

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：53901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18171

研究課題名(和文) 非定常通風環境における気持ちよさ評価モデルの開発

研究課題名(英文) Development of pleasant sensation evaluation model under the cross ventilated environment of unsteady state

研究代表者

森上 伸也 (Morikami, Shinya)

豊田工業高等専門学校・建築学科・助教

研究者番号：50735107

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：通風環境における気持ちよさ評価を予測するためには、物理要素から生理量を予測する多分割型人体温熱生理モデルと、生理量と心理量を関連付けた心理量評価モデルの2つを確立することが必要である。本研究では主に、「非定常通風環境に適応可能な多分割型人体温熱生理モデルの開発」と「非定常通風環境における気持ちよさ評価モデルの開発」を目的として研究を行った。発汗サーマルマネキンおよび被験者実験から、非定常通風環境における多分割型人体温熱生理モデルの精度検証を行い、通風環境への適用性に関する問題点を把握した。また、被験者実験および実測から、通風環境における気持ちよさ評価モデルを検討した。

研究成果の概要(英文)：It is necessary to establish two model which the multi node human thermoregulation model predicting physiological responses from environmental parameters and the psychological sensation model connecting physiological and psychological quantity to predict an evaluation of pleasant sensation under the cross-ventilated environment. The main purposes of this study are "the development of the multi node human thermoregulation model that could predict under the cross-ventilated environment of unsteady state" and "the development of the pleasant sensation model under the cross-ventilated environment of unsteady state". From sweating thermal manikin and human subject experiments, it was validated that the prediction accuracy of the multi node human thermoregulation model under cross-ventilated environment of unsteady state. From human subject experiment and actual measurement, it was investigated that the pleasant sensation model under the cross-ventilated environment of unsteady state.

研究分野：建築環境における温熱生理・心理反応

キーワード：通風環境 被験者実験 発汗サーマルマネキン 気持ちよさ評価モデル 人体温熱生理モデル 1/fゆら  
ぎ

## 1. 研究開始当初の背景

伝統的に、日本の住宅では自然通風が室内温熱環境の改善に有効な手段であると考えられてきた。自然通風利用建物の設計法は、空調設備の設計法に比べて、未だ明確な設計基準が確立されていない。

長年にわたり室内の通風について多くの研究が行われており、数値流体力学 Computational Fluid Dynamics (CFD) による物理量の予測は高い精度が確立される傾向にある。しかし、人体温熱生理モデルに関する多くの既往研究は、空調静穏気流の「閉ざされた執務空間」を対象としており、通風環境への適応は困難である。また、既往の温熱快適性指標は、一定の環境に長時間滞在し続けた場合の快適性であることから、通風環境のような非定常状態への適応は困難である。

## 2. 研究の目的

建物周辺から室内および人体周辺の気流解析を行うためにオープンソースで無償配布されている CFD 解析ソフトである OpenFOAM の予測精度を検証する。

通風環境における 2 node モデルの発汗モデルおよび筆者が開発した新たな発汗・蒸発モデルを検証するために、通風型人工気候室を用いて非定常状態における発汗サーマルマネキンによる実験を行う。

人体の部位ごとの評価が可能な Stolwijk の 25 node モデルによる予測と非定常通風環境における被験者実験を行い、人体の皮膚温および発汗・蒸発現象の予測精度を検証する。

人工気候室の非定常通風環境における被験者実験から既存の気持ちよさ評価モデルの妥当性を評価し、予測精度の向上を図る。

通風利用建物における気持ちよさ評価の実測調査を行い、夏季の通風環境における気持ちよさの発生メカニズムを明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) CFD 解析手法の確立

今回の CFD 解析には OpenFOAM ver2.3.0 を使用した。岐阜工業高等専門学校建築学科の柴田らが開発した Digital Engineering on eXtensible Computing System (DEXCS) を使用した。対象建物モデルは幅、奥行き、高さの比が 2:2:1 の単純形状モデルとし、開口部なしの建物モデルと上・下流壁面中央に開口部を有する建物モデルとした。

### (2) 風速がステップ変化した通風環境における発汗サーマルマネキンを用いた発汗・蒸発量の測定

風速をステップ的に変化させて発汗サーマルマネキンを用いた実験を行い、精度検証用の発汗量・蒸発量データを測定する。実験は東京工芸大学の通風型人工気候室と発汗サーマルマネキンを使用して行った。実験の風速は 0.1m/s から 2.0m/s へステップ変化させた後、2.0m/s へステップ変化させた。人体温熱生理モデルは Gagge の 2 node モデルを使

用して発汗・蒸発モデルの妥当性を検証した。

### (3) 非定常通風環境における多分割型人体温熱生理モデルの予測精度検証

風速をステップ的に変化させて被験者実験を行い、精度検証用の生理量データを測定する。被験者実験は東京工芸大学の通風型人工気候室で行った。被験者実験は相対湿度、風速の異なる 7 ケースを実施した。実験室の気温条件は 32 とし、相対湿度は 50% と 70% の 2 パターンとした。風速は 0.1m/s から 1.0m/s へステップ変化させた後、2.0m/s へステップ変化させた。風速のステップ回数や時間を変化させて非定常通風環境における生理量データを測定した。被験者は一般的な大学生年齢の男性 10 名とした。実験期間は人体の季節順応に配慮して、2016 年 8 月 16 日から 8 月 20 日の間で実施した。

多分割型人体温熱生理モデルである Stolwijk の 25 node モデルの解析ソフトを構築し、モデルの問題点を把握した。また、被験者実験の結果をもとに、人体の部位ごとにおける皮膚温および発汗・蒸発現象の予測精度を検証した。

### (4) 非定常通風環境における既存の気持ちよさ評価モデルの予測精度検証

風速をステップ的に変化させて、被験者実験を行い、精度検証用の心理量データを測定した。被験者実験は東京工芸大学の通風型人工気候室で行った。実験条件は多分割型人体温熱生理モデルの検証実験と同様の条件とした。

### (5) 気流の変動周期が気持ちよさ評価に及ぼす影響に関する主観申告実験

実際の自然通風には心地よい周波数成分とされる「1/f ゆらぎ」や「風のゆらぎ」と呼ばれる変動特性があるが、温熱快適性へ及ぼす定量的な影響は未だ解明されていない。自然風の変動に焦点をあてて、気温および風速の変動周期の条件を変化させて行った。気温は日本の夏を想定して 28°C と 32°C の 2 パターンとした。風速の変動波形は矩形波とした。変動周期は 2 分、10 分および 30 分の 3 パターンとした。風速の変動は気流感を得るために最小風速を 0.1m/s (静穏)、最大風速を 1.0m/s とした。気持ちよさ評価のスケールは気持ちよいと感じる側のみの 4 段階を目安とした無段階尺度により評価した。測定対象を明確にするために気持ちよいと感じる側のみの申告とした。被験者は一般的な大学生年齢の男性 10 名とした。

### (6) 通風利用建物における気持ちよさ評価の実測調査

被験者を用いた主観申告調査を行い、中期および夏季の通風が温熱快適性へ及ぼす定性的・定量的影響を調査した。実測および被験者実験は愛知県豊田市にある”とよたエコフルタウン”に建設された株式会社 LIXIL の展示住宅で実施した。対象建物は吹き抜けの最上階部分にジャロジー窓を有する塔屋があり、また、地域風を考慮した建物の配置

や、開口部の配置がなされており、通風利用に着眼して建設されている。実測は2016年5月を中間期、9月を夏期として実施した。気持ちよさ評価は4段階を目安に無段階で評価した。気持ちよさ評価は測定対象を明確にするために気持ちよい側のみとした。被験者は一般的な大学生年齢の男性3名とした。主観申告は通風の気持ちよさ感であることを被験者に説明して測定した。被験者には測定時に、少しでも気持ちよさを感じた場合、すぐさま操作するよう注意を促した。被験者は住宅における休息時を想定してLDKに滞在させ、椅子座を保たせた。被験者の着衣量は夏季の住宅における通風環境を想定して、夏服の軽装とする。夏服は半袖Tシャツ、ハーフパンツ、トランクス、スリッパとした。

#### 4. 研究成果

##### (1) CFD解析手法の確立

既往研究の風洞実験結果を用いてCFD解析の精度検証を行った。無償配布されているCFD解析ソフトであるOpenFOAMの解析環境を構築した。メッシュ数や乱流モデルおよび建物および建物周辺モデリングなど様々な要因が解析結果に大きな影響を及ぼしており、更なる予測精度の向上を図る必要がある。

##### (2) 風速がステップ変化した通風環境における発汗サーマルマネキンを用いた発汗・蒸発量の測定

既往研究で2 nodeモデルにおける発汗モデルの問題点を解決するために、発汗現象と蒸発現象に分離したモデルを検討した。その妥当性を検証するために発汗サーマルマネキンを用いて、発汗量と蒸発量を測定し予測精度を検証した。拡張型蒸発モデルでは、風速のステップ変化直後において、皮膚に残った汗の急激な蒸発を再現できた。言い換えると、既往の発汗モデルでは風速が変化するような通風環境の予測には適さないことがわかった。また、発汗サーマルマネキンや被験者実験で生じた風速のステップ変化直後において皮膚温がアンダーシュートする傾向を再現できるようになった。

##### (3) 非正常通風環境における多分割型人体温熱生理モデルの予測精度検証

25 nodeモデルにおける発汗制御の算出式において、風速の変化や相対湿度の影響が直接的には考慮されていないことがわかった。25 nodeモデルは2 nodeモデルを基にしていると考えられるため、既往研究で得られた知見と同様の結果となった。25 nodeモデルの解析ソフトを構築し、被験者実験の結果を用いて予測精度の検証を行った。定常状態において、着衣部分である上半身の実験値と予測値に差が生じたことから、毛髪や着衣量による熱抵抗などを考慮する必要があることがわかった。風速がステップ変化した直後の非正常状態において、皮膚温はアンダーシュートする傾向を示し、25 nodeモデルでは傾

向を予測できないことが分かった。発汗量は非正常通風環境において、実験値よりも計算値の方がやや低い値を示したが、変化傾向は同様の結果を示したことから、発汗モデルを発汗現象と蒸発現象で区別したモデルの検討が必要である。これは筆者らの既往研究と同様の結果で、予想通りの結果であった。今後、部位を考慮した拡張を検討する必要がある。

##### (4) 非正常通風環境における既存の気持ちよさ評価モデルの予測精度検証

非正常通風環境における気持ちよさ評価を調査するために、人工気候室を用いて主観申告実験により測定を行った。通風環境の気持ちよさ評価の経時変化は温冷感や涼暖感とは異なり、一過性の傾向があることを確認した。暑くて不快な状態から急激に環境が変化することで気持ちよさが発生する傾向を確認した。これらは筆者らの既往研究の結果と同じであり、測定の有意性が得られているといえる。気持ちよさ評価モデルは、平均皮膚温の積分値および平均皮膚温の変化率の積分値を説明変数として改良を行った。改良型の気持ちよさ評価モデルの予測精度は既往のモデルに比べてやや向上したものの、さらに予測精度を向上させる必要がある。今後はモデルの再検討および実験ケースを増やしてさらに普遍性のあるモデルを開発する必要がある。

##### (5) 気流の変動周期が気持ちよさ評価に及ぼす影響に関する主観申告実験

気温および矩形波で変動する風速の変動周期を変化させた主観申告実験を行い、通風環境の気持ちよさ評価について調査を行った。気持ちよさ評価の平均値が最も高かったケースは気温32°C、変動周期10分のケースであった。最も低かったケースは気温32°C、変動周期30分のケースであった。変動周期10分で気温28°Cのケースにおける気持ちよさ評価の平均値は1.0であった。したがって、ゆらぎを持つ自然風が高い快適性を生じさせるとはいえないことが推察できる。また、高い快適性を得るための風の変動特性は他の温熱環境の影響を受けると考えられる。気温28°Cの場合、気持ちよさ評価が2.0を超過する確率は概ね0であり、超過確率の分布は周期によらず同様の傾向を示した。気温32°Cの場合、気持ちよさ評価が2を超える確率もあり、変動周期が10分の場合の超過確率は0.40となった。また、超過確率の分布は周期によって異なる傾向を示した。

##### (6) 通風利用建物における気持ちよさ評価の実測調査

自然換気・通風利用建物において、被験者を用いた主観申告実験を行い、中間期および夏期の通風環境における気持ちよさ評価について調査を行った。中間期および夏期の実験とも天候に恵まれず、通風を利用するにはやや寒い気候であった。中間期の実験終了後に実験を通した総合的な温冷感についてア

ンケート評価をしたところ、“寒い”と申告しており、気温が低い場合は通風による気持ちよさが得られないといえる。夏期の主観申告実験では、気持ちよさ評価が“やや気持ちよい”よりも低いことが多く、気温が低かったことが原因であると考えられる。今後、実験回数を増やし、定量的な評価をする必要がある。

## 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 1 件)

森上伸也、大場正昭：通風環境における気持ちよさ評価モデルに関する実験的研究：風速がステップ変化した場合における検討、日本建築学会環境系論文集 Vol.80, No.715, pp.723-730., 2015 年 2 月、査読有

〔学会発表〕(計 3 件)

森上伸也、水谷国男、飯野由香利：通風環境における気持ちよさ評価に関する実験的研究 その1 矩形波変動風環境における気持ちよさ評価について、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)(2017 年 9 月発表予定)

Shinya Morikami, Kunio Mizutani, Yukari Iino, Kenji Tsukamoto, Masaaki Ohba, Tomonobu Goto : Study on evaporative heat loss by sweating of two-node model under cross-ventilated environment, The Fifth International Conference on Human-Environment System ICHES2016 Nagoya, No.20061, Oct. 2016

森上伸也、野中俊宏：塔屋のある戸建て住宅における夏期室内温熱環境の実測調査および被験者実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、環境工学 II, pp.315-316、2015.9

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

森上伸也 (Shinya Morikami)

豊田工業高等専門学校建築学科・助教

研究者番号：50735107