

シミュレーションによる車内温熱環境の再現と評価

Modeling and evaluation of thermal environment in railway vehicle by simulation technique



林 伸明*



島宗 亮平*



長谷川 晋一*

In this study, simulation of the thermal environment in the cabin of a commercial train using the CFD analysis and the human thermal model was conducted to achieve a comfortable thermal environment in the design phase. Psychological response under the environment was predicted as well; and the respective precision of reproduction and predictability were verified. As a result, it was confirmed that the thermal environment could be simulated, and that thermal sensation under such an environment could be predicted with practical accuracy.

●キーワード：空調、シミュレーション、CFD、人体熱モデル、温冷感予測

1. はじめに

通勤型電車車内の温熱環境については、以前より「暑い」「寒い」といったお客さまからのご意見が寄せられている。これに対し、空調能力の向上等の対策が取られてきているが、ご意見が無くなってない状況である。

通勤型電車の車内温熱環境は、設計段階での検討により、空車状態では均一な温度分布となっている。しかし、お客さまの乗車されている営業列車内の温熱環境を調査した結果、混雑時などに温度ムラが生じる場合があることが確認された。このように、営業列車では車内にお客さまが存在することにより、空車状態の検討では想定できなかったような不快な状況が発生し、ご意見に繋がっていることが考えられる。

そこで、より快適な車内温熱環境を構築するためには、お客さまの存在する条件での検討が必要である。この検討において、近年発達した著しいシミュレーション技術を適用することで、営業列車を想定した車内温熱環境を再現し、さらに、その環境下において人の感じる心理応答（温冷感、快適感等）を予測できる可能性がある。これにより、営業列車内で生じる不快な状況の再現と、これを改善する方策の検討が設計段階で可能となり、快適な車内温熱環境の構築に寄与することができる。と考える。

これまで、シミュレーションによる温熱環境の再現手法として一般的に数値流体力学（Computational Fluid Dynamics：CFD）が活用され¹⁾、また、人体の生理応答から心理応答を予測するために人体の体温調節機能や発汗などを考慮した人体熱モデルが開発されている²⁾。これらを連成させ、不均一な環境下における熱的快適性を予測する研究も行なわれている³⁾。しかし、鉄道の営業列車内のような、多数の人がいる温熱環境をCFDにより再現し、心理応答を評価している事例はあまりない。

そこで本研究では、営業列車内で生じる不快な状況を改善し、快適な車内温熱環境を構築するための検討手段として、CFDと人体熱モデルを用いたシミュレーションによる冷房稼働時の営業列車内温熱環境の再現と、その環境下における心理応答の予測を試みた。

2. 通勤型電車の車内温熱環境

2.1 通勤型電車の冷房方式

本研究で対象とした車両の冷房方式は、図1に示す構成であり、通勤型電車ですべて用いられている方式である。屋根上に設置された空調装置で作られた冷気が天井内の空調ダクトを通り、天井部に2列に並ぶ吹き出し口から車内

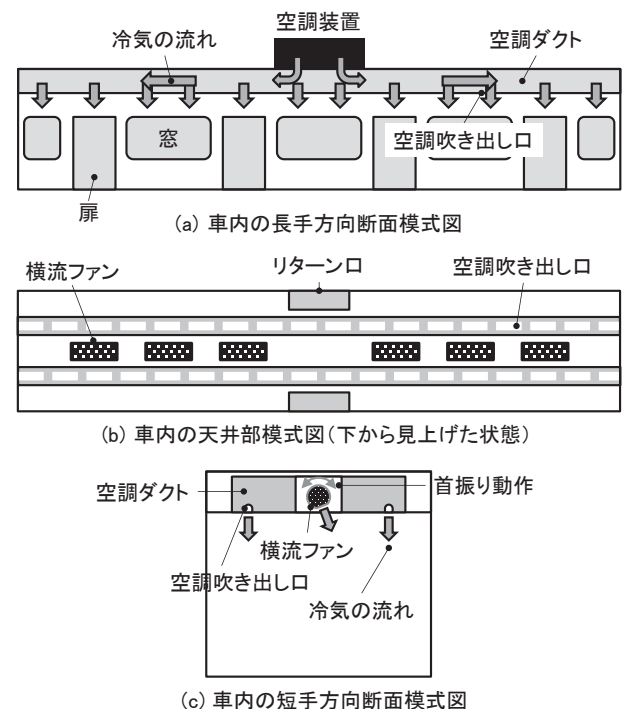


図1 通勤型電車の空調システム

に吹き出され、天井部中央にあるリターン口より吸い込まれ循環される。また、天井部には、冷房効果の向上およびサーキュレータの役割を果たす横流ファンが設置されている⁴⁾。

冷房制御は、車両毎に車内温度・湿度、外気温、乗車率、ドア閉鎖情報などを検知し、車内温度が基準温度と呼ばれる設定温度に保たれるように自動で制御される。

2.2 営業列車内の温熱環境

営業列車内の実態を把握するため、10月の朝通勤時間帯の首都圏を走る営業列車に乗車し、温熱環境の測定を行った。なお、外気温は22~25℃であった。

上下方向温度分布、水平方向（車両長手方向）温度分布および乗車率について、ある走行区間の時間推移の測定結果を図2に示す。なお、上下方向温度分布の測定位置は、車両中央部の高さ0.15m、0.8m、1.5m、水平方向温度分布の測定位置は、高さ0.8mの車両中央部、車両端部とした。

図2より、乗車率が80%程度より低い場合は測定位置による温度差は少ないが、これよりも乗車率が高くなると、上下方向で最大5℃、水平方向で最大4℃の温度差が見られ、車内に温度ムラが生じていることが確認できた。温度ムラの発生要因として、乗車率が低い場合は均一な分布に保たれていることから、お客さまの存在により空調空気が車内全体を均一に行き渡らなくなることが考えられる。

このような車内の温度ムラは、局所的に不快な環境を生じ、お客さまからのご意見に繋がっていると考えられることから、改善が望まれる。

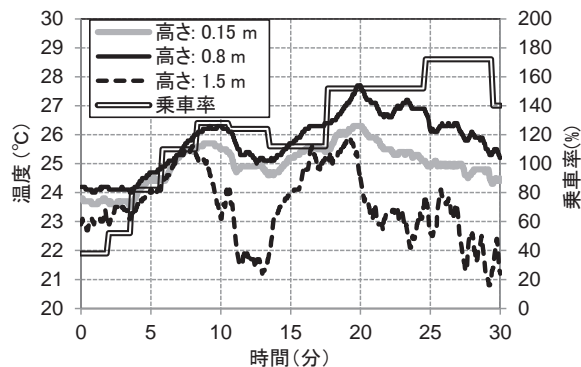
3. シミュレーション精度検証用データの取得

シミュレーションによる温熱環境の再現精度および心理応答の予測精度を検証するため、比較となる実測データを取得する現車測定を行なった。なお、空調は冷房条件のみを対象とした。

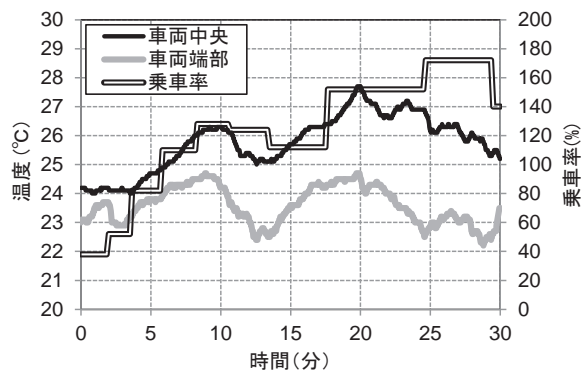
3.1 測定条件

現車測定は、2014年9月に実施した。車両基地の屋外に留置した通勤型電車の車内に複数の被験者を乗車させ、営業列車の環境を模擬した。被験者には測定の目的、内容を十分に説明し、インフォームドコンセントを得た。

被験者は性別、年代に偏りの無い43名とし、図3の位置に立位で配置し、乗車率75%相当の環境とした。冷房は車内を25℃に保つように自動で制御した。横流ファンは、動作させない条件と、1周期13.4秒で首振り動作し風量9m³/min

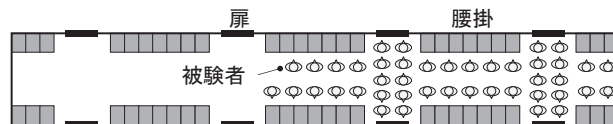


(a) 上下方向分布



(b) 水平方向分布

図2 営業列車内の温熱環境測定結果



(a) 被験者配置図



(b) 測定時の写真

図3 測定時の被験者配置

の風を車内に送る条件の2通りとした。また、日射の影響を軽減するため、カーテン等で窓面を覆い、日射の侵入を防止した。

3.2 温熱環境測定方法

温熱環境として車内の温度・湿度・風速・壁面温度、吹き出し口直下の温度・湿度、および吹き出し口風量・風向を測定した。車内の温度は複数箇所の高さ0.15m、1.1m、1.7m、湿度は複数箇所の高さ1.1m、風速は複数箇所の高さ1.1m、壁面温度は部材の異なる複数箇所にて測定を行なった。

3.3 心理応答測定方法

温熱環境に対する人の心理応答は、被験者を25℃に制御された車両内に図3のような配置で21分間滞在させ、3分毎にアンケートにより測定した。取得項目は温冷感とし、深井らの研究⁵⁾で用いられている9段階の全身温冷感申告(TSV)と対応させ、暑い:4、やや暑い:3、暖かい:2、やや暖かい:1、どちらでもない:0、やや涼しい:-1、涼しい:-2、やや寒い:-3、寒い:-4の9段階尺度を使用した。

4. シミュレーションの実施

シミュレーションは、通勤型電車のモデル中に人体熱モデルを配置し、CFDと人体熱モデルの連成解析を行なうことで、お客さまの乗車している営業列車内を想定した温熱環境の再現を行なった。さらにその再現環境下における心理応答の予測を行なった。

4.1 計算精度の目標

まず、シミュレーションによる計算精度の目標を定めた。本研究ではシミュレーションによる温熱環境の再現結果から3.3項で示した9段階の温冷感を予測することとし、実用性を考慮して1段階以内の誤差を目標とした。

続いて、この目標を達成するために必要な温熱環境の再現精度を求めた。本研究では、温熱環境から温冷感を予測する方法として、標準新有効温度(Standard new effective temperature:SET*)を用いた予測式を使用した。

SET*は体感温度の1つであり、1971年にASHRAE(アメリカ暖房冷凍空調学会)が発表したものである。「温熱感覚、放熱量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%における標準環境の気温」と定義され、単位は「℃」である⁶⁾。温度、湿度、放射温度、風速、着衣量、代謝量から算出することができる。そして、以下のようなSET*を用いた全身温冷感申告(TSV)の予測回帰式を求める研究⁵⁾が行なわれている。

$$TSV = a \times SET^* - b \quad \dots\dots (1)$$

ここで、aとbは係数であり、SET*とTSVの実測データから回帰式を求めることで算出する。深井らの研究では、式(1)の係数aは0.3~0.5程度とされており、温冷感の誤差を1段階以内とするためには、SET*の誤差を2.0℃以内とする必要がある。このためには、車内温熱環境について温度は2.0℃以内、風速は0.3m/s以内の誤差に抑える必要がある。本研究においては、シミュレーションによる温熱環境の計算値と実測値の誤差が、上記範囲内となることを目標とした。

4.2 車体モデル

温熱環境を再現するための車体モデルを構築した。車体モデルは現車測定で使用した通勤型電車の車内を3D-CADで作成し、車内の流れ場に影響する腰掛、荷棚、吊り手、中吊り広告および握り棒といった設備品を再現している(図4(a))。なお、計算時間の短縮を目的として、荷棚、吊り手、中吊り広告、握り棒については、現車測定時に被験者が存在した範囲のみの再現とした(図4(b))。

CFDによる解析手法は、一般的に用いられている有限体積法とし、乱流モデルは、乱流場の予測モデルとして一般的に用いられているk-εモデル⁷⁾とした。

入力条件として、3章の現車測定で実測した吹き出し口からの風量・風向、吹き出し口直下の温度・湿度、車内の壁面温度および横流ファンによる吹き出し条件を時系列的に与え、車内の風速、温湿度を時系列的に求めた。

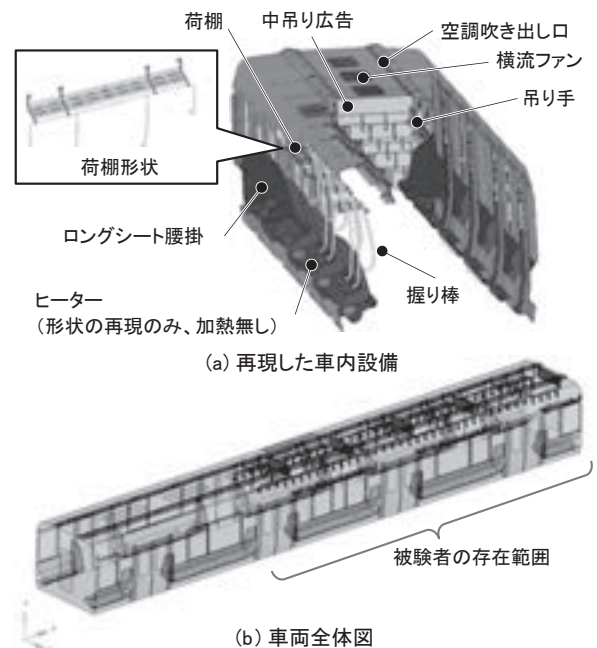


図4 3D-CADで作成した車体モデル

4.3 人体熱モデル

図5に示すように、車体モデルには、現車測定において被験者の存在した位置(図3、図4)に人体熱モデルを配置し、CFDと連成解析させることで現車測定時の温熱環境を再現した。

人体熱モデルは田辺らの開発した人体熱モデルJOS⁸⁾を用いた。CFD解析から得られるモデル周囲の温熱環境(温度、湿度、風速等)と、現車測定時の被験者情報(性別、年齢、体脂肪率、着衣量および発熱量等)を付与し、人体による発熱、発汗等を再現した。なお、体脂肪率は一般的な成人の値として男性20%、女性30%、着衣量は被験者

に半袖、長ズボンを指定したため0.5clo、発熱量は立位の代謝量から求めて男性116W、女性95Wとした。

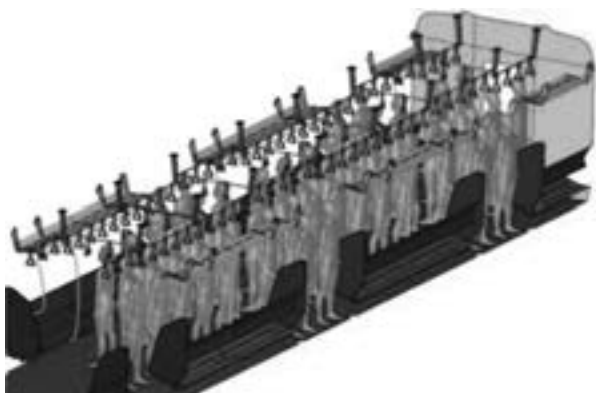


図5 人体熱モデルの配置

5. 現車測定結果とシミュレーション結果の比較

現車測定の結果とCFD-人体熱モデル連成計算の結果を比較し、シミュレーションによる温熱環境の再現精度および心理応答の予測精度の評価を行なった。

5.1 車内風速分布の予測精度

CFD解析により得られた、横流ファン稼働条件のある時間の車内風速分布を図6に示す。吹き出し口からの流れや、横流ファンからの流れを確認することができる。

横流ファン稼働条件での車内風速について、実測値と計算値を比較した。図7に風速測定点と風速値の比較結果を示す。風速の平均値については、目標精度である0.3m/sの誤差範囲内で再現することができた。また、風速は横流ファンの首振り動作により周期的に変動しており、横流ファンの直下領域 (Point2、3、4) では風速値の変動範囲が大きい。計算でもこの現象を再現することができている。

また、横流ファン停止条件においても、同様の再現精度が得られた。

5.2 車内温度分布の予測精度

CFD解析により得られた、横流ファン稼働条件のある時間の車内温度分布を図8に示す。吹き出し口からの冷気が車内に導入されている様子や、人体発熱により人体モデル周囲の温度が高くなっていることがわかる。

車内温度の実測値と計算値の時系列推移について、どの箇所、高さにおいても同様の傾向であったため、比較例として図9にPoint2(図7参照)の高さ1.1mにおける結果を示す。計算により、変動する実測の温度推移を、目標精度である2.0℃の誤差範囲内で再現することができている。なお、計

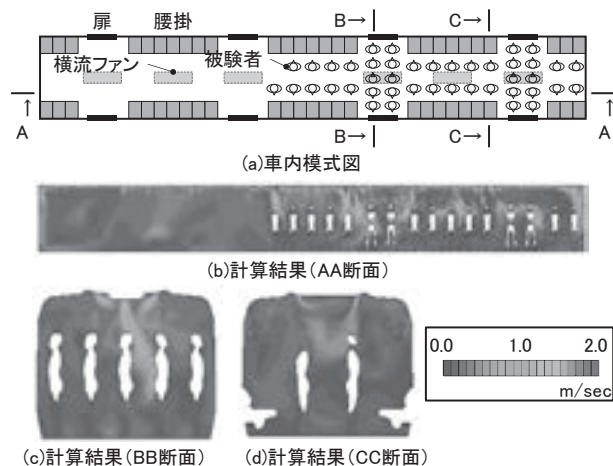


図6 風速分布計算結果の例

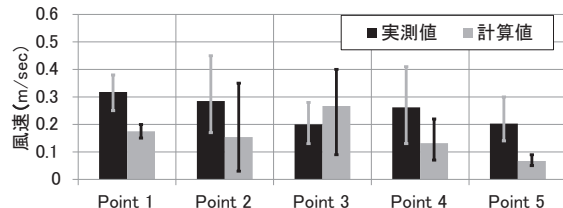
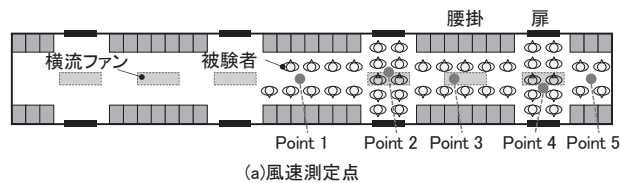


図7 実測値と計算値の比較 (風速・横流ファン稼働条件)

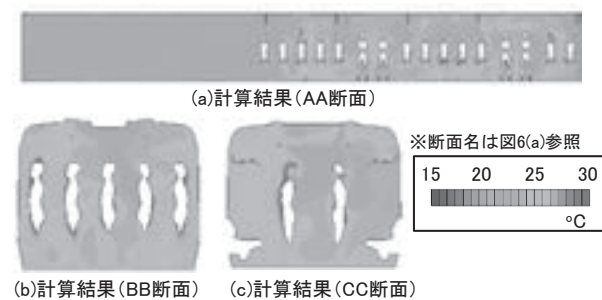


図8 温度分布計算結果の例

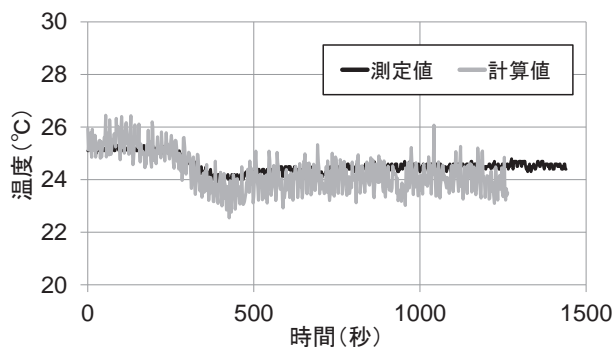


図9 実測値と計算値の時系列推移 (温度・横流ファン稼働条件) (Point2、高さ1.1m位置)

算値が短い周期で揺らいているのは、流れ場、温度場の両者を非定常で計算したためである。その他の箇所、高さにおいても図9と同様に、2.0℃の誤差範囲内で再現することができた。

また、横流ファン停止条件においても、同様の再現精度が得られた。

5.3 車内湿度分布の予測精度

CFD解析により得られた、横流ファン稼動条件のある時間の車内湿度分布を図10に示す。吹き出し口からの冷気が車内に導入されている箇所では、湿度が高くなっていることがわかる。

また、図11に、図7のPoint2の高さ1.1mにおける実測値と計算値の時系列車内湿度推移を示す。計算により、変動する湿度推移を誤差10%RH程度で再現することができている。

また、横流ファン停止条件においては、誤差が20%RH程度の再現精度であった。これらの誤差は温冷感の予測に影響の無い程度である。

5.4 心理応答の予測精度

本研究では、温冷感を心理応答の予測対象とした。温冷感の予測方法は、CFDと人体熱モデルの連成解析により算出された温熱環境値(5.1~5.3項参照)を用いてSET*を求め、式(1)に代入することで算出した。式(1)の係数a、bは、同様の通勤型電車で実施した被験者試験の結果(a=0.5379、b=12.74)⁹⁾を使用した。また、SET*の算出の際、放射温度は空気温度と同等とし、代謝量は70W/m²、clo値は0.5とした。

温冷感の予測は、車両内の部位毎に予測が可能か確認するため、車両長手方向に1組4人のグループを7グループ設

定し(図12)、グループ内の平均温冷感で評価を行なった。なお、温冷感の予測に用いる温熱環境の計算値は、4人グループの中央部(図12)の高さ1.1mで取得した。

図13に各グループにおける、横流ファン稼動条件での温冷感(TSV)の実測値と計算値の時系列推移を示す。計算

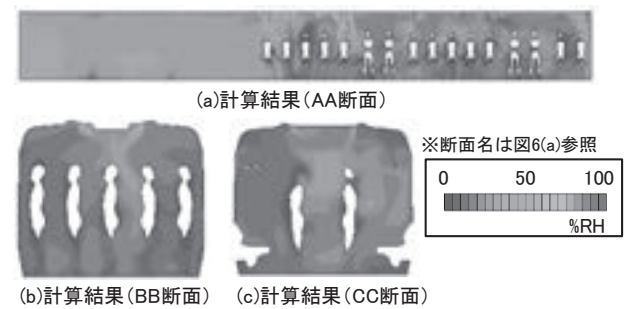


図10 湿度分布計算結果の例

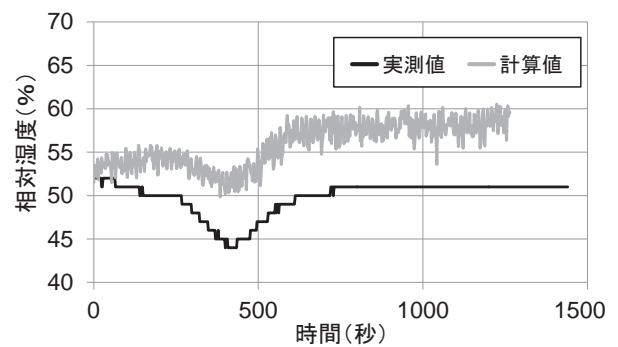


図11 実測値と計算値の時系列推移(湿度・横流ファン稼動条件)(Point2、高さ1.1m位置)

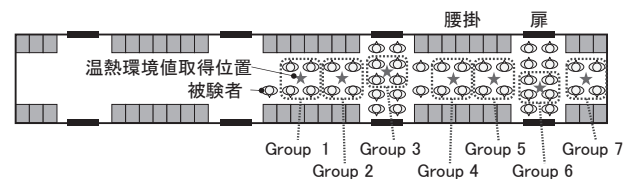


図12 被験者のグループ設定

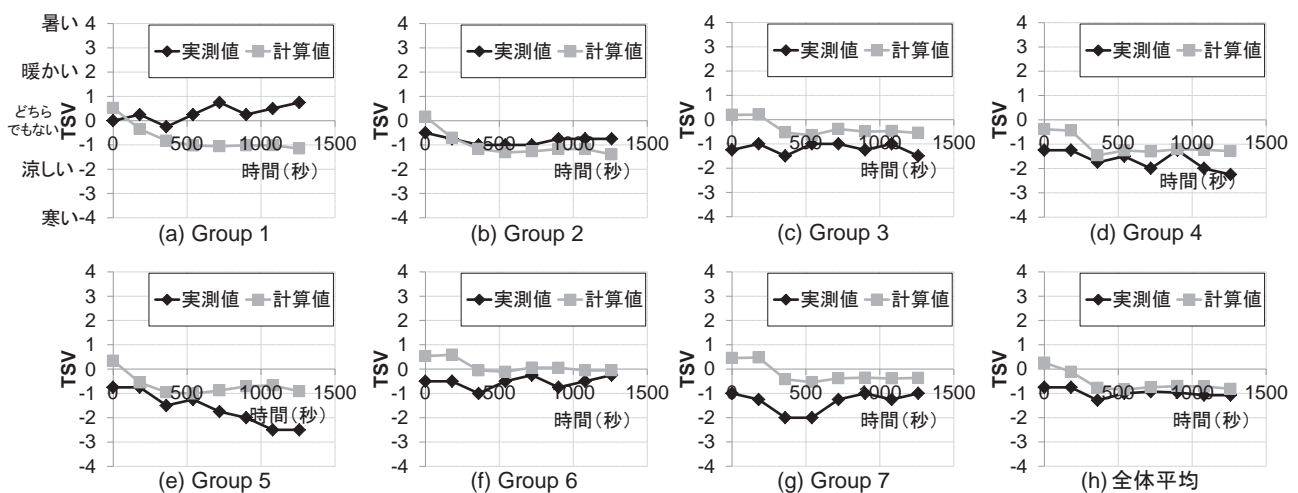


図13 実測値と計算値の時系列推移(温冷感・横流ファン稼動条件)

により、各部位における温冷感の推移傾向を再現することができた。温冷感の予測誤差は、主に個人差および風速値の計算誤差によるものと考えられる。

また、横流ファン稼働条件、停止条件における各グループの平均値を求め、実測値と計算値を比較したものを図14に示す。これにより、シミュレーションを用いた温冷感の予測誤差は、9段階中ほぼ1段階以内の精度が得られることがわかった。

以上から、シミュレーションによりお客さまの存在する営業列車の車内温熱環境を再現し、その環境下において人の感じる温冷感を実用的な精度で予測可能であることが確認できた。

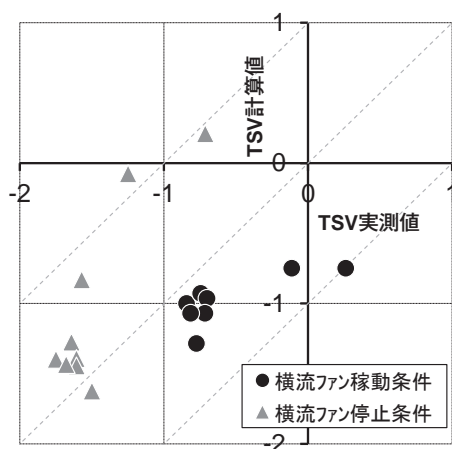


図14 実測値と計算値による平均温冷感の比較

6. おわりに

本研究では、営業列車内で生じる不快な状況を改善し、快適な車内温熱環境を構築するための検討手段として、CFDと人体熱モデルを用いたシミュレーションによる冷房稼働時の営業列車内温熱環境の再現と、その環境下における心理応答の予測を行なった。

まず、シミュレーションによる温熱環境の再現精度および心理応答の予測精度を検証するための実測データを取得する現車測定を実施し、実測値の一部を入力値としてシミュレーションを実施した。

この結果、営業列車内の温熱環境について、時系列で変化する風速、温度、湿度を再現することができた。またその再現精度は、温冷感の予測計算に必要な精度の範囲内とすることができた。そして、再現した温熱環境値から予測した温冷感は、局所的に誤差が生じる場合が見られるが、車両全体としては9段階中ほぼ1段階以内の予測誤差が得られた。

以上から、シミュレーションによりお客さまの存在する営業列車内の温熱環境を再現することができ、その環境下において人の感じる温冷感を実用的な精度で予測可能であるこ

とが確認できた。今後はこのシミュレーション技術を活用し、営業列車内の温度ムラ等、お客さまに不快感を与えてしまう状況の改善検討を行なっていく。

謝辞

本研究の遂行にあたり、近藤彰氏（トヨタテクニカルディベロップメント株式会社）のご協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 例えば、藤田明浩、金丸純一、中川洋、尾関義一、自動車室内温熱環境を予測するシミュレーションの実用化手法、HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.2(1999), pp.89-98.
- 例えば、Gagge, A.P., Stolwijk, J. A. J. and Nishi, Y., An effective temperature scale based on a simple model of physiological regulatory response, ASHRAE Trans., Vol.77, No.1, pp.247-262.
- 例えば、楊靈、加藤信介、永野秀明、朱晟偉、Fanger, Sakoi人体熱モデルを用いた椅子座位人体の位置変更に伴う温熱適応効果の比較、日本建築学会環境系論文集, Vol.73, No.630, (2008), pp.979-984.
- 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.81, No.10, (2007), pp.681-684.
- 深井一夫、伊藤宏、後藤滋、阿久井哲、斎藤純司、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・衛生工学会論文集, No.51, (1993), pp.139-147.
- ASHRAE Handbook Fundamentals, (1989), p.13, ASHRAE.
- 加藤信介：数値流体力学CFDの室内環境への応用(2) CFD解析の基礎(その1)基礎方程式、空気調和・衛生工学, Vol.71, No.7, (1997), pp. 629-636.
- 徐莉、佐藤孝広、小川一見、田辺新一、人間-熱環境系快適性数値シミュレータ（その22）：体温調節モデルJOSの開発-AVAを含む血管系の考慮、学術講演梗概集, D-2, (2002), pp.361-362.
- 林伸明、島宗亮平、長谷川晋一、遠藤広晴、大江哲之、鉄道車両内の温熱環境の再現と評価、日本機械学会 第22回交通・物流部門大会 講演論文集, (2013), pp.47-50.