木材の年間を通じての変形性状

— 熱・湿気挙動と膨張/収縮特性 —

THE STUDY OF ANNUAL DEFORMATION ON YARD LUMBERS

The evaluation of hygrothermal behavior and expansion/shrinkage on a wooden stud

佐藤 真奈美^{*1}, 松本 衛^{*2}

Manami SATO and Mamoru MATSUMOTO

We have recognized that the evaluation of deformation on wooden material in building envelopes is important for a durable design of building envelopes. There were slight evaluations of deformation on wooden material caused by annual hygrothermal behavior.

It is a practical interest that expansion/shrinkage on wooden materials are caused in low moisture content region. In this paper, we analyze deformation on wooden stud in well insulated and air tight building envelope that is caused by annual moisture content variation.

We have used wooden materials equilibrated 12-15% weight moisture content (90% relative humidity related with a warm temperature). The wooden stud can be expanded 1% of initial state, during summer. We show additionally that a wooden stud equilibrated 60% relative humidity can be expanded to exceed initial state, during summer. In winter, the wooden stud shrinks utmost 2% in proportion to the decrease of moisture content.

Keywords : Durability, Expansion/Shrinkage, Wooden stud, Annual Hygrothermal Behavior, Numerical Analysis

耐久性, 膨張/収縮, 間柱, 年間熱・湿気挙動, 数値解析

1. はじめに

エネルギー危機を発端に、省エネルギーの意識は商業建築のみならず住宅にまで広がった。建物の暖冷房負荷軽減を目的に断熱性能向上やハッシブな室内環境制御手法導入は急速に広がっている¹⁾。さらに地球環境への負荷軽減にまで発展してきた意識は、例えばLCC評価の重要性を指摘している。このような評価を高めるには、対象物が効果的に使用され、廃棄に至るまでの時間経過が長いことがひとつの解、つまり、耐久性向上が環境負荷軽減の重要な要素と考えられる。

耐久性の評価軸は様々存在する。そのうち、本報告で明らかにしようとするのは熱と水分および湿気に関わる建物外皮の耐久性問題である。雨や地盤内水分の浸入、結露発生や建物外皮の吸放湿による湿潤化によって引き起こされる黴・菌類の発生や建築材料の膨張/収縮が引き起こす建物外皮の変形、崩壊問題は身近な耐久性問題であろう。黴・菌類の問題は、人間の健康に及ぼす影響の評価が先行し、防黴、防菌薬剤の材料への塗布による発生抑制の方策が種々取られつつある。つまり、これが耐久性問題へと進むことを許容しないことが設計、施工をする者の現在の解であろう。同様に、雨や地盤内水分の浸入は、原則としてどのような場合でも許容されない。

一方で、結露防止に建築材料の吸放湿性を積極的に利用する設計や施工思想が広がっている。外皮の変形で実害が無く、崩壊などが発生しないなら、建築材料の含水率増加や減少を許容しようとする設計法である。一般に建築材料の変形と水分の問題は、材料の高含水率域で発生すると認識されている。ハイグロスコピック領域を越えた多孔質材料では、毛細管内含有水分が自由水として挙動し始め、その結果、様々な実害を引き起こす。例えば、自由水による建材原料の膨潤、溶解、化学反応、結氷などが挙げられる。これらは毛細管構造の変形、崩壊を引き起こす要因となる。従って、建築材料を材の変形、崩壊を誘導しない許容含水率の範囲で利用できる壁体構造と使用外界条件を示すことがこの問題の解となる。

さて、建築材料の中で最も身近な「木材」や「木質建材」は他の建材同様、多孔質材料として認識されている。しかし、材の変形と言う視点で見ると、木材は高含水率域での挙動と同様、低・中含含水率域での変形挙動が無視できない材料である。繊維飽和点を超え、細胞内こう中で水分が自由水として活発に挙動し始めると、木材は変形しなくなる。一方、木材を構成する細胞壁に水分が吸着する低・中含含水率域で変形が進行する。故に、変形の問題を扱う場合、他の建築材料とは異なった視点での評価が必要な材料といえよう。

^{*1} 大阪工業大学工学部建築学科 講師・博士(工学)

^{*2} 大阪産業大学環境デザイン学科 教授・工博

Lecturer, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Osaka Institute of Technology, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Environmental Planning, Osaka-Sangyo University, Dr. Eng.

林産学の分野では、品質確保と生産性向上のために、木の生育条件・方法の研究や木に製品としての付加価値をもたせるための研究として木の物理特性の解明は古くから進んでいる。特に、木を生材から製材に加工する乾燥過程での材料変形と変形によって生じる応力とひずみ問題を含め、木材の力学的特性研究が進んでいる²⁾。

日本では、木は古くから重要な建築用材であった。現在でも、木造建築技術者は「季節や時間経過、施工条件による変動を予測する。」人でなくてはならないと言われている。経験則を根拠にした技術である。しかし、現在多くの木造建物がこの「匠の技」を駆使して建設されてはいない。

本報告では、木材の変形に関する耐久性評価の試みのはじめとして、年間を通じた含水率変動で生じる材の膨張/収縮量を評価する。評価対象を断熱性能の向上を目的に増加しつつある高断熱・高气密住宅用木質パネル内間柱（スタッド）とした。木質材特有の冬季の乾燥による収縮と夏季の含水率上昇による膨張が顕著となることが予測される壁体構造を評価対象とした³⁾。

2. 木材の物性値

本報の評価に必要な物性値には、材料密度、比熱、平衡含水率関係、熱伝導率、湿気伝導率または水分拡散係数と含水状態に応じる膨張率である。限られた樹種での一部の物性値測定が僅かになされている⁴⁾。IEAより出版された物性値集⁵⁾ではpine, spruceの2種材料ではあるが、前述の物性値を網羅するデータも報告されている。とはいえ、樹種ごと測定された物性値の数は極めて少ない。これは、農学(林産学等)の研究で、木材は原料生材の生育条件によって物理特性に大きな違いが生じ、個体物性値の同定が困難である、さらに、針葉樹/広葉樹の区別を除き、樹種の違いは大きくないとして位置付けられていたことによると考えられる。以下に、当研究室で測定した物性値や文献データを例に木材の物性値について整理したい。

図1, 2に木材4種の平衡含水率実測値⁶⁾と文献データ値⁵⁾を示す。図1に樹種による平衡含水率の違いを例示する。図示のように樹種による物性値の違いが読み取れる。図2では杉という同一名称の材料であっても平衡含水率測定値にばらつきが見られる例を示した。さらに物性値の近似方法によって、樹種の違いと同程度の差ができることを示した。

繊維飽和点以下の木材内水分移動を模式的に以下に示す。拡散による水分移動速度は水分の結合エネルギーに依存する。繊維飽和点を超えると細胞壁は結合水で飽和し、水分の濃度勾配が無くなる為、液移動は無くなる。細胞内こうと壁孔内空隙中の自由水が毛細管力で動く。

図1 平衡含水率測定値の比較

図2 平衡含水率関係(杉)

図3 木材の湿気伝導率

図3に湿気伝導率の測定値例^{4), 5)}を示す。pine, spruceのデータから木材内の水分拡散に異方性があることが読み取れる。一般に木材では、繊維方向と、繊維直角方向で水分および熱の拡散に大きな違いがある。文献²⁾では水分移動に関し、繊維方向では接線方向拡散の45~600倍の値となると報告されている。図中pine, spruceでは5倍から100倍となっている。水分拡散では繊維直角方向のうち年

輪に対し接線方向と放射方向による差も小さくなく、放射方向の拡散は接線方向の拡散の最大 1.2 倍となると言われている²⁾。この理由として①放射方向細胞壁は接線方向細胞壁に比べ木化が進んでいるために接線方向の水分拡散の抵抗が大きくなる。②細胞壁の膨張は接線方向が放射方向の 2 倍程度生じるため拡散経路の伸張による抵抗の増大が挙げられているが、最大 1.2 倍と言うオーダーを木材の物性から理論的に推定しきれてはいない。

次に木材の顕著な特徴である、低・中含水率域での膨張/収縮特性評価に重要な膨張率測定結果（絶乾状態の試料の吸湿過程実験）と近似曲線例を図 4、5 に示す。測定値を比較すると米松、杉どちらも接線方向の膨張が放射方向に比べ大きな値である。文献によると生材から絶乾状態への乾燥過程での接線方向の収縮は放射方向の約 2 倍となるとの報告²⁾がある。木材の膨張と収縮過程で性状の違いが無ければ、図示の吸湿過程（相対湿度 35% から 90%）の測定結果で、差の大きな杉でも接線方向の膨張は放射方向の値の 20% 増し程度であり、その差は文献ほど大きくない。図 4 に示す単純な最小二乗法多項式近似による近似曲線は相対湿度 30% 以下と 90% を超える領域で膨張特性を十分に反映しているかの判断は明確にはできていない。このような湿度域の性状を評価対象とする場合、近似法の再考が必要であるが、後述の解析では、木材は大略この領域に無いことから、本報告では図示の近似を評価に用いた。図 6 に産地の異なる杉の膨張特性を示した。僅かな測定結果からの類推ではあるが、膨張率そのものがそれほど大きな値でないことも含め、生育条件による同一樹種間の膨張特性の差は小さい。2 種の樹種ではあるが、製品となった木材の膨張率－平衡相対湿度関係には樹種の違いが大きく影響しないことを確認した。

以上、木材の水分挙動に影響の大きい平衡含水率関係、湿気伝導率について測定値の特徴を見てきたが、評価対象によっては樹種による違いを無視できるとは考えにくい。物性値のばらつき問題は、前述の木材固有の特徴ではなく、建築材料全般に共通の問題であり、妥当な物性値決定法の確立が必要である。

3. 木製スタッドの熱・湿気挙動と膨張/収縮特性

本章では、高断熱・高気密住宅用木質パネルを対象に年間の熱・湿気(含水率)挙動と壁体内木製スタッド(米松)の膨張/収縮特性の定量的評価を示す。

壁体構造は図 7 に示す、室内側に大きな湿気容量を有する輸入(スウェーデン) 壁体である。冬季結露防止と住宅の気密性を高めるために、断熱材(ロックウール)の室内側境界に防湿シートが貼付されている。計算に用いた材料物性値を表 1、図 8、図 9 に示す。この壁

表 1 材料物性値

	密度 (kg/m ³)	定圧比熱 (W·s/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)	湿気伝導率 (kg/m/Pa/s)
プラスターボード	963	838	0.161	2.70E-11
パーティクルボード	682	1298.9	0.151	3.30E-09
スタッド(米松)	430	1295.8	0.116	*1
ロックウール	100	838	0.038	1.46E-10
合板	547	1298.9	0.151	*2

図 4 膨張特性(米松の絶乾状態からの吸湿実験結果)

図 5 膨張特性(杉/福岡産の絶乾状態からの吸湿実験結果)

図 6 膨張特性の比較(異なった産地の杉)

図 7 壁体構造
(解析対象領域をハッチで示す)

体構造は夏季（蒸暑地域）に防湿シート・断熱材境界で結露発生の危険性が指摘されている⁷⁾。外界条件には、大阪の標準気象データ¹¹⁾を用いた。室温は25℃一定とし、相対湿度を冬季（12月～4月）50%、夏季（6月～10月）60%とした。中間期の5月、11月の各1ヶ月の間で相対湿度勾配一定として変化させた。

前述の夏季結露発生があれば、防湿シート表面やロックウール内に凝縮した水滴が多数存在することが予測されるが、ロックウール内の凝縮水分は独立して存在し、液水流動は生じにくいと考えられる。防湿シート上の凝縮水層厚さは、日積算値から概算するに最大でも0.5mm程度である¹²⁾。シート上水滴の流動、落下が生じる可能性は否定できないが、本報告では、これを無視した。従って、壁体の熱・湿気挙動解析には蒸気拡散支配の熱・水分同時移動方程式⁸⁾（水分の駆動力には水蒸気分圧使用）を用いた。壁体を構成する材料全ての吸放湿性能 κ 、 ν の含水率依存性を考慮し、水分移動に関する含水率依存性はスタッドの米松と合板のみ考慮した。

なお、外気側に通気層を持つ壁体であるが、日射受熱量を軽減する通気層の効果は無視し、通気層内温湿度条件に標準気象データ（大阪の南壁面）¹¹⁾を用いた。

3.1 壁体の初期含水率と施工時期に関する検討

計算対象を表1に示す4通りの条件で大略定常状態となる2年間の挙動を解析した。

図10、11で初期条件の違いによるスタッド内平均含水率変動を比較する。図10、11ともに2年目の含水率変化に初期条件の違いは見られない。初期含水率の影響は1年に限り顕著であり、2年目以降はほとんど影響を与えない。図10に示すように、1年目の夏季最大含水率は条件①が約15wt%に対し、条件③では約12wt%となる。竣工後スタッドは一旦乾燥した後に夏季結露により湿潤する。条件①は初期状態と同程度の含水率となり、条件③では初期状態より約4wt%、増加する。夏季最大含水率は条件①が約3wt%高

表2 スタッドの初期状態と壁体竣工時期

条件	竣工時期	初期 相対湿度(%)と含水率(wt%)
①	5月1日	90%、15.2wt% (合板も90%平衡)
②	11月1日	90%、15.2wt% (合板も90%平衡)
③	5月1日	気乾状態8.3wt% (合板:気乾状態)
④	11月1日	気乾状態9.1wt% (合板:気乾状態)

い。5月竣工の場合、壁体の初期含水率は夏季の最大含水率の値に影響するが、含水率の上昇は気乾状態の壁体でおおきい。さらに、1年目の冬季、条件①、③のスタッドはほぼ同程度、約5wt%まで乾燥する。2年目の含水率変動に初期条件の影響はみられない。図11に示す夏季の最大含水率は、条件②で約11.5wt%、③の場合で約11wt%と差は殆ど無い。11月竣工では、冬季の乾燥を経て1年目の梅雨、夏季の含水率増加をむかえるため初期含水率が高くても1年目の夏季に対する影響は少ない。1年目の冬季最小の含水率は条件②で5.6wt%、条件④で4.7wt%で、その差は約1.0wt%である。冬季の乾燥に関しては4月頃まで初期含水率の影響を受ける

図8 計算に用いた材料の平衡含水率関係

図9 計算に用いた材料の湿気伝導率（表1; *1, *2）

図10 スタッド日平均含水率の経年変化(条件①、③)

図11 スタッド日平均含水率の経年変化(条件②、④)

図12 スタッド内膨張率分布(条件①)

図13 スタッド内膨張率分布(条件③)

図14 スタッド内膨張率分布(条件②)

図15 スタッド内膨張率分布(条件④)

ため条件②の壁体は条件④に比べ大きく乾燥する。

図 12 から 15 に、年オーダーで得られた含水率変化に応じるスタッドの膨張/収縮特性を示す。木材の平衡含水率関係は材の膨張/収縮によって変化することが予測されるが、ここでは、平衡含水率関係は一意に決まるものとして得られた含水率変動に対応する膨張率の変動を評価した。図 4 に示す米松、接線方向の膨張率測定値を評価に用いた。各図は図 7 に示すスタッド内部離散点 ($J=1\sim3$, $I=4\sim10$) での膨張/収縮挙動を示す。横軸はスタッド長手方向距離 (mm) と季節 (時間) を示す。

図 12、条件①では夏季結露によるスタッドの含水率増加で、防湿シート側 ($I=4$) で初期状態より僅かに膨張し、合板側では初期状態より 0.5% の収縮が起こる。冬季のスタッドの乾燥によって変形は顕著となる。スタッドの防湿層側断熱材との境界では初期状態より膨張率で約 2% の収縮が起きている。また材料内で膨張/収縮の程度の比較的大きな分布が生じる。

図 13 の条件③の場合、夏季の含水率増加による防湿シート側 ($I=4$) での初期値からの膨張は大きく、スタッド全体が初期状態より膨張する。冬季の収縮も小さくないが、条件①の 7 割程度の変形である。条件①ではスタッドが初期状態より大きく膨張することはない。

図 15 の条件④で条件②と同様に防湿シート側での夏季の膨張がみられるが、条件②のようにスタッド全体の膨張ではなく断熱材側境界付近に限られる。冬季のスタッドの変形は 5 月竣工、初期含水率 15.2wt% の条件①で最大である。年間を通しての膨張/収縮の幅が最も大きい。11 月竣工、気乾状態の条件④が、膨張/収縮の幅が最小である。スタッドの冬季の収縮はどの条件でも生じ、程度の差はそれほど大きくない。むしろ、5 月にスタッドが気乾状態で施工された場合、夏季にスタッドのいたるところが初期状態より膨張する現象に注意を向ける必要がある。

3. 2 スタッドの湿気拡散、膨張/収縮の異方性について

前節ではスタッドの物理特性を均一、等方として年オーダーでの膨張/収縮特性を評価してきた。本節では木の含水率変動に大きく影響すると考えられる湿気拡散の異方性の影響を検討する。同時に、木材には板目材、柎目材など断面方向によって区別する呼び名があるように同一材料内に膨張/収縮の異方性が存在する。そこで、スタッドに板目材、柎目材を想定して膨張/収縮特性も評価した。

解析対象のイメージを図 16 に示す。スタッドの湿気伝導率は年輪に対し接線方向の値に図 3 に示すアカマツの値を用い、放射方向の値をその 1.2 倍とした。計算条件には、材料が高含水状態となる期間が長い前節条件①を用いた。

図 17 に板目材、柎目材スタッドの日平均含水率の年変化を示す。どの方向の湿気伝導率も放射方向の 1.2 倍の値を用いた異方性を考慮しない結果 (異方性なし) と柎目材の結果は一致している。板目材と柎目材及び異方性なし結果には最大で冬季に 0.3wt% 程度の差が生じる。柎目材日平均含水率は湿気伝導率の異方性を考慮しなくても予測が可能である。一般的に認識されている木材の性質に合致して、本結果でも板目材の方が、柎目材に比べ年オーダーでの含水率変化に湿気伝導率異方性の影響がある。

図 18、19 に、板目材、柎目材スタッド長手方向 (初期値 100mm)

図 16 スタッドの板目材・柎目材イメージ

①グラスボード②パーティクルボード③防湿シート④スタッド⑤合板⑥通気層⑦防水透湿シート⑧ロックウール

図 17 スタッドの日平均含水率の年変化

図 18 板目材長手方向変形

図 19 柎目材長手方向変形

長さの変化を示す。図 18 板目材では湿気伝導率の異方性を考慮しない結果との差異はほとんどみられない。スタッド長手方向の差異は桁目材で大きい。図 19 に示すように、夏季、冬季とも約 0.5 mm 程度の差が生じる。日平均含水率の値は板目材と異方性なしの場合で差があったが、膨張/収縮の結果には大きな差は見られない。湿気伝導率の異方性を考慮しない場合と板目材では含水率の値で差が生じたにもかかわらず、膨張/収縮に関しては桁目材に湿気伝導率の異方性の影響が顕著である結果が得られた。この結果を考察する。図 4 に示すスタッド(米松)膨張率の測定結果を最小二乗法で多項式近似したものを膨張の評価に用いている。図示のように膨張曲線の勾配は高湿度域では放射方向が接線方向に比べ大である。従って、初期相対湿度 90% とした本解析では初期放湿過程で放射方向の膨張率変化が大となり、変形の大きな放射方向を長手方向にもつ桁目材は板目材に比べ初期状態からの収縮が大きく評価されたものと考えられる。以上の性質が材料(米松)特性であるか、評価に用いる膨張曲線の近似方法によるものかの検討にまではいたっていない。

図 20~23 に夏季及び冬季の板目材及び桁目材スタッドの変形予測を示す。解析対象としたスタッド(100×22.5 mm)がどの方向に変形

するかを模式的に示した。実変量の 10 倍の変形を示したものである。夏季、スタッドの変形は長手方法で大きい。

断熱材境界では、図 21 の桁目材は図 20 の板目材の 2 倍、スタッド長手方向の収縮が大きく、初期値との差は最大で約 0.4 mm である。スタッド内部の板目材長手方向収縮は小さい。変形の大きな桁目材での長手方向収縮でさえ、0.23 mm 程度である。短辺方向では桁目材より板目材の収縮が大きい。とは言え、値は最大でも 0.1 mm 程度である。夏季、スタッドの変形は僅かであり、長手方向でのみ生じていると考えてよからう。

冬季はスタッドの乾燥によって材料全体が変形する。図 22 の板目材、図 23 の桁目材は外気合板側(I=10)、防湿シート側(I=4)共にスタッド長手方向で収縮が大きい。冬でも、スタッドの防湿シート側の収縮量は外気合板側の大略 2 倍となる。ただし収縮の最大値は約 0.9 mm で夏季の収縮の 2 倍となる。短辺方向の収縮は冬で大きく、スタッドの断熱材側表面(J=3)の防湿シート側(I=4)では最大で 0.4 mm 収縮する。一方で合板側の変形はその半分程度である。冬季は材の収縮の程度が夏季より大きいことと、材の中で収縮の程度の大きな分布が生じることが大きな特徴といえよう。

図 20 夏季、板目材の変形予測

図 22 冬季、板目材の変形予測

図 21 夏季、桁目材の変形予測

図 23 冬季、桁目材の変形予測

4. まとめ

- 1) スタッドの初期含水率が材料の変形に影響するのは1年に限り顕著である。2年目以降は外界条件に応じた周期的定常状態での変形予測をすれば十分と考えられる。
- 2) 初期含水率が高い場合、5月竣工、11月竣工ともにスタッドは乾燥する一方で、材が初期状態よりも膨張することはない。気乾状態で施工された場合、竣工時期に関わらず、夏季に初期状態よりも膨張する。壁体内で固定されたスタッドの膨張による反力としての応力発生はスタッドの変形を複雑なものとして考えられるし、周囲部材への影響も大きいと予測する。ゆえに、スタッドの施工方法にもよるが、膨張/収縮の変形状は材が気乾状態の場合での検討が重要となる。
- 3) スタッド(米松)が高含水状態で、5月竣工の壁体では、日平均含水率の変化で板目材での異方性の影響が顕著となる。柃目材の日平均含水率変化は異方性を考慮しなくとも十分予測可能である。
- 4) スタッド(米松)が高含水状態で、5月竣工の壁体では、米松板目材より柃目材で変形が大きく生ずる可能性を示した。
- 5) 壁体の耐久性評価に関し、スタッドの変形は、冬季の収縮が割合も大きく注意を要する項目である。しかし、材が気乾状態で施工された場合、夏季の壁体内結露が原因の膨張が僅かながら発生することにはより注意が必要であろう。

本研究は、平成12-14年度科学研究費補助金(基盤研究(C))「耐久性・変形予測のための建築要素内熱・水分場に関する研究」、(研究代表者 松本衛)より補助を受けました。本報告は2001年10月の第31回建築学会熱シンポジウム「湿気研究の新たな進展」にて発表したものを訂正・加筆したものです。

謝辞 本研究の解析の一部は、西畑雄介君(日立電子サービス)の卒業研究(1999年度大阪工大)として行われたものです。卒業後も、解析を行うにあたり多大な協力を得ました。

参考文献

- 1) 住宅の次世代省エネルギー基準と指針、(財)住宅・建築・省エネルギー機構、1999年
- 2) 例えば、伏谷賢美他「木材の物理」、文永堂出版、1995年
- 3) 佐藤 他、高断熱・高気密壁体の熱湿気挙動(その2)、(その3)、建築学会大会学術講演梗概集D-2、pp323-326、2001年
- 4) 建築設計資料集成1 環境、日本建築学会編、丸善、1978年
- 5) IEA ANNEX24, Hamtie Final Report, vol.3, Task3: Material Properties, 1996 [建築材料の熱・空気・湿気物性 日本建築学会編、丸善、2001年]
- 6) 佐藤 他、高断熱・高気密壁体の熱湿気挙動(その1)、建築学会大会学術講演梗概集D-2、pp269-270、2000年
- 7) 土屋 他、冷房時の夏型壁体内結露に関する研究(その1)、(その2)、建築学会大会学術講演梗概集D-2、pp265-268、1996年
- 8) 松本 他、建築学体系10 環境物理 湿気、彰国社

註1)

本解析に用いた大阪の標準気象データには気温、絶対湿度、法線面直達日射量、水平面天空日射量、夜間放射量、太陽高度の $\sin$ 、太陽高度の $\cos$ 、太陽方位角の $\sin$ 、太陽方位角の $\cos$ の値が1時間ごと、1年間分用意されている。大阪の気象観測値のうち標準的(平均的)な年の値を収集したものである。解析に用いた温度・湿度(絶対湿度と温度から相対湿度に換算)日平均値の時間経過を図Aに示す。図Bに、南面の月毎、積算日射量(直達、拡散)を示す。図Bに示した南面の値から等価気温を求め解析に用いた。

図A 日平均外温度と日平均外気相対湿度の時間経過

図B 月毎の積算日射量

註2)

ロックウール内相対湿度は100%を越えないものとし、差分計算用に定義したコントロールボリュームごと水蒸気分圧が飽和水蒸気分圧を超えた量に相当する絶対湿度変化を求めた。絶対湿度から液水重量への換算に用いた比容積は該当するコントロールボリュームの状態(温度、相対湿度100%)から換算している。この液水重量の日積算値を容積換算し、全て防湿シート上に付着すると想定した。

(2004年3月8日原稿受理, 2004年9月17日採用決定)