

枠組壁工法による木造住宅における壁の非定常熱湿気同時移動解析  
 Transient Analysis inside the Wall of the Wooden Dwellings by Two-By-Four Method

正会員 柚本 玲 (お茶の水女子大学) 正会員 田中 辰明 (お茶の水女子大学)  
 Lei YUMOTO\*<sup>1</sup> Tatsuaki TANAKA\*<sup>1</sup>

Synopsis: The inside wall of the wooden dwellings by the two-by-four method were simulated by transient analysis to illustrate the effect of damp proof membrane and type of insulation materials. The seven cities were selected each area segmented under the Energy Saving Standard 1999. In Asahikawa, Hirosaki, Nagano and Tokyo, the wall without the membrane were humid in winter. However in Naha, very hot humid area in Japan, the membrane caused high humidity in summer. In Kumamoto and Miyazaki, the wall needs both it and wood fiber insulation board. The former prevents the humidity in winter, and the latter in summer.

はじめに

住宅の高気密・高断熱化、空調の発達により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、内部結露などの問題が生じてきた。内部結露がひどくなると室内環境に不具合が生じたり、木材の腐敗などの害の恐れがある。再建、非再建論はあるものの法隆寺中門は飛鳥時代の建立と伝えられ、世界最古の木造建築といわれている。このように木造は乾燥した状態で上手く使うと何百年も使用することができる。しかし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<sup>1)2)</sup>。

本研究では日本各地において木造枠組壁工法の壁内湿気性状を明らかにすることを目的とし、非定常熱湿気同時移動解析による無機繊維断熱材(住宅用グラスウール)と木毛繊維断熱材、防湿層有無の比較を実施した。

1 実験方法

1.1 解析ソフトウェア

式) 1、式) 2 の連立方程式に基づく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 (フラウンホーファー建築物理研究所) を用いた<sup>3)</sup>。

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

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

H: 建材の蒸発潜熱 (J/m<sup>3</sup>), T: 温度 (K), λ: 熱伝導率 (W/mK), h<sub>v</sub>: 水の蒸発潜熱 (J/kg), p: 蒸気圧 (Pa), p<sub>sat</sub>: 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/m<sup>3</sup>), D<sub>φ</sub>: 水分移動係数 (m<sup>2</sup>/s)

表-1 対象都市気温、湿度、降雨量

地域	都市	温度 (°C)			湿度 (%RH)			降雨量 (mm/a)
		平均	最高	最低	平均	最高	最低	
I	旭川市	6.9	33.2	-22	77	100	16	977
II	弘前市	9.9	33.3	-11	76	100	20	1,008
III	長野市	11.6	34.5	-9.4	73	100	15	1,120
IV	東京	16.1	35.3	-0.8	62	100	10	915
V	熊本市	16.4	35	-4.8	71	100	16	1,757
V	宮崎市	17.4	34.8	-5.8	73	100	17	2,250
VI	那覇市	22.7	32.7	10.9	75	100	33	1,709

表-2 建材物性

	外装仕上	通気層	防水層	合板	石膏ボード
d (kg/m <sup>3</sup> )	1900.0	1.3	130.0	500.0	850.0
p (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0.240	0.999	0.001	0.500	0.650
c (J/kgK)	850	1000	2300	1500	850
λ (W/mK)	0.800	0.130	2.300	0.100	0.200
μ (-)	25.0	0.6	100.0	700.0	8.3

	断熱材			防湿層	d:密度, p:空隙率, c:熱容量, λ:熱伝導率, μ:水蒸気拡散抵抗係数
	GW	WFB	XPS	PEシート	
d (kg/m <sup>3</sup> )	60.0	155.0	40.0	130.0	
p (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0.950	0.981	0.950	0.001	
c (J/kgK)	850	2000	1500	2300	
λ (W/mK)	0.038	0.042	0.028	2.300	
μ (-)	1.3	3.0	450.0	50000.0	

GW: 住宅用グラスウール (24k), WFB: 木毛繊維断熱板, XPS: 押出法ポリスチレンフォーム, PE: ポリエチレンシート

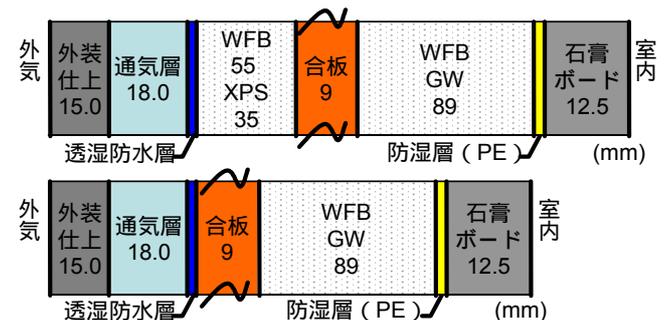


図-1 解析モデル(上:I地区、下:II地区からVI地区)(北側)

## 1.2 気象データ

表-1に対象都市の気温、湿度、年降雨量を示す。対象都市は次世代基準の各地域区分から、I地区：旭川市、II地区：弘前市、III地区：長野市、IV地区：東京都、熊本市、V地区：熊本市、VI地区：宮崎市、VII地区：那覇市の7都市を選出した。気象データは拡張アメダス気象データを WUFI 形式に変換された搭載データを用いた。室内温湿度は住宅性能評価機関等連絡協議会ガイドライン(2004)<sup>6)</sup>に準じて湿度60%RH一定、7月末日に最高温度27、2月末日に最低温度18を示すサインカーブで設定した。

## 1.3 解析モデル

表-2に建材物性、図-1に解析モデルを示した。枠組壁工法(ツーバイフォー)の壁を想定した。通気層18mm(換気回数25回/h)の外側に窯業系外装材(15mm)を設置した。断熱は住宅用グラスウールの充填断熱(I地区は押出法発泡ポリスチレンフォームを付加)とし、厚みは次世代省エネルギー基準<sup>5)</sup>に準じた。また、一般的に用いられるポリエチレンシート(PE)を防湿層とし、設置する場合としない場合、また断熱材を吸放湿性能があるとされる木毛繊維断熱材に変更した場合について解析した。

## 1.4 その他の条件

表面熱伝達抵抗は外気側0.0588 m<sup>2</sup>K/W、室内側0.125 m<sup>2</sup>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までの建物の北側の壁を想定した。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%が壁にかかる想定した。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%が透湿防水層の内側に侵入する設定とした。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。

## 1.5 工法が適切かどうかの判定

住宅性能評価機関等連絡協議会ガイドライン(2004)<sup>6)</sup>及び、ドイツ工業規格DIN4108-3<sup>7)</sup>を参考に、以下のいずれかが当てはまる場合は不適切であると判定した。

- (1) 水分の蓄積：全体含水率(kg/m<sup>2</sup>)が経年で増加<sup>6)</sup> <sup>7)</sup>
- (2) 極度の結露：全体含水率(kg/m<sup>2</sup>)の季節差が1.0kg以上<sup>7)</sup>
- (3) 木材腐敗の危険性：木材(本条件では合板)の含水率(質量-%)が20%以上かつ温度10以上<sup>7)</sup>
- (4) 結露、カビの危険性：構造内任意の点の湿度が98%RH以上で結露<sup>6)</sup>、80%RHを長期間超えるとカビの危険性<sup>7)</sup>。

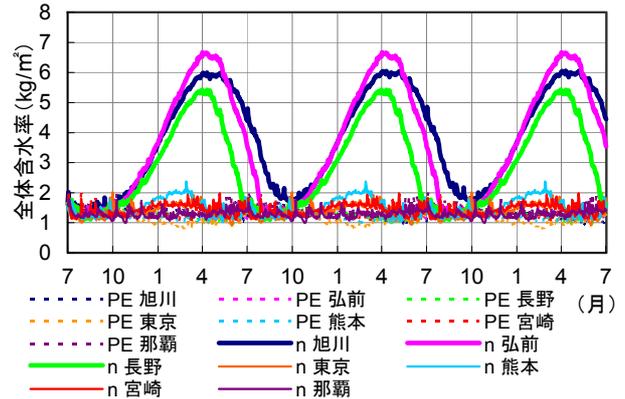


図-2 全体含水率(kg/m<sup>2</sup>)変化(北側)

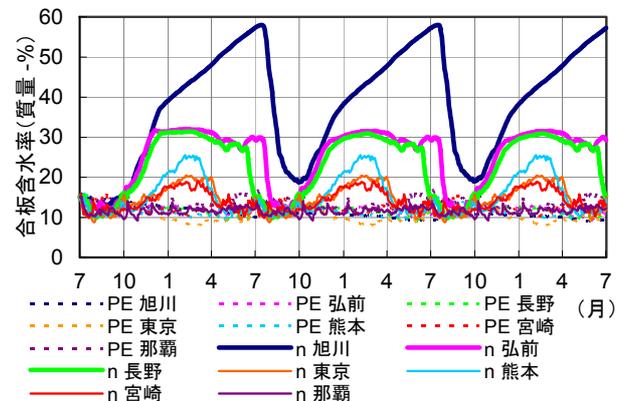


図-3 合板含水率(質量-%)変化(北側)

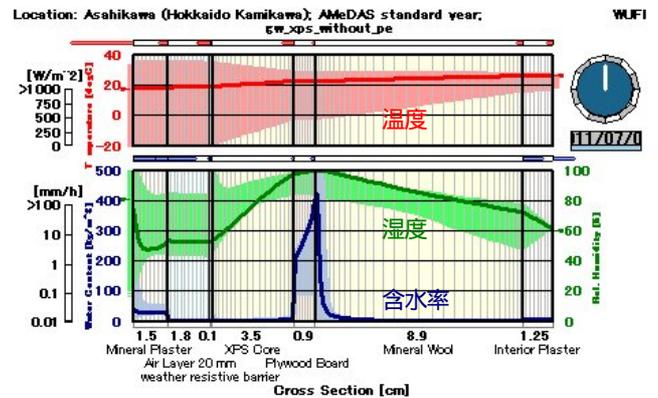


図-4 断面温湿度分布：旭川市 GW\_防湿層なし(北側)

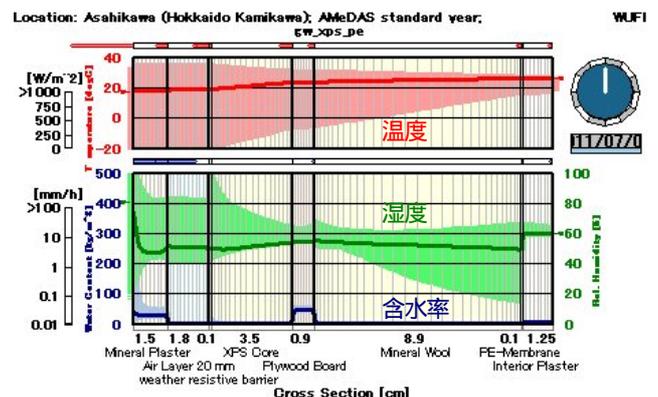


図-5 断面温湿度分布：旭川市 GW\_防湿層あり(北側)

## 2 結果および考察

### 2.1 含水率

全体含水率が経年で増加する条件は認められなかった。図-2に全体含水率 ( $\text{kg/m}^2$ )、図-3に合板含水率(質量-%)の住宅用グラスウールの場合の変化を示す。防湿層の無い場合、旭川市、弘前市、長野市の寒冷地では全体含水率の季節差が  $1.0 \text{ kg}$  以上となり極度の結露が認められた。またこれらの都市及び熊本市では、合板の含水率(質量-%)も、 $20$  質量-%を超え、腐敗の危険性が認められた。

### 2.2 断面温湿度分布

図-4、図-5に寒冷地の旭川市、図-6、図-7に蒸暑地の那覇市における充填断熱材が住宅用グラスウール(以下GW)の場合の断面温湿度分布について示す。旭川市では防湿層が無い場合、合板と充填断熱の間(以下充填外)で高湿度になり(図-4)、防湿層を設置することで壁内が  $80\%RH$  以下に保たれることが確認できた(図-5)。一方、蒸暑地である那覇市では、防湿層を設置すると防湿層と充填断熱材との間(以下防湿外)が高湿度になってしまい(図-7)、逆に防湿層が無ければ壁内の湿度が低く保たれた(図-6)。

断熱材がGWの場合の長野市における断面温湿度分布を図-8、図-9に示す。弘前市、長野市、東京、熊本市、宮崎市では、防湿層を設置しないと図-8のように合板内側で、防湿層を設置すると図-9のように防湿外側で  $80\%RH$  を超える高湿度になった。

これらの湿気への対策として、断熱材を吸放湿性に優れているとされる木毛繊維断熱板(以下WFB)にして解析した。長野市におけるWFBの場合の断面温湿度分布を図-10、図-11に示す。その結果、断熱材をWFBにし、防湿層を設けることで、湿気の問題が解消され、弘前市、長野市、東京都で同様の結果であった。

一方、図-12のように宮崎市、熊本市ではWFBに変更し、防湿層を設けた場合も防湿層外側で高湿度が認められた。なお、これらの都市で、断熱材をWFBに変えても防湿層を設置しないと、断熱内側の高湿度は解消されなかった。

### 2.3 相対湿度

断面湿度分布で高い湿度を示した熊本市、宮崎市について高湿度が長期間続くかどうか確認するために、相対湿度変化を図-13、図-14に示す。

GW\_PEでは7月から9月にかけて  $80\%RH$  以上であった防湿層外側の湿度がほぼ  $80\%RH$  以下に保たれており、長期間、高湿度となりカビが発育する可能性がないことが確認できた。

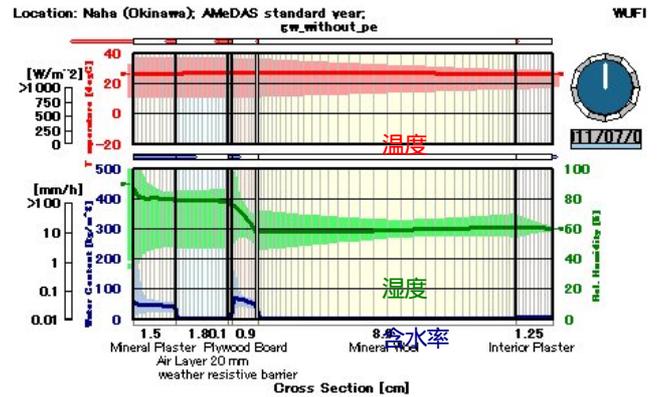


図-6 断面温湿度分布：那覇市GW\_防湿層なし(北側)

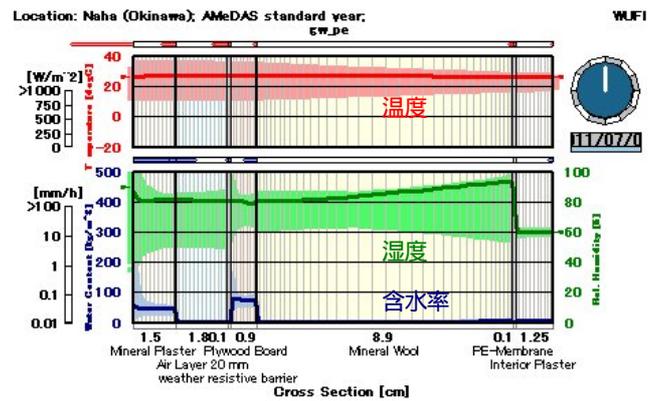


図-7 断面温湿度分布：那覇市GW\_防湿層あり(北側)

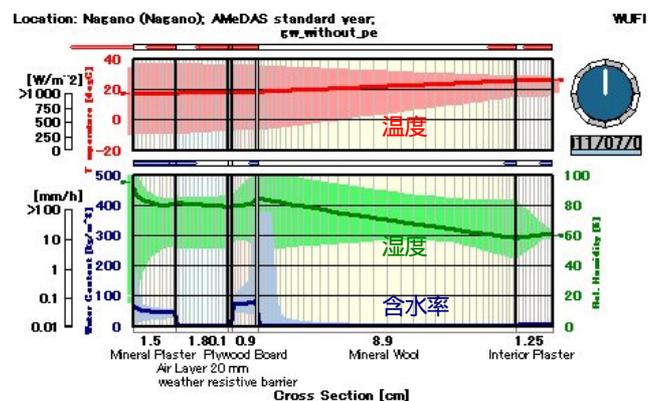


図-8 断面温湿度分布：長野GW\_防湿層なし(北側)

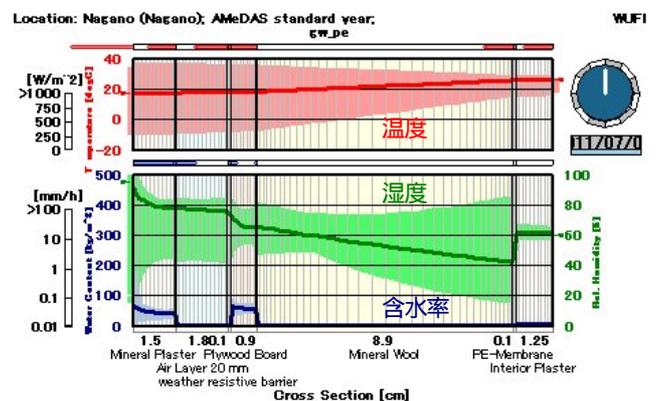


図-9 断面温湿度分布：長野GW\_防湿層あり(北側)

### 3 まとめ

次世代省エネルギー基準各地域の都市において、防湿層、断熱材の種類を変えて壁の熱湿気性状を解析、比較したところ、以下の結論を得た

- 1) 旭川市では防湿層を設置すると壁内の高湿度が解消された。
- 2) 那覇市では、防湿層を設置すると壁内全体が高湿度になるため不適切であった。
- 3) 弘前市、長野市、東京、熊本市、宮崎市では防湿層を設置し、さらに充填断熱材を住宅用グラスウールから木毛繊維断熱板にすると壁内が高湿にならなかった。

### 謝 辞

本研究は第5回坪井記念研究助成（社団法人日本ツープイフォー建築協会）を受け、実施した。記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) T. Tanaka und L. Yumoto: Nicht stationäre Simulation von hydrothermalen Aspekten einer Dampfsperrenmembran in Holzwohnbauten: Gesundheits Ingenieur: Vol. 128, No. 3 (2007) p. 136-139
- 2) 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)
- 3) H. M. Künzle; Aussen dampfdicht, vollgedaemmt? Die rechnerische Simulation gibt Hinweise zu dem Feuchteverhalten aussen dampfdichter Steildaecher; bauen mit holz (1998)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) ドイツ工業規格 DIN4108-3

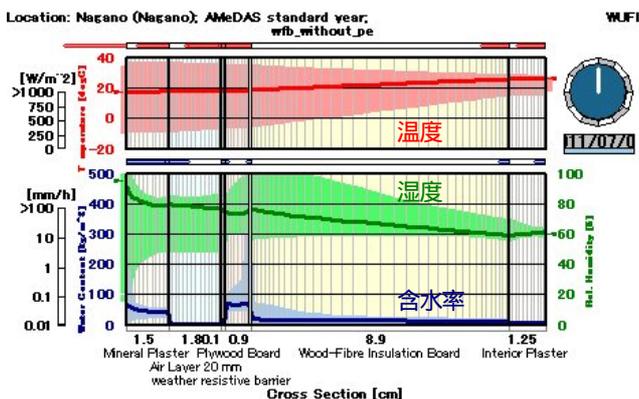


図-10 断面温湿度分布：長野 WFB\_防湿層なし（北側）

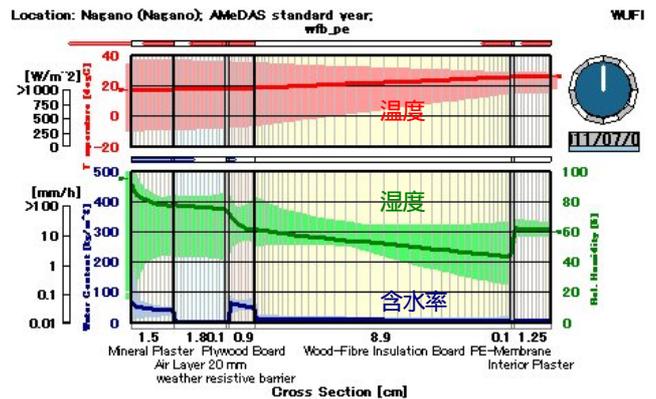


図-11 断面温湿度分布：長野 WFB\_防湿層あり（北側）

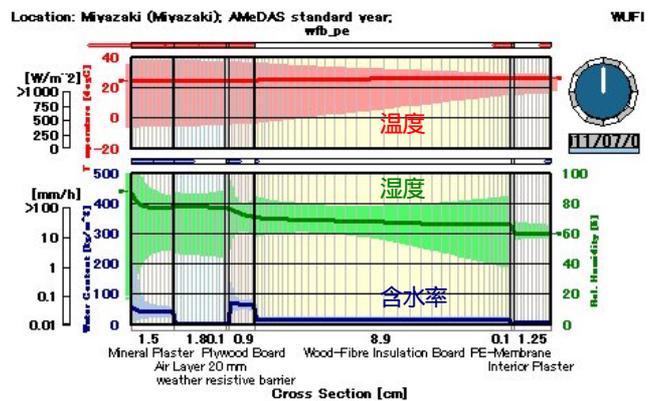


図-12 断面温湿度分布：宮崎市 WFB\_防湿層あり（北側）

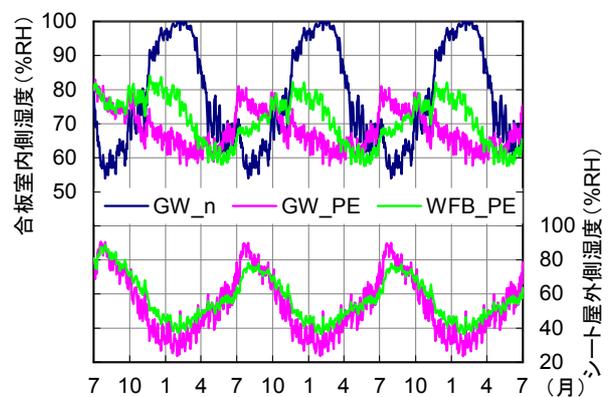


図-13 相对湿度変化（熊本）（北側）

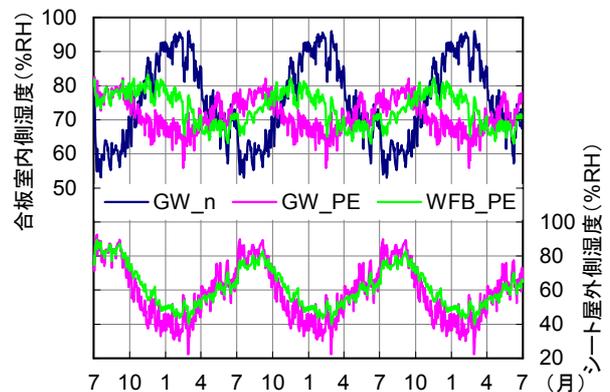


図-14 相对湿度変化（宮崎）（北側）