第Ⅳ章 木造住宅の水分に起因する劣化リスク分析・同解説

関連報告

関連報告　目次

1. モルタル直張り構法外壁の国総研実験を対象としたシミュレーション計算 72
1.1 目的 72
1.2 計算対象外壁 72
1.3 シミュレーション計算の概要 73
1.3.1 基本計算式 73
1.3.2 計算で用いた材料の物性値 73
1.3.3 計算対象部位および計算条件 73
1.4 計算結果 74
1.5 まとめと考察 75
2. モルタル直張り構法と通気構法との比較 78
2.1 目的 78
2.2 計算対象外壁 78
2.3 シミュレーション計算の概要 79
2.3.1 基本計算式 79
2.3.2 計算で用いた材料の物性値 79
2.3.3 計算対象部位および計算条件 79
2.4 計算結果 80
3. 外皮層構成と躯体内部の長期湿潤化リスクの関係 85
3.1 目的 85
3.2 ２つの壁体構成 85
3.3 計算条件 86
3.4 計算結果 86
3.5 まとめと考察 87
4. 外皮層構成と躯体内部の長期湿潤化リスクの関係（続） 88
4.1 目的 88
4.2 ２つの壁体構成 88
4.3 計算条件 89
4.4 計算結果 89
4.5 まとめと考察 91
5. バルコニー笠木下の漏水による長期湿潤化リスクについて 92
5.1 目的 92
5.2 計算対象壁体構成 92
5.3 計算条件 93
5.4 計算結果 93
5.5 知見と指針 94

執筆者

1～5　土屋喬雄（東洋大学）

1. モルタル直張り構法外壁の国総研実験を対象としたシミュレーション計算

1.1 目的

先に国総研が実施した屋外実験住宅によるモルタル直張り構法外壁の熱・湿気環境の測定を対象にシミュレーション計算を行い、その有用性を確認すること、さらに雨水の浸透による影響を試験的に求め、今後の劣化リスク評価に役立てることを目的としている。

1.2 計算対象外壁

下図に示したモルタル直張り構法の外壁を対象とする。外側より軽量ラスモルタル 20mm、アスファルトフェルト 430、構造用合板 12mm、グラスウール 100mm、気密シート、石膏ボード 12mm で構成されている。

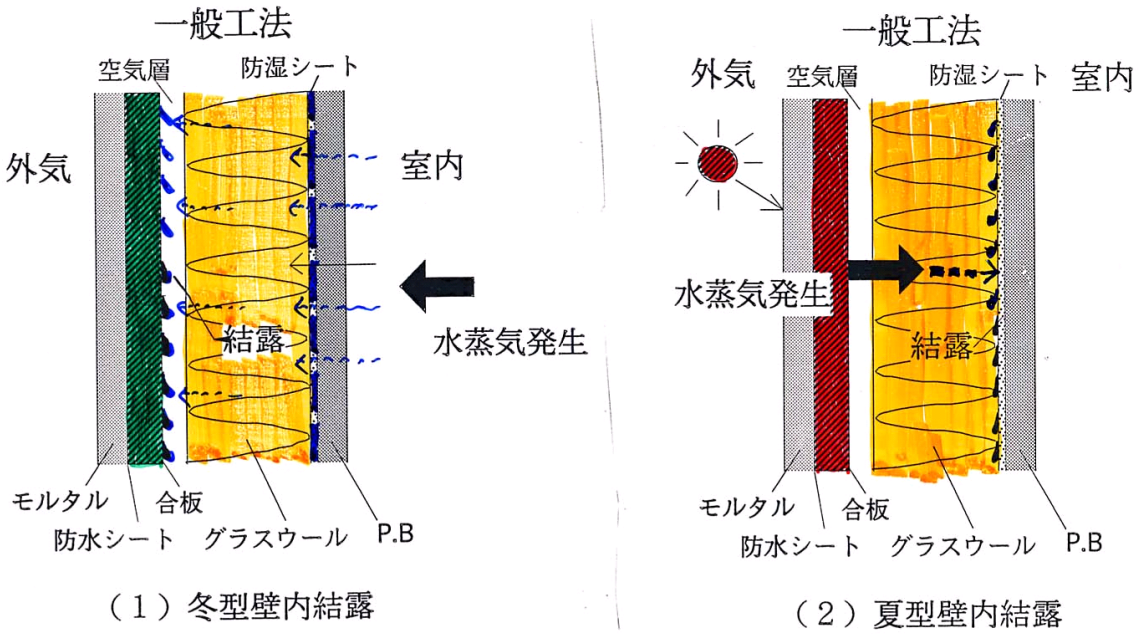


図 1.1 冬型結露と夏型結露の発生メカニズム

1.3 シミュレーション計算の概要

1.3.1 基本計算式

多孔質材である合板およびモルタルは、以下の熱水分同時移動方程式による。

合板及びモルタル

$$\frac{\partial w}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(Dw\frac{\partial w}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(D\theta\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)$$

$$Dw=\lambda`\cdot\partial g/\partial w$$

$$D\theta=\lambda`\cdot\partial g/\partial \theta$$

$$c\gamma\frac{\partial \theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)$$

W：含水率（kg/m^3）
X：絶対湿度（kg/kg′）
λ`：湿気伝導率（kg/mh（kg/kg））
θ：湿度（℃）
λ：熱伝導率（kcal/mh℃）
γ：密度（kg/m^3）

境界条件

$$-\left(Dw\frac{\partial w}{\partial x}+D\theta\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)=\alpha`\left(Xs-X\right)$$

$$-\lambda\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)s=\alpha\left(\theta s-\theta\right)$$

ここに、ｇ：平衡含水率曲線　X=g(w,θ)

1.3.2 計算で用いた材料の物性値

計算で用いた材料の物性値を下表に示す。

表 1.1 計算で用いた材料物性値

材料	熱伝導率	比熱	密度	湿気伝導率
	kcal/mh℃	kcal/kg℃	kg/㎥	kg/mh(kg/kg′)
合　　板	0.130	0.27	644	0.0010
グラスウール	0.038	0.19	15	0.1000
モルタル	0.570	0.20	1660	0.0080

なお、防湿層の透湿抵抗を 50 m^{2}hmmHg/g、アスファルトフェルトの透湿抵抗を 10 m^{2}hmmHg/g、石膏ボードの透湿抵抗を 1.3 m^{2}hmmHg/g とした。

1.3.3 計算対象部位および計算条件

（1）計算対象部位

計算対象部位は、モルタル、合板、グラスウールで、それぞれ 10 分割して熱水分同時移動方程式の差分近似をおこなった。

（２）室内外の条件

室内の温湿度は、実測データを用いた。

外気の温湿度は実測されていなかったため、北壁通気層下部の温湿度の実測データを用いた。また外表面温度は合板内外の実測データより推定した。

（３）雨水の浸透条件

外気相対湿度が 90%をこえるとき降雨があり、次式に従い雨水がモルタル外表面から浸透するものとした。なお今回は、C_{ab}=20(g/m^{2}h/wt%), w_{max}=20(wt%)を用いた。

$$q' = C_{ab} \times (w_{max} - w_s) \text{-------(1)}$$

ここに、 q ’：雨水の浸透量 (g/m^{2}h)

C_{ab}：雨水の浸透係数 (g/m^{2}h/wt%)

w_{max}：モルタル飽和吸水時の含水率 (wt%)

w_s：モルタル外表面の含水率 (wt%)

1.4 計算結果

計算結果を図 1.2～1.4 に示した。

（１） 南壁下部

防湿層裏、合板内側、合板外側の温度に関しては、計算と実測での良好な一致がみられる。相対湿度に関しては、合板外側では計算と実測はよく合っているが、防湿層裏、合板内側で４月以降計算と実測との乖離が大きくなっている。水蒸気の流れが壁内から室内へ向かっていることを考慮すると、何らかの理由により合板内側の含水率が高くなったものと思われる。

実測では夏型結露を除いて劣化リスクの兆候は見られないが、雨水の浸透を加えた計算ではモルタル内表面と合板外側での相対湿度が大きく変動し、劣化リスクが増すものと推察される。

（２） 北壁下部

南壁下部と同様に防湿層裏、合板内側、合板外側の温度に関しては、計算と実測での良好な一致がみられる。相対湿度に関しては、合板外側では計算と実測はよく合っているが、防湿層裏、合板内側で４月以降計算と実測との乖離が大きい。南壁下部と比べると、温度、相対湿度とも変動幅が小さく夏型結露も少ない。

雨水の浸透を加えた計算では、モルタル内表面と合板外側での相対湿度が徐々に増大し４月初めには 100%に達している。当該部位はラス網を留め付けるステープル等の金属が多数あり錆の進行による劣化リスクが急増するものと推察される。

1.5 まとめと考察

今回の計算では、実測との比較によりその有用性を確認することに主眼を置いたが、内外の境界条件が不明であったこと、とりわけ降雨による影響が捉えられなかったことは残念の一語に尽きる。今後の共同実験では事前の綿密な調整が必要であろう。

劣化リスク評価にあたっては、外側からの雨水の影響と内側からの水蒸気による結露の影響を同時に組み入れた数値化が必要であり、今後の課題である。

・雨がかりの大きさ

・雨水の浸透性--------外装材の吸水率と乾燥性------- ステープル等の腐食------ 合板腐食

・塗膜の防水性

・夏型結露の危険性-------木部の腐れ、カビの発生

・冬型結露の危険性-------合板の腐れ

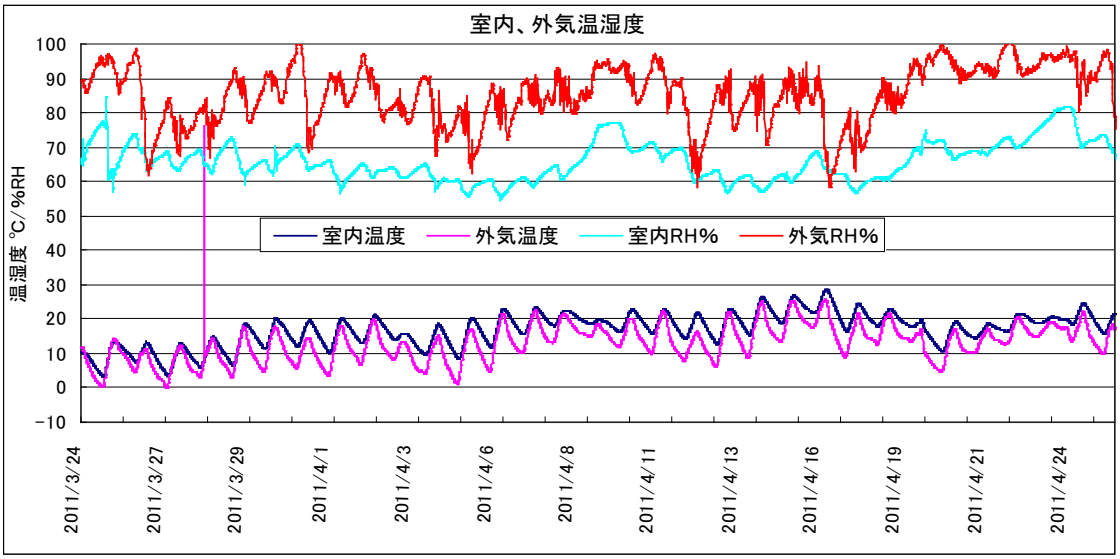
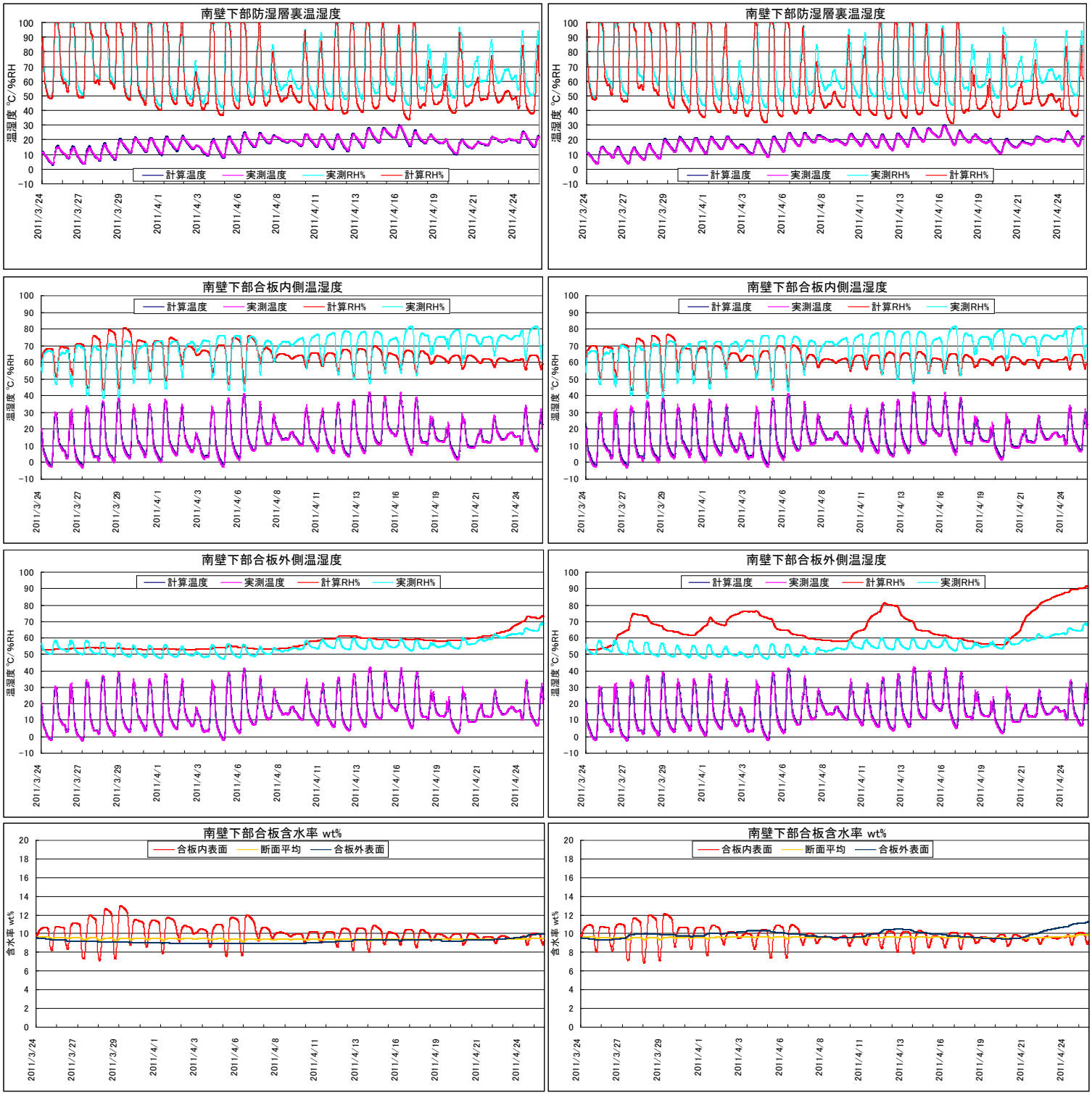
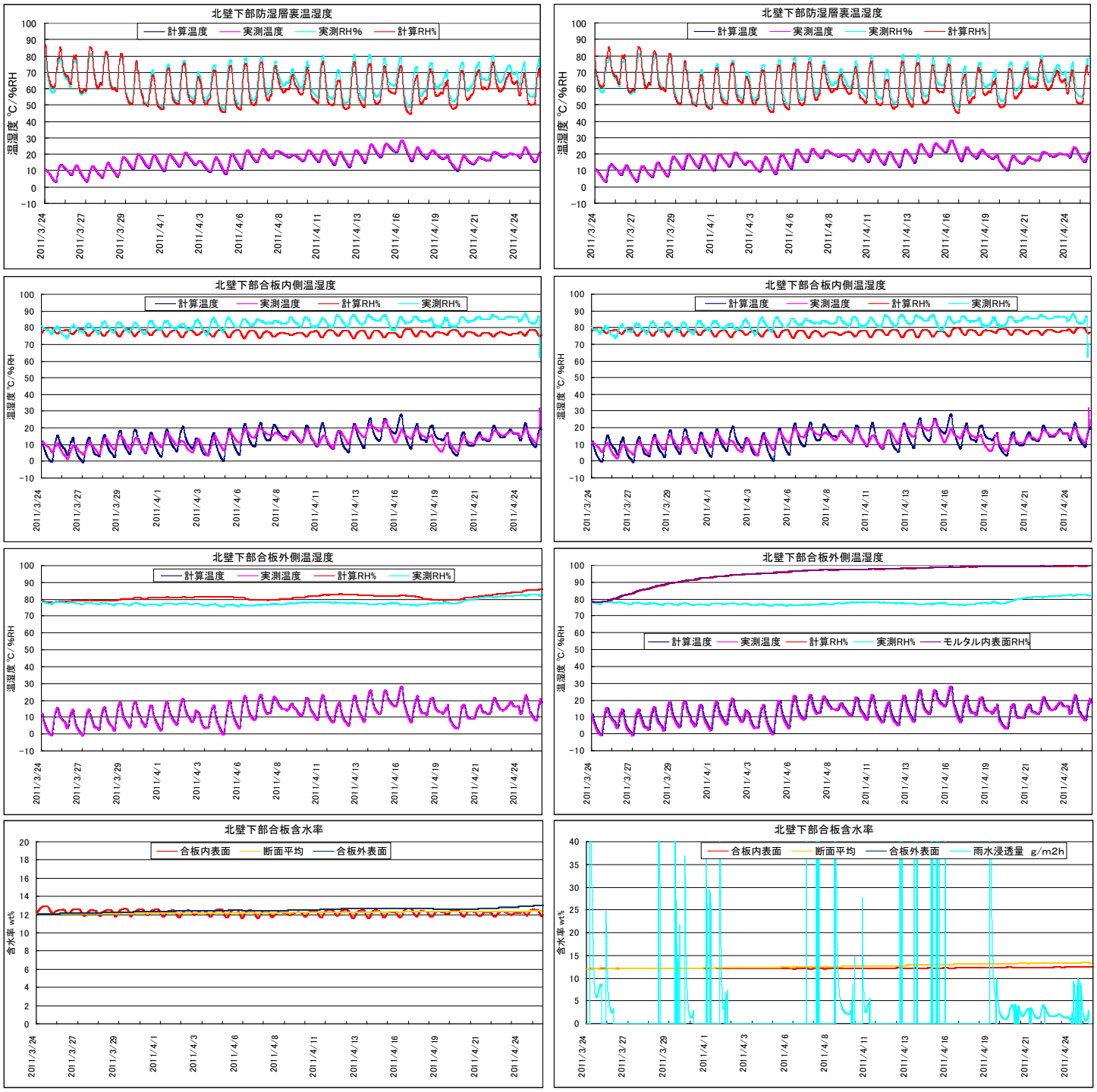


図 1.2 室内および外気（推定値）の温湿度



（１）雨なし、外気 RH＝実測値＋20%　　（２）雨あり、外気 RH>94%のとき

図 1.3 南壁下部　温湿度実測と計算との比較



（１）雨なし、外気 RH＝実測値＋20%　　（２）雨あり、外気 RH>90%のとき

図 1.4 北壁下部　温湿度実測と計算との比較

2. モルタル直張り構法と通気構法との比較

国総研実験を対象としたシミュレーション計算

2.1 目的

先に報告した国総研による屋外実験住宅のモルタル直張り構法外壁を対象とした熱・湿気環境のシミュレーション計算と今回実施したモルタル通気構法壁での結果を比較し、その有用性や問題点等をあきらかにすることを目的としている。

2.2 計算対象外壁

下図に示したモルタル直張り構法および通気構法の外壁を対象とする。外側より軽量ラスモルタル 20mm、アスファルトフェルト 430、構造用合板 12mm、グラスウール 100mm、気密シート、石膏ボード 12mm で構成されている。

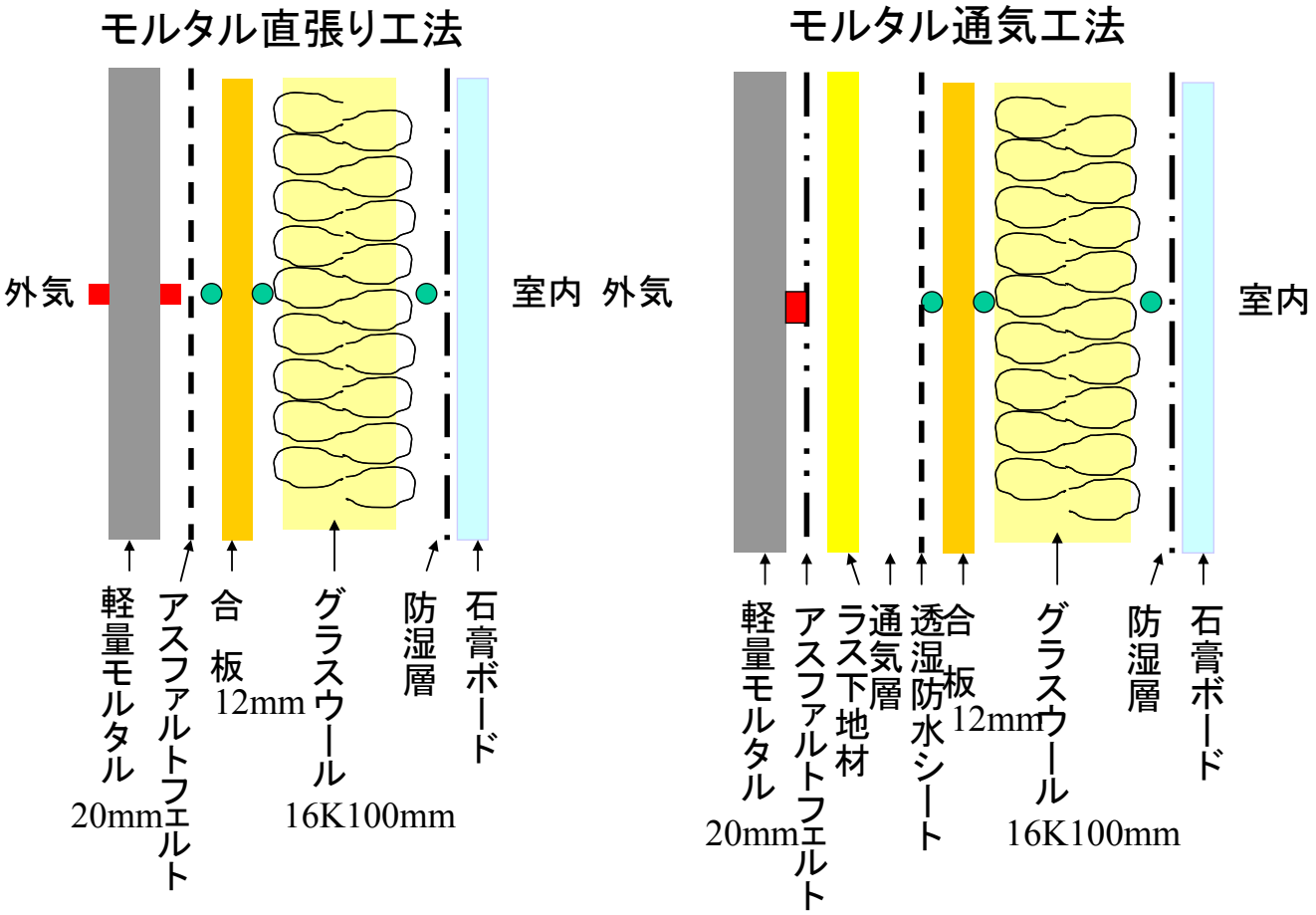


図 2.1 計算対象のモルタル直張り外壁とモルタル通気構法外壁の断面構成

2.3 シミュレーション計算の概要

2.3.1 基本計算式

多孔質材である合板およびモルタルは、以下の熱水分同時移動方程式による。

合板及びモルタル

$$\frac{\partial w}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(Dw\frac{\partial w}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(D\theta\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)$$

$$Dw=\lambda`\cdot\partial g/\partial w$$

$$D\theta=\lambda`\cdot\partial g/\partial \theta$$

$$c\gamma\frac{\partial \theta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)$$

W：含水率（kg/m^3）
X：絶対湿度（kg/kg′）
λ`: 湿気伝導率（kg/mh（kg/kg））
θ： 温度（℃）
λ：熱伝導率（kcal/mh℃）
γ：密度（kg/m^3）

境界条件

$$-\left(Dw\frac{\partial w}{\partial x}+D\theta\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)=\alpha`\left(Xs-X\right)$$

$$-\lambda\left(\frac{\partial \theta}{\partial x}\right)s=\alpha\left(\theta s-\theta\right)$$

ここに、 g ：平衡含水率曲線　X=g(w,θ)

2.3.2 計算で用いた材料の物性値

計算で用いた材料の物性値を下表に示す。

表 2.1 計算で用いた材料物性値

材料	熱伝導率	比熱	密度	湿気伝導率
	kcal/mh℃	kcal/kg℃	kg/㎥	kg/mh(kg/kg')
合　　板	0.130	0.27	644	0.0005
グラスウール	0.038	0.19	15	0.1000
モルタル	0.570	0.20	1660	0.0080

なお、防湿層の透湿抵抗を 1000 m^{2}hmmHg/g、アスファルトフェルトの透湿抵抗を 10 m^{2}hmmHg/g、石膏ボードの透湿抵抗を 1.3 m^{2}hmmHg/g とした。

2.3.3 計算対象部位および計算条件

（1）計算対象部位

計算対象部位は、モルタル、合板、グラスウールで、それぞれ 10 分割して熱水分同時移動方程式の差分近似をおこなった。

（２）室内外の条件

室内の温湿度は、実測データを用いた。

外気の温湿度は実測されていなかったため、北壁通気層下部の温湿度の実測データを用いた。また外表面温度は合板内外の実測データより推定した。

2.4 計算結果

計算結果を図 2.2～2.5 に示した。

（３） 冷房時の夏型結露（図 2.2）

直張り構法では冷房開始と同時に夏型結露が防湿層裏で発生し、測定期間中継続している。一方通気構法では夏型結露の発生は見られない。測定期間後半に見られるが、量はわずかである。これは主に合板内側の表面温度の相違に拠り、通気構法のほうが数度低いためである。通気により冷えたというよりラス下地板と通気層の付加により熱抵抗が増したことの影響が大きい。とくに本計算で対象としたのは南面下部であり、外気の影響がもろに及ぶことも大きな要因である。

（４） 断熱材への注水の影響（図 2.3）

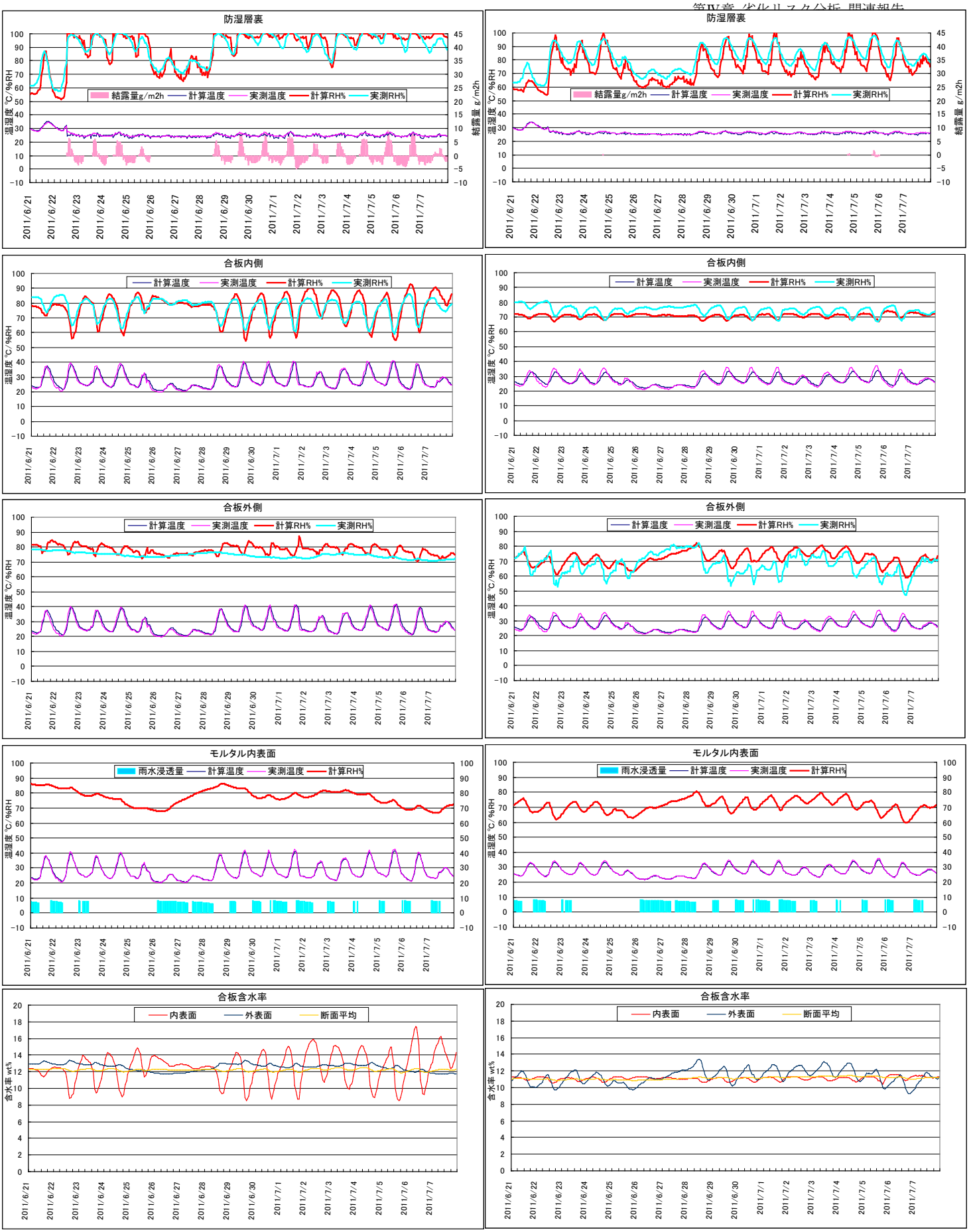
合板内側での注水の影響は、直張り、通気ともほぼ同じで温度以外の差は少ない。通気では温度がやや低めであり防湿層裏の相対湿度が低くなっている。合板外側は、通気層の影響で差が大きく出ている。

（５） タイル貼りモルタル裏漏水あり時の直張り構法と通気構法との比較（図 2.4）

タイル貼り仕上げで、モルタルとアスファルトフェルトとの間に雨水が浸入する場合が最もリスクの大きいケースである。直張りの場合は当該個所の相対湿度が 100%で継続し、ステープルの腐食が進行して１年で約 170μm の厚さ減少が生じている。通気構法では 120μm 程度であるが、その差は少ない。（３）、（４）はⅢ地域楯岡（山形県）の標準気象データによる南壁の計算結果である。合板とラス下地板の初期含水率を 20wt%とした。

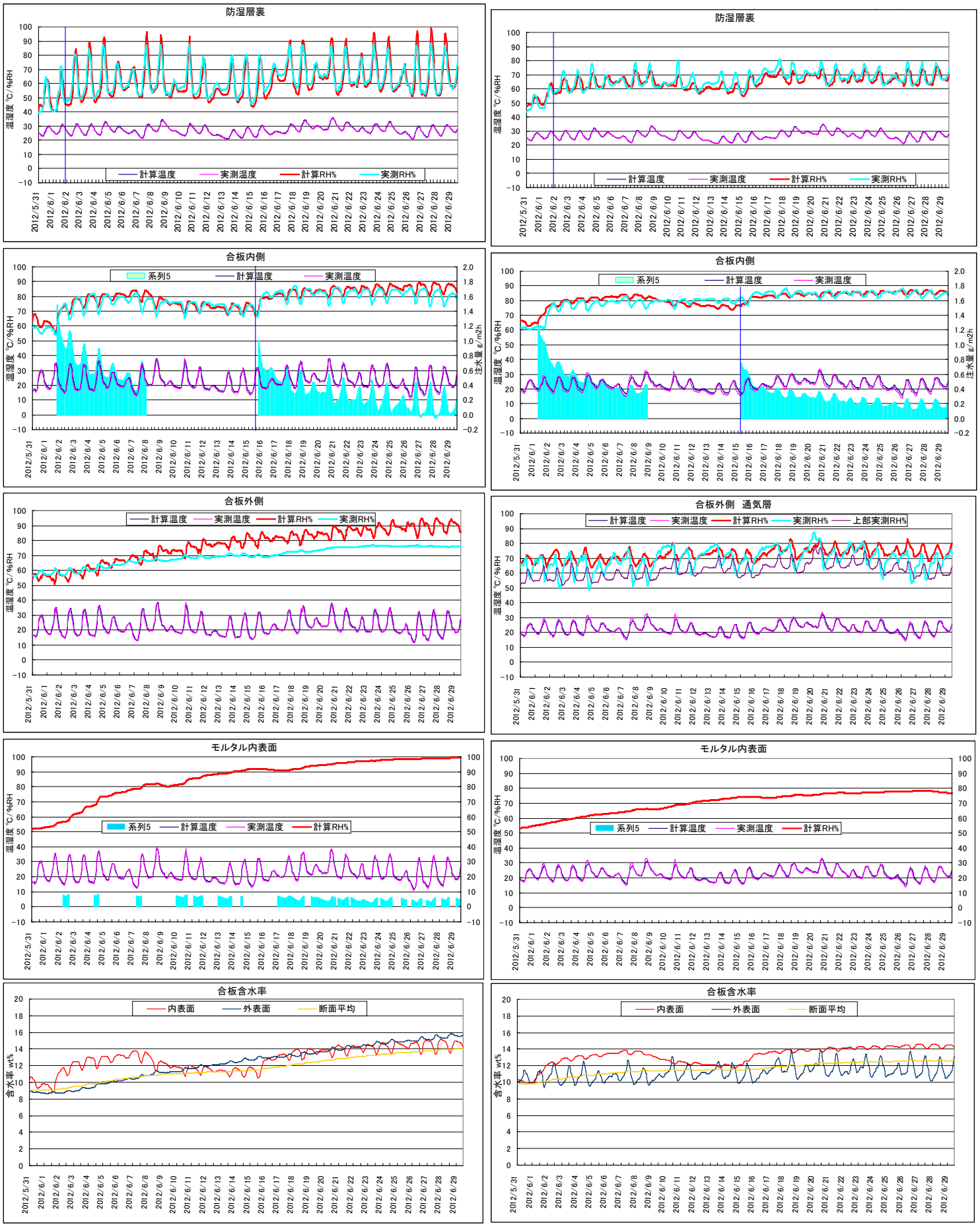
（６） 通気構法・タイル貼りモルタル裏漏水あり時の透湿ルーフィングの効果（図 2.5）

上でみたとおり通気構法でもステープル腐食のリスクが高いことが判った。アスファルトフェルトとラス下地板が漏水の通気層への放散を妨げているからである。そこで、アスファルトフェルトの代りに透湿ルーフィングにし、さらにラス下地板の透湿率を 2 倍にしたらどうなるかを計算した。ステープルの腐食は 1 年で 20μm 弱で効果の大きいことが判った。



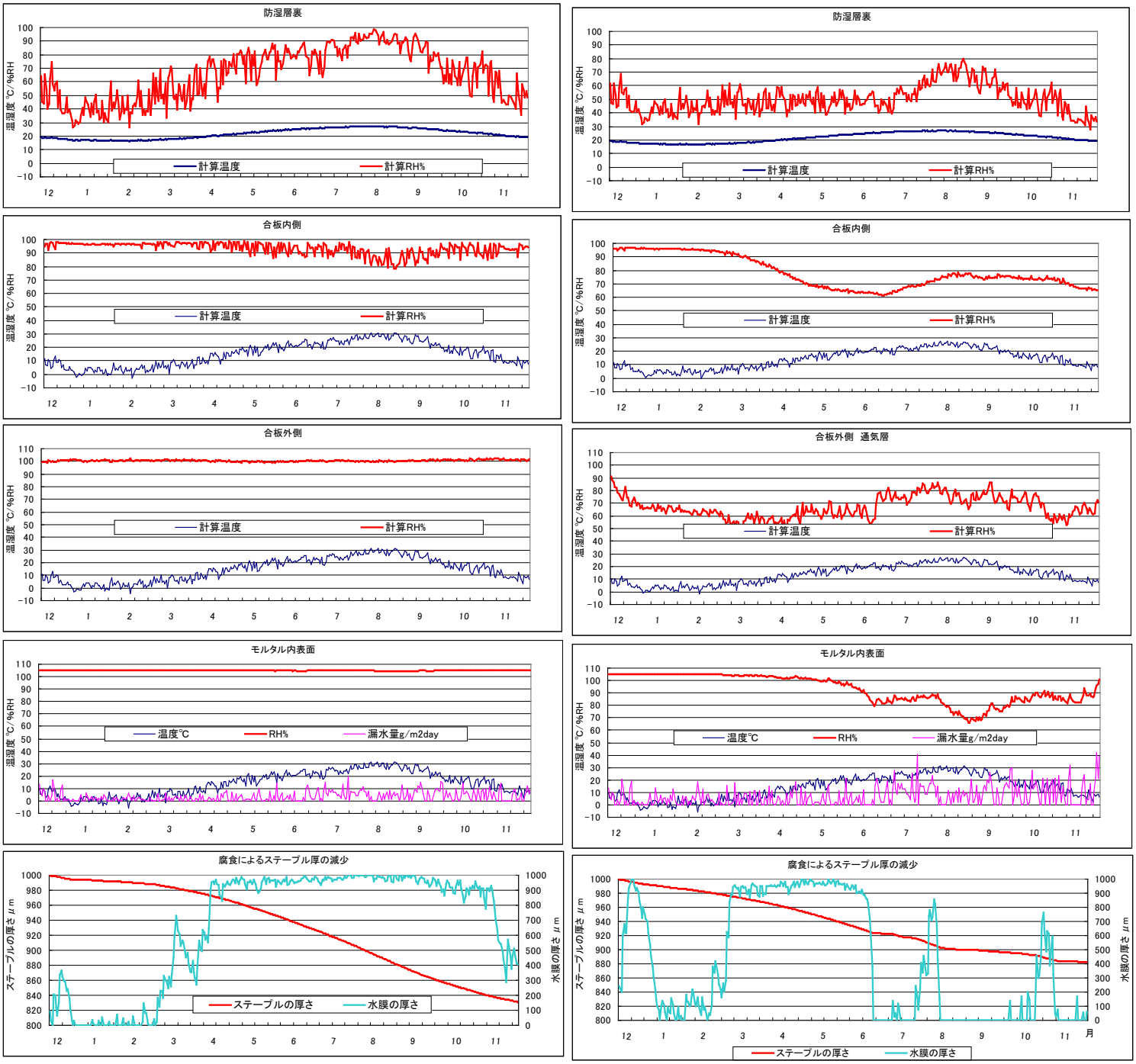
（１）モルタル直張り構法　　（２）モルタル通気構法

図 2.2 冷房時の夏型結露　直張り構法と通気構法との比較



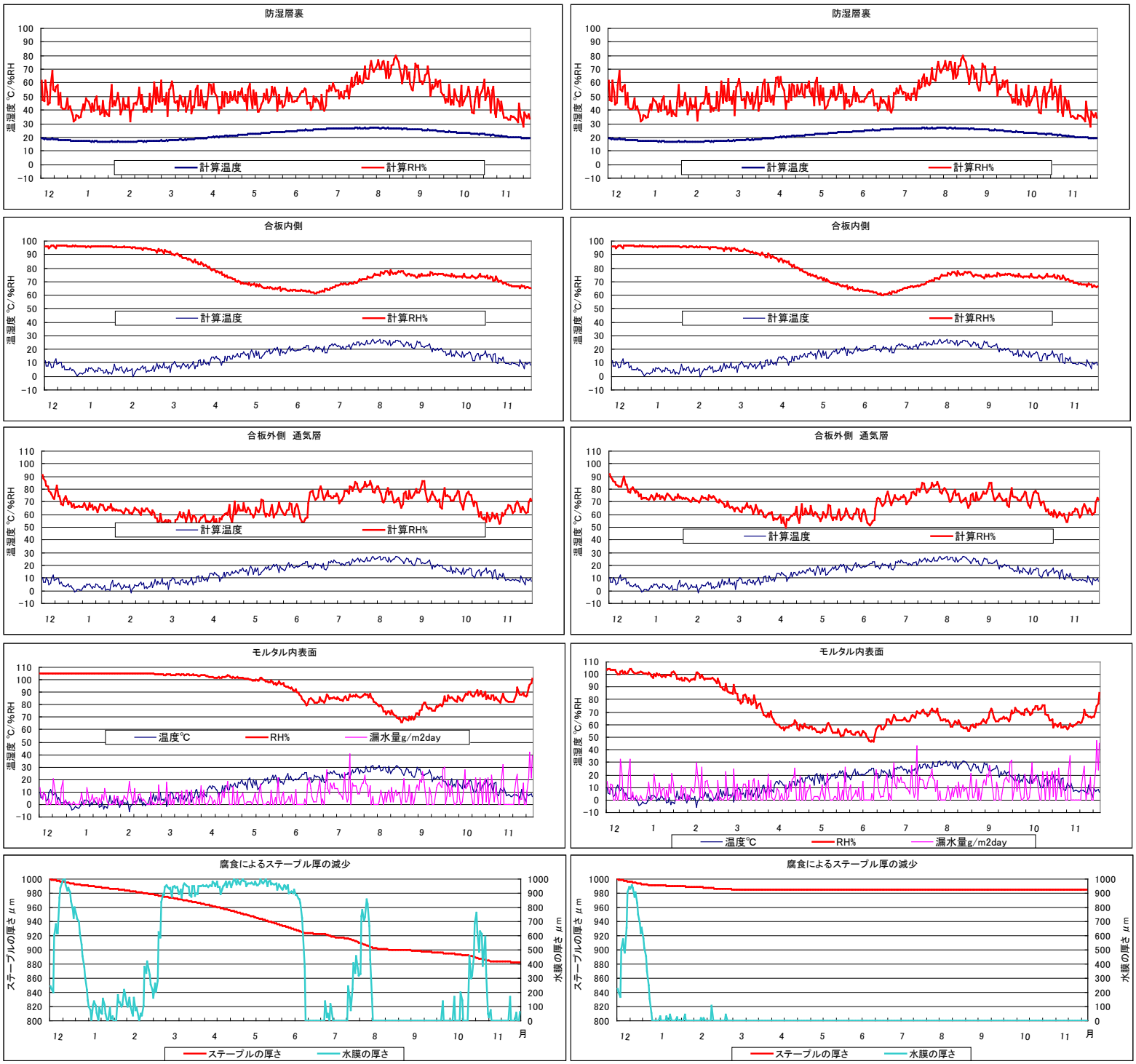
（１）モルタル直張り構法　　（２）モルタル通気構法

図 2.3 注水時の直張り構法と通気構法との比較



（１）モルタル直張り構法　　（２）モルタル通気構法

図 2.4 タイル貼りモルタル裏漏水あり時の直張り構法と通気構法との比較



（１）アスファルトフェルト　　（２）透湿ルーフィング

図 2.5 通気構法タイル貼りモルタル裏漏水あり日平均値（山形県楯岡標準気象データ）

3. 外皮層構成と躯体内部の長期湿潤化リスクの関係

3.1 目的

結露防止の観点から外壁内外の透湿抵抗比の目安は示されているが、総体としての透湿抵抗の絶対値については言及されていない。総体としての透湿抵抗が高いほど、事故的に浸入した水分が長期間在留し湿潤化リスクを高めるのではとの問題提起がされた。そこで、壁体内外の透湿抵抗比は同じでも総体としての透湿抵抗が大きく異なる２つの壁体構成につて、浸入水の長期滞留・湿潤化リスクを対象にシミュレーション計算を行い、その性状を明らかにして今後の参考資料とすることを目的にした。

3.2 ２つの壁体構成

2 つの壁体構成 A と B を対象とする。

表 3.1 Ａ，Ｂ２つの壁体の透湿抵抗値

層構成	仕様	透湿抵抗値 m2・s・Pa/ng	透湿抵抗の和 m2・s・Pa/ng	透湿抵抗比	透湿抵抗の総和 m2・s・Pa/ng	総和の比（A/B）
A	せっこうボード12mm	0.0003	0.083	3.6	0.106	21.7
	住宅用プラスチック系防湿フイルムA種	0.0820				
	グラスウール100mm	0.0006				
	OSB	0.0200	0.023			
	透湿防水シート	0.0002				
	通気層 ＋ 外装材（カテゴリーⅢ）	0.0026				
B	しっくい25mm	0.0002	0.004	3.6	0.005	
	モイス9.5ｯm	0.0030				
	グラスウール100mm	0.0006				
	透湿防水シート	0.0002	0.001			
	通気層 ＋ 外装材（カテゴリーⅠ）	0.0009				

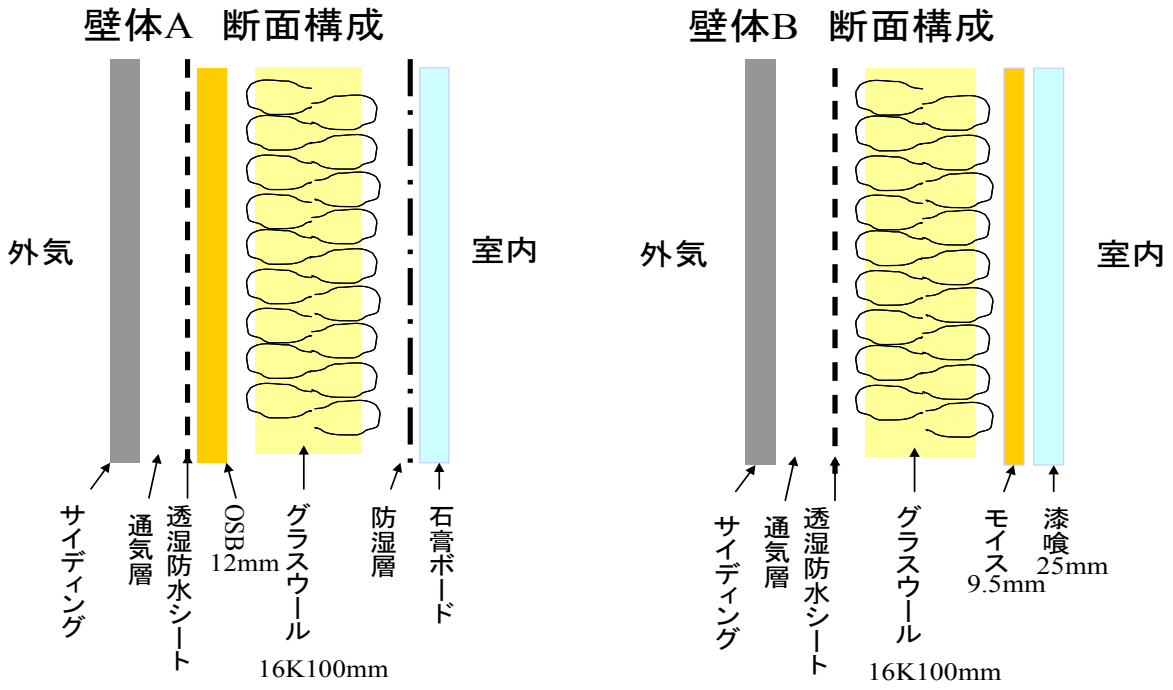


図 3.1 A，B壁体の断面構成

3.3 計算条件

室内： 20 ℃ 60% 8.72 g/kg’

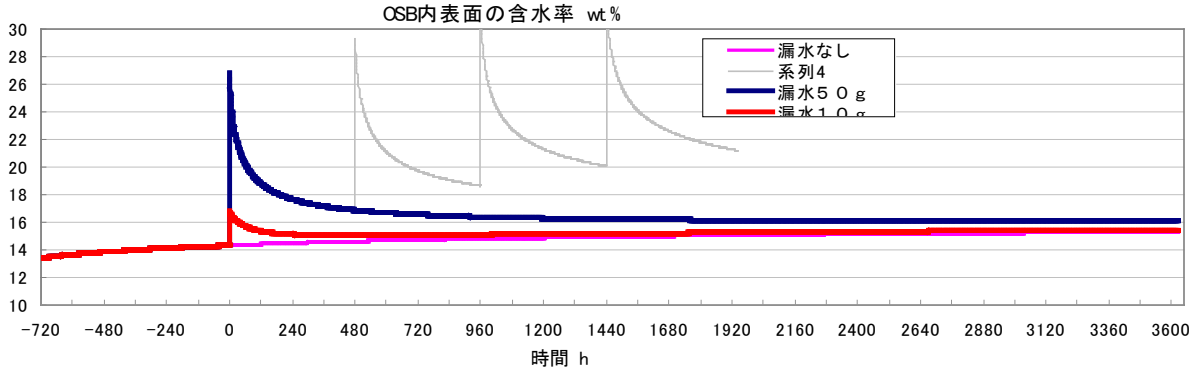
外気： 5 ℃ 70% 3.76 g/kg’

外壁 SAT：3 ℃

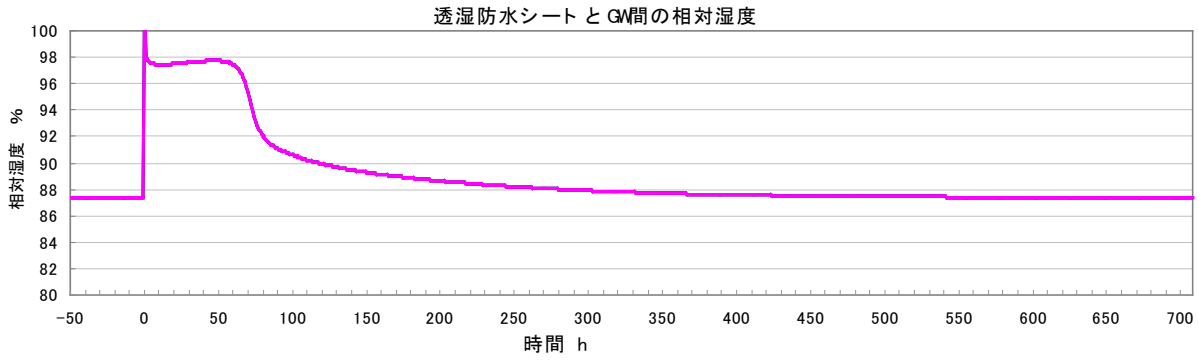
上記条件で熱水分同時移動計算をおこない、ほぼ定常となった時点で 10g/m^2 または 50g/m^2 の浸入水量を与え、その後の経過をトレースする。

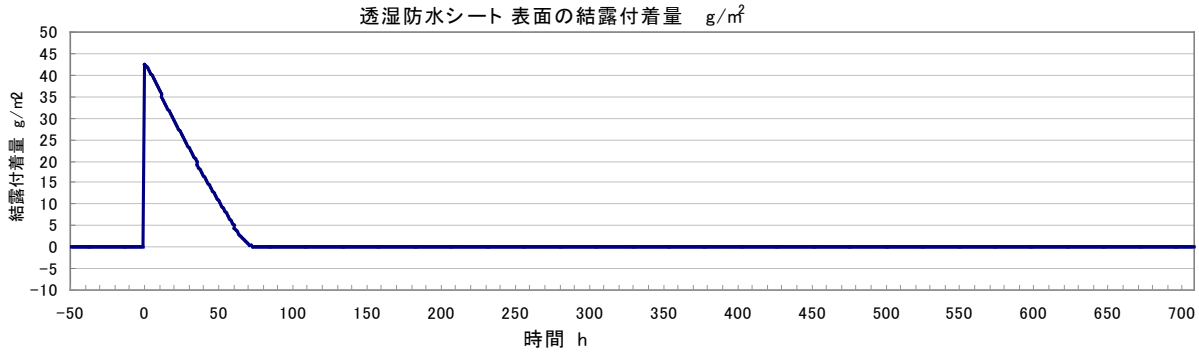
3.4 計算結果

（1）壁体 A



（2）壁体 B





・壁体 A では、漏水 50g/m^2 の場合 OSB 内表面の含水率が 27wt% 程度にまで上昇し、その後低下してゆくが 10 日過ぎても 18wt% 弱で漏水なしの 14wt% より高く推移し、なかなか低下しない。20 日毎に漏水 50g/m^2 が加わる場合には上昇の一途をたどる危険な状況となる。一方、漏水 10g/m^2 の場合には 1 カ月程度で漏水なしに近づきリスクは低くなる。

・壁体 B では、漏水により一時的に透湿防水シートの表面で結露するが、3 日間ほどで結露水がなくなり元に戻っている。

3.5 まとめと考察

壁体内外の透湿抵抗比は同じでも総体としての透湿抵抗が大きく異なる 2 つの壁体構成につて、浸入水の長期滞留・湿潤化リスクを対象にシミュレーション計算を行った。その結果、総体としての透湿抵抗の大きい壁体 A では、漏水 50g/m^2 の場合 OSB 内表面の上昇した含水率がなかなか低下せず、20 日毎に漏水 50g/m^2 が加わる場合には上昇の一途をたどる極めてリスクの高い危険な状況となることが分った。また、漏水 10g/m^2 の場合には 1 カ月程度で漏水なしに近づきリスクが低くなることも判明した。一方、壁体 B では、漏水により一時的に透湿防水シートの表面で結露するが、3 日間ほどで結露水がなくなり元に戻ることが示された。

以上のことより、漏水は 10g/m^2 以下に抑えること、壁体内外の透湿抵抗比は守りつつ総体としての透湿抵抗をできるだけ小さくすることが必要であると言える。

4. 外皮層構成と躯体内部の長期湿潤化リスクの関係（続）

4.1 目的

結露防止の観点から外壁内外の透湿抵抗比の目安は示されているが、総体としての透湿抵抗の絶対値については言及されていない。総体としての透湿抵抗が高いほど、事故的に浸入した水分が長期間在留し湿潤化リスクを高めるのではとの問題提起がなされた。今回は、壁体内の間柱が浸水した場合につて、浸入水の長期滞留・湿潤化リスクを対象に２次元のシミュレーション計算を行い、その性状を明らかにして今後の参考資料とすることを目的にした。

4.2 ２つの壁体構成

２つの壁体構成 A と B を対象とする。

表 4.1 A，B２つの壁体の透湿抵抗値

層構成	仕様	透湿抵抗値 m2・s・Pa/ng	透湿抵抗の和 m2・s・Pa/ng	透湿抵抗比	透湿抵抗の総和 m2・s・Pa/ng	総和の比（A/B）
A	せっこうボード12mm	0.0003	0.083	3.6	0.106	21.7
	住宅用プラスチック系防湿フイルムA種	0.0820				
	グラスウール100mm	0.0006				
	OSB	0.0200	0.023			
	透湿防水シート	0.0002				
	通気層 ＋ 外装材（カテゴリーⅢ）	0.0026				
B	しっくい25mm	0.0002	0.004	3.6	0.005	
	モイス9.5ッm	0.0030				
	グラスウール100mm	0.0006				
	透湿防水シート	0.0002	0.001			
	通気層 ＋ 外装材（カテゴリーⅠ）	0.0009				

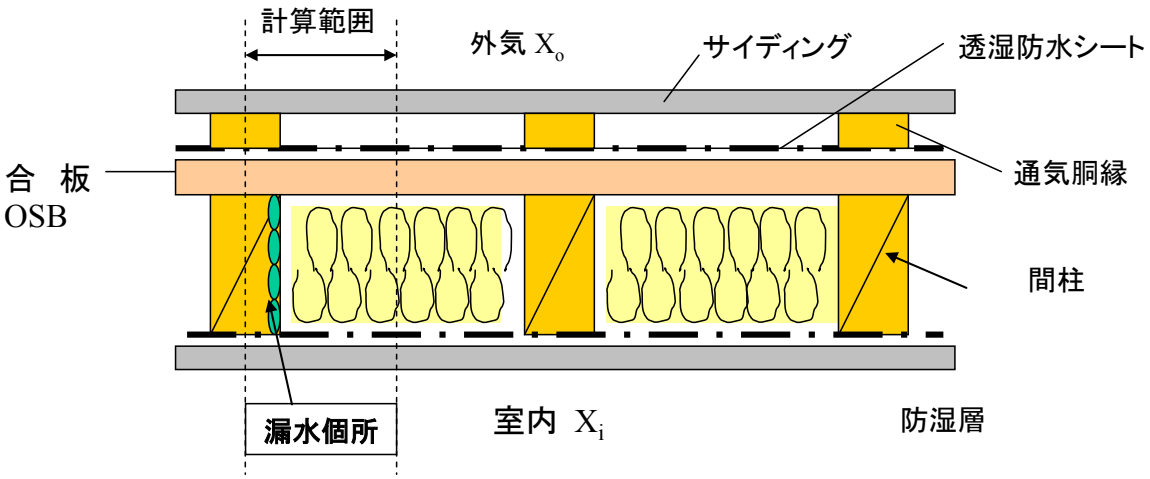


図 4.1 壁体A2次元断面（平面）図

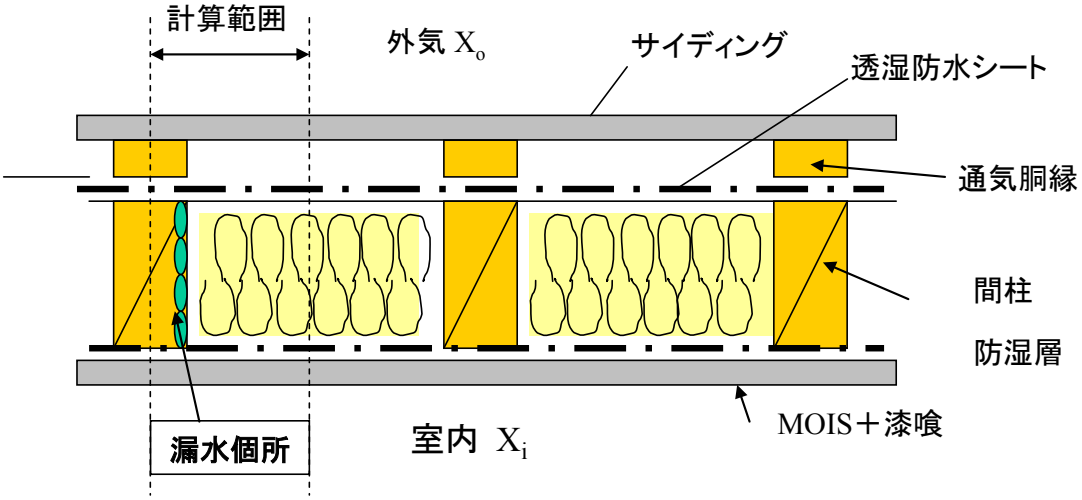


図 4.2 壁体B2次元断面（平面）図

4.3 計算条件

室内： 20 ℃ 60% 8.72 g/kg’

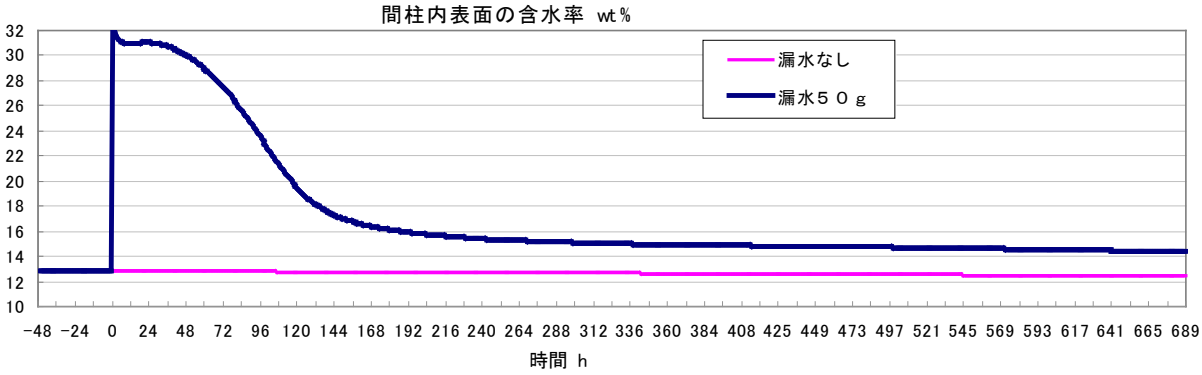
外気： 5 ℃ 70% 3.76 g/kg’

外壁 SAT：3 ℃

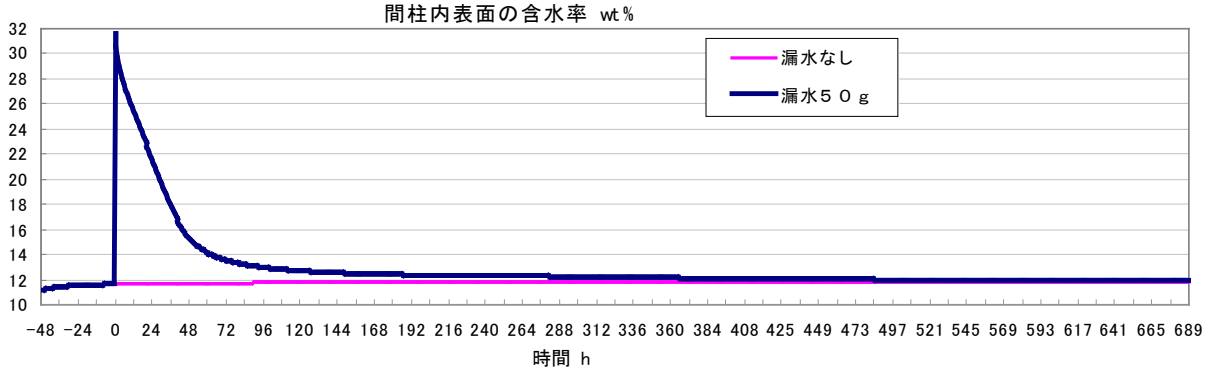
上記条件で熱水分同時移動計算をおこない、ほぼ定常となった時点で 10g/m^2 または 50g/m^2 の浸入水量を与え、その後の経過をトレースする。

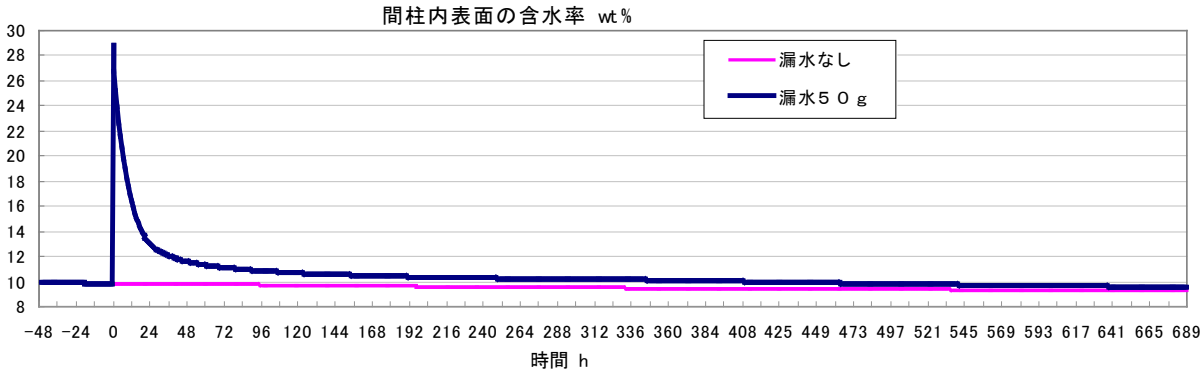
4.4 計算結果

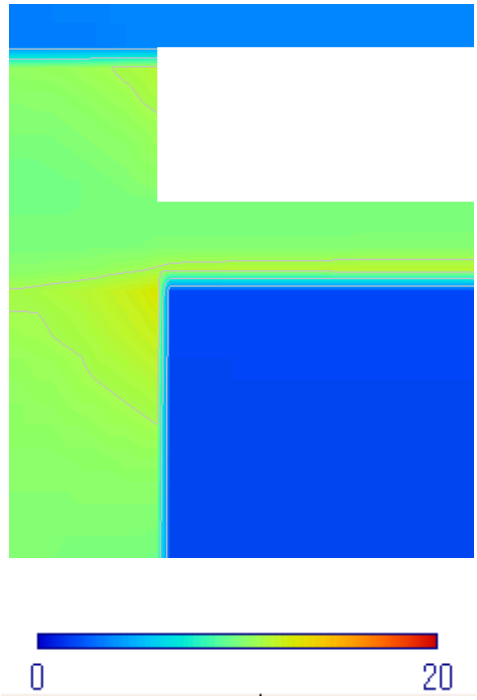
（1）壁体 A



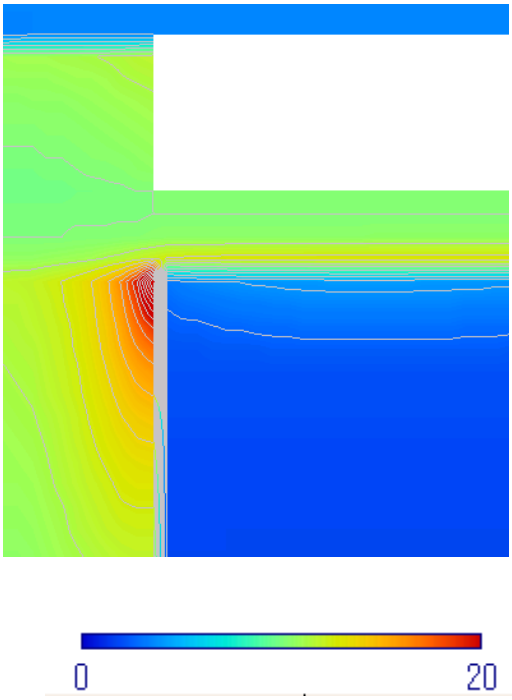
（２）壁体Ｂ





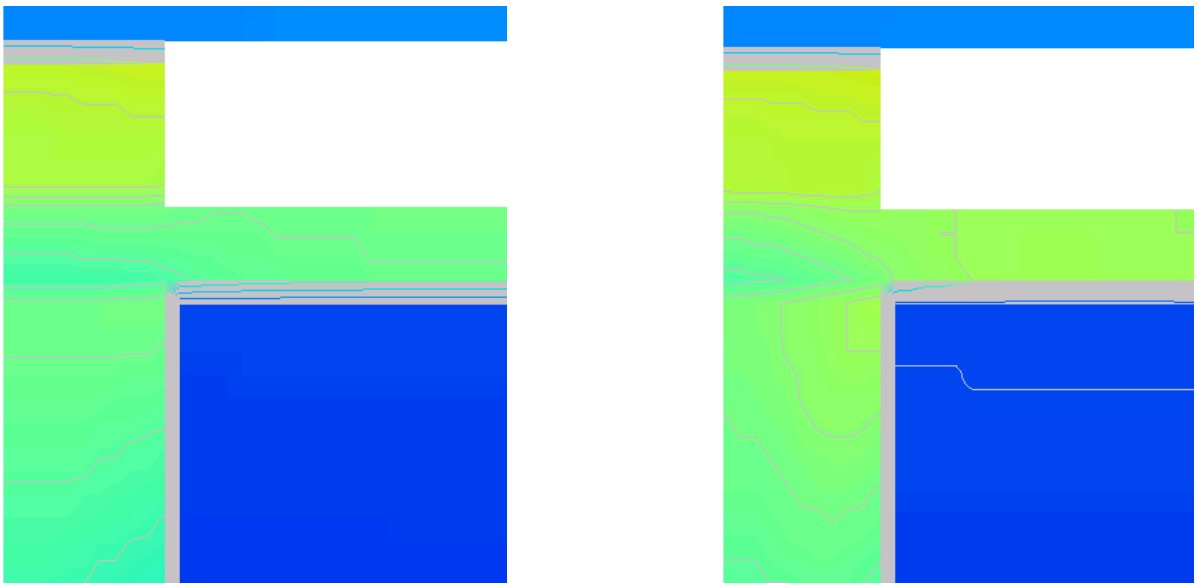


（ｉ）吸水前



（ⅱ）吸水後２日目

図 4.3 壁体Ａの２次元含水率分布



（ｉ）吸水前　　（ⅱ）吸水後２日目

図 4.4 壁体 A―インシュレーションボードの２次元含水率分布

・壁体 A は総体としての透湿抵抗が高い仕様である。この場合、漏水 50g/m^2 に曝された間柱表面は含水率が高くなり 32wt% に達している。その後の低下は緩やかで、１０日過ぎ以降はほとんど低下していない。

・壁体 B は総体としての透湿抵抗が低い仕様である。この場合、漏水により一時的に含水率は上昇するが、3 日程度で急激に下がり 10 日過ぎには元に戻っている。

・壁体 C は壁体 A の OSB をインシュレーションボードに替えた仕様で、壁体 B より早く元に戻っている。

4.5 まとめと考察

今回は、壁体内の間柱が浸水した場合を想定して、浸入水がどのような影響を与えるのかにつき、壁体内外の透湿抵抗比は同じでも総体としての透湿抵抗が大きく異なる 2 つの壁体構成（壁体 A、壁体 B）と壁体 A の OSB をインシュレーションボードに替えた仕様（壁体 C）を対象に、浸入水の長期滞留・湿潤化リスクをシミュレーション計算した。その結果、壁体 A では、漏水 50g/m^2 に曝された間柱表面は含水率が高くなり 32wt% に達し、その後の低下は緩やかで、10 日過ぎ以降はほとんど低下しないこと、壁体 B は、漏水により一時的に含水率は上昇するが、3 日程度で急激に下がり 10 日過ぎには元に戻ること、壁体 C は、壁体 B より早く元に戻ることが明らかになった。

以上のことより、壁体内外の透湿抵抗比は守りつつ総体としての透湿抵抗をできるだけ小さくすること、下地材はできるだけ透湿抵抗の小さいものを用いるようにすることが重要であると言える。

5. バルコニー笠木下の漏水による長期湿潤化リスクについて

5.1 目的

バルコニーは腐朽等の不具合発生三大個所の一つであり、現在推奨納まり TG で鋭意研究が進行中である。ここでは、笠木下の木部で漏水が発生した場合、仕様によってどのように劣化リスクが変化するのか等の性状をシミュレーション計算により明らかにすることを目的にしている。

5.2 計算対象壁体構成

次の壁体構成を対象とする。

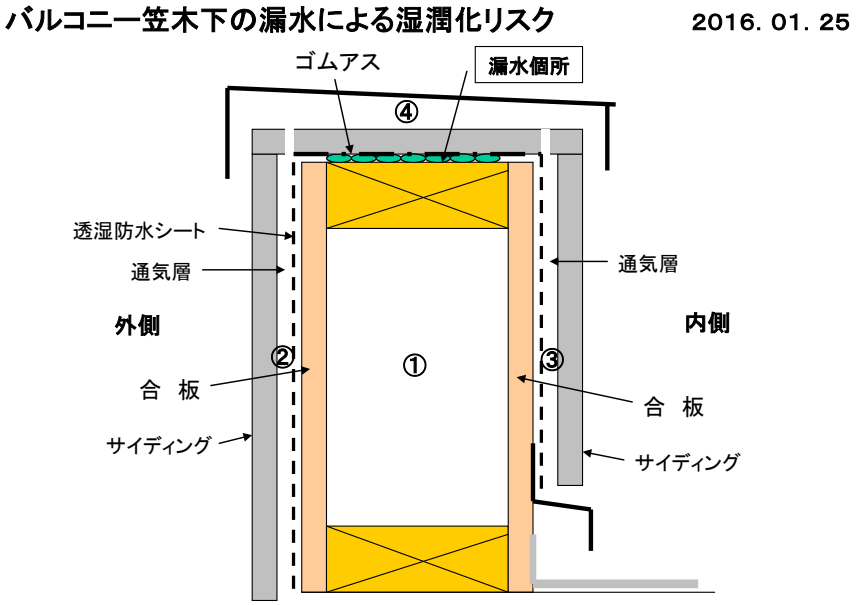


図 5.1 バルコニー計算対象断面

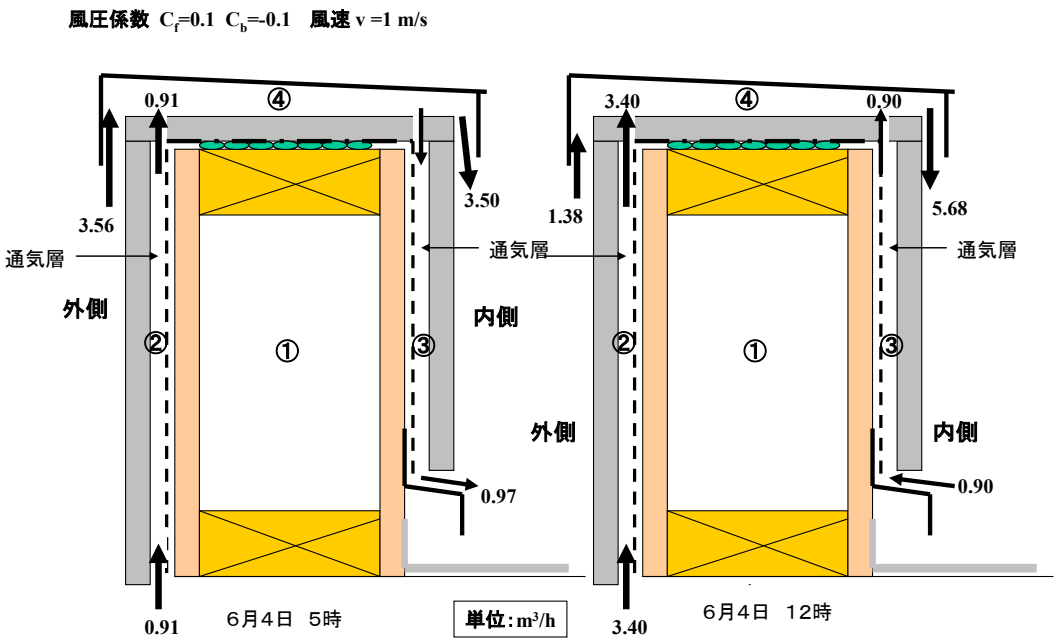


図 5.2 通気量

5.3 計算条件

外気条件は、宇都宮の標準気象データをもとに計算した水平面、南北面の相当外気温度 SAT と外気温湿度である。

上記条件で構成部材であるサイディング、合板、枠材を熱水分同時移動計算により温度、含水率、絶対湿度を求める。その場合、各通気層および中空層の温湿度も連立して求める。

外部風は 1m/s ,風圧係数 風上面 C_f=0.1 ,風下面 C_b=-0.1 とし、南北通気層、笠木下通気層間の換気計算を行う。

漏水は笠木下上枠材の最上部で発生し、200 g/ m^2h の雨水が浸入するものとする。

5.4 計算結果

(1) 初期含水率：サイディング 7wt% 、合板および枠板 12wt%の場合

10 日間で影響はほとんどなくなる（下図赤線）。

(2) 初期含水率：サイディング 8wt% 、合板および枠板 20wt%の場合

10 日置きに漏水が繰り返されるとすると、含水率が上昇し続け劣化リスクが増大する（下図青線）。

(3) 同上条件で、上枠材保護用サイディングを外し、ゴムアスを透湿防水シートに替える場合

極めて短時間に漏水の影響がなくなり、含水率の上昇は見られない（下図緑線）。

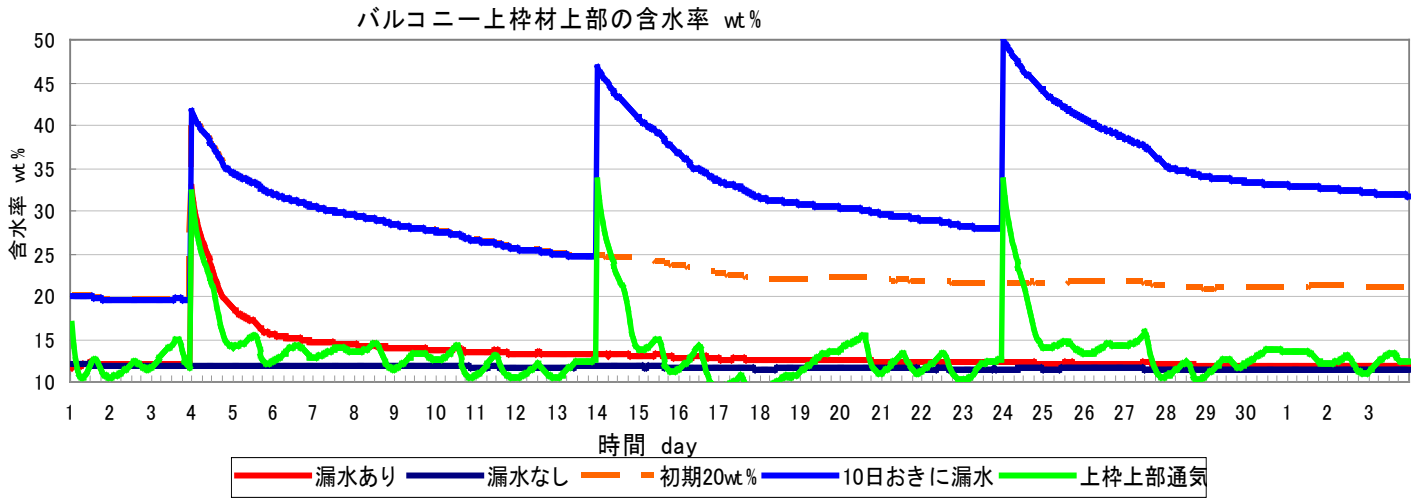


図 5.3 バルコニー上枠材上部の含水率変動

5.5 知見と指針

- 雨水の浸入を少なくするためにアスファルト系防水材を使用する場合には、合板、枠板等の初期含水率を 15wt% 以下にすべきである。20wt% 以上では劣化リスクが急激に増大する。
- ただし、雨水の浸入量が 50g/m^2 程度であれば、アスファルト系防水材の使用は可である。
- アスファルト系防水材の代りに透湿性を備えた防水材にすれば、初期含水率が 20wt% でも劣化リスクを低く抑えることができる。
- 濡れが想定される面は透湿抵抗をできるだけ小さくし、通気層に直接接するようにすべきである。