

# B-30 非定常解析による木毛繊維断熱板を用いた木造住宅の壁内熱湿気性状

The Hygrothermal Aspect inside the Wall in the Wooden Dwellings with Wood Fiber Insulation Board by Transient Simulation

袖本 玲 (お茶の水女子大学 (有) イーアイ) \*<sup>1</sup>  
田中 辰明 (お茶の水女子大学) \*<sup>2</sup>

The aim of this study is to make clear that the hygrothermal aspect inside the wall in the wooden dwellings with wood fiber insulation board by transient simulation in Sapporo. The insulation materials of one analytical construction were glass wool and extruded polystyrene foam as filled and additional insulation (hereinafter GW\_XPS), and the other were wood fiber board (hereinafter WFB\_WFB). Concurrently, we investigated the effects of the polyethylene damp proof membrane on the wall's hygrothermal aspect. The relative humidity outside filled insulation in the cases of WFB\_WFB, were lower than in the cases of GW\_XPS. If the membrane were not put on, inside the wall were especially humid. Therefore the wall must have the damp proof membrane in Sapporo.

非定常解析, 木毛繊維断熱板, 木造住宅, 壁内熱湿気性状, 材料  
Transient Simulation, Wood Fiber Insulation Board, Wooden Dwellings, Hygrothermal Aspect inside the Wall, Material

## はじめに

住宅の高気密・高断熱化が進み省エネルギー及び熱的快適性が実現された一方、不適切な設計や施工により、結露やカビ、シックハウス症候群などの問題が生じてきた。

内部結露がひどくなると壁紙がはがれたり、壁紙の裏にカビの害が生じたりと室内環境に不具合が生じる。また、鉄筋のサビや木材の腐敗などの害の恐れがある。

内部結露を防ぐには壁の中で湿気が溜まる部位や時季など湿気性状を把握し適切な対策を立てること、またその対策の有効性を予測することが必要である。

従来冬型結露の予測のために定常計算が用いられてきたが、定常計算では、雨、日射の影響が考慮されず、夏型結露を予測することができないといった欠点がある。そこで、これまで筆者らは非定常熱湿気同時移動解析の必要性を報告してきた<sup>1)-6)</sup>。

寒冷地では一般に防湿シートで内部結露を防ぐ対策が取られている。また近年、環境問題に対する配慮などから木材など天然物を材料とする断熱材が注目されてきた。これらのうち木毛繊維断熱板は他の断熱材に比べて熱容量が大きく、吸放湿性が高いとされ、内部結露防止の観点からも使用されるようになってきた。

本研究では寒冷地札幌で一般的に用いられている充填断熱材に鉱物系、付加断熱材にプラスチック系を設置した場合と、これらに木毛繊維断熱板を使用した場合とで壁内の湿気性状を比較し、同時にポリエチレン製防湿シートの効果を確認することを目的とした。

Table 1 Material data

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
D (kg/m <sup>3</sup> )	1900.0	1.3	130.0	500.0	130.0	850.0
P (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.240	0.999	0.001	0.500	0.001	0.650
C (J/kgK)	850	1000	2300	1500	2300	850
λ (W/mK)	0.80	0.13	2.30	0.10	2.30	0.20
μ (-)	25.0	0.6	100.0	700.0	50000.0	8.3

	WFB	XPS	GW
D (kg/m <sup>3</sup> )	168.0	40.0	30.0
P (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.883	0.950	0.990
C (J/kgK)	2100	1500	840
λ (W/mK)	0.044	0.028	0.038
μ (-)	3.3	450.0	1.3

D: Bulk density, P: Porosity, C: Specific heat capacity- Dry, λ: Thermal Conductivity- Dry, μ: Water vapour diffusion resistance factor, GW: Glass wool insulation, XPS: Extruded polystyrene foam, WFB: Wood fiber board  
\* The numbers in Table 1 correspond numbers in Fig. 1.

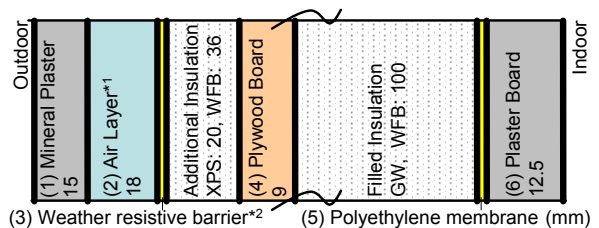


Fig. 1 Analytical model (\*<sup>1</sup> Air change rate=25/h, \*<sup>2</sup> Sd=0.1 m)

Table 2 Temperature and Humidity in Sapporo

	Temp. (°C)	Humidity (%RH)
Mean	8.9	71
Maximum	32.6	100
Minimum	-13.2	26

\*1 Lei YUMOTO (Ochanomizu University, EI., Ltd)

\*2 Tatsuaki TANAKA (Ochanomizu University)

## 1. 実験方法

### 1.1 対象モデル・物性値

Fig. 1 に解析対象モデル、Table 1 にその物性値を示す。

住宅用グラスウール（以下 GW）充填の場合、付加断熱は押出法ポリスチレンフォーム（以下 XPS）20 mm とした（以下 GW\_XPS と記す）。木毛繊維断熱板（以下 WFB）充填の場合、付加断熱は XPS 20 mm と同等の断熱性能となるよう WFB 36 mm とした（以下 WFB\_WFB と記す）。それぞれの構造に対し、ポリエチレン製防湿シート（以下 PE シート）の有無を比較した。

### 1.2 解析プログラム

1次元非定常熱湿気同時移動解析プログラム WUFI Pro 4.1 for Japan（ブラウンホーファー建築物理研究所）を用いた。熱湿気の蓄積と移動は式 1、式 2 の連立方程式を元に解析される<sup>7)</sup>。

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

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

$H$ : 湿った建材の蒸発潜熱 ( $\text{J/m}^3$ ),  $T$ : 温度 (K),  $\lambda$ : 熱伝導率 ( $\text{W/mK}$ ),  $h_v$ : 水の蒸発潜熱 ( $\text{J/kg}$ ),  $p$ : 蒸気圧 (Pa),  $p_{sat}$ : 飽和蒸気圧 (Pa),  $\delta$ : 空気中の水蒸気拡散伝導率 ( $\text{kg/msPa}$ ),  $\phi$ : 相対湿度 (-),  $w$ : 含水率 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $D_\phi$ : 水分移動係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

### 1.3 初期条件、解析期間

初期条件は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<sup>8)</sup>に従った。温度は構造全体に 26 を与え、各建材に湿度 80%RH の場合の含水率（プログラム搭載データ）を与えた。解析は 1 時間ごと、解析期間は 7 月 1 日 0:00 開始で 3 年間繰り返した。

### 1.4 室内温湿度条件及び屋外気象条件

室内温湿度は前述のガイドラインに従い<sup>8)</sup>、湿度 60%RH 一定、温度は 7 月 31 日に最高温度 27 を示し、最低温度 18 度となるサインカーブとして設定した。Table 2 に札幌市気象データの温湿度の平均、最大、最小を示す。屋外の気象データは札幌市の拡張アメダス標準年気象データ（WUFI 形式に変換されたプログラム搭載）を用いた<sup>9)</sup>。

### 1.5 その他の条件

表面熱伝達抵抗は外気 0.0588  $\text{m}^2\text{K/W}$ 、室内 0.125  $\text{m}^2\text{K/W}$ 、屋外における日射の短波長放射吸収は 0.4、長波長放射放散は 0.9 とした。構造は高さ 10m までの建物の北向きの壁を想定した。

Fig. 2 に壁にかかる雨の量の変化を示す。降雨量、風向、風速等によりその方位の構造にあたる雨の量が算出される。垂直の壁を想定しているため、そのうち 70%がかかると想定した。また、本研究では安全側に判断するため、壁にあたる雨の 1%が付加断熱外側に侵入する設定とした。

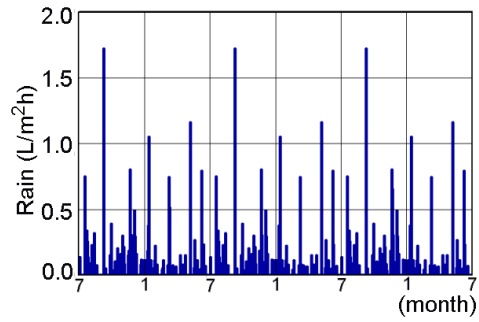
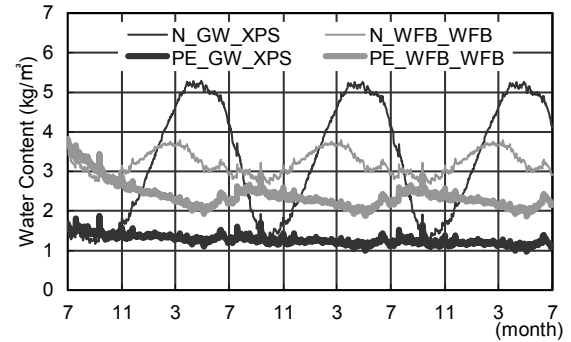
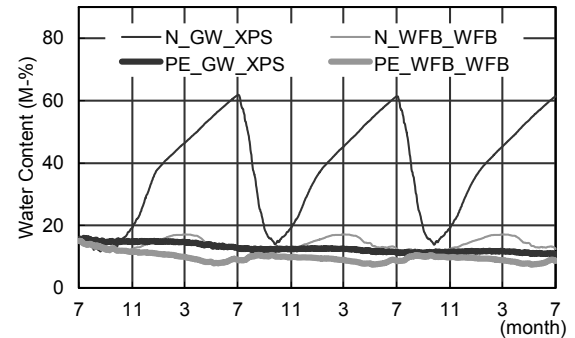


Fig. 2 Amount of driving rain against North wall.



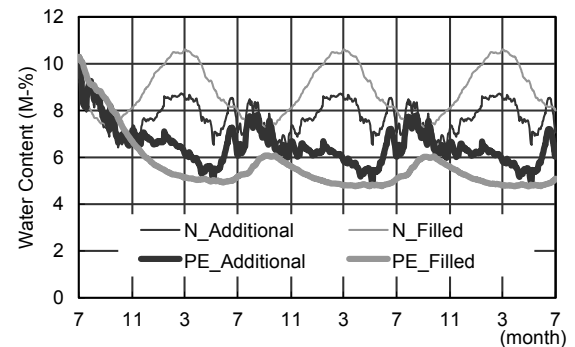
N: without PE membrane; PE: with PE membrane; GW: Glass wool insulation, XPS: Extruded polystyrene foam, WFB: Wood fiber board

Fig. 3 Change of total water content per square meter.



N: without PE membrane; PE: with PE membrane; GW: Glass wool insulation, XPS: Extruded polystyrene foam, WFB: Wood fiber board

Fig. 4 Change of water content of plywood board



N: without PE membrane; PE: with PE membrane; Additional: Additional insulation, Filled: Filled insulation

Fig. 5 Change of water content of Wood fiber board

## 2. 結果及び考察

### 2.1 含水率変化

Fig. 3 に全体含水率変化を示す。経年で構造全体の含水率が上昇すると水分が蓄積し、工法として不適切であると判断できる。今回は全ての条件で目立った水分の蓄積は認められなかった。しかし、GW\_XPS で PE シート無しの場合（グラフ中 N\_GW\_XPS）全体含水率の年間変化量が約 4.0 kg/m<sup>2</sup> であった。ドイツ工業規格 DIN4108-3 によると、構造全体の年間含水率変化量が単位面積あたり 1.0 kg 以上変化すると極度の結露のため不適切であるとされる<sup>10)</sup>。

Fig. 4 に合板含水率変化を示す。同規格<sup>10)</sup>によると、木材については長期間含水率が 20 質量% (M-%) を超え、かつ 10 以上になると腐敗の危険性があるとされる。全体含水率で極度の結露が認められた GW\_XPS で PE シートの無い場合、合板の含水率は 20 質量% を大きく超えていた。

一方、Fig. 5 に木毛繊維断熱板の含水率変化を示すが、WFB の含水率は 20 質量% を超えないことが確認できた。

これらより、GW\_XPS で PE シート無しの構造は札幌市では工法として不適切と判断できる。

### 2.2 断面熱湿気分布

Fig. 6、Fig. 7、Fig. 8、Fig. 9 に断面熱湿気分布を示す。実線は解析最後のデータ、網がけは解析期間の履歴を示す。Fig. 6、Fig. 7 は PE シート無しの場合である。各図中段の相対湿度を見ると、合板と充填断熱の境界及び付加断熱と透湿防水層の境界付近が高湿となることが分かる。特に極度の結露が見られた GW\_XPS の PE シート無しで顕著であった。

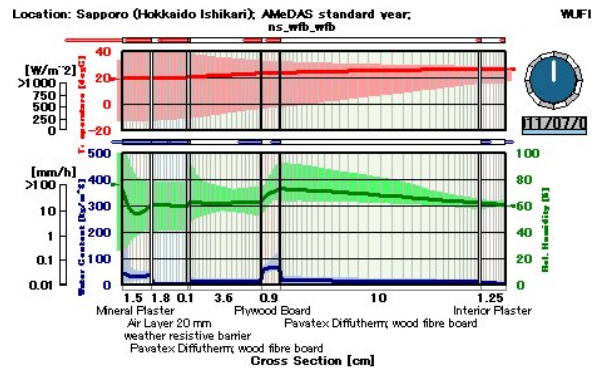
一方、PE シートを施した Fig. 8、Fig. 9 では付加断熱と透湿防水層の境界付近が最も高湿度であった。

また、PE シートの有無を問わず、木毛繊維断熱板の方が、壁内の湿度が低い傾向があった。

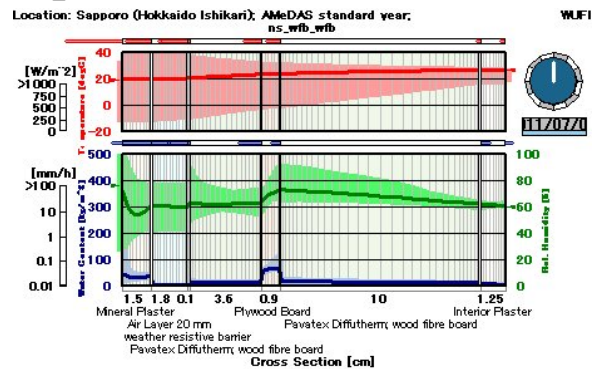
### 2.3 境界における湿度変化

Fig. 10、Fig. 11 に充填断熱材の外側と内側の相対湿度変化を示す。PE シートの無い場合、充填断熱外側の湿度はどちらの条件でも 80%RH 以上の高湿度となった。特に GW-XPS ではほぼ年間を通して 80%RH 以上であり、12 月から 7 月の 7 ヶ月間 100%RH となり結露を示した。一方、断熱材を WFB にすると GW-XPS と比べて低くなるものの、冬季を中心に 11 月から 5 月の約半年 80%RH 以上の高湿度を示すため、こちらも工法としては不適切であった。PE シートを施すとどちらの断熱材でも 80%RH を超えることが無かった。

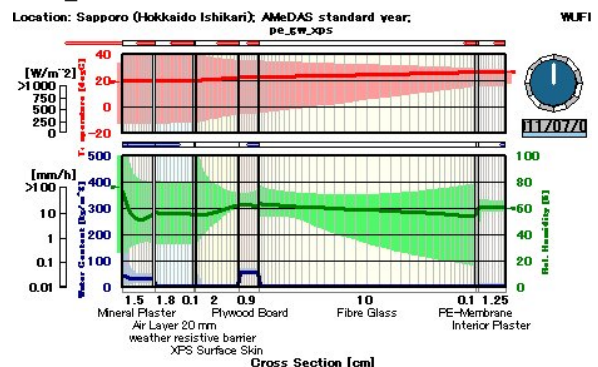
Fig. 12 に付加断熱屋外側の湿度変化を示す。雨の一部がこの部分に侵入する設定でシミュレーションを実施したため、雨の影響で相対湿度が高くなる時間がある。この部位では PE シートの有無に関わらず、WFB\_WFB の方が湿度の変化が小さいことが分かった。これは XPS がほとんど吸水しないのに対し、WFB は雨水を吸収し断熱材全体に分配されるためであると考えられる。



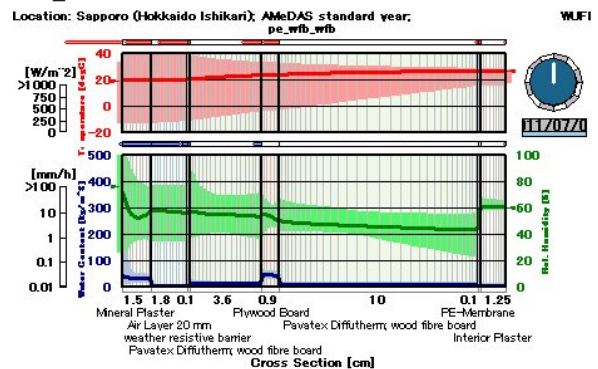
Upper: Temperature, Middle: Relative Humidity, Lower: Water Content.  
Fig. 6 Hygrothermal distribution of the wall in the case of GW\_XPS without PE membrane.



Upper: Temperature, Middle: Relative Humidity, Lower: Water Content.  
Fig. 7 Hygrothermal distribution of the wall in the case of WFB\_WFB without PE membrane



Upper: Temperature, Middle: Relative Humidity, Lower: Water Content.  
Fig. 8 Hygrothermal distribution of the wall in the case of GW\_XPS with PE membrane.



Upper: Temperature, Middle: Relative Humidity, Lower: Water Content.  
Fig. 9 Hygrothermal distribution of the wall in the case of WFB\_WFB with PE membrane

このように、WFB を用いると GW\_XPS に比べて低湿度になるものの、今回の条件下ではどちらの断熱条件でも防湿シートが必要であると確認された。

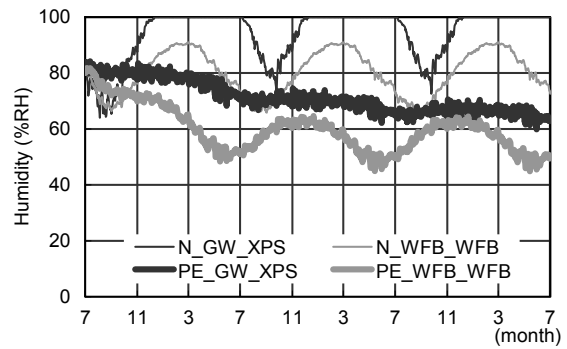
### 3. 結論

寒冷地札幌市における木造住宅で木毛繊維断熱板を使う効果と、ポリエチレン製防湿シートの働きを確認するために 1 次元非定常熱湿気同時移動解析を実施した。充填断熱に住宅用グラスウールと付加断熱に押出法ポリスチレンフォームの場合 (GW\_XPS) とそれぞれに木毛繊維断熱板を施した場合 (WFB\_WFB) に対し、ポリエチレン製防湿シート (PE シート) の有無を比較し、以下の結果を得た。

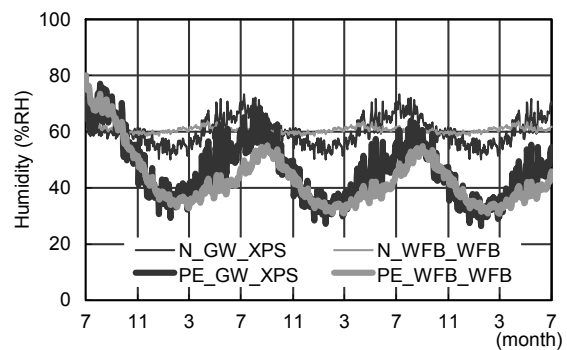
- (1) 全ての条件で水分の蓄積は認められなかった。
- (2) PE シートを施すと湿気の問題が認められなかった。
- (3) GW\_XPS で PE シートが無いと極度の結露と合板に腐敗の危険性が確認された
- (4) PE シートが無い場合 GW\_XPS よりも WFB\_WFB の方が低く保たれたが、とどちらの構造でも充填断熱の外側が 80%RH 以上の高湿度となり不適切であった。

### 参考文献

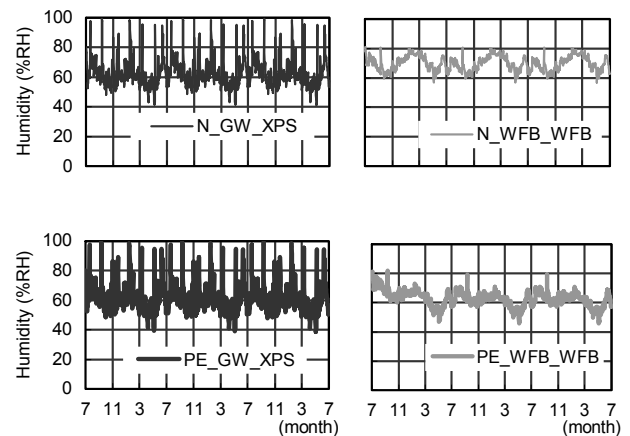
- 1) 柚本 玲, 堀内 正純, 田中 辰明: 木造住宅における防湿シートの熱湿気性状に関する非定常シミュレーション: 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集 (2006/9) p. 447 -450
- 2) 柚本 玲, 堀内 正純, 田中 辰明: 木造住宅における防湿シートの熱湿気性状に関する非定常解析: 第 25 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集 (2007/4) p. 97 -99
- 3) 柚本 玲, 堀内 正純, 田中 辰明: 木造住宅における防湿シートの熱湿気性状に関する非定常解析: 日本家政学会 第 59 回大会 (2007/5)
- 4) 柚本 玲, 堀内 正純, 田中 辰明: 非定常解析プログラム WUFI ( ヴーフィ ) による木造住宅壁内の湿気に関する研究: 2007 年度日本建築学会講演会 (2007/8)
- 5) 柚本 玲, 堀内 正純, 田中 辰明: 断熱材の種類が木造建物の壁内湿気分布に及ぼす影響: 平成 19 年度空気調和・衛生工学会大会 (2007/9)
- 6) Tatsuaki Tanaka und Lei Yumoto: Nicht stationäre Simulation von hygrothermalen Aspekten einer Dampfsperrenmembran in Holzwohnbauten: Gesundheits Ingenieur: Vol. 128, No. 3 (2007) p. 136 -139
- 7) H. M. Künzeli; Aussen dampfdicht, vollgedaemt? Die rechnerische Simulation gibt Hinweise zu dem Feuchteverhalten aussen dampfdichter Steildaecher; bauen mit holz; (1998)
- 8) 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 (2004/04)
- 9) 拡張アメダス気象データ; 日本建築学会編
- 10) ドイツ工業規格 DIN4108-3



N: without PE membrane; PE: with PE membrane; GW: Glass wool insulation, XPS: Extruded polystyrene foam, WFB: Wood fiber board  
Fig. 10 Change of relative humidity outside filled insulation.



N: without PE membrane; PE: with PE membrane; GW: Glass wool insulation, XPS: Extruded polystyrene foam, WFB: Wood fiber board  
Fig. 11 Change of relative humidity inside filled insulation



N: without PE membrane; PE: with PE membrane; GW: Glass wool insulation, XPS: Extruded polystyrene foam, WFB: Wood fiber board  
Fig. 12 Change of relative humidity outside additional insulation

### 謝辞

本研究は財団法人トステム建材産業振興財団助成を受け実施した。また、研究遂行にあたりフラウンホーファー建築物理研究所ダニエル・ツィルケルバッハ氏、田中啓輔氏、田中絵梨氏のご協力を得た。心より謝意を表する。