フォームコアパネル棟を主とする4棟の試験棟のパッシブ下における 温熱居住環境の実測

—蒸暑地域の住宅の温熱環境に関する調査研究 その1—

FIELD STUDY ON INDOOR THERMAL ENVIRONMENT UNDER PASSIVE CONDITIONS FOR FOUR TEST HOUSES CONSTRUCTED MAINLY WITH FOAM CORE PANELS

—Investigation on indoor thermal environment of residential houses
in hot and humid climate in Japan Part 1—

赤坂 裕*, 黒木 荘一郎**, 小原 聡司***, 曾我 和弘****

*Hiroshi AKASAKA, Soichiro KUROKI, Satoshi OBARA
and Kazuhiro SOGA*

The purpose of this report is to examine experimentally the indoor thermal environment of highly insulated house constructed in hot and humid climate. Four test houses were constructed in the site of Kagoshima University (31°34'N, 130°33'E) in 1990. Each of them was single story, one room detached house with 3(m)×4(m) floor area. One was built by 2×4 construction and the other three were built with FCP(foam-core-panels). Outdoor meteorological parameters, as well as indoor air temperature, surface temperature, globe temperature and relative humidity in the four test-houses were measured. The effects of sunshading and natural ventilation during summer, and solar heat gain during winter on the indoor thermal environment were examined.

Keywords: *Insulation, Air-tightness, Foam core panel, Passive cooling, Passive heating*
断熱, 気密, フォームコアパネル, パッシブクーリング, パッシブヒーティング

1. はじめに

本報告でいうフォームコアパネル(Foam Core Panel, 以下FCPと略す)とは、EPS(Expanded Polystyrene, 発泡ポリスチレン)を芯材とし、OSB(Oriented Strand Board)と呼ばれる構造用面材(木材繊維板)を接着させたパネルである。米国では1980年代よりこのパネルを外壁や屋根に用いた住宅が建設され始め、年々戸数が増加している¹⁾。日本でも住宅の断熱化・気密化に伴い、同様の住宅が今後次第に普及することが予想される。

熱抵抗、透湿抵抗、気密性が高いことから、この種のパネルを用いて建設された住宅は温熱居住環境面と省エネルギー性に優れていると期待される。そのような利点は特に寒冷地で発揮されるが、蒸し暑い日本の夏季にどのような温熱居住性をもたらすかは一概には予測できない。そこで、日本の夏季蒸暑度の高い地域において、外壁・屋根等にFCPを用いた住宅の温熱環境を実測により確認することを目的として、1990年7月に鹿児島大学工学部の敷地内に、FCPによる試験棟3棟と比較用の2×4構法による試験棟1棟の計4棟を建設した。試験棟の竣工後、窓仕様の変更、2×4構法棟の屋根構造の改修等を経ながら、1993年12月まで実測を継続した。実測の内容はパッシブ手法、およびアクティブ手法を採用した時の各試験棟内部の温熱環境が主である

が、本報告ではこれらのうちパッシブ手法に関する測定結果をまとめた。試験棟はすべて単室で床面積が同じであり、構造もシンプルであるため、実測データは、各種シミュレーションプログラムの検証用データとしての利用価値も高いと考えられる。したがって本報告をまとめるにあたっては、建物仕様と実測データをそのような目的にも使用できるように、総括的に整理・提供しよう考慮した。

2. 実測の目的と試験棟の仕様、および実測データの整理

2. 1 試験棟による実測の目的

1980年代後半には、冬季の温熱環境、特にパッシブヒーティングを対象として、試験家屋による研究が多く行われた^{2)~4)}。いっぽう夏季蒸暑地においては、パッシブクーリングによって温熱環境を改善する方法に関心が向けられ、地中冷熱利用や各種換気の効果が試験家屋で実測されている⁵⁾⁶⁾。1992年2月の新省エネルギー基準⁷⁾によって住宅の断熱化・気密化が推進されたが、断熱・気密住宅の温暖地への適応性を考慮して、換気、空調⁸⁾や冷房⁹⁾の実証的研究が多く行われるようになった。また、夏季の蒸暑度がそれ程高くない地域でも夏季の熱のこもりへの対応を余儀なくされ、比較的高緯度な地域でもこの問題に

* 鹿児島大学工学部建築学科 教授・工博

** 鹿児島大学工学部建築学科 助教授・工博

*** 都城工業高等専門学校 講師・工博

**** 鹿児島大学大学院工学研究科 大学院生・工修

Prof., Dept. of Architecture, Kagoshima Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Kagoshima Univ., Dr. Eng.

Asst. Prof., Miyakonojo National College of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Kagoshima Univ., M. Eng.

関する実証的研究が行われている¹⁰⁾¹¹⁾。

我が国、特に夏季蒸暑度の高い地域では、これまで、冷房に頼るばかりでなく、日除けや通風などの暑さ対策も取り入れてきた。住宅の断熱化・気密化は今後全国的に普及していくと予想されるが、断熱・気密住宅においても、そのような住まい方がどの程度室温上昇を緩和することができるかを把握することが、まず重要な点として挙げられる。また日本の大部分の地域では冬の寒さ対策が必要であるから、夏季の蒸暑度が高い地域でも、当然ながら、冬季の温熱環境を同時に考慮しなければならない。本研究では、以上のような観点から鹿児島に建設されたFCP棟でパッシブ条件下における温熱環境を実測し、得られたデータを整理・提供することを目的とした。パッシブの内容を具体的にいえば、窓の大きさ等の住宅仕様の違いと住宅の使用状態（住まい方）等であり、住まい方としては夏季については

写真1 試験棟南側外観（東側よりTF,RA,RB,RC棟）

図1 試験棟の立面・平面・断面（RA棟、単位[mm]）

表1 試験棟の改修の履歴と名称の変遷

竣工時	試験棟名称				改修内容
1990年7月	TF	RA	RB	RC	
1991年12月			RB'		RB':他棟と同じ北窓設置
1992年5月				RCF	RCF:屋根をFCPフラットに改修(結露測定)
1992年7月	TFR		RB''		TFR:屋根をFCPに改修 RB'':屋根・外装をRAと統一
1993年7月				TWS	TWS:木造軸組構法で完全改修
1993年12月					

*RCF、TWS棟に関するパッシブ条件下での温熱環境の実測は行っていない。

表2 試験棟^{*1}の仕様

試験棟名	構 造		仕 上 げ		基礎	床面積 [m ²]	窓面積 [m ²]		空間容積 [m ³]			小室裏換 気口 [mm]	
	壁	屋根 ^{*2}	床	屋根			外壁	南 ^{*4}	北 ^{*5}	居室	小室裏		床下
TF	2×4	2×4	2×4	スレート	サイディング	布基礎 ^{*3}	12.0	2.35	0.7	28.8	7.65	7.38	1.0φ ^{*6}
RA	FCP	FCP	2×4	スレート	サイディング			2.35	0.7	27.6	4.78	5.70	
RB	FCP	FCP	2×4	スチール	スチール			2.35	—	27.6	4.78	5.70	1.0φ ^{*7}
RC	FCP	FCP	2×4	瓦	モルタル			1.18	0.7	27.6	4.78	5.70	
TFR	2×4	FCP	2×4	スレート	サイディング			2.35	0.7	28.8	4.78	7.38	
RB [*]	FCP	FCP	2×4	スレート	サイディング			2.35	0.7	27.6	4.78	5.70	無
TWS	軸組	軸組	軸組	スレート	サイディング			2.35	0.7	28.1	6.86	4.20	200×350

*1 各試験棟とも南側上部壁面にヒートポンプエアコン（暖房能力4.2kW、冷房能力2.8kW）を設置。RA、TF、TFR棟は北側上部壁面にも設置。

*2 勾配は3/10。

*3 換気口は南北各2ヶ所。計4ヶ所。

*4 外付けブラインド^{*5}（1993年5月以降は簾）、遮光カーテンあり。
*5 遮光カーテンあり。
*6 妻壁（東西）に各1ヶ所。
*7 妻壁（東西）に各1ヶ所。通常はガラスで密閉。

表3 試験棟の部位別の断面構成

棟名	TF		RA		RB		RC		TFR		RB'		TWS	
部位	材名	厚さ [mm]	材名	厚さ [mm]	材名	厚さ [mm]	材名	厚さ [mm]	材名	厚さ [mm]	材名	厚さ [mm]	材名	厚さ [mm]
屋根	スレート	10	スレート	10	スチール	1	瓦	15	スレート	10	スレート	10	スレート	10
	アスファルト・フィング	2	アスファルト・フィング	2	アスファルト・フィング	2	空気層	50	アスファルト・フィング	2	アスファルト・フィング	2	アスファルト・フィング	2
	合板	25	OSB	12	OSB	12	アスファルト・フィング	2	OSB	12	OSB	12	合板	12
			発泡スチレン	190	発泡スチレン	190	合板	15	発泡スチレン	140	発泡スチレン	190		
壁面	サイディング（スレート）	20	サイディング（スレート）	20	スチール	1	モルタル	30	サイディング（スレート）	20	サイディング（スレート）	20	サイディング（スレート）	12
	合板	10	OSB	12	OSB	12	OSB	12	合板	10	OSB	12	アスファルト・フィング	2
			発泡スチレン	90	発泡スチレン	90	発泡スチレン	90	グラスウール（10K）	50	発泡スチレン	90		
			OSB	12	OSB	12	OSB	12			OSB	12		
天井	グラスウール（10K）	50	石膏ボード	9	石膏ボード	9	石膏ボード	9	石膏ボード	9	石膏ボード	9	グラスウール（10K）	50
	石膏ボード	9											石膏ボード	9
外壁	サイディング（スレート）	20	サイディング（スレート）	20	スチール	1	モルタル	30	サイディング（スレート）	20	サイディング（スレート）	20	サイディング（スレート）	12
	合板	10	OSB	12	OSB	12	OSB	12	合板	10	OSB	12	アスファルト・フィング	2
	グラスウール（10K）	50	発泡スチレン	90	発泡スチレン	90	発泡スチレン	90	グラスウール（10K）	50	発泡スチレン	90	グラスウール（10K）	50
	空気層	50	OSB	12	OSB	12	OSB	12	空気層	50	OSB	12	空気層	50
	石膏ボード	9	石膏ボード	9	石膏ボード	9	石膏ボード	9	石膏ボード	9	石膏ボード	9	石膏ボード	9
床	合板	10	合板	10	合板	10	合板	10	合板	10	合板	10	合板	15
	発泡スチレン	25	発泡スチレン	75	発泡スチレン	75	発泡スチレン	75	発泡スチレン	25	発泡スチレン	75	発泡スチレン	50
窓	普通ガラス	3	普通ガラス	3	普通ガラス	3	普通ガラス	3	普通ガラス	3	普通ガラス	3	普通ガラス	3
	空気層	12	空気層	12	空気層	12	空気層	12	空気層	12	空気層	12	空気層	12
	普通ガラス	3	普通ガラス	3	普通ガラス	3	普通ガラス	3	普通ガラス	3	普通ガラス	3	普通ガラス	3
窓枠	木材（中量）	30	木材（中量）	30	木材（中量）	30	木材（中量）	30	木材（中量）	30	木材（中量）	30	木材（中量）	30

日射遮蔽と通風、冬季については日射導入というごく一般的な手法を考慮した。更に2×4棟の天井断熱と屋根断熱が小屋裏温度や居室の温熱環境に与える影響、FCP棟の屋根葺材がパネル内部の断熱材温度に与える影響等についても調べた。

2. 2 試験棟の仕様

試験棟は当初4棟建設した。建設当初の外観を写真1に示す。いずれも平面形は3m×4mで、TF棟が2×4構法棟、RA～RC棟の3棟がFCP棟である。建設後、実測目的に応じて表1のように数回の改修を行った。RA～RC棟は、窓の面積または位置、屋根葺材と外壁の仕上げ材が異なる。屋根葺材を変えたのは日射受熱による屋根断熱材の温度上昇に与える影響、外壁の仕上げ材を変えたのは壁内水分の変化に与える影響を比較することが目的であった。ただし後者については、紙面の関係で本報では述べていない。また、同一建物で住まい方の影響を比較するためRB棟をRA棟と同一仕様としたのがRB'棟、RC棟を取り壊し木造軸組み構法で改築したのがTWS棟、TF棟を屋根断熱としたのがTFR棟である。RA棟の平面・立面・断面図を図1に示す。窓の大きさを除き、各棟ともほぼ同じ形状である。また各棟の部位別構法、仕上げ、設備等の仕様を表2、表3に示す。

2. 3 実測データの整理

風向・風速はそれぞれ10分間の最多頻度と平均値、それ以外はすべて10分毎の測定値（瞬時値）からその前後30分間の移動平均をとった。室空気温度は数点で測定したが、各棟平面の中央・床上120cmのグローブ温度がその棟の熱環境を最もよく代表していると考えられるため、本報ではこれを室温と呼ぶことにする。今回の目的に照らして、夏季については、まず、晴天で気温の高い日の実測データが重要であろう。また設定条件を変えた直後の日の温熱環境には前日までの影響が残る恐れがある。そこである設定条件下で、晴天が少なくとも2日以上継続した数日間における2日目以降の1日分のデータを考察の対象とした。本測定地は夏季に台風の襲来の影響を受けやすいこと、条件の設定が多様であったこと等により、以上のような要求を満たす日はなかなか得難いが、その中からできるだけ良好な日を選択した。また各棟内部に置かれた計測機器類からの発熱は棟内部の温熱環境に影響するため、その発熱量をあらかじめ測定した。その結果、TF棟で5W、RA、RB棟で10W、RC棟で7W程度と少なく、かつほぼ一定値を示すことを確認した。

3. 試験棟の断熱性と気密性

試験棟の熱損失係数の計算値および相当隙間面積の測定値を表4にまとめた。RA棟～RC棟は、断熱性の高さ比べると気密性はそれ程高くない。表4はFCPによる住宅建設が日本での公的認可を受ける前の測定値であり、このパネルによる構法が試験棟の建設当時はまだ確立していなかったために、パネル間や開口部との接合部に隙間が生じ、それが気密性の低さに現れている。またRA棟の相当隙間面積が2年間で2倍以上となっているのは、南北両側窓に使用した木枠ペアガラス窓（米国製）枠の経年的な歪みによるものである。1993年の測定で、在来構法であるTWS棟の相当隙間面積がRA棟より小さいのは、この棟が竣工後間もないため窓枠の歪みが少ないことによると思われる。FCPは断熱性・気密性が高く、FCPによる住宅建設は施工性に優

れているが、表4のように、本試験棟にはそのような性能が十分には発揮されていないことがわかる。

4. 夏季・冬季の温熱環境実測結果

夏季の日射遮蔽、通風、および冬季の日射受熱が室温に与える影響を調べる。各設定条件下で測定した期間から、特徴の良く現れた1日を選択し、外界気象と室温の時間変化を図2～図8に示した。各図の室温と外気温の関係を図9にまとめ、表5に室内温熱環境と外界気象条件の統計データを整理した。

4. 1 夏季における窓面の日射遮蔽と通風の効果

(1) 窓面の日射遮蔽の効果

図2、図3はいずれも「通風なし」であって、図2は「日射遮蔽なし」、図3は「日射遮蔽あり」で10時から15時までの5時間、外付けブラインドによる日射遮蔽を行っている。「日射遮蔽なし」の室温の最高値はTF棟で41℃、RA、RB棟で39.5℃、RC棟で37℃程度である。RA棟の室温最高値はTF棟より1.5℃程度低いが、表5 a欄を見ると日平均室温は0.7℃高い。南側窓面積が他棟の半分であるRC棟の室温は、11～20時頃までRA、RB棟より1.5～2.5℃低い、最低室温はほぼ同じであるため、表5 a欄で見ると日平均室温の差は1℃程度にとどまっている。表5 a欄で、「日射遮蔽なし」と「日射遮蔽あり」の（室温－外気温）の日平均を比較すると、TF棟では0.8℃、RA、RB棟では1～2℃、RC棟では0.5℃程度である。

(2) 通風の効果

a) 片側窓開放と両側窓開放の効果の相違

図4 aは北側窓のみ開、図4 bは南北両側窓を開として通風を行った時の実測結果である（「片側窓開」と「両側窓開」の

表4 各試験棟の熱損失係数（計算値）と相当隙間面積（減圧法）

棟名	TF	RA	RB	RC	RB'	TFR	TWS
熱損失係数 ^{*1, *2} [W/m ² K]	5.23	3.14	2.79	2.79	3.14	5.00	4.77
相当隙間面積 [cm ² /m ²] (隙間特性値 n)	測定年月 1991年12月						
	窓や点検口等の目張りなし						
	6.5 (1.5)	4.4 (1.5)	3.7 (1.5)	3.6 (1.6)	-	-	-
	測定年月 1993年11月						
	窓や点検口等の目張りなし						
	-	9.0 (1.8)	-	-	7.3 (1.5)	8.9 (1.7)	7.6 (1.5)
	北側窓及び天井・床下点検口目張り有 ^{*3}						
	-	3.0 (1.3)	-	-	2.8 (1.2)	2.3 (1.1)	4.1 (1.5)
	上2欄の差						
	-	6.0	-	-	4.5	6.6	3.5

*1 換気回数は、TF、TFR、TWS棟は0.6回/h、その他の棟は0.3回/hとした。

*2 窓の熱貫流率は3.02W/m²Kとした。 *3 TWS棟は小屋裏換気口も閉鎖。

図2 「通風なし・日射遮蔽なし」の室温(1990/8/26) 図3 「通風なし・日射遮蔽あり」の室温(1991/7/27)

状況は図1参照)。いずれも8時から19時まで外付けブラインドによる日射遮蔽を併用している。トレーサースガス(SF₆)で測定した換気回数は、「片側窓開」では平均4.8回/h、「両側窓開」では平均10.4回/hであった。図4aの「片側窓開」の室温は、午前10時から11時頃までは外気温より1~2℃高い程度であるが、午後はこの差が次第に大きくなる。14~16時以降の室温と外気温との差を見ると、TF棟では4~5℃でほぼ一定であるが、RA棟では約2℃から次第に拡大し6~7℃に達している。このように断熱性の高い棟では、熱のこもり現象が明確に現れる。図4bの「両側窓開」を見ると、RA棟では14時頃まで室温は外気温よりわずかに高く19時でも2℃高い程度である。各棟とも「両側窓開」の方が室温と外気温の差が縮まっている。図4bでは19時に窓を閉じたため、この時刻直後に室温が不連続的に上昇している。これは19時以降の通風の効果を示唆している。

図4 片側窓開と両側窓開の通風効果の比較

図5 通風時間帯が室温に与える影響

図6 高さ方向の通風の冷却効果

b) 通風時間帯の影響

図5に通風時間帯が室温に与える影響を示す。RAとRB'棟は同一仕様であって、RA棟は8時から19時まで、RB'棟では9月5日は終日、9月6日は0時から22時まで南北両方の窓を開けて通風している。両棟とも8時から19時まで日射遮蔽を併用している。通風による冷却効果は通風時間が19時までより22時までの方が大きく、22時までより終日の方が更に大きい。19時または22時に窓を閉じて通風を停止すると、その直後に室温は不連続的に上昇し、それ以降は外気温の低下にしたがってゆるやかに下降する。このように、本試験棟では通風による蓄冷効果はほとんど期待できず、その冷却効果はほぼ通風時に限定されている。

c) 高さ方向の通風の効果

図6では、夏季及び中間季(秋季)にRA棟の床下点検口、天井点検口、東西妻面の小屋裏換気口を開放し、高さ方向の通風を行った。トレーサースガス(SF₆)による換気回数は、RA棟で平均2.5回/h、両点検口を開放しないRB'棟で平均0.5回/hであった。図6aより、14時頃の室温と外気温の差を比較すると、RA棟で4~5℃の差、RB'棟では約7℃の差である。表5dでRA棟とRB'棟の(室温-外気温)の日平均を比較すると約1.4℃の差にとどまっているが、図6aを見ると床下空気温度は外気温より日中は3℃程度低く、床下空気の導入をより積極的に行えばこれ以上の冷却効果が期待できよう。図6bでは、RA棟の室温は日中は28℃程度であるが、明け方6時頃には15℃程度まで低下している。

4. 2 冬季における日射受熱が温熱環境に与える影響

(1) 晴天日

図7a, bに冬季晴天日の室温を示す。前日はいずれも晴天日である。図7aを見ると、TF, RA, RB'棟では日中の室温は24℃程度に達している。RC棟のみ17℃程度にとどまっているのは、RC棟南面の窓面積が他の棟の半分であることによる、室温は明け方6~7時頃に最低、TF棟とRA, RB'棟の室温の差は同時

刻頃最大となり、5℃程度である。

図7bでは晴天日のRA棟とTF棟を屋根断熱に改修したTFR棟とを比較したが、TFR棟の明方の室温はRA棟に対して1.5℃低い程度におさまっている。

(2) 晴天日と曇天日が継続する場合

図8に、冬季で晴天日の次に曇天日が出現した2~3日間の室温を示す。前日の2月7

図9 各パッシブ手法における外気温平均と室温平均の関係

日は、午前中はやや曇りで午後より晴天となった。晴天日(2月8日)のRA, RB棟の室温の最高値は26℃程度、翌日の曇天日は16℃程度である。RA, RB棟の最低室温は晴天日の2月8日の早朝で11℃程度、曇天日の2月10日の早朝で9℃程度である。外気温が類似していることから、この2℃程度の差は、昼間の日射受熱による蓄熱の影響と考えられる。なお、18時~翌8時にTFR棟, RA棟の南北窓に遮光カーテンを用いているが、室温低下の緩和効果は見られない。これは使用したカーテンの熱抵抗が小

さく、熱抵抗の増加はカーテンとガラスとの間の中空部の熱抵抗相当地にすぎないことによる。

4. 3 図2~図8の各日の室温と外気温の関係

図2~図8に現れた各日の外気温と室温の関係を、図9に、日平均と各パッシブ手法を採用している時間帯の平均で示した。日射遮蔽・通風とも行わない場合の夏季の日平均室温(●)は、TF棟とRA棟では断熱性の高いRA棟のほうがやや高く、南側窓面積が他棟の半分のRC棟が最も低い。通風せず日射遮蔽のみ行

図7 冬季晴天日の室温

図10 天井断熱と屋根断熱の小屋裏温度と室温の比較(夏季)

図8 冬季晴天日の次に曇天日が出現する場合の室温

図11 天井断熱と屋根断熱の小屋裏温度と室温の比較(冬季)

った場合の室温(■)は、遮蔽時間帯ではTF棟が最も高く、RA、RC、RB棟の順に低くなる。しかし日平均室温で比較するとTF棟よりRA棟の方が高い。日射遮蔽のみを行った日が暑い日(平均外気温30℃)のため、各棟とも日平均室温は35℃位にまで達している。日射遮蔽と通風の併用(▲、◆)によって、室温上昇は緩和される。両側通風(◆)の方が効果は大きい。FCP棟では、各通風モードとも、通風時間帯の平均室温は外気温より1℃程度高いのみである。しかし、日平均で見るとその差は2倍以上となり、この割合はTF棟より大きい。RB'棟で終日通風した場合の日平均室温(◆)は外気温との差が2℃以内となり、断熱棟での夜間通風の効果が高いことを示している。冬季晴天日の日射受熱による室温上昇(●)は、RA、RB'棟等の断熱棟に、より顕著に表れており、TF棟では窓面積が半分のRC棟と同じ位である。

5. 天井断熱、屋根断熱が小屋裏温度と室温に与える影響

TF棟を屋根断熱に改修したのがTFR棟である。両者の小屋裏空気温度と室温を、図10(夏季)と図11(冬季)で比較する。それぞれ、aがTF棟、bがTFR棟である。

(1) 夏季

図10a、bとも、日射遮蔽も通風も行っていない日である。小屋裏空気温度は、図10aのTF棟では52℃程度に達し、RA棟の小屋裏温度より約14℃高いが、図10bのTFR棟では最高時でも37℃程度でRA棟とほぼ同じである。最高室温は、図10aではTF棟の方がRA棟より2℃程度高いが、図10bではTFR棟の方がRA棟より逆に0.5℃程度低い。

(2) 冬季

RA棟の小屋裏温度の振幅は、両日の外気温の相違が影響し、図11aでは14℃、図11bでは12℃程度で、振幅比は0.85程度である。これに対して図11aのTF棟と図11bのTFR棟の振幅比は約0.4であり、屋根断熱によって振幅比はかなり減少したと見られる。小屋裏の最低気温は、TF棟では外気温程度まで下がっているが、TFR棟は外気温より4℃程度高い。最低室温を比較すると、TFR棟の方がTF棟よりRA棟に接近している。

以上より屋根断熱は、夏季昼間は小屋裏の温度上昇を、冬季夜間はその下降を抑制する。TF棟とTFR棟で室温に相違も見られる。しかし、天井断熱は通常の断熱厚とし、それを改修した

表5 各パッシブ条件下における比較観点・設定内容・室内熱環境と外界気象の測定結果

季節区分	比較観点	実測年月/日 図番号	設定内容	棟名	室内熱環境							外界気象								
					日平均室温 [℃]	室温最高値 [℃] (発生時刻)	室温最低値 [℃] (発生時刻)	室温日较差 [℃]	(室温-外気温)の日平均 [℃]	日平均相対湿度 [%]	日平均外気温 [℃]	外気温最高値 [℃] (発生時刻)	外気温最低値 [℃] (発生時刻)	外気温日较差 [℃]	日平均外気相対湿度 [%]	水平面全天日射量 [MJ/m ² ・日]	主風向 (16方位の上2位) (頻度 [%])	日平均風速 [m/s]		
夏季	a 日射遮蔽	1990 8/26 図 2	全棟日射遮蔽なし 全棟通風なし ^{*1}	TF RA RB RC	34.3 35.0 35.3 34.1	41.1 (15:30) 39.5 (15:30) 39.5 (15:30) 36.7 (15:40)	28.5 (06:20) 31.1 (06:10) 31.4 (06:30) 31.2 (06:20)	12.6 8.4 8.1 5.5	5.58 6.34 6.64 5.37	57.8 57.5 61.9 61.3	28.7	32.9 (14:30)	25.1 (06:10)	7.8	78.2	19.1	N(21.5) S(13.9)	1.3		
		1991 7/27 図 3	全棟日射遮蔽10～15時 全棟通風なし ^{*1}	TF RA RB RC	34.8 35.4 34.6 34.9	40.4 (16:00) 38.6 (16:00) 37.4 (16:30) 37.3 (15:40)	30.5 (05:30) 32.7 (05:40) 32.3 (06:00) 32.6 (06:10)	9.9 5.9 5.1 4.7	4.83 5.37 4.61 4.88	53.0 30.0 57.0 59.1	30.0	33.9 (13:10)	27.5 (04:20)	6.4	76.5	22.4	S(32.6) SSW(17.4)	1.7		
		b 片側窓開 または 両側窓開	1991 8/7 図 4 a	全棟日射遮蔽 ^{*2} 8～19時 TF, RA: 北側窓開 ^{*3} 通風時間 8～19時	TF RA	29.5 29.8	33.8 (16:00) 32.0 (16:00)	25.5 (05:30) 27.6 (05:30)	8.3 4.4	3.86 4.19	55.4 58.4	25.6	30.3 (13:10)	21.6 (05:40)	8.7	74.5	23.6	N(14.6) WSW(13.9)	1.0	
			1991 8/11 図 4 b	TF, RA: 南北窓開 ^{*4} 他は8/7と同じ	TF RA	29.3 29.5	32.7 (14:40) 31.7 (14:40)	26.0 (06:10) 27.6 (05:40)	6.7 4.1	2.59 2.76	62.7 64.5	26.7	31.2 (14:40)	22.8 (06:10)	8.4	80.3	19.1	ENE(14.6) NNE(11.1)	1.0	
	c 追風時間	1992 9/5 図 5	全棟日射遮蔽8～19時 全棟南北窓開 TFR, RA: 8～19時 RB ^{''} : 終日	TFR RA RB ^{''}	31.1 31.2 30.0	33.8 (15:00) 33.4 (14:40) 34.0 (14:40)	28.8 (06:20) 29.8 (05:40) 26.7 (06:30)	5.0 3.6 7.3	2.56 2.71 1.46	65.2 67.2 73.4	28.5	33.0 (14:40)	25.1 (06:30)	7.9	77.9	13.0	NNE(20.8) WSW(18.1)	1.4		
		1992 9/6 図 5	RB ^{''} の窓開の時間 8時～22時 他は9/5と同じ	TFR RA RB ^{''}	30.6 30.7 29.4	34.0 (15:50) 33.5 (15:20) 34.2 (15:30)	27.9 (06:20) 29.0 (06:00) 25.7 (06:10)	6.1 4.5 8.5	2.71 2.91 1.59	58.6 60.5 65.3	27.9	32.9 (15:10)	23.9 (06:00)	9.0	69.6	13.5	NNE(16.0) WSW(14.6)	1.4		
		d 高さ方向の 通風	1993 9/16 図 6 a	全棟日射遮蔽8～19時 全棟南北窓開 RA棟: 終日床下点検口 及び天井点検口を開放 ^{*5} RB ['] 棟: 両方とも閉鎖	RA RB [']	30.1 31.5	34.5 (13:30) 36.1 (13:30)	27.2 (06:00) 27.9 (06:10)	7.3 8.2	4.00 5.39	65.4 — ^{*6}	26.1	30.6 (12:10)	23.3 (06:20)	7.3	81.0	16.3	ENE(23.6) WSW(11.8)	0.9	
			1993 10/25 図 6 b		RA RB [']	21.5 24.4	28.5 (14:30) 32.2 (15:00)	15.6 (06:40) 17.3 (07:00)	12.9 14.9	6.90 9.78	41.4 — ^{*6}	14.6	21.5 (13:40)	8.7 (03:30)	12.8	64.2	17.5	N(18.8) NNW(16.0)	1.2	
	冬季	e 晴天日の 日射受熱	1991 2/26 図 7 a	全棟日射遮蔽なし 全棟通風なし 全棟夜間カーテンなし	TF RA RB ['] RC	11.6 15.2 15.8 11.9	23.8 (15:50) 23.3 (15:10) 24.4 (15:50) 16.9 (16:10)	1.5 (07:40) 7.0 (08:00) 7.1 (08:10) 6.1 (07:40)	22.3 16.3 17.3 10.8	7.62 11.16 11.76 7.91	27.4 26.9 25.5 29.1	4.0	11.8 (14:40)	-2.5 (06:40)	14.3	55.3	19.1	N(20.8) NW(18.1)	1.5	
			1993 3/2 図 7 b		TFR RA RB [']	12.3 13.7 14.1	21.3 (15:10) 21.6 (15:10) 22.4 (15:10)	5.5 (07:10) 7.1 (06:50) 6.9 (07:00)	15.8 14.5 15.5	7.22 8.64 8.99	39.4 36.9 36.0	5.1	10.6 (14:10)	1.6 (06:50)	9.0	62.5	17.3	N(25.7) NNE(24.3)	2.1	
			f 晴天日 及び 曇天日の 日射受熱	1993 2/8 図 8	全棟日射遮蔽なし 全棟通風なし	TFR RA RB [']	15.0 17.6 18.0	23.8 (15:30) 25.4 (14:50) 26.4 (14:50)	8.5 (07:40) 11.1 (07:30) 11.1 (07:20)	15.3 14.3 15.3	7.92 10.58 10.92	38.2 37.7 36.4	7.1	12.1 (15:00)	3.5 (23:20)	8.6	52.4	15.7	N(32.6) NNE(25.7)	2.1
				1993 2/9 図 8	TFR, RA棟: 夜間カーテン 使用(18～8時)	TFR RA RB [']	10.5 12.7 12.6	14.5 (16:10) 15.8 (00:00) 16.1 (16:00)	8.5 (08:50) 10.8 (09:50) 10.7 (10:50)	6.0 5.0 6.4	4.63 6.81 6.75	39.1 36.7 36.7	5.8	9.0 (15:30)	3.0 (01:20)	6.0	69.3	4.9	N(28.5) NNE(25.7)	1.8

*1 外付けブラインドを使用しない(巻き上げ)状態で、日射遮蔽係数 0.90程度。

*2 外付けブラインドを使用した(全開)状態で、日射遮蔽係数 0.14程度。

*3 北側窓を図1(c)のように開いた状態。換気回数は平均 4.8回/h。

*4 南側窓を図1(b)のように開いた状態。換気回数は平均 10.4回/h。

*5 図1(c)のように床下及び小屋裏換気口を開放した状態。

*6 欠測。

屋根断熱では夏季の遮熱を考慮して断熱を厚くしたため（表3参照）、TF棟の天井断熱とTFR棟の屋根断熱の熱抵抗は異なっており、本実測結果にはその影響が含まれている。したがって、本実測結果は両断熱法の違いを定性的に示すものであって、定量的な評価を行うことは困難である。

6. 屋根葺材によるパネル内部温度の相違

夏季晴天日における屋根表面温度、およびFCP内部（FCPの外気側OSBと芯材である発泡ポリスチレンとの境界面）の温度を、屋根葺材の異なるRA（スレート）、RB（鉄板）、RC（瓦）の3棟について図12で比較する。南側屋根表面とFCP内部の最高温度は、RA、RB、RC棟で、それぞれ73℃:72℃、76℃:69℃、65℃:57℃程度である。屋根葺材の相違によりパネル内部温度に12℃程度の差が生じている。

この実測の目的は、FCPの芯材が暑い日の日射受熱により溶融し痩せ現象を起こすかどうかを調べることにある。本研究が終了し試験棟を取り壊す時点で、屋根に使用したFCPの芯材を目視により確認したが、そのような痩せ現象は見られなかった。高温環境が芯材に与える影響に関しては、別途外壁に使用したものと同一FCPを用いて恒温箱で加熱実験を行い、その変化を目視により確認した¹³⁾。その結果、低温側のパネル表面は約20℃とし、高温側パネル表面温度を100℃一定に制御して10時間加熱を継続した場合は変化なし、110℃一定で5時間加熱を継続した場合は溶融によるわずかな空隙が発生、120℃一定で5時間加熱すると高温側から厚さの半分程度までが溶融することがわかった。図12に示した測定日は最高気温が約33℃の快晴日であるが、芯材の温度は最高でも72℃程度にとどまっている。このように、FCPの芯材が溶融を起こす温度は夏季の日射受熱で到達しうる温度よりかなり高いと考えられるため、屋根に用いるFCPの芯材が暑熱による痩せ現象を起こす可能性は極めて低い。

7. 外気湿度と室内湿度の関係

図12 屋根葺材がFCP内部温度上昇に与える影響の比較(1990/8/26)

図13 夏季の外気と室内の湿度変動

図14 冬季の外気と室内の湿度変動
(晴天日の次に曇天日が出現する場合(1993/2/8~2/10))

(1) 夏季

図13で、夏季における外気および室内の相対湿度と絶対湿度の変化を比較する。図13 a～dはいずれも晴天日で、aは日射遮蔽なし・通風なし、bは日射遮蔽あり(10～15時)・通風なし、cは日射遮蔽あり(8～19時)・通風あり(8～19時北側窓のみ開放)、dは日射遮蔽あり(8～19時)・通風あり(8～19時北側および南側窓開放)である。外気相対湿度は、a～dとも夜間90%程度で昼間は60%前後に低下し日周期性が見られるが、外気絶対湿度には日周期性は見られない。室内相対湿度は、a～dとも平均約60%程度で日中はやや低下するが、変動は小さい。通風時間帯は外気相対湿度に接近している。非通風日の室内絶対湿度は日中に上昇し、明確な日周期性が見られる。これは建物内装材が日中放湿・夜間吸湿し、室内相対湿度を安定化させていることによると考えられる。RA棟に比べ室温の日較差の大きいTF棟にその傾向がより明確に表れる。通風時間帯の室内絶対湿度には日中の上昇が見られず、通風の排湿効果がうかがえる。

(2) 冬季

図14に、冬季における晴天日(2月8日)とその翌日(2月9日)の曇天日について、外気及び室内の相対湿度と絶対湿度の変化を示す。晴天日の外気相対湿度は夜間60%程度、昼間40%程度で日周期性を示す。晴天日の後半から天気が悪化したと見られ、翌日の前半まで約80%程度となり、天気の回復に伴い60%程度まで下降している。外気絶対湿度は4～5g/kg(DA)程度で変動はあまり見られない。室内相対湿度は40%程度で両日ともほぼ一定である。室内絶対湿度には、夏季と同様、晴天日に外気相対湿度と逆位相の日周期性が見られる。

8. まとめ

(1) 4棟(1棟は2×4棟(TF棟)、3棟はFCP棟(RA, RB, RC棟))の試験棟で、断熱程度、窓仕様等の建物条件と住まい方を設定し、夏季・冬季における外界条件と室内温熱環境を実測した。実測データを、建物仕様との関係が明確にわかるように、総括的、かつ具体的に整理した。

(2) FCP棟の熱損失係数の計算値は2.79～3.14W/m²Kで新省エネ基準のⅢ地域適合程度であったが、相当隙間面積の測定値は予想より大きくかつ経年変化が見られた。

(3) 夏季の典型的な晴天で暑い日について、日射遮蔽と通風を行った場合の温熱環境を調べた。

- 太陽高度の高い盛夏・晴天日の10～15時に日射遮蔽のみを行ったときの日平均室温は、4棟とも約35℃であった。このような条件下では室内は極めて暑くなるという結果が得られた。
- 日射遮蔽と通風を併用すると室温上昇は緩和されるが、それでも日平均室温は4棟とも約30℃であった。FCP棟では夜間の熱のこもりが顕著であるが、夜間通風を行うと夜間の室温(グローブ温度)を外気温+2℃以内に維持できた。夏季晴天日でも夜間外気温が25℃以下に低下する日は多く、そのような日は夜間通風により冷房なしで就寝できる可能性が高い。
- 以上のように、夏季晴天日は日射遮蔽・通風という一般的なパッシブ手法のみで居住に適した室温を維持することは困難で、アクティブ手法との併用が必要であることがわかった。本報ではパッシブ手法に限定したが、本試験棟での冷暖房時

の温熱環境と省エネルギー性は統報でまとめる予定である。

(4) 冬季の日射受熱によるパッシブヒーティングにより、FCP棟では日平均室温が外気温より11～12℃上昇したが、TF棟では7.5℃程度の上昇にとどまった。このように、パッシブヒーティングの効果は断熱性の高い棟に顕著に現れた。

(5) 2×4棟の天井断熱を、屋根断熱に改修することにより、小屋裏温度環境の改善効果が見られた。しかし小屋裏の熱環境が空調時の居室温度に与える影響は、屋根断熱の方が天井断熱より大きいことも考えられる。その解明は今後の課題である。

(6) 屋根断熱に用いたFCPの芯材の温度が夏季の晴天時にどの程度まで上昇するかを、屋根葺材の異なる棟で測定した。パネルの加熱実験と解体調査も合わせて行い、日射熱によって芯材が痩せ現象を起こす危険性は極めて低いことを示した。

(7) 外気と室内の相対湿度と絶対湿度について、夏季晴天日の密閉時と通風時、冬季の晴天日と曇天日についての実測結果をまとめた。晴天日のデータに、内装材からの吸放湿、および通風による排湿効果が表れていることを示した。

謝辞：本研究の一部は平成3年度文部省科学研究費(一般研究(B)、課題番号03452229、代表者:赤坂裕)により行われた。試験棟の建設には三井ホーム(株)Rコントロールパネル推進センターに協力していただいた。換気量の測定には鹿児島大学工学部建築学科の岩下助教授の協力を得た。実測とデータ整理には、数年にわたり卒論生と大学院生の協力を得た。記して感謝の意を表します。

参考文献

- Steve Andrews: Foam Panels, CUSTOM BUILDER, March, 1988
- 長谷川房雄, 木村建一, 吉野博, 石川善美, 松本博: パッシブソーラーシステム試験棟を用いた蓄熱床方式に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 366, pp. 33～40, 1986年8月
- 伊藤直明, 須永修道: ダイレクトゲインシステム補助暖房量と蓄熱部位の熱挙動に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 377, pp. 1～8, 1987年7月
- 松尾陽, 井上隆ほか: パッシブソーラー・ダイレクトゲインシステムの性能評価に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No. 400, pp. 25～33, 1989年6月
- 浦野良美, 渡辺俊行, 龍有二ほか: 蒸暑地域における付設地下室住宅の涼房効果, 日本建築学会九州支部研究報告, 第31号・2, pp. 141～144, 1989年3月
- 石原修ほか: パッシブエアサイクル住宅の温熱環境に関する実験的研究, 日本建築学会中国・九州支部研究報告, 第6号・2, pp. 249～252, 1990年3月
- 住宅・建築省エネルギー機構, 住宅の新省エネルギー基準と指針, 1992年3月
- 村上周三, 吉野博, 加藤信介, 赤林伸一, 小泉求: 高断熱・高気密住宅の空調方式に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1447～1448, 1993年9月
- 小峯裕巳, 西郷徹也, 荒木幹男: 温暖地の高断熱・高気密住宅における冷房負荷に関する実大実験, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 309～312, 1995年10月
- 根本恭子, 吉野博, 小林仁: 断熱・気密住宅における日射遮蔽と夜間換気の効果に関する実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 181～182, 1995年8月
- 佐藤豊, 郡公子: S住宅の夏季における温熱環境の実測研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 197～198, 1995年8月
- 赤坂裕: 温暖地における断熱・気密住宅の温熱居住環境に関する研究, 平成4年度文部省科学研究費補助金研究成果報告書, 1993年3月

(1996年10月10日原稿受理, 1997年2月25日採用決定)