

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—

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

4. 環境工学-9b. 結露

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

1 序論

1-1 研究背景 建築材料として使用される多孔質材料の多くは、同じ相対湿度であっても吸湿過程と放湿過程とで平衡含水率は異なり、過去の相対湿度の履歴が現在の状態に影響を及ぼす、いわゆる吸放湿履歴を持っている。図1にALCの吸湿時と放湿時の平衡含水率を示す。どの相対湿度でも吸湿時の平衡含水率に比べて放湿時の平衡含水率の方が大きく、高湿度になればなるほどその差が大きくなる。また、平衡含水率の履歴と同様に水分伝導率にも履歴が存在することが確認されている。図2にALCの吸湿時と放湿時の水分伝導率を示す。吸湿時の水分伝導率は、放湿時の水分伝導率よりも大きくなる。材料の含水率挙動及び水分移動性状を把握し、壁体の結露防止を考える場合に吸放湿履歴を適切に考慮する方法を確立し、またどのような場合に考慮するべきかを明らかにする必要がある。

1-2 既往研究 平衡含水率の履歴は独立領域理論^{1),2),3)}によって説明できることが示されており、ALCについても妥当性が確認されている^{4),5)}。温度勾配や水分化学ポテンシャル勾配の水分伝導率（以下、特に断らない限り水分伝導率）に関して、以下が明らかとなっている。野口⁴⁾らは、

ALC試料を用いて、結露実験、蒸発実験、結露・蒸発を周期的に繰り返す場合の実験を行い、それぞれ熱水分同時移動解析による再現を行った。その結果、平衡含水率の履歴の考慮に加え、結露実験には吸湿の水分伝導率を、蒸発実験には放湿の水分伝導率を用いなければ、実験結果を再現できないことを示した。さらに、結露・蒸発を繰り返す場合に同定された水分伝導率は、吸湿境界曲線と放湿境界曲線の間の値に収束していくことを確認した。

既報⁶⁾において、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、水分伝導率の予測モデルの1つであるCarmelietらのマルチスケールネットワークモデル（以下、MNモデル）^{6),7)}に独立領域理論を組み込み、平衡含水率の履歴を考慮し水分伝導率の履歴過程を予測するモデルへと拡張した（以下、拡張MNモデル）。この拡張MNモデルを用いて求めた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を解析し、吸湿時と放湿時の再現性を確認した（図3(a)）。さらに一様な温度場で吸放湿を繰り返す過程では、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う結果を得た（図3(b)）。これは上述の野口⁴⁾の結果と一致する。しかし、温度勾配に関する水分伝導率については、履歴のモデル構築を含めてまだ明らかとなっていない。

1-3 研究目的 本研究では、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。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

2-1 平衡含水率の履歴を取り扱うモデル 平衡含水率の履歴については、独立領域理論⁵⁾を用いる。

2-2 解析に用いた平衡含水率曲線 本研究では、ALCの吸湿時の平衡含水率の測定結果に一致するように、既報⁴⁾と同じ以下の吸湿境界曲線を用いる。

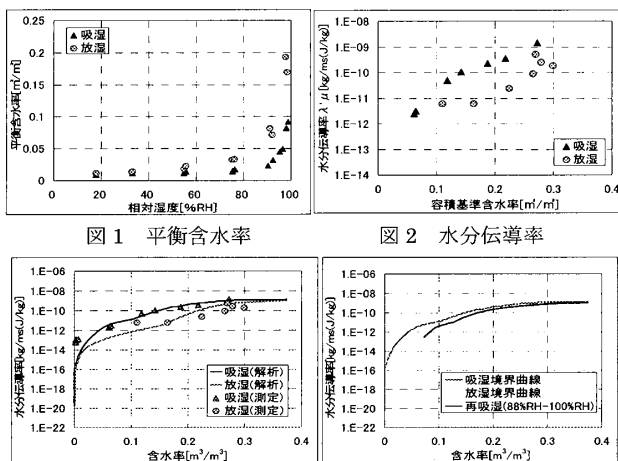


図3 水分化学ポテンシャル勾配水分伝導率の解析結果
(a) 吸湿・放湿過程 (b) 繰り返し過程

A Study on Hysteresis of Ad-, De-sorption in the Range of High Moisture Content of Building Walls
-Modeling of Moisture Conductivity Related to Temperature Gradient-

MATSUOKA Sayaka, OGURA Daisuke, HOKOI Shuichi, and CARMELIET Jan

$$\psi = \frac{-4.77353 \times 10^{-3}}{h_{12} - 1.05623} - 4.51942 \times 10^{-3} \quad (0 \leq h_{12} \leq 0.9855) \quad (1)$$

$$\psi = \frac{-2.21026 \times 10^{-4}}{h_{12} - 1.00068} + 4.84126 \times 10^{-2} \quad (0.9855 \leq h_{12} \leq 1)$$

2-3 解析に用いた分配関数 独立領域理論では、履歴過程を考慮するために分配関数と呼ばれる関数が必要となる。本報では、既報⁴⁾で作成した分配関数を用いる。なおこれは、放湿時の平衡含水率の測定結果に一致するように作成されたものである。

$$k(h_{12}, h_{21}) = \left(\frac{h_{21}}{h_{12}} \right)^n \quad (2)$$

$n = 4$	$(0 \leq h_{12} \leq 0.8)$
$n = 4 + 50(h_{12} - 0.8)$	$(0.8 \leq h_{12} \leq 0.96)$
$n = 12 + 100(h_{12} - 0.96)$	$(0.96 \leq h_{12} \leq 0.98)$
$n = 14$	$(0.98 \leq h_{12} \leq 0.9995)$
$n = 14 + 10^6(h_{12} - 0.9995)$	$(0.9995 \leq h_{12} \leq 1)$

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⁸⁾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。

毛細管の形状はすべて円柱であるとする。毛細管を格子状に繋いだ 2 次元のネットワークを作る。また、図 4 に示すように、ひとつの格子点に繋がる毛細管の個数 z を 4~8 まで調節でき、毛細管の繋ぎの疎密を調整することができる。

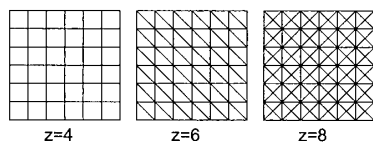


図 4

ネットワークを

構成する各毛細管の半径は、細孔径分布に一致するように、ランダムに与える。水分伝導率は、この 2 次元ネットワークの左右両端のポテンシャル差と、各毛細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が得られるまで繰り返し、その平均値を水分伝導率としている。

ある湿度における毛細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細管から詰まっていくという特徴より、ある相对湿度で、ネットワーク中のどの半径の毛細管に液水が詰まっているのかを判定することができる。飽和からの放湿あるいは吸放湿を繰り返す過程については、同じ毛細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。2 で示した独立領域理論を用いると、ある相对湿度において各毛細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 の毛細管に対して、液水が詰まっている比率を、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

まった毛細管を決定していく。

水分流動の駆動力は、既報では、水分化学ポテンシャルとして毛細管 1 本ごとの水分流量を求めたが、本報では、温度を駆動力として水分流量を求める。

1 本の毛細管(半径 r 、長さ L)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、温度勾配のものは下式となる。

$$\dot{m}_l = -k_n \frac{\Delta T}{L} = - \left(\frac{r}{4} \frac{\rho_l}{\eta} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right) \frac{\Delta T}{L} \quad (3)$$

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、温度勾配のものは下式となる。

$$\dot{m}_v = -k_{nv} \frac{\Delta T}{L} = - \left(h \frac{D_{va}}{1 + N_k} \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} \right) \frac{\Delta T}{L} \quad (4)$$

4 吸湿及び放湿過程の解析

以下の手順で、3 で示したモデルを用いて吸湿及び放湿過程の解析を行った。①拡張 MN モデルが、吸湿及び放湿過程の平衡含水率を十分考慮できているかどうかを、測定結果を再現した境界曲線と比較した。②温度勾配水分伝導率の予測を行い、まず吸湿と放湿のそれぞれの過程のモデルの妥当性を検討した。上記検討では併せてモデルのパラメータの影響について検討した。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、湿気伝導率、水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率へと変換し、野口らの結果との比較に用いた。

$$\lambda'_{\mu g} = \lambda'_{Tg} / \left(\frac{R_s T}{p_{vs}} \frac{\partial p_{vs}}{\partial T} - \frac{\mu}{T} \right) \quad (5)$$

$$\lambda'_m = \lambda'_{Tg} / h \left(\frac{\partial p_{vs}}{\partial T} - \frac{\mu}{R_s T^2} \right) \quad (6)$$

4-1 解析条件 ネットワークの大きさは、1 辺 30 本とした。毛細管半径の最小値を 10^{-8} [m]、最大値を 10^{-3} [m]とした。ネットワークの試行回数は、結果の再現性を確認し、500 回とした。また、毛細管の繋ぎの粗密が水分伝導率にどう影響するのかを調べるため、1 つの格子点に繋がる毛細管の接続数 z が 4, 6, 8 の場合を解析した。なお、ネットワーク両端の温度差を 1°C 、基準温度を 20°C とした。

4-2 平衡含水率の解析結果 平衡含水率の解析結果を図

5に示す。図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。

4・3 水分伝導率の解析結果 解析した温度勾配水分伝導率を図6に、それを気相水分によるものとみなし水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率、湿気伝導率へ変換した結果をそれぞれ図7、図8に示す。なお、図7の実線は、野口らが同定した気相水分伝導率曲線である。

図7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、野口らの同定値とよく一致している。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。図6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に関する水分伝導率の履歴は液水だけではなく気相水分も大きいと考えられる。

また、図8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細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。

図6より、吸湿と放湿の温度勾配水分伝導率がともに含水率変化に対して上に凸の変化を示している。低含水率領域で、含水率が増加すると水分伝導率が上昇するのは、式(4)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増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。

z を変えたときの吸湿と放湿過程の解析結果を比較したものを、それぞれ図9、図10に示す。吸湿過程において、液水移動が支配的となるにつれ水分伝導率は低下するが、 z の値が小さい（つまり管の繋がりが疎である）ほど急激に減少する。この原因は、管の繋がりが疎であるほど水蒸気の管の連続性がはやく絶たれるためと考えられる。放湿過程において、 z の値が大きい（つまり管の繋がりが密である）ほど水分伝導率が上昇を始めるのがはやい。これは z が大きいほど水蒸気の詰まる管が繋がりがやすいためと考

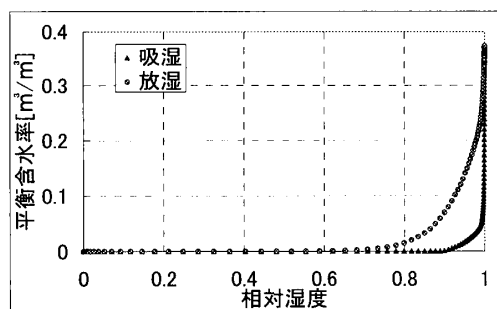


図5 平衡含水率曲線

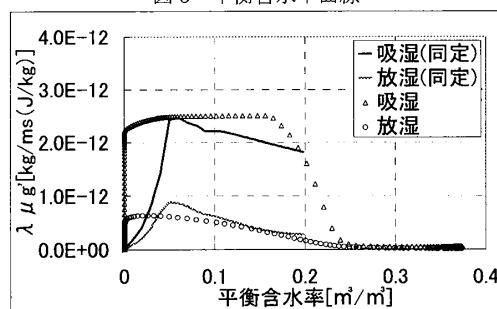


図7 $\lambda \mu g'$

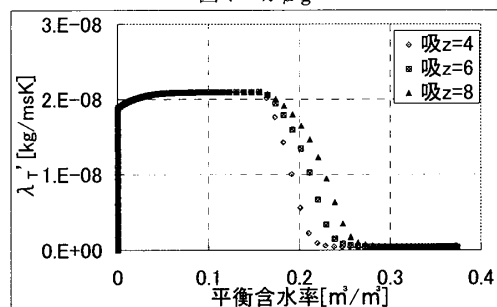


図9 $\lambda_T'(z \text{ 比較} \cdot \text{吸湿})$

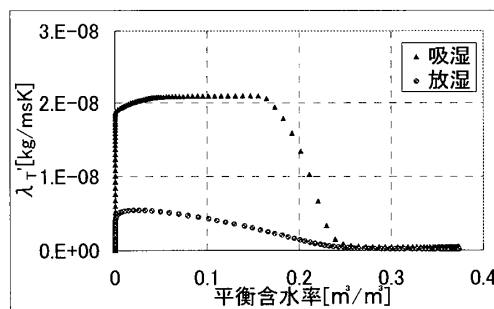


図6 λ_T'

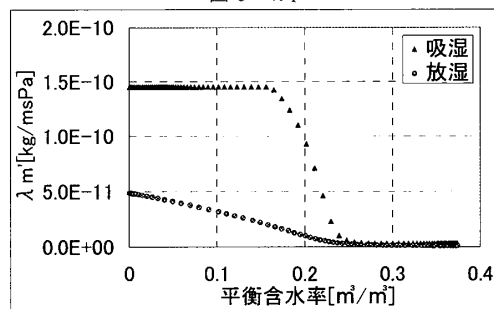


図8 $\lambda m'$

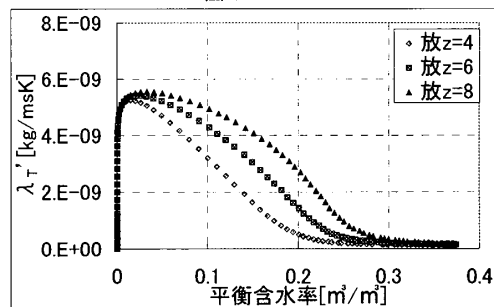


図10 $\lambda_T'(z \text{ 比較} \cdot \text{放湿})$

えられる。

5 吸放湿を繰り返す過程の解析

拡張MNモデルを用いて吸放湿を繰り返す過程について以下の手順で検討した。①拡張MNモデルから求まる平衡含水率を、独立領域理論から求めた平衡含水率の履歴曲線と比較し、水分伝導率を求める過程で平衡含水率の履歴が再現できるかを検討した。②吸放湿を繰り返す場合の温度勾配水分伝導率を求め、既報⁴⁾で得た「結露・蒸発を繰り返す過程で、水分伝導率は吸湿境界曲線と放湿境界曲線の間に収束する」という結論を再現できるかを検討した。

5-1 解析条件 飽和状態から相対湿度が88%まで放湿した後再び吸湿する過程を拡張MNモデルを用いて再現する。解析条件は4と同様である。1つの格子点に繋がる毛細管の接続数 z の値は6を用いた。

5-2 平衡含水率の解析結果 図11に示すとおり平衡含水率は、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できている。

5-3 水分伝導率の解析結果 再吸湿過程を解析した結果を図12に示す。放湿境界曲線上の相対湿度が88%のところで再吸湿をはじめてからは、吸湿境界曲線と放湿境界曲線の間の値を推移した。ただし、吸湿と放湿の境界の曲線では、放湿側の曲線に近い値となっている。この結果から、温度勾配水分伝導率に関しても、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。

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) 吸湿過程・放湿過程の解析では、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。また放湿後の吸湿時には、放湿に近い値を推移した。

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_{rl} : 液水の毛細管の水分伝導率[kg/msK], k_{rv} : 水蒸気の毛細管の湿気伝導率[kg/msK], 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) Neel, L.: Theories des lois d'aimanation de Lord Rayleigh, 1, Cah. Phys., 12, 1-20, 1942 2) Neel, L.: Theories des lois d'aimanation de Lord Rayleigh, 2, Cah. Phys., 13, 1-20, 1943 3) Everett, D. H.: A general approach to hysteresis, 4, An alternative formulation of the domain model, Trans. Faraday Soc., 51, 1551-1557, 1955 4) 小椋, 鈴井, 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) 松本, 松下: ハイグロスロ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, 65-72, 1981.8 6) 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 7) 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, 197-104, 1999 8) 松岡, 小椋, 鈴井, 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

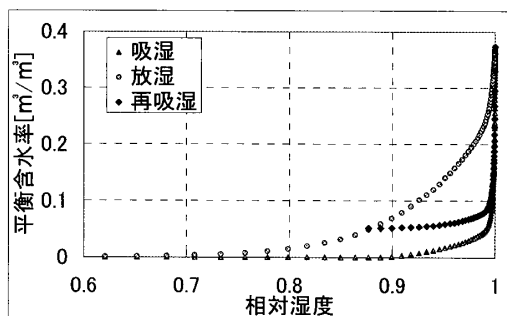


図11 平衡含水率曲線

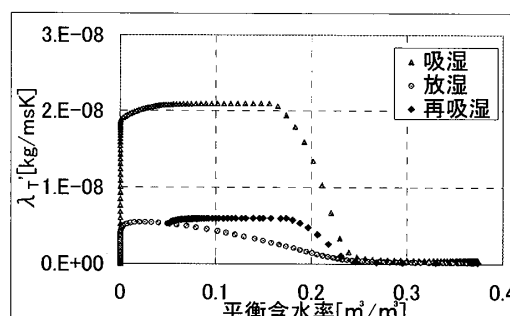


図12 λ_T

*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

Graduate Student, Graduate School of Eng., Kyoto Univ.
 Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng
 Prof., Graduate School of Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng
 Prof., Swiss Federal Institute of Technology Zurich, PhD