

# 温湿度環境による皮膚含水率変化のメカニズムに関する検討

## その2：皮膚含水率の短期的変化メカニズムに関する考察

正会員 ○高橋 旺大\*<sup>1</sup> 同 小林 春斗\*<sup>1</sup>  
同 松橋 佳菜未\*<sup>2</sup> 同 高木 理恵\*<sup>3</sup>  
同 後藤 伴延\*<sup>4</sup>

温湿度環境 皮膚含水率 経皮水分損失量  
短期的影響 角層の湿気抵抗 シミュレーション

### 1 はじめに

本報では、前報で報告した被験者実験に基づき、温湿度環境による皮膚含水率の短期的変化メカニズムに関する理論的考察を行う。また、シミュレーションによって実験の皮膚含水率変化の再現を試みる。

### 2 角層の湿気抵抗に関する考察

図1に角層内の水分移動の概略図を示す。表1について、皮膚表面から空気層への水分移動の駆動力が水蒸気分圧であると考え、経皮水分損失量は式(1)のように表される。ここで、角層表面の湿気伝達率をルイスの関係<sup>1)</sup>を用いて式(2)で与えれば、被験者実験での環境条件と経皮水分損失量の測定値から、角層表面の水蒸気分圧が推定できる。また、定常状態においては、角層表面から空気への水分移動量と角層内の水分移動量が等しくなることを考慮すると、被験者の角層全体の湿気抵抗は式(3)、(4)を用いて推定できる。

図2に、被験者実験の各Caseにおける角層の湿気抵抗の推定値を示す。この図から、皮膚温度を変化させた実験2Aの条件間の湿気抵抗の違いが、皮膚含水率の測定結果から予想されたよりも小さいことが分かった。しかし、仮に角層の湿気抵抗が変化しないとするならば、式(4)より、経皮水分損失量の増加には、表面の不飽和水分ポテンシャル $\mu_{out}$ の低下、即ち、含水率の低下が伴うはずであり実験結果を説明できない。ここで、実験で測定された皮膚含水率は、使用した測定器(Corneometer)の構造上、表面の角層だけでなく内部の角層の含水率の影響も含んだものであることが分かっている。そして、各深度の含水率の測定値への影響度は図3のように推定されている<sup>3)</sup>。このことを踏まえると、角層の湿気抵抗が主として角層の表面に集中し、その部分の湿気抵抗は大きく変化しないものの、内部の角層の湿気抵抗が変化していたことが推察される。一方で、室内水蒸気圧を変化させた実験2Bにおける湿気抵抗については、条件間で差があることが推定された。これは、皮膚含水率の上昇に伴って角層の湿気抵抗が減少したものと推察される。

### 3 シミュレーションによる皮膚含水率の再現

建築壁体内の水分移動に関する理論として、非平衡熱力学に基づき、水分の化学ポテンシャルを駆動力として水分移動を計算する理論<sup>4)</sup>が知られている。ここで、角層内において建築壁体と同様の水分移動が起こっていると

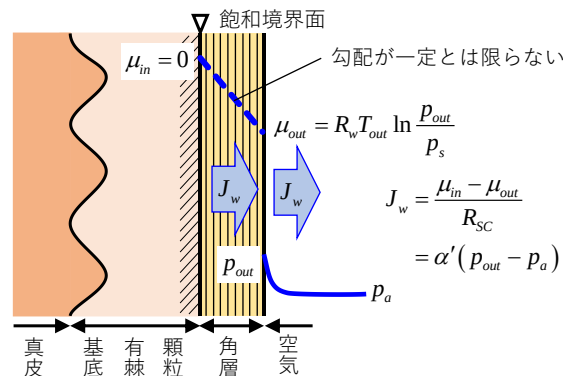


図1 角層内の水分移動

表1 角層の湿気抵抗の推定方法

$$J_w = \alpha'(p_{out} - p_a) \quad (1)$$

$$\alpha' = \frac{\alpha_c}{c_p \rho R_w T_a} \quad (2)$$

$$\mu_{out} = R_w T_{out} \ln \frac{p_{out}}{p_s} \quad (3)$$

$$J_w = \frac{\mu_{in} - \mu_{out}}{R_{SC}} \quad (4)$$

$c_p$  : 湿り空気 の定圧比熱 (=1021) [J/(kg·K)]

$J_w$  : 経皮水分損失量 [kg/(s·m²)]

$p_a$  : 空気の水蒸気分圧 [Pa]

$p_{out}$  : 角層表面の水蒸気分圧 [Pa]

$p_s$  : 飽和水蒸気圧 [Pa]

$T_a$  : 気温 (=296.15 と仮定) [K]

$T_{out}$  : 皮膚表面温度 [K]

$R_{SC}$  : 角層の湿気抵抗 [m²·s·(J/kg)/kg]

$R_w$  : 水蒸気 1kg あたりの気体定数 [J/(kg·K)]

$\alpha'$  : 空気層の湿気伝達率 [kg/(m²·s·Pa)]

$\alpha_c$  : 対流熱伝達率 (=6.5 と仮定<sup>2)</sup>) [W/(m²·K)]

$\mu_{in}$  : 飽和面の不飽和水分ポテンシャル (=0) [J/kg]

$\mu_{out}$  : 角層表面の不飽和水分ポテンシャル [J/kg]

$\rho$  : 湿り空気 の密度 (=1.187 と仮定) [kg/m³]

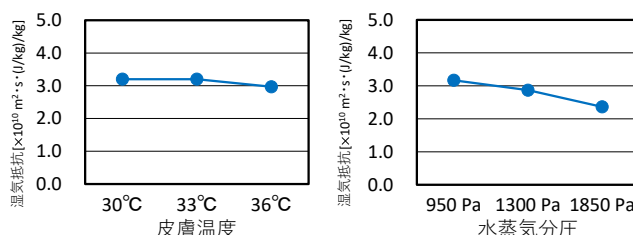


図2 実験結果から算出した湿気抵抗  
(左：実験2A, 右：実験2B)

仮定し、さらに角層が非常に薄いことから、角層内の温度分布を無視できるものと仮定すると、表2の式(5)が成り立つ。この角層内の水分移動方程式に基づけば、角層内部の皮膚含水率の分布が計算できる。

なお、含水率計算に必要な角層の含水特性 $\partial\Psi/\partial\mu$ は、既往文献<sup>5),6)</sup>を参考に求めた図4の平衡含水率曲線に基づいて与えた。また、角層の水分伝導率については、その逆数である湿気抵抗率を、前項の考察に基づいて図5のように与えた。この湿気抵抗率は、角層内部から皮膚表面にかけて上昇する指数関数で表され、角層表面の値は条件によらず一定で、角層内部の値のみが皮膚温度や水蒸気分圧の条件によって変化するものとした。

以上の方法により、皮膚含水率のシミュレーションを実施した。ただし、実験の皮膚含水率測定値は具体的な物理量ではなく、0~120の任意単位[AU]で示されており、計算値と測定値を直接対応させることが出来ない。本報では、暫定的に測定値[AU]と重量含水率 $\Psi$  [kg/kg(S.C. dry)]が単純に比例し、角層が絶乾状態( $\Psi=0$ )のときに測定値が0、角層が飽和状態( $\Psi=\Psi_{sat}$ )のときに測定値が120になると仮定することとした。さらに、図3に示した測定器の感度特性を考慮し、計算値と測定値の間に表2の式(6)の関係が成立するものとした。

図6と図7に、前報の被験者実験をシミュレーションにより再現した結果を示す。図6は皮膚含水率の深度分布の計算結果であり、この結果と式(6)から計算された含水率を図7に示している。図7から、シミュレーションによる皮膚含水率と実験結果が良く一致していることが分かる。さらに図6の計算結果から、温湿度条件による皮膚含水率の差異は、主として角層表面から1~5 $\mu\text{m}$ の深さで生じていると推定される。

#### 4 まとめ

実験結果に基づき、角層の湿気抵抗が主として角層の表面に集中すること、その表面部分の湿気抵抗は大きく変化せず、内部の角層の湿気抵抗率が皮膚温度や含水率によって変化することを考察した。さらに、そのような湿気抵抗率の特性を考慮することで、シミュレーションによる実験結果の再現が可能となることを確認した。

##### 【参考文献】

- 1) 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧 第14版 基礎編，pp.161-177，2009
- 2) 市原 他：日本建築学会計画系論文集，501，pp.45-51，1997
- 3) 我孫子 他：日本建築学会大会学術梗概集，pp.1015-1018，2020
- 4) 尾崎 他：日本建築学会計画系論文集，pp.17-24，1996
- 5) 竹ノ内 他：香粧会誌，9(3)，pp.182-189，1985
- 6) Egawa et al.: Skin Research and Technology, 15, pp.242-249, 2009

\*1 東北大学大学院工学研究科 大学院生

\*2 株式会社大林組（研究当時，東北大学大学院生）

\*3 東北工業大学ライフデザイン学部 准教授・博（工）

\*4 東北大学大学院工学研究科 准教授・博（工）

\*1 Graduate Student, Graduate School of Eng., Tohoku Univ.

\*2 Obayashi Corporation (Former Graduate Student, Tohoku Univ.), M.Eng.

\*3 Assoc.Prof., Tohoku Institute of Tech., Dr.Eng.

\*4 Assoc.Prof., Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Dr.Eng.

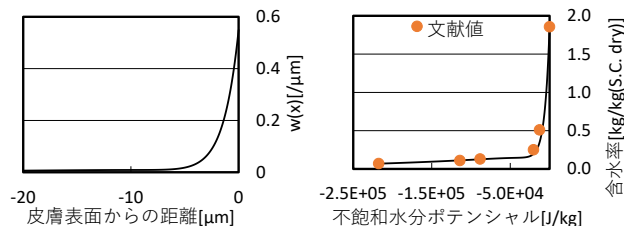


図3 Corneometer 感度特性

図4 平衡含水率曲線

表2 皮膚含水率予測モデルに関する式

$$\rho_{SC,dry} \frac{\partial \Psi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \lambda' \frac{\partial^2 \mu}{\partial x^2} \quad (5)$$

$$\Phi = \frac{120}{\Psi_{sat}} \int_{-\infty}^0 \Psi(x) w(x) dx \quad (6)$$

$t$  : 時間 [s]

$w(x)$  :  $x$  における感度特性 [1/ $\mu\text{m}$ ]

$x$  : 皮膚表面からの距離 (角層内部を負とする) [m]

$\lambda'$  : 角層の水分伝導率 [kg/(m $\cdot$ s)/(J/kg)]

$\mu$  : 不飽和水分ポテンシャル [J/kg]

$\rho_{SC,dry}$  : 絶乾状態の角層密度(=470.9<sup>5)</sup>) [kg(S.C. dry)/m<sup>3</sup>]

$\Phi$  : Corneometer 測定値 [AU]

$\Psi$  : 絶乾状態の角層重量に対する重量含水率 [kg/kg(S.C. dry)]

$\Psi(x)$  :  $x$  における重量含水率 [kg/kg(S.C. dry)]

$\Psi_{sat}$  : 飽和状態の重量含水率(=1.86) [kg/kg(S.C. dry)]

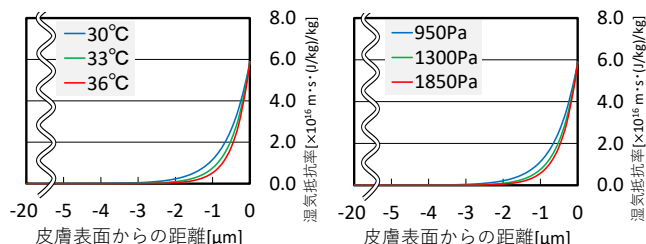


図5 湿気抵抗率分布の推定 (左：実験2A，右：実験2B)

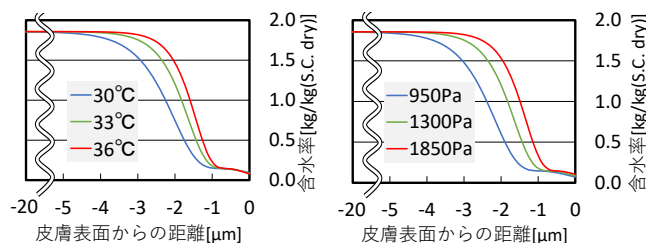


図6 含水率の深度分布 (左：実験2A，右：実験2B)

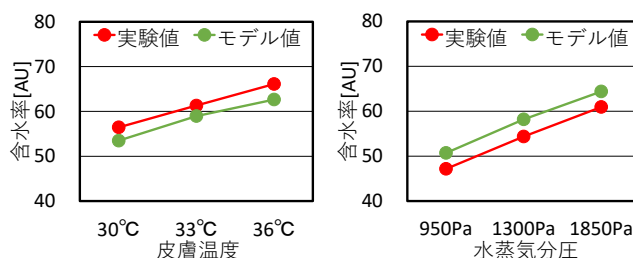


図7 実験値と計算値の比較 (左：実験2A，右：実験2B)