

称号及び氏名	博士 (工学) 島 崎 康 弘
学位授与の日付	2010年3月31日
論文名	「人体熱収支に基づく人間温冷感覚を用いた 屋外温熱環境評価」
論文審査委員	主査 吉田 篤正 副査 横山 良平 副査 大久保 雅章

## 論文要旨

全地球的規模である温暖化の一方で、人とエネルギーの集中する都市域では郊外よりも気温が高くなるヒートアイランド現象が顕著になり、熱帯夜の増加などに伴う不快感にとどまらず熱射病などの疾患や死亡例が報告されており、さらには経済的損失もが危惧されている。これら悪化した都市温熱環境の解決策指針として、その空間に滞在する人間がどう感じるかという人間の根源的な能力としての感性である体感の役割が見直されている。

人が感じる温度(体感温度)はふく射量(放射温度)、気温(空気温度)、湿度のほか、風速(気流)、代謝量、服装(着衣量)、さらには心理の影響をも受ける。これまでも体感指標は提案されてきており、より良い環境を実現するためにより多くの要素を指標の中で表現しようとしてきた結果 SET\*や PMV のような国際規格化にまで至った。しかし、これらは室内環境を対象として開発されたものであり、悪化の著しい暑熱な夏期の屋外環境の評価にそのまま適用できるかどうかは疑問が呈されている。屋外空間における温熱快適性の評価手法の確立が急務となっている一方で、環境が時間的、空間的に非一様かつ非定常であり、その過渡反応の把握が充分行なわれていないのが現状である。

また、温熱環境改善のため温熱環境 6 大要素の一つである衣服素材の機能が注目されている。とりわけ屋外環境を想定した場合には、そのふく射特性が重要であるが、現行の衣服性能としては熱・湿気抵抗を取り扱うのみにとどまっている。より良く衣服の機能性を理解し、活用するためにも詳細な取り扱いが求められる。

そこで本研究では、人体やそれを取り巻く様々な環境構成材料を含めてその熱収支を把握することを通して、環境改善を試みるものである。その過程において、体感指標としての構築、衣服素材の詳細な取り扱い、都市空間の温熱環境の解析を行なうことで、人間の温熱感覚により近い快適都市空間の創造指針をここに示すものである。

第1章では、人間と快適性に関して温熱快適性やそれに付随する環境要素について従来の研究をレビューし、それを踏まえて本論文の位置付け及び本論文の概要を示した。

第2章では、新たな温熱快適性指標である人体熱負荷量を定義し、屋外空間への適用について議論した。人体熱負荷量は、代謝量、機械的仕事量、正味ふく射量、顕熱損失量、潜熱損失量からなる。この指標は、人体と周囲環境間で行われる熱の授受が人体の快適感や不快感に影響を及ぼすとの考えから、人体熱負荷量は人体熱収支に基づいている。また、体感指標として必要とされる環境情報および様々な生理量・熱物性などを含有している。はじめに、温熱快適感の解釈として、温冷感と同等であることを被験者を用いた実験により明らかにした。これをもって、本研究では、温熱快適性について温冷感を用いて議論してゆく。次に、人体熱負荷量の指標としての考え方や精度を検証するため、まず定常状態における結果の検討を行ない、国際規格化されている体感指標と同等程度以上の精度で温熱環境を予測できることを示した。さらに屋外空間など非定常性の強い空間へと適用範囲を広げるため、代謝量、ふく射量、気温、湿度の要素をそれぞれステップ状に変化させ、その応答を観察した。人体熱負荷量増減に沿って温冷感が増減する関係が確認でき、定性的には人体熱負荷量と温冷感の間に関係があることを示した。また、定常状態に達するまでに過渡反応として温冷感の過剰応答が観察され、人体熱負荷量を用いた温熱環境解析するにあたり時間的な制約があることを示した。

第3章では、衣服素材の熱移動、水分移動、日射特性、対流熱伝達率を実測し、人間の温冷感に与える影響を熱の流れから考察する。まず、人体の温熱快適性に与える衣服の影響を図るために被験者実験を実施し、衣服に関わる要素として、熱・水分移動および日射遮蔽が大きいことを特定した。衣服は人体（発熱体）と周囲環境の間の熱交換の抵抗として作用しており、それを熱通過率および湿気通過率として測定し、検討を行なった。続いて、衣服を介した熱の流れを把握する目的から反射率、透過率、吸収率といった日射特性および対流熱伝達率の計測、検討を行なった。様々な外部要因を考慮して、熱通過率、湿気通過率、対流熱伝達率は定式化し、また、日射特性を特定した。最終的に、衣服の熱収支モデルにより、被験者を用いた実験と同様の熱の流れを再現し、被験者の体感に及ぼす衣服の影響を検討した。

第4章では、得られた知見を基に数値解析を用いて代表的なヒートアイランド対策手法の有効性について議論した。不均一かつ非定常状態の温熱環境にも適用が可能である65MNモデル（65分割体温調節モデル）に改良を加え、屋外空間に適用できるようにした。この数値人体熱モデルは、伝導、対流、放射、蒸発による熱交換を考慮しており、生理量と部位ごとの皮膚温を予測するモデルである。さらに、環境モデルとして2つのモデルと結合し代表的なヒートアイランド施策の効果を検討した。一つ目のモデルは、一次元熱伝導方程式を用いた手法であり、もう一つはビル空調や建物高さ、大気側では乱流モデルを取り入れたより高度なモデルである。結果として、日射による熱負荷の低減が都市空間の温熱快適性向上に大きく寄与することが分かった。また同時に、高反射

率材料などは都市全体の熱負荷削減には貢献するものの、日射の照り返しにより温冷感には悪い影響を及ぼすなど、その適切な試行の必要性がわかった。最後に、情報の発信ツールとして温冷感を基にした都市気候図を作成した。

第5章では、これまでの研究の総括を行い、今後の課題について述べた。

## 審査結果の要旨

本論文は、人間の感性である温冷感を都市温熱環境改善に適用するために、人体熱収支に基づく屋外温熱快適性指標を提案、調査したものである。また、人体周囲環境を構成する素材の熱の流れに着目し環境情報の把握を試み、更に数値解析手法を用いて都市の現状や対策技術の効果を評価したものである。得られた主な結果は、以下のように要約できる。

- (1) 人体の熱収支を把握する方法、それに基づく温熱快適性指標を提案し、その適用可能性を示した。適用に際し、体温と心拍数に代表される人体生理情報を含む有利性を示した。また、定常状態に移行するまでの過渡期における反応において、時間的制約があることを示した。
- (2) 身近な温熱環境改善策である衣服素材の影響を熱収支を基にして評価を行なった。衣服素材の熱物性を、熱・湿気通過率、対流熱伝達率、日射反射率・日射透過率、日射吸収率として実測、またそれらに及ぼす影響因子を特定し整理した。また、衣服素材を介した熱の流れを明らかにし、屋外空間に適用できる衣服モデルを示した。
- (3) 人間感性である温冷感を基にした都市環境構築を目指し、現状の都市温熱環境や代表的な温熱環境対策のいくつかの有効性を評価した。屋外環境における日射の影響の強さから、温度や湿度、風速などといった既存の対策以上にふく射関連の対策の重要性を明らかにした。
- (4) 総合的な温熱環境対策の重要性を示し、また都市温熱環境地図（クリマアトラス）をして環境の数値化・明確化を図った。

以上の結果は、把握しにくい温熱環境を明確する手法を示し、本分野における今後の対策検討や情報発信において大いに貢献するものである。また、申請者が自立して研究活動を行なうのに必要な能力と学識とを有することを証したものである。

本委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。