

快適性予測手法を用いた自動車用暖房システムの検討

松永 和彦¹⁾ 北野 善久¹⁾ 田辺 新一²⁾ 森 勇司³⁾
¹⁾いすゞ自動車株式会社 ²⁾早稲田大学 ³⁾早稲田大学(現：鹿島建設)

Study of Vehicle Heating System with Thermal Comfort Prediction Method

Kazuhiko Matsunaga¹⁾ Yoshihisa Kitano¹⁾ Shin-ichi Tanabe²⁾ Yuuji Mori³⁾
¹⁾ISUZU MOTORS LIMITED ²⁾Waseda University ³⁾Kajima Corporation

In recent years, there has been a growing popularity of electric vehicle itself. It is said that the travel distance is half because it can not generally be used for heating the waste heat of the engine is an internal combustion engine, electric vehicles (EV), and subjected to heating by electricity. Since an important factor, thermal environment of the vehicle interior is required to provide comfortable and energy-saving air-conditioning system, however. Is intended to establish a simulation method that can be used early in the development of air conditioning system design. In this paper, thermal manikin and computational fluid dynamics (CFD) and numerical measurement by thermal manikin of the vehicle a comparison of three conditions of the mode with the foot in normal mode, bi-level mode, the panel heater is assumed during heating I consider that combines simulation. Measurement and calculation, it has almost the same tendency was confirmed as a result.

Keywords : In Vehicle , Transient Non-uniform , CFD, Thermal manikin

近年、電気自動車の普及が高まってきている。電気自動車（EV）は、内燃機関であるエンジンの廃熱を暖房に利用することが出来ない為、電気での暖房を行なうと走行距離が一般的に半減するといわれています。しかし車室内の温熱環境は重要な要素である為、快適で省エネルギーな空調システムが求められています。この空調システム開発に設計初期に利用できるシミュレーション手法を確立を目的としています。本報告では、暖房時を想定し通常のフットモード、バイレベルモード、パネルヒータを用いたモードの3種類の条件での比較を実車のサーマルマネキンによる測定と数値流体計算（CFD）とサーマルマネキンモデルを組み合わせたシミュレーションを行い検討した。結果として実測と計算は、ほぼ同等の傾向を持つことが確認できた。

キーワード：車室内、非定常、数値流体力学、サーマルマネキン

1. はじめに

本研究では、車室内温熱環境の快適性予測シミュレーションにより、温熱環境が不均一となる車室内において、空調の吹出位置及び補助暖房装置として放射パネルを使用した際の乗員生理量・心理量予測を試みた。

予測評価結果の妥当性を検証するため、車体曝露環境、車体環境、乗員生理量を取得する車室内サーマルマネキン実験を実施した。曝露環境から一括して乗員周辺環境まで解析するため、CFD（Computational Fluid Dynamics）により実験室と車体、乗員のモデル化を行い、実測値を境界条件として入力した。人体の形状モデルにサーマルマネキンの熱制御式を設定して皮膚温を予測するモデルにより乗員の生理量予測を行った。さらに IS014505-2 に記載されたサーマルマネキン実験による等価温度評価を使用して、乗員の快適性予測を行い各条件の比較を行った。

2. 実験概要

2.1 実験目的

実現象を把握し、車体曝露環境から車体伝熱を含めた一括の車体温熱環境、及び乗員の生理量、心理量の予測解析の境界条件として入力する実測値を取得するため、低温風洞実験室において、サーマルマネキン実験を行った。

2.2 実験手順

本実験は IS014505-2 に記載されている冬季暖房時の正常実験手順に基づいて行った。図1に低温風洞実験室及び助手席に設置した放射パネルの概観を示す。曝露環境は冬季夜間を想定し、車体前方の吹き出し空気温度を-10℃、実験車の駆動輪をシャシダイナモ装置に乗せて 50km/h で走行させ吹き出し風速を走行追従設定とした。また湿度制御は行わず、成り行きとする。車両助手席にサーマルマネキンを設置し、運転席にドライバーが乗車し、足元から吹出す条件（以下、FOOT と称す。）、車室内前方胸部位置と足元から吹出す条件（以下、BILEVEL と称す。）、放射空調として、足元周辺に放射パネルを設置した条件（以下、PANEL と

称す。)の計3条件で空調を稼働させた。暖房は車室内の温熱環境がほぼ定常となるまでつづけ、定常状態1分間の平均温度を最終的な温度として記録した。FOOT、BILEVELの吹出は空調ブロワ最大風量とし、PANELでは足元の吹出は空調ブロワ2段の風量とした。パネルヒーター表面は60℃になるように設定した。

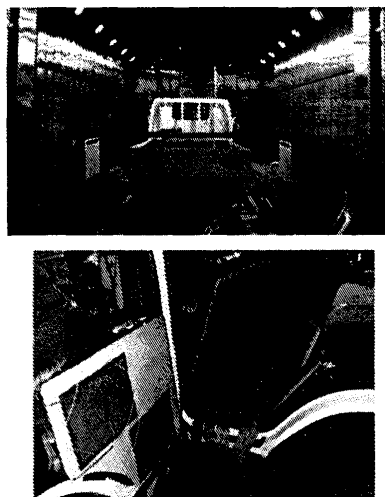


Fig.1 Cold Tunnel and Panel Heater at vehicle test

2.3 測定項目

実験室の大気温度を車体前方に設置した熱電対により測定した。車体温熱環境は、車体外表面温度16点、車室内表面温度22点、車室内空気温度28点を熱電対により、相対湿度(車室内中央大腿位置1点)は湿度計により測定した。サーマルマネキンは助手席に乗車させ、5秒間隔で皮膚温を測定した。数値計算との比較を精度良く行うため、サーマルマネキンは着衣なしの状態で行った。

3. 心理量予測モデル

サーマルマネキンの熱損失量 Q 及び皮膚温 t_{sk} から各躯体部位の等価温度 t_{eq} を算出し、ISO14505-2に記載されている等価温度と温冷感・快適感の相関図から快適性予測を行う。相関図における快適領域は夏季・冬季で異なり、「1:とても寒い」から「5:とても暑い」までの5段階で評価される。熱損失量 Q および皮膚温 t_{sk} はサーマルマネキンの躯体分割数で面積重み付けを行う。総合熱伝達率 h_{cal} は標準環境($t_a = t_r = 24^\circ\text{C} \pm 0.2^\circ\text{C}$, $v_a = 0.05\text{m/s}$, Δt 0.1-1.1m < 0.4℃)でのサーマルマネキン躯体部位ごとの総合熱伝達率であり、チャンパー内において別途計算が必要となる。式(1)に部位別等価温度 $t_{eq, segment}$ 算出式を、式(2)に全身等価温度 $t_{eq, whole}$ 算出式を示す。

$$t_{eq, segment} = t_{sk, segment} - \frac{Q_{segment}}{h_{cal, segment}} \quad \dots (1)$$

$$t_{eq, whole} = t_{sk, whole} - \frac{Q_{whole}}{h_{cal, whole}} \quad \dots (2)$$

t_{eq} : Equivalent Temperature [$^\circ\text{C}$]、 t_{sk} : Skin Temperature [$^\circ\text{C}$]

h_{cal} : Combined Heat Transfer Coefficient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

Q : Total of Convective Heat Loss and Radiation Heat Loss [W/m^2]

t_a : Air Temperature [$^\circ\text{C}$]、 t_r : Radiation Temperature [$^\circ\text{C}$]

v_a : Wind Velocity [m/s]

4. 温熱環境シミュレーション

実験室、車体、人体の3Dモデルを作成し、FOOT、BILEVEL、PANELの3条件において、車室内温熱環境が定常に達した際の温熱環境予測を数値流体解析により試みた。計算結果と実測値を比較し、モデル精度を検証した。

4.1 モデル概要

図2に非構造格子系ソフトで作成したモデル概要図を示す。人体形状データ(体表面積 1.51834m^2)を2体、車体モデルキャビン内部に乗車させ、要素分割を行った。総要素数は約280万、人体表面では約3.6万となった。解析領域は実験室内表面から人体皮膚表面までとした。インパネ内部空間等は再現が困難であり、計算時間を短縮するために非解析領域とした。また人体が座面に沈み込んだ正確な形状を再現する事は困難であるためシート座面と接触させず、わずかに浮かせた状態で車室内に固定した。

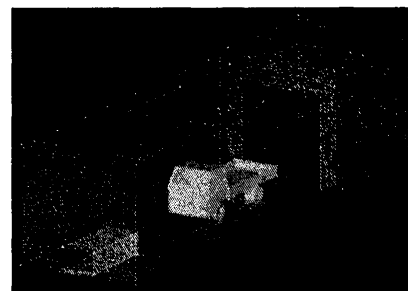


Fig.2 Mesh Model

4.2 解析条件

図3に車室内空調詳細図を示す。境界条件は実測値を基に、車体部材の物性値は実際の車両仕様を基に設定を行った。実験室は断熱壁面とした。また、実験室吹出し口に、50km/h走行想定質量流量、空気温度 -10°C 、相対湿度の流入条件を与え、風向は吹出面に垂直とした。実験室天井後方にある実験室内気吸込口は境界面差圧0Paとして設定した。車体熱貫流を再現する部材はガラス、リアパネル、床、ドア、ピラー、ルーフ、シートで、厚みのない領域には物性値及び厚みの条件を与え、体積領域には物性値のみ与えた。インパネ等には実測値を固定値として入力した。実車では隙間風による熱損失があるが、モデルで再現する事が困難であるため、隙間風による換気(30回/h)を想定して、足元の隙間風流入部より外気が流入する設定とした。P1からP8は助手席に設置した放射パネルを表す。全条件において、左右ドア後方にあるアウトレットを境界面差圧0Paとし、車室内空気が流出する設定とした。放射率は人体表面、実験室表面、車体で0.95とした。

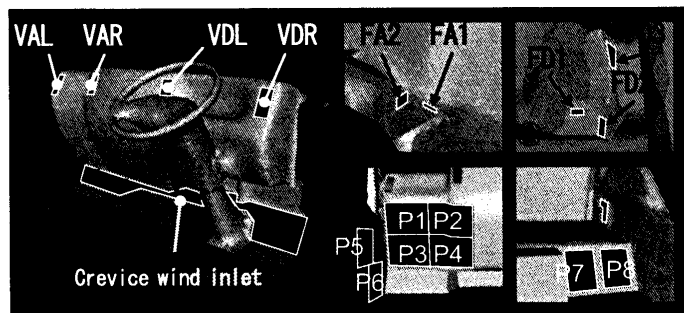


Fig.3 Air Conditioner in Vehicle Cabin

4.3 サーマルマネキン数値モデル設定条件

サーマルマネキンの皮膚温制御を模擬するため、皮膚表面から環境までの熱抵抗値を式 (3) から算出し、人体形状データの躯体部位表面に熱伝導率を設定した。サーマルマネキン内部には 36.4℃ の一定発熱を与えた。その後、解析結果の熱損失量からサーマルマネキンの皮膚温制御式である式 (4) を用いて皮膚温の算出を行った。実測同様、サーマルマネキンは裸体とした。

$$I_t = 0.054 + 0.115I_{cl} \quad \dots (3)$$

$$t_{sk} = 36.4 - 0.054Q_l \quad \dots (4)$$

I_t : Thermal Resistance from The Skin Surface to Environment (Clothing) [clo]

I_{cl} : Clo, Basic Thermal Resistance [clo]

t_{sk} : Skin Temperature [°C]

Q_l : Quantity of Heat Loss at Clothing [W/m²]

5. 実測・解析結果

5.1 車体外・車室内表面温度

図 4 に車体外・車室内表面温度を示す。外表面温度の実測結果は各条件においてほとんど差が見られなかった。内表面温度はルーフ・リアパネルにおいて BILEVEL が他条件よりも高くなっていた。

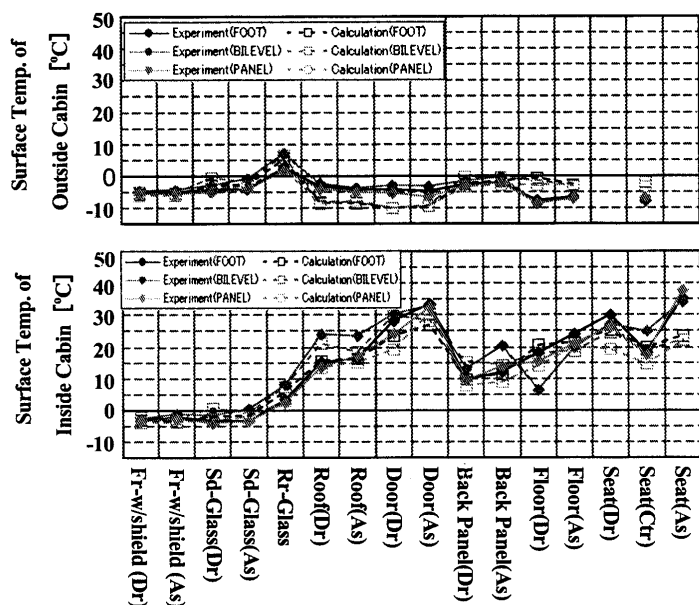


Fig.4 Temperature of Inside and Outside Vehicle Surface

BILEVEL は他条件よりも吹出し風量が多く人体に当たった風が天井及び背面を温めたためと考えられる。計算結果に関して、ガラスは全ての条件において外表面、内表面とも再現精度が高く、熱貫流が再現されていた。ルーフは空気層が実車よりも厚いため、熱貫流が小さくなっていた。実車ではドア内部は、アウトレットを通過した車室内空気が排出される経路となっているが、モデルでは無垢材として体積領域に物性値を設定しているために誤差が生じたと考えられる。シートは厚みが実車よりも薄いため熱貫流が大きくなった。全体としては温度分布が再現されており誤差が約 5℃ 以内となっているため、概ね再現性のあるモデルといえる。

5.2 実験室・車室内空気温度

図 5 に実験室・車室内空気温度を示す。頭部は天井から 150mm、胸部は 350mm、大腿部は 650mm、足元は床面から 100mm の位置とする。実験室は各条件とも約 -10℃ が再現されていた。FOOT 及び BILEVEL において大腿部位置より上部の空気温度が実測値と比較して約 2℃ 程度高くなっていたが、温度分布は概ね一致しており、FOOT において足元の温度が高く、BILEVEL において上方の空気温度が高くなる傾向を再現していた。PANEL 条件では足元が実測値よりも低い値となった。実車では車室内全体からの隙間風があるが、本モデルにおいては隙間風流入部を足元に集約している事が原因と考えられる。PANEL では FOOT 吹出しからの総風量が FOOT の半分だが、車室内平均温度は FOOT とほぼ等しく、補助暖房装置として放射パネルが有効であるといえる。

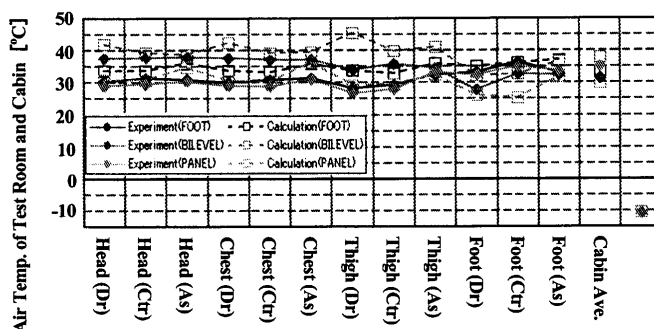


Fig.5 Air Temperature of Vehicle Inside and Outside

5.3 サーマルマネキン皮膚温

図 6 にサーマルマネキン部位別皮膚温を示す。各条件において皮膚温分布は概ね一致していた。背部において各条件とも計算値が実測値よりも低い値であった。モデルでは乗員をシートから浮かせて設置していることにより、乗員の背中側に気流が通過したことが原因と考えられる。BILEVEL において胸部及び右腕の皮膚温が高くなり、PANEL において足先の温度が低くなる傾向が再現されていた。BILEVEL ではハンドルに当たった気流が左右不均一に暖め、PANEL では足先周辺に放射パネルが無いと考えられる。隙間風の影響により全条件とも足の皮膚温が低く計算された。

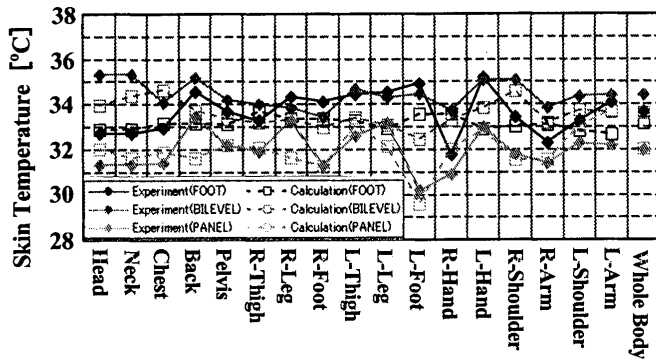


Fig.6 Skin Temperature of Thermal Manikin

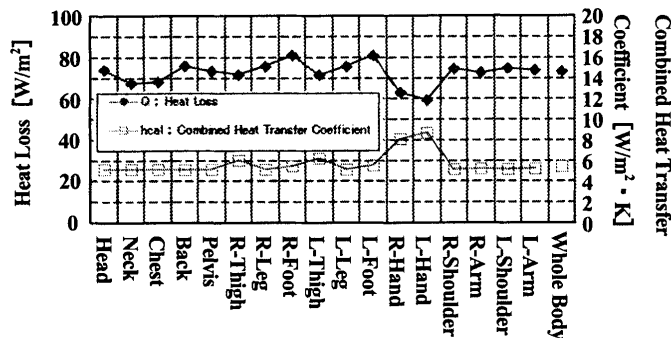
6. 心理量予測

体温調節数値モデルやサーマルマネキン数値モデルなどを利用すると躯体部位ごとの生理反応を考慮した解析が行える。実験室、車体、乗員モデルを用いて等価温度による心理量予測を行った。

6.1 ISO14505(等価温度による心理量予測)

6.1.1 標準環境チャンパーモデル

標準環境下での総合熱伝達率 h_{cal} を求めるため、ASHRAE に仕様が記載されたテストチャンパーのモデルを作成しキャリブレーション状況を再現した。図 7 にマネキン全身と躯体ごとの熱損失量・総合熱伝達率を示す。チャンパー内は標準環境が再現され、人体発熱による上昇流が確認できた。各躯体部位の総合熱伝達率 h_{cal} は約 6W/m^2 となる結果を示した。

Fig.7 Heat Loss · Combined Heat Transfer Coefficient
(Standard Condition)

6.1.2 等価温度による車室内快適性予測

図 8 に実験条件における等価温度による快適性予測結果を示す。PANEL では全身が「とても寒い」を示した。右腕の各部位において「寒いが快適」であるのに対して左腕が「快適」及び「暖かいが快適」となっているのは、助手席ドアに設置した放射パネルが影響していると考えられる。全体では足元が「とても寒い」結果となっており、皮膚温が低く頭熱損失量が多いことが原因と考えられる。FOOT では全身・ほぼ全ての部位が「快適」を示した。冬季の快適域は足元に行くにつれ高い等価温度になっているため、FOOT は効果的な暖房方式であるといえる。BILEVEL では全身が「暖かいが快適」を示し

た。身体各部では上方が「暖かいが快適」、下腿以下はほぼ「寒いが快適」、大腿が「快適」を示した。

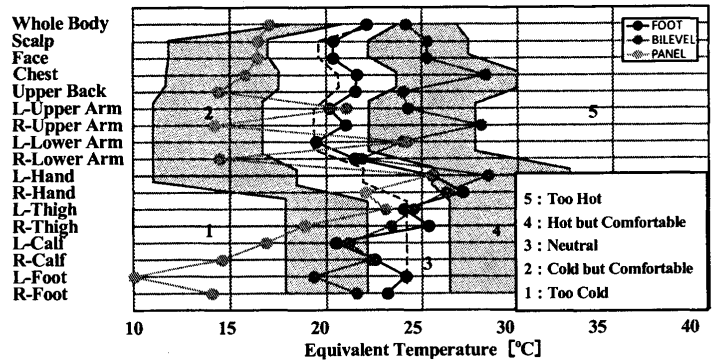


Fig.8 Prediction of Thermal comfortable by Equivalent Temperature

7. まとめ

- (1) CFD 解析結果を実験結果と比較した。車体熱貫流・車室内温熱環境・サーマルマネキン皮膚温が概ね再現された。
- (2) CFD 解析結果を用いて等価温度による快適性の予測を行った結果、FOOT で最も快適であるとの結果を得た。

参考文献

- P.O.Fanger: Thermal Comfort, Danish Tech. Press, 1970
A.P.Gagge, A.P.Fobolets, L.G.Berglund: F A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Transactions, Vol.92, Part 2, 1986
ISO-14505: Ergonomics of the Thermal Environment - Thermal Environment in Vehicles (Part 1-3), 2007
Hui Zhang: Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments, PhD., 2003
Keita Murakami, Shin-ichi Tanabe, Masaaki Haneda: Numerical Thermoregulation-Model JOS for Evaluation of Thermal Comfort, Roomvent, 2007

<連絡先>

連絡先氏名 松永 和彦

住所 神奈川県藤沢市土棚 8

所属 いすゞ自動車(株)電装・制御開発部

E-mail アドレス kazuhiko_matsunaga@notes.isuzu.co.jp