



建築仕上技術者のための
建築物理学講座

第8講 「建材の物性値」

第9講 「熱容量・比熱」

第10講 「建築材料の水分吸収」

第11講 「非定常熱湿気同時移動解析プログラム
WUFIで使用する物性値」

第12講 「非定常熱湿気同時移動解析 WUFI」

田中 辰明

柚本 玲

(お茶の水女子大学名誉教授・工博) (お茶の水女子大学田中研究室・博士(生活科学))

(株)工文社 **建築仕上技術** 2007年11月号～2008年3月号より



建築物理学講座

第8講「建材の物性値」

田中 辰明

柚本 玲

(お茶の水女子大学名誉教授・工博) (お茶の水女子大学田中研究室・博士(生活科学))



はじめに

前講で各種建築材料の水蒸気拡散抵抗係数 μ について解説を行った。わが国では建材の水蒸気の通りやすさを示す指標として「湿気伝導率」、「透湿率」、「透湿係数」等が使用され、混乱しているが、国際規格では水蒸気拡散抵抗係数が用いられ、最近わが国でもJISに取り入れられるようになった。水蒸気拡散抵抗係数を説明するには建材と水蒸気の拡散との関係について元の定義がどのようなものであったかを明確にする必要がある。本稿ではその測定法を述べる。

この研究はドイツで進められ、測定法はドイツ工業規格DIN52615 “Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen (建築材料、断熱材料の水蒸気透過性の測定)”で規定されているため、この規格に沿って解説する事とした。文章が直訳調で大変読みにくい内容となった事をお詫びする。またドイツ語の定義を英語標記する場合の訳語も出ているので、これについても触れた。

1. 適用範囲

次に示す方法は均質あるいはほぼ均質な材料(例えば有孔材料、繊維質材料、粒子状材料)で、拡散方向が垂直な方向に層をなす材料に適用される。

2. 目的

ここに示す規格で規定された試験方法は定常状態で様々な境界条件に対して適用される。

3. 概念

(1) 水蒸気拡散流量

(Wasserdampf- Diffusionsstrom)

水蒸気拡散流量 I (kg/h)は、ある時間に、ある水蒸気分圧の下、平面に垂直に拡散していく水蒸気量をいう。

(2) 水蒸気拡散流密度

(Wasserdampf- Diffusionsstromdichte)

単位面積当たりの水蒸気拡散流量を水蒸気拡散流密度 i ¹⁾(kg/m²h)という。

実用上g/(m²d)という単位が使用されている。これはWDDという標記号が用いられる。

(3) 水蒸気拡散透過係数

(Wasserdampf- Diffusionsdurchlaßkoeffizient)

水蒸気拡散透過係数 Δ ²⁾(kg/m²hPa)は実際に水蒸気分圧の差が作用した場合に水蒸気拡散流密度がどの程度であるかを示すものである。

水蒸気拡散透過係数 Δ の逆数は水蒸気拡散抵抗(Wasserdampf Diffusionsdurchlaßwiderstand) $1/\Delta$ (m²hPa/kg)と示される。

註：1) 英訳を行う際はISO-1663-1981で次のように訳している。

註：2) 単位面積当たりの水蒸気拡散流量を水蒸気拡散流密度 i (Wasserdampf- Diffusionsstromdichte): water vapour transmission rate (WVT)

水蒸気拡散透過係数 Δ (Wasserdampf- Diffusionsdurchlaßkoeffizient): water vapour permeance (perm)

水蒸気拡散伝導係数 δ (Wasserdampf- Diffusionsleitkoeffizient): water vapour permeability (perm-inch)

(4) 水蒸気拡散伝導係数

(Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient)

水蒸気拡散伝導係数 δ (kg/mhPa)は試験体の内部で水蒸気分圧差により試験体を拡散していく水蒸気量で面積、時間、圧力差に対するものである。

水蒸気拡散透過係数 Δ (Wasserdampf-Diffusionsdurchlaßkoeffizient)に試験体の厚さ s を乗じることにより水蒸気拡散伝導係数 δ (Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient)を求める事ができる。

(5) 水蒸気拡散係数

(Wasserdampf-Diffusionskoeffizient)

水蒸気拡散係数(Wasserdampf-Diffusionskoeffizient) D は水蒸気拡散流密度 i と濃度勾配 dc/dx の比例係数である。水蒸気拡散流密度 i はフィック(Fick)の法則により次のように示される。

$$i = -D \frac{dc}{dx} \quad (1)$$

シルマー(Schirmer)によると、 D (m^2/h)は次のように計算される。

$$D = 0.083 \frac{P_0}{P} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad (2)$$

理想ガスに対する状態式と物質濃度 $c = p / (R \cdot T)$ から次式が得られる。

$$i = -\frac{D}{R_D T} \left(\frac{dp_D}{dx} \right) \quad (3)$$

ここで

P_D 水蒸気分圧(Pa)

T 温度(K)

R_D 水蒸気的气体定数(Nm/kgK)

この式は状態式が一般的なものでない為、全てに正当とは言えないが建築物理学の分野では充分の精度を持っている。

(6) 水蒸気拡散抵抗係数

(Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl)

水蒸気拡散抵抗係数 μ (-)は空気の水蒸気拡散透過係数 δL (Wasserdampf-Diffusionsdurchlaßkoeffizient)を材料の水蒸気拡散透過係数(Wasserdampf-Diffusions-

Table 1 境界条件

境界条件記号	温度(°C)	相対湿度(%)	
		乾燥側	湿潤側
23-0/50	23±0.5	0~3	47~53
23-50/95		47~53	90~95
23-0/85		0~3	82~88
38-0/90	38±0.5	0~3	88~92

注:一般に23-0/50という境界条件で試験は行なわれる(乾燥範囲法とも呼ばれる)。規格が存在した場合や協定が結ばれた場合はこの限りでない。例えばDIN18558に規定される合成樹脂仕上げ材の場合は23-50/95の境界条件が使用される(これは湿潤範囲法と呼ばれる)。

durchlaßkoeffizient)で除した数で、材料の水蒸気拡散抵抗(WasserdampfDiffusionsdurchlaßwiderstand)が同じ厚さで同じ温度の静止空気層の何倍に相当するかを示している。

(7) 水蒸気拡散相当空気厚さ

(Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke)

水蒸気拡散相当空気厚さ s_d (m)は試験体の厚さ s の水蒸気拡散抵抗(WasserdampfDiffusionsdurchlaßwiderstand)に相当する静止空気層厚さをいう。単位はmである。

$$S_d = \mu \cdot s \quad (4)$$

4. 測定方法の記述

(1) 測定理論

水蒸気拡散相当空気厚さ s_d は定常状態における水蒸気拡散流量の決定、試験体両面の水蒸気分圧差、試験体の寸法測定から算定される。試験体の厚さを知る事により、水蒸気拡散抵抗係数 μ を算定する事ができる。試験体両面の温度は同一でなければならない。試験に供する試験体は容器の上部に設置され、内部の水蒸気分圧は一定に保たれる。容器は空気調和された部屋に置かれ、容器の内部は定常状態で、試験体を通して一定の水蒸気拡散流量が流れるように様々な条件で一定の水蒸気分圧を保てるようにする。

(2) 境界条件

水蒸気透過性(Wasserdampfdurchlässigkeit)の試験に際し、Table 1に示す境界条件を用いる。

5. 試験体

(1) 試験体の採取

試験体は既存の規定(規格や品質監視協定)などによらない場合は委託者との合意により採取を行なう。

(2) 試験体の測定

試験体表面は一般に円形である。厚さは試験体の非均一性の影響が無いように選ぶ。(厚さは少なくとも容器空間の2倍は欲しい。)試験体直径は少なくとも試験体厚さの4倍は欲しい。試験面積は数学的方法で上部と下部の試験面積であり、少なくとも50 cm^2 必要である。

(3) 試験体の数

材料の試験にはそれぞれの試験で5つの試験体を必要とする。十分に均質な試験体の場合は3つの試験体で充分である。

(4) 試験体の前処理

材質の変化、例えば湿気による変化、ガスの交換、硬化等々が予測される場合は試験体を十分に長く保存して使用する。

6. 実施

試験体は溶液を入れる容器が水蒸気が通らないように取り付け(Fig.1参照)。

吸収剤としては十分な沈殿物もしくはゲルを保有した飽和塩溶液が適する。次のような吸収剤は23℃もしくは38℃において下記の相対湿度を示す。

P_2O_5 (5酸化2リン)、 CaCl_2 (塩化カルシウム) : 0%、
 粒状ゲル : 0 ~ 3%、 $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (クロム酸ナトリウム二水和物)の飽和溶液 : 23℃において52%、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (リン酸二水素アンモニウム)の飽和溶液 : 23℃において93%、 KCl (塩化カリウム) : 23℃において85%、 KNO_3 (硝酸カリウム) : 38℃において88.5% (さらなる飽和溶液についてはDIN 50008 Teil 1を参照のこと)。

吸収剤の上表面と試験体の下表面の間は約10mmの間隔を取ること。この事により粒状の乾燥剤を用いた場合、振動により吸収剤の積み替えが可能になる。流体の吸収剤を使用した場合は試験操作により試験体の下表面が

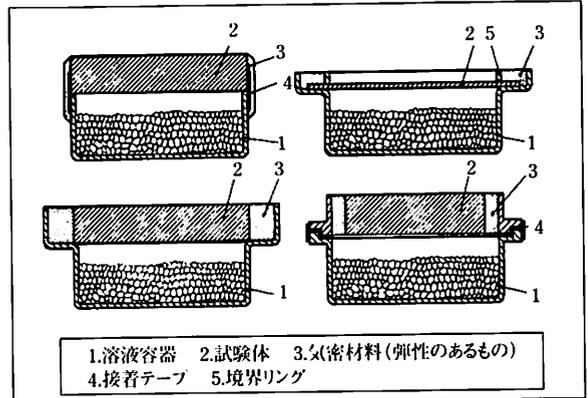


Fig.1 試験要領

湿潤にならないような間隔を取る必要がある。湿潤になる恐れがある場合は流体の表面に格子状の網を設けることで危険性を減少させることが出来る。

吸収剤の分量は試験時間帯に試験体の下の相対湿度変化が許容範囲内に入るように決定する。試験容器は空調室もしくは空調された容器内に一定の温度、一定の相対湿度で保管される。空調室内の空気流は0.3 m/s を越えてはならず、0.02 m/s を下回ってもいけない。

試験体容器は試験体を通して拡散した水蒸気量を算定するために一定の時間間隔で計量される。計量は計量で質量の変化がなくなるまで(定常状態に達するまで)継続される。試験中に試験体の質量変化がある場合は非定常状態には容器を分割することが薦められる。

水蒸気拡散透過が積層材の下地の影響を受ける場合は、まず下地材の測定を行うべきである。下地材の試験を行ってから次の層の試験を行う。積層材は必要なら各層ごとに試験を行う。

7. 評価

水蒸気拡散相当空気厚さ s_d は次式で計算される。

$$s_d = \delta_L \cdot A \frac{p_1 - p_2}{I} - s_L \quad (5)$$

均質な材料では試験で用いられた層の厚さを用いるだけでなく、水蒸気拡散抵抗係数 μ は次式によって求められる。

$$\mu = \frac{1}{s} \left(\delta_L A \frac{p_1 - p_2}{I} - s_L \right) \quad (6)$$

ここで

δ_L : 空気の水蒸気拡散伝導係数 (kg/m·h·Pa)

A : 試験体の面積 (m²)

p_1, p_2 : 試験体付近の水蒸気分圧 (Pa)

I : 水蒸気拡散流量 (kg/h)

s : 試験体の平均厚さ (m)

s_L : 試験容器内の試験体下部の空気層平均圧さ (m)

水蒸気拡散相当空気厚さsdが1.0m以下の場合には s_L は無視される。

空気中の水蒸気の水蒸気拡散伝導係数 δ_L は計測において空気圧、空気温度の影響を受けるのでFig. 2のグラフもしくは次式によって求められる。

$$\delta_L = \frac{D}{R_D \cdot T} \quad (7a)$$

$$\delta_L = \frac{0.083}{R_D \cdot T} \frac{p_0}{p} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad (7b)$$

ここで

D : 水蒸気拡散係数 (m²/h)

RD : 水蒸気的气体定数462 (Nm/kgK)

T : 空調室の温度 (K)

P : 空調室の平均気圧 (hPa)

p_0 : 規格状態の大気圧1013.25 (Pa)

Sd値が1500m以上の場合は実用上水蒸気に対して気密であるとされる。

簡易化された評価方法

水蒸気透過性を求めるに際し、(Wasserdampf-Diffusionsstromdichte) WDDは次式で求められる。単位は(g/m²·d)である。

$$WDD = \frac{24}{t_2 - t_1} \cdot \frac{m_2 - m_1}{A} \quad (8)$$

ここで

$m_2 - m_1$: 2回の計測における質量差

$t_2 - t_1$: 2回の計測における時間差

A : 試験体の面積 (m²)

(8)式と(6)式から次式が得られる。

$$\mu = \frac{1}{s} \left(\delta_L \frac{24000(p_1 - p_2)}{WDD} - s_L \right) \quad (9)$$

Table 2 計算を簡易化するための水蒸気拡散抵抗係数一覧

記号	空気圧P(hPa)	μ (s(m))
23-0/50	900	26.7/(WDD·s)
	950	25.3/(WDD·s)
	1000	24/(WDD·s)
	1050	22.9/(WDD·s)
	1100	21.8/(WDD·s)
23-50/95	900	22.9/(WDD·s)
	950	21.7/(WDD·s)
	1000	20.6/(WDD·s)
	1050	19.7/(WDD·s)
	1100	18.8/(WDD·s)
23-0/85	900	45.3/(WDD·s)
	950	43/(WDD·s)
	1000	40.8/(WDD·s)
	1050	38.9/(WDD·s)
	1100	37.1/(WDD·s)
38-0/90	900	115.8/(WDD·s)
	950	109.7/(WDD·s)
	1000	104.3/(WDD·s)
	1050	99.3/(WDD·s)
	1100	94.8/(WDD·s)

s_L が無視できると次の簡易式が求められる。

$$\mu = \delta_L \frac{24000 \cdot (p_1 - p_2)}{WDD \cdot s} \quad (10)$$

計算を簡易化するための(10)式による水蒸気拡散抵抗係数 μ をTable 2に示す。ここではTable 1に示す各5つの空気圧の条件に対し24000 $\delta_L \cdot (p_1 - p_2)$ の値を示した。

8. 試験報告

試験報告には次のことを記述する。

- 試験を行った材料
- 材料採取の説明
- 試験体の説明(寸法、乾燥状態でのかさ密度、単位面積当たりの質量、もし計測が可能なら計測時の平均湿度、積層材の場合:下地材、積層の数、1m²当たりの塗装(吹きつけ)方法、塗装(吹きつけ)量または層の厚さ(6項参照))
- 測定値(水蒸気拡散相当空気厚さ、もしくは水蒸気拡散抵抗係数もしくは実際の水蒸気密度(第7項参照)の個々の値と平均値を記すること)

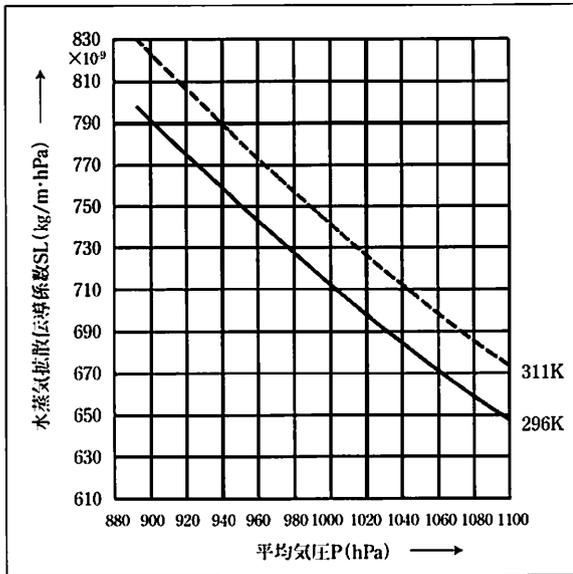


Fig. 2 (7b)式による空気圧pによる静止空気が23°C (296K)と38°C (311K)の場合の水蒸気拡散伝導係数 δ_L

<引用規格とその他の文献>

- 1) DIN 4106 Teil 5 Wärmeschutz im Hochbau Berechnungsverfahren
- 2) DIN 18550 Teil1 Putz, Begriffe, Anforderung Konstantenklima über wäßrigen Lösungen Gesättigte salzlösungen-Glycerination
- 3) ISO 1663-1981 Cellular plastics- Determination of water vapour ransmission rate of rigid materials
- 4) Schürmer, Beiheft VDI Zeitschrifte, Verfahrenstechnik (1936) H,6, S 170-177
- 5) Siehe Krischer Die wissenschaftlichen Glundlagen der Trocknungstechnik 2 Auflage Springer-Verlag, Berlin Gottingen Heiderberg (1963)

建築物理学講座

第9講「熱容量・比熱」

田中 辰明

柚本 玲

(お茶の水女子大学名誉教授・工博) (お茶の水女子大学田中研究室・博士(生活科学))



はじめに

海の水は温めにくく、冷めにくい。陸地は温めやすく、冷めやすい。これは水の熱容量が陸地の熱容量に比べて大きい事による。海岸で夏の昼間は海から陸に向かって風が吹き、夜間は陸から海に向かって風が吹くのはこのことによる。熱容量に影響する物理量は比熱C(J/kgK)である。では建築の熱の現象でどのような場合に熱容量が影響を与えるであろうか？

1. 短時間における熱の侵入と伝導による熱の逃げ

奥行きが無限にある2つの固体の表面でそれぞれの表面温度が θ_1, θ_2 とし、その平面が接触すると接触する面の温度 θ_0 が生じる。t時間における接触面での熱流は式) 1で示される。

$$\text{式) 1} \quad Q(t) = A \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot b \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \cdot (\theta_0 - \theta_\infty)$$

これはO. Krischer氏の論文“Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik”(乾燥技術における学術的基礎)によるもので、 θ_0 は θ_1, θ_2 の表面温度を持つ面から十分に距離が離れた点の温度である。ここで $b = \sqrt{\delta \cdot c \cdot \lambda}$ は接触係数、もしくはある物質の熱侵入係数と呼ばれる。bの単位は(J/m²Ks^{0.5})である。時間tの間に接触面Aを通して式) 2のように熱が流れる。

$$\text{式) 2} \quad Q(t) = \int_0^t \dot{Q}(t) \cdot dt = A \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot b \cdot \sqrt{t} \cdot (\theta_0 - \theta_\infty)$$

$\theta_2 > \theta_1$ の場合、t時間に固体2から取られる熱は式) 3で表される。同じ時間に固体1に侵入する熱は式) 4で

示される。

$$\text{式) 3} \quad Q_2 = A \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot b_2 \cdot \sqrt{t} \cdot (\theta_2 - \theta_0)$$

$$\text{式) 4} \quad Q_1 = A \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot b_1 \cdot \sqrt{t} \cdot (\theta_0 - \theta_1)$$

b_1, b_2 は互いに接触する物質により形成される接触係数である。 $Q_1 = Q_2$ であるから、接触温度の計算は式) 5で行なわれる。

$$\text{式) 5} \quad \theta_0 = \frac{b_1 \cdot \theta_1 + b_2 \cdot \theta_2}{b_1 + b_2}$$

半無限でないこれらの式は θ_0 が反対側表面で一定に保たれている事、すなわち短い時間での現象に有効である。

式) 1から式) 5の変数

Q(t) : 時間tにおける接触面での熱流(J)、t : 時間、 θ_1, θ_2 : 固体1, 2各表面温度(K)、 θ_0 : 固体表面が接触する面の温度(K)、A : 接触面の面積(m²)、 Q_1, Q_2 : t時間に固体2、固体1から奪われる熱(J)、 b_2, b_1 : 互いに接触する物質により形成される接触係数(J/m²Ks^{0.5})

例：式) 5より、コルク層の場合は厚さ1mmで接触時間が0.8秒の場合に有効であり、石の場合は厚さ10mmで接触時間8秒の場合に有効である。接触温度は接触を始めて最初の時間が有効である。素手や素足で壁や床に接触した場合、当初「冷たい」もしくは「温かい」と感じるのは手や足が熱を奪ったり放出しているからである。

各種材料の密度 ρ 、比熱c、熱伝導率 λ 、接触係数bをTable 1に示す。

例えば接触係数b値の異なる2つの固体、すなわちb

Table 1 各種材料の密度 ρ 、比熱 c 、熱伝導率 λ 、接触係数 b ²⁾

材 料	ρ (kg/m)	c (J/kgK)	λ (W/mK)	b (J/m ² Ks ^{0.5})
コルク	300	1.88	0.07	200
木材	600	2.51	0.17	506
石膏	1200	0.84	0.70	840
コンクリート	2200	1.05	1.40	1800
アルミニウム	2700	0.84	204	21510

値が大きい調理プレートと b 値が小さい発泡スチレンが室温と同じ温度に保たれているとする。その場合、両方の固体に素手で触れると調理プレートは冷たく感じ、発泡スチレンは温かく感じる。これを元に接触温度が計算され、調理プレートでは低く、発泡スチレンでは高くなる。

床に素足で接触した場合、足は寒さ、温かさを感じるが、これは接触温度の影響を受けるからである。素足(接触係数は1120)の表面温度が30℃で、表面温度15℃の(a)コルク、(b)木材、(c)コンクリート床に接触する時、短時間における接触温度 θ_0 はそれぞれ(a)27.7℃、(b)25.3℃、(c)20.75℃となりそれは以下のように算出される。

$$(a) \text{ コルク } \theta_0 = \frac{1120 \cdot 30 + 200 \cdot 15}{1120 + 200} = 27.7 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$(b) \text{ 木材 } \theta_0 = \frac{1120 \cdot 30 + 506 \cdot 15}{1120 + 506} = 25.3 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$(c) \text{ コンクリート } \theta_0 = \frac{1120 \cdot 30 + 1800 \cdot 15}{1120 + 1800} = 20.75 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

2. 比熱の通過と振幅の減少並びに位相の遅れ

熱容量は室温が一定範囲に保たれるかどうかに関わる値であり、それは物質固有の比熱という物性値に関係する。熱容量はその物質の比熱に密度を乗じた値で、比熱が大きいほど、また物質の質量が大きいほど大きくなる。

ガラスを通して日射が室内に入る。これが床や壁に当たり相互放射を行い、また一部は床や壁に吸収されて時間遅れを伴って床や壁表面温度を上昇させる。壁や床の

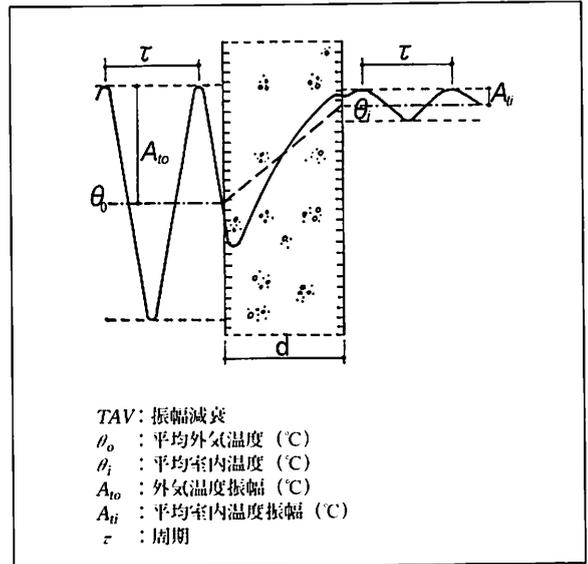


Fig. 1 外壁を通過する振動する熱の現象 ($TAV = A_i/A_o$)³⁾

表面温度との温度差により室内空気に対流が起こり、室温を上昇させる。床や壁が厚いと熱容量が大きくなるため、日射が室内に入ってから時間遅れを伴って室温が上昇する。一方床や壁が薄い材料すなわち熱容量が少ないと、日射が入れば直ちに室温が上昇する。日射は周期的に変動するものであるが、熱容量の大きい部屋に入った日射熱は振幅の遅れが大きくなる。つまり日射熱の影響による室温変化が遅れて生じる。このような現象は外壁や屋根を通過する熱の現象にも適用できる。

Fig.1に外壁を通過する振動する熱の現象を示す。熱が振動するというのは日射や外気温度は周期を持って振動をしているからである。外気温度と日射の両方を考慮した温度を相当外気温度といい、式) 6で示される。

$$\text{式) 6 } t_e = \frac{a}{\alpha_o} I + t_o$$

t_e : 相当外気温度(°C)、 a : 日射吸収率(-)、 α_o : 表面熱伝達率(-)、 I : 日射量(W/m²°C)、 t_o : 外気温度(°C)

東京のある年の7月23日の相当外気温度の例をFig. 2に示す。外壁や屋根は相当外気温度によって形成される熱が通過している。Fig.1の振幅は外壁もしくは屋根の熱容量が大きければ減衰が大きくなり、熱容量が小さい場合は減衰は小さくなる。また位相の遅れも熱容量が大きい場合は大きくなり、熱容量が小さい場合は遅れが小さくなる。位相の遅れが大きいのことは正午に強い日

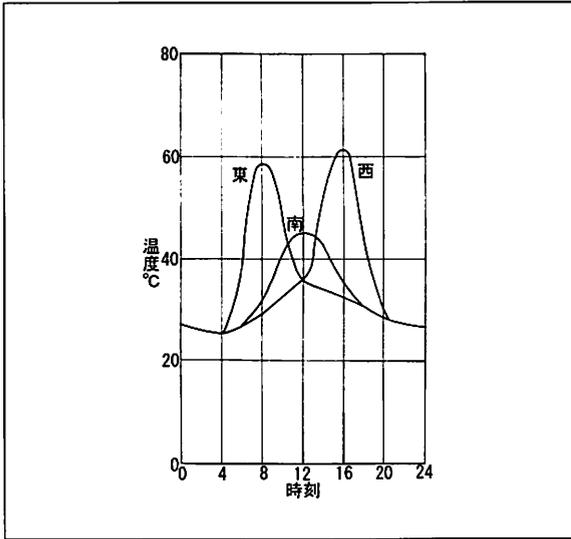


Fig. 2 東京7月23日の相当外気温度の例(井上宇市著 空調和ハンドブック⁴⁾ よりプロットしたもの)³⁾

射を屋根が受けても室内側に影響するのは14時間後の深夜になるというようなことである。また深夜に昼の暑い日射の影響が室内側に現れても、振幅の減少も大きいので、影響は殆どないということになる。このような熱容量に影響する物理量が比熱である。Table 3からTable 9に建築材料の密度 ρ (kg/m³)、熱伝導率 λ (W/mK)、比熱 c (J/kgK)、水蒸気拡散抵抗 μ (-)の一覧を示す。

Table 2 アスファルト・れき骨・コンクリート²⁾

材 料	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	c (J/kgK)	μ (-)	
				乾燥	湿潤
アスファルト	2100	0.70	1000	50000	50000
れき骨(建材)	1050	0.17	1000	50000	50000
れき骨 (シート/道路)	1100	0.23	1000	50000	50000
コンクリート:中程	1800	1.15	1000	100	60
度のかさ密度	2000	1.35	1000	100	60
	2200	1.65	1000	120	70
コンクリート: 高いかさ密度	2400	2.00	1000	130	80
鉄筋コンクリート (鋼1%)	2300	2.30	1000	130	80
鉄筋コンクリート (鋼2%)	2400	2.50	1000	130	80

Table 3 ゴム²⁾

材 料	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	c (J/kgK)	μ (-)	
				乾燥	湿潤
ゴム	1200	0.17	1400	10000	10000
合成樹脂	1700	0.25	1400	10000	10000
多孔質ゴム又は 合成樹脂:下敷物	270	0.10	1400	10000	10000
フェルト下敷	120	0.05	1300	20	15
ウール下敷	200	0.06	1300	20	15
コルク下敷	<200	0.05	1500	20	10
コルクタイル	>400	0.065	1500	40	20
じゅうたん・ じゅうたん床	200	0.06	1300	5	5
リノリウム	1200	0.17	1400	1000	800

Table 4 ガラス²⁾

材 料	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	c (J/kgK)	μ (-)	
				乾燥	湿潤
ソーダガラス (フロートガラス含む)	2500	1.00	750	∞	∞
水晶ガラス	2200	1.40	750	∞	∞
ガラスモザイク	2000	1.20	750	∞	∞

Table 5 気密・水密材料、断熱材料²⁾

材 料	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	c (J/kgK)	μ (-)	
				乾燥	湿潤
シリカゲル	720	0.13	1000	∞	∞
詰め物のない シリコン	1200	0.35	1000	5000	5000
詰め物のある シリコン	1450	0.50	1000	5000	5000
発泡シリコン	750	0.12	1000	10000	100000
ウレタン/発泡ポリ ウレタン(断熱材)	1300	0.21	1800	60	60
軟質ポリ塩化 ビニル(PVC-P)	1200	0.14	1000	100000	100000
発泡エラストマー	60~80	0.05	1500	10000	10000
発泡ポリウレタン (PU)	70	0.05	1500	60	60
発泡ポリエチレン	70	0.05	2300	100	100

Table 6 石膏・漆喰・モルタル²⁾

材 料	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	c (J/kgK)	μ (-)	
				乾燥	湿潤
石膏	600	0.18	1000	10	4
石膏	900	0.30	1000	10	4
石膏	1200	0.43	1000	10	4
石膏	1500	0.56	1000	10	4
石膏ボード	900	0.25	1000	10	4
漆喰とモルタル					
石膏断熱漆喰	600	0.18	1000	10	6
石膏漆喰	1000	0.40	1000	10	6
石膏漆喰	1300	0.57	1000	10	6
石膏、砂	1600	0.80	1000	10	6
石灰、砂	1600	0.80	1000	10	6
セメント、砂	1800	1.00	1000	10	6

Table 8 土壌・岩石・瓦など²⁾

材 料	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	c (J/kgK)	μ (-)	
				乾燥	湿潤
粘土又は泥土	1200~	1.5	1670~	50	50
又はスケール	1800		2500		
砂と砂利	1700~	2.0	910	50	50
	2200		1180~		
クリスタル粉	2800	3.5	1000	10000	10000
自然石					
堆積岩自然石	2600	2.3	1000	250	2
軽鼠スチール	1500	0.85	1000	30	20
軽鼠岩石	1600	0.55	1000	20	15
玄武岩	2700~	3.5	1000	10000	10000
	3000				
片麻岩	2400~	3.5	1000	10000	10000
	2700				
花崗岩	2500~	2.8	1000	10000	10000
	2700				
大理石	2800	3.5	1000	10000	10000
粘板岩スレート	2000~	2.2	1000	1000	800
	2800				
石灰岩:特別軟質	1600	0.85	1000	30	20
石灰岩:軟質	1800	1.1	1000	40	25
石灰岩:やや硬質	2000	1.4	1000	50	40
石灰岩:硬質	2200	1.7	1000	200	150
石灰岩:特別硬質	2600	2.3	1000	250	200
砂岩	2600	2.3	1000	40	30
天然軽石	400	0.12	1000	8	6
合成樹脂石	1750	1.3	1000	50	40
屋根瓦石:粘土	2000	1.0	800	40	30
屋根瓦石:コンクリート	2100	1.5	1000	100	60
板:磁器/陶器	2300	1.3	840		∞
板:合成樹脂	1000	0.20	1000	10000	10000

Table 7 木材²⁾

材 料	ρ (kg/m ³)	λ (W/mK)	c (J/kgK)	μ (-)	
				乾燥	湿潤
構造用木材	500	0.13	1600	50	20
構造用木材	700	0.18	1600	200	50
合板	300	0.09	1600	150	50
合板	500	0.13	1600	200	70
合板	700	0.17	1600	220	90
合板	1000	0.24	1600	250	110
セメント含有	1200	0.23	1500	50	30
おがくず板					
おがくず板	300	0.10	1700	50	10
おがくず板	600	0.14	1700	50	15
おがくず板	900	0.18	1700	50	20
OSB板	650	0.13	1700	50	30
MDFを含む	250	0.07	1700	5	2
木毛板					
MDFを含む	400	0.10	1700	10	5
木毛板					
MDFを含む	600	0.14	1700	10	12
木毛板					
MDFを含む	800	0.18	1700	10	20
木毛板					

<参考文献>

- 1) J. Berber: Bauphysik – Wärmetransport – Feuchtigkeit – Schall : Bernh. Friedr. Voigt (1979)
- 2) Erich Cziesielski: Bauphysik Kalender 2004: Ernst & Sohn (2004)
- 3) 青木 幹, 田中 辰明: 断熱基準と外断熱工法: 建築技術 No.294 (1976) p.129-137
- 4) 井上 宇市: 新版 空気調和ハンドブック: 丸善株式会社 (1967)

建築物理学講座

第10講「建築材料の水分吸収」

田中 辰明

柚本 玲

(お茶の水女子大学名誉教授・工博) (お茶の水女子大学田中研究室・博士(生活科学))



はじめに

建築材料の多くは水を吸収する。この事により建築物が汚染をきたしたり、カビや藻類が生殖し微生物汚染をもたらす場合がある。また、建築物が湿潤になることにより熱を通しやすくなり、熱負荷の増大をもたらすこともある。建築材料の吸水は毛管現象によって生じるものが多い。建築材料と毛管現象の研究、特に実験研究はスイスが盛んで、Georg Staufenbiel氏、Jopsef Wessig氏、両氏の研究は有名である。両氏の著書、Bauphysik und Baustofflehre Bauverlag 1986を参考に建築物の水分吸収について解説を行う。熱と湿気の同時移動非定常計算プログラムWUFIでは建築材料の熱・湿気特性として吸水率、空隙率など、わが国ではあまり用いられない物性値を使用している。これら物性値を理解することも本講の目的である。

1. 毛管現象

建材の表面に水分が付着し表面を湿らせると、水分子と建材の分子が吸着力を出し、水分が建材の中に浸入していく。多くの建材には微細な孔があり、それらの多くは独立した孔であるが、お互いが細い管路で繋がった構造になっている場合もある。建材表面にある孔は外気に向けて開放されており、この表面の孔が管路に繋がっていると水分は建材の奥深くにまで浸入する。Fig.1に建材の孔の形態を示す。ここでBと示した例は気泡コンクリート、軽量レンガ、気泡粘土、泡ガラス、発泡合成樹脂等の発泡による孔である。Sと示した形態は粘土を練る時に出来る構造上の孔で、例えば粘土で作るレンガに見られる。Hと示した形態は、粒子または繊維の間出来る孔で砂や石綿に見られる。Tの形態は水分が乾くと

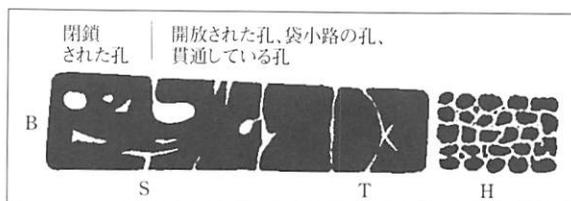


Fig.1 建材の孔の形態¹⁾

きに生じる気泡である。

表面に開放された気泡が管路でつながり、かつ直径が0.1mmよりも小さい場合を毛管と呼ぶ。毛管があると、毛管現象という力が働き水分を引き付ける。例えば、湿球温度計は湿球に取り付けたガーゼの先端を水の入った容器に入れ、ガーゼが水を引き上げることで湿球が湿るように出来ている(乾湿温度計では、蒸発し気化熱を奪われることで低くなる湿球温度と乾球温度の差から相对湿度等を読み取るわけである)。このガーゼのように水が狭い隙間や細い管を吸い込まれる現象を毛管現象と呼んでいる。建材でも毛管現象が生じて、水分が建材の中まで運搬されていくのである。

有孔材料は単に外表面積を持つだけでなく、内表面積を持っている。この内表面積の総和は意外に大きなものとなる。概念的な内表面積計算をFig.2、Table 1に示す。Fig.2、Table 1の左の図は粒子の混合物、右の図は多孔質の材料を示す。左の図は一辺が1cmすなわち、1000mm³の立方体に1辺が1mmの立方体が詰まっている状態を示している。この場合内表面積の総和は60cm²になる。この1辺が1mmの立方体を小さくし、1辺が0.1mmにすると、内表面積は600cm²、1μmにすると6m²、10nmにすると、600m²の大きさにまでなってしまう。

右の図は多孔質材料であるが、1cm³の立方体に直径が0.6mmの孔を10²個設けると内表面積は20cm²、直径6μmの孔を10⁶個設けると内表面積は2000cm²、直径60nmの孔を10¹⁰個設けると内表面積は20m²、直径6nmの孔を

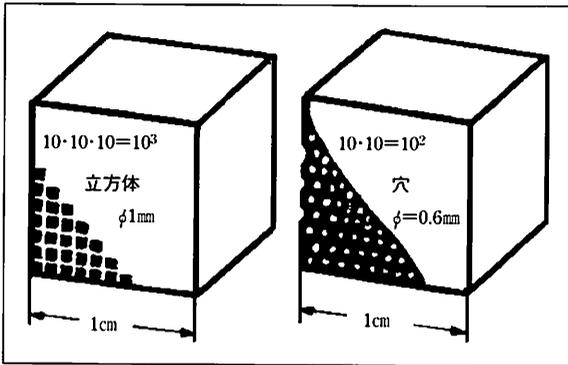


Fig.2 内表面積計算の概念¹⁾

Table 1 内表面積計算の例¹⁾

1cmの立方体を切り分ける			1cmの立方体に孔を設ける		
立方体数	一辺長さ	内表面積	孔の数	孔の数	内表面積
10^3	1 mm	60 cm ²	10^3	0.6 mm	20 cm ²
10^6	0.1 mm	600 cm ²	10^6	6 μm	2000 cm ²
10^{12}	1 μm	6 m ²	10^{12}	60 nm	20 m ²
10^{16}	10 nm	600 m ²	10^{16}	6 nm	200 m ²

10^{12} 個設けると内表面積は200 m²になる事を示している。

2. 孔の接合部の種類と点滴実験

孔の接合部とは固体材料の中で孔がどのような状態で存在しているかを示すものである。直径が0.1mmの孔を大きな孔と呼び、この場合は孔の開口部を肉眼で見ることが出来る。一方、孔の直径が0.1mmよりも小さいものは小さな孔と呼ばれ、その開口部は肉眼で見ることが出来ない。

材料の吸水性は点滴実験で行なうのが分かりやすい。試験体は3個～5個用意し、Fig.3に示す要領で、点滴瓶から水滴を落とし、15分経過するまで毎分の材料による水分の吸収を観察する。表面に水滴が残る材料は気密性に富んだ材料といえ、直ちに(多くの場合15秒以内に)吸水する材料は吸水性が高い材料として評価される。

さらに、Fig.4に示すように垂直に立てた試験体に25cm離れた地点から垂直にスポイトで水を5秒間スプレーする試験がある。この際に手は同じ圧力で水のスプレーを行い、試験体にできた水のしみの幅と長さを測定する。Fig.3の場合は水平に置かれた試験体であったが、この場合は垂直に置かれる材料での評価に適する。例えば、各種の建物表面、石の壁体、コンクリート壁、モルタルプラスターにより仕上げられた壁、耐水性の壁体、

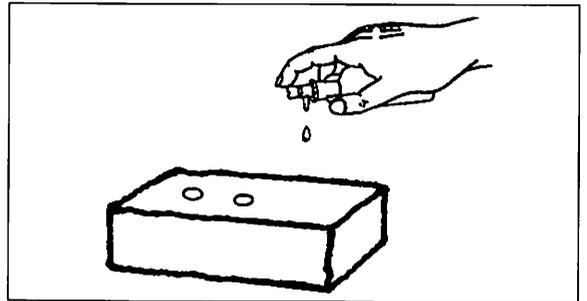


Fig.3 点滴実験の様子¹⁾

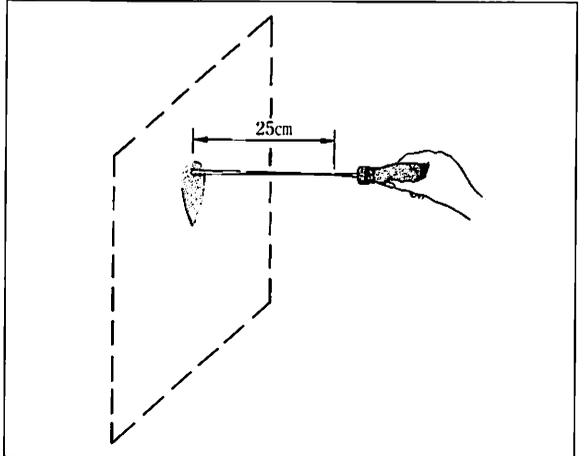


Fig.4 垂直に立てた試験体の点滴実験の様子¹⁾

垂直に立てられた石膏、気泡コンクリート、軽量コンクリートなどに適する。

3. レンガの短時間吸水試験

レンガ等の短時間吸水試験装置の概念図をFig.5に示す。試験体のレンガ等を容器に入れ、試験体が0.5cm～1cm浸かるように水を入れる。この時、試験体の吸水により減った水は瓶より補給される。容器に入れる前後のレンガの質量を計測することにより、吸水量(g)を求める。試験体下面の単位面積(1 dm²)当たりの1分間の質量変化(g)が吸水能力(g/dm²・min)ということになる。

この試験方法は現場試験に適し、撥水処理が行われた壁体が数年後にも効力があるか否かの試験にも使用される。スイスではこの試験方法が規格化されている。この試験方法は短時間に吸水する材料の試験に適している。

Fig.6に18032個のレンガについて吸水能力試験を行った頻度分布を示す。目地モルタルがあるような壁体ではモルタルが若ければ吸水量が多くなる。この試験方

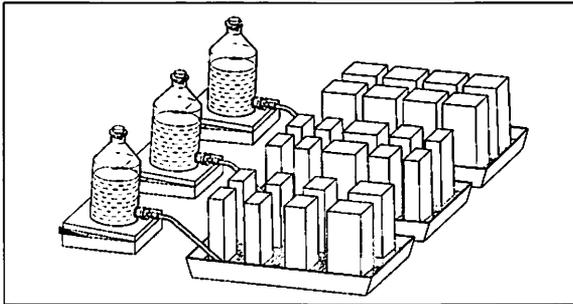


Fig.5 レンガ等の短時間吸水試験装置の概念図 1)

法はスイスのHaller氏により開発されたことからHaller法とも呼ばれている。

4. 材料の吸水速度、水浸入率 v

材料の吸水速度、水浸入率 v の試験は建築物における毛管現象の試験である。合成樹脂性の容器 (630mm×400mm×65mm) に試験体となる建築材料を入れ、水の高さが0.5cm～1cmになるように注水する。試験体の毛管現象により吸水され、一定時間である長さ分、吸い上げられる。吸水速度もしくは水浸入率 v は吸い上げられた毛管の長さ (l) を時間で除する事で得られる。単位は $\text{cm}/\text{h}^{0.5}$ である。

$$\text{式) } 1 \quad v = \frac{l}{\sqrt{h}}$$

ここで v : 水浸入率 ($\text{cm}/\text{h}^{0.5}$)、 l : 吸い上げられた毛管の長さ (cm)、 h : 時間 (h)

吸水能力は材料である試験体を水に入れたときは大きく、徐々に少なくなる。横軸を時間の平方根 $h^{0.5}$ として吸水長さをタテ軸にプロットすると、吸水長さと吸水時間の関係を直線で示すことが出来る (Fig.7参照)。

Fig.7においてレンガは $14\text{cm}/\text{h}^{0.5}$ 、石膏ボードは $13\text{cm}/\text{h}^{0.5}$ 、有孔石膏ボードは $11\text{cm}/\text{h}^{0.5}$ 、石膏砂岩KSVm12は $6.5\text{cm}/\text{h}^{0.5}$ 、気泡コンクリートは $5\text{cm}/\text{h}^{0.5}$ 、軽量レンガは $3.5\text{cm}/\text{h}^{0.5}$ 、固焼きレンガは $0.5\text{cm}/\text{h}^{0.5}$ となる。

5. 材料の吸水能力、吸水係数 w

吸水能力とは建築材料の微細な孔が、建築材料の表面を通して一定時間に水をどの程度吸水するかを示す尺度である。実験方法はFig.5に示すものと似ている。この

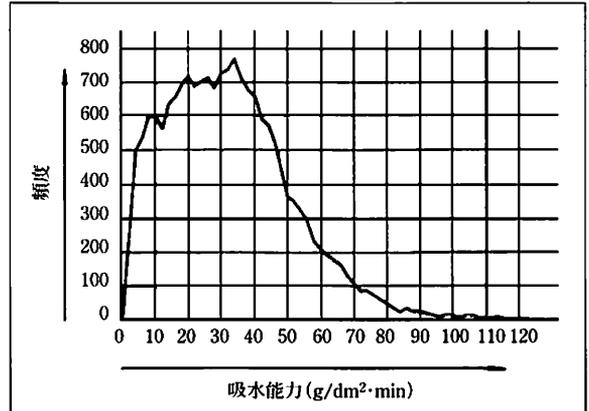


Fig.6 レンガ吸水能力試験の頻度分布 1)

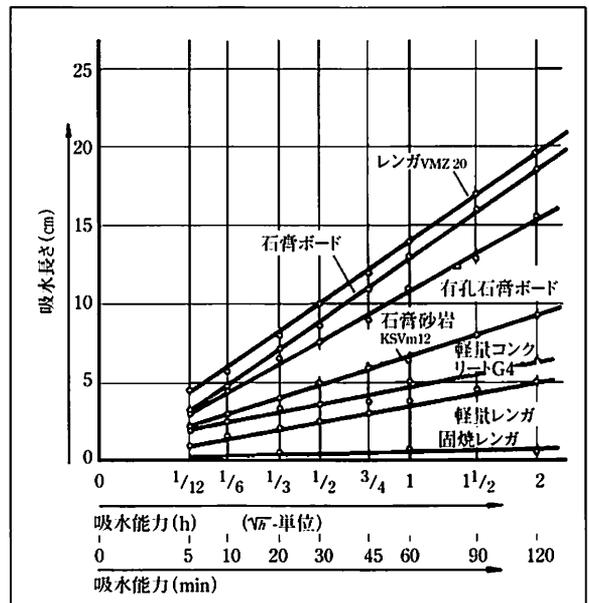


Fig.7 吸水長さと吸水時間の関係 1)

試験では、試験体の側面4面をフォイルで包み、側面からは水が浸入しないようにする。つまり、水は試験体の下部表面からのみ吸水される。こうして試験前、試験が始まってから一定時間ごとに試験体質量を測定し、吸水量 (kg) を求める。吸水係数 w はすなわち試験体の吸水面 1m^2 を通して最初の1時間にどれだけの水が吸水されたかを示し、単位は ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$) となる。吸水係数試験結果の例をFig.8に示す。またFig.9、Fig.10、Fig.11に建築材料の吸水曲線について示した。

$$\text{式) } 2 \quad w = \frac{Q}{s\sqrt{h}} \quad (\text{一般に試験では } 1\text{m}^2 \text{ で実施})$$

Q: 吸水量 (kg)、s: 底面積、h: 時間

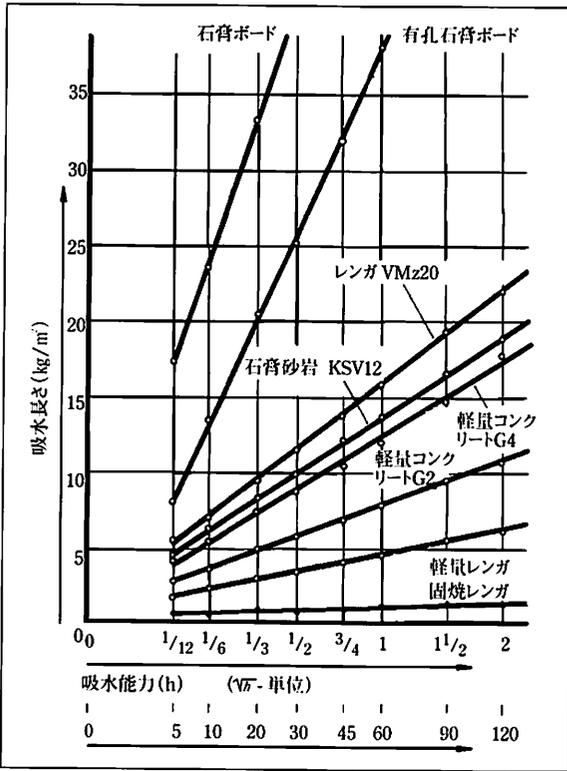


Fig.8 吸水係数試験結果の例 1)

Table 2 吸水係数試験結果の例 1)

建 材	ρ	w
石膏ボード	750	57
有孔石膏ボード	580	38
レンガVMz20	1790	16
石膏砂岩KSVm12	1730	14
軽量コンクリートG4	700	12
軽量コンクリートG2	530	8
軽量レンガ	810	4.5

* ρ :密度 (kg/m³), w:吸水係数 (kg/m²·h^{0.5})

<参考文献>

- 1) G. Staufenbiel, J. Wessig: Bauphysik und Baustofflehre -Eine Einführung in Experimenten- Adhäsion Porigkeit Kapillarität: Bauverlag (1986)
- 2) Erich Cziesielski: Bauphysik Kalender 2004: Ernst & Sohn (2004)
- 3) Lutz, P., Jenisch, R., Klopfer H., Freymuth, H., Krampf, L.: Lehrbuch der Bauphysik, Teubner- Verlag (1994)
- 4) Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten: Stuttgart Universität Diss (1994)
- 5) Gerrecht, H.: Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk: Karlsruhe, Universität Diss., (2000)
- 6) Hohmann, R.: Bestimmung der Feuchtepufferfunktion von Innenputzen, Essen, Universität GH, Diss. (1996)

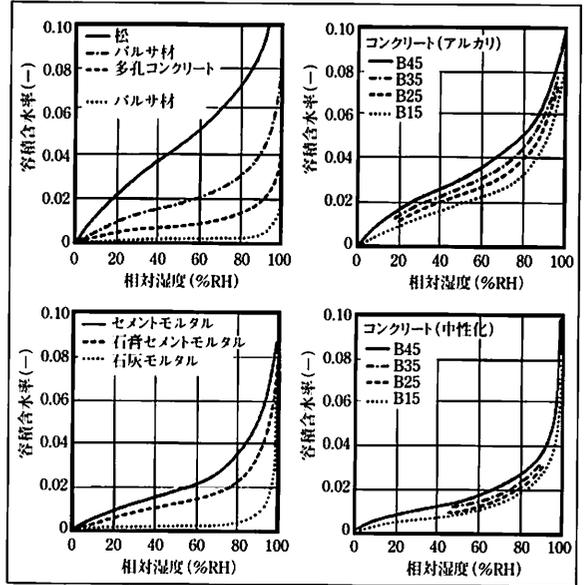


Fig.9 建築材料の吸水曲線 (容積含水率) 2), 3)

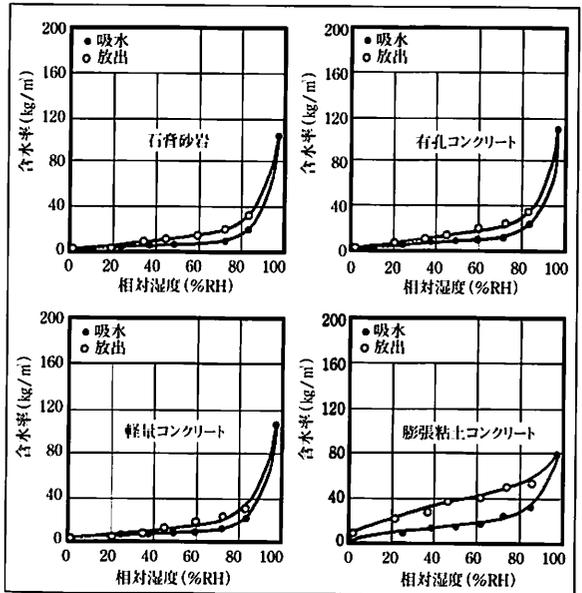


Fig.10 建築材料の吸水曲線 (含水率) 2), 4)

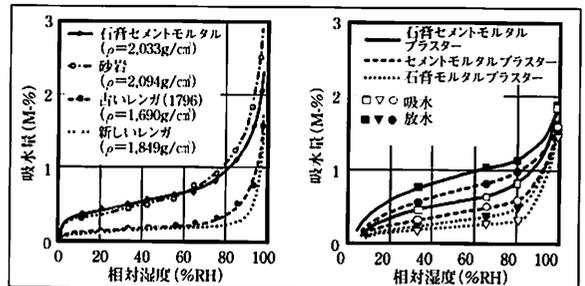


Fig.11 建築材料の吸水曲線 (吸水量) 2), 左5), 右6)

建築物理学講座

第11講「非定常熱湿気同時移動解析プログラムWUFIで使用する物性値」

田中 辰明

柚本 玲

(お茶の水女子大学名誉教授・工博) (お茶の水女子大学田中研究室・博士(生活科学))



はじめに

建物に対する熱と湿気の影響を考える場合、熱と湿気を個別に考えるのではなく相互に関係するものとして解析しなければならない。自然の気象条件における主要な熱湿気輸送メカニズムを考慮した非定常熱湿気同時移動解析により、熱湿気性状を把握する必要がある。シミュレーション結果の良し悪しは、与える物性値に依存する。本講は文献2)、3)を参考にした拙著「これからの外断熱住宅¹⁾」第3章を元にまとめた。

1. 空隙率

空隙率は湿気や水分を吸収する材料の最大含水率を予測するために必要な物性値であり、材料中の空隙の占める体積が材料の体積中どれだけの割合かという物性値で、式) 1より求められる。

$$\text{式) 1} \quad p = 1 - (\rho_{\text{dry}} / \rho_{\text{solid}})$$

p : 空隙率(m³/m³)、ρ_{dry} : 絶乾時の密度(kg/m³)、ρ_{solid} : 吸水時の密度(kg/m³)

2. 含水率の換算式

建材には吸湿性のあるものとなないものがある。ガラスや金属など多孔質で無い材料の場合、含水率はほとんど無いとみなすことができる。しかし、吸湿性のある多孔質の建材(木材や、コンクリートなど)の場合、周囲と平衡状態になるまで空気中の水分を吸収していく。当然、相対湿度が高いほど含水率が大きくなるが、周囲の温度にはあまり影響されない。この性質は、それぞれの湿度

における建材の含水率をプロットして得られる建材固有の曲線によってあらわすことができる。

周囲の湿度が95%RHまではこの曲線で考えることが出来るが、95%RHを超えるとほとんどの場合、結露が生じ始め建材内の空隙部分は水で満たされている状態になる。そうなるまでには水分が気体状態であったため自然に吸放湿できていたものが、液水であるがために吸放湿させるための圧力が必要となる。その時の含水率を知るには特殊な測定をしなければならないが、80%RHの時と95%RHの時の含水率が分かれば式) 2および式) 3により近似させることで予測することができる。

$$\text{式) 2} \quad \varphi = \exp\left(-\frac{p_c}{\rho_w R_D T}\right)$$

φ : 相対湿度、p_c : 測定圧力(Pa)、ρ_w : 密度、R_D : 水蒸気の気体定数、T : 温度

$$\text{式) 3} \quad u(p_c) = \frac{u_f}{1 + \left(\frac{p_c}{p_{k1}}\right)^{pk2}}$$

u : 相対湿度、p : 圧力

3. 水分移動係数(毛細管輸送)

液水は毛細管輸送で移動し、これは多孔質建材内の空隙で生じる水分移動の形態である。外壁に雨がかった場合、それを建材が吸う場合とそれが外に放出される場合で移動のスピードや水分の分布が異なる。そこで、吸水時と放出時にスピードの異なる2つの水分移動係数が必要になる。この係数は吸水実験で、建材内での含水率分布の時間変化を吸水から放出まで観察することで

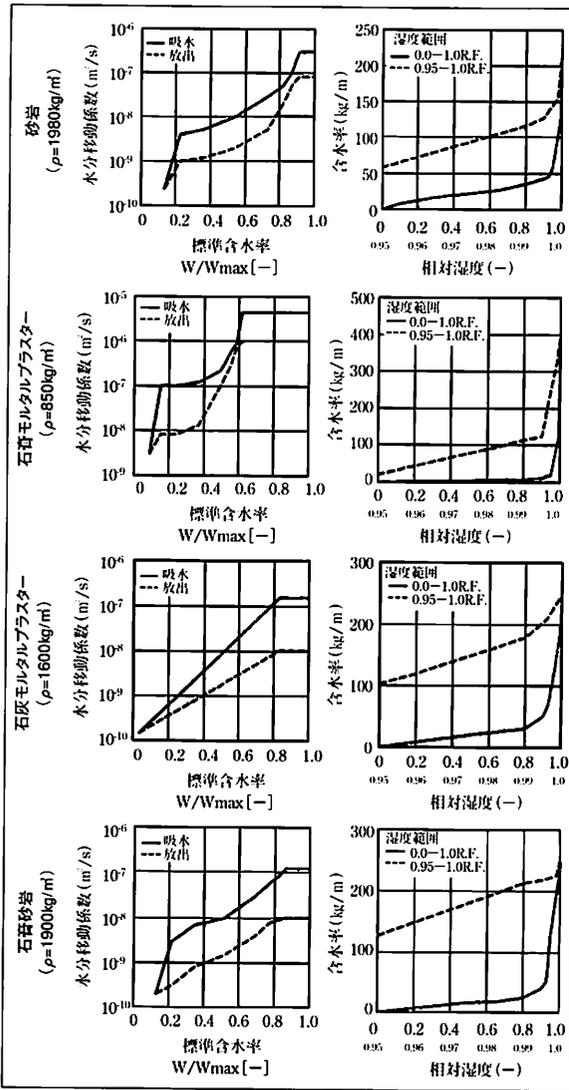


Fig. 1 建築材料の水分移動係数⁶⁾

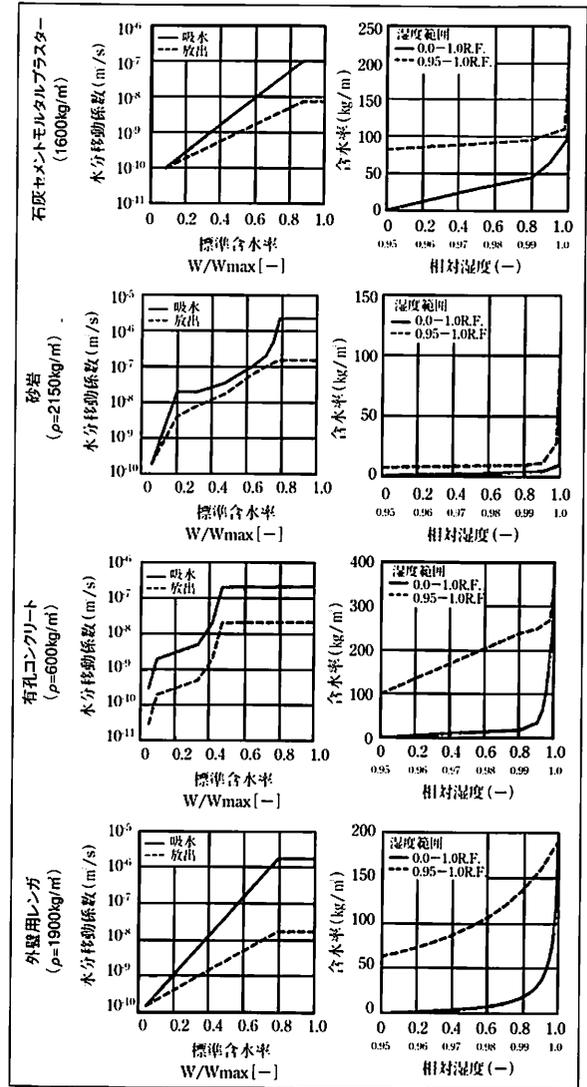


Fig. 2 建築材料の水分移動係数⁶⁾

得られる。これらの係数は相対湿度80%RHのときの含水率と飽和含水率が分かれば、式) 4の近似式で求めることができる。

$$\text{式) 4 } D_{ws}(w) = 3.8(A/w_f)^2 1000^{w/w_f - 1}$$

$$\text{式) 5 } D_{ww}(w_f) = \frac{D_{ws}(w_f)}{10}$$

D_{ws} : 吸水時の水分移動係数 (m^2/s)、 D_{ww} : 放出時の水分移動係数 (m^2/s)、 A : 吸水係数 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$)、 w : 含水率 (kg/m^3)、 w_f : 飽和含水率 (kg/m^3)

4. 物性値

Table 1からTable 7に建材の物性値を示す。記号は密度 ρ (kg/m^3)、 $23^\circ\text{C} \cdot 50\%RH$ の場合の水蒸気含有 u (kg/kg)、 ϕ (m^3/m^3)、 $23^\circ\text{C} \cdot 80\%RH$ の場合の水蒸気含有 u (kg/kg)、 ϕ (m^3/m^3)、水蒸気含有に対する換算係数 f_u (-)、 f_ϕ (-)、水蒸気拡散抵抗係数 μ_{tr} : 乾燥 (-)、 μ_i : 湿潤(-)、比熱 c_p (J/kgK)、空隙率 p (m^3/m^3)、熱伝導率 λ (W/mK)、 λ 増加: 吸湿による熱伝導率の増加、 $23^\circ\text{C} \cdot 80\%RH$ のときの含水率 U_{80} (kg/m^3)、飽和含水率 U_i (kg/m^3)、吸水係数 w ($\text{kg}/\text{m}^2\text{h}^{0.5}$)、吸水係数 A ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{0.5}$)を示す。

Table 1 断熱材、構造材の防湿技術関連物性値と比熱 4), 5)

材 料	密度 ρ	水蒸気含有(23°C)				水蒸気含有に対する 換算係数		水蒸気拡散 抵抗係数		比 熱 c_p
		50%RH		80%RH		f_u	f_v	μ_{tr}	μ_f	
		u	ψ	u	ψ					
押出発泡スチレン	10-50		0		0		4	60	60	1450
皮付押出発泡スチレン	20-65		0		0		2.5	150	150	1450
硬質発泡ウレタン	28-55		0		0		3	60	60	1400
ロックウール	10-200		0		0		4	1	1	1030
硬質発泡フェノール	20-50		0		0		5	50	50	1400
泡ガラス	100-150	0		0		0		∞	∞	1000
バーライト板	140-240	0.02		0.03		0.8		5	5	900
発泡コルク	90-140		0.008		0.011		6	10	5	1560
軽量木繊維板	250-450		0.03		0.05		1.8	5	3	1470
木繊維断熱板	150-250	0.1		0.16		1.5		10	5	1400
発泡尿素樹脂板	10-30	0.1		0.15		0.7		2	2	1400
発泡ポリウレタン	30-50		0		0		3	60	60	1400
低密度ロックウール	15-60		0		0		4	1	1	1030
低密度セルローズ繊維	20-60	0.11		0.18		0.5		2	2	1600
充填発泡バーライト	30-150	0.01		0.02		3		2	2	900
充填発泡パーミキュライト	30-150	0.01		0.02		2		3	2	1080
充填発泡粘土	200-400	0		0.001		4		2	2	1000
ポリスチレン粘土	10-30		0		0		4	2	2	1400
充填レンガ	1000-2400		0.007		0.012		10	16	10	1000
石膏砂岩	900-2200		0.012		0.024		10	20	15	1000
発泡剤入コンクリート	500-1300		0.02		0.035		4	50	40	1000
硬化剤入コンクリート	1600-2400		0.025		0.04		4	150	120	1000
ポリスチレン混入コンクリート	500-800		0.015		0.025		5	120	60	1000
発泡粘土入コンクリート	400-700	0.02		0.03		2.6		6	4	1000
発泡剤多量混入コンクリート	800-1700	0.2		0.03		4		8	6	1000
発泡剤として70%以上の 高カスラップ混入コンクリート	1100-1700	0.02		0.04		4		30	20	1000
高カ処理された岩石を 多量に含むコンクリート	1100-1500	0.02		0.04		4		15	10	1000
有孔コンクリート	300-1000	0.026		0.045		4		10	6	1000
軽量剤混入コンクリート	500-2000		0.03		0.05		4	15	10	1000
モルタル	250-2000		0.04		0.06		4	20	10	1000

Table 2 自然石の熱と湿気に関する物性値 4), 6)

材料	ρ	p	c_{tr}	λ_{tr}	λ 増加	μ	U_{80}	U_f	w	A
砂岩	1980	0.23	850	1.7	8	20	35.6	210	0.043	2.58
砂岩	2050	0.22	850	1.8	8	15	12	180	0.095	5.7
砂岩	2440	0.13	850	2.25	8	140	2.5	75	0	0
砂岩	2150	0.14	850	2.3	8	32	3.4	110	0.05	3
砂岩	1950	0.24	850	1.7	8	17	12.4	200	0.286	17.16
砂岩	2120	0.17	850	1.6	8	33	19	130	0.021	1.26
砂岩	2080	0.227	850	1.7	8	14	0.075	170	0.26	15.6
砂岩	2263	0.13	850	1.8	8	26	10.4	110	0.016	0.96
砂岩	2300	0.05	850	2.3	8	70	6	40	0.0025	0.15

ρ : 密度 (kg/m³)、 μ_{tr} : 乾燥時の水蒸気拡散抵抗係数(-)、 μ_f : 湿潤時の水蒸気拡散抵抗係数(-)、比熱 c_p (J/kgK)、空隙率 p (m³/m³)、 λ_p : 熱伝導率 (W/mK)、 λ 増加: 吸湿による熱伝導率の増加、 U_{80} : 23°C・80%RHのときの含水率 (kg/m³)、 U_f : 飽和含水率 (kg/m³)、 w : 吸水係数 (kg/m²h^{0.5})、 A : 吸水係数 (kg/m²s^{0.5})

Table 3 鋳物材料の熱と湿気に関する物性値 4), 6)

材 料	ρ	p	c_{tr}	λ_{tr}	λ 増加	μ	U_{80}	U_f	w	A
コンクリート	2300	0.18	850	1.6	8	180	85	150	0.003	0.18
コンクリート(B15)	2200	0.18	850	1.6	8	92	8	175	0.016	
コンクリート(B25)	2220	0.18	850	1.6	8	105	8	160	0.019	
石膏ボード(上端)	1960	0.23	850	1.6	1	18	8	185	0.212	
石膏ボード(下端)	1910	0.237	850	1.6	1	18	8	168	0.148	
セメント板(中間層)	1970	0.177	850	1.6	1	69	8	152	0.016	
セメント板(上端)	1890	0.2	850	1.6	1	58	8	168	0.025	
セメント板(下端)	1990	0.175	850	1.6	1	99	8	145	0.012	
細かい添加物を含む石膏モルタル	1700	0.35	850	0.8	6.29	14.8	12.07	249.5	0.087	
粗い添加物を含む石膏モルタル	1830	0.27	850	0.7	9.98	20	10.23	211	0.067	
石膏モルタル	1785	0.28	850	0.7	6.25	15	6.53	274.6	0.153	
細かい添加物を含む石膏セメントモルタル	1880	0.28	850	0.6	10.25	50	25.66	210	0.057	
粗い添加物を含む石膏セメントモルタル	1910	0.25	850	0.8	7.03	45.9	24.65	200	0.085	
外装モルタルプaster	1150	0.6	850	0.13	3.876	12.3	44.54	163.2	0.002	
内装モルタルプaster	850	0.65	850	0.2	8	8.3	6.3	400	0.287	17.22

Table 3 鉱物材料の熱と湿気に関する物性値(つづき) 4), 6)

材 料	ρ	p	c_{tr}	λ_{tr}	λ 増加	μ	U_{80}	U_f	w	A
石膏モルタルプaster	1600	0.3	850	0.7	8	7	30	250	0.047	2.82
石膏砂岩	1900	0.29	850	1	8	28	25	250	0.045	2.7
石膏セメントモルタルプaster	1900	0.24	850	0.8	8	19	45	210	0.03	0.18
石膏セメントモルタルプaster(w=1.0-)	1900	0.24	850	0.8	8	19	45	210	0.017	1.02
合成樹脂モルタルプaster	1100	0.12	850	0.7	0	1000	10	100	0.013	0.078
セメントモルタルプaster	2000	0.3	850	1.2	10	25	35	280	0.0076	0.456
有孔コンクリート($\rho=400\text{kg/m}^3$)	400	0.81	850	0.1	3.7	7.9	8.4	380	0.056	3.36
古くなった有孔コンクリート($\rho=400\text{kg/m}^3$)	400	0.81	850	0.1	3.7	7	11	340	0.052	3.12
有孔コンクリート($\rho=500\text{kg/m}^3$)	500	0.77	850	0.12	3.7	8	9.8	435	0.067	4.02
古くなった有孔コンクリート($\rho=600\text{kg/m}^3$)	600	0.72	850	0.14	3.7	8	17	470	0.083	4.89
有孔コンクリート($\rho=600\text{kg/m}^3$)	600	0.72	850	0.14	3.7	8.3	10.7	470	0.0832	4.992
コンクリートブロック	664	0.67	850	0.14	10	4	28	291	0.047	
古いレンガ	1800	0.31	850	0.6	15	15	4.5	230	0.36	21.6
発泡レンガ	1650	0.41	850	0.6	15	9.5	9.2	370	0.4	24
手練レンガ	1725	0.38	850	0.6	15	17	2.7	200	0.3	18
外壁用レンガ	1900	0.24	850	0.6	15	10	18	190	0.11	6.6
歴史的ウィーン風レンガ	1560	0.38	850	0.6	8.5	14.9	11.8	387	0.583	
断熱レンガ	600	0.77	850	0.12	10	16	11	188	0.095	
断熱レンガ	650	0.74	850	0.13	10	15	15	178	0.097	
石膏砂岩	1830	0.35	850	1	7.999	34.1	27.5	257.1	0.059	
石膏ボード	850	0.65	870	0.163	8	6	35	399.7	1	

Table 4 断熱材の熱と湿気に関する物性値 4), 6)

材 料	ρ	p	c_{tr}	λ_{tr}	λ 増加	μ	U_{80}	U_f	w	A
ケイ酸カルシウム板	230	0.9	920	0.05	1.656	3.23	4.76	849.7	1.667	
ケイ酸カルシウム板	230	0.9	920	0.05	1.656	2.93	8.27	833.06	1.26	
ビーズ法発泡ポリスチレン	15	0.95	1500	0.04	-	30	0	0	0	0
ビーズ法発泡ポリスチレン	30	0.95	1500	0.04	-	50	0	0	0	0
ガラス繊維	30	0.99	840	0.035	1	1.3	1	1	1	1
木質繊維断熱板	155	0.981	2000	0.042	0.5	3	19	980	0.007	
鉱物繊維断熱板	115	0.95	850	0.043	3.7	3.4	1	1	1	1
コルク	150	0.9	1880	0.04	-	10	0	0	0	0
鉱物繊維	60	0.95	850	0.04	-	1.3	0	0	0	0
発泡フェノール樹脂	43	0.95	1500	0.04	-	30	0	0	0	0
発泡ポリウレタン	40	0.95	1500	0.025	-	50	0	0	0	0
発泡ポリウレタン	40	0.95	1500	0.03	-	50	0	0	0	0
発泡尿素樹脂	13	0.95	1500	0.04	-	2	0	0	0	0
押出発泡ポリスチレン	40	0.95	1500	0.03	-	100	0	0	0	0
皮付押出発泡ポリスチレン	40	0.95	1500	0.03	-	450	0	0	0	0
セルローズファイバー	70	0.95	2500	0.04	1	1.5	1	1	1	60
泡ガラス	120	0.25	850	0.045	0	10000	8.4	380	0.056	

Table 5 材木ならびに木工品の熱と湿気に関する物性値 4), 6)

材 料	ρ	p	c_{tr}	λ_{tr}	λ 増加	μ	U_{80}	U_f	w	A
柏(長さ方向)	685	0.72	1500	0.13	1.3	8	115	500	0.0073	0.438
柏(断面方向)	685	0.72	1500	0.13	1.3	140	115	500	0.0007	0.042
松	600	0.2	2000	0.16	3.272	132.6	72.09	121.87	0.001	
松	400	0.73	1880	0.082	1.3	4.3	80	600	0.0073	
松(長さ方向)	455	0.73	1500	0.09	1.3	130	80	600	0.007	0.42
松(断面方向)	455	0.73	1500	0.09	1.3	130	80	600	0.004	0.24
硬質木材	650	0.47	1500	0.13	1.3	200	98	370	0	0
木毛繊維板	300	0.8	1500	0.05	1.5	12.5	45	150	0	0
MDF板	750	0.64	1880	0.101	1.5	33	33	636	0.047	
HWL板	450	0.55	1500	0.08	2.5	9	68	350	0	0
OSB板	555	0.6	1880	0.101	1.5	287	37	593	0	
OSB板	600	0.6	1880	0.101	1.5	650	1	1	1	
OSB板	630	0.6	1500	0.13	1.5	650	1.5	1	1	
OSB板	670	0.6	1300	0.09	1.5	240	86	600	1.5	90
圧縮パネル	600	0.5	1500	0.11	1.5	70	90	400	0	0
積層板	500	0.5	1500	0.1	1.5	700	75	350	0	0
積層板	578	0.8	1880	0.102	1	917	70	578	1	
軟質板	400	0.73	1500	0.09	1.3	200	60	575	0	0

Table 6 空気層の熱と湿気に関する物性値 4), 6)

空気層	ρ	p	c_{tr}	λ_{tr}	μ	U_{80}	U_f	w	A
5 mm	1.3	0.999	1000	0.047	0.79	0	0	0	0
10 mm	1.3	0.999	1000	0.071	0.73	0	0	0	0
20 mm	1.3	0.999	1000	0.13	0.56	0	0	0	0
25 mm	1.3	0.999	1000	0.155	0.51				
30 mm	1.3	0.999	1000	0.18	0.46	0	0	0	0
40 mm	1.3	0.999	1000	0.23	0.38	0	0	0	0
50 mm	1.3	0.999	1000	0.28	0.32	0	0	0	0

Table 7 フィルムの熱と湿気に関する物性値 4), 6)

材 料	ρ	p	c_{tr}	λ_{tr}	μ	U_{80}	U_f	w	A
ルーフィング材	2400	0.001	1000	0.5	50000	-	-	-	-
クラフトペーパー	800	0.6	1500	4.2	$S_{at}=0.4$				
ナトリウムクラフトペーパー	120	0.6	1500	0.42	1250	1.8	11.2	-	-
ポリアミドフィルム	65	0.001	2300	2.9	75000	1.8	11.2	0	0
ポリエチレンフィルム	130	0.001	2300	2.3	35500	-	-	-	-
ポリエチレンフィルム	130	0.001	2300	2.3	13500				
PVCルーフィング	1000	0.0002	1500	0.16	$S_{at}=15$	0	0	0	0
ビニル壁紙	471	0.01	2300	23	$S_{at}=0.2$				

<参考文献>

- 1) 田中辰明, 柚本玲: これからの外断熱住宅: 工文社(2007)
- 2) K.Sedlbauer: Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components: Dissertation Universität Stuttgart(2001)
- 3) H.M.Künzel, 田中辰明: WUFIを使った建築部位における非定常熱湿気同時移動のシミュレーション: 月刊建築仕上技術: Vol.30, No.355(2005)
- 4) Erich Cziesielski: Bauphysik Kalender 2004: Ernst & Sohn(2004)
- 5) DIN EN 12524: Baustoffe und-produkte-Waerme-und feuchtetechnische Eigenschaften-Tabellierte Bemessungswerte.(2000)
- 6) Fraunhofer Institut für Baufysik: WUFI-Databank, Holzkirchen(2000)

建築物理学講座

第12講「非定常熱湿気同時移動解析WUFI」

田中 辰明

柚本 玲

(お茶の水女子大学名誉教授・工博) (お茶の水女子大学田中研究室・博士(生活科学))



はじめに

現在、建築物の構造体の熱及び湿気のシミュレーションは欧米では非定常解析が規格化されている(詳細は欧州規格 prEN 15026 : 建築部位および建材の熱と湿気の挙動—数値シミュレーションによる湿気性状の評価³⁾、WTA -Guidline 6-2-01/E : 熱と湿気の経時変化⁴⁾、ASHRAE Draft Standard 160 : Design criteria for moisture control in buildings. ⁵⁾)。本稿では「これからの外断熱住宅¹⁾」第4章、及び建材フォーラム(工文社)2007年10月号に掲載された「外断熱工法と湿気移動²⁾」を元に非定常熱湿気同時移動解析プログラムWUFI(ヴァーフィ)の紹介をする。

1. フラウンホーファー建築物理研究所 (IBP)

ヴァーフィはドイツの応用研究を目的とするフラウンホーファー建築物理研究所(以下IBP)により開発された。ヴァーフィ開発の元となるのは同研究所のHartwig M.Künzel博士の学位請求論文であるが、このプログラムの素晴らしさは多くの同僚がプログラムの改善とデータの補完に大いに協力していることにある。またドイツ国内で過酷な気象条件であるホルツキルヘンにあるIBPは本来建築材料や建築部位の耐候性試験等を行ってきた。耐候性試験は長期の時間と膨大な費用を必要とする根気のいる研究である。かって膨大な時間と費用を必要としたコンピュータのシミュレーションが最近では廉価なものになったので、この研究所でシミュレーション開発も行われるようになった。IBPではシミュレーション開発にあたり、その得意とする実験による裏づけを取りながら解析精度を上げている。

ヴァーフィではカビが生育するか否かの判定も行なわ

れるが、これにもこの研究所のカビ研究の専門家が協力をしている。わが国にも熱と水蒸気同時移動のシミュレーションプログラムは存在するがIBPの開発体制には残念ながらかなわない。またフラウンホーファー研究機関は設立当時から研究のための研究を行うのでなく、常に実際に役立つ研究を行う事を目的としてきた。したがってヴァーフィもユーザーにとって大変使用しやすいことが大きな特徴になっている。

2. WUFI(ヴァーフィ)とは

従来、壁内の結露の予測などには定常計算がなされてきた。しかし、定常計算では、建材中の湿気の放出、液水移動、夏型結露、湿気によるエネルギーへの影響等把握できない現象が多かった。現在、欧米ではより現実に近く精度の高い計算をすることができる非定常解析が規格化されている。

ヴァーフィは液水移動、日射を考慮した非定常熱湿気同時移動解析プログラムであり、その名称はドイツ語のWärme(熱) und (及び) Feuchte(湿気) Instationär(非定常)の略である。建材中の湿気の放出、雨水の浸透、夏型結露、湿気による断熱性への影響、夜間冷却による外表面での結露の発生、結露やカビが発生する危険性などが計算対象である。

ヴァーフィには1次元、2次元など数種類あるが、ここでは1次元のプログラムWUFI Pro(ヴァーフィ・プロ)について解説する。

ヴァーフィ・プロは実際の気候条件下で壁や屋根の構造内で熱・湿気がどのように移動していくかを正確に予測することができる1次元の非定常解析プログラムである。大きな特徴は直感的に分かりやすい画面・操作方法である。簡単な操作により、雨や日射、液水の毛細管輸送、夏型結露が考慮された正確なシミュレーションを実

施できる。

メニューに従い、構造、建物特性、表面物性、初期値、屋外気象条件、室内温湿度条件を設定し、含水率、相対湿度、臨界温湿度曲線、断面の温度・湿度・含水率分布(動画も可)などの結果を得ることができる。ゾーフイにより得られる知見には、結露の危険性、建材中の湿気の乾燥時間、降雨時の吸水、長期間の変化や改修時の影響などが挙げられる。

3. 熱と湿気の同時移動

ゾーフイでは建物部位における熱と湿気の輸送について熱についての式) 1、水分についての式) 2を同時に解くことにより解析される^{6), 7)}。

$$\text{式) 1} \quad \frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\phi p_{sat}))$$

$$\text{式) 2} \quad \frac{\partial w}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla (\phi p_{sat}))$$

H: 湿った建材のエンタルピー(J/m³)、T: 温度(K)、λ: 熱伝導率(W/mK)、h_v: 水の蒸発潜熱(J/kg)、p: 蒸気圧(Pa)、p_{sat}: 飽和蒸気圧(Pa)、δ: 空気中の水蒸気拡散伝導率(kg/msPa)、φ: 相対湿度(-)、w: 含水率(kg/m³)、D_φ: 水分移動係数(m²/s)

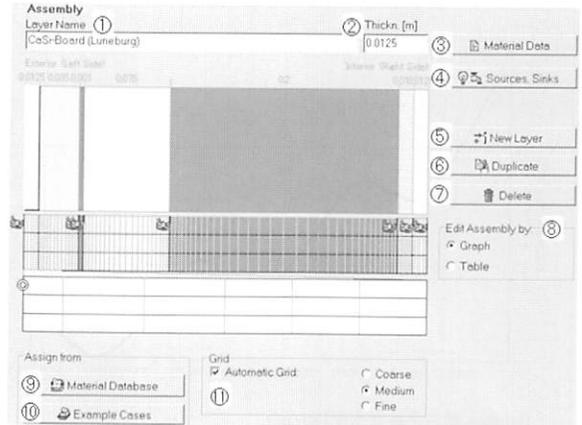
4. 条件の設定

Fig.1は構造および観測点の設定画面である。建材物性はデータベースから選択あるいは任意の値を入力できる。観測点はその点における温湿度等の変数の経時変化を出力するために設定する。

構造の外表面の方位(16方位から選択)、傾き(任意の角度の入力)、建物の高さを設定する。建物高さは戸建(10m以下)、10m以上の中高層建物の場合、0m-10m、10m-20m、20m-30mの3種類の位置から選択する。

屋外および室内表面の熱湿気特性(熱伝達抵抗、仕上の湿気の通しにくさSd値、放射熱の吸収および放散、雨のかかり方など)を設定する。

解析開始時に各建材あるいは構造全体に与える初期値を設定する。ゾーフイには各建材に関して、各相対湿度や竣工後における典型的な含水率のデータベースが搭載されており、そのデータを選択したり、任意のデー



- ① Layer Name: 層(建材)の名前
- ② Thickn: 厚み(m)
- ③ Material Data: 物性データの確認
- ④ Sources, Sinks: 発生と消失(熱、水分、換気)
- ⑤ New Layer: 新しい層の挿入
- ⑥ Duplicate: 層をコピーして挿入
- ⑦ Delete: 層の削除
- ⑧ Edit Assembly by: 層の設定方法の選択(図か表)
- ⑨ Material Database: 物性データベース
- ⑩ Example Cases: 構造
- ⑪ Grid: グリッド(解析の細かさ)

Fig.1 構造と観測点の設定画面

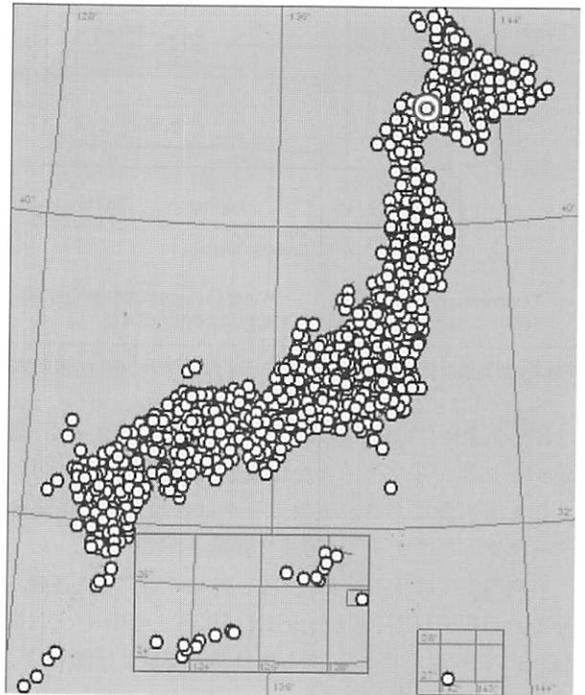


Fig.2 屋外気象条件の選択(札幌を選択した状態)

タを入力できる。

測定開始日と終了日を設定し、解析期間を決定する。通常1時間ごとに計算し、経年の水分蓄積を確認するため3年間以上分析するのが望ましく、場合によってはそれ以上の期間解析することが必要である。

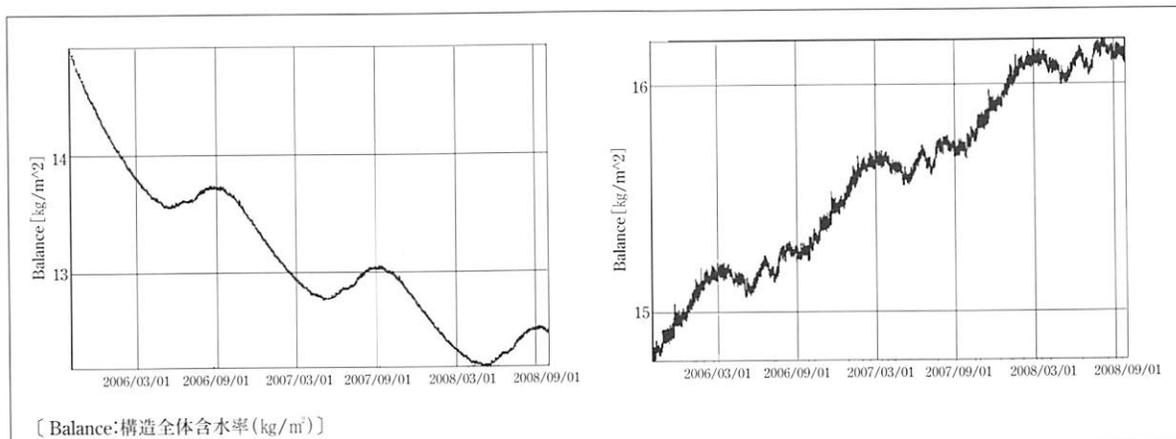


Fig.3 構造全体含水率変化(左:水分の蓄積の無い例、右:水分が蓄積し不適切な例)

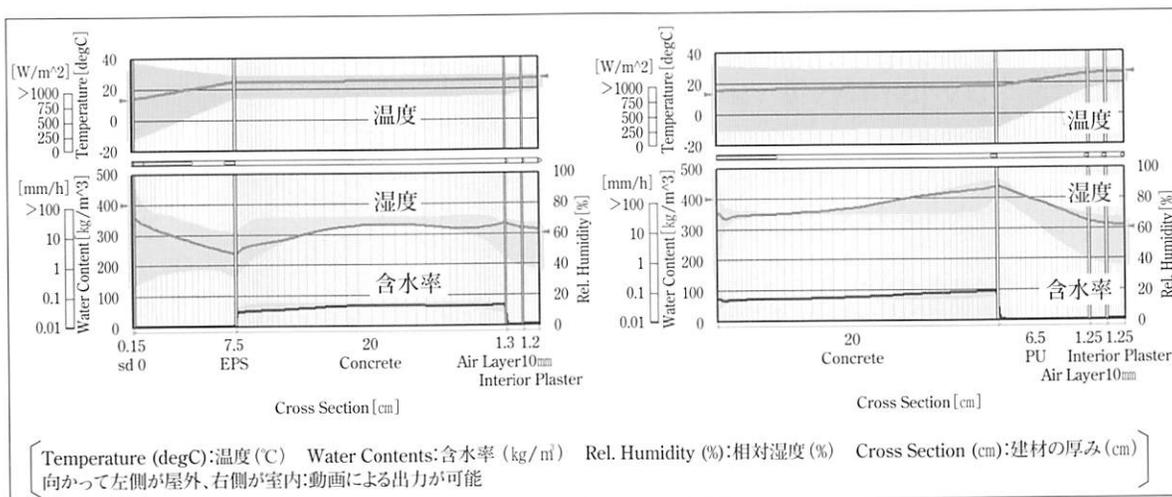


Fig.4 断面湿度分布(左:湿度が80%RH以下に保たれる例、右:湿度が80%RH以上の高湿になり不適切な例)

屋外気象条件はFig.2のような地図上で選択するか、測定データ等からファイルを作成し外気条件として用いることも可能である。気象データは拡張アメダス気象データをもとにヴァーフィ形式に変換されている。

室内温湿度はサインカーブや、外気の温湿度に連動させる欧州規格(EN13788, prEN15026)、ASHRAE規格160pにより設定できる。あるいはファイルを作成し設定することも可能である。

5. 物性データベース

IBPは「建築に関する試験・監督・認定機関」として、DAR(Deutsche Akkreditierungs Rat)という国(ドイツ)の認証機関から認証されている。データベース中、他

国のデータも各国の公的に認定されている研究所あるいは大学で測定され、ヴァーフィ搭載時にはIBPで最終チェックを行っている。わが国では、財団法人建材試験センターがこの役割を担う。

6. 解析結果

設定終了後に解析を実行し、出力される結果のうち主に含水率変化、断面湿気分布、相対湿度変化を観察した例を示す。

構造に水分が蓄積すると、初期は問題がなくても時間を経て水分による害が生じる可能性がある。したがって、構造全体含水率(kg/m²)の経年変化を観察し、増加している場合、水分蓄積の危険性があるため不適切であ

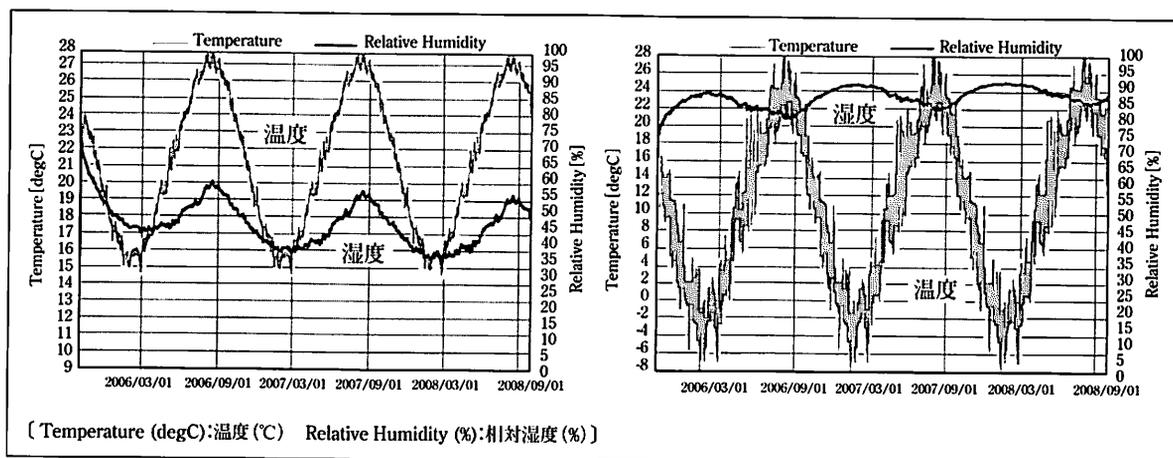


Fig.5 断熱材・コンクリート間の相対湿度変化(左:湿度が80%RH以下の例、湿度が80%RH以上の高湿になり不適切な例)

ると判断する。Fig.3に含水率が低下して問題がない例、増加して水分の蓄積が認められる例を示した。全体の含水率のほかに構造内の各建材について含水率(kg/m^3)を出力することも可能である。

Fig. 4は断面の温度、湿度、含水率分布を示すものである。これは動画でも出力できる。Fig. 4は解析終了時の断面を示しており、実線は最終日の分布、網掛けは各変数が通った履歴を示している。左側が屋外、右側が室内で縦線が建材の境界を示している。一つの目安として、壁内の相対湿度が80%RHを超えると湿気による害(カビなど)が生じるとされる。図は外気の影響を受け屋外表面付近で80%RHを超えるものの、室内側では80%RHより低く維持されている例、及び室内側の境界が80%RHを超えている例を示した。

Fig. 5にある境界における相対湿度変化を示した。一方は解析開始から80%RH以上の高湿で変化し、特に冬季に高湿度となる例を示した。このような場合、湿気による害が生じる可能性が考えられるため、何らかの対策が必要である。

これまでの変数のほかに、室内表面における臨界温湿度曲線(LIM曲線:Lowest Isoleth for Mould)を出力することができる。LIM曲線とはこの曲線以下であればカビが発育しないことを示し、LIM B Iは生物が利用できる培養質、LIM B IIは生物が利用しにくい培養質を示す⁹⁾。x軸を温度、y軸を相対湿度として結果をプロットして、曲線よりも上に点が位置するような条件ではカビ発育の可能性があると、そういった場合はカビ発育についてより詳細な検討を要する。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、フラウンホーファー建築物理研究所(http://www.japanbau.de/ibp/index_j.html)のHartwig M. Künzle氏、Daniel Zirkelbach氏、田中啓輔氏、田中絵梨氏および有限会社イーアイ(<http://www.f-ei.jp/>)の多大な協力を得た。記して謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 田中辰明, 柚本玲: これからの外断熱住宅: 工文社(2007)
- 2) 柚本玲: 外断熱工法と湿気移動-非定常熱湿気同時移動解析プログラムWUFIの解析事例紹介: 月刊建材フォーラム(2007/10)
- 3) prEN15026 建築部位および建材の熱と湿気の挙動-数値シミュレーションによる湿気性状の評価
- 4) WTA-Guideline 6-2-01/E 熱と湿気の経時変化
- 5) ASHRAE Draft Standards 160 Design criteria for moisture control in buildings.
- 6) H. M. Künzle: Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart (1995)
(フラウンホーファー建築物理研究所サイトにて公開: http://www.japanbau.de/literatur/hk_dissertation_e.pdf)
- 7) H. M. Künzle, 田中辰明: WUFIを使った建築部位における非定常熱湿気同時移動のシミュレーション: 月刊建築仕上技術: Vol.30, No.355(2005)
- 8) K. Sedlbauer: Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components: Dissertation Universität Stuttgart (2001)
- 9) K. Sedlbauer: Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components: Dissertation Universität Stuttgart (2001)