

学 位 論 文 題 名

車室内環境評価へのサーマルマネキンの
導入と設計を志向した実証的研究

学位論文内容の要旨

近年、自動車の分野でも車室内環境の熱的快適性が注目され、重要視されてきている。環境の温熱性に関しては、建築系の分野では研究が進んでいるが、自動車に限らず交通機関ではこれからの研究対象である。通常の室内環境と比較して、自動車では次の3点で大きく異なる。第一に人の占有空間が狭く姿勢が限られること、第二に断熱性が悪いこと、第三に移動による外部環境の変化に伴う車内環境への影響が挙げられる。

車室内の容積は、一般住宅8畳間のわずか1/10の狭い空間にもかかわらず、暖房能力が約2倍であることから、厳しい条件であることが理解できる。特に窓際の乗員は、夏季には日射の影響を受けて暑く、冬季は冷放射の影響を受けて寒さを感じる。

国外の最新動向として、空調関係のISO（国際標準化機構）が、車室内の温熱環境評価に注目しており、ISO/TC159（人間工学）/SC5（環境人間工学）/WG1（温熱環境）の専門家委員会は、新しいIS（国際標準規格）として、ISO NP14505: Evaluation of the thermal environments in vehicles（車室内の温熱環境評価）の作成を目指している。この動きを受け、日本の自動車技術会の内部組織である車室内環境専門委員会では、ISOの動向調査とその対応を開始した。

本研究は、こうした背景から、車室内の熱環境を評価する方法を検討し、その上に立って、理想的な環境を如何に具現するかを目的としている。車室内の温熱環境の評価と設計に際し、日本で最初のサーマルマネキンによる事例を示した。その結果、サーマルマネキンを用いることで、気温のみで車室内環境評価を行う従来の手法に比して、日射や長波長放射による影響を定量的に把握することが可能となった。

また、温冷感評価で用いた、Madsenの等価温度を、新しく導出した修正等価温度と比較検証し、使用上の限界と注意点を示した。

実証研究として、自動車室内の温熱環境の特徴と問題点の現状を述べ、車内における放射暖房の有効性を示した。

本論文は7章より構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章「序章」では、自動車の暖房システム能力が、標準的な建物に比べて、「狭い空間」、「断熱性が悪い」、「走行による外部環境の変化に伴う車内環境への影響」などの問題点を有し、通常の居住環境に対して暖房能力が2倍の約4000Wで1/10の容積の車内を暖房することを述べ、車両暖冷房システムの概要、および最近の車室内環境におけるISOの動向を紹介し、本論文の構成を記した。

第2章「従来の研究と本研究の目的」では、従来の研究と本研究の目的を示した。現状では、気温を検知して車室内の環境を制御しているが、車室内気温の均一化を目指した制御を行っても、気温の一様化は難しく、さらにドラフトも加わり、熱的不快感を与えている。この改善に向けて、熱放射による快適な暖房環境を車両室内に創出することを検討し、本研究の目的を記した。

第3章「自動車室内の温熱環境評価法」では、新しく開発した放射暖房システムによる自動車の室内温熱環境評価を行うことで、放射暖房の有効性と実用性を実車試験により明確にした。この目的のために冬の北海道で改良した実車走行試験を行い、サーマルマネキンによる計測と被験者を用いた基礎データを収集し、放射暖房の有用性を明らかにした。

第4章「等価温度の分析と検討」では、使用範囲を限定すれば、Madsen の等価温度 T_{eq} を用いて評価が可能なことを示した。

Bedford の等価温度 T_{eq} 、Madsen の等価温度 T_{eq} での不合理な点は、不感蒸泄と発汗に伴う放熱量を正しく考慮しておらず、湿度の体感温に及ぼす影響の少ない低温環境では実態と大きな違いは見られないが、高温環境では湿度の影響が大きくなる為、実際の温熱感と合わない点と、式中の係数が持つ意味が不明な点である。しかし、暖房環境では、蒸汗放熱量を一定値として扱うことが可能である為、対流と放射のみでの対応が可能となる。すなわち、使用範囲を限れば、従来のように Madsen の等価温度 T_{eq} を用いて暖房環境を評価できることを確認した。

第5章「夏期における車室内熱環境の評価実験」では、本論文の主点である、暖房環境実験に先立ち、基本的な問題点を探る意味も含めて、車室内の直達日射の影響をみる為に、温熱性の評価をサーマルマネキンの等価温度を用いて行い、以下の結果を得た。

- ①トラック車室内環境：直達日射の影響は、車室内の気温測定では、明確な違いが見られなかったが、サーマルマネキンによる等価温度からは、直達日射の影響を確認できた。また、エアコンの冷風の影響もサーマルマネキンの等価温度で評価できる事を示した。
- ②バス車室内環境：日射の影響をサーマルマネキンの等価温度で確認できた。また、気温 25°C 、上下分布が $0.2 \sim 1.8^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $45 \sim 50\%$ の範囲であれば、被験者の温感評価とも良くあっていることから、等価温度での評価が可能であることを示した。

第6章「放射暖房システム車の開発と車室内の温熱環境評価およびその有効性」では、温風暖房と放射暖房の比較実験を行い、以下の知見を得た。

- ①放射パネルヒータを用いることにより、温風暖房で見られたような助手席と助手席後席における車室内の気温の不均一性が改善された。
- ②頭部が暑く脚部が冷え、かつ、ドラフトの大きい送風暖房方式を改善する上で、放射パネルヒータ方式は、大きな改善がみられた。
- ③被験者の温冷感申告では、明らかに放射パネルヒータを作動させた方が、作動させない時のやや寒いに対して、やや暖かいと明確な違いが見られた。
- ④車両の断熱性の向上、特にガラス面からの放射熱をいかに低減させるかが今後の課題と考えられ、有効な放射パネルの開発が望まれる。

第7章「総括」では、本研究で得られた結果を要約して述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 持 田 徹

副 査 教 授 窪 田 英 樹

副 査 教 授 繪 内 正 道

副 査 助教授 横 山 真太郎

副 査 助教授 長 野 克 則

学 位 論 文 題 名

車室内環境評価へのサーマルマネキンの 導入と設計を志向した実証的研究

自動車の暖冷房設計は、これまで最大暖房能力と最大冷房能力に重きを置かれ、実車を用いた車室内の気温計測を中心に、可視化実験や熱を伴う流体の数値解析をもとに行われてきた。一般の乗用車やトラックの車室内の容積は、住宅8畳間のわずか1/10の狭い空間であるにも関わらず、最大熱負荷が、約2倍であることから厳しい環境であることが理解できる。低断熱性の要因の一つである窓は、走行中の安全性から可視光透過率が法律で定められており、このため窓際では夏季は日射を受けて暑く、冬季は窓面からの冷放射により寒く感じる。環境の温熱性評価や設計に関する研究は、建築関係の分野では数多く行われているが、自動車に限らず走行中の交通機関ではあまりなされてはならず、これからの研究対象である。近年、自動車の分野でも車室内環境の熱的快適性が重視されつつあり、ISO（国際標準化機構）が基準の制定に向けて検討に入っている。一方、我が国でも、2000年に自動車技術会が車室内環境専門委員会のワーキンググループを設置し、ISOの動向調査とその対応を開始した。

こうした背景から、本論文は車室内の熱環境を評価する方法を検討し、その結果を踏まえて、熱的に快適な環境の具現化を目的としている。従来、車室内の温熱環境計測と言えば、気温のみか、せいぜい風速の計測が考慮される程度であった。著者は、気温と風速に加えて、日射や湿度などの物理的要素が、人の温冷感に与える影響度合を定量評価することを目的とし、車内用に改良したサーマルマネキンを用いて、ISOに先駆けて車室内の熱環境計測と評価を試みた。さらに、従来、温冷感評価に用いられてきたMadsenの等価温度と、著者が新しく導出したより合理的な等価温度との比較検討を行い、Madsenの等価温度の限界と注意点を示している。さらに、自動車室内の温熱環境の特徴と現状の問題点を述べ、走行実験を行って、放射暖房の効果を実証している。

本論文は7章より構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、序章として自動車の暖冷房システムの歴史的背景や解説、車室内環境の特徴としての「空間の狭小性」、「低断熱性」、「走行に伴う外部環境変化の車内環境への影響」

などについて触れ、さらに車室内環境の評価に関する最近のISOの動向を紹介し、本論文の構成を記している。

第2章「従来の研究と本研究の目的」では、現車両に標準装備されている温風暖冷房の特徴、制御方法、システム構成および、最大能力重視の評価方法に関する問題点を述べ、乗車時の快適な温熱環境を提供するための具体的手段として、放射暖房方式に着目し、本研究の目的を述べている。

第3章「自動車室内の温熱環境評価法の開発」では、人体側と環境側の6要素と熱的快・不快感の関係を論じ、暖房環境用の評価指標として用いられている等価温度、作用温度、新有効温度、予想温冷感申告などの概要を記すと共に、今後、車室内の評価ツールとして主流になる可能性の大きいサーマルマネキンの熱特性について記している。

第4章「等価温度の分析と検討」では、自動車用の評価指標として用いられているMadsenらの等価温度の分析を行っている。著者は体心から環境までの熱移動を系統的に考えることにより、新たに等価温度を導いた。松永の等価温度は、その定義式の中に人体の対流熱伝達率、放射熱伝達率、着衣量などがパラメータとして表示されており、Madsenらの等価温度において、定数値と扱われている3つの項に掛かる係数の内部構造を明らかにしている。すなわち、内臓、骨、筋肉、血液などをマクロにみた、体心から皮膚表面までの相当熱抵抗の取りうる範囲を、体心温、皮膚温、気温、湿度、活動量の組み合わせを考えて検討した。その結果、Madsenの等価温度式で気温、平均放射温に掛かる係数が一定値として与えられているのに対し、松永の等価温度式では、風速が変化した場合、Madsenの等価温度式では気温の項は、実際よりも影響が小さく、平均放射温の項は、実際よりも影響が大きくなることを確認している。つぎに、冬期の車室内環境を想定し、着衣量、体内温、気温、風速、湿度の各組み合わせのもとで、Madsenの等価温度と松永の等価温度の示値との比較を行い、等価温度の適用範囲、有効性を検討した結果、暖房環境で使用する限り、前述の相殺効果により、Madsenの等価温度と著者の等価温度では、結果的には大きな差が無く、実用上使用して差し支えないことを確認している。

第5章「夏期における車室内熱環境の評価実験」では、本論文の主題である暖房環境の実験に先立ち、基本的な問題点を探る意味も含めて、大型観光バスを実際に高速道路で走らせ、被験者の温熱感申告とサーマルマネキンの等価温度の対比を行っている。その結果、車室内の気温測定だけでは、温熱感に及ぼす日射の影響をうまく評価できなかったが、サーマルマネキンによる等価温度を用いた場合、直達日射の影響を良く定量でき、さらに、被験者の温感評価とも良い相関を示したことから、等価温度での評価が可能であることを確認している。

第6章「放射暖房車の開発と車室内の温熱環境評価およびその有効性」では、新しく取り入れた、放射暖房方式によって形成された車内熱環境の評価を行うことにより、放射暖房の有効性と実用性を実車試験により明確にし、放射暖房の効果を述べている。放射パネルヒータを用いることにより、温風暖房で見られたような、前座席と後部座席における車室内の気温の不均一性が改善されると共に、被験者らの温冷感も快適性が向上したことを示している。頭部が暑く脚部が冷え、かつ、ドラフトの大きい温風暖房方式に対して、放射パネルヒータを作動させた方が、作動させない時のやや寒いに対して、やや暖かいと暖かさの側へ申告値が転じ、環境の温熱性が改善されたことを確認している。

第7章は、総括であり本研究で得られた結果を要約して述べている。

これを要するに、著者は走行中の車室内の暖房環境を評価するために、人の温熱特性を備えたサーマルマネキンを用いることを提唱し、かつ、Madsenの等価温度によって温感評

価ができることを示し、車両における放射暖房の有効性を実証したことから、車内熱環境の評価と設計、および暖房環境工学の進展に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格があるものと認める。