

解析モデルを用いた入浴による浴室の温湿度変動予測

大谷 哲也、高田 暁
神戸大学大学院自然科学研究科Prediction of change in temperature and humidity of bathroom during bathing by
using analytical modelTetsuya Otani, Satoru Takada
Graduate School of Science and Technology, Kobe Univ.

Abstract: For predicting change in temperature and humidity in bathroom, it is necessary to grasp the behavior of heat and vapor generations from hot water in bathtub or in shower. In this study, we propose a simple analytical model in which the heat and vapor generations from hot water are described with heat and moisture transfer coefficients. At the same time, by using the experimental results conducted in a bathroom in a model house, the coefficients are determined.

Key Words: bathing, bathroom, temperature and humidity, transient condition, experiment, analysis

要旨 : 入浴を行う際の浴室内の温湿度を予測するために、浴槽に貯めた湯やシャワーから散水された湯などからの熱・水分発生量の挙動を知ることが必要となる。本研究では湯面やシャワーの流水表面からの熱・水分発生量を熱・湿気伝達率を用いた簡易なモデルで表現し、実験住宅内での浴室実験の結果を用いて、熱・湿気伝達率を決定した。

キーワード : 入浴、浴室、温湿度、非定常過程、実験、解析

1.はじめに

浴室内の温湿度を予測するためには、浴室壁の熱物性、浴室内の熱・湿気伝達特性、浴槽に貯めた湯や浴室で使用されるシャワーからの熱・水分発生などを知ることが必要となる。建築設計資料集成(1978)では浴槽からの水蒸気発生量は 500～1000[g/h]となっているが、浴室の温湿度の予測に直接利用できるデータではない。また、シャワーからの水蒸気発生量については検討されておらず、現在の生活スタイルに対応したものではない。一方、団野ら(1994)は入浴における浴槽水及びシャワーの使用量について調査を行っているが、浴槽水及びシャワーからの熱・水分発生に関する検討は

行っていない。そこで本研究では、浴槽に貯めた湯及びシャワーから散水される湯からの熱・水分発生の基本性状把握の為の実験を行った。また、熱・湿気伝達率を用いた簡易なモデルを提案し、実験結果を用いて熱・湿気伝達率を決定した。特に、シャワーからの熱・水分発生量については、流水表面が常に流動している事などから静穏な湯面の熱・水分発生とは異なると考えられるため、熱・湿気伝達率を用いた簡易なモデル化によりその量を検討した。

2.実験方法

浴槽に貯めた湯の表面からの熱・水分発生性状に関する実験(以降浴槽実験と記述)とシャワーか

ら散水される湯からの熱・水分発生性状に関する実験(以降シャワー実験と記述)の2種類を行った。浴槽実験、シャワー実験とも2006年8月7日に大阪市に建設された実験住宅の浴室にて行われた。測定項目は表1に示すように浴室気温、浴室壁表面温度、湯温、浴室空気の絶対湿度とした。実験中は浴室の窓及びドアは閉鎖しており、換気扇等の運転は行っていない。但し、浴室のドア下部には吸気用のスリットが設けられており、ドア周りの隙間を含めて、特に閉鎖することは行っていない。また、実験中、浴室内は無人である。

2.1 浴槽実験の実験方法

浴槽に湯を満水になるように貯水し、実験開始とともに浴槽蓋を全て開放し、一定時間その状態を保った。

2.2 シャワー実験の実験方法

シャワーヘッドを既設のシャワーフックに固定し、実験開始とともに床面に向けて散水を始めた。シャワーの流量は、実験中一定に保った。

Table1. Measured items

浴槽実験	浴室気温 36 点、浴室壁表面温度 24 点、湯温、絶対湿度
シャワー実験	浴室気温 36 点、浴室壁表面温度 24 点、シャワー湯温、絶対湿度

3. 実験結果

3.1 浴槽実験における浴室の温湿度変動

図4の実験値を見ると浴槽蓋開放後、浴室気温は上昇し、時間経過と共に気温の上昇率は小さくなっていくが、実験開始から約1400秒で浴室気温の上昇率は再び大きくなっている。図5の浴室壁表面温度(実験値)を見ても約1400秒で温度の上昇率が再び大きくなることから、浴室壁表面で結露が生じ、その凝縮潜熱により浴室気温が上昇したものと考えられる。

浴室の絶対湿度(図6、実験値)は実験開始から単調に増加しており、1800秒後には0.028 [kg/kg'] まで上昇した。

3.2 シャワー実験における浴室の温湿度変動

浴室気温、浴室壁表面温度、絶対湿度は浴槽実験よりも短時間で急激に上昇している(図7~9、実験値)。シャワーの流水表面からの熱・水分発生量の方が、浴槽湯面よりも大きいと考えられる。

4. 解析モデルの概要

実験で使用した浴室は図1のように、一面は外気に、他の面は隣室空間に面している。解析モデルにおいては、浴室空気を1質点で表現し、各壁体を通しての熱移動は面の法線方向の1次元系を

考える。また、浴室空気の絶対湿度が気温に応じる飽和絶対湿度を超える場合に、超えた分の水蒸気が空気中で凝縮し、湯気を形成するものとした。その際の凝縮潜熱は水のそれと同じとした。浴室壁表面に生じる結露水については、壁全体に様に水膜を形成し、流下することはないものとした。また、浴槽の形状は矩形とし、浴室と脱衣室との一定の換気を想定した。壁体の構成材料や寸法及び熱物性値は伊藤ら(2004)によった。以下に基礎式を示す。

・浴室空気に関する熱収支式

$$V \rho_{air} c \frac{\partial T_r}{\partial t} = S_{hw} \alpha'_{hw} (T_{hw} - T_r) + S_{apron} \alpha'_{wall} (T_{apron} - T_r) - \sum_{i=1}^6 S_{wall,i} \alpha'_{wall} (T_r - T_{wall,i}) - \frac{nV}{3600} \rho_{air} c (T_r - T_{bath}) + r \frac{\partial W_r}{\partial t} \quad (1)$$

・浴室空気に関する水分収支式

$$\rho_{air} V \frac{\partial X_r}{\partial t} = S_{hw} \alpha'_{hw} (X_{hw} - X_r) - S_{apron} \alpha'_{wall} (X_r - X_{apronsat}) - \sum_{i=1}^6 S_{wall,i} \alpha'_{wall} (X_r - X_{wallsat,i}) - \frac{nV}{3600} \rho_{air} (X_r - X_{bath}) - \frac{\partial W_r}{\partial t} \quad (2)$$

<記号>

V: 浴室容積[m³]、 ρ_{air} : 乾燥空気密度[kg/m³]、c: 空気の定圧比熱[J/(kg·K)]、S: 面積[m²]、X: 絶対湿度[kg/kg']、T: 温度[°C]
 α : 総合熱伝達率[W/(m²·K)]、 α' : 湿気伝達率[kg/(m²·s·(kg/kg'))]、n: 換気回数[1/h]、r: 凝縮潜熱[J/kg]、t: 時間[s]、W_r: 浴室に湯気として存在する水分量[kg]
 <添え字>

r: 浴室、hw: 湯表面、wall: 壁表面、apron: 浴槽の浴室側表面、bath: 脱衣室、sat: 飽和、i: 壁番号

ここで、 α_{hw} 、 α'_{hw} は表2中における湯面の、 α_{wall} 、 α'_{wall} は壁面の熱・湿気伝達率に相当する。また、S_{hw}は湯の表面積(シャワーの場合、モデル上の熱・水分伝達面積)を表す。

・湯気が浴室空気内に存在しないとき(W_r ≤ 0)

$$X_r \leq X_{rsat} \text{ のとき}$$

$$\frac{\partial W_r}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$X_r > X_{rsat} \text{ のとき}$$

$$\frac{\partial W_r}{\partial t} = \rho_{air} V \frac{\partial X_r}{\partial t} \quad (4)$$

・一方、湯気が浴室空気内に存在するとき(W_r > 0)

$$\frac{\partial W_r}{\partial t} = \rho_{air} V \frac{\partial X_r}{\partial t} \quad (5)$$

W_r: 浴室に湯気として存在する水分量[kg]

X_{rsat}: 浴室気温に応じる浴室の飽和絶対湿度[kg/kg']

シャワー実験の解析に際しては、湯の熱・水分伝達面を図3のような円錐の外表面と近似した。円錐の外表面温度は表2に示すような値とした。湯面の絶対湿度は、浴槽湯面、シャワー湯面とも、

その表面温度に応じる飽和絶対湿度とした。シャワーからの熱・水分発生量は、流水表面が常に流動している事などから静穏な湯面の熱・水分発生とは異なると考えられるため、対流熱伝達率及び湿気伝達率を変化させる事で次に示すように簡易に表現した。

(熱発生量 $Q[W]$)

$$Q = \int q(S) dS \doteq \alpha_{hw} (T_{hw} - T_r) S_{hw} \quad (6)$$

(水分発生量 $G[kg/s]$)

$$G = \int g(S) dS \doteq \alpha'_{hw} (X_{hw} - X_r) S_{hw} \quad (7)$$

ここで、 dS は実際の湯表面を表す。 $q(S)$ 、 $g(S)$ はそれぞれ湯表面の熱流 $[W/m^2]$ 及び湯表面の水分流 $[kg/(s \cdot m^2)]$ を表す。これらは湯表面上の位置によって一般的に異なる値となる。本解析では、単純化し、流水表面での熱・湿気伝達に関して、伝達面積を図3に示す方法で決定し、実験結果を用いて熱・湿気伝達率を決定する。

尚、計算は有限差分法で行い、時間の差分刻みは $0.05(s)$ 、壁体の空間刻みは $9.0 \times 10^{-4} \sim 3.0 \times 10^{-3} (m)$ とした。境界条件は湯表面温度と浴室周辺の各部屋気温及び外気温として表2に示す値を用いた。また、初期条件は浴室壁の任意の点での温度及び浴室気温、浴室空気絶対湿度を実験値より決定した。

Table2. Condition of calculation

	case1 浴槽実験	case2 浴槽実験	case3 シャワー実験	case4 シャワー実験	case5 シャワー実験
(境界条件)					
外気温(°C)	31.8	31.8	31.6	31.6	31.6
脱衣室温度(°C)	31.8	31.8	31.6	31.6	31.6
脱衣室絶対湿度(kg/kg)	0.0133	0.0133	0.014	0.014	0.014
浴室気温(°C)	31.8	31.8	31.6	31.6	31.6
天井裏空気温度(°C)	31.8	31.8	31.6	31.6	31.6
床下空気温度(°C)	31.8	31.8	31.6	31.6	31.6
湯表面温度(°C)	40.7	$33.9 + 4 \exp(-5.9 \cdot 10^{-4} t)$	40.7	40.7	40.7
(初期条件)					
壁体温度(°C)	31.6	32.8	32.8	32.8	32.8
浴室気温(°C)	31.8	32.4	32.4	32.4	32.4
浴室絶対湿度(kg/kg)	0.0149	0.0149	0.0149	0.0149	0.0149
(その他の計算条件)					
湯面の総合熱伝達率(W/m^2K)	$\alpha_c + \alpha_r$	$\alpha_c + \alpha_r$	$8\alpha_c + \alpha_r$	$\alpha_c + \alpha_r$	$20\alpha_c + \alpha_r$
湯面の湿気伝達率(kg/m^2s)	α'_{hw}	α'_{hw}	$8\alpha'_{hw}$	α'_{hw}	$20\alpha'_{hw}$
湯面の総合熱伝達率(W/m^2K)	$\alpha_c + \alpha_r$	$\alpha_c + \alpha_r$	$\alpha_c + \alpha_r$	$\alpha_c + \alpha_r$	$\alpha_c + \alpha_r$
湯面の湿気伝達率(kg/m^2s)	α'_{hw}	α'_{hw}	α'_{hw}	α'_{hw}	α'_{hw}
入浴者熱負荷(W)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
湯の表面積(m^2)	0.87	0.87	0.13 π	0.13 π	0.13 π

$\alpha_c = 4.65 [W/m^2K]$ 、 $\alpha_r = 4.65 [W/m^2K]$ 、 t : 時間(sec.)、また、 α'_{hw} はレイス関係を用いて α_c より求めた。

Table3. Condition of shower experiment

実験	h[m]	r[m]	$S_{hw}[m^2]$	シャワー流量[l/min]
Exp1	1.2	0.1	0.13π	8.4

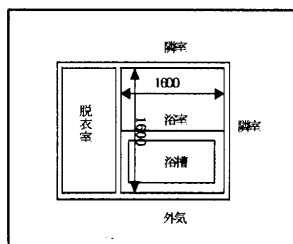


Figure1. Plan of the bathroom

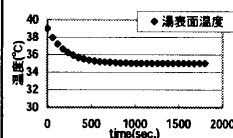


Figure2. Surface temperature of hot water in bathtub in calculation of case2

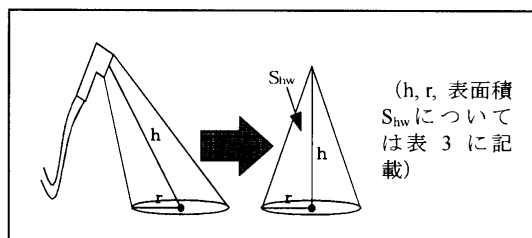


Figure3. The shape of the hot water surface by shower

5. 実験と解析の比較

前章で作成した解析モデルを用いて、浴室の温度を計算し、実験結果と比較する。

まず、図4~6に浴槽実験と case1、case2 の計算結果について示す。ここで、case1 は浴槽に貯めた湯表面温度が 40.7°C 一定(浴槽内湯面から約 100mm での測定値)の場合、case2 は湯表面温度が図2のように降下する条件を想定したものである。浴室気温、浴室壁表面温度、浴室絶対湿度ともに case1 は実験値よりも大きい。熱・湿気伝達率の値としてより小さいものを用いれば実験結果に近づくが、湯表面での上昇気流等を考慮すると、case1 で与えた数値を小さくすることは妥当とは言えない。一方、熱・湿気伝達率は case1 と同じで、湯表面温度の低下を考えた case2 は実験値と概ね一致した。今回は入浴者が居なかったため、湯面がほとんど静止状態であり、湯内の温度と湯表面温度の差が大きくなっていた可能性がある。今後、湯表面温度について検討が必要と考えている。

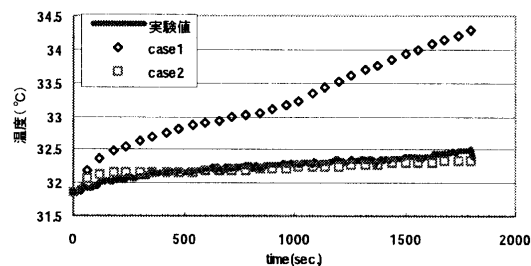


Figure4. Bathroom air temperature in experiment of bathtub (experiment and calculation)

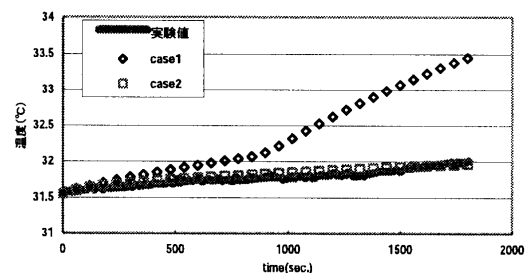


Figure5. Wall surface temperature in bathroom in experiment of bathtub (experiment and calculation)

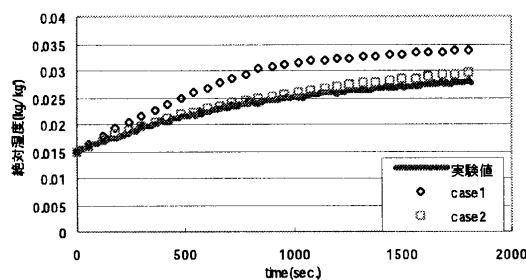


Figure6. Bathroom air humidity ratio in experiment of bathtub (experiment and calculation)

次に、図7～9にシャワー実験と case3～5 の計算結果を示す。case4 はシャワーの湯表面での対流熱伝達率を $4.65[\text{W}/\text{m}^2 \text{K}]$ とし、case3 ではその 8 倍、case5 では 20 倍として表 2 のように総合熱伝達率を与えた。(湿気伝達率は対流熱伝達率に比例して変化させた。)

図7～9を見ると、浴室の温湿度は case3 の条件では他の条件と比べると、全体的に良い一致を示している。浴室気温及び浴室壁表面温度は実験値との差が大きい部分もあるが、絶対湿度に関してはよく一致している。

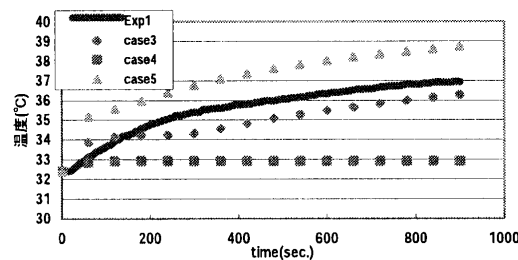


Figure7. Bathroom air temperature in experiment of shower (experiment and calculation)

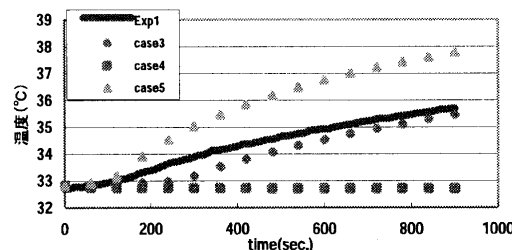


Figure8. Wall surface temperature in bathroom in experiment of shower (experiment and calculation)

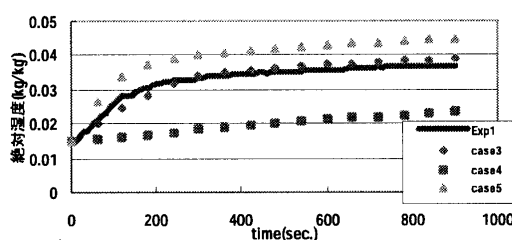


Figure9. Bathroom air humidity ratio in experiment of shower (experiment and calculation)

次に、浴室絶対湿度を決定する水蒸気収支(case3の計算値)を図10に示す。換気による流出や湯気の生成に伴う減少分はほとんど影響していない。約330秒以降は、壁体への結露による減少分の影響が大きい、それ以前ではシャワーからの水分発生項が浴室空気絶対湿度を決定する支配的要因であり、図9において case3 と実験値が一致していることから case3 で想定したシャワー表面の湿気伝達モデルは妥当であると考えられる。また、シャワー表面の対流熱伝達率については、湿気伝達率と相似と考えると、その妥当性が示されていると言えよう。浴室空気及び壁面の温度に関しては、実験値との差が見られるため、シャワー表面の対流熱伝達率を除く伝熱モデルに関して検討する必要があると考えている。

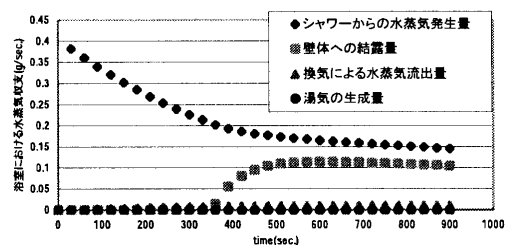


Figure10. The balance of water vapor in the bathroom (calculation of case3)

6. まとめ

本研究では、浴室内の温湿度予測を目的として、浴室内の熱・水分解析モデルについて検討を行った。浴槽に貯めた湯及びシャワーからの熱・水分発生の基本性状を実験により確認した。熱・湿気伝達率を用いてシャワーの流水表面での熱・水分発生モデルを提案し、実験結果から熱・湿気伝達率を決定した。

7. 文献

- 1) 日本建築学会編, 建築設計資料集 1, 環境, 丸善, p.180, 1978 年
- 2) 伊藤泰世, 鉾井修一, 原田和典, 高田暁, 永井廉子 浴室において発生する水分の移動過程に関する研究(その3)浴室の乾燥過程における換気量と蒸発速度の関係 平成 16 年度日本建築学会近畿支部研究報告集(環境系), 4074, pp.293-296, 2004 年 8 月
- 3) 団野直子, 紀谷文樹 入浴におけるミニマム水量算定のための基礎的検討 日本建築学会計画系論文集, 第 461 号, pp.81-86, 1994 年 7 月

<連絡先>

著者名: 大谷 哲也
住 所: 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1 - 1
所 属: 神戸大学大学院
E-Mail: 056t006n@stu.kobe-u.ac.jp