

# 建材の熱・湿気物性値を利用した定量的評価例の紹介

建物外皮の熱物性とシステムデザイン  
第3回研究会・日本熱物性学会  
大阪工業大学 佐藤真奈美

## 解析モデル

## 建材 (多孔質材料) を構成する要素

- 多孔質材料      固体実質部  
                         毛細管
- 毛細管内水分    気相水分 (水蒸気)  
                         液相水分 (毛管水、吸着水)
- 毛細管内乾燥空気

実質部に含まれる水溶性の塩、毛細管内水分のうち「固相水分 = 氷」は、ここでは扱っていない。

## 熱水分拡散方程式を構成する系

- 気相系 (3成分)  
    水蒸気、乾燥空気、固体実質部
- 液相系 (2成分)  
    吸着水・含有水、固体実質部
- 乾燥空気は液相に対し不活性で気相にのみ存在する

## 熱水分拡散方程式

熱流

$$q = -D_{00}\nabla T \quad (a)$$

気相水分流

$$j_v = -D_{10}\nabla T - D_{11}(\nabla m_v - F_w) - D_{12}\nabla P \quad (b)$$

乾燥空気流

$$j_a = -D_{20}\nabla T - D_{21}(\nabla m_v - F_w) - D_{22}\nabla P \quad (c)$$

液相水分流

$$j_l = -D_{30}\nabla T - D_{33}(\nabla m_l - F_w) - D_{32}\nabla P \quad (d)$$

## 記号解説

- T 温度、 $\mu$  水分化学ポテンシャル、 $F_w$  水分1Kgに作用する外力、 $P$  気相の圧力
- 添え字  $v$ は気相水分、 $l$ は液相水分、 $a$ は乾燥空気
- 微分演算子 (gradient)
- $D_{00}$ は熱伝導率、 $D_{10}$ は気相水分の熱拡散、 $D_{11}$ は気相水分の水分伝導率、 $D_{12}$ は気相水分の圧力拡散
- $D_{20}$ は乾燥空気に対する熱拡散、 $D_{21}$ は乾燥空気の水分伝導率、 $D_{22}$ は乾燥空気の透気率
- $D_{30}$ は液相水分の熱拡散、 $D_{33}$ は液相水分の水分伝導率、 $D_{32}$ は液相水分の圧力拡散
- 水分化学ポテンシャル $\mu$ は自由水基準の値であり、自由水をポテンシャルゼロとする、ギブスの自由エネルギーである。

## 熱水分同時移動方程式

熱流

$$q = -I \nabla T \quad (1.1)$$

水分流

$$J_w = J_v + J_l = -I'_T \nabla T - I'_m (\nabla \mathbf{m} - F_w) - I'_p \nabla P \quad (2.1)$$

$$\text{(気相)} J_v = -I'_{Tg} \nabla T - I'_{mg} (\nabla \mathbf{m} - F_w) - I'_{pg} \nabla P \quad (2.1.1)$$

$$\text{(液相)} J_l = -I'_{Tl} \nabla T - I'_{ml} (\nabla \mathbf{m} - F_w) - I'_{pl} \nabla P \quad (2.1.2)$$

湿り空気流

$$J_a = j_a + j_v = -k_p \nabla P \quad (3.1)$$

## 解説

- 熱水分拡散方程式より、材料中の温度、ポテンシャル勾配が大きくない場合、気相 - 液相間で水分の局所平衡が成り立つと見なせるとしてモデル化した熱水分同時移動方程式が式 (1.1) から (3.1) です。
- 無機質の一般的建材では水分の局所平衡の仮定は概ね条件を満足するものと考えられる。
- 木材のような植物性の有機材料ではこのような仮定は成り立ちにくいといわれている。
- 特に、木材表面での短周期での吸放湿を扱う場合では局所非平衡の状態を配慮する必要があるが、1年程度の長周期の温湿度変動を扱うような場合、材料中で水分の局所平衡が成り立つと扱っても概ね正確な挙動が得られると考えられる。

- 式中  $I$  は建材の熱伝導率  $I'$  は水分伝導率  $k_p$  は透気率

# 解析モデルと拡散係数

## 含水率をポテンシャルとした拡散方程式

熱流

$$q = -I \nabla T \quad (1.2)$$

水分流

$$J_w = J_v + J_l = -D_T \nabla T - D_m \nabla f + I'_m F_w - I'_p \nabla P \quad (2.2)$$

$$\text{(気相)} J_v = -D_{Tg} \nabla T - D_{fg} \nabla f + I'_{mg} F_w - I'_{Pg} \nabla P \quad (2.2.1)$$

$$\text{(液相)} J_l = -D_{Tl} \nabla T - D_{fl} \nabla f + I'_{ml} F_w - I'_{Pl} \nabla P \quad (2.2.2)$$

湿り空気流

$$J_a = -k_p \nabla P \quad (3.2)$$

## 式の解説

- 解析モデルに応じる拡散係数の定義を確認する。
- 水分化学ポテンシャルは直接測定が難しい物理量です。
- 水分移動の駆動力として、重量測定でその値が測定可能な含水率を用いた解析モデルを定義し解析モデルに応じた拡散係数  $D_T$ 、 $D_\mu$  等の測定について考える。

## 含水率をポテンシャルとした拡散係数

$$m = g(T, f) \quad \dots \quad \nabla m = \frac{\partial g}{\partial T} \nabla T + \frac{\partial g}{\partial f} \nabla f$$

$$D_T = I'_T + I'_m \frac{\partial g}{\partial T} \qquad D_f = I'_m \frac{\partial g}{\partial f}$$

$$D_{Tg} = I'_{Tg} + I'_{mg} \frac{\partial g}{\partial T} \qquad D_{fg} = I'_{mg} \frac{\partial g}{\partial f}$$

$$D_{Tl} = I'_{Tl} + I'_{ml} \frac{\partial g}{\partial T} \qquad D_{fl} = I'_{ml} \frac{\partial g}{\partial f}$$

## 解説

- 水分科学ポテンシャル  $\mu$  は含水率 と温度  $T$  の関数であるから、式 (1.1) から (3.1) で定義された各伝導率は含水率を水分移動の駆動力として定義した式 (1.2) から (3.2) に示された拡散係数  $D$  を用いて表現可能となる。
- ここで示される拡散係数は実測により比較的精度よく得られるものである。
- ゆえに、実測された拡散係数より、気相・液相水分が混在する建材の水分伝導率が定義可能となる。
- この拡散係数や伝導率の気・液成分分離には 建材の平衡含水率関係を示す 関数  $g$  が必要であるため、建材の平衡含水率の測定が拡散係数や伝導率決定には欠かせない。

## 湿気伝導率測定と気・液成分への分離

蒸気移動のみの水分流

$$J_w = -I \nabla p_v \quad (3.2)$$

湿気伝導率  $I'$  と気相水分の伝導率  $I'_{Tg}$

$$I'_{mg} = I' \left( \frac{\partial p_v}{\partial m} \right)_T \quad (3.2.1) \quad I'_{Tg} = I' \left( \frac{\partial p_v}{\partial T} \right)_m \quad (3.2.2)$$

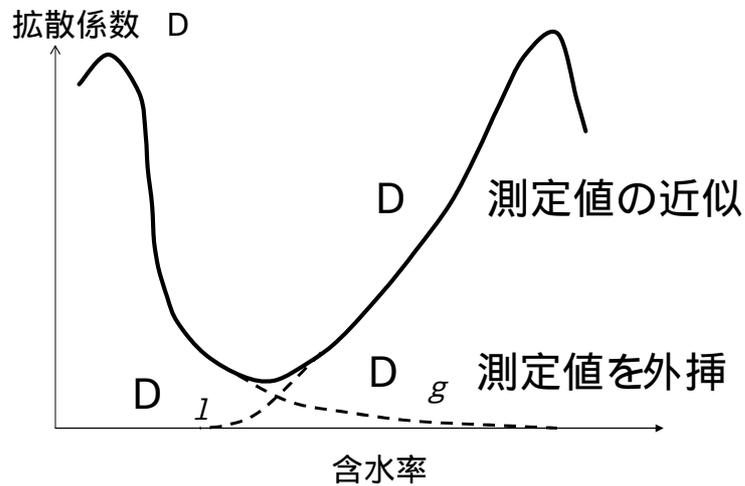
$$\{ I'_T = I'_{Tg} \}$$

$$I'_{mg} = I'_{Tg} \left( \frac{\partial p_v}{\partial m} \right)_T / \left( \frac{\partial p_v}{\partial T} \right)_m = I'_{Tg} / \left( \frac{dp_{vs}}{dT} \cdot \frac{R_v T}{p_{vs}} - \frac{m}{T} \right) \quad (3.2.3)$$

## 式の解説

- 拡散係数や伝導率測定の考え方の一例を示す。
- 温度一定の環境下で建材に grad.  $p_v$  と記号する水蒸気分圧差を与え、そのときの定常水蒸気流量  $J_w$  が測定できれば、式 (3.2) で定義した 湿気伝導率  $I'$  が得られる。
- 湿気伝導率  $I'$  と気相水分の拡散係数である水分伝導率  $D_{vg}$  と  $D_{lg}$  は式 (3.2.1)、(3.2.2) で、分離可能
- 蒸気拡散のみ生じる系では、液相水分移動の伝導率  $I'_{Tl}$  がゼロとみなせるので  $I'_{Tg}$  は  $I'_T$  と等しい。

## 拡散係数測定と気・液成分への分離



大阪工業大学 佐藤真奈美 2006-11-01

17

## 解説

- 液相水分の移動も含む、測定された拡散係数の気・液相分離の考え方について
- 含水率に応ずる測定された拡散係数は高含水域に入る前に極値となる。
- 毛細管内では中含水域から高含水域にかけて、移動する水蒸気流によってその表面に収着または吸着水が付着する。
- その結果、毛細管断面積は小さくなり蒸気の移動量が減少する。
- その結果、蒸気移動支配での拡散係数は小さくなる。
- 毛細管表面の吸着水が自由水と同様に移動したと、気・液混合の水蒸気流は増加した。
- その部分を測定値より読み取り、液相と気相の拡散係数を分離する。
- 温度勾配に対する拡散係数  $D_T$  も同様の考え方で気相成分、液相成分に分離する。

大阪工業大学 佐藤真奈美 2006-11-01

18

## 通常条件下での熱水分同時移動方程式

熱収支

$$\frac{\partial c r T}{\partial t} = \nabla (1 + r l'_{Tg}) \nabla T + \nabla r l'_{mg} \nabla m \quad (4.1)$$

$$r = H_v - H_l$$

水分収支

$$r_w \left( \frac{\partial f}{\partial m} \right) \frac{\partial m}{\partial t} = \nabla l'_m \nabla m + \nabla l'_{Tg} \nabla T \quad (4.2)$$

## 解説

- 熱収支式 (4.1) 中  $r$  は蒸気のエントルピーと液相水分のエントルピー差であり、蒸発の潜熱に相当する。
- 水分収支式 (4.2) では、建材中の含水率変動は液相水分の変動によって決定づけられる。
- 毛細管内水蒸気が含水率変動に与える影響は小さいとみなしている。
- さらに、平衡含水率関係の温度依存性は小さいので、水分収支式の左辺では  $d f / d m$  は無視できる。

## 境界条件

熱境界

$$\begin{aligned}
 & -l \frac{\partial T}{\partial n} - r \left[ l'_m \frac{\partial m}{\partial n} + l'_{Tg} \frac{\partial T}{\partial n} \right] \\
 & = (a + r a'_T)(T_o - T) + r a'_m(m_o - m) + q_s \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

水分境界

$$-l'_m \frac{\partial m}{\partial n} - l'_T \frac{\partial T}{\partial n} = a'_m(m_o - m) + a'_T(T_o - T) \quad (4.4)$$

$n$ ; 固体表面内向き法線

## 蒸気拡散支配 熱水分同時移動方程式

熱収支

$$-r \cdot \mathbf{k} \frac{\partial X}{\partial t} + (c \cdot \mathbf{r} + r \cdot \mathbf{n}) \frac{\partial T}{\partial t} = l \nabla^2 T \quad (5.1)$$

$X$  : 絶対湿度

$\phi_0$  : 最大空隙率

水分収支

$$(\Phi_0 \cdot \mathbf{g}' + \mathbf{k}) \frac{\partial X}{\partial t} - \mathbf{n} \frac{\partial T}{\partial t} = l'_X \nabla^2 X \quad (5.2)$$

$F$  : 含水率の関数

$\rho'$  : 乾燥空気密度

$$\frac{\partial \mathbf{r}_v}{\partial t} = \mathbf{g}' \frac{\partial X}{\partial t}$$

$$\mathbf{r}_w \frac{\partial F_X}{\partial T} = -\mathbf{n}(X, T) \quad (5.3)$$

$$\mathbf{r}_w \frac{\partial F_X}{\partial X} = -\mathbf{k}(X, T) \quad (5.4)$$

$$\mathbf{f} = F_X(T, X)$$

## 境界条件

熱収支

$$-l \frac{\partial T}{\partial n} = a(T_0 - T) \quad (5.5)$$

水分収支

$$-l'_X \frac{\partial X}{\partial n} = a'_X (X_0 - X) \quad (5.6)$$

# 実大住宅実験棟のLDK内 水分挙動に関する研究

解析による内装材の吸放湿性状の予測

大阪工大 佐藤真奈美  
関西電力 古賀 修

大阪工業大学 佐藤真奈美 2006-11-01

25

## 研究の目的と方法

- 住宅内での湿度環境制御法の提案
- LDK内で発生し、保存される(吸放湿材)水分の利用可能性の定量的検討
- IHクッキングヒータでの調理を想定した発生水分による室内温湿度環境実測(既報<sup>1)</sup>)
- 実測結果を再現する解析モデルの検討(本報)
- 吸放湿材による湿度環境制御の予測(今後)

大阪工業大学 佐藤真奈美 2006-11-01

26

## 解析モデル

- LDK内含有水分量変動要因

吸放湿材 (内装材) の吸湿  
自然換気または漏気に伴う排湿

- 解析の基礎式

蒸気拡散支配の熱水分同時移動方程式  
室、1質点での水分収支

## 解析条件

- 吸放湿材 (内装材)

天井 : クロス + 石膏ボード 19 mm

床 : フローリング 12 mm

壁 : クロス + 石膏ボード 2.5 mm

- 境界条件

室内側内装材近傍 : 実測温度・湿度

・内装材表面断湿

・加熱 (1000KWヒーター) 50分

・発湿量 (約600 g) 70分

内装材裏面 : 室初期 温・湿度 (解析時間3時間)

推定吸湿量=(室水分量初期値 + 時間当たり水蒸気発生量) - 室含有水分量  
 - 時間当たり概算漏気量(排湿量)

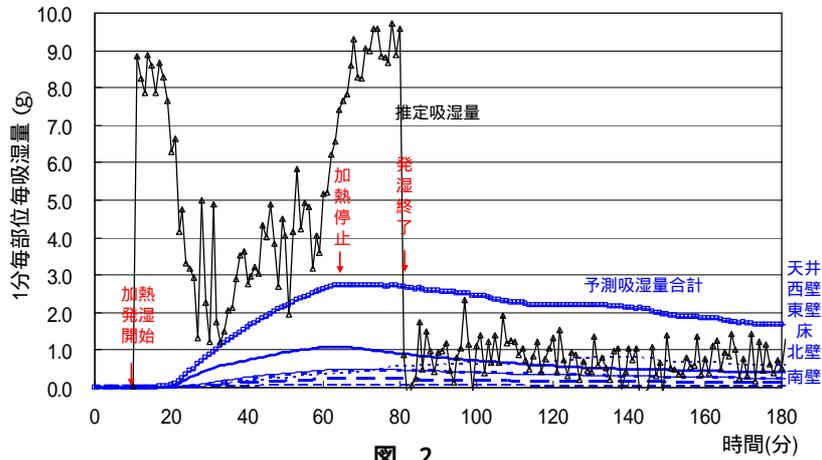


図 2

断湿用ビニルシート上で吸着水が観察されたことから、吸湿・排湿以外にシート上の吸着を考慮する必要あり。 → 今後の検討課題

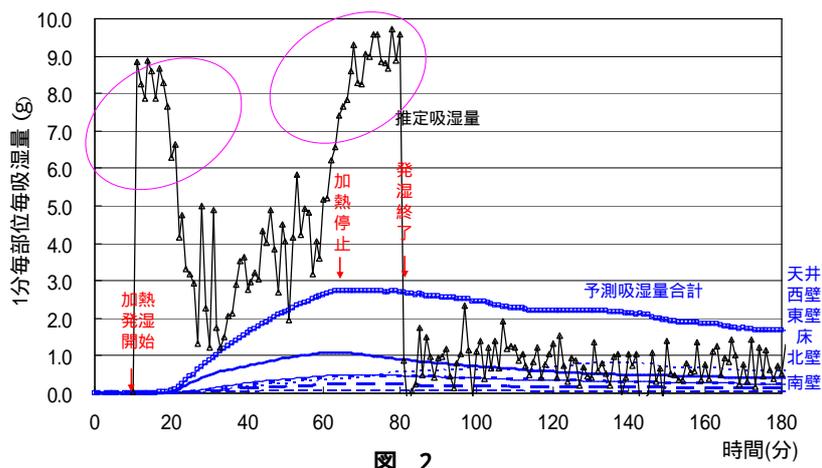
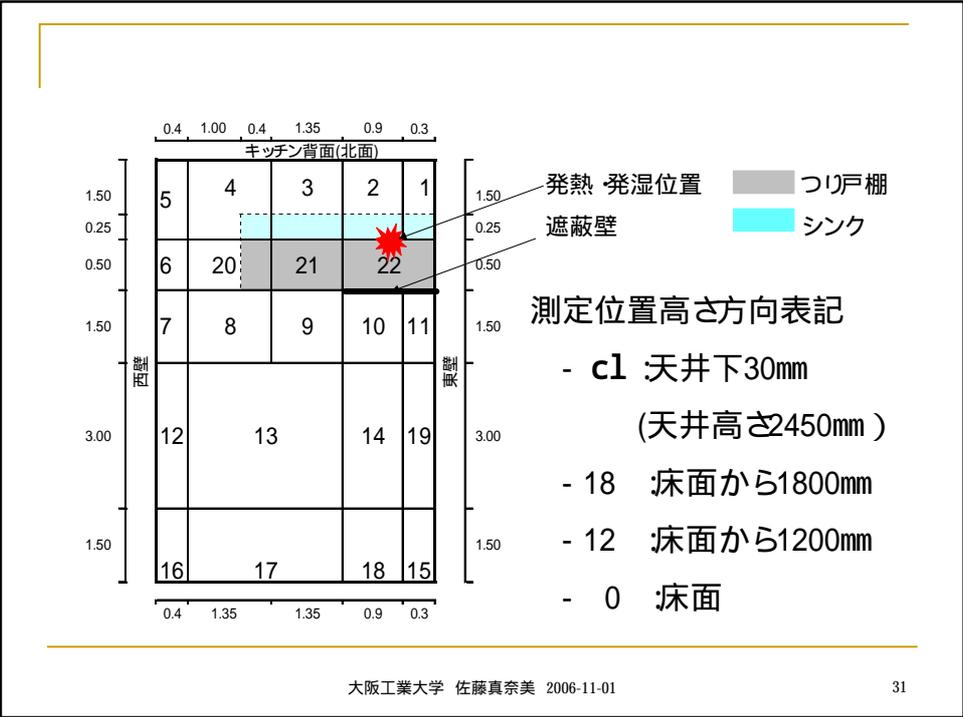


図 2



## 天井単位面積当たり吸湿量 (1分積算値)

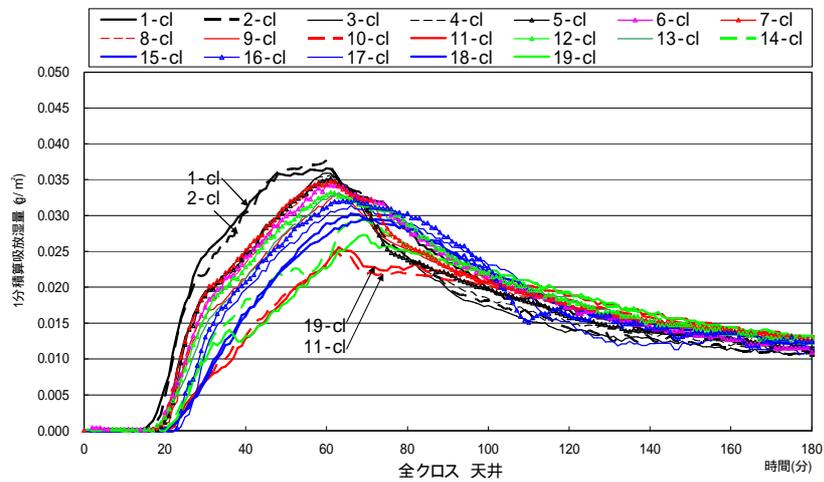
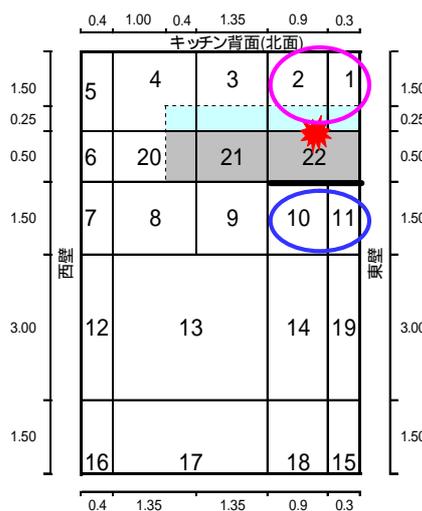


図 5

大阪工業大学 佐藤真奈美 2006-11-01

33

## 天井面吸湿特性



加熱・発湿位置直上の吸湿量が卓越  
最大  $0.04\text{g}/\text{m}^2(\text{分})$

遮蔽壁裏面位置は加熱・発湿位置に近いにもかかわらず吸湿量最小

大阪工業大学 佐藤真奈美 2006-11-01

34

## キッチン背面単位面積当たり吸湿量 (1分積算値)

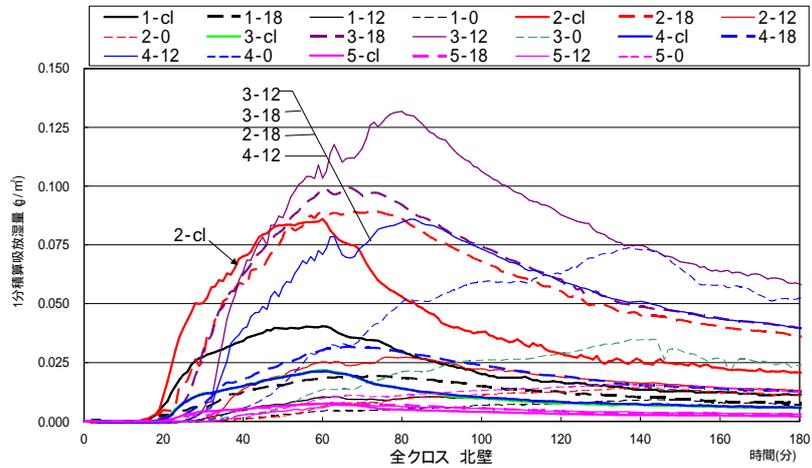
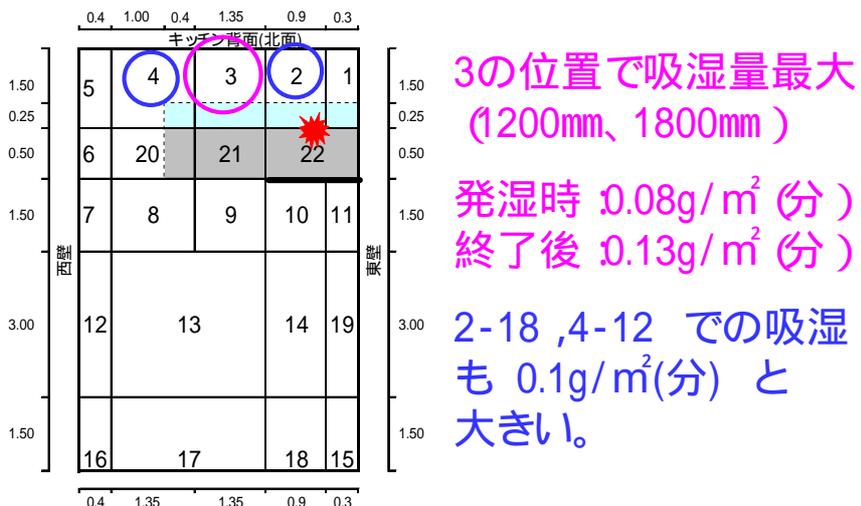


図 6

大阪工業大学 佐藤真奈美 2006-11-01

35

## キッチン背面吸湿特性



大阪工業大学 佐藤真奈美 2006-11-01

36

## 東壁単位面積当たり吸湿量 (1分積算値)

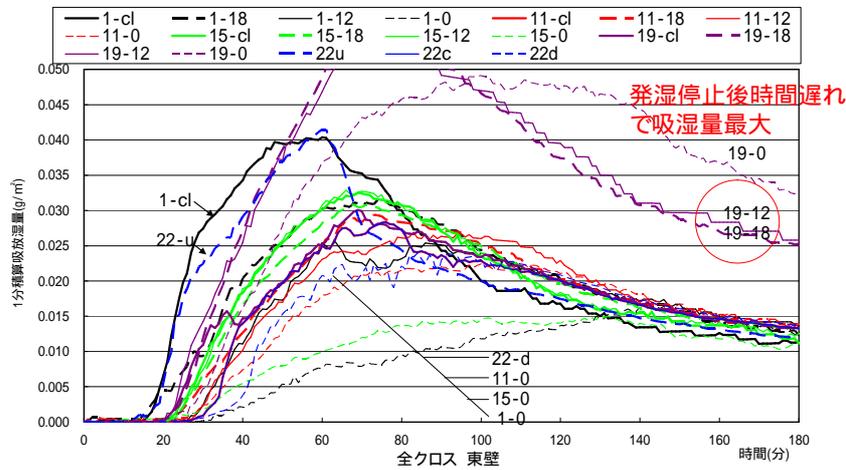
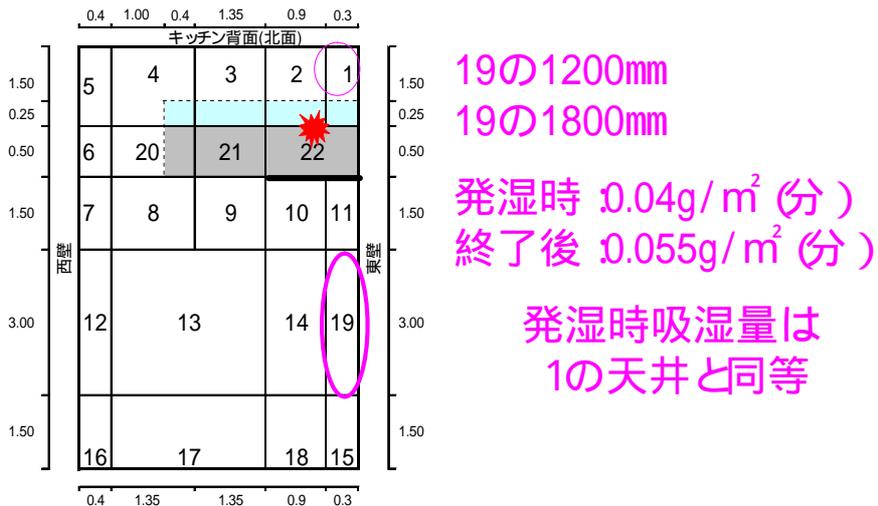


図 8

## 東壁吸湿特性



## まとめ

- 発湿位置に近いLDK天井では加熱発湿時に1分当たり最大 $0.04 \text{ g/m}^2$ の吸湿が期待できる。
- 壁面ではさらに大きく吸湿に寄与し、加熱発湿時に壁面で最大 $0.08 \text{ g/m}^2$ の吸湿量が期待できる。
- 加熱停止後の発湿には壁体中央高さの吸湿面が有効に働き、吸湿量は天井面近傍の5割増し程度となる。
- 床面では発湿停止後20分程度吸湿量が微増し続ける。その値はその他の部位の約半分程度である。
- 天井面近傍への水蒸気流が遮蔽された部位では水蒸気流の下降が早く始まり発湿停止後に加熱発湿時の天井面と同程度以上の吸湿が期待できる。