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

INFLUENCE OF HYSTERESIS IN SORPTION ISOTHERM AND MOISTURE CONDUCTIVITY ON CONDENSATION AND EVAPORATION PROCESSES

小椋大輔*, 銚井修一**, 清水孝範***, 野口 浩****

*Daisuke OGURA, Shuichi HOKOI, Takanori SHIMIZU
and Hiroshi NOGUCHI*

It is well known that some porous materials used as building walls show hysteresis in ad/desorption sorption isotherms. Some materials similarly show hysteresis in moisture conductivity. Sorption isotherm and moisture conductivity have an effect on heat and moisture transfer in materials, But there is little information available on the degree of the influence of hysteresis, especially that of moisture conductivity. In this study, we clarified the effect of hysteresis of sorption isotherm and moisture conductivity on heat and moisture behavior in ALC using the simultaneous heat and moisture transport equations and the independent domain theory for the experiment of repeat both condensation and evaporation process.

Keywords : *Hysteresis, Condensation, Sorption isotherm, Moisture conductivity,
Coupled heat and moisture transfer, Gamma-ray attenuation method*

履歴, 結露, 平衡含水率, 水分伝導率, 熱水分同時移動, ガンマ線含水率測定装置

1. はじめに

建築材料は、多くが材料内部に空隙を有する多孔質材料であり、材料の内部で水分の移動が存在する。多孔質材料の多くは、同じ相対湿度であっても、その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。材料の吸放湿性や、壁体の結露防止を考える場合に、これを適切に考慮する方法を確立し、どのような場合に考慮すべきかを明らかにする必要がある。

建築の省エネルギー性、健康・快適性、耐久性を維持する上で壁体の結露^{注1)}防止は、重要な要素の一つといえる。この結露防止に関して、内部結露が生じても材料の腐朽・カビの発生などの害が起きなければよいと考える、実害のない結露を許す壁体設計が、今後、確立される必要があると考えられる。上記設計のためには、材料内部の温湿度、含水状態を妥当な精度で予測する方法と、腐朽、カビ等の害の関係を予測する方法が必要である。前者については、以下に示すような現状と問題点が挙げられ、後者については、近年、研究が行われつつある^{1)~3)}。

建築材料の吸放湿性状や、壁体の結露性状の予測を行う基礎理論である熱水分同時移動理論は、松本⁴⁾、池田⁵⁾によって、ほぼ確立

されている。しかし、多くの材料について認められる吸放湿履歴現象については、それを取り扱う方法や、吸放湿、結露性状に与える影響について十分に分かっていない。また吸放湿履歴は、不飽和透水係数（水分伝導率）^{注2)}に存在することも確認されている⁶⁾。

松本ら⁷⁾は、ALCを用いて95%RH以下の平衡含水率の履歴過程の予測において独立領域理論^{8)~13)}が適応可能であることを示し、この材料に対して吸放湿実験を行い、95%程度までの高湿時の吸放湿性状の予測に対して平衡含水率の履歴を考慮する必要性を明らかにした。松下ら¹⁴⁾は同じくALCを用いて周期的境界条件下で、材料内部の水分移動が水蒸気支配である、いわゆるハイグロスコピック領域において、履歴を考慮した解析の方が含水率は高くなるが、相対湿度を用いて材料内部を評価する場合には、履歴を考慮しなくても、十分な精度の計算が可能であることを示した。

一方、松本ら¹⁵⁾は、ALCを用いて結露後の蒸発過程において、平衡含水率や水分伝導率に結露過程と異なる値を用いなければ予測ができず、両者の履歴を考慮する必要性を示した。しかし、これまで液水移動が生じる高含水率領域で平衡含水率と水分伝導率の履歴を考慮した解析的検討は行われておらず、またこれらが繰り返されるような場合に、履歴が結露性状にどのような影響を及ぼすのかにつ

* 京都大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

** 京都大学大学院工学研究科 教授・工博

*** 関西電力㈱ 修士(工学)

**** 京都大学大学院工学研究科 大学院生・修士(工学)

Assistant Prof., Graduate School of Eng., Kyoto University, Dr. Eng.

Prof., Graduate School of Eng., Kyoto University, Dr. Eng.

The Kansai Electric Power Co., Inc., M. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Eng., Kyoto University, M. Eng.

いては不明である。

従って、本研究では、液水移動が生じる高含水率領域に注目し、建築材料の結露・蒸発性状に及ぼす平衡含水率・水分伝導率の履歴の影響を、実験・解析により明らかにすることを目的とする。材料は、均質性・等方性を有する ALC を使用して、まず平衡含水率及び水分拡散係数の吸放湿時の履歴特性を把握する。次に、飽和近傍の平衡含水率の吸放湿履歴を測定し、独立領域理論を用いてその履歴の再現性を検討する。その後に材料の結露、蒸発、及び結露・蒸発を繰り返す実験を行い、非破壊の含水率測定装置の一種であるガンマ線含水率測定装置を用いて測定された含水率挙動を明らかにする。最期に、これら実験結果に対して平衡含水率と水分伝導率のそれぞれの履歴を考慮した解析を行い、その比較・検討を行うことにより液水移動領域で吸放湿を繰り返す場合の、平衡含水率・水分伝導率の履歴の影響を明らかにする。

2. 基礎理論

2.1 基礎方程式¹⁶⁾

本研究では、建築材料内部における、液水移動領域を含めた熱水分同時移動方程式として、以下の松本の式を用いる。

・水分収支式

$$\rho_w \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[\lambda'_\mu \left(\frac{\partial \mu}{\partial x} - \mathbf{ng} \right) + \lambda'_T \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad \cdots(1)$$

・熱収支式

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[\left(\lambda + r\lambda'_{Tg} \right) \frac{\partial T}{\partial x} + r\lambda'_{\mu g} \left(\frac{\partial \mu}{\partial x} - \mathbf{ng} \right) \right] \quad \cdots(2)$$

ここで、 ρ_w : 水密度[kg/m³]、 ψ : 容積基準含水率[m³/m³]、 t : 時間[s]、 μ : 水分化学ポテンシャル[J/kg]、 x : 距離[m]、 λ'_μ : 水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率[kg/ms(J/kg)]、 $\mathbf{n}$: 鉛直下向き単位ベクトル、 g : 重力加速度[m/s²]、 λ'_T : 温度勾配に関する水分伝導率[kg/msK]、 T : 絶対温度[K]、 $c\rho$: 材料のみかけの容積比熱[J/m³K]、 λ : 熱伝導率[W/mK]、 r : 水分の気相から液相への相変化熱[J/kg]、 λ'_{Tg} : 温度勾配に関する気相水分伝導率[kg/msK]、 $\lambda'_{\mu g}$: 水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率[kg/ms(J/kg)]

(1)、(2)式中の水分化学ポテンシャル μ は以下の式で表される。

$$\mu = R_v T \ln(h) \quad \cdots(3)$$

ここで、 R_v : 水蒸気の気体常数($R_v=R/M_v$)[Pa m³/kg K]、 R : 一般気体常数[Pa m³/kmol K]、 M_v : 水蒸気の分子量[kg/kmol]、 h : 相対湿度[-] また、吸放湿履歴を考慮しない場合、平衡含水率は、温度の依存性は十分小さいものとする以下との関係となる。

$$\psi = f(h, T) \approx f(h) \quad \cdots(4)$$

吸放湿履歴を考慮する場合は、平衡含水率は一意に求まらず次節で示すような履歴曲線が必要となる。(1)式の水分化学ポテンシャルと含水率の関係は、(3)式と(4)式あるいは(3)式と次節で述べる独立領域理論から得ることができる。

2.2 独立領域理論⁷⁾と平衡含水率の履歴

多孔質材料内部には多数の吸着^{注3)}領域が存在する。ここでは、全

ての吸着領域は、相対湿度 h が変化するとき、1:領域に全く水がない状態、2:領域に完全に水がある状態、の内のどちらか一方を必ずとるものと仮定する。一つの吸着領域が状態1から状態2に変化する時の h の値を h_{12} 、状態2から状態1に変化する時の h の値を h_{21} とする。各吸着領域は必ず固有の値(h_{12} 、 h_{21})を持っており、この値は周囲の他の領域の影響、その領域の過去の履歴の影響、温度等の外部変数による影響を受けないとする。

図1 1つの吸着領域の状態の変化 図2 分配関数の一例

このような吸着領域の集合体である多孔質体は h の変化に伴い履歴が現れる。全ての吸着領域の(h_{12} 、 h_{21})が $h_{12}=h_{21}$ である時、この多孔質体は h の任意の変化に対して可逆的な変化を示し、履歴を示さない。一方、 $h_{12}>h_{21}$ である吸着領域が存在する時、この多孔質体は h の変化に伴って履歴を示す(図1)。この時の様相が独立領域理論に基づく履歴である。ある相対湿度 h_{12} で吸湿する領域の集合に吸湿された水分量に対して、放湿過程で h_{12} よりも低湿度に戻った場合の相対湿度 h において保持されている水分量の比率を表したものを分配関数といい、 $k(h_{12}, h_{21})$ で表す(図2)。分配関数は放湿過程時の相対湿度 h の低下とともに単調に減衰する性質を持つ。分配関数を放湿過程時の相対湿度で微分したものが独立領域密度関数で、それに吸湿境界曲線の相対湿度で微分したものを掛けて $h_{12}>h_{21}$ となる、吸湿軸(h_{12})と放湿軸(h_{21})の全ての湿度域について離散的に表現したものが分布ダイアグラムである^{注4)}。

平衡含水率の履歴は、計算では基礎方程式の(1)式の左辺 $\rho_w(\partial\psi/\partial t)$ の項を(5)式の様に変形し、平衡含水率の相対湿度勾配を現す $\Delta\psi/\Delta h$ の項として用いる。これは分布ダイアグラムを用いて、算出できる。

$$\rho_w \frac{\partial \psi}{\partial t} \approx \rho_w \frac{\Delta \psi}{\Delta h} \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad \cdots(5)$$

2.3 水分伝導率の取り扱い方法

水分伝導率の履歴については、田中ら¹⁷⁾により Childs and Collis-George のモデルを拡張した水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率の履歴過程の予測モデルの提案がなされているが、妥当性は確認されていない。ここでは、水分伝導率の履歴過程そのものがよく分かっていないことから、後述する吸湿過程及び放湿過程における水分拡散係数を測定した結果を用いて、吸湿過程と放湿過程の水分伝導率の曲線を含含水率の関数として作成し、この2曲線を利用して履歴過程を検討する。

3. 物性値の履歴の測定

3.1 平衡含水率

(1) 測定概要

平衡含水率の測定は、文献¹⁸⁾に準拠して行った。平衡含水率の湿度条件は、高湿度域に注目してそれぞれ 33,75,86,92,96%RH の 5 条件として、測定方法はデシケーター法を用いた。試料は約 2cm 角のものを 50 個作成した。試料の乾燥密度は、表 1 に示すような値であり、ばらつきは大きくない。試料の初期条件は、乾燥状態と飽和状態を設定した。まず全ての試料を 105℃の乾燥炉内で質量一定になるまで乾燥させ、吸湿曲線の測定に用いる試料はそのままの乾燥状態のものを、放湿曲線の測定に用いる試料は、乾燥させた試料を蒸留水に一日つけた状態を飽和状態 A とし、蒸留水につけて真空ポンプで試料内の気泡を除き一日おいた状態を飽和状態 B として 2 種類の飽和状態のものをを用いた。なお、デシケーターは 20℃50% に制御した恒温恒湿室内に置かれた。

表 1 試料の乾燥密度

	乾燥密度(kg/m ³)
平均値	493.7
標準偏差	16.55

(2) 測定結果と考察

図 3, 4 に平衡含水率の測定値を示す。図 4 は相対湿度 85%以上、含水率 0~0.3[m³/m³]の部分だけを拡大したものである。以後、乾燥状態から吸湿させた試料を単に吸湿、飽和状態 A から放湿させた試料を放湿 A、飽和状態 B から放湿させた試料を放湿 B と呼ぶ。放湿 A, B に関しては、全試料の飽和時の含水率の平均値を、相対湿度 100%における平衡含水率として示す。各試料の平衡含水率は、その試料の実験中に測定した相対湿度を平均した値であり、文献値¹⁹⁾(×吸湿、+放湿)も同図中に示す。

図より、平衡含水率に吸放湿履歴が存在することは明らかである。高湿度ほど顕著で、最大で 0.19[m³/m³]ほどの違いがある。低湿度ではそれほど吸放湿履歴は見られず、0.02[m³/m³]以下の違いである。また放湿 A と放湿 B では、飽和状態の平衡含水率には大きな違いはあるが、それ以下の湿度条件ではほぼ等しい。これは飽和状態の差となる水分は、100%RH に非常に近い放湿過程においてほとんど抜けてしまっており、この水分は空隙径の大きい部分に詰まっていたものであると考えられる。

また文献値と比較すると、吸湿ではほぼ一致しており、放湿の高湿度域では今回の測定値の方が若干高いが、吸放湿の両方の過程で非常に近い値を持つ。

図 3 平衡含水率

図 4 平衡含水率(相対湿度 85%以上, 含水率 0~0.3[m³/m³])

図 5 含水率勾配による水分拡散係数

3.2 含水率勾配による水分拡散係数の測定

ここでは、水分伝導率の履歴を調べるために、乾燥からの吸湿過程と飽和からの放湿過程の含水率勾配に関する水分拡散係数の測定を行った。

(1) 測定概要

含水率勾配による水分拡散係数は下式で定義される。

$$J_w = -D_w \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad \dots(6)$$

ここで、 J_w : 水分流[kg/m²s]、 D_w : 含水率勾配による水分拡散係数[kg/ms]、 ϕ : 容積基準含水率[m³/m³]。

測定は、文献¹⁸⁾に準拠して行われた。測定試料は、断面の一边が約 8cm の正方形であり、厚さは 2cm、5cm の 2 通りとして、それぞれ 2 体ずつ作成した。試料の初期条件は、乾燥と飽和の 2 つの状態とした。乾燥状態は、平衡含水率測定と同じ状態であり、飽和状態は、飽和状態 A とした。測定は、20℃、55%一定に制御した恒温恒湿室内に装置を設置して行った。

(2) 測定結果と考察

図 5 に各試料の水分拡散係数の測定値を示す。なお、吸湿過程、放湿過程は、それぞれ初期が乾燥状態、飽和状態の試料の結果である。図 5 より、吸湿過程では、含水率が 0.05~0.2 の間はほぼ一定値で、それ以上になると増加するのに対し、放湿過程では、含水率が 0.1~0.16 で減少し、0.16~0.25 で増加し、0.27 から減少する。このような含水率の狭い範囲でピークが生じる理由は、この含水率近傍での平衡含水率の変化が大きいことによると考えられる。

含水率が0.27以上では吸湿過程の水分拡散係数の値が得られていないが、それ以下では、どの含水率においても吸湿過程よりも放湿過程の方が水分拡散係数は大きく、吸放湿履歴が存在するのがわかる。特に、含水率が0.1付近の低含水率域で比較的大きな差が見られる。また、松本ら^{20), 21)}の行った同種の材料に関する測定値は、 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-7} [\text{kg/ms}]$ の範囲であり、今回の測定値との差は小さい。

4. 平衡含水率の吸放湿履歴の予測

4.1 検討手順

ここでは、独立領域理論を用いて高湿度域の平衡含水率の履歴の逐次予測が可能かどうかを検討する。そのために、まずは3章で述べた平衡含水率の測定値から吸湿境界曲線を作成し、独立領域理論により放湿境界曲線を決定する。次に、高湿度域で吸放湿を繰り返す場合の平衡含水率を測定し、その測定値と独立領域理論により求めた平衡含水率の履歴曲線との比較を行う。

4.2 吸放湿境界曲線の作成

吸湿時の平衡含水率の測定値から求めた吸湿境界曲線を(7)式に示す。(7)式は、放湿状態Bを飽和時の平衡含水率とした場合の式である。

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{-5.11122 \times 10^{-3}}{h_{12} - 1.06076} - 4.81846 \times 10^{-3} \quad (0 \leq h_{12} \leq 0.9911) \\ \psi &= \frac{-8.55546 \times 10^{-5}}{h_{12} - 1.00011} + 5.90663 \times 10^{-2} \quad (0.9911 \leq h_{12} \leq 1) \end{aligned} \quad \dots(7)$$

ここで、 ψ ：容積基準含水率 $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ 、 h_{12} ：吸湿時相対湿度 $[-]$ 。

次に分配関数 k について検討する。松下ら¹⁴⁾によって示された分配関数を用い、指数の n 値を、湿度域によって変更して、放湿境界曲線が測定値と一致するように(8)式のように与えた。

$$k(h_{12}, h_{21}) = \left(\frac{h_{21}}{h_{12}} \right)^n \quad \dots(8)$$

$$n = 4 \quad (0 \leq h_{12} \leq 0.8)$$

$$n = 4 + 50(h_{12} - 0.8) \quad (0.8 \leq h_{12} \leq 0.96)$$

$$n = 12 \quad (0.96 \leq h_{12} \leq 0.9995)$$

$$n = 12 + 1000000(h_{12} - 0.9995) \quad (0.9995 \leq h_{12} \leq 1)$$

ここで、 h_{21} ：放湿時相対湿度 $[-]$ である。

分布ダイアグラムの分割幅は表2に示す様に可変刻みとする。

図6に、(7)、(8)式から求めた吸湿・放湿境界曲線を測定結果と共に示す。

表2 分布ダイアグラムの分割幅

湿度範囲[%]	0～60	60～80	80～96	96～100
分割幅[%]	2	0.25	0.1	0.01

4.3 平衡含水率の吸放湿履歴の測定

高湿時の平衡含水率の吸放湿履歴を、以下の2ケースについて測定した。

1) 乾燥状態からの吸・放湿の繰り返し(ケース1)

乾燥状態から、99%で試料を平衡させた後、92%→88%→92%→99%という順で平衡含水率を測定した。

2) 飽和状態からの放湿・吸湿の繰り返し(ケース2)

飽和状態から、88%で試料を平衡させた後、92%→99%→92%→

88%という順で平衡含水率を測定した。

なお、ケース1は、最初と最後の湿度の条件は等しく、ケース2も同様である。独立領域理論が妥当ならば、この湿度変化条件では最初と最後の平衡含水率の測定結果が一致することになる。

4.4 計算結果と考察

図7, 8にそれぞれ2ケースの吸放湿を繰り返す平衡含水率の測定値と、独立領域理論により決定した履歴曲線との比較を示す。

まず、測定結果について考察する。両図より、ケース1, 2共に、初期と最後の含水率はほぼ一致しており、独立領域理論と矛盾しない。次に、測定結果と履歴曲線を比較する。両図より、初期状態が乾燥状態、飽和状態のいずれも、履歴曲線は、測定値と良く一致している。これらより、独立領域理論を用いることで、高湿度域における平衡含水率の履歴を逐次追跡することは、十分可能であることが分かる。

図6 吸湿境界曲線及び放湿境界曲線

図7 乾燥状態→吸湿→放湿→吸湿の場合の履歴曲線

図8 飽和状態→放湿→吸湿→放湿の場合の履歴曲線

5. 結露・蒸発実験

実験は、結露実験に継続して蒸発実験を行い、その後、結露・蒸発を繰り返す実験を3周期行った。ここでは実験の概要と結果について示す。

5.1 実験の概要

図9に実験装置の概要を示す。ALCの試料は上表面を室内に開放し、試料底部は銅製の恒温水槽に密着させ、一次元の熱水分流となるように、側面を発泡スチロールで断熱、ポリエチレンシートで断湿し、底面をアルミホイルで断湿した。試料の寸法は、 $8\text{cm} \times 8\text{cm} \times 5\text{cm}$ であり、試料A、Bの2つを作成した。どちらの試料も上表面中央、下表面中央の表面温を測定するためT型熱電対をアルミテープで接着し、試料Bは温度分布測定用とし、側面から深さ4cm程度の穴をあけ熱電対を挿入して試料内温度分布を測定した^{注5)}。試料内の含水率分布は、非破壊による含水率測定装置の一種である、ガンマ線含水率測定装置²²⁾を用いて測定した。図10に示すアクリル製の湿度制御箱を試料上部に設置し、その湿度を、飽和塩溶液によって制御し、室温は、空調機によって制御した。制御箱と断熱材の間は、アルミテープで埋め、隙間を出来るだけ無くした。また断熱材の上表面、側面、断熱材と試料の隙間は、全てアルミテープで覆って防湿措置を施した^{注6)}。制御箱内の温湿度は温湿度データロガー(エス・パックス社製RS-12)により測定した。結露・蒸発の条件は、空気湿度及び試料底部の恒温水槽の温度を変えることで設定した。

結露実験は、試料を 40°C で質量が一定になるまで乾燥させた後、図9のようにセットし、35日間行った。室温は 23°C 、室内湿度は飽和塩溶液で85%に制御した。水槽温度は $3 \sim 8^\circ\text{C}$ に設定した。

蒸発実験は、結露実験終了後に継続して28日間行った。室温は 23°C 、室内湿度は飽和塩溶液で75%に制御した。水槽温度は $23 \sim 28^\circ\text{C}$ に設定した。

結露・蒸発を繰り返す実験は、蒸発実験終了後に継続して行った。室温は、結露・蒸発時に関わらず 23°C に制御した。密閉水槽温度は、結露時には 5°C に設定し、蒸発時には 26°C に設定した。室内湿度は、結露時は85%、蒸発時は75%に、飽和塩溶液により制御した。このように5日ごとに水槽温度と室内湿度を変更し、結露5日・蒸発5日の10日間を1周期として、これを3回繰り返した。

5.2 結露実験の結果と考察

図11に結露実験時の含水率分布の時間変化を示す。図より、初期は試料上部の含水率が少しずつ上昇し、10日後からは試料底部の含水率が上昇を始めることがわかる。それ以降は試料上部の含水率はおおよそ $0.04 \sim 0.05[\text{m}^3/\text{m}^3]$ であり変化はなく、試料底部の含水率が上昇し、含水率の高い領域が試料底部から試料上部に向かって広がっていく様子が確認できる。

5.3 蒸発実験の結果と考察

図12に含水率分布の変動を示す。図より、初期は、試料上部と底部で含水率が低下し、試料中央では変化が小さい。10日後以降からは、試料中央を含めて全体で含水率が低下する様子が確認できる。

5.4 結露・蒸発を繰り返す実験の結果と考察

図13に結露・蒸発を繰り返す実験時の試料各部の含水率の変動を示す。図中の凡例は、試料底面からの距離である。図より、試料底部(5mm)ではおおよそ $0.015[\text{m}^3/\text{m}^3]$ の振幅で含水率が変動しており、結露・蒸発を繰り返していることが確認できる。

図9 実験装置の概要

図10 湿度制御箱

図11 含水率分布変動(結露実験)

図12 含水率分布変動(蒸発実験)

試料中央部分ではおおよそ $0.005[\text{m}^3/\text{m}^3]$ の振幅であり、試料上部・底部ほど含水率の増減は顕著ではない。また、2周期目と3周期目の各部の含水率変動は最高、最低値、平均を含めて非常によく似ており、ほぼ周期定常的な変動をしていると考えられる。

図 13 試料各部の含水率変動(結露・蒸発を繰り返す実験)

6. 結露・蒸発実験の解析

6.1 解析方法

計算は、2 章で示した基礎方程式を用いて、前進型有限差分法により行った。空間刻みを 5mm、時間刻みを 5 秒とした。初期条件は、実験開始時の温度分布、含水率分布の測定値を与えた。境界条件は、試料上部では、熱・水分共に第 3 種境界条件として実測した室内温湿度を与えた。試料底部では、熱は第 1 種境界条件として実測した試料底面温度を、水分は第 2 種境界条件として水分流=0 を、それぞれ与えた。

試料上部境界の熱伝達率、湿気伝達率については、結露過程と蒸発過程で熱流の向きが逆になり対流の性状が変化すると考えられるため、熱流の向きによって値を変更した。その値を表 3 に示す。対流熱伝達率と湿気伝達率には Lewis 関係を用いた(例えば 16)。

表 3 試料上部境界の熱伝達率・湿気伝達率

判断条件	物性値	単位	値
$T_0 > T_1$	総合熱伝達率 α	$[W/m^2K]$	6.1
	湿気伝達率 α'	$[kg/m^2s(kg/kg(Da))]$	5.85×10^{-4}
$T_0 < T_1$	総合熱伝達率 α	$[W/m^2K]$	10.8
	湿気伝達率 α'	$[kg/m^2s(kg/kg(Da))]$	5.87×10^{-3}

T_0, T_1 はそれぞれ室空気温度、試料上表面温度である。

6.2 平衡含水率曲線

解析に用いた平衡含水率の吸放湿境界曲線及びその履歴過程は、4 章で妥当性を確認した独立領域理論を用いた。

6.3 水分伝導率曲線

水分化学ポテンシャル勾配に関する液相水分伝導率は、絶乾からの吸湿過程と飽和からの放湿過程の 2 曲線について、3 章で示した水分拡散係数と平衡含水率の測定値を用いて、(9)式により変換する。

$$\lambda'_{\mu} = D_w \frac{\Delta \psi}{\Delta \mu} \quad \dots(9)$$

蒸発実験では、上記の履歴過程と異なるので、ここではこの 2 曲線を元に含水率の関数として同定を行った。温度勾配に関する液相水分伝導率は、その影響は非常に小さいとして無視した。

水分化学ポテンシャル勾配に関する気相水分伝導率は、別途同一の試験体から取り出した試料を用いて測定した湿気伝達率から(10)式を用いて換算し、温度勾配に関する気相水分伝導率は、水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率から求めた¹⁶⁾。また、吸湿境界曲線の相対湿度 95%に相当する $0.05[m^3/m^3]$ 以下では、液水移動は

ほとんどないと考え、気相水分伝導率と水分伝導率は等しいとした。

$$\lambda'_{\mu} = \lambda'_m \frac{\partial p_v}{\partial \mu} = \lambda'_m \frac{\partial p_v}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial \mu} = \lambda'_m p_{vs} \frac{h}{R_v T} \quad \dots(10)$$

ここで、 λ'_m : 湿気伝達率 $[kg/msPa]$ 、 p_v : 水蒸気圧 $[Pa]$ 、 p_{vs} : 飽和水蒸気圧。これら水分伝導率は、結露実験、蒸発実験に対して含水率の関数として同定した。

6.4 その他の物性値

各実験に共通で用いた物性値を表 4 に示す。最大空隙率及び密度は、平衡含水率測定の際に求めた値の平均値を用いた。熱伝導率は、別途測定を行った値^{注 7)}の近似曲線を作成し、図 14 に示す様な含水率の関数として与えた。

表 4 解析に用いた物性値

物性値	単位	値
水蒸気の気体常数 R_v	$Pa \cdot m^3 / (kg \cdot K)$	461.64
水	相変化熱 r	J/kg
	密度 ρ_w	kg/m^3
	比熱 c_w	J/kgK
ALC	最大空隙率 ϕ_{max}	m^3/m^3
	乾燥密度 ρ_o	kg/m^3
	比熱 c_o	J/kgK
	熱伝導率 λ	W/mK

図 14 含水率と熱伝導率の関係

6.5 結露実験の解析

結露実験では、材料全体が乾燥から吸湿するので、平衡含水率及び水分伝導率は吸湿境界曲線上を通ると考えられ、それぞれ乾燥からの吸湿時の値を用いた。気相及び液相両方を含んだそれぞれの水分伝導率は、前述の通り、結露実験の結果を再現する曲線として同定した。図 15 に、同定した吸湿時の水分伝導率を、蒸発実験で同定した放湿時の水分伝導率と共に示す。図 16, 17 にそれぞれ含水率分布と温度分布の解析結果を実験結果と共に示す。両図より、解析結果は実験結果をよく再現できている。

6.6 蒸発実験の解析

蒸発実験では、平衡含水率は独立領域理論を用い、水分伝導率については、結露実験と同様にして、蒸発実験の実験結果を再現できる曲線を試行錯誤の上で決定した。同定した放湿時の水分伝導率を図 15 に示す。図 18, 19 にそれぞれ含水率分布と温度分布の解析結果を実験結果と共に示す。図 18 より、解析結果は実験結果をよく再現できているが、試料上部の計算値が測定値よりやや高い。これは、上部空気の相対湿度(76%RH)に近い湿度範囲における吸放湿履歴曲線の予測の精度がやや悪いことによると考えられる^{注 8)}。図 19 より、温度分布の解析結果も実験結果とよく一致している。

また、図 20,21 に、吸湿時の水分伝導率を用いて、それぞれ平衡含水率の履歴を考慮しない場合とする場合の解析結果を示す。図より、平衡含水率の履歴の考慮の有無に関わらず、蒸発速度が実験よりも過大となっており、蒸発実験においては、結露実験とは異なる水分伝導率を用いる必要があると言える。次に気相と液相の水分伝導率のそれぞれの履歴の影響を検討する。図 22,23 に平衡含水率の履歴を考慮した上で、それぞれ液相水分伝導率の履歴のみ考慮した場合と気相水分伝導率の履歴のみ考慮した場合の解析結果を示す。図 22 より底部の含水率の解析結果は、蒸発初期は実験結果と一致がよいものの、後半は一致が悪く、解析結果の蒸発速度の方が速い。液相水分伝導率は比較的高い含水率で影響が大きいといえる。図 23 より底部の含水率の解析結果は、初期の蒸発が実験結果よりやや早くなるものの、その後は一致がよい。つまり、蒸発過程では、気相の水分伝導率の履歴の影響が、液相の水分伝導率の履歴の影響より大きく現れている。

図 15 水分化学ポテンシャル勾配の水分伝導率

図 16 含水率分布の実験と解析の比較(結露実験)

図 17 温度分布の実験と解析の比較 (結露実験)

図 18 含水率分布の実験と解析の比較(蒸発実験)

図 19 温度分布の実験と解析の比較(蒸発実験)

図 20 履歴を考慮しない場合の含水率分布(蒸発実験)

図 21 平衡含水率の履歴のみ考慮する場合の含水率分布(蒸発実験)

図 22 平衡含水率と液相水分伝導率の履歴を考慮する場合の含水率分布 (蒸発実験)

図 23 平衡含水率と気相水分伝導率の履歴を考慮する場合の含水率分布 (蒸発実験)

6.7 結露・蒸発を繰り返す実験の解析

まず、履歴を考慮しない場合として、吸湿時の平衡含水率と水分伝導率を用いた解析結果と実験結果の含水率の比較を図 24 に示す。図より、解析結果は、試料底部で 5 日以降の蒸発過程で実験結果よりもかなり低下し、それに続く周期を繰り返す過程でも平均的に低下しており、実験結果の性状と大きく異なっている。

次に、平衡含水率の履歴を前提として、結露実験・蒸発実験の解析から得られた吸湿時・放湿時の水分伝導率の 2 つの曲線を元にして、水分伝導率の履歴過程について検討を行う。検討を行うケースは、1) 水分伝導率として吸湿時には吸湿境界曲線を、放湿時には放湿境界曲線を用いる場合 (以下、両境界曲線)、2) 水分伝導率の吸湿境界曲線を用いる場合 (以下、吸湿曲線)、3) 水分伝導率の放湿境界曲線を用いる場合 (以下、放湿曲線)、4) 吸湿境界と放湿境界の中間の水分伝導率を用いる場合 (以下、中間曲線) の 4 ケースである。

図 25~28 にそれぞれのケースの解析結果と実験結果の含水率変動の比較を示す。図 25 より、両境界曲線の場合、解析結果は、試料底部において初期 5 日間の一致はよいが周期を繰り返すことで含水率が徐々に高くなり、実験結果と大幅に異なる。図 26 より、吸湿曲線の場合、解析結果は、試料上部において、蒸発時の含水率の変化が大きく、やや低くなるものの、結露時の変化はよく一致している。蒸発時の試料上部の含水率がやや大きい傾向は、他のケースについても同様であり、6.6 節で述べたのと同様の比較的低い相対湿度範囲における履歴曲線の予測精度がやや悪いことが理由と考えられる。図 27 より、放湿曲線の場合、解析結果は、試料底部において、1 周期目はやや低すぎるが、その後増加し、振幅は小さい

図 24 含水率変動の実験と解析の比較 (履歴を考慮しない場合)

図 25 含水率変動の実験と解析の比較 (平衡含水率の履歴考慮+両境界曲線を用いる水分伝導率)

図 26 含水率変動の実験と解析の比較 (平衡含水率の履歴考慮+吸湿曲線の水分伝導率)

図 27 含水率変動の実験と解析の比較 (平衡含水率の履歴考慮+放湿曲線の水分伝導率)

図 28 含水率変動の実験と解析の比較
(平衡含水率の履歴考慮+中間曲線の水分伝導率)

ものの実験結果に近づく。

図 28 より、中間曲線の場合、解析結果は、試料底部において、1 周期目では若干低いものの、2 周期目以降、平均値、変動ともに実験結果とよく一致している。

これらの結果から、初期 5 日間は、吸湿曲線の場合が、それ以降は、中間曲線の場合が、含水率変動が最もよい一致を示していると考えられる。このことから、水分伝導率は、結露・蒸発の繰り返しの過程で、初期は、吸湿境界曲線に近い値をとり、その後、吸湿境界曲線と放湿境界曲線の中間を通る曲線に収束していつていると考えられる。また図 29 に示す様に中間曲線の場合、温度分布についても解析結果は実測結果とよく一致している。

結露実験、蒸発実験ではそれぞれ水分伝導率の吸湿と放湿の境界曲線によって、その過程の再現ができることと考えあわせると、結露、蒸発の初期の挙動とその繰り返しの挙動では、平衡含水率の履歴以外に、水分伝導率の履歴を適切に考慮する必要があることが分かる。

7. まとめ

本研究では、建築材料の結露・蒸発性状に及ぼす平衡含水率・水分伝導率の履歴の影響を、明らかにすることを目的として、ALC の平衡含水率及び水分拡散係数の履歴を測定し、同材料の結露・蒸発を繰り返す実験を行い、この実験結果に対して、平衡含水率・水分伝導率の履歴の影響を考慮した熱水分同時移動方程式を用いた解析的検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 高湿時の吸湿と放湿を繰り返す過程の平衡含水率は、独立領域理論を用いて十分再現可能である。
 - 2) 結露後の蒸発時の含水率分布予測には、平衡含水率の履歴に加え、放湿時の水分伝導率を用いる必要がある。
 - 3) 結露・蒸発を繰り返す場合の含水率分布予測には、平衡含水率の履歴に加え、水分伝導率の履歴を適切に考慮する必要がある。
- ここでは吸湿過程と放湿過程の水分伝導率の中間の値に履歴が収束していくことが確認できた。

今後は、液相、気相のそれぞれの水分伝導率の履歴性状をより詳細に明らかにすること、さらにそれら予測が可能となるモデル化を行うことが必要である。

図 29 温度分布の実験と解析の比較
(平衡含水率の履歴考慮+中間曲線の水分伝導率)

謝辞

本研究は、平成 17～18 年度科学研究費補助金若手研究 (B) (課題番号 17760469 研究代表者 小椋大輔) と、(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。

注

- 注 1) ここで言う結露とは、通常窓ガラス表面等で起こるような相対湿度 100% の状態としてだけではなく、試料内の水分が自由水に近い状態を含めて、含水量がある限界値以上の相対湿度状態として用いている。
- 注 2) Darcy 式を不飽和の状態まで拡張した不飽和透水係数は、2 章の基礎理論で示す水分化学ポテンシャル勾配に関する水分伝導率の液相成分に相当する。括弧内の水分伝導率は上記意味で用いている。水分伝導率は、水分化学ポテンシャル勾配に関するもの、温度勾配に関するものがあり、それぞれ気相、液相の成分に分けられる。以後、水分伝導率は、特に断らない限り、上記全ての水分伝導率を含めた総称として用いる。
- 注 3) ここでいう吸着は、以下の状態で存在する水分を考えている。
- ① 固体実質部の結晶内部や固体実質と空隙に存在する水分
 - ② ゲル構造の固体内にオスモティックに存在する水分
 - ③ 固体内の毛細管に、毛細管力で保持される水分
- 注 4) 分布ダイアグラムについては、参考文献 7) を参照いただきたい。
- 注 5) 熱電対を挿入した穴はコーキングして埋めた。
- 注 6) ガンマ線含水率測定装置は、ガンマ線が透過する部位における水の存在による線量の減衰を測定原理としており²²⁾、測定試料以外の部位での吸湿を避けるため防湿措置を施した。
- 注 7) 絶乾状態と湿潤状態の試料を作成し、HFM 法で測定を行った。絶乾状態の試料は、平衡含水率と同様に準備した。湿潤状態は、以下の 2 種類を作成した。一つは飽和状態であり、蒸留水に 1 日程度つけた後、余分な自由水を取り除くために、蒸留水を入れた容器の中に水に触れないように設置し、蓋をして、およそ 1 週間放置して養生した。もう一つは含水率がおおよそ 0.05[m³/m³] となるように、蒸留水を 200ml 程度散水した後にラッピングして気中で 1 週間程度養生した。
- 注 8) 実験終了時の試料底面から 35mm 以上の含水率の測定値は 0.02 m³/m³ 以下であった。0.02 は、絶乾からの吸湿時の相対湿度 85% の平衡含水率にほぼ等しい。この実験条件は放湿過程であり、この含水率と平衡する相対湿度は 85% より下回っていると考えられる。また上部空気の相対湿度は約 76% であった。以上から、試料上部は 76%～85% の範囲にあったと考えられる。解析においても試料上部の相対湿度は上記とほぼ等しい範囲に入っていた。以上のことから、解析では放湿時の含水率をやや高めに予測していると考えられる。なお、4 章で行った平衡含水率の吸放湿履歴においては、相対湿度 85% 以下、含水率 0.02 以下の領域において検討を行っておらず、この範囲の平衡含水率の履歴曲線の予測精度がやや悪いことが考えられる。

参考文献

- 1) Hukka A, Viitanen H.: A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology, 33(6), pp.475-85, 1999
- 2) 鈴木大隆, 北谷幸恵, 岩前 篤, 永井久也, 小南和也, 坂本雄三: 定常条件下における各種木材の含水率と腐朽の関係 -木質系建築材料における腐朽現象の定量化とダメージの数学的予測モデルに関する研究 (第 1 報) -, 日本建築学会環境系論文集 NO.627, pp.591-597, 2008.5
- 3) 齋藤宏昭, 福田清春, 澤地孝男, 大島 明: 水分収支を考慮した木造外皮の耐久性評価のための木材腐朽予測モデル -建築外皮の湿害に対する評価手法の開発 その 1-, 日本建築学会環境系論文集 NO.630, pp.971-978, 2008.8

- 4) 松本衛：建築壁体における熱・水分の同時移動および水分蓄積に関する研究，博士論文，1978.11
- 5) 池田哲朗：結露障害防止に関する基礎的研究，博士論文，1979.10
- 6) Topp, G. C. and Miller, E. E.: Hysteretic moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass-bead media, Soil Sci. Soc. Ame. Proc., vol. 30, pp.156-162, 1966
- 7) 松本衛,松下敬幸：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, pp.65-72, 1981.8
- 8) Everett, D. H. and W. I. Whitton : A general approach to hysteresis, 1, Trans. Faraday Soc., 48, pp.749-752, 1952
- 9) Everett, D. H. and F. W. Smith : A general approach to hysteresis, 2, Development of the domain theory, Trans. Faraday Soc., 50, pp.187-197, 1954
- 10) Everett, D. H. : A general approach to hysteresis, 3, A formal treatment of the independent domain model of hysteresis, Trans. Faraday Soc., 50, pp.1077-1096, 1954
- 11) Everett, D. H. : A general approach to hysteresis, 4, An alternative formulation of the domain model, Trans. Faraday Soc., 51, pp.1551-1557, 1955
- 12) Enderby, A. J. : The domain model of hysteresis, 1, Independent domains, Trans. Faraday Soc. 51, pp.835-848, 1955
- 13) Enderby, A. J. : The domain model of hysteresis, 2, Interacting domains, Trans. Faraday Soc. 52, pp.106-120, 1956
- 14) 松下敬幸, 川田英彦, 小椋大輔, 松本衛：大阪の温湿度条件下でのハイグロスコピック領域における建築多孔質材料の吸放湿履歴の解析, 日本建築学会計画系論文集, 第 526 号, pp.31-36, 1999.12
- 15) 松本衛, 平野一治：気泡コンクリートの結露後の蒸発過程の解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.85-88, 1978.5
- 16) 松本衛：新建築学体系 10 環境物理, 第 3 章湿気, 彰国社,1984
- 17) 田中徹彦, 松下敬幸, 高田暁：建築材料の水分物性値の履歴に関する研究 水分伝導率の取り扱いの検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.359-360, 2007
- 18) 日本建築学会：日本建築学会環境基準 AIJES-H001-2006 湿気物性に関する測定規準・同解説, 日本建築学会, 2006
- 19) 日本建築学会：建築材料の熱・空気・湿気物性値, 2001
- 20) 松本衛, 鉦井修一, 堀口忠：多孔質材料における水分拡散係数の測定に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.121-124, 1982.6
- 21) 松本衛, 鉦井修一, 青木秀樹：建築多孔質材料の水分拡散係数の測定とそのヒステレシスの含水率・温度への影響に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.701-702, 1983.9
- 22) 小椋大輔, 鉦井修一：ガンマ線による含水率測定装置を用いた発泡系断熱材の結露性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.385-386, 2005.9

(2009年4月10日原稿受理, 2009年6月19日採用決定)