

横流ファンにより通勤列車内の 温熱環境を快適にする



遠藤 広晴
Hiroharu Endo
人間科学研究部
快適性工学研究室長

はじめに

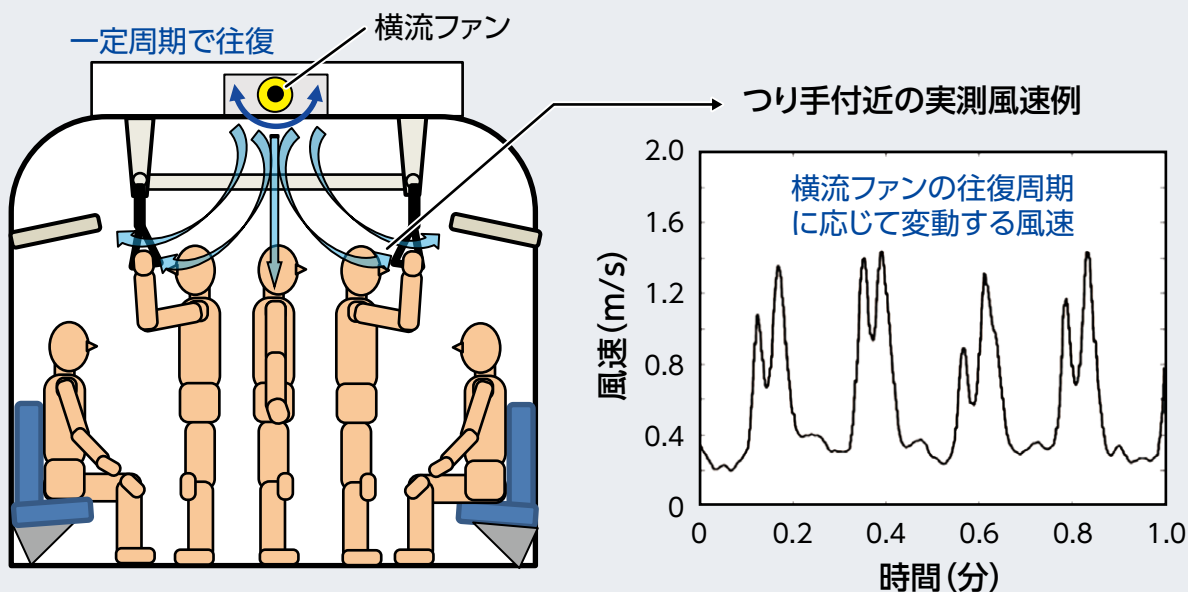
通勤列車内では、スマートフォンで情報検索をしたり、読書をしたり、休憩をしたり、それぞれの乗客が目的地までの移動時間をより自由に、有意義に過ごせることが魅力の一つと思います。そのような時間を過ごすためには、乗客にとってストレスのない快適な車内環境、例えば、振動や騒音が小さく、暑さ/寒さによるストレスを感じない環境であることが必要です。ここでは、これら環境要素の中で、暑さ/寒さに関わる温熱環境に着目し、さらなる快適性向上を目的として私たちが実施した実験や提案し

ている評価手法について紹介します。

通勤列車内の扇風機兼 サーキュレーター：横流ファン

2023年の夏は全国各地で記録的猛暑となりましたが、通勤列車内は近年の空調技術の進歩により、屋外の猛暑を感じさせないより涼しく快適な環境が提供されています。通勤列車の空調設備の大きな特徴の一つに、天井部に設置された「横流ファン」があります(図1)。横流ファンは車内の空気循環を促すサーキュレーターとしての役割と、乗客に風を提供して清涼感を与

図1 通勤列車内の横流ファンからの風



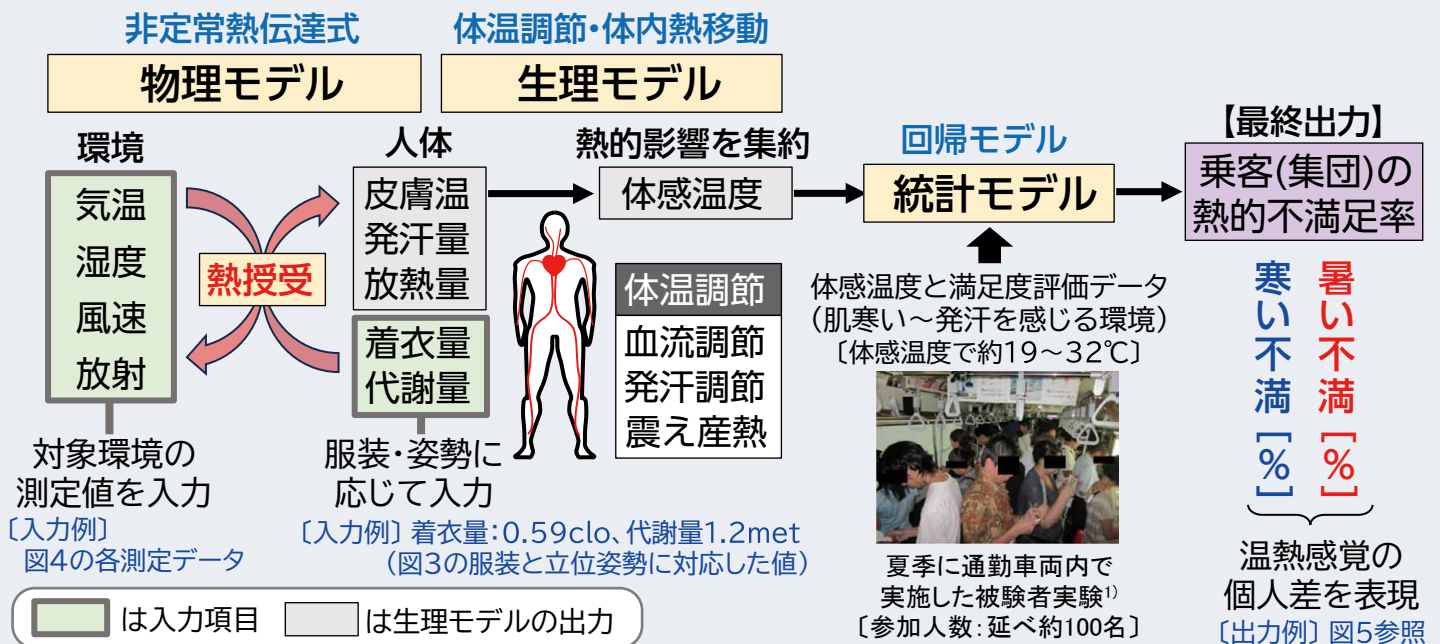


図2 温熱快適性評価手法の全体像

える扇風機としての役割があり、特に梅雨から夏季の蒸し暑い季節において、通勤列車内の温熱快適性の確保に貢献しています。ただし、横流ファンの風は、気温によっては乗客の寒い不快感の原因にもなるため、通勤列車内の温熱環境を快適にするうえで、この横流ファンの改善／悪化効果を正しく評価することが重要です。

通勤列車内の温熱快適性を評価する¹⁾

通勤列車内のように、不特定多数の人が利用する空間の温熱快適性を考える際は、温熱感覚に個人差があることをふまえて、温熱環境に不満を感じる人の割合(熱的不満足率)で評価するのが一般的です。そのような評価指標として、建築分野でPPD (Predicted Percentage of Dissatisfied: 予測不満足率) とよばれる指標が古くから提案されており、現在では分野を越えて広く利用されています²⁾。ただし、PPDは、建物室内で見られるような、温湿度・風速変動の小さい温熱環境を対象としています。また、室内で発汗を感じた際、より不快感が助長されますが、PPDは発汗による不快感への影響が考慮されていません。一方で、通勤列車内は外気の影響や乗客数の変化などにより温湿

度変動が大きく、横流ファンによる大きな風速変動もあります。また、特に梅雨から夏季では、車内温湿度が上昇して発汗が生じる状況となることが十分考えられます。

そこで、通勤列車内で見られるような、温湿度・風速変動が大きく、また、発汗が生じ得る温熱環境に対しても温熱快適性をよりの確に評価するために、図2に示す評価手法を提案しました。提案手法では、最初に6つの温熱要素：気温、湿度、風速、放射温度^①、着衣量^②、代謝量^③を入力して、物理モデル(非定常熱伝達

① 放射温度

壁面と体表面の温度に差があると、電磁波を介して壁から熱を受けたり、もしくは熱を奪われたりします。このような熱の授受を放射といいます。放射温度は、周囲壁面温度の測定や、内部が空洞の黒色の球の中心温度(黒球温度)の測定により算出します。

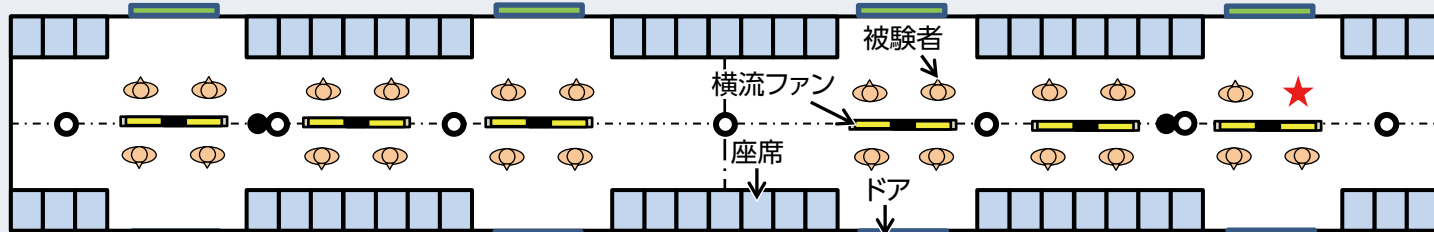
② 着衣量

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

③ 代謝量

代謝量はメット(met)という単位で表され、1 met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58.2 W/m²として定義されています。

(a) 車内での被験者・測定器配置の概要(実験車両を上からみた図)



- 温度・湿度計
- 黒球温度計(放射温度測定用[※]放射温度参照)
- ★ 風速計

〔実験日〕 2015年7月3日

〔被験者〕 23名 (男性：12名, 女性：11名)

〔実験中の天候〕 外気温：22.0~22.9℃, 外気湿度：93~99% (雨)



(b) 実験風景

図3 実験車両内の被験者・測定器配置と実験風景⁴⁾

式) および生理モデル (生体恒常性：ホメオスタシス[※]の原理による体温調節系) により、人体の皮膚温、発汗量、放熱量を計算します。次に、これら3つの生理状態を基に、「体感温度」[※]を計算します。理論的には、「体感温度」が同じであれば、異なる温熱環境(6つの温熱要素の組合せが異なる環境)でも、人体が周囲環境から受ける熱負荷とそれにより生じる生理的影響は等しくなります。最後に、「体感温度」を過去の被験者実験データに基づいて構築した統計モデルに入力して、乗客の熱的不満足率(温熱環境に対して満足できない乗客の割合)を予測

します。この一連の計算の流れは、PPDの計算概念²⁾を踏襲していますが、通勤列車内の温熱快適性評価に適したモデルとするために、提案手法では、変動の大きい温熱環境に適用可能な物理・生理モデルを使用し、さらに、肌寒い環境から発汗を感じるような環境(「体感温度」で約19~32℃の環境)で得られた快適性評価データに基づく統計モデルを使用しました。また、PPDが予測する熱的不満足率は、暑い不満/寒い不満の内訳を区別できないのに対し、提案手法が使用する統計モデルは、乗客の熱的不快状況をより詳細に把握するために、両者を分離して出力できるモデルとしました。

※ 生体恒常性(ホメオスタシス)

外界の環境の変化に対して、身体内部の環境を一定の状態に保とうとする機能のことです。体温に関しては、自律神経が働くことで、暑いときは汗をかいて体温を下げ、寒いときは震え(筋活動)により熱を生成して体温を上げるなどして調整され、身体内部が37℃前後に維持されています。

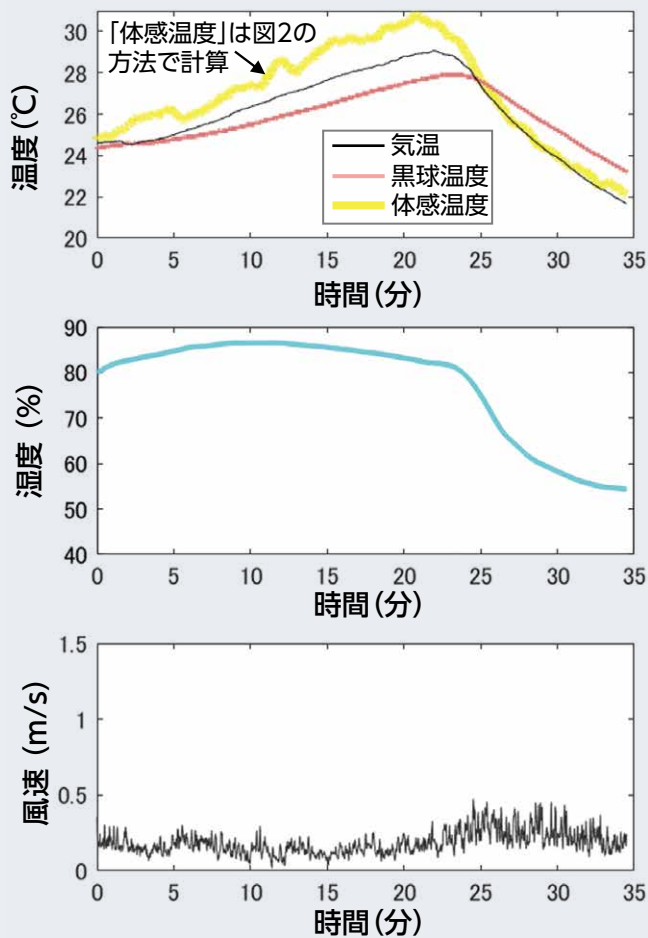
※ 体感温度

提案手法で使用した体感温度はSET*とよばれるもので、生理モデルで計算される皮膚温と皮膚ぬれ率(発汗量から算出)、および放熱量が同一となる相対湿度50%の気温として定義されています。例えば、無風で、放射の影響がない場合、気温28℃、湿度50%の環境と気温26℃、湿度80%の環境はSET*が28℃で同一となり、両者では同程度の温熱快適性になると推定されます。

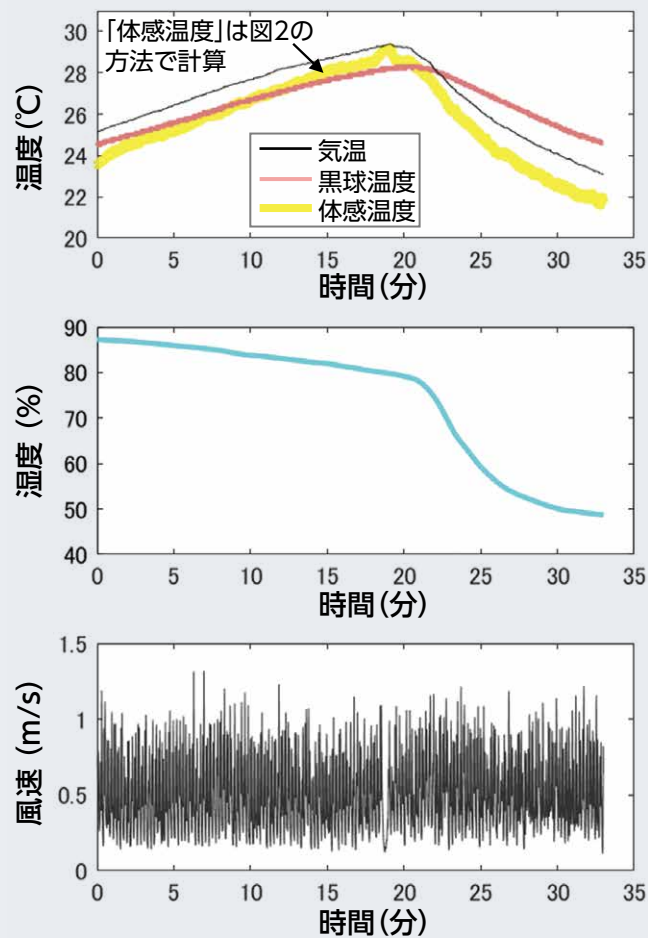
横流ファンの温熱快適性への効果検証と提案手法の精度検証³⁾

ここでは、通勤車両内で実施した横流ファンの効果に関する検証実験の概要と、前章で紹介した提案手法を適用した際の精度検証結果について紹介します。

実験は2015年7月3日の午後(天気は雨)に実施し、通勤列車を日頃から利用している一般の鉄道利用者23名(男性12名、女性11名)が参加しました。被験者は図3のように横流ファンの近くに立ち、通勤列車内の気温変動を模擬し



(a) ファン OFF 条件時



(b) ファン ON 条件時

図4 各条件の温熱環境と体感温度

た環境下で、横流ファンを稼働した条件（以降、「ファンON条件」と停止した条件（以降、「ファンOFF条件」）をそれぞれ30分程度体感し、数分間隔で発汗を感じる程度や温熱快適性に関するアンケートに回答しました⁴⁾。

図4に各条件の温熱環境と、前述の図2の方法で計算した「体感温度」（着衣量：0.59clo，代謝量：1.2met）を示します。ファンOFF条件の気温上昇時は、湿度が高く風速も小さいため、体感温度は気温より高くなっているのに対し、ファンON条件時は、風の影響で体感温度が気温より低くなっていることが確認できます。

図5に各条件開始から終了までの熱的不満足率と発汗感率（「発汗を感じる」と回答した割合）を示します。図6は、このうち前半の気温上昇時に着目して、気温と暑い不満足率の関係を

示したものです。図5および図6より、暑い不満足率と発汗感率は横流ファンからの風により明らかに低減していることが確認できます。ただし、気温が29°C付近まで上昇すると、低減効果はやや薄れ始める傾向も確認できます。後半の気温下降時に関しては、ファンOFF条件・ファンON条件のいずれにおいても暑い不満足率が低減し、各条件終了付近（30分付近）では、ファンON条件において、寒い不満足率の増大傾向が確認できます。

図5、図6にPPDおよび提案手法の予測結果を、図7に両予測値と実測不満足率との関係を示します。PPDは、ファンOFF条件・ファンON条件とも、特に前半の気温上昇時に不満足率を最大40～50%pt（%ptはパーセントの差の単位）程度過小評価しているのに対し、

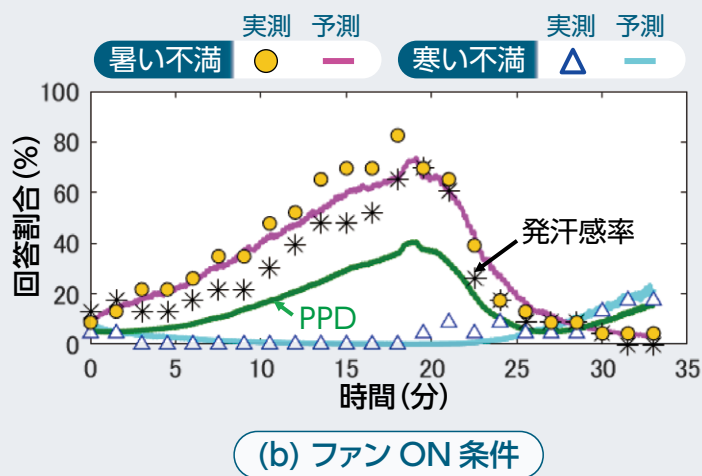
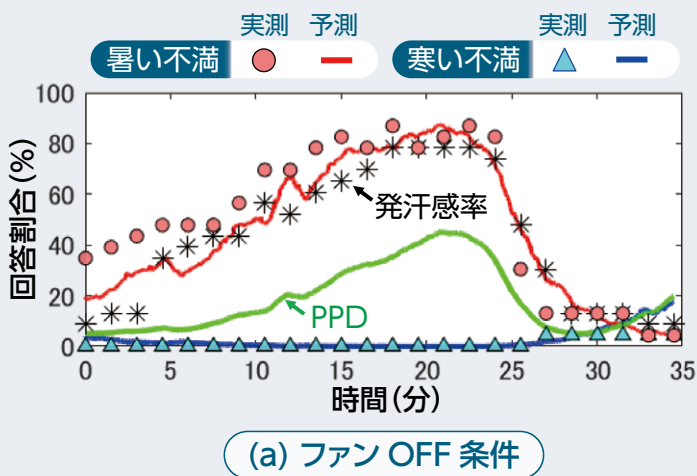


図5 各条件のアンケート評価結果と熱的不満足率の予測結果

提案手法による予測は、ファンOFF条件の初期（開始直後から5分程度まで）に20%pt程度の過小評価が見られるものの、PPDと比較して全体的に予測精度が向上していることが確認できます（図7参照）。なお、提案手法で見られたファンOFF条件初期の過小評価の原因としては、冷房と横流ファン停止により空調音が消失し、被験者が温度上昇を予感したことなどが考えられます。当該時間帯では、発汗感率が約

10%に対して、暑い不満足率が約40%と、ほかの気温上昇時の評価と比較して両者の乖離が大きいことから、提案手法が評価対象とする熱的影響以外の心理的要因が影響し、誤差が大きくなった可能性が考えられます。

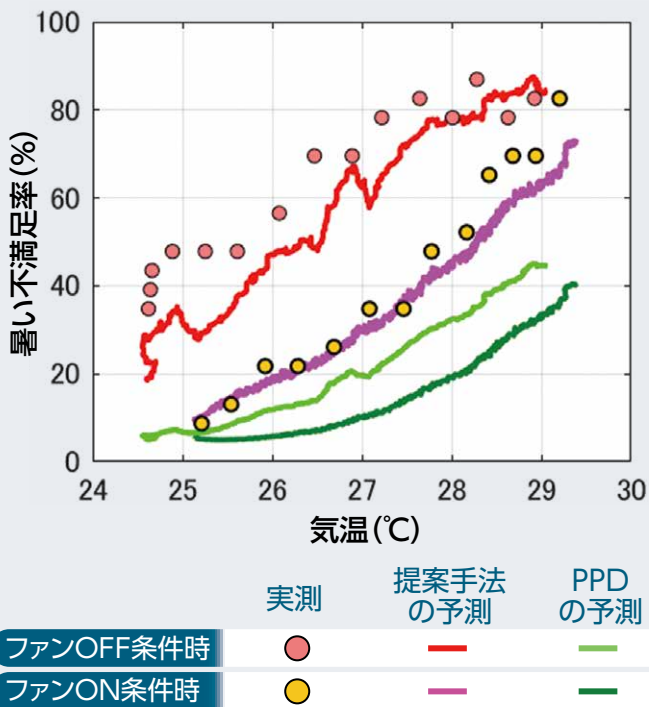
横流ファンの快適性への効果を見える化する

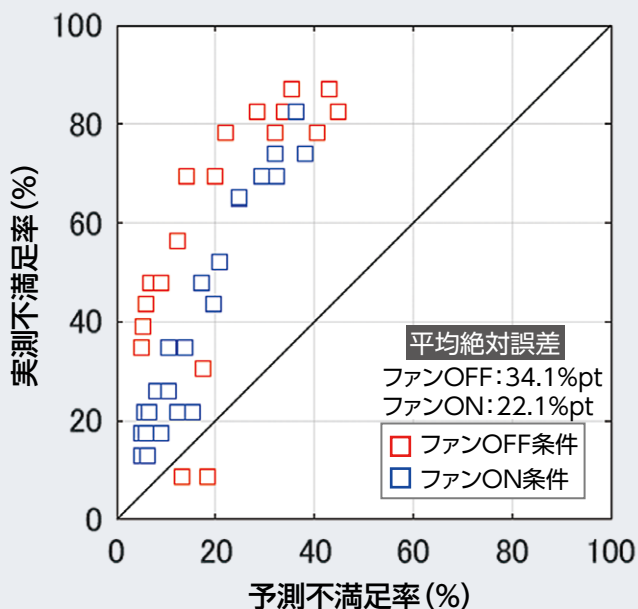
提案手法を利用することで、横流ファンからの風による快適性の改善／悪化効果を定量化し、視覚的に把握することが可能となります。図8にその一例を示します。横流ファンからの風を正弦波と仮定し、横軸を車内気温、縦軸を風速ピーク値として熱的不満足率の等高線を描いています。なお、不満足率の計算にあたり、気温と風速以外の温熱要素である湿度、放射温度、着衣量、代謝量は図中に示す設定条件で固定しています。この例では、気温27℃で横流ファンの設定風速を1.5m/s程度にすることは、25℃付近に気温を下げることで同程度の快適性の改善効果が見込めることや、24℃以下の場合、風速を上げることで寒い不満足率が增大する可能性が高いことがわかります。

おわりに

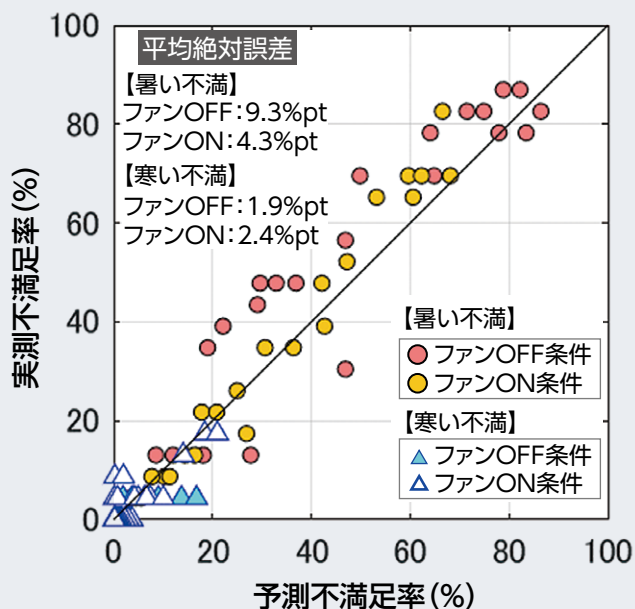
ここで紹介した温熱快適性評価手法は、夏の冷房時だけでなく、冬の暖房時も含めて、年間

図6 気温と暑い不満足率の関係（気温上昇時）





(a) PPDによる予測と実測の比較



(b) 提案手法による予測と実測の比較

図7 熱的不満足率の予測と実測

を通して利用することができると考えています。ただし、より精度の高い評価を行うためには、今回対象としなかった直射日光の影響や体温調節系の季節変化の影響などについても考慮する必要があります。今後は、これらの要因を考慮した、より精度の高い温熱快適性評価手法の構築に向けた研究を進め、通勤列車内の温熱快適性のさらなる向上に貢献したいと考えています。RRR

文献

- 1) 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
- 2) 空気調和・衛生工学会: 新版 快適な温熱環境のメカニズム, 空気調和・衛生工学会, 2006
- 3) 遠藤広晴, 榎並祥太, 菊地史倫, 吉江幸子, 伊積康彦, 野口純: 夏季における通勤車両内の横流ファン送風の影響を考慮した温熱快適性評価手法, 鉄道総研報告, Vol.37, No.8, pp.1-8, 2023
- 4) 遠藤広晴, 榎並祥太, 吉江幸子, 伊積康彦, 林伸明: 通勤車両内の横流ファン送風が乗客の温熱快適性に及ぼす影響, 第23回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2016) 講演論文集, S5-1-1, 2016
- 5) 白石和彦, 酒井修: 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

図8 横流ファンの快適性への効果の試算例

