

人体熱モデルを用いた入浴時の温熱生理反応の解析

正会員 ○東浩太郎*1 同 高田暁*2 同 銚井修一*3 同 仲嶋正訓*4 同 山手美穂*4 同 松下敬幸*5

4.環境工学- 10.温熱感

人体熱モデル, 非定常状態, 入浴, CFD 解析, 対流熱伝達率

1. はじめに

入浴時における人体の温熱生理反応を把握する方法として、被験者実験に加えて、人体熱モデルを用いた解析的検討がなされている。高田ら¹⁾は入浴時における浴槽内の湯から体への熱移動の再現性、入浴後の体温調節系の変動特性について検討している。Munirら²⁾はシャワー浴時の人体温熱生理反応の再現性を検討している。杉本ら³⁾は人体熱モデルを用いて、入浴時の熱中症による死亡・入院リスクを予測している。しかし、これらはシャワー浴や浴槽に浸かった状態のいずれかを対象としたもので、通常の入浴として考えられる一連の手順の再現については行われていない。本研究では、被験者が体を洗うなどの行為を自由に行う入浴実験を実施する。そして、浴室での行動内容に応じて、皮膚表面での伝熱モデルを変えた人体熱モデルを用いて、入浴中の非定常温熱生理反応の再現を試みる。

2. 実験と解析モデルの概要

2.1 実験概要

冬季において住宅型実験棟内に設置されている浴室を対象に被験者を用いた入浴実験を行った。浴室の概要を図1に示す。被験者は健康な青年男子1名である。前室にて食道/直腸センサー及びT型熱電対を装着し、長袖Tシャツ、長ズボン、トランクスを着用して30分間椅座で安静にする。その後脱衣室で脱衣して入浴する。入浴手順を図2に示す。入浴の手順は被験者の好みで行うものとし、

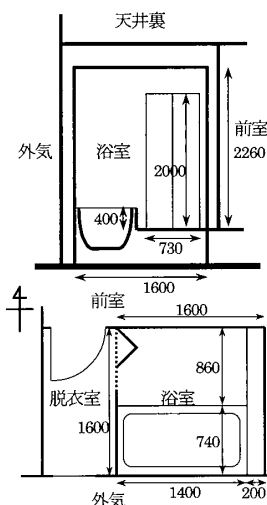


図1 浴室概要(単位: mm)

行動内容を口頭で申告させ、ICレコーダーで記録した。なお、浴槽の湯温は43[°C]^{注1)}である。実験結果として浴室気温・壁面気温それぞれの平均値及びシャワー湯温、浴槽底面温度を図3に示す。



図2 入浴手順

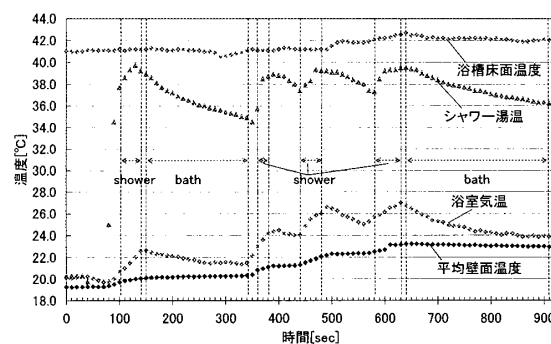


図3 浴室気温・平均壁面温度・シャワー湯温・浴槽底面温度

2.2 解析概要

解析にはそれぞれの入浴行為時における皮膚表面での伝熱の状況をStolwijkモデル⁴⁾に適用したものを用いる。着衣の熱抵抗として、前室における椅座安静時には0.6[clol]、入浴時は0[clol]を与える。浴室内部での行動を①洗い場椅座時、②シャワー時、③浴槽の湯に浸かっている時(以下、浴槽使用時)のいずれかに分類し、それぞれについて皮膚表面での伝熱モデルを適用する。

洗い場椅座時には、人体皮膚全体が濡れているものと考え、皮膚表面での水蒸気圧を皮膚温における飽和水蒸気圧とする。人体まわりの対流・放射熱伝達率はStolwijkモデル⁴⁾に用いられている値(表1)を引用し、湿気伝達率に関してはレイスの関係を用いて対流熱伝達率より決定する。

シャワー時には、既に提案されているシャワー時の皮膚表面での伝熱モデルをStolwijkモデルに適用する手法²⁾を用いる。これは、式(1)に表すように流水被覆面積率

Analysis of Thermophysiological Responses during Bathing by Thermal Model of Human Body
AZUMA Kotaro, TAKADA Satoru, HOKOI Shuichi, NAKAJIMA Masanori, YAMATE Miho and MATSUSITA Takayuki

β を用いることで、流水被覆部とそれ以外の部分とで皮膚表面での伝熱を分けて扱う手法である。それぞれの部分での伝熱は式(2)・(3)で表現する通りである。流水被覆部では湯との対流熱伝達が、それ以外では周辺と対流・放射による熱移動が考慮されている。また、流水被覆部では蒸発による熱損失は考慮しない。シャワー時における皮膚表面での伝熱の概要を図4に示す。人体各部位の流水被覆面積率及びシャワーからの湯との対流熱伝達率を表2に示す。

浴槽使用時には、湯に浸かっている部位の放射熱伝達率は0とする。湯の対流熱伝達率はWitherspoonら⁵⁾が提案している $133.7[\text{W}/\text{m}^2/\text{K}]$ を用いる^{注2)}。また、平均放射温度には各壁面の面積で重み付けした温度を用い、相対湿度は100[%]とする。以上を基準モデルとして解析を行う。

$$Q_{sk} = \beta \cdot Q_w + (1 - \beta) \cdot Q_a \quad \dots(1)$$

$$Q_w = \alpha_{cw} \cdot (T_w - T_{sk}) \cdot S \quad \dots(2)$$

$$Q_a = \{ \alpha_c \cdot (T_a - T_{sk}) + \alpha_r \cdot (T_r - T_{sk}) \} \cdot S \quad \dots(3)$$

$$E = E_{\max} (1 - \beta) \quad \dots(4)$$

表1 Stolwijkモデルの対流・放射熱伝達率⁴⁾

人体部位	頭部	胸部	腕部	手	脚	足先
対流熱伝達率 $[\text{W}/\text{m}^2/\text{K}]$	2.75	2.15	3.0	3.35	2.75	3.0
放射熱伝達率 $[\text{W}/\text{m}^2/\text{K}]$	5.5	4.5	4.3	3.0	4.0	4.0

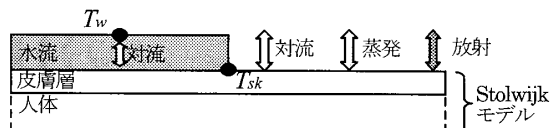


図4 シャワー時における皮膚表面での伝熱概要

表2 人体各部の流水被覆面積率・湯との対流熱伝達率²⁾

	頭	胸	腕	手	脚	足先
流水被覆面積率[-]	0.00	0.40	0.12	0.12	0.46	0.46
対流熱伝達率 $[\text{W}/\text{m}^2/\text{K}]$		104	104	104	104	104

*頭を洗わない場合のシャワー入浴を想定して決定されたものである

3. 実験結果と基準モデルを用いた解析結果の比較

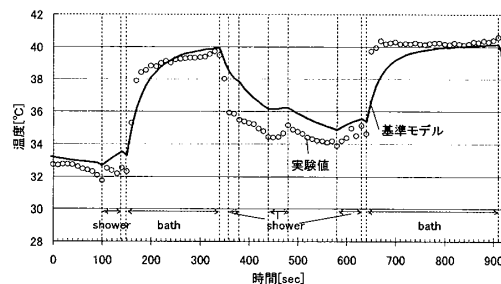


図5 実験結果と解析結果(基準モデル)の平均皮膚温の比較

実験結果と解析結果(基準モデル)の平均皮膚温の比較を図5に示す。浴槽使用時の温度上昇は概ね再現できている。しかし、浴槽から出た直後の急激な温度低下が再現できず、340～640秒の間、計算値が実験値と比べ1～2[°C]高くなっている。

4. 入浴時における人体表面の対流熱伝達率の算出

入浴時の浴室内では自然対流が発生しやすいことから、人体表面の対流熱伝達率について検討する必要がある。そこで、CFD解析を用いて入浴時における人体表面の対流熱伝達率を算出する。想定する温度条件は洗い場椅子時である入浴380～440秒とする。解析結果から得られた定常状態の浴室の平均気温と各面の対流熱流より、式(5)を用いて人体各部の対流熱伝達率を算出する。

$$q = \alpha_c (T_{sk} - T_a) \quad \dots(5)$$

解析対象を図6に示す。被験者実験で用いた浴室の洗い場に直方体で表現した人体を椅座状態で配置する。手及び足先の対流熱伝達率はそれぞれ腕及び脚と同等の値となる考え、手及び足先は省略する。解析条件を表3に示す。また、境界条件として与えた各面の温度を表4に示す。

表3 CFD解析条件

計算対象	定常状態
解析領域	1.6m(X) × 1.6m(Y) × 2.26m(Z)
メッシュ数	3379316:146(X) × 163(Y) × 142(Z)
乱流モデル	標準k-εモデル
移流項	一次精度風上差分
壁面条件	【速度】noslip 【温度】温度対数則
最大無次元距離Y'	7.2

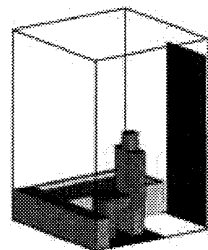


図6 CFD解析対象

表4 境界条件(単位:°C)

東壁	西壁	南壁	北壁
19	18	18.5	19.5
ドア	床(東側)	床(西側)	天井
22	30	20	21.5
湯面	人体		
43	35		

図7中の点a・bの鉛直温度分布についてCFD解析の結果と実験結果(入浴430秒)の比較を行う(図8)。鉛直温度分布の傾向については概ね一致した。また、点a・bどちらの点においても解析結果の温度が低くなった。今回はこの解析結果より、式(5)を用いて対流熱伝達率を算出する。人体各部位の対流熱伝達率を表5に示す。浴室の平均気温は23.1[°C]であった。

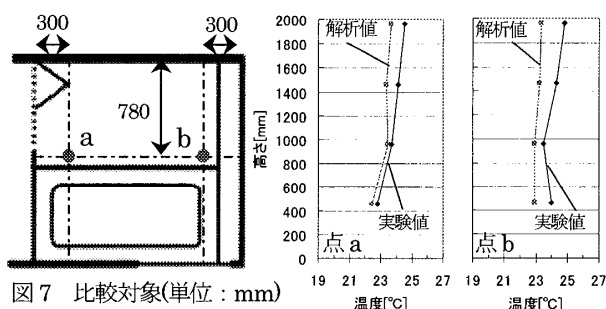


図7 比較対象(単位: mm)

図8 鉛直温度分布の比較

表5 入浴時における人体表面の対流熱伝達率

人体部位	頭部	胴部	腕部	手	脚	足先
対流熱伝達率 $[W/m^2 \cdot K]$	3.9	4.2	4.4	4.4	4.9	4.9
対流熱流 $[W/m^2]$	46.9	49.4	52.2	52.2	58.1	58.1

5. 入浴時における対流熱伝達率を考慮した解析結果

入浴時における浴室内の自然対流を考慮した人体表面の対流熱伝達率を用いて解析を行う。平均皮膚温の実験値と解析値の比較を図9に示す。基準モデルと比較すると浴槽から出た後の体温低下が大きくなっているが、実験結果と比較すると依然として緩やかである。浴槽に入った直後の温度上昇については、人体が湯に浸かったために対流が発生したためと考えられる。また、浴槽から出た直後の温度低下の要因として、浴槽から洗い場への移動や、シャワー湯温調節のための放水に起因する気流の発生⁹⁾によって皮膚表面での対流熱伝達率が増加することが考えられる。

深部温について鼓膜温(実験値)と頭部 core 温度(解析値)の比較を図10に、直腸温と胴部 core 温度の比較と図11に示す。鼓膜温については温度が上昇するタイミングがずれているものの、両者の温度上昇幅はよく一致した。直腸温については、実験値にあまり変化が見られなかったが、解析値では入浴中に約1[°C]上昇した。

また、人体各部位について頭部・胴部・腕部の実験結果と解析結果の比較をそれぞれ図11・12・13に示す。頭部については、シャワー時の実験値と解析値に差が見られた。これは、頭部の流水被覆面積率が0であったため、シャワー時の湯の影響が含まれなかったためと考えられる。胴部については2回目の浴槽使用時の温度上昇が実験値より1[°C]弱低かったものの、概ね実験値と一致した。脚及び足先についても、胴部と同様の傾向が見られた。腕部については440～480秒と580～630秒のシャワー時の温度上昇が再現できていない。これは、腕部の流水被覆面積率が0.12と胴部などに比べて小さいためと考えられる。そのため、温度の上昇がみられるシャワー時に脚と同等の0.46を

与えて解析を行うと実験値に近づいた。被験者の好みで入浴を行っているため、個人差により、流水被覆面積率が変化した可能性が考えられる。

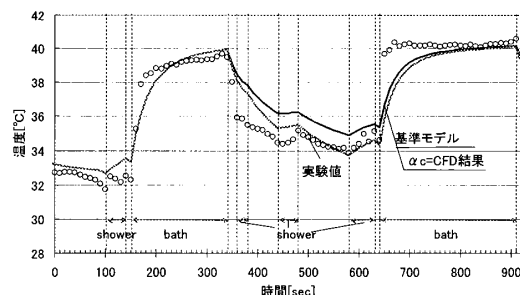


図9 平均皮膚温の比較

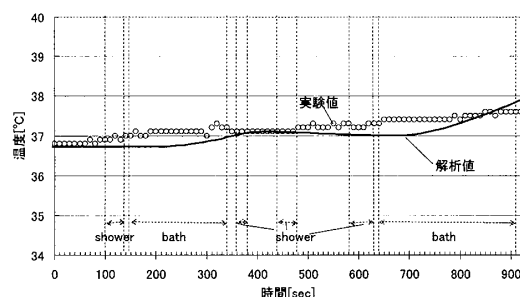


図10 鼓膜温と頭部 core 温度の比較

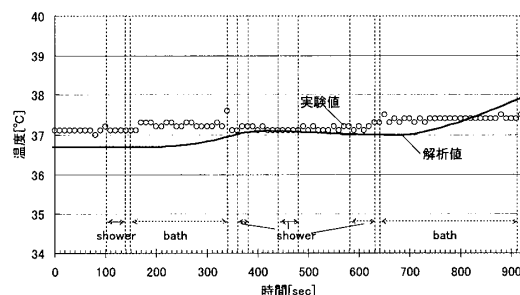


図11 直腸温と胴部 core 温度の比較

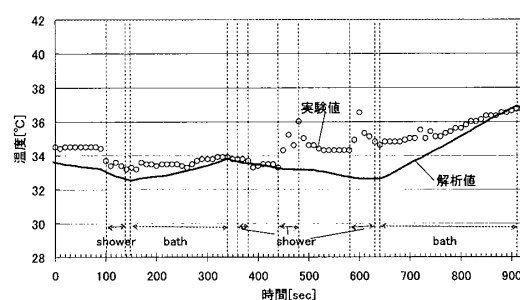


図12 頭部皮膚温の比較

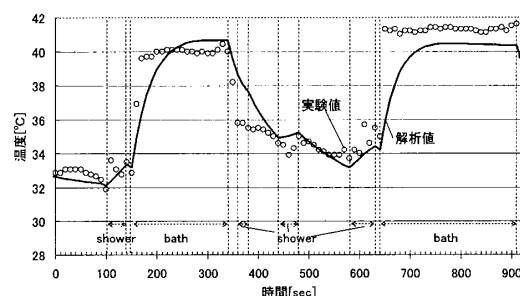


図13 胴部皮膚温の比較

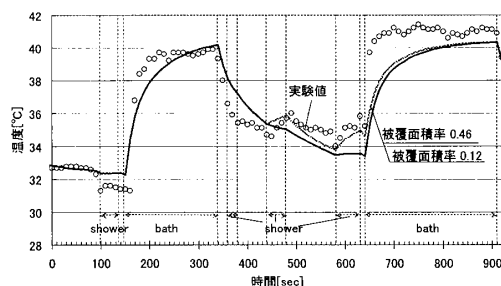


図 14 腕部皮膚温の比較

6. 異なる実験結果への解析モデルの適用

夏季においても同様の実験を行い、実験結果と解析結果を比較することで解析モデルの有効性を確認する。被験者は、冬季における実験と同一である。夏季入浴実験の入浴手順を図 15 に示す。なお、浴槽湯温は 41[°C] 注 1) である。対流熱伝達率は、夏季の実験結果から境界条件を与えた CFD 解析の結果から得られたものを用いる。CFD 解析の境界条件を表 6 に示す。解析対象及び解析条件は、第 4 章と同様である。夏季の浴室を想定した CFD 解析の結果から得られた対流熱伝達率を表 7 に示す。

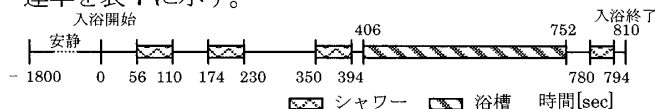


図 15 夏季入浴実験 入浴手順

表 6 CFD 解析 境界条件(単位: °C)

東壁	西壁	南壁	北壁	ドア
29	29	29	29	29
床(東側)	床(西側)	天井	湯面	人体
35	28	31	41	35

表 7 夏季入浴実験における対流熱伝達率

人体部位	頭部	顔部	腕部	手	脚	足先
対流熱伝達率[W/m²/K]	3.4	3.3	4.0	4.0	3.4	3.4
対流熱流[W/m²]	18.3	18.0	21.8	21.8	18.6	18.6

実験結果と解析結果の平均皮膚温の比較を図 16 に示す。浴槽使用時については、冬季と同様に実験結果と一致した。しかし、浴槽使用時に至るまでの温度上昇が実験値では約 3[°C] に対して、解析値では約 1.5[°C] であった。この原因として、夏季入浴実験でのシャワー流量が異なった場合に、シャワーからの湯の対流熱伝達率や人体各部位の流水被覆面積率が冬季と異なった可能性が考えられる。また、季節によって体内部の温度が異なる可能性が考えられる。

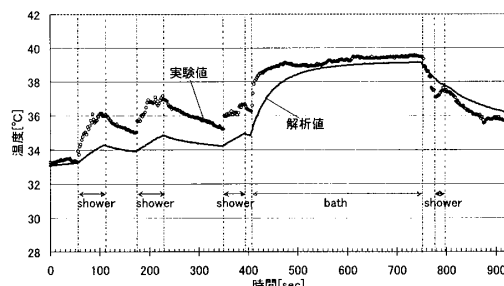


図 16 夏季入浴実験における平均皮膚温の比較

7. まとめ

被験者が好みの手順で入浴を行う実験を対象に、既に提案されているシャワー時や浴槽使用時の皮膚表面での伝熱モデルを組み合わせた人体熱モデルを用いて解析を行った。冬季の実験については概ね再現できたものの、夏季の実験についてはシャワー時の温度上昇が再現できなかった。シャワー流量と湯の対流熱伝達率及び流水被覆面積率の関係について、また季節の違いによる体温への影響について検討する必要がある。

記号: Q_{sk} : 皮膚表面での熱量[W], Q_w : 流水被覆部での熱量[W], Q_a : 流水被覆部以外での熱量[W], α_{cw} : 湯との対流熱伝達率 [W/m²K], α_c : 対流熱伝達率 [W/m²K], α_r : 放射熱伝達率 [W/m²K], T_{sk} : 皮膚温 [°C], T_w : 湯温 [°C], T_a : 気温 [°C], T_r : 平均放射温度[°C], T_i : 各面の温度 [°C], E : 蒸発による熱損失 [W], E_{max} : 皮膚表面での水蒸気圧=飽和水蒸気圧の場合の蒸発による熱損失[W], S : 表面積[m²], q : 対流熱流[W/m²]

参考文献

- 1) 高田暁、松下敬幸、入浴時の非定常温熱生理応答- 人体熱モデルによる検討-、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp.511-512、2005.5
- 2) Abdul Munir, S. Takada, T. Matsushita, H. Kubo Prediction of human thermophysiological responses during shower bathing, International Journal of Biometeorology, Vol. 54, No. 2, pp.165-178, 2010.3.
- 3) 杉本有梨、伊香賀俊治、堀進悟、鈴木昌、高柳絵里、入浴時の体温予測モデルの開発と熱中症による死亡・入院リスクの予測、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp.591-592、2010.9
- 4) J.A.J.Stolwijk, A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man, NASA-Langley, CR-1855, 1971
- 5) 中山昭雄、温熱生理学、理工学社、p.57、1981
- 6) 東浩太郎、高田暁、シャワー浴時の浴室内気流性状の CFD 解析、第 34 回人間・生活環境系シンポジウム報告集、pp.9-12、2010.11

注釈: 1)湯温は測定していないため、設定温度を湯温として与えている。ただし、浴槽底面温度からこの値は妥当であると判断したため、解析に用いている。

2)既報は湯の対流熱伝達率の値として、平板まわりの自然対流熱伝達の実験式を参考にした 80[W/m²/K]を用いている。ただし、本研究の実験では被験者に自由に入浴させていること、既報が対象とした実験と比べて人体に装着した測定器具が少ないことから、浴槽内で動作を起こしやすいため、浴槽内で対流が発生していると考えられる。そのため、より大きな値を用いているが検討する必要がある。

*1 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生
 *2 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)
 *3 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博
 *4 関西電力株式会社 エネルギー利用技術研究所
 *5 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工学)

Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Kobe Univ.
 Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Kobe Univ., Dr. Eng.
 Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.
 Kansai Electric Power Company, Inc., Energy Use R&D Center
 Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Kobe Univ., Dr. Eng.