

平成 22 年 5 月 21 日現在

研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2007～2009
課題番号：19360101
研究課題名（和文） 建物外皮の熱物性と体感評価に与える影響
研究課題名（英文） EFFECT OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF BUILDING EXTERIOR ON HUMAN THERMAL FEELING
研究代表者
吉田 篤正（YOSHIDA ATSUMASA）
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号：60174918

研究成果の概要（和文）：建物外皮の日射特性および赤外放射特性の現場測定法を開発した。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。また、人体周囲環境を構成する素材の熱の流れに着目した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。

研究成果の概要（英文）：The on-site measurement method was developed for the solar and infrared characteristics of the building exterior. To apply the human thermal feeling to the urban thermal environment improvement, the outdoor thermal amenity index was proposed and investigated based on human energy balance. The attention was paid to the heat flow through the material that composed a human body surroundings and the environmental information was understood. Moreover, the urban current state and the effect of the measures technology were evaluated by using the numerical analysis technique.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2008年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：環境熱工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：温熱快適性、都市空間、人体熱負荷量、人体モデル、生理反応、衣服素材、日射反射率

1. 研究開始当初の背景

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。

2. 研究の目的

気温、湿度などの物理量だけでは、人間が持つ快適性に対する感覚とのずれを生ずることになる。新しい環境評価指標である屋外環境下の熱的快適性指標の提案に関しては、屋外における気温や湿度、日射量など人体への入力量を測定、算出し、その反応として変化する皮膚温、血流量、発汗量、代謝量などを測定する。都市空間においては、環境要因が複雑であるので、多点測定の準備が必要であり、データがある程度そろった段階で、屋外実験に代わる数値解析による評価も検討する。また被験者による申告実験も同時並行して行う。提案する快適性指標による温熱環境評価を行い、従来にはない人間の感性を取り込んだ都市空間の熱環境および大気環境の解析を行うことによって、人間の感性により近づいた都市空間の創造および環境情報である都市環境気候図の作成ツールの完成を目指す。

3. 研究の方法

複雑な3次元形状を持つ代表的な都市空間において、人体熱負荷の観点から温熱環境の測定を行う。測定結果に基づいて数値解析モデルの開発も併せて行う。

人体熱負荷を評価するため人体周囲の外部環境を考え、気温、湿度、風速、日射量、赤外放射量など外部刺激量を測定する。人体でのふく射収支量を考えるため、鉛直方向の水平方向の日射量、赤外放射量をそれぞれ測定する。また、風速に関しては平均風速だけでなく、変動も大きく快適感に作用すると思われるので、超音波風速計により風速の高周波成分も把握する。測定は周囲に障害物(建物、樹木など)が少ない平坦な場所で行う。

屋外環境下にある人体の生理反応を考え

る。被服を通して外部刺激を受けた人体がどのような生理反応を示すかを計測する。恒温動物である人間は外部からの刺激から判断し、常に一定に保たれている人体のコア温度(核心温)を参照することにより血管を拡張・収縮し、汗をかくよう指令を出す。この指令を出す役割を担っているのが脳内の視床下部であり、温熱快適性などの判断も同じくここでされていると言われている。したがって、温熱快適性を生理反応の観点から考えるには視床下部で制御されている血流量・代謝量・発汗量を測定することが有効であると考えられる。またその結果として変化する皮膚温も測定する。

衣服や道路舗装、建物壁面などに使用されている材料の分光反射率・吸収率を測定し、それらの熱的挙動(吸熱効果)の予測に用いる。日射、赤外放射に対する材料の光学的特性を把握する。ここで得られる結果は、人体熱負荷モデルの基礎的データの一部として用いられる。

周囲に建物などがあるいくつかの代表的な都市空間で人体熱負荷量の測定を実施する。ふく射収支量を考えるため、鉛直方向だけでなく、東西南北の水平方向の日射量、赤外放射量を複数台の放射収支計を用いてそれぞれ測定する。同時に生理量の変化、心理反応も測定する。屋外環境下で状態変化がある場合の心理反応を分析する。ある生理反応を示した被験者からの快適性申告を出力として考える。前年度およびこれらの測定結果に基づいて人体熱負荷モデルを提案する。このモデルによるシミュレーション結果も含めて、環境変化に対して敏感な生理反応を抽出して、外部環境要因から熱的快適性を予測する指標を構築する。

屋外環境において日射や風などの非定常性が熱的快適性に与える影響について検討を行い、必要に応じて予測指標の中に組み込む。最終的に決定された熱的快適性指標を、既存の都市空間に対して適用し、温熱環境評価を行う。その結果に対して都市空間の温熱環境を改善するための環境設計を提案する。都市空間における温熱環境の評価結果を地図情報として都市環境気候図に重ね合わせて、本研究で提案する屋外環境下の熱的快適性を考慮した人間本位の都市づくりへ情報発信する。

4. 研究成果

中規模の臨海都市である堺市を主な対象に、隣接する大阪市、東大阪市および内陸の枚方市を含めて2年間を通して夏期(7~9月)、冬期(12月~2月)の気温の連続定点測定を実施した。気温に対する土地利用と海陸風などの影響を調べ、堺および枚方市域における気温分布を作成した。その結果以下の結論を

得た。

(1)堺市においては、北西部の市街地は周辺に比べると気温が高く、ヒートアイランド現象が顕在化し、熱環境改善の対策が必要な地区である。(2)各都市間の気温を比較すると、昼夜を問わず大阪市、東大阪市で気温が高い。沿岸部は昼間の気温が低いのが特徴的である。緑地が多い丘陵地区の気温が最も低い。冬期が夏期に比べて気温差が全般的に顕在化する。(3)海風の発達した夏期、季節風の強い冬期は沿岸部およびその隣接地区を除き、全般に気温が平準化する傾向にある。海風の発達した夏期において大阪市中心部で暖められた空気塊の海風による内陸への輸送が示唆される。(4)気温と土地利用には強い相関があり、商業・業務用地では明瞭な気温上昇効果があり、公園・緑地では気温低下が認められ、水面については季節により異なる方向に影響する。

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。

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。

大阪市御堂筋西側の歩道において、6方向の日射量および赤外放射量、風速、気温、湿度、地表面温度、顕熱流束、潜熱流束、地中伝導熱流束の各項目について定点測定を行った。結果として、(1)地表面への正味の放射量に対して地中熱伝導の寄与が大きいこと、(2)日射は真上から最も大きく地面および壁からの反射は小さいこと、(3)赤外放射量は直射が地面に当たる時間を除き地面および建物

壁面から大きいこと、(4)街路の風速・風向は屋上でのそれと比べて建物の影響により大きく異なることを示した。

同地点において皮膚温の被験者測定ならびに街頭アンケートを行い、平均皮膚温と温冷感との相関があることを示した。また街路における人体熱負荷の強さについてWBGT 指数により調査した。これらの熱環境実測結果を鑑み、歩行空間における熱負荷低減の効果的手法として、街路表面を日射反射率の高い材料で構成し日射吸収率を低減させること、植物や膜材により日射を適度に遮ること、オープンテラスのような滞在型屋外空間への通風を良くするための適切な建物設計を行うことが挙げられる。但し、街路表面を日射反射率の高い材料で構成する場合には、人体の温熱快適性に考慮する必要がある。

ヒートアイランド対策技術で注目されている高反射率塗膜および防水シートを対象として日射反射率の現場測定法について検討した。反射率が既知の標準板を用いて、測定対象面の周囲の影響を取り除く方法を採用し、その有効性について評価した。標準板を用いる事で屋外にて施工状態の各材料の反射率を測定することができた。測定誤差要因の分析として、標準板の反射率に対する日射の入射角の影響について評価し、入射角が大きくなると測定される反射率が減少する傾向があることを確認した。標準板の反射率は測定前後で測定しておくことが望ましい。また、Bird モデルに基づく全天日射スペクトルを用いて日射反射率を求めた結果、晴天で安定な場合、日射スペクトルの違いが日射反射率の与える影響は小さい。

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した。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、衣服が関わる要素として、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。

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。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 22 件)

1. 島崎康弘、吉田篤正、元武裕介、木下進一、人体の温熱快適性へ適用するための衣服素材の熱特性評価、人間と生活環境、査読有、Vol. 16、2009、67-76
2. 木下進一、吉田篤正、屋外測定による高反射率素材施工面の日射反射特性評価、日本建築学会技術報告集、査読有、Vol. 15、2009、159-162
3. 木下進一、吉田篤正、島崎康弘、街路空間における熱輸送量測定と温熱快適性評価 - 大阪市御堂筋における夏季実測 -、日本建築学会技術報告集、査読有、Vol. 15、2009、803-806
4. 吉田篤正、安田龍介、木下進一、堺市およびその周辺地域の温熱環境の実測と解析、日本冷凍空調学会論文集、査読有、Vol. 26、2009、57-67
5. 島崎康弘、吉田篤正、木下進一、人体熱負荷量に基づく温熱快適性指標の提案、日本冷凍空調学会論文集、査読有、Vol. 26、2009、113-120
6. 木下進一、吉田篤正、屋上面熱負荷に及ぼす防水シート面反射率および断熱工法の影響評価、環境情報科学論文集、査読有、Vol. 22、2008、203-208
7. 加賀田翔、山田哲也、吉田篤正、光音響法を用いた皮膚の熱的性質の測定、日本伝熱学会論文集、査読有、Vol. 16、2008、87-93

[学会発表] (計 29 件)

1. 島崎康弘、吉田篤正、鈴木良太、木下進一、人体熱収支に基づく温熱環境評価、第47回日本伝熱シンポジウム、2009. 6. 2
2. 新居宏亮、吉田篤正、木下進一、片岡由美、孤立した植物の熱収支の評価、ヒートアイランド学会 第4回全国大会、2009. 8. 23
3. 木下進一、吉田篤正、保水性材料の熱水分輸送量に関する屋外実測および数値解析、2009年度日本建築学会大会、2009. 8. 26

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田篤正 (YOSHIDA ATSUMASA)
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号：60174918

(2) 研究分担者

木下進一 (KINOSHITA SHINICHI)
大阪府立大学・工学研究科・准教授
研究者番号：70263209

(3) 研究分担者

安田龍介 (YASUDA RYUSUKE)
大阪府立大学・工学研究科・助教
研究者番号：50244661

(4) 研究分担者

山田哲也 (YAMADA TETSUYA)
大阪府立大学・工学研究科・助教
研究者番号：10158206