

| |
|-------|
| 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 |

乗客の暑い・寒いを予測する

鉄道車両の冷暖房能力や制御性能は年々向上していますが、車内が暑い・寒いといった乗客からの不満の声は依然として多く寄せられています。現状を改善し、より多くの乗客にとって快適な車内温熱環境を提供するためには、乗客がどのような状況で暑い・寒いと感じているかを明らかにすることが重要です。ここでは、温熱生理学の知見と鉄道車両内で実施した温熱環境の体感実験結果に基づく、乗客の暑い・寒いを予測する方法について紹介します。



遠藤 広晴
Hiroharu Endoh
人間科学研究部
人間工学研究室
副主任研究員
[専門分野] 人間工学

暑い・寒いに影響する基本要因

人の暑い・寒いといった温冷感に影響する基本的な要因には、環境側の要因として、気温、風速、湿度、壁面などからの放射温度があります。さらに、人側の要因として、着衣量と代謝量(☞参照)があります¹⁾。この6つの要因は「温熱6要因」と呼ばれており、これらが複合的に絡み合っただけでなく、人体と周囲環境間に熱のやり取りが生じ(図1)、その結果、人体の皮膚温、体内温、発汗量などの温熱生理状態が変化します。人体内部には、これら生理状態を検知するセンサーが内在し、このセンサー

が脳に情報を伝えることで、私たちは暑い・寒いと感じています。なお、人体内部の熱移動に影響する体組成や、発汗・震えをコントロールする体温調節機能には個人差があるため、たとえ温熱6要因が同じでも温熱生理状態は人により異なります。これに個人の経験や好みといった心理的な要因も影響するため、温熱感覚にはばらつきが生じます。多くの乗客が滞在する列車内では、この温熱感覚のばらつきの特徴を考慮して、できるだけ多くの乗客にとって快適な温熱環境を提供することが重要となります。

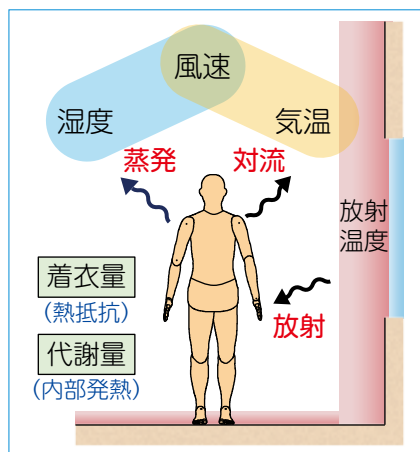


図1 人体一周囲環境間の熱交換

☞ 着衣量

皮膚表面から着衣外表面までの熱抵抗で、単位はクロ(clo)。1cloは0.155(m²・℃)/W。たとえば、上下スーツ着用時は約1clo、裸体時は0cloです。

☞ 代謝量

代謝量はメット(met)という単位で表され、1metは椅子に安静に座っている状態のエネルギー消費量に相当する58.2W/m²として定義されています。単位体表面積で表されるのは、エネルギー消費量が体重ではなく体表面積に比例して増加するという「ループナーの体表面積の法則」に基づくものです。

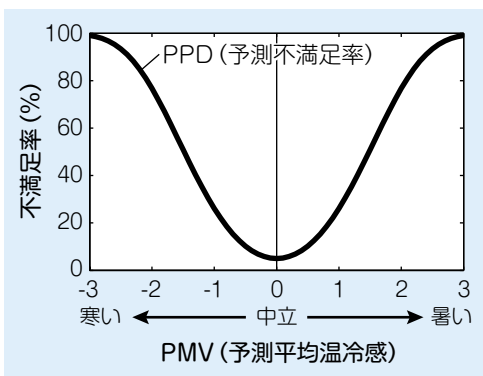


図2 PMVとPPDの関係

温熱指標PMV・PPD

人の温熱感覚を定量化するための研究は、1970年頃にデンマークのFangerによって精力的に行われました²⁾。Fangerは温熱6要因が人体に及ぼす影響を、「快適方程式」と呼ばれる熱平衡式により定式化しました。快適方程式では、人体を熱的中立状態と仮定したうえで、周囲環境から受ける熱負荷(単位はワット(W))を計算します。これにより、温熱6要因の人体への複合効果が、熱負荷という1変数に集約されたこととなります。Fangerは、この熱負荷と約1300人分の被験者実験での温冷感申告(7段階尺度で-3: cold, -2: cool, -1: slightly cool, 0: neutral, +1: slightly warm, +2: warm, +3: hot)とを結びつけ、集団の平均的な温冷感を予測するPMV(Predicted Mean Vote, 予測平均温冷感申告)を提案しました。さらに、温冷感として-1: slightly cool, 0: neutral, +1: slightly warm以外を申告した人の割合を不満足率として、それを予測するPPD

☞ %rh

相対湿度の単位で、rhはrelative humidityの略。相対湿度とは、空気中に存在し得る水蒸気の量(飽和水蒸気量)に対して、どれだけの水蒸気が空気中に含まれるかを百分率で表したものです。湿度としては、この他に空気1m³に何グラムの水蒸気が含まれているかを表す絶対湿度(単位はg/m³)がありますが、一般に「湿度」というときは「相対湿度」を指します。

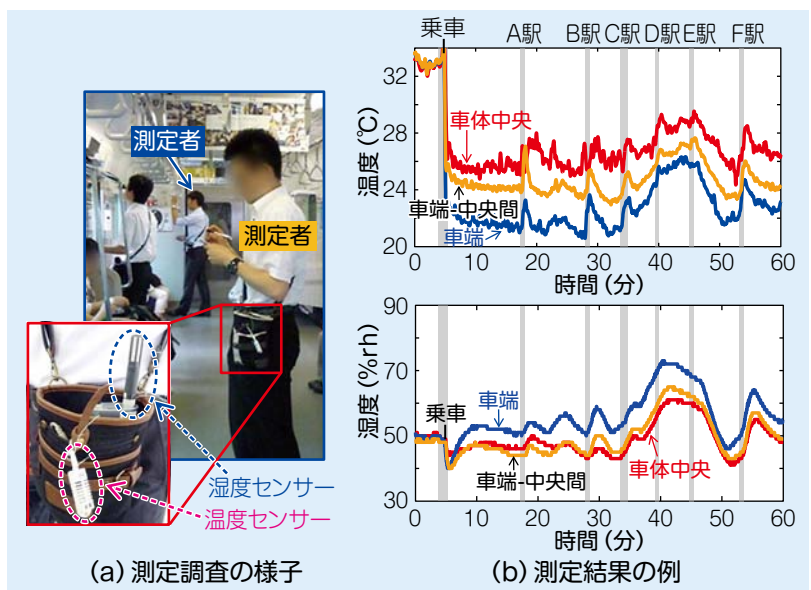


図3 営業列車内の温湿度測定調査

(Predicted Percentage of Dissatisfied, 予測不満足率)を提案しました。図2は、PMVとPPDの関係を表したものです。温冷感が中立であるPMV = 0で最も不満足率が小さくなりますが、それでも5%は不満足と覚えることが予測されています。PMV・PPDは、そのわかりやすさからさまざまな分野で広く利用されています。

列車内の温熱環境

ここでは、列車内の温熱環境について、夏季の通勤列車(営業走行中)を対象に行った温湿度の測定調査結果をご紹介します。図3(a)は測定の様子で、図3(b)は測定した温湿度変動の例です。駅間走行中に関してしてみると、乗車後B駅までの約20分間は、車内各箇所の温湿度は2℃以内、10%rh(☞参照)以内の変動で収まっています。一方、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ます。この温湿度変動は、駅停車時におけるホームから車内への外気侵入、乗客からの熱放出や水分蒸発、空調制御による冷房強度の調整などが複合的に絡み合っている生じたもので、オフィス空間では見られない通勤列車内

に特有の温熱環境といえます。

列車内の温熱環境に対して、前述したPMV・PPDが適用できれば、不快状況の抽出や、乗客の体感にあった空調制御への活用が期待できます。ただし、PMV・PPDの導出時に利用された被験者の温冷感評価データは、一定の温湿度環境に数時間滞在した場合のもので、図3(b)のような温度変動環境への適用は想定していません。したがって、PMV・PPDの夏季の通勤列車内への適用にあたっては、その妥当性を検証する必要があります。

車内温熱環境の体感実験

車内温熱環境下での乗客の温熱感覚の特徴を把握するとともに、PMV・PPDの夏季の通勤列車内への適用の妥当性を検証するために、一般の鉄道利用者を対象に、車内温熱環境の体感実験を実施しました。

実験方法

実験は夏季に、定置状態の通勤車両内で実施しました。被験者は立った状態で温湿度変動を体感し、数分間隔で温冷感や快適性に関する主観評価を行いました。通勤列車ではさまざまな混雑環境が想定されます。そこで、被験者の滞在領域を調整して、混雑率70%、140%、180%の各混雑環境を

模擬しました。混雑率180%は、**図4**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す。

温湿度と主観量の時系列

混雑率70%条件を例に、温湿度と主観量の時系列を**図5**に示します。ここで注目すべき点は、同様の温湿度でも温湿度が下降しているか上昇しているかで、温冷感や快適性が異なる傾向を示している点です。たとえば、時間5.5分(4回目評価)の温湿度下降時と時間20.5分(14回目評価)の温湿度上昇時は、両者とも温湿度はおおむね24℃、50%rhですが、前者の平均温冷感は「やや涼しい」付近で、暑さによる不満足率は13%程度であるのに対し、後者の平均温冷感は「中立」付近で、暑さによる不満足率は30%程度となっています。つまり、温湿度上昇時の方が下降時よりも温冷感はより暑い側の評価、暑さによる不満足率はより高い値になっています。これは、温湿度の変化方向(上昇/下降)が温熱快適性に影響を及ぼすことを示唆しており、PMV・PPDでは考慮されていない点です。

PMV・PPDと実測との関係

図6(a)にPMV-PPD曲線と本実験でのPMVと実測不満足率の関係を示します。PPDと実測不満足率との間に大きく二つの相違点が見られます。一つ目は、PPDがPMV=0で最小となるのに対し、実測不満足率はPMV=-1付近で最小となる傾向を示している点です。四季のある日本では、体温調節系が季節の影響を受け、夏季に汗をかきやすくなるのが既往研究で報告されています³⁾。温熱的な快・不快感には、温冷感のほか、発汗による皮膚の湿り具合も影響するため、夏季は暑い不快感が他の季節と比較して生じやすくなると考えられます。ただし、PMV・PPDはそのような温熱快適性の季節差を考慮していません。二つ目

は、実測不満足率に関して、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違いがみられる点です。とくに温度上昇時は、PPDと最大で45ポイント程度の相違が生じています。温冷感には、皮膚に内在するセンサーの応答が影響することは前述しましたが、それは皮膚の温度だけでなく、その変化速度も影響することが知られています。したがって、温度上昇時は、温度一定環境を想定しているPMV・PPDよりも実測値が大きくなったと考えられます。

鉄道車内版 PMV・PPD

PMV・PPDを夏季の通勤列車内の温熱環境に対して適用すると、温度変動と季節影響による誤差が生じることがわかりました。その誤差の主な原因は、PMV・PPD計算における、「(1) 温度一定環境を想定した熱負荷計算」、「(2) 季節差を考慮していない温冷感と快適性の関係式(PMV-PPD曲線)」、「(3) 温度一定環境下での被験者実験データ」の使用にあると考えられます。そこで、本研究では、これら(1)~(3)による誤差を改善するために、「(1) 温度変動環境に対応した人体熱モデル(※参照)」、「(2) 季節差を考慮した温冷感と快適性の関係式」、「(3) 通勤列車内の温熱環境(温度変動環境)下での被験者実験データ」を利用した、鉄



図4 体感実験の様子(混雑率180%条件)

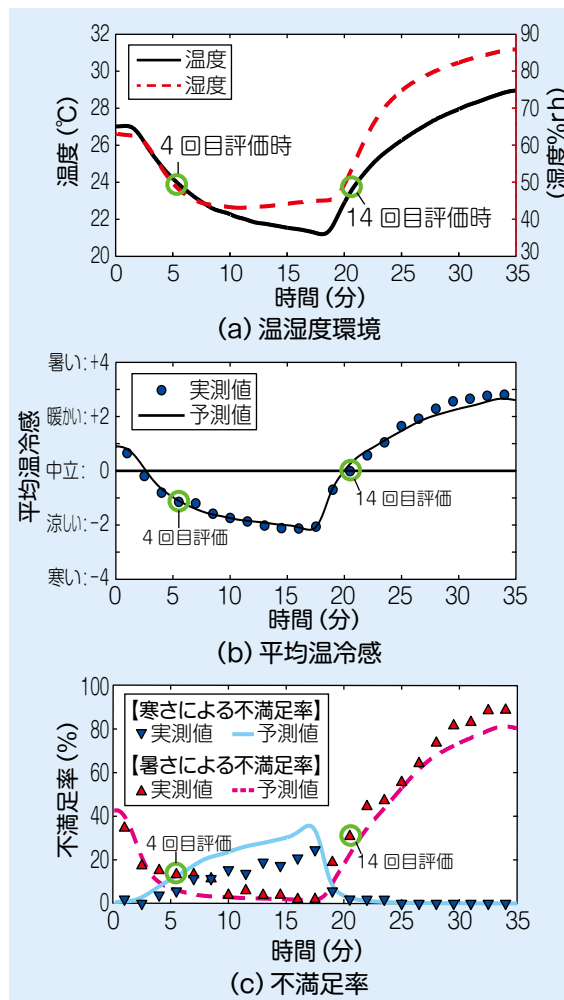


図5 主観評価結果例(混雑率70%条件)

道車内版のPMV・PPD指標「DyPMV・DyPPD」を提案しました。提案方法の全体像を**図7**に示します。

生理状態予測部

第1段階の生理状態予測部では、人体熱モデルにより、時間的変動を伴う温熱環境下での人の皮膚温や発汗などの生理状態を予測します。ここでは、人体と周囲環境間の熱交換、人体内部で行われる血流による熱輸送や骨⇄筋肉⇄脂肪⇄皮膚間の熱伝導などを時々刻々と計算します。さらに、生理状態

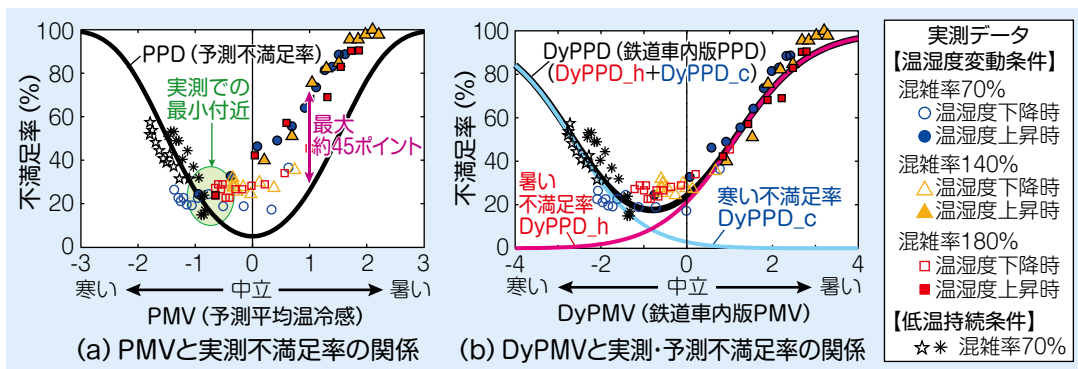


図6 体感実験での実測不満足率と予測値の関係

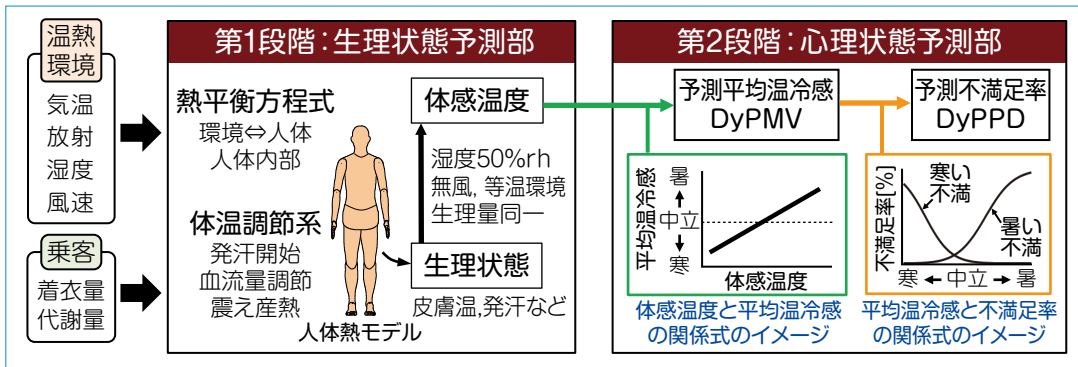


図7 鉄道車内版PMV・PPD計算モデルの全体像

から「体感温度」を計算します。ここでの「体感温度」は、計算した生理状態と同一となる、等温環境(放射の影響のない環境)、無風、湿度50% rhでの気温に相当します。

心理状態予測部

第2段階の心理状態予測部では、生理状態予測部で計算された「体感温度」から、乗客の平均温冷感と不満足率を予測します。この予測には、前述した体感実験データを基に、[体感温度と予測平均温冷感DyPMV]、[予測平均温冷感DyPMVと予測不満足率DyPPD]を結びつけた関係式を利用しています。なお、本方法では、暑さに

よる不満足率(DyPPD_h)と寒さによる不満足率(DyPPD_c)がそれぞれ計算され、DyPPDは両者の和として計算されます。各関係式には、夏季の通勤列車内の乗客の温熱感覚の特徴が反映されているといえます。

本方法による時系列予測の例を図5(b)、(c)に示します。温湿度変動環境下での平均温冷感、不満足率の変動を良く予測できていることが確認できます。DyPMVと実測不満足率の関係を図6(b)に示します。図にはDyPMV - DyPPD曲線もあわせて示しました。PMV・PPDでみられた温度変動による誤差や不満足率の最小点のずれはほぼ解消され、全条件で予測値と実測値がよく一致していることが確認できます⁴⁾。なお、温熱快適性には季節差があることから、図6(b)の関係は夏季専用となります。年間を通した精度の高い予測を実現するためには、夏季以外の季節においても体感実験を実施し、季節影響を考慮した予測モデルの構築が必要です。

おわりに

周囲環境と人体の熱交換の仕組みや温熱生理学の知見、そして、鉄道車両内の温熱環境の体感実験データを活用することで、定量化の難しい乗客の温熱感覚を予測する方法を紹介しました。本方法は、現状の予測・評価だけでなく、新たな対策の効果検証にも活用できると考えています。今回は夏季の通勤列車に焦点を当てましたが、他の車種・季節に対しても適用範囲を広げ、年間を通した快適な車内温熱環境の実現に貢献できるよう、研究を進めています。RRR

人体熱モデル

人の体温調節機能と人体内部および人体表面一周環境間の熱移動をモデル化し、数値計算により皮膚温や発汗などの生理状態を予測するモデルです。人体内部の熱伝導率や比熱などの熱物性値、震えによる産熱量、皮膚温や体内温に応じた発汗・血流量などの体温調節パラメータ値は、過去の実験データに基づいて設定されています。

文献

- 1) 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
- 2) Fanger P.O.：Thermal Comfort, McGraw-Hill Book Company, 1972
- 3) 中山昭雄編：温熱生理学，理工学社，1981
- 4) 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