2棟の実証棟での測定に基づく外壁・屋根への遮熱技術の導入効果の確認

通気層を有する外壁・屋根の遮熱・断熱効果の計算法に関する研究（その4）

VERIFICATION OF THE EFFECT OF SUNSHADING TECHNIQUES INTRODUCED TO WALLS AND ROOFS THROUGH THE MEASUREMENT AT THE TWO TEST HOUSES

Study on calculation method for the evaluation of sunshading and insulating effect of the walls and roofs with vented air-layer (Part 4)

福留伸高^{*1}, 赤坂 裕^{*2}, 二宮秀興^{*3}, 武田和大^{*4}
村橋喜満^{*5}, 川上寛明^{*6}*Nobutaka FUKUDOME, Hiroshi AKASAKA, Hideyo NIMIYA,
Kazuhiro TAKEDA, Yoshimitsu MURAHASHI and Hiroaki KAWAKAMI*

Indoor thermal comfort and energy consumption during summer season are greatly influenced by the radiant heat from windows as well as walls and ceilings. The objective of this report is to compare the surface temperatures of the second floor room of the two test houses, one with sunshading techniques and the other without them, and to verify the proposed calculation method by comparing calculated indoor surface temperatures with measurements. The following results were obtained.

- (1) The surface temperatures of the test house with sunshading techniques were lower than those of the test house without sunshading techniques during summer, while as the same level as them during winter.
- (2) The calculated surface temperatures well agreed with the measurements.

Keywords : Test house, sunshading, insulation, indoor thermal environment, surface temperature

実証棟, 遮熱, 断熱, 室内温熱環境, 表面温度

1. はじめに

室内温熱環境の快適性に影響を与える要因の一つとして、開口部・壁面からの日射熱取得があげられる。日射熱取得は、夏季の冷房消費エネルギーに大きな影響を与えるため、従来からの断熱技術だけでなく、遮熱技術を組み合わせることが重要である。

住宅の遮熱技術に関する研究は、これまで日射熱取得の影響の大きい開口部において断熱技術と合わせ重点的に進められてきた。しかし、建物外皮に占める面積が大きい外壁・屋根のもたらす影響は無視できない。外壁・屋根への遮熱技術は、断熱技術と適切に組み合わせることによって、断熱厚さを減らすことができ、建設コストの削減にもつながることから、低コストで快適な居住空間を実現する点でも注目される技術である。

実大住宅での温熱環境や消費エネルギー測定の事例は、高瀬ら¹⁾、坂口ら²⁾、長谷川ら³⁾、西村ら⁴⁾、佐藤ら⁵⁾の研究など幾つかみられるが、おもに高断熱・高气密に重点が置かれた住宅の温熱環境や空調消費エネルギーの測定や数値計算、アンケート調査の事例である。また、高反射率塗料や遮熱シート、通気層の排熱といった遮熱技術を考慮

したクールルーフの測定事例^{6)~9)}も報告されているが、実大住宅2棟を同時測定して、遮熱技術導入の影響を評価した事例はみられない。

本研究は、外壁・屋根への遮熱技術の導入した影響を、同型実大住宅2棟の比較で検証する意義が大きいことに着目し、住宅の外壁・屋根に遮熱技術を付加した場合の室内温熱環境や空調エネルギー消費への影響を定量的に評価する手法を提案し、その実用性を測定で検証してきた。既報(その1)¹⁰⁾では、通気層を有する外壁・屋根の排熱と対流・放射による熱伝達を組み込んだ実用性のある計算法を提案し、既報(その2)¹¹⁾では、通気層を有する外壁実大モデルによる温度と熱流の測定結果と既報(その1)の計算結果との整合性を示した。既報(その3)¹²⁾では、鹿児島市に建設した実証棟2棟の測定から、外壁・屋根の測定値と既報(その1)による計算値との差異を明らかにし、計算法の検証を行った。また非空調時および空調時の温熱環境及び空調エネルギー消費の比較を報告^{13)~17)}するとともに、使用する外装材の日射反射率や低放射シートの表面放射率を測定¹⁸⁾で明らかにした。

^{*1} 鹿児島大学大学院理工学研究科 博士後期課程・修士(工学)^{*2} 鹿児島工業高等専門学校 校長・工博^{*3} 鹿児島大学大学院理工学研究科 教授・博士(工学)^{*4} 鹿児島工業高等専門学校情報工学科 助教・博士(工学)^{*5} 新日本製鐵㈱建材開発技術部 博士(経済学)^{*6} 新日本製鐵㈱建材開発技術部

Graduate Student, Kagoshima University, M. Eng.

President, Kagoshima National College of Technology, Dr. Eng.

Prof., Kagoshima Univ., Dr. Eng.

Assistant Prof., Dept. of Info. Eng., Kagoshima National College of Technology, Dr. Eng.

Nippon Steel Corporation, Doctor of Economics

Nippon Steel Corporation

遮熱技術は、主に日射熱取得が熱負荷となる夏季にその導入効果が期待できる。しかし冬季では、遮熱技術の導入で住宅の熱取得が減少する懸念がある。そのため夏季だけでなく冬季において室内温熱環境が受ける影響を明らかにし、導入した遮熱技術の評価を行うことが重要である。本稿では、外界の熱的影響を受けやすい2階において、夏季・冬季代表日のグローブ温度や表面温度を測定する。あわせて2台の赤外線放射カメラで、2棟の室内表面温度分布を同時撮影し、熱画像を比較する。これより、既報^{10)~12)}で検討した代表断面での「点」の評価から、より広い面積での室内温熱環境の遮熱技術による

導入効果を明らかにする。また、既報(その1)で提案した計算法による計算値と測定値を比較し、室内表面温度の計算精度も考察する。

2. 実証棟と測定方法の概要

2-1. 実証棟の仕様

本研究で導入した遮熱技術は、工法面及びコスト面から比較的導入が容易な以下の3点である。

(1) 外壁・屋根に日射反射率の高い色を塗装し、外表面から吸収される日射熱を低減させる。

図1 実証棟の外観

図2 実証棟の配置図と冬至の日影曲線図

表1 ブラインド内蔵窓の光・熱特性値

		全開時 (巻上げ)	調光時	全閉時
可視光	透過率[%]	82.5	10.2	4.1
	反射率[%]	15.4	59.6	59.6
日射	透過率[%]	74.7	9.2	3.7
	反射率[%]	13.7	50.6	50.6
熱貫流率[W/m ² K]		2.77	2.71	2.60

* 上記の値は、JIS R3209-1998(複層ガラスの透過率・反射率・放射率・日射熱取得率の試験方法)に基づいて算出されたものである。
**窓のグレーニング部分は、普通透明ガラス3mm+空気層16mm+普通透明ガラス3mmであり、空気層部分にブラインドが設置されている。

図3 外壁・屋根の詳細断面図

表2 測定機器の仕様

測定機器	タイプ(メーカー)
温度センサー	T型熱電対
日射計	英弘精機 ML-020VM
屋外気象観測	VAISARA WXT510
データロガー	江藤電気 CADAC21+スキャンユニット
赤外線放射カメラ	NEC三栄 TH9100-MLN

図4 実証棟2階のセンサー配置図

図5 実証棟2階の赤外線放射カメラ配置図

図6 2階設置センサーの配置(垂直方向)

表 3 実証棟の外壁・屋根における詳細仕様

		A棟(次世代省エネ基準)		B棟(次世代省エネ基準+遮熱技術)	
屋根	外装材	塗装色	ブラック(写真1)	シルバー(写真2)	
		日射反射率	0.04*	0.39*	
		放射率	表面:0.9,裏面:0.9	表面:0.9,裏面:0.06(アルミ箔を貼付)**	
	断熱材	材料	押出法ポリスチレンフォームⅢ種	押出法ポリスチレンフォームⅢ種+アルミ箔(通気層接触面に貼付)	
		厚さ	40mm	40mm	
		通気層接触面の放射率	0.9	0.06**	
外壁	通気層	厚さ	45mm	89mm	
	有効開口面積	出口	291cm ² (4.4%)	4367cm ² (33.3%)	
		入口	1032cm ² (15.8%)	4367cm ² (33.3%)	
	外装材	塗装色	モスグリーン(写真3)	ホワイト(写真4)	
		日射反射率	0.2*	0.65*	
		放射率	表面:0.9,裏面:0.9	表面:0.9,裏面:0.06(アルミ箔を貼付)**	
断熱材	材料	押出法ポリスチレンフォームⅢ種	押出法ポリスチレンフォームⅢ種+アルミ箔(通気層接触面に貼付)		
	厚さ	40mm	40mm		
	通気層接触面の放射率	0.9	0.06**		
	通気層	厚さ	18mm	18mm	
	有効開口面積	出入口	0cm ² (0%)	0cm ² (0%)

写真1 A棟屋根

写真2 B棟屋根

写真3 A棟外壁

写真4 B棟外壁

* 建材のサンプル試験体を使った分光反射率測定を実施し、JIS R3106 に基づいて日射反射率を算出した値である。詳細は参考文献 18)を参照のこと。

**JIS A1423 に基づいてアルミ箔の表面放射温度を赤外線放射温度計で測定し、算出式で求めた値である。詳細は参考文献 18)を参照のこと。

表 4 実証棟の相当隙間面積[cm²/m²]

気密測定実施日	2005/7/22	2006/7/11	2007/7/11
A 棟	0.70	0.70	0.83
B 棟	0.92	0.95	1.09

表 5 測定項目(1 棟当たり)

項目		設置位置	測定間隔
室内	グローブ温度	2 階中央床上 1200mm	5 分
	空気温度(4 点)	①床上 1200mm ②天井面 ③南・外壁室内側表面 ④西・外壁室内側表面	
	熱流量(4 点)	①外壁・通気層外装材裏面 ②外壁・通気層断熱材表面 ③屋根・通気層外装材裏面 ④屋根・通気層断熱材表面	
屋外	外気温	B 棟屋上	10 分
	外気相対湿度	日射量⇒①水平面 ②東壁面	
	降雨量	③西壁面 ④南壁面	
	日射量	⑤北壁面	5 分

(2)外壁・屋根の通気層に接する部材面に低放射シートを貼付することで、通気層内の放射熱伝達を低減させる。

(3)外壁・屋根の通気層厚を通常工法の 2 倍程度にし、通気層出入口開口率を大きくして、通気層上下の温度差による排熱を促進させる。

実証棟 2 棟のうち、A 棟は次世代省エネルギー基準の V 地域(建設地の鹿児島市が該当する地域)適合の断熱性能・気密性能を有しており、B 棟は A 棟の仕様に前記の遮熱技術を導入している。

実証棟は図 1 に示すように、2 階建の薄板軽量形鋼造の住宅である。延床面積は 92.74m²であり、同じ外界条件となるよう隣接して建設されている。ただし実証棟へかかる日影の影響を考慮し、図 2 に示すように、冬至の 9 時以降は日影が双方の建物に当たらないよう 2 棟の間隔を 14m とした。なお 9 時以前に A 棟東面にかかる日影で遮蔽される日射量は積算で約 0.1MJ であり、日積算日射量の 1.7%程度

表 6 比較測定対象日と設定条件

	設定	測定期間	対象日	2 階エアコン設定 (日積算電力量[kWh])	ブラインド
夏季 (2006)	1	8/21-22	8/22	OFF	全閉
	2	8/25-26	8/26	ON(間欠) 27℃	A:2.87 B:2.85
	3	8/27-30	8/28	ON(連続) 27℃	A:6.37 B:6.09
冬季 (2008)	4	1/22-24	1/23	OFF	全閉
	5	1/14-16	1/15	ON(連続) 20℃	A:7.24 B:7.69
	6	1/26-30	1/28	ON(連続) 24℃	A:12.9 B:11.5

* タイマー設定…照明(ON:18:00~24:00)、エアコン(ON:19:00~翌朝 6:00)

** エアコンの定格値…処理能力(冷房 2.2kW、暖房 2.8kW)、消費電力(冷房 345W、暖房 420W)、COP(冷房 6.4、暖房 6.7)

***ここでのブラインドは、トイレ以外のすべての窓に内蔵されているブラインドのブラット角度の状態を指す。詳細は表 1 を参照のこと。

で、影響は小さいと考えられる。実証棟の外壁と屋根は薄板軽量形鋼を用いた外張断熱通気工法で施工している。図 3 に各断面の詳細仕様を示す。また外壁・屋根と同じ厚さ 40mm の押出法ポリスチレンフォームで基礎断熱している。実証棟の開口部のうち、窓はブラインド内蔵普通複層ガラスを使用している。ブラインド内蔵窓の光・熱特性値を表 1 に、設置した測定機器の仕様を表 2 に、遮熱技術の導入による 2 棟の仕様の詳細について表 3 に、実証棟の相当隙間面積の推移を表 4 に示す。次世代省エネルギー基準 V 地域の相当隙間面積の基準値は 5.0cm²/m²であり、測定した 3 年間では基準値を大幅に下回って、高い気密性能を有していた。

2-2. 測定箇所と測定内容

測定項目を表 5 に、各測定センサーの配置を図 3~図 6 に示す。グローブ温度計(図 4、図 6 の◎)と 4 点の熱電対(図 4、図 6 の○、◆、△)を設置した。また B 棟屋上に、屋外気象観測機器と日射計を設置し、外気の温湿度、降雨量、水平面と壁面の日射量(図 4、図 6 の■)を観測した。加えて屋根・外壁内の熱流量(図 3 の★)も測定した。さらに室内側表面温度の分布を比較するため、図 5 に示す位置

図7 2006年夏季3設定の外界気象データ

図8 2006年夏季3設定の2階室内グローブ温度・室温・熱流量の推移

図9 2006年夏季3設定の2階室内表面温度の推移

に赤外線放射カメラを各棟1台設置し、1日の室内側表面温度の分布を放射熱画像として10分間隔で撮影した。夏季では、赤外線放射カメラに視野角を広げる広角レンズを取り付けて撮影したが、冬季の撮影では広角レンズは取り付けしていない。

比較測定の対象日と空調運転・開口部の設定条件の一覧を表6に示す。夏季では、実証棟自体の熱性能を比較するための非空調、実際の住宅でのエアコンの実使用に即した温熱環境比較のための間欠空調、室内温熱環境に加え空調消費エネルギー消費も含めた比較を行える連続空調の3設定とした。また冬季では、間欠空調時での室内表面温度分布の熱画像撮影を行わなかったため、非空調と設定温度を変化させた2設定の連続空調の3設定で考察した。

なお、室内発生負荷は、夏季・冬季とも測定機器や照明・冷蔵庫からの発熱負荷(約390W)のみとし、人体からの発熱・発湿負荷は発生させていない。

3. 夏季の遮熱技術導入に伴う影響

3-1. 外界気象条件

夏季の外界気象データを図7に示す。設定1は、前日から同じ気象条件になっている。ただし、台風接近により測定システムを停止させ欠測であったため、測定地点から約2km離れた鹿児島地方気象台の観測データより、晴天日であることを確認した。対象日の日中の気温は30℃、水平面全天日射量も800W/m²を超える夏季晴天日であった。設定2は前日から同じ気象条件が続き、日中の気温が30℃、水平面全天日射量も800W/m²を超える夏季晴天日であった。設定3は前日日中と対象日の明け方に降雨が観測され、日積算全天日射量は先の2設定より少なく、最高気温も17時に30℃付近にとどまった。

3-2. 室内グローブ温度・表面温度の比較

夏季の室内温熱環境測定項目のうち、2階の室内中心に設置したグローブ温度と室温(床上1200mmの空気温度)、外壁の室内側表面及び天井表面温度を比較し、遮熱技術の導入効果について考察する。

図 10 2008 年冬季 3 設定の外界気象データ

図 11 2008 年冬季 3 設定の 2 階室内グローブ温度・室温・熱流量の推移

図 12 2008 年冬季 3 設定の 2 階室内表面温度の推移

同位置にあるグローブ温度と室温、屋根からの熱流量(室内への流入熱を正の値)の推移を図 8 に示す。設定 1 において、グローブ温度と室温はほぼ同じ値で推移しており、遮熱技術を導入した B 棟が A 棟に比べて低く、17 時では最大 2.5℃低くなった。設定 2 の非空調時間帯では、設定 1 と同じ傾向を示し、17 時に最大 2.5℃の差が生じた。しかし夜間の空調開始後、2 棟のグローブ温度に差がみられ 21 時には最大 1℃程度の差となった。また夜間では、グローブ温度と室温にも差がみられ、各棟のグローブ温度は室温より最大 1.5℃程度高くなった。設定 3 では、グローブ温度と室温の 2 棟間の違いはほとんどなかった。しかし 12 時から 19 時にかけて、グローブ温度は室温より最大 1.5℃程度高くなった。外壁の室内側表面と天井表面温度の結果を図 9 に示す。設定 1 では、17 時から 18 時にかけて天井面と南及び西面はともに遮熱技術を導入した B 棟が約 2.5～2.8℃A 棟より低くなった。この傾向は、設定 2 の日中の非空調時間帯でも同様である。一方、設定 2 の夜間の空調開始後 3 時間、A 棟

の天井表面及び外壁室内側表面温度は、B 棟に比べて高く、21 時には 1℃程度の差となった。一方設定 3 では、室内表面温度に大きな差が生じなかった。

以上の結果から、遮熱技術の導入により、B 棟室内表面温度の上昇が抑制され、それが室内温熱環境の快適性指標となるグローブ温度に反映し、2 棟間の差としてはっきり表れていることが分かった。また空調時のグローブ温度は室温より高く推移していることから、室内の空気温度で空調制御をしても室内温熱環境の快適性には違いが出ており、遮熱技術を導入して室内放射環境を改善する意義は大きいと考えられる。

3-3. 放射熱画像の比較

壁面の一点における温度だけではなく、表面温度の分布を確認するため、各棟 2 階室内に赤外線放射カメラ(図 5 を参照)を設置して 10 分間隔で撮影し、南西側天井面・外壁室内側表面の温度分布と各面の平均表面温度を放射熱画像で図 13～図 15 に示す。図 13 の設定

図 13 2 階室内表面温度分布と各平均表面温度(2006 年夏季：設定 1)

図 16 2 階室内表面温度分布と各平均表面温度(2008 年冬季：設定 4)

図 14 2 階室内表面温度分布と各平均表面温度(2006 年夏季：設定 2)

図 17 2 階室内表面温度分布と各平均表面温度(2008 年冬季：設定 5)

図 15 2 階室内表面温度分布と各平均表面温度(2006 年夏季：設定 3)

図 18 2 階室内表面温度分布と各平均表面温度(2008 年冬季：設定 6)

図 19 冬季快晴日の温熱環境比較(2007 年 1 月 14 日)

1 では、14 時 30 分に A 棟天井面 38.6℃、西外壁室内側表面 37.1℃となった。しかし同時刻の B 棟では、天井面・西外壁室内側表面とも約 35℃と天井面で約 3℃、西外壁室内側表面で約 2℃低くなった。図 14 の設定 2 では、14 時 30 分に A 棟の天井表面 37.0℃、外壁室内側表面 35.5℃程度なのに対し、B 棟では天井面 33.4℃、外壁室内側表面 33℃程度と天井面で 3.6℃、外壁室内側表面で 2.5℃低くなった。さらに冷房開始後の夜間に、侵入熱の少ない B 棟は、A 棟より天井表面温度の低下が早く始まり 21 時 30 分で B 棟が 28.7℃なのに対し、A 棟は 30℃を下回らなかった。図 15 の設定 3 では、外界条件が夏季晴天日でなかったが、A 棟天井表面は冷房設定温度に比べ 14 時 30 分で +1.9℃、21 時 30 分でも +0.5℃なのに対し、B 棟はそれぞれ +0.4℃、-0.3℃と A 棟より温熱環境が改善した。また図 9 の各代表点温度と比較すると、設定 1 の日中 A 棟の天井面は、約 1℃平均表面温度が高くなるが、南面・西面では大きな違いはない。さらに B 棟では天井面・南面・西面での大きな違いはなかった。設定 3 の A 棟では

日中から夜間にかけて約 1℃、代表点温度が高くなったが、南面・西面に大きな違いはない。B 棟では、天井面で日中から夜間にかけて約 0.5℃、代表点温度が高くなったが、南面・西面において大きな違いはなかった。

以上の結果から夏季において、A 棟のように外張断熱通気工法を採用し、次世代省エネルギー基準に合致している住宅でもその天井裏には熱が籠りやすく、天井表面温度が B 棟より高くなって、夜間になっても低下していない。この傾向は空調時でも同様である。このため同時刻の天井面と南面・西面の平均表面温度にばらつきがみられる。また図 9 の代表点温度と平均表面温度の比較から、A 棟天井面には温度むらのあることが分かる。一方 B 棟では、同時刻における各表面の平均表面温度はほぼ同じ値であり、ばらつきはほとんどない。代表点温度と平均表面温度を比較しても設定 3 の天井面で 0.5℃程度の差が生じたものの、大きな差は生じなかった。このことから、遮熱技術の導入によって室内各表面温度のばらつきや表面での温度むらが解消され、熱快適性が向上していることが分かり、室内温熱環境改善のためには遮熱技術の導入が有効であることが示された。

4. 冬季の遮熱技術導入に伴う影響

冬季では、遮熱技術によって日射熱取得が外壁・屋根の部分で抑制され、パッシブヒーティング効果が低減し、快適な室内温熱環境の維持するうえで不利になることが考えられる。一方、通気層に接する両面(外装材裏面と断熱材表面)に低放射シート(アルミ箔)を貼付することは、熱損失を減らす効果がある。ここでは、2-1 に示した遮熱技術の導入が、総合的に冬季の温熱環境に与える影響を確認する。

4-1. 外界気象条件

冬季の外界気象データを図 10 に示す。設定 4 では、前日に水平面全日射量は最大 60W/m²で外気温も 10℃～12℃付近で推移した。対象日の 14 時に水平面全日射量が約 400W/m²を観測したものの、ほかの時間帯の日射量は 120W/m²程度であり、外気温も夜間に 10℃を下回ることにはなかった。設定 5 では、前日の水平面全日射量の最大が 120W/m²程度、外気温は一日を通して約 10℃で推移した。対象日の日中の水平面全日射量が 360W/m²を観測し、外気温も 7 時から 8 時に放射冷却で 5℃付近に低下するなど冬季の特徴的な気象条件となったが、夜間の気温は 10℃を下回らなかった。設定 6 では、前日の水平面全日射量が最大 240W/m²程度、外気温 6℃～10℃で推移したが、夜間の気温低下がなかった。また対象日の明け方から昼にかけて降雨が観測され、日中の水平面全日射量も約 100W/m²にとどまり、外気温も一日を通して約 7℃で推移し、冬季の雨天・曇天日の気象条件となった。

4-2. 室内グローブ温度・表面温度の比較

グローブ温度と室温、屋根からの熱流量(室内への流入熱を正)の測定結果を図 11 に示す。設定 4 では 2 棟間に大きな違いはなく、1 日を通して約 15℃で安定した。グローブ温度と室温は、ほぼ同じ値で推移した。設定 5 では、日中のブラインドを巻き上げた最初の 2 時間はグローブ温度が A 棟に比べ B 棟が 0.5～1.5℃低くなった。しかし 15 時にはこの差はほとんどなくなり、冬季日中に開口部からの日射導入を適切に行えば室内温熱環境の 2 棟間の差を解消できることを確認した。さらに夜間になっても、グローブ温度差はほとんどない。設定 6 では、12 時から 16 時にかけて A 棟に比べて B

棟が最大 2.5℃程度低くなった。また 2 棟の室温は、1 日を通しグローブ温度より 0.5℃程度高く推移した。

2 階の外壁室内側表面と天井表面温度の結果を図 12 に示す。設定 4 では 2 棟に大きな違いはなかった。設定 5 では天井表面に違いはなかったものの、南面では 10 時から 17 時にかけて B 棟の方が 0.5～1.0℃低くなった。これは図 11 でもわかるように室内へ侵入する熱流量が A 棟は日中流入熱になるのに対し、B 棟は 1 日を通して流出熱になっていることに起因している。設定 6 でも 13 時から 18 時にかけて B 棟南面温度が 0.5～1.0℃低い。B 棟の流出熱量が A 棟より少ないにもかかわらず、このような結果となったのは、エアコン運転モードが自動制御により弱運転となっていたため、空気温度の暖まり方に違いがでたことが原因と考えられる。以上のことから、日射照射時間の多い南面では、外表面の日射反射率や低放射シートの設置によって、室内侵入熱量に違いがあり、その違いが表面温度に反映していることが明らかとなった。

4-3. 放射熱画像の比較

赤外線放射カメラによる天井面・室内壁面温度の分布と各平均表面温度を図 16～図 18 に示す。設定 4 では、外壁室内側表面・天井面も平均温度が 13～15℃の範囲で 2 棟とも同じ温度分布であった。設定 5 では、日射の室内導入で 14 時 30 分と同じ温度分布となり、21 時 30 分でも大きく変わらない。設定 6 でも設定 5 と傾向は同じであるが、B 棟の方が日射の少ない朝方(8:30)で約 1℃、夜間(21:30)で約 0.3℃平均表面温度が高くなった。これは、遮熱技術により昼間のパッシブヒーティング効果が小さくなるものの、それ以外の時間帯では、低放射シートによって室外への熱損失が少なくなり、室内表面温度が上昇して室内温熱環境が改善されたことを示す。また図 11 の各代表点温度と比較すると、設定 4 では両棟天井面で 1 日を通し約 2℃、代表点温度の方が高い。設定 5 では、両棟の各面において大きな違いはみられない。設定 6 では、両棟天井面で 1 日を通し約 1℃、平均表面温度の方が高くなった。よって冬季での 2 棟各表面での温度のばらつきや温度むらに大きな違いはなく、遮熱技術導入によるデメリットは小さいと考えられる。

4-4. 冬季快晴日の比較

冬季の設定 4～設定 6 には冬季快晴日が含まれていなかった。冬季快晴日の室内は、日中はパッシブヒーティング効果が大きい一方、夜間は放射冷却による冷え込みが予想され、A 棟、B 棟の室内温熱環境の違いが大きく現れると考えられる。そこで 2005 年度～2007 年度の測定データから、晴天日(日積算全天日射量 13.5MJ/m²)で 1 日の気温変動が大きく、設定 4 と同じ非空調日を選んだ(2007 年 1 月 14 日)。ただしこの日は熱画像の撮影を行っていない。前日からの外界条件、グローブ温度、室温、熱流量(室内への流入熱を正)、表面温度を図 19 に示す。対象とする測定日前日の 1 月 13 日の日積算全天日射量は 7.2MJ/m²であり、晴天日が継続していた。図 19 より、日射量は放物線型で外気温は日較差が大きく、冬季快晴日の変動を示している。グローブ温度は A 棟の方が B 棟より日中 1.5℃程度、夜間 0.5℃程度高い。室温は昼間グローブ温度より低く推移す

図 20 外壁の計算モデル

図 21 夏季の表面温度の比較

図 22 冬季の表面温度の比較

る。表面温度はA棟の方が日中最大で、天井面で約 1.5℃、南面で約 3℃、西面で約 2℃高いが、夜間には両棟の差がほとんどみられない。このように、A棟とB棟では日射量の多い日中に、グローブ温度や室温、表面温度にかなりの差がみられるが、日中はB棟でもグローブ温度・室温・表面温度とも 15℃に達している。一方、室温が低下する夜間では、B棟の流出熱がA棟より低く抑えられ、両棟のグローブ温度・室温・表面温度の違いはわずかである。これは、B棟に導入された遮熱技術の(2)が冬季の断熱にも有効に作用し、夜間の室温低下を緩和しているためと考えられる。

5. 室内表面温度の測定値と計算値の比較

既報(その 1)で、通気層を有する多層壁の各層における後退差分型の計算式を提案した。この計算法の特徴は、通気の換気駆動力を密度差圧とし、通気層の圧力バランスによる通気量の変化を求めて通気層の熱伝達と通気による排熱から通気層の空気温度を逐次計算する点である。この計算法に基づいて、図 3 を参考に実証棟の壁を図 20 に示す計算モデル^{注 1)}とした。実測で得られた外界気象データ(外気温・各方位面全日日射量・夜間放射量^{注 2)}・外気風速)と室内温度(室中央床上 1200mm のグローブ温度)、室内総合熱伝達率(9W/m²K)を与条件として、南面および西面の外壁室内側表面温度を計算値と測定値で比較した。今回の計算法では、室内と条件の一つである熱伝達率に総合熱伝達率を用いているため、室温は放射の影響を考慮したグローブ温度を利用している。結果を図 21、図 22 に示す。

図 21 は、夏季の計算値と測定値を示したものである。設定 1 では、測定値と計算値はよく一致し、高い計算精度を確認した。設定 2 では、朝方から日中にかけて計算値と測定値はよく一致した。夜間から明け方の空調時間帯では、20 時から 23 時にかけて計算値が測定値より 0.5℃～1℃低くなったものの、両者は同じ推移を示している。設定 3 では、南面において 12 時以降、計算値が測定値より 1℃～1.5℃低くなったが、それ以外の時間帯や西面ではよく一致している。図 22 は、冬季の計算値と測定値の比較を示したものである。設定 4 では、図 19 に示す 2007 年 1 月 14 日の外界気象および室温データを用いた。その結果、8 時から 16 時にかけて計算値が測定値より 0.5℃～1℃高くなるものの、両者はほぼ一致した推移を示すことを確認した。設定 5 では、ブラインド全上げ後の 8 時から 12 時にかけて、南面で A 棟の計算値が測定値より約 1℃高くなり、また西面では 4 時から 8 時にかけて、B 棟の測定値が計算値より高くなったが、同じような推移を示した。設定 6 では、12 時から 18 時にかけて南面の A 棟計算値は測定値より 0.5～1℃程度高くなったが、概ね計算値と時から 8 時にかけて、B 棟の測定値が計算値より高くなったが、同じような推移を示した。設定 6 では、12 時から 18 時にかけて南面の A 棟計算値は測定値より 0.5～1℃程度高くなったが、概ね計算値と測定値はほぼ同じ値を推移した。以上の結果より、本計算法は遮熱技術を導入した住宅の室内表面温度算出において十分な計算精度を有していることが示された。

今回の比較では室温にグローブ温度を用いたが、一般的に室温として利用される空気温度を用いた場合の計算も実施した。夏季の南外壁室内側表面において、各室温設定で計算した値と測定値の比較

図 23 室温設定に伴う測定値との差異(夏季・南面)

を図 23 に示す。これより非空調時の設定 1 では、空気温度とグローブ温度がほぼ一致するため、室温に空気温度、グローブ温度のどちらを利用しても測定値とよく一致する結果が得られた。一方空調運転を行っている設定 3 では、12 時以降になると測定値と計算値との間に差が生じる。空気温度で設定した場合、両棟とも 17 時に測定値と計算値の差は約 1.5℃となる。それに対してグローブ温度で設定した場合、同時刻での差は約 0.8℃にとどまる。この傾向は冬季でも同様であった。したがって総合熱伝達率を用いる計算体系では、室内空気温度と表面温度の差が大きくなる空調時に、空気温度を室温とすると計算値と測定値との差が大きくなる。よって本研究では、室温にグローブ温度を用いた。

6. まとめ

次世代省エネルギー基準のV地域に適合するA棟、A棟の仕様により外表面の高反射化・通気層の放射熱伝達の低減・通気層からの排熱促進の遮熱技術を導入したB棟について、2 階室内温熱環境の比較と室内表面温度の計算値と測定値の比較から、以下の知見を得た。

- (1) 夏季では、A棟のように外張断熱通気工法を採用し、次世代省エネルギー基準に合致している住宅でもその天井裏には熱が籠りやすく、温熱環境改善のためには遮熱技術の導入が有効である。
- (2) 冬季では、遮熱技術の導入により昼間のパッシブヒーティング効果が小さくなるものの、それ以外の時間帯では、室外への熱損失が少なくなり、室内表面温度の上昇による室内温熱環境の改善が確認できる。また、冬季快晴日(非空調)の日中では、A棟のグローブ温度、表面温度はB棟より高くなるものの、室温が低下する夜間での違いはわずかであった。これは、遮熱技術として外壁・屋根の通気層に設置した低放射シートが室内から室外への熱損失を抑え、夜間の室温低下が緩和したと考えられる。
- (3) 夏季・冬季において、代表断面における「点」の温度に加え、室内表面温度分布や各平均表面温度といったより広い面積での温度を比較した。その結果、A棟に比べB棟の方が天井面と各壁面のばらつきが少なく均一な表面温度分布となること、さ

らに温度変化の大きい天井面の温度むらが少なくなることが確認された。これより室内表面全体の遮熱技術の導入効果が確認され、室内温熱環境の快適性が向上することが示された。

(4) 既報(その1)の計算法を用いた外壁室内側表面温度の計算値と測定値を比較した結果、夏季・冬季とも計算値は測定値とほぼ同じ値で推移することが分かり、本計算法が遮熱技術を導入した住宅の室内表面温度の予測にあたって、十分な計算精度を有することが示された。

謝辞

本研究は、経済産業省からの交付金を原資とし実施する「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一環として、NEDO 技術開発機構の共同研究契約(2003 年度～2005 年度)に基づき実施した。また、本研究の一部は、2006 年度日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号 18360275)「住宅外皮への遮熱技術の導入効果を評価できるシミュレーションツールの開発」(研究代表者、赤坂裕)により行なわれた。なお、実証棟の管理や測定データの収集及び整理にあたっては、当時鹿児島大学大学院生であった山口研二君、筒井陽介君、今里淳平君、学部生であった前田亮平君、山口慎一郎君、長住圭城君、宮崎稔也君らの協力が大きいものであった。ここに記して謝意を表す。

注

注 1) 今回使用した外壁の計算モデルの構成部材と物性値、は既報(その3)の表4に基づいている。その一覧を以下に示す。

		厚さ [mm]	熱抵抗		容積比熱 [×10 ⁶ J/m ³ K]
			熱伝導率 [W/mK]	熱伝達抵抗 [m ² K/W]	
内装材(石膏ボード)		9.5	0.22	—	0.9022
中空層	夏季	89	—	0.23	—
	冬季		—	0.25	—
合板		9	0.16	—	0.7158
断熱材 (ポリスチレン フォーム Ⅲ種)	夏季	40	0.024	—	0.02512
	冬季		0.022		
通気層		18	計算による		
外装材		16	0.17	—	1.6786

*B 棟において、外装材裏面と断熱材表面に貼付される低放射シートの放射率は表3を参照のこと。

注 2) 実証棟で観測した外気相対湿度から水蒸気圧を求め、Brunt の式を使って夜間放射量を算出する簡便な方法を用いた。また各壁面から天空を望む形態係数 F も、 $F=(1+\cos \gamma)/2$ の式を用い、 $\gamma=90^\circ$ より、 $F=0.5$ とした。

参考文献

1) 高瀬秀芳, 渡辺俊行, 尾崎明仁: 季節蒸暑地域における断熱気密住宅の温熱環境性能, 日本建築学会環境系論文第 572 号, pp. 9-16, 2003. 10

2) 坂口淳, 赤林伸一, 山口一: 新潟市に建設された住宅における室内温熱環境とエネルギー消費量に関する実測調査 全電化・高気密・高断熱住宅を対象として, 日本建築学会計画系論文第 543 号, pp. 33-39, 2001. 5

3) 長谷川兼一, 吉野博, 松本真一: 東北地方における断熱気密住宅のエネルギー消費量: 暖房用を中心とした実態調査と数値計算, 日本建築学会計画系論文第 557 号, pp. 49-56, 2002. 7

4) 西村仁, 池田真樹, 藤村知春, 垂水弘夫: 北陸の次世代省エネルギー基準全電化住宅を対象とした温熱環境と暖冷房用エネルギー消費に関する実態調査, 日本建築学会環境系論文第 582 号, pp. 37-44, 2004. 8

5) 佐藤豊, 郡公子: 栃木県における住宅の熱環境と住まい方に関する研究 冬

季の暖房室・非暖房室の熱環境と住まい方, 日本建築学会計画系論文第 522 号, pp. 7-14, 1999. 8

6) 山田正也, 中島裕輔: 折板屋根用遮熱シートに関する調査研究 比較実験棟における実測調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), D-1, pp. 641-642, 2007. 8

7) 木村梨絵, 中島裕輔, 山田大智: 折板屋根用遮熱シートによる室内外の熱環境改善効果に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告 I, 第 78 号, pp. 501-504, 2008. 2

8) 内田則之, 小野公平, 川近飛鳥: 愛知県半田市における通気層屋根構法のクールルーフ効果(その1), 日本建築学会九州支部研究報告, 第 46 号・2(環境系), pp. 293-296, 2007. 3

9) 小野公平, 内田則之, 川近飛鳥: 愛知県半田市における通気層屋根構法のクールルーフ効果(その2), 日本建築学会九州支部研究報告, 第 46 号・2(環境系), pp. 297-300, 2007. 3

10) 赤坂裕, 武田和大: 通気層を有する外壁・屋根の遮熱・断熱効果の計算法, 日本建築学会環境系論文第 595 号, pp. 33-40, 2005. 9

11) 村橋喜満, 赤坂裕, 武田和大, 川上寛明, 倉山千春: 実大の外壁モデル試験に基づく遮熱・断熱効果の計算法検証と実用化に向けた考察 通気層を有する外壁・屋根の遮熱・断熱効果の計算法に関する研究(その2), 日本建築学会環境系論文第 620 号, pp. 89-96, 2007. 10

12) 村橋喜満, 赤坂裕, 武田和大, 川上寛明, 曾我和弘, 福留伸高: 鹿児島市に建設した2棟の実証棟の測定に基づく遮熱・断熱効果の計算法検証と実用化に向けた考察 通気層を有する外壁・屋根の遮熱・断熱効果の計算法に関する研究(その3), 日本建築学会環境系論文第 641 号, pp. 883-892, 2009. 7

13) 福留伸高, 今里淳平, 武田和大, 赤坂裕, 村橋喜満, 川上寛明: 通気層を有する外壁・屋根の遮熱・断熱技術の定量的評価(その9)夏季冷房時のエアコン電力消費量の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), D-2, pp. 135-136, 2006. 9

14) 筒井陽介, 福留伸高, 武田和大, 長澤康弘, 曾我和弘, 赤坂裕, 村橋喜満, 川上寛明: 通気層を有する外壁・屋根の遮熱・断熱技術の定量的評価(その11)室内表面温度分布と放射熱環境の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), D-2, pp. 131-132, 2007. 8

15) 今里淳平, 福留伸高, 武田和大, 長澤康弘, 曾我和弘, 赤坂裕, 村橋喜満, 川上寛明: 通気層を有する外壁・屋根の遮熱・断熱技術の定量的評価(その14)年間を通した空調の省エネルギー効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), D-2, pp. 137-138, 2007. 8

16) 福留伸高, 今里淳平, 武田和大, 長澤康弘, 曾我和弘, 赤坂裕, 村橋喜満, 川上寛明: 通気層を有する外壁・屋根の遮熱・断熱技術の定量的評価(その15)外調機運転に伴う室内温熱環境への影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), D-2, pp. 139-140, 2007. 8

17) 福留伸高, 筒井陽介, 今里淳平, 武田和大, 長澤康弘, 曾我和弘, 赤坂裕, 村橋喜満, 川上寛明: 通気層を有する外壁・屋根の遮熱・断熱技術の定量的評価(その16)冬季における室内表面温度分布と放射熱環境の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), D-2, pp. 245-246, 2008. 9

18) 横山正臣, 榊里子, 武田和大, 赤坂裕: 建築材料の日射反射率および表面放射率の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), D-2, pp. 145-146, 2006. 9

(2009年6月10日原稿受理, 2009年10月28日採用決定)