

夏季冷房時における断熱気密壁体の内部結露に関する研究

渡辺 俊行

1. 研究の目的

住宅の断熱気密化により西日本における冬季の居住環境も改善され、少ない暖房エネルギーで快適な室内熱環境が得られるようになった。しかし、夏季には壁体の内部結露の問題が懸念される。梅雨季を経た躯体や断熱材はその含水率が上昇し、特に、在来の軸組構法に従った断熱気密壁体では吸放湿性を持たない密閉空間が形成され、躯体内水分を容易には放湿することができない。高湿な状態となった躯体や断熱材は夏季の冷房により内表面が冷却され、仕上げ材や断熱材で内部結露が生じれば、躯体腐朽の原因となる。

我が国では、これまで壁体の吸放湿や結露防止に関する多くの研究がなされてきた。なかでも、松本による一連の解析的研究^{文1)}は特筆に値しよう。また、壁体あるいは空間の熱と水分の同時収支を扱った研究として、松本・銚井ら^{文2)}、坂本ら^{文3)}、宇田川ら^{文4)}の最近の研究が注目される。しかし、梅雨季および夏季の壁体吸放湿、夏季冷房時の結露問題を対象とした研究事例は極めて少なく^{文5)}、季節蒸暑地域における壁体の設計・施工指針は決して十分なものとは言えない。

本研究は、季節蒸暑地域における住宅の断熱気密断湿指針と夏季冷房時の壁体内部結露防止策を提案することを目的として、壁体系の熱と水分の複合伝熱解析モデルを提案するとともに、壁体における熱と水分の複合移動現象を実験的・解析的に明らかにするものである。また、屋外比較実験、実験室実験、断熱気密住宅の実測調査により、夏季冷房時の壁体熱湿気性状と内部結露の有無を明らかにする。さらに、熱・水分複合伝熱解析モデルを用いた数値計算により、季節蒸暑地域における断熱壁体の最適構成法について検討する。

2. 建築壁体の湿気移動

2.1 湿流の駆動力

ハイグロスコピック域では気相状態で水分流（湿流）が生じるため、防露設計や室内温湿度計算には蒸気拡散法則が適用され、湿流の駆動力として水蒸気圧（あるいは絶対湿度）が用いられる。しかし、熱力学的平衡条件は、温度、圧力、各成分の化学ポテンシャルが全系を通じて一様である場合に満足されるため、湿流の駆動力が

質量的平衡条件の指標となる化学ポテンシャルであるとすれば、水蒸気圧はその状態変数となり湿流の駆動力には不十分なものとなる。ここでは、大気圧下で湿流の駆動力として妥当なポテンシャルを定義し、これを用いた熱・水分移動方程式を提案する。

2.1.1 熱力学的平衡条件^{文6)}

熱力学ポテンシャル(またはギブスの自由エネルギー) G を、温度 T 、圧力 p 、 s 個の成分それぞれのモル数 n_i ($i=1,2,\dots,s$) の関数として式(1)で表す。

$$G = U - TS + pV \\ = G(T, p, n_1, n_2, \dots, n_s) \quad (1)$$

成分 i の化学ポテンシャル μ_i を式(2)で定義すると式(3)が導かれる。

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j \neq n_i} \quad (2)$$

$$G(T, p, n_1, n_2, \dots, n_s) = \sum_i n_i \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j \neq n_i} \\ = \sum_i n_i \mu_i \quad (3)$$

式(3)は、単一成分系では式(4)で表される。

$$G(T, p, n) = n\mu \quad (4)$$

つまり、単一成分系では化学ポテンシャル μ は 1 モル当たりの熱力学ポテンシャルにほかならず、熱力学的平衡条件は化学ポテンシャルが一様な場合に満足される。

2.1.2 混合気体の熱力学関数

混合気体全系のエンタルピー H は式(5)で表される。

$$H = \sum_i n_i h_i = \sum_i (U_i + p_i V) \quad (5)$$

$$h_i = \int_0^T C_{p_i} dT = C_{p_i}^0 T + \int_0^T C_{p_i}'(T) dT \quad (6)$$

$$C_{p_i} = C_{p_i}^0 + C_{p_i}' \\ (\lim_{T \rightarrow 0} C_{p_i}' = 0) \quad (7)$$

C_{p_i} : 定圧モル比熱,

$C_{p_i}^0$: 0 [K] のときの定圧モル比熱,

h_i : エンタルピーのモル値,

U_i : 内部エネルギー,

p_i : 分圧,

V : 体積

また、混合気体のエントロピー S は式(8)で求められる。

$$S = \sum_i n_i (C_{pi}^0 \ln T + \int_0^T \frac{C_{pi}'}{T} dT - R \ln p + i_j') - R \sum_i n_i \ln c_i$$

$$(\lim_{T \rightarrow 0} S = 0, p_i = c_{ip})$$

c_i : モル分率, p : 混合気体の全圧, R : 気体定数
したがって, 混合気体の熱力学ポテンシャル G は, 式(1), (5), (6), (8)から次式で与えられる。

$$G = H - TS$$

$$= \sum_i n_i [\mu_i^0(T, p) + RT \ln c_i]$$

$$\mu_i^0(T, p) = (C_{pi}^0 - i_i') T - C_{pi}^0 T \ln T - T \int_0^T \frac{dT}{T^2} \int_0^T C_{pi}' dT + RT \ln p$$

$\mu_i^0(T, p)$ は温度 T , 圧力 p における成分気体 i の化学ポテンシャルである。混合気体中の成分 i の化学ポテンシャルは式(3), (4), (9)から次のように導かれる。

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_j \neq i}$$

$$= \mu_i^0(T, p) + RT \ln c_i$$

$$= G_i^0(T, p) + RT \ln c_i$$

ここで, $G_i^0(T, p)$ は, 温度 T , 圧力 p における成分気体 i の 1 モル当たりの熱力学ポテンシャルである。

2.1.3 水分ポテンシャル

湿り空気中の水分は気・液相水分が共存する単一成分系と考えられる (空気は多成分系であるが, 水分が相変化しても他成分の組成に影響しない) から, 飽和水蒸気圧 p_s を基準にした水分の化学ポテンシャル (以下では, 水分ポテンシャルと称す) μ_w は式(11)を基に,

$$\mu_w = \mu_w^0(T, p_s) + R_w T \ln(p_a/p_s)$$

で表される。ここで, $\mu_w^0(T, p_s)$ は温度 T の飽和空気の水蒸気化学ポテンシャル (飽和水分ポテンシャルと称す) であり, 式(1), (11)から次式で求められる。

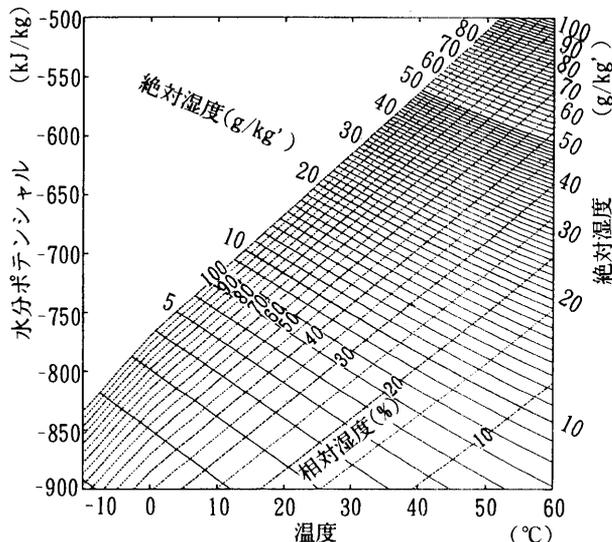


図 2-1 水分ポテンシャル線図

$$\mu_w^0(T, p_s) = G_w^0(T, p_s) = U_w - TS_w + p_s V$$

$$U_w = (3/2) R_w T \text{ [J/kg]}, R_w = 461.50 \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]},$$

$$V = 1.24411 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

また, 湿り空気を理想気体と仮定すると, 式(8)とマイヤーの関係式から次式が導かれる。

$$S_w = C_{pw} \ln T - R_w \ln p_s$$

$$C_{pw} = C_{vw} + R_w = (3/2) R_w + R_w \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]}$$

熱力学的平衡条件は, 温度 T , 圧力 (空気の全圧) p , 水分ポテンシャル μ_w が全系を通じて一様である場合に満足され, その質量的平衡条件は水分ポテンシャル μ_w で満足される。水分ポテンシャルと温度, 絶対湿度, 相対湿度の関係 (水分ポテンシャル線図) を図 2-1 に示す。

2.2 熱・水分移動方程式

水分ポテンシャルを用いた熱・水分移動方程式を提案するとともに, 提案式と従来式 (温度と水分化学ポテンシャルを用いた熱・水分移動方程式) を比較し, 両方程式の基本的な違いを明らかにする。

2.2.1 水分ポテンシャルを用いた場合^{文7)}

多孔質壁体内の水分収支式は, 質量保存より次式で表される。

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla J_w = 0$$

$$J_w = -\lambda'' \nabla \mu_w, W = \rho_{gw} \psi + \rho_{lw} \phi$$

λ'' : 水分ポテンシャル勾配に対する水分伝導率,

ψ : 空隙率, ϕ : 含水率, ρ_{gw} : 容積絶対湿度,

ρ_{lw} : 液水の比重

ここで, J_w と W は多孔質壁体内における単位面積当たりの湿流と単位容積当たりの水分重量である。式(17)を式(16)に代入し, ϕ を μ の関数として与えれば, ハイグロスコピック域の水分収支として式(18)が導かれる。

$$\frac{\partial \rho_{gw} \psi}{\partial t} + \rho_{lw} \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \lambda'' \nabla^2 \mu_w$$

$$= \lambda'' \nabla^2 \mu_w^0 + \lambda'' \nabla^2 \mu$$

熱収支式は, 単位容積当たりの多孔質壁体のエンタルピー H , 熱流 q を用いて次式で表される。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla q = 0$$

これを变形して, ハイグロスコピック域の熱収支は式(20)で表される。

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + r (\lambda'' \nabla^2 \mu_w - \frac{\partial \rho_{gw} \psi}{\partial t})$$

C : 比熱, r : 相変化熱, t : 時間, λ : 熱伝導率

高温の場合を除けば ρ_{gw} は非常に小さく, また一般材料の空隙率 ψ は小さいので, 式(18), (20)の $\partial \rho_{gw} \psi / \partial t$ は無視できる。

熱・水分収支に関する境界条件は次式で与えられる。

$$-\lambda'' \frac{\partial \mu_w}{\partial n} = \alpha'' (\mu_{wa} - \mu_{ws}) \quad (21)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - r\lambda'' \frac{\partial \mu_w}{\partial n} = \alpha (T_a - T_s) + r\alpha'' (\mu_{wa} - \mu_{ws}) + q_s \quad (22)$$

n : 境界面の内向き法線ベクトル, α : 対流熱伝達率,
 α'' : 水分ポテンシャル差に対する水分伝達率,
 q_s : 放射受熱量

2.2.2 温度と水分化学ポテンシャルを用いた場合^{文1)}

温度と水分化学ポテンシャルを用いた熱・水分移動方程式 (以下では従来式と称す) は, 式(23), (24)で表される。

$$\rho_{tw} \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \lambda_T' \nabla T + \nabla \lambda_\mu' \nabla \mu \quad (23)$$

$$C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + r(\nabla \lambda_T' \nabla T + \nabla \lambda_\mu' \nabla \mu) \quad (24)$$

ここで, λ_T' と λ_μ' は, 温度勾配と水分化学ポテンシャル勾配に対する水分伝達率で, 湿気伝達率 λ' を基に式(25)で与えられる。

$$\lambda_T' = \lambda' \frac{\partial p}{\partial T} \Big|_\mu, \quad \lambda_\mu' = \lambda' \frac{\partial p}{\partial \mu} \Big|_T \quad (25)$$

境界条件は次式で表される。

$$-\lambda_T' \frac{\partial T}{\partial n} - \lambda_\mu' \frac{\partial \mu}{\partial n} = \alpha_T' (T_a - T_s) + \alpha_\mu' (\mu_a - \mu_s) \quad (26)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - r(\lambda_T' \frac{\partial T}{\partial n} + \lambda_\mu' \frac{\partial \mu}{\partial n}) = (\alpha + \alpha_T') (T_a - T_s) + r\alpha_\mu' (\mu_a - \mu_s) + q_s \quad (27)$$

ここで, α_T' と α_μ' は温度差と水分化学ポテンシャル差に対する水分伝達率で, 湿気伝達率 α' を基に式(28)で与えられる。

$$\alpha_T' = \alpha' \frac{\partial p}{\partial T} \Big|_\mu, \quad \alpha_\mu' = \alpha' \frac{\partial p}{\partial \mu} \Big|_T \quad (28)$$

つまり, 式(23), (26)は式(29), (30)に示すように, 水蒸気圧勾配(差)から求められる湿流を, 温度勾配(差)と水分化学ポテンシャル勾配(差)で表現したものである。

$$-\lambda' \nabla p = -\lambda_T' \nabla T - \lambda_\mu' \nabla \mu \quad (29)$$

$$\alpha' (p_a - p_s) = \alpha_T' (T_a - T_s) + \alpha_\mu' (\mu_a - \mu_s) \quad (30)$$

2.2.3 熱・水分移動方程式の比較

提案式と従来式の根本的な違いは湿流の表現方法, つまり湿流の駆動力である。提案式では熱力学的状態量(水分ポテンシャル)を用いているが, 従来式ではこの状態量を示す状態変数(温度)と状態量の一部(水分化学ポテンシャル $= R_w T \ln(p_a/p_s)$ ^{文1)})を用いている(ただし, 式(29), (30)に示すように従来式の湿流の駆動力は基本的には水蒸気圧勾配(差)である)。そのため, 提案式と従来式

では係数(水分伝導率と水分伝達率)が異なる。ハイグロスコピック域では, 提案式の水分伝導率 λ'' は定数として扱えるのに対して, 従来式の水分伝導率 λ_T' と λ_μ' は式(25)を用いて湿気伝導率 λ' から計算ごとに算出する必要がある。このことは水分伝達率についても同じであり, 従来式の水分伝達率 α_T' と α_μ' は, 式(28)を用いて湿気伝達率 α' から計算ごとに算出する必要がある。

2.3 グラスウールの透湿実験^{文8)}

空気温湿度の制御が可能な実験装置(模型室)の間仕切り壁に試料を設置し, 装置室内の空気温湿度を変化さ

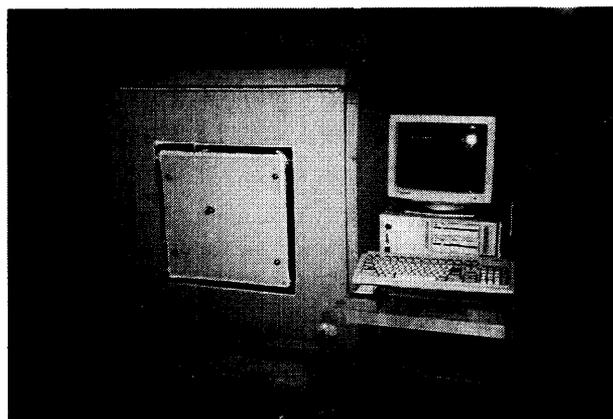


写真 2-1 実験装置外観

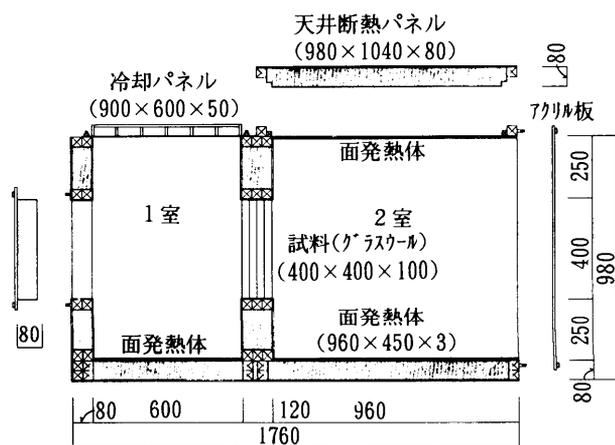


図 2-2 実験装置断面 (単位 mm)

表 2-1 グラスウールの物性値

	設定値	25°C一定, RH30%と90%のポテンシャル差
λ'	$2.789 \times 10^{-10} [\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$	1899.120 [Pa]
λ''	$3.4273 \times 10^{-12} [\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot (\text{J}/\text{kg}))]$	151.211 [kJ/kg]
α'	$3.1768 \times 10^{-8} [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$	1899.120 [Pa]
α''	$3.9899 \times 10^{-10} [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{J}/\text{kg}))]$	151.211 [kJ/kg]
$\rho_{tw} (\partial \phi / \partial \mu)$	$2.339 \times 10^{-9} [\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot (\text{J}/\text{kg}))]$	

λ' : 水蒸気圧勾配に対する湿気伝導率
 λ'' : 水分ポテンシャル勾配に対する湿気伝導率
 α' : 水蒸気圧差に対する湿気伝達率
 α'' : 水分ポテンシャル差に対する湿気伝達率
 $\rho_{tw} (\partial \phi / \partial \mu)$: 含水率 ϕ と水分化学ポテンシャル μ の関係

せることで試料の温湿度変動を解析する。さらに、測定値と熱・水分移動方程式（提案式と従来式）による計算値を比較することにより、数式モデルの妥当性について検討する。

2.3.1 実験装置

実験装置の外観と断面を写真2-1と図2-2に示す。実験装置は2室構成で、間仕切り壁の中央に試料(400×400×100mm)を設置している。本実験では、4枚重ねにした25mm厚のグラスウール(96kg/m³)を試料とした。表2-1にグラスウールの物性値を示す。装置室内の内法は、1室が600×900×900mm、2室が1000×900×900mmで、室内はアルミ箔付きアスファルトフェルトで仕上げられている(実験装置の換気および漏湿は無く、装置室内はほぼ完全に密閉されている)。1室天井は冷却パネルで構成されており、恒温水槽から冷水が循環する。また、1室床と2室床・天井には面発熱体を設置しており、1、2室の加熱・冷却を制御することで両室の空気温度を任意に設定できる。合板(5mm)で構成された2室天井と1、2室側壁には、断熱パネル(合板3mm付きフォームポリスチレン80mm)の取り付けが可能である。なお、室内湿度は飽和塩溶液で制御される。

2.3.2 実験方法および条件

実験条件を表2-2に示す。剥き出しのグラスウールに温湿度センサーを取り付け、それを模型室の間仕切り壁に設置した。模型室の温湿度を一定(初期温度は1室約28℃、2室約29℃、初期相対湿度は1室約72%、2室

約40%)にして養生した後に、2室のみ約50℃まで加熱した。室内湿度は飽和塩溶液(MgCl₂·6H₂OとKNO₃)で制御した。

表2-2 実験条件

		実験条件(初期条件)	実験終了(定常値)
透 湿	試料	28℃, 42~69%	——
	1室	28℃, 72%	30℃, 80%
	2室	29℃, 40%	50℃, 49%

2.3.3 実験結果および考察

図2-3に実験結果を示す。1、2室とグラスウール①~⑤の初期温度はほぼ等しい。このとき、グラスウールの絶対湿度と相対湿度は1、2室の間の値を示し、①(1室側)~⑤(2室側)の順に高い値となる。2室を加熱するとグラスウール①~⑤の絶対湿度はいずれも上昇する。その傾向は加熱側である⑤が最も顕著であり、定常後は⑤~①の順に高い値となる。また、室内空気絶対湿度は温度が高い2室の方が1室より高い値を示す。ただし、1、2室とグラスウール①~⑤の絶対湿度を比較すると、初期状態(等温場)では1、2室の間の値をグラスウール①~⑤が示すのに対し、加熱後の定常状態(非等温場)では1、2室はグラスウール①~⑤の間の値を示す。湿流は絶対湿度勾配(差)によって生じると仮定すれば、グラスウールの絶対湿度は非等温場でも定常時に

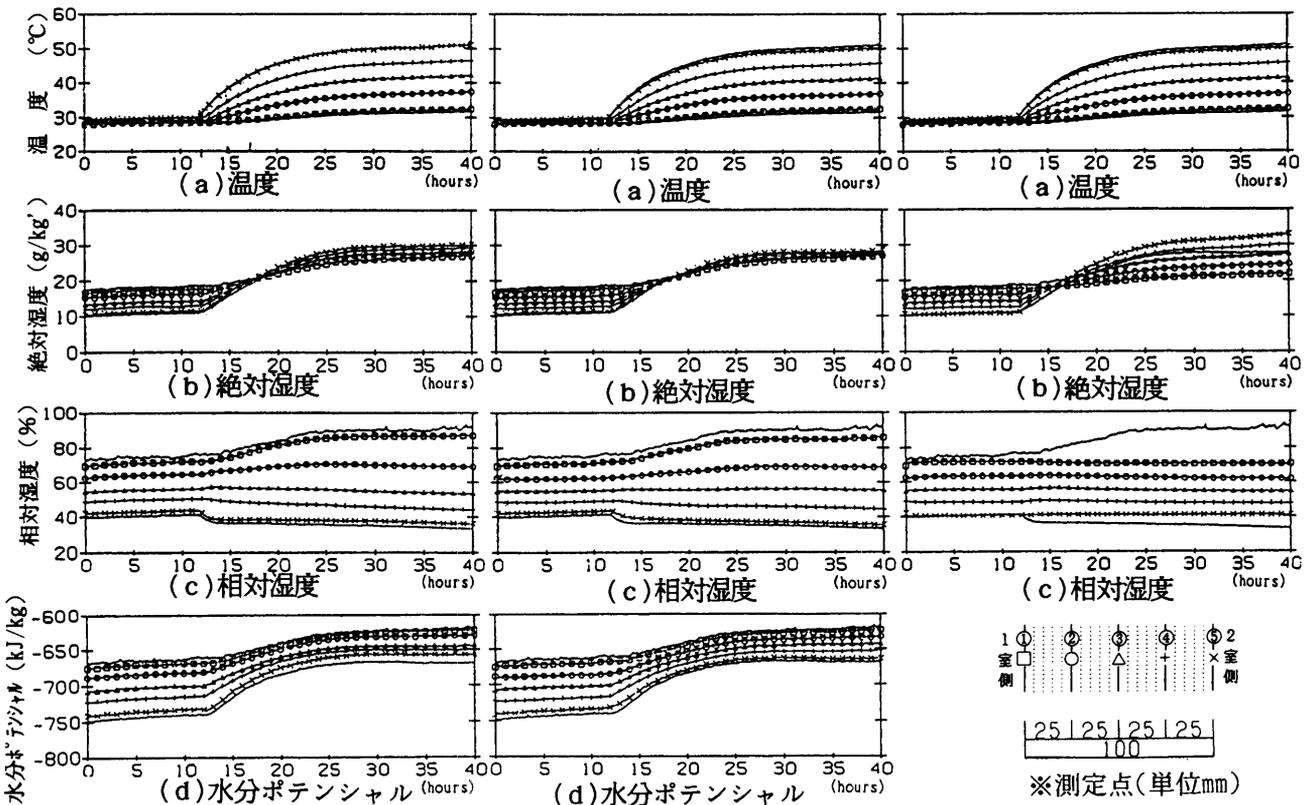


図2-3 透湿実験の測定値

図2-4 提案式による計算値

図2-5 従来式による計算値

は高湿側（2室）と低湿側（1室）の間に分布するはずであるが、本実験はそれとは矛盾する結果を示している。これに対して、水分ポテンシャルを用いた場合は、初期状態（等温場）でも加熱後の定常状態（非等温場）でも、1室、ガラスウール①～⑤、2室の順に高い値を示し、ガラスウール①～⑤は常に1、2室の間に分布している。ガラスウール①～⑤の相対湿度は常に1、2室の間の値を示し、その分布は加熱後に広がる。

2.3.4 測定値と計算値の比較

提案式と従来式による計算値を、図2-4、5に示す。提案式による計算値は、温度、絶対湿度、相対湿度、水分ポテンシャルのいずれも測定値と良く一致し、加熱後の1室側①、②と2室側④、⑤における相対湿度の上昇と低下が良く再現されている。一方、従来式による計算値は測定値より加熱後の絶対湿度分布が大きく、相対湿度にはほとんど変化がみられない。

3. 夏季冷房時の壁体内部温湿度変動^{文9)}

3.1 断熱壁体の夏季内部結露

試験家屋を用いた屋外比較実験により外壁の夏季温湿度変動について解析し、内部結露などの湿害防止に有効な断熱壁体の構成指針について検討する。

3.1.1 試験家屋および壁体構成

福岡県春日市に試験家屋（写真3-1参照）を建設した。この家屋の西壁に、構成の異なる4種類の壁体を取り付けた。図3-1に壁体構成を示す。断熱材には透湿性と吸放湿性を有するグラスウール(10kg/m³)を使用した。壁体1～4は順に、在来壁体、通気壁体、内部防湿層付き通気壁体(グラスウール中央に防湿層有り)、通気通湿壁体(室内側通湿層では上部通湿孔から湿気のみ移動)である。

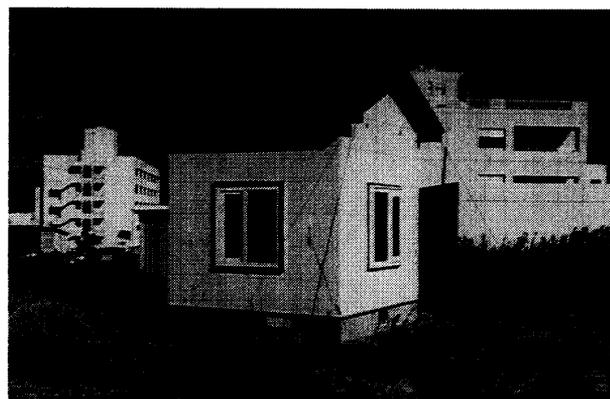


写真3-1 試験家屋外観

3.1.2 実験結果および考察

終日冷房（設定温度26℃）した1993年7月7～12日（冷房開始日は7月3日）と冷房しなかった7月12～13日の結果を図3-2～4に示す。内装材外側（グラスウール内表面）の相対湿度は昼間に上昇する傾向があり、冷房時には壁体1～4の順に最高で100%、97.4%、89.6%、88.7%を示す。在来壁体1では内部結露が発生し、通気壁体2でもその危険性が極めて高いのに対し、内部防湿層付き通気壁体3と通気通湿壁体4では内部結露の恐れは少ない。壁体1、2の外装材内側（グラスウール外表面）と内装材外側の水分ポテンシャルを比較すると、両壁体とも昼間は外装材内側の方が、夜間は内装材外側の方が高い値を示し、昼間は外気側から室内側へ、夜間は室内側から外気側へ湿流を生じる。外装材内側の昼間の水分ポテンシャルは壁体2より壁体1の方が高く（特に8日）、外装材内側と内装材外側の水分ポテンシャル差は壁体2より壁体1の方が大きいいため湿流量は壁体1の方が多し。壁体1、2の昼間の内部結露の有無は、この湿流量の差に起因する。通気壁体2の外装材内側と外気的水分ポテンシャルを比較すると、昼間は外装材内側の方

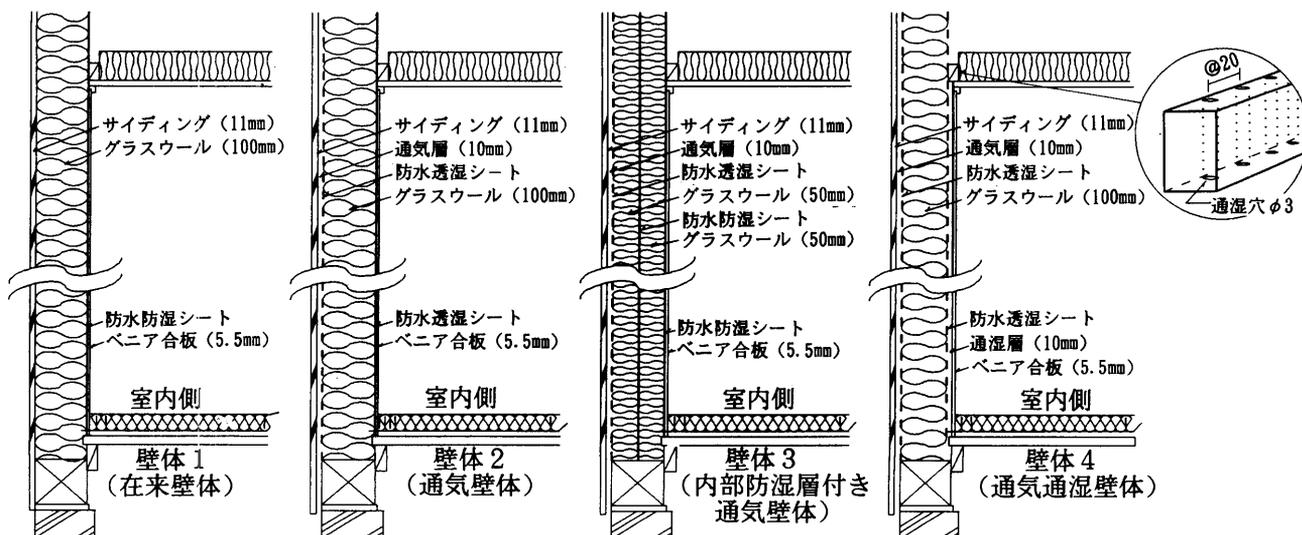


図3-1 壁体構成

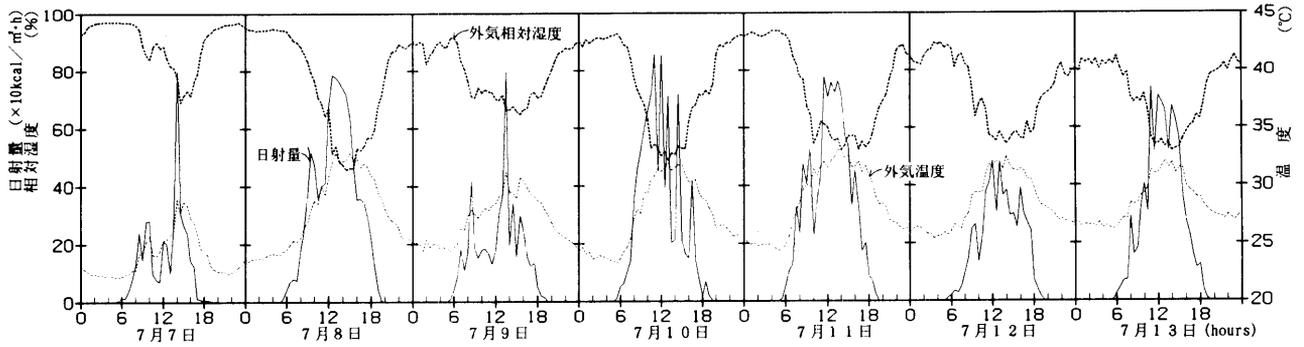


図3-2 外界気象 (1993年)

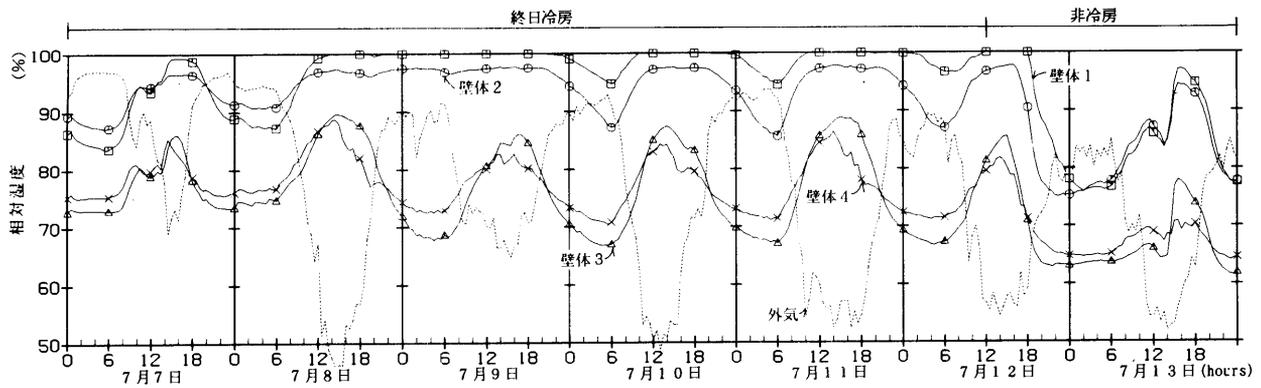


図3-3 内装材外側の相対湿度

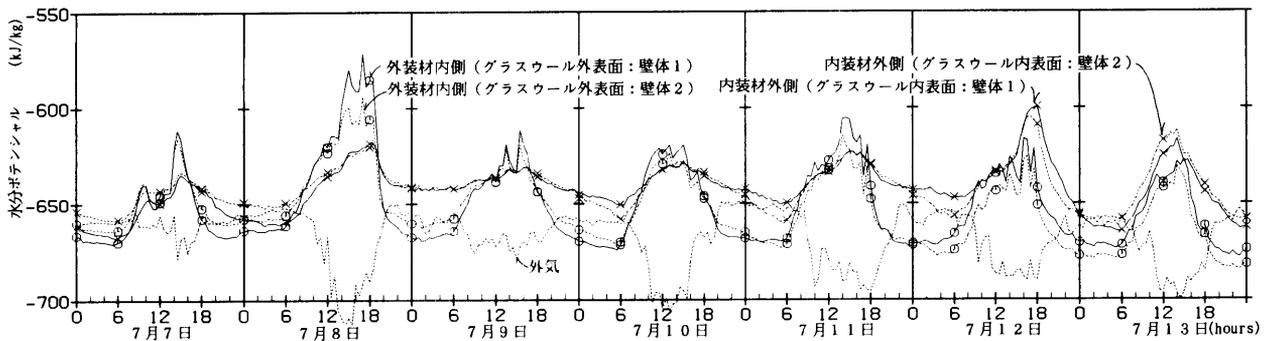


図3-4 内装材外側および外装材内側の水分ポテンシャル

が、夜間は外気の方が高い値を示す。つまり、昼間は壁体内から外気へ、夜間は外気から壁体内へ湿流を生じ、外気と壁体内部の間で通気層を介した湿気伝達が行われ、通気層が夏季の壁体内の蒸れ防止に有効であることがわかる。しかし、夏季内部結露の防止という点では、外気側から室内側への貫流湿流を内部防湿層で遮断する壁体3、あるいは壁体内部の湿気を室内側通気層から排湿する壁体4の方がはるかに優れている。なお、夏季の内部結露は室温にも依存するため、冷房停止後は在来壁体1でも結露しない。



写真3-2 実測家屋外観

3.2 高断熱高气密住宅の夏季壁体内部温湿度調査^{文10)}

夏季蒸暑地域に建設された高断熱高气密住宅の外壁の温湿度変動を測定し、壁体構成の違いによる夏季冷房時

の内部温湿度の差異を明らかにする。

3.2.1 測定家屋

佐賀県三養基郡基山町に建設された2×6構法の高断

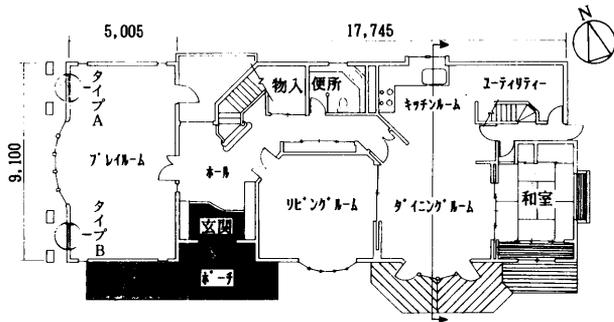


図3-5 1階平面および供試壁体位置 (単位 mm)

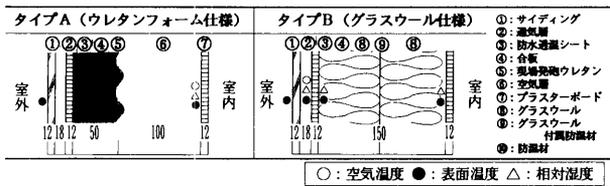


図3-6 壁体構成 (単位 mm)

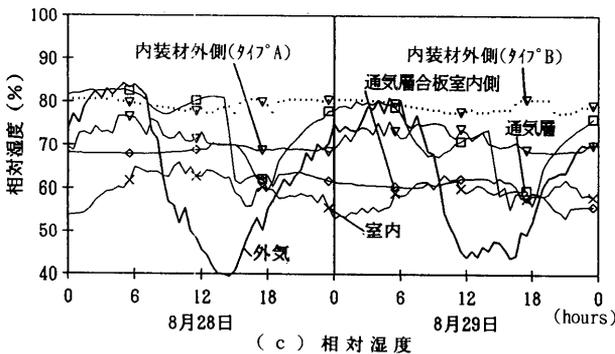
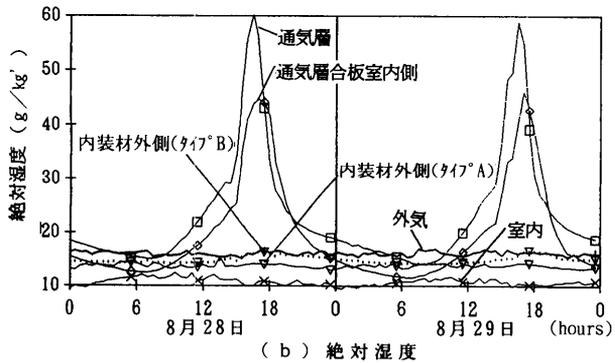
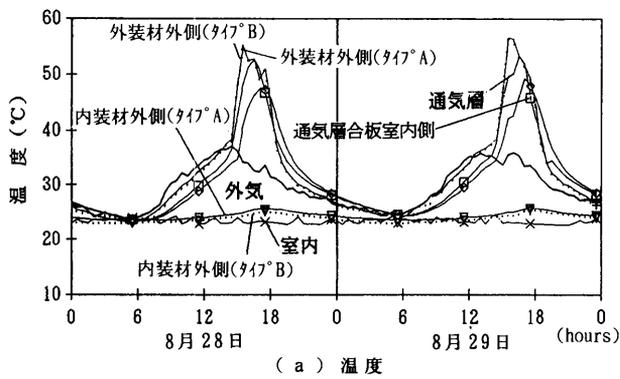


図3-7 夏季実測結果

熱高气密住宅の外観と平面を写真3-2と図3-5に、外壁の構成(タイプA, B)を図3-6に示す。壁体はタイプA, Bいずれも通気壁体であるが、断熱材としてタイプAにはウレタンフォームを使用し、タイプBには100mm厚のグラスウール2枚を圧縮して使用した。タイプAの室内側空気層は小屋裏と通じており湿気を拡散させる目的で設置している。タイプBは内部にグラスウール付の防湿材があり、3.1で述べた内部防湿層付き通気壁体と類似した仕様である。通気層には基礎の上部から外気が流入し、通気層内空気は底附近から流出する。ここでは、西壁のみを解析の対象とした。

3.2.2 測定結果

室内を終日冷房(設定温度23°C)した1992年8月28~29日の結果を図3-7に示す。通気層と通気層合板室内側(タイプB)の絶対湿度は、壁体温度が高い14~16時に躯体からの放湿により著しく上昇し、最高でそれぞれ約60g/kg¹, 46g/kg¹を示す。しかし、内装材外側の絶対湿度はタイプA, Bいずれも13~15g/kg¹で、終日ほぼ一定の値を示す。内装材外側の相対湿度は、タイプAで67~75%, タイプBで80%程度である。3.1の結果と同じように内部防湿層付き通気壁体では内部結露の危険性は少ない。また、ウレタンフォームなどの透湿性と吸放湿性が少ない材料を使用した場合には壁体内部はさらに低湿に保たれる。

3.3 供試壁体の湿気移動実験^{文10)}

室内空気温湿度の制御が可能な実験装置の一面に構成が異なる各種供試壁体を設置し、それらの外表面受熱量のステップ変化にともなう温湿度変動の過渡応答を比較

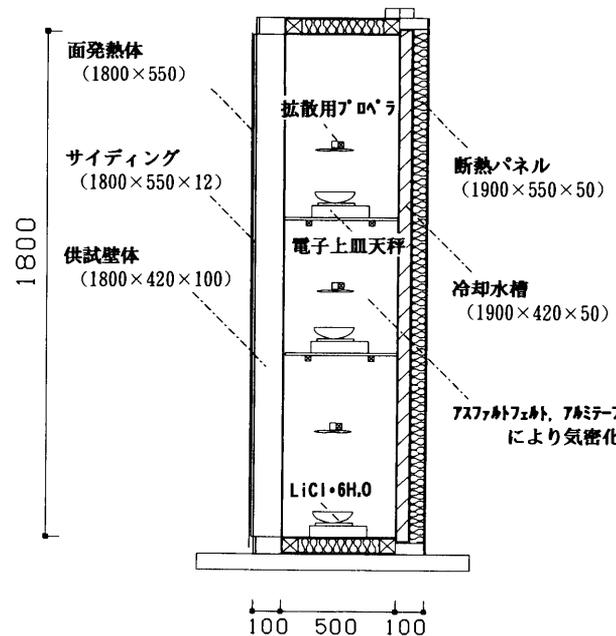


図3-8 実験装置断面 (単位 mm)

することにより、壁体構成の違いが内部温湿度に及ぼす影響について検討する。

3.3.1 実験装置

図3-8に実験装置断面を示す。実験装置の一面は水槽で構成され、これに恒温水槽から冷水を循環することにより装置室内を冷却できる。室内湿度は飽和塩溶液で制御し、装置室内は空気温湿度が一様になるようにプロペラで攪拌する。実験装置は人工気候室内に設置しており、装置室内と外気に相当する人工気候室内の空気温湿度は任意に設定可能である。また、供試壁体の外装材外側(サイディング外表面)には面発熱体を付設しており、外装材の日射受熱を仮想的に再現できる。

3.3.2 実験内容および条件

図3-9に供試壁体の構成を、表3-1に実験条件を示す。供試壁体は在来壁体、内部防湿層付き通気壁体、通気通湿壁体であり、いずれも断熱材には30℃、90%のもとで約6時間養生したグラスウール100mm (10kg/m³)を使用した。在来壁体、内部防湿層付き通気壁体ではグラスウールのみが吸放湿するように躯体材料は断湿した。装置室内と人工気候室の空気温湿度をそれぞれ26℃、40%と26℃、60%で一定(初期状態)にした後に面発熱体で供試壁体の外装材外表面が35℃になるまで加熱した。

表3-1 実験条件

養生条件	30℃ 90% (10kg/m ³ のグラスウールを約6時間養生)
設定条件	外気 26℃ 60%一定, 室内 26℃一定
加熱条件	室内, 外気温度26℃一定 面発熱体 加熱

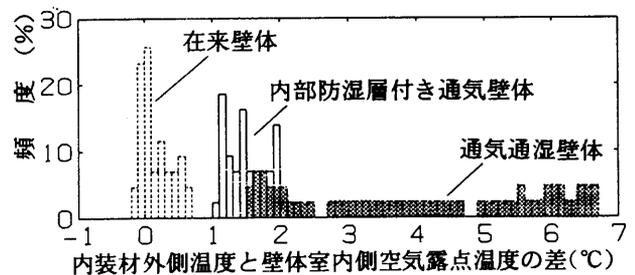


図3-11 内装材外側温度と壁体室内側空気露点温度の差の頻度分布

3.3.3 実験結果

壁体内部温湿度の過渡応答を図3-10に、内装材外側温度と壁体室内側空気露点温度の差の頻度分布を図3-11に示す。壁体内部が密閉される在来壁体では、相對

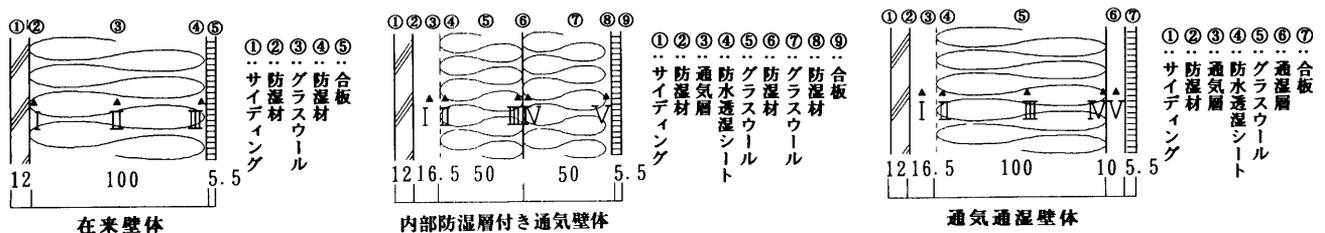


図3-9 供試壁体の構成と測定点(単位 mm)

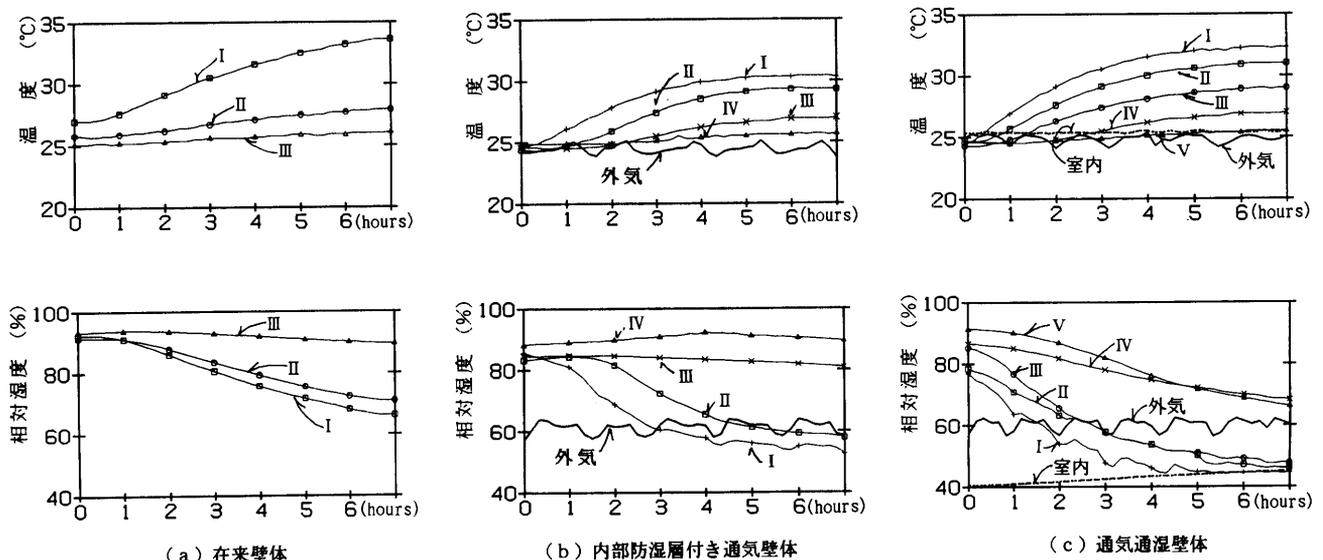


図3-10 壁体内部温湿度の過渡応答

湿度は温度勾配に依存して形成される。壁体温度が上昇するにつれてグラスウールからの放湿（脱着）が促進され、壁体内部空気の露点温度が高くなり内装材外側で結露する。内部防湿層付き通気壁体の相対湿度は、内部防湿層を境に外側と内側で異なる変動を示す。外側相対湿度（測定点 I, II）は通気層を介した排湿に起因して次第に低下し60%以下の値を示すのに対し、内側相対湿度（測定点 III, IV）はわずかしか変化せず在来壁体と同じように温度勾配に依存する。通気通湿壁体の相対湿度はいずれの部位も次第に低下し、内装材外側（測定点 IV, V）でも70%以下の値を示す。

4. 熱・水分移動方程式による数値シミュレーション

4.1 数式モデル^{文11)}

2.2の水分ポテンシャルを用いた熱・水分移動方程式と、以下に示す通気層の熱・水分収支式を使用して壁体内部温湿度の数値計算を行う。

$$C_p \gamma V \frac{dT}{dt} = \sum_s \alpha_c S_s (T_s - T_v) + C_p \gamma n V (T_o - T_v) \quad (31)$$

$$\gamma_d V \frac{dx}{dt} = \sum_s S_s \alpha'' (\mu_{ws} - \mu_{wv}) + \gamma_d n V (x_o - x_v) + \sum_s S_v \alpha_v'' (\mu_{wo} - \mu_{wv}) \quad (32)$$

C_p : 湿り空気の比熱, n : 換気回数, S : 面積,

V : 通気層容積, x : 絶対湿度, α_c : 対流熱伝達率,

γ : 湿り空気の比重

添字 d : 乾燥空気, o : 外気, s : 表面, v : 通気層, ここで、式(32)の α'' と α_v'' は、通気層に面する壁体表面の

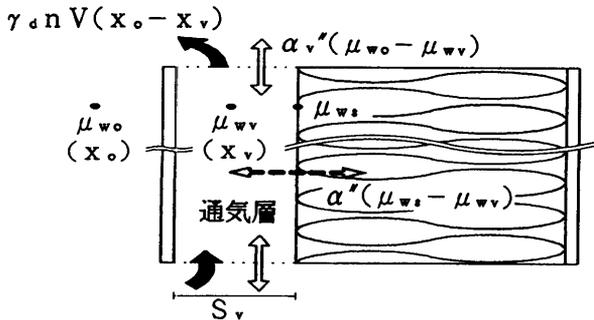


図4-1 通気層の熱・水分収支モデル

水分伝達率と通気口の水分拡散係数で、式(32)右辺の各項は、通気層と壁体表面の水分伝達（第1項）、換気（第2項）、通気口での水分ポテンシャル差（通気層空気と外気の水分ポテンシャル差）による水分拡散（第3項）を表す（図4-1参照）。なお、通気層の熱・水分収支は、式(31)と式(32)の右辺第2項（換気）を無視したものとなる。

4.2 計算値と測定値の比較

3.3節に示した測定値と計算値を比較することにより、数式モデルの妥当性について検討する。内部防湿層付き通気壁体の測定位置および温湿度変動（測定値と計算値）を図4-2に示す。温度の測定値と計算値は、①～⑤のいずれの位置でも良く一致する。相対湿度は、通気層①とグラスウール通気層側②でわずかに差を生じるが、その差は最大でも6%程度で、内部防湿層の室内側④と内装材外側⑤ではほぼ一致する。温湿度とも計算値は測定値を比較的良い精度で捕捉する。

4.3 壁体内部温湿度の数値シミュレーション

標準気象データ（大阪、福岡、鹿児島、那覇）を用いた数値シミュレーションにより、夏季蒸暑地域における壁体内部結露の有無について月別、地域別、方位別、壁体別に検討する。

4.3.1 計算条件

壁体モデルは、図3-1に示す壁体1～4（在来壁体、通気壁体、内部防湿層付き通気壁体、通気通湿壁体）とする。各壁体の内装材と外装材は合板(5.5mm)とサイ

表4-1 熱・水分伝達に関する係数

通気層の水分伝達率	1.3667×10^{-11} kg/($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{J} \cdot \text{kg})$)
通気層の水分伝達率	1.2629×10^{-11} kg/($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{J} \cdot \text{kg})$)
通気層（空気流出入口）の水分拡散係数	2.0×10^{-10} kg/($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{J} \cdot \text{kg})$)
通気層（排湿口）の水分拡散係数	1.4249×10^{-11} kg/($\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{J} \cdot \text{kg})$)
内表面对流熱伝達率	3.0 W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
外表面对流熱伝達率	風速の関数 ^{文12)}
内外表面の放射熱伝達率	温度の関数

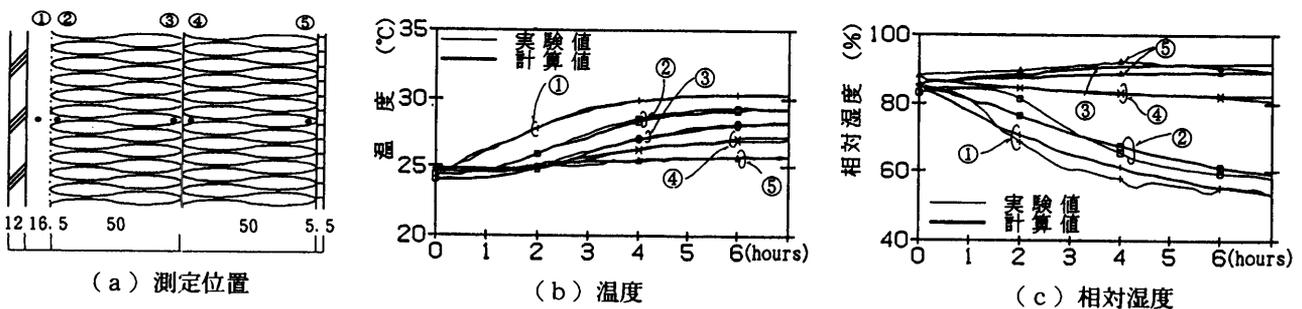


図4-2 内部防湿層付き通気壁体の測定位置および温湿度変動

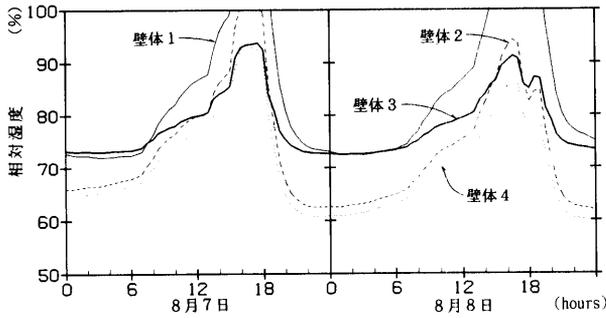


図4-3 内装材外側相対湿度の経時変化（福岡，西壁）

ディング（12mm）で、断熱材にはグラスウール（10kg/m³，100mm）を使用する。ただし、壁体モデルの吸放湿はグラスウールのみで生じるものと仮定し、サイディングと合板のそれは無視する。表4-1に熱・水分伝達に関する係数を示す。通気層の換気回数は2回/h一定で、通気層と通湿層に面するグラスウール表面の水分伝達率は透湿シートを純抵抗層とみなして算出した。なお、室内空気温度は26℃一定で、壁体の日射吸収率 a_s は0.7である（ただし、図4-7には $a_s=0.5, 0.3$ の場合も併記）。

4.3.2 計算結果および考察

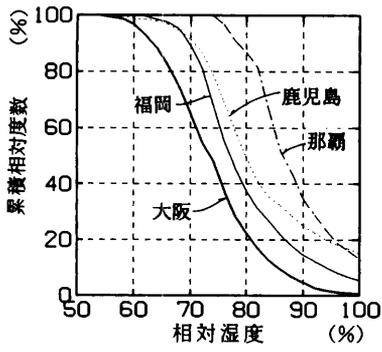
図4-3に福岡（8月7～8日）における西壁の内装材外側相対湿度の経時変化を示す。在来壁体1と通気壁体2の相対湿度は昼間に100%を示すのに対して、内部防湿層付き通気壁体3と通気通湿壁体4のそれは最高でも約93%である。図4-4に各地域における在来壁体の内装材外側相対湿度の方位別累積相対度数（6～9月）を示す。東・西壁はいずれの地域でも結露し、鹿児島と那覇では北壁でも結露する。鹿児島と那覇では比較的同じ割合で結露するが、相対湿度が90%以上を示す割合は那覇の方がはるかに多い。例えば、西壁では鹿児島は約19%であるのに対して那覇では約34%にもなる。図4-5に各地域における在来壁体（西壁）の内装材外側相対湿度の月別累積相対度数を示す。いずれの地域においても内部相対湿度は7、8月に高くなる。例えば、大阪で相対湿度が90%以上を示す割合は6～9月の順に約4%、約12%、約8%、約2%であり、内部結露は7、8月にのみ発生する。図4-6に福岡における内装材外側相対湿度の方位別・壁体別累積相対度数（6～9月）を示す。いずれの方位においても相対湿度は通気通湿壁体4が最も低い値を示す。通気壁体2と内部防湿層付き通気壁体3の相対湿度を比較すると、90%以下の範囲では壁体2の方が低い値となるが、90%以上の範囲では壁体3の方が低い値となる。壁体3の相対湿度はほぼ90%以下であるのに対し、壁体2のそれは東・西・南壁で90%を超え、わずかながら100%を示す。壁体2と壁体4を比較すると、両者は低湿域ではほぼ同じ値を示すが、高湿域では壁体4の方が低くなる。つまり、室内側通湿層の排湿効

果は高湿域で顕著に現れる。図4-7に日射吸収率を変えた場合の福岡における在来壁体の内装材外側相対湿度（西・南壁）の累積相対度数（8月）を示す。相対湿度が75%以上の範囲では、日射吸収率が小さい方が低湿になる。これは、日射受熱量が少ない方が壁体の温度上昇が抑制され、グラスウールの脱着水分量が減少するためである。図4-8に那覇における壁体4の方位別累積相対度数を示す。南・北壁の相対湿度はほぼ90%以下の値を示すが、東・西壁のそれはわずかながら90%以上の値を示す。蒸暑地域でも通気壁体は壁体内部の蒸れ防止に有効であるが、壁体内部に防湿層あるいは通湿層を設けることでさらに効果的となる。特に、通気層に面する部位（通湿シート等）の透湿抵抗が大きい場合は有用であると考えられる。ただし、那覇のような多湿地域では通気通湿壁体でも内部結露を生じる恐れがあるため、併せて外壁外表面の日射遮蔽や日射吸収率を小さくする等の工夫が必要である。

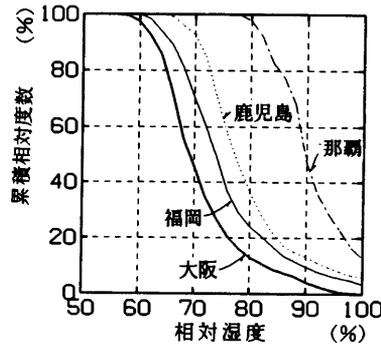
5. 結語

季節蒸暑地域における住宅の断熱気密断湿指針と夏季冷房時の壁体内部結露防止策を提案することを目的として、壁体内部の熱・水分移動現象を実験的・解析的に明らかにするとともに、断熱壁体の最適構成法について検討した。結果は以下のとおりである。

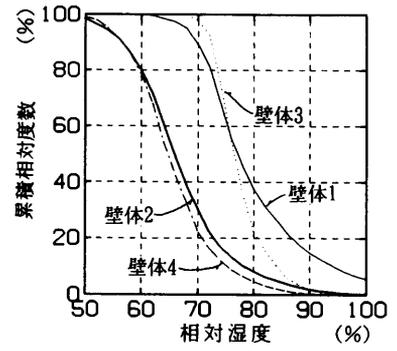
- 1) 水分ポテンシャル（熱力学的状態量）を用いた熱・水分移動方程式を提案し、グラスウールの透湿実験との照合により数式モデルの妥当性を検証した。
- 2) 夏季冷房時を想定した屋外暴露実験（断熱材としてグラスウールを使用）により、在来壁体では内部結露が生じること、貫流湿流を内部防湿層で遮断する内部防湿層付き通気壁体、および壁体内部の湿気を室内側通湿層から排湿する通気通湿壁体では結露が発生しないことを明らかにした。
- 3) 高断熱高气密住宅（佐賀県基山町，R2000クラス）の内部防湿層付き通気壁体および通気通湿壁体において、夏季冷房時の内装材外側相対湿度はそれぞれ80%程度、67～75%であり、いずれの壁体も内部結露は生じなかった。
- 4) 供試壁体の両側空気温湿度と壁体外表面加熱量（日射受熱量に相当）を制御した実験により、壁体内の初期相対湿度が90%と高く、壁体外表面が加熱された条件において、上記2)の屋外暴露実験結果が再現されることを確認した。
- 5) 熱・水分移動方程式を用いた数値計算により、各種壁体の湿気性状に関する地域特性（大阪、福岡、鹿児島、那覇）と方位特性を検討した。在来構法の東・西壁ではいずれの地域でも内部結露が発生する。通気通湿壁体の結露防止効果は大きく、福岡の場合は



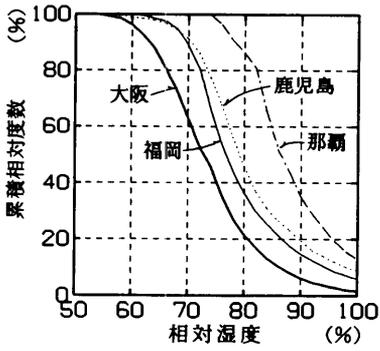
(a) 東壁



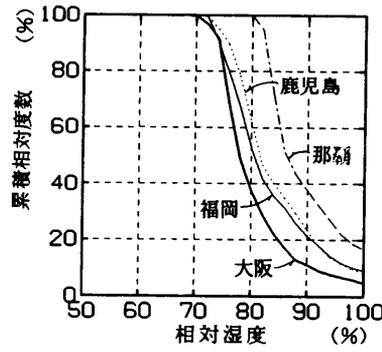
(a) 6月



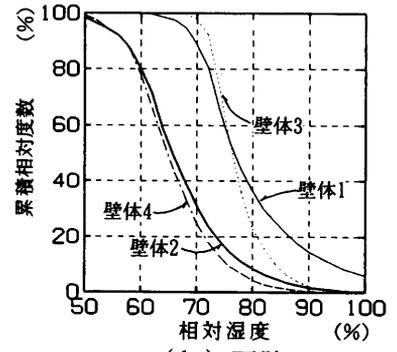
(a) 東壁



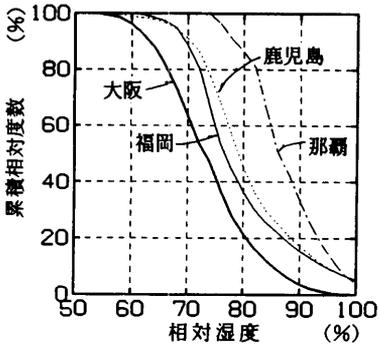
(b) 西壁



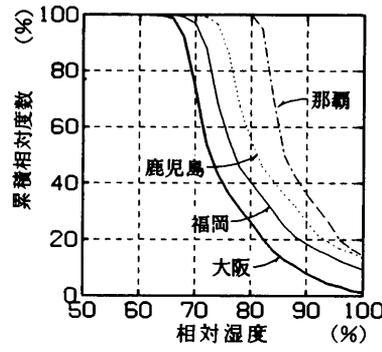
(b) 7月



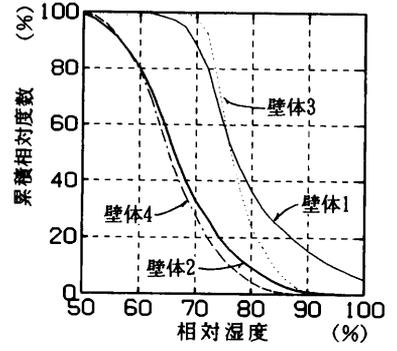
(b) 西壁



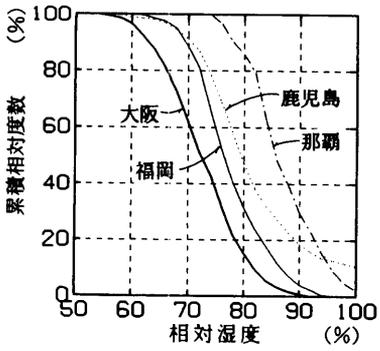
(c) 南壁



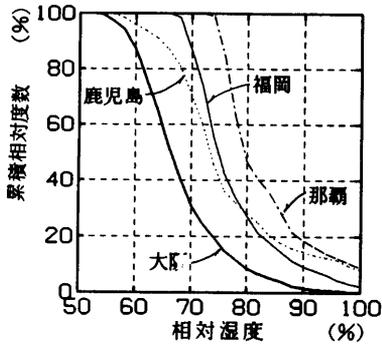
(c) 8月



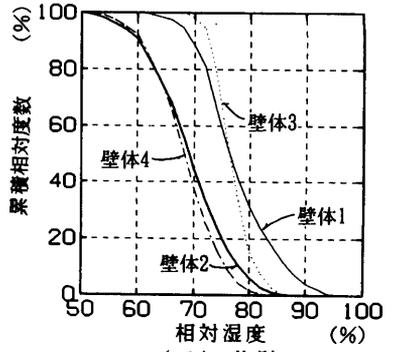
(c) 南壁



(d) 北壁



(d) 9月

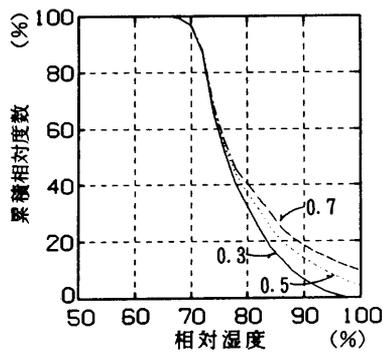


(d) 北壁

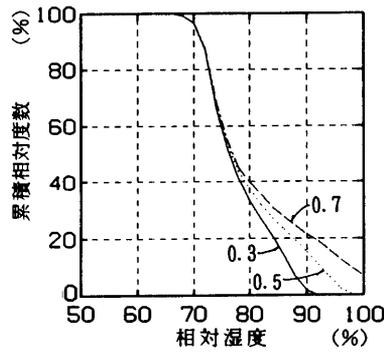
図4-4 地域と内装材外側相対湿度 (在来壁体, 6月~9月)

図4-5 地域と西壁内装材外側相対湿度 (在来壁体)

図4-6 壁体構成と内装材外側相対湿度 (福岡, 6月~9月)



(a) 西壁, 8月



(b) 南壁, 8月

図4-7 日射吸収率と内装材外側相対湿度
(福岡, 在来壁体)

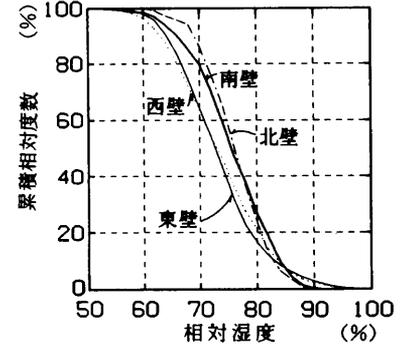


図4-8 壁体4(通気通湿壁体)と
内装材外側相対湿度
(那覇, 6月~9月)

壁体方位にかかわらず内装材外側相対湿度を90%以下に保つことができる。

<参考文献>

- 1) 松本 衛: 建築壁体における熱・水分同時移動および水分蓄積に関する研究, 京都大学学位請求論文, 1978
- 2) 松本 衛, 銚井修一, ほか3名: セメント系多孔質建築材料の結露, 乾燥過程の実験とその解析, 日本建築学会計画系論文報告集, 第353号, pp.11~20, 1985
- 3) 坂本雄三, ほか2名: 木造建築における湿気予測と結露害防止に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.943~944, 1992
- 4) 持田浩一郎, 宇田川光弘: 吸放湿性のある壁体の調湿作用についてのシミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.771~772, 1991
- 5) 例えば永峰 章, 土屋喬雄: 高断熱高気密化住宅の壁体の防露性能に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.951~952, 1992, など
- 6) 小出昭一郎: 基礎物理学2 熱学, 東京大学出版会, 1991
- 7) 尾崎明仁, ほか7名: 水分ポテンシャルによる壁体湿気移動解析その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1237~1238, 1993
- 8) 佐藤章造, 渡辺俊行, ほか6名: 水分ポテンシャルによる壁体湿気移動解析その4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1243~1244, 1993
- 9) 尾崎明仁, ほか2名: 季節蒸暑地域における木造断熱壁体の最適構成に関する研究, 福岡大学工学集報, 第50号, pp.127~135, 1993
- 10) 渡辺康徳, 渡辺俊行, ほか6名: 高断熱高気密住宅の夏季壁体内部結露に関する研究その5, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1255~1256, 1993
- 11) 藤田協二, 渡辺俊行, ほか6名: 高断熱高気密住宅の夏季壁体内部結露に関する研究その6, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1257~1258, 1993
- 12) 木村建一: 電算機による動的空調負荷計算法, 空気調和・衛生工学, Vol.46, No.3, pp.3~38, 1972

<研究組織>

主査	渡辺 俊行	九州大学工学部建築学科教授
委員	龍 有二	九州大学工学部建築学科助教授
	須貝 高	福岡大学工学部建築学科教授
	尾崎 明仁	福岡大学工学部建築学科助手
	赤司 泰義	九州大学工学部建築学科助手
協力	藤田 協二	九州大学大学院修士課程
	山崎 繁	九州大学大学院修士課程
	湯浅 孝	九州大学大学院修士課程
	木場 隆徳	九州大学大学院修士課程
	佐藤 章造	九州大学大学院修士課程
	渡辺 康徳	九州大学大学院修士課程