

## 2. 外皮に関する研究開発

### 2.1 開口部における日射遮蔽の性能等に関する検討

#### 2.1.1 はじめに

開口部に求められる日射熱取得率、可視光透過率といった物性値は、窓面方位・地域だけでなく居住者の嗜好や生活スタイルにより大きく異なる。最適な日射遮蔽装置を選択するためには、日射遮蔽装置の有効性を評価・予測することが必要である。このような予測・評価を行う上で物性値が必要となり、それらをデータベース化することが重要であると考えられる。このように設計資料として日射遮蔽装置の物性値を横断的に整理することによって、省エネ効果を向上させることが期待できる。しかし、既往の研究では熱物性値や光学特性値など個別の測定は行われているが、横断的な測定事例は少ない<sup>1)</sup>。

熱物性値を測定するためには太陽シミュレーター<sup>2)</sup>を用いた装置など大掛かりな装置を必要とする場合が多く、多数のサンプルを測定するには向いていない。また、大掛かりな装置では光源の移動が困難で、報告されている物性値のほとんどが垂直入射(もしくは拡散光)時のものであり、入射角特性が考慮されていない。

そこで本研究では、実大の実験棟にブラインドやロールスクリーン、レースのカーテン、すだれ等の日射遮蔽装置を装着し、実際の入射角特性を考慮した光環境および熱環境の把握を目的とし、測定を行った。

#### 2.1.2 実験棟概要

東京都文京区東京大学・本郷キャンパスの屋上実験棟において2010年8月4日から9月3日までの間の晴天日に測定を行った。図 2.1.1 に実験棟の外観と内観を示す。実験棟の大きさは、間口 3940mm、奥行 4028mm、高さ 2442mm である。壁の一面は大きな開口となっており、開口の方位を任意の方位に回転させることができる。本実験期間中はファンコイルユニットにより冷房を行っている。

既往の研究では、本実験棟に対して熱負荷シミュレーションなどを行うときは、窓面に入射する日射量から室内に入射する日射量を推定することが可能であると報告されている<sup>3)</sup>。本研究では、この結果を参考とし、日射侵入率を算出した。



図 2.1.1 実験棟の外観と内観

### 2.1.3 実験条件

本実験の日射遮蔽装置の条件は日射遮蔽装置なし、内付けブラインド、レースカーテン、すだれ、ロールスクリーン、外付けブラインドの 6 条件である。窓方位は南面と東面とした。但し、東面は測定期間の都合により日射遮蔽装置なし、内付けブラインド、レースカーテンの 3 条件のみの測定である。尚、内付けブラインド及び外付けブラインドのスラット角は  $0^\circ$ （水平）としている。図 2.1.2 に測定した日射遮蔽装置を示す。



図 2.1.2 本測定に使用した日射遮蔽装置

## 2.1.4 測定項目

測定項目は日射透過率，可視光透過率，輝度分布，照度分布，温度分布，日射侵入率である。輝度分布は 8 時から 12 時まで 1 時間毎の測定とし，他の測定項目は輝度分布の測定日とは異なる日に 1 分間の連続測定とした。図 2.1.3 に測定位置を示す。

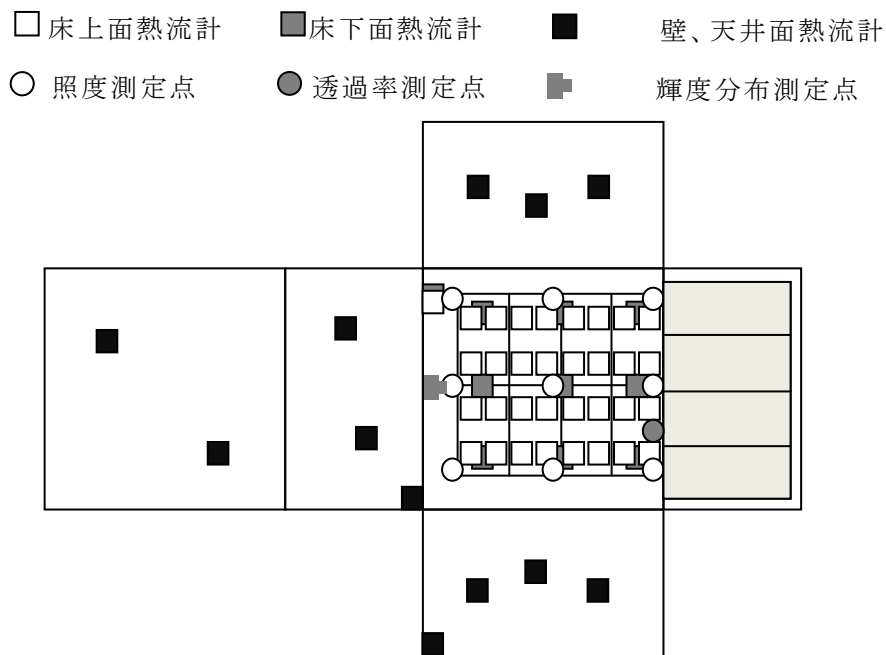


図 2.1.3 測定位置

## 2.1.5 測定結果

図 2.1.4～図 2.1.12 に結果の一例として、日射侵入率と輝度分布の結果を示す。日射侵入率は高負荷となる時間帯のデータを抽出し解析を行っている(7～17 時かつ窓面鉛直面日射量  $200 \text{ W/m}^2$  以上，ファンコイルユニットの流量が安定している時間帯)。日射侵入率は一日の日射からの積算取得熱量に対する一日の積算除去熱量の割合としている。これは実環境下における一日の平均的な日射侵入率と考えられ，日射の入射角特性も考慮されている。

垂直入射に近い東面の遮蔽装置なし 8 時の日射侵入率は 0.40 であり，ISO15099 に基づき測定された結果 0.483 と近い値となっている。また各遮蔽装置の相対的な関係からも概ね良く日射侵入率の測定ができていると考えられる。

遮蔽なしの日射侵入率は南面では日射の入射角が大きくなる為，東面に比べ小さくなっている。本実験で用いたレースカーテンも同様の傾向を示している。一方，それらとは異なりブラインド(スラット角  $0^\circ$ )は東面よりも南面の方が日射遮蔽効果は高い。

## 2.1.6 まとめ

屋上実験棟において測定を行い、各日射遮蔽装置が室内光・熱環境に与える影響について明らかにした。日射侵入率の測定は主に垂直入射に近い入射角で測定が行われるが、本研究では実条件における日射侵入率を測定した。その結果、垂直入射に近い東面よりも日射の入射額が大きくなる南面の方が日射遮蔽装置なしの場合、日射侵入率が小さくなるなど、方位毎に日射侵入率が異なることを示した。また日射遮蔽装置により日射侵入率の入射角特性が異なることも示している。本測定では実大実験だったので測定環境を制御できず、時刻ごと(入射角ごと)の詳細なデータを得ることができなかった。今後はより詳細な実験を行い、日射遮蔽装置を含む窓面の入射角特性を考慮したデータベースの作成を行う必要がある。

日射遮蔽装置に求められる視環境性能として、「室内の明るさの確保」、「窓面不快グレアの抑制」、「外部景観の見え方の保持」の3つが考えられる<sup>4)</sup>。今後は照度分布や輝度分布を用いて視環境性能について検討するとともに、熱環境についても温冷感の評価を行う予定である。光環境と熱環境を総合的に評価し、省エネ性と快適性の観点から日射遮蔽装置を選択することが可能となる。

### <参考文献>

- 1) Kobayashi, M. , Sawachi, T. , Kurayama. C. , Nishizawa, S. , Seto, , Inoue, T. , Narita, K. . : Integrated evaluation of solar-shading devices for the indoor climate controllability by cross ventilation and solar shading, Journal of Environmental engineering, Architectural Institute of Japan, No. 613, pp57-64, 2007. 3 (in Japanese)
- 2) Kurayama. C : Development of a measurement system for shgc and u-value, Study on SHGC and U-value for fenestration and shading system Part 1, Journal of Environmental engineering, Architectural Institute of Japan, No. 604, pp15-22, 2006. 6 (in Japanese)
- 3) Kim, S. , Kono, R. , Satoh, M. , Kindaichi, S. , Akamine, Y. , Mae, M. , Sakamoto. Y. : Energy Performance in a Floor Heating System of Thermal Energy Storage, Using Solar Direct Gain and Air Source Heat Pump, (Part1) Introduction of the Experimental System and Verification of Solar Direct Gain, Journal of Environmental engineering, Architectural Institute of Japan, No. 660, pp. 169-176, 2011. 2 (in Japanese)
- 4) Itoh, D. , Iwata, T. , Mochizuki, E. : Comparison of visual performances of window screens and venetian blinds, Study on the evaluation method for the indoor visual environment by window screens Part 4, Journal of Environmental engineering, Architectural Institute of Japan, No. 627, pp. 573-579, 2008. 5 (in Japanese)

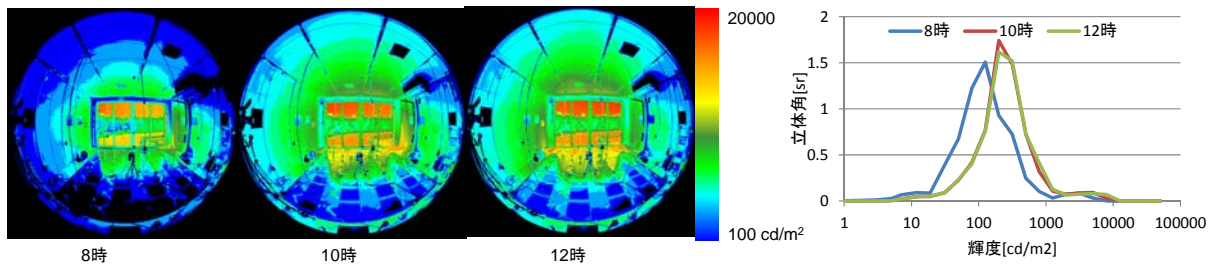


図 2.1.4 遮蔽なし(南面) 日射侵入率:0.35

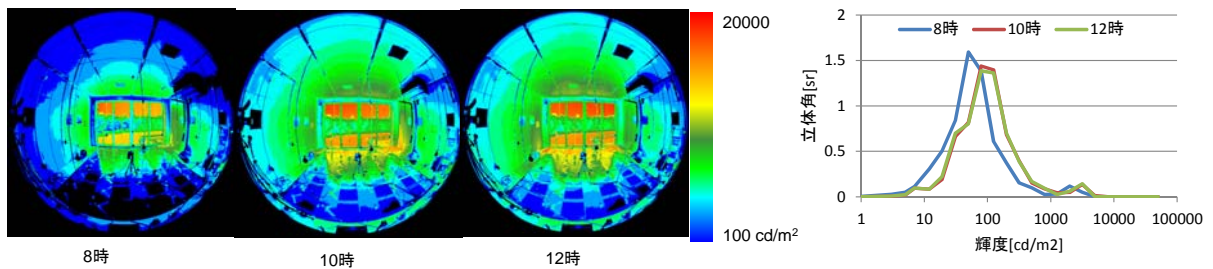


図 2.1.5 内付ブラインド(南面) 日射侵入率:0.12

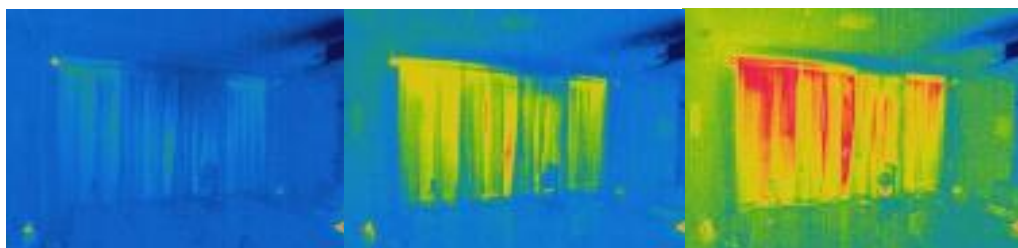
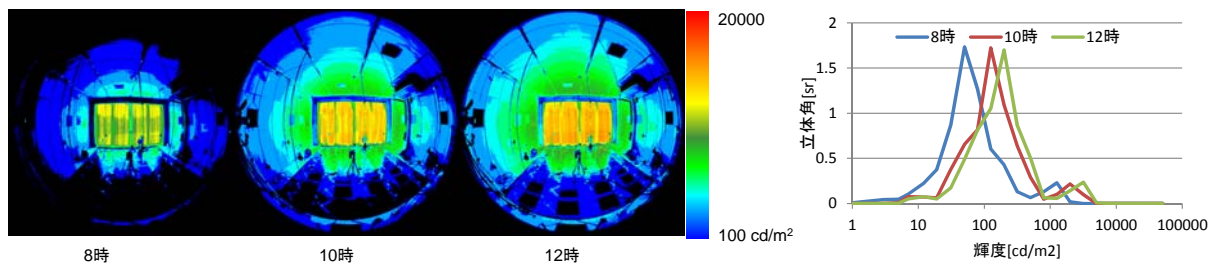


図 2.1.6 レースカーテン(南面) 日射侵入率:0.22

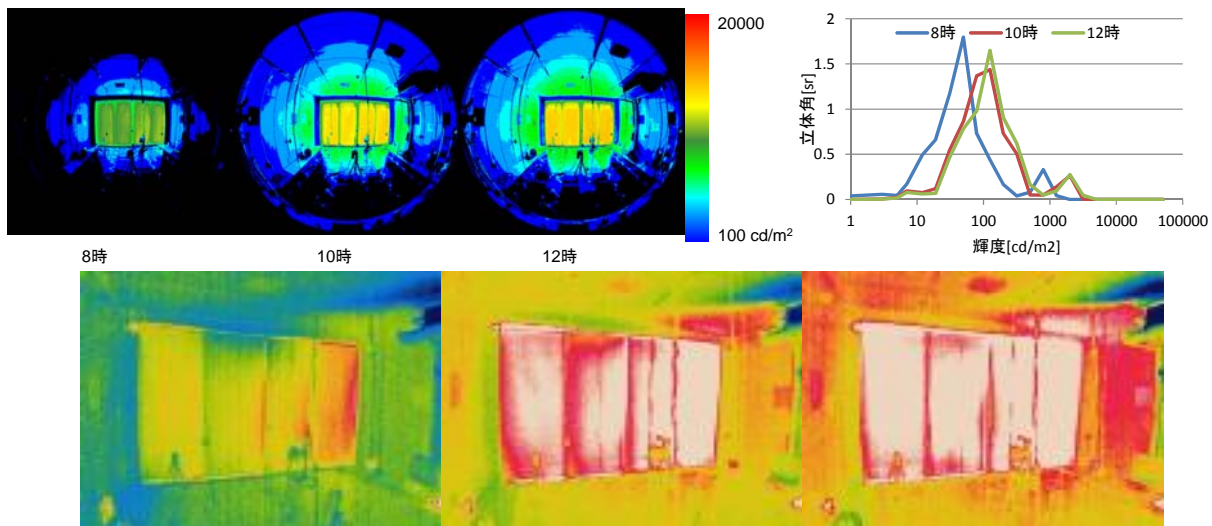


図 2.1.7 ロールスクリーン(南面) 日射侵入率:0.22

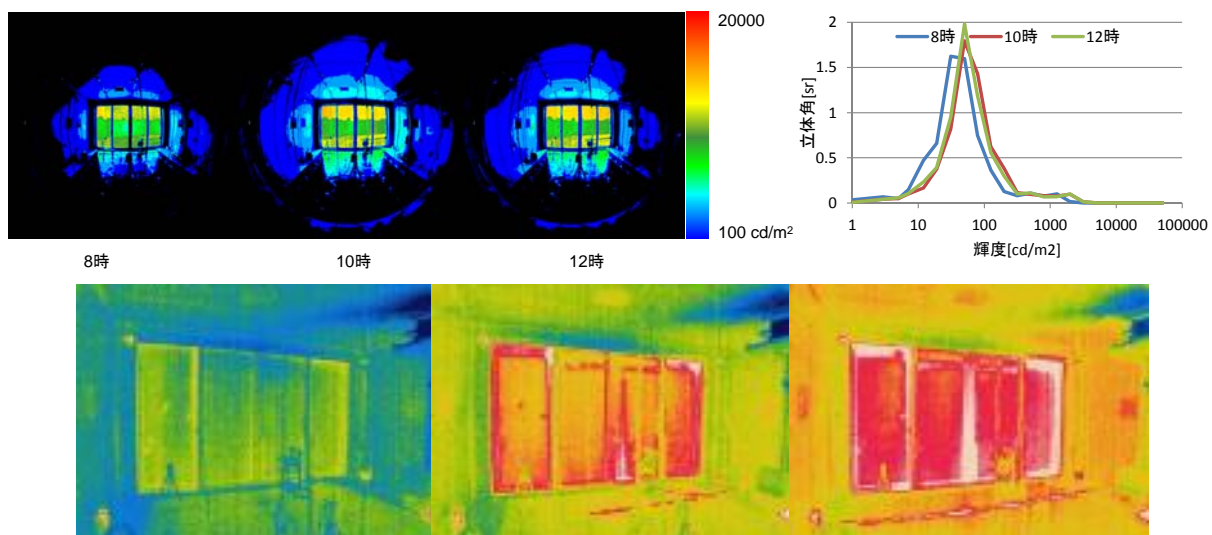


図 2.1.8 すだれ(南面) 日射侵入率:0.11

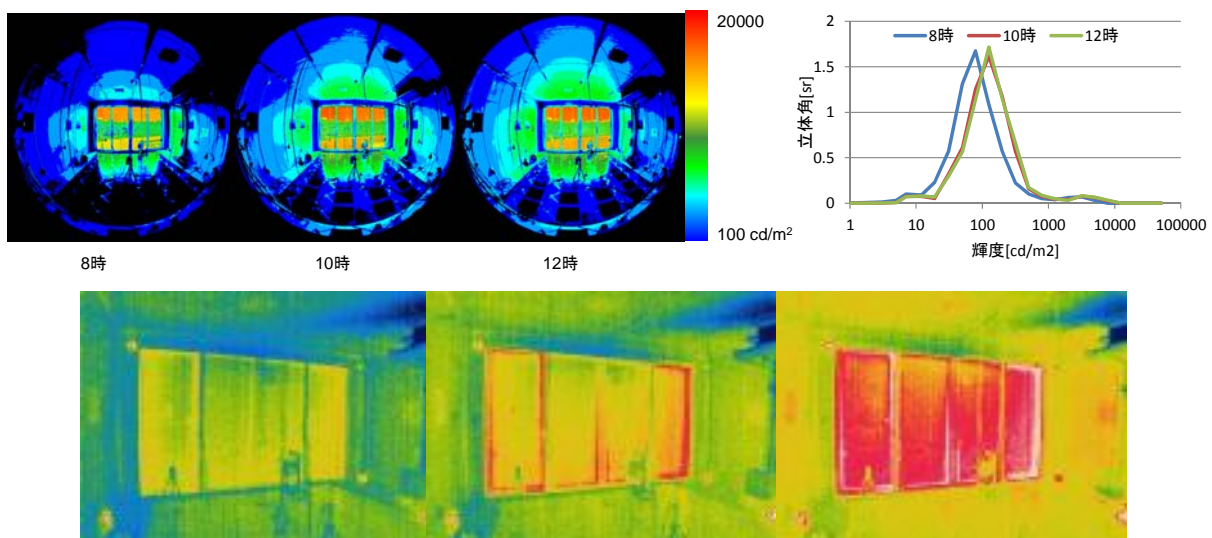


図 2.1.9 外付けブラインド(南面) 日射侵入率:0.13

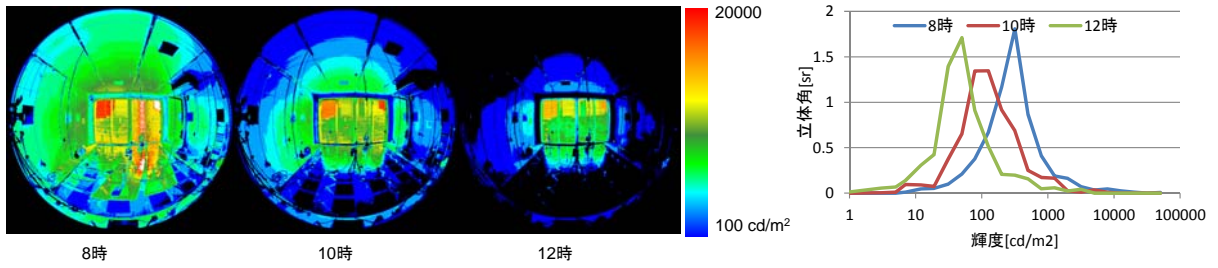


図 2.1.10 遮蔽なし(東面) 日射侵入率:0.40

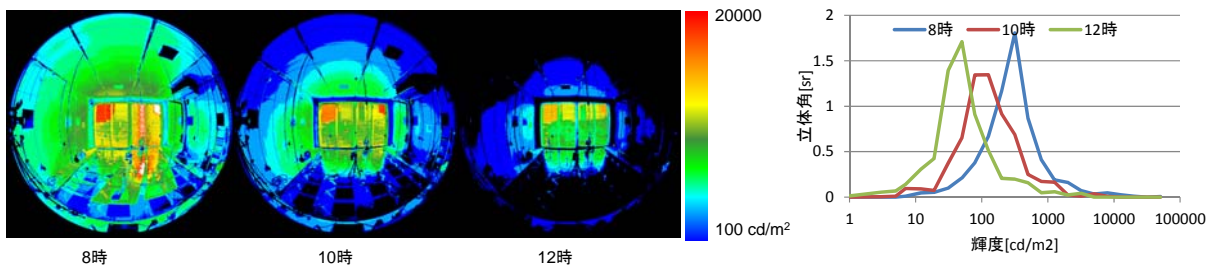


図 2.1.11 ブラインド(東面) 日射侵入率:0.40

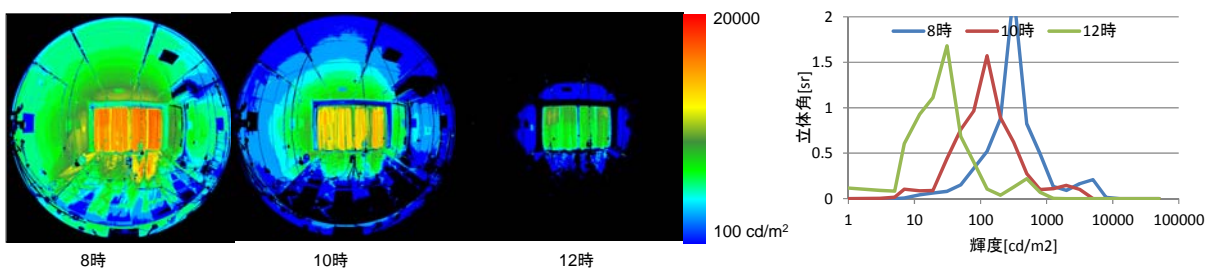


図 2.1.12 レースカーテン(東面) 日射侵入率:0.29

## 2.2 太陽熱利用による暖房負荷削減効果に関する検討

### 2.2.1 はじめに

暖房エネルギーの削減手法として、太陽熱を積極的に利用することは非常に重要である。これまでの技術開発の研究においても、太陽熱利用の効果について試算が行われており、立地、方位の条件や蓄熱建材の導入によって暖房負荷削減効果が体系的に示された。しかしながら、これまでの試算は単室のモデルで行われており、住宅一棟での検討がなされていなかった。そこで、太陽熱を利用することによる、住宅一棟としての暖房負荷削減効果について、数値計算を用いた検討を実施した。さらに実住宅での実験も併せて実施し、数値計算の結果の検証を行った。

### 2.2.2 暖房負荷削減に関する数値計算を用いた検討

太陽熱の利用(パッシブ利用)による、暖房負荷削減の効果を定量的に示すため、シミュレーションを活用した感度分析を行った。

#### (1) 計算概要

暖房負荷の計算は AE-Sim/Heat を使用し、計算地域は表 2.2.1 のように定めた。なお気象データは、拡張アメダス気象データ2000年版の標準年データを使用した。計算対象の住宅モデルは、自立循環型住宅の研究による一般住宅モデル(図 2.2.1)とした。住宅の断熱仕様は、平成 11 年省エネルギー基準を満たす仕様とした。なおこの断熱仕様は、自立循環型住宅の研究における検討で日射熱利用(パッシブ)の必要条件とされている。この仕様を基準として、表 2.2.2 に示すパラメータを変数とする感度分析を実施した。これらのパラメータは、以前検討した自立循環型住宅の研究において掲げられている項目である。住宅の仕様を変更することで、日射熱利用による暖房負荷削減効果がどの程度期待できるかを確認する。

表 2.2.1 検討対象地域

		P <sub>SP</sub> 地域区分	
		ろ地域	に地域
HDD <sub>18-18</sub> 地域区分	III地域	長野	小河内
	IVa地域	富山	宇都宮
	IVb地域	米子	岡山



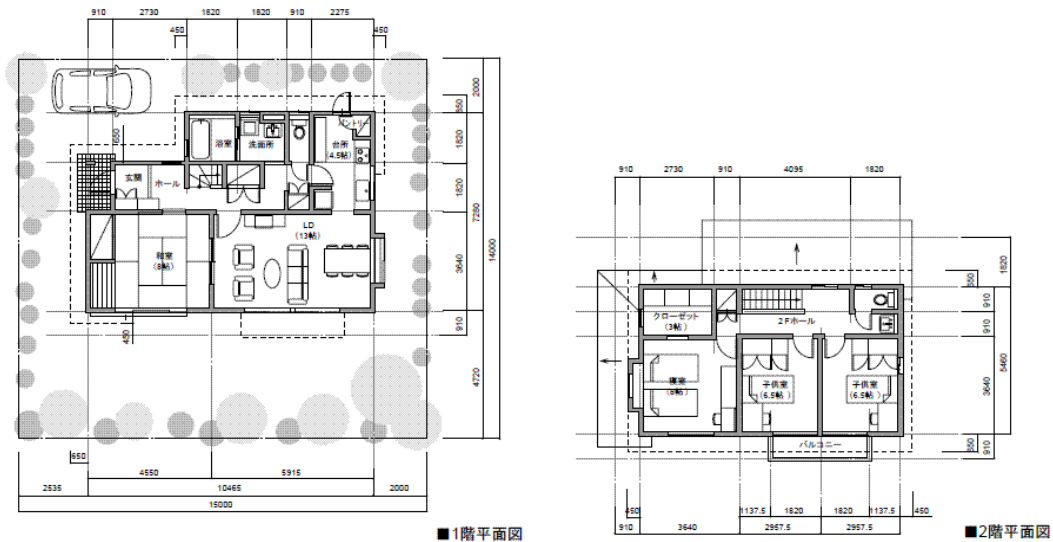


図 2.2.1 一般住宅モデル

表 2.2.2 感度分析のパラメータ

窓のU値 W/m <sup>2</sup> K	集熱 行為	蓄熱	南面 開口率 %	方位	日照 障害
4.65	あり	あり (床)	16.4	真南	なし
3.49	なし	なし	20.0	東へ 15°	日照 5h
2.91				東へ 30°	日照 3h

## (2) 感度分析結果

### 1) 集熱行為による暖房負荷削減効果

集熱行為とは、集熱開口部(真南±30°の方位にある開口部)において、日中にレースカーテンを含む全ての日射遮蔽部材を開放し、積極的に日射熱を取り込む行為を指す。

集熱行為の有無による暖房負荷の比較結果を図 2.2.2 および図 2.2.3 に示す。横軸は集熱行為を実施しなかった場合の暖房負荷、縦軸は集熱行為を実施した場合の暖房負荷である。PSP 地域区分および HDD 地域区分による回帰の両者とも高い相関性を確認できるが、HDD 地域区分で回帰した場合、IVb 地域で傾きが 1 を越えており、高い負荷帯では集熱行為による暖房負荷削減の効果が減少することを意味する結果となった。このことから、集熱行為による暖房負荷削減効果は PSP 地域区分によって層別することが適切であると考えられる。

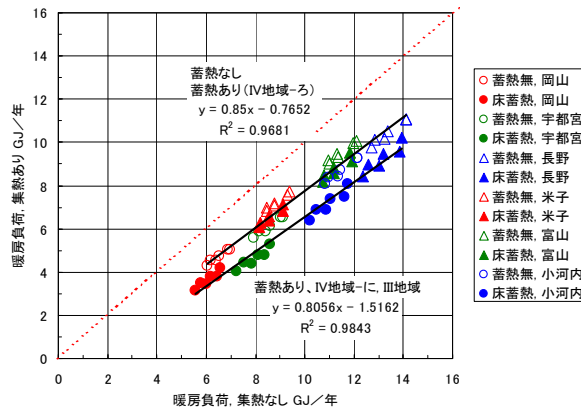


図 2.2.2 集熱行為の有無による暖房負荷の比較 (P<sub>SP</sub> 地域区分による回帰)

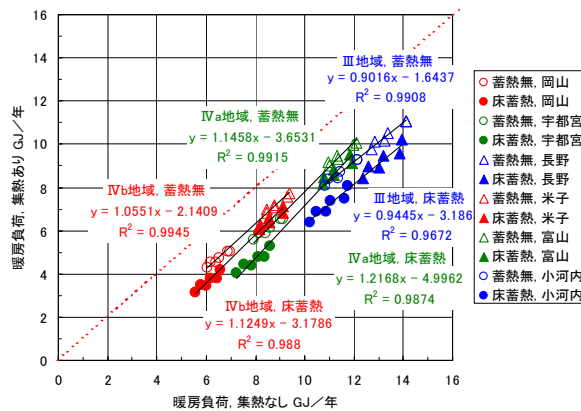


図 2.2.3 集熱行為の有無による暖房負荷の比較 (HDD 地域区分による回帰)

また、集熱行為の効果は蓄熱材料を設けることで高められることが図から確認できるが、その効果を地域毎に見ると、IVa-ろ地域および IVb-ろ地域における年間暖房負荷は、蓄熱材料がない場合と殆ど変わらない一方で、III 地域では、PSP の地域によらず蓄熱の効果が現れていることが読み取れる。

## 2) 蓄熱（熱容量の付加）による暖房負荷削減効果

温暖地における自立循環型住宅では、太陽熱利用において有効な蓄熱容量として 120kJ/m<sup>2</sup>K の熱容量を付加することを推奨している。そこで、蓄熱容量を付加することによって、暖房負荷がどの程度削減されるか、改めて確認を行った。熱容量の付加は床面に対して行い、全ての床の室内側にコンクリート 60mm (120kJ/m<sup>2</sup>K の熱容量に相当) を付加して計算した。

暖房負荷の比較結果を図 2.2.4 および図 2.2.5 に示す。蓄熱による効果は集熱行為の有無によって異なっていることが伺える。集熱行為を実施した場合、日射取得熱の多いは地域は、ろ地域よりも暖房負荷が少なくなる傾向にあることが確認できる。一方、集熱行為を行わない場合は、暖房負荷に地域による差は見られず、回帰直線の傾きも 1.0 に近いことから、蓄熱容量の付加は、集熱行為と組み合わせることによって効果が得られると考えられる。

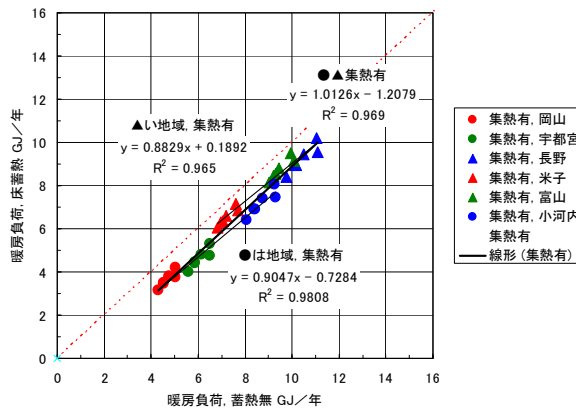


図 2.2.4 蓄熱による暖房負荷削減効果(集熱行為あり)

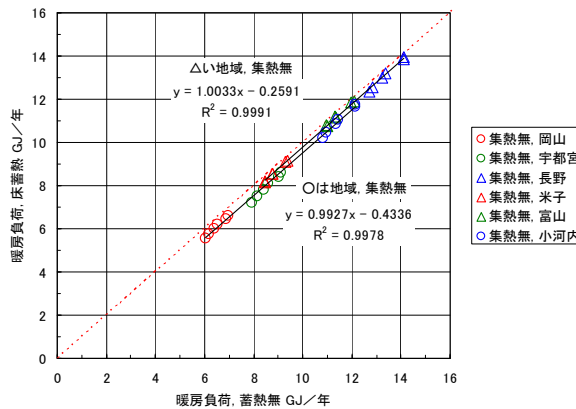


図 2.2.5 蓄熱による暖房負荷削減効果(集熱行為なし)

### 3) 開口部の仕様による暖房負荷の差異

開口部の断熱性能を向上させた場合の暖房負荷の削減効果を図 2.2.6 に示す。横軸は開口部の U 値が  $4.65\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  である場合の暖房負荷、縦軸は断熱性能を向上させた場合の暖房負荷である。この図から、開口部の断熱性能を向上させた場合の暖房負荷削減効果は、H DD 地域区分ならびに PSP 地域区分によらず、仕様ごとに 1 つの回帰式で表現できることが確認できる。さらに、断熱性能が同一である場合は普通複層ガラスよりも遮熱複層ガラスの暖房負荷の方が大きくなっていることがわかる。これは、遮熱ガラスにより日射取得熱が小さくなることで、普通複層ガラスに比して暖房負荷が大きくなったことに起因すると考えられる。ガラスの仕様による暖房負荷の差異を図 2.2.7 に示す。この図からも、遮熱複層ガラスの暖房負荷は普通複層ガラスよりも大きく、地域によらず同様の傾向にあることが確認できる。

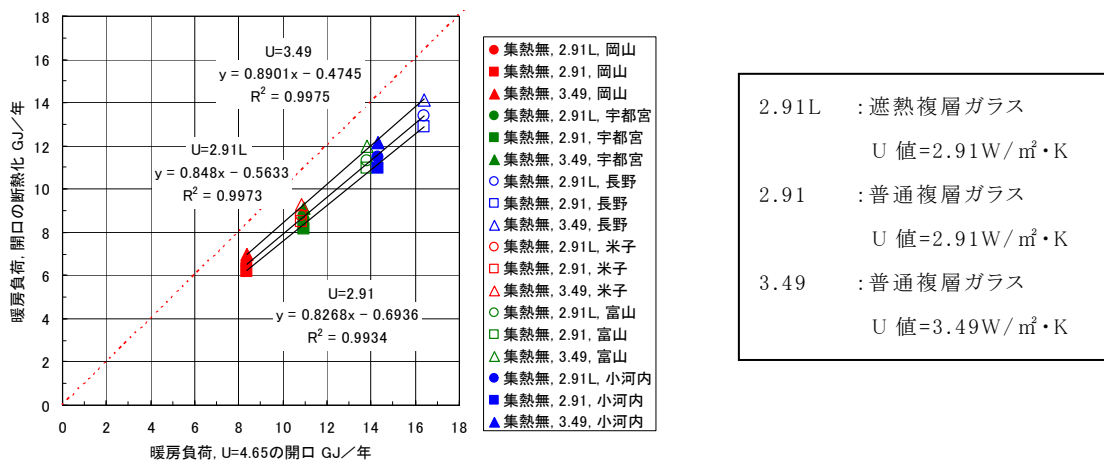


図 2.2.6 開口部の断熱仕様による暖房負荷の差異

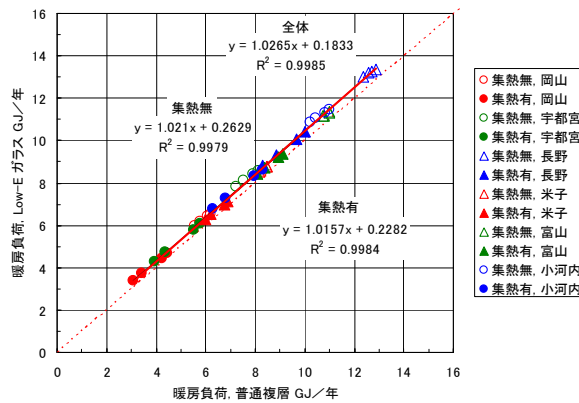


図 2.2.7 ガラスの仕様による暖房負荷の差異

#### 4) 方位角および日照時間による暖房負荷の差異

日照障害がない条件下において、集熱開口部の方位が真南から15°、および30° 東へ振れた場合の暖房負荷を図 2.2.8 および図 2.2.9 に示す。集熱開口部が真南に面している場合に比して、15° 振れた場合はおよそ 3%、30° 振れた場合にはおよそ 6%暖房負荷が大きくなっており、地域によらず同様の傾向にあることが確認できる。

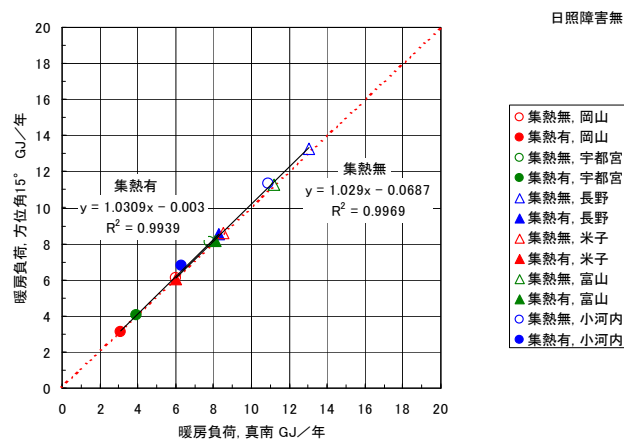


図 2.2.8 方位角の暖房負荷への影響(方位角 15°、日照障害なし)

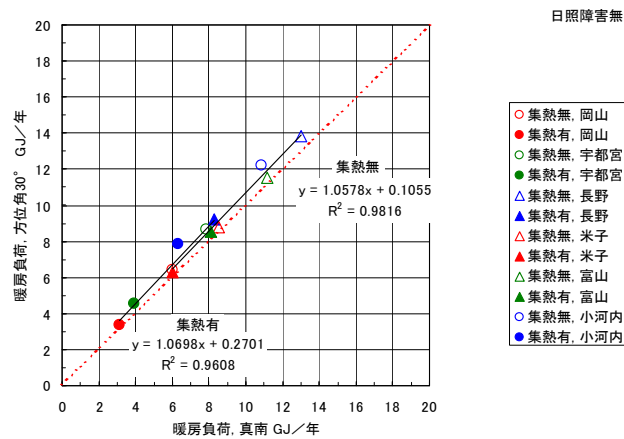


図 2.2.9 方位角の暖房負荷への影響(方位角 30°、日照障害なし)

日照時間 5 時間における、各方位角の暖房負荷を図 2.2.10、図 2.2.11 に示す。回帰直線の傾きは 1.0 に近づいているが、日照障害がない場合に比して切片が大きく、日照時間が少なくなることで暖房負荷が全体的に大きくなっていることが伺える。

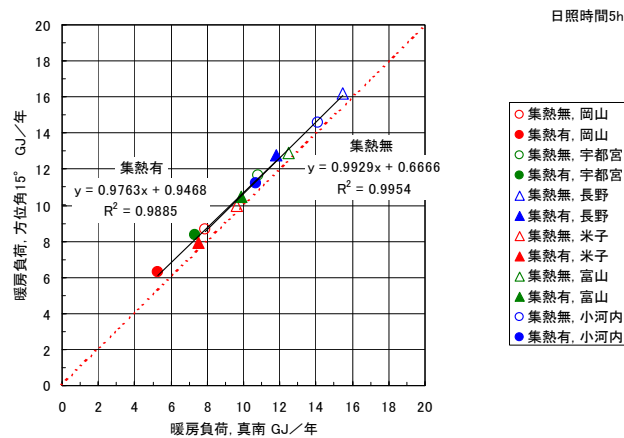


図 2.2.10 方位角の暖房負荷への影響(方位角 15°、日照 5 時間)

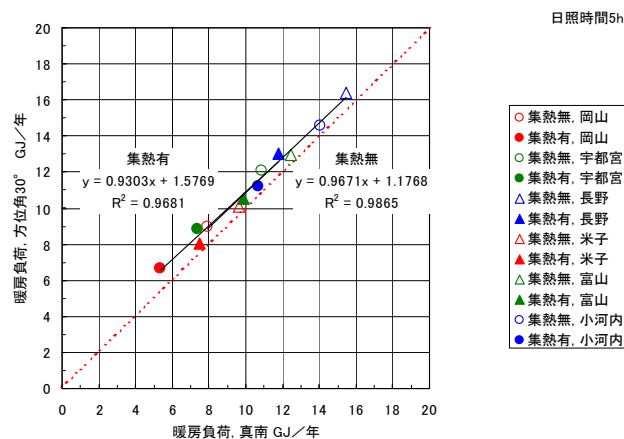


図 2.2.11 方位角の暖房負荷への影響(方位角 30°、日照 5 時間)

日照時間が 3 時間の場合、図 2.2.12、図 2.2.13 に示すように、回帰直線の傾きが 1.0 を超えていることに加え、切片が日照時間 5 時間の条件よりも大きくなっていることが確認できる。

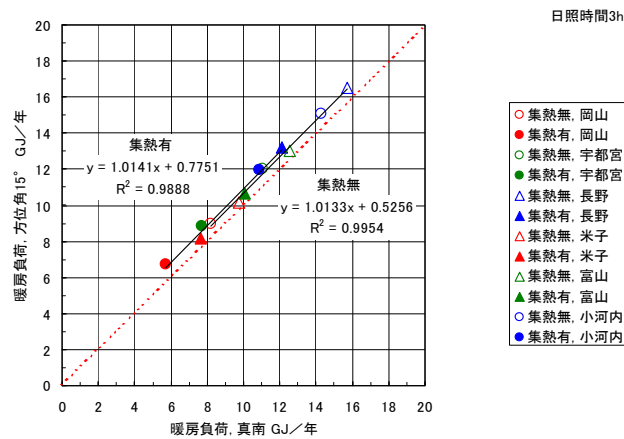


図 2.2.12 方位角の暖房負荷への影響(方位角 15°、日照 3 時間)

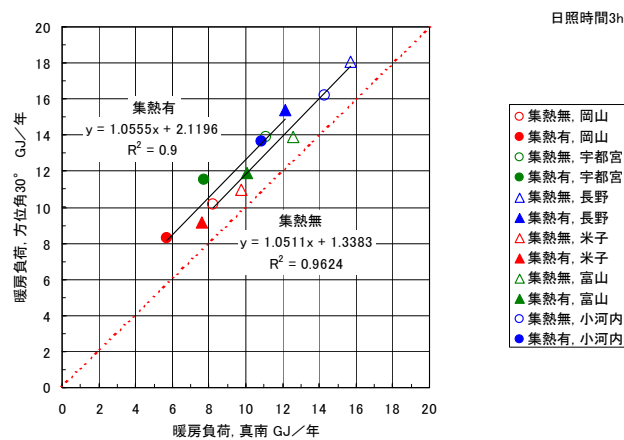


図 2.2.13 方位角の暖房負荷への影響(方位角 30°、日照 3 時間)

### (3) まとめ

AE-Sim/Heat を使用した数値計算により、日射熱を積極的に利用する場合の建物仕様に関する感度分析を実施した。その結果、集熱行為と蓄熱建材の採用が暖房負荷削減に対して比較的大きな効果をもつことが確認された。特に、蓄熱建材は太陽熱の積極的な利用を前提として採用することが重要であることが確認された。

## 2.2.3 暖房負荷削減に関する実証実験

前項で示されたシミュレーション結果を実証することを目的として、岐阜県恵那市に建設された住宅において暖房に係るエネルギー消費量の測定を実施した。今回の実験では特に、集熱行為による暖房負荷削減効果の確認、蓄熱建材の有無による暖房負荷の差異に関する調査、および日照時間が短い場合における暖房エネルギー増加の度合いの確認を実施した。

### (1) 実験対象住宅

実証実験は、岐阜県恵那市に建設された木造軸組構造の戸建住宅にて実施した。集熱行為

による暖房エネルギー削減効果および日照障害による暖房エネルギー増大に関する実験は、図 2.2.14 に示す土壁住宅で実施した。この住宅には蓄熱建材として壁の室内側に厚さ 63mm の土壁が施されている(図 2.2.15)。延床面積は 120.5m<sup>2</sup>、熱損失係数(Q 値)は 1.35W/m<sup>2</sup>K である。



図 2.2.14 土壁住宅外観



図 2.2.15 土壁住宅内観

また、蓄熱建材の有無による暖房エネルギーの差異に関する実験は、図 2.2.16 に示す K 邸離れで行った。当該住宅には図 2.2.17 に示すように、南面の開口付近に蓄熱体が敷設されている。表面は御影石で仕上げられ、この下にコンクリートブロックが積まれている。延床面積は 99.4m<sup>2</sup>、Q 値は 2.0W/m<sup>2</sup>K である。



図 2.2.16 K 邸離れ外観



図 2.2.17 K 邸離れ内観

## (2) 実験条件

### 1) 集熱行為の効果の検証（土壁住宅）

日射熱の取得条件と暖房エネルギーとの関係を確認するため、集熱開口部からの日射取得を変化させて実験を行った。窓面を透過する日射量の調整は、窓の室内側に設置された断熱スクリーンを用いることとした。昼間にスクリーンを全開にして日射熱を取り入れる場合（全開）と、終日スクリーンを閉じて日射を遮った場合（全閉）、日照障害を模擬するために 10 時～13 時の間のみスクリーンを開け、それ以外はスクリーンを閉じる場合（日照 3 時間）の 3 つのケースについて、暖房に係るエネルギーを測定した。設定温度は 20℃とし、暖房スケジュールは 6 時～10 時および 16 時～23 時とした。暖房は図 2.2.17 に示すように電気ファンヒータを使用し、温度成層ができないようにサーキュレータを用いて室内空気を攪拌した。このときの室内における消費電力量を暖房エネルギーとした。測定期間は各ケース共 2 週間とした。



図 2.2.18 暖房用ファンヒータ

### 2) 蓄熱による効果（K邸離れ）

蓄熱体の有無による暖房エネルギー消費の差異を確認するため、図 2.2.18 の蓄熱部位を露出した場合（蓄熱あり）と、断熱材で表面を覆い蓄熱を無効にした場合（蓄熱なし）で、暖房に係るエネルギーを比較した。暖房のスケジュールや設定温度は 1)と同様である。測定期間は各ケース共 2 週間とした。



### (3) 実験結果

#### 1) 集熱行為による効果（土壁）

各実験ケースにおける測定期間から外気温が類似している部分を抜き出し、図 2.2.19～図 2.2.21、および表 2.2.3 に示す。外気温を見ると、全開のケースでは 3 日間とも同じように推移しているが、全閉のケースでは 3 日目の夜間が高い一方、日照 3 時間のケースでは 1 日目が高くて、3 日目は全体的に低くなっていることが確認できる。室温(床上 1,200mm)は、全開のケースと日照 3 時間のケースで同様の推移となっているが、全閉のケースでは全体的に低くなっていることが確認できる。暖房用として 2,000W のヒータを準備したものの、暖房能力が不足していたと考えられる。

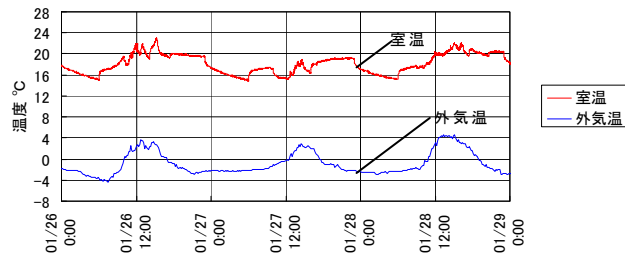


図 2.2.19 室温および外気温の推移(全開)

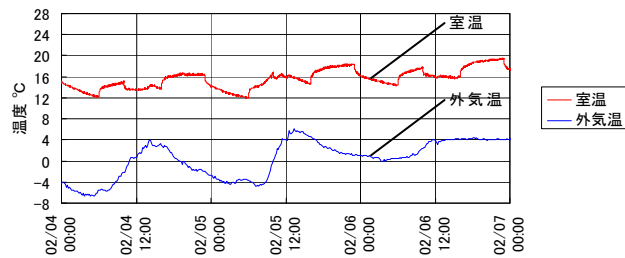


図 2.2.20 室温および外気温の推移(全閉)

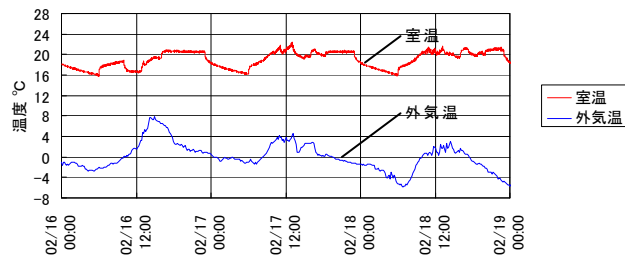


図 2.2.21 室温および外気温の推移(日照 3 時間)

表 2.2.3 各実験ケースにおける外気温

	平均気温	最高気温	最低気温
全開 (1/26-29)	-0.87	4.7	-4.4
全閉 (2/4-6)	0.34	6.1	-6.7
日照 3h (2/16-18)	0.03	7.8	-5.9

単位 : °C

このときの暖房に係るエネルギー消費量の測定結果を表 2.2.4 に示す。全開のケースと日照 3 時間のケースのエネルギー消費が同等となっているが、全開のケースの 2 日目において、昼間の外気温が低いことから日射量が十分得られなかったことが考えられ、そのため 2 日目の消費エネルギーが増大し、結果として日照 3 時間のケースの暖房エネルギーと同等となったことが考えられる。全開のケースの 2 日目における消費エネルギーが 1 日目、3 日目と同等であったと仮定すると、日照 3 時間のケースよりもエネルギー消費が小さくなると思われる。したがって、暖房に係るエネルギーの削減のためには日射熱を積極的に取り入れることが肝要であるといえる。

表 2.2.4 各ケースにおける消費エネルギー

	1日目	2日目	3日目	平均
全開	36.7	42.3	36.4	38.4
全閉	44.9	41.0	44.6	43.5
日照3h	39.2	35.2	37.7	37.4

単位：kWh

## 2) 蓄熱による効果 (K邸離れ)

各実験ケースにおける測定期間から外気温が類似している部分を抜き出し、図 2.2.22～図 2.2.25、および表 2.2.5 に示す。蓄熱なしのケースで、1 日目に室温および外気温が蓄熱のある場合に比して低くなっているものの、室温および外気温の推移、窓を透過した日射量の推移は両ケースとも概ね同様となっていることが確認できる。

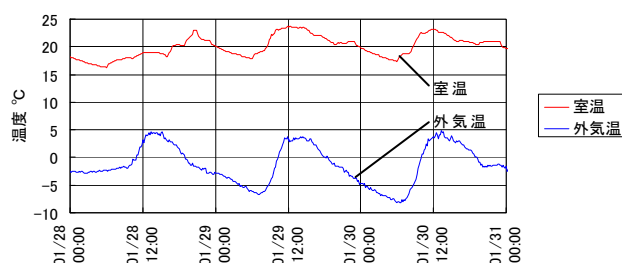


図 2.2.22 室温および外気温の推移(蓄熱あり)

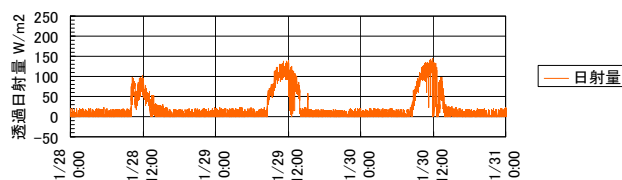


図 2.2.23 透過日射量の推移(蓄熱あり)

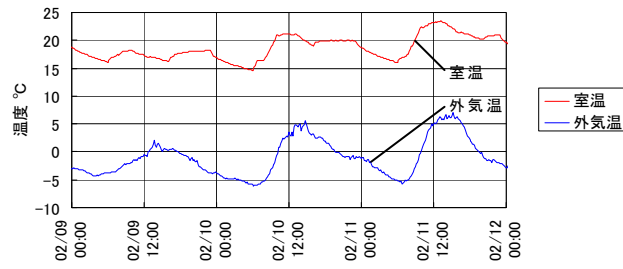


図 2.2.24 室温および外気温の推移 (蓄熱なし)

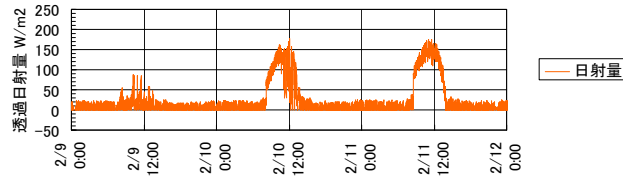


図 2.2.25 透過日射量の推移 (蓄熱なし)

表 2.2.5 各ケースにおける外気温

	平均気温	最高気温	最低気温
蓄熱あり (1/28-30)	-1.28	4.9	-8.1
蓄熱なし (2/9-11)	-1.01	7.1	-6.1

単位：℃

このときの暖房に係るエネルギー消費量の測定結果を表 2.2.6 に示す。蓄熱建材を敷設した場合、蓄熱がない場合に比して、暖房に係るエネルギーが 2 割程度少なくなっていることを確認できる。日射熱の取得もさることながら、室内に取り入れた熱を蓄えることも重要であることが、この結果から伺える。

表 2.2.6 各ケースにおける消費エネルギー

	1日目	2日目	3日目	平均
蓄熱あり	17.2	13.3	20.0	16.84
蓄熱なし	23.3	23.3	13.5	20.04

単位：kWh

#### (4) まとめ

シミュレーションで得られた結果の検証のため、実住宅における暖房実験を実施した結果、数値計算と同様に、積極的な日射熱取得や蓄熱によって、暖房にかかるエネルギーを削減することができることが確認された。

## 2.3 吹抜け空間の室内環境に関する検討

### 2.3.1 はじめに

近年の住宅で多く採用される空間構成として、吹抜けを介した LDK と階段室や寝室との一体化が挙げられるが、通風経路や採光面の確保等への寄与に対し、暖房エネルギーの増加やコールドドラフト等の問題が指摘されている<sup>1)、2)</sup>。特に不均一な温熱環境は、隣室条件、生活スタイルによって大きく異なり、設備計画もこれらを勘案すべきであるが、経験則に基づいた設計法や対策が採られているのが現状である。

そこで本検討では、吹抜け空間の温熱環境に関する実験的検討を行うとともに、室内環境全般に対する現状把握と課題抽出を目的としたアンケート調査を行った。なお、温熱環境に関する実験については既往の実験結果<sup>1)</sup>を一部引用したうえで、追加検討を行った。

### 2.3.2 実大実験棟における吹抜けの温熱環境の検討

#### (1) 吹抜け空間の温熱環境の測定結果<sup>注)</sup>

既往研究では、人工気象室内に建設された吹き抜けを有する鉄骨 ALC 造 3 階建ての戸建実験住宅(図 2.3.1 参照、Q 値= 2.8 W/m<sup>2</sup>K)において、暖房時の吹抜けの温熱環境の測定が行われている。表 2.3.1 に検討ケースを示す。測定対象は南側の 1~2 階の吹抜け部分で、外気温度は 6℃一定、1、2 階の居間以外の空間と 3 階は非空調となっている。エアコンの仕様は 1 階が 6.7kW、2 階が 3.6kW の定格容量(暖房時)、床暖房はガス温水式である。

図 2.3.2 は実験を開始し温度が安定してからの温度と風速の上下分布である。計測ポイントは図 2.3.1 に対応しており、D1 がリビング階段上り口付近の結果である。Case3 が床暖房のみ、Case4 が 1 階のエアコンを運転した際の結果であるが、床暖房の有無にかかわらず足元付近(床上 100mm)の空気温度が低いうえ、風速 0.4m/s もの気流が生じている。

#### (2) 吹抜け空間の保温性能の測定

前述した既往の測定結果では 0.4m/s ものドラフトが生じていたが、吹抜け空間の断熱性に対し暖房機器容量の不足が懸念されるため、吹抜けを介して繋がる暖房領域全体の保温性能を測定した。測定方法は、電気ヒーターにより室内を加熱するとともに、空間内に温度差が生じないようにファンにより攪拌し、内外温度差と加熱量より空間全体の保温性能を算出する。暖房領域は前節の実験と同様、図 2.3.1(d)に示す空間で廊下や 2 階の階段室に繋がる扉は閉とした。保温性能の測定結果を表 2.3.1 に示す。保温性能は住宅の熱損失係数と同様に、加熱量を内外温度差と床面積で除した値である。ただし、吹抜け空間のため床面積の設定を 3 水準設けて保温性能を算出した。測定時は加熱量 3.8kW で内外温度差が約 22K 生じており、保温性能は吹抜け部分の床面積を加えた条件 3 で 3.5W/m<sup>2</sup>K であった。1 階のエアコンの暖房能力は定格で 6.7 kW であり、測定結果を勘案すると吹抜けを介した 1 階のエアコンだけでも 1、2 階の空間を暖房

するには十分な能力を有すると言えよう。しかし図 2.3.2 の 2 階床付近(H1)の温度は低く、空間構成や暖房設備の配置の影響で温度ムラが生じており、吹抜け空間特有のドラフトを発生させる要因になったと推測できる。

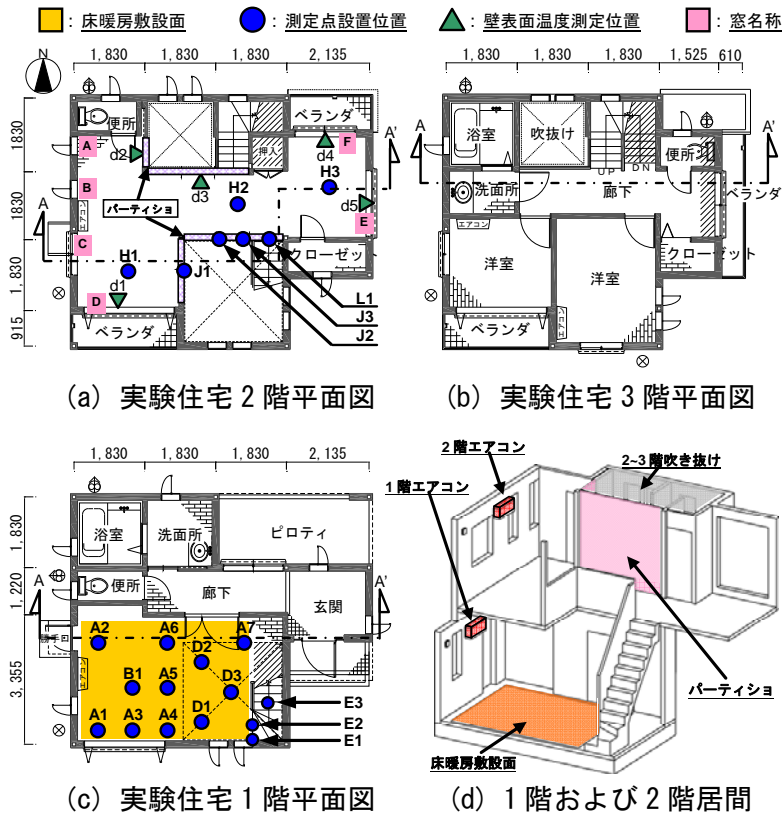


図 2.3.1 実験住宅平面図及び暖房機器設置位置 1)より引用

表 2.3.1 検討ケース

ケース	エアコン設定温度 [°C]		床暖房 運転設定	備考
	1階	2階		
Case3	—	—	強	再実験
Case4	20	—	—	
Case5	20	—	強	
Case6	—	20	強	
Case7	20	20	強	追加実験
CaseA	20	20	—	
CaseB	20	16	—	
CaseC	—	16	強	
CaseD	—	20	弱	
CaseE	20	20	弱	

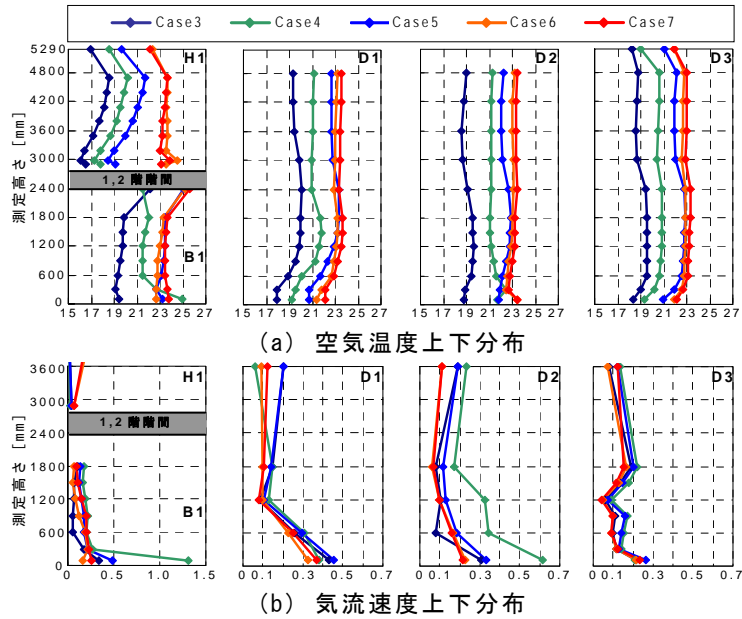


図 2.3.2 吹抜きの温度及び風速分布<sup>文献 1)より引用</sup>

表 2.3.2 空調領域の保温性能測定結果

分類	項目	結果	単位
建物条件	条件 1 (1F 面積のみ)	18.98	m <sup>2</sup>
	条件 2 (1F、2F 延床面積)	41.58	
	条件 3 (1F、2F 延床面積[吹抜け含む])	49.12	
測定結果	加熱量	3879	W
	室内温度	28.4	°C
	外気温度	6.0	°C
	内外温度差	22.4	K
	総括熱貫流率	173.0	W/K
保温性能	条件 1 (1F 面積のみ)	9.1	W/m <sup>2</sup> K
	条件 2 (1F、2F 延床面積)	4.2	
	条件 3 (1F、2F 延床面積[吹抜け含む])	3.5	

### (3) 暖房時の気流性状の可視化

メタルハライドランプを用いた非レーザー可視化装置を用いて、1階リビングにおける暖房時の気流性状把握を試みた。実験は1階エアコン、1階床暖房、1階床暖房+2階エアコンの3ケースの暖房方式について行った。測定時の上下及び水平方向の温度分布を図 2.3.3、図 2.3.4 に、床付近の風速分布を図 2.3.5 に示す。

1階エアコンのみでは1・2階床付近の温度が18°Cを下回っている箇所があり、床暖房でも2階の温度は低い(図 2.3.3、図 2.3.4)。図 2.3.5 の風速分布は階段付近の値が高く、リビング階段を経由したドラフトの影響と考えられる。図 2.3.6 は1階床上100mmの平均ベクトルと流線(評

備時間:20 秒)である。1 階床暖房のケースでは階段降り口からの気流が顕著に表れており、図の右斜め下への流れが生じている。1 階エアコン運転時は、吹出しの影響を受け写真中央で階段からのドラフトと衝突し渦が生じている。

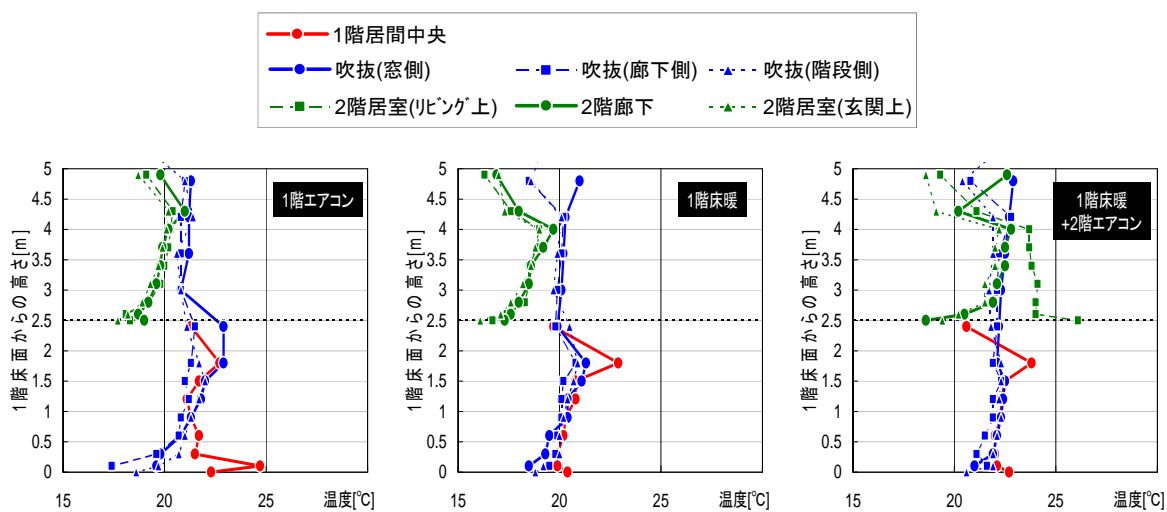


図 2.3.3 測定時の上下温度分布

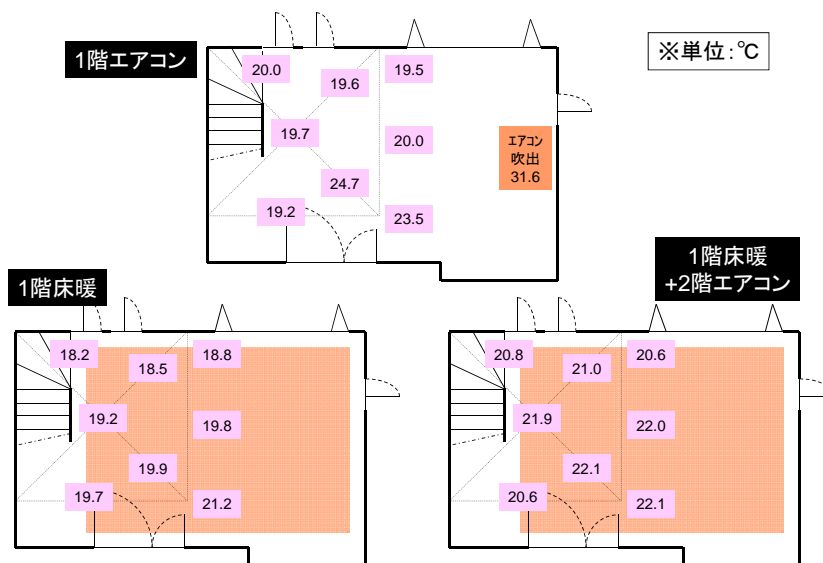


図 2.3.4 測定時の床付近温度分布

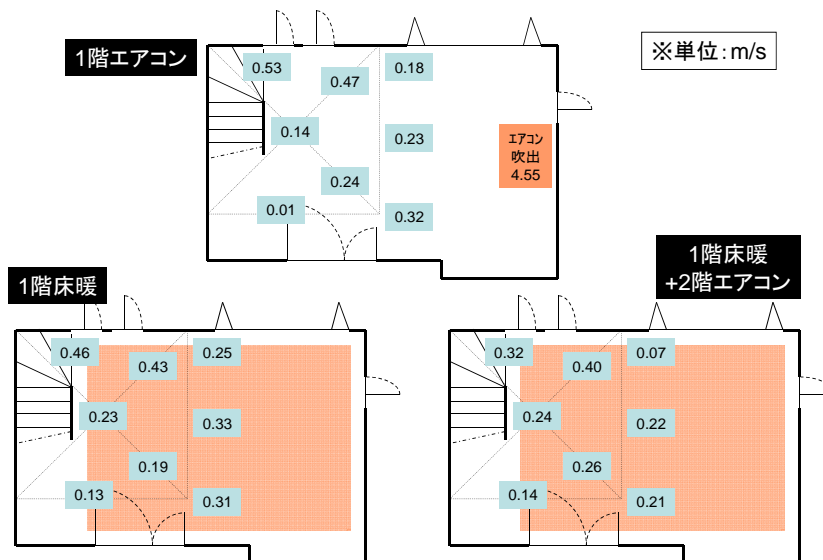


図 2.3.5 測定時の床付近風速分布

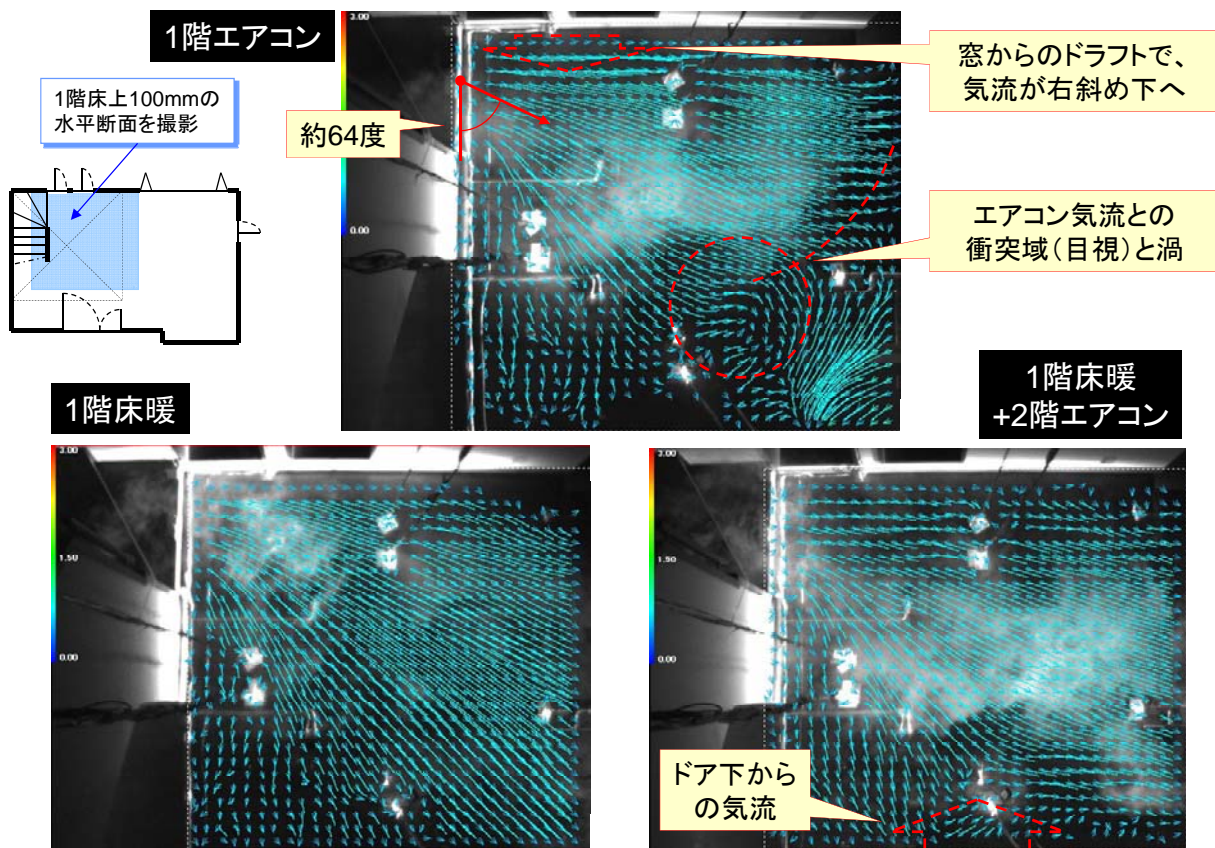


図 2.3.6 暖房時の平均ベクトルと流線(評価時間:20 秒)

#### (4) 暖房機器別のコールドドラフトと空調エネルギーの関係<sup>注)</sup>

暖房機器の組合せや設定温度別の実験で得られた、リビング階段(図 2.3.1 参照)の風速と空気温度を図 2.3.7 に示す<sup>1)</sup>。各種条件は前出した図 2.3.2 と同じであるが、エアコンの設定温度や床暖房の強弱にバリエーションを設けている。加熱源が 1 階のみとなる Case3~Case5、2



階エアコンの設定温度が低い CaseB、C では気流速度が 0.3m/s を越えている。一方、2 階エアコンを 20℃設定で運転した条件では風速が小さく、2 階も適度に暖め上下温度差を小さくすることが、吹抜け空間のドラフト緩和に有効であることが示されている。

図 2.3.8 は電力及びガス消費量から求めた 2 次エネルギー消費量との関係である。1 次エネルギー表示ではないため、エアコンのケースに比べ床暖房使用時の値が大きい。1 階で床暖房の使用を前提とする場合は、2 階エアコンと併用する CaseD が気流速度、エネルギー消費ともに小さく温熱環境とエネルギー効率が良い結果となった。

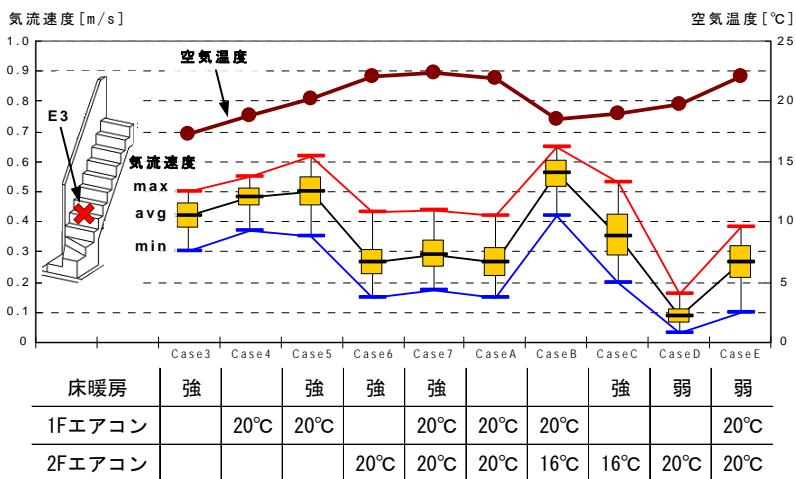


図 2.3.7 測定点 E3 の空気温度および気流 文献 1)より引用

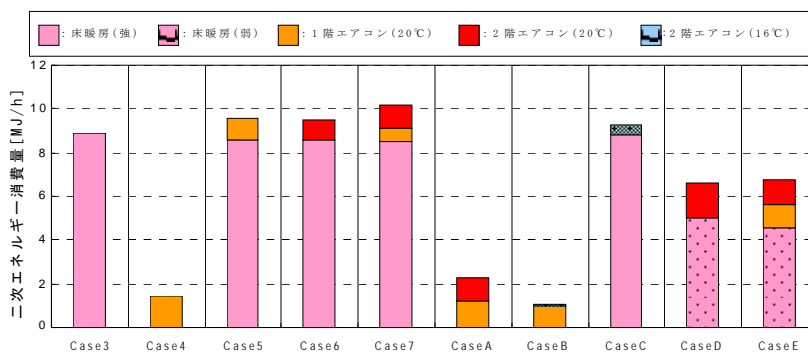


図 2.3.8 二次エネルギー消費量 文献 1)より引用

### 2.3.3 吹抜け空間の環境性能に関するアンケート調査

#### (1) アンケート調査の概要

アンケートはインターネットを利用した二段階調査で、予備調査は 2011 年、本調査は 2012 年冬期に実施した。調査対象は民間調査会社に登録されている一戸建の複数人世帯で、建設地域、吹抜けの有無や平日の在室時間を予備調査で確認した。調査概要を表 2.3.3 に示す。本調査では予備調査の結果より、吹抜けの有無や建設地域の標本数にバラツキが生じないように配慮したうえで、表 2.3.3 の条件に適合する世帯を抽出し回答を依頼した。

本調査の主な調査項目は、建物属性(吹抜けのタイプも含む)、光環境、暖冷房及び通風時の温熱環境、設備機器及び容量等である。なお、室内環境の調査項目はリビングを対象としており、本報における「吹抜け」はリビング吹抜けを意味する。

表 2.3.3 調査概要

実施時期	予備調査:2011年2月8日～2月14日 37963件 本調査:2012年1月24日～1月30日 251件
方法	インターネット利用 二段階調査
対象者	予備調査
	本調査

(2) 予備調査における吹抜けの採用状況

図 2.3.9、図 2.3.10 に予備調査の回答より得られた吹抜けの採用状況を示す。なお、予備調査における建物は「木造」が 73.2%であり、「平日在宅」の回答者は 49.8%であった。「リビングに吹抜けあり」と回答した全国平均は 7.9%であり、北海道、東北は 10%以上と高く、関東、近畿、中国はおおよそ 7%以下と低い(図 2.3.9)。一方、年代別に整理すると(図 2.3.10)、吹抜けの採用状況は建設年代が新しい程高く、平成 18 年以降は東京に限っても 14%と近年は増加傾向であることが判る。

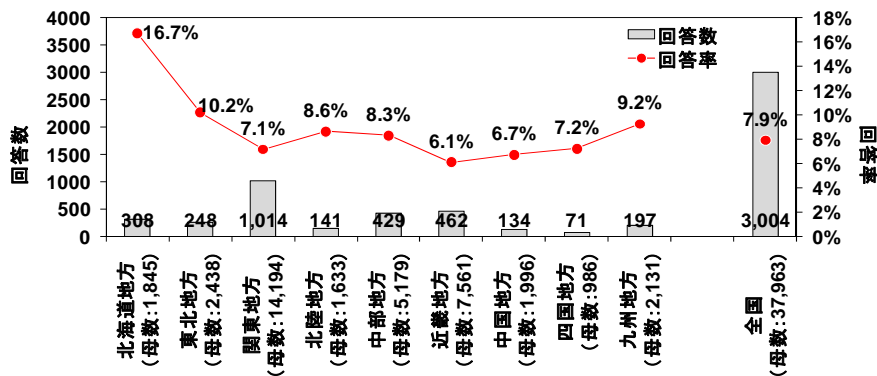


図 2.3.9 吹抜けの採用状況 (地域別)

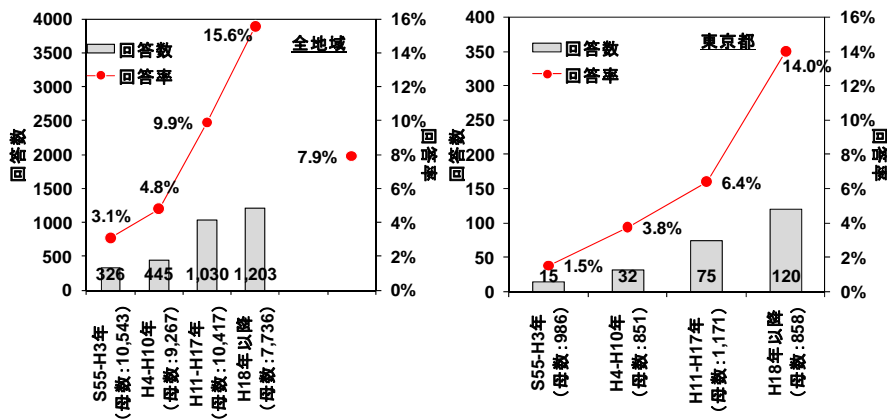


図 2.3.10 リビング吹抜けの採用状況 (建設年代別)

### (3) 本調査の分析結果

#### 1) 建物及び居住者の概要

図 2.3.11 に本調査における建物及び居住者の概要を示す。建設地域は予備調査に基づき回答者を選別したため、表 2.3.3 で示した地域 1～3 の標本数は同程度となっている。ただし、地域 1 は北海道が回答者の半分を占めており、地域 1 の結果を分析する際は寒冷地の回答者の影響が大きい結果となる点に注意が必要である。階数は 2 階が 93%、工法は 78%が木造であり、一般的な戸建住宅が大半を占める。吹抜けの有無と平日在宅率(週 3 回以上)はおおよそ半々となっている。また、図は省略しているが建物仕様を「高断熱」と回答したものが 73%、「高气密」が 63%となっている。

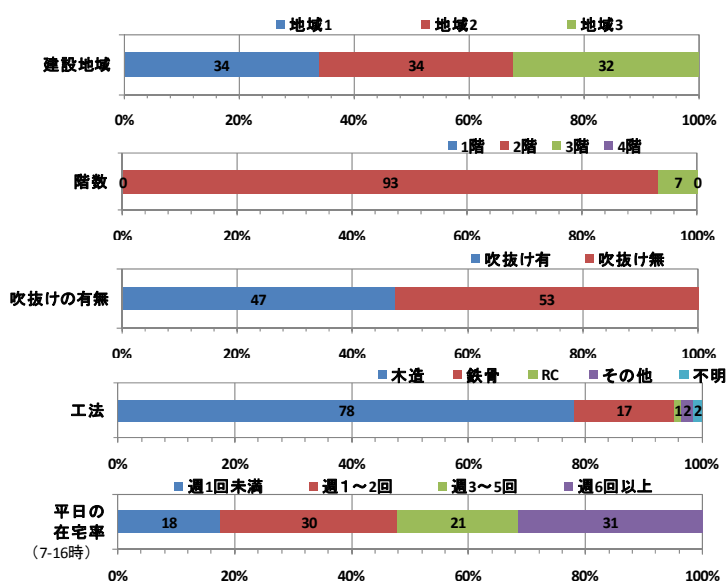


図 2.3.11 建物及び居住者の概要

#### 2) 暖房時の温熱環境

暖房時の温熱環境については、前節で検討した部分暖房時の状況を把握する観点から、標本を「高断熱」、「部分暖房」及び「部分間欠暖房」に限定し分析を行った。「吹抜けあり」に関してはタイプ別に集計した。A、B タイプは吹抜けと階段室が繋がっており、文献<sup>1)、2)</sup>で指摘されているコールドドラフトの発生が懸念されるオープンタイプである。C は階段室が吹抜けから独立しているクローズタイプである。

図 2.3.12 は暖房時の温熱環境に関して、PMV を参考にした 7 段階評価に対する回答である。中立以下(涼しい～とても寒い)を比較すると吹抜けありは約 30%と、吹抜けなしの 3 倍の割合となっている。また、階段室と吹抜けが繋がる A、B タイプでは「寒い」、「とても寒い」が合計 10%程度あり、吹抜けの有無やタイプによる温熱環境の差異が見られる。

図 2.3.13 は、暖房の効きや局部不快感に関する回答である。吹抜けありでは「暖房が効かない」、「床面が冷たい」等の回答が多く、図 2.3.12 と同様に吹抜けのタイプ別では A、B タイプで足元付近の不快感が多い傾向が見られる。

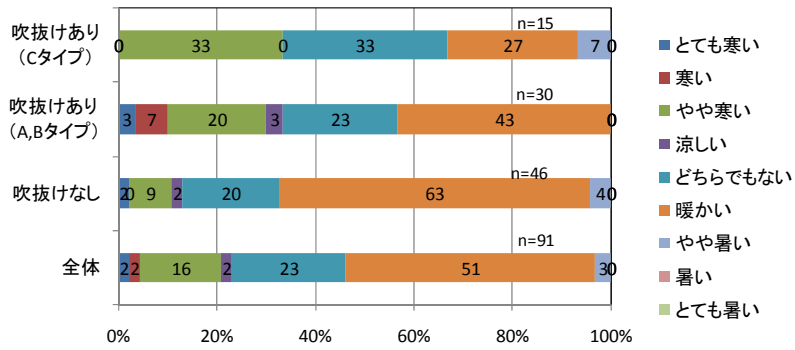


図 2.3.12 暖房時の温熱環境

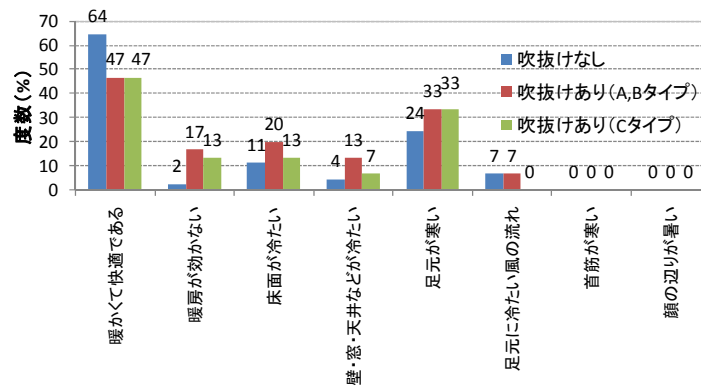


図 2.3.13 暖房時の局部不快感

### 3) 暖房機器の容量

図 2.3.14 はアンケートで得られたリビングで使用する暖房機器の定格容量の積算値と、積算値をリビングに繋がる空間の床面積で除した値を示している。機器容量の積算にあたっては、定格容量の回答が無いもの、セントラル、採暖機器、送風を目的とするもの等は省き、夕方又は夜間に使用すると回答した機器のみを対象とした。また、吹抜けありの床面積は吹抜け部分に床があるものと仮定し、面積を加算している。なお、凡例の Ave は平均値である。吹抜けありの暖房機器容量(図 2.3.14 上)は吹抜けなしと比べやや高めであり、平均も 9.6kW と 2kW 程度高い。しかし、床面積あたりの容量(図 2.3.14 下)では、吹抜けなしが 0.8kW/m<sup>2</sup> を越える回答があるため平均値は大きいものの、頻度分布からは吹抜けの有無で大きな差は見られなかった。

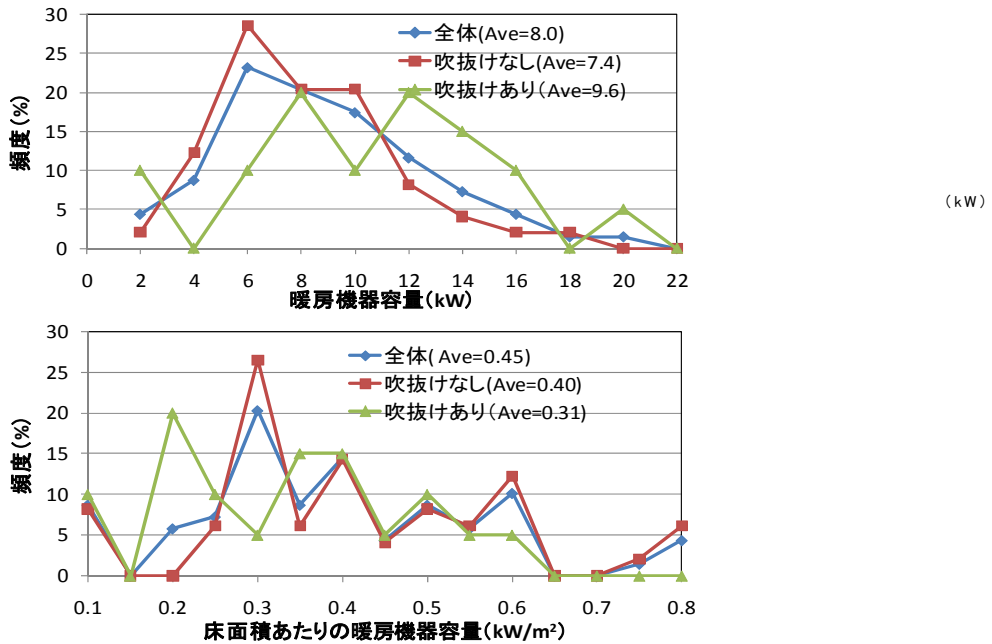


図 2.3.14 リビングの暖房機器容量

#### 4) 居室の空間構成

分析は、リビングに吹抜けを持つと回答したもの(回答数:119)を対象とし、気象条件による違いを把握するために、地方ごとに地域を分類して分析を行った(表 2.3.4)。吹抜け空間は階段の位置によって、図 2.3.15 に示す 3 種類のタイプに分類した<sup>3)</sup>。A は吹抜け内に階段があるタイプ、B はリビングの吹抜け外に階段があるタイプ、C はリビングの外に階段があるタイプである。

表 2.3.4 地域の分類

地域 1 (N=43)	北海道・東北
地域 2 (N=34)	北陸・山陰
地域 3 (N=42)	関東・関西・中部・近畿・中国・四国・九州

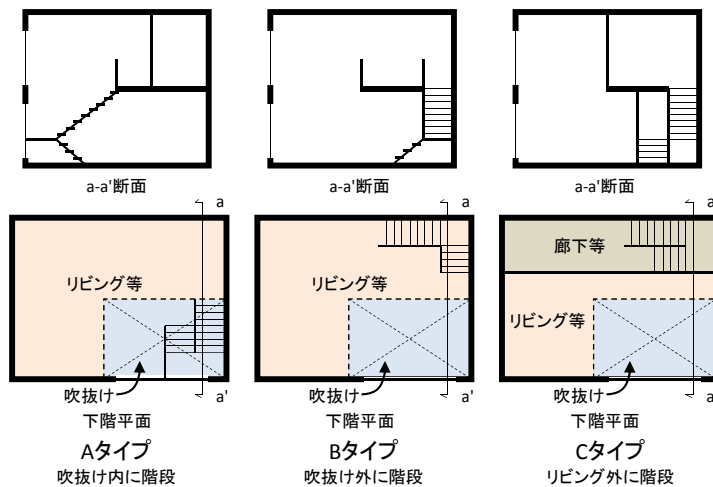


図 2.3.15 階段の位置による吹抜け空間のタイプ分類

吹抜け空間のタイプは A (36%)、B (35%)、C (28%) の順に採用されていた(図 2.3.16)。地域別に見ると地域 1 は C、地域 2 は B が少ない傾向にある。住宅の建築時期は H11 年以降

が半分以上を占めている(図 2.3.17)。なお、地域 1・地域 3 は A、地域 2 は C が増加傾向にあった(データは省略)。吹抜け、及び、吹抜けと連続した空間を図 2.3.18 のように定め、それぞれの面積(畳数)の状況を分析した(図 2.3.19)。吹抜けの下階部分は半数以上が 10 畳程度以上であった。なお、4 畳程度以下の回答も見られたが、リビングの床面積としては小さく、回答者の誤解の可能性が高いため、分析からは除外した。吹抜け部分の回答率が高いのは A が 2 畳以下(23%)、B が 4 畳程度(39%)、C が 6 畳程度(27%)となっており、A の吹抜けが他よりも小さい傾向にあった。上階部分は 6 畳程度以下が過半を占めており、A は 4 畳程度(23%)、B は 6 畳程度(27%)、C は 2 畳以下(33%)の回答が多い。

リビングの主開口は南面に設置されている(図 2.3.20)。ガラスは複層または二重窓、サッシは C を除き半数以上が樹脂・木または複合サッシとなっており、断熱性への配慮がなされていることが伺える(図 2.3.21)。特に、地域 1 の複層ガラス又は二重窓の採用率はほぼ 100%であった。

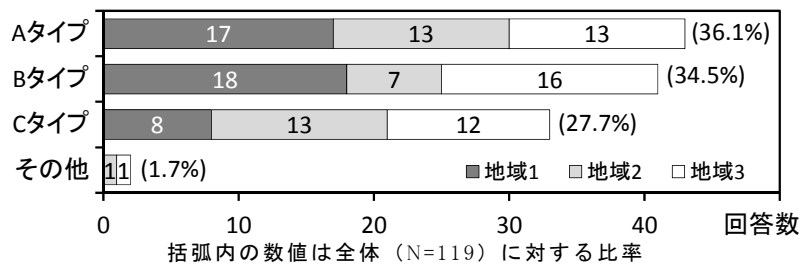


図 2.3.16 吹抜け空間のタイプ

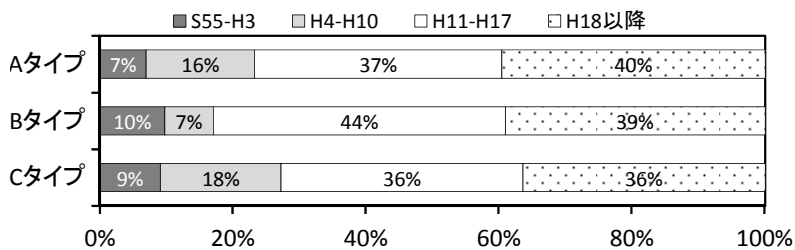


図 2.3.17 吹抜け空間タイプごとの建築時期

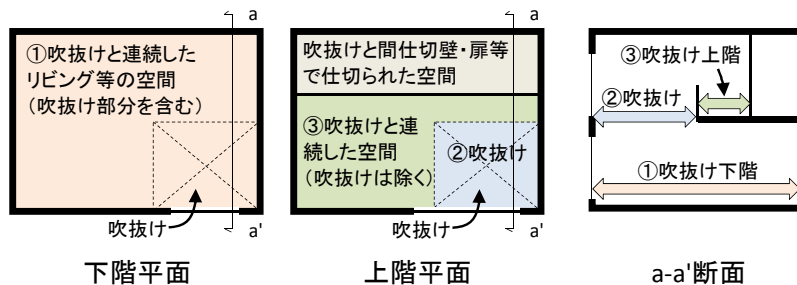


図 2.3.18 吹抜け及び吹抜けと連続した空間の床面積の定義

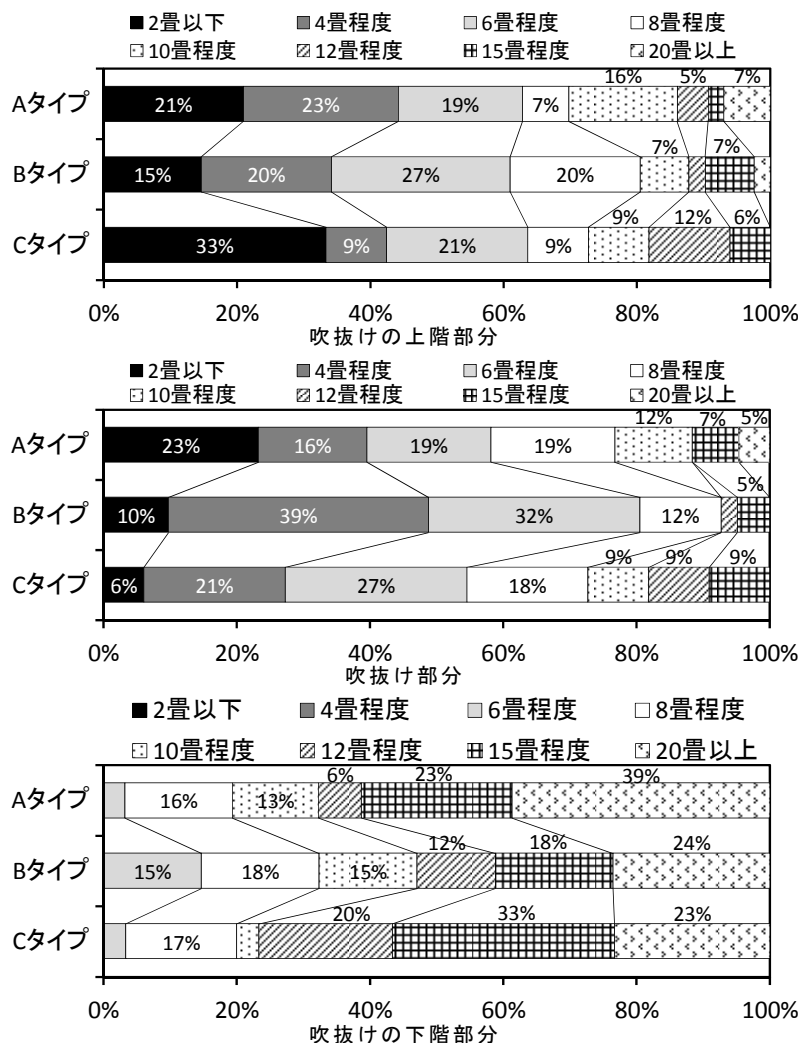


図 2.3.19 吹抜け及び吹抜けと連続した空間の床面積（畳数）

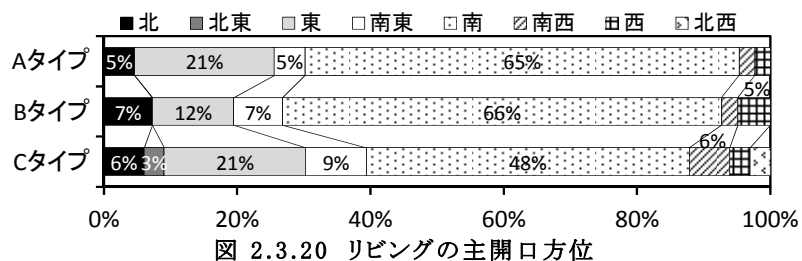


図 2.3.20 リビングの主開口方位

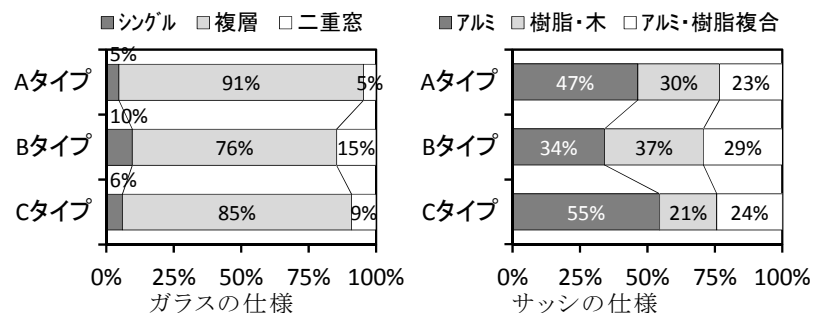


図 2.3.21 リビングの主開口のガラスとサッシの仕様

5) 居室の暖房方式

暖房方式は、吹抜け空間のタイプ(A～C)による違いは無かったので、地域ごとに分析を行った(図 2.3.22)。住宅における暖房運転方式は、地域3では部分間欠が81%を占めるが、地域1・地域2では全館連続または居室連続が基本となっている。表2にリビングで使用している暖房機器を地域別に示した。地域1ではパネルヒーター(33%)、地域2・3ではエアコン(50%・52%)の採用率が高い。また、空気攪拌用のシーリングファンが各地で採用されていた。

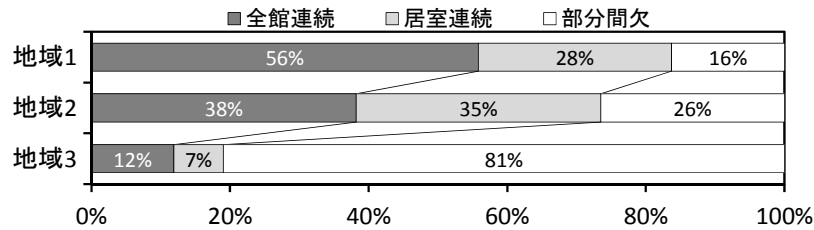


図 2.3.22 暖房運転方式(地域別)

表 2.3.5 リビングで使用している暖房機器(地域別)

暖房機器	地域1	地域2	地域3
セントラル空調	3 (7%)	2 (6%)	2 (5%)
エアコン(1台め)	8 (19%)	17 (50%)	22 (52%)
エアコン(2台め)	0 (0%)	4 (12%)	6 (14%)
ファンヒーター(電気)	1 (2%)	2 (6%)	3 (7%)
ファンヒーター(ガス・石油)	4 (9%)	5 (15%)	10 (24%)
ストーブ(ガス・石油)	1 (2%)	2 (6%)	4 (10%)
FF式ストーブ(ガス・石油)	9 (21%)	4 (12%)	1 (2%)
床暖房	7 (16%)	3 (9%)	7 (17%)
オイルヒーター	3 (7%)	1 (3%)	2 (5%)
パネルヒーター	14 (33%)	3 (9%)	2 (5%)
蓄熱式暖房機	11 (26%)	8 (24%)	4 (10%)
薪ストーブ・暖炉	1 (2%)	4 (12%)	2 (5%)
電気カーペット	3 (7%)	6 (18%)	4 (10%)
電気コタツ	4 (9%)	3 (9%)	7 (17%)
シーリングファン	6 (14%)	5 (15%)	8 (19%)
サーキュレーター	2 (5%)	1 (3%)	2 (5%)

数値は回答数、括弧内は各地域での比率。網掛けは各地域の上位3位(電気カーペット・コタツの採暖器、シーリングファン・サーキュレーターの補機を除く)。



## 6) 人工照明の設置状況及び使用状況

表 2.3.6 に分析対象とした質問項目を示す。No.2～5 は使用頻度の高い 5 つの照明器具について質問しているがここでは最も使用頻度が高い器具について報告する。

図 2.3.23 に吹抜け空間の照明器具数を示す。「5 個以上」と答えている割合は吹抜けありの住宅の方が高い。図 2.3.24 に器具の種類を示す。吹抜けがない住宅では「シーリング」が 70%程度占めているのに対し、吹抜けがある住宅では、「シーリング」が最も多い器具であるが、「ダウンライト」や「ペンダント」、「ブラケット」の使用割合も吹抜けなしの住宅に比べ高い。図 2.3.25 に使用している光源の種類を示す。吹抜けなしの住宅ではシーリングライトの使用が多いことから「管型蛍光灯」の使用も多い。吹抜けがある住宅では、様々な種類の光源が使用されている。

図 2.3.26 に照明を点灯する時間帯を示す。いずれの条件においても吹抜けがある住宅の方が割合は低い。特に朝方でその差が大きい。図 2.3.27 に照明を調光している時間帯を示す。吹抜けがある住宅では調光ができない器具を使用している割合が 50%程度ある。

表 2.3.6 人工照明の設置状況及び使用状況に関する質問項目

No	質問項目	
1	人工照明の 設置状況及び使 用状況	照明器具数(5 肢選択)
2		器具の種類(8 肢選択)
3		光源の種類(7 肢選択)
4		点灯する時間帯(17 肢選択)
5		調光する時間帯(17 肢選択)

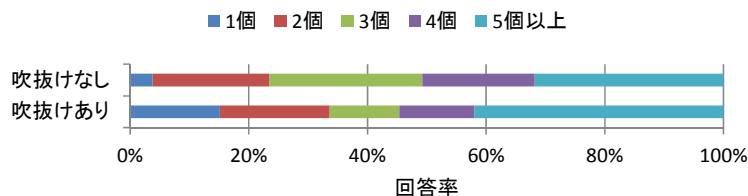


図 2.3.23 設置器具数

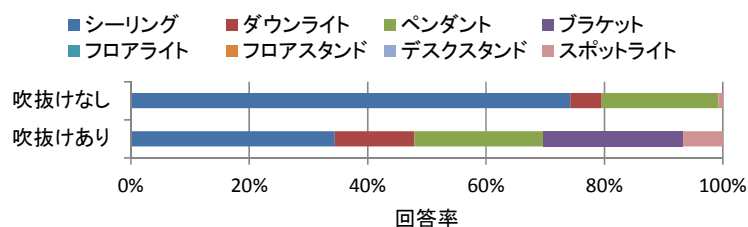


図 2.3.24 器具の種類

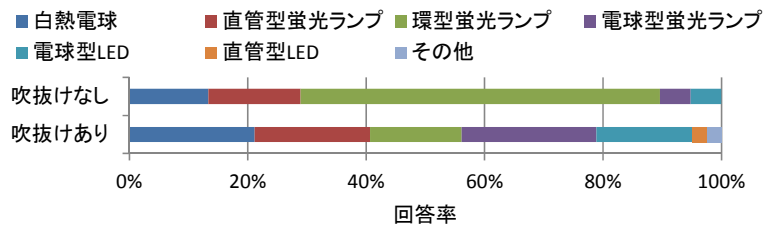


図 2.3.25 光源の種類

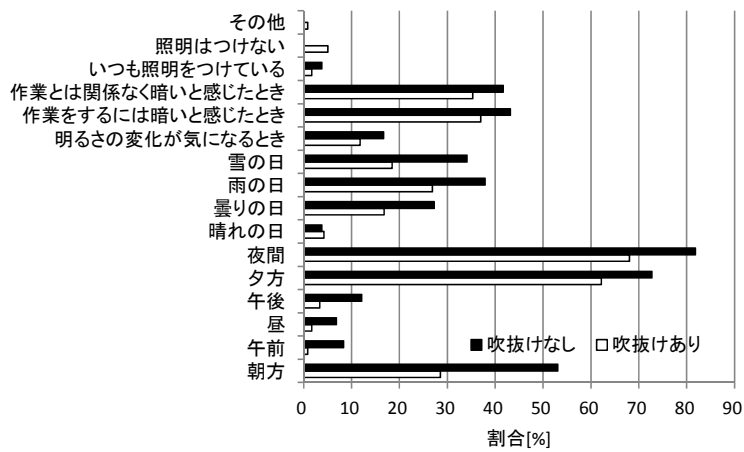


図 2.3.26 照明を点灯する時間帯

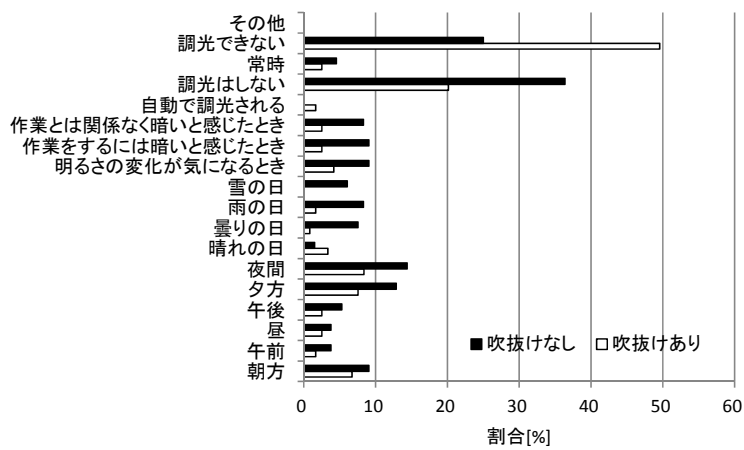


図 2.3.27 照明を調光している時間帯

## 7) 光環境評価の調査結果

表 2.3.7 に分析対象とした質問項目を示す。No.6~9 は朝、昼、夜の時間帯について質問を行っているが、ここでは昼の結果について報告する。

図 2.3.28 に明るさ感の結果を示す。明るさ感の評価は吹抜けがない住宅、ある住宅ともに「明るい」と回答した割合は 60%程度であった。図 2.3.29 に明るさの変化の結果を示す。明るさ感と同様、吹抜けの有無による差は見られない。いずれも「気になる」と回答した割合は 20%程度であった。図 2.3.30 にまぶしさの結果を示す。「気になる」と回答している割合は吹抜けなしの地域 1 で約 50%と高いが、他は 20%以下となっている。図 2.3.31 に開放感の結果を示す。吹抜けなしでは 54%、吹抜け有では 78%で「開放的である」と答えている。吹抜けありでは「閉鎖的である」の回答はなかった。図 2.3.32 に満足度の結果を示す。明るさ感同様に、吹抜け有無による差はなく、ともに 80%程度であった。

表 2.3.7 光環境評価に関する質問項目

No	質問項目
6	明るさ(3 肢選択)
7	明るさの変化(2 肢選択)
8	光環境評価 まぶしさ(2 肢選択)
9	開放感(3 肢選択)
10	満足度(2 肢選択)

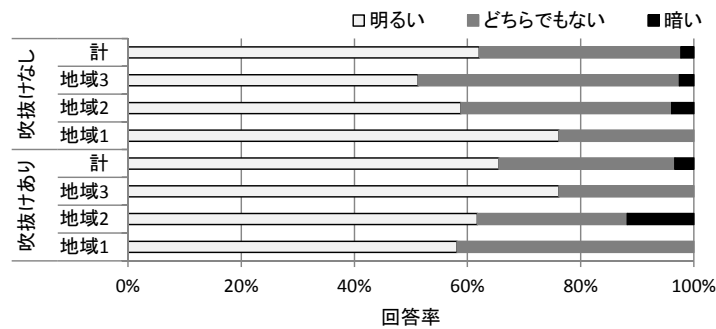


図 2.3.28 吹抜けの有無と明るさ感

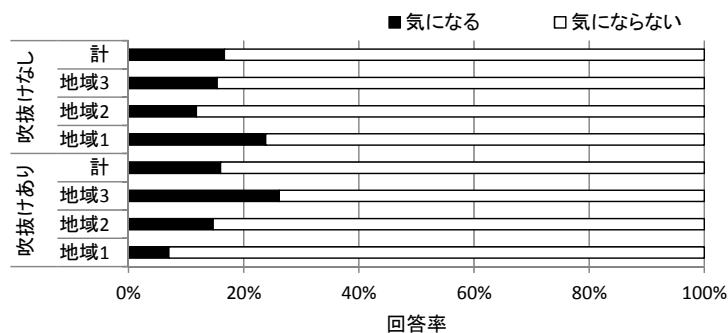


図 2.3.29 吹抜けの有無と明るさの変化

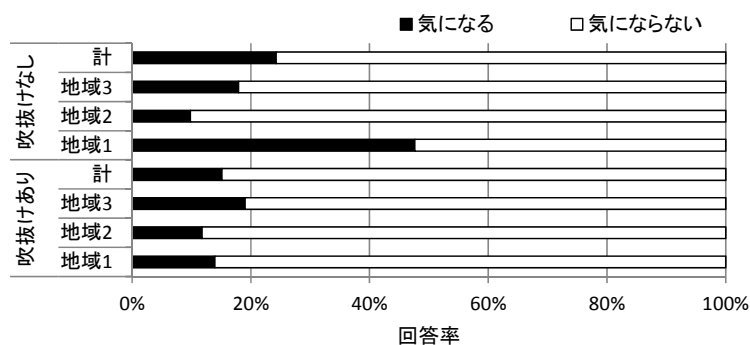


図 2.3.30 吹抜けの有無とまぶしさ

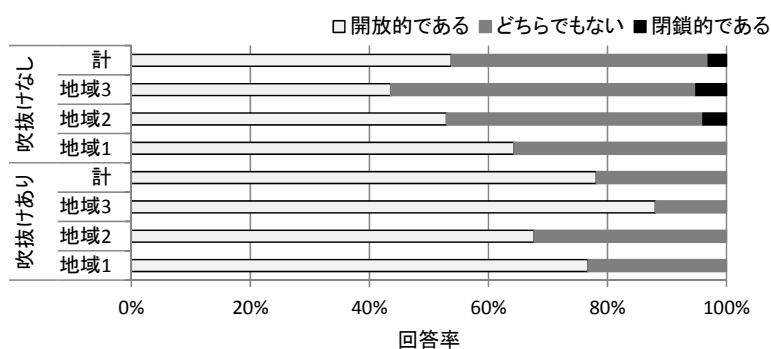


図 2.3.31 吹抜けの有無と開放感

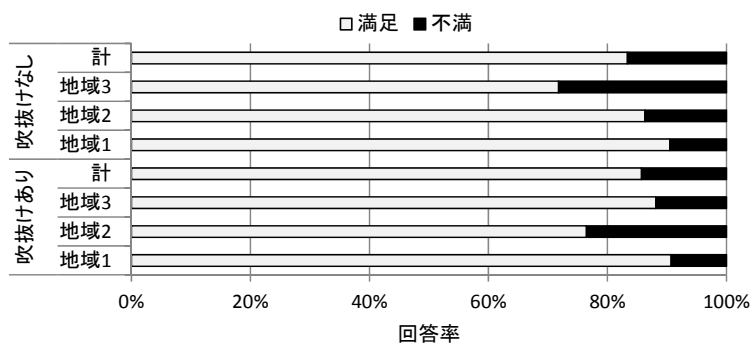


図 2.3.32 吹抜けの有無と満足度

### 2.3.4 まとめ

本節では、吹抜け空間の温熱環境と暖房エネルギー消費量に関する実験室実験に加え、吹抜けの空間構成、温熱及び光環境等に関するアンケート調査を行った。実験では、吹抜け特有のドラフトが上下階の温度ムラによって生じることや、対策として熱源の分散配置が有効である等の知見が得られた。また、アンケート調査からはリビング吹抜けの採用率の増加、空間構成の傾向、吹抜け有無による温熱環境の差異等が確認された。今後は、住宅内の大空間に対する室内環境及び

消費エネルギー評価に資する検討を行う予定である。

注) (1)、(4)に関しては既往研究 1)の図表を引用したうえで説明を加えた。

<参考文献>

- 1) 岩本他：住宅内吹き抜けが室内温熱環境に与える影響（その1）実大実験建物を用いたコールドドラフトの実験把握，日本建築学会学術講演梗概集 D-2、341-342、2010 年
- 2) 松岡他：戸建住宅の吹き抜け空間における温熱環境形成に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集 D-2、61-62、2007 年
- 3) 下川他：吹き抜け空間のタイプの違いによる住み心地評価への影響 住宅の吹き抜け空間に関する調査研究 その2、日本建築学会学術講演梗概集 E-2、253-254、2006 年

## 2.4 小屋裏換気口の要求性能に関する検討

### 2.4.1 はじめに

現在の小屋裏換気口面積に対する規定(金融支援機構の木造住宅工事共通仕様書などの基準)は、北米で用いられている基準を導入している。しかし、小屋裏に必要な開口面積は、本来、天井面の気密性能や気候区分により異なる。特に日本の場合、地域により冬季の温度や夏季の雨量が異なり、これらを考慮することが求められている。これまで、軒裏換気方式を対象に熱・湿気・換気の連成解析による検討<sup>1)</sup>がなされているが、外部風に影響される換気方式別の評価や文献<sup>2)</sup>で指摘されている外壁通気層の寄与については未着手であった。また、小屋裏空間内の温湿度分布や換気口設置位置による違いなどの詳細な実験検証の事例は少ない。

これらの背景より、本技術開発では小屋裏換気口の評価手法の開発と要求性能の明示を目的として、実験住宅における実証実験に加え、外部風を考慮したシミュレーション計算を行った。

### 2.4.2 実験住宅における小屋裏温湿度環境の検討

本節では小屋裏空間に繋がる躯体の隙間性状や防湿・気密性能に着目した実験を行い、小屋裏換気口面積の要求性能を定めるための実証データを収集する。これまで、軒天換気口面積と気流止めの有無についてデータを収集し、気流止めによる天井面の気密性の確保が重要であるとの知見が得られた。本研究では、妻・軒・妻の組み合わせなど、異なる換気口に対するデータを収集した。

#### (1) 実験概要

##### 1) 実験住宅の概要

実験住宅は、埼玉県越谷市に建つ東西切妻屋根を持つ平面 3.64m×3.64m、天井高 2.45 m の1階建建物であり、北面は真北から 27° 東に振れている。南側約 3mと東側約 2.5mに隣地との塀が、西側 2mに同規模の実験住宅があり、その更に西 2.5mに高さ 15mの構造実験棟がある。実験住宅北側は畑で開けている(図 2.4.1)。

天井は別張り防湿フィルムを施工し、袋入り断熱材グラスウール 10K 厚 100mm の 2 重敷きとし、外壁及び床も平成 11 年省エネルギー基準の断熱性能に準じた仕様となっている。実験住宅外観及び各部の施工状況を図 2.4.2、図 2.4.3 に示す。

実験棟の居室には、部屋中央部に間仕切壁を想定した下がり壁(天井より 300mm 下がり)を設けている。その下端にはコンセント等の隙間を想定して開口を設けてあり、上部には気流止め断熱材が充填してある。相当隙間面積(測定値)は 1cm<sup>2</sup>である。

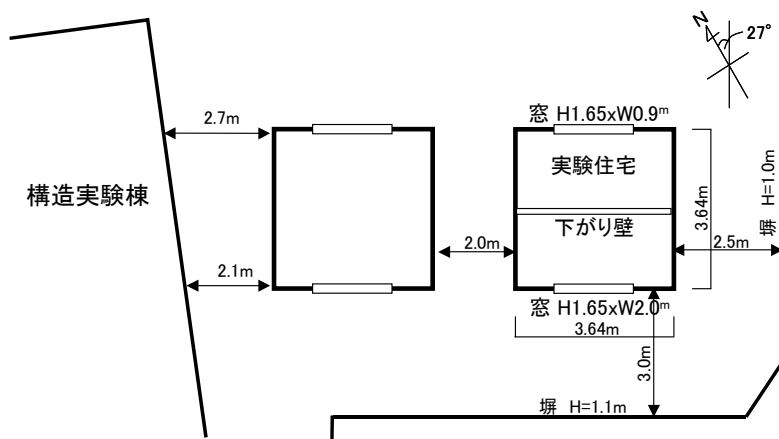


図 2.4.1 実験住宅配置図・平面図



図 2.4.2 実験住宅外観



サイディングは実験中に取り外せるようにした(取合い部、継ぎ目はコーキング代わりに気密テープ)



天井断熱施工状況

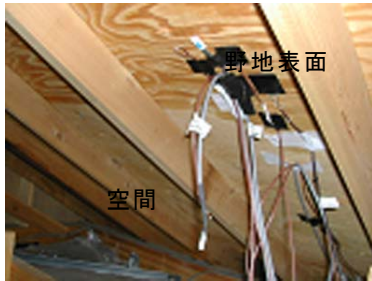
下がり壁気流止め

軒換気口は軒一軒換気の場合  
気密テープで塞ぐ

図 2.4.3 実験棟の施工状況

各種センサーの設置状況を図 2.4.4 に示す。温湿度センサーは、小屋裏空間の南と北空間に加え、野地板表面近傍(厚さ 6mm の湿度センサーエレメントを野地板に貼付して設置)、

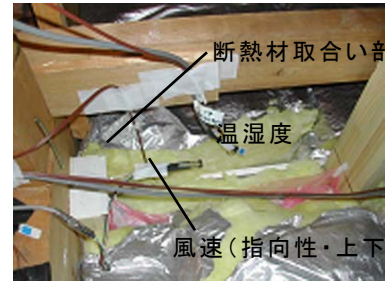
野地板近傍下部(桁梁直上)、通気層内部(風速センサーは軒裏天井から約20cm下)など各部に設置した。また、小屋裏への移流量を把握するため、軒天換気口小屋裏側、通気層上端部に熱線風速計を設置した。また、外部風向・風速計は実験住宅西側、地上からの高さ5mに設置している。



野地南側



野地北側



間仕切壁 直上



軒天換気口 風速計



通気層



軒部分



軒天換気口 微差圧計



天井吊り木上 野地表面



天井吊り木 直上



室内ロガーなど



室内下がり壁と隙間状況

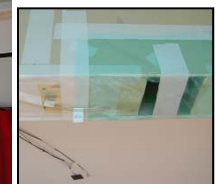


図 2.4.4 各種センサーの設置状況



## 2) 実験条件

実験は、小屋裏換気方式及び換気面積の組合せを設定し、それぞれ 1 週間程度の測定を行う。本研究では、軒のみ換気＋間仕切壁気流止め＋全日暖房を基準ケースとして、以下の 4 ケースの実験を行った。換気口は住宅金融支援機構の木造住宅工事共通仕様書に合致するように設置した。

居室の空調についてはヒートポンプエアコン及び加湿器を設置し、設定温度 20℃、相対湿度 50%RH で制御した。また、居室はパイプファンで給気を行う第2種換気とし、居室の換気回数がほぼ 0.5 回/hになるようにボルトスライダーにより調整した。第2種換気によって、小屋裏と下がり壁下部の差圧は常時 3Pa 程度生じている。

表 2.4.1 実験条件及びスケジュール

Case	Case10-1	Case10-2	Case10-3	Case10-4
小屋裏換気方式	南北軒裏のみ	南北軒裏のみ	東西妻のみ	軒一妻
小屋裏換気口面積	軒基準	軒基準 1/2	妻基準	軒妻基準
通気層からの空気流入	あり			
気流止め	あり	あり	あり	あり
実験期間	1/1～1/7	1/7～1/14	1/14～1/21	1/21～1/31
居室	連続暖房			

## (2) 実験結果および考察

### 1) Case10-1及びCase10-2（換気口面積の違い）

Case10-1 及び Case10-2 の各測定点の温度変動、相対湿度変動、絶対湿度変動のグラフを図 2.4.5～図 2.4.10 に示す。図中凡例の「表面」とは小屋裏空間に面する野地板表面を意味し、「表面近傍」は野地板表面の近傍空気の値を意味する。ただし、「表面」の相対湿度については「表面近傍」の絶対湿度を表面温度の測定値で補正して算出したものである。なお、絶対湿度変動は日射量との相関性が強いので、水平面全天日射量を右軸に挿入した。

Case10-1、Case10-2 ともに居室温度は約 21℃、相対湿度は 50%前後で推移しているが、Case10-2 の 1/11 の午後から加湿器の不調により相対湿度が低くなっている。外気温度は両者ともほぼ毎日、最低温度が 0℃程度まで下がっているが、Case10-2 の方は-3℃程度まで下がる日が数日あった。

相対湿度のピークは Case10-1、Case10-2 ともに同じように見えるが、Case10-2 の方の 1/3 の朝方の結露時間が長い。

小屋裏内の絶対湿度は日射量とともに上昇している。これは、日射により野地板温度が上昇し、合板内に吸着されている水蒸気が小屋裏空間に放湿されているためである。外気絶対湿度との差は、Case10-2 の方が大きくなっており、換気口面積を 1/2 にしたことによって、換気が少なくなったことが推測される。

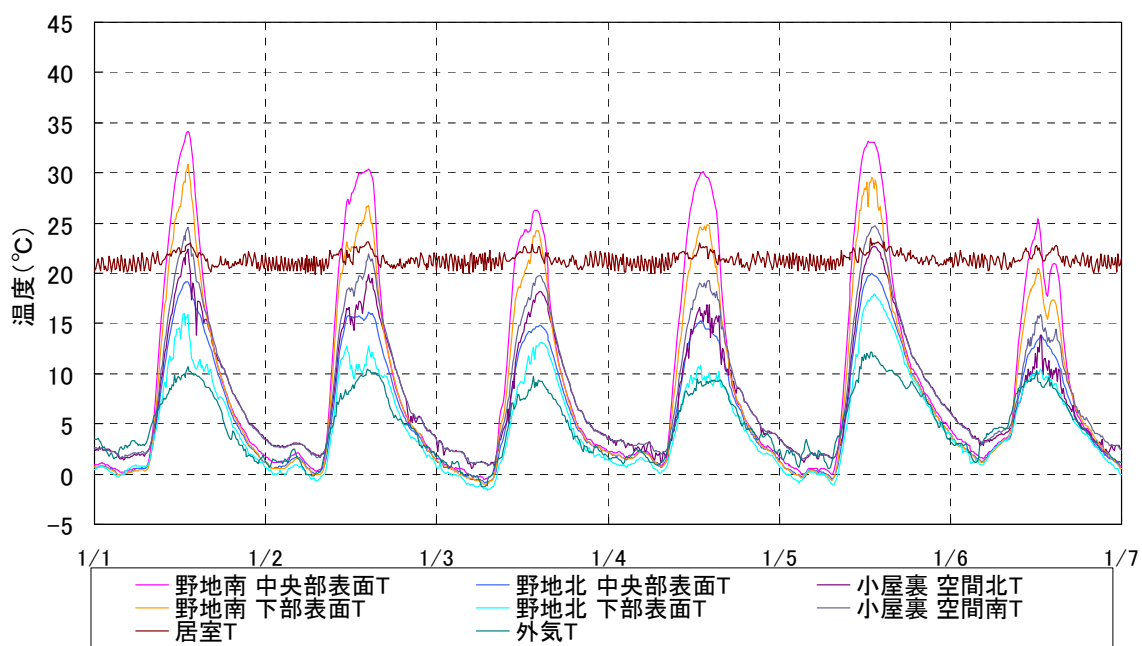


図 2.4.5 温度変動グラフ (Case10-1:1/1~1/6 )

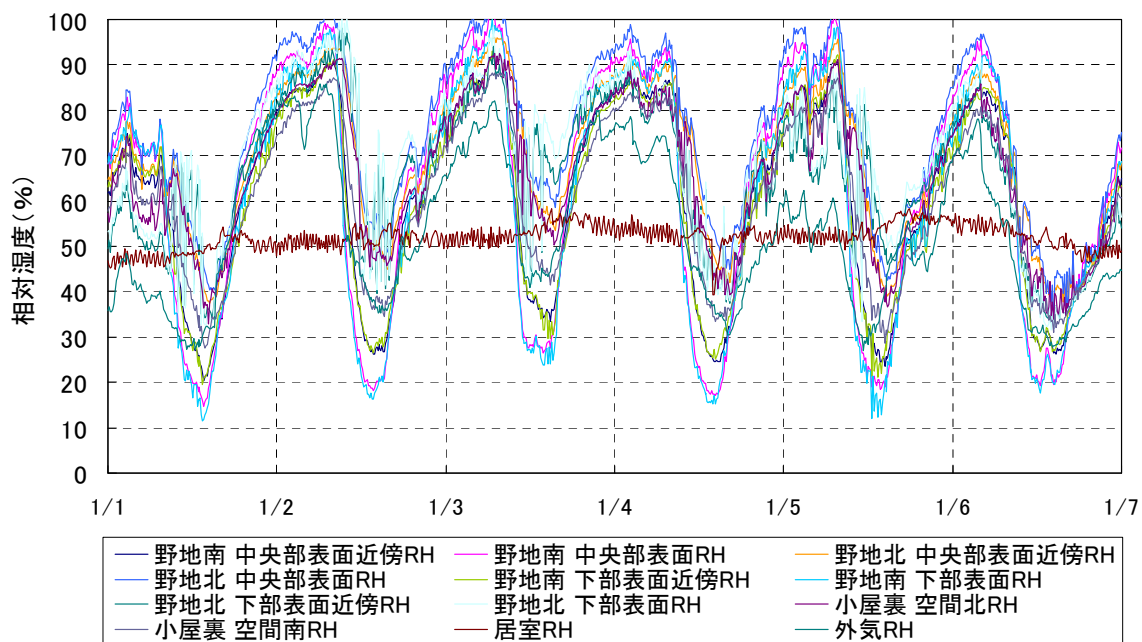


図 2.4.6 相対湿度変動グラフ (Case10-1:1/1~1/6 )

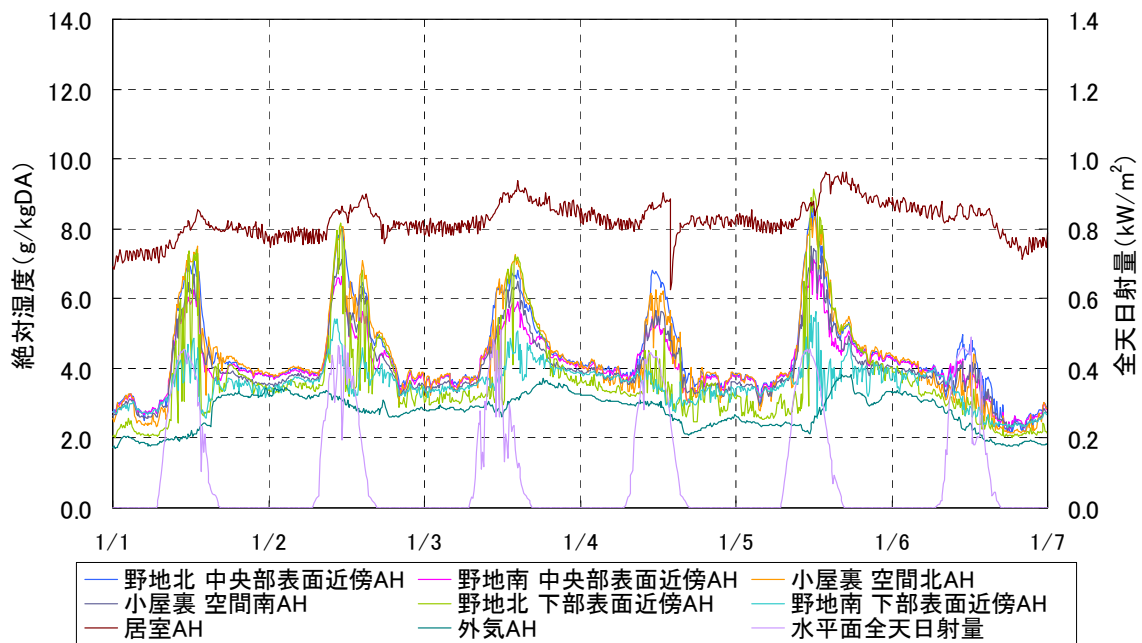


図 2.4.7 絶対湿度・全天日射量変動グラフ (Case10-1: 1/1 ~ 1/6 )

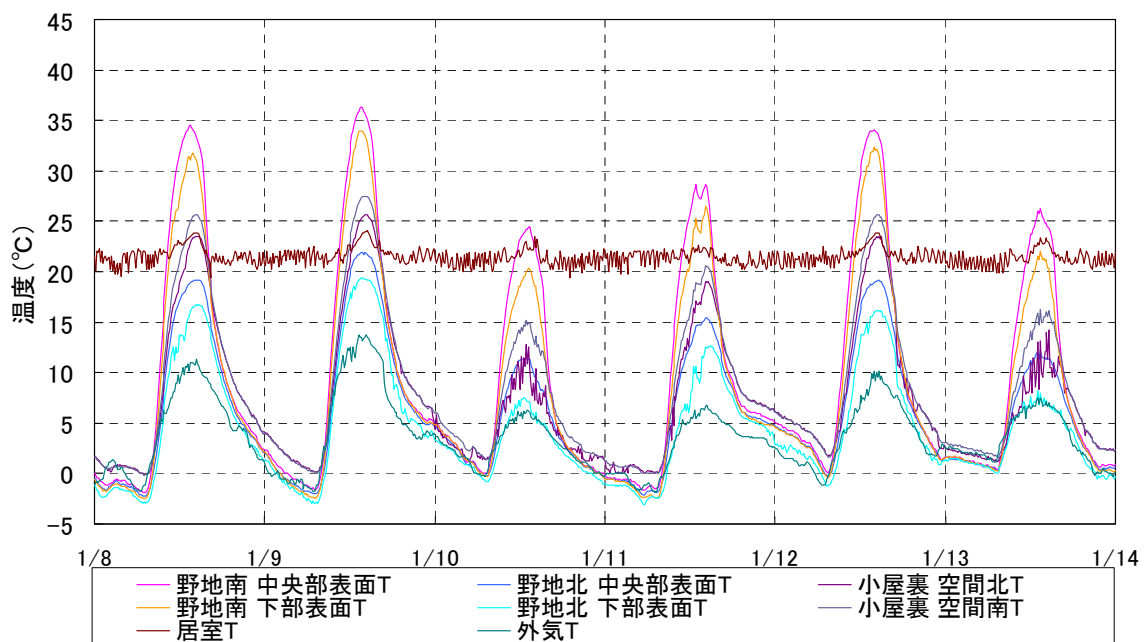


図 2.4.8 温度変動グラフ (Case10-2: 1/8 ~ 1/13 )

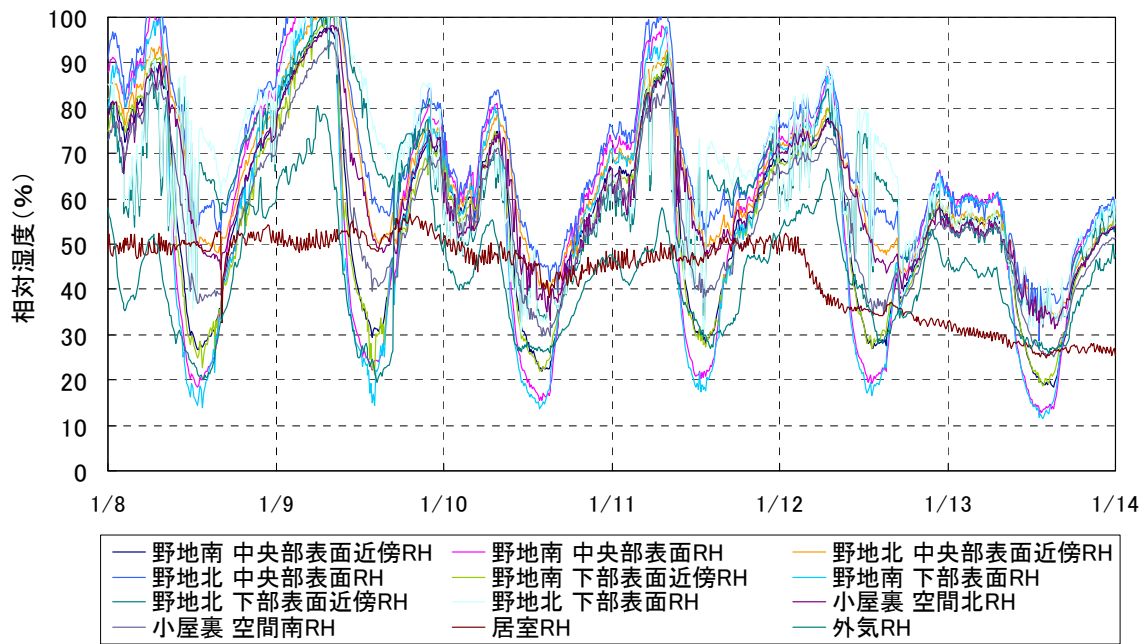


図 2.4.9 相対湿度変動グラフ (Case10-2 : 1/8~1/13)

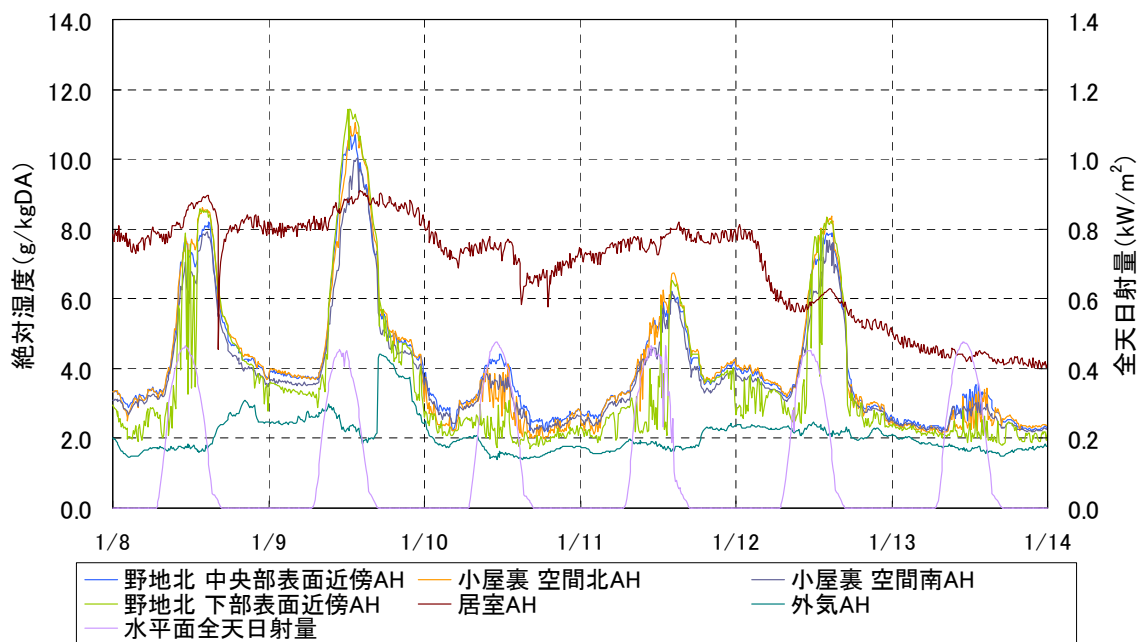


図 2.4.10 絶対湿度・全天日射量変動グラフ (Case10-2:1/8~1/13)

## 2) Case10-3 (妻換気方式)

日最低外気温度は-3℃程度でありCase10-1、2より下がっているが、外気温度の差異を考慮しても湿度は高い傾向がみられる。特に居室の相対湿度が50%前後になった1/18~20は0時前から昼12時前後まで長時間にわたって結露発生の兆候が観測されている(前半の居室の相対湿度は40~50%。加湿器の調整がうまくいかなかったため)。

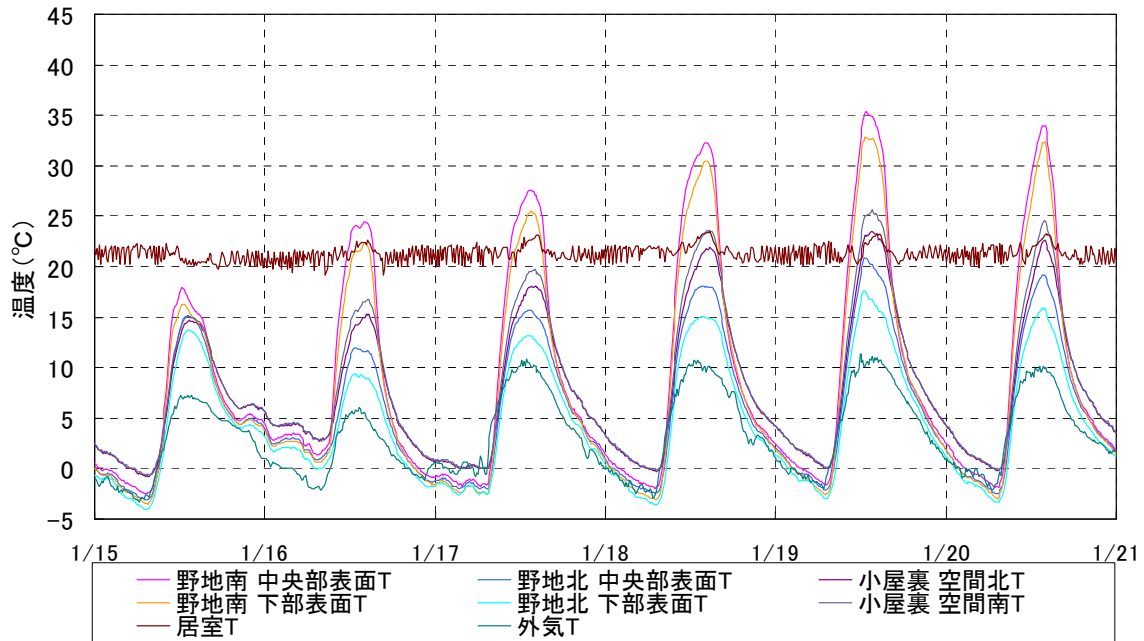


図 2.4.11 温度変動グラフ (Case10-3:1/15~1/20)

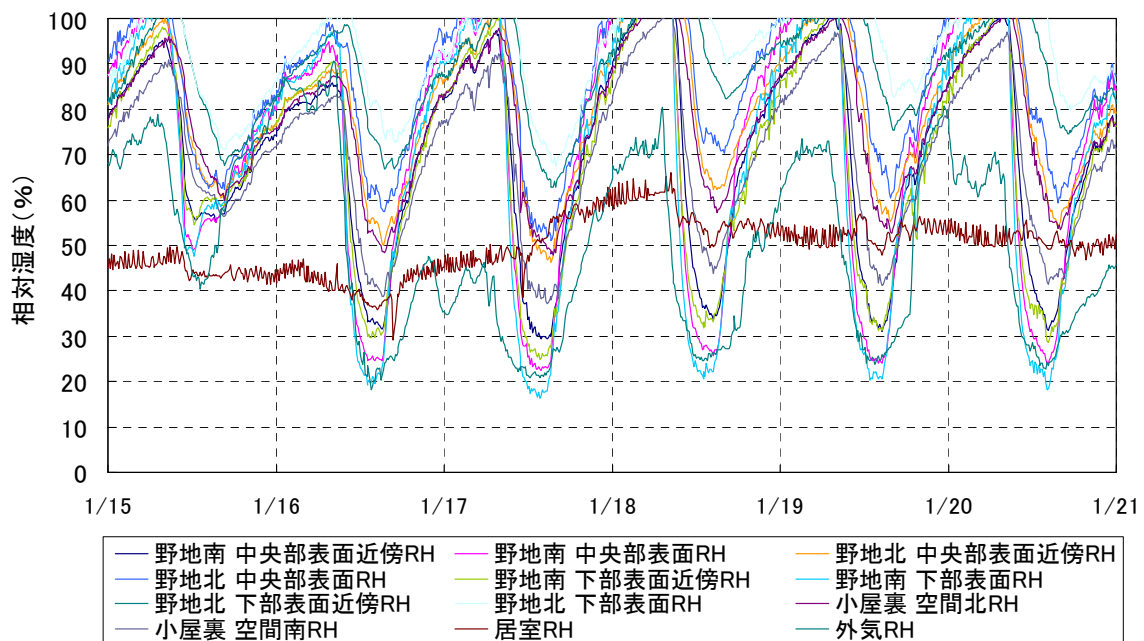


図 2.4.12 相対湿度変動グラフ (Case10-3:1/15~1/20)

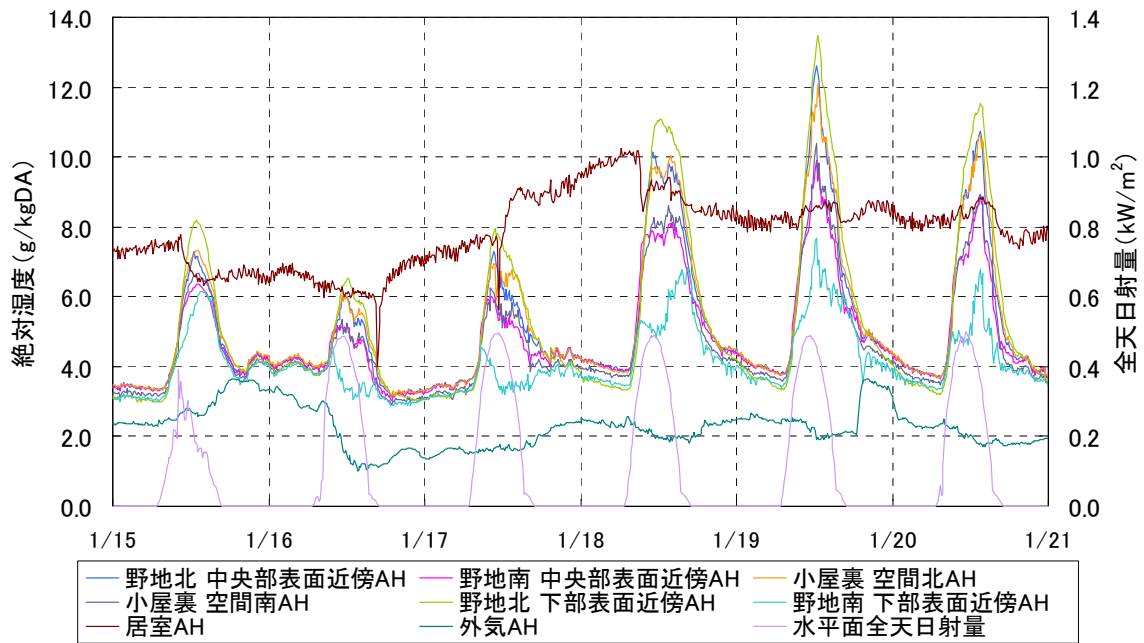


図 2.4.13 絶対湿度・全天日射量変動グラフ (Case10-3:1/15~1/20)

### 3) Case10-4 (軒一妻換気方式)

日最低外気温度は0℃から-3℃程度であった。居室の相対湿度40%の時は結露の発生は確認されていない。1/30 居室の相対湿度が50%に戻った時に瞬間的に結露する程度で、軒天のみや妻換気に比べ湿度は低く推移している。

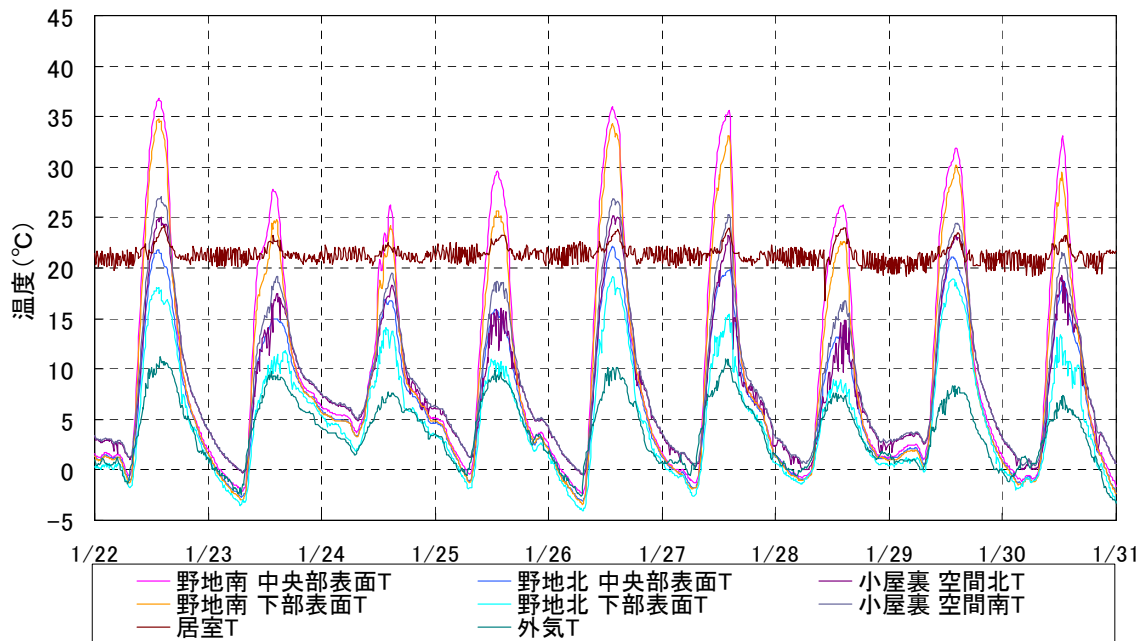


図 2.4.14 温度変動グラフ (Case10-4:1/22~1/30)

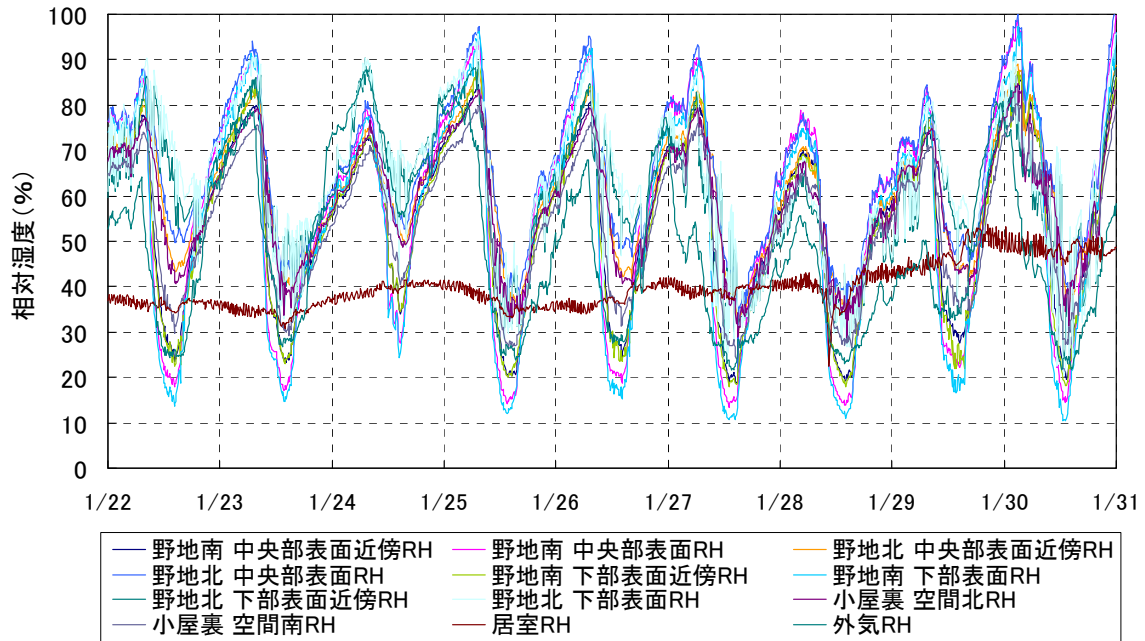


図 2.4.15 相対湿度変動グラフ (Case10-4:1/22~1/30)

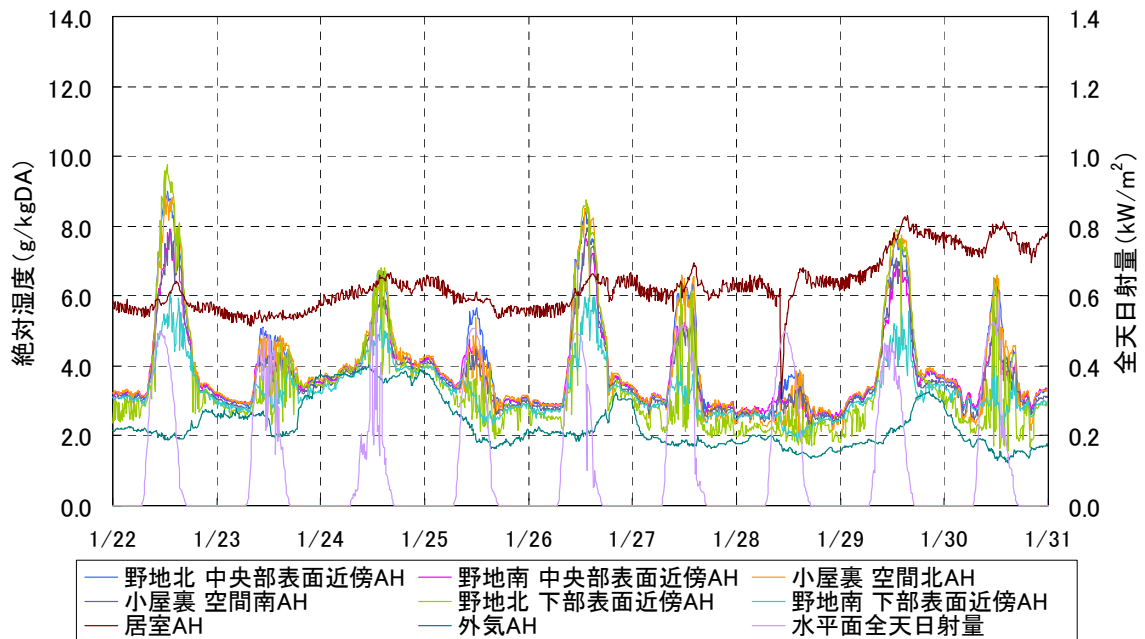


図 2.4.16 絶対湿度・全天日射量変動グラフ (Case10-4:1/21~1/28)

#### 4) 無次元絶対湿度による比較

内外の絶対湿度差で無次元化した値を求め、与条件に対する影響を考察する。比較対象とするデータは、温湿度変動が安定する0時～6時の期間平均値とし、以下の(2.4.1)式により無次元絶対湿度を求めた。無次元絶対湿度は0が外気、1が居室と同等であることを意味しており、1に近づくほど対象部位が高湿化したことになる。

$$\chi = (X_a - X_o) / (X_i - X_o) \quad (2.4.1)$$

ここに、

・: 小屋裏各部の無次元絶対湿度

$X_a$ : 小屋裏各部の絶対湿度 (g/kgDA)

$X_o$ : 外気絶対湿度 (g/kgDA)

$X_i$ : 居室の絶対湿度 (g/kgDA)

0時～6時における無次元絶対湿度を図 2.4.17 に示す。

無次元絶対湿度によれば Case10-3 の妻換気の条件が最も値が高く、換気による小屋裏内の水蒸気の希釈が確保されていない結果となった。また、Case10-4 の妻+軒換気では開口に高低差があるため温度差による換気の促進が期待されたが、換気口面積の基準値自体が軒に比べ小さいこともあり、Case10-2 (軒のみ、基準値 1/2)と同程度の結果となった。

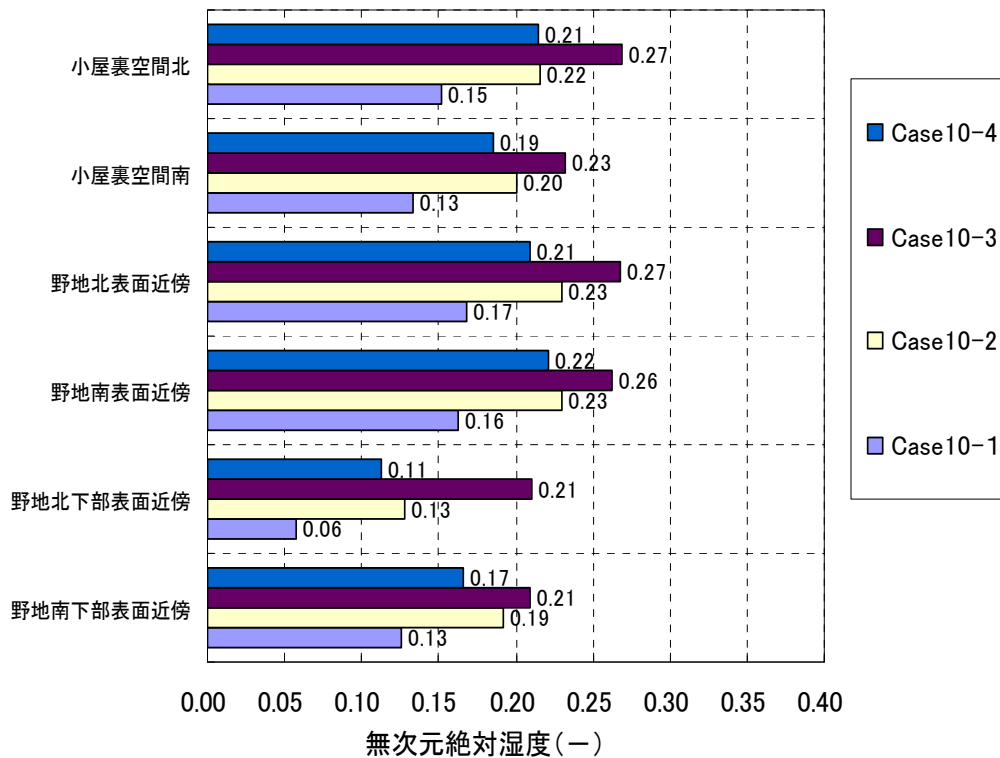


図 2.4.17 各部位の無次元絶対湿度(0時～6時の平均値)



### 2.4.3 外部風を考慮したシミュレーション計算による小屋裏換気口の要求性能の検討

本節では、外部風を考慮したシミュレーション計算によって、地域、換気方式、気密性能等の諸条件を勘案した小屋裏換気口の要求性能について検討する。

#### (1) 計算概要

##### 1) 計算方法

計算は熱と水分の収支式と換気回路網により連成計算を行うプログラムを新たに開発を行った。多孔質材の熱水分移動に関しては、水分化学ポテンシャルによる熱水分同時移動方程式を適用し、既往の検討<sup>1)</sup>と異なり液水移動領域までの計算を対象とした。

<計算対象住宅>

計算対象は日本建築学会の熱負荷計算用標準問題に用いられる住宅モデル<sup>3)</sup>を参考にした(図 2.4.18 参照)。屋根は 4 寸勾配の寄棟及び切妻とし、断熱位置は天井である。計算対象室は小屋裏、居室、通気層 4 方位の計 6 室で、居室は 1 室とした。小屋裏換気口は寄棟では 4 方位、切妻は東西面に設置した。なお、外壁通気層は窓の無い部分のみ考慮し、寄棟では全方位、切妻では南北面が小屋裏に繋がる設定とした。天井面の隙間量については既往研究<sup>1)</sup>と同様に、表 2.4.3 に示す 3 水準とした。小屋裏換気口については、表 2.4.4 の住宅性能表示制度の劣化等級に関する基準値相当に加え、基準値の 0.5 及び 0.25 倍の合計 12 水準を設けた。ただし、計算では単純開口として扱い、隙間特性値  $n=2$  とした。

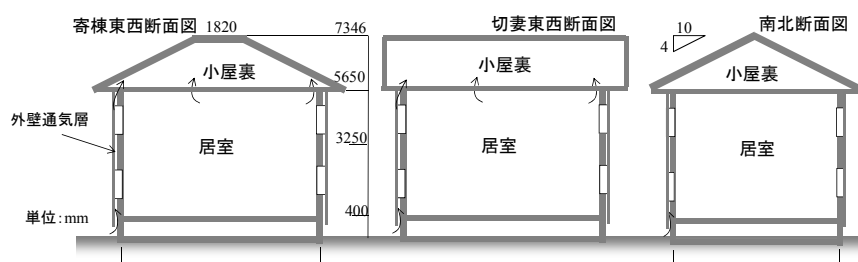


図 2.4.18 計算対象住宅

##### 2) 計算条件

材料物性値に関しては既報<sup>2)</sup>と同じであるが、野地板に関しては文献を参考に平衡含水率及び水分拡散係数を設定した。対象とする都市は盛岡、宇都宮、富山、福岡の 4 都市とし、拡張アメダス気象データの標準年を計算に用いた。計算期間は 1.5 年、居室の温度条件は連続暖房を想定した(2.4.2)式で求め、湿度は 60%一定とした。

$$T_r = 4.5 \cdot \cos(48\pi(D-212)/8760) + 22.5 \quad (2.4.2)$$

風圧係数差については、密集住宅地を想定した卓越風による換気はないが風の脈動によ

って各開口面間に  $\Delta C_p=0.05$  に相当する実効差圧が生じる条件を設定した<sup>3)</sup>。気象データの風向によらず、4 方位の開口部に  $C_p=+0.0375$  が同じ頻度(各 25%)で発生するものとし、そのときに他の開口部で  $C_p=-0.125$  をとることで、風の脈動の効果で実効差圧  $\Delta C_p=0.05$  となるように設定している。また、居室の天井面には内外温度差相当の浮力が生じる設定とし、機械換気による圧力勾配は無視した。

表 2.4.2 対象住宅の各部仕様

屋根	スレート瓦 + アスファルトルーフィング + 野地板12mm(合板)
天井	GWB250mm + 防湿シート + 石こうボード12mm
壁	サイディング12mm + 通気層 + GW16K100mm + 防湿シート + 石こうボード12mm

表 2.4.3 気密性能の設定

記号	天井面の気密性能* $C_{ceiling}$ ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ )	住宅気密性能の目安 $C_{Total}$ ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ )	備考
A	3.58	10.4	非気密
B	0.81	4.9	気密住宅(温暖地)
C	0.41	2.4	気密住宅(寒冷地)

\*天井の隙間面積を天井面積で除した値

表 2.4.4 小屋裏換気口面積の設定

換気方式	小屋裏換気口面積 $\cdot A$ ( $\text{cm}^2$ )	天井面積あたりの小屋裏換気口面積* $C_{attic}$ ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ )
軒換気	2650	40
軒+棟換気	1153	17.4
妻換気	2208	33
妻+軒換気	1471	22.2

## (2) 結果及び考察

以降の計算結果は最寒期となる 1~2 月の期間平均値とし、換気量は天井面積あたりの質量基準 ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$ ) とした。1~2 月の計算結果を抽出したのは、小屋裏結露の発生頻度が最も高い時期のためである。計測期間は、含水率が長期変動で変わること考慮して 1.5 年とした。また、通気層ありの場合、小屋裏への外気空気流入量に外壁通気層からの流入分を加算している。

### 1) 小屋裏への室内空気流入量

小屋裏への室内空気流入量を図 2.4.19(左)に示す。屋根及び換気口形状の影響は少なく、天井面の気密性能と室内外温度差によって差異が生じている。図 2.4.19(右)は室内側で第 3 種換気システムの稼働を前提とした既往研究<sup>1)</sup>からの引用であるが、本計算では機械換気の稼働を想定しておらず、小屋裏結露に対しては厳しい結果が得られるよう配慮している。

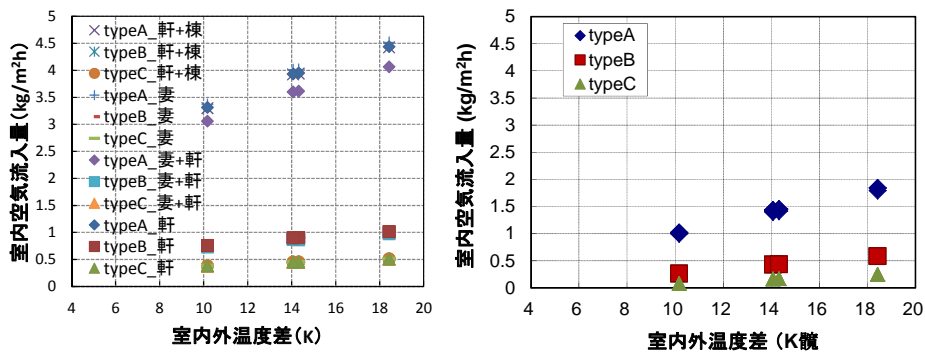


図 2.4.19 小屋裏への室内空気流入量と内外温度差の関係  
(左:本計算結果、右:第3種換気稼働時[文献から引用1])

## 2) 換気方式と小屋裏への外気空気流入量の関係

図 2.4.20 に typeC の換気方式毎の小屋裏への外気流入量を示す。なお、小屋裏換気口面積は、表 2.4.4 の値(性能表示制度基準値相当)で、点線で囲んだデータは通気層ありの結果(外気+通気層からの流入量)である外気流入量は小屋裏換気口面積とほぼ線形関係であり、勾配は換気方法により異なる。妻換気口では最大で  $1.0\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$  程度であり、他に比べ少ない結果であった。本計算では風圧力を各方位 25%ずつの出現頻度で与えているため、2面開口となる妻換気では値が小さい。一方、点線で囲んだ通気層からの流入量を加えた結果は通気層なしに比べ  $0.6\sim 2.0\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$  程度増加した。

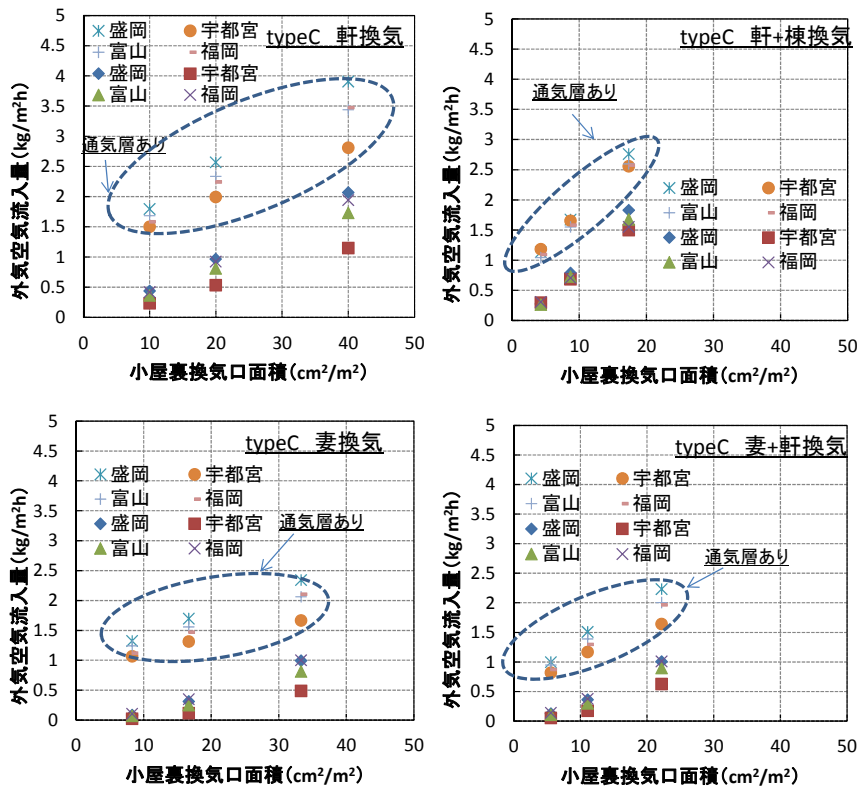


図 2.4.20 小屋裏換気口面積と外気流入量の関係(typeC)

図 2.4.21 の typeC に対する外気流入量の割合は妻換気の typeA が特に低く、typeC 軒換気の 2 割程度であった。しかし、通気層が小屋裏空間へ繋がる場合は 7 割程度への改善が見られ、脈動による実効差圧のみの想定では、通気層の効果は相対的に大きい傾向であった。

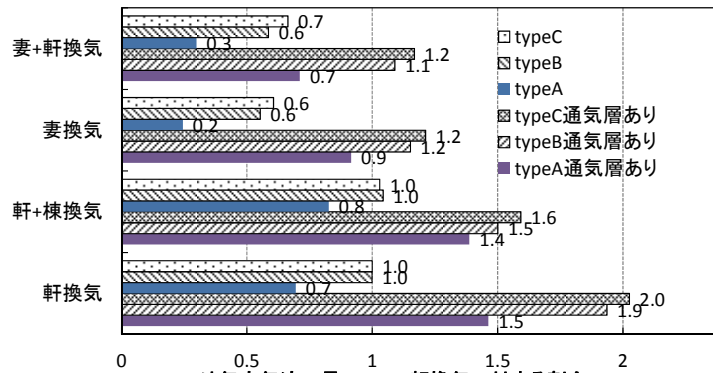


図 2.4.21 typeC に対する外気流入量の割合

### 3) 小屋裏への外気流入量と含水率の関係

図 2.4.22 に typeC の小屋裏への外気流入量と北側野地板表面含水率の関係を示す。含水率がやや高めであるが、外気流入量との相関は確認できる。また、通気層あり・なしはほぼ連続した曲線と見なせ、通気層からの流入分の加算は換気方式の評価において妥当であると言えよう。

### 4) 外気空気流入量に対する評価指標の提案

天井面積あたりの小屋裏換気口面積  $C_{attic}$  ( $\text{cm}^2/\text{m}^2$ ) と外気流入量  $q$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$ ) を線形関係と見なし(2.4.3)式で近似し勾配  $a$  と切片  $b$  を求めた注)。 $v_0$  は外部風速の期間平均値 ( $\text{m}/\text{s}$ ) である。

$$q = a \cdot \alpha A \cdot v_0 + b \quad (2.4.3)$$

図 2.4.23 に仕様毎の勾配  $a$  と切片  $b$  の平均値と標準偏差を示す。標準偏差から判るように、外部風速で基準化を行い得られる勾配  $a$  は軒+棟換気を除けば切片  $b$  と共に地域による差が僅かであり、図中の  $a$ 、 $b$  が換気方式や通気層の組合せから定まる評価指標と見なすことができる。

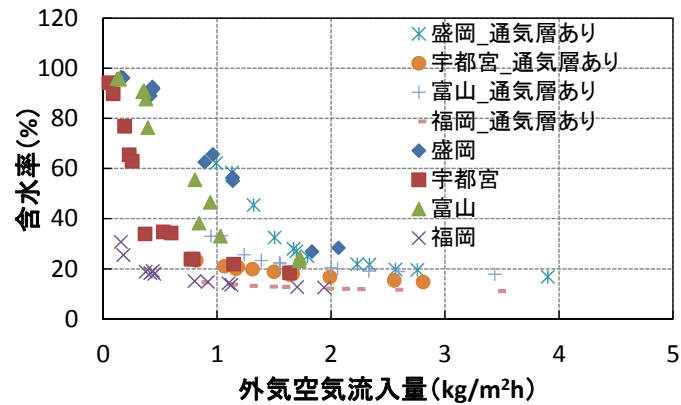


図 2.4.22 小屋裏への外気流入量と含水率の関係 (typeC)

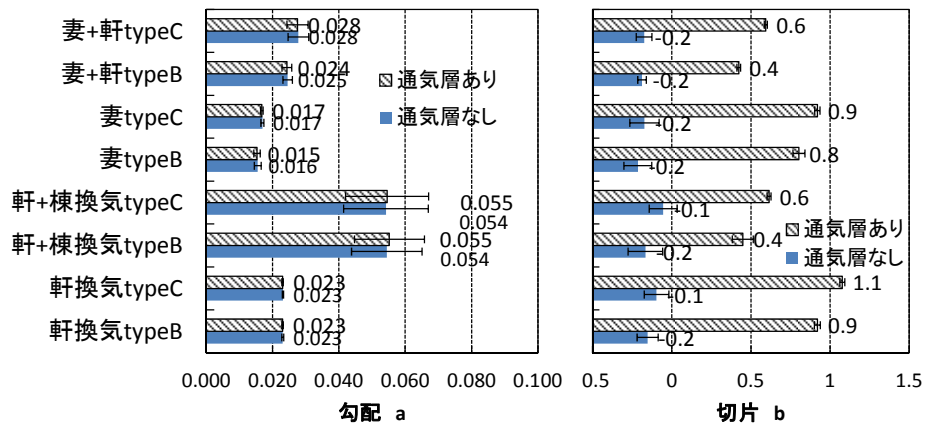


図 2.4.23 換気方式毎の勾配  $a$  及び切片  $b$

#### 2.4.4 まとめ

実験棟における実証実験とシミュレーション計算により、小屋裏空間への外気流入量に対する換気方式や外壁通気層の影響を検討した。換気方式については妻換気の性能が低いこと、外壁通気層の効果の高い等の知見が得られた。また、換気方式や気密性能毎に小屋裏への外気流入量を求める推定式を作成し、小屋裏換気措置に対する評価指標を提案した。今後は評価指標の検証を行い、地域ごとに必要な小屋裏換気措置の要件を整備する予定である。

注) 風圧力  $P$  は外部風速  $v^2$  に比例するため、換気量が  $\Delta P$  の平方根で定義されると仮定し ( $n=2$ )、外部風速の一次式で表現した。また、通気層は断熱層の外側に位置するため、地域による温度差の影響は小さいとみなした。

#### <参考文献>

- 1) 齋藤宏昭、本間義規他：多数室シミュレーションによる気密性能を考慮した木造住宅の小屋裏防露性能に関する検討、日本建築学会技術報告集 第 35 号、pp. 221~226、2011.2

- 2) 松岡大介他、木造住宅の小屋裏温湿度形成に関する実験的検討、その2 軒裏換気方式の場合における小屋裏への各部空気流量と加湿量の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集 D2. 2011. 9
- 3) 宇田川光弘：標準問題の提案、日本建築学会環境工学委員会 熱分科会第 15 回熱シンポジウム、pp23-33, 1985. 9
- 4) Shigeki Nishizawa, Takao Sawachi, Eizo Maruta " Study on Wind, Pressure Coefficient for Cross Ventilation Design in Residential District", Advances in Wind and Structures (AWAS' 08), Vol. 2, pp. 1141-1155 (2008)

## 2.5 陸屋根の防露措置・防露条件の整理に関する検討

### 2.5.1 はじめに

天井・屋根周りに要求される防露性能に関しては、品確法の省エネ等級及び劣化等級に定められる小屋裏換気口や防湿層の設置、透湿抵抗比などの指針がある。しかし、これらは主に勾配屋根を想定しており、陸屋根に関する検討は為されていない。陸屋根を有する住宅は住宅密集地等によく見られ、屋上をバルコニーとして利用する場合、広い外部空間を有効に確保できる利点を有している反面、勾配屋根のように軒や棟等を有していない為に、換気口の設置が困難で、厳しい放射環境に曝される中、防露上の懸念があると言われている。一方、勾配屋根の不具合に関する実態調査によれば、比較的築年数が浅い物件での野地板の劣化が指摘されており、瑕疵担保履行法や長期優良住宅の施策の観点からも、屋根周りの劣化メカニズムに関する検討は重要になりつつある。

これらの背景を勘案し、本技術開発では陸屋根に要求される防露措置を明らかにする為に、屋外実験により、その性状を確認し、次いで数値解析により、陸屋根に求められる防露条件に関して整理し、提案を行った。

### 2.5.2 屋外実験棟における検討

#### (1) 実験概要

##### 1) 実験棟の概要

実験は茨城県つくば市の建築研究所内に、陸屋根を模擬した木造平屋建ての実験棟を建設して行った(図 2.5.1)。実験棟屋上には南側に腰壁を作成し、パラペット立ち上がりによる日影を再現させ、冬季の一定期間日陰となるよう配慮した(図 2.5.2)。天井面には別張りの防湿層が施工され、照明設備などの防湿欠損は無い。また、各仕様は 910mm ごとに区画し、区画間で熱と水分の移動が無いように、断熱材と防湿シートで仕切り、同時に複数の検証ができるように配慮した(図 2.5.3)。陸屋根の仕様は、断熱位置、野地板含水率、脱気口が異なる合計 8case の条件とした(表 2.5.1)。排湿を目的とした脱気口は、天井断熱では小屋裏空間から、屋根断熱では野地板上側の空気層から直径 30φ、長さ 150mm の塩ビ管を北側外壁に貫通させ排湿性能を調節した。野地板は、case ごとに 910×910mm の合板を日向と日陰用に 2枚用意し、未乾燥材や施工中の雨水による吸水を想定し事前に吸水させ、含水率を 20～40 mass%程度に調整した(表 2.5.1)。



図 2.5.1 実験当外観(北側)

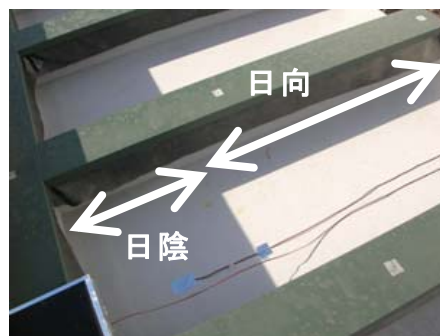


図 2.5.2 屋根部分の日影状況

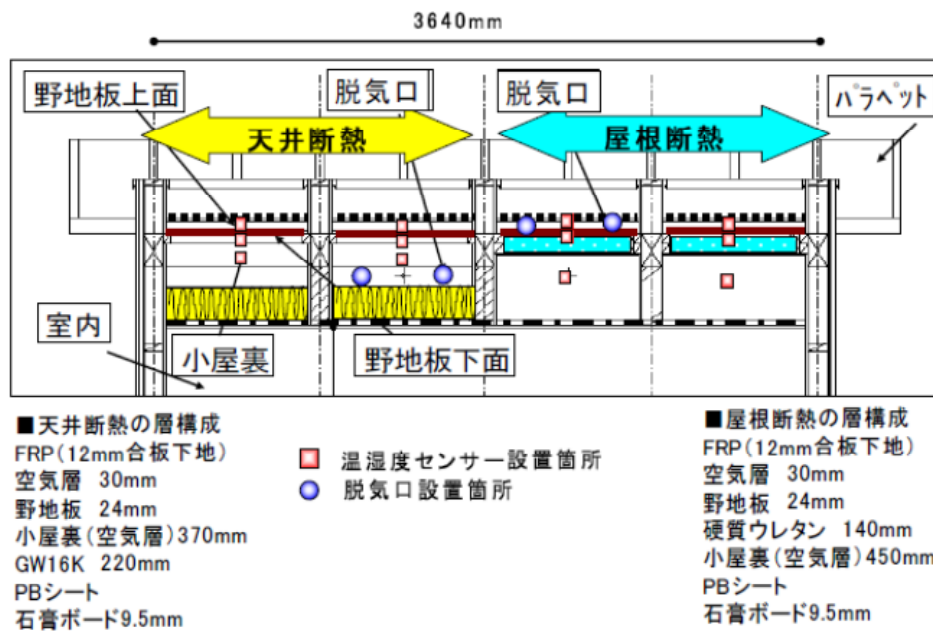


図 2.5.3 実験棟屋根部垂直断面図



## 2) 測定概要

温湿度の測定には、耐結露性の高い温湿度センサー(コーナー札幌社製 KNS-DEW-10)を用い、パラペットによる日陰となる部位、若しくは日向となる位置の断面方向各層に設置した。外界条件については外気温湿度に加え、日向、日陰部分それぞれの水平面 SAT 温度を計測した。測定期間は、2009年12月から2010年の2月末で、case1、case5 以外は3週間とし、計測インターバルは10分とした。室内の温湿度は、約23℃40%に調整した。

表 2.5.1 実験条件

Case	断熱位置	脱気口	野地板含水率 (mass%)		期間
			日向	日陰	
case1	天井	無	36.2	39.1	12/19~2/27
case2		大	33.0	30.4	1/9~1/28
case3		小	27.5	30.0	2/2~2/21
case4		無	17.6	15.7	12/19~1/7
case5	屋根	無	36.7	33.0	12/19~2/27
case6		大	27.8	32.1	1/9~1/28
case7		小	29.6	37.3	2/2~2/21
case8		無	19.2	19.1	12/19~1/7

※脱気口大:30φ×2本、脱気口小:30φ×1本

## (2) 測定結果

### 1) 屋根内部湿度に対する外乱の影響

屋根内部湿度に対する外乱の影響を考察するため、初期含水率が高く、密閉された条件である case1 及び case5 の試験期間中の代表的な晴天日(12/24~26)と曇天日(2/12~13)の2日間を選択し、野地板の上側に位置する空気層の温湿度変動を図 2.5.4~図 2.5.7 に示した。

晴天日の湿度変動に関しては、図 2.5.4 及び図 2.5.5 より、SAT 温度の上昇に伴い日向、日陰ともに絶対湿度が上昇するが、ピークである15時頃の日陰の絶対湿度は日向よりやや低く、夜間は逆に高く推移している。一方、相対湿度は、日向では昼間に低下するが、日陰では昼ごろ相対湿度が上昇し、結露発生が示されている。日陰と日向の日中の絶対湿度差は僅かであるが、水平面 SAT 温度は20℃以上あり、パラペットにより生じる日影の影響によって、局所的な結露が生じていると言える。

野地板上の空気層は厚さ30mm程度で、日向と日陰の空間の間に遮蔽物は無く、センサーの設置位置も南北方向に900mm程度しか離れていない。しかしながら、放射環境の差異により温湿度変動は大きく異なり、初期含水率が高く密閉された空間の日陰側では、温度が上昇する日中に結露が発生する結果となった。

曇天日の湿度変動に関しては、図 2.5.6 及び図 2.5.7 より、日陰部分では終日ほぼ100%RHとなっている。これは、竣工後2ヶ月程経過した2月中旬のデータであるが、前述した放射環境の影響によって、日陰側の含水率が上昇し、低温が続くことで生じたと思われる。絶対湿度は曇天でも日中に若干高くなるが、晴天日ほどの変化は見られなかった。

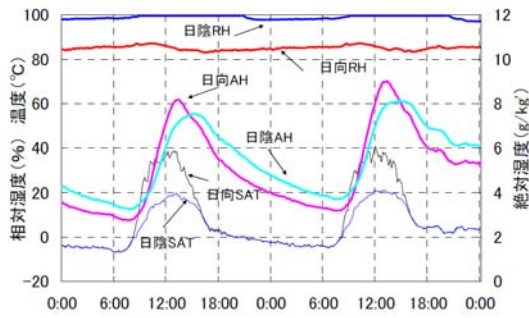


図 2.5.4 晴天日の温湿度変動  
(case1 : 天井断熱)

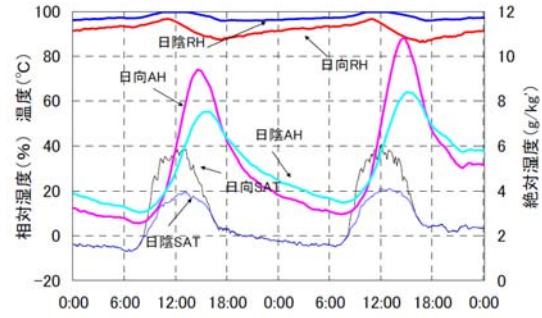


図 2.5.5 晴天日の温湿度変動  
(case5 : 屋根断熱)

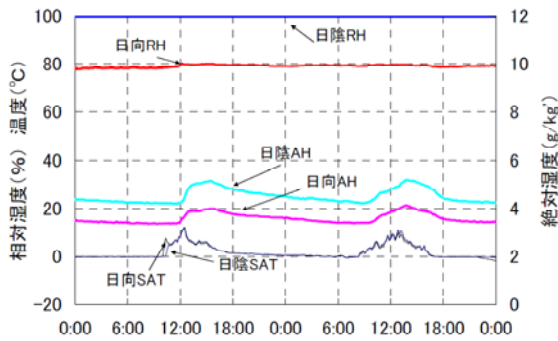


図 2.5.6 曇天日の温湿度変動  
(case1 : 天井断熱)

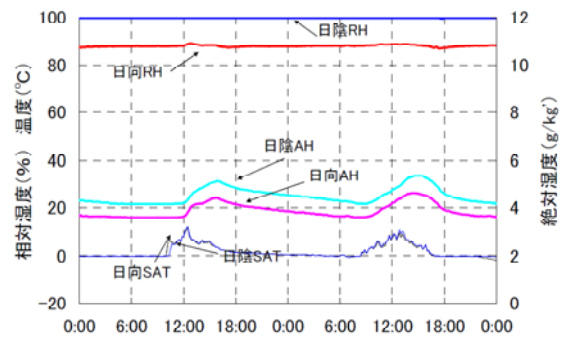


図 2.5.7 曇天日の温湿度変動  
(case5 : 屋根断熱)

## 2) 脱気口の効果

脱気口の排湿性能を把握するため、天井断熱の仕様を対象に炭酸ガスを用いた濃度減衰法により、換気回数を求めた(表 2.5.2)。これより、30φ程度の脱気口(case3、小)でも 0.3回/h程度の換気回数を確保できることが確認された。

図 2.5.8 は試験前後の野地板の質量変化を試験日数で除し算出した、1日あたりの放湿量を示す。本来、放湿量は初期含水率や試験期間中の天候の影響を受けるが、図からは脱気口の有無や大小の差が見られ、表 2.5.2の結果も勘案すると、脱気口の設置が初期水分の排出に一定の効果をもたらすことを示唆している。また図からは、日向と日陰の差異も若干示されており、日射による吸放湿の影響が読み取れる。

表 2.5.2 小屋裏空間の換気回数測定結果

	case1	case2	case3
換気量 (m <sup>3</sup> /h)	-	0.34	0.26
換気回数 (1/h)	-	0.48	0.36
脱気口	無	大	小
容積 (m <sup>3</sup> )	0.71		

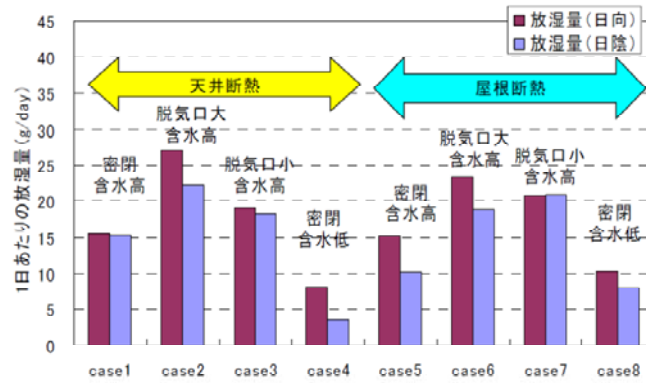


図 2.5.8 野地板からの 1 日あたりの放湿量

### 3) 脱気口が無い場合の湿度性状

初期水含水率が高い場合 (case1、case5) に関して、野地板の上面及び下面で計測した相対湿度変動を図 2.5.9、図 2.5.10 で示す。case1、case5 ともに日向の相対湿度は低下する傾向が見られるものの、日陰は case1 の野地下を除いて 95%RH 以上を維持している。特に、野地板上日陰の湿度は僅かながらも上昇傾向が見られ、1) で述べた日向部の放湿が日陰部分の結露を誘発し、乾燥を妨げていることが推測される。また、曇天が続く 2 月中旬は 1 週間程度飽和状態が続いている。

天井断熱と屋根断熱による差異については野地下日陰が顕著であり、天井断熱の case1 では 2 月下旬に 90%RH 以下まで乾燥するものの、屋根断熱の case5 では 95%RH 以上を維持していた。これは、天井断熱では小屋裏空間に面する構造躯体の湿気容量が大きいため、野地板から放出された水分を吸着できるのに対し、屋根断熱では野地板下面の空間が小さく吸放湿が期待できないことが要因と推測される。ただし、構造躯体に未乾燥材を用いた場合は、case1 の野地下側のような乾燥傾向は再現されないことが予想される。

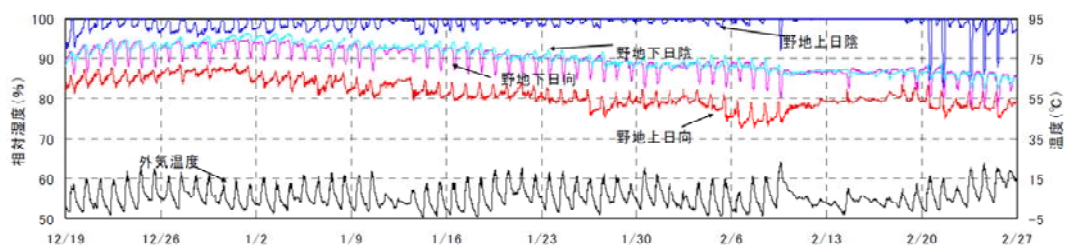


図 2.5.9 野地板上下の相対湿度変動 (case1 : 天井断熱、初期含水率高)

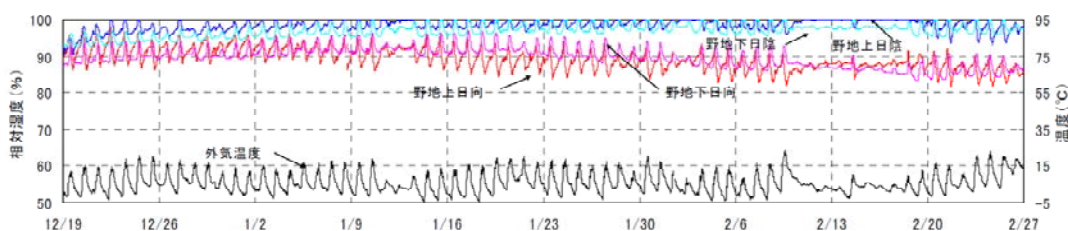


図 2.5.10 野地板上下の相対湿度変動 (case5 : 屋根断熱、初期含水率高)

初期含水率が低い場合 (case4、case8) に関して、野地板の初期含水率を 20mass% 程度に調整した場合の結果図 2.5.11、図 2.5.12 で示す。case1、case5 と比較して、測定期間は短いですが、相対湿度は 90%RH 以下で上昇傾向は見られない。既に述べたとおり脱気口が無い場合、換気による排湿はほとんど期待できないが、竣工時の初期含水率を 20% 程度に抑えれば、初期結露の発生は避けられると言えよう。

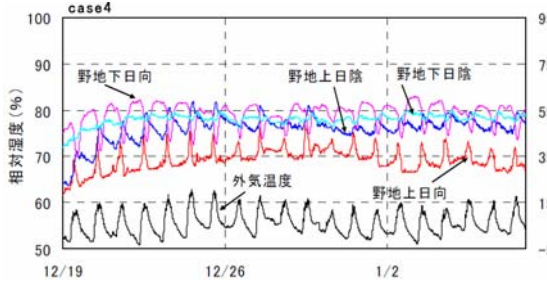


図 2.5.11 野地板上下の相対湿度変動  
(case4 : 天井断熱、初期含水率低)

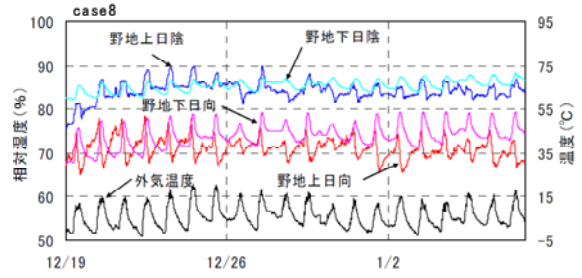


図 2.5.12 野地板上下の相対湿度変動  
(case8 : 屋根断熱、初期含水率低)

#### 4) 試験前後の野地板含水率

質量測定より求めた試験前後の野地板含水率を図 2.5.13 に示す。脱気口を設置した case 2、3、6、7 は 3 週間で 10% 程度、脱気口の無い case1、5 は 10 週間で 15% 程度の含水率の低下が示されている。着目すべきは、case1 と case5 であり、試験終了時の含水率が 20mass% 程度であるにもかかわらず、図 2.5.9 の野地上及び図 2.5.10 の野地上及び野地下日陰の相対湿度が 95%RH を超えている。これは野地板全体の含水率は低下しているものの、日陰の為温度が低く、水分の逃げ場が無い部位は、乾燥せずに局所的に高い含水率が維持されたことを示唆している。

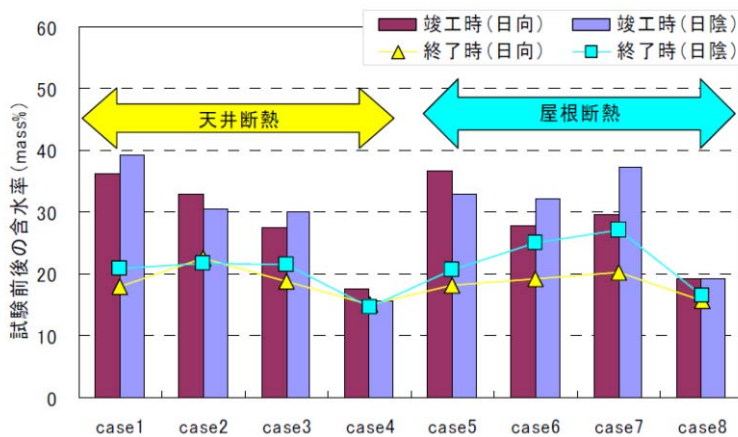


図 2.5.13 試験前後の野地板含水率

## 5) まとめ

- ・ 30φ程度の脱気口の設置により、天井断熱では0.25 m<sup>3</sup>/h程度の換気量が確保でき、初期水分の排出が促進されることが確認された。
- ・ 脱気口がなく野地板の初期含水率が30%程度の場合、日陰となるFRP下面において冬期を通じ結露が断続的に発生し、曇天の場合は終日飽和状態が続く傾向が見られた。また、日射授受時の日向部の放湿が日陰部の乾燥を妨げ、低温部での局所的な結露を助長する傾向が示された。
- ・ 野地板の初期含水率が20%程度では、脱気口が無くとも野地上下の空間を90%RH以下に抑制でき、乾燥材の使用が陸屋根の初期結露防止に有効であることが確認された。

### 2.5.3 シミュレーション計算による検討

屋外実験棟で得られた知見を踏まえ、熱水分同時移動方程式を用いた数値解析により、陸屋根に求められる防露性能に関して検討を行う。

#### (1) 計算概要

##### 1) 熱水分移動の基本式

基本式は1次元湿流を想定した熱水分同時移動方程式と熱及び水蒸気の収支式より構成される。その概要は①建物外皮の材料を通過する熱・水分の移動、②換気による熱・水分・空気の移動、③室内から小屋裏へ流入する熱・水分の移動から成り立っている。

詳細を述べると、陸屋根小屋裏の温度と絶対湿度は、対象となる空間に対して瞬時拡散を仮定した熱湿気の収支式である(2.5.1)、(2.5.2)式を用いる。材料実質部に対する基本式は、水蒸気拡散領域から液水移動領域まで適応することが可能であるうえ、多層壁に対しても統一場で解析できる利点を持つ、水分化学ポテンシャルを用いた熱水分同時移動方程式(2.5.3)、(2.5.4)式を適用する。

$$\rho_a c V \frac{\partial T_r}{\partial t} = \sum \alpha A (T_s - T_r) + \rho_a c Q (T_o - T_r) \quad (2.5.1)$$

$$\rho_a V \frac{\partial X_r}{\partial t} = \sum \alpha' A (X_s - X_r) + \rho_a Q (X_o - X_r) \quad (2.5.2)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \{ (\lambda + r \lambda'_{Tg}) \nabla T + r \lambda'_{\mu g} \nabla \mu \} \quad (2.5.3)$$

$$\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda'_{\mu} \nabla \mu + \lambda'_T \nabla T) \quad (2.5.4)$$

室内及び外界との境界条件は(2.5.5)、(2.5.6)式を用いた

$$-\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial n}\right]_s - r \left[ \lambda'_{\mu g} \frac{\partial \mu}{\partial n} + \lambda'_{Tg} \frac{\partial T}{\partial n} \right]_s = \alpha(T_r - T_s) \quad (2.5.5)$$

$$\left[ -\lambda'_{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial n} - \lambda'_{T} \frac{\partial T}{\partial n} \right]_s = \alpha'(X_r - X_s) \quad (2.5.6)$$

水分化学ポテンシャルに対する水分伝導率は絶対湿度基準の湿気伝導率に対して、時間ステップごとに(2.5.7)、(2.5.8)式により数値微分を行ない逐次計算したものを与えた。

$$\lambda'_{\mu} = \lambda' \frac{\partial X}{\partial \mu} \Big|_T \quad (2.5.7)$$

$$\lambda'_{T} = \lambda' \frac{\partial X}{\partial T} \Big|_{\mu} \quad (2.5.8)$$

記号

t: 時間

$\phi$ : 体積含水率 (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

$\mu$ : 水分化学ポテンシャル (J/kg)

T: 温度 (K)

X: 絶対湿度 (g/kgDA)

$\lambda'_{Tg}$ : 温度勾配による気相水分伝導率(kg/msK)

$\lambda'_{\mu g}$ : 水分化学ポテンシャル勾配による

気相水分伝導率(kg/ms[J/kg])

$\lambda'_{\mu}$ : 水分化学ポテンシャル勾配による

水分伝導率(kg/ms[J/kg])

$\lambda'_{T}$ : 温度勾配による水分伝導率(kg/msK)

$\lambda'$ : 湿気伝導率 (kg/msPa)

$\rho_a$ : 空気比重量 (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_w$ : 水の比重量 (kg/m<sup>3</sup>)

r: 潜熱 (J/kg)

$\rho$ : 材料密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\lambda$ : 熱伝導率 (W/mK)

$\alpha c$ : 熱伝達率 (W/m<sup>2</sup>K)

$\alpha' c$ : 湿気伝達率 (g/m<sup>2</sup>hg/kgDA)

c: 比熱 (J/kgK)

Q: 換気量 (m<sup>3</sup>/h)

V: 体積 (m<sup>3</sup>)

A: 面積 (m<sup>2</sup>)

添字

$\mu$ : 水分化学ポテンシャル

T: 温度

g: 水蒸気

r: 室内

o: 外気

s: 表面

## 2) 計算対象

計算対象は実験で得られた知見を勘案し、陸屋根の日向及び日陰部分を設けた図 2.5.14 に示すモデルとする。寸法は戸建住宅のルーフバルコニーを想定した規模(表 2.5.3 参照)とし、それぞれの空間の換気量は、屋外実験棟の結果を踏まえて表 2.5.4 の値とした。なお、断熱方式は天井断熱のみとした。

計算対象地域は省エネルギー基準の地域区分でIVa 地域に該当する宇都宮とし、外界条件としては拡張アメダス気象データ(標準年)を用いた。

変更するパラメータは、小屋裏の換気回数、天井の気密性、室内の相対湿度とした。さらに、合板の初期含水率を 20%と 30%の 2 水準設定し、計算開始日(夏期及び冬期)の影響についても検討を行う。

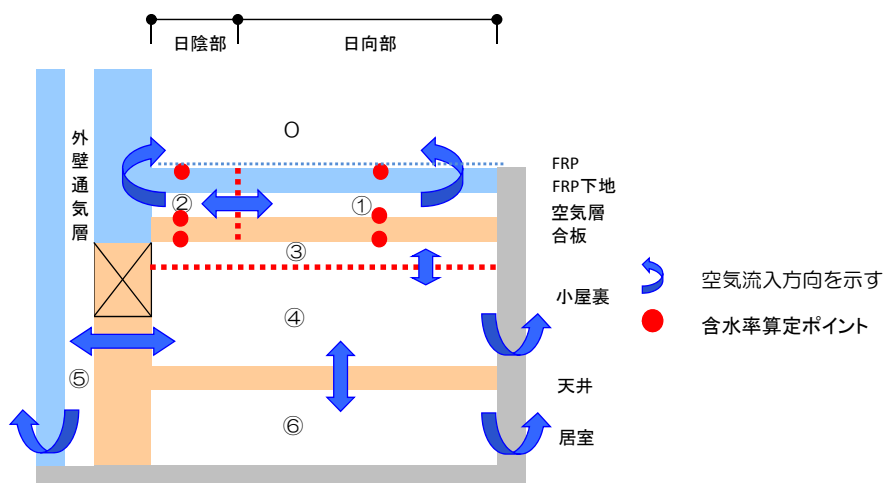


図 2.5.14 計算対象モデル

表 2.5.3 計算モデルの空間ボリューム

空間番号	空間名称	長辺(m)	短辺(m)	高さ(m)	容積(m <sup>3</sup> )
0	外気	-	-	-	-
①	FRP下日向	3.640	1.365	0.03	0.149
②	FRP下日陰	3.640	0.455	0.03	0.050
③	小屋裏上部	3.640	1.820	0.05	0.331
④	小屋裏	3.640	1.820	0.35	2.319
⑤	外壁通気層	3.640	0.018	2.60	0.170
⑥	室内	3.640	1.820	2.60	17.224

表 2.5.4 計算モデルの空気流入量の整理

	OUT	→	IN	流入量(m <sup>3</sup> /h)	備考
1	①	→	0	0	
2	①	→	②	0	
3	②	→	0	0	
4	②	→	①	0	
5	③	→	④	0.0662	
6	④	→	0	0.0000	換気回数0回/h
	④	→	0	0.2319	換気回数0.1回/h
	④	→	0	0.6956	換気回数0.3回/h
7	④	→	③	0.0662	
8	④	→	⑤	0	
9	④	→	⑥	1.7200	
10	⑤	→	0	0.1700	
11	⑤	→	④	0	
12	⑥	→	0	8.6122	換気回数0.5回/h
13	⑥	→	④	1.7224	C値 2cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> 相当
	⑥	→	④	3.4449	C値 5cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> 相当

## (2) 計算結果

### 1) 年間の含水率変動

図 2.5.15 夏期竣工の合板及び FRP 下地の含水率変化は夏期に竣工したケースの計算結果である。初期含水率 30%、小屋裏の換気回数 0.1 回/h、天井の気密性能を C 値  $2\text{cm}^2/\text{m}^2$  程度とし、室内湿度の差異を考察する(左:50%RH、右:60%RH)。夏期の竣工では、竣工直後の含水率の上昇は見られず初期含水に起因する含水率の局所的な上昇は見られない。冬期は室内湿度 60%設定(図 2.5.15 右)で合板日陰下の含水率が上昇しているが、これは居室からの水蒸気流入による影響である。室内湿度 60%設定の FRP 日陰では 4 月から 6 月にかけて含水率の上昇がみられ、冬期の間、日陰側の合板に蓄積された水分が時間をかけて FRP 日陰部分に到達したと考えられる。

図 2.5.16 は冬期竣工のケースで、室内湿度 50%、小屋裏の換気回数 0.1 回/h、天井の気密性能を C 値  $2\text{cm}^2/\text{m}^2$  で、初期含水率の差異を比較した(左:20%、右:30%)。図 2.5.16 は夏期竣工の結果と異なり、相対湿度 50%にもかかわらず冬期の含水率が双方とも 30%を越えている。特に初期含水率 30%では合板日陰下の値が高く、居室からの水蒸気流入が僅かでも躯体に含まれる水分が低温となる箇所に集中し、局所的な含水率の上昇を引き起こすことが読み取れる。しかし、12 月には合板、FRP ともに含水率が低下しており、初期含水の影響が次年度以降に持ち越すことはない。

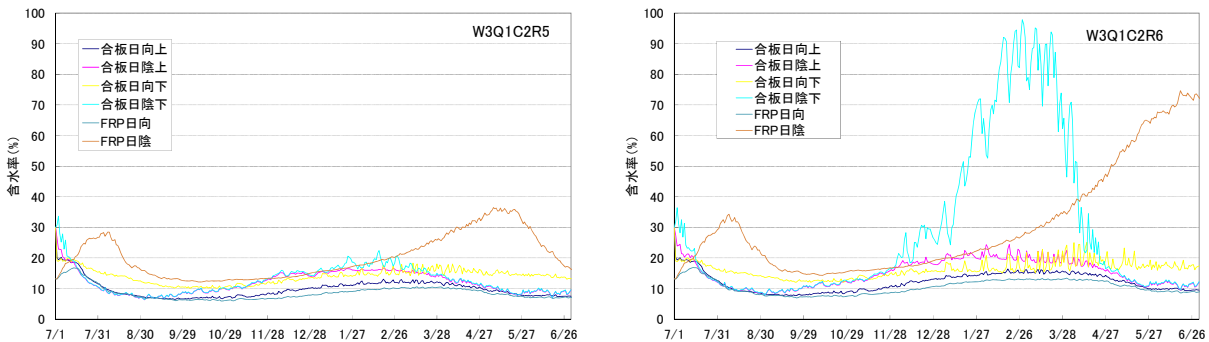


図 2.5.15 夏期竣工の合板及び FRP 下地の含水率変化

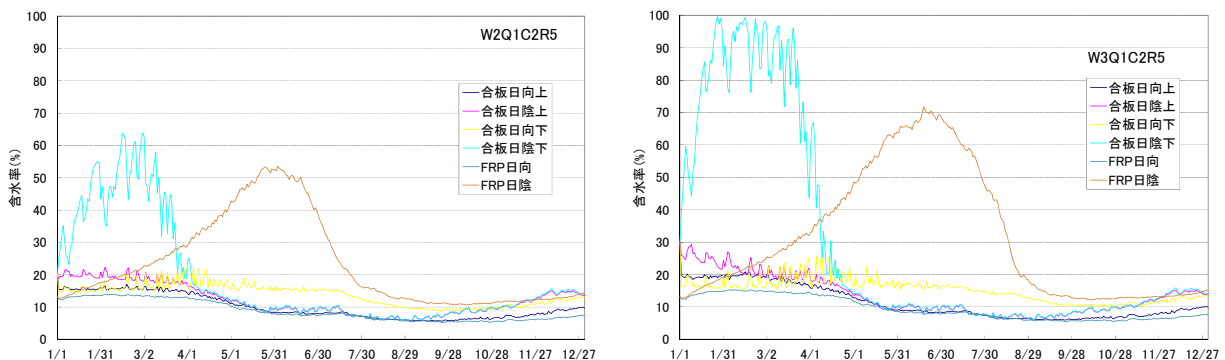


図 2.5.16 冬期竣工の合板及び FRP 下地の含水率変化



## 2) 外気流入量と含水率の関係

図 2.5.17、図 2.5.18 は、最寒期となる1～2月の合板日陰下含水率の期間平均値と外気空気流入量の関係である。なお、外気空気流入量は天井面積あたりの質量基準( $\text{kg}/\text{m}^2\text{h}$ )とした。

冬期竣工の図 2.5.17 では総じて含水率が高く、居室に加え躯体からの水分供給の影響が読み取れる。初期含水率が20%の条件(W2)では外気空気流入量の増加により含水率が低下しているものの、30%(W3)では外気流入量との相関が低く、初期水分排出の観点では換気量が不足している。夏期竣工(図 2.5.18)では、W3R6(初期含水率30%、室内湿度60%)を除けば25%以下であり、冬期に至るまでに躯体が乾燥し初期含水の影響はほとんど見られない。W3R6(初期含水率30%、室内湿度60%)については、居室からの水蒸気流入量がやや多いため乾燥が遅れたものと推測できる。

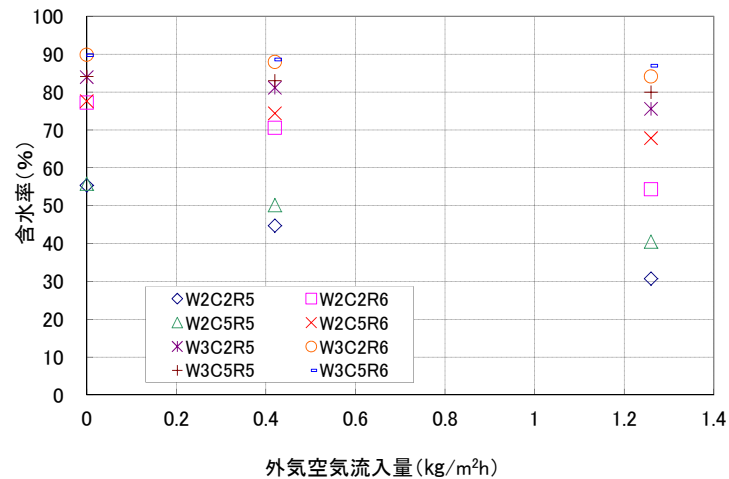


図 2.5.17 外気空気流入量と含水率の関係(夏期竣工)

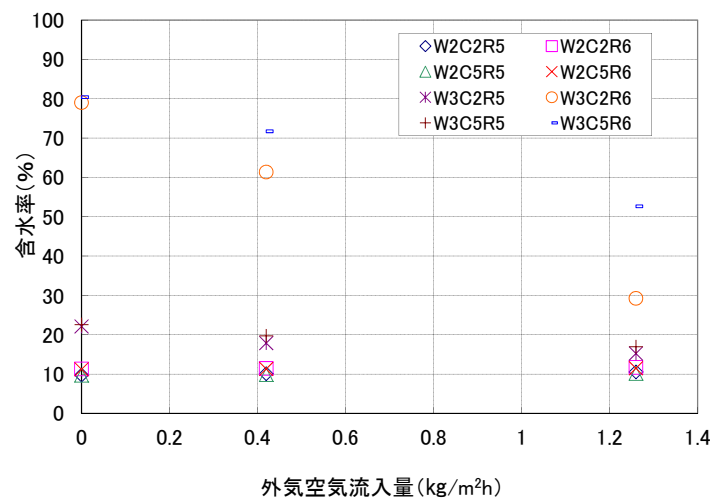


図 2.5.18 外気空気流入量と含水率の関係(夏期竣工)

## 2.5.4 まとめ

天井断熱の陸屋根小屋裏を対象とした数値解析により得られた知見を以下に示す。

〈初期結露に関して〉

躯体の初期含水が高い場合、野地板の含水率上昇の防止に一定の換気措置が有効である。

冬期竣工の場合、初期含水率が 20%程度でも一時的に日陰部野地板の含水率の上昇が生じる。しかし、0.1 回/h 程度の換気があれば夏期に水分が排出され次年度以降に影響は残らない。

躯体の初期含水率が 30%の場合、0.3 回/h 程度の換気でも初期水分排出には半年程度の期間を要する。

合板と FRP 下地の含水率上昇の位相は異なり、含水率が上昇するケースでは春季から初夏にかけて高含水状態が維持される可能性がある。

〈通年の結露に対して〉

野地板の含水率上昇は日向では生じないが、低温となる日陰部に水分蓄積が集中する。

野地板の含水率上昇は外気導入量に比べ、天井面の気密性と室内湿度の影響が大きく、宇都宮の気象条件下では天井面の気密を確保すれば、0.1 回/h 程度の外気導入量でも 25%以下に維持できる。

本検討は、宇都宮の気象条件下で金物などの熱橋、降雨・降雪等の影響を無視した場合の結果である。計算結果からは低温部への水分の集中が示唆されており、今後は低温部の面積割合や地域性等についても検討が必要と考えられる。

## 2.6 外壁通気層における防露性能・断熱性能評価に関する検討

### 2.6.1 はじめに

日本の木造戸建て住宅の外壁で多く採用されている通気層構法は、外装材と断熱層の間に、外気に通じる空気層(通気層)を設けることによって壁体内の湿気を排出し、壁体内の高湿化を抑制する構法である。外壁通気層に関しては多くの研究がなされており、壁体内の湿気排出に有効な通気層厚さなどの知見が得られているものの、実住宅において外壁通気層の効果を検討した研究は少なく、通気量の実態は明確となっていない。外壁通気層では、外気と通気層の温度差による浮力と外部風による風圧力が通気の駆動力となるが、外部風と通気量の関係性についてはほとんど検討されていない。また、通気量の違いは通気層内の温湿度に影響するため、外壁通気層の防露性能を評価する上で、通気量と温湿度の実態を把握することが重要である。一方、外壁の断熱性能を評価するにあたり、通気層外側の外装材が有する断熱性能を加味した評価手法が求められている。実測に基づく断熱性能検証は、評価手法を確立する上で重要な情報になると考えられる。

以上の背景から、本節では、外壁通気層に関する以下の性状を明らかにすることを目的として、屋外に建てられた実験住宅における長期間の実測を実施した。

- (1) 外壁通気層における通気量
- (2) 外壁通気層内の温湿度
- (3) 通気層を有する外壁における外装材の熱抵抗の効果

### 2.6.2 通気量の実態把握

戸建て住宅の外壁通気層における通気量の実態を把握するため、実験住宅において通気層の通気量を測定し、外気と通気層の温度差、外部風向・風速が通気量に及ぼす影響について検討した。

#### (1) 実測概要

測定は、岩手県立大学の建築環境工学実験棟にて実施した。実験住宅の概要を図 2.6.1、図 2.6.2、表 2.6.1 に示す。西向き片流れ屋根の総2階建てで、周囲に隣接する建物はなく開けた敷地に建っている。壁合板と透湿防水シートを防風層とする一般的な通気層構法の外壁を有する。北側は天井断熱、南側は屋根断熱であるため、小屋裏の換気方式が異なっている。ただし通気層の上端は軒裏に開放されており、軒裏空間を介して、小屋裏または屋根通気層につながっている。通気層の厚さは9mm、18mm、27mmの3仕様を図 2.6.3 に示すとおり配置した。窓がなく1、2階連続した壁を対象とし、天井断熱に通ずる厚さ9mm、18mmの通気層を「天井 9mm」、「天井 18mm」、屋根断熱に通ずる厚さ18mm、27mmの通気層を「屋根 18mm」、「屋根 27mm」として比較した。



図 2.6.1 実験住宅の外観

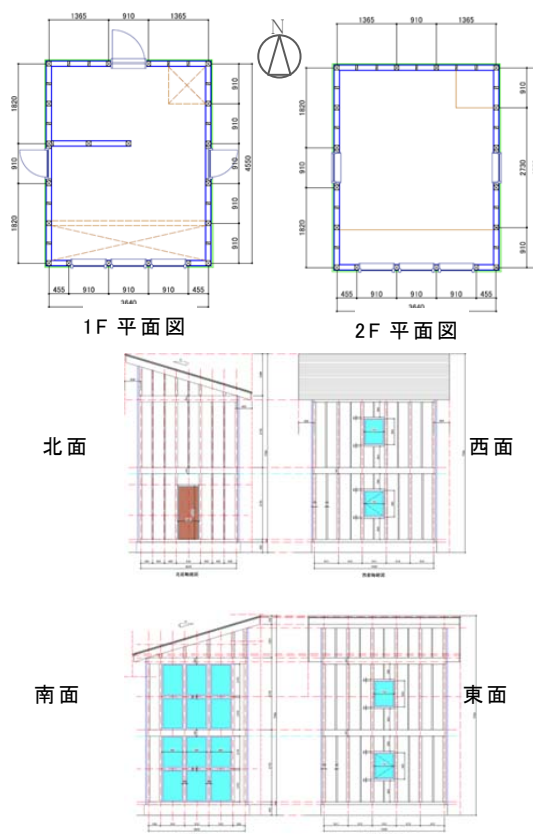


図 2.6.2 実験住宅の平面図・立面図

表 2.6.1 実験住宅の概要

建設地	岩手県滝沢村(岩手県立大学内)
工法	木造総2階建て
延床面積	33.12 m <sup>2</sup> (3.64×4.55m)
屋根	片流れ (3寸勾配)
断熱仕様	外壁: 高性能 GW16K100mm 天井: 高性能 GW16K200mm 基礎: XPS3 種 b100mm (外張り)
通気層	厚さ: 東西面: 9, 18, 27mm の3仕様 南北面: 18mm

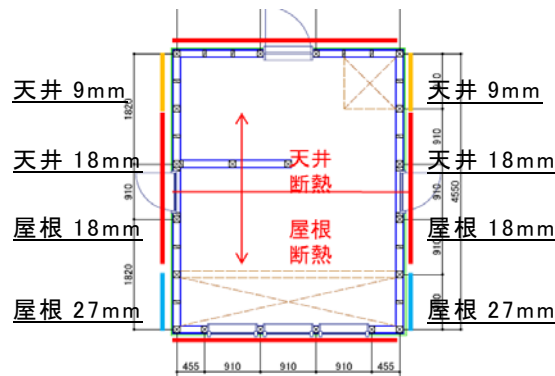


図 2.6.3 通気層の配置

通気層内風速、温度、外部風向・風速、外気温とともに、西面では通気層上下端の圧力差を測定し、通気層内の通気方向の判定に用いた。風向・風速と圧力差は1分間隔、温度は10分間隔の瞬時値を記録した。実測期間は2010年3月17日～2011年5月23日である。

通気量の算定において、通気層内の流れは上下方向の層流とし、断面方向の風速分布を図2.6.4の様に2次曲線と想定した。通気層内風速の測定値を中心風速とみなして、式2.6.1より外壁幅1mあたりの通気量を算定した。

$$Q = \frac{2}{3} d v \tag{2.6.1}$$

ここで Q:通気量[m<sup>3</sup>/s]、v:通気層内風速(厚さ中心)[m/s]、d:通気層厚さ[m]

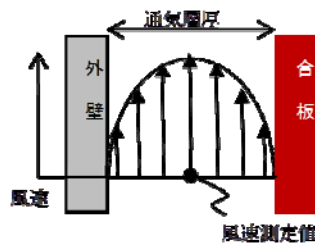


図 2.6.4 通気層内風速分布

## (2) 通気量の実態

図2.6.5に通気層内風速の測定結果を示す。2日間の外部および西面通気層内の風速である。通気層内風速はおおよそ0～1m/sで変動している。外部風速に応じて、日中の風速が大きく、夜間に風速が小さい傾向が見られる。東面通気層においても同様の性状であった。測定期間における通気層内風速の頻度分布を図2.6.6に、各通気層の平均風速を表2.6.2に示す。いずれの通気層も80%以上が風速0.4m/s以下である。西面では通気層厚さが薄い「天井9mm」が「天井18mm」より風速が大きい。一方、東面では「天井18mm」が「天井9mm」より大きいなど、方位や小屋裏換気方式の違いによって、壁体内通気性状は異なる。

通気層上下端の圧力差より通気方向を判定し、下向きの通気を負とした西面の風速の頻度分

布を図 2.6.7 に示す。10～20%の時間帯において下向きの通気が生じている。「屋根 27mm」を除くと、下向き通気のほとんどは風速 0.2m/s 未満と小さい。

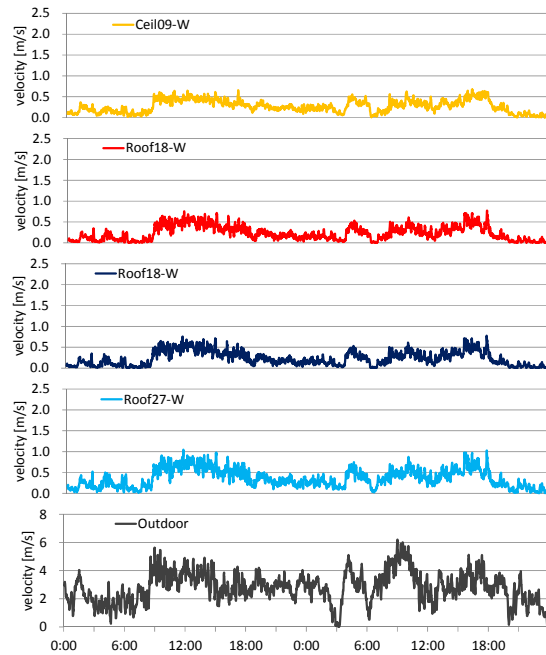


図 2.6.5 通気層内風速(西面)

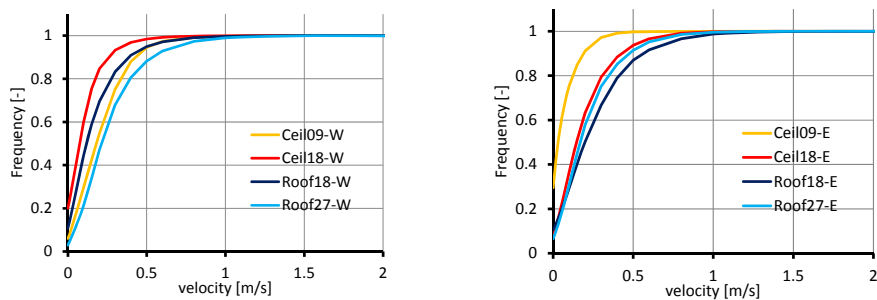


図 2.6.6 風速の頻度分布(左:西面,右:東面)

表 2.6.2 平均風速(単位:m/s)

	天井 9mm	天井 18mm	屋根 18mm	屋根 27mm
西面	0.209	0.105	0.166	0.260
東面	0.066	0.190	0.253	0.215

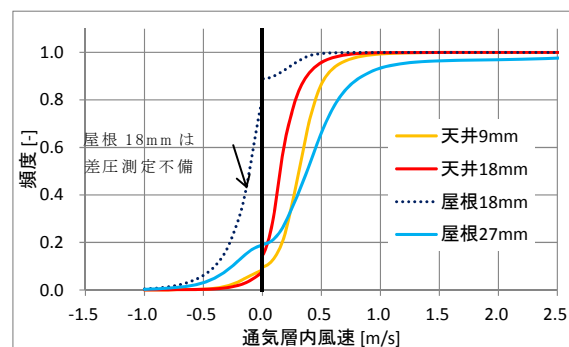


図 2.6.7 通気層内風速(上下頻度分布)

通気量の頻度分布を図 2.6.8 に示す。西面では、「天井 9mm」と「天井 18mm」の通気量がほぼ等しく、「屋根 18mm」、「屋根 27mm」ほど通気量が多い。東面では、「天井 9mm」の通気量が少なく、「天井 18mm」、「屋根 18mm」、「屋根 27mm」の順で通気量が多い。概ね通気層厚さに応じて通気量が多くなっているが、方位や小屋裏換気方式の違いによって通気量が異なる。

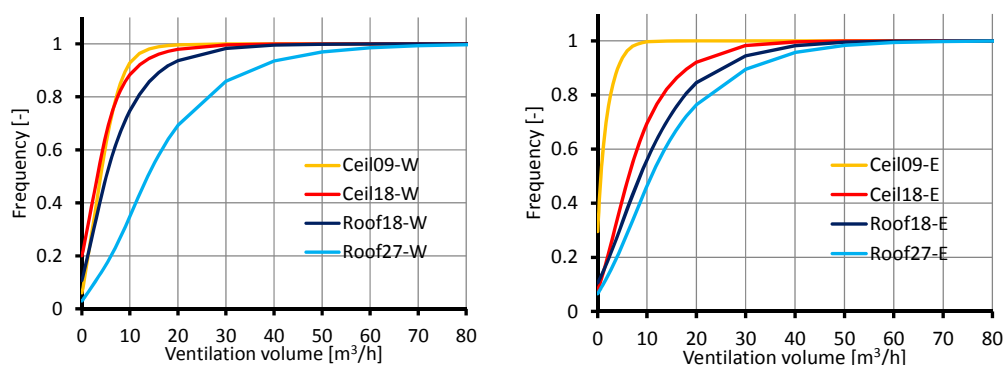


図 2.6.8 通気量の頻度分布

### (3) 温度差による通気

外気と通気層の温度差と壁体内通気量の相関を図 2.6.9 に示す。通気層の温度は、1, 2 階の高さ中心における測定値の平均値を用いた。外部風の影響を小さくするため、外部風速が 0.4 m/s 未満の時間帯を抽出した。通気量は、温度差の 1/2 乗に概ね比例している。各通気層における比例定数を表 2.6.3 に示す。同じ通気層厚さでも方位や小屋裏換気方式によって比例定数は異なっている。また上下通気方向を考慮した西面では、温度差が小さい場合、温度差が正であっても下向きの通気を生じている。温度差による通気においても、小屋裏や他の通気層との連続性により通気が影響を受けていることが推測される。

### (4) 外部風による通気

外部風速と壁体内通気量の相関を図 2.6.10 に示す。浮力の影響を小さくするため、外気と通気層の温度差が 0.5K 未満の時間帯を抽出した。通気風速の包絡線は外部風速に比例するが 0 m/s の間に分布している。西風では外部風速の増加に伴い、上向きの通気層内風速が増加する。東風では通気層内風速は非常に小さいものの、下向きの通気が増える傾向がみられる。南風や北風では、上向きと下向きの両方向に対して通気層内風速が増加している。図 2.6.10 は、西面天井 18mm の結果だが、他の通気層においても通気層と外部風向の位置関係に対し同様の結果が得られている。

西面と東面について、通気層内風速と外部風速の比例係数を図 2.6.11 に示す。比例係数は通気層内風速の絶対値を用い、西面においても通気方向は考慮していない。外部風が東西方向の時を比較すると、風上側で風速が大きく、風下側で小さい。風下側に対し風上側の比例係数は 2~3 倍の大きさである。

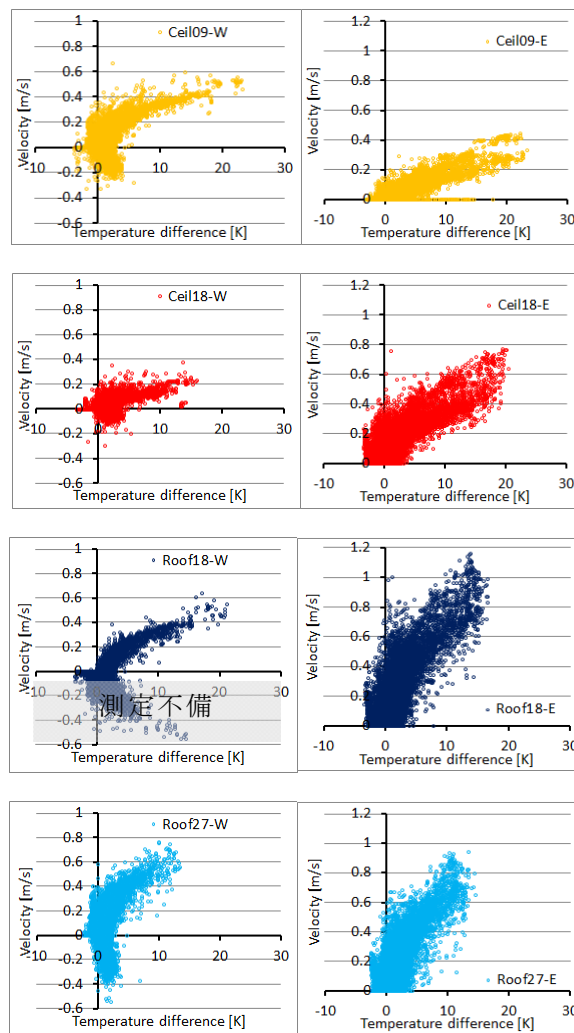


図 2.6.9 温度差と風速の相関（左:西面、右:東面）

表 2.6.3 温度差の 1/2 乗と風速の比例定数

	天井 9mm	天井 18mm	屋根 18mm	屋根 27mm
西面 (上向き)	0.11	0.05	0.10	0.18
西面 (下向き)	-0.12	-0.05	-0.14	-0.22
東面	0.07	0.12	0.23	0.20

#### (5) まとめ

壁体内通気層における通気量の実態を把握するため、実験住宅における測定を行い、通気の駆動力である温度差および外部風と通気量の関係について検討した。総 2 階建て片流れ屋根の住宅における壁体内通気について以下の性状を確認した。

壁体内通気層において、風速は 0.5m/s 未満がほとんどであり、平均風速は 0.06~0.26m/s と小さい。10~20%の時間帯において下向きの通気が生じている。浮力換気を駆動力とする通気量は、通気層と外気の温度差の 1/2 乗に比例している。外部風圧力を駆動力とする通気量は外



部風速に比例しており、風上側の通気層では上向きの通気量が、風下側の通気層では下向きの通気量が増加する。通気層に平行方向の外部風は、上向きと下向きの両方向に対して通気を生じる駆動力となっている。

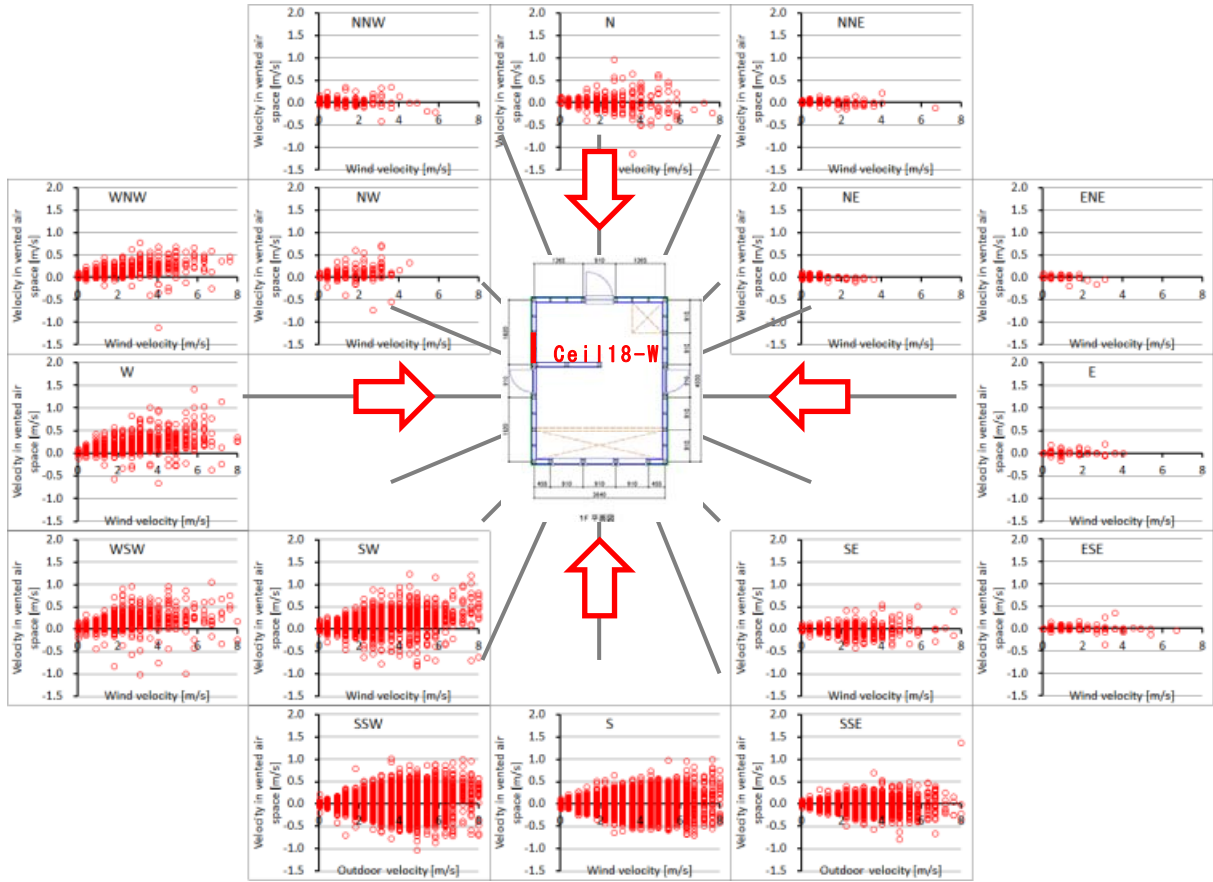


図 2.6.10 通気層内風速と外部風速の相関(西面天井 18mm、風向別)

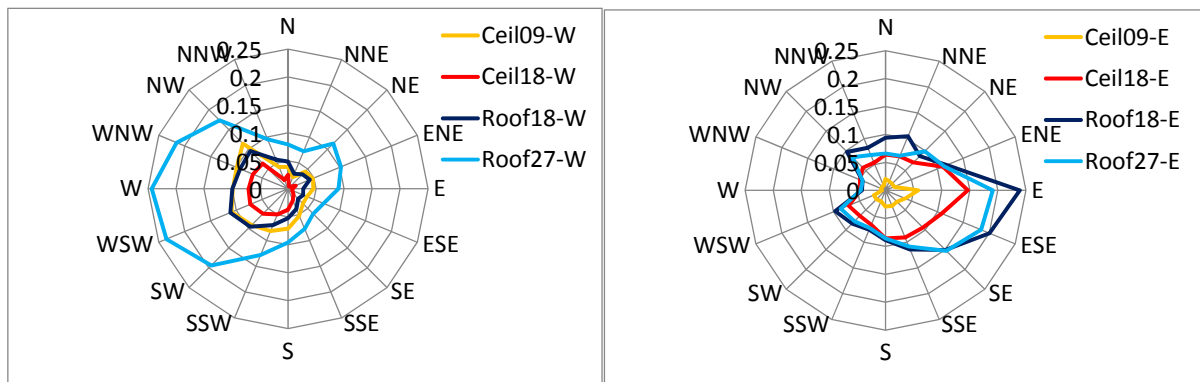


図 2.6.11 外部風速と通気層内風速の比例係数: 風向別(左: 西面、右: 東面)

### 2.6.3 通気層内温湿度の実態把握

通気層内の温湿度測定結果より温湿度変動の特性を示すとともに、通気量の差が温湿度に及ぼす影響について検討する。

#### (1) 実測概要

通気層内温湿度の測定は、前節の通気量と同じ、岩手県立大学敷地内に建設された岩手県立大学盛岡短期大学部の建築環境工学実験棟にて行った。

通気層内の風速および温湿度は、1Fの中央高さ(FL+1200mm)で測定した。風速は1分間隔、温度と相対湿度は10分間隔で、それぞれ瞬時値を記録した。測定期間は2010年3月18日～8月28日および、2010年12月6日～2011年5月23日である。

#### (2) 通気層内温湿度の実態

屋根18mmの場合の通気層内温湿度変動を図2.6.12に示す。通気層温度は、日射が当たる時間を除けば外気温とほぼ等しい変動を示している。日射による外気との温度差は約15℃に達する。相対湿度は、温度変動に応じておよそ20～80%で変動している。絶対湿度は外気とほぼ等しいが、温度と同様、日射の当たる時間に上昇する傾向がみられる。外気温が最も低くなった1月16日(7時)に東面で短時間の結露を生じている。東面では夜間に壁が低温となった状態に日射が当たり始めるため、このように瞬時的な高湿度状態となる。

全測定期間の通気層温湿度を昼夜別に外気と比較すると、通気層温度は夜間(18:00-6:00)は外気温度にほぼ等しく、日中(6:00-18:00)は外気温～外気温+20℃程度を示している(図2.6.13)。絶対湿度も外気とほぼ等しいが、夜間にはばらつきが大きく、外気よりやや低い傾向が見られる。(図2.6.14)

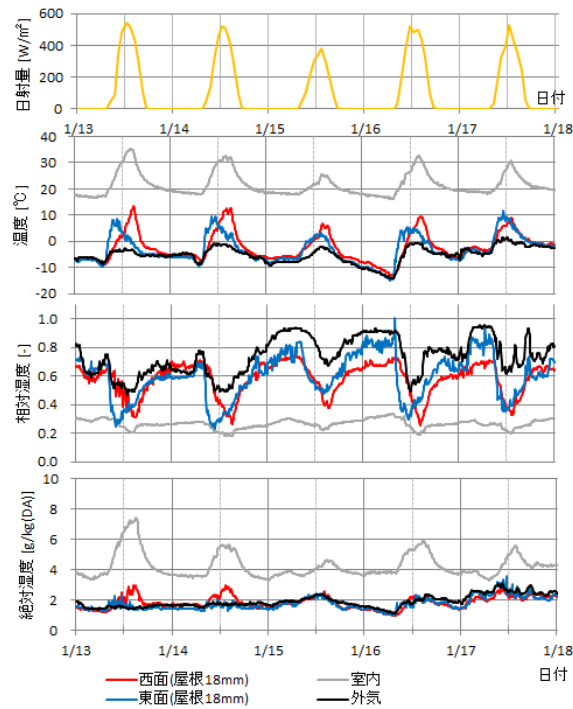


図 2.6.12 通気層の温湿度変動

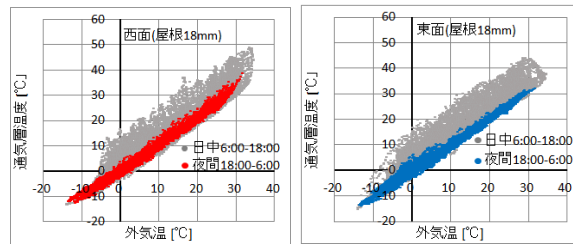


図 2.6.13 通気層温度と外気温度の相関

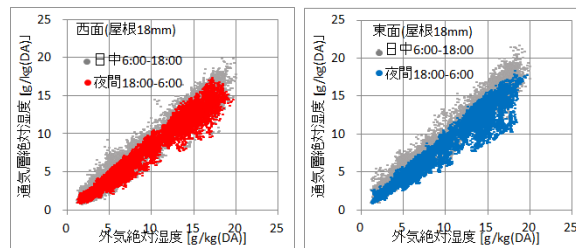


図 2.6.14 通気層と外気の絶対湿度の相関

### (3) 通気層内温湿度と通気量

図 2.6.15、図 2.6.16 に各通気層と外気の温度差、絶対湿度差を示す。いずれの通気層においても、外気に比べて日中は温度が高く、夜間は絶対湿度が低い傾向が見られる。平均値はほぼ等しいが、最大値および較差(最大値と最小値の差)は通気層によって違いがある。通気量が少ない通気層ほど最大値、較差が大きい。

温度差と絶対湿度差について、振幅と最大値を平均通気量と比較した結果をそれぞれ、図 2.6.17、図 2.6.18 に示す。平均通気量は前節と同様、通気層内風速から推定した。夜間は通気

量が少なく、温度差、絶対湿度差とも、日中と比較して振幅が 1/2 程度と小さい。測定した 4 仕様の通気層では平均通気量で 3 倍近い差があり、温度差の振幅は約 9℃、絶対湿度の振幅は 1 2g/kg(DA)の差がある。

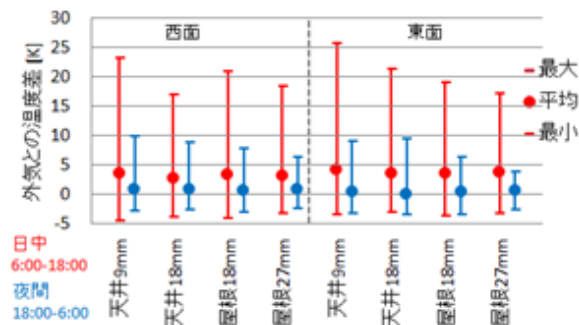


図 2.6.15 通気層と外気の温度差

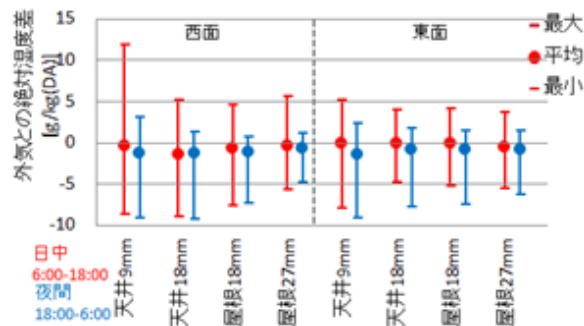


図 2.6.16 通気層と外気の絶対湿度差

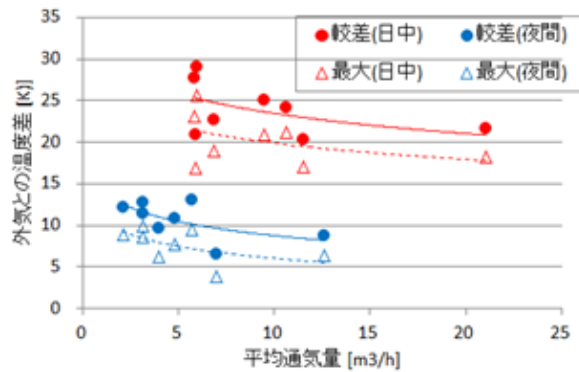


図 2.6.17 外気との温度差と平均通気量の相関

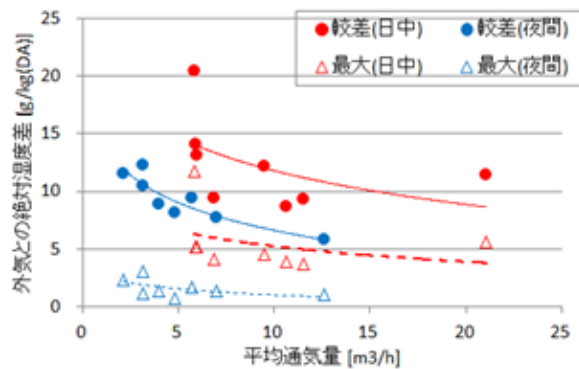


図 2.6.18 外気との絶対湿度差と平均通気量の相関

#### (4) まとめ

実験住宅における温湿度の実測調査より通気層内の温湿度変動特性を確認し、通気量の差が及ぼす影響について検討した。

本実験住宅のような断熱および室内防湿がなされた外壁の壁体内通気層では、温湿度変動は外気とほぼ等しいが、日中は日射の影響により外気より 20～30℃高い温度となる。また、通気量が少ない通気層ほど、外気との温度差や絶対湿度差が大きくなる。平均通気量で 6～21m<sup>3</sup>/h の差があると、温度 9℃、絶対湿度 12 g/kg(DA)の差を生じる。

通気量が少ない通気層では、外気の温湿度変動に加えて、日射による温度上昇や壁の吸放湿量(日中:放湿、夜間:吸湿)が大きくなる傾向がある。早朝における東面での一時的な高湿化のリスクが高い。通気層に求められる防露性能については、このような非定常の温湿度変動を考慮した評価が重要である。

### 2.6.4 通気層を有する外壁における外装材の断熱性能評価

外壁の熱貫流率を算出する際、何らかの実証データがなければ、外壁通気層の温度は外気と同じとみなし、外気側熱伝達抵抗を変えて評価されている。通気層外側の外装材の性能を問わないため、外装材が有する断熱性能は評価されない。通気層を有する外壁において、通気層の外気側にある外装材の断熱性能を評価し、外壁の熱貫流率へ反映するための基礎データを得ることを目的とした実験を行った。

#### (1) 実験概要

実験は前節までと同様、岩手県立大学敷地内に建設された岩手県立大学盛岡短期大学の建築環境工学実験棟にて行った。東面外壁の一部において外装材外側に断熱材を付加し、外壁表面断熱材の有無による壁の断熱性能の違いを評価した。実験の状況、外壁の断面構成を図 2.6.19～図 2.6.21 に示す。壁 A(断熱材あり)、壁 B(断熱材なし)ともに通気層厚さは 18mm である。付加断熱材は XPS3 種 50mm を、外装材と隙間が生じないように施工した。

図 2.6.20 に示す測定点において、熱流量(室内せっこうボードの外気側表面)、通気層内温度、通気量を 1 分間隔で測定した。測定期間は 2011 年 2 月 23 日～3 月 11 日である。



図 2.6.19 実験の状況

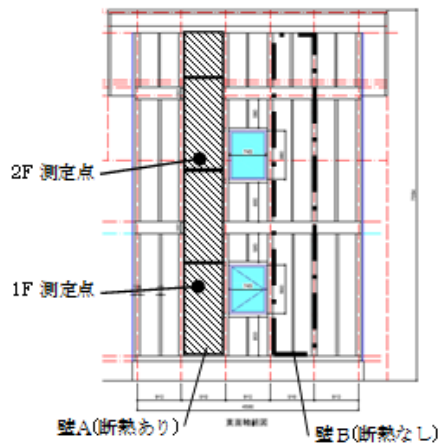


図 2.6.20 評価外壁の配置

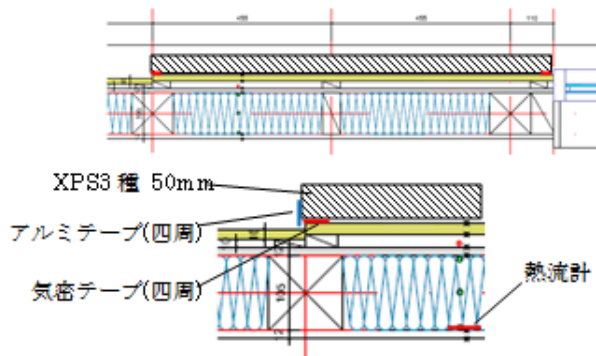


図 2.6.21 外壁の断面構成

## (2) 外装材による熱流量の違い

通気層温度の測定結果を図 2.6.22 に示す。以降では、日射による影響を無視するため、夜間(0:00~6:00)の測定データを検討対象とする。

断熱材を付加した壁 A では、通気層と外気側表面(XPS 外)で 2~3℃の温度差があるのに対し、断熱材のない壁 B では通気層温度が外壁表面温度とほぼ等しい。付加断熱材の熱抵抗が通気層温度に影響していることが確認される。室内からの熱流量についても、壁 A は壁 B より小さく、外壁の断熱性能に差がある(図 2.6.23)。

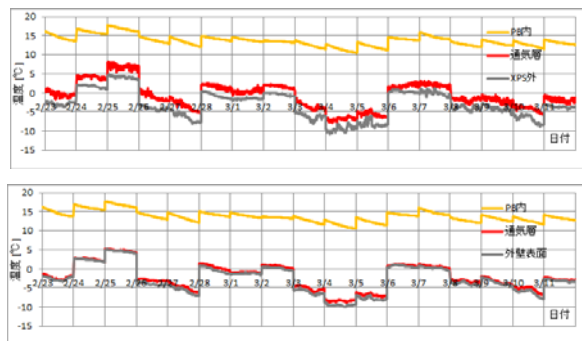


図 2.6.22 温度変動(夜間 0:00~6:00、上:壁 A 断熱あり、下:壁 B 断熱なし)

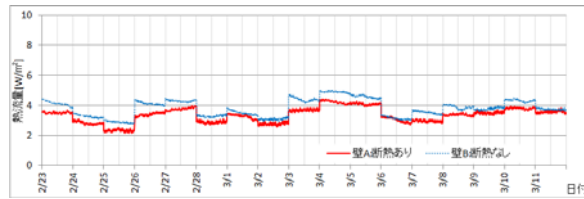


図 2.6.23 熱流量(夜間 0:00-6:00)

### (3) 外装材の断熱性能評価方法

図 2.6.24 に示すとおり、室内からの熱流量は、外壁の室内表面と通気層の温度差に比例する結果が得られた。室内からの熱流量の違いは、外装材の熱抵抗を加味した実質的な断熱性能によると考えられることから、通気層温度の低下率を用いて、外装材の熱抵抗を加味した外壁の熱貫流抵抗を導く手法を検討する。なお温度低下率の算出における内外温度差には、外壁の室内側表面と外装材(壁 A では付加した断熱材)の外気側表面の温度差を用いる。

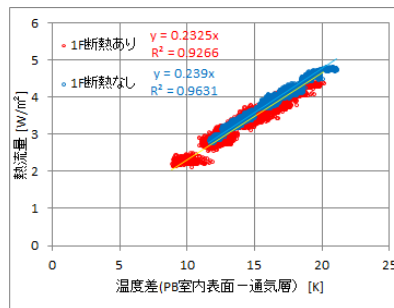


図 2.6.24 温度差と熱流量の相関

通気層温度低下率  $c$  は、式 2.6.2 で表される。

$$c = \frac{T_{si} - T_v}{T_{si} - T_{so}} \quad \dots (2.6.2)$$

ここで、 $c$ :通気層温度低下率[N.D.]、 $T_{si}$ :室内表面温度[°C]、 $T_{so}$ :外気側表面温度[°C]、 $T_v$ :通気層温度[°C]

外装材を考慮しない場合の熱貫流抵抗を  $R$ 、考慮する場合を実質熱貫流抵抗  $R'$  とすると、 $R$  と  $R'$  はそれぞれ式 2.6.3、式 2.6.4 で表される。

$$R = \frac{1}{\alpha_i} + r_i \quad \dots (2.6.3)$$

$$R' = \frac{1}{\alpha_i} + r' + \frac{1}{\alpha_o} \quad \dots (2.6.4)$$

ここで、 $R$ :外装材を考慮しない場合の外壁の熱貫流抵抗[m²K/W]、 $R'$ :外装材を考慮した外壁の熱貫流抵抗[m²K/W]、 $\alpha_i$ :室内側熱伝達率[W/m²K]、 $\alpha_o$ :外気側熱伝達率[W/m²K]、 $r_i$ :室内側表面から通気層中心までの熱貫流抵抗[m²K/W]、 $r'$ :室内表面から外気側表面までの熱貫流抵抗[m²K/W]

外壁の貫流熱量  $q$  は式(2.6.5)で表されることより、室内外表面温度差に対する通気層温度低下率  $C$  を用いて、実質熱貫流抵抗  $R'$  は式(2.6.6)で表現できる。

$$q = \frac{(T_{si} - T_{so})}{r'} = \frac{(T_{si} - T_v)}{r_i} \quad \dots(2.6.5)$$

$$R' = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{r_i}{c} + \frac{1}{\alpha_o} = R + \frac{1-c}{c} \left( R - \frac{1}{\alpha_i} \right) + \frac{1}{\alpha_o} \quad \dots(2.6.6)$$

通気層温度低下率  $c$  と通気層風速の相関を図 2.6.25 に示す。通気層風速は 10 分間の移動平均値を用いた。ばらつきは大きいものの、風速が大きくなるほど通気層温度低下率は 1 に近づく。通気層風速が 1.5m/s(壁 A)または 0.5m/s(壁 B)で通気層温度低下率が 1 となっており、通気層温度が外装材の外気側表面温度と等しくなることが分かる。

図 2.6.25 の近似式より算出した式(2.6.6)の右辺の係数  $(1-c)/c$  と通気層風速の相関を図 2.6.26 に示す。壁 A と壁 B の差は、外装材の熱抵抗の違いであることから、外装材の熱抵抗  $R_{out}$  と通気層内風速を用いて、図 2.6.26 の近似曲線を表すと、式(2.6.7)となる。

$$0.007412 \cdot R_{out}^{0.5936} \cdot v^2 - 0.119 \cdot R_{out}^{0.4046} \cdot v + 0.1038 \cdot R_{out} \quad \dots(2.6.7)$$

ここで、 $R_{out}$ :外装材の熱抵抗[m<sup>2</sup>K/W]、 $v$ :通気層内風速[m/s]

以上より、外装材の断熱性能を考慮した実質熱貫流抵抗  $R'$  は、式(2.6.6)、(2.6.7)を用いて、熱貫流抵抗  $R$ 、室内外熱伝達率  $\alpha_i$ 、 $\alpha_o$ 、外装材の熱抵抗  $R_{out}$  により推定される。

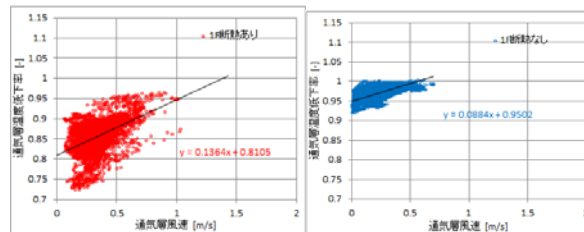


図 2.6.25 通気層内風速と温度低下率  $C$  の相関

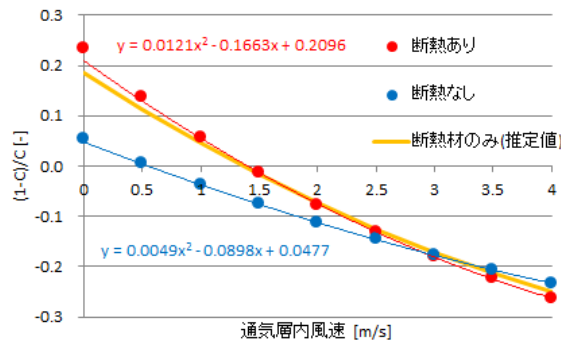


図 2.6.26 通気層内風速と係数  $(1-C)/C$  の相関



#### (4) まとめ

通気層外側の断熱性を壁体の断熱性能に反映することを目的として、実験住宅における実測に基づく実質熱貫流抵抗の算出式を提案した。通気層内風速の平均値、外装材の熱抵抗値をパラメータとして、外装材による熱貫流抵抗への効果を推定できることを示した。

## 2.7 外壁断熱性能の簡易評価方法の開発

### 2.7.1 はじめに

主に、木造の断熱改修物件の外壁について、その改修前後における断熱性能を評価する事を目的とし、現場で簡易に評価できる方法を検討した。現在、赤外線カメラ等を用いた熱画像法<sup>1)</sup>などの現場測定法も検討されているが、これらの評価方法は測定がやや煩雑であり専門的な知識や高価な測定機器が必要である。本評価法の利用者は、主に工務店や設計者等の建築実務者も想定しており、より簡易、簡単かつ安価な評価方法の開発を目的として行ったものである。

### 2.7.2 簡易評価法の概要

通常、部位の断熱性の評価には温度及び熱量の測定が不可欠であるが、現場ではより簡易な評価法が求められる。本評価法は、断熱性能既知の標準板を用いることで、温度測定のみで部位の断熱性を推定する簡易評価法である<sup>2)</sup>。測定原理を以下に示す。

室内外に温度差のある部位について考えた場合、定常状態においては、部材全体を流れる熱流と室内空気から部位室内側表面へ流入する熱流は等しいので、

$$U(\theta_{ai} - \theta_{ao}) = \alpha_i(\theta_{ai} - \theta_{si}) \quad (2.7.1)$$

ここに、 $U$  : 熱貫流率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$\alpha_i$  : 室内側表面熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$\theta_{ai}$  : 室内側空気温度 (°C)

$\theta_{ao}$  : 外気側空気温度 (°C)

$\theta_{si}$  : 建物外皮の室内側表面温度 (°C)

(1)式を変形すると、

$$(\theta_{ai} - \theta_{si}) = \frac{U}{\alpha_i}(\theta_{ai} - \theta_{ao}) \quad (2.7.2)$$

ここで、表面熱伝達抵抗  $\alpha_i$  及び室内外空気温度差  $(\theta_{ai} - \theta_{ao})$  が一定であれば、室内側空気温度と建物外皮の室内側表面温度との差  $(\theta_{ai} - \theta_{si})$  は、建物外皮の熱貫流率  $U$  に比例する。従って、断熱性既知の部材と測定対象部位の表面熱伝達率が同程度であれば、それぞれの表面温度の違いから断熱性が推定できる。本評価法は、断熱性既知の部材と測定対象部位の室内側表面温度を

それぞれ測定し、その温度の高低から断熱性能を推定する比較法である。本評価法では、断熱性能既知の部材として、熱抵抗の異なる複数の発泡プラスチック保温材（以下、標準板と記す。）を用いる手法について検討した。測定手順を以下に示す。

- ①測定対象は窓面近傍に位置する外壁とする。
- ②窓ガラス面には熱抵抗既知かつその値の異なる複数の標準板を貼り付け、窓全面を断熱する（図 2.7.1(a)）。
- ③室内を加熱又は冷却し、室内外に温度差を設ける。
- ④日射がなく温度が比較的安定している時間帯において、測定対象外壁と標準板の表面温度を測定する。
- ⑤測定対象と標準板の表面温度の高低から、外壁の断熱性能を定性的に評価する。また、定量的な評価を行う場合は、標準板の断熱性能と温度の関係式を求め、この式から外壁の熱貫流率を算出する（図 2.7.1(b)）。

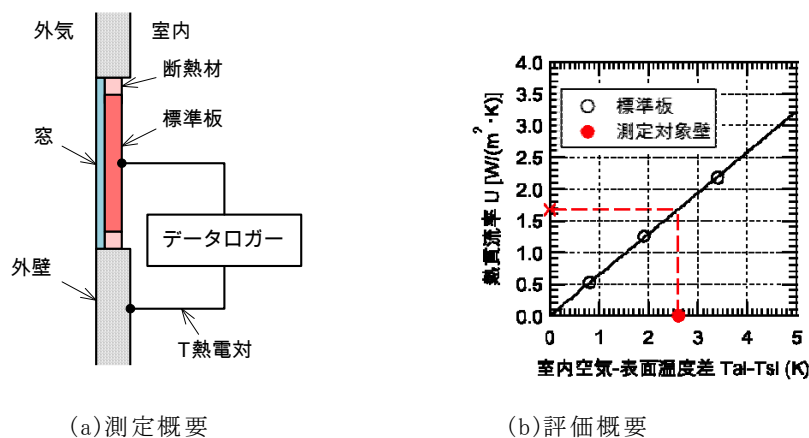


図 2.7.1 簡易評価法の概要

### 2.7.3 簡易評価法の検証

簡易評価法の測定精度を検証するため、2009年度から2011年度の3カ年に亘り検証実験を行った。その内容および結果を以下に示す。

#### (1) 簡易現場測定（2009年度）

##### 1) 測定内容

異なる断熱性を持つ4種類の外壁モデルを作製し、埼玉県草加市の建材試験センター中央試験所の敷地内にある2F建て建物の試験室の一部で、簡易的な現場測定を行った（表 2.7.1）。使用する測定器による測定精度を確認するため、測定器にはT熱電対、放射温度計、赤外線カメラおよび熱流計とした（表 2.7.2）。外壁の断熱仕様は、無断熱からH11基準相当の断熱性とした（表 2.7.3）。また、標準板は断熱性の異なる3種類の発泡プラスチック保温材とし、それぞれS55基準相当、H4基準相当、H11基準相当の断熱性を持つものとした（表 2.7.4）。

表 2.7.1 外壁の断熱水準と断熱性(設計値)

建物	2F 建て S 造試験棟
場所	埼玉県草加市
測定位置	2F 試験室東壁 (窓面を使用)
測定期間	2010 年 3 月 1 日～20 日

表 2.7.2 測定器概要

No.	測定器	品名	製造社名
No.1	放射温度計	73009	シンワ測定
No.2		AD-5615	エーアンドディ
No.3		IR-TA	チノー
No.4		R-150	アンリツ計器
No.5	赤外線カメラ	CPA-8200	チノー
No.6	T 熱電対	—	山里産業
No.7	熱流計	—	英弘精機

表 2.7.3 外壁の断熱水準と断熱性(設計値)

断熱水準	壁の熱貫流率
無断熱	1.74 W/ m <sup>2</sup> ・K
S55	1.17 W/ m <sup>2</sup> ・K
H4	0.66 W/ m <sup>2</sup> ・K
H11	0.44 W/ m <sup>2</sup> ・K

表 2.7.4 標準板の種類と断熱性

断熱水準	種類	厚さ	熱貫流率
S55	EPS	25 mm	1.27 W/ m <sup>2</sup> ・K
H4	EPS	50 mm	0.74 W/ m <sup>2</sup> ・K
H11	PF	50 mm	0.40 W/ m <sup>2</sup> ・K



図 2.7.2 試験室(試験体設置位置)



図 2.7.3 試験室(測定状況)

## 2) 測定結果

測定期間中の室内外温度測定結果を図 2.7.4 に、熱貫流率の推定結果を図 2.7.5 に、室内側表面温度分布測定結果の一例を図 2.7.6 に示す。図 2.7.5 は 2010 年 3 月 18 日 19 時から 19 日 5 時までの 2 時間毎の測定結果の平均値を示す。測定器によりばらつきはあるが、H4 以下の断熱性を持つ外壁の熱貫流率推定結果は、概ね設計値の±20%以内で一致しており、夜間かつ室内外空気温度差が 20K 程度の環境下であれば、H4 程度の断熱性を持つ外壁であれば、断熱性能の推定ができる事が確認できた。

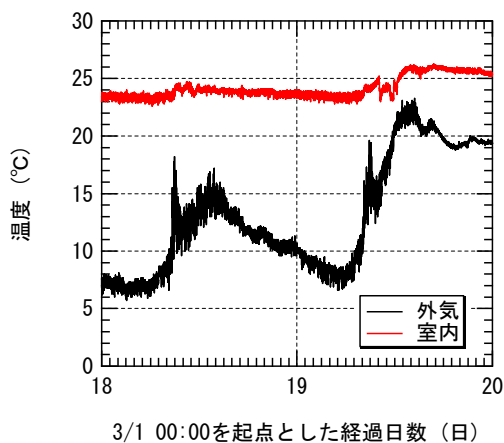


図 2.7.4 室内外温度測定結果

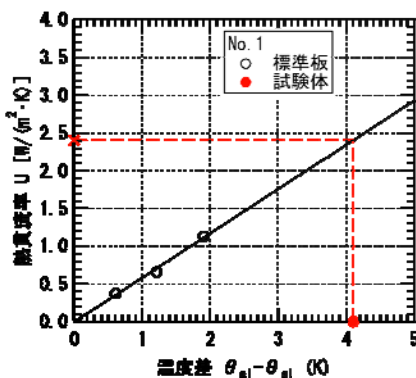


図 2.7.5 熱貫流率の設計値と推定値の比較結果(2010年3月18日19時から19日5時の平均値)

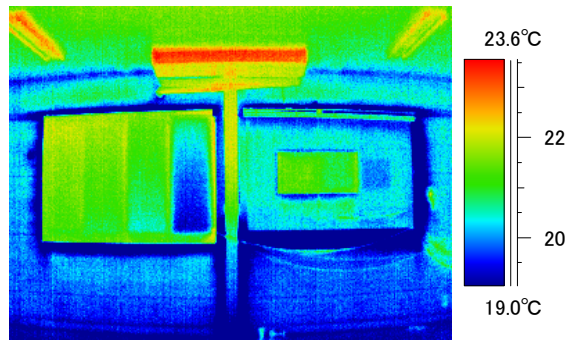


図 2.7.6 赤外線カメラによる表面温度分布測定結果(2009年3月18日23時)

## (2) 現場測定 (2010年度)

### 1) 測定内容

2009年度の簡易現場測定の結果を踏まえ、実際の住宅における現場測定を実施した。放射温度計による測定は、ややばらつきが見られたので、温度測定器には現場での測定のし易さを考慮し小型のロガーを持つ接触式温度計を用いた。

測定対象の建物は、無断熱仕様(A棟)、S55基準相当(B棟)、H11基準相当(C棟)の3棟とした(表2.7.6及び図2.7.7～図2.7.9)。A棟は無断熱仕様であるが、土壁のため熱容量が大きい建物である。また、C棟の窓ガラスは複層ガラス仕様であったが、検証用に単板ガラスに取り換えた。A棟、B棟に関してもガラスは単板ガラスである。ガラス面には、表2.7.7に示す3種類の標準板を水平に並べて設置した(図2.7.10～図2.7.12)。

表 2.7.5 測定器概要

No.	測定器	品名	製造社名
—	接触式温度計	おんどとり	ティアンドデイ

表 2.7.6 測定対象外壁の概要

	A棟	B棟	C棟
建物	木造2F建て	S造2F建て	S造2F建て
断熱水準	無断熱(土壁)	S55相当	H11相当
場所	滋賀県 米原市	滋賀県 彦根市	滋賀県 近江八幡市
測定位置	2F洋室北壁	1F和室東壁	2F洋室北壁
熱貫流率	不明	0.61 W/m <sup>2</sup> ·K	0.32 W/m <sup>2</sup> ·K
測定期間	2011年3月	2011年3月	2011年3月

表 2.7.7 標準板の種類と断熱性

断熱水準	種類	厚さ	熱貫流率
S55 相当	XPS	25 mm	1.13 W/ m <sup>2</sup> ・K
H4 相当	XPS	50 mm	0.66 W/ m <sup>2</sup> ・K
H11 相当	PF	50 mm	0.38 W/ m <sup>2</sup> ・K



図 2.7.7 建物外観(A棟)



図 2.7.8 建物外観(B棟)



図 2.7.9 建物外観(C棟)



図 2.7.10 測定状況(室内側、A棟)

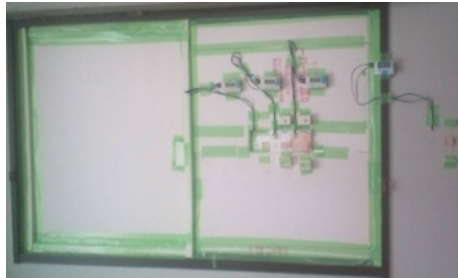


図 2.7.11 測定状況(室内側、B棟)



図 2.7.12 測定状況(室内側、C棟)

## 2) 測定結果

測定期間中における室内外空気温度測定結果を図 2.7.13～図 2.7.15 に、その時の外壁及び標準板室内側表面温度測定結果を図 2.7.16～図 2.7.18 に示す。なお、図 2.7.13～図 2.7.18 の横軸は 0 時を起点とした経過時間を示す。

いずれの測定結果をみても、外壁の室内側表面温度は標準板断熱性能に対応しておらず、温度測定結果から断熱性が判別できない結果となった。A 棟および B 棟に関しては、室温の変動に比べ表面温度の変動が大きいことから、表面の気流状態が一樣又は一定では無い(変化している)可能性があり、これが測定精度に影響を与えていると考えられる。また、標準板及



び温度測定器の一部は、ガラス面及び標準板からの浮きが見られており、これも測定精度の低下要因となっていると考えられる。

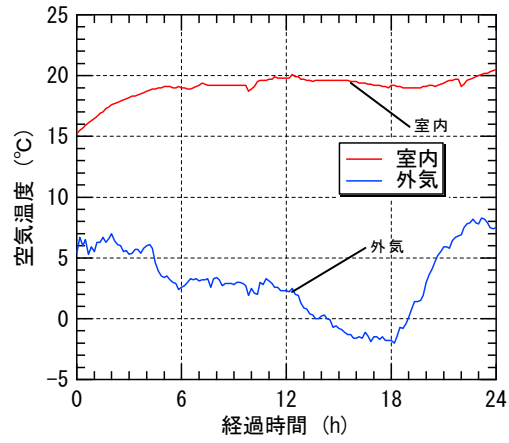


図 2.7.13 空気温度測定結果(A棟)

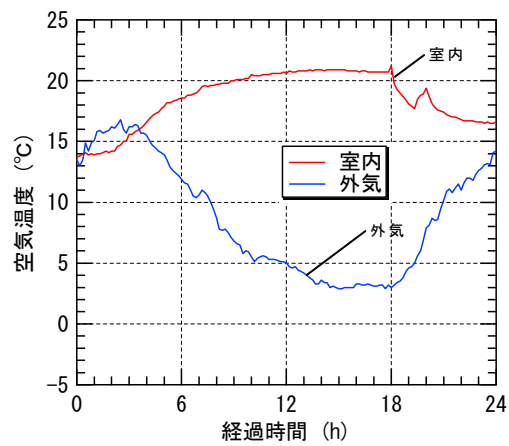


図 2.7.14 空気温度測定結果(B棟)

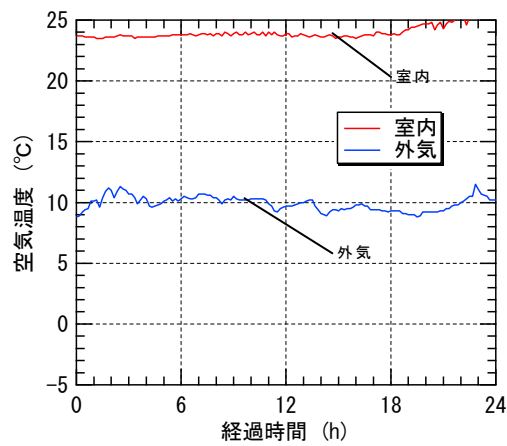


図 2.7.15 空気温度測定結果(C棟)

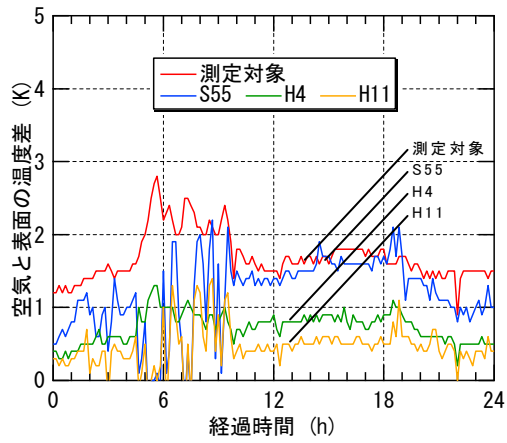


図 2.7.16 室内側表面温度測定結果(A棟)

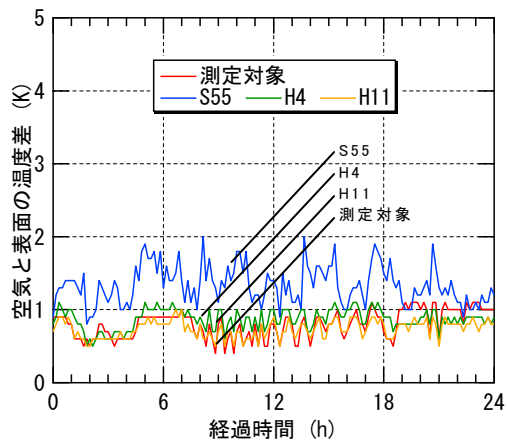


図 2.7.17 室内側表面温度測定結果(B棟)

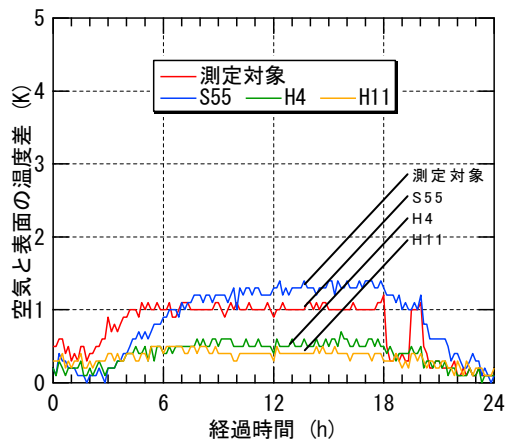


図 2.7.18 室内側表面温度測定結果(C棟)

### (3) 実験室実験 (2010 年度)

評価法の妥当性を再検証するため、実験室において定常環境下における測定を行った。

## 1) 試験体および標準板

試験体は、寸法 W1、820mm×H1、980mm の木造外壁で、その一部に寸法 W805×H900 mm の窓を持つ(図 2.7.19)。この窓ガラス面(FL3mm)を標準板設置位置とし、その近傍の壁面の一般部を測定対象とした。外壁の断熱水準は、無断熱の仕様から次世代省エネルギー基準を超える仕様の4種類とした(表 2.7.8)。

なお、外壁の一般部の熱貫流率は(2.7.3)式より算出し、各材料の熱抵抗は JIS A 1412-2 [3] により測定した。また、表面熱伝達率は表 2.7.10 に示す値を用い、中空層の熱抵抗は  $0.09\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$  と仮定した。

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_i R_i + \frac{1}{\alpha_o}} \quad (2.7.3)$$

ここに、 $U$  : 熱貫流率 [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]

$\alpha_i$  : 室内側表面熱伝達率 [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]

$\alpha_o$  : 外気側表面熱伝達率 [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]

$R_i$  : 部位の各材料*i*の熱抵抗 ( $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ )

標準板は、熱抵抗の異なる3種類とし、それぞれIV地域におけるS55相当、H4相当およびH11相当の断熱性を持つものとした(表 2.7.9)。各標準板の熱抵抗は、JIS A 1412-2 に従って測定した。

## 2) 測定内容

### a 標準板の設置方法

本評価法では、測定面と標準板面の表面熱伝達率が同程度であることを前提条件としているが、標準板の設置条件によっては、表面熱伝達率が変化する可能性がある。このため、その設置方法が測定結果に与える影響を検討した。いずれの条件でも標準板は、寸法は  $200\times 200\text{mm}$  とし、窓の中央部に3枚並べて設置した。Case1は標準板と同じ断熱材で周囲のガラス全面を覆う条件(図 2.7.21)、Case2は標準板周囲のガラス面は断熱せず室内に開放した条件(図 2.7.22)である。

### b 簡易評価法の検証

測定は、人工気候室の界壁に測定対象の外壁モデルを垂直に設置して行った(図 2.7.20)。室内外の温度は、冬季の温熱環境を再現した条件とした(表 2.7.10)。各部の温度が安定した後、測定面及び標準板の室内側表面温度を測定した。温度測定器は、T 熱電対及び赤外線カメラ(サーモビジョン CPA-8200 (株式会社チノー製))の2種類を用いた。各標準板の温度測定結果より、図 2.7.1 に示すように断熱性と温度の関係式(校正線図)から測定面の熱貫流率を求めた。また、比較用に測定対象面のせっこうボードの外気側に熱流計を貼り付け熱流量を測定し、(2.7.4)式より熱貫流率を求めた。

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{\theta_{si} - \theta_{so}}{q} + \frac{1}{\alpha_o} \quad (2.)$$

7.4)

ここに、 $U$  : 部材の外気側表面温度 (°C)

$\alpha_i$  : 室内側表面熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

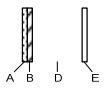
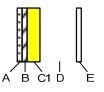
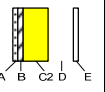

$\alpha_o$  : 外気側表面熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup>·K)]

$\theta_{si}$  : 部材室内側表面温度 (°C)

$\theta_{so}$  : 部材外気側表面温度 (°C)

$q$  : 部材を通過する熱量 (W/m<sup>2</sup>)

表 2.7.8 試験体の概要

No.	No.1	No.2	No.3	No.4
断熱水準	無断熱	S55 相当	H4 相当	H11 相当
熱貫流率	2.82 W/m <sup>2</sup> ·K	0.92 W/m <sup>2</sup> ·K	0.55 W/m <sup>2</sup> ·K	0.29 W/m <sup>2</sup> ·K
断面図				
備考	A: サイディング、t=14mm B: 合板、t=9mm C1: XPS、t=25mm C2: XPS、t=50mm C3: GW、t=105mm D: 中空層、t=105~55mm E: せっこうボード、t=12.5mm			

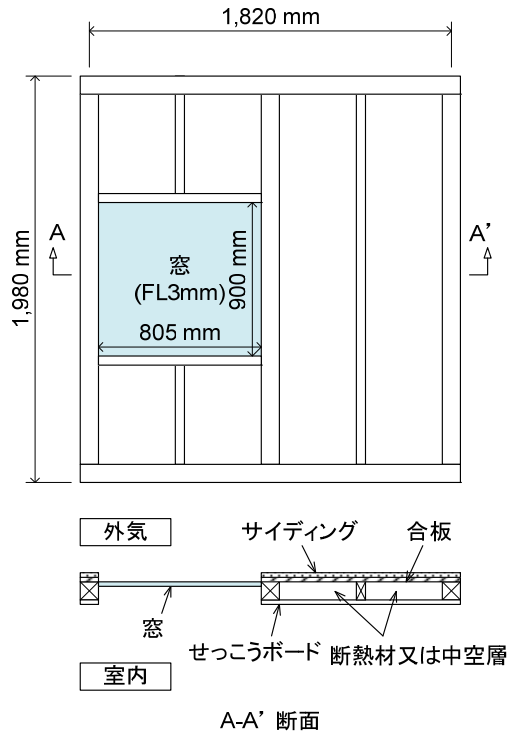


図 2.7.19 試験体概要

表 2.7.9 標準板の概要

記号	A	B	C
断熱水準	S55 相当	H4 相当	H11 相当
種類	XPS t=25mm	XPS t=50mm	PF t=50mm
熱貫流率	1.13W/m <sup>2</sup> ・K	0.66W/m <sup>2</sup> ・K	0.38W/m <sup>2</sup> ・K

表 2.7.10 空気温度及び表面熱伝達率の設定値

項目	室内	外気
空気温度	20℃	0℃
表面熱伝達率	9 W/m <sup>2</sup> ・K <sup>[4]</sup>	25 W/m <sup>2</sup> ・K <sup>[4]</sup>

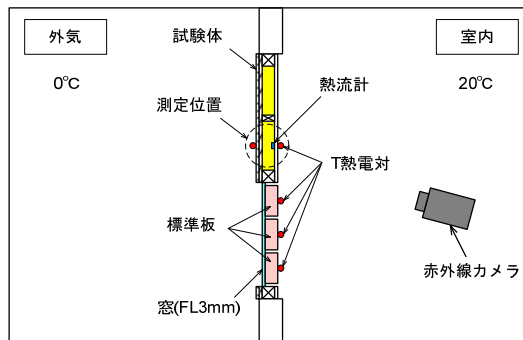


図 2.7.20 試験概要



図 2.7.21 試験状況 (Case1)



図 2.7.22 試験状況 (Case2)

### 3) 測定結果

#### a 標準板の設置方法

窓全面を標準板で覆う Case1 では、標準板の断熱水準の高低に応じた表面温度測定結果が得られた(図 2.7.26、図 2.7.31)。一方、標準板周囲の窓面を断熱しない Case2 では、3種類の標準板の表面温度はほぼ同じ値となり、またその相関性も低い結果となった(図 2.7.27)。これは主に窓面からのドラフトが影響しているものと考えられ、標準板は Case1 のように窓全面を覆う形で設置する方法が望ましいと言える。

#### b 簡易評価法の検証

いずれの断熱仕様においても、3種類の標準板の表面温度との高低から、断熱基準が判別できる結果が得られた(図 2.7.23～図 2.7.27)。また、比較的断熱性能の低い試験体 No.2 及び No.3 に関しては、おおむね設計値に対して±10%以内で一致する結果が得られ、本評価法の妥当性が確認できた(表 2.7.11)。ただし、試験体 No.1 及び No.4 は、設計値に比べ±30%を超える顕著な差が認められる条件もあった。これは、校正線図を外挿して結果を推定していることが影響していると考えられる。また、断熱性能が高くなるほど、室内空気温度と室内側表面温度との差が小さくなるため、測定精度は低くなる。表面熱伝達率にもよるが、断熱性能の高い試験体 No.4 は、温度差が0.3℃程度と非常に小さい。このため、次世代省エネルギー基準を大幅に超えるような断熱性能を持つ部位に関しては、本評価法での定量的な評価は難しいと考えられる。

表 2.7.11 熱貫流率算定結果

No.	断熱水準	熱電対	赤外線カメラ	熱流計
1	無断熱	2.40 W/(m <sup>2</sup> ·K) (-14.9%)	2.18 W/(m <sup>2</sup> ·K) (-22.9%)	1.52 W/(m <sup>2</sup> ·K) (-30.4%)
2	S55 相当	1.00 W/(m <sup>2</sup> ·K) (+7.9%)	0.91 W/(m <sup>2</sup> ·K) (-1.7%)	0.81 W/(m <sup>2</sup> ·K) (-11.9%)
3	H4 相当	0.59 W/(m <sup>2</sup> ·K) (+7.4%)	0.58 W/(m <sup>2</sup> ·K) (+6.1%)	0.53 W/(m <sup>2</sup> ·K) (-2.3%)
4	H11 相当	0.21 W/(m <sup>2</sup> ·K) (-28.1%)	0.17 W/(m <sup>2</sup> ·K) (-41.3%)	0.30 W/(m <sup>2</sup> ·K) (+6.3%)

[備考]表中の( )内の数値は設計値との差を示す。

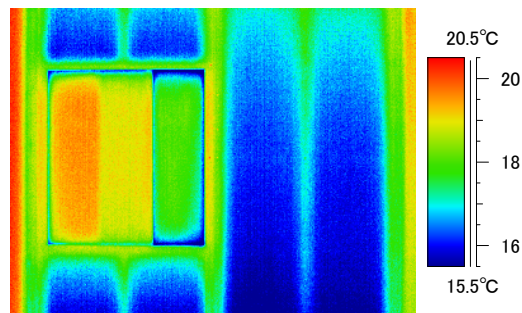


図 2.7.23 赤外線カメラによる表面温度分布測定結果(無断熱仕様、Case1)

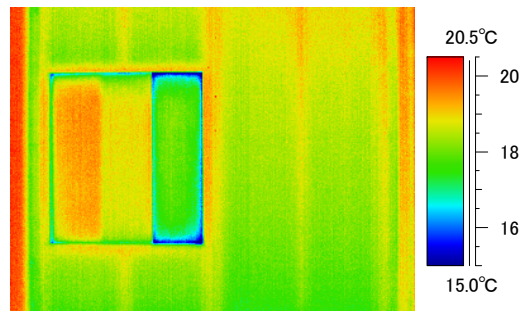


図 2.7.24 赤外線カメラによる表面温度分布測定結果(S55 仕様)

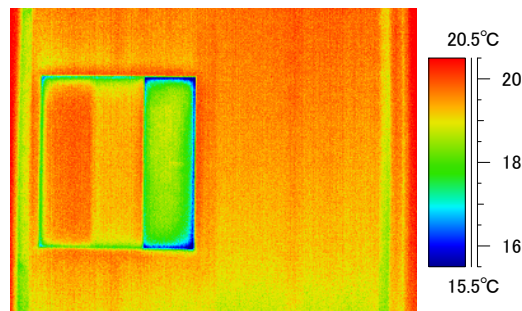


図 2.7.25 赤外線カメラによる表面温度分布測定結果(H4 仕様、Case1)

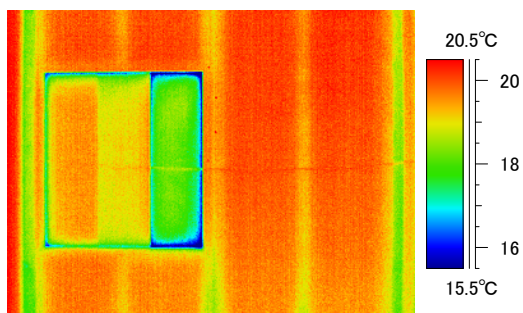


図 2.7.26 赤外線カメラによる表面温度分布測定結果(H11仕様、Case1)

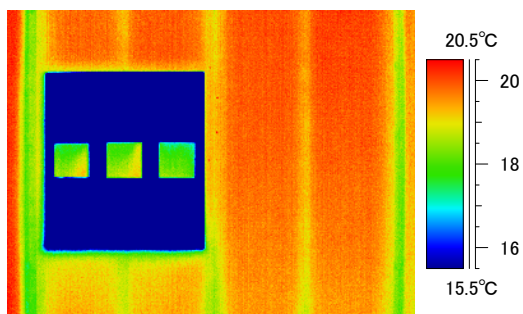


図 2.7.27 赤外線カメラによる表面温度分布測定結果(H11仕様、Case2)

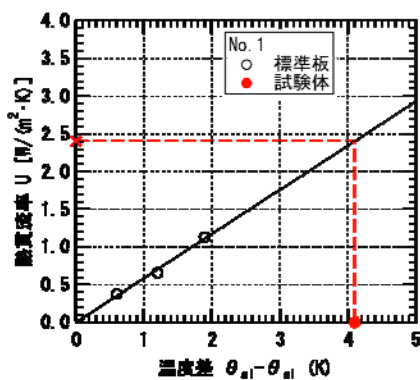


図 2.7.28 熱貫流率推定結果(無断熱)

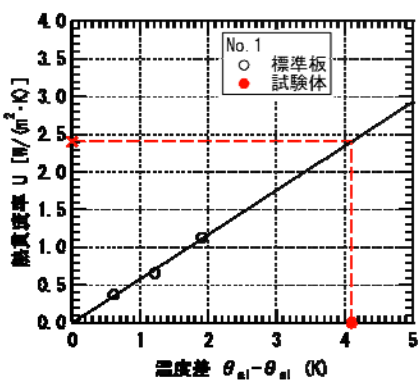


図 2.7.29 熱貫流率推定結果(S55相当)



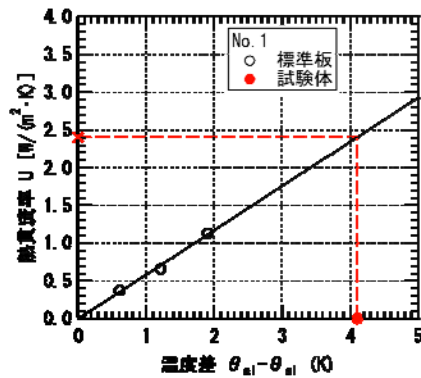


図 2.7.30 熱貫流率推定結果(H4 相当)

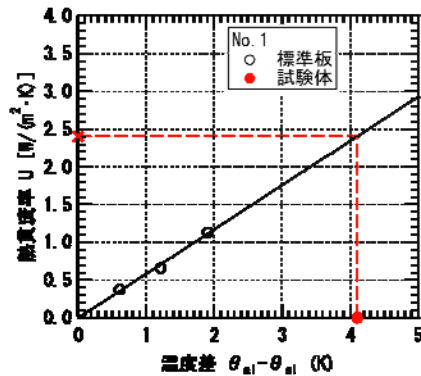


図 2.7.31 熱貫流率推定結果(H11 相当)

#### (4) 現場測定 (2011 年度)

非定常環境下における精度検証を目的とし、「(3) 実験室実験 (2010 年度)」と同様の方法にて、現場測定を行った。

##### 1) 建物内容

現場測定は、埼玉県三郷市に建築された 2 棟の戸建木造住宅で行った。各住宅の外壁の断面構成を図 2.7.32 に示す。それぞれの断熱性能は、A 棟が次世代省エネルギー基準(H11)相当、B 棟が新省エネルギー基準(H4)相当である(表 2.7.12)。また、いずれも窓面は複層ガラス仕様の引き違い窓である(表 2.7.13)。

表 2.7.12 建物概要

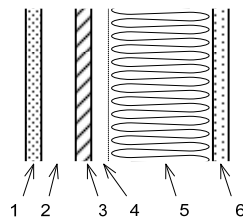
項目	A 棟	B 棟
測定部位	1F 北側外壁	2F 南東側外壁
断熱水準	H11 相当	H4 相当
熱貫流率 <sup>注1</sup>	0.37 W/m <sup>2</sup> ·K	0.55 W/m <sup>2</sup> ·K
断熱材	高性能 GW16K t=90mm	RW t=50mm
測定期間	H24.2.19～ H24.2.20	H24.3.10～ H24.3.12

表 2.7.13 窓仕様および標準板の概要

項目	A 棟		B 棟	
窓の種類	引違い窓		引違い窓	
ガラスの仕様	Low-E 複層ガラス (FL6+A6+ Low-E6mm)		複層ガラス (網入 6.8+A6+FL6mm)	
ガラスの熱抵抗 <sup>注2</sup>	0.23 m <sup>2</sup> ・K/W		0.13 m <sup>2</sup> ・K/W	
標準板の種類	XPS 1 種 b t=75mm	XPS 3 種 b t=25mm	XPS 1 種 b t=50mm	XPS 3 種 b t=25mm
標準板の熱抵抗 <sup>注3</sup>	2.14 m <sup>2</sup> ・K/W	0.81 m <sup>2</sup> ・K/W	1.47 m <sup>2</sup> ・K/W	0.82 m <sup>2</sup> ・K/W
熱貫流率 <sup>注1</sup>	0.39 W/m <sup>2</sup> ・K	0.83 W/m <sup>2</sup> ・K	0.57 W/m <sup>2</sup> ・K	0.90 W/m <sup>2</sup> ・K
断熱水準	H11 相当	S55 相当	H4 相当	S55 相当

## 2) 測定内容

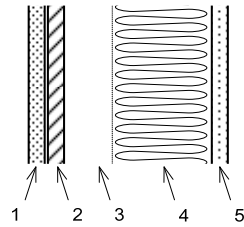
標準板は、ガラスと同寸法で厚さ 25～75mm の発泡プラスチック保温材とし、引き違い窓のそれぞれのガラスに各 1 枚貼り付けた(図 2.7.34、図 2.7.35)。窓のフレーム部分は気泡緩衝シートで覆い、窓全面を断熱した。測定期間は約 2 日間とし、A 棟は 2012 年 2 月、B 棟は同年 3 月に実施した。室温は暖房器を用いて約 23℃に設定した。暖房器は、A 棟ではオイルヒータ及び扇風機を、B 棟ではセラミックファンヒータを用いた。いずれも、暖房器からの放射熱や温風が直接測定面には当たらないように設置した。また、温度測定には φ0.2mm の T 熱電対を用いた。測定対象部の断面詳細を図 2.7.32 および図 2.7.33 に示す。



- 1:外装材、t=16mm
- 2:通気層、t=18mm
- 3:構造用面材、t=9mm
- 4:空気層、t=15mm
- 5:断熱材、t=90mm

6:内装材、 $t=9.5\text{mm}$

図 2.7.32 断面詳細図(A棟)



1:外装材、 $t=15\text{mm}$

2:構造用面材、 $t=9\text{mm}$

3:空気層、 $t=34\text{mm}$

4:断熱材、 $t=55\text{mm}$

5:内装材、 $t=12.5\text{mm}$

図 2.7.33 断面詳細図(B棟)



図 2.7.34 測定状況(A棟)



図 2.7.35 測定状況(B棟)

### 3) 測定結果

#### a 温度測定結果

夜間(0~6時)の外気温はA棟では $-3^{\circ}\text{C}$ 前後、B棟では $3^{\circ}\text{C}$ 前後で比較的安定して推移しており、いずれも室内外温度差を $20\text{K}$ 以上確保する事ができた(図 2.7.36、図 2.7.40)。外壁の室内側表面温度は、A、B棟共に標準板②よりも高い温度で推移する結果となり、いずれ

の外壁も S55 基準以上の断熱性能をもつ事が示される結果が得られた(図 2.7.40、図 2.7.41)。また、A 棟に関しては、標準板①に近い温度で推移しており、H11 基準に近い断熱性能を持つ事が推定できる。一方、B 棟は標準板②よりも低い温度で推移しており、設計値よりも低い断熱性能と推定される結果となった。外壁の室内側表面温度は、断熱性能が高くなるほど室温に近づき、その変化幅も小さくなる。このため、断熱性能が高い部位ほど測定の不確かさが大きくなるが、S55 基準程度であれば外壁の断熱水準がどの程度に位置するかを推定できる結果が得られた。

#### b 熱貫流率算定結果

測定期間中における熱貫流率の算定結果を表 2.7.14 に示す。A 棟、B 棟共に、日没後は熱貫流率の変化が小さく比較的安定した結果が得られた。また、ISO 98693) の簡易的な評価方法を参考に、各測定日の 0~6 時の 6 時間の平均値を求めた(表 2.7.14)。この結果を見ると、設計値との差は A 棟が 40%弱、B 棟は 20%前後の差であった。B 棟は日中に日射の当たる部位であるが、夜間であれば比較的設計値に近い結果が得られた。

表 2.7.14 熱貫流率推定結果

建物	A 棟	B 棟
測定日	H24.2.20	H24.3.12
外気空気温度	-1.9℃	2.3℃
室内空気温度	24.2℃	22.7℃
外壁室内側表面温度	22.4℃	21.0℃
標準板①室内側表面温度	22.6℃	21.6℃
標準板②室内側表面温度	21.4℃	20.0℃
熱貫流率	0.51 W/m <sup>2</sup> ・K	0.63 W/m <sup>2</sup> ・K
設計値との差	37.8 %	14.5 %

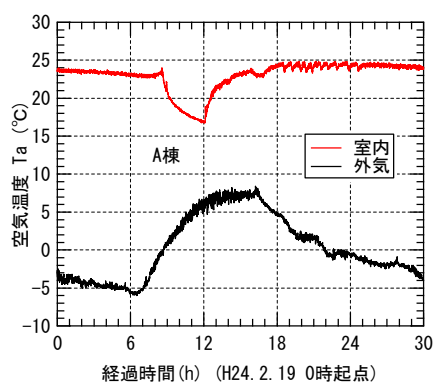


図 2.7.36 空気温度測定結果(A 棟)

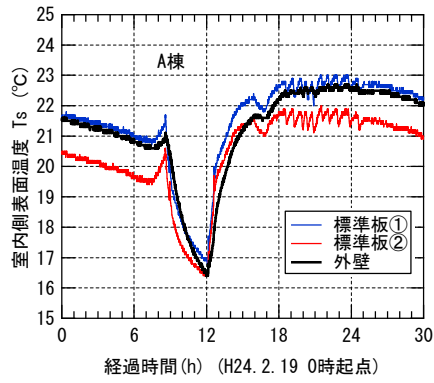


图 2.7.37 室内側表面温度測定結果(A棟)

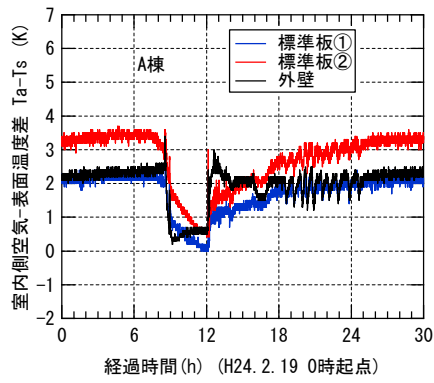


图 2.7.38 空氣-表面温度差測定結果(A棟)

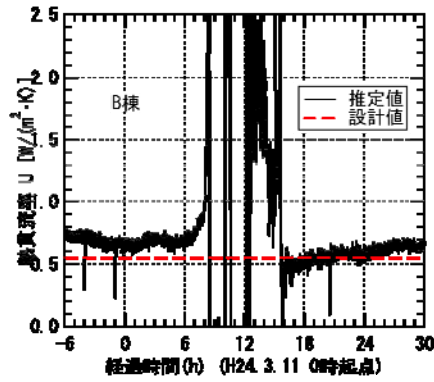


图 2.7.39 熱貫流率推定結果(A棟)

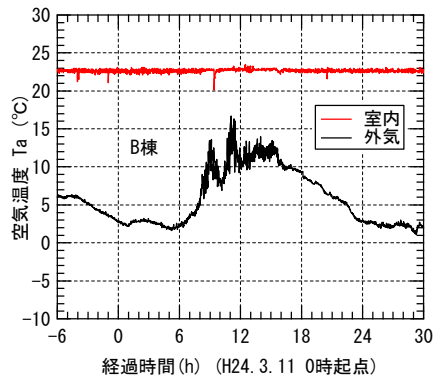


图 2.7.40 空気温度測定結果(B棟)

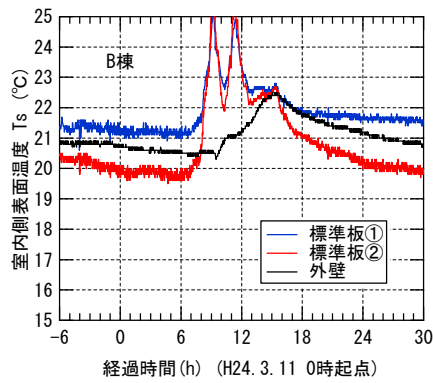


図 2.7.41 室内側表面温度測定結果(B棟)

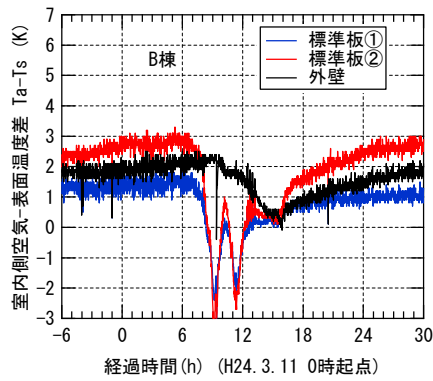


図 2.7.42 空気-表面温度差測定結果(B棟)

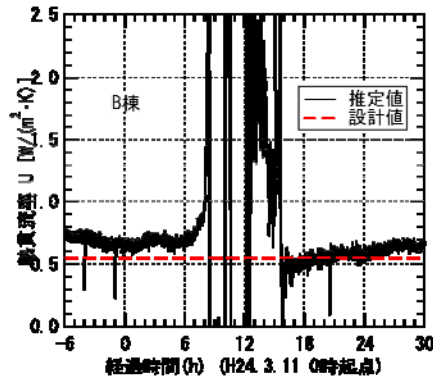


図 2.7.43 熱貫流率推定結果(B棟)

## 2.7.4 まとめ

木造住宅における外壁の断熱性能について、熱抵抗既知の標準板を用いる簡易評価法を検討した。本評価法は、比較的断熱性能の高い部位の定量的な評価には課題はあるが、定性的な評価により断熱水準をある程度推定できることを示した。今後は、現場測定を継続して行うと共に、夏期、中間期など、より温度差の小さい温熱環境下での測定精度についても検証を行う予定である。

理想的な環境が揃えば、比較的断熱性能の高い外壁においても設計値と概ね一致する結果も得られた。一方、本評価法は、標準板と測定対象面の表面熱伝達率の差異、室温の変動、日射等の外乱など、様々な要因が測定精度に影響する。このため、例えば、室温変動や気流変動の大き

い条件下では、断熱性能の比較的低い外壁においても設計値と実測値に顕著な差異が認められ、測定環境の変化による影響が測定に大きく影響する事が示された。今後は、現場における実測結果を増やすと共に、精度の高い測定を行うための諸条件を精査する必要がある。

結果と今後の課題について以下に示す。

## (1) 検証実験の結果

### 1) 実験室実験

実験室実験では、定常状態の条件を完全に設定できる事、また恒温室内の温度分布、気流分布が小さいため、旧省エネルギー基準相当及び新省エネルギー基準相当の外壁では、±20%以内で設計値と一致する結果が得られた。また、非定常環境を再現した測定(旧省エネルギー基準相当)においては、外壁の温度応答の遅れに伴う熱貫流率算定結果の振幅は認められたが、設計値と概ね一致する結果が得られた。このことから、環境条件を整えば本簡易評価法による測定は可能と言える。

### 2) 現場測定

2010年度の測定では、簡易接触式温度計による測定を試みた。一部標準板と窓面、温度センサーと標準板面の密着性等の問題もあり、精度の良い測定を行うことができなかった。このため、2011年度は熱電対を用いて測定を行った。本測定では、室内外の温度差が25K以上、かつ室温変動が比較的小さいという理想的な環境下での測定ではあるが、設計値に対し±20%以内で一致する結果が得られた。今後は測定データを増やし、精度の良い測定を行うための条件を精査する必要がある。

## (2) 簡易評価法の検証

測定器にもよるが、新省エネルギー基準以下の外壁であれば、断熱水準の判別は可能であると言える。一方、外壁の断熱性能が高くなるほど室温と室内側表面温度差が小さくなるから、次世代省エネルギー基準を超える外壁については精度の高い測定は困難である。また、無断熱の外壁の断熱性能は、標準板よりも低くなり、校正線図を外挿して熱貫流率を求める事になる。断熱水準の判別は問題無いが、熱貫流率を推定する場合は、熱抵抗の小さい標準板を用いる等の方法も検討する必要がある。

### 1) 測定器

当初は安価な放射温度計を用いて測定する計画であったが、測定値のばらつきが大きく、精度の高い測定がやや厳しい結果となった。このため、2010年度及び2011年度は、接触式温度計、赤外線カメラなど複数の測定器を用いて検討を行った。T熱電対や熱流計による測定では、新省エネルギー基準相当以上の断熱性能を持つ外壁でも、設計値に対し±20%以内と比較的精度の良い結果が得られた。放射温度計での測定については今後の課題である。

### 2) 標準板

標準板には、S55基準、H4基準及びH11基準の各基準に相当する断熱性能を持つ発泡プラスチック系断熱材を用いた。外壁と標準板とでは、熱容量の違いによる温度応答の差異が

生じるが、その詳細な影響は検討できていない。また、複層ガラスに複数の標準板を設置した場合等の影響も確認する必要がある。

### 3) 測定環境

実験結果より、室温変動、気流変動などが測定精度に大きく影響する事が示された。これらの変動は極力小さくすべきであるが、現場では限界がある。測定できる環境条件について、具体的に示す必要があると思われる。また、冬期以外の低温度差環境下における精度検証も今後の課題である。

#### <参考文献>

- 1) 萩原伸治、黒木勝一、永田明寛、市川大介、加藤信介：建物部位断熱性能の現場測定法の開発 その8 熱画像法、日本建築学会大会、D-2、(2008)、205-206
- 2) 田坂太一、齋藤宏昭：比較法による建物外皮の断熱性簡易評価法の検討：第32回日本熱物性シンポジウム、pp.252-254、2011
- 3) ISO 9869:1994 “Thermal insulation -Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance”