壁内相対湿度の発生頻度を考慮した温暖地向け木造住宅用 簡易防露設計法の開発

(その2) 防露設計用透湿抵抗比の推定式の提案

DEVELOPMENT OF PRACTICAL DESIGN METHOD FOR WOODEN WALL ASSEMBLIES IN MILD CLIMATE REGIONS BASED ON FREQUENCY OF RELATIVE HUMIDITY

Part 2 Proposal of the equations to estimate design value of moisture resistance ratio

齋藤宏昭*¹, 坂本雄三*², 澤地孝男*³

Hiroaki SAITO, Yuzo SAKAMOTO and Takao SAWACHI

Current moisture guidelines for building envelopes employ specification standards, which specify the types and the details of building assemblies. However, required performances to avoid moisture damages within building envelopes should be clarified in terms of performance standards. Taking these back grounds into account, we already proposed a framework of a practical design method based on the frequency of relative humidity within wooden wall assemblies in the previous paper of this research. In this paper, a regression model to predict the excess frequency of the relative humidity is proposed by statistical analysis of simulation results of a one-dimensional HAM model. Moisture resistance ratio that is one of the design parameters to determine wall specifications can be derived from the model. Accuracy of the model was examined in comparison with the precise values regarding the excess frequency. Furthermore relation between the moisture resistance ratios and climate conditions was discussed in terms of regional classification based on the required performances.

Keywords: External Wall, Design Method for Prevention of Moisture Damage, Mild Climate Region, Regional Classification

外壁、防露設計、温暖地、地域区分

1. はじめに

現時点における外壁の防露性能に関する実務者向けの設計指針では、木造住宅工事共通仕様書^{1), 2)}のように断面構成を例示する仕様規定が採用されている。しかし、性能規定の観点に立てば、設計をするうえで目安となる要求性能を明示することが将来的に必要となる。断熱性能に関しては、熱損失係数によって住宅全体の性能を規定することにより、材料に対する等級や地域区分等の設計資料が整備されている。外壁の防露性能についても、実用的な観点から要求性能を規定し、これに付随した設計資料を整備することは重要と考えられる。これに対し土屋³⁾、尾崎⁴⁾らは、地域毎に含水率や相対湿度の閾値を越えないための設計要件の整理を試みている。しかし、これらは閾値や室内条件の変更に対して柔軟に対応できる手法には至っていない。特に、関東以西の温暖地では土壁や漆喰といった伝統的な材料を用いた木造住宅が多く、主に寒冷地で培われてきた設計指針だけでは、地域によって特徴が異なる工法への柔軟な対応は難しい。

一方、防露設計を目的とした1次元場の含水率挙動に関しては、佐藤ら⁵⁾が熱水分同時移動方程式の周期定常解を検討している。また、鉢井⁶⁾は気象条件のランダム性を考慮し、含水率の確率密度分布を求める解析法を示している。しかし、断面の詳細や寸法等が決定していない基本設計の段階においては、多くの入力データが必要な数値計算ツールや詳細な解析法に頼らずに設計要件を把握できることが望ましい。また、材料物性値や気象条件等のパ

ラメータと壁内湿度変動の関係を示すことは、設計者の水分移動に対する理解を深める観点からも有用と考えられる。

このような背景を考慮して、筆者らは既報¹⁾において壁内相対湿度の上限値に対する超過頻度を尺度とした、外壁の透湿抵抗の配分(図1の R'/R_0 に該当、以下、透湿抵抗比 ξ とする)に関する要件を求める簡易防露設計法の枠組みを提案した。この簡易防露設計法は、断熱層と外装下地層の境界部分における冬季の相対湿度(図1黒丸部分、以下、壁内相対湿度 ϕ とする)を、図2に示すような頻度分布ととらえ、壁内相対湿度の冬季平均値 ϕ_w 及び標準偏差 σ_ϕ から、上限相対湿度を超過する頻度に応じた透湿抵抗比 ξ を算出するものである。この透湿抵抗比の算出には、壁内相対湿度に関する標準偏差の推定が不可欠であり、既報¹⁾では標準偏差を求めるための熱水分移動解析手法の検証を行った。

本報では、温暖地で建設が想定される木造断熱外壁に対して、1次元の熱水分同時移動方程式を用いた数値計算による感度解析を行い、非定常計算から得られた壁内相対湿度の標準偏差 σ_ϕ と各パラメータの関係から、 σ_ϕ に対する推定式を作成する。次に、推定式の一般性について、様々な断面構成及び気象条件下における非定常計算結果との比較により検証する。さらに、温暖地を対象に地域毎に必要な透湿抵抗比を例示する。

2. 設計法開発の検討対象及び計算概要

2.1 対象とする外壁の断面構成

*本論文は、本研究に関する既発表論文²⁾の内容をもとに加筆・修正し、まとめたものである。

*¹ 独立行政法人建築研究所 修士(工学)

*² 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授・工博

*³ 国土交通省国土技術政策総合研究所
建築新技術研究官・工博

Researcher, Dept. of Environmental Engineering, Building Research Institute, M. Eng.
Prof., Dept. of Arch., Grad. Sch. of Eng., Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
Research Coordination for Advanced Building Technologies, National Institute for Land and Infrastructure Management, Dr. Eng.

計算対象は、木造住宅工事共通仕様書¹⁾及び枠組壁工法住宅工事共通仕様書²⁾を参考に、図1に示す内装材、断熱層、外装下地層、通気層、外装材から構成される外壁とした。通気層については、構造躯体の初期水分排出や雨水浸入防止の観点からも重要であるため、今回の検討対象は通気層を持つ壁体構成に限定した。

2.2 材料物性値に関する検討範囲

感度解析で変動させる材料物性値は、外装下地層の透湿抵抗、熱抵抗、絶対湿度変化に対する含水率変化^{注1)}、断熱層の透湿抵抗とする。物性値の範囲は、推定式を温暖地の一般的な木造断熱外壁に適用させることを念頭に文献¹⁾、²⁾、⁷⁾を考慮し、各項目3~5水準を計算条件として設定した。表1に変動させる物性値と検討範囲に含まれる材料例を示す。外装下地層としては、透湿防水シートに加え、耐力面材として多用される構造用合板や25mm程度の付加的な断熱材も検討範囲に加えられるよう配慮した。ただし、計算条件が増えすぎること避けるため、断熱層と外装下地層に対しては、以下に述べる簡略化を行った。

- ・材料厚さ：断熱層100mm、外装下地層12mm一定とした。
- ・透湿抵抗：材料厚さを考慮し、表1の透湿抵抗に見合う湿気伝導率を与えた。液水移動については文献⁷⁾を参考に、相対湿度98%RHを越えた際の水分伝導率を 3.1×10^{-11} (kg/[mJ/kg])一定とした。ただし、湿気伝導率の湿度依存性^{注2)}については考慮しない。
- ・熱抵抗：外装下地層は透湿抵抗と同様に、熱抵抗に見合う熱伝導率を与えた。断熱層は、グラスウール16K100mm相当の値(熱抵抗2.22[m²K/W])とした。
- ・湿気容量：外装下地層については、平衡含水率曲線(質量含水率 w [mass%]と相対湿度 ϕ [%RH]の関係)の傾きを一定とし($w=0.2\phi$ に固定^{注3)})、材料密度 ρ の変更によって湿気容量を変化させた^{注4)}。ただし、相対湿度が98%RHを越えた場合は、飽和含水率を160mass%として98%RHの平衡含水率から直線近似し求めた。断熱層については、グラスウール16Kの平衡含水率曲線⁷⁾を用いた。
- ・熱容量：比熱を1.0kJ/[kgK]^{注5)}の一定値とし、材料密度 ρ に対応して熱容量を変化させた。

また、内装材は石膏ボード12mm、外装材はサイディング15mm相当の物性値とし、上述したような物性値の簡略化は行わない。通気層については厚さを18mm、通気層風速を0.05m/s一定として解析を行った。

2.3 透湿抵抗比

本研究で検討する透湿抵抗比 ξ の範囲については1以上とする。これは透湿抵抗比が1未満のケースでは、室内からの湿流が外装下地層で遮られ、条件によっては結露発生となる可能性が高い。このようなケースは、現象を厳密に扱う非定常計算によって個々の断面仕様の検討を行うことが不可欠であるため、本研究の検討対象には含めない。

2.4 外気及び室内条件

計算対象地域は、平成11年に改正された現行の省エネルギー基準(以下、平成11年基準とする)のIV地域以南で気候特性が異なる5都市を選択した。外界条件は、拡張アメダス気象データ(標

準年)の1時間毎の外気温湿度を与えた。計算対象地域における冬季の外気平均気温湿度及び外気温度標準偏差を表2に示す。

室内条件は、住宅性能表示制度の型式性能認定における結露防止に関するガイドライン⁸⁾を参考に定め、温度については(1)式で与え、相対湿度は期間中60%RH一定とした。

$$\theta_r = 22.5 + 4.5 \cos(2\pi(\text{day} - 212)/365) \quad \dots (1)$$

ここに、 θ_r ：温度(℃)

day：1/1を起点とした延べ日数

図1 検討対象壁体

図2 相対湿度の頻度分布(例)

表1 材料物性値の検討範囲

部位	項目	数値	検討範囲に含まれる材料例
外装下地層の物性値	透湿抵抗 R' (4水準) ([m ² skg/kgDA]/kg)	6.94×10^2 2.78×10^3 1.11×10^4 4.32×10^4	透湿防水シート 軟質繊維板12mm 構造用合板**12mm OSBボード**9mm EPS25mm ウレタンフォーム25mm 軽量モルタル30mm
	熱抵抗 R (4水準) (m ² K/W)	0.048 0.133 0.40 1.20	
	絶対湿度変化に対する含水率変化 κ^* (5水準) (kg/[m ³ kg/kgDA])	1.36 408 2040 4079 8159	
断熱層の物性値	透湿抵抗 R' (3水準) ([m ² skg/kgDA]/kg)	4.81×10^3 6.21×10^4 4.95×10^5	グラスウール100mm ロックウール100mm ウレタンフォーム100mm EPS100mm

*温度20℃50%RHにおける値

**OSBボード、構造用合板については、透湿抵抗の湿度依存性が高く、平均湿度25%RHでは上記範囲から逸脱するが、平均湿度75%RHでは範囲内に入るため記載した。

表2 計算対象地域の気象条件(1~2月の平均値及び標準偏差)

対象地域	都府県	地域区分	温度℃	絶対湿度kg/kgDA	相対湿度%RH	温度標準偏差℃	備考
富山	富山	IV	2.2	3.7×10^{-3}	84.0	2.5	低温湿潤
八王子	東京	IV	3.0	2.7×10^{-3}	58.3	4.4	低温乾燥
大阪	大阪	IV	6.0	3.5×10^{-3}	58.6	3.2	都市部
鹿児島	鹿児島	V	8.4	4.5×10^{-3}	63.7	4.5	蒸暑地域
神門	宮崎	IV	3.9	4.0×10^{-3}	75.1	6.4	温度標準偏差大

感度解析は、表1に示されるそれぞれの材料物性値と表2に示す地域の組み合わせについて行うが、内外透湿抵抗比が1以下となる仕様は除くため、計算条件は合計1000通りとなる。計算は、既報¹¹⁾で検証したプログラムを用いて1月1日より2年間行い、2年目の1~2月の結果を以降の検討に用いた。ただし、長期にわたり内部結露が発生していると思われる条件の結果については省いた。本研究では冬季における相対湿度の頻度分布から設計要件を定めるため、結露が発生した場合は100%RHが上限となり、非定常計算から得られる σ_ϕ が見かけ上小さくなるのが理由である。

また、液水移動の影響が大きいケースは物性値を整備したうえで、詳細な検討を行う必要があり、簡易防露設計法の開発を目的とした本研究の対象範囲とは異なる。結露発生が確認された条件は、富山における内外透湿抵抗比2以下のケースが該当していたため、これらの計算結果は以降の検討に含まれていない。

3. 冬季平均湿度に対する定常計算の推定精度

既報¹⁾で述べたように、本研究で開発する設計法では冬季の壁内相対湿度標準偏差から分布範囲を推定し、その平均値に対応した透湿抵抗比を求める。したがって、冬季(1~2月)の壁内相対湿度平均値を定常計算で推定できることが設計法的前提条件となる。ここでは、表1、2で設定した範囲において、定常計算がどの程度の精度で壁内相対湿度を推定できるかを、非定常計算結果と比較し検討する。定常計算の入力条件としては同期間の平均内外温湿度を用いた。また通気層に関しては、非定常計算と同等の換気回数分の熱及び湿気の排出が行なわれるとして、外装材の貫流抵抗と換気損失を並列合成した熱及び湿気貫流抵抗を求めて、定常計算に用いた。その他の諸物性値は、非定常計算と同一である。

断熱層と外装下地層境界部分における冬季平均温湿度の定常計算と非定常計算の比較結果を図3に示す。今回設定した条件の範囲では、定常計算でも冬季平均湿度をおおよそ推定できることが確認され、非定常計算に対する定常計算の誤差は絶対湿度 $3.0 \times 10^{-4} \text{ kg/kgDA}$ 、相対湿度 8%RH 以内であった。

図3 定常計算と非定常計算の比較(1~2月の平均値)

4. 冬季における壁内相対湿度の分布特性

壁内相対湿度の分布特性を検討し、標準偏差によって表現される平均値からの距離と超過頻度の関係式を得る。図4に非定常計算によって得られた壁内相対湿度 ϕ の頻度分布を示す。標本は、1~2月における1時間毎の壁内相対湿度 ϕ の全計算データを(2)式により正規化した値であり、区間の幅は0.2とした。図4によれば、正規化された壁内相対湿度は標準正規分布からは若干逸脱しているものの、全体としてみれば平均値を中心として左右に広がる分布であった。これは計算上、平衡含水率曲線を線形として扱った影響と考えられる。また、北陸、関東、関西、九州等、気候特性の異なる地域でも、 $z > 1.5$ の領域では気象条件による影響はそれ程大きくない。

$$z = (\phi - \phi_a) / \sigma_\phi \quad \dots (2)$$

図5に表2の全地域の計算結果を標本とした超過頻度Prとzの関係を示す。一般に、標本が正規分布の場合は、任意点の超過頻度を正規分布表から推定することが可能である。しかし、今回の計算結果は標準正規分布から逸脱するケースがあるため、 $2.4 \geq z \geq 1.6$ (超過頻度0.03~0.12に相当)の範囲において有意水準5%点を求め、zと超過頻度Prの関係を表す(3)式を得た。

$$\text{Pr}(z) = 0.6436 - 0.4712z + 0.08964z^2 \quad \dots (3)$$

図4 正規化された壁内相対湿度の頻度分布

図5 正規化された壁内相対湿度と超過頻度の関係(全地域)

5. 壁内相対湿度標準偏差と室内外条件の関係

本節では、温暖地の住宅で想定される室内外条件に対する設計法の適用を念頭に、壁内相対湿度標準偏差 σ_ϕ に対する内外温湿度の影響を検討し、 σ_ϕ の基準化を行う。

5.1 室内条件の影響

σ_ϕ に対する室内温湿度の影響については、大阪を対象に表3に示す条件で別途感度解析を行い検討する。室内温度は(1)式と同様に年周期の余弦波1項で近似し、相対湿度は一年を通じ一定とした。Case0が前節で設定した基準の条件(1)式参照)である。Case1、Case2の温度設定はCase0と同じであるが、相対湿度のみを変化させた。一方、Case3、Case4では室内温度のみ変化させており、暖房設定温度の低い状況を想定した。また、材料物性値については、表1に示す全ての組み合わせとした。

図6は、各断面仕様についてCase0からCase4の壁内相対湿度標準偏差 σ_ϕ の平均値を求め、この値との相関を示したものである。今回の検討範囲においては σ_ϕ に対する室内条件の影響は小さいが、Case0のみ平均値からの誤差の大きいデータが見られる。図7か

らわかるように、これらは全て透湿抵抗比が2以下であるうえ、外装下地層の熱抵抗も小さく、室内条件の変更により壁内相対湿度 ϕ_w の変化が大きい仕様である。室内条件の変更に伴う ϕ_w の変化によって σ_ϕ に差が生じた理由としては、飽和水蒸気圧と温度の関係の非線形性により、断面構成と外乱の振幅が同一であっても、平均湿度が高い程、その振幅が大きくなるため^{注6)}と考えられる。

5.2 外気条件の影響

外気の変動成分の影響に関しても、図6と同様に各断面仕様について σ_ϕ の平均値を求め、図8に示す平均値に対する相関図を作成した。使用したデータは、既に表1、表2で示した材料物性値と地域の組み合わせから得られたものであり、室内条件はCase0に相当する。図8では、地域によって同一の断面仕様でも σ_ϕ の異なることが示されており、富山と神戸では2倍以上の差が生じている。また、図8の σ_ϕ の傾きと表2に示した外気温度の標準偏差はおおよそ対応しており、 σ_ϕ との相関性の高いことが推察できる。

5.3 室内外条件による相対湿度標準偏差の基準化

上述の内容を勘案して、 σ_ϕ の基準化に適したパラメータを検討する。検討対象は後述する σ_ϕ の推定式作成を考慮し、表4に示す壁内温湿度の平均値と、外気温湿度の標準偏差それぞれを無次元化したものとする。

表4に各パラメータにより基準化した相対湿度標準偏差の断面仕様ごとの平均値に対する残差平方和を併記する。壁内温湿度に関しては、相対湿度をパラメータとして用いた際の残差平方和が最も小さく、5.1及び注6)で述べたように σ_ϕ の基準化に適していることが表4よりわかる。外気の変動成分に関しては、外気温度標準偏差 $\sigma_{\theta,o}$ により基準化した場合に残差平方和が小さかった。 σ_ϕ は断熱層の外側における相対湿度標準偏差であるため、外気の変動成分に関しては温度の影響が最も大きく表れたと推測される。

図9は、表4の結果を考慮し、Case0からCase4で得られた σ_ϕ を ϕ_w/ϕ_o で基準化し、断面仕様ごとの平均値との対応を示したものである。図6で見られたバラツキの大きい値も、平均値に近づき、決定係数も0.990から0.995に上昇した。図10は、同様に $\bar{\sigma}_{\theta,o}/\sigma_{\theta,o}$ で基準化した場合の結果である。図8と比べて、平均値との相関が高いことは明らかであり、決定係数も0.786から0.936に上昇した。

以上の検討結果を考慮し、(4)式により σ_ϕ の基準化を行った結果を図11に示す。 σ_ϕ を基準化することにより、1%RH程度の誤差はあるものの、内外条件による影響を取り除くことができた。

$$\delta_\phi = \sigma_\phi \cdot \frac{\phi_o}{\phi_w} \cdot \frac{\bar{\sigma}_{\theta,o}}{\sigma_{\theta,o}} \quad \dots (4)$$

6. 壁内相対湿度標準偏差の推定式の作成

6.1 壁内相対湿度標準偏差と材料物性値の関係

大阪の結果について(4)式で基準化された壁内相対湿度標準偏差 δ_ϕ と材料物性値の相関図(単相関)を図12に示す。図12では、表5のCase5~Case7の断面構成を基準条件とし、各物性値を表1の範囲内で変化させた際の δ_ϕ との関係を示している。

図12からは、 δ_ϕ が透湿抵抗 R'_1 、 R'_2 や含水率変化 κ と相関性の高いことを読み取ることができる。また、外装下地層に κ の大きい材料を用いたCase6では、各物性値の変化に対する δ_ϕ の変化は小

表3 室内条件

Case	室内温度 ℃	相対湿度 %RH	1~2月の平均値	
			温度℃	絶対湿度 kg/kgDA
Case0	22.5+4.5 cos(2π(day-212)/365)	60	18.2	7.9×10 ⁻³
Case1		40	18.2	5.2×10 ⁻³
Case2		30	18.2	3.9×10 ⁻³
Case3	22.5+6.5 cos(2π(day-212)/365)	60	16.3	7.0×10 ⁻³
Case4	22.5+8.5 cos(2π(day-212)/365)	60	14.4	6.1×10 ⁻³

*day: 1/1を起点とした延べ日数

表4 σ_ϕ の基準化のためのパラメータ及び検討結果

パラメータ x	残差平方和	パラメータ x	残差平方和
基準化なし	25.7	基準化なし	1273
θ_o/θ_w	25.2	$\bar{\sigma}_{\theta,o}/\sigma_{\theta,o}$	199
X_o/X_w	19.7	$\bar{\sigma}_{X,o}/\sigma_{X,o}$	722
ϕ_o/ϕ_w	18.2	$\bar{\sigma}_{\phi,o}/\sigma_{\phi,o}$	395
分子：1・2月の外気温湿度平均値 分母：1・2月の壁内温湿度平均値		分子：外気温湿度標準偏差平均値（表2の5都市の平均値） 分母：外気温湿度標準偏差	
残差平方和 Q は、パラメータ x によって基準化した相対湿度標準偏差 $\sigma_{\phi,x}$ を用いて下式より求めた。式中の i は表3の Case0 から Case4、又は表2の計算対象地域に対応し、両者とも $N=5$ となる。 k は断面仕様の組み合わせで200となる。			
$Q = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N (\sigma_{\phi,x,i,k} - \overline{\sigma_{\phi,x,i}})^2$		$\overline{\sigma_{\phi,x,i}}$ ： $\sigma_{\phi,x,i}$ の同一仕様毎の平均値

図6 室内温湿度の σ_ϕ への影響

図7 σ_ϕ と透湿抵抗比の関係

図8 相対湿度標準偏差の地域差

図9 壁内温湿度による基準化

図10 外気温度標準偏差による基準化

図11 (4)式による基準化

さく、相関関係が断面構成により若干異なっている。

6.2 基準化された相対湿度標準偏差に対する推定式の作成

δ_ϕ の推定式は各パラメータに対する重回帰分析から作成するこ

とも可能である。しかし、推定式の精度が若干落ちたとしても、少ない説明変数で δ_p を安全側で予測できれば、物性値に基づいた材料分類が可能となり、設計要件の整理が容易となる。したがって本研究では、外装下地層の湿気物性値及び断熱層の透湿抵抗に着目した、相対湿度標準偏差の最大範囲を推定する式の作成を試みる。説明変数は、図12の結果を考慮し、外装下地層の絶対湿度振幅比 η と断熱層透湿抵抗 R'_2 を用いることとする。 η は半無限固体における表面絶対湿度の変動振幅に対する比を表しており、

(5)式に示すように、 σ_p に影響の大きいパラメータ κ 、 R'_1 (d/λ に相当)を含んだ無次元数である。ただし、角速度 ω については、 δ_p の最大範囲と η の関係がほぼ直線と見なせるように定めた($t=345600[s]$)。

$$\eta = \exp(-\sqrt{\kappa\omega/2\lambda}d) \quad \dots (5)$$

$$\omega = 2\pi/t \quad \dots (6)$$

絶対湿度振幅比 η と基準化された相対湿度標準偏差 δ_p の関係を図13に示す。図13は表1の計算条件で設定した断熱層の透湿抵抗ごとに、 η と δ_p の関係を示したものである。また、 δ_p の最大範囲を η の1次式より近似した結果を図中に併記する。ここで、単相関の結果(図12)を考慮すると、断熱層の透湿抵抗 R'_2 と δ_p はほぼ正の相関があるので、図13で示した近似式の傾きを断熱層透湿抵抗 R'_2 によって表現すれば、 δ_p の最大範囲に対する推定式(7)式が得られる。

$$\delta_p = (1.07 \cdot \ln(R'_2) - 4.40)\eta + 2.9 \quad \dots (7)$$

なお、図13の点線で囲んだ範囲は、外装下地層の物性値が $\kappa=1$ ($\text{kg}/[\text{m}^3\text{kg}/\text{kgDA}]$) 且つ $R'_1 > 1.11 \times 10^4$ ($[\text{m}^2\text{skg}/\text{kgDA}]/\text{kg}$) の条件における結果である。この条件を満たす外装下地層は、アスファルトクラフト紙等の透湿抵抗が高いシート系材料が該当し、(7)式で δ_p を推定する場合、大きめの値となる。

図14に2節で述べた1000通りの非定常計算結果から求めた σ_p の精算値と、(4)式～(7)式を用いて得られた推定値の対応を示す。図13の点線部分に該当する材料では誤差が大きいものの、全体としてみれば推定式により安全側の値が得られている。

7. 推定法の一般性

前節では、壁内相対湿度標準偏差 σ_p の最大範囲を、室内外温湿度と材料物性値により算出する推定式を作成した。推定式は富山、八王子、大阪、鹿児島、神門の結果から得たものであるが、他の地域にも適用できれば有用である。ここでは、断面構成や気象条件を変えて非定常計算を行い、推定法の一般性を検証する。

7.1 推定法検証のための計算概要

推定法検証のための計算は、表6に示すtype1からtype8の断面構成について行った。断熱層にセルロースファイバーを用いたtype5や内装材に土壁を用いたtype8は、表1で設定した範囲に該当しないが、材料の吸放湿性により σ_p が小さくなることと、温暖地での建設が見込める仕様のため検討対象に加えた。ただし、外装下地層の物性値に関しては、平衡含水率を直線近似して用い、水分伝導率等、他の物性値の扱いも2節と同様とした。使用した物性値を表7に示す。

表5 基準条件

部位	説明変数	Case5	Case6	Case7
外装下地層	透湿抵抗 R'_1 ($[\text{m}^2\text{skg}/\text{kgDA}]/\text{kg}$)	695	43200	695
	熱抵抗 R ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$)	0.048	0.13	1.2
	絶対湿度変化に対する含水率変化 κ^* ($\text{kg}/[\text{m}^3\text{kg}/\text{kgDA}]$)	1	8159	1
断熱層	透湿抵抗 R'_2 ($[\text{m}^2\text{skg}/\text{kgDA}]/\text{kg}$)	61920		
備考 (想定される工法)		在来工法	枠組壁工法	在来工法 (付加断熱)

*温度 20℃ 50%RH における値

図12 δ_p と材料物性値の関係 (単相関)

図13 絶対湿度振幅比と基準化された相対湿度標準偏差の関係 (断熱層の透湿抵抗別に表示)

図14 非定常計算による σ_p と推定値の対応

計算対象地域は、本設計法の適用範囲であるIV地域以南の主要都市を包括するように、表8に示す地域を対象とした⁷⁾。外気温湿度は標準年の拡張アメダス気象データを用い、室内温度は前掲した(1)式で求め、室内相対湿度は60%RH一定とした。計算対象の組み合わせは計64通りである。

7.2 超過頻度に対応した相対湿度の推定精度

推定精度の比較は、超過頻度3%、5%、10%点の相対湿度について行った。非定常計算では1～2月における1時間毎の計算結果から、超過頻度に対応する相対湿度を求めた。推定法では以下の手順に従って相対湿度を算出した。

- 1) 1～2月の室内外温度平均値を用い、熱抵抗比 R_i/R_o (図1参照) 及び透湿抵抗比 ξ より壁内相対湿度平均値 ϕ_u を求める
- 2) 外装下地層の絶対湿度振幅比 η 及び断熱層透湿抵抗 R'_2 を用い、(7)式から基準化された壁内相対湿度標準偏差 σ_ϕ を求める
- 3) (4)式により壁内相対湿度標準偏差 σ_ϕ を求める
- 4) (3)式より超過頻度 Pr に対応する z_c を求める
- 5) (8)式により超過頻度 Pr に対応した相対湿度 ϕ_c を求める

$$\phi_c = \phi_u + z_c \sigma_\phi \quad \dots (8)$$

図15に、超過頻度に対応した相対湿度に関する推定法との比較結果を示す。冬季の相対湿度平均値に関しては、定常計算は非定常計算に比べて+10%RH以内の範囲に納まっている。各超過頻度に対応する相対湿度は、(7)式が安全側の推定式であるため、推定値が非定常計算による値を上回っているものの、+15%RH以内の精度を示している。また、推定値が非定常計算結果を下回る場合の最大誤差は3%RH程度であり、地域や断面構成が変わっても、表1の物性値の範囲においてはおよそ安全側の結果が得られている。

8. 地域毎の防露設計用透湿抵抗比の算出

前節で検証した推定法を用い、表9の条件に対する地域毎の防露設計用透湿抵抗比を算出し、例示する。ここでは、安全側の結果を得るため外装下地層の断熱性能を無視し、相対湿度平均値 ϕ_u を算出した。ただし、本論文は透湿抵抗比の導出方法の提案と推定法の検証を主眼としているため、相対湿度上限値 ϕ_c と超過頻度 Pr については暫定的に定めた。また、対象地域は離島を除くIV地域以南の各都府県のアメダス気象データ全観測点とし、以下の手順⁸⁾により算出した。

Step1: 外装下地層及び断熱層の物性値を定め、(7)式より基準化された相対湿度標準偏差 σ_ϕ を求める。

Step2: 上限相対湿度 ϕ_c の超過頻度 Pr を定め (3)式より、閾値を考慮した z_c を求める。

Step3: (9)式⁹⁾より冬季平均相対湿度 ϕ_u を求める。

Step4: 冬季における内外温度の平均値及び熱抵抗比 R_i/R_o より、断熱層と外装下地層界面の冬季平均温度 θ_i を求め、 ϕ_u に対応する冬季平均絶対湿度 X_u を (10)式により求める。

Step5: (11)式により X_u に対応する防露設計用透湿抵抗比 ξ を求める。

$$\phi_u = \phi_c / (1 + z_c \sigma_\phi \sigma_{\theta,i} / [\phi_o \cdot \sigma_{\theta,o}]) \quad \dots (9)$$

表6 推定法検証のための断面構成

type	内装仕上げ	内装材	断熱材	外装下地層	通気層厚	外装材
type 1	ビニールクロス ^{*1}	石膏ボード [*] 12mm	GW16K 100mm	透湿防水シート	18mm	サイディング [*] 15mm
type 2				繊維板12mm		
type 3	ビニールクロス ^{*2}			合板12mm		
type 4			CF100mm	UF25mm		
type 5	ビニールクロス ^{*3}			繊維板12mm		
type 6		なし	UF100mm	合板12mm		
type 7			XPS100mm	合板12mm		
type 8		土壁 70mm	GW32K 30mm	透湿防水シート		

内装をビニールクロスで仕上げる地域 *1: 小瀬及び古町のみ、*2: 全地域、*3: 古町のみ
GW: グラスウール、CF: セルロースファイバー、UF: ウレタンフォーム、XPS: 押出発泡ポリスチレン

表7 計算に使用した材料物性値

材料	熱伝導率 W/[m・K]	湿気伝導率 kg/[m・s・kgDA]	比熱 J/[K・kg]	密度 kg/m ³
石膏ボード [*]	0.22	3.69×10^{-6}	870	787
土壁	0.45	5.00×10^{-6}	844	1334
グラスウール 16K	0.045	2.52×10^{-3}	698	16
グラスウール 32K	0.036	2.52×10^{-3}	698	32
セルロースファイバー	0.039	2.09×10^{-3}	1880	48
ウレタンフォーム	0.024	4.17×10^{-7}	1470	35
XPS	0.034	2.00×10^{-7}	1470	30
軟質繊維板	0.0629	3.24×10^{-6}	1052	371
合板	0.16	6.08×10^{-7}	1860	613
サイディング	0.963	5.42×10^{-7}	879	1095
透湿防水シート [*]	-	1.15×10^3	-	-
ビニールクロス [*]	-	7.55×10^4	-	-

*透湿防水シートとビニールクロスについては透湿抵抗([m²skg/kgDA)/kg)のみ表示した。

表8 推定法検証のための対象地域及び気象条件^{*}

対象地域	都府県	地域区分	温度℃	絶対湿度 kg/kgDA	相対湿度 %RH	温度標準 偏差℃
東京	東京都	IV	6.1	2.9×10^{-3}	48.9	3.0
名瀬	鹿児島県	V	14.9	7.3×10^{-3}	67.7	3.2
寺泊	新潟県	IV	3.7	3.3×10^{-3}	67.2	2.2
小瀬	茨城県	IV	1.7	2.7×10^{-3}	64.4	5.1
福岡	福岡県	V	6.6	3.9×10^{-3}	62.8	3.5
新潟	新潟県	IV	2.6	3.3×10^{-3}	71.8	2.8
古町	岡山県	IV	1.5	3.4×10^{-3}	80.1	3.8
広島	広島県	IV	5.6	3.6×10^{-3}	64.7	3.3

*1～2月の平均値及び標準偏差

図15 超過頻度に応じた相対湿度の推定結果

表9 地域ごとの透湿抵抗比の計算条件

- ・外装下地層の断熱性能を無視
- ・断熱材の熱抵抗及び透湿抵抗はグラスウール 16K100mm 相当とする (熱抵抗 $R=2.22\text{m}^2\text{K/W}$ 、透湿抵抗 $R'_2=4.81 \times 10^3 [\text{m}^2\text{skg/kgDA)}/\text{kg}]$)
- ・室内条件: 18℃、60%RH
- ・相対湿度上限値 $\phi_c=95\%RH$ 、超過頻度 $Pr=0.1$ ($z_c=1.71$)

$$X_u = 0.01 \cdot X_{sat, \theta_u} \cdot \varphi_u \quad \dots (10)$$

$$\xi = (X_r - X_u) / (X_u - X_o) \quad \dots (11)$$

図16に地域毎の防露設計用透湿抵抗比 ξ の計算結果を示す。図16からは、外装下地層の η が0.1以下の場合、太平洋側の都市部では、相対湿度95%RHを超過する頻度を10%以下にするために必要な透湿抵抗比 ξ は2以下で良いことが容易に読み取れる。一方、西日本でも標高が高い地域や日本海側は3以上の透湿抵抗比が必要であり、平成11年基準でIV地域以南に分類されている都府県でも、必要とされる防露性能は異なると言える。

本設計法は、 ξ のパラメータである外装下地層の絶対湿度振幅比 η や断熱層の透湿抵抗 R'_2 によって予め材料を分類し、これに対応した防露設計用透湿抵抗比 ξ を求め、図16のようなマップやチャートとして簡易に整理できることが特徴である。実務では、個々の壁体に対してStep1からStep5の計算を行うより、これらの設計資料を予め準備し、断面仕様を決定する際に使用する手順が有用と思われる。

9. 結露の有無を判定基準とする結果との比較

推定法により得られた防露設計用透湿抵抗比 ξ と、結露発生の有無を判定基準とする従来の定常計算法（以下、従来法とする）⁹⁾に基づいて算出した透湿抵抗比との対応を図17に示す。従来法では、断熱層と外装下地層境界における絶対湿度が飽和絶対湿度を越えないことを条件に X_u を求め、(11)式より ξ を算出した。従来法の外気条件については、1～2月の外気温湿度平均値と、同期間の日最低外気温度の平均値の双方を使用した。前者は、性能表示制度における内部結露の計算条件に準拠し¹⁰⁾、後者は結露発生を許容しない場合の条件と位置付けられる。なお、比較対象はIV地域以南の各都府県の2都市程度とし、推定法については前節

で得られた結果を用いた。

従来法で求めた ξ は使用する外気条件の扱いによって異なる。1～2月の温湿度平均値を用いた従来法は、仮に平衡含水率曲線の傾きが飽和状態まで変わらないとすれば、およそ $\varphi_e=100\%RH$ 、 $Pr=0.5$ に設定した結果と見なせるため、推定法の ξ が大きくなる。しかし、日最低気温を用いた場合は、 $\varphi_e=100\%RH$ 、 $Pr=0.0$ の結果に該当するため、推定法で得られた ξ の方が小さい値となる。最寒期の平均温湿度を用いる従来法では、内外条件を厳しく設定したり、断熱層の外側に位置する部材の断熱性を無視することで、安全側の結果が得られるよう配慮することが多いが、推定法は閾値の設定によって安全率を柔軟に調整できる手法であると言える。

10. まとめ

本研究では、相対湿度の超過頻度を防露性能の尺度とした、木造断熱外壁の透湿抵抗比算出のための推定式を感度解析の結果より作成し、その一般性について検討した。また、得られた推定式及び気象データの統計値を用い、地域毎に必要なとされる透湿抵抗比を例示した。

本推定式は、想定される条件下での数値解析の結果から統計的に導いたものであるため、物理現象そのものを正確に表すものではなく、適用範囲は平成11年基準のIV地域以南の通気層を持つ外壁（内外透湿抵抗比1以上、表1の材料物性値の範囲）に限定される。また、上限相対湿度を越える出現頻度を考慮できるが、その継続時間については扱っていない。しかし、複雑な数値計算を行わずに、任意の相対湿度の上限値に対する超過頻度を考慮した透湿抵抗比を算出できるため、防露性能の閾値に対して柔軟に対応できる利点がある。なお、本稿で示された透湿抵抗比の推定式は、2次元的な拡散現象や漏気、防湿欠損などの影響は考慮されていないため、実用化にあたってはこれらの点を考慮した運用が必要であり、今後の検討課題とされる。

図16 地域毎に必要なとされる防露設計用透湿抵抗比
(断熱材：グラスウール、相対湿度上限値： $\varphi_e=95\%RH$ 、超過頻度： $Pr=0.1[z=1.71]$)

図17 推定法と従来法により求めた透湿抵抗比の比較

謝辞

本研究は、国土交通省総合技術開発プロジェクト「エネルギー自立循環型建築・都市システム技術の開発」及び独立行政法人建築研究所研究課題「エネルギーと資源の自立循環型住宅に係わる普及支援システムの開発」の研究成果の一部であり、関係各位に感謝の意を表します。

注

注 1) 本論文における解析では水分化学ポテンシャルで記述された熱水分同時移動方程式を用いるため、厳密には湿気容量は一定値ではない。しかし、後述する推定式作成に際して定数とし扱う必要があるため、絶対湿度変化に対する含水率変化 κ を湿気容量に関する指標として用いることとした。また κ を求める際の温湿度条件は 20℃50%RH とした。

注 2) 湿気伝導率の湿度依存性が壁内湿度に及ぼす影響については既報^[1]により検討し、外装下地層については冬季の平均湿度より低い条件で測定された湿気伝導率を用いれば、安全側の結果が得られることがわかっている。

注 3) 木質系構造用面材のハイグロスコピック域における平衡含水率曲線を考慮し、相対湿度 80%RH における平衡含水率を 16%と仮定して、原点 (相対湿度、平衡含水率ともに 0%) を通る 1 次式で近似した。

注 4) 注 1) で説明したように、感度解析では平衡含水率曲線の傾きから逐次湿気容量を求める。このとき、湿気容量を絶対湿度変化に対する含水率変化 κ で表現すれば、平衡含水率曲線の傾き $\partial w / \partial \phi$ が一定であれば、 κ は (A1) 式に示すように材料密度に比例した値となる。

$$\kappa = \rho \frac{1}{X_{sat}} \frac{\partial w}{\partial \phi} \quad \dots (A1)$$

注 5) 文献^[10]によれば、外装下地材として用いられる一般的な建材の比熱はおおよそ 0.8~1.2 (kJ/kgK) の範囲となる

注 6) SONNTAG の式から得られた飽和絶対湿度と温度の関係を指数関数 1 項で近似すれば、相対湿度 $\phi(\%)$ は絶対湿度 $T(K)$ と絶対湿度 $X(kg/kgDA)$ を変数とした、(A2)式で表わされる ($a=1.67 \times 10^{10}$ 、 $b=0.06577$ 、決定係数 $R^2=0.998$)。

$$\phi(T, X) = aXe^{-bT} \quad \dots (A2)$$

このとき、温度変化に対する相対湿度の変化は(A3)式で表わされる。

$$\partial \phi / \partial T = -abXe^{-bT} \quad \dots (A3)$$

したがって、平均絶対湿度を X_i とすれば温度の微小変化 ΔT に対する相対湿度の振幅 $|\Delta \phi|$ は、

$$|\Delta \phi|_{X=X_i} = |-abX_i e^{-bT} \cdot \Delta T| \quad \dots (A4)$$

となり、ここで(A2)式を考慮すると(A5)式が導かれる。(A5)式は微小空間において周囲の吸放湿性が等価であれば、温度変化 ΔT が等しい場合、振幅 $|\Delta \phi|$ は平均相対湿度に比例することを示している。

$$|\Delta \phi|_{X=X_i} = |-b\phi_i \cdot \Delta T| \quad \dots (A5)$$

注 7) 付図 1 は、平成 11 年基準の都道府県による分類 (文献^[11]、別表第 1) で、IV、V 地域に該当するアメダス気象データ全観測点の平均温度、平均絶対湿度、平均相対湿度及び温度標準偏差の頻度分布 (1~2 月) である (沖縄を除く)。引用したデータでは、市町村等による詳細な分類で II、III 地域となるものも含まれており、詳細にデータを検証したところ、おおよそ平均温度 1.5℃が区分の変わる目安となっている。図中の矢印は、表 8 の計算対象地域の値を指しており、前述した内容を勘案すれば、IV 地域の 8 割以上の範囲を網羅している。

注 8) 感度解析の結果を精査したところ、(4) 式による基準化によって σ_ϕ の推定精度が高くなることが示されたため、本論文における相対湿度標準偏差 σ_ϕ の導出手順 (Step1~Step5) は、既報^[11]と若干異なっている。

注 9) 超過頻度 Pr に対応した相対湿度上限値 ϕ_u と相対湿度平均値 ϕ_o の関係は (A6) 式で表わされる。

$$\phi_u = \phi_o - z_c \sigma_\phi \quad \dots (A6)$$

本文中の(4)式を σ_ϕ について整理し、(A6)式に代入すると ϕ_u は(A7)式で表わされる。

$$\phi_u = \phi_o / (1 + z_c \delta_\phi \sigma_{\phi_o} / [\phi_o \cdot \bar{\sigma}_{\phi_o}]) \quad \dots (A7)$$

注 10) 防露に関する試験ガイドライン^[8]では、外気条件が最寒月の月平均値、室内温湿度は 15℃70%RH となっており、厳密には本論文における計算条件と異なる。

本論文に関連する既発表論文

- [1] 齋藤宏昭、坂本雄三、澤地孝男、瀬戸裕直：壁内相対湿度の発生頻度を考慮した温暖地向け木造住宅用簡易防露設計法の開発 (その 1) 簡易防露設計法の提案と水分移動解析手法の検証、日本建築学会環境系論文集 第 604 号、pp23-29、2006.6
- [2] 齋藤宏昭、坂本雄三、澤地孝男、瀬戸裕直：温暖地向け木造外壁のための簡易防露設計法の開発 壁体内における相対湿度頻度分布の予測に基づく防露設計用透湿抵抗比の導出、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp411-412、2005.9

付図 1 都府県による区分で IV、V 地域に分類される気象データの頻度 (1~2 月の拡張アメダス気象データ [標準年] より算出)

参考文献

- [1] (財) 住宅金融普及協会：木造住宅工事共通仕様書 平成 15 年改訂、pp108-pp135、2003.3
- [2] (財) 住宅金融普及協会：枠組壁工法住宅工事共通仕様書 平成 15 年改訂、pp164-pp180、2003.3
- [3] 土屋喬雄：木造外壁内部結露防止のための室内側、外気側透湿抵抗の目安について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp529-530、1988.10
- [4] 尾崎明仁：壁体の防露仕様と湿害予防を目的とした地域区分、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2、pp265-268、2000.9
- [5] 松本衛、佐藤真奈美：建築壁体の結露・再蒸発過程の周期的定常状態の数値解法と解の性状、日本建築学会計画系論文集 第 464 号、pp1-10、1994.10
- [6] 井修一、松本衛：Fokker-Planck 方程式による結露過程の解析、日本建築学会大会近畿支部報告集、pp121-1214、1992
- [7] Kumaran, M.K 著 日本建築学会訳：建築材料の熱・空気・湿気物性値、2001.10
- [8] 計算又は実験の結果による温熱環境 (結露の発生を防止する対策) に関する試験ガイドライン 住宅性能評価機関等連絡協議会資料
- [9] 齋藤平蔵：建築気候、共立出版、1976 年
- [10] 日本熱物性学会編：熱物性ハンドブック、養賢堂
- [11] (財) 住宅・建設省エネルギー機構：住宅の次世代省エネルギー基準と指針、pp11、1999 年

記号

ϕ : 相対湿度 (%)
 θ : 温度 (°C)
 X : 絶対湿度 (kg/kgDA)
 w : 質量含水率 (mass%)
 λ : 湿気伝導率 (kg/[m·s·kg/kgDA])
 R : 熱抵抗 (m²K/W)
 R' : 透湿抵抗 (m²·s·[kg/kgDA]/kg)
 ξ : 透湿抵抗比 (—)
 κ : 絶対湿度変化に対する含水率変化 (kg/m³/[kg/kgDA])
 ρ : 密度 (kg/m³)
 d : 材料厚さ (m)
 t : 時間 (s)
 ω : 角速度 (1/s)
 Pr : 超過頻度 (—)
 σ_ϕ : 相対湿度標準偏差 (%)
 δ_ϕ : 基準化された相対湿度標準偏差 (%)
 σ_{ϕ_o} : 外気温度標準偏差 (°C)
 ϕ_o : 外気相対湿度平均値 (%)
 ϕ_u : 壁内相対湿度平均値 (%)
 η : 絶対湿度振幅比 (—)
 z : 正規化された相対湿度 (—)
 $\bar{\sigma}_{\phi_o}$: 外気温度標準偏差の平均値 {5 都市の平均} (°C)

添字

o : 外気
 s : 表面
 i : 室内
 u : 平均値
 sat : 飽和絶対湿度
 i : 任意点
 c : 閾値
 ϕ : 相対湿度
 θ : 温度

(2006 年 4 月 10 日原稿受理, 2006 年 8 月 18 日採用決定)