

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820245

研究課題名(和文)循環系の詳細計測に基づく熱的健康被害防止のための数値人体モデルの開発

研究課題名(英文)Development of a new human simulation model for preventing health problems due to severe thermal environments based on detailed measurements of cardiovascular system

研究代表者

後藤 伴延(GOTO, TOMONOBU)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20386907

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)：熱的健康被害の防止に寄与すべく、体温だけでなく血流量や血圧の予測も可能な新たな数値人体モデルの開発と、リファレンスデータ収集のための生理量測定実験を行った。生理量測定実験では、室温・姿勢が異なる9条件について体温・血圧・血流量などの測定を行い、加えて、被験者の体格の違いによる影響についても観察した。数値人体モデルは、物理モデルと生理モデルより構成され、物理モデルは熱回路網モデル(伝熱解析)と循環系モデル(流体解析)より構成される仕様とした。本研究では特に熱回路網モデルと循環系モデルの開発を実施し、これらのモデルによって生理量測定実験を概ね再現できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In order to prevent health problems caused by severe thermal environments, we developed a new human simulation model, which can predict not only body temperature but also blood pressure and blood flow rate. We also carried out some subjective experiments to collect reference data for the development. The experiments were done in 9 cases with different combinations of ambient temperature and body posture, and some physical quantities, e.g. body temperature, blood pressure, blood flow rate, were measured. The new human model was designed to be composed of a physical model and physiological model, and besides, the physical model was designed to be composed of a thermal network model and cardiovascular model. In this study, the thermal network model and cardiovascular model were developed, and it was confirmed that the models were able to reproduce the subjective experiments reasonably.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：温熱生理 熱中症 ヒートショック 人体シミュレーション 血液 血圧 体温 生理量測定

1. 研究開始当初の背景

近年、熱中症やヒートショックによる熱的健康被害が増加している。これらの健康被害には、過酷な温熱環境への曝露に伴う、体温や血圧・血流量の変動が影響している。また、体温や血圧・血流量などの人体生理量が変動する要因は、温熱環境だけでなく、個人の行動（姿勢・運動負荷）や体格（サイズ・組織構成）、体質（年齢・性別・遺伝・既存疾患）なども影響しており、これらの複合影響によって健康被害は生じている。このような熱的健康被害の危険度を予測する手段の一つとして、数値人体モデルを利用した生理量予測が挙げられる。

しかし、従来建築分野で開発されてきた人体モデルは、主たる目的が体温予測であったため、血流量の予測については精度検証が不十分であり、血圧の予測については不可能であった。また、その原因の一つとして、従来は血流測定が困難であり、血流に関する参照用データが絶対的に不足していたことがあった。しかし現在では、医工学の発展により、非侵襲的な血流測定が可能となってきた。

2. 研究の目的

本研究では、熱的健康被害の発生に大きく関わっている血流量や血圧に着目し、従来の体温予測だけでなく、血流量や血圧の予測も可能な新たな数値人体モデルの開発を目的とする。また、超音波ドプラなどを用いることで血流量や血圧を中心とした生理量のデータを収集し、人体生理反応の解明および数値人体モデルの開発に活用する。

3. 研究の方法

(1) 生理量測定実験

実験は、放射の不均一による影響の少ない人工気候室の中で行い、被験者は特定の健康な男子学生1名ないしは2名とした。実験の物理条件および測定項目、測定機器を表1、表2、表3にそれぞれ示す。特に血流量の測定には、超音波画像診断装置やレーザー血流計を用いた。実験スケジュールを図1に示す。実験前の環境影響を取り除くために被験者を30分間実験環境に滞在させた後で各生理量の測定を行った。

異なる室温における生理量測定

仰臥位において室温が異なる5ケース、椅座位において室温が異なる3ケースで実験を行い、室温が生理量に及ぼす影響を観察した。

異なる姿勢における生理量測定

室温を28に固定し、仰臥位、椅座位、立位の姿勢が異なる3ケースで実験を行い、姿勢が生理量に及ぼす影響を観察した。

異なる被験者における生理量測定

椅座位-28、椅座位-35、立位-28の3ケースにおいて異なる2名の被験者を用いた実験を行い、生理量変化の傾向の類似点や体格・体質といった個人差による相違点を観察した。

表1 物理条件

姿勢	室温	被験者	相対湿度	気流速度	放射温度	着衣量
仰臥位	18	被験者1	成り行き	0.1 m/s以下	室温と同条件	0.06 clo
	23					
	28					
	35					
	40					
椅座位	23	被験者1, 2	成り行き	0.1 m/s以下	室温と同条件	0.06 clo
	28					
	35					
立位	28					

表2 測定項目

測定項目	測定部位
動脈血流量	総頸動脈、椎骨動脈、外頸動脈、内頸動脈、上腕動脈、 橈骨動脈、尺骨動脈(中枢・末梢)、大腿動脈、大腿深動脈、 膝窩動脈、前脛骨動脈、後脛骨動脈、左室流出路
血圧	上腕、下腿
心拍数	胸部
皮膚血流量	顔、頸部、胸部、腹部、背中、腰、上腕(前・後)、前腕(前・後)、 手(掌側・背側)、大腿(前・後)、下腿(前・後)、足(背側・底側)
皮膚温度	顔、頸部、胸部、腹部、背中、腰、上腕、前腕、手(背側)、 大腿(前・後)、下腿(前・後)、足(背側)
深部温度	耳内
熱流束	顔、頸部、胸部、腹部、背中、腰、上腕、前腕、手(背側)、 大腿(前・後)、下腿(前・後)、足(背側)
発汗量	体重減少量を測定

表3 測定機器

測定項目	測定部位
動脈血流量	超音波画像診断装置 Aplio SSA-700A (TOSHIBA社製)
血圧	血圧計 UA-767PC (A&D社製)
心拍数	心拍計 S610i (ポラール社製)
皮膚血流量	レーザー血流計 FLO-Lab (OMEGAWAVE社製)
皮膚温度	T型熱電対 (0.3 mmφ)
深部温度	耳用体温ロガー-DBTL2 (テクノサイエンス社製)
熱流束	熱流束センサー HF-D30 (CAPTEC社製)、 熱流センサー Type S11A (江藤電気社製)
発汗量	分銅内臓重量級天秤GP-100K (A&D社製)

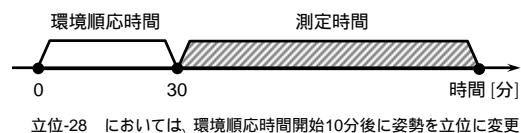


図1 実験スケジュール

(2) 数値人体モデルの開発

数値人体モデルを、図2に示すように「1.物理モデル」と「2.生理モデル」に分割し、さらに、物理モデルを「A.熱回路網モデル(伝熱解析)」と「B.循環系モデル(流体解析)」に分割して各モデルの構築を進めた。本研究では、先ずA・Bそれぞれの開発を行い、それぞれ単体での検証を行った。具体的には、(1)の実験で得られた測定値(または実験に基づく推定値)を、各モデルの入力条件(生理反応量)として与え、その出力結果が実験を正しく再現しているかを検証した。

熱回路網モデルの開発

Stolwijkモデルを基礎とし、図3に示すように、心臓を想定したCentral Bloodを含めて人体を計16部位に分割し、さらにCentral Blood以外の部位をそれぞれ4層に分割した。また、Central Blood以外の各部位には血管を

想定した血液プールを設け、血管と隣接組織との間の熱交換、および、血管同士の熱交換を考慮した。さらに、体格に関するパラメータ（サイズ・組織構成）については、MRI 全身画像（図 4）に基づき、被験者の実測値を与えた。高温条件下においては、手足の AVA 血管を通る血流を考慮できるようにした。

循環系モデルの開発

Liang らのモデルを基礎とし、図 5 に示すように、大動脈・動脈を再現する 1 次元モデル（1-D モデル）と、細動脈・静脈・心臓・肺循環を再現する集中定数系モデル（0-D モデル）からなるモデルを構築した。また、体温調節反応の一部として生じる血流調節反応を、動脈末梢部と細動脈の血管抵抗の変化、および、静脈のコンプライアンスの変化として表現することとした。

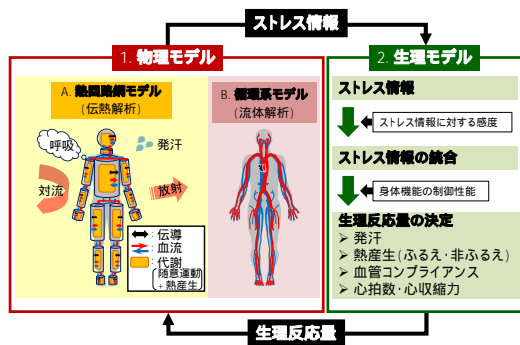


図 2 開発モデルの概要

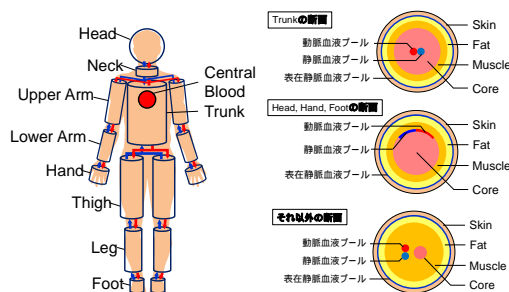


図 3 熱回路モデルの概要図

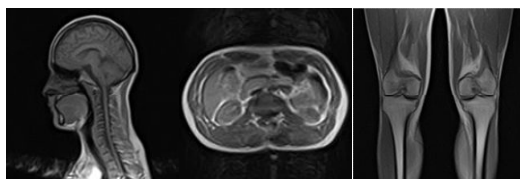


図 4 MRI 診断画像

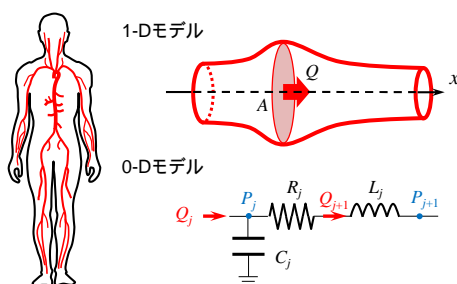


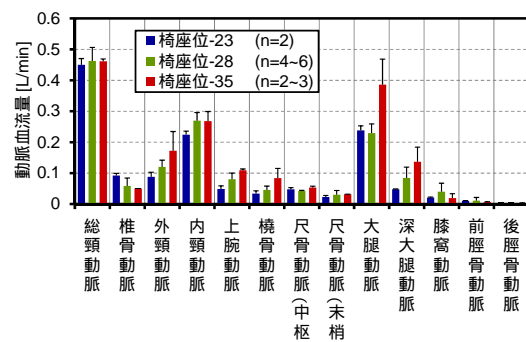
図 5 循環系モデルの概要図

4. 研究成果

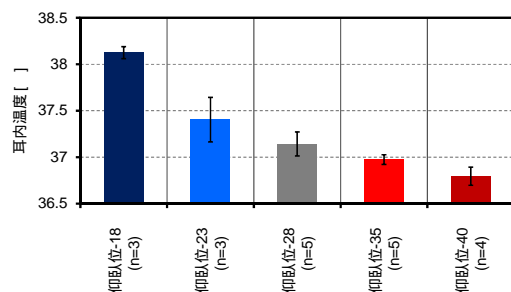
(1) 生理量測定実験

異なる室温における生理量測定

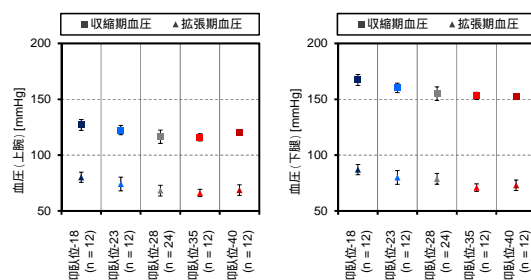
室温の上昇に伴う血流量の増加や耳内温度の低下に関するデータが得られた（図 6(a),(b)）。なお、室温と耳内温度の関係には血流が大きく影響していると考えられ、高温環境における耳内温度の低下は、体表面を流れる血液が増加し、冷却された血液が頭部へ循環してくること、また、発汗により冷却が促進されることが理由として挙げられる。逆に、低温環境における耳内温度の上昇は、体深部を流れる血流が増加し、血液が冷却されずに頭部へ循環してくること、また、ふるえ熱産生により血液が温められることが理由として挙げられる。また、低温環境下においては、血管収縮による血圧の上昇に関するデータが得られた（図 6(c)）。



(a) 動脈血流量



(b) 耳内温度



(c) 血圧

図 6 異なる室温における生理量測定の結果

異なる姿勢における生理量測定

姿勢が仰臥位から椅座位、立位になるにつれて、一回拍出量の低下や心拍数の増加が観察された（図 7(a),(b)）。前者は、下腿に静水圧が加わったことで血液が足に貯留し、心臓への還流血液量が減少したためと考えられる。後者は、この還流血液量の減少を補うた

めと考えられる。また、下腿では皮膚血流量の減少傾向も観察された(図7(c))。これは、姿勢を変更したことで下肢の筋肉における酸素消費量が変化し、皮膚と筋肉の血流量の分配率が変わったためと推察される。

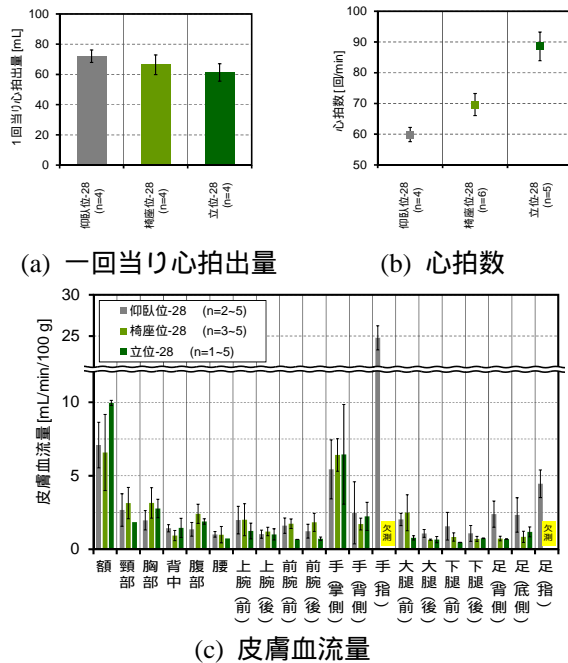


図7 異なる姿勢における生理量測定の結果

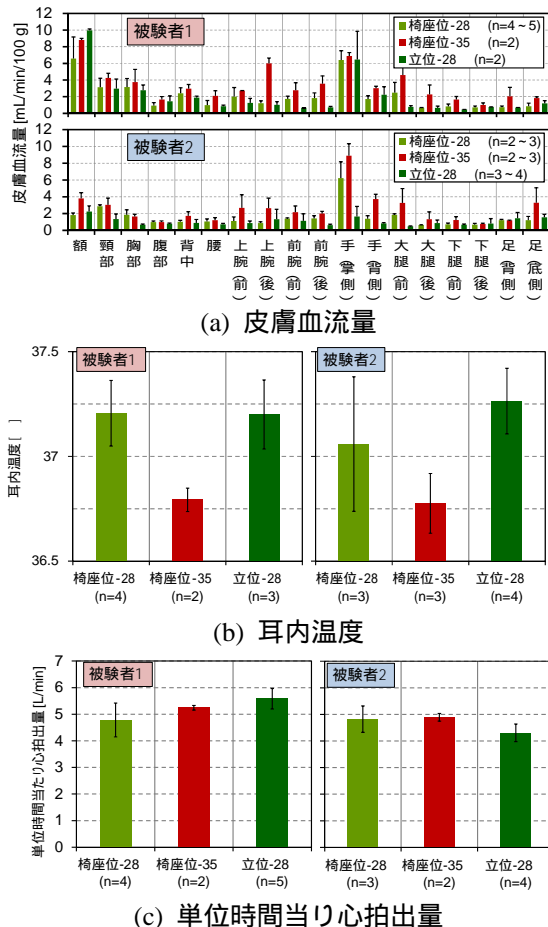


図8 異なる被験者における生理量測定の結果

異なる被験者における生理量測定

2名の被験者に対する測定結果の類似点としては、椅座位-35において、椅座位-28よりも血流量が増加し、耳内温度が低下する様子が観察された(図8(a),(b))。一方、相違点としては、立位-28において、被験者1では椅座位-28よりも単位時間当たり心拍出量が増加したものの、被験者2では減少する様子が観察された(図8(c))。外見から被験者2の方が筋肉量は少ないと判断されたことから、被験者2は下肢の骨格筋収縮力が弱く、立位時、重力により下肢に多くの血液が貯留して還流血流量が減少したため、心拍出量が減少したと推察される。また、頭部・上肢・下肢それぞれへの主な経路である総頸動脈・上腕動脈・大腿動脈においても、被験者2の血流量がより減少する様子が観察されており、単位時間当たり心拍出量の変化傾向と対応がみられた。

(2) 数値人体モデルの開発

熱回路網モデルの開発

従来の熱回路網モデルでは、高温条件における体温の再現ができないことが明らかになったため、動脈および静脈とその他の組織との間の熱交換に関してモデルの改良を行い、より実体に即したモデルを行った。これによって、図9に示すように、室温の上昇に伴う皮膚温度上昇および耳内温度低下の傾向を再現することが出来た。一方、部位ごとの発汗量や代謝量の配分については、さらなる検討を要することが明らかになった。

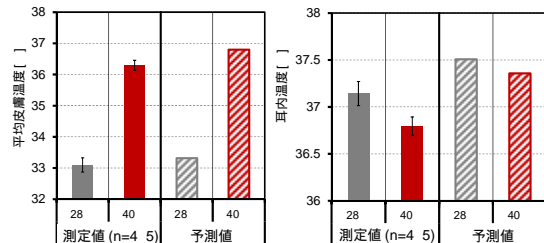


図9 仰臥位-28 と 40 における体温の再現

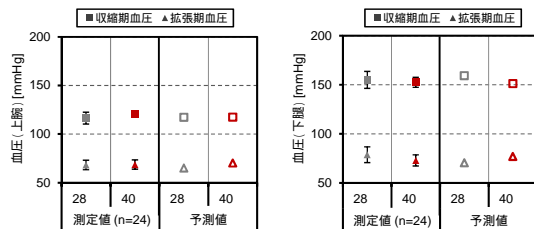
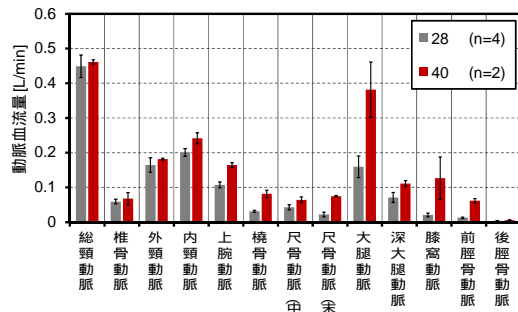


図10 仰臥位-28 と 40 における血圧の再現

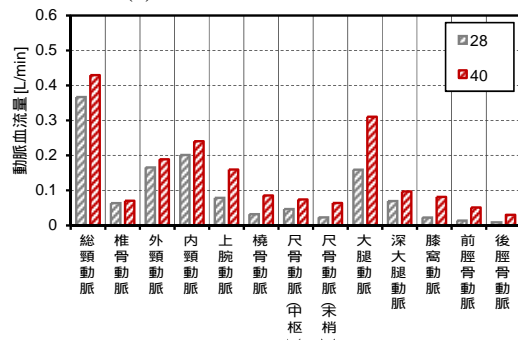
循環系モデルの開発

被験者の特性に合わせたパラメータを用いることで、基準条件である仰臥位-28の実験の血圧や血流量が概ね再現できること、また、動脈末梢部と細動脈の血管抵抗および静

脈のコンプライアンスを変化させることにより、高温条件での血圧(図10)や血流量(図11(a),(b))の変化を概ね再現することを確認した。一方、現時点で推定値を与えている動脈の弾性等のパラメータについて、さらに詳細な測定を実施し、定量化を進める必要があることが明らかになった。



(a) 動脈血流量の測定値



(b) 動脈血流量の再現

図11 仰臥位-28 と 40 における血流量の再現

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)

[学会発表](計12件)

寺山大喜, 坂本寛人, 後藤伴延, 熱的健康被害防止のための人体シミュレーションモデルに関する研究, その4 熱回路網モデルの改良と高温条件における体温および血圧・血流量の再現, 日本建築学会大会, 2016年8月24日~26日, 福岡大学(福岡県・福岡市)

坂本寛人, 寺山大喜, 後藤伴延, 熱的健康被害防止のための人体シミュレーションモデルに関する研究, その3 室温や姿勢が異なる7つの条件下における生理量の測定, 日本建築学会大会, 2016年8月24日~26日, 福岡大学(福岡県・福岡市)

寺山大喜, 千葉友樹, 坂本寛人, 後藤伴延, 熱的健康被害防止のための人体シミュレーションモデルに関する研究, その2 室温や姿勢が異なる条件下における生理量の測定, 日本建築学会大会, 2015年9月4日, 東海大学(神奈川県・平塚

市)

坂本寛人, 千葉友樹, 寺山大喜, 後藤伴延, 熱的健康被害防止のための人体シミュレーションモデルに関する研究, その1 血圧・血流量を予測する循環系モデルの開発, 日本建築学会大会, 2015年9月4日, 東海大学(神奈川県・平塚市)

坂本寛人, 千葉友樹, 寺山大喜, 後藤伴延, 新たな数値人体モデルのための循環系モデルの開発, 日本建築学会東北支部研究報告会, 2015年6月20日, 山形大学(山形県・山形市)

寺山大喜, 千葉友樹, 坂本寛人, 後藤伴延, 室温や姿勢が異なる条件下における人体生理量の測定, 日本建築学会東北支部研究報告会, 2015年6月20日, 山形大学(山形県・山形市)

H Sakamoto, Y Chiba, T Hayase, K Fukumoto, Y Saijo, T Goto, Measurements of blood flow and blood pressure under different indoor temperature and body postural conditions, and development of a new human simulation model, 査読有, Healthy Buildings Europe 2015, 2015年5月18日~20日, Eindhoven (Netherlands)

坂本寛人, 千葉友樹, 寺山大喜, 後藤伴延, 新たな人体モデル開発に向けた循環系のモデル化, 空気調和・衛生工学会東北支部学術・技術報告会, 2015年3月10日, 東北大学(宮城県・仙台市)

寺山大喜, 千葉友樹, 坂本寛人, 後藤伴延, 室温・姿勢が異なる3つの条件下における人体生理量の測定, 空気調和・衛生工学会東北支部学術・技術報告会, 2015年3月10日, 東北大学(宮城県・仙台市)

千葉友樹, 坂本寛人, 後藤伴延, 室温及び姿勢の違いが血流量・血圧に及ぼす影響の実験的検討, その2 血流量・血圧の変化とその他の生理量に関する考察, 日本建築学会大会, 2014年9月12日, 神戸大学(兵庫県・神戸市)

坂本寛人, 千葉友樹, 後藤伴延, 室温及び姿勢の違いが血流量・血圧に及ぼす影響の実験的検討, その1 非侵襲的測定法を用いた血流量測定, 日本建築学会大会, 2014年9月12日, 神戸大学(兵庫県・神戸市)

坂本寛人, 千葉友樹, 後藤伴延, 定常条件下における血流量・血圧の測定と人体熱モデルによる再現性に関する検討, 空気調和・衛生工学会東北支部学術・技術報告会, 2014年3月18日, ユアテック本社(宮城県・仙台市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

後藤 伴延 (GOTO TOMONOBU)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 20386907

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし