

建築材料の高含水率領域における吸放湿履歴に関する研究 —温度勾配水分伝導率のモデル化—

吸放湿履歴 平衡含水率 水分伝導率
温度勾配 マルチスケールネットワークモデル

正会員 ○ 松岡紗矢佳*1 同 小椋大輔*2
同 鉾井修一*3 非会員 Jan Carmeliet*4

1 序論

本研究は、水分伝導率の履歴過程の予測モデルの構築を目的としている。既報⁵⁾において、Carmeliet らによるマルチスケールネットワークモデル²⁾³⁾を拡張し、平衡含水率の履歴を考慮して水分伝導率の履歴過程を予測するモデル（拡張MNモデル）を作成した。これを用いた解析で、吸湿と放湿の水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率の再現性を確認した。さらに一様な温度場で吸放湿を繰り返す過程を解析し、水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率は吸湿境界曲線と放湿境界曲線の中間の値をとるといふ、既報⁴⁾の結果と一致する結果を得た。本報では、温度勾配に関する水分伝導率（以下、温度勾配水分伝導率）の履歴について、拡張 MN モデルを元に予測モデルを作成し、吸湿、放湿、吸放湿を繰り返す過程を検討した結果を報告する。

2 平衡含水率の履歴の取り扱い

平衡含水率の履歴については独立領域理論¹⁾を用いる。本報では ALC の吸放湿時の平衡含水率の測定値に一致するよう既報⁴⁾で作成した吸湿境界曲線と分配関数を用いる。

3 温度勾配水分伝導率の履歴の取り扱い

温度勾配水分伝導率の解析には既報⁵⁾と同様、拡張 MN モデルを用いる。このモデルの概要は以下の通りである。

毛管の形状はすべて円柱であるとする。毛管を格子状に繋いだ 2 次元のネットワークを作る。図 1 に示すように、1 つの格子点に繋がる毛管の個数 z を 4~8 まで調節し、毛管の繋がり疎密を調整することができる。各毛管の半径は細孔径分布に一致するようにランダムに与える。

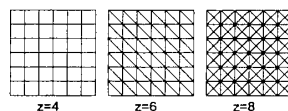


図 1

水分伝導率は、2 次元ネットワークの左右両端のポテンシャル差と、各毛管が液水と湿り空気のどちらで満たされているかの情報とを与え、水分の流れ場を解くことで得られる。上記ネットワークの作成を、統計的信頼性を得るまで繰り返し、その平均値を水分伝導率とする。

ある湿度における毛管の水の詰まり方は次のように決定する。乾燥からの吸湿過程において液水は細孔径の小さな毛管から詰まっていくので、ある相対湿度でネットワーク中のどの半径の毛管に液水が詰まっているのかを判定することができる。飽和からの放湿及び吸放湿を繰り返す過程は、同じ毛管半径でも液水が詰まっているか

否かを分けて考える必要がある。独立領域理論を用いると、ある相対湿度において各毛管半径に対して液水が詰まっている比率を求めることができる。ネットワーク中の半径 r の毛管に対して液水が詰まっている割合を、この比率に一致するようにランダムに割り振ることで、ネットワーク中で液水が詰まった毛管を決定していく。

本報では、温度を駆動力とした水分流量を求める。1 本の毛管における温度勾配による水分の質量流束は次式に従って計算する。液水が詰まっている場合、Hagen-Poiseuille の法則を水分化学ポテンシャル勾配と温度勾配に分離し、温度勾配のものは(1)式となる。湿り空気で満たされている場合、Fick の法則を水分化学ポテンシャル勾配と温度勾配に分離し、温度勾配のものは(2)式となる。

$$\dot{m}_l = -k_{rl} \frac{\Delta T}{L} = -\left(\frac{r}{4} \frac{\rho_l}{\eta} \frac{\partial \sigma}{\partial T}\right) \frac{\Delta T}{L} \quad (1) \quad \dot{m}_v = -k_{rv} \frac{\Delta T}{L} = h \frac{D_{va}}{1 + N_1} \left(\frac{p_{vs} \mu}{R_v T^2} - \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} \right) \frac{\Delta T}{L} \quad (2)$$

4 吸湿及び放湿過程の解析

4-1 解析条件 表 1 の条件で吸湿時と放湿時の平衡含水率、温度勾配水分伝導率を解析した。また、温度勾配に関する水分伝導率は、殆どが水蒸気の移動の影響による。ここでは液水の移動を無視できる程小さいとみなして、求めた温度勾配水分伝導率を温度勾配に関する気相水分伝導率とみなし、以下の式を用いて、水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率、湿気伝導率へと変換し、既報⁴⁾の結果との比較に用いた。

$$\lambda'_{\mu g} = \lambda'_{Tg} / \left(\frac{R_v T}{p_{vs}} \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} - \frac{\mu}{T} \right) \quad (3) \quad \lambda'_m = \lambda'_{Tg} / h \left(\frac{\partial p_{vs}}{\partial T} - \frac{\mu}{R_v T^2} \right) \quad (4)$$

4-2 解析結果 図 2 より放湿過程の平衡含水率は独立領域理論に基づく履歴曲線と一致している。解析した温度勾配水分伝導率を図 3 に、変換して求めた水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率、湿気伝導率を図 4、図 5 に示す。

図 4 より水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率の解析値は、放湿時より吸湿時の方が大きな値を持ち、上に凸の形状をとっており、その特徴が既報⁴⁾の同定値と一致している。また気相水分の移動が支配的な低含水率において、吸湿の方が放湿よりも顕著に大きい。

表 1 解析条件

ネットワークの大きさ: 1 辺 30 本
毛管半径: 最小値 10^{-8} [m]、最大値 10^{-3} [m]
試行回数: 500 回 格子点に繋がる毛管の数: 6
ネットワーク両端の温度差: 1℃、基準温度: 20℃

図 3 より元の温度勾配水分伝導率も同様の結果である。以上から水分化学ポテンシャル勾配・温度勾配に関する水分伝導率の履歴は液水だけでなく気相水分も大きいと考えられる。また温度勾配水分伝導率が、低含水率領域において含水率が增加すると水分伝導率が上昇するのは、式(2)に示すとおり気相水分の質量流束が相対湿度に比例するためである。高含水率領域で含水率が增加するにつれ水分伝導率が低下するのは、水蒸気の管の繋がりが液水で絶たれて、水蒸気の移動が阻害されるためである。

また図 5 より、湿気伝導率は、吸湿・放湿ともに単調に減少している。水蒸気の移動のみを表す湿気伝導率は、含水率が上昇するほど毛管に液水が詰まり流れる経路が減少することから、含水率の増加に伴って単調に減少するので、妥当な結果といえる。また吸湿過程では、低含水率では比較的径の小さな管にだけ液水が詰まり、全体として水蒸気の繋がりが保たれているため一定値をとるが、ある境の半径より大きな径の管に液水が詰まり水蒸気の繋がりが断たれると急激に減少する。

5 吸放湿を繰り返す過程の解析

5-1 解析条件 飽和状態から 88%RH まで放湿した後再吸湿する過程を再現した。解析条件は前節と同様である。

5-2 解析結果 図 6 より平衡含水率は再吸湿過程においても、独立領域理論に基づく履歴曲線を正しく考慮している。温度勾配水分伝導率の結果を図 7 に示す。放湿境界曲線の 88% RH の点で再吸湿を始め、吸湿境界曲線と放湿境界曲線の間の値を推移した。この結果から温度勾配水分伝導率に関して、既報⁴⁾で予測されたとおり、吸放湿を繰り返す過程では吸湿・放湿の境界曲線の間の値をとるものと考えられる。

また図 5 より変換した湿気伝導率は、再吸湿を始めて暫くはほぼ同じ値を取り、吸湿境界曲線に近づくとその曲線に沿

て減少する。吸湿過程と同様、径の小さな管から液水が詰まっていくので、水蒸気の繋がりが保たれている間は一定値をとり、ある境を超え繋がりが断たれるようになると急激に下がりはじめると考えられる。

6 結論

本研究では、平衡含水率の任意の履歴を考慮した水分伝導率の履歴過程を解析する拡張 MN モデルを用いて、温度勾配に関する水分伝導率を予測するモデルを作成し、解析を行った。吸湿および放湿過程、そして吸放湿を繰り返す過程の解析から以下の結論を得た。

- 1) 吸湿時と放湿時の解析では、温度勾配水分伝導率は吸湿の方が放湿より大きくなり、含水率変化に対して上に凸の変化を示す既報⁴⁾と性状が一致する結果が得られた。
- 2) 吸放湿を繰り返す過程において、温度勾配水分伝導率は吸湿境界曲線と放湿境界曲線の間の値となり、既報⁴⁾と一致する結果が得られた。

記号 ϕ : 平衡含水率[m³/m³], h : 相対湿度[-], μ : 水分化学ポテンシャル[J/kg], T : 絶対温度[K], R_v : 水蒸気の気体定数[Pa m³/kgK], p_{vs} : 飽和蒸気圧[Pa], η : 動粘性係数[Ns/m²], σ : 表面張力[Pa/m], ρ_l : 液水密度[kg/m³], m_l : 液水の管の質量流束[kg/m²s], m_v : 水蒸気の管の質量流束[kg/m²s], k_{TL} : 液水の毛管の水分伝導率[kg/msK], k_{TV} : 水蒸気の毛管の湿気伝導率[kg/msK], r : 毛管半径[m], L : 毛管長さ[m], D_{va} : 分子拡散係数[m²/s], N_k : クヌーセン数[-], λ_T : 温度勾配水分伝導率[kg/msK], λ_{Tg} : 温度勾配気相水分伝導率[kg/msK], $\lambda_{\mu g}$: 水分化学ポテンシャル勾配気相水分伝導率[kg/ms(J/kg)], λ_m : 湿気伝導率[kg/msPa]

謝辞 本研究は、(財)トステム建材産業振興財団の平成 20 年度研究助成金の補助を受けた。記して謝意を表す。

参考文献 1) 松本, 松下: ハイグロスコピックの領域での気泡コンクリートの吸放湿性状 その 2 吸放湿過程におよぼす吸放湿履歴の影響と履歴のある場合の解析法, 日本建築学会論文報告集, 第 306 号, 5-72, 1981.8 2) Jan Carmeliet, Filip Descamps, and Geert Houvenaghel: A Multiscale Network Model for Simulating Moisture Transfer Properties of Porous Media, Transport in Porous Media, 35, 67-88, 1999 3) Jan Carmeliet, and Roels S.: Modeling of temperature dependent moisture flow in porous materials, 5th Symposium of Building Physics in the Nordic countries, ed. Chalmers University of Technology, 1, 97-104, 1999 4) 小椋, 鉾井, 清水, 野口: 結露・蒸発過程における平衡含水率および水分伝導率の履歴の影響, 日本建築学会環境系論文集, NO.643, pp.1065-1074 2009.9 5) 松岡, 小椋, 鉾井, Carmeliet: 建築壁体の高含水率領域における吸放湿履歴に冠する研究—水分伝導率の履歴過程のモデル化—2010 年度大会学術講演梗概 D-2, pp.231-232

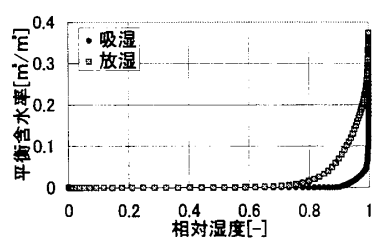


図 2 ϕ

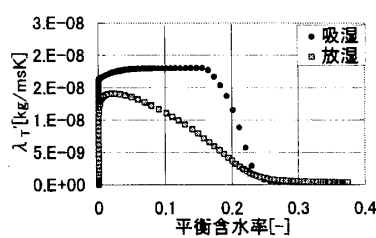


図 3 λ_T

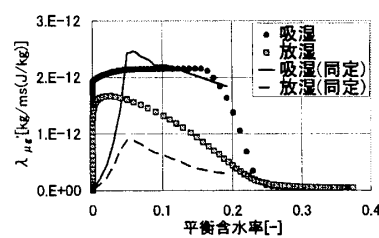


図 4 $\lambda_{\mu g}$

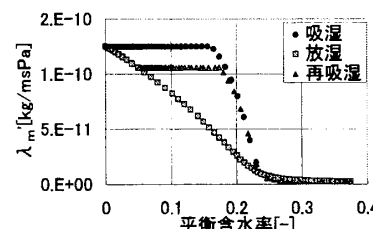


図 5 λ_m

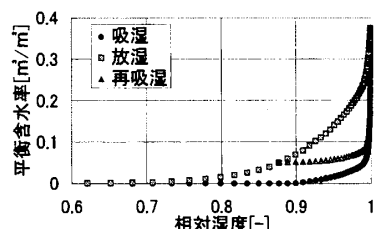


図 6 ϕ

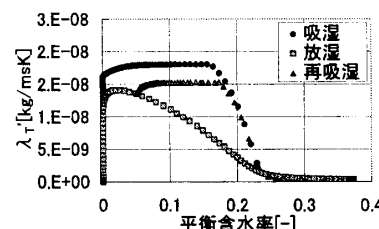


図 7 λ_T

*¹ 京都大学大学院工学研究科 大学院生
 *² 京都大学大学院工学研究科 准教授・工博
 *³ 京都大学大学院工学研究科 教授・工博
 *⁴ スイス連邦工科大学 教授・PhD

*¹ Graduate Student, Graduate School of Eng., Kyoto Univ.
 *² Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng
 *³ Prof., Graduate School of Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng
 *⁴ Prof., Swiss Federal Institute of Technology Zurich, PhD