

## 数値シミュレーションによる煉瓦造壁体の温湿度解析：空気循環による壁体の湿度コントロール

高瀬, 秀芳  
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻博士後期課程

渡辺, 俊行  
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

尾崎, 明仁  
北九州市立大学国際環境工学部

<https://doi.org/10.15017/19032>

---

出版情報：都市・建築学研究. 4, pp.123-130, 2003-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門  
バージョン：  
権利関係：

## 数値シミュレーションによる煉瓦造壁体の温湿度解析 —空気循環による壁体の湿度コントロール—

Hygrothermal Analysis of Brick Wall System with HAM Computer Software  
—Effectiveness of Air-Circulation System in the Wall on Moisture Control—

高瀬秀芳\*<sup>1</sup>, 渡辺俊行\*<sup>2</sup>, 尾崎明仁\*<sup>3</sup>

Shuho TAKASE, Toshiyuki WATANABE and Akihito OZAKI

A low energy house with an air-circulation system in brick walls has been developed. However, a moisture problem for durability of wall assembly has not been considered so far. Since moisture capacity of brick is large, it is difficult for the brick wall to dry quickly. In this paper, four different types of wall structure are calculated with computer software "HAM Computer Software" using water potential. The purpose of this study is to clarify the relationship between the wall structure and the moisture problem in the wall. It is also considered how effective the air-circulation system is.

**Keywords:** Brick Walls, Air-Circulation, Moisture Control, Computer Simulation

煉瓦壁, 空気循環, 湿度コントロール, 数値シミュレーション

### 1. はじめに

近年の住宅は、省エネルギー性と快適性を目標として多種多様な工夫がなされている。筆者らにより開発されてきた空気循環式パッシブ煉瓦造住宅（熊本県）も低環境負荷型住宅の一つと言え、その省エネルギー性は既往の研究により明らかにされている<sup>1) 2)</sup>。しかしその一方で、いくつかの検討すべき問題点も指摘されている。壁体内における湿害（カビ・腐朽）の問題はその一つで、特に高温多湿な西日本では危険性が高い。壁体内の湿害は建物の耐久性に大きな影響を及ぼすため、その危険性について検討すべきである。中でも煉瓦造住宅のように湿気容量が大きい構法は、湿潤化すると乾燥に時間が掛かり一般の乾式構法に比べて長期に亘り高湿になる場合がある。

本報では、熱・水分複合移動解析モデルを使用した数値シミュレーションにより、フルブリック構法（標準タイプと空気循環タイプ）、ブリックベニア構法、木造構法の合計4種の壁体の湿害の危険性について検討する。また、室内・壁体内の温湿度には、実生活の中で発生する熱や水分を無視することはできない。本報では、室内および壁体温湿度の計算に先立ちSchedule Ver.2.0<sup>注1)</sup>を使用して生活スケジュールを作成し、実生活における熱発生量・水分発生量を考慮した。

### 2. 熱・水分複合移動解析モデル

既往の研究<sup>3) ~6)</sup>により、通気層の熱・水分拡散を含む壁体の熱・水分複合移動解析モデルを定式化した。本モデルの特徴は、湿流の駆動力に水分ポテンシャル<sup>3)</sup>を使用することにある。多孔質材料内部の熱・水分複合移動を表す基礎方程式<sup>4)</sup>はエネルギーおよび水分の保存則より、通気層の熱・水分拡散方程式<sup>5)</sup>は熱および水蒸気の自然拡散と移流拡散から導かれる。なお、通気層の浮力による移流量は、連続の式、運動方程式、エネルギー方程式の無次元解析により整理されており、任意の通気層寸法に対して通気層温度の関数として与えられる<sup>6)</sup>。壁体の熱・水分複合移動は、これらの数式モデルの逐次計算収束解として求められる。

#### 2.1 水分ポテンシャル

水分ポテンシャルは、化学ポテンシャル「熱力学平衡系における物質平衡の指標」を湿り空気に応用したもので、水蒸気 1kg 当たりの熱力学エネルギーとして式(1)~(3)で定義される。等温の物質非平衡系では、熱力学系は化学ポテンシャルの少ない方向に変化し、化学変化が起こらない場合は物質移動のみが生じる。したがって、水分ポテンシャルは水蒸気の拡散エネルギーを意味し、水蒸気拡散は系内部の水分ポテンシャル分布に支配される。なお、水分ポテンシャルは非等温熱力学系でも湿流の駆動力となることがオンサーガーの相反定理<sup>7)</sup>より証明できる。

\*1 空間システム専攻博士後期課程

\*2 都市・建築学部門

\*3 北九州市立大学国際環境工学部

$$\mu_w(p, T) = \mu_w^{\circ}(T) + \mu(p) \quad (1)$$

$$\mu_w^{\circ}(T) = h_{o,w} - T s_{o,w} + c_{p,w}(T - T_o) - T c_{p,w} \ln \frac{T}{T_o} + R_v T \ln \frac{P_s}{P_o} \quad (2)$$

$$\mu(p) = R_v T \ln \frac{P_w}{P_s} \quad (3)$$

$c_{p,w}$ : 定圧モル比熱,  $h_{p,w}$ : 基準エンタルピー,  $P_o$ : 基準圧力 (=  $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ),  $P_s$ : 飽和水蒸気圧,  $P_w$ : 水蒸気圧,  $R_v$ : 気体定数 (=  $461.50 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ),  $s_{o,w}$ : 基準エントロピー ( $h_{o,w} - T_o s_{o,w} = 6.44243 \times 10^5$ ),  $T$ : 絶対温度,  $T_o$ : 基準絶対温度 (=  $273.15 \text{ K}$ ),  $\mu_w$ : 水分ポテンシャル,  $\mu_w^{\circ}$ : 飽和水分ポテンシャル,  $\mu$ : 不飽和水分ポテンシャル

## 2.2 熱・水分複合移動の基礎方程式<sup>4)</sup>

式(4),(5)に hygroscopic 域を対象とした材料内部の熱・水分拡散方程式を示す。

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + r \left( \lambda' \nabla^2 \mu_w - \frac{\partial \rho_{gw} \Psi}{\partial t} \right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{gw} \Psi}{\partial t} + \rho_{lw} \frac{\partial \phi}{\partial t} \frac{\partial \mu}{\partial t} &= \lambda' \nabla^2 (\mu_w + F) \\ &= \lambda' \nabla^2 (\mu_w^{\circ} + F) + \lambda' \nabla^2 \mu \end{aligned} \quad (5)$$

$C$ : 材料の比熱,  $F$ : 応力ポテンシャル,  $r$ : 吸着熱 (気相水分から液相水分への相変化熱),  $T$ : 絶対温度,  $\phi$ : 容積含水率,  $\Psi$ : 空隙率,  $\lambda$ : 熱伝導率,  $\lambda'$ : 湿気伝導率,  $\rho$ : 材料の比重,  $\rho_{gw}$ : 容積絶対湿度,  $\rho_{lw}$ : 液水の比重

$F$  は応力ポテンシャルと呼ばれ, ここでは外力・内力による湿流への影響を意味する。例えば, 温度変化 (空隙の圧力変化) により力  $F_T$  が作用するとき,  $F_T$  は次式で与えられる。

$$F_T = p \bar{V}_w = R_v T \quad (6)$$

$p$ : 圧力,  $\bar{V}_w$ : 単位重量あたりの体積

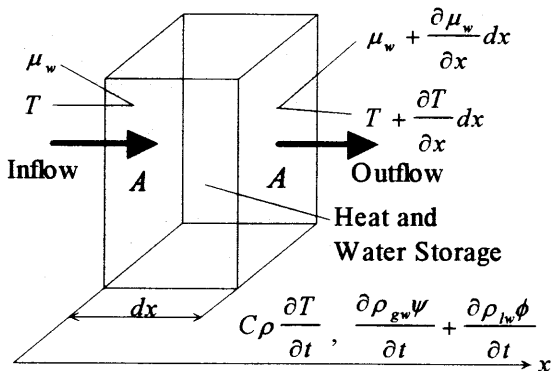


図1 材料内部の熱・水分複合移動モデル

境界条件は, 次式で与えられる。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - r \cdot \lambda' \frac{\partial \mu_w}{\partial n} = \alpha_c (T_a - T_s) + r \cdot \alpha' (\mu_{w,a} - \mu_{w,s}) + q_s \quad (7)$$

$$-\lambda' \frac{\partial \mu_w}{\partial n} = \alpha' (\mu_{w,a} - \mu_{w,s}) \quad (8)$$

$n$ : 境界におけるベクトル成分,  $q_s$ : 放射熱,  $\alpha_c$ : 対流熱伝達率,  $\alpha'$ : 水分ポテンシャル勾配に対する水分伝達率,  $\mu_{w,a}, \mu_{w,s}$ : 外気と境界表面の水分ポテンシャル,  $T_a, T_s$ : 外気と境界表面の絶対温度

## 2.3 通気層の熱・水分収支式<sup>5)</sup>

式(9),(10)に通気層内の熱・水分収支式を示す。式(9),(10)の右辺第1項は通気層表面の熱・水分伝達, 右辺第2項は移流による熱・水分拡散, 式(10)の右辺第3項は濃度差による水分の自然拡散を表す。通気流量  $mV$  は浮力による移流のみとし, 次項に示す無次元解析より求める。

$$c_a \rho_a V \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1,2} A \alpha_{c,i} (T_{s,i} - T_v) + c_a \rho_a m V (T_o - T_v) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho_{a,d} V \frac{dx}{dt} &= \sum_{i=1,2} A \alpha'_i (\mu_{w,s,i} - \mu_{w,v}) + \rho_{a,d} m V (x_o - x_v) \\ &\quad + (A_{v,in} + A_{v,out}) D'_v (\mu_{w,o} - \mu_{w,v}) \end{aligned} \quad (10)$$

$m$ : 換気回数,  $A$ : 通気層表面積,  $A_{v,in}, A_{v,out}$ : 通気層上下の開口面積,  $c_a$ : 湿り空気の比熱,  $V$ : 通気層の容積,  $x_a, x_v$ : 外気と通気層空気の絶対湿度,  $D'_v$ : 水分ポテンシャル勾配に対する水分拡散係数,  $\mu_{w,o}, \mu_{w,v}$ : 外気と通気層の水分ポテンシャル,  $\rho_a, \rho_{a,d}$ : 湿り空気と乾燥空気の比重

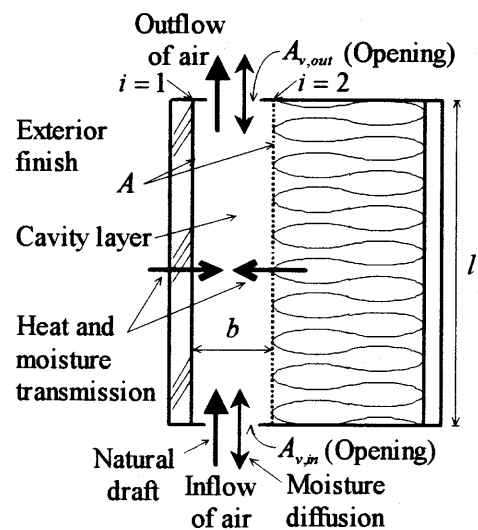


図2 通気層の熱・水分移動モデル

## 2.4 通気層の自然流量<sup>6)</sup>

式(11)~(13)の連続の式, エネルギー方程式, 運動方程式, および式(14)~(18)の境界条件 (図3に示す断熱面と一様な温度の加熱面から成る通気層) を, 式(19)~(26)の無次元数を用いて整理し, Simpson の 1/3 公式より無次元流量  $Q = b\bar{u}/\nu G_r$  ( $\bar{u}$ : 通気層内の平均流速,  $\nu$ : 動粘性係数) に関する収束解を導くと, 無次元流量と  $Q$  無次元数  $(b/\lambda)G_r P_r$  ( $b$ : 通気層厚さ,  $\lambda$ : 通気層高さ,  $G_r$ : グラスホフ数,  $P_r$ : プラントル数) の一意的な関係が求まる. 図4に無次元流量  $Q$  と無次元数  $(b/\lambda)G_r P_r$  の関係を示す.

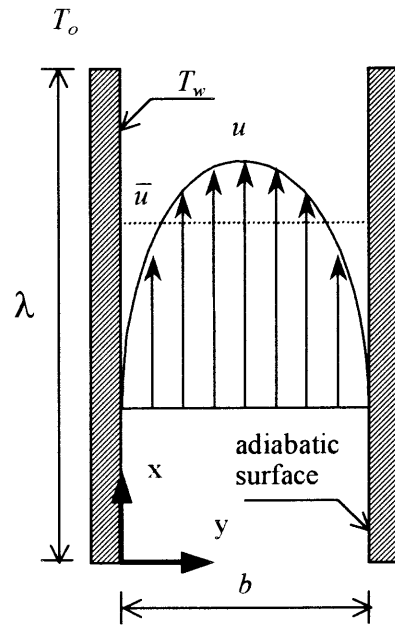


図3 通気層モデル

・連続の式, 運動方程式, エネルギー方程式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (12)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_d}{\partial x} + \beta g (T - T_o) \quad (13)$$

(  $\ominus p_d = p - p_o, \beta = \frac{\rho_o - \rho}{\rho(T - T_o)}$  )

・境界条件

$$x = 0, 0 < y < b : u = \bar{u}, v = 0, T = T_o \quad (14)$$

$$y = 0, x \geq 0 : u = 0, v = 0, T = T_w \quad (15)$$

$$y = b, x \geq 0 : u = 0, v = 0, \partial T / \partial y = 0 \quad (16)$$

$$x = 0 : p_d = 0 \quad (17)$$

$$x = l : p_d = 0 \quad (18)$$

・無次元数

$$U = \frac{bu}{\nu G_r}, \quad V = \frac{bv}{\nu} \quad (19), (20)$$

$$X = \frac{x}{b G_r}, \quad Y = \frac{y}{b} \quad (21), (22)$$

$$P = \frac{p_d b^2}{\rho \nu^2 G_r^2}, \quad \Theta = \frac{T - T_o}{T_w - T_o} \quad (23), (24)$$

$$G_r = \frac{g \beta (T_w - T_o) b^3}{\nu^2}, \quad P_r = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (25), (26)$$

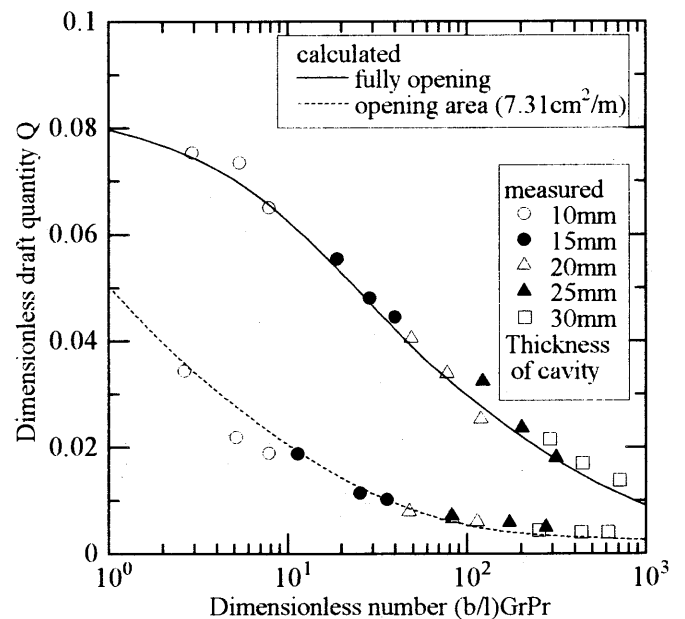


図4 無次元流量  $Q$  と無次元数  $(b/\lambda)G_r P_r$  の関係

$b$ : 通気層の厚み,  $c_p$ : 空気の比熱,  $G_r$ : グラスホフ数,  $g$ : 重力,  $\lambda$ : 通気層の高さ,  $P$ : 通気層と外気の無次元差圧,  $P_r$ : プラントル数,  $p_d$ : 通気層と外気の差圧,  $Q$ : 無次元流量,  $T$ : 絶対温度,  $U$ : 垂直方向の無次元速度,  $u$ : 垂直方向の速度,  $V$ : 水平方向の無次元速度,  $v$ : 水平方向の速度,  $X$ : 垂直方向の無次元座標,  $x$ : 垂直方向の座標,  $Y$ : 水平方向の無次元座標,  $y$ : 水平方向の座標,  $\beta$ : 膨張係数,  $\Theta$ : 無次元温度,  $\lambda$ : 熱伝導率,  $\mu$ : 粘性係数,  $\nu$ : 動粘性係数,  $\rho$ : 空気の比重

### 3. 壁体の温湿度計算

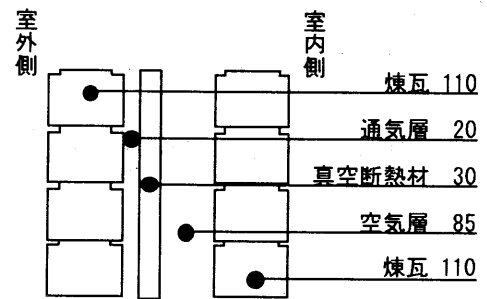
#### 3.1 計算方法および計算条件

本報の計算には3つのソフトを使用している。最初に Schedule Ver.2.0 を使って生活スケジュールを作成し、生活に伴う内部発熱量、水分発生量を算出する。次に、その結果と外界気象データを入力条件として、動的熱負荷計算ソフト THERB<sup>註2)</sup> を使い、室内温湿度を計算する。最後に THERB による計算で得られた結果と外界気象を入力条件とし、熱・水分複合移動解析ソフト P-Model で壁体内温湿度を計算する。

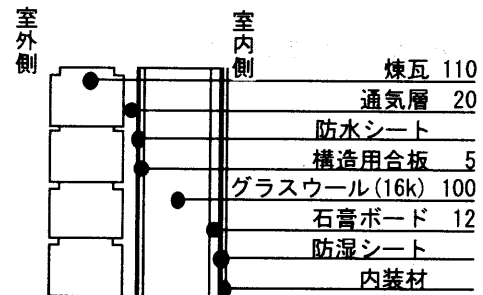
表1に室内および壁体温湿度の計算条件を、図5に計算対象とした住宅の平面図を示す。生活スケジュールは4人家族と仮定して作成し、外界気象データは福岡標準気象データを使用して室内温湿度を計算し、その結果を入力値として煉瓦壁体と木造壁体の温湿度を計算する。煉瓦造壁体は、外装材と内装材に煉瓦を使用するフルブリック（標準タイプ、空気循環タイプ）と、外装材のみが煉瓦のブリックベニアの3種類である。一般的構法に習い、ブリックベニアと木造壁体は構造材の間を断熱する充填断熱構法（構造用合板あり）とする。なお、断熱材としてフルブリックには防湿機能を有する真空断熱材、ブリックベニアと木造壁体にはグラスウール（室内側に防湿シートあり）を使用する（図6）。室内条件は、6～9月は終日冷房（26℃以下）、12～3月は終日暖房（20℃以上）とする。ただし、冷暖房期間でも室内湿度の制御（冷房時60%以下、暖房時40%以上）は温度が制御される実質の空調時間のみ行われる。なお、空気循環タイプについては、空調時間に室内空気が循環すると仮定する。

表1 室内および壁体温湿度の計算条件

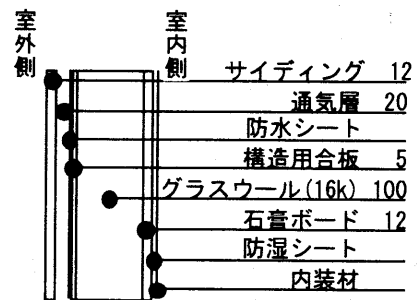
気象データ	標準気象データ（福岡）
家族構成	4人（勤め人、家庭婦人、高校生、中学生）
助走期間	2ヶ月間
計算時間間隔	1時間
空調対象室	床下・小屋裏を除く全室
空調対象時間	24時間/日
空調対象期間 および 設定温湿度	冷房：6～9月 設定温湿度：26℃，60% 暖房：12～3月 設定温湿度：20℃，40%



(a) フルブリック構法



(b) ブリックベニア構法



(c) 木造構法

[単位：mm]

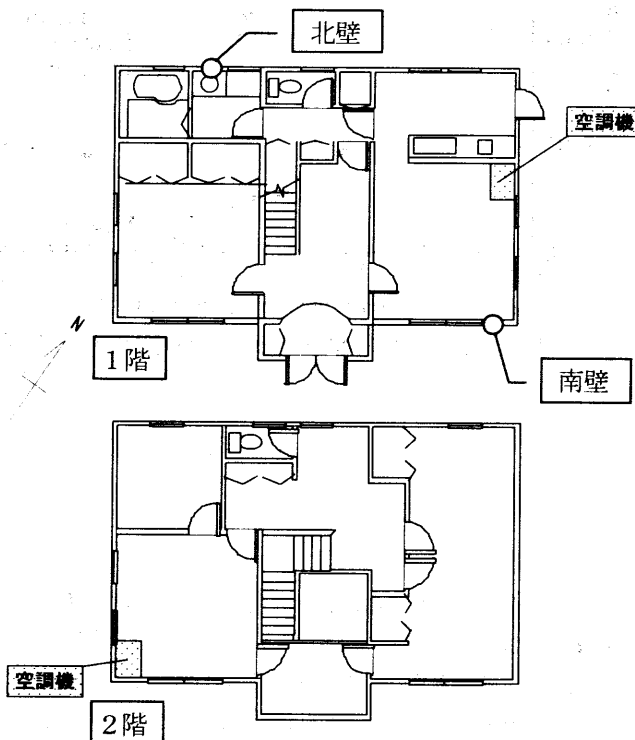


図5 計算対象建物平面図

図6 壁体構成

### 3.2 計算結果

図7～13に外気、室内、南壁・北壁（壁体内部）の通年の温湿度変動（0時から6時間毎の値）、および7月30日～31日の南壁内部湿度の日変動を示す。フルブリックの壁体内部湿度（室内側煉瓦裏面の相対湿度）は、標準タイプ・空気循環タイプいずれも4月から徐々に上昇する。ただし、空気循環タイプの内部湿度は、ほぼ終日冷房される7月12日から低下し概ね60%に保たれるのに対し、標準タイプは7月12日～17日に約75%まで急激に上昇してその後低下する。湿流は熱流に比べ応答が遅いため、標準タイプの内部湿度は冷房開始後の数日間は煉瓦の温度低下に伴い上昇する（標準タイプの内部湿度は空気循環タイプより最大約15%も高い）。一方、空調時に壁体内空気層に室内空気が流入する空気循環タイプでは、壁体内部湿度は室内空気と同

様にリアルタイムに空調制御される。なお、冬季の内部湿度は、標準タイプ・空気循環タイプいずれも南壁・北壁ともに低湿（35%～45%）である。

煉瓦造壁体でもブリックベニアの内部湿度は木造壁体と同じように変動する（夏季と冬季の湿害の危険性を考えて、南壁は断熱材内側、北壁は断熱材外側の値を示す）。南壁の内部湿度は6月下旬～8月下旬に非常に高くなる。図13に示すように、ブリックベニアと木造壁体ではピーク時間は異なるものの、夏季の内部湿度は昼間に著しく上昇する。ピーク時間の違いは外装材の熱容量の差（温度変化の違い）に起因しているが、両壁体ともにいわゆる夏季の内部結露が発生している。冬季の内部湿度は60%～75%（断熱材外側）であり、フルブリックと比較すると高湿ではあるが湿害の危険性は少ない。

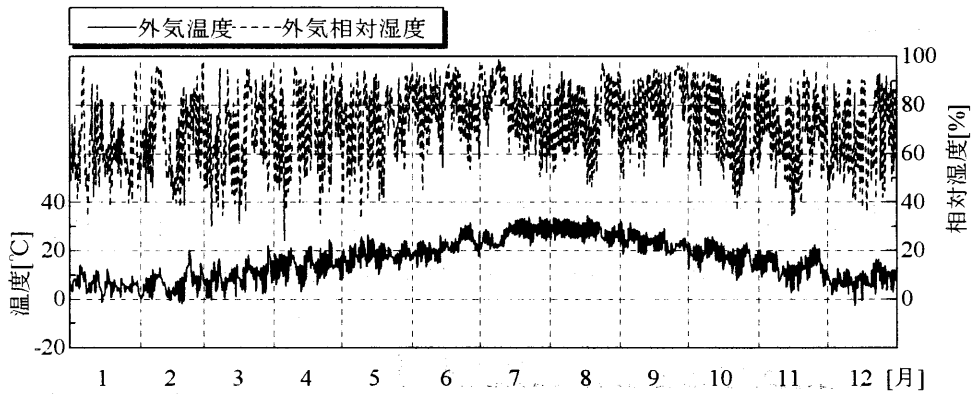


図7 外気温湿度の経年変化

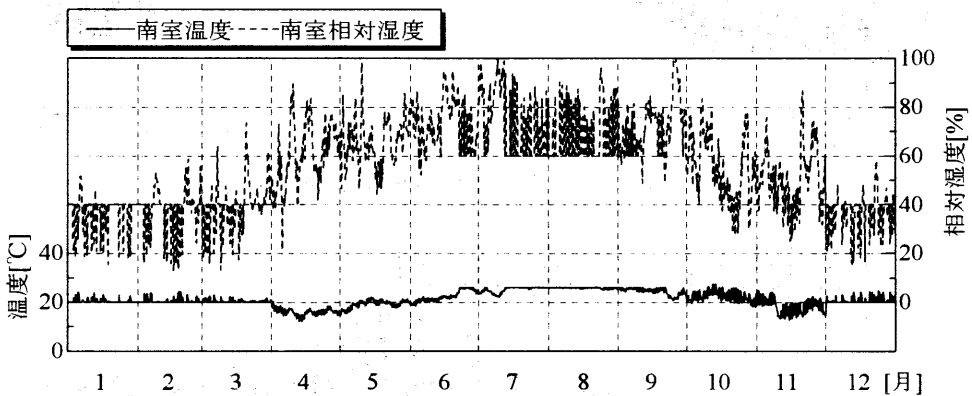


図8 室内温湿度の経年変化

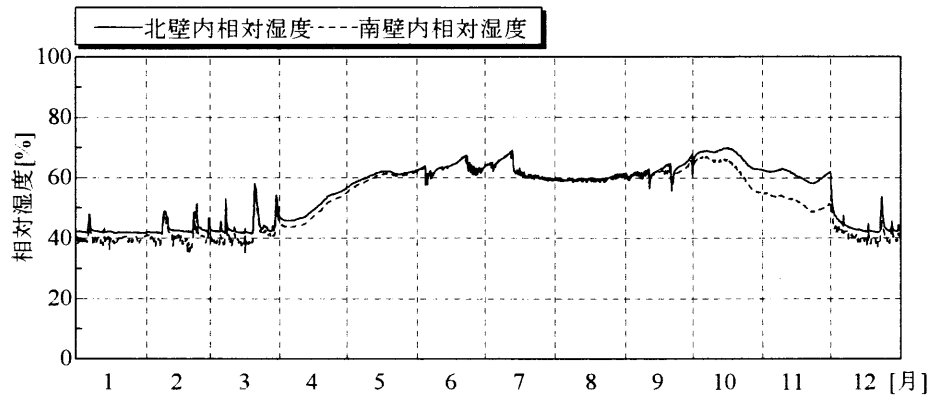


図9 フルブリック（空気循環）の壁体内湿度経年変化

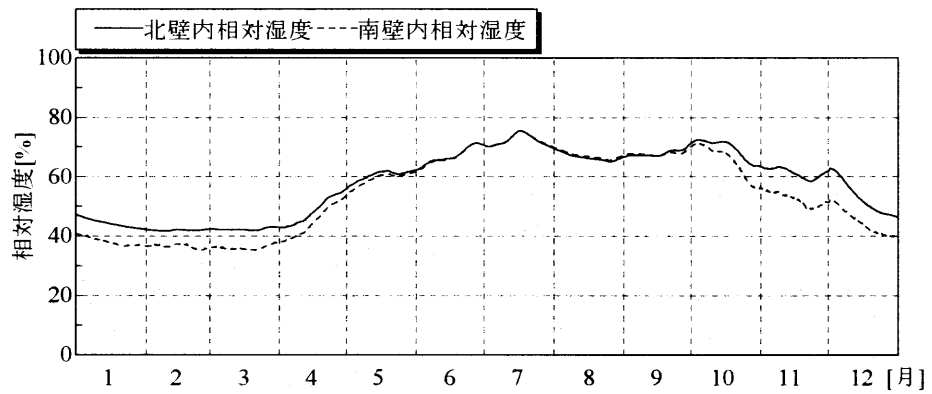


図10 フルブリック（標準）の壁体内湿度経年変化

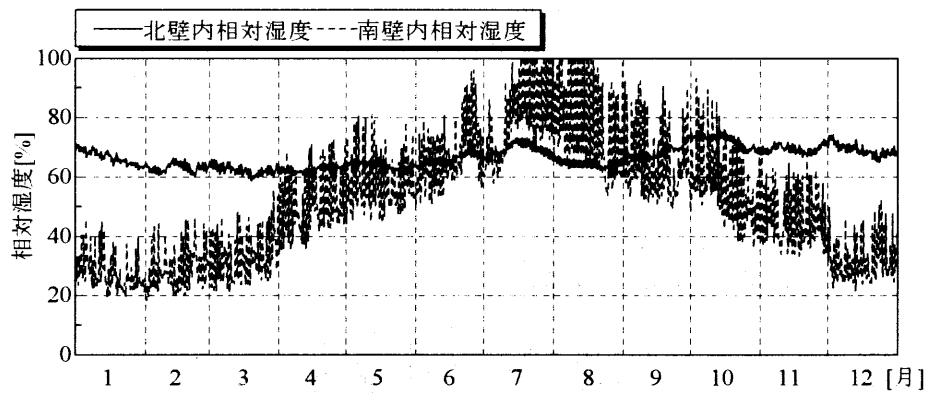


図11 ブリックベニアの壁体内湿度経年変化

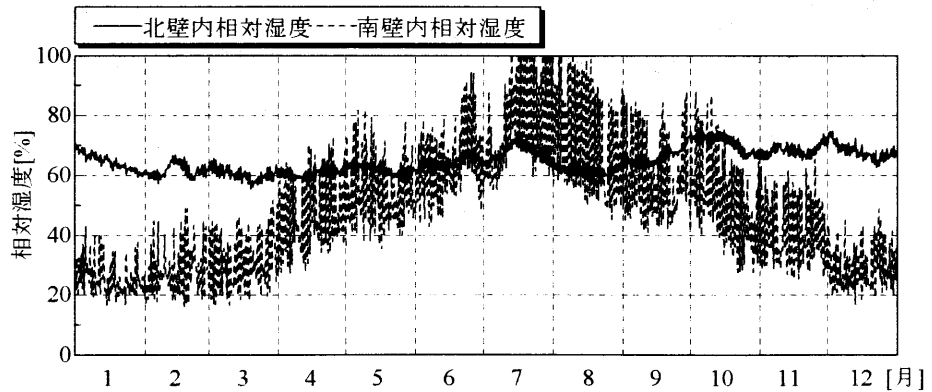


図12 木造の壁体内湿度経年変化

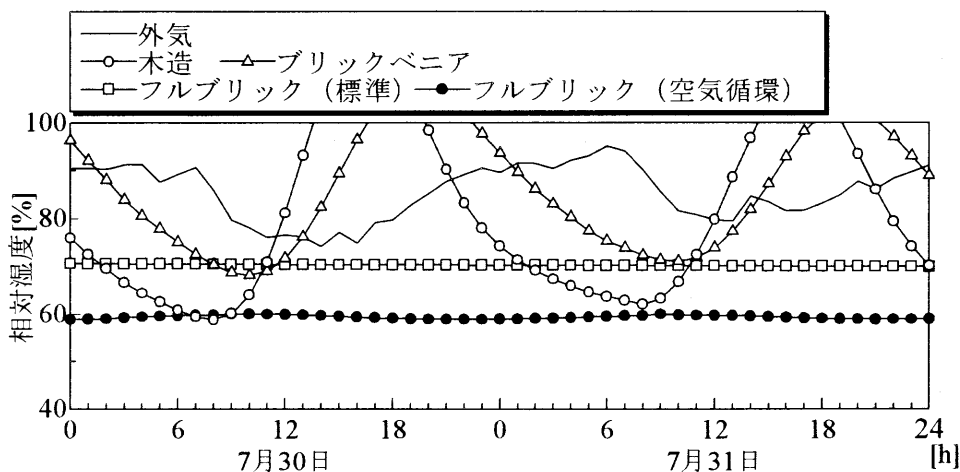


図 13 南壁内部湿度の日変動

図 14, 15 に南壁・北壁の内部湿度の 1 年間の時間累積率を示す。フルブリックについて内部湿度が 70%以上になる時間累積率を比較すると、標準タイプは南壁 12%, 北壁 16%, 空気循環タイプは南壁 0%, 北壁 0%で、室内と連成して壁体内部も湿度制御される空気循環タイプの方が低湿に保たれている。なお、間欠空調(冷房)の場合は湿流と熱流の応答速度の違いにより標準タイプの方がより高湿になると予想される。ブリックベニアと木造壁体の内部湿度が 70%以上になる時間累積率は、それぞれ南壁(断熱材内側)は 18%, 16%, 北壁(断熱材外側)は 18%, 12%である。特に南壁はフルブリックより高湿で、フルブリックは通年に

亘り 75%以下に保たれるのに対し、ブリックベニアと木造壁体は 80%以上になる時間累積率は 9%にもなる。フルブリックは内部湿度の年較差が小さく低湿に保たれており、湿害の危険は少ない。一方、ブリックベニアと木造壁体の内部湿度は夏季に著しく上昇し結露することさえある。これらの違いは構法(煉瓦造と木造)よりはむしろ構造用合板の有無、断熱材の透湿性および防湿層の位置に起因している。内装材側に防湿層を有する場合は外気が水分の供給源となるため、ブリックベニアと木造壁体は外気が高湿となる夏季に湿害が発生する危険がある。

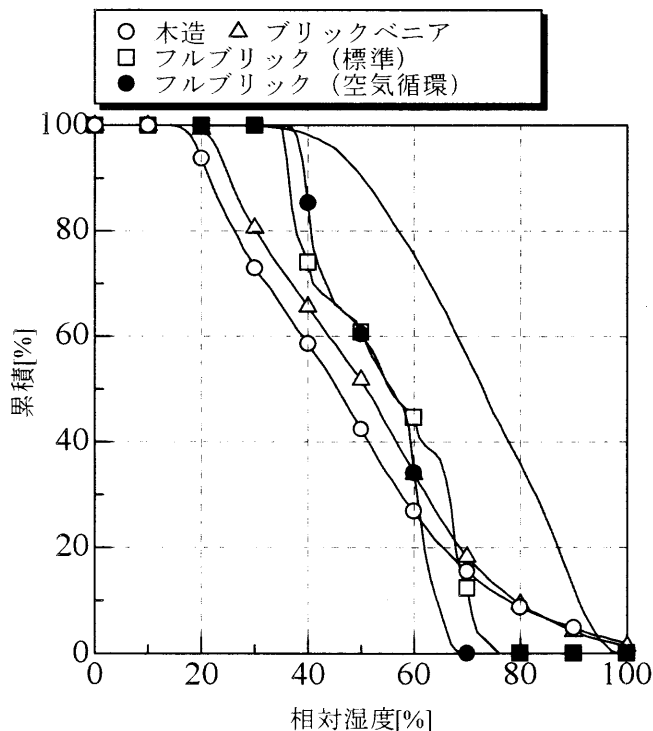


図 14 南壁相対湿度の時間累積率

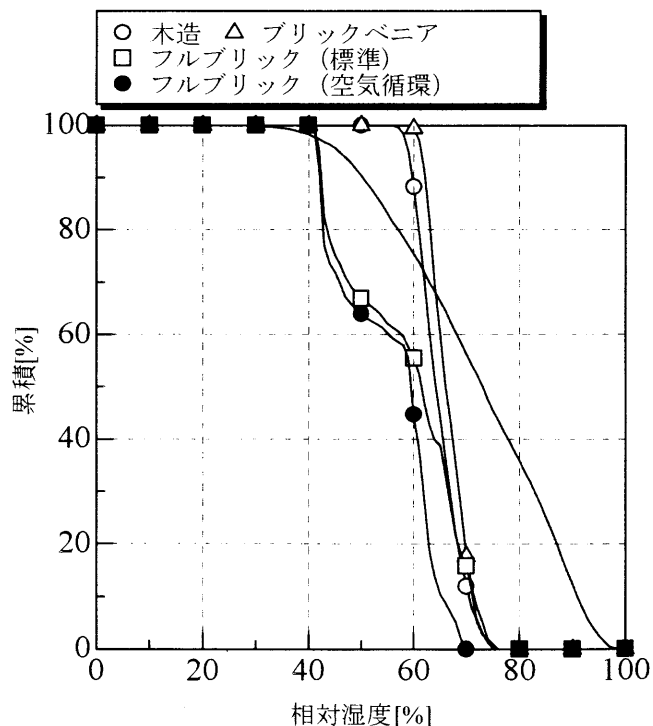


図 15 北壁相対湿度の時間累積率



#### 4. むすび

熱・水分複合移動解析モデルを使用した数値シミュレーションにより、煉瓦造壁体（フルブリックの標準タイプ・空気循環タイプおよびブリックベニア）と木造壁体の温湿度の動特性と湿害の危険性について検討した。その結果、①内部湿度は4月から徐々に上昇し7月中旬に最高値を示す、②空気循環タイプは空調時にリアルタイムに壁体を湿度制御するため夏季でも内部湿度を約60%に抑えられる（標準タイプより最大約15%も低い）、③湿流は熱流に比べ応答速度が遅いため標準タイプの内部湿度は冷房開始後（7月中旬）に数日間上昇する、④ブリックベニアと木造壁体の内部湿度は同じように変動して夏季は非常に高湿になる、⑤冬季はいずれの壁体も低湿で湿害の危険はない、⑥各壁体の内部湿度の違いは、構法（煉瓦造と木造）よりはむしろ構造用合板の有無、断熱材の透湿性および防湿層の位置に起因している、⑦内装材側に防湿層を有する場合は外気が水分の供給源となり夏季に結露しやすい、ことなどを明らかにした。

#### 注

- 1) 空調和衛生工学会により作成された、任意の家族構成、任意の建物における生活行為に伴う室内発熱・水分発生パターンなどを作成するプログラム。
- 2) 住宅の品質確保の促進等に関する法律第53条第4項の規定に基づき、年間暖冷房負荷の計算方法を用いて評価する方法として認定されているプログラム。（IBEC 品試 - SN0003）

#### 参考文献

- 1) 中村美紀子, 渡辺俊行, 他: 煉瓦の熱的特性と自然エネルギーを利用した室内環境制御システムの提案 自然エネルギーを利用した空気循環式煉瓦造住宅の開発研究 その1, 日本建築学会計画系論文集, 第563号, pp.17~24, 2003.1
- 2) Takase S., Watanabe T., et al: "Measurement and Simulation of the Thermal Environment of a Low Energy House with Air-Circulation in Brick Walls", Proceedings of eSim 2001, pp212~219, 2001.6
- 3) 尾崎明仁, 渡辺俊行, 他: 水分ポテンシャルによる湿気移動解析・湿流の駆動力, 日本建築学会計画系論文集, 第488号, pp.17~24, 1996.10.
- 4) Ozaki A., Watanabe T., Hayashi T. and Ryu Y.: "Systematic Analysis on Combined Heat and Water Transfer through Porous Materials Based on Thermodynamic Energy", An International Journal of Energy and Buildings, Vol. 33, No.4, pp.341-350, 2001.4
- 5) 尾崎明仁, 渡辺俊行, 他: 通気層の熱・湿気移動解析 その1~2, 日本建築学会九州支部研究報告 第35号・2, pp.105~112, 1995.3.
- 6) Ozaki A., et al: "Analysis of Draft Quantity through Ventilated Air Space", Proceedings, 14th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, vol.2, pp.33-38, 1997.1.
- 7) Katchalsky A. and Curran F. Peter.: "Nonequilibrium thermodynamics in biophysics", published by Misuzu Shobo, 1988.

(受理: 平成15年6月12日)