

学位論文題名

SET*を用いた車内熱環境の評価法に関する研究**学位論文内容の要旨**

近年、自動車の開発期間は大幅な短縮を余儀なくされているため、開発効率の向上は優先度の高い課題の一つになっている。自動車の開発過程は、計画、設計、生産の三段階に大別される。計画段階においては、商品企画の上で必要とされる性能を満足させるための基本構造が検討される。この段階の検討は従来から、その大部分を簡易的な予測計算が担っていたが、最近では、計算機支援技術(CAE)の進展によって、定量的な予測計算が可能となり、大幅な開発効率の向上が図られつつある。一方、設計段階では、試作車を設計・製作して各種の実験評価を実施している。この段階は、予測計算では捉えることのできない微妙な特性や、定量化し難い感性に関わる検討項目が大きな比率を占めるため、実験を遂行する担当者の主観に基づく判断に依存している。感性に基づく評価は、高品質な製品開発には欠くことのできない過程であるものの、改善の段になると試行錯誤に陥りやすく効率向上の妨げにもなっている。この種の問題を抱える項目の一つに空調系の開発がある。本論文では、開発効率の向上を目的として、従来から困難と考えられてきた乗員の局所的な温熱快適性を定量化し、より合理的で客観的に評価できる新しいプロセスを提案した。これは、①車内の熱的な環境条件の計測、②人体の熱平衡計算による温熱的な生理反応の予測、③温感指標による評価、の三段階で構成されている。本論文では個々の段階において必要となる技術を提案し、特に②項に関する計算法に重点を置いた。

人体熱平衡の計算法に関しては、分布定数系に基づく方法と集中定数系に基づく方法が、従来から提案されている。前者は、体内の伝熱特性や温熱的な生理反応を厳密に計算することを目的としているが、任意の熱環境に対して実用的な精度が得られる迄には至っていない。一方、後者は、人体熱平衡を総括的に捉えることを狙いとしており、Gagge らが提案した二層モデルや Fanger が提案した快適方程式などがある。しかし、これらは全身の評価を目的に開発されたモデルであるため、人体の局所的な予測に適用する場合には、さらに検討の余地が残されている。また、これらを基にした温熱指標である SET* (Standard New Effective Temperature) や PMV (Predicted Mean Vote) は、至適環境に近い条件に対しては実用的な精度が得られている。このうち、本論文で採用した SET* は、米国暖冷房空気調和学会 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: ASHRAE) が推奨する指標で、気温、湿度、放射、風速、着衣、代謝といった温冷感を支配する基本要素を全て考慮した指標であるが、局所的な評価に適用する場合には、検討の余地が残されている。

本論文では、人体の局所的な熱平衡と温冷感を予測するために、分散二層モデルを新たに提案した。これは、集中定数系に属する計算法で、「共通の中心部温」という概念を用いつつ、人体の部位毎に二層モデルを適用する方法である。さらに、本モデルで算出した部位別の温熱的な生理反応を基に局所的な SET* を求める方法を提案し、全体をまとめて新しい評価プロセスを構築した。

本論文は 8 章より構成され、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、研究の背景と目的、全体構想について示した。

第2章では、対流による熱伝達特性の計測法について述べた。本論文では、設計段階で試作車の車内熱環境を評価するのみならず、改善検討することも想定しているため、サーマルマネキンと風速マネキンによる計測を組合せ、対流による伝熱特性を汎用化する方法を提案した。併せて、開発の効率向上を目的としたアメニティーマネキンによる簡易計測を試みた。

第3章では、主に放射による熱伝達特性の計算法について述べた。新たに提案した計算法は、車内壁面からの放射伝熱量や窓を通過して車内に侵入する直達日射量、天空日射量を計算するものである。上述のように、本論文では評価のみならず改善検討を行うための特性予測をも想定しているため、人体と室内壁面との間の形態係数を求めることが課題となるが、特に車内の凹凸や乗員自身の身体と放射伝熱線の経路との干渉の影響を計算できるように配慮した。また、開発の担当者が実務で活用することを想定し、入力の手便性にも配慮した。最後に、本計算法を代表的なトラック室内の検討に適用し、車両方向や季節、時刻、内装部材の壁温やガラス表面温度の違いが乗員の放射伝熱量に与える影響に関する定量的な知見を得た。

第4章では、二層モデルの基本的な特性に関して述べた。Gagge らが発表した初期モデルに対して近年 ASHRAE が推奨しているモデルでは、計算モデルの一部が改善されている。そこで本章では、両モデルの違いが特性に及ぼす影響を吟味し、本論文の基になる ASHRAE モデルの諸特性を明らかにした。さらに、二層モデルでは日射の影響について定式化されていないため、新たに日射の影響を含めた二層モデルの熱平衡式を導出した。併せて、人体の熱平衡を考慮に入れた日射の影響を、等価的な作用温度に置き換える考え方を提案した。

第5章では、新たに開発した分散二層モデルによる人体の局所的な熱平衡に関する計算法について述べた。本モデルは、体深部温度を動脈温度と見なした上で、全部位で同一の温度になると仮定し、各部位に対応した複数の二層モデルを連結した計算論理に特徴がある。そして、本モデルで計算した部位別の熱平衡と、二層モデルで計算した全身の熱平衡が整合するように、代謝量、震え産熱量、皮膚血流量の各部位の特性は、全身の平均量に各部位別の分配比率を掛けて算出する計算論理とした。つぎに、計算論理に含まれるモデル定数を同定するために、人工気候室で車内の夏季冷房時の作用温度を想定した被験者実験を行い、各条件下での皮膚温の特性を解明した。本論文では、この実験で想定した熱環境に対して、概ね $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内の精度で皮膚温が予測できるように、モデル定数の一つである体内の熱通過率を同定した。なお、この熱通過率の考え方については、第6章で詳細に論じている。予測精度を検証するために、人工気候室の中に放射パネルおよび日射ランプを設置し、不均一な放射による伝熱環境を模擬した実験を行って、本モデルの予測値と比較した。その結果、ここで検討した負荷の偏り範囲では、概ね満足できる精度で予測でき、環境条件の変更による影響も、よく予測できることが確かめられた。また、頭部と下腿部の気温差が 8°C 程度ある山岸らの実験に本モデルの適用を試み、極端に不均一で本モデルの仮定が満たされなくなるような熱環境下では、予測精度が $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 程度にまで低下することを確かめ、本手法の可能性と限界を明らかにした。

第6章では、分散二層モデルで用いた熱通過率を、適切な値に定めるため、有限体積法による伝熱解析プログラムを作成し、生体組織内の熱移動解析を行った結果を述べた。本解析を通じて、作用温度の変化に応じて熱通過率が変化する機構を明らかにすると共に、第5章で述べた被験者による実験結果が、理論的にも符合する特性を示していることを確かめた。この結果を踏まえた上で、実験の際に想定した熱環境の範囲内で実用的な予測精度が得られるよう、熱通過率を決めるための指針を定めた。

第7章では、車内の局所的な熱環境を、温熱指標により定量化する方法を述べた。まず、全身の評価として用いられている SET^* を拡張して、部位別の評価に適用する局所 SET^* の考え方を提案した。つぎに、局所 SET^* と開発担当者の温冷感申告とを対応させるために被験者実験を行い、両者の相関関係を回帰して部位別の温冷感申告の予測式を提案した。そして各章の方法を統合し、

「車内熱環境の評価プロセス」を完成させた。最後に、本手法を夏季における典型的な車内の冷房環境へ適用して、その有用性を示した。

第8章では、本論文において得られた結果を総括した。

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

SET^* を用いた車内熱環境の評価法に関する研究

自動車の開発は、計画・設計・生産の3つの過程に大別される。基本計画と初期設計の段階における、基本的な構造や性能に関する検討は、実験よりむしろ予測計算に重点が置かれている。近年、計算機支援技術であるCAEの進展による予測精度の向上によって、予測計算は定量的な判断の基準になりつつあり、このことが開発効率の改善に大きく寄与している。一方、試作車を用いた評価は、「感覚」に拠る検討項目が主たる部分を占めており、その定量化が困難なため、依然として担当者の感覚とそれに基づく判断に依存している。しかし、このような感覚に基づく検討は試行錯誤に偏り勝ちとなるため、開発効率を高める上での妨げとなっている。自動車の空調系開発もこの種の問題を抱える分野の一つである。それ故、高品質な製品を効率的にしかも安定的に開発することを目的として、従来から困難と考えられてきた熱的快適性を定量化した、より合理的で客観的な評価法の開発が切望されていた。このような背景の下で、本論文は、試作車の局所的な車内熱環境を評価する新しいプロセスを提案している。これは、①車内の熱的な環境条件に関する計測、②人体の熱平衡計算に基づく温熱的な生理反応の予測、③温熱指標に基づく温冷感の評価、の三段階から構成されている。特に、②項が本論文の中核をなしている。

人体の熱収支に関する計算法は、分布定数系モデルと集中定数系モデルに分けられる。前者は、生理学や解剖学の知見に基づいて、体内の伝熱特性や温熱的な生理反応を厳密に算出することを主眼に置いているが、任意の熱環境に対して実用的な精度が得られる迄には至っていない。一方、後者は、人体の熱平衡を総括的・平均的に捉えることを狙いとしており、Gaggeらが提案した二層モデルやFangerが提案した快適方程式がある。これらを基に求めた温熱指標である SET^* (Standard New Effective Temperature)や PMV (Predicted Mean Vote)は、至適環境に近い条件に対しては実用的な精度を与えることが知られている。しかし、これらの指標は、全身の評価を目的に開発されたものであり、自動車の開発に必要とされる人体周囲の局所的な熱環境の評価に適用するには、更なる検討の余地が残されている。

本論文では、部位の温冷感を評価するために、集中定数系モデルに属する分散二層モデルを新たに提案している。本モデルは、人体の部位間で中心部温が共通な値を持つと仮定し、部位毎に二層モデルを適用した点に特徴がある。さらに、上述③項に関する検討では、本モデルで算出される温熱的な生理反応を基にした指標である、局所 SET^* による評価法を提案している。

本論文の構成および各章の概要は以下の通りである。

第1章では、研究の背景と目的、全体構想について述べている。

第2章では、対流による熱伝達特性の計測法について述べている。本論文では、評価段階にて、車内の熱環境を計測するだけでなく、空調システムの改善検討を実施することを意図している。このため、サーマルマネキンと風速マネキンによる計測を組合せ、対流による伝熱特性を汎用的な形で取り扱う方法を提案している。併せて、開発効率の向上を目的としたアメニティーマネキンによる簡易的な計測法も試みている。

第3章では、放射による熱伝達特性の理論計算法について述べている。本論文では評価法に留まらず、改善検討に必要な汎用特性の把握をも意図しているため、主として熱伝達特性の理論的な計算法を提案している。この方法は、車内壁面の放射伝熱量および直達日射量、天空日射量を計算するもので、特に、車内の凹凸や乗員自身の身体と、放射伝熱線の通過経路との干渉が計算できるよう考慮がなされている。また、担当者が実務で使うことを想定し、車両の基本諸元、運行状況などの入力の手便性にも考慮がなされている。最後に、本計算法をトラック・キャビン内の放射に関する熱環境の予測に適用し、車両方向や季節、時刻、内装部材の壁温やガラス表面温度の違いが、乗員の放射伝熱量に与える影響に関する定量的な結果を導き出している。

第4章では、二層モデルの基本的な特性を検討している。Gagge らが発表した初期モデルに対して、米国暖冷房空気調和学会(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: ASHRAE)が推奨している改善モデルは、計算論理の一部が変更されている。本章では両モデルの違いが予測特性に及ぼす影響を分析し、本論文で用いた ASHRAE モデルの基本特性を明らかにしている。さらに、二層モデルでは日射の影響について定式化されていないため、日射の影響を含めた二層モデルの熱平衡式を新たに導出している。

第5章では、本論文で新たに提案した分散二層モデルの理論的な背景、モデルを同定した過程および精度検証について述べている。本モデルは、二層モデルを拡張したもので、動脈血液の温度を中心部温度と見なし、全部位で共通と仮定した上で、各部位に対応した複数の二層モデルを連結した計算論理に特徴がある。また、本モデルで求めた部位毎の熱平衡と、二層モデルで求めた全身の熱平衡が整合するよう、代謝量、震え産熱量、皮膚血流量の特性は、全身の平均量に各部位別の分配比率を乗じて算出している。このような論理を定めた後、夏季冷房時の作用温度を想定した被験者実験を人工気候室で行い、各条件下での皮膚温の特性を得ている。そして、被験者実験で想定した冷房環境下では、概ね $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内の精度で皮膚温が予測できるよう、モデルの定数を同定している。さらに、気温や放射が不均一な環境下の皮膚温予測に本モデルの適用を試みて精度検証を行い、本モデルの適用限界を明らかにしている。

第6章では、モデル定数の一つである熱通過率の適正化を図るために行った、有限体積法による熱移動解析について述べている。本モデルで扱ったように、熱通過率を定数で代表させることによる誤差を理論的に把握するために、有限体積法による熱移動解析プログラムを新たに作成している。これより、作用温度の変化に応じて体内の熱通過率が変化する機構を明らかにし、被験者による実験結果が、理論的にも符合する特性を示すことを確かめた上で、熱通過率の実用的な値を決めるための指針を定めている。

第7章では、車内の局所で異なる熱環境を、温熱指標によって定量化する方法について述べている。まず、全身の評価指標として用いられている SET^* を拡張して、部位別の評価に適用する局所 SET^* の考え方を提案している。つぎに、局所 SET^* と乗務者の温冷感申告とを対応させるための被験者実験を行い、両者の相関関係を回帰し、部位毎に温冷感の申告予測式を導出している。そして、各章で述べた方法を総合して、「 SET^* を用いた車内熱環境の評価法」を提案している。最後に、本手法を夏季における典型的な車内の冷房環境へ適用して、その有用性を示している。

第8章では、本論文において得られた結果を総括している。

これを要するに、著者は部位別の皮膚温が予測可能な、分散二層モデルによる計算法を開発

するとともに、それを援用した部位別の温熱指標としての局所 *SET** を考案し、車両の開発段階における車内の熱環境設計法を提案しており、人間環境計画学および車内の空気調和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。