

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 鉾井修一 3*
同 仲嶋正訓 4* 同 山手美穂 4* 同 松下敬幸 5*

人体熱モデル 非定常状態 入浴
CFD 解析 対流熱伝達率

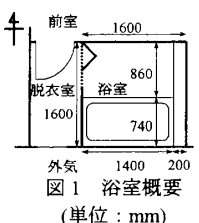
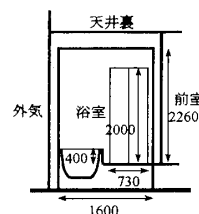
1. はじめに

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¹⁾²⁾³⁾がなされている。しかし、これらはシャワー浴、浴槽に浸かった状態のいずれかを対象としたものである。そこで本研究では、体を洗うなどの行為を自由に行う入浴実験を行い、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ることで、通常の入浴として考えられる一連の手順を行った場合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

夏季および冬季において、住宅型実験棟内に設置されている浴室で、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、両方の実験で同一である。前室で食道/直腸センサー及びT型熱電対を装着し、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。夏季・冬季それぞれの入浴



手順を図2・3に示す。入浴の手順は被験者の好みで行うものとし、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^{注1)}は夏季41℃、冬季43℃である。



2.2 解析概要

解析には、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、それぞれについての皮膚表面での伝熱モデルをStolwijkモデル⁴⁾に適用したものを用いる。洗い場椅座時では、皮膚表面での水蒸気圧を皮膚温においての飽和水蒸気圧とする。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(図4)。人体各部位の流水被覆面積率^{注2)}及びシャワーからの湯との対流熱伝達率を表1に示す。なお浴槽使用時には、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[W/m²/K]を用いる^{注3)}。人体表面の対流熱伝達率については、洗い場椅座時を想定したCFD解析を行うことで算出し、放射熱伝達率はStolwijkモデル⁴⁾に用いられている値(表2)を引用する。湿気伝達率に関してはルイスの関係を用いて対流熱伝達率より決定する。なお、シャワー湯温には実験値を、平均放射温度には各壁面の形態係数^{注4)}で重み付けした温度を用い、相対湿度は100[%]とする。着衣の熱抵抗として、前室での椅座安静時には0.6[clo]、入浴時は0[clo]を与える。以上を基準モデルとして解析を行う。

表1 人体各部の流水被覆面積率・湯との対流熱伝達率²⁾

人体部位	頭部	胴部	腕部	手	脚	足先
流水被覆面積率 COV	0.00	0.40	0.12	0.12	0.46	0.46
対流熱伝達率 α_{sw} [W/m ² /K]	104	104	104	104	104	104

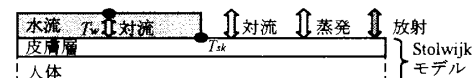


図4 シャワー時における皮膚表面での伝熱概要

表2 Stolwijkモデルの放射熱伝達率⁴⁾

人体部位	頭部	胴部	腕部	手	脚	足先
放射熱伝達率 α_{r} [W/m ² /K]	5.5	4.5	4.3	3.0	4.0	4.0

3. 入浴時における人体表面の対流熱伝達率の算出

夏季・冬季それぞれの洗い場椅座時を想定してCFD解析を行い、定常状態の浴室での平均気温と各面の対流熱流から式(1)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。解析条件・境界条件を表4・5に、解析対象を図5に示す。

$$q = \alpha_c (T_{sk} - T_a) \quad \dots(1)$$

q : 対流熱流[W/m²]、 α_c : 対流熱伝達率[W/m²/K]、 T_{sk} : 皮膚温[℃]、 T_a : 気温[℃]

CFD解析の結果得られた浴室の平均気温は夏季29.6[℃]、冬季23.1[℃]であった。人体各部位の対流熱伝達率を表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 γ	7.2

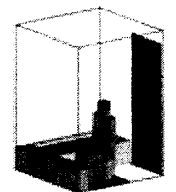


図5 CFD解析対象

表4 CFD境界条件(単位:℃)

	夏季	冬季		夏季	冬季
東廊	29.0	19.0	床(裏)	35.0	30.0
西廊	29.0	18.0	床(西)	28.0	20.0
南廊	29.0	18.5	天井	31.0	21.5
北廊	29.0	19.5	溝口	41.0	43.0
ドア	29.0	22.0	人体	35.0	35.0

表5 人体表面の対流熱伝達率

	夏季		冬季	
人体部位	αc	α	αc	α
頭部	3.4	18.3	3.9	46.9
胴部	3.3	18.0	4.2	49.4
腕部	4.0	21.8	4.4	52.2
手	4.0	21.8	4.4	52.2
脚	3.4	18.6	4.9	58.1
足先	3.4	18.6	4.9	58.1

4. 解析結果と実験結果の比較

夏季および冬季入浴実験の解析結果と実験結果の平均皮膚温の比較をそれぞれ図6・7に示す。シャワー時について、冬季では概ね再現できたものの、夏季では皮膚温の上昇が実験値と比べ約2℃小さい。ここで用いているシャワーからの湯の流水被覆面積率は、立位でのシャワー浴を想定したものであるため、座位でのシャワー浴を想定した値を設定する必要がある。また、一般に給湯温度はシャワーの設定温度より高く、水と混合させることで設定温度になる。このことから給湯温度が高い夏季では混合する水量が多くなるため、シャワー流量が大きくなり、冬季と比べ流水被覆面積率と対流熱伝達率が大きくなる可能性が考えられる。そこで、それぞれの値を2パターン変化させた4ケース(Case1:基準モデル)について解析を行った(表6)。その結果、Case4(COV=0.7[-]、 $\alpha_{cw}=200[W/m^2/K]$)の場合で実験値とよく一致した。このことから、シャワー流量と流水被覆面積率および湯の対流熱伝達率の関係を考慮することで、シャワー時の温熱生理反応が再現できる可能性が示唆された。

浴槽使用時については、浴槽入出時の温度変化が実験値と比べて緩やかだが、基準モデル(Case1)を用いた解析で夏季・冬季どちらの入浴実験についても概ね再現できた。浴槽から出た直後の温度低下の原因として、シャワー湯温調節のための放水開始(図6・7中の※)と同時に皮膚温の低下が大きくなっていることから、シャワーからの放水に起因する気流の発生⁹⁾や、浴槽から洗い場への移動による皮膚表面での対流熱伝達率の増加が考えられる。そこで、4ケースのうち、夏季・冬季それぞれの実験結果に対して最もよく再現できたもの(夏季:Case4、冬季:Case1)を対象に、浴槽から出た後シャワーを浴びるまでの皮膚表面での対流熱伝達率に15[W/m²/K]を与える。その結果、冬季では実験値をよく再現できた。夏季では、シャワー放水前(752~768秒)までは一致しているが、シャワー放水後(768~780秒)は、実験値の温度低下が大きい。前述したように、冬季に比べ夏季ではシャワー流量が大きくなる可能性があり、シャワーの放水によって発生する気流が大きくなることで、皮膚表面での対流熱伝達率についても大きくなったためと考えられる。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ことによって対流が発生し、湯の流速が大きくなることから、

湯との対流熱伝達率が増加したことが考えられる。

深部温についてはどのケースでもよく一致しており(図省略)、部位別皮膚温については、平均皮膚温と同様の傾向を示した⁷⁾。

表6 解析ケース

α_{cw}	104	200
文献値 ²⁾	Case1	Case2
全身 ³⁾	Case3	Case4

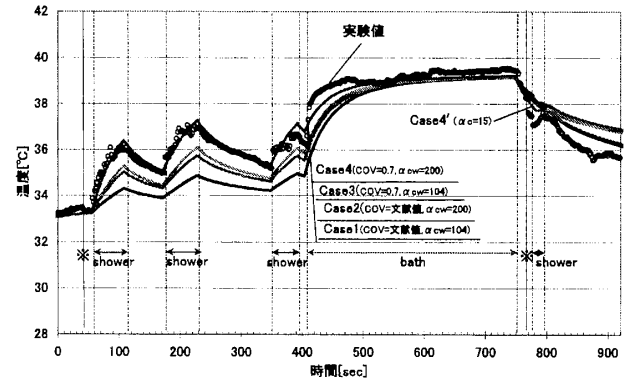


図6 平均皮膚温の比較(夏季入浴実験)

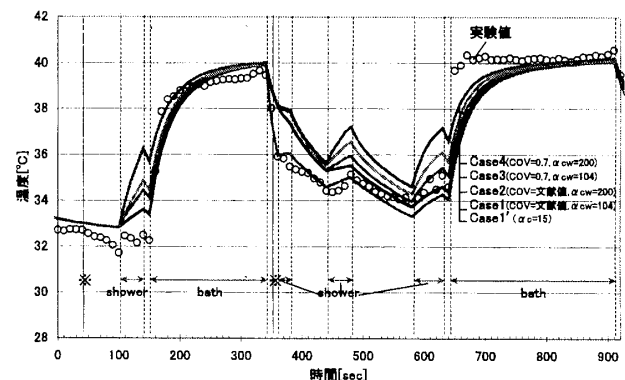


図7 平均皮膚温の比較(冬季入浴実験)

5. まとめ

被験者が好みの手順で入浴を行う2つの実験を対象に、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。入浴中の状況に応じた皮膚表面での対流熱伝達条件を与えることで、入浴時の温熱生理反応について再現できることが示唆された。

参考文献 1) 高田晴ら、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, 2005.7、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) 杉本有梨ら、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) 東浩太郎ら、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、7) 東浩太郎ら、人体熱モデルを用いた入浴時の温熱生理反応の解析、日本建築学会近畿支部研究報告集(掲載予定)、2011

注釈 1) 湯温は測定していない。設定温度を湯温として与えている。2) 頭を洗わない立位でのシャワー浴を想定して決定されたものである。3) 既報では湯の対流熱伝達率に、平板まわりの自然対流熱伝達の実験式を参考とした80[W/m²/K]を用いている。ただし、本研究の実験では、既報が対象とした実験と比べて被験者が自由に動きやすい入浴条件としているため、湯の流速が比較的大きいと考え、より大きな値を用いているが検討する必要がある。4) 第3章のCFD解析のモデルを対象に、モンテカルロ法を用いて人体から見た各面の形態係数を算出し、用いている。

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)

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