

特集●戸建て住宅の換気

# 戸建て住宅の換気と室内温湿度

土屋喬雄\*

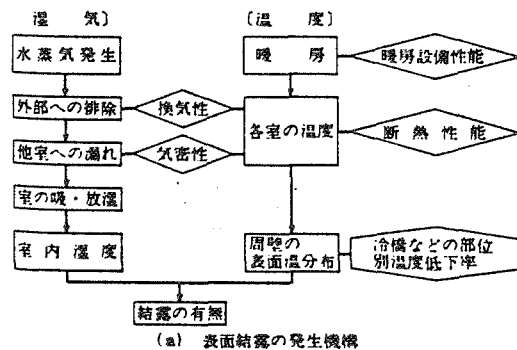
住宅の結露防止に関連して、室内温湿度変動の長期予測法を中心に述べた。そこには、多数室換気のほかにも室の吸放湿の算定法も含まれている。多数の部材から構成される室を一つの等価な材料に置き換え、吸放湿性にかかわる二つの係数を短期的な実験によって同定する方法である。一度これらの係数を同定しておけば、任意の加熱・加湿・換気などの生活条件および地域条件に対して、室内温湿度変動の予測が可能となるはずである。本稿では、計算と実験との比較および長期予測計算例について述べた。

## はじめに

住宅の結露防止という観点から、換気と室内温湿度との関連について述べてみたい。ここでいう結露とは表面結露のことをいい、内部結露は含まない。

建物の結露は、図-1に示したように、室内で発生された水蒸気のうち開口や間仕切りを通して外部や他室に漏れる分と、周壁に吸湿される分を差し引いた正味の加湿量によって決まる。室内湿度に対応した露点温度と周壁の表面温度との関連でとらえることができる。すなわち、結露は建物に固有な断熱性・保温性・気密性・換気性・吸放湿性などの固定的な性能と、そこで繰り広げられる極めて変動的な生活パターンとの相互作用の結果として生じるものである。したがって、建物の結露防止性能を評価するには、建物に固有の熱的・湿氣的・換氣的諸性能を明らかにするとともに、生活パターンの分類を行い、建物の性能との相関関係である室内の温湿度変動としてとらえる必要がある。

建設省建築研究所第5研究部居住環境研究室 正会員



特に結露被害という観点から見ると、短期的な結露よりも長期にわたる結露や含水率変化のほうが問題である。実際に被害に結び付くか否かは、建物の耐水性・調湿性・耐食性・防かび性や結露水の排出性などにかかわっており、これらの性能を室内温湿度変動との関連で明らかにすることが、つぎの段階で要求されてくる。

以上を要約すれば、住宅の結露防止を考える場合、まず第一に要求されることは、室内の温湿度が生活パターンや換気によってどのように変化し、結露がどのように生じて、含水率がどのように変化するかを長期的にとらえることであり、つぎに必要とされるのは、それらが被害に結び付くか否かを判定し得る手法の開発である。

本稿では、主に前半の室内湿度変動の予測法について述べる。

## 1. 室内湿度変動予測法

室内湿度変動を予測するうえで一番問題となるのが、周壁の吸放湿である。部材レベルの研究はあるが、室というさまざまな部材で構成された場に適用できるまでに整備されていないのが実情である。そこで、室の周壁を等価な一つの部材に置き換え、吸・放湿性を2日間程度の短期の実測によって評価しようというのが、以下に述べる予測法のねらいである。

### 1.1 基本式

$$G_i \frac{dX_i}{dt} = W_i - \frac{dw_i}{dt} + \sum_j V_{ji}(X_j - X_i) - \alpha' S_p (X_i - f_p) \quad \dots\dots (1)$$

$$\frac{dw_i}{dt} = K_i' S_i (X_i - \phi_i) \quad \dots\dots (2)$$

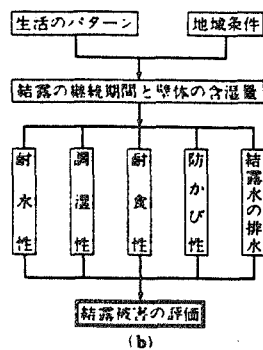


図-1 結露の発生機構と結露被害の評価

$$\phi_i = \frac{\phi_i}{41} \left( \frac{w_i}{w_0} T_i - 5.46 \right) \quad \dots\dots (3)$$

$$\frac{dw_g}{dt} = \alpha' S_g (X_i - f_g) \quad \dots\dots (4)$$

ここに、

- $G_i$  :  $i$  室の乾燥空気重量 [kg']
- $W_i$  :  $i$  室の水蒸気発生量 [g/h]
- $V_{ji}$  :  $j$  室から  $i$  室へ流出する乾燥空気重量 [kg'/h]
- $w_i$  :  $i$  室の周壁などに吸着せられている水蒸気量 [g]
- $w_g$  : ガラス面での結露量 [g]
- $K_i'$  :  $i$  室周壁表面から薄層内すきままでの湿気通過率 [g/m<sup>2</sup>·h] (g/kg')
- $\alpha'$  : 湿気伝達率 [g/m<sup>2</sup>·h] (g/kg')
- $S_i$  :  $i$  室周壁の表面積 [m<sup>2</sup>]
- $S_g$  : ガラス窓の面積 [m<sup>2</sup>]
- $f_g$  : ガラス表面の絶対湿度 [g/kg']
- $\phi_i$  :  $i$  室周壁の薄層内すきまの絶対湿度 [g/kg']
- $T_i$  :  $i$  室の空気温度 (絶対温度) [°C]
- $\phi_s$  :  $T_i$  に対する飽和絶対湿度 [g/kg']
- $w_0$  :  $i$  室周壁の薄層部分の乾燥重量 [g]
- $X_i$  :  $i$  室の絶対湿度 [g/kg']
- $X_j$  :  $j$  室の絶対湿度 [g/kg']
- $t$  : 時間 [h]

式(1)右辺の第1項は室内の加湿量を、第2項は周壁の吸放湿量を、第3項は換気による湿気の移動量を、また第4項はガラス面などでの結露量(蒸発量)を表す。

吸放湿には表面の薄層のみ関係し、この薄層内では瞬時に平衡に達すると仮定する。木材平衡含水率曲線を標準と考え、その  $C$  倍が薄層の平衡含水率とみなせば、相対湿度 20~80% の範囲で次式で近似的に表される。

$$\frac{w_i}{w_0} \times 100 = \frac{C}{T_i} \left( 41 \frac{\phi_i}{\phi_s} \times 100 + 5.46 \right)$$

上式から、式(3)を導くことができる。式(1)~(4)を Crank-Nicholson 形の差分近似で置き換えて整理すれば、式(5)~(8)となる。

$$\left( \frac{G_i}{\Delta t} + \frac{1}{\frac{2}{K_i' S_i} + \frac{\phi_i^{n+1} T_i^{n+1}}{41 C w_0} \Delta t} + \frac{1}{2} \sum_j V_{ji} \right) X_i^{n+1} = \left( \frac{G_i}{\Delta t} - \frac{1}{\frac{2}{K_i' S_i} + \frac{\phi_i^n T_i^n}{41 C w_0} \Delta t} - \frac{1}{2} \sum_j V_{ji} \right) X_i^n + \frac{1}{2} \sum_j V_{ji} (X_j^{n+1} + X_j^n) + \frac{\left( \frac{\phi_i^{n+1} T_i^{n+1} + \phi_i^n T_i^n}{41 C w_0} \right) w_i^n - \frac{5.46}{41} (\phi_i^{n+1} + \phi_i^n)}{\frac{2}{K_i' S_i} + \frac{\phi_i^{n+1} T_i^{n+1}}{41 C w_0} \Delta t} - \alpha' S_g (X_i^n - f_g^n) + W_i^n \quad \dots\dots (5)$$

$$w_i^{n+1} = \frac{X_i^{n+1} + X_i^n + \left( \frac{2}{K_i' S_i \Delta t} - \frac{\phi_i^n T_i^n}{41 C w_0} \right) w_i^n + \frac{5.46}{41} (\phi_i^{n+1} + \phi_i^n)}{\frac{2}{K_i' S_i} + \frac{\phi_i^{n+1} T_i^{n+1}}{41 C w_0} \Delta t} \Delta t \quad \dots\dots (6)$$

$$\phi_i^{n+1} = \frac{\phi_i^{n+1}}{41} \left( \frac{w_i^{n+1}}{C w_0} T_i^{n+1} - 5.46 \right) \quad \dots\dots (7)$$

$$w_i^{n+1} = \alpha' S_g (X_i^n - f_g^n) \Delta t + w_i^n \quad \dots\dots (8)$$

ただし、

ガラス面で結露がなければ、 $f_g = X_i$

ガラス面で結露があれば、 $f_g =$  ガラス表面温度に対応した飽和絶対湿度

上式中、 $w_0$  は元来推定が困難な量であるから、 $C w_0$  を新たな未知数  $C$  とする。また初期条件は、薄層内が室内と平衡しているものとみなし、式(9)とする。

$$\left. \begin{aligned} \phi_i^0 &= X_i^0 \quad (n=0) \\ w_i^0 &= \frac{C}{T_i^0} \left( 41 \frac{\phi_i^0}{\phi_s} + 5.46 \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (9)$$

以上の式では、吸放湿にかかわる  $K'$  と  $C$  ならびに室間換気量  $V_{ji}$  が未決定である。これらは、以下に述べる方法によって決定される。

### 1.2 吸放湿にかかわる $K', C$ の求め方

各室で独立に間欠的に水蒸気および熱を発生させ、室内の温湿度変化・加湿量・加熱量を連続測定記録する。その場合、換気による湿気の移動を正確にとらえるために開口などを目張りし、室間のすきま換気を防いで換気は外部間のみとする。測定期間中は換気量を一定に保つように機械換気を使用し、ノズルまたはオリフィスなどによって換気量を測定する。

30分ないし1時間間隔で得られた測定データを基に、式(10)を最小ならしめるように、室の吸放湿性にかかわる係数  $K', C$  を決定する。

$$\delta_i = \sum_{n=1}^N (X_i^n - X_i'^n)^2 \quad \dots\dots (10)$$

ここに、

$X_i'$  :  $i$  室絶対湿度の測定値

$N$  :  $\Delta t$  時間間隔で得られたデータの数

### 1.3 室間換気量 $V_{ji}$ の求め方

多数室換気計算法による。換気の駆動力には、外部風・温度差・換気扇を考慮に入れる。

床面の大気圧を基準とした各室の圧力  $p_i$  を未知数と

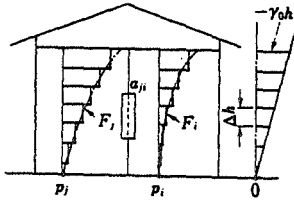


図-2

して、つぎの連立方程式(11)を近似解法で解いて換気量を求める。

$$\left\{ \sum_{j \neq i} a_{ji} (p_j - p_i + F_j - F_i) \right\}^{1/n} = 0 \quad \dots\dots (11)$$

ここに、

$a_{ji}$ :  $i$ 室と $j$ 室間のすきま特性値

$F_i$ :  $i$ 室の上下圧力分布関数

$n$ : すきま特性値 (=1.5 または 2)

計算法は既往の発表例とだいたい同じで、2分割法である程度近似度を高めておき、この配法によって収束させる。ここで新たに改良しようとするのは、つぎの点である。

- 1) Newton-Raphson 法の代わりに、それより収束回数数が少なく済む Brown-Conte 法<sup>13)</sup>を採用する。
- 2) 通常  $n$  の値は極めて小さくなるので、けた(桁)落ち誤差を少なくするように 1000 倍する。
- 3) 上下方向の圧力分布は、温度分布があると複雑な形態となるので、有限幅  $\Delta h$  分割とし、その間は一定とする。ただし、上下温度分布は直線近似とする。
- 4) 式(11)中の  $( )^{1/n}$  を 3本の折れ線で近似する。

## 2. 室内湿度変動の計算と実験の比較例

### 2.1 $K', C$ を求める基本実験

#### (1) 供試モデル住宅

供試モデル住宅は、2"×4" 工法によって構築された図-3のような平面を有する平屋建てで、室内気候実験室内(旧建築研究所)に建設されたものである。床・天井・壁には原則として室内側に 50 mm の断熱材を、また外気側にシーシングボードを挿入している。壁の仕上げは化粧合板、天井は内装用軟質繊維板、床は木フローリングである。ただし、浴室では床がブロック、壁・天井が石綿スレート板仕上げとなっている。

#### (2) 実験

1.2 で述べたように、各室ごとに間欠的な加熱・加湿を行い、温湿度の時刻別データを得る。加熱は温風ヒータ、加湿は超音波加湿器・電熱ポットによった。加湿量

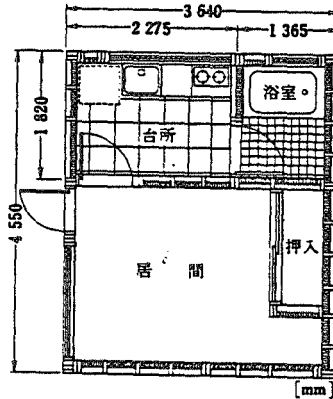


図-3 モデル住宅平面図

は台ばかり(秤)によって秤量し、温湿度は C-C 熱電対およびエース鋭感湿度計によって測定した。測定点は原則として室中央の 1 点とした。換気は外部間のみとし、室間の換気をなくすためにすきまを目張りした。換気は機械的に行い、整流格子とノズルを有するチャンバを窓などに取り付け、風量を熱線風速計によって測定した。換気量は実験中一定に保った。

#### (3) 計算と実験との比較

式(10)を満足するように各室の  $K', C$  を定め、それらを用いて計算した結果の例を図-4 に示した。得られた  $K', C$  の値の妥当性を調べるために、新たな加熱・加湿条件に対する実験および計算を行い、両者を比較したものが図-5 である。両者の一致は良好であり、 $K', C$  を実測によって求めておけば、各種条件下の室内湿度が予測し得ることがわかる。

### 2.2 生活パターンを考慮した実験

前例では、各室を独立させて室ごとに周壁の吸放湿性にかかわる係数を同定した。ここでは、任意の生活パターンでの湿度予測が、これらの係数を用いて可能であるか否かを明らかにすることを目的としている。なお、湿度予測計算には 1.3 で述べた多教室換気を付加している。

#### (1) 実験

前述のモデル住宅によって、図-6 のような生活パターンを想定して加熱・加湿を行い、30 分ごとに温・湿度、加熱量、加湿量を計測した。これらの方法は前例と全く同一とした。

ただし、暖房には開放形石油ストーブを使用している。台所と浴室の換気扇による排気量は、前例同様ノズルと熱線風速計によって求めた。開口はすべて閉じた状態にした。

#### (2) 計算と実験との比較

図-7(a)~(d)は、居間・台所・浴室・押入の絶対湿

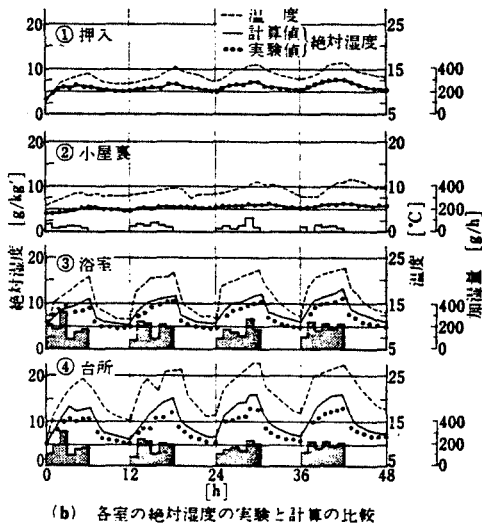
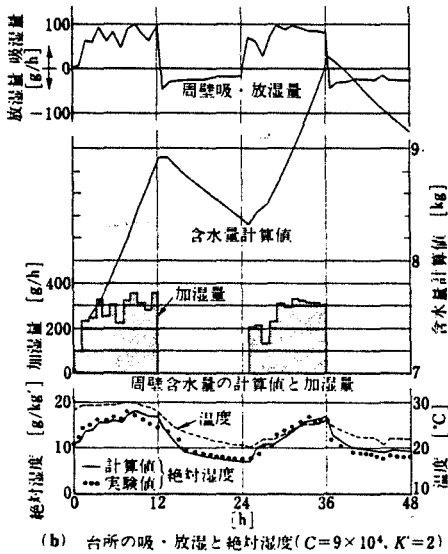
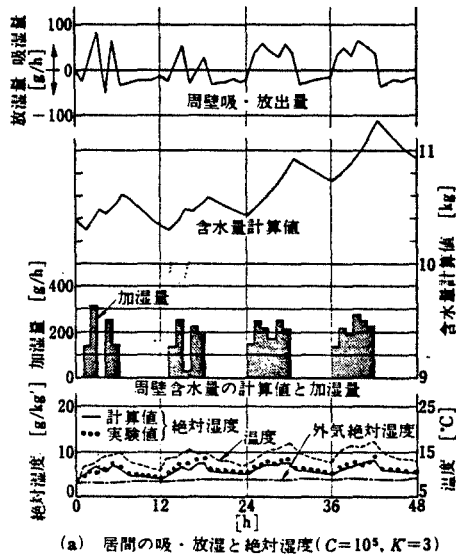
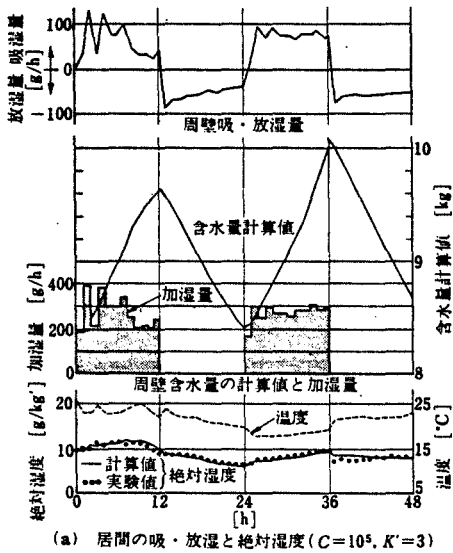
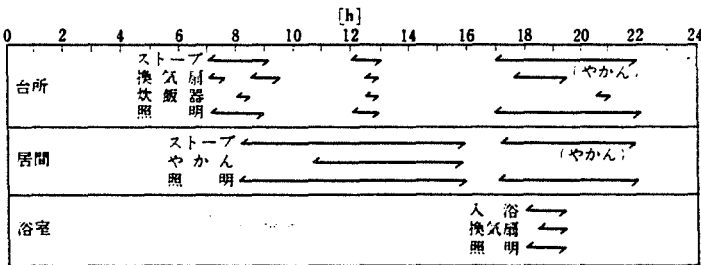


図-4 室の吸放湿性を求める基本実験と計算

図-5 4周期実験と計算



度、周壁の含水量・吸放湿量の計算結果と実験値とを比較したもので、居間を除いて両者はかなりよく一致している。居間での上下温度差は $20^{\circ}\text{C}$ もあり、その分布形も直線とはかけ離れており、すきま換気量が正しくとらえられなかったこと、湿度の測定が室中央の1点のみ

で、正しい室の平均を代表していなかったことが、居間での計算と実験との差を大きくした原因であると思われる。室間の換気をなくして独立に同定した周壁の吸放湿にかかわる係数を用いても、実生活の場に存在する上下温度差、室間のすきま換気を考慮すれば、かなりの精度

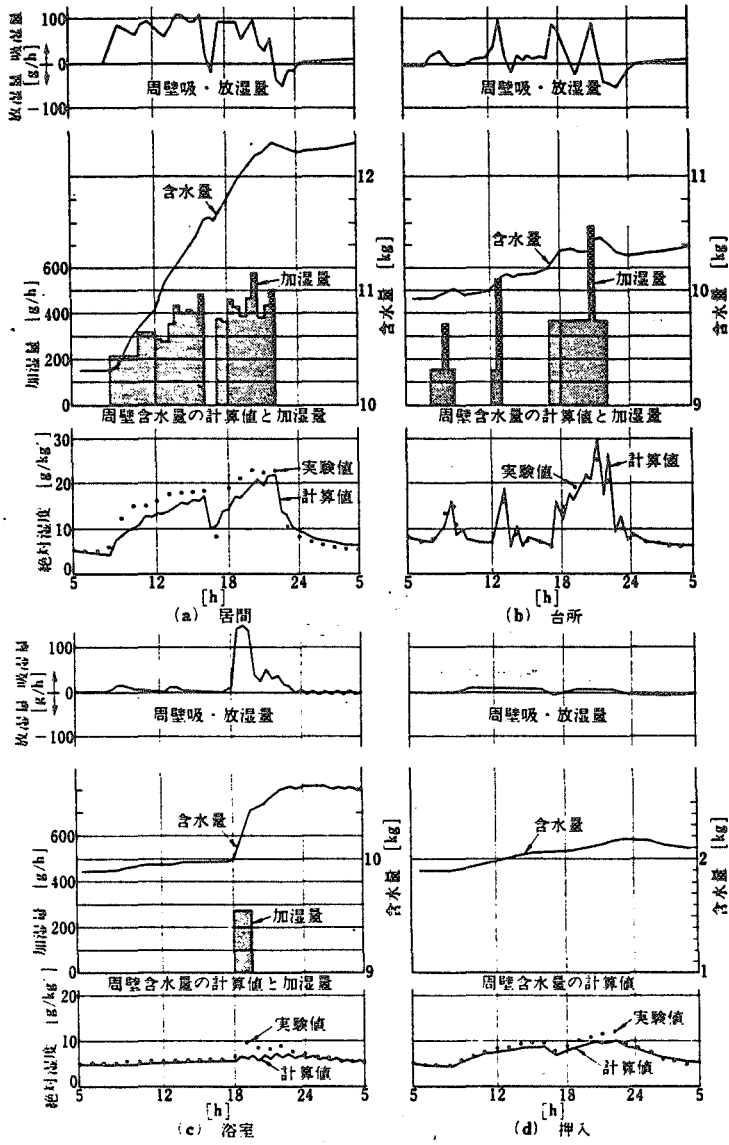


図-7 生活パターンを想定した実験と計算

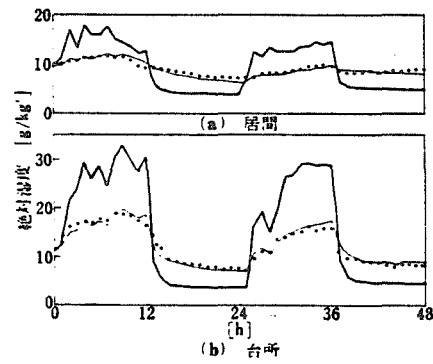


図-8 周壁吸・放湿の有無による室内湿度の相違

で室内湿度変動の予測が可能であると言えよう。

### 3. 室内湿度変動に及ぼす周壁吸放湿および換気の影響

#### 3.1 周壁吸放湿の影響

2.の実験によれば、加湿量のはぼ1/3が周壁に吸湿され、加湿が止まるとはぼ同量が周壁から室内に放湿されることがわかる。その結果、室内湿度は極めて緩やかな変動となる。これが壁の調湿作用と呼ばれる現象である。

このことが一層明らかになるのが、図-8である。図-4に対応させて、もし周壁の吸放湿が全くなかったら

室内の湿度変動はどのようになるかを示している。吸放湿が全くない場合には、室内湿度は加湿量に応じて急激に上昇し、加湿が止まると急激に下降して外気湿度に近付いていく。吸放湿の有無による湿度変動の差は、絶対湿度で10 g/kg'前後にも達している。

#### 3.2 換気の影響

室内絶対湿度は、換気に極めて敏感に影響を受ける。図-9は、2.2で述べた計算で居間の換気回数を3通りに変えた場合の湿度変動を示したものである。

換気回数が多くなるにつれて絶対湿度の変動は小さくなり、また最大値も小さくなる。換気回数1回/hと2.7回/hとでは約10 g/kg'もの差が付いている。周壁含水

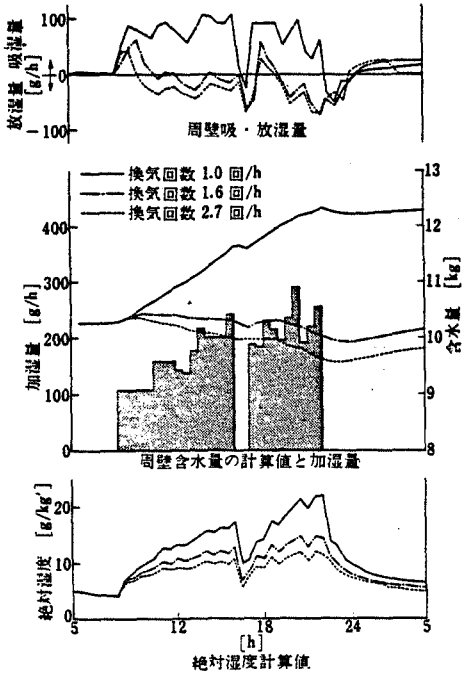


図-9 換気量による居間の絶対湿度、含水量、吸・放熱量の相違

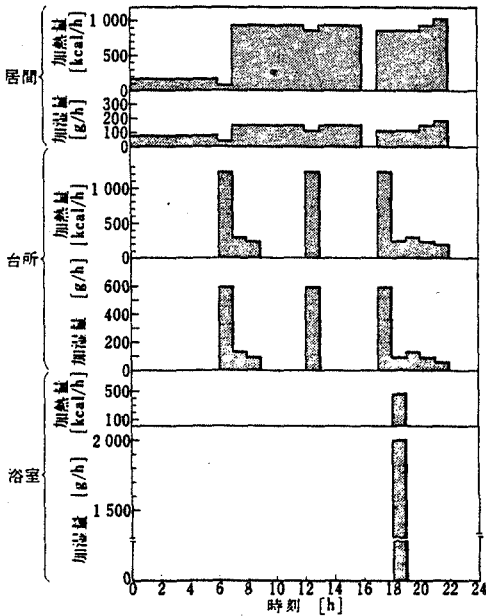


図-10 長期予測計算における生活パターン

量も、換気がある程度以上になると減少過程をたどり、乾燥する一方となる。

#### 4. 室内温湿度変動の長期予測計算例

3.の実験に使用したモデル住宅を新潟に建てた場合を想定して、室内温湿度変動を暖房期間にわたって長期的

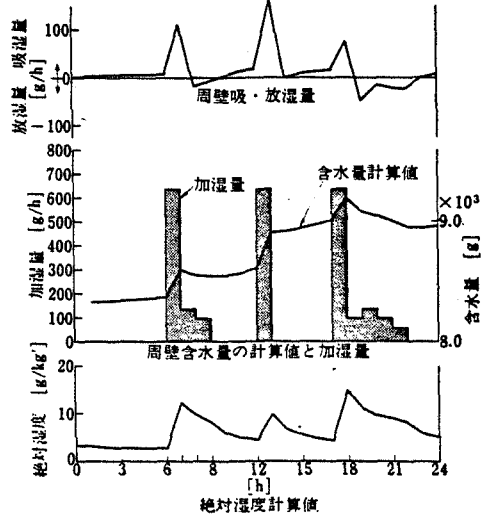
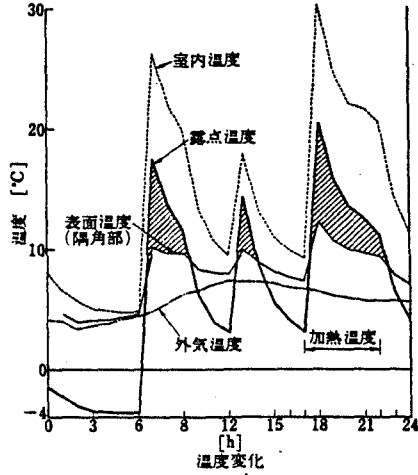


図-11 台所の時刻別温湿度変動計算値

に予測計算した例である。

##### 4.1 計算条件

###### (1) 外界気象条件

新潟を想定し、東京の標準気象データから式(12)で気温を推定する。風向・風速は北、3m/s、曇り、相対湿度80%とし、これらは期間中(11~2月)継続するものとする。

$$\theta(t) = 2.6/6.4 \{ \theta(t) + 0.1 \} - 1.7 \quad \dots\dots (12)$$

###### (2) 生活パターン

家族は夫婦二人のみで、図-10に示したような加熱・加湿を行うものとする。

###### (3) 室温変動計算

建物各室を集中定数分布系の質点とみなし、室の相当熱容量( $M_i/a_i$ )によって、つぎのように表されるものとする。

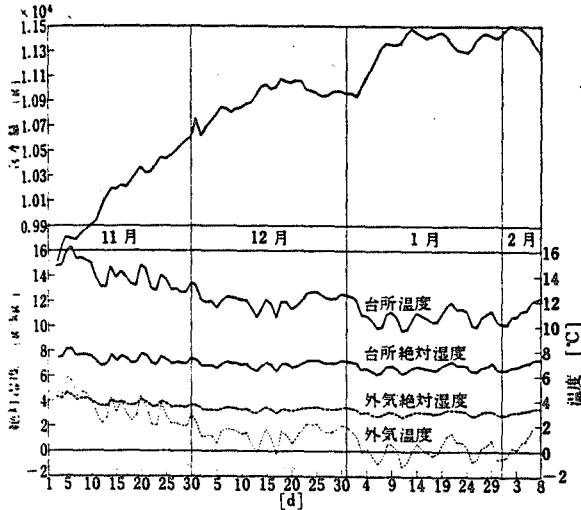


図-12 台所の温湿度・含水量の日平均値

$$M_i \frac{d\theta_i}{dt} = \alpha_i \sum_j (KA_{ji} + 0.3V_{ji}) (\theta_j - \theta_i) \quad \dots (13)$$

ここに、

$\alpha_i$ : 熱容量の補正係数(=2)

$KA_{ji}$ : 総括熱通過率

$V_{ji}$ : 換気量

上式を差分近似し、時系列的に室温を求めていく。

#### 4.2 計算結果

計算結果の一例として、台所について掲げる。図-11は、時間別の温湿度・含水量・吸放湿量の変化を示したもので、同図中の隅角部の温度は赤外線カメラによって実験室内で計測した壁一般部との比率から算出している。斜線部分が結露範囲であり、炊事に伴う加湿時に発生している。特に夕食時に結露が多くなっている。

図-12は、台所の温湿度・含水量の日平均値を暖房期間にわたってプロットしたもので、絶対湿度は外気のそれより約4 g/kg<sup>4</sup>多いが、期間内での変動はごくわずかしかない。それに対し、周壁の含水量は1日100 g以上の割合で増加していき、1月以降はほぼ横ばいとなるが、11月初めと比べると1800 gの増量となっている。

#### おわりに

建物の結露防止を考える場合には、室内の温湿度と周壁の含水量の変化を長期にわたってとらえる必要がある。これらの変動をかなりの精度で予測するためには、周壁の吸放湿とすきま換気を多数室問題として解かなければならない。多数室換気は、近年の研究開発によってすでに実用域にあると思われるが、周壁の吸放湿に関してはまだ実験室レベルにとどまっている。ここで述べた方法は、部材の築成による算法ではなく、室全体を等

価の材料で置き換え、それを実験的に求めようとするもので、短期的な実験で得られた吸放湿性にかかわる係数 $K', C$ を用いて長期予測を試みている。これもまだ初期の試行段階に過ぎないが、諸データの整備と長期実験による検証を経て、実用化を図ることが今後に残されている。

#### 参考文献

- 1) 前田敏男・松本衛: 室内壁表面の吸放湿を考えた場合の室内湿度の計算, 日本建築学会論文報告集, 63(昭34-10)
- 2) 斎藤平蔵・宮路榮二: 材料の吸放湿特性とその調湿能力表示法について, 日本建築学会論文報告集, 69(昭36-10)
- 3) 堀江裕郎・江口和雄: 室内気候に関与する材料の吸放湿について, 日本建築学会論文報告集, 69(昭36-10)
- 4) 前田敏男・水畑雅行: 結露がある場合の室内湿度の計算, 日本建築学会論文報告集, 89(昭38)
- 5) 土屋喬雄: 住宅の結露防止性能評価法(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭53)
- 6) 土屋喬雄: 住宅の結露防止性能評価法(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭54)
- 7) 石原正雄・鈴木明史: 建築物における空気流動特性の解析について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭47)
- 8) 浅野賢二・原口茂毅: 住宅の換気性状(その1,2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭49)
- 9) 石川善美・長谷川房雄・水口広隆: 電算機を用いた換気計算について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭50)
- 10) 福島明・荒谷登: 回路網法による木造住戸モデルの通気, と熱湿気移動解析(その1,2), 第49回日本建築学会北海道支部研究報告集, (昭53)
- 11) Brown, Conte: The Solution of Simultaneous Nonlinear Equations, Proc. A. C. M., (1967)

(昭和55. 7. 16 原稿受理)

#### Infiltration and Indoor Air Temperature and Moisture Variation in a Detached Residence

Takao Tsuchiya\*

**Synopsis** In this report, we present the long term calculation method of indoor air temperature and moisture variation related to the water vapor condensation problem in a detached residence. In this method, the multi-room infiltration calculation is developed. Furthermore, the effect of sorption and desorption of a room, which is evaluated by means of a short term experiment, is introduced.

(Received July 16, 1980)

\* Living Environmental Division, Physics and Fire Department, Building Research Institute, Member