

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：25301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760192

研究課題名(和文) 人体温熱快適性に及ぼす環境6要素の非定常・非一様性の影響評価

研究課題名(英文) Evaluation of six components regarding thermal environment on human thermal comfort in unsteady and non-uniform conditions

研究代表者

島崎 康弘 (Yasuhiro, SHIMAZAKI)

岡山県立大学・情報工学部・助教

研究者番号：20584270

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：日射量(放射温度)、気温、湿度、気流、代謝量、着衣量の6要素が人体の温熱感受性に与える影響として、時間的変動(非定常性)について熱的ステップ応答を観察することで、また空間的変動(非一様性)について局所的熱刺激に対する部位差を観察すること解析した。人体と環境との熱授受を考慮し、人体熱収支(人体熱負荷量)を求めることで、被験者申告による官能評価と精度よく一致することを示し、温熱環境を温冷感により数値化した。更に、熱量に対する感受性の部位差から、熱的非一様空間における全身の温熱状態を予測する手法を提案し、人体温熱感覚を生かした環境設計へとつなげる土台を構築することができた。

研究成果の概要(英文)：The effect of six components regarding thermal environment such as radiation, temperature, humidity, wind, metabolism and clothing insulation on human thermal perceptions was examined by analyzing responses of step-like pattern change and regional thermal stimulation. The human thermal load method which is calculated from human energy balance was established for evaluating thermal environment. The human thermal load was verified by comparing human psychological responses, thus thermal environment was quantified successfully. Moreover, the whole body human thermal state could be estimated by considering regional differences. Finally, fundamental data for thermal comfort designing was obtained.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：人体熱モデル 人体熱負荷 温熱快適性 環境評価 非定常 非一様 部位差

### 1. 研究開始当初の背景

気候温暖化や都市域のヒートアイランド現象といった高温化に伴い、熱中症などの暑熱障害の発生増加が社会的な関心を集めるとともに、それに起因する疾患や経済損失までもが危惧されている。屋外労働や運動時に加えて、高齢化社会の到来をうけて通常生活においても暑熱障害の危険性は増している。今置かれた環境の現状を把握、またこの問題に対処するためには、適切に温熱環境を評価、つまり「環境を見える化」できるツールが不可欠である。暑熱障害は気温や湿度といった外部環境だけでなく、人間の様々な因子が関わった結果によるものであるためこれらを複合的に取り扱う必要がある。従来、温熱快適性の研究は見られるが、屋外空間の非定常性・非一様性や支配的である日射の影響を評価できず都市域での複雑な環境に対応できなく、人体生理情報と温熱快適感の関係性の理解が進んでいない。更に、これからの設計指針として最も基本かつ大切な判断基準は主体である人体の快適性である。単に気温や湿度といった環境量だけを快適感の基準としているだけでは、人間の持つ感覚とのずれを生じることとなる。人間中心の設計姿勢として非常に重要だが、検討項目が多岐にわたるため、複雑かつ高度な情報処理が必要で、実用に耐える有効性のある技術は未だ確立されていない。生理反応は今までブラックボックス的に取り扱われることが多かったため、本研究では身体への様々な熱刺激が人体の快適感・温冷感に与える影響を明確化する。実空間の非定常・非一様性を考慮した温熱快適性指標の構築により、従来にはない人体の生理情報および感性(温熱感覚)を取り込んだ都市空間の温熱環境解析を行なうことで、人間本位により近い生活空間の創造および環境情報の提供を目指す。

### 2. 研究の目的

最終な研究目標はより良い生活環境の創造をすることであるが、本研究期間内ではその評価基準となる非定常・非一様性を表現できる温熱環境指標の構築、およびその数値モデル化までを目標とする。温熱快適性の関係する要素の入力(刺激)に対する人体反応の把握を、出力である生理情報を基に行い、温熱刺激に対する生体反応理解を進める。その際、各要素、刺激部位による感受性や応答性の違いを明らかにすることで、数値モデル化を進め、人間の温熱快適感という視点から最適化を図り、快適かつ環境に配慮した都市のあり方を見出すための土台を構築することが主たる目的となる。人体温熱快適感を大きく左右する日射量(放射温度)、気温、湿度、気流、代謝量、着衣量の環境6大要素の及ぼす影響を定量的に把握したうえで、人体情報の把握に努め、いまだに確立されていないそれら要素の非定常変動時および非一様性の強い空間における人体温熱快適感を精度よ

く予測することができる温熱快適性指標の確立を目標に、更にその活用を図り安全・快適な都市空間設計へ生かしてゆく。

### 3. 研究の方法

人間の温熱快適感とは、「気温、湿度、放射温度、気流、代謝量、着衣量」の環境6大要素で主に表現することができ、温熱快適性指標としてはこれらの要素をできるだけ多く含有する必要がある。これらを含有した温熱快適性指標の一つに申請者が提案する「人体熱負荷量」指標がある。人体熱負荷量は、人体を中心とした熱の授受を、代謝量、着衣量という人的要素および正味ふく射量、顕熱損失、潜熱損失という環境要素から算出した物理量である。また、温熱快適性の主なるものは温冷感という感覚量であり、国際規格により「寒い」~「暑い」の7段階で表される。

本研究は、この人体熱負荷量を活用することを念頭にし、大きく分けて(1)非定常応答の把握と(2)非一様性の理解の2つの部分から成り立っている。つまり、非定常変動および非一様空間へとその適用範囲を広げること、一般性を高めること、に加えて、人体周辺の熱収支把握に必要な物性計測を必要に応じて行なう。

多くの温熱環境指標の検証は被験者実験により行われており、本研究も同様の手順を経る。水平面全天日射量及び地面からの反射日射量、大気及び地面からの赤外放射量、気温、湿度、風速、皮膚温度は1分毎、血流量は0.1秒毎、心拍数は5秒毎、代謝量はガス分析により20秒毎、体重変化は実験前後に記録した。温冷感と快適感は線形尺度を用いて、2~5分毎に被験者自身が現在感じる温冷感・快適感に当たるポイントに縦線を記入させるものである。実験の手順としては、実験開始15分前から被験者は測定場所に滞在し、センサ類の装着を行なった後で実験を行なった。皮膚温度はサージカルテープで貼付されたサーミスタでHardy-DuBoisの7点法で測定した。被験者は健康な成人男女であった。更に、局所熱刺激に対する応答を観察するため、ペルチェ素子および熱流束センサ、熱電対で主に構成される熱刺激モジュールを作成した。このモジュールは電圧一定または温度一定に制御可能である。作成したモジュールを人体7箇所(前額、腹、上腕、手甲、大腿、下腿、足甲)に接触させることで熱刺激を付与し、局所熱負荷量、生理反応および心理申告を解析する。なお、寒冷、中立、温暖の3種の気温条件を再現した。

以上より得た人体情報、環境情報をもとに熱流体数値シミュレーションを行い、実測データとの比較・検討を行なう。結果に基づき、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。既存の都市空間に対しては、温熱環境評価を実施でき、その結果に対し熱的快適性を考慮した都市空間設計という観点から改善策を提案する。ま

た、同時に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として、情報発信を行なう。

#### 4. 研究成果

##### (1) 素材物性計測によるふく射環境の把握

屋外空間の熱ストレス要因を考えると、日射などふく射による人体の受熱が支配的である。また、屋外空間におけるふく射伝熱は、直接的に天空から放射されるほか、我々の生活空間を構成する様々な素材を介して行われる。街区では、人体の受けるふく射熱流束に関して、壁面に比べて路面の寄与が大きいとされることから、異なるふく射物性も有する路面の検討をおこなった。地表面は十分広く一様であることを考慮して、全天日射量と反射日射量の比から日射反射率で表すこと手法を提案した。実例として、一般的な裸地、芝生、木質、アスファルト、タイルの5つの地表面に関して日射反射率を実測した結果、タイル面で最も高く39.4%となり、以下は裸地(22.1%)、芝生(17.1%)、木質(14.5%)、アスファルト面(12.3%)の順となった。他方、人体と環境の間の熱授受の入り口となる皮膚に影響を与えるものに衣服素材がある。衣服素材が温熱環境に与える影響は、体感温度を調整することで快適性を保ったままに、空調エネルギーさらには温室効果ガス削減を目指すクールビズやウォームビズが提唱されるなど、近年注目されている。そこで、もともと同一の白色の100%綿素材を白、黒、赤、青、黄、緑色の6色に染色し日射反射率、日射透過率、日射吸収率を屋外空間にて測定した。路面の日射特性計測を応用し、周囲の物性と形態係数を考慮する屋外日射特性計測手法を考案した。結果、日射吸収率は黒(68.5%)、赤(62.3%)、青(62.3%)、緑(61.8%)、黄(57.0%)、白色(51.8%)の順になった。日射吸収率は白より黒色が約17%高く、日射反射率は黒より白色が約25%高かった。また、有彩色の場合、吸収率に大きな違いは見られない。吸収率、反射率ともに白と黒色の中間の値になった。光の三原色である赤、青、緑色では同程度の値になった。

次に人体ふく射モデルを検討する。ふく射モデル形状は、延べ36人の成人被験者における人体表面積を計測した結果をもとに、人体を直方体形状(L0.2m×W0.4m×H1.2m、体表面積1.6m<sup>2</sup>)で表すものとした。人体と環境とのふく射伝熱に際して、環境を構成する材料の短波ならびに長波ふく射物性を含ませた。なお、6方位の放射量測定と比較した結果、本人体ふく射モデルは十分な精度で人体へのふく射伝熱量を見積もることができ、これにより、様々な環境と人体とのふく射伝熱量を把握する土台が構築できた。

##### (2) 人体温熱状態と温冷感覚

人体の熱平衡を人体温熱状態基準とすれば、気温・湿度・放射温度・気流の環境条件と代謝量・着衣量の人体条件を人体熱収支に

反映させた形で人体熱負荷量を定義できる。

$$F_{\text{load}} = M - W + R_{\text{net}} - C - E$$

ここで、 $M$ は代謝量、 $W$ は機械的仕事量、 $R_{\text{net}}$ は正味ふく射量(短波放射量および長波放射量の収支)、 $C$ は対流熱損失量(皮膚顕熱および呼吸顕熱の和)、 $E$ は潜熱損失量(発汗蒸発熱、不感蒸泄熱、および呼吸蒸発熱の和)であり、単位は全て[W/m<sup>2</sup>]である。なお、衣服の効果は対流および潜熱損失量に熱抵抗として導入されており、発汗蒸発熱はASHRAEの血流モデルによるものである。人体熱負荷量は人体への熱の授受に関して、受熱をプラス、放熱をマイナスの熱負荷としてその熱量を熱流束で表現したものである。人体から熱が十分に放散されなければ人は暑く感じ、逆に過度に放散されると寒く感じる。つまり、熱的中立が保たれていない場合、人体に温・冷の負荷がかかることになる。受熱する際にはその受熱量に応じて暑さが、逆に放熱する際にはその放熱量に応じて寒さが生起される。また、人体熱負荷量と温冷感の間には高い相関があり、両者には関連性があることが示唆された。従って、人体熱負荷量を用いることで人間の感じる温冷感覚を数値化することが可能となった。なお、温冷感と温熱快適感にも関連がみられることから、人体熱負荷量を用いた快適性評価も可能である。

##### (3) 非定常変化(ステップ応答)

非定常応答を扱う際には過渡期を除外して初期の定常状態、新たな定常状態へ収斂している段階のみを扱うことも多いが、今回は代謝量、気温、湿度、気流、ふく射量をステップ的に変化させて、被験者実験により人体の生理・心理反応と物理的環境量の関係性を検討した。

代謝量の変動が全身温冷感に及ぼす影響を考察する。人体に及ぼす代謝量以外の影響をなくすため、本実験は人工気候室内で実施し室温は35℃、湿度50%R.H.、実験時間は40分であり、被験者はあらかじめ人工気候室内環境と熱的平衡状態とみなせる時間滞在したのち、20分間を座位安静状態、その後20分間は自転車漕ぎ運動をおこなった。実験開始20分後の運動開始により代謝量が増加するため、それと同時に人体熱負荷量はステップ的に急激に増加する。温冷感も20分後から増加傾向となるが、人体熱負荷量ほどの急激な変化は観察されない。人体熱負荷量が安定するまで運動開始後5分程度であり、温冷感が安定するまで運動開始後10分程度を要しているが、温冷感としては多少過剰反応しているといえる。このように代謝量変動と温冷感変動には5~10分程度の時間差が生じている。しかしながら、総合的に見ると、温冷感と人体熱負荷量とおおむね線形関係にあった。

ふく射量の変動が全身温冷感に及ぼす影響を考察する。実験時間は40分であり、は

じめ 20 分間を日向，その後 20 分間を日陰，またはその逆にはじめ 20 分間を日陰，その後 20 分間を日向にて，いずれの状況でも立位安静状態で過ごしてもらった．実験開始 20 分後に日射量が増加または減少するため，それと同時に人体熱負荷量はステップ状に急激に増加または減少する．温冷感も 20 分後から変動する．人体熱負荷量に沿って温冷感が増加する傾向は見られるが，両者の関係が線形関係とはいえない．この関係は，直線的というより幅のある帯状の分布を示す．

気温の変動が全身温冷感に及ぼす影響を考察する．実験時間は 40 分であり，はじめ 20 分間を 25%，その後 20 分間を 35%，またはその逆にはじめ 20 分間を 35%，その後 20 分間を 25% にて，いずれの状況でも立位安静状態で過ごしてもらった．なお，湿度は一定で 50% R.H. であった．温冷感と人体熱負荷量とおおむね線形関係にあった．

湿度の変動が全身温冷感に及ぼす影響を考察する．実験時間は 40 分であり，はじめ 20 分間を 25% R.H.，その後 20 分間を 50% R.H.，またはその逆にはじめ 20 分間を 50% R.H.，その後 20 分間を 25% R.H.，いずれの状況でも立位安静状態で過ごしてもらった．なお，気温は一定で 35℃ であった．湿度変動により温冷感に変動する一方で，人体熱負荷量はほぼ一定であり，湿度変動の人体熱負荷量に対する影響はきわめて小さかった．人体に湿度感覚器は存在しないとされ，湿度に対する温冷感の影響を熱的に捉える方法はいまだに確立されていないとされ，今後の課題である．

風速の違いが全身温冷感に及ぼす影響を考察する．寒冷環境では風速が上がるにつれては人体熱負荷量の値が小さくなり放熱量が増す．風速が増すと対流熱伝達が促進され，高風速時には人体熱負荷量がより減少する．対流熱伝達量は皮膚温と気温との差の影響もある．皮膚温と気温の温度差が大きい寒冷環境では風速が上がるほど対流熱伝達量が増大し，一方で，皮膚温と気温が大きく変わらない暑熱時には風速が増大しても大きく変化しない．人体熱負荷量と人体温冷感を全体としてみると，両者には良好な関係があることが確認された．

なお，温熱環境 6 大要素のひとつである衣服は前述(2)で考慮してあるため，ここでは割愛する．

これらの実験結果より，おおむね非定常変化時にも人体熱負荷量を用いて温熱環境を測ることができる．なお，ダイナミックな変動を伴う過程や湿度など熱量換算精度が定かでない場合には精度が充分とは言えない．

(4)非一様性(部位差)

温刺激時には皮膚温上昇，冷刺激時には皮膚温降下が見られる．部位ごとに結果を見ると，体幹部では，熱刺激時に体温変動が大きく，局所熱負荷が皮膚温に与える影響が大きい．末端部では，温・冷どちらの熱刺激時にも皮膚温変化はほとんどなく，局所熱負荷が

皮膚温に与える影響は小さかった．また，一般に，局所熱負荷量の増減と局所温冷感の増減は同期している．これより，局所熱負荷は局所温冷感を生起する関係性が見てとれる．更に，局所温冷感と全身温冷感の間には相関関係が認められた．また，局所熱負荷は，皮膚温を変動させ，局所的温冷感も生起する．さらにはそれが全身温冷感にも寄与することが合わせて示された．温暖環境において，生理・感覚応答は体幹より四肢の加熱で影響が大きく，手甲，下腿，足甲の温熱感受性が相対的に高い．中立環境において，顔面，体幹，上肢，下肢部の順に感受性が高く，冷感感度に関しては腹部など体幹で高く，下腿や大腿部など低い傾向にあった．各条件における局所熱負荷の全身温冷感への感度をまとめると，部位  $i$  における局所熱負荷量  $q_i$  が全身温冷感  $TS$  へ及ぼす影響を定式化できる．

$$TS = \sum_{i=1}^7 \alpha_i q_i$$

人体部位を表す  $i$  は，1:前額，2:腹，3:上腕，4:手甲，5:大腿，6:下腿，7:足甲である．重み係数  $\alpha$  は各部位における合計が 1 となるように規格化して整理される．

#### (5)数値解析モデル

本研究において得られた知見を生かすキーとなるのは人体熱モデルである．上述の結果から，環境量や活動・内部発熱といった入力値を基に人体熱負荷量や温冷感を一定精度で予測できるようになった．既存の 65MN モデルをふく射量に関して屋外空間に適用できるように改良し，部位ごとの人体熱収支から皮膚温や温冷感感度導入して，より実空間に起こりうる環境の数値化が可能となった．活用の一例として，屋内空間における日射遮蔽や気流で効果解析において日除けの効果は温冷感を約 0.5 変化させる効果があること，屋外空間では外皮改質による効果は日射性能の改変が有効であることなど，温冷感指標の変動を基にして表現することができた．また，より広範囲空間の例として，近畿地区の温冷感に基づく都市気候図を作成し，情報発信にも成功している．

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

1. Yasuhiro SHIMAZAKI, Atsumasa Yoshida, Ryota SUZUKI, Takeshi KAWABATA, Daiki IMAI and Shinichi KINOSHITA, Application of Human Thermal Load into Unsteady Condition for Improvement of Outdoor Thermal Comfort, Building and Environment, Vol.46, Issue 8, pp.1716-1724, 2011.
2. 島崎康弘, 吉田篤正, 佐藤正一朗, 森田武志, 接触熱刺激による局所冷却が温冷感に与える影響, Thermal Science and Engineering, Vol.20, No.40, pp.61-67, 2012.
3. 島崎康弘, 犬飼義秀, 竹谷翔平, 夏季の室内における日常活動による代謝量変動が生

理応答・温冷感応答に与える影響に関する高齢者と若年者の比較，人間と生活環境，Vol.20，No.2，pp.137-145，2013.

〔学会発表〕(計 16 件)

1. Yasuhiro SHIMAZAKI，Atsumasa YOSHIDA，Shinichi KINOSHITA，and Shigeru NOZU，Thermal environmental analysis of outer structure based on human thermal comfort，19th International Congress of Biometeorology，Auckland，New Zealand，No.144 (6 pages)，2011.

2. Yasuhiro SHIMAZAKI，Atsumasa YOSHIDA，and Shinichi KINOSHITA，Effect of radiation around human for urban thermal sensation，8th International Conference on Urban Climate，Dublin，Ireland，No.119 (6 pages)，2012.

3. 島崎康弘，吉田篤正，山本貴則，櫻原健太，人体の顕熱損失特性計測，第 50 回日本伝熱シンポジウム，仙台，pp.450-451，2013.

〔その他〕

ホームページ

<http://www-es.ss.oka-pu.ac.jp/>

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

島崎 康弘 (Yasuhiro SHIMAZAKI)

岡山県立大学・情報工学部・助教

研究者番号：20584270