

令和元年6月14日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18026

研究課題名（和文）実環境の非一様・非正常性に適用できる生理・心理量を反映した環境適応評価指標の開発

研究課題名（英文）An evaluation method for thermal adaptation in real environment with non-uniformity and unsteadiness in consideration of human physiology and perception

研究代表者

島崎 康弘 (Shimazaki, Yasuhiro)

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：20584270

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：人体からの放熱および人体への受熱のバランスと生起される温熱生理との関連性に着目した人体熱収支モデルである「人体熱負荷量」を対象に、空間的分布を有する環境-人体の相互作用を考慮しマルチノード化、また、時々刻々と変動する環境・人体における相互作用の結果である人体熱収支を境界条件として非常生体伝熱現象をモデル化することで、人間そのものや人間生活の場の非一様・非正常性に対応できる実用的な環境適応評価法を構築し、実環境における実証により精度検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生活の主体である人体に着目しその熱ストレスを低減し安全・快適性を確保するという視点に立ち、これまでの温熱環境評価において精度に難のある人間生活の場の非常・非一様性を有する複雑である人体温熱環境の定量化を実験的エビデンスに基づき実現した。これにより、生活空間の環境最適化に応用できるだけでなく、安全・快適な空間提供を通して一般国民の生活の質（QOL）の向上への貢献も期待される

研究成果の概要（英文）：In the present study, the human energy balance model called 'Human Thermal Load' is improved. HTL is calculated based on heat transfer to and from the human body, and is related to the degree of thermal perceptions. HTL becomes a multi-node model, and can be applicable to non-uniform environments by integrating regional thermal loads at major anatomical regions and to unsteady dynamic environments by unsteady computation. Therefore, HTL is considered as a practical thermal evaluation method, and is verified its applicability by experiments under real environments.

研究分野：環境熱工学

キーワード：温熱環境 安全・快適性評価 適応評価 非一様・非常環境 人体熱収支モデル QOL向上

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

昨今の温暖化・ヒートアイランド緩和努力に関わらず、生活空間の温熱環境が人々の健康・安全を脅かす事例（熱中症、睡眠障害など）が後を絶たない。そこで、今まさに変動しつつある温熱環境に対していかに適応するか、主体である人体に着目しその熱ストレスを低減し安全・快適性を確保するという視点にたった取組みが必要である。そのため、現状把握や事前評価に用いるための、的確に人体のおかれた温熱環境状態を表現する適応評価指標の確立、が求められている。

温熱環境は周囲環境の気温、湿度、気流、放射量の物理環境のみによらず、人体の活動や着衣状況という人的要素と合わせ複合的に決定される。気象庁の熱中症指標（WBGT）など既存適応評価指標の多くは物理環境4要素のみの計測や評価に留まっており、屋外を含めて一般環境における人間そのものや人間生活の場の温熱的非一様・非正常性の対応に難がある。更に、国際指標策定に取組む欧米各国とは気候や感性が異なることを考えれば、日本人に適した適応評価指標を新規に構築する必要がある。

### 2. 研究の目的

暑熱化する生活環境整備のため、環境物理量・人体生理量・感性である心理量の関係性を調査することで、「生活の主体である人間（とりわけ日本人）の感性」に沿った適応評価を行うための指標を構築する。複雑な実環境の非一様・非正常性に対処するため、人体温熱状態を規定する熱収支はマルチノード化して部位を考慮し、その時間変動する人体熱収支を入力として非正常伝熱現象を表現することで生理量への影響を測る。環境・生理状態の相互関係から心理量を把握する手法を確立し、適応度合を基準に人間の生活の質を最優先した先進的な空間の実現へ貢献することを目指す。

具体的には、適応評価として重要な人体温熱状態は、人体とその周囲環境の間の熱授受の結果である人体熱収支により把握できると考えられるため、人体と環境の熱授受到に影響の大きい六要素（気温、湿度、放射温度、気流、代謝量、着衣量）それぞれが、人体温熱状態を規定するエネルギー輸送現象（顕熱損失、潜熱損失、ふく射伝熱、熱産生、外部仕事）においてどのような役割をし、さらにそのなかで空間的・時間的変動が及ぼす影響、を解明することで適応評価指標の確立をする。

また従来、人体は質点として扱い、瞬時・定常的な概念の元に、各時刻における環境物理量や熱収支を直接的に心理量へとブラックボックス的に統計的な対応を取る手法であった。本研究は2段階に分けて考え、人体のおかれた温熱環境物理量と人体生理量の関係を把握し、環境に応じた生理量応答をエビデンスに心理量予測・評価することで、安全・快適性等環境適応度合を判断する。

### 3. 研究の方法

#### (1)局所熱負荷を考慮した「全身人体熱負荷量」の算出

平均皮膚温を求めるときには、各部位の皮膚表面に、その部位に関する重みを乗じ、得られた積の総和を全身の平均皮膚温としている。同様に、各々の部位における皮膚表面と環境間の熱移動である局所熱負荷量  $q_i$  を求めることで、全身の温熱状態である全身熱負荷量  $q$ 、さらに全身温冷感を予測する。

#### (2)非一様環境下における人体生理・心理応答把握実験

不均一な温熱環境に適応可能な人体温熱モデルを構築し、更にこのモデルを用いて温熱快適性予測を行うためには、非一様な環境下における人体の温熱生理応答および心理量を把握する必要があるため被験者実験を実施した。人工気候室にて、健康な男子大学生および大学院生のべ40名を対象として、上・下半身それぞれに接する気温に差を作り出すことで検証を行った。人工気候室内に空調BOXを設置し、外気温と異なる環境を再現した。実験開始から10分間は全身が均一な環境下であるが、開始10分から40分の30分間は空調BOX内に移動し、下半身の環境を変化させた不均一な環境下に暴露させ、その後の空調BOX外に移動し10分間を再び均一な環境に暴露させた。

#### (3)非一様屋外空間への適用

屋外空間を構成する素材として舗装は代表的であり、その日射特性により高反射や長波ふく射により非一様性の強い空間を構成する。また、舗装など人工被覆材はヒートアイランド現象の要因と考えられており、地表面の日射反射率を高めることで大気への正味放射量を減らすことを目的とした高反射性舗装、地表面からの水分の気化熱による熱吸収に伴う顕熱輸送低減を目的とした保水性舗装などが開発され、夏季暑熱環境の改善を目指している。そこで、これら環境調和舗装上の滞在者に及ぼす影響評価を本研究で開発した評価指標を適用することで、実地における人体熱負荷量を用いた評価法の検証を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 局所熱負荷を考慮した「全身人体熱負荷量」

人体の温熱状態を評価するためには、人体と環境間の熱交換の結果である熱収支を求める必要がある。本研究では、部位差を考慮し、不均一の温熱環境にも適応可能である田辺らの提案する65分割体温調節モデル(以下65MN)を用いた。65MNでは人体を16部位に分割し、さらに各部位を4層(Core, Muscle, Fat, Skin)に分割し、これに加えて、中央血液溜りを考えることで計 $16 \times 4 + 1 = 65$ ノードからなるものとしている。同一部位内の4層は伝導によって熱交換し、Skin層は外部環境と対流、放射、蒸発によって熱交換を行う。そこで、人体と環境の熱移動部位であるSkin層における熱平衡式から各部位の局所的な熱負荷量を式(1)から算出することで、全身の熱負荷量を式(2)より求めた。

$$q_i = (Qg_i - B_i - D_i - Qt_i - E_i) / A_i \quad (1)$$

$$F = \sum \omega_i q_i \quad (2)$$

ここで、 $q$ は各部位の熱負荷量[W/m<sup>2</sup>]、 $Qg$ は産熱量[W]、 $B$ は中央血液溜りと各ノードとの熱交換量[W]、 $D$ は同じ部位内に隣接する層との伝導による熱交換[W]、 $Qt$ は皮膚表面と環境の対流及び放射熱交換[W]、 $E$ は蒸発熱損失[W]、 $A$ は体表面積[m<sup>2</sup>]、 $\omega$ は各部位の体表面積率[N.D.]、 $i$ は人体各部位を示し、1:額、2:腹、3:上腕、4:手甲、5:大腿、6:下腿、7:足甲である。

##### (2) 非一様環境下における人体生理・心理応答把握実験

皮膚温は人体と環境との間で熱授受がなされた結果、形成される生理的な状態値である。従って、生理応答については皮膚温により評価する。様々な条件における全身の平均皮膚温の経時変化を図1に示す。図のx軸が経過時間、y軸が温度変化を示す。また、それぞれの値は全被験者の平均値である。一方、不均一環境暴露後の実験開始40分後の全身と上半身および下半身の温冷感(TS)並びに快適感(TC)を示したものが図2である。ここで全温度条件における全身温冷感(TSV<sub>whole</sub>)を従属変数とし、上半身温冷感(TSV<sub>upper</sub>)、下半身温冷感(TSV<sub>lower</sub>)を独立変数とし、それらを標準化して重回帰分析を行った。回帰式は以下の式(3)となった。

$$TSV_{whole} = 0.73 TSV_{upper} + 0.32 TSV_{lower} \quad (3)$$

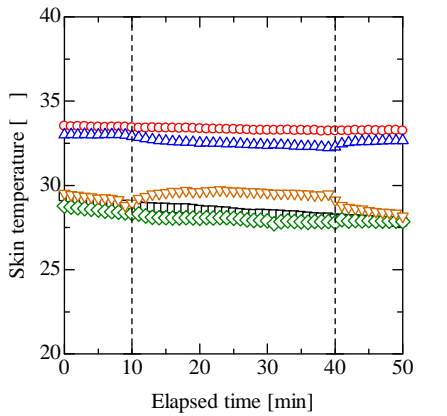


図1 平均皮膚温の変化(実験)

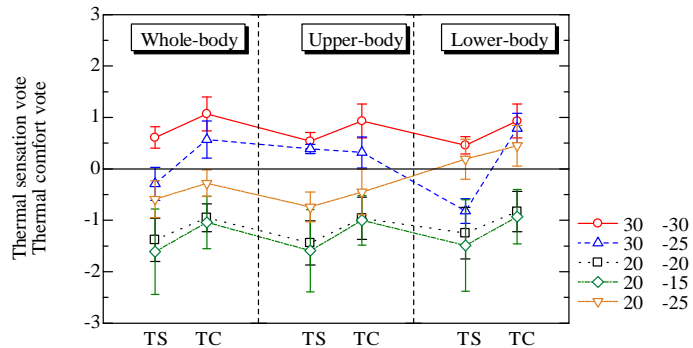


図2 全身及び部位毎の心理申告

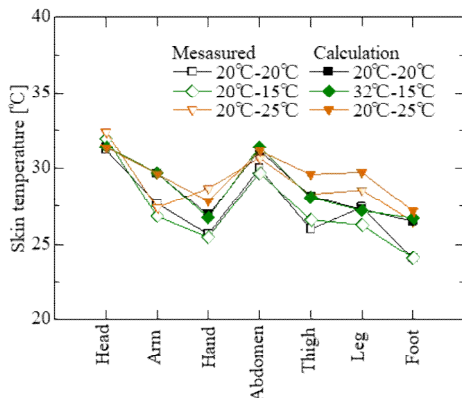


図3 平均皮膚温の比較

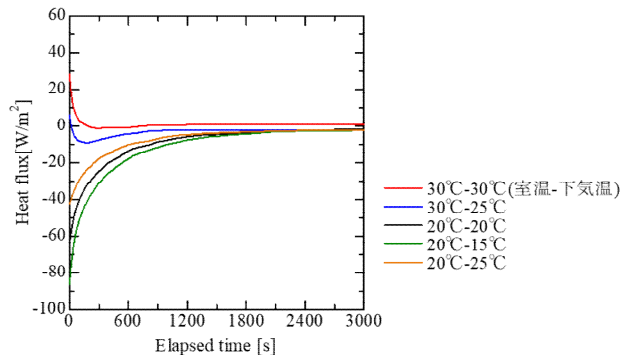


図4 熱負荷量の計算結果

次に、上記 3(1)にて提案した局所熱負荷を精度よく計算するため、皮膚温の算出が適切であるかを検討した。図 3 に皮膚温の解析の結果と実測値の比較例を示す。また、このときの熱負荷量の解析結果を図 4 に示す。図 4 の x 軸は経過時間 [min]、y 軸は熱負荷量  $[W/m^2]$  である。各部位の皮膚温は全環境条件において、概ね一致しており、不均一な温熱環境においても 65MN を用いた皮膚温の予測が可能であることが確認できた。

さらに算出可能となった人体熱負荷量より、人体温冷感予測を実施し、その精度検証結果の例を示す。図 5 は、 $20^{\circ}C - 25^{\circ}C$  条件における熱負荷量の解析値と被験者実験によって得られた全身温冷感の経時変化である。これより、全身熱負荷量の変化量と温冷感の変化量には同様の傾向があることがいえる。一般に、人間の感じる感覚は刺激量の対数に比例するとされ、本実験結果における熱負荷量はこの知見に沿う経時変化となっている。以上を以て、人工気候室という整った環境下において人体熱負荷量を用いた評価システムが整ったといえる。

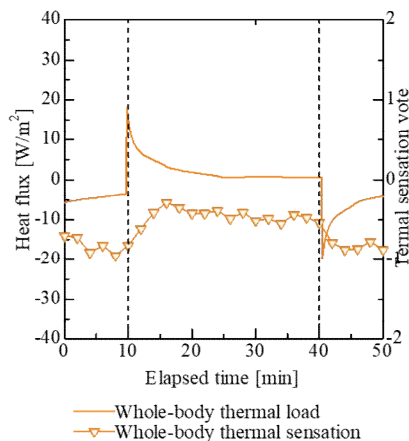
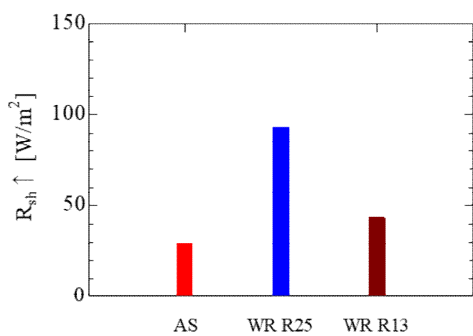


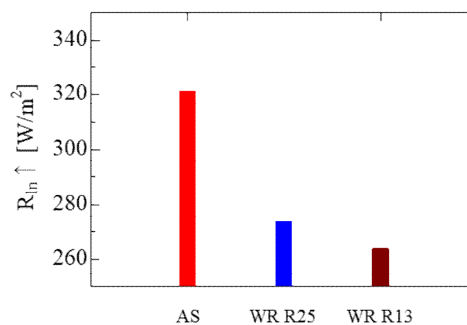
図 5 人体熱負荷量（計算）と人体温冷感（実験）の比較

### (3) 非一様屋外空間への適用

実環境下における環境評価を目的とし、夏季の屋外オープンスペースにおける評価実験を舗装上にて実施した。舗装面評価においてその日射反射率は重要となる。実験で用いた舗装の日射反射率は密粒度アスファルト舗装が約 8% (AS) に対して、保水性舗装が約 25% (WR R25) と約 13% (WR R13) であった。これに起因して図 6 に示すようなふく射環境の非一様性が発現する。



(a) 下方からの短波放射量



(b) 下方からの長波放射量

図 6 舗装の違いによる複雑環境

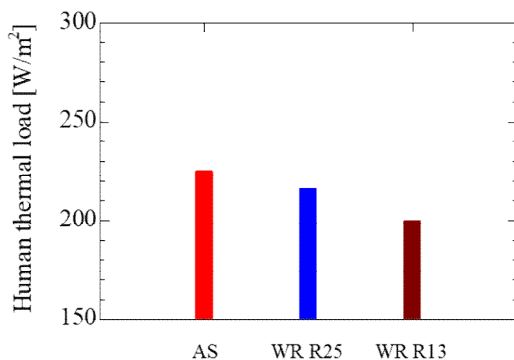


図 7 環境別人体熱負荷量

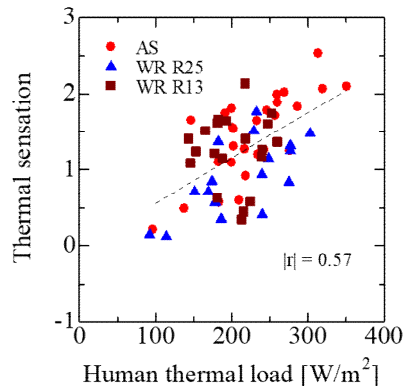


図 8 人体熱負荷量と人体温冷感の関係

実験期間中の人体熱負荷量の平均値を舗装別に示すと図7となり、被験者申告による人体温冷感との関係を示したものが図8である。図7において舗装の違いにより異なるふく射環境が人体へも影響を及ぼすことが分かる。過去に、屋外環境での被験者評価実験において、人体熱負荷量と温冷感の関係は線形上の分布となることが既に示されており、図8においてもこれらの関係には相関関係がある。結果として一定精度で温熱環境評価が行えたことを示唆している。

#### (4)まとめ

人体に着目しその熱ストレスを低減し安全・快適性を確保するために、人体およびその周囲環境とで構成される系の温熱環境解析モデルとして統一的に評価できるシステムを構築し、実空間評価だけでなく、環境設計に有用な事前評価にも活用が可能となった。また、本評価手法の適用例として、舗装上におけるヒトに優しい舗装設計を実践した。

### 5. 主な発表論文等

#### 〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. 青木政樹, 島崎康弘, 唐木健次, 保水性舗装の人に対する暑熱環境改善効果, 舗装, 53(6), pp.31-36, 2018. (査読有)

#### 〔学会発表〕(計 6 件)

1. 相坂和利, 島崎康弘, 春木直人, 屋外環境評価における伝導伝熱量の人体熱負荷量への影響, 第55回日本伝熱シンポジウム, 2018.

2. Masashige Aoki, Toshiyuki Nakamura, Yasuhiro Shimazaki, Experimental Investigation of the Effect of Water Retentive Sidewalk Block Pavement on Improving Human Thermal Environment, The 12th International Conference on Concrete Block Pavement, 2018.

3. 林大輝, 安田翔陽, 吉田篤正, 木下進一, 島崎康弘, 暑熱環境における日射, 代謝のステップ変化に対する人体温冷感の予測, 第47回空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会, 2018.

4. 倉嶋謙吾, 島崎康弘, 春木直人, 温熱環境の不均一性が温熱快適性に及ぼす影響, 第41回人間-生活環境系シンポジウム, 2017.

他2件

#### 〔図書〕(計 1 件)

1. 島崎康弘, 繊維機械学会誌 Vol.71, No.11, 5 pages, 2018 (月間せんい内解説記事/着衣時の人体温熱快適性評価に向けた熱特性計測).

#### 〔産業財産権〕

##### 出願状況(計 1 件)

名称: 舗装構造設計方法

発明者: 島崎康弘, 青木政樹, 城本政一, 唐木健次, 岡島穂高

権利者: 島崎康弘, 大成口テック株式会社

種類: 特願

番号: 2018 - 147072

出願年: 2018年

国内外の別: 国内

#### 〔その他〕

所属機関 教員・研究紹介

[https://www.tut.ac.jp/university/faculty/ace/post\\_55.html](https://www.tut.ac.jp/university/faculty/ace/post_55.html)

### 6. 研究組織

#### (1) 研究分担者

なし

#### (2) 研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。