

人体の熱伝達特性と体感温の評価法に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

温熱環境の設計・制御・管理は、力ずくの加温、冷却への依存を見直し、伝統的な通風、日射遮蔽、太陽熱取得などの、自然エネルギーや地域環境の潜在能力の有効利用を、改めて見つめ直す転換期に立っている。温熱環境の設計は、人を主客と扱ってなされるべきであり、それ故、人の温熱特性を知ることは、温熱環境の設計・制御・管理あるいは評価にあたっての基本と言えよう。人体と環境間の熱交換の形態として、対流、放射、伝導、蒸発の4形態が挙げられ、それぞれの実態を適切に把握することは、アクティブ手法に頼らず、潜在能力を最大限に活用するパッシブ手法に拠る温熱環境計画の基礎となる。

創造した温熱環境が、人にとっていかなる環境か、また、熱環境の緩和に向けて講じた処置が、どの程度の効果をもたらすかを評価する尺度として、これまでに幾多の温熱指標が提案されてきた。温感および温熱生理状態に影響を与える主因子として、少なくとも、気温、放射温、湿度、気流、着衣量、活動量、暴露時間が考慮されるべきで、その評価尺度である温熱指標は、これらの複合影響を実態に即して評価してこそ、尺度として有効に利用され得る。現在、温熱環境の評価尺度として、国際標準化機構がISO-7730に定めるPMV（Predicted Mean Vote）と、米国暖冷房空気調和学会（American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers：ASHRAE）の尺度であるSET*（Standard New Effective Temperature）の2指標が世界的に多用されている。両指標とも、発表以来、すでに30年以上経過しているが、その間に、温熱環境の設計、制御、評価の対象は、至適環境の創造、限界環境の緩和から、温熱環境の全域へと拡大してきた。PMV、SET*はともに、至適条件に対応する生理量と、熱収支式に基づいて作成された指標であり、至適条件を予測、評価する指標としては、実態を良く表すと言えるものの、至適条件外での生理応答と温感の対応には、熱負荷や等価と換算された温度を経由するなど、なお、不明瞭・不合理な点も見られ、至適条件以外での適用については、検討の余地が残されている。

本論文では、温熱環境計画の基礎として、人体と環境間の熱授受を論じて、特に放射に関する形態係数、および衣服の保温性能評価法を提案した。また、現在多用されている主な温熱指標の長所、短所について検討を行い、新しい温冷感の評価指標である、熱環境指標（Index for Thermal Environment, ITE）を提案した。

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章では、緒言として、研究の背景と着眼点、目的を述べ、論文の構成を示した。

第2章では、人体と環境間の熱授受の概略を述べ、熱授受の表現式に検討を加えて、本論文で用

いる式を指定した。また、平均皮膚温を算出する重み係数の特性について考察した。さらに、第3章に記述する形態係数を測定する鏡曲面と熱流計を用いて、トレッドミル歩行時の対流熱伝達率を実測し、ナフタリン昇華法による Nishi らの結果との比較を試みた。

第3章では、放射に関わる形態係数の秤量法を検討した。人体と環境間の熱交換を明らかにする上で、熱流計が多用されるが、熱流計は部位全面の計測と言うより、部位上の一点における計測としての意味合いが強い。そこで、熱流計の貼付点における形態係数を定量する手法として、測定点に直接接触させて形態係数を測定できる、立体角投射の性質を有する鏡曲面を試作した。検証実験の結果は、鏡曲面に写る辺縁部の形態係数に、撮影距離および試作段階の近似に伴う、定性的な誤差が認められたものの、立体角投射の性質を良く表すものであった。また、人体相応の大きさを有する椅座姿勢モデル、および立位姿勢のモデルに関する形態係数の数値積分計算より、人体の形態係数を回帰する変数として、人体基準点から直交3方向に対象矩形面を見込み、得られる3形態係数が有効であることを確認し、緑陰の減少、アスファルトや躯体蓄熱の影響を特定し、ヒートアイランド化の緩和法を計画する上でも有効となる、大・中規模空間を対象とする、実用的な形態係数の秤量法を提示した。

第4章では、着装および皮膚温の不均一さが衣服の保温性能に及ぼす特性を、被験者実験とサーマルマネキンによる実測を基に検討した。環境の作用温度に変化があれば、衣服換気や圧迫の影響がない場合であっても、clo 概念による衣服の保温性能が、生理応答である皮膚温の変化に応じて変化することを確認した。そして、この現象に関して、快適状態を念頭に与えられた衣服の保温性能値によって寒冷環境を評価する場合に、放熱を過大に見積もり、実態をより厳しく評価するために、無視して差し障りないことを示した。また、着装の実態を考慮した、実用的な衣服の保温性能評価法を提案した。さらに、サーマルマネキンによる23単品衣服、49組み合わせ衣服による部位の衣服熱抵抗を実測し、部位ごとの熱抵抗値に基づいて、衣服の保温性能を評価する手法を提案した。

第5章では、定活動・定常時における平均皮膚温とぬれ面積率の特性を検討した。また、これまでに提案されてきた熱平衡式に基づく主な温熱指標の中から、ISO規格であるISO-7730、ISO-7933、ISO-11079 およびASHRAEスタンダードに関して、熱伝達論と生理応答に着目して考察を行い、その長所と短所、使用限界を明らかにして、新しい温熱指標の提案に向けての背景と着眼点を述べた。

第6章では、椅座・定常時の生理量と体温調節性の熱量の関係式を、温熱生理特性に関する考察と、椅座、裸体または冬服条件における被験者実験の結果から導いて、多様な評価条件における、熱平衡式に基づく、椅座・定常時の平均皮膚温とぬれ面積率の予測法を提案した。また、実験より得られた一定温感時における平均皮膚温とぬれ面積率の変化特性に関する考察から、3段階の一定温感である、「少し暖かい」、「暖かい」、「暑い」において、平均皮膚温とぬれ面積率が変動し、いずれの温階でも水蒸気圧が高いほどぬれ面積率は大きくなり、平均皮膚温は低くなることを示した。また、温冷感申告が、中立付近ではぬれ面積率に大きく影響を受け、暑熱領域では平均皮膚温の影響を大きく受ける傾向にあることを示した。そして、Stevensの法則に基づいて、平均皮膚温とぬれ面積率、温冷感の関係式を設定し、椅座・定常時を対象とする、新しい温冷感の評価指標として、熱環境指標 (Index for Thermal Environment, ITE) を提案した。新しい指標の検証のため、ITE

の基礎実験とは着衣条件の異なる夏服において温冷感実験を行い、異なる環境条件においても、「寒い」～「暑い」の範囲で ITE が有効であることを確認した。

第 7 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

人体の熱伝達特性と体感温の評価法に関する基礎的研究

温熱環境の設計・制御は、利用温度が狭い範囲に限られるために、未利用エネルギーの高度な有効利用が期待される分野であり、高気密・高断熱化や送風暖冷房に加えて、放射パネル、自然通風、日射遮蔽、太陽熱取得などを活用することにより、より環境負荷の小さい、快適な暖冷房方式を構築できる可能性を有している。温熱環境を定量的に評価する尺度としての温熱指標は、個人差や主観に影響される人体応答を、客観的な尺度によって表現する手段として用いられる。

温熱主 6 因子とされる、気温、放射温、湿度、気流、着衣量、活動量を包含した温熱環境の評価法を構築する上で、対流、放射、蒸汗、呼吸による、人体と環境間の熱交換の実態を適切に把握すること、およびその評価結果が、人の温熱生理・心理特性と良く合致することが重要となる。世界的に多用される温熱指標として、国際標準化機構が ISO-7730 に定める PMV (Predicted Mean Vote) と、米国暖冷房空気調和学会 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: ASHRAE) の尺度である SET* (Standard New Effective Temperature) が挙げられるが、両指標とも、発表以来すでに 30 年以上経過しており、その間に温熱環境の設計、制御、評価の対象も、至適環境の創造、限界環境の改善から、不快な温熱環境の緩和をも内包する、温熱環境の全域へと拡大してきた。PMV, SET*はともに、至適条件に対応する生理量と熱収支式に主点を置いて作成された指標であり、至適条件を予測、評価する指標としては、実態を良く表現していると言えるものの、至適条件外での生理応答と温冷感の対応には、熱負荷や、等価と換算された温度を経由するなど、なお、不明瞭・不合理な点も見られ、至適条件以外での適用について、検討の余地が残されている。

本論文では、人体と環境間の熱交換を論じ、特に、放射に関する形態係数、および衣服の保温性能評価法の提案を行っている。さらに、現在多用されている主な温熱指標の特性を独自の視点から分析すると共に、より合理的な新しい温冷感の評価指標として、熱環境指標 (Index for Thermal Environment, ITE) を完成させた。

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、緒言として、研究の背景と着眼点、目的を述べ、論文の構成を示している。

第 2 章では、人体と環境間の熱交換の概略を述べ、熱授受の表現式に検討を加えて、論文で用い

るべき式を指定している。また、平均皮膚温を算出する重み係数の特性について考察するとともに、第3章に記述した形態係数を測定する鏡曲面と熱流計を用いて、トレッドミル歩行時の対流熱伝達率を実測した結果を詳述している。

第3章では、放射に関わる形態係数の秤量法を報告している。人体と環境間の熱交換を明らかにする上で、熱流計が多用されているものの、熱流計による計測は、部位全面と言うより、部位上の一点における実測としての意味合いが強い。そこで、熱流計の貼付点における形態係数を定量する手段として、測定点に直接接触させて形態係数を測定できる、立体角投射の性質を有する鏡曲面を試作して、検証実験を行っている。結果は、鏡曲面の辺縁部に写る面の形態係数に、撮影距離および試作段階の近似に伴う定性的な誤差が認められたものの、立体角投射の性質を良く表しものとなったことを報告している。さらに、人体相応の大きさを有する椅座姿勢モデル、および立位姿勢のモデルに関する形態係数の数値積分計算より、人体の形態係数を回帰する変数として、人体基準点から直交3方向に対象矩形面を見込み、得られる3形態係数が有効であることを確認し、緑陰の減少、アスファルトや躯体蓄熱の影響を定量し、ヒートアイランド化の緩和法を計画する上でも有効となる、大・中規模空間を対象とした、実用的な形態係数の秤量法を提示している。

第4章では、着装および皮膚温の不均一さが衣服の保温性能に及ぼす特性を、被験者実験とサーマルマネキンによる実測を基に述べている。環境の作用温度に変化があれば、衣服換気や圧迫の影響がない場合であっても、clo概念による衣服の保温性能が、生理応答である皮膚温の変化に応じて変化することを明らかにしている。そして、この現象に関して、快適状態を念頭に与えられた衣服の保温性能値によって寒冷環境を評価する場合には、放熱を過大に見積もり、実態をより厳しく評価するので、無視して差し障りないことを示している。また、着装の実態を考慮した、実用的な衣服の保温性能評価法も提案している。さらに、サーマルマネキンによる23单品衣服、49組み合わせ衣服による部位の衣服熱抵抗を実測し、各部位の熱抵抗値を反映できる衣服の保温性能を評価する手法を提示するとともに、露出面積率が衣服の保温性能を決定する主要因であることも明らかにしている。

第5章では、定活動・定常時における平均皮膚温とぬれ面積率の特性を検討している。また、これまでに提案されてきた熱平衡式に基づく主な温熱指標の中から、ISO規格であるISO-7730、ISO-7933、ISO-11079およびASHRAEスタンダードについて、熱伝達論と生理応答に着目して考察を行い、その長所と短所、使用限界を明らかにし、中立温感時に対する生理状態の偏差に対して温冷感覚を関係付けることが、生理・心理応答の実態と合致する温熱指標の構築に有効となることを示している。

第6章では、椅座・定常時の生理量と体温調節性の熱量の関係式を、温熱生理特性に関する考察と、椅座、裸体または冬服条件における被験者実験の結果から導いて、多様な条件における、熱平衡式に基づく、椅座・定常時の平均皮膚温とぬれ面積率の予測法を提案している。また、実験より得られた一定温感時における平均皮膚温とぬれ面積率の変化特性に関する考察から、3段階の一定温感である、「少し暖かい」、「暖かい」、「暑い」において、平均皮膚温とぬれ面積率が変動し、いずれの温階でも水蒸気圧が高いほどぬれ面積率は大きくなり、平均皮膚温は低くなることを示している。また、温冷感申告が、中立付近ではぬれ面積率に大きく影響を受け、暑熱領域では平均皮膚温の影響を大きく受ける傾向にあることを示している。そして、Stevensの法則を適用して、平均皮膚温とぬれ面積率、温冷感の関係式を設定し、椅座・定常時を対象とする、新しい温冷感の評価指標：熱環境指標（Index for Thermal Environment, ITE）の提案を行っている。さらに、新しい指標の検証のため、ITEの基礎実験とは着衣条件の異なる夏服において温冷感実験を行い、異なる環境条件においても、「寒い」～「暑い」の範囲でITEが有効であることを確認している。

第7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、特に人体と環境間の放射熱交換、および衣服による保温効果の実態を解明し、その評価法を考案するとともに、人の温熱生理特性を踏まえて広い温階を定量評価できる熱環境指標（ITE）を構築しており、人間環境計画学および暖冷房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。