

ウレタン遮熱工法の実建物を用いた通年実測と排熱・伝熱特性の定量的評価

創造理工学専攻 環境都市コース 6164110042-0 田嶋 圭一
(指導教員 近本智行)

1. はじめに

国内の住宅政策として、省エネ基準の改正・改訂により住宅の高断熱・高気密化が推進されてきた。特に住宅の断熱性能は、省エネ基準内において必要な断熱材厚みが設けられており、各部材の物性値から熱貫流率として壁体性能の評価が決まり、その低減が図られてきた。

一方で、通気層の排熱効果や遮熱技術が注目されつつあり、その評価方法を確立する必要があるが、現行の省エネ基準では部材単体で評価され、通気層内の熱収支や低放射率化の影響は加味されない。

そこで本研究では、構造材を囲むようにアルミを貼り、アルミの外気側に通気層を設け、室内側から発泡ウレタンを吹き付ける工法^{文1)}(以下、ウレタン遮熱工法)に着目し、部材の組み合わせによる遮熱・断熱効果の定量的評価を目指した。実大実験棟を屋内外に製作し、建物規模実測を通して実気象下における性能把握や通気層及びアルミ反射材を導入した際の基本的な排熱・伝熱特性を検証したので報告する。

2. 実験概要

屋内外に、ウレタン遮熱工法を施した棟(以下、屋外をA棟、屋内をA'棟とする)とグラスウールを用いた充填断熱工法を施した棟(屋外をB棟、屋内をB'棟)を製作した。各壁面工法は屋内外ともに同様であり、各壁体断面と部材熱伝達率を図1、表1に示す。

2-1 屋外暴露実験棟

実気象下の性能評価を目的とし、立命館大学 BKC キャンパスの屋外に暴露実験棟を製作した。図2に屋外実験棟の外観を示す。各棟は1.8m角正方形平面で、各壁面は東西南北に正位している。また窓は設置しておらず、東面のみ扉を設置した^{注1)}。

2-2 屋内実験棟

非定常状態では複雑な通気層の排熱・伝熱特性の把握を目的とし、BKC キャンパス・風環境実験室内に屋内実験棟を製作した。図3に屋内実験棟の空間断面図を示す。各棟は2.7m角正方形平面であり、空調機により各季節を想定した定常状態を再現するため、実験棟の周囲に環境調整空間を設けた^{文1)}。

2-3 測定概要

測定概要を表2に示す。通気層内風速は、外装材に設けた穴から多点風速計を設置し、測定した。

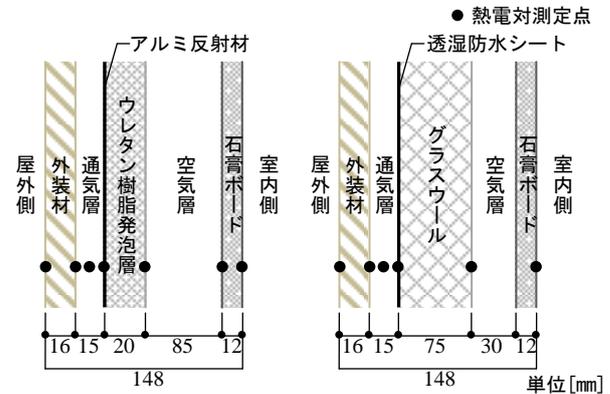


図1 壁体断面詳細図

表1 部材熱伝達率

材料	厚さ δ [mm]	熱伝導率 λ [W/m·K]	熱抵抗率 R [m ² ·K/W]	熱貫流率 K [W/m ² ·K]
石膏ボード	12.0	0.213	1.05	0.95
空気層	85.0	r _a =0.07		
ウレタン樹脂発泡層	20.0	0.033		
アルミ熱線反射材	4.0	237.3		
通気層	15.0	r _a =0.24		
外装材(サイティングボード)	16.0	0.17	1.91	0.52
石膏ボード	12.0	0.213		
空気層	30.0	r _a =0.07		
グラスウール	75.0	0.044		
通気層	15.0	r _a =0.07		
外装材(サイティングボード)	16.0	0.17		

表2 測定概要

測定機器	測定項目
熱電対	部材間温度、室内温度、小屋裏温度、屋外温度、環境調整空間温度
多点風速計	通気層内風速
微差圧計	通気層内上下差圧
電力計※	エアコン消費量
全天日射計※	水平面全天日射量

※屋外実験棟のみ計測



図2 屋外実験棟外観

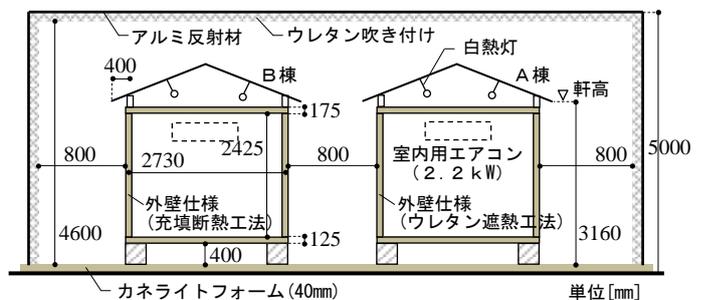


図3 屋内実験棟空間断面図

3. 屋外暴露実験棟を用いた通年の実測調査

屋外暴露実験棟において通年の実測調査を行った。測定期間は、2012年7月23日～2013年1月31日とした。

3-1 日変動からみる実測結果

図4に夏期の通気層温度及び通気層内断熱材側温度分布、図5に室内温熱環境分布^{注2)}を示す。両日とも日射量が十分あり、室内空調を行っていない。

図4によると、A棟の断熱材表面温度はB棟に比べ最大4℃低いのにに対し、通気層温度は最大3℃高くなっている。通気層内でアルミ反射材による低放射率化を行うことで、通気層内排熱量が増え、結果としてA棟の内壁表面温度及び室内温度が改善されているものと考えられる。また図5より、ピーク時間にずれが生じておりA棟のピーク後もB棟では室内温熱環境が悪化していたことから、アルミによって断熱部の蓄熱作用を抑制し、熱帯夜現象を軽減していたものと思われる。

3-2 月別統計値

図6に、日較差(日最高室温と日最低室温の差)の月別平均値の統計値を示す。日較差は、夏期・中間期では主に4～7℃、冬期では2～5℃で推移している。また、各季節においてA棟の日較差はB棟より緩和傾向にあり、年間を通して熱貫流率以上の性能を発揮していた。特に夏期でその傾向は顕著であり、アルミ反射材が日射等の屋外環境の影響を最小限にしているものと思われる。

3-3 エアコン電力消費量の比較

図7、表3に冷房エネルギー消費量の比較と実測日の屋外環境を示す。エアコンの設定温度は28℃とし、風向上下、風量は自動調整とした。また、エアコン稼働時間は9～19時とした。

A棟の冷房消費量はB棟より抑えられており、日積算使用量では最大でB棟より10%削減されていた。

4. 通気層の排熱・伝熱特性の把握

4-1 定常実験概要

屋内実験棟において、表4の通り外気側と室内側温度を設定し^{注3)}、夏期・冬期を想定した定常実験を行った。夏期ケースにおいては、壁面への日射の影響を再現するため、各実験棟の外壁1面を面状発熱体、屋根裏空間は白熱灯により発熱させた。また充填断熱工法の実験棟では、通気層の上下をスタイロフォームより密閉させて空気層とする測定ケースについても検証した。

表4 測定ケース

Case	壁体工法	面状発熱体温度	室内側温度	屋外温度		
I-1	充填断熱工法(通気層無)	50℃	冷房28℃	35℃		
I-2		60℃				
I-3		70℃				
II-1	充填断熱工法(通気層有)	50℃				
II-2		60℃				
II-3		70℃				
III-1	ウレタン遮熱工法	50℃	暖房22℃	7℃		
III-2		60℃				
III-3		70℃				
IV-1	充填断熱工法(通気層有)	—				
IV-2	ウレタン遮熱工法					

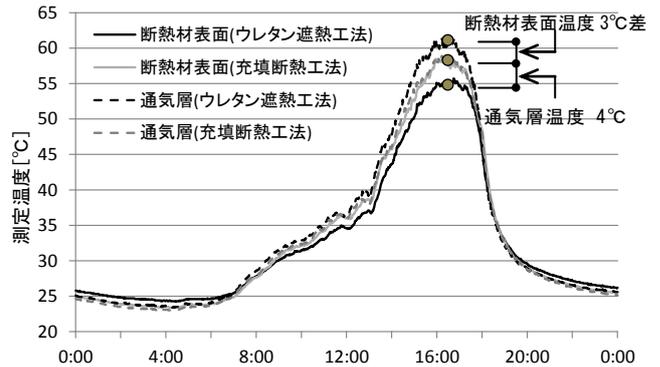


図4 夏期通気層付近温度比較(8/26)

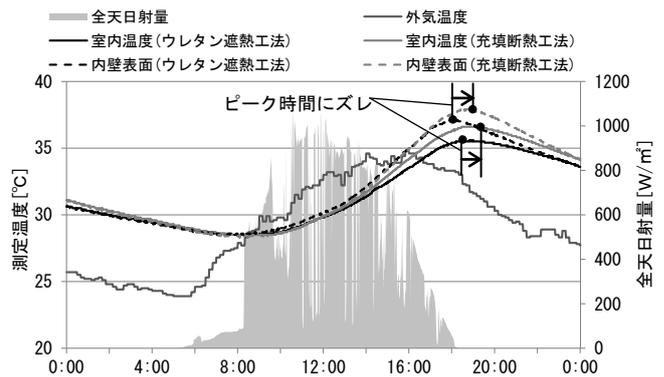


図5 夏期室内温熱環境比較(8/16)

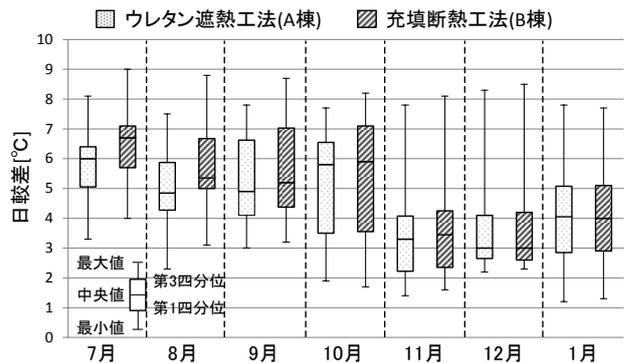


図6 室温日較差の月別統計値

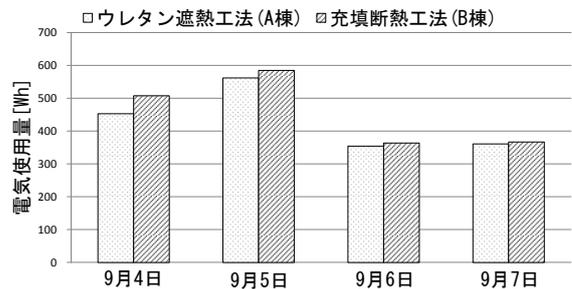


図7 冷房エネルギー消費量

表3 屋外環境

	気温[°C]		電気使用量[Wh]		日照時間[h]
	最高	最低	A棟	B棟	
9月4日	32.1	22.8	452.9(89.2%)	507.8	6.7
9月5日	35.0	24.0	561.9(96.1%)	584.6	7.8
9月6日	30.4	24.2	354.6(97.4%)	364.0	3.4
9月7日	34.0	22.5	361.2(98.4%)	366.9	9.0

4-2 各部材間温度分布の比較

実測値と物性値から算出した各部材間温度を比較した。実測値は、1階高さ中心の熱電対の値を用いた。なお、図中の括弧無の数値を実測値、括弧付を計算値とする。

図8、9に夏期実験結果を示す。通気層有無(Case I・II)のCaseを比較すると、通気層断熱材側においてCase I(通気層無)の実測値は計算値を上回っているがCase II(同有)では実測値が計算値を下回っており、通気層による壁体性能の向上がみられた。またアルミ有無(Case II・III)のCaseでは、Case III(アルミ有)の通気層断熱材側でCase II(同無)以上に実測値と計算値に差が生じており、室内放射熱環境の改善がみられた。アルミ面で輻射熱成分を除去し通気層で排熱することにより、壁体システム全体では実際の熱貫流率以上の性能が発揮されていた。

図10に冬期実験結果を示す。通気層断熱材側においてCase IV-1の実測値と計算値に差が見られなかったが、IV-2では3℃の差がみられた。アルミ面で輻射熱伝達を抑制し、見かけの断熱性能が上がったものと考えられる。

4-3 通気層内伝熱の算定方法

通気層内の熱伝達現象に関して、日射が入射する外表面材を加熱面とした垂直平行平板間における自然対流現象として、図11^{文2)}のようにモデル化した。各壁体の貫流熱量は部材間温度データと物性値より算出し、放射熱伝達量は各壁面の表面温度から平行2平面間の有効放射率を用いて求めた。また対流熱伝達量は各壁面の貫流熱量と放射熱伝達量の差より算出した。

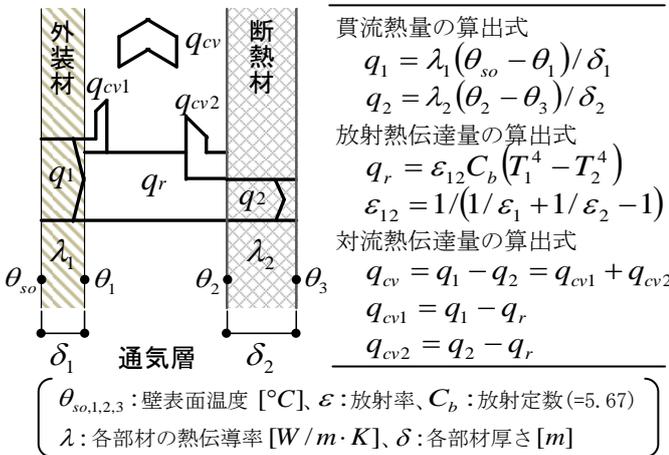


図11 通気層内熱収支の仮定

4-4 通気層内挙動の把握

測定ケース別の通気層内風速^{注4)}及び排熱量を図12に示す。通気層の通気による排熱量 q_{cv} は単位横幅(1m)あたりの通気量 Q [m²/s]を用いた次式より算出した^{文3)}。

$$q_{cv} = c_p \cdot \rho \cdot Q(\theta_{out} - \theta_{in}) / l \quad Q = d \cdot v$$

c_p : 空気の定圧比熱 [J/kg·K]、 ρ : 空気密度 [kg/m³] (=1.2)
 θ_{out} : 通気層出口温度 [°C]、 θ_{in} : 通気層入口温度 [°C]
 l : 通気層の長さ [m]、 d : 通気層の厚さ [m]、 v : 通気層風速 [m/s]

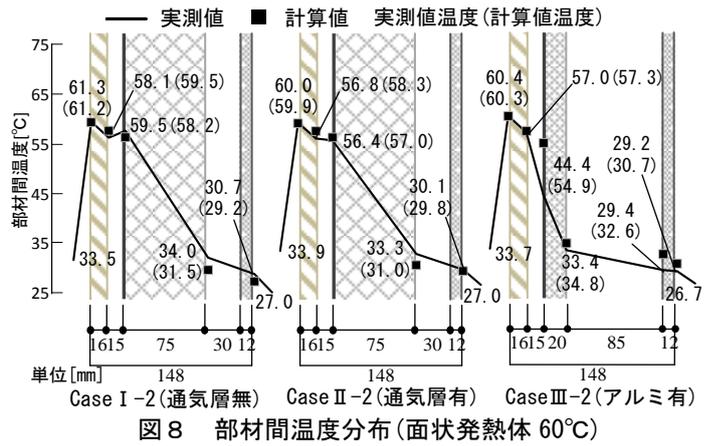


図8 部材間温度分布(面状発熱体 60°C)

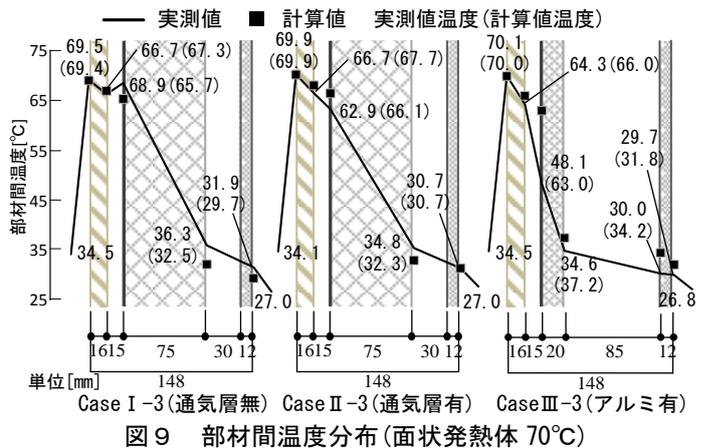


図9 部材間温度分布(面状発熱体 70°C)

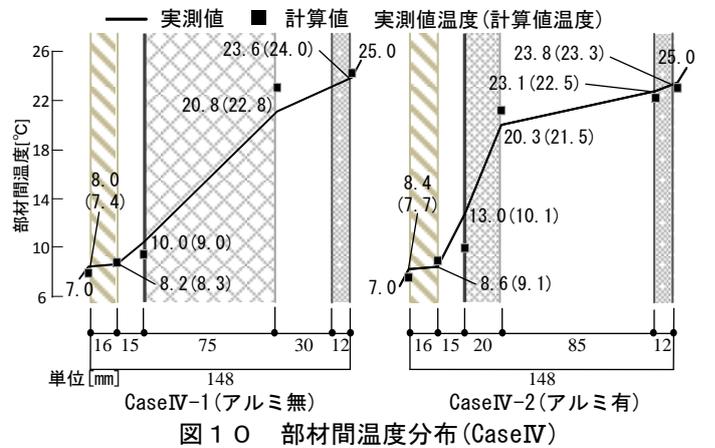


図10 部材間温度分布(Case IV)

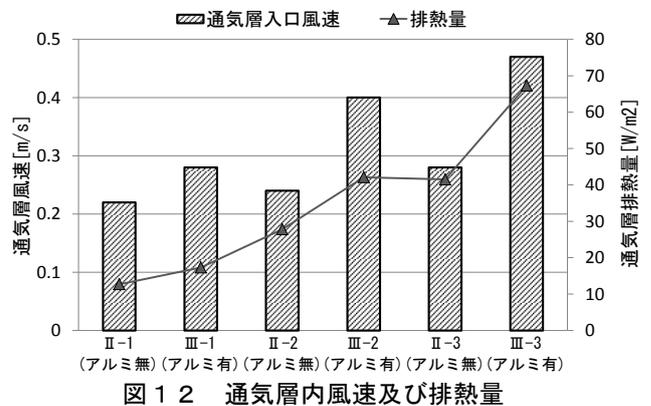


図12 通気層内風速及び排熱量

工法別でみると、CaseⅢの風速は CaseⅡに比べて総じて大きく、発熱温度が同じ場合では CaseⅡの 1.4~1.8 倍程度の排熱量が CaseⅢの通気層内で生じていた。

4-5 通気層の排熱・伝熱特性

図 11 の算出式より求めた通気層内熱収支を図 13 に示す。なお図示している通気層の熱収支は、通気層下端から 0.5、1.4、2.3m(下端から上端までは 2.75m)の測定点における実測値から算出したものである。

高さ方向でみると、下層部では全 Case において両側面からの対流熱伝達量が大きく、断熱材への侵入熱量は小さい。対流熱伝達量は通気層温度と表面温度差に起因するため、下層部は外気の影響により通気層が低温となり、対流熱伝達が促進されたと考えられる。また中・上層部をみると、Case I では空気層内の高温となった空気からの対流熱伝達により、断熱材側への熱移動がみられるが、Case II では排熱方向に対流熱伝達が働いていた。Case III では、通気層の低放射率化により放射熱伝達量が大幅に削減されるとともに対流熱伝達量が大きくなり、断熱材側への侵入熱量が削減されていた。しかし、Case I と同様に対流熱伝達による断熱材側への熱移動が働いており、遮熱材を導入する際は、放射率として計算に組み込むだけでなく、再吸収等も考慮に入れることが重要である。

また表 5 より、壁体全体からみる見かけの熱貫流率では大幅な改善がみられ、充填断熱工法よりも優れていた。

5. まとめ

ウレタン遮熱工法の性能評価を目的として、建物規模実測により実気象下の性能を把握し、基本的な排熱・伝熱特性を検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 実気象下での通気層実測結果では、アルミの放射熱伝達量の抑制による通気層温度の上昇がみられ、年間を通じた日較差の緩和や冷房消費量の削減がみられた。
- 2) 部材間温度分布の結果より、ウレタン遮熱工法のアルミ面の実測値と計算値で差が見られ、特に夏期で充填断熱工法より室内側表面温度が有利側に働いており、熱貫流率の不利に反し室内放射熱環境の改善がみられた。
- 3) 排熱・伝熱特性の検証結果より、通気層内の低放射率化により放射熱伝達量が大幅に抑制される一方で、断熱材側に対流熱伝達による熱吸収が働いていた。しかしながら、排熱量の増加により断熱部への侵入熱量の削減がみられ、見かけの熱貫流率でも大幅に改善されていた。

表 5 実験結果

Case	放射率	熱貫流率 [W/K・㎡]	見かけの熱貫流率 [W/K・㎡]	熱抵抗値増分 [W/K・㎡]	通気層内風速 [m/s]	排熱量 [W/㎡]
I-1	0.9	0.52	0.48	0.18	0.00	0.00
		0.52	0.51	0.05	0.00	0.00
		0.52	0.51	0.04	0.00	0.00
II-1	0.9	0.52	0.47	0.24	0.22	12.7
		0.52	0.50	0.10	0.24	27.8
		0.52	0.46	0.24	0.28	41.5
III-1	0.03	0.95	0.44	1.22	0.28	17.3
		0.95	0.44	1.21	0.40	42.1
		0.95	0.42	1.31	0.47	67.3

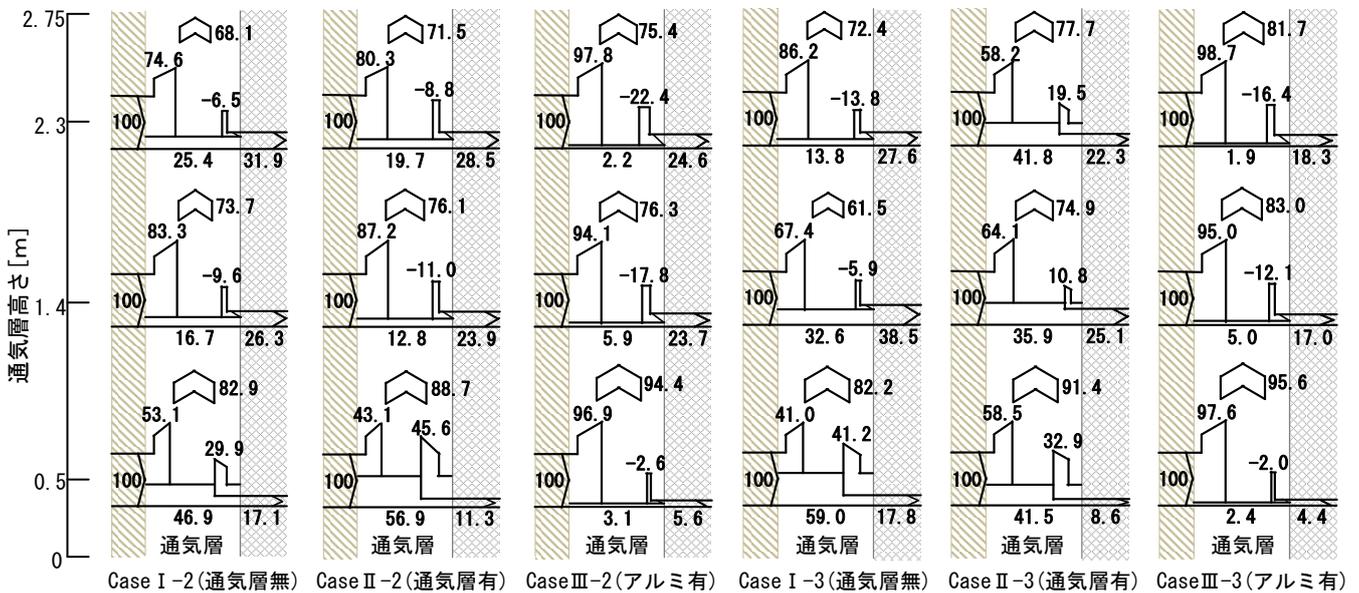


図 13 高さ方向における通気層内熱収支

注釈

- 1) 扉の影響を考慮に入れないため、室内側に断熱材、屋外側にアルミを貼る仕様とした。
- 2) 外気温度データは、大津市のアメダスデータを使用した。
- 3) 夏期 Case では、小屋裏を白熱灯により 45℃に制御した。測定機器の凍結及び空調機の制約条件より、冬期外気条件を 7℃とした。
- 4) 風速及び温度は、通気層上下端部から 150mm 地点で測定した。

参考文献

- 1) 近本智行ら：通気層とアルミ反射材の複合工法による熱負荷低減効果の検証(その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2012.09
- 2) 石原修ら：外張断熱通気工法における壁体内通気層の熱・通気特性に関する研究, 日本建築学会論文集 NO.502, p29-36, 1997.12
- 3) 赤坂裕、武田和夫：通気層を有する外壁、屋根の遮熱・断熱効果の計算法, 日本建築学会論文集 NO.595, p33-40, 2005.09