

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

遠藤 広晴* 菊地 史倫* 伊積 康彦**
辻村 壮平*** 林 伸明#

Experimental Study on the Characteristics of Thermal Comfort in a Main Line Vehicle in Winter

Hiroharu ENDOH Fumitoshi KIKUCHI Yasuhiko IZUMI
Sohei TSUJIMURA Nobuaki HAYASHI

In this paper, the relationships between the thermal environment and thermal comfort in a main line vehicle in winter were reported. At first, in the field measurement, temperature and humidity in main line vehicles in regular passenger services were measured and their observational ranges were investigated. And then, a subjective experiment was conducted in a main line vehicle at a standstill. In the experiment, the subjects taking on the same clothes sat on the seat and answered the questions about thermal comfort. Based on the results, the regression equations of thermal comfort on the thermal index (SET*) were derived and the comparisons with the summer experiment in a commuter train were made.

キーワード：車内温熱，快適性，優等列車，被験者実験，SET*

1. はじめに

列車内の乗客が感じる快適性には様々な要因が影響しているが、車内温熱環境はその重要な要因の一つである¹⁾。快適な温熱環境の実現のためには、十分な冷暖房能力をもつ空調設備と、乗客の快適性を考慮した空調制御が不可欠である。一方で、空調の冷暖房能力や制御能力は年々向上し続けるのに対し、乗客の温熱快適性に関しては、これまでの調査・研究例が少なく、十分な知見がないというのが現状である。列車内が「暑い」、「寒い」といった乗客からの不満の声は未だ多く寄せられており、現状改善のためには、快適性の観点から車内温熱環境を適切に評価し、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る。本研究の目的は、そのための評価手法を開発することである。

本稿では、この研究の一環として、冬季暖房時の優等列車を対象に実施した、営業列車内の温湿度測定調査および定置車両内での被験者実験の結果概要を報告する。また、筆者らが先行研究で実施した、夏季冷房時の通勤車両内での被験者実験²⁾（以後、「夏季通勤実験」）の結果と比較し、温熱快適性への季節影響の有無やその要因について検討する。

2. 営業列車内の温湿度測定調査³⁾

2014年2～3月に、営業運転中の優等列車内の温湿度測定調査を実施した。乗車時間は1回あたり約3時間（朝の時間帯の例：7:30～11:00、夜の時間帯の例：17:40～21:00）で、乗車回数（測定回数）は計10回であった。

2.1 測定方法

事前調査において、定置車両内での温熱環境の空間分布を測定した。その結果、最高気温は車両中央付近で、最低気温は車端付近で観測された。本調査では、冬季優等列車内で生じ得る気温の範囲を把握するため、これら2箇所を測定した。

測定者は温湿度計を入れたポーチ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、床上、座席テーブル上、荷棚上にポーチをセットした。それぞれの床上高さは約0.1m, 0.8m, 1.7mである。気温は熱電対（sensor：LR9692, logger：LR5021, Hioki）により1秒間隔で記録し、湿度は高分子膜抵抗式測定器（sensor：TR-3110, logger：TR72Ui, T&D）により5秒間隔で記録した。

2.2 測定結果

測定結果の例を図1に示す。例Aでは、気温は26℃付近を微小変動し、湿度は20%rhから40%rhへ緩やかに変動していた。例Bでは、湿度は20%rh程度で概ね

* 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
*** 構造物技術研究部
東日本旅客鉄道株式会社

特集：人間科学

一定であったが、気温は乗車時の24℃程度から上昇傾向にあり、28℃を超えることもあった。例Bのような温度上昇は全10回の乗車のうち4回観測された。

図2に、座席テーブル上で測定した温湿度の観測領域を示す。図中の各点は、1分間の気温と湿度の平均値、楕円はその95%信頼領域である。今回の測定調査での平均気温は25.9℃、平均湿度は23.6%rh、95%信頼領域は、気温は23.8～28.0℃、湿度は5.6～41.7%rh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⁴⁾、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。

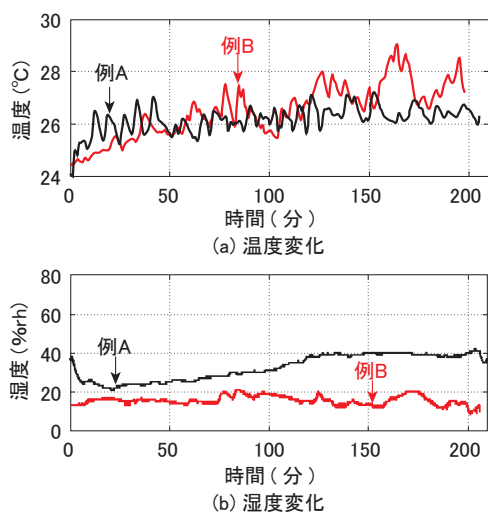


図1 営業列車内の気温と湿度の測定結果の例³⁾

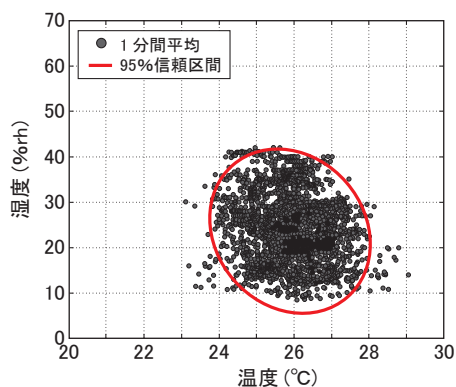


図2 営業列車内の気温と湿度の観測領域³⁾

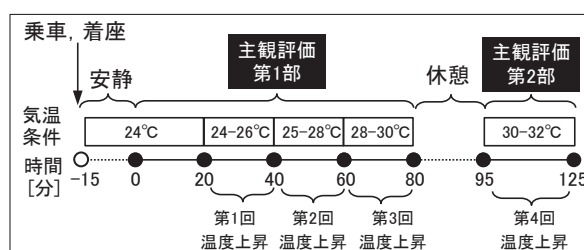
3. 実車両を用いた被験者実験

2014年2月に、留置された優等車両内で温熱環境の体感実験を実施した。実験中の天気は雨で、車外の気温は10.4～13.1℃、湿度は67～87%rh、日射量は0.006～0.010kW/m²であった。参加した被験者は25～56歳（平均40.2歳）の鉄道関係者19名（男性9名、女性10名）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 環境条件および実験スケジュール

事前調査により、優等列車内の気温は概ね24℃以上となることが推察された。そこで、本実験では、温度上昇場面を想定して、車内の平均気温が24℃付近から段階的に上昇するように空調の設定温度を調節した（図1の例Bに対応）。また、営業列車内の気温範囲を包含した、より広い範囲での温熱快適性に関する知見を得るため、実際の営業列車内より高い気温条件も実施した。実験スケジュールを図3に示す。被験者には乗車後15分の安静時間を設けた。その後、主観評価を3分間隔で繰り返した。実験の途中に約15分の休憩を設けた。



※ 時刻0分は主観評価開始時刻に相当

図3 実験スケジュール概要³⁾

3.1.2 環境測定

営業列車の測定調査と同様、被験者が着座した座席テーブル上に温湿度計を配置した。気温は熱電対（sensor: LR9692, logger: LR5021, Hioki）により1秒間隔で記録し、湿度は高分子膜抵抗式測定器（sensor: TR-3110, logger: TR72Ui, T&D）により5秒間隔で記録した。

気温の上下分布を把握するために、車端および車両中央付近で、床上高さ0.1m、0.6m、1.1mにサーミスタ式温度計（sensor: TR1106, logger: TR71, T&D）を配置し5秒間隔で記録した。周囲壁からの熱放射の強さを推定するため、車両中央付近の床、側壁、天井の表面温度を熱電対により1秒間隔で測定した。

3.1.3 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、下着以外の被験者の服装を統一した。実験中の被験者の様子を図4に示す。

3.1.4 主観評価

被験者は、温冷感、気温に対する要求（以後、「温度要求」と記述）、発汗感、および満足感等に関する主観評価を行った。主観評価項目とその評価尺度を表1に示す。なお、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としないよう教示した。さらに、満足感に関しては、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4 被験者実験の様子⁵⁾

表1 実験で使った主観評価尺度⁵⁾

温冷感	「-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」の9段階
温度要求	「温度を上げて欲しい」, 「このままでよい」, 「温度を下げて欲しい」の3段階
発汗感	「感じない」, 「やや感じる」, 「感じる」, 「非常に感じる」の4段階
満足感	「満足できる」, 「満足できない」の2段階

3.2 分析方法

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⁶⁾。これら温熱6要素の全てを考慮できる指標として標準新有効温度 Standard New Effective Temperature (以後, 「SET*」)がある。SET*は「温熱生理状態(皮膚温, 発汗)および放射熱が実在環境におけるものと同等になるような相対湿度50%の標準環境の気温」(単位は℃)と定義され⁷⁾, 人体と周囲環境との熱交換や人体内部の体温調節系が考慮された数理モデル(以後, 「人体熱モデル」)を基に計算される。人への熱的影響が等しければ, 温熱6要素の組合せが異なる環境でも同一のSET*となる。

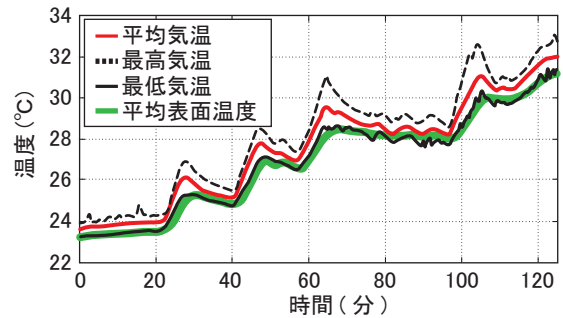
SET*は建物室内のような温湿度がほぼ一定の定常的な温熱環境用に開発されたが, 近年, 人体周囲の温熱環境が大きく変動する非定常温熱環境(例えば, 屋外移動時⁸⁾等)への適用も試みられている。筆者らも, 先行研究において, 非定常温熱環境用の人体熱モデルを基に計算したSET*(定常環境用のSET*と区別するため, 以後「DySET*」と記述)を利用して, 夏季の通勤列車内に適用可能な快適性予測手法(以後, 「夏季通勤手法」)を提案した²⁾。本稿でも同様に, DySET*を利用して冬季優等車両内の温熱環境と人の温熱快適性との関係を把握する。また, DySET*と温熱快適性の関係について, 夏季通勤実験の結果と比較する。

3.3 実験結果

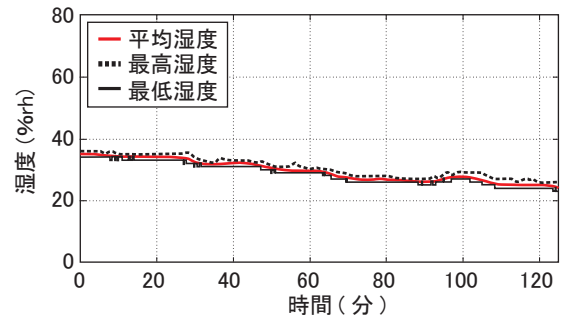
3.3.1 環境測定結果

座席テーブル上で測定した温湿度の時系列変化を図5に示す。被験者が滞在した領域では, 気温差は1~2℃

程度, 湿度差は5%rh程度であった。図5(a)には, 床面, 側面, 天井面温度の平均値(平均表面温度)を描いた。平均表面温度は測定気温の平均値と概ね同様であり, 放射温度は気温とほぼ等しいと見なせる環境にあった。床上0.1m, 0.6m, 1.1mの気温を図6に示す。実験中の上下温度差は3℃以内であった。



(a) 温度変化



(b) 湿度変化

図5 車内の気温, 表面温度, 湿度

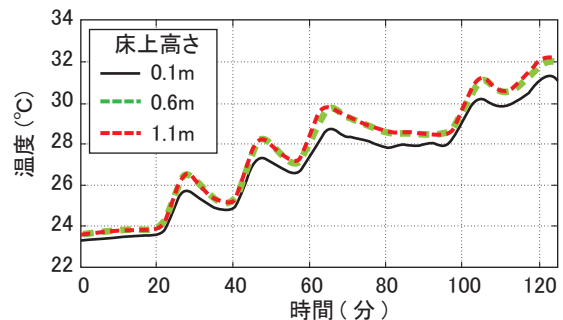


図6 床上0.1m, 0.6m, 1.1mの気温

3.3.2 主観評価結果

(1) 時系列変動

各主観評価の時系列変化を図7に示す。温冷感は評価平均値(以後, 「平均温冷感」), 温度要求は「温度を下げて欲しい」/「温度を上げて欲しい」の申告率(以後, 「温度下げ申告率」/「温度上げ申告率」), 発汗感は「感じない」以外の申告率(以後, 「発汗感申告率」), 満足感は「満足できない」の申告率(以後, 「不満足申告率」)を示した。

平均温冷感は実験開始後20分以降の温度変動によく対応した変化を示した。その他の主観量は, 実験開始後40分以降の26℃からの温度上昇においてより明確な変

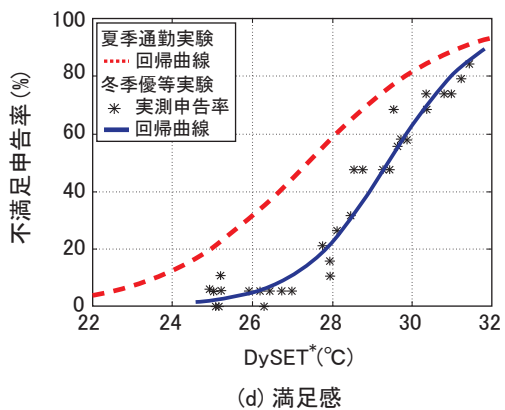
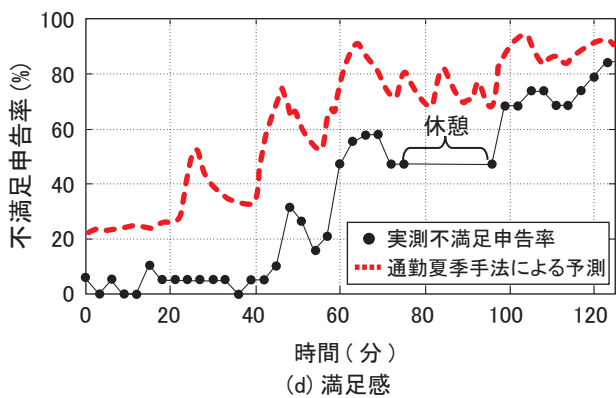
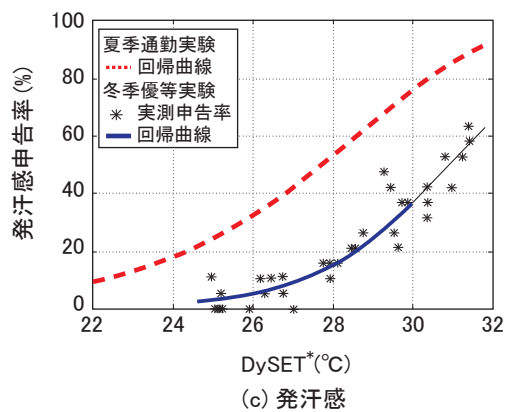
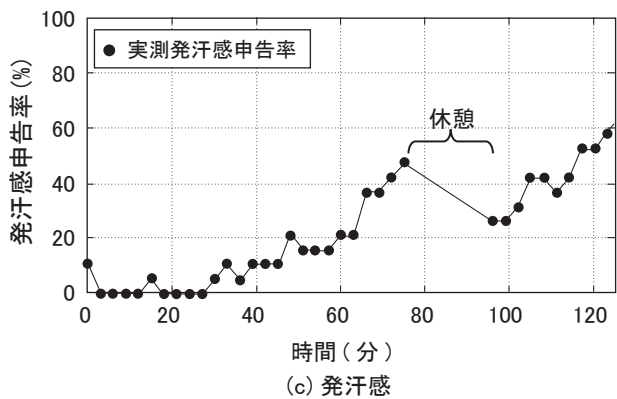
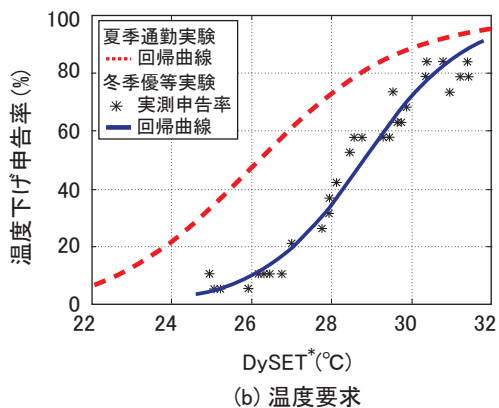
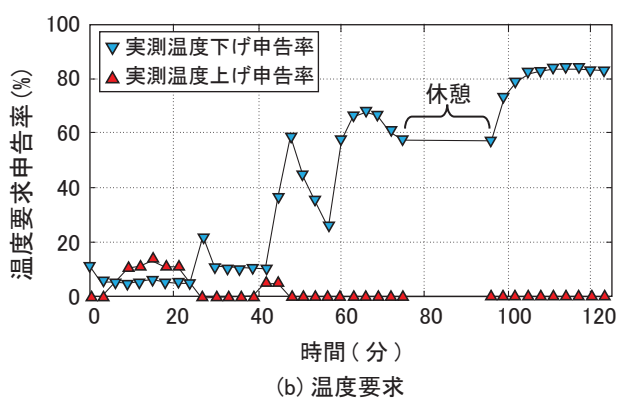
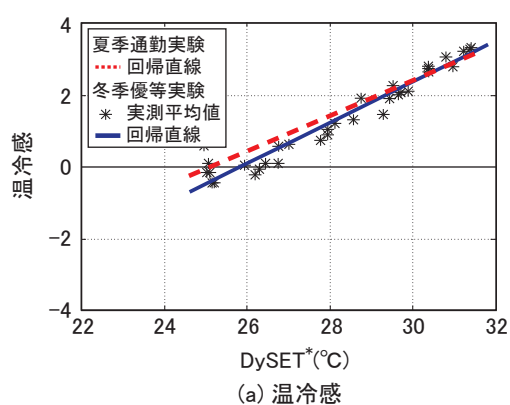
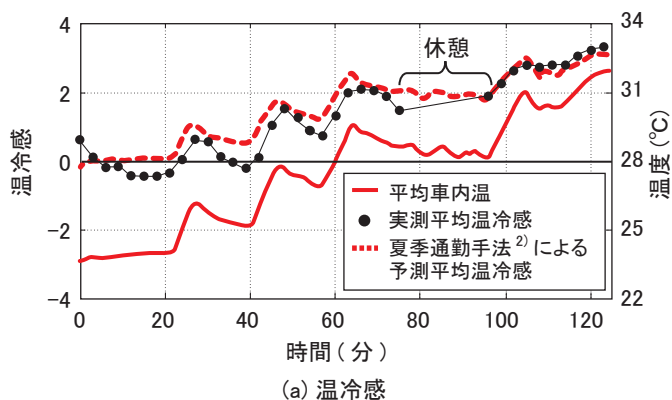


図7 主観評価の時系列変化

図8 DySET*と主観評価の関係

化を示した。26℃から28℃付近への温度上昇（開始後40分から60分付近）では、特に温度下げ申告率が10%から60%へ急激に上昇した。27℃から30℃付近への温度上昇（開始後60分から80分付近）では、発汗感申告率が20%から50%程度へ上昇し、不満足申告率も60%まで上昇した。30℃から32℃付近への温度上昇（100分以降）では、温度下げ申告率は飽和状態となったが、それ以外は急激な変化はないものの上昇を続けた。

(2) DySET* との関係

DySET* と各主観評価との関係を図8に示す。DySET* の計算に用いた気温と湿度は、各被験者近くの座席テーブル上の測定値とし、風速は事前に行った空車状態での測定結果を基に0.25m/sで一定とし、放射温度は気温に等しいとした。着衣量は着衣重量を測定した上で1.0cloと推定し⁹⁾、代謝量は着座安静時の1.0met⁴⁾とした。DySET* と平均温冷感には、線形関係がみられたため線形回帰モデルを適用した。その他の申告率に関しては、指数関数的な増加傾向を示し、高いDySET* 領域では緩やかな増加傾向を示したことからロジスティック回帰モデルを適用した。前者は最小二乗法、後者は最尤法によりモデルパラメータを同定した。

同定した回帰モデルを表2に示す。なお、図8には、得られた回帰直線/曲線を示した。全ての回帰式に関して実測との当てはまりはよく、全体傾向をよく捉えていた。平均温冷感が「中立」となるのは、DySET* が26℃付近であり、また、DySET* が約2℃変化すると温冷感カテゴリーが1段階変化する傾向を示した。温度下げ申告率、発汗申告率、不満足申告率は共にDySET* が28℃付近で急激に増大する傾向を示した。

表2 回帰分析結果

	回帰式	R
平均温冷感	$0.56 \times DySET^* - 14.6$	0.97 ($p < 0.01$)
温度下げ申告率 (%)	$\frac{100}{1 + \exp(-0.79 \times DySET^* + 22.8)}$	0.94 ($p < 0.01$)
発汗感申告率 (%)	$\frac{100}{1 + \exp(-0.59 \times DySET^* + 18.4)}$	0.98 ($p < 0.01$)
不満足申告率 (%)	$\frac{100}{1 + \exp(-0.88 \times DySET^* + 26.0)}$	0.98 ($p < 0.01$)

R は回帰式による推定値と実測との相関を意味する
 平均温冷感の数値範囲：-4（寒い）～+4（暑い）
 DySET* の実験範囲：25～31℃

3.4 考察

3.4.1 冬季優等列車内における DySET* の快適範囲

ASHRAE（米国暖房・冷凍空調学会）では、団体の構成員の80%以上が、その環境に「満足である」と表明できれば、その環境を「快適」と判定することになっている⁷⁾。本実験では、平均温冷感が寒い側となるような温熱環境を条件として実施していないため、快適範囲の下限値は推定できないが、仮に、本実験での不満足申告

率が20%となるDySET* 値を快適範囲の上限値とすると、回帰式より27.8℃と推定できる。このDySET* 付近では、不満足申告率のほか、温度下げ申告率、発汗感申告率も急激に増大することから、冬季の優等列車内はDySET* が27.8℃以上にならないように空調を制御することが重要といえる。

3.4.2 本研究で得た回帰式の適用例

図9に、図1の例Bに対して平均温冷感と不満足申告率の回帰式（表2）を適用した結果を示す。DySET* の計算において、着衣量は1.0cloと0.7cloとした。1.0cloは概ね冬用スーツ（また、図4に示した本実験で被験者が着用した服）に対応し、その上着を脱ぐと、着衣量は概ね0.7cloとなる。その他のDySET* 計算の入力値は、3.3.2項(2)と同じとした。

推定結果より、乗客が冬用スーツを着ている場合は、125分以降で温冷感は「やや暖かい」から「暖かい」となり、不満足申告率は20%以上となることが推測される。一方、乗客が上着を脱いだ場合は、温冷感は「中立」付近となり、不満足申告率は20%以下となることが推測される。このように、表2の回帰式を適用することで、想定する各種状況での乗客の温熱快適性を定量的に推定することができる。

ただし、これらの回帰式はDySET* が25℃以下（平均温冷感が「中立」より寒い側）は適用範囲外である。温度上げ申告率や寒さによる不満足申告率の回帰式は、DySET* が25℃以下となる環境で別途データを獲得して導出する必要がある。

3.4.3 夏季通勤実験²⁾ との比較

夏季通勤実験で得られたDySET* と各主観評価との関係を図8に示す。平均温冷感と不満足申告率に関して

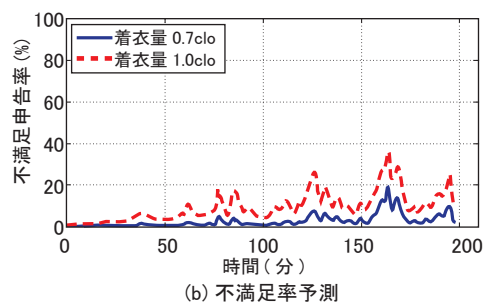
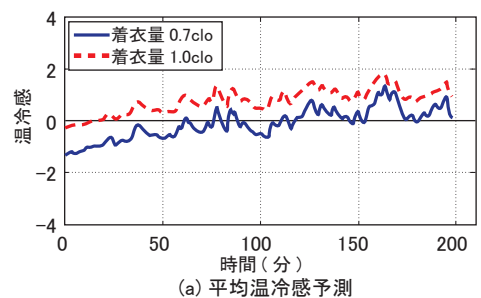


図9 乗客の平均温冷感と不満足申告率の予測例

特集：人間科学

は、夏季通勤手法による時系列予測を図7(a)および図7(d)にそれぞれ示す。夏季通勤実験では、延べ約100名の一般の鉄道利用者が参加し、留置された通勤車両内で20℃～34℃程度の広い範囲の温熱環境を体感した。DySET*と平均温冷感の関係(図8(a))は夏季通勤実験とはほぼ同様であり、時系列変化(図7(a))は夏季通勤手法により精度良く予測できていることが確認できる。一方、温度下げ申告率(図8(b))、発汗感申告率(図8(c))および不満足申告率(図8(d))は、同一のDySET*では夏季通勤実験の方が大きい傾向を示した。不満足申告率の夏季通勤手法による時系列予測(図7(d))は、実測に対して過大推定している。このように、温熱環境と温冷感の関係には季節差があまり見られないが、快適性には季節差が見られた点は、人工気候室を利用した既往研究でも報告されている⁹⁾。

夏季は、短期間の高温順化により発汗が早く発現し、汗量が増加することが知られている¹⁰⁾。汗の蒸発により体温上昇は抑えられる一方で、発汗の発現による暑さの不快感が生じることで、冬季と夏季とで前述したような相違が生じたものと推察される。DySET*の計算では、人体熱モデルが使用され、発汗も考慮された体温調節系が実装されているが、短期間の高温順化のような季節による変化は考慮されていない。年間を通じて温熱快適性を精度よく予測するためには、季節ごとに被験者実験を実施し、車内温熱環境と生理・心理状態との関係の季節変化について調査する必要がある。

なお、今回は通勤車両での実験結果と優等車両での実験結果を比較したため、両実験結果の相違には、季節影響の他、車種の影響(乗客が車内温熱環境に対して持つ期待値の相違等)も混入している可能性がある。今後、同一季節に実施した優等・通勤車両内での被験者実験結果を比較し、車種の温熱快適性への影響についても検証する必要がある。

4. まとめ

本研究で得た主な結果を以下に示す。

- 冬季の優等列車内の温湿度測定調査の結果、全10回の乗車中における車内気温の観測範囲は23.8～28.0℃、車内湿度の観測範囲は5.6～41.7%rhであった。車内の上下温度差(足部～頭部間の気温差)の観測範囲は、不均一感による不快感が生じるといわれている3℃以内であった。
 - 冬季に優等車両内で被験者実験を実施し、DySET*と温熱快適性の関係式を得た。今回の実験環境はDySET*25～31℃であり、特に同27.8℃以上で温熱快適性が急激に悪化することが示唆された。
 - 冬季優等車両と夏季通勤車両での実験結果を比較した結果、同一DySET*でも、後者の方がより発汗感申告率が高く、不満足申告率も高い傾向を示した。これより、同一温熱環境、着衣・代謝状況においても、乗客の温熱快適性が季節により異なる可能性が示唆された。
- 今後は、季節影響を考慮した温熱快適性予測・評価手法について検討を進める予定である。また、同一季節において優等・通勤車両内での被験者実験を実施し、車種が乗客の温熱快適性に及ぼす影響についても検討を行う予定である。

文 献

- 1) 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
- 2) 遠藤広晴, 伊積康彦, 林伸明: 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) H. Endoh, F. Kikuchi, Y. Izumi, S. Tsujimura and N. Hayashi, "Experimental Study on Thermal Comfort in Railway Vehicle", The Proceedings of the 7th International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems, 3A25, 2015.
- 4) 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.
- 5) 遠藤広晴, 菊地史倫, 伊積康彦, 辻村壮平, 林伸明: 優等列車内の温熱的快適性に関する被験者実験, J-RAIL2014, S5-2-1, 2014
- 6) 空気調和・衛生工学会: 快適な温熱環境のメカニズム, 丸善, 2006
- 7) ASHRAE Standard: Thermal environmental conditions for human occupancy, ASHRAE, 1992.
- 8) 吉田伸治, 佐藤大樹, 大黒雅之: 人体を覆う仮想球を用いた屋外空間の不均一放射環境の分析, 日本建築学会環境系論文集, Vol.79, No.705, pp.967-977, 2014
- 9) 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
- 10) 中山昭雄編: 温熱生理学, 理工学社, 1981