

WUFIを使った建築部位における 非定常熱湿気同時移動のシミュレーション

Hartwig M.Künzel (フラウンホーファー研究所部長)

田中 辰明 (お茶の水女子大学教授)

フラウンホーファー研究所のゼドルバウアー所長、
キュンツェル博士は平成16年6月から7月にかけて東京、
京都、札幌で講演の為来日された。ここにフラウンホー
ファー研究所とお茶の水女子大学で行った共同研究の
報告を行う。

1. はじめに

建築部位における湿気輸送を考える場合、建築に携わ
る者は先ず冬の水蒸気拡散による結露を思い浮かべる。
水蒸気拡散について考える場合、定常条件下での結露の
発生が非常に少ない、あるいは全くないことが分かる
と、問題は通常解決されたことになる。それでも期待に
反して湿気による被害が発生した場合、あるいは定常状
態において水蒸気拡散を考察した結果、ある建築部位で
問題が生じることが判明した場合に初めて、他の評価方
法を探すことになる。冬の水蒸気拡散による結露形成
は、湿気による多くの問題のうちの一つに過ぎないた
め、定常の水蒸気拡散の考察によるプラスの評価によっ
て、湿気の問題が全く発生しないかのような誤った印象
が生まれる危険がある。その際、他の湿気の影響、例え
ば室内空気の対流、降雨あるいは夏の外気の高い湿気な
どによる問題は考慮されていない。同じことが建材の湿
気についても言える。昨今の現場での厳しい建築工程を
考えると、この問題は非常に深刻である。これらの影響
も把握できるようにするためには、単純な定常状態の水
蒸気拡散の考察から、現実即した建築部位内の湿気性
状のシミュレーションへと移行しなくてはならない。こ
の目的のために近年新しい非定常の計算方法が開発さ
れ、実験においてその真価が証明された。この計算方法
が今日では実地で広く普及していることから分かる



お茶の水女子大学構内にて。(右・キュンツェル、左・田中)

ように、その信頼性は非常に大きい。新たな欧州基準[1]
もこの事実を考慮して作成された。

以下に建築部位における湿気の増加と湿気移動によ
る影響を示し、建築部位内の湿気性状に関する物理学的
基礎を説明する。次に、今日では広く普及している非定
常熱湿気同時移動解析計算ソフトWUFIを使って、建
材および気候データならびに計算の正確性のための条
件が分析される。最後に、建築部位における熱湿気挙動
の分かりやすい説明のためにいくつかの実例を考察し、
将来の発展に関する展望について簡単に述べる。

2. 建築部位における湿気の影響

建築部位および建材の有用性と耐久性は、次のような
湿気の影響により損なわれる可能性がある：

- 断熱性の低下
- 膨張、収縮あるいは塩類の結晶化などにおける湿気
による応力の発生

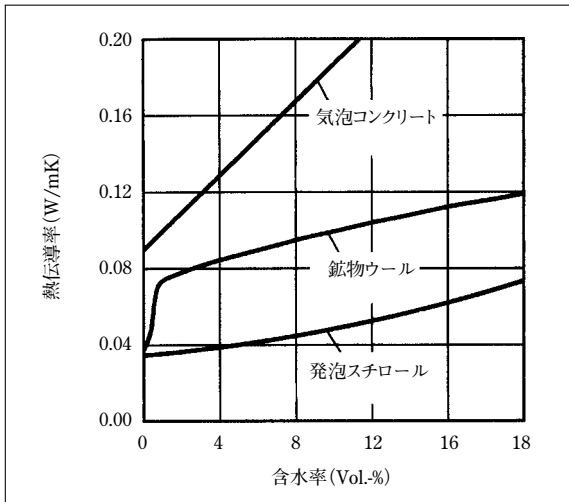


図1 建材の熱伝導率に対する湿気の影響

- 一 建材の湿気の増加に伴う微生物の発生あるいは腐食による損害

湿気による熱損失

通常、建築内の熱と湿気の移動プロセスは相互に密接に関連している。それは特に建築部位の断熱における湿気の影響にはっきりと現れる。図1は3種類の建材の含水率の増加に伴う熱伝導率の上昇を示している[2]。この例の気泡コンクリートに代表される鉱物性壁材の熱伝導率が含水率に応じて直線的に上昇するのに対して、硬質発砲スチロールの場合、上昇は緩やかである。意外なのは、鉱物ウールの熱伝導率が僅かな含水率でも急激に上昇していることである。これは温度勾配を設定した後、鉱物ウールにおいて水蒸気拡散による大幅な湿気移動が生じた結果である。つまり、計測中に生じた材料中の水分の相変化による、いわゆる非定常の潜熱効果である。このような潜熱効果は通常短時間で、断熱材の実際の熱伝導率とは何ら関係がない。この潜熱効果の作用は断熱材に接する建築部位の層に大きく依存するため、断熱材自体の特性であるとは言えない。しかし、熱伝導率計測の際に適切な措置を施すことによって、鉱物ウールの実際の熱伝導率を知ることができる。そのような計測の結果から、鉱物ウールの潜熱効果を含まない熱伝導率の湿気への依存性は、図1の硬質発砲スチロールの場合と非常に似ていることが証明されている。同じことが他の透湿性のある断熱材についても言える。

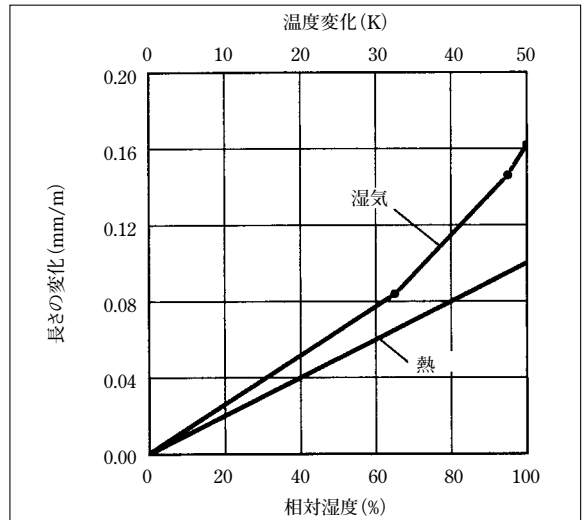


図2 熱湿気による外装材の長さの変化

熱湿気の相互作用による機械的負荷

熱と湿気の同時作用が、強い非定常の性質のものであることを示す例として、複合断熱システム(湿式外断熱システム)上の外装材における熱湿気による変形あるいはそこから発生する応力が挙げられる。日中、これらの外装材表面に生じる温湿度変化の幅は最大40Kもしくは80%にまで達する[3]。図2はそのような外装材の熱湿気による長さの変化を比較して示している。ここに示された値は異なるメーカーの20以上のサンプルの計測から得られた平均値である。これを建物に置き換えて考えると、外装材が自在に変形可能な場合、熱による長さの変化は0.4mm/m、また湿気による膨張は0.7mm/mにもなる。しかし、この2つのプロセスは多くの場合は逆方向に作用する。外装材は温度の上昇に伴って乾燥し、乾燥による収縮が一定の時間差を伴って熱による膨張を補正するのである。しかし通常、外装材表面は自在に変形しないため、応力が発生し、これが外装材の強度を上回る場合にはひび割れや下地のはがれが生じるのである。

熱湿気の相互作用による建物の損害として、塩害および凍害が上げられる。塩分はその種類に特有の相対湿度を下回ると溶出され、結晶化する。逆にこの湿度を再び上回ると、周囲から水蒸気を引き付け、再び溶液中に戻る。この現象は塩類を含む建材の細孔内でも起こる。しかし細孔内での結晶化は狭い構造によって妨げられるため、結晶化により著しい膨張圧が生じることがある。

これが頻繁に繰り返されると壁材がもろくなる。塩の溶解度によって、この現象は外装材表面あるいはその数ミリメートルもしくは数センチメートル下で起こり、壁材表面を砂状にもろくしたり、より深い位置にある壁層の強度を低下させ、殻形成をもたらす。凍結もこれと非常によく似た害を引き起こすことがあるが、この場合、氷の結晶が塩類の結晶と同じ作用を及ぼす。この場合には凍結点をめぐる温度変化と凍結領域における建築部材の含水率が問題となる[5]。

建材の湿気による害

高い含水率は非常に多くの物理学的(凍結による破裂など)、化学的(腐食など)そして微生物学的(腐敗など)害を引き起こす条件となる。凍結点を下回る温度のみに発生する凍害とは逆に、ほとんどの化学的および生物学的現象はより高い温度で促進される。どの含水率で害が発生し易いかは建材の特性に依存することが多い。木材の場合、DIN68800-2[6]により、20質量%以下の含水率では破壊的な微生物は生じないと考えられている。

どのような条件でカビが発生するかは[7]で詳しく研究されている。空気湿度と温度の他に基質の特性と時間が重要になる。生物学的に利用しにくい成分を含む建材の場合、簡単に言うと、表面の相対湿度が80%以下であればカビは発生しないと考えられる。

似たような臨界値はコンクリート中の鉄筋の腐食についても示される。年数を経ていないコンクリートの場合、高いアルカリ性により鉄筋に保護膜が形成されるが、時間の経過と共にコンクリート表面から炭化が始まる。この炭化が鉄筋に到達すると、その部分のコンクリートのpH値が変化し、保護膜は形成されなくなり、鉄骨が腐食し始める。しかし、[8]の研究では、腐食の進行は鉄筋周辺の空気相対湿度に依存することが示された。鉄筋周辺の相対湿度が持続的に80%以下に抑えられていれば、腐食は抑制される。

以上の例から建材および建築部位の有用性と耐久性にとって、熱湿気条件がいかに重要であるかが分かる。従って、建物における熱湿気の工学的プロセスの詳細な把握は急務である。定常の水蒸気拡散のみに基づく計算方法による評価は、例外的なケースを除いて適切ではない。自然の気候条件におけるすべての主要な熱湿気輸送メカニズムを考慮した、非定常熱湿気挙動の解析計算は近年著しい発展を遂げ、実地でもその真価が証明されて

おり、その適用は建築の多くの分野で有意義であると考えられる。

3. 保水と湿気輸送のメカニズム

建築部位における熱湿気挙動の非定常計算のためのシミュレーションを行うためには、建材の熱湿気の蓄積と輸送特性を知る必要がある。蓄熱と熱伝導についてはよく知られており、相変化(潜熱効果)を伴う水蒸気拡散による熱輸送は、湿気輸送との関連において考察しなくてはならないため、ここでは保水と湿気輸送の現象に限定して述べる。氷の融解熱と熱工学的特性が関係する凍結・融解のプロセスに関する詳しい分析については、[3]を参照していただきたい。

保水性

建材には吸湿性のあるものとないものがある。吸湿性建材の場合、建材は乾燥した状態から周囲の条件における平衡湿度に達するまで空気中の水分を吸収する。この水分の吸着は主として周囲の相対湿度に依存し、周囲の湿度はさほど影響を及ぼさないため、保水性は建材に特有の吸着曲線によって表すことができる。図3は吸湿性の非常に異なる建材試料の吸着曲線(または吸着等温線)を示している。吸着等温線は実験室で建材試料を様々な環境条件に晒した結果得られる。計測範囲の相対湿度上限はおおよそ95%である。これは、それ以上の湿度ではほとんどの気候実験室の調節特性により、サンプルに結露が生じるからである。この湿度を超える自然飽和までの、通常の検湿器で計測できない湿度の範囲については、[9]に記された吸引力の計測を行う必要がある。

この計測方法ではまず水中で建材試料を自然飽和させる(圧をかけない)。次に最大100barまでの様々な圧力段階において、脱水を行う。その際、各圧力段階で平衡水分含有率が得られる。この計測の結果、おおよそ95%の相対湿度を超える範囲に関する保水性を知ることができる(図3のグレーで示された部分)。この領域は従来の吸着等温線の後に切れ目なく続く。レンガのような、孔の粗い鉱物性建材の場合、相対湿度95%を超える領域は95%以下の領域よりも大きく、原則として吸水実験による分析を欠かすことができない。コンクリートのような多孔質建材の吸湿性は相対湿度93%で既に非常に高く、それ以上の自然飽和までの領域における変化も外挿法

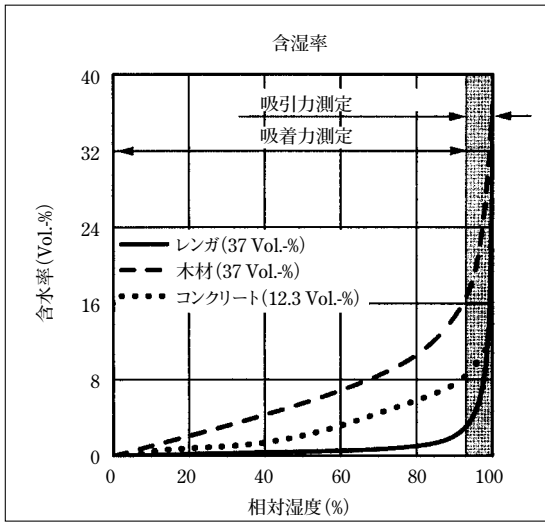


図3 吸湿性の異なる代表的な建材(吸湿性が小さい:レンガ、中程度:コンクリート、大きい:木材)の保水性

により正確に計算することができる。木材も同じように相対湿度95%以下の領域でかなりの水分を吸水するため、ほとんどの場合は自然飽和状態までの外挿法で十分である。吸湿性のない、ガラスや金属あるいは一部の発泡樹脂建材では融点を下回らない限り水分は蓄積されない。これらの材料は相対湿度100%以下の環境で完全に乾燥する。

湿気輸送

多孔質建材における湿気輸送は主として水蒸気拡散、表面拡散および毛細管輸送によって行われる。固定された細孔構造を持たないプラスチックのような建材では、高分子の間に水分子が蓄積され、いわゆる溶液拡散が起こる。これまでの経験から、この種の拡散は水蒸気拡散の式によって表すことができる。この場合、通常の水蒸気拡散とは異なり拡散抵抗は周囲の湿度に依存する。水飽和されていない孔隙における重力による水の流れや電場における水分子の移動、あるいは浸透圧による輸送などのその他の湿気輸送についてはまだ十分に計算することができない。これらの現象は例外の場合のみ重要となるのでここでは考察されない。また、室内外の気圧差により湿気を運びた室内空気が建築部位を通過するといった対流の現象もここでは考慮されない。気密性は建物の外郭に対する中心的な要求であるため、空気の対流は、建築上の欠陥や不適切な建築部位建材などの計画どおり施工されていない箇所のみで起こる。このため、

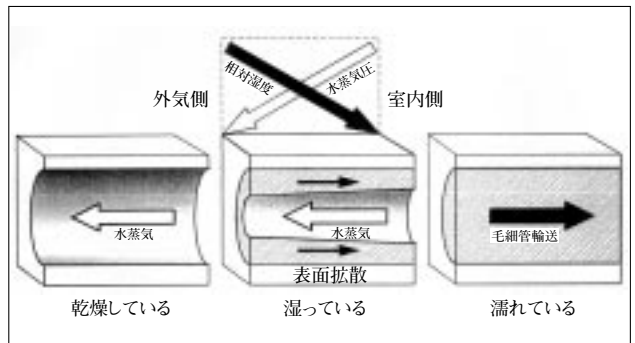


図4 冬のコンクリート壁細孔内の異なる含水性における湿気輸送現象

対流をあらかじめ計算することは不可能であり、その実際の状態は三次元的な気流メカニズムのシミュレーションプログラムのみによって掌握され得る。

主要な湿気輸送の相関を示しているのが図4である。図は壁体の細孔を表しており、この毛細管の両側は暖房期間の通常境界条件となっている。すなわち蒸気圧は室内側は外気側よりも高く、相対湿度は外気側の方が室内側よりも高い。建材が十分乾燥しているか、吸湿性がない場合、水蒸気は蒸気圧差に応じて室内側から外気側に移動する。建材が多くの湿気を含み、吸着水の水膜が細孔内壁で動くようになると(相対湿度およそ60%を超えるとこの現象が起こる)、通常の水蒸気拡散の他に、吸着された水によるいわゆる表面拡散が細孔内壁で起こる。吸着された水の分子層の厚さ、もしくは可動性が相対湿度の上昇に伴って増加するため、[9]で証明されるように、湿気輸送は吸着水の水膜中の蒸気圧差とは逆方向に、吸着水濃度の高い領域から低い領域に起こる。従って表面拡散の駆動力は相対湿度であり、水蒸気圧ではない。表面拡散とはつまり液水輸送であって、気相の水蒸気拡散ではないのである。しかし、多くの場合、表面拡散を水蒸気拡散に加算しても差し支えない。当該建築部位の建材層の間に大きな温度差が発生しなければ、この計算方法でも両方の輸送現象を厳密に分けて計算した場合と結果は同じになる。

表面にあたる強い雨などにより建材内に95%以上の相対湿度が生じる場合、細孔が充填され、いわゆる毛細管現象が生じる。これは最も有効な湿気輸送の形態である。このための駆動力は毛細管の負圧である。この負圧は細孔内の空気と水との界面におけるメニスカス中の水の表面張力によって生じる。毛細管の負圧はメニスカス上の相対湿度と関数関係にある。すなわち、液相にお

ける駆動力は、気相における一定の相対湿度に相応する。毛細管の負圧の代わりに相対湿度を毛細管輸送の力として使うこともできるということである。

この例はしばしば生じる、水蒸気拡散と液水輸送の逆方向への輸送をはっきりと示している。水蒸気拡散はほとんどの場合、温度の高い方から低いほうに向かって生じ、液水輸送はこれに対してほとんどの場合、温度とは無関係に湿っている方から乾燥している方に向かって起こる。実地では、鉱物性建材中に生じる冬の結露における毛細管輸送の逆流として知られているこの現象もまた、計算モデルの中で正確に捉えられなくてはならない。これは水蒸気拡散と液水輸送には異なる駆動力が設定されなくてはならないということである。この関連において特に有効なのは、温度と相対湿度を輸送力として選択することである。水蒸気拡散の駆動力としての水蒸気圧はこの二つの値から明確に特定される。どちらの力も建築部位断面において安定して推移し、含水率のように建材の境界で大きな差が生じない。下記の熱と湿気に関する物性値と境界条件もこの方法で簡単に特定することができる。

4. 熱と湿気に関する物性値

シミュレーション計算の結果の良し悪しは、基盤となる材料のパラメータに依存する。信頼性のある物性値が不足していたために、近代的な計算方法の認知は長年にわたって妨げられてきたのである。ここではこのため、様々な問題についてどのパラメータが本当に必要であるかを示す。原則として、熱性状の非定常計算のためには以下の物性値が必要である：

- － 乾燥密度 ρ
- － 熱容量 c
- － 熱伝導率 λ

材料の湿度の熱貫流率 (U-値) への影響を定量する場合、図1に示されるように、熱伝導率を含水率の関数として入力する。これに関する数値は[2]もしくはWUFIデータベースに記されている。

吸湿性のない材料も含めたすべての建材の湿気性状に関する物性値は次のとおりである：

- － 水蒸気拡散抵抗係数 μ (μ 値)
- － 空隙率 ϵ (可能最大の含水率 W_{max} のための基準値)

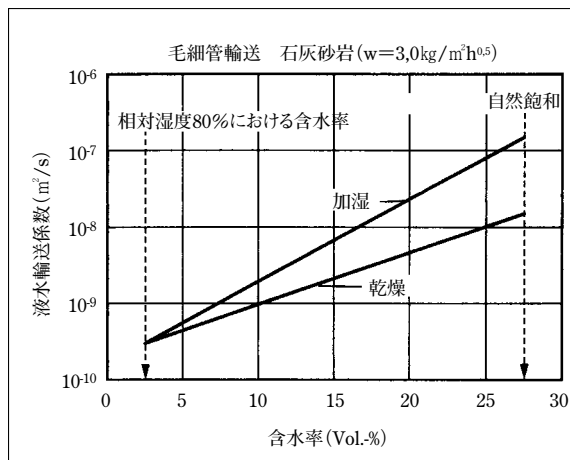


図5 毛細管における加湿と乾燥もしくは水との接触のない状態での湿気輸送に関する、WUFI独自の近似法によるw-値(吸水係数)から得られた液水輸送係数。吸水係数は含水率の増加に伴い、指数関数的に上昇する。相対湿度80%における含水率以下では、ほとんどの建材において液水輸送はもはや示されない。

μ 値は多くの建材について知られている。空隙率は空隙を含む密度と空隙を含まない真の密度から、もしくは飽和時の最大含水率から求めることができる。尤も、これは建材が水もしくは水蒸気をその細孔に取り込める場合のみに重要になる。しかし、これまでに記された物性値では非定常の水蒸気拡散しか考察することができない。

吸湿性の、毛細管輸送が生じる建材の熱湿気性状を正確に把握するためには、この他に既に図3に示されたような保水性と図5に記されている湿気に依存する液水輸送係数が必要になる。これらの係数においては図のように、プロセスに依存した微分法が有用であることが証明された。これは、水との接触における鉱物性建材の加湿プロセスが、給水中断後の毛細管による液水輸送もしくは乾燥よりも明らかに迅速に起こるためである。吸湿性および毛細管特性に関する付加的なパラメータは、多くの建材について既に関連のデータベース(WUFIデータベースなど)に存在する。計測による定量は煩雑であるため[9]、通常は行わない。多くの場合は近似法を適用することができる。建築部位における吸湿性建材の層が直接接触しない、もしくは接触する層が長時間湿気を帯びない場合は、WUFI[3]による、相対湿度80%における平衡含水率 U_{80} と飽和含水率 U_f を使った保水性のための近似法によって十分正確な計算結果が得られる。似たようなことが同様にWUFIに組み込まれている、吸水係数

(A - 値)からの液水輸送係数(図5)の近似法についていえる。つまり、実際の適用においては、吸湿性および毛細管輸送が活発な建材については以下のパラメータにより十分正確に計算を行うことができる：

- 相対湿度80%における含水率 U_{80}
- 飽和含水率 U_f
- 吸水係数 A (A - 値)

飽和含水率はw - 値計測において完全に濡れた状態で定量される含水率である。

すべての建材の特性には製造もしくは加工により、ぶれが生じるため、物性値を計算において特定の範囲内で変動させ、この変動の計算への影響を記録しなくてはならない。当該適用例においてこの物性値の影響が小さいことが判明すれば、正確な特定は不必要である。しかし、当該物性値の影響が結果を著しく左右する場合は、標準値や文献のデータは適切ではない。この場合には当該物性値を正確に計測する必要がある。

5. 気候条件および熱湿気の伝達条件

どの建築部位もその表面を通して外気と熱および湿気の交換を行っている。つまり、外気が建築部位に作用するだけでなく、逆に建築部位もまた、蓄積された熱の放出や室内の湿気の吸着による緩衝などにより外気に影響を及ぼすのである。この事実は境界条件を記す際に考慮しなくてはならない。原則として次の3つの領域を区別しなくてはならない。地上、地中そして室内の状態である。対流と輻射もしくは伝導と拡散によるそれぞれの熱湿気交換プロセスにより、すべての3つの領域において異なる伝達条件を設定しなくてはならない。

外気

建築部位に作用する外気条件は外気温、湿度ならびに放射と降雨である。放射および降雨による負荷は建築部位の勾配と方位に依存するため、実際の状況に即して換算されなくてはならない。降雨の影響については、さらに風速と風向きならびに建物周囲の気流に関する物性値が必要である。垂直の建築部位において長波放射を考慮する場合、地上反射率も重要になる。図6に気温を例に示されたように、気候の日々の変動は原則として短い間隔で考察されなくてはならない。熱湿気に関するシミュレーション計算では時間平均値を使うことが有効

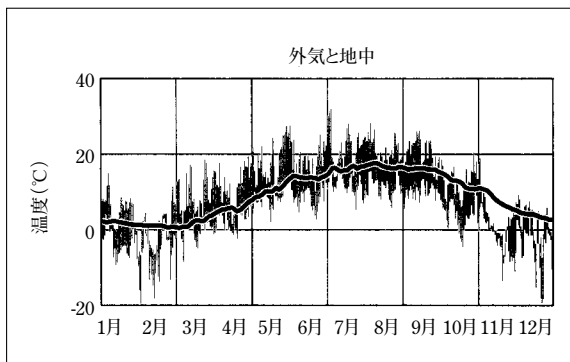


図6 ホルツキルヒェンで計測された外気温の変動(1日の最低気温と最高気温をむすんだ垂直線で示されている)と地下1メートルの地中の温度。地中にはもはや外気の1日の気温変動は伝わってこないのが分かる(実録)。

であることが証明されている[3]。しかし、湿気の問題は通常平均的気候ではなく、極端な気候において発生するため、場合に応じて特別寒い年(冬の結露)もしくは穏やかだが降雨量の多い年(凍害)あるいはまた特別暖かい年(夏の結露)を使うことによって最悪の気候条件を表すことができる。

地中における熱と湿気

地中では外気温の変動は伝わりにくい。図6はホルツキルヒェンの外気温と地下1mで計測された温度の変化を示している。この深さでは1日の外気温の変動がもはや分からないほどである。さらに外気温は数週間のずれを伴って地中に伝わる。このずれは特に春と秋に顕著である。計測された変動には降雨の影響も含まれている(雨水、雪解け水の侵入など)。測定は野原で行われたため、熱を放出する建物の近くよりも全体的に温度は低い。地中の相対湿度は、植物が繁殖している場合、通常99%~100%である。植物はこの湿度領域でしか土から水を吸い上げられないからである。これは緑化屋根における基質についても同じであるが、この場合温度は異なる。

室内気候

室内気候条件は一般に建物の空調の状態によって決定される。暖房はするが冷房はせず、換気のためには窓を開ける住居の場合、室内気候は外の気候に左右される。この他に影響を及ぼす要素として室内で発生する熱および湿気、建物の蓄熱性そして室内の壁面と家具による湿気の吸収力が挙げられる。このため、空調されてい

ない建物について選択された温湿度条件は、当該気候区における室内気候計測もしくは経験値に基づかなくてはならない。

伝達条件

地中の状況は別として、屋外の気候も室内気候も境界層を通して建築部位表面に影響を及ぼす。この境界層は熱湿気輸送における、気流に依存した抵抗であり、その大きさは適切な伝達係数によって定量される。通常、建築部位における特有の対流の影響を詳しく考慮する必要はない。これは伝達抵抗が個々の建材層の抵抗よりも小さいためである。このため、以下の熱湿気伝達係数の平均値で原則として十分正確である：

| 建築部位表面 | 熱伝達率 α [W/m ² K] | 水蒸気伝達率 β_p [kg/m ² sPa] |
|--------|---------------------------------------|---|
| 外 | 17 | 75 x 10 ⁻⁹ |
| 内 | 8 | 25 x 10 ⁻⁹ |

熱伝達係数には長波輻射交換を考慮する項が含まれている。しかしこれは対流および輻射による熱流が同じ方向の場合のみ有効である。高断熱の建築部位の夜間の冷却ではこれは起こらない。このため、そのような建築部位の夜間結露の計算には、伝達率の修正もしくは経験値に照らし合わせた長波放射率の調整による補正が必要となる。

日射と降雨の建築部位への影響は、熱および湿気の発生源として表すことができる。外装材の塗装の色に依存するエネルギー吸収率から、建築部位への短波放射は一部しか熱に変換されないことが明らかである。この吸収率は白い外装材などの明色の場合0.2から0.4、塗装された木材、クリンカー、屋根瓦やアスファルトシートのような暗色の場合0.6から0.8である。また、壁に強く当たる雨についても、大半は壁に当たった瞬間にはじかれるか重力により流れ落ち、一部だけが表面に残るので、吸収率を使って計算するとよい。これまでの経験から、垂直な面の雨水吸収率としては通常0.7という数字を使うのが適切である。

6. 計算方法

現在は国内および国際的なレベルで信頼できる結果

を提供できる熱湿気移動に関する解析計算ソフトが数多く存在する。日本でも[11]にあるようなモデルが存在する。以下は解析計算ソフトWUFI(Warme-Und Feuchtetransport Instationar=非定常の熱湿気同時移動)を基盤としたモデルに関する説明である。このモデルでは時間と共に変化する熱および湿気の建築部位内での輸送プロセスを次の連立微分方程式を使って記述する：

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial (\varphi \cdot p_{sat})}{\partial x} \right) \quad \text{熱輸送}$$

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial (\varphi \cdot p_{sat})}{\partial x} \right) \quad \text{湿気輸送}$$

| | |
|-------------------------------------|-----------------|
| Dw [m ² /s] | 液水輸送係数 |
| H [J/m ³] | 湿った建材のエンタルピー |
| h _v [J/kg] | 水の蒸発エンタルピー |
| Psat [Pa] | 水蒸気飽和圧 |
| u [m ³ /m ³] | 含水率 |
| δ [kg/msPa] | 空気中の水蒸気拡散伝導率 |
| θ [°C] | 温度 |
| λ [W/mK] | 湿った建材の熱伝導率 |
| μ [-] | 乾燥した建材の水蒸気拡散抵抗率 |
| ρ_w [kg/m ³] | 水の密度 |
| ϕ [-] | 相対湿度 |

どちらの式にも左側に蓄積に関する項が含まれている。蓄熱は乾いた建材の熱容量と建材に含まれる水分から構成される。水の蓄積、保水は既述の保水性を表す式から導出される。式の右側には輸送に関する項が含まれている。熱輸送は湿気に依存する熱伝導率と水蒸気エンタルピー流束に基づく。この水蒸気エンタルピー流束による熱の輸送とは、ある場所で水が蒸発し、その場所から熱を奪い、次には別の場所に拡散し、凝縮し、それによって熱を与えるというものである。この種類の熱輸送はしばしば潜熱効果と呼ばれる。相対湿度勾配による表面拡散と毛細管輸送による湿気輸送の温度への依存は比較的小さい。水蒸気拡散はこれに対して、飽和水蒸気圧が温度に伴って指数関数的に上昇するため、大きく温度に左右される。

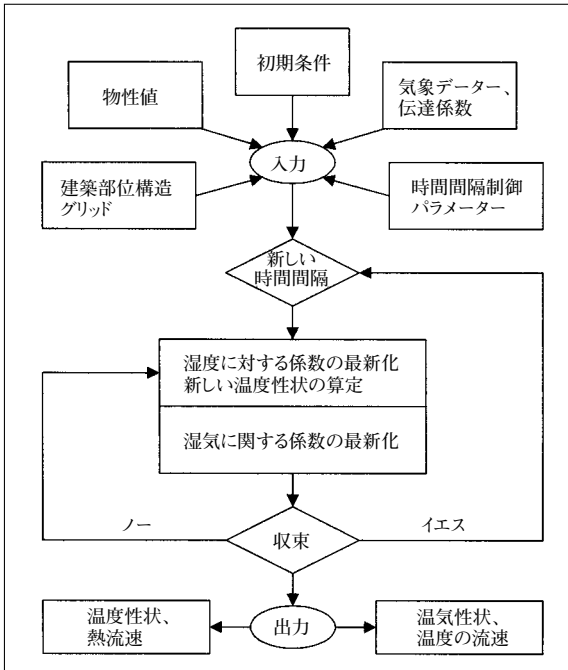


図7 WUFI計算モデルのフローチャート

この連立微分方程式は陰関数で表された有限体積法により離散化され、図7のフローチャートに基づいて反復法により解かれる。数値計算結果の正確性はグリッド幅、時間間隔の大きさと中断基準の選定に依存する。通常、数値計算の結果は非常に正確であるため、材料や気候に関するデータなどの物理学的パラメータとは異なり、数値パラメータの影響は無視できるほどである。計算後は、操作もしくは収束における誤りを除外するために、結果確認を行う。収束の問題点はWUFIによって表示され、その影響の大きさは加算された湿気流束と建築部位に蓄積された水分から評価される。インプットの誤りや非現実的な材料データは信憑性の検定によってのみ、明らかにすることができる。

7. 実際の適用例

以下の例は、利用者がWUFIを使ってシミュレーションによって建築部位における湿気性状に関してどのような情報を得、どのような解釈の可能性があるかを示すものである。計算結果の可視化は、建築部位内の温度や湿気の変動を示す動画によっても可能である。(http://ww.wufi.deを参照のこと)。

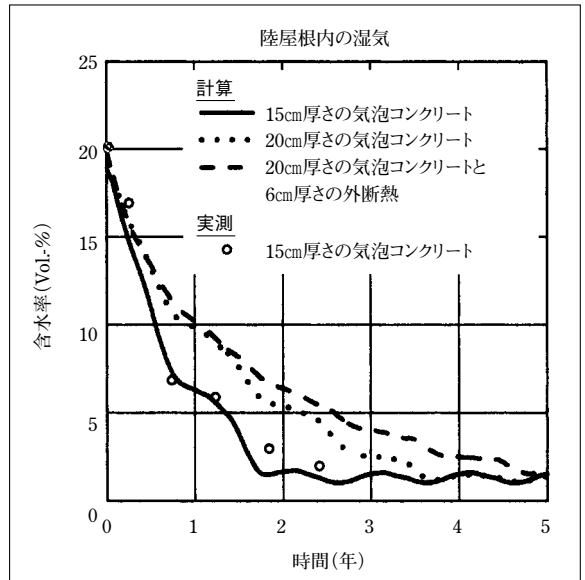


図8 様々な厚さ、またEPS断熱材のある場合とない場合の気泡コンクリート平屋根の乾燥の経過における含水率のシュミレーション計算結果と採取された壁体試料の実測値との比較

ホルツキルヒェンの屋外実験の結果を比較として使うことができるので、最初の二つの例についてはホルツキルヒェン(標高680m、ミュンヘンの南30km)の代表的な気候データが選択された。ホルツキルヒェンの気候は札幌の気候とほぼ同じである。3つ目の計算例については東京の気候データが使われた。

気泡コンクリート平屋根における湿気

近代的な計算方法の適用のための典型的な例として、気泡コンクリート平屋根の乾燥が挙げられる。このような平屋根の乾燥のプロセスを説明するためには、純粋な水蒸気拡散の考察だけでは十分でないため、既に60年代に平屋根に関する広範囲に及ぶ実験が実施されている。近年、南の気候区でこれと似たような構造の屋根に著しいカビ被害が発生し、改めて専門家の注目を集めた。このため、ここではこの屋根を例に、コンクリート平屋根の熱湿気挙動を調べた。

気泡コンクリート製品の使用初年度の含水率を20質量%として、3つの異なる断熱を施した平屋根の乾燥の状態を図8に示した。厚さ15cmの屋根に関する計算結果と計測の結果[12]との比較から、計算による予測の正確さが分かる。最初の6ヶ月間における10質量%(15g

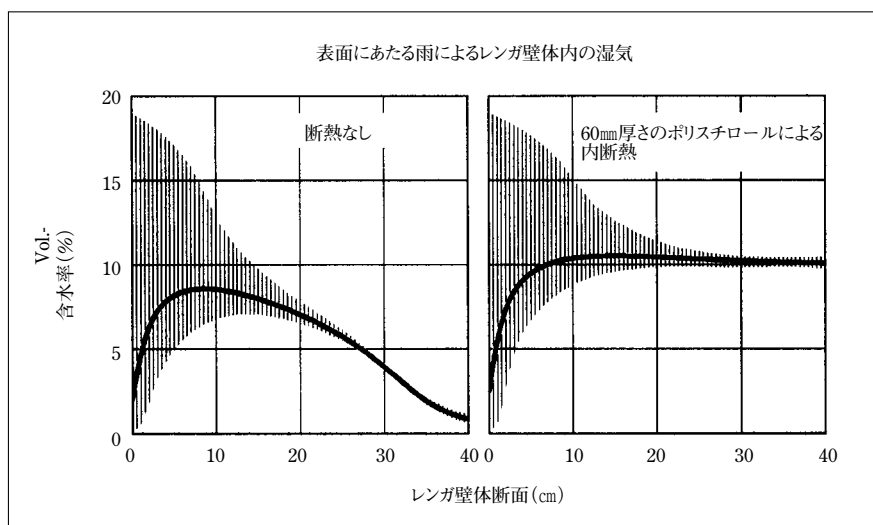


図9 雨のあたる単層レンガ壁に内断熱を付けた場合と付けない場合の壁体内の年間平均含水率(実線)と変動

／m²)という急速な乾燥は、屋根表面のアスファルト処理による日射の影響によるものである。屋根は室内側のみに向かって急速に乾燥し、室内には大量の湿気が発生するため、これを迅速に逃さなくてはならない。ドイツなどでは長時間窓を開け放つことによってこれが可能であるのに対し、湿気が多く暖かい気候では、空調機による十分な湿気の排出ができず、この屋根の乾燥工程における室内空気の湿気は非常に高くなることもある。

屋根の計画されたU値は、気泡コンクリートの相対湿度80%における含水率(およそ1.5質量%)が下回られた時に初めて得られる。厚さ15cmの屋根の場合、この状態は2年以内に達成される。厚さ20cmの気泡コンクリート屋根の場合、このためにはおよそ2倍の3.5年が必要である。この屋根にさらに厚さ6cmの硬質発泡スチロールで断熱を施した場合、乾燥期間は5年近くにまで延びる。この例から平屋根の湿気性状に日射が非常に大きな影響を及ぼすことが分かる。付加的な断熱は気泡コンクリートにおいて総合的により高い温度水準をもたらすが、同時に夏場の表面温度のピークを著しく低下させる。水蒸気飽和圧は温度に伴って指数関数的に上昇するため、この表面温度の抑制によって、初期の、毛細管輸送によって支持される気泡コンクリートからの湿気の排出後、乾燥速度は低下する。

内断熱を行った装飾外壁における雨の湿気

熱湿気性状の観点からは内断熱よりも外断熱が推奨

される。しかし、経済的理由や歴史的建造物保護の観点から、外断熱が行えず、建物のエネルギー消費を軽減し、快適性を高めるために内断熱しか行えない場合がある。結露の問題とその解決策(防湿シートなど)は以前から知られている。しかし、内断熱が雨による外壁の湿気性状に影響を及ぼし、場合によっては凍害の危険を高めることは見過ごされていることが多い。[13]ではこの影響が、風雨に晒された総れんが造りの外壁を例にシミュレーション計算され、これと並行して行われた屋外実験によりその計算結果の正確性が証明された。図9に厚さ40cmの壁体に内断熱を施した場合と施していない場合の、変動幅が一定の状態(すなわち、シミュレーションが同じ年間気候データで繰り返し行われた結果、ある年の非定常の湿気性状が次の年と同じになるまで)における湿気性状が示されている。斜線で示された領域は、雨が当たった壁体の断面に一年間に発生する含水率である。実線は、外壁表面からその内側の表面、つまり内装材もしくは硬質発泡スチロールの内断熱が始まる箇所までの湿気の年平均分布を示している。

集中的に雨が打ちつける外壁では繰り返し水飽和が起こるにもかかわらず、外壁表面の平均含水率は、日射のある良好な乾燥条件のため、壁体の相対湿度80%における含水率に相当する。毛細管輸送(図5参照)が湿度に大きく依存しているため、外壁表面下の時間平均含水率は急速に上昇する。内断熱を行わない壁では外壁表面より数センチメートル内側で最大値に達し、その後ほぼ規

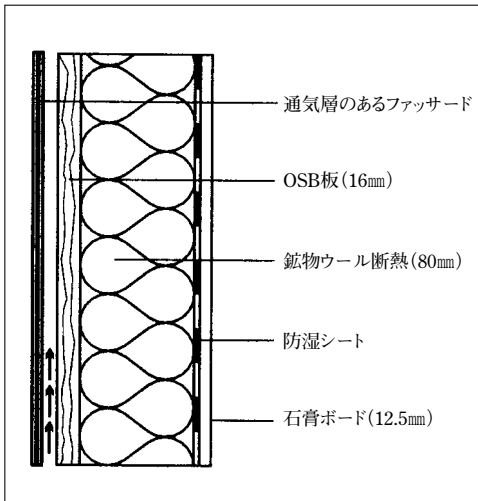


図10 通気層のある壁体の構造

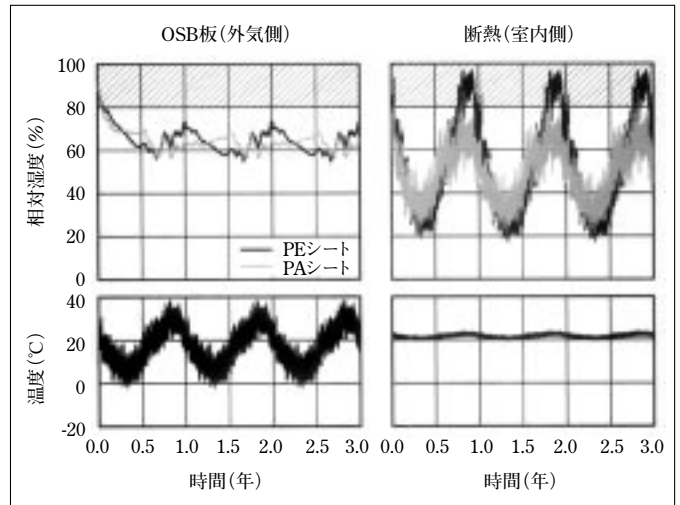


図11 東京の気候条件における木造の外壁。外側のOSB板内と、断熱材と内側の防湿シートの間の温湿度変化のシミュレーション計算。相対湿度80%以上(斜線で示された領域)ではカビ繁殖の危険が極めて高い。

則的に減少し、室内側では乾燥した状態となる。外壁表面より20cm以上内側では含水率は一年中変化しない。つまり、非定常の気候の作用は壁体の外側半分のみに限られることになる。

内断熱は壁体内の湿気性状を持続的に変化させる。内断熱を施した場合、外壁表面下の含水率はよりいっそう上昇し、内側に向けて建材の湿気はさほど減少しない。その原因として2つ挙げられる。外壁表面に同じ程度の雨が当たる場合、発泡スチロールの断熱板が室内側への乾燥を妨げ、さらに断熱によって壁体の平均温度水準が低下するため、外側への乾燥も妨げられる。断熱を行わない場合と比較すると、壁体内の総合含水率は内断熱によって明らかに増加する。凍結が起こった場合、この湿気の上昇は凍害の危険を増大させる。これに対しては外装材に撥水性をもたせるなどの、防水対策を行うしかない。

日本の気候における軽量壁内の逆方向への水蒸気拡散

中央ヨーロッパの気候条件では、水蒸気拡散による建築部位内の結露はほとんどの場合、冬のみ問題となる。しかし、日本のより暖かい地域では建物が空調されていれば夏でも一定の結露の危険がある。尤もその場合には水蒸気拡散は逆方向、すなわち外側から内側に向かって起こる。夏の結露は、冬と同じように低温側に生じるが、断

熱材の外側ではなく、室内側に生じる。東京の建物における通気層のある壁体構造を例に、この状態を詳しく説明してみたい。

図10はそのような壁体構造を示している。この壁に二種類の防湿シートを取り付けて考察する。1つめは従来のポリエチレン製の防湿シート(PE)、2つめは湿気調節機能のあるポリアミド(PA)防湿シートである。このポリアミドシート(厚さ50 μ m)は冬の気候条件では夏の高温多湿の気候条件よりもより高い水蒸気拡散抵抗を有する。これにより、夏は内側に向かって壁体の乾燥が起こりやすく、冬の結露防止効果が弱まることもない。湿気調節機能付き防湿シートの正確な機能原理は[14]に説明されている。WUFIによるシミュレーション計算は、どちらも東京の同じ気候データを使って10月に開始され、3年間について行われる。この期間の室内気候条件は室温22 $^{\circ}$ C、相対湿度50%に保たれる。OSB板の初期含水率は20質量%で、壁のその他の建材は乾燥した状態にある。考察されるのは、経験上このような壁体内で特に敏感な箇所とされるOSB板の中ならびに断熱材と防湿シートの中の2箇所における非定常湿度性状である。

計算結果は図11に示されている。下側のグラフに示された温度変化は予想どおり防湿シートの種類とは無関係である。OSB板は1日における変動の他に、0 $^{\circ}$ Cから40 $^{\circ}$ Cまでの季節による変動を示した。室内側の温度は僅かしか変動しない。OSB板内の初期の湿気はどちらの防

湿シートの場合もすばやく乾燥し、その後相対湿度は60%～70%の間にとどまった。この範囲は湿気の工学的観点から危険ではないと考えられる。断熱材と防湿シート間の湿度の変動(図11右上)から、夏は湿気が内側に移動することがはっきりと見て取れる。PAシートの水蒸気拡散抵抗は可変であるため、相対湿度(グレーで記された領域)は80%以上に上昇しにくくなるのに対して、PEシートの湿度(黒く記された領域)は何ヶ月間も斜線で表した危険な領域にとどまっている。これらの条件下でカビの胞子が存在すれば、壁の中にカビが繁殖する確率は高い。

8. 結論

上記の実例は、非定常熱湿気移動のシミュレーション計算が実際の適用例においてどのような利点をもたらすかを示した。総括すると、気候条件による建築部位内の温湿度挙動について、従来の定常の評価方法を明らかに上回る、次のような分野における適用ならびに評価が可能である：

- － 水蒸気吸着と毛細管輸送を考慮した、暖房期間における結露形成
- － 建材内の湿気の乾燥
- － 逆方向の水蒸気拡散による夏の結露
- － 外壁表面に当たる雨の影響
- － 熱貫流損失への湿気の影響

建築部位内の熱湿気挙動に関する結果は、任意の場所と時間について求めることが可能であるため、以下のような目的に使うことができる：

- － 実験結果の外挿
- － 有用性が実証された建築構造の他の気候区への適用
- － 新築、改築、改修方法の計画
- － 建築製品の開発と最適化
- － 室内における最大許容湿度の調査
- － 建材および建築部位の適用における熱湿気に関する条件と適用の限界

上記の熱湿気に関するシミュレーション計算は、特に古い建物の改修の分野で大きな需要をもたらした。この分野では従来の解決方法がしばしば有効ではなかったためである。

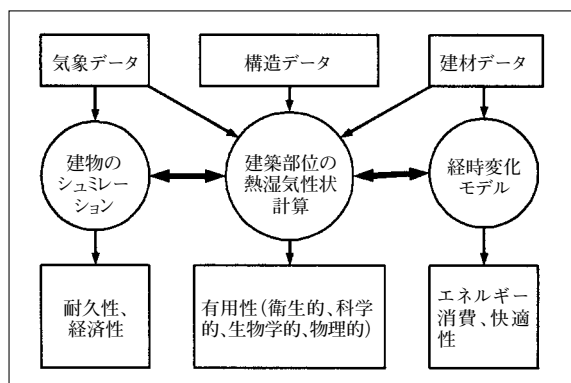


図12 将来的な熱湿気シミュレーション分野における開発傾向

9. 将来的な開発

建物の有用性に関する評価のためには、建築部位の熱湿気性状の詳しい知識だけでは多くの場合不十分である。非定常の温湿度変動から耐久性や損害の危険について評価を行うためには、特殊な評価基準もしくは評価モデルが必要である。これについては建築物理の分野はまだ開発の初期段階にあるが、将来的には湿気に関する評価と建築における損害の予防は明らかに改善されるであろう。建築部位の熱湿気性状のシミュレーション計算に関して現在国際的に進められている開発の傾向(図12)について以下に説明する。

建物の熱湿気性状のシミュレーション

中心的な開発課題の一つとして、建築部位における熱湿気計算を建物のエネルギーシミュレーションに組み込むことが挙げられる。そこから生まれる建物の熱湿気性状のシミュレーションが、建物全体とその建築部位間の熱湿気の相互作用に関する正確な分析を可能にする。そのためには室内の湿度変動における周壁面の湿気緩衝作用や室温の変動における湿気の吸着もしくは放出を考察する必要がある。この開発の主要な目的は、建物の空調のための経費を削減するための計画ツールの作成である。建物の周壁面と内装の蓄熱および保水性を徹底的に利用することによって、冷房をできるだけ使わずに室内気候の変動を抑えることが求められる。人の快適性の知覚に関する最新の知見[15]から、室内空気のエントルピー、すなわち温度と湿度の組み合わせが重要であることが知られているため、建物の熱湿気性状のシ

ミュレーションモデルに対する需要は今後増加すると予想される。

経時変化のプロセス

建築部位における熱湿気移動による長期的な負荷は、建材を変質させる。この経時変化のプロセスはコンクリートの炭化の進行などのような化学的变化によってもたらされる場合もあるが、建材成分の洗脱や脱気(Au swaschen oder Ausgasen)などの物理学的変化によって起こる場合もある。経時変化に伴って建材の物性に变化が起こることも多く、これによって当該建築部位の非定常熱湿気性状にも変化がもたらされる。建築部位における熱湿気移動のシミュレーションの中に経時変化のプロセスを組み込むことによって、実際の建物の耐久性と経済性の長期的な予測が可能になる。

結果の処理

建物もしくは建築部位における熱湿気移動に関するシミュレーション計算の結果は、実際に発生する非定常の温湿度および熱湿気の流れを示すものである。これらをその他のモデル計算と組み合わせることによって、当該建築製品のエネルギー的特性を帰納的に推測することが可能となる。例えば、湿気による熱貫流損失や潜熱損失もしくは湿気を排出するために必要とされる換気回数などは、建物の利用年数から計算することができる。実地で非常に重要となるのは、熱湿気負荷に依存する建材と建築部位の有用性の評価である。図12に総括されているように、建物の有用性は凍害、塩類の破壊作用、腐敗、カビの繁殖、腐食ならびに熱湿気による建材疲労によって損なわれる。適切な評価モデルによって建築部位の局所的な温湿度の変動から損害の確率が導出される

はずである。ここから、安全割り増しを考慮した上で、その建築部位の有用性に関する評価が行えるようになる。

<参考文献>

- [1] WTA-Merkblatt (注意書き) 6-2-01/E:Simulation of Heat and Moisture Transfer. (熱湿気移動のシミュレーション) 2002年5月 <http://www.wta.de>
- [2] Cammerer, J.と Achtziger, J.: 建材と断熱材の熱伝導率への湿気の影響. BmBau 研究計画に関する報告書 BI 5-80083-4, 1984
- [3] Künzel, H.M.: Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters(建築部位における熱湿気同時移動。簡単なパラメータを使った一次元・二次元計算) IRB 出版 (1995). Reprint: <http://docserver.fhg.de/ibp/1995/kuenzel/001/pdf>
- [4] Arnold, A.: 塩類 - 不快な白華もしくは劣化の主要原因。石の崩壊と保存 年間報告書 1990, Ernst&Sohn 出版 P.1~9
- [5] Sedlbauer, K. And Künzel, H.M.: Frost Damage of Masonry Walls - A Hygrothermal Analysis by Computer Simulations (石壁の凍害 - コンピュータ・シミュレーションによる熱湿気性状解析). Journal of Thermal Envelope & Building Science (Vol. 23(2000), No.3, P.277~281
- [6] DIN 68800-2: 建築物における木材の保護のための予防的措置。1996年5月
- [7] Sedlbauer, K.: Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components(建築部位表面および内部におけるカビ繁殖の予測)。シュツットガルト大学博士論文、2001年、<http://docserver.fhg.de/ibp/2001/sedlbauer/001.pdf>
- [8] Cziesielski, E.: 鉄筋コンクリート建築における腐食による損傷のエネルギー工学的に正しい改修方法. Bauphysik 13(1991), No.5, P.138~143
- [9] Krus, M.: Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials(多孔質の鉱物性建材における湿気移動と保湿度) IRB 出版 シュツットガルト 1996年
- [10] Hans, H.: Modelling, Heat Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts(外断熱建築部位における熱湿気移動のモデリング) Final Report IEA-Annex 24, KU Leuven 1996
- [11] Matsumoto, M.: On Prediction of Dynamic Behaviours of Moisture and Temperature in Buildings and Building Elements (建築物および建築部位における熱湿気動的挙動の予測について) BRI-Proceedings No.2, International Workshop Mass-Energy Transfer 1995, P.166~210
- [12] Künzel, H.: 平屋根における湿気挙動に関する研究。建築研究報告書 No.48, Ernst&Sohn 出版、ベルリン 1996年
- [13] Künzel, H.M. & Ließl, K.: Drying of brick walls after impregnation(含水したレンガ壁の乾燥) Bauinstandsetzen 2(1996), P.87-100
- [14] Künzel, H.M.: More Moisture Load Tolerance of Construction Assemblies Through the Application of a Smart Vapor Retarder (インテリジェントな蒸発遅延剤の適用による建築部位における湿気許容量の増加)。外断熱推進会議 VII, ASHRAE 1999, P.129~132
- [15] Fanger, P.O.: 将来的に空調される環境に対する人間的な要求. KI36(2000), No.3, P.114~119
- [16] 田中辰明「シンポジウムレポート: フラウンホーファー研究所と建築仕上技術」月刊建築仕上技術 Vol.30No.351 平成 16年 10月号