

建物外皮の熱と湿気のシミュレーション —建物の設計と湿気の害に関する検証のための使い方

海外文献紹介

Hygrothermische Simulation - Anwendungsmoeglichkeiten fuer Planer und Sachverstaendige

Daniel Zirkelbach^{*†}
[Internationale Baufach- und Sachverständigen
Regensburg, 2013]

田中繪梨訳 フラウンホーファー建築物理研究所
柚本玲訳 文化学園大学 正会員

建物の省エネルギー対策として、日本でも建物外皮の高気密、高断熱化が進んでいる。高気密、高断熱化は、室内の温熱環境の改善や冷暖房エネルギーの抑制という観点では、(正しく計画および施工されれば!)大変有効である。しかし、湿気の観点から見るとどうであろうか? 気密性を高めると、建物外皮の外側と室内側の間を通る空気が遮断され、空気と一緒に構造を通過し、外側または室内側に排出されるべき湿気の流れが滞ってしまう。すると、壁体内で結露が生じ、それが木材の腐朽につながるリスクが高まる。また、重量構造において断熱性を高めると、内断熱の場合は軸体の外側と内側の温度差が小さくなる。冬場は、温度差が大きければ、温度の高い室内側の水蒸気分圧が高くなり、低温側、つまり水蒸気分圧が低い外側に湿気が排出される。つまり、内断熱をすることにより、冬場は外側に排出されるべき湿気が排出されにくくなる。外断熱の場合、冬場は外表面の表面温度が、断熱をしていない場合に比べると低くなり、露点温度を下回ると外表面に結露が生じ、藻類が繁殖しやすくなる。その結果、表面が黒ずんでしまい、美観が損なわれる。このように、よかれと思って施した高気密、高断熱化が、思わぬ湿気の害を引き起こすことを知っておかなくてはならない。よってドイツでは、建物のエネルギー・コンサルタントの資格を持つ人が、湿気に関する知識を取得することは重要であると考えられ、そのためのセミナーが、在ドイツ、フランホーファー建築物理研究所で開催されている。また、米国のPHIUSは、パッシブハウス^{*2}としての認定を行う際に、建物の省エネルギー性だけではなく、湿気による害がないかどうかを審査している。日本で

smoeglichkeiten fuer Planer und Ausbau und Fassade,] DIN 1108-3(DIN: ドイツ工業規格)。建物外皮の中の湿気と熱の動きを非定常でシミュレーションするプログラムとして、WUFI®(ヴーフィー)というプログラムが国際的に使われている。WUFI®は在ドイツ、フランホーファー建築物理研究所で開発され、1995年の発売以来、常に新しい知見を取り入れてアップデートを続けている。WUFI®の開発グループの主任である Daniel Zirkelbach 氏が記したレポートを、ここに日本語にして紹介する。このレポートには、防湿の基本的な考え方やシミュレーションの実践的な使い方が詳しく記されているため、日本でも、省エネルギーであるだけではなく、湿気の害がない建物の建設に役に立つことを願っている。

建物の外皮構造の中に含まれる湿気の量は、外気や室内の温湿度環境によって一年を通して変化する。また、外皮構造の中の湿気がどのように輸送され、または蓄えられるかなど、使用している建材によっても変わる。

部屋の中と外の温湿度条件の違いが、湿気の流れを引き起す。中央ヨーロッパの典型的な気候(北海道のような日本の寒冷地もこれに類似する)では、湿気はおおよそ、部屋の内側から外側に向かって流れる。しかし外側の温度が高い場合や、室内を冷房している場合には、湿気は部屋の外側から内側に向かって流れる。特に、外側の建材が雨水を吸収しやすい場合には、より多くの湿気が構造の中に

*1 フラウンホーファー建築物理研究所

*2 パッシブハウスとは、ドイツパッシブハウス研究所が規定する性能認定基準(年間冷暖房負荷が 15 kWh/m^2 など)を満たす省エネルギー住宅である。

入ってくる。また、構造の中や外皮の表面に生じた結露や、空気の対流によって室内側および屋外側の表面に運ばれる湿気、地面に含まれる水分も、構造の中に湿気が入ってくる原因となる。それゆえ、入ってくる湿気と、出て行く湿気の量がつりあっていることが重要で、構造の中の湿気の量が、年間を通じて長時間、基準値を超えることがあってはならない。DIN 4108-3(DIN: ドイツ工業規格)²⁾では、定常計算によって構造の中の温度と湿気の分布を算出する方法に基づいて、湿気のバランスについて言及されている。しかしこの定常計算法は、冬の結露量のみを評価基準としていて、他の多くの重要な要因が考慮されていない。それに対して、熱湿気シミュレーションは、ほぼすべての重要な要因が考慮されており、構造中の湿気性状をより詳しく、正確に把握することができる。そのため、防湿計画のためにも、または施工後に生じた湿気の害について分析し、その原因を探ることができる。DIN EN 15 026(ヨーロッパ規格のドイツ版)³⁾では、熱湿気シミュレーションに関して、プログラムで考慮するべき項目やプログラムのベンチマークテストの実施などについて記述されている。

以下、定常計算と熱湿気シミュレーション(非定常計算)の違いについて述べ、シミュレーションが設計現場と、建物に生じた湿気の害に関する検証を行う専門家にどのように役に立つかを記す。

1. 定常計算 Vs. 热湿気シミュレーション(非定常計算)

ドイツでは、建物構造の防湿に関する判定について、DIN 4108-3に記されている。この規格の中では、降雨から建物を守るために指針と、冬の結露を抑えるための判定方法が定められている²⁾。

定常計算の方法では、グラフを描いて、または計算によって、一年間で建物構造の中に入ってくる、または構造から出て行く湿気の量を見積もる。室内側と屋外側の気候条件として、それぞれに固定の温度と相対湿度を与える。これらの条件は、なるべく現実的となるように考えられてはいるが、実際には、湿気による害がないことがすでに確認されている構造が定常計算法による判定で可となり、問題がある構造に対しては、判定が不可となるように決められている。このため、定常計算法で使用する周辺条件は、現実的であるとはいがたい。例えば夏の室温が12度となっているが、夏にこれほど低温な住宅があるだろうか。また、その他の気象要因、例えば日射や風、降雨や長波長放射(天空放射や周辺の物体との放射のやりとり)などは考慮されない。つまり、定常計算法で考慮されている現象は、冬期に湿気が溜まる現象と、夏期に乾燥する現象のみ

であり、そしていずれも水蒸気の輸送のみが考慮されている。また、液体としての水の輸送は考慮されていない。

にもかかわらず定常計算法は長年にわたり使われ、この方法によって優良と認められる構造が、良しとされてきた。それらの構造はつまり、施工時に含まれる湿気や、雨水の浸入や、日射による影響をほとんど受けないような構造である。しかし、外側も内側も湿気を通さない施工がなされている木造の屋根に関しては、定常計算法による判定では良しとされるが、実際には多くの害が生じている。なぜかというと、判定の際には構造の防湿性が十分であり、建材ももともと乾燥していることを仮定しているが、実際には、現場での施工がこのように完璧であることは保障できないためである。もし、湿気がまったく浸入しないのであれば、乾燥しにくい構造でも問題はないが、施工時に湿気が含まれていたり、防湿施工が完璧でなく湿気が侵入するような場合には、害が生じる。

その他の多くの構造も、規格に定められている適用範囲外であるために定常計算法による判定を免れるか、構造の安全性を証明する義務を免れている。定常計算法による判定を免れる場合とは、定常計算法が考慮しない要因や気候要素の影響が大きい場合である。例えば、施工時に湿気が含まれる場合や雨水を吸収する場合、または外気候が通常とは大きく異なる場合や、屋上緑化、冷房をしている部屋またはオフィスや居住以外の目的の建物などである。証明の義務を免れる場合とは、定常計算法による判定では不可となるかもしれないが、実際に長期間、問題がないことが明らかになっている構造である。

熱湿気シミュレーションは、建築物理的に重要な要因がくまなく考慮される物理モデルを使って、実際的な熱と湿気性状を把握することができるため、定常計算法の限界を補うことができる。また、定常計算法を規定しているDIN 4108-3でも、2001年の改定からは、定常計算法による判定ができない構造については、熱湿気シミュレーションをすることを推奨している。当時、シミュレーションは真新しいものであったが、今となっては、ヨーロッパ規格であるDIN EN 15026(2007)でも規定され、ますます広く使われている。

熱湿気シミュレーションでは、定常計算法による湿気の流出入だけではなく、次のような要因や周辺環境が考慮される。

- 1) 雨水の吸収と液体としての水分の輸送
- 2) 建材の保湿性および施工時に建材中に含まれる湿気
- 3) 建材の蓄熱性
- 4) 湿気が断熱性能に与える影響
- 5) 調湿性のある防湿シート
- 6) 氷結および蒸発に伴う潜熱の吸放出

建物外皮の熱と湿気のシミュレーション—建物の設計と湿気の害に関する検証のための使い方／田中絵梨・柚本玲 訳

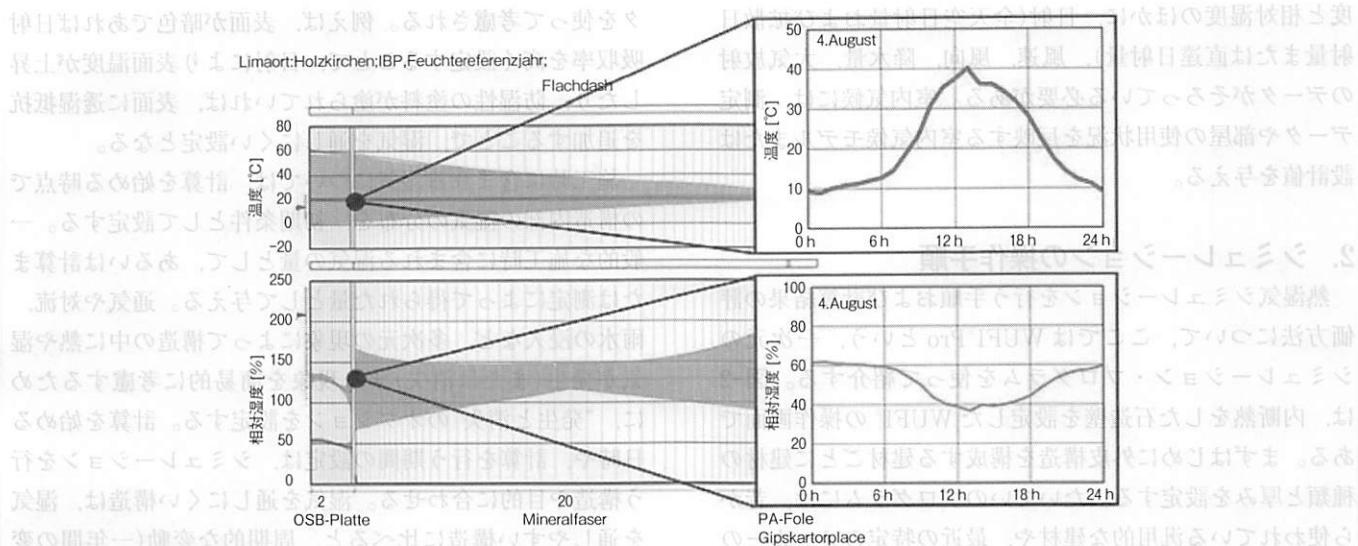


図-1 WUFI® を使った陸屋根断面の熱湿気シミュレーションの結果。陸屋根の中の温度と相対湿度、含水率の分布図(左)および、ある夏の一日の、OSB® 板とロックウール板、パネルの間の温度と相対湿度の変化(右)。

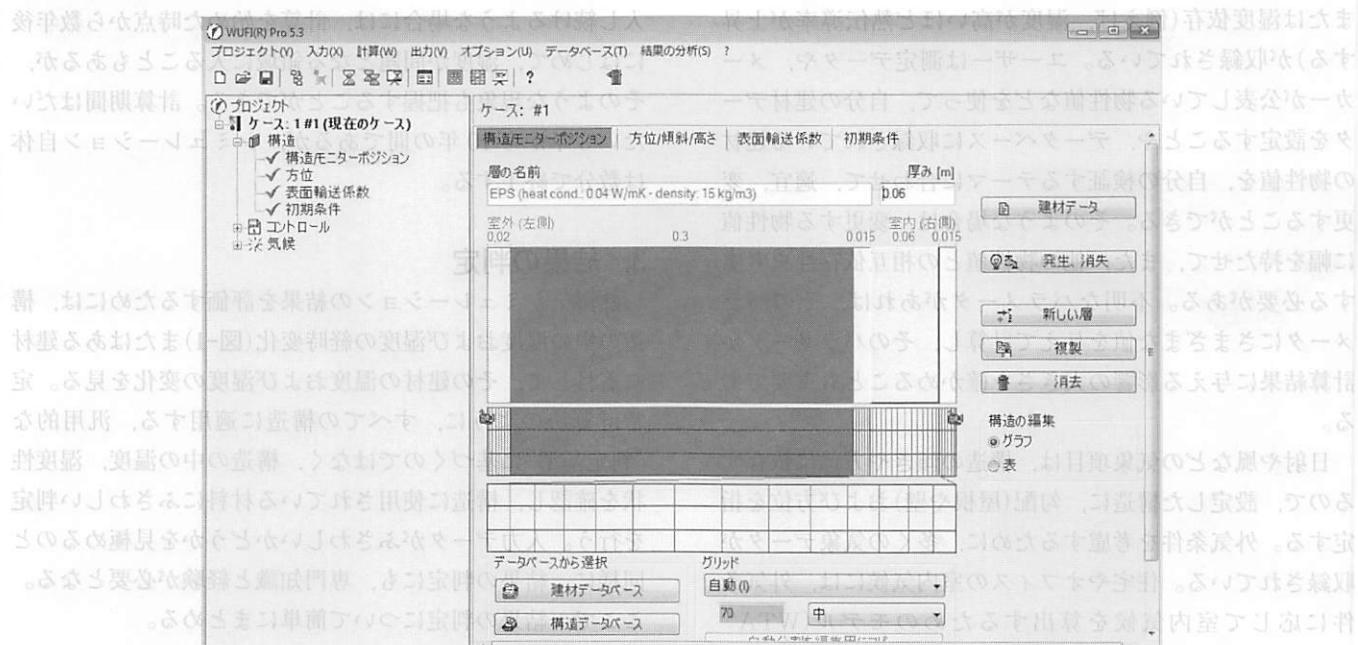


図-2 WUFI® Pro の構造を設定する画面。このプログラムは日本語で表示させることができる。

7) 日射による温度上昇
8) 長波長放射による放射冷却と結露の発生
信頼できる計算結果を得るために、ふさわしい建材データが必要となる。シミュレーションに使う建材データには、定常計算法に必要なデータのほかに、含水率曲線^{*3}、水分拡散係数^{*4}、熱伝導率や透湿抵抗係数の温度依存性^{*5}に関する情報が必要である。湿気による害は、一日の間の外気条件の変化によってもたらされる場合もあるため(図-2)、建材の相対湿度と、その建材に含まれる水分量の関係を表す曲線。

1) 通常は1時間間隔の、計算する地域の気象データが必要である。気象データには、検証するテーマに合わせて、温

度^{*3}、毛細管現象によって建材の中を水分が液体として輸送される現象を計算するために、液体としての水分拡散の早さを記述する数値。単位は[m²/s]。一般的に、建材が水との接触がある場合(例えは、雨が外壁に当たっている時)の水分拡散係数は、水との接触がなく、建材の中の液体が拡散していく場合(雨がやんだ後の水分拡散係数よりも大きい)と比べて大きい。

**4 一般的に、建材の熱伝導率は建材の温度上昇または湿度上昇に伴い、増加する。周囲の相対湿度によって透湿性が変化するような調湿シートを使った構造をシミュレーションする場合、透湿性の湿度依存を考慮することは必要不可欠である。

*5 木質ボードの一種。配向性ストランドボード。

度と相対湿度のほかに、日射(全天空日射量および拡散日射量または直達日射量)、風速、風向、降水量、大気放射のデータがそろっている必要がある。室内気候には、測定データや部屋の使用状況を反映する室内気候モデルまたは設計値を与える。

2. シミュレーションの操作手順

熱湿気シミュレーションを行う手順および計算結果の評価方法について、ここでは WUFI^{*}Pro という、一次元のシミュレーション・プログラムを使って紹介する。図-2 は、内断熱をした石造壁を設定した WUFI^{*} の操作画面である。まずははじめに外皮構造を構成する建材ごとに建材の種類と厚みを設定する。たいていのプログラムには、昔から使われている汎用的な建材や、最近の特定のメーカーの建材などが入った建材データベースが付属している。水蒸気拡散抵抗係数^{**}、熱伝達率などの基本的な物性値のほかに、含水率曲線や水分拡散係数、さらに物性値の温度依存または湿度依存(例えば、湿度が高いほど熱伝導率が上昇する)が収録されている。ユーザーは測定データや、メーカーが公表している物性値などを使って、自分の建材データを設定することや、データベースに収録されている建材の物性値を、自分の検証するテーマに合わせて、適宜、変更することができる。そのような場合は、変更する物性値に幅を持たせて、また、他の物性値との相互依存性を考慮する必要がある。不明なパラメータがあれば、そのパラメータにさまざまな値を与えて計算し、そのパラメータが計算結果に与える影響の大きさを確かめることも重要である。

日射や風などの気象項目は、構造の傾きや方位に依存するので、設定した構造に、勾配(屋根や壁)および方位を指定する。外気条件を考慮するために、多くの気象データが収録されている。住宅やオフィスの室内気候には、外気条件に応じて室内気候を算出するためのモデル(WTA^{**} 6-2-01/D^{**}、EN 13788^{**}、EN 15026、ASHRAE 160^{**})が用意されている。その他にも、測定データや人工気候室の温湿度条件を、シミュレーションに使用することもできる。

気候条件が建物構造に与える影響は、表面伝達パラメー

タを使って考慮される。例えば、表面が暗色であれば日射吸収率を高く設定することで、日射により表面温度が上昇したり、防湿性の塗料が塗られていれば、表面に透湿抵抗を追加することで、湿気を通しにくい設定となる。

施工時に含まれる湿気については、計算を始める時点での構造内部の湿気の分布を、初期条件として設定する。一般的な施工時に含まれる湿気の量として、あるいは計算または測定によって得られた量として与える。通気や対流、雨水の浸入など、多次元の現象によって構造の中に熱や湿気が発生(または消失)する現象を簡易的に考慮するために、“発生と消失”的オプションを設定する。計算を始める日時や、計算を行う期間の設定は、シミュレーションを行う構造や目的に合わせる。湿気を通しやすい構造は、湿気を通しやすい構造に比べると、周期的な変動(一年間の変動が、毎年同じで、年ごとに湿気の量が継続的に増加または減少しない状態)、に至るまでの期間が長い傾向がある。また、少しずつ、しかし長期的に湿気が構造の中に浸入し続けるような場合には、計算を始めた時点から数年後にはじめて、湿度が問題となる領域に入ることもあるが、そのような現象も把握することができる。計算期間はだいたい3年から10年の間であるが、シミュレーション自体は数分で終了する。

3. 結果の判定

熱湿気シミュレーションの結果を評価するためには、構造の中の温度および湿度の経時変化(図-1)またはある建材に着目して、その建材の温度および湿度の変化を見る。定常計算法のように、すべての構造に適用する、汎用的な“判定基準”に基づくのではなく、構造中の温度、湿度性状を確認し、構造に使用されている材料にふさわしい判定を行う。入力データがふさわしいかどうかを見極めるのと同様に、結果の判定にも、専門知識と経験が必要となる。ここで、結果の判定について簡単にまとめる。

3.1 热湿気性状

構造中の湿気が継続的に増加し続けてはいけない。そのため、まずは構造全体に含まれる水分の量を見る。この湿気の量が、計算初期のレベルで保たれるか減少すればいいが、計算期間中に増加し続ける傾向があれば危険である。次に、建材ごとの湿気の変化を見る。建材ごとの湿気も、長期的に増加し続けてはいけない。例えば、施工直後に、ある建材に多くの湿気が含まれていて、その湿気が隣の建材にゆっくりと移動するような場合がある。

3.2 凍害

周期的な変動になった状態で、どれだけの湿気を含んでいてもいいかという基準は、建材によって異なる。凍害に強い左官材やレンガ、コンクリートであれば、自然飽和状

^{*} 建材の透湿抵抗と、その建材と同じ厚みの静止空気層の透湿抵抗の比。静止空気層の透湿抵抗は温度によって変わるために、比として表すことで、建材の透湿抵抗の温度依存が考慮できる。日本で一般的に使われている建材の透湿抵抗の値は、測定時の温度によって異なるため、熱と湿気を同時に解析するシミュレーションでは、水蒸気拡散抵抗係数を使用する必要がある。

^{**} WTA とはドイツ語圏の国々における、主に建物の改修に関して必要な基準の設定や研究を行う、産業界と連携した学術団体である。ここで作成された基準のうち、欧州基準(EN)および国際基準(ISO)に採用されるものもある。筆者(Zirkelbach)はこの団体の委員でもある。

態、つまり、相対湿度が100%の状態になるまで湿気を含んでも凍害の危険性はない。しかし、これらの材料でも高湿度の状態が長く続くと、表面にカビや藻類が生えるリスクがある。凍害になりやすい材料は、多くの湿気を含んではいけない。石灰砂岩の場合、中欧ヨーロッパの標準的な冬の気温を考えると、含水率が12質量%を超えると凍害が生じる。しかし他の材料に関しては、基準値が明らかではない。そこでWTAの内断熱に関する章⁷⁾では、凍害になる可能性がある材料に関して、凍害にならないために、材料中の湿気の量に関して、建材に含まれる水分量の、その建材の最大含水量に対する割合を30%以下、または材料の空隙の中の相対湿度を95%以下に保つことを推奨している。これまでの知見から、この基準は凍害が生じやすい材料に対しても有効であることがわかっている。

3.3 木材の腐朽

木材や木質系の材料に関して、腐朽や強度の劣化を防ぐためには、材料中の湿気の量が長期間にわたり18または20質量%を超えてはいけないことがDIN 68000⁸⁾に明記されている。同様の基準値は、有機繊維系断熱材にも当てはまる。とはいってもこの基準値は、安全のためにより厳しい値となっており、実際に菌類が木材を腐蝕はじめる湿気の量は、25から30質量%である。温度が低いと、菌類の成長が抑えられ、最終的には死滅する。材料の空隙の中の空気の相対湿度と温度によって、木材の腐蝕のリスクを評価するためのプログラムは現在、開発中である⁹⁾。

3.4 熱伝導率の上昇

硬質発泡プラスチック系は湿気の影響を受けにくい断熱材ではあるが、湿気が拡散によって入ってきた場合に、熱伝導率が大きくなる。つまり断熱性能が落ちる可能性がある。このような性質は建材データの中に記述されており、ユーザーはその断熱材が取りうる熱伝導率の範囲を確認することができる。原則として、湿気の量が2体積%までであれば、湿気が熱伝導率に与える影響はほとんどないといえる。

3.5 カビ

室内の表面や、構造の中の空気層などのすき間に接する面では、湿度が高い状態が続くとカビが生える可能性がある。DIN 4108では、冬期の熱橋部分での室内表面温度、つまり12.5°Cを想定して、カビが生える相対湿度の基準値を80%としている。しかし温度の高い夏期では、75%を超えるとすでにカビが生える危険性がある。WUFI^{*}には、カビが生える温度と相対湿度の条件を表すIsoplethen曲線が収録されている。温度と相対湿度の計算結果がこの曲線を超えない範囲であれば、カビが生えるリスクがないといえる。この曲線を超える場合には、その超えている程度と、越えている時間の長さによって、リスクの大きさが

異なる。そのリスクの大きさは、生物熱湿気モデルを使うと、より詳しく検証することができる。生物熱湿気モデルは、モデル化したカビの胞子が、発芽および成長する早さを算出する¹⁰⁾。この計算モデルWUFI^{*}Bioは、WUFI^{*}のホームページ¹¹⁾で無料で提供されている。

3.6 繊維系断熱材の内部での結露

ロックウールやグラスウールなどの繊維系断熱材は通常、保湿性がほとんどない。よって、拡散によって湿気が入ってくると、低温の側で、結露が生じことがある。結露の量は、結露水が流れ落ちることのないように制限する必要がある。そのため、DIN EN ISO 13788の改訂版では、結露が生じる状態で、材料自体が湿気を蓄えることができない場合、その箇所に生じる結露量は200 g/m²を超えないように定めている⁵⁾。

3.7 サ ビ

構造に金属の材料が使われている場合、高湿度の状態が続くと錆びる可能性がある。特に、コンクリート内部の鉄筋が中性化し、防錆効果がなくなった後に生じる。ここで、錆びる条件を簡略化すると、中性化した後のコンクリート内部にある鉄筋は、材料の空隙内部の相対湿度が80%を越えなければ、錆びは進行しない、といえる。ここでも、温度が高いほど、錆びの進行は早まるが、このことに関しては今まで、あまり考慮されていない。フランホーファー建築物理研究所は現在、ミラノのポリテクニコ科学技術大学と共同で、無機系の材料に関して、温度と相対湿度の条件によって、錆びるリスクとその進行の早さを予測するためのモデルを開発している¹²⁾。

また、湿気が原因で生じる建材の強度の低下や、化学的性質の変化、または熱湿気に関する耐久性なども、判定基準となる。これらの現象も、必要に応じて検証することができる。

4. 施工不良も考慮して安全な計画を

構造の防湿計画を行う際に、防湿施工が完璧で、材料がもともと乾燥していることを前提にすることは、あまり意味がない。そのような前提のもとでは、外から湿気が入ってこないために防湿性が高いほうがいいという結果になります。しかし実際には、防湿性が高いがゆえに、建材の中から外へ湿気が逃げにくく、どちらかというと湿気による害が起こりやすい。

防湿設計の原則は、必要なだけ防湿性を高く、しかし同時に、必要なだけ湿気を通しやすくすることである。そうすることで、施工不良によって予期せぬ湿気が入ってきたとしても、その湿気を外に逃がす可能性が確保される。

4.1 施工時に含まれる湿気

どれだけの湿気を逃がす能力を確保するべきかを検証す