温冷感の関係は夏季と冬季でほぼ同一であることが確認できる。これより, 被験者への熱負荷条件が同じであれば, 温冷感には季節差が無いことが示唆された。

一方, 図 6 (d) より, PMV と不満足率の関係は, 夏季と冬季で異なる傾向がみられた。これより, 被験者への熱負荷条件が同じでも, 温熱快適性には季節差があることが示唆された。温冷感には季節差が確認されなかったことから, 温冷感以外の感覚が温熱快適性の季節差に影響したと考えられる。温熱快適性には温冷感の他, 発汗による皮膚の濡れ感も影響することが知られている。また, 夏季は, 発汗が他の季節と比較して低い温度で発現し, 汗量が増加することが知られている⁷⁾。図 6(b) は, 冬季よりも夏季の方が同一熱負荷条件に対する発汗感率が高い傾向を示しており, 既往の知見と整合する。被験者への熱負荷条件が同じ温熱環境でも, 発汗による皮膚の濡れ感を相対的に強く感じる夏季では, 冬季よりも不快感が増大したと推察される。

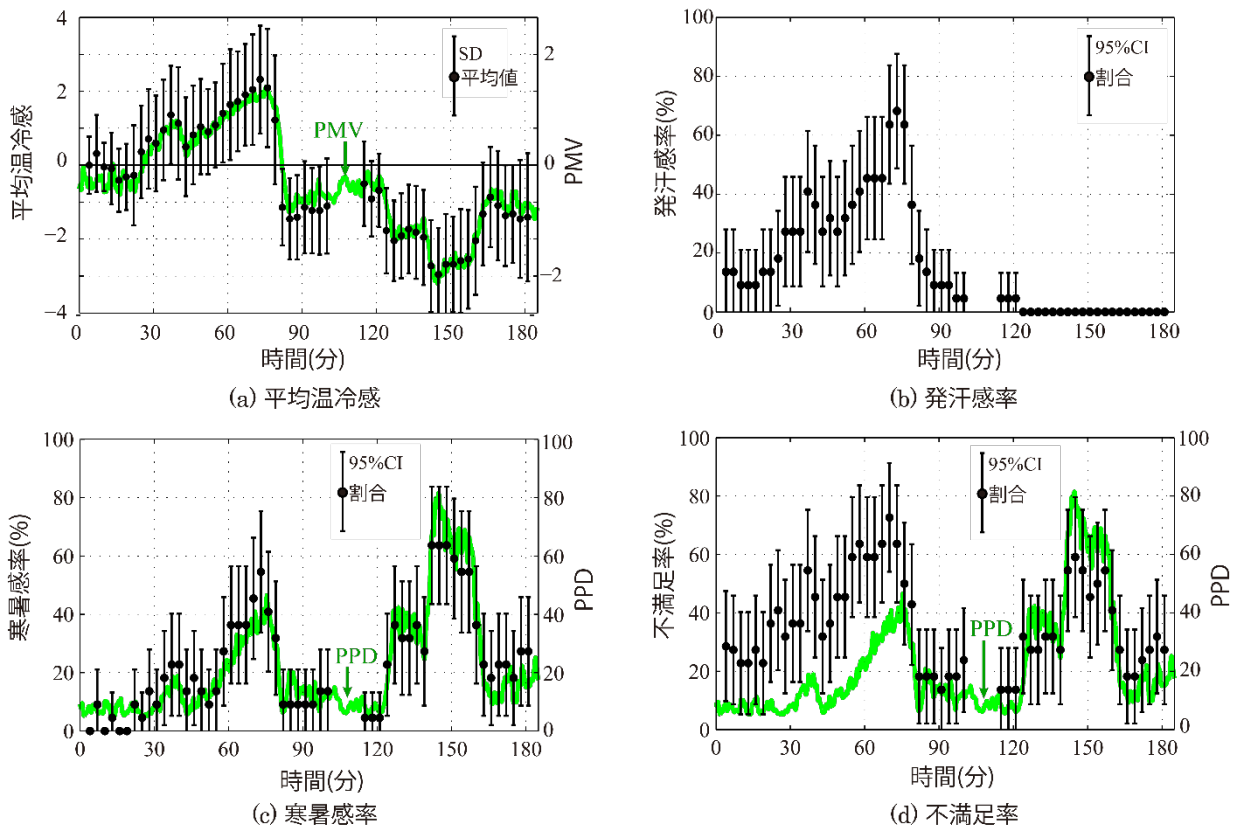


図5 主観評価の時系列の例 (第2回試験)⁴⁾

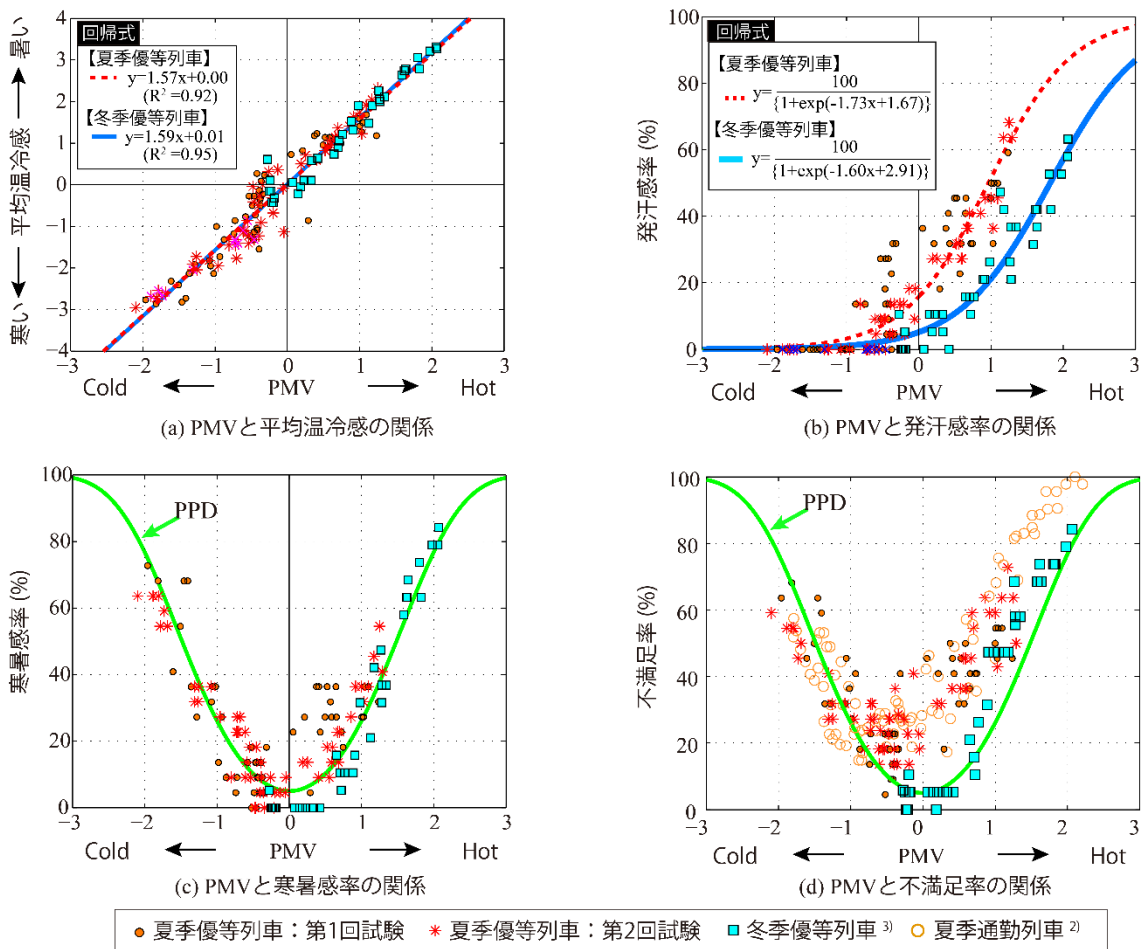


図6 PMVと主観評価の関係⁴⁾

3.4.2 温熱快適性への車種の影響

夏季の通勤列車内での被験者実験²⁾で得られた、PMVと不満足率の関係を図6(d)に示す。なお、満足度に関しては「通勤列車内の温熱環境として満足できるかできないか」を回答するよう教示し、通勤列車内の温熱環境に対して持つ乗客の期待値が反映されるようにした。図6(d)より、優等列車内と通勤列車内とでPMVと不満足率の関係はほぼ同一であることが確認できる。これより、被験者への熱負荷条件が同じであれば、車種による温熱快適性への影響は小さいことが示唆された。現在日本では、通勤列車を含む様々な公共交通機関で冷暖房の提供が当たり前のサービスとなり、車種を問わず不快の少ない温熱環境が乗客から期待されていると推察される。

3.4.3 PMV/PPDの年間を通した適用可能性

図6(a)に示すように、夏季・冬季共に、平均温冷感とPMVの関係は高い相関を持ち、かつ両季節でほぼ同一の傾向をもつことから、PMVは年間を通して優等列車内の乗客が感じる温冷感の予測指標として適用可能であると考えられる。ただし、PMV/PPDは温湿度変動の少ない定常環境用に構築された指標であるため、通勤列車内のような温湿度変動の大きい環境への適用に関しては更なる検証が必要である。

不満足率に対するPPDの予測誤差のRMSEは、夏季は20.4%pt、冬季は11.0%ptであり、夏季では予測精度が悪化した。PMV/PPDが導出された実験は主に秋季～冬季に行われていることから⁶⁾、夏季におけるPPDの予測精度の悪化は、3.4.1で確認した温熱快適性の季節差が主な要因と推察される。なお、PPDは「満足度」の回答結果から直接導出されたものではなく、「温冷感」の回答結果から間接的に導出されたものであり、本研究で定義した「寒暑感率」に相当する。図6(c)より、寒暑感率に対しては、夏季・冬季共にPPDの予測精度が高いことが確認できる（PPDのRMSE：夏季は9.8%pt、冬季は6.5%pt）。したがって、PPDの導出過程から考えると、PPDは正確には「予測不満足率」ではなく「予測寒暑感率」を表していると考えられる。

以上より、PPDは、その導出過程通りに「寒暑感率」の予測指標として解釈した場合は、年間を通して適用可能であるが、「不満足率」の予測指標としては、年間を通した適用は適切でないと考えられる。乗客の快適性を的確に表現するのは、「寒暑感率」よりむしろ、温熱環境への満足度を表す「不満足率」である。より快適な車内温熱環境を実現するためには、乗客が不快となる状況を明らかにすることが第一に重要であり、発汗特性の季節変化等の季節影響を考慮した車内温熱快適性指標の構築が必要である。

4. まとめ

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- 夏季および冬季における優等列車内の被験者実験により、被験者への熱負荷条件が同じであれば、温冷感に季節差は無いが、温熱快適性には季節差があることが示唆された。温熱快適性の季節差の要因の一つとして、季節による発汗特性の相違が推察された。
- 夏季における通勤列車内および優等列車内の被験者実験により、被験者への熱負荷条件が同じであれば、車種による温熱快適性への影響は小さいことが示唆された。
- 既存の温熱指標PMV/PPDの優等列車内温熱環境への適用可能性を検証した結果、PMVは平均温冷感の予測指標として適用可能であるのに対し、PPDは寒暑感率の予測指標としては年間を通して適用可能であるが、不満足率の予測指標としては、夏季において誤差が大きいため、年間を通した適用は適切ではないことが示唆された。

今後は、春季および秋季においても、本研究と同様の被験者実験を実施し、温熱快適性の季節差についてより詳細な検討を行う。また、これら実験で得られた知見を基に、季節影響を考慮した車内温熱快適性予測指標の構築を目指す。

文献

- 1) 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.
- 2) 遠藤広晴ほか：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
- 3) 遠藤広晴ほか：冬季の優等列車内における温熱快適性に関する被験者実験，鉄道総研報告，Vol.30, No.9, pp.29-34, 2016
- 4) 遠藤広晴ほか：鉄道車両における乗客の温熱快適性に関する実験的研究，日本機械学会論文集，Vol.83, No.854, 17-00089, 2017
- 5) 深井一夫ほか：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
- 6) Fanger, P.O.: Thermal comfort, McGraw-Hill, 1972.
- 7) 中山昭雄編：温熱生理学，理工学社，1981