

建築物理学講座

第24講「非定常熱湿気同時移動解析プログラムWUFIの解析事例紹介」

田中 辰明

柚本 玲

(お茶の水女子大学名誉教授・工博) (お茶の水女子大学田中研究室・博士(生活科学))



はじめに

200年住宅など、建物の寿命を長くすることは環境への負荷を減らす大切な取り組みである。しかし不適切な設計や施工で壁などの内部が湿潤な状態になると、腐敗やカビの害が起こる可能性がある。そのため地域の気象条件、断熱材の種類、位置、防水層、防湿層の取り付けなどの複合的な影響を受ける構造内の熱湿気性状を精度よく確認するためには、熱と湿気の同時移動非定常解析による検証が必要になる。

ここでは、この非定常解析プログラムの一つとして、本誌でも何度か紹介した^{1) 2) 3)}非定常熱湿気同時移動解析プログラムWUFI(ヴーフィ)による解析事例を紹介する。

1. WUFIとは

WUFIは実際の気候条件下で壁や屋根等構造内の熱・湿気がどのように移動していくかを正確に予測することができる1次元の非定常解析プログラムである。このプログラムはドイツの研究機関フラウンホーファー建築物理研究所で開発され、欧米では広く標準的に使われている。大きな特徴は直感的に分かりやすい画面・操作方法である。簡単な操作により、雨や日射、液水の毛細管輸送、夏型結露が考慮された正確なシミュレーションを実施できる。WUFIでは式1、式2の連立方程式に基づき計算される⁴⁾。

$$\text{式) 1} \quad \frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\phi p_{sat}))$$

$$\text{式) 2} \quad \frac{\partial w}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\phi \nabla \phi + \delta_p \nabla (\phi p_{sat}))$$

H: 建材の蒸発潜熱(J/m³)、T: 温度(K)、λ: 熱伝導率(W/mK)、h_v: 水の蒸発潜熱(J/kg)、p: 蒸気圧(Pa)、p_{sat}: 飽和蒸気圧(Pa)、δ: 空気の水蒸気拡散伝導率(kg/msPa)、φ: 相対湿度(-)、w: 含水率(kg/m³)、D_φ: 水分移動係数(m²/s)

Table 1 解析条件

建物向き	北向き、垂直の壁
建物高さ	10mまでの高さの戸建を想定
日射影響	短波長吸収率:0.4、長波長放散:0.9
表面熱伝達抵抗	外気(0.0588 m ² K/W)、室内0.125 m ² K/W
表面の雨	壁にあたる雨水のうち、7割が構造にあたるうち、1%が通気層内側建材に侵入する
初期値*	26℃、80%RH
室内条件	湿度60%RH一定、温度:7月27℃、1月18℃のサインカーブ
解析期間	1時間ごと3年間(7/1 0:00~6/30 23:00)

Table 2 解析対象都市の温湿度と降水量

都市	温度(℃)			湿度(%RH)			降水量(mm/年)
	平均	最高	最低	平均	最高	最低	
旭川	6.9	33.2	-22	77	100	16	977
東京	16.1	35.3	-0.8	62	100	10	915
那覇	22.7	32.7	10.9	75	100	33	1,709

2. 解析方法

Table1に解析条件、Table2に解析対象とした旭川、東京、那覇の温湿度及び降水量を示す。Fig.1のような木造(ツーバイフォー)の壁を想定し、防湿層の有無により壁内の湿気分布や相対湿度変化がどのように異なるかを都市ごとに確認した。断熱材の厚みは次世代省エネルギー基準を満たすように断熱材を設定した^{5) 6)}。

解析に使用した物性値はTable3に示す。住宅性能評価機関等連絡協議会ガイドライン(2004)⁷⁾及び、ドイツ工業規格DIN4108-3⁸⁾を参考に、相対湿度が93%RH以上に達したり、長期間80%RHを超えるような場合は不適切であると判定した。

Table 3 解析モデルに使用した物性値

	外装仕上	通気層	防水層	合板	石膏ボード	断熱材		防湿層
						MW	XPS	PEシート
密度(kg/m ³)	1900.0	1.3	130.0	500.0	850.0	60.0	40.0	130.0
空隙率(m ³ /m ³)	0.240	0.999	0.001	0.500	0.650	0.950	0.950	0.001
比熱(J/kgK)	850	1000	2300	1500	850	850	1500	2300
熱伝導率(W/mK)	0.800	0.130	2.300	0.100	0.200	0.038	0.028	2.300
水蒸気拡散抵抗係数(μ)	25.0	0.6	100.0	700.0	8.3	1.3	450.0	50000.0

MW 無機繊維系断熱材, XPS 押出法ポリスチレンフォーム, PE ポリエチレン

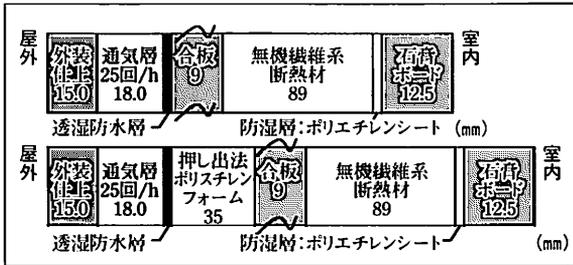


Fig. 1 解析モデル(上:東京、那覇、下:旭川)

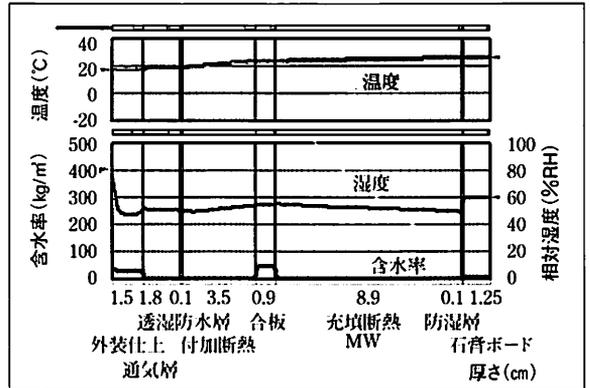


Fig. 2 旭川において防湿層を設けた場合の断面温湿度、含水率分布
網掛けは2年目以降の結果の履歴、実線は最終データ(3年目6月30日1230時)、
上(左上軸):温度(°C)、中(右軸):相対湿度(%),下(左下軸):含水率(kg/m³)

3. 解析結果

まず、寒冷地の旭川における温湿度、含水率分布の結果について、Fig.2に防湿層を設けた場合、Fig.3に防湿層の無い場合を示す。Fig.2のように防湿層を設けると、合板室内側においても80%RHに達することなく高湿度となることが無く、防湿層が効果を示していることがわかる。一方、Fig.3の防湿層の無い場合を見ると、充填断熱材と合板の間で100%RHに達し、充填断熱材、付加断熱材ともに広範囲にわたって80%RHを超える高湿度となっていることが分かる。すなわち、非常に湿った状態で、結露やカビの危険性の点から工法として適切でない。

より詳しく見るために相対湿度及び含水率が高かった充填断熱と合板の間の相対湿度を観察する(Fig.4)。この部位の相対湿度は年間を通して80%RHを超え、特に12月から7月の約7ヶ月間は100%RHを示し、冬季を中心に湿気の害が起こっていることを確認できる。これは、室内の湿った空気が壁内に侵入し、温度が低く湿気を通しにくい合板の位置で水蒸気が溜まり、高湿度になってしまう冬型結露の現象である。したがって、寒冷地では防湿層をきちんと確保し、切れ目のないような施工をすることが壁内の湿気を適切に保つために非常に重要である。

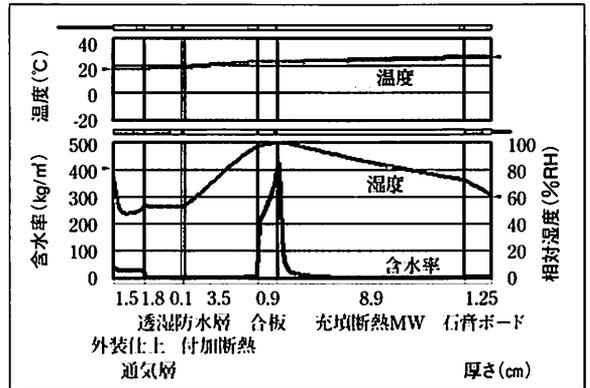


Fig. 3 旭川において防湿層の無い場合の断面温湿度、含水率分布
網掛けは2年目以降の結果の履歴、実線は最終データ(3年目6月30日1230時)、
上(左上軸):温度(°C)、中(右軸):相対湿度(%),下(左下軸):含水率(kg/m³)

次に蒸暑地の那覇における温湿度、含水率分布の結果について、Fig.5に防湿層を設けた場合、Fig.6に防湿層の無い場合を示す。那覇では防湿層を設けた場合(Fig.5)、旭川と異なり、防湿層と充填断熱材の間、つまり防湿層の屋内側が100%に達する非常に高い湿度を示した。一方、Fig.6を見ると分かるように、防湿層が無ければ、壁内

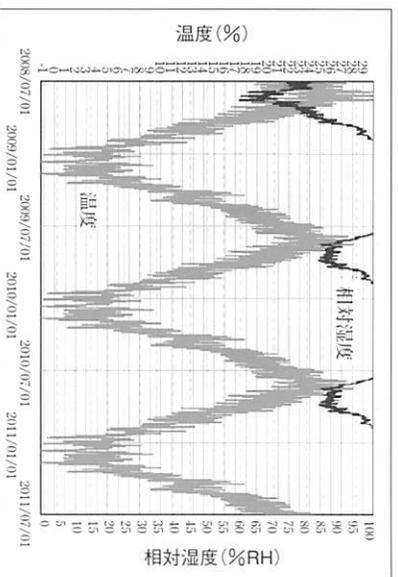
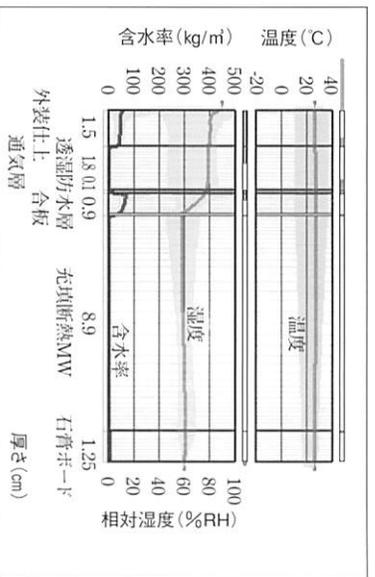


Fig. 4 旭川における合板と充填断熱の間の相対湿度変化

Fig. 6 那覇において防湿層の無い場合の断面温度、含水率分布
網掛けは2年目以降の結果の履歴、実線は最終データ(3年目6月13日23時)、
上(左上軸):温度(C)、中(右軸):相対湿度(%),下(左下軸):含水率(kg/m)

が80%RHに達しないことがわかる。

最も高い湿度を示した充填断熱と防湿層の間の相対湿度変化をFig.7に示す。ここでは、4月から10月の約半年間80%RH以上の高湿度を示しており、夏季に湿度が高くなる蒸暑地で認められる現象が確認できた。これは冬型結露と逆にして湿度の高い外気が壁内に侵入し、冷房で室温近くに冷やされ、湿気を通さない防湿層の外側でせき止められ高湿度になる現象である。この解析では、那覇で冬型結露の危険性はないため、防湿層のように室内近くで湿気の通過を遮るものは設置しない方が良いことが確認できる。

さらに、寒冷地と蒸暑地の中間地点の代表として、東京における温湿度、含水率分布の結果について、Fig.8に防湿層を設けた場合、Fig.9に防湿層の無い場合を示した。東京では防湿層を設けた場合、Fig.8のように防湿層の外側側に少しだけではあるが、80%RHを超える部

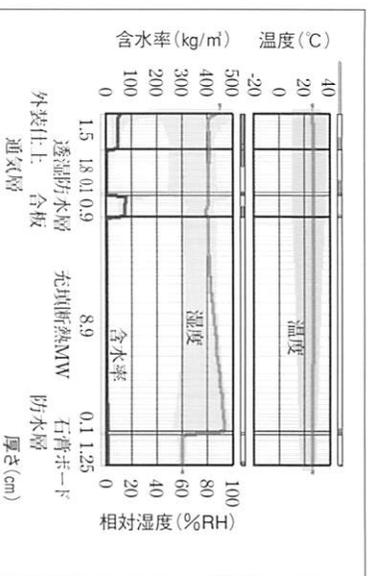
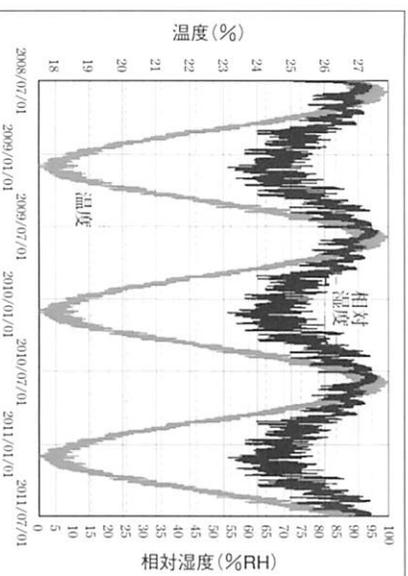
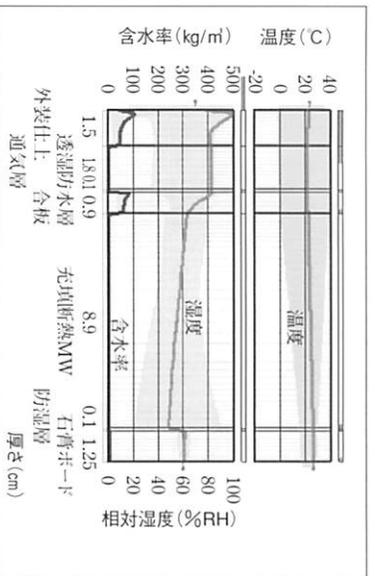
Fig. 5 那覇において防湿層を設けた場合の断面温度、含水率分布
網掛けは2年目以降の結果の履歴、実線は最終データ(3年目6月30日23時)、
上(左上軸):温度(C)、中(右軸):相対湿度(%),下(左下軸):含水率(kg/m)

Fig. 7 那覇における充填断熱と防湿層の間の相対湿度変化

Fig. 8 東京において防湿層を設けた場合の断面温度、含水率分布
網掛けは2年目以降の結果の履歴、実線は最終データ(3年目6月13日23時)、
上(左上軸):温度(C)、中(右軸):相対湿度(%),下(左下軸):含水率(kg/m)

が認められた。また、防湿層が無い場合、Fig.9のように合板の室内側を中心に高い湿度を示した。相対湿度は旭川ほどではないものの、冬季に高い値を示した。したがっ

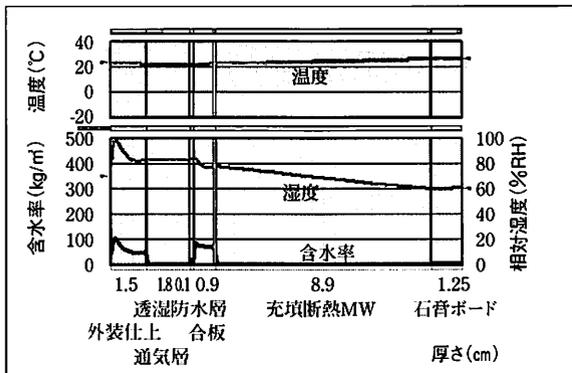


Fig. 9 東京において防湿層の無い場合の断面温湿度、含水率分布
網掛けは2年目以降の結果の履歴、実線は最終データ(3年目6月30日23時)、
上(左上軸):温度(°C)、中(右軸):相対湿度(%),下(左下軸):含水率(kg/m³)

て東京では冬型結露に対する対応が必要である。一方、湿度が若干高めであった防湿層の屋外側の相対湿度をFig.10に示す。これを見ると夏季7月から8月にわずかに80%RHを超える場合があるが、連続しているわけではなく、短い時間であるため、湿気の害が生じるほどではないと判断できた。

次世代基準のⅢ～Ⅴ地区のように中間的な気候を持つ都市では、こういった冬型結露と、夏の湿気の問題が同時に認められる場合がある。これらは、降雨量や外気の状態が関わり複雑に変化するので、WUFIのような非定常解析により物件ごとに確認することが、安全な建物の供給に欠かせないと考えられる。

おわりに

日本は山が多く、南北に長いので、地域によって気候条件が複雑にからみあっている。また、非常に多くの建築工法が存在するため、地域の気象条件に合わせてその工法が適切かどうかを確認する必要がある。その際、ここで紹介したWUFIのような非定常解析を実施することが非常に大切になる。今回の分析では断面の温湿度および含水率分布、任意の点の温湿度変化を示したが、WUFIでは、そのほかに断面分布の動画、表面のカビの危険性を予測するLIM曲線、熱流や水蒸気の移動量などが出力できる。2009年4月21日(火)から3日間、WUFI開発元のフラウンホーファー建築物理研究所から研究者が来日し講師を行うワークショップが開催される(詳細は(有)イーアイサイト<http://www.f-ei.jp>)。この機会に

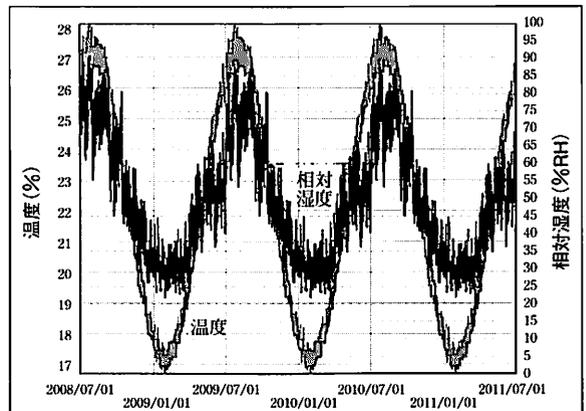


Fig. 10 東京における充填断熱と防湿層の間の相対湿度変化

非定常解析を学び、現場で使用する技術者が増え、より安全で性能の高い建物の供給の一助となればと考える。

謝辞

この解析結果は第5回坪井記念研究助成(社団法人日本ツーバイフォー建築協会)を受け、筆者が平成20年度空気調和・衛生工学会大会(草津)にて2008年8月27日(水)に発表した解析結果の一部を使用した。記して謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 田中辰明, 柚本玲: 建築仕上技術者のための建築物理学講座 第12講「非定常熱湿気同時移動解析WUFI」: 建築仕上技術: Vol. 33, No.392(2008/3)p.86-89
- 2) 田中辰明, 柚本玲: 建築仕上技術者のための建築物理学講座 第11講「非定常熱湿気同時移動解析プログラムWUFIで使用する物性値」: 建築仕上技術: Vol.33, No.391(2008/2)p.86-89
- 3) Hartwig, M.Künzel, 田中辰明: 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: 建築仕上技術: Vol. 30, No.355(2005/2)p.49-60
- 4) H.M.Künzel; Aussen dampfdicht, vollgedämmt? Die rechnerische Simulation gibt Hinweise zu dem Feuchteverhalten aussen dampfdichter Steildächer; bauen mit holz(1998)
- 5) 住宅金融公庫: 枠組壁工法住宅工事共通仕様書(解説付)平成12年度(全国版): (財)住宅金融普及協会(2000)
- 6) 次世代省エネルギー基準解説書編集委員会: 住宅の省エネルギー基準の解説: (財)建築環境・省エネルギー機構(2002)
- 7) 住宅性能評価機関等連絡協議会, 計算又は実験の結果による湿熱環境(結露の発生を防止する対策)に関する試験ガイドライン(2004/04)
- 8) ドイツ工業規格DIN4108-3
- 9) T.Tanaka und L.Yumoto: Nicht stationäre Simulation von hygrothermalen Aspekten einer Dampfsperrenmembran in Holzwohnbauten: Gesundheits Ingenieur: Vol.128, No.3(2007)p.136-139
- 10) 柚本玲, 堀内正純, 田中辰明: E-3断熱材の種類が木造建物の壁内湿気分布に及ぼす影響: 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集: (2007/9)