

全国5物件の実証住宅の計画と年間実測による性能評価

太陽熱フル活用を目的とした空気集熱式太陽熱利用住宅の性能向上に関する研究 その1

PERFORMANCE EVALUATION OF FIVE CUSTOMIZED MODEL HOUSES IN JAPAN
BY ANNUAL MEASUREMENTSImproving the performance of air-based solar system in detached houses
via maximum utilization of available solar energy, Part 1軽部 達也^{*1}, 森田 舟哉^{*2}, 高瀬 幸造^{*3}, 崔 榮 晋^{*4}, 山本 智大^{*2},
吉田 英明^{*2}, 前 真之^{*5}, 井上 隆^{*6}, 盧 炫 佑^{*7}*Tatsuya KARUBE, Shuya MORITA, Kozo TAKASE,
Youngjin CHOI, Tomohiro YAMAMOTO, Hideaki YOSHIDA,
Masayuki MAE, Takashi INOUE and Hyunwoo ROH*

In this paper, we planned five model houses with air-based solar system for each climate zone defined by Japanese energy-saving standard and later evaluate their annual performances by measurement. To improve the thermal comfort and reduce energy use, the insulation level was raised beyond the Japanese energy-standard levels. In addition, we adopted some energy-saving techniques e.g. using bottled water as heat storage medium. The annual measurements showed excellent improvements in the energy-saving performance of each house compared with the energy-saving standard model in Japan.

Keywords: Solar Energy, Air-Based solar heating system, Energy Saving, Heat balance, Heat storage
太陽エネルギー, 空気式太陽熱暖房, エネルギー削減, 熱収支, 蓄熱

1. はじめに

1-1 背景・目的

近年,省エネルギー基準適合義務化に向けて,住宅・非住宅ともに省エネルギー化の動向が高まっている。住宅分野では,現在の省エネルギー基準より高水準な外皮・設備を実装し,再生可能エネルギーも加えることで年間エネルギー消費量がゼロ以下となるゼロ・エネルギー・ハウス¹⁾(以下,ZEH)化も促されており,経済産業省では平成24年度より補助事業が実施され,その成果も毎年公開²⁾されている。こうした状況において,太陽エネルギー等の再生可能エネルギーの効率的利用について関心が高まっている。

我が国では,太陽エネルギー利用の第一歩として1960年代から70年代にかけて,太陽熱の給湯用途への利用が進むとともに,木村^{3),4)},田中^{5),6)}等を代表として,暖冷房用途にも太陽エネルギーを利用した多くの研究が報告されている。これらの研究では,太陽熱集熱器内部を通過する熱媒が液あるいは空気のものに大別されるが,我が国においては住宅におけるエネルギー消費量の過半数を占める暖房・給

湯用途のエネルギー消費削減の両立を図る太陽熱活用型システムとして,屋根から外気を取り込み集熱利用する空気式システムが普及してきた経緯があり,これまで様々な検討^{7)~11)}が行われ,これらをはじめとする太陽エネルギー利用に関する個々の要素についての技術情報も整理されてきている¹²⁾。筆者らも現行の省エネルギー基準相当の断熱性能を有する実験棟において,屋根空気集熱利用の有無による暖房消費エネルギー量の違いや,集熱した熱を床下空間に効率的に蓄熱する方式についての検討^{13),14)}を蓄積してきた。また,海外においても,多様な地域・気候におけるソーラー建築¹⁵⁾に加え,太陽光発電と空気集熱の両立を図った,Photovoltaic Thermal(以下,PVT)の研究^{16)~18)}も多く報告されている。

そこで本研究では,住宅の屋根面における太陽エネルギーを,太陽光発電だけでなく太陽熱集熱にも利用する屋根空気式集熱システム(以下,本システム)を検討することとし,気候の異なる全国5か所に太陽エネルギー活用型実証住宅を建設した。現時点での省エネルギー基準の解説¹⁹⁾に示されている用途別エネルギー消費量推定の

本稿は日本建築学会大会における既発表内容^{20)~24)}を再編成,加筆したものである。

^{*1} 当時 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 大学院生
^{*2} 当時 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻 大学院生
^{*3} 東京理科大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)
^{*4} 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 特任研究員・博士(工学)
^{*5} 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)

^{*6} 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博
^{*7} OMソーラー(株) 取締役・技術部長・博士(工学)

Grad. Student, Dept. of Architecture, the Univ. of Tokyo
Grad. Student, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science
Assist. Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.
Project Researcher, Dept. of Architecture, the Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., the Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.
Director, R&D Department, OM Solar Inc., Dr. Eng.

ための4人世帯の負荷条件を想定し、各月に暖冷房・給湯・換気等をスケジュール運転した際の温熱環境やエネルギー消費量等の実測を行うことで、各地域の気候特性に従った本システムの性能評価及び省エネルギー効果に関する検討を行った。

1-2 システム概要

本システムでは、日中、屋根面に設置された集熱面（PVT（予備集熱面）及びガラス集熱面で構成される）で外気を温め、その温められた空気を小屋裏のハンドリングボックス（以下、HB）に設置されたファンにより立下りダクトを通じて床下空間に送る。床下に送られた熱は、室内の床に設けられた吹き出し口を通じた室内への対流、床面を介した床下空間から室内への貫流、基礎コンクリートへの蓄熱、といういずれかの経路により暖房用途に利用される。非集熱時（夜間や曇天日など）には循環運転となり、小屋裏で室内空気を吸い込み床下空間に送ることで床下に蓄熱された熱を取り出す。また夏期・中間期や冬期で室内が十分暖房された際にHB内の熱交換器にて不凍液を介して貯湯槽内の水と熱交換することで貯湯し、集熱分を給湯利用することが可能である。また集熱面が一部PVTであり、発電により住宅内の空調・照明・家電などの電力消費を賄うことができる。

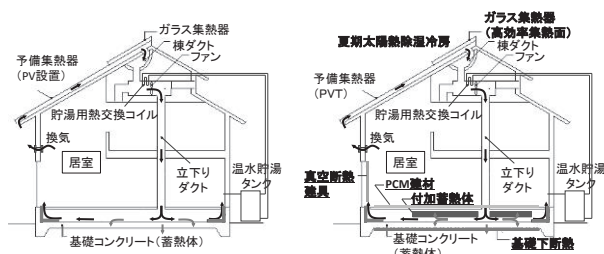


図1 システム概要図（左：既存、右：改善）

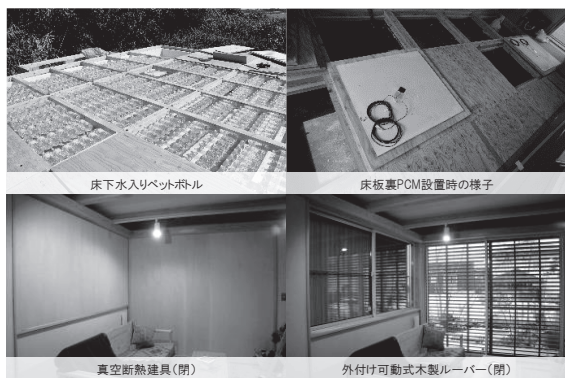


図2 採用した要素技術の一部

また既存のシステム搭載住宅からエネルギー性能を大幅に向上させるため以下の要素技術を採用した（図1、図2）。

- ① 集熱量の向上：高効率ガラス集熱器の採用
- ② 基礎から地中への熱損失の低減：基礎下断熱の実施
- ③ 床下蓄熱性能の向上：付加蓄熱体（水入りペットボトル、潜熱蓄熱材）の設置
- ④ 開口部の夜間断熱強化：真空断熱材を用いた開閉式建具の設置
- ⑤ 夏期開口部日射熱取得の低減：適切な日射遮蔽物の設置
- ⑥ 冷房負荷の低減：太陽熱除湿冷房（後述）の採用

①ガラス集熱器の集熱性能の向上¹⁴⁾（ガラス種類による日射取得率の向上や熱損失の低減）により太陽エネルギーの利用効率を高め

ることができる。

また太陽熱を利用するという本システムの特性上、熱の取得時間と熱の利用時間（負荷の発生時間）に差が生じるため、太陽熱の有効利用のために適切な蓄熱部の計画が肝要である。②既存システムでは基礎床中心部を蓄熱部として想定しており、基礎下断熱を施すことで地中への熱損失を減らし蓄熱性能を向上することができる¹³⁾。③また集熱量や暖房負荷に応じて床下空間に付加蓄熱体（水入りペットボトル（以下、PB）²¹⁾、潜熱蓄熱材含有建材（Phase Change Material（以下、PCM））を導入することで蓄熱性能の向上が可能である。このような付加蓄熱体は吸熱分を全て床下空間に再放熱するため室外への損失がなく蓄熱性能の向上に有効である。

④熱的に弱点となる開口部には、真空断熱材を内蔵した引き込み式建具（以下、真空断熱建具またはVIP（Vacuum Insulation Panel））を設置し、冬期の夜間に建具を閉じることで断熱強化を図り室内からの熱損失を低減するとともに、夜間の室温低下を抑制する。

夏期においても、⑤開口部外部側に適切な外ブラインドや外付け可動式ルーバーを設置することで、開口部からの日射を遮蔽し冷房負荷を低減するとともに、高断熱・高气密化に伴うオーバーヒートを抑制する²²⁾。⑥さらに温暖地以南では、太陽熱を乾燥剤（シリカゲル）の再生に活用したデシカントと気化冷却器を組み合わせたバッチ式太陽熱利用除湿冷房（以下、太陽熱除湿冷房）を採用し、太陽熱を活用した冷房負荷の低減を目指した。室内からの還気は乾燥剤により潜熱処理され、その後水の気化冷却を利用して顕熱処理されて室内に給気される。同時に他方のユニットでは集熱空気による乾燥剤の再生と不凍液を介した給湯用熱交換が行われており、約15分間隔で各ユニットが切り替えられている（図3）。なお太陽熱除湿冷房運転時には換気設備が運転し新鮮外気を導入している。

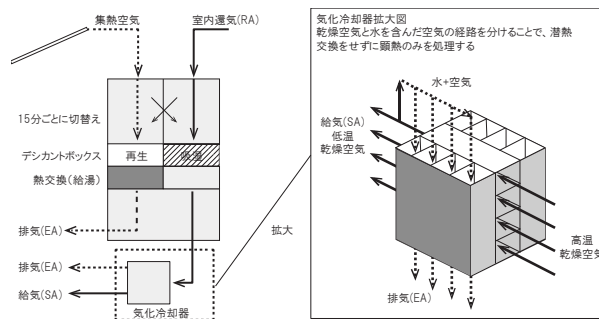


図3 太陽熱除湿冷房システム図

2. 実証住宅及び実測の概要

2-1 建物概要

本研究では、気候条件が大きく異なる全国5か所（北海道伊達市、宮城県仙台市、静岡県浜松市、鹿児島県鹿児島市、沖縄県北谷町）に計画・建設された本システム搭載の実証住宅を対象とした。以降北海道、仙台、浜松、鹿児島、沖縄実証住宅とする。これらの実証住宅については、地域ごとの気候特性に応じた断熱性能や集熱・蓄熱性能などについて設計時に入念に検討を行い、既存システム搭載住宅と比較して暖冷房・給湯の年間負荷の半減を目標とし、表1のような仕様とした²³⁾。以下に各物件の概要を簡潔に示す。

北海道実証住宅は大きな吹抜けを持つ木造2階建ての建物である。寒冷地のため高断熱高气密化が必須であり、外壁の付加断熱の実施

及び高性能ガラス,サッシの採用により省エネ基準を大きく上回る断熱性能とした。補助暖房として温水を石膏ブロックに通す輻射式パネルヒーターが主居室階段横に,床下空気加温用温水コイルが立下りダクト内に設置されている。また床下付加蓄熱体として 500ml の PB,1000 本(計 500L)を大引間に,PCM を床下空間の天井部(1F 床板裏)に配置した。その他室内排気熱を給湯に利用する換気排熱利用ヒートポンプ給湯を採用している。冷房設備はなく,夏期と中間期は積極的に通風を行うことで室温を維持する。

仙台実証住宅は吹抜けを持たないものの各階が階段室を含めた一体的な空間構成となっている。集熱だけでなくダイレクトゲインも有効利用するため開口部を大きくし,高性能ガラス,サッシを採用して高断熱化を図った。補助冷暖房としてエアコンが 1F に設置されている。また床下付加蓄熱体として 500ml の PB,1000 本(計 500L)を大引間に配置した。その他,壁付全熱交換換気を導入した。

浜松実証住宅は大きな吹抜けを持つ建物であり,温暖地の住まいとして通風にも配慮した平面となっている。豊富な日射量を得られるため,集熱量及び蓄熱容量の増加による補助暖房使用ゼロを目指した。床下空間には 2L の PB,500 本(計 1000L)を導入し,1F 床板裏,一部の内壁,天井に PCM が使用されている。また冷房負荷低減のため太陽熱除湿冷房及び外付け可動式木製ルーバーが採用されている。加えて室内の温度環境を均一にするため吹き抜け上部にはシーリングファンが設置されている。

鹿児島実証住宅は仙台同様,吹抜けを持たないものの各階が階段室を含めた一体的な空間構成となっている。適度な断熱性能を確保するとともに開口部を大きくし補助暖房の使用ゼロを目指した。また冷房負荷低減のため外付け可動式木製ルーバーを主要な窓に設置した。補助冷暖房として 2F 天井付近にエアコンが設置されている。高い太陽高度に合わせ集熱面の傾斜を緩やかにし,太陽熱除湿冷房を重視した設計とした。また壁付全熱交換換気が導入されている。

沖縄実証住宅は,RC 造 3 階建てであり,比較のため 1 階部分は無断熱,2,3 階部分(評価対象)が断熱ありである。断熱境界は 1,2 階の間に設けられており,屋根集熱による暖房空気は 2,3 階の床下に送られる。補助冷暖房として全居室にエアコンを設置した。また花ブロック(通風と日射遮蔽を両立する沖縄特有の透かし模様のブロック)と外付け可動式木製ルーバーを採用し,日射遮蔽による冷房負荷低減を徹底している。なお,沖縄実証住宅は竣工時期がずれたため年間でのデータ取得に至っておらず,本報では概要の紹介のみとする。

2-2 計測点概要

集熱部から居室までの熱の流れを詳細に測定することを目的とし,気象観測器や日射計,熱電対,熱流計,流量計,電力計などの各種測定器を約 140 点以上設置しデータロガーにて記録した。特に本システムの運転状況の把握に重要と思われる計測項目については 10 秒間隔での測定とし,室温などの比較の変動が小さいと予想される計測項目に関しては 1 分間隔での計測とした。居室室温及び床表面温度は無線式温湿度計を用いて計測している。表 1 の平面図にその位置を示す。その他,本システムの改善に重要と考えられる各要素技術についても詳細に計測を行っている。図 4~図 7 に浜松実証住宅における計測器設置場所を示す。他の 4 件についても設置位置や導入設備機器による差異はあるものの,概ね同様である。

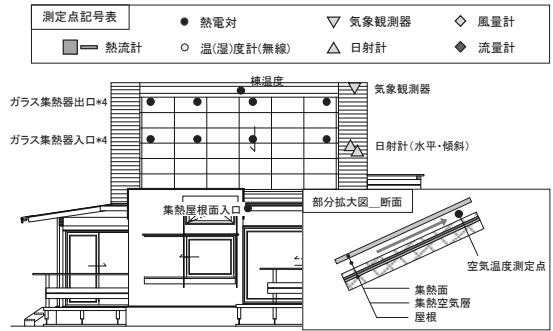


図 4 集熱面及び外気条件計測点(浜松)

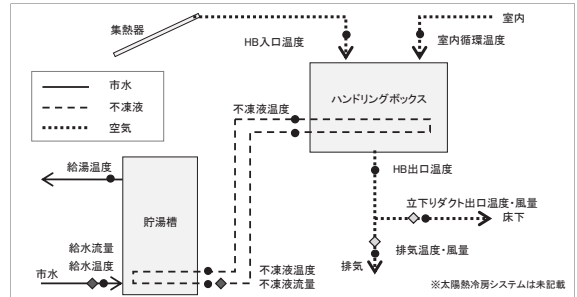


図 5 システム周り計測点(太陽熱暖房・給湯,浜松)

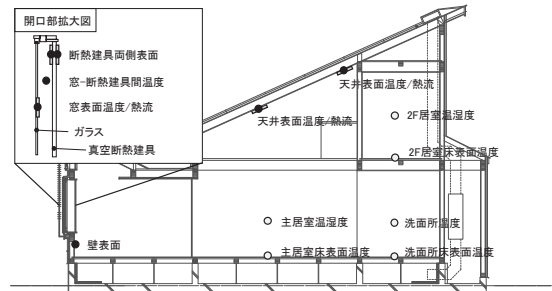


図 6 室内側計測点(浜松)

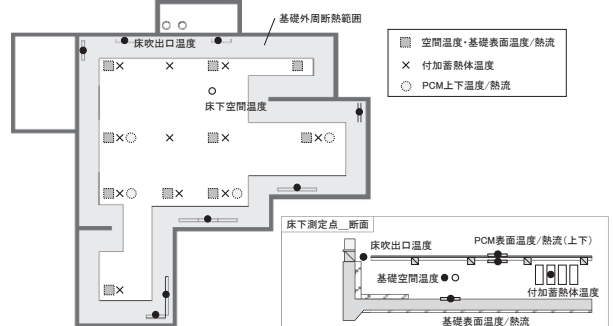


図 7 床下空間計測点(浜松)

2-3 実証住宅における実測条件の設定に関して

実測条件の設定にあたっては,省エネルギー基準の解説書¹⁹⁾を参考にした。これによれば一般住宅(居住人数 4 人,平日,延床面積 120m²)の日平均内部発熱は換気(局所+24h 換気) 16W,調理 133W,照明 140W,家電 199W,人体発熱 143W(顕熱 60W/人とし在室人数を乗じた)であり,合計 631W である。この値をもとに実証住宅の延床面積で補正を行うと,概ね 450~580W 程度が内部発熱として妥当であり,計測器や家電等に加え人体発熱を模擬した電球を点灯することで 500W 程度の内部発熱を再現した。また給湯湯使用量は基準給湯温度 40℃及び居住人数 4 人における平日(中)の基準給湯量 450L/日をもとに,毎日 40℃での出湯を計 450L 行った。

表 1 実証住宅 5 件の建物仕様詳細

所在地	北海道伊達市	宮城県仙台市	静岡県浜松市	鹿児島県鹿児島市	沖縄県北谷町	
建物外観						
建物内観 (主居室)						
建物周辺 (灰色部分が実証住宅、地図上が北)						
1階平面図 ※1 (沖繩は2階)						
2階平面図 ※1 (沖繩は3階)						
断面 (南-北)						
気候条件 ※2	省エネ地域区分	2地域	4地域	6地域	7地域	8地域
	日射量区分(年間・冬期)	A2・H3	A2・H2	A5・H4	A4・H2	A4・-
	年平均外気温[°C]	8.0	12.7	16.4	18.6	23.3
	年間日平均 全日日射量[Wh/m ² ・日]	2969	3347	4133	3910	3933
	冬期日平均 全日日射量[Wh/m ² ・日]	2660	3143	3422	2908	2722
建物条件	延床面積	114.0	106.0	88.6	111.8	168.4
	開口部面積 (うち南面開口面積)	22.9 (9.0)	32.5 (14.7)	29.1 (11.6)	37.2 (9.0)	32.7 (11.3)
	外皮等面積合計	324.9	295.0	297.8	305.5	464.9
熱性能 ※3 (()内は基準値)	α値[W/K]	88.1	131.9	152.6	173.3	385.8
	U _A 値[W/m ² ・K]	0.28(0.46)	0.47(0.75)	0.52(0.87)	0.57(0.87)	0.83(-)
部位ごとの 断熱仕様・構成	屋根	吹込・GW30K t=400	A種フェノールフォーム保温板1種2号t=90	A種フェノールフォーム保温板1種2号t=170	A種フェノールフォーム保温板1種2号t=90	A種押出法ポリスチレン1種 t=25
	外壁	充填・高性能GW16K t=100 付加・EPS特号t=100	充填・高性能GW16K t=105	充填・セルローズファイバー55K t=105	充填・高性能GW16K t=105	A種押出法ポリスチレン1種 t=25
	主要な窓	木製サッシ +Low-Eリフレクトガラス	木製サッシ +真空ガラス(複層)	木製サッシ +Low-E複層ガラス	アルミ樹脂複合サッシ +Low-E複層ガラス	アルミサッシ +普通単板ガラス
	扉	木製断熱複層	木製断熱複層	木製断熱複層	木製断熱複層	木製ドア
太陽熱利用 システム 採用状況	予備集熱面(PVT)面積[m ²]	41.1	29.9	22.4	27.9	30.8
	ガラス集熱面面積[m ²]	20.8	15.1	11.3	15.1	10.3
	太陽熱暖房・給湯	○	○	○	○	○
	太陽光パネル発電容量[kW]	5.5	4.0	3.0	3.5	4.1
給湯 (()内はタンク容量)	換気排熱利用HP 潜熱回収型ガス給湯器 (300L)		自然冷媒CO2 ヒートポンプ給湯器 (420L)	自然冷媒CO2 ヒートポンプ給湯器 (420L)	自然冷媒CO2 ヒートポンプ給湯器 (420L)	自然冷媒CO2 ヒートポンプ給湯器 230L・200L(2タンク式)
	補助冷暖房(設置位置) (定格消費電力[kW])	輻射式温水パネルヒーター(1F) 温水加温コイル(床下)	エアコン(1F・1台) (冷房1.56kW・暖房標準1.48kW)	エアコン(1F・1台) (冷房1.62kW・暖房標準1.49kW)	エアコン(2F・1台) (冷房1.23kW・暖房標準1.28kW)	エアコン(2.3F・4台) (冷房1.38kW・暖房標準1.235kW)
換気	ダクト式第3種換気	壁付け第1種全熱交換換気	第3種換気	壁付け第1種全熱交換換気	第3種換気	
真空断熱材使用建具	○	○	○	○	○	
付加蓄熱体	水入りペットボトル500L (500mL×1000本)	水入りペットボトル500L (500mL×1000本)	水入りペットボトル1000L (2L×500本)	-	-	
PCM建材	1F床板裏 相変化温度25°C, 潜熱量6.7MJ	1F床板裏 相変化温度30°C, 潜熱量6.7MJ	1F床裏・天井・壁の一部 相変化温度25°C, 潜熱量10.8MJ	1F床板裏 相変化温度30°C, 潜熱量6.7MJ	フローリング建材 相変化温度26.3°C 潜熱量5.6MJ	
日射遮蔽物	-	外付け可動式木製ルーバー	外付け可動式木製ルーバー 外ブラインド	外付け可動式木製ルーバー	花ブロック 外付け可動式木製ルーバー	

※1: 図中の●は無線式温(湿)度計による室温計測位置、○は無線式温度計による床表面温度計測位置、灰色部は主たる居室、長方形の斜線部はエアコンの設置位置を表している。

※2: 年平均外気温および平均全日日射量は拡張アメダス標準年気象データ(2000年)をもとに算出した。

※3: 沖繩を除く4件の熱性能の算出には「(株)インテグラル「ホームズ君省エネ診断エキスパート」(「簡易CADをもとに省エネルギー基準における外皮計算を行うプログラム」)を使用した。

3. 各実証住宅における実測期間の外気気象条件に関して

年間での性能把握を行うにあたり、今回各月に定めた実測期間の気象条件（実測値）と標準年における気象条件の比較を行った。なお本報では、6～9月を夏期、4・5・10・11月を中間期、12～3月を冬期とした。図8に4物件の季節ごとの気象条件を示す。実測値は実測期間平均値、標準値は拡張アメダス標準年気象データ（2000年）より算出した。各地域で外気温は実測値と標準年で大きな差はない。一方、水平面全天日射量は天候不順により鹿児島島の夏期・冬期において実測値の方が標準年に比べ最大2割程度少なかった。

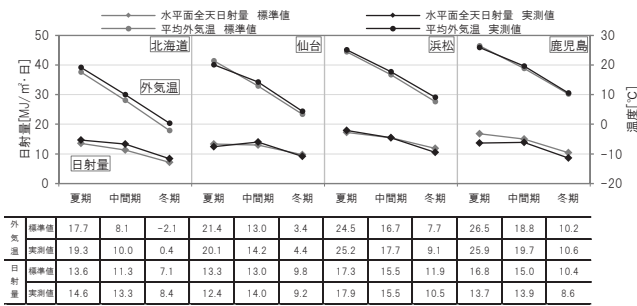


図8 実測期間気象条件と拡張アメダス気象標準年データ

4. 冬期実測

4-1 冬期実測概要

冬期は、各月に1週間程度の実測期間を設け標準生活を模擬した実験を行った。暖房設定温度は20℃とし、模擬内部発熱の点灯、自動出湯、真空断熱建具操作を行った。ここでは冬期でも比較の日射量が豊富な浜松と、比較的外気条件の厳しい仙台を中心に結果を示す。

表2 冬期、中間期実測条件

	2015年			2016年			
	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月
集熱運転	給湯+暖房						
暖房(設定温度)	太陽熱暖房(20℃)+補助暖房(18℃)						
換気	ON						
真空断熱材建具	8時~16時開			8時~18時開			
日射遮蔽物	開						
模擬内部発熱	100W電球4球		常時・100W電球2球点灯				
給湯(自動出湯)/日	約450L・40℃			約450L・42℃			

4-2 冬期室温実測状況

仙台、浜松における2016年2月の実測結果を図9、図10に示す。なお室温基準暖房集熱量 Q_r （集熱取得量）については次式により算出した。式中の記号に関しては文末注1にまとめた。

$$Q_r = (T_{HB,out} - T_{in}) \rho_p c_p \cdot V_{duct} \quad \dots(1)$$

仙台では晴天日に集熱が行われ、予備集熱器で最大30℃程度まで、ガラス集熱器で最大70℃程度まで暖められ、床下空間に約30℃から50℃程度で吹き出していた。日中は集熱暖房により補助暖房なしで室温は25℃程度まで上昇した。深夜や明け方にはエアコンが運転し、室温を20℃以上に保っており、消費電力量は平均約3.0kWh/日であった。また主居室は約9割の時間帯でPMVが-0.5から0.5の間に収まっており、集熱暖房及びエアコンにより室内環境が安定して快適に保たれていた（図11）。なお、PMVの算出にあたってはmet値1.2、clo値1.0、風速0.1m/sとし、空気湿度は実測値を用い、MRTは実測値から面積加重平均周壁温度を算出した。

浜松でも同様に、集熱器により最大70℃程度まで集熱され30℃か

ら40℃程度で床下空間に吹き出していた。集熱暖房により室温は最大25℃程度まで上昇し、夜間・明け方のみエアコンが運転した。エアコンの消費電力量は平均2.1kWh/日程度であった。また居室床表面温度は居室温度とほぼ同じもしくはやや高めに推移し、床下空間を経由した暖房により室内の快適性の向上につながっていると考えられる。晴天が続いた日（2016年2月19日）には集熱暖房と開口部日射熱取得のみで暖房負荷を賄うことができ、エアコンは運転されなかった。浜松においても9割以上の時間帯においてPMVは-1から1の間であり、安定して快適な室内環境が形成された（図11）。

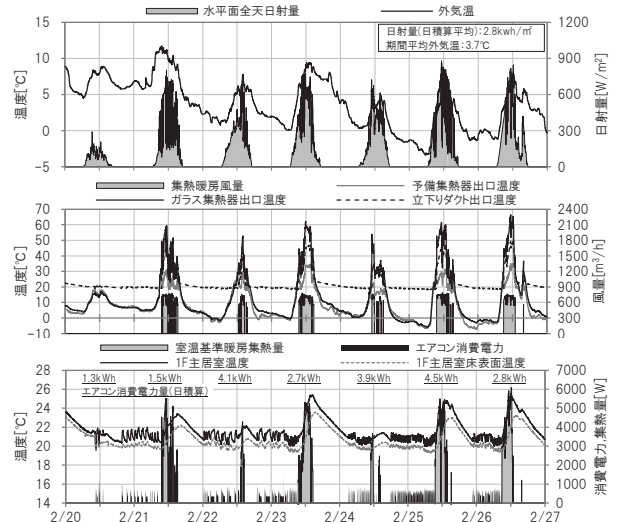


図9 気象条件と集熱・室温状況（仙台）

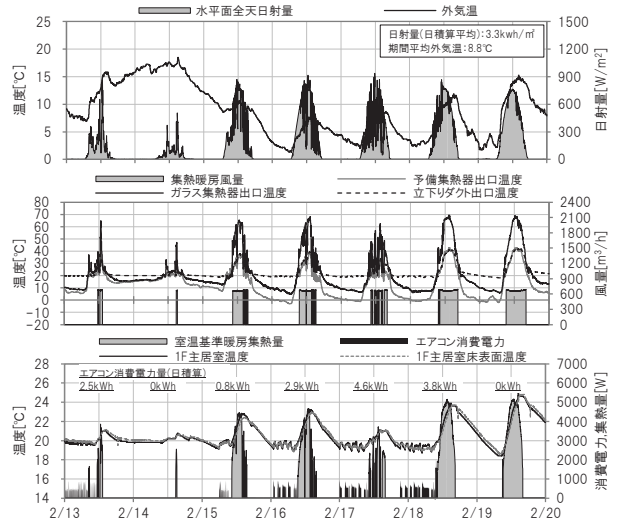


図10 気象条件と集熱・室温状況（浜松）

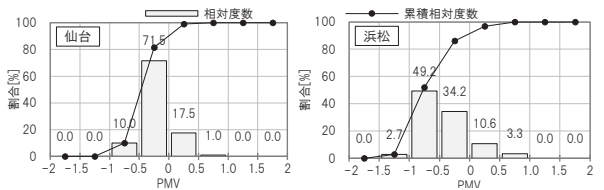


図11 実測期間中の主居室快適性（PMV）

4-3 床下蓄熱部吸放熱性能

仙台における床下蓄熱体の挙動を図12に示す。集熱暖房により9時頃からPBの温度が上がり、平均で25℃程度まで上昇した。集熱が停止した15時頃以降は床下空間温度よりも1~2℃程度高く推

移し、徐々に放熱することで床下空間の温度低下を抑制していることが分かる。特に立下りダクト近傍のPB温度は集熱停止時で床下空間温度よりも5℃程度、遠方のPBでも1℃程度高く、設置位置により温度の差はあるもののPB全体で集熱空気から吸熱していた。また基礎コンクリート中央部（立下りダクト付近）においても日中に吸熱し、集熱運転停止後に徐々に放熱している様子が確認された。一方、外周部（立下りダクト遠方、基礎床上断熱材非敷設部）では常に吸熱していた。さらに吸放熱のサイクルを勘案し、集熱運転の開始する9時から翌日の9時までを1日として各日の蓄熱体吸放熱量（PB: Q_{PET} , 基礎床: Q_{uf} , PCM: Q_{PCM} ）を式(2)~(4)により算出した。

$$Q_{PET} = (T_{PET,t+1} - T_{PET,t}) \rho_p c_p \cdot V_{duct} \quad \dots(2)$$

$$Q_{uf} = q_{uf} \cdot S_{uf} \quad \dots(3)$$

$$Q_{PCM} = (q_{PCM, bottom} - q_{PCM, upper}) \cdot S_{PCM} \quad \dots(4)$$

その結果を図13及び表3に示す。基礎においては基礎外周部での吸熱分が大きく、それらはこの期間内では放熱されず基礎の温度維持及び地中への損失となっていると推測される。基礎中央部は日平均で約3.7MJの吸熱があり吸放熱比は76.4%であった。付加蓄熱体であるPBは日平均で9.0MJ程度の放熱がありその吸放熱比は106%であった。基礎と比べてもその放熱量は大きく、PBが床下空間の蓄熱性能向上に寄与していることが分かる。なお集熱のなかった2月20日はほぼ放熱のみであり吸放熱比が大ききな値を示した。

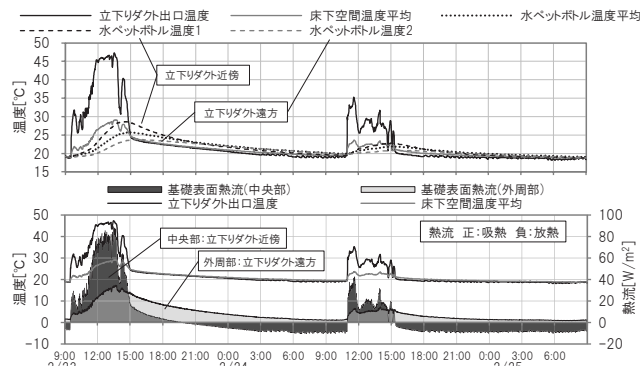


図12 床下蓄熱部 (PB・基礎) 挙動 (仙台)

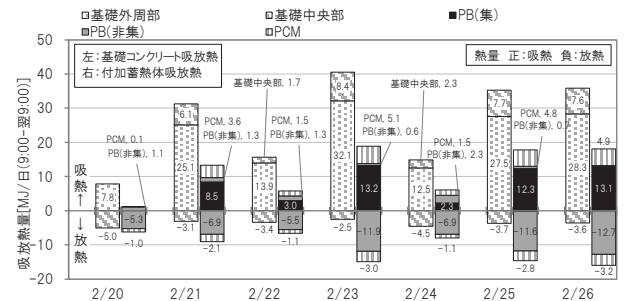


図13 床下蓄熱体の日積算吸放熱量 (仙台)

表3 蓄熱体吸放熱比 (仙台)

吸放熱比[%]	2/20	2/21	2/22	2/23	2/24	2/25	2/26	期間吸放熱比[%] (平均放熱量/平均吸熱量)
基礎(中央)	-	50.5	201.1	29.5	196.2	47.5	47.9	76.4%(3.7MJ/4.8MJ)
基礎(外周)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0%(0.0MJ/21.1MJ)
水ペットボトル	473.6	95.8	129.0	86.2	152.5	90.4	97.0	106.4%(9.0MJ/8.5MJ)
PCM	1213.7	58.5	73.8	59.4	69.9	58.3	64.8	66.4%(2.0MJ/3.1MJ)

4-4 冬期床下空間熱収支

仙台の冬期実測期間中の床下空間熱収支を図14に示す。なお床下基準暖房集熱量 Q_{under} 対流による床下空間から室内への供給熱

量 Q_{con} は式(5)(6)により算出した。また貫流による室内への供給熱量については計測している熱流計の計測値から算出した。

$$Q_{under} = (T_{HBout} - T_{uf}) \rho_p c_p \cdot V_{duct} \quad \dots(5)$$

$$Q_{con} = (T_{uf} - T_{inv}) \rho_p c_p \cdot V_{duct} \quad \dots(6)$$

実測期間中においては30.5MJ/日程度の熱量が床下に供給され、そのうちの約25%が室内に対流、貫流により供給された。残りの約75%は基礎・PB・PCMに蓄熱されており、集熱時吸熱分に対して基礎は約34%、PBは約121%が非集熱時(室内循環運転時)に放熱されていた。吸熱分の約30%は1日のサイクルでは放熱されておらず、蓄熱体の残蓄及び地中への損失となっていると考えられる。またPBの吸放熱比が100%を大きく上回っているのは集熱停止後にも床下空間の暖気から吸熱しているためである。

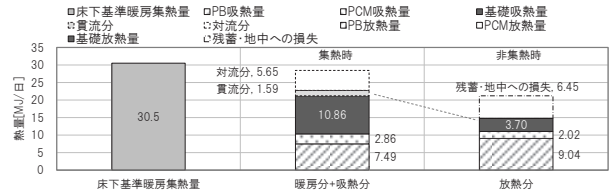


図14 床下空間熱収支 (仙台)

4-5 真空断熱建具による開口部夜間断熱強化

冬期の実測期間中は、日中は積極的な日射導入を行うために真空断熱建具を開け、18時頃から翌朝8時頃までは断熱強化のために閉じることで暖房負荷低減を意図した運用とした。ここでは開口部断熱強化がより求められる北海道での2016年2月11日の実測結果を図15に示す。真空断熱建具使用時、建具の室内側と窓の表面温度には最大15℃程度の差が見られ、建具使用による開口部の断熱強化、室内の放射環境改善への寄与が見られた。さらに実測値から式(7)(8)によりガラス、開口部全体の熱貫流率 K_g, K_{win} を算出した。なお算出には温度変化の小さい0時~6時までのデータを使用した。

$$K_g = q_g / (T_p - T_{in}) \quad \dots(7)$$

$$K_{win} = q_g / (T_{in} - T_{out}) \quad \dots(8)$$

ガラスのみの熱貫流率は1.60W/m²Kとなり、真空断熱建具を使用することで熱貫流率は0.73W/m²Kまで改善した。

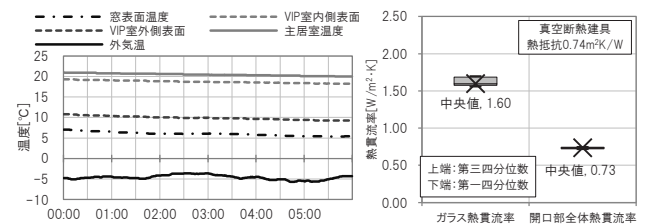


図15 真空断熱建具周辺温度 (左) と開口部熱貫流率 (右)

(2016年2月11日・北海道)

4-6 冬期居室熱収支

厳密かつ正確な熱収支の評価は実住宅における実測という性質上、困難であるが、本研究では太陽熱による暖房負荷削減効果を検討するため、実測期間における居室熱収支を概算した(注2)。貫流熱取得 Q_{st} 及び換気熱取得 Q_{lt} は式(9)(10)から、エアコン供給熱量は消費電力にCOP(暫定的に固定値3とした)を乗じて算出した。

$$Q_{st} = (T_{out} - T_{in}) \cdot U_A \cdot S_{bs} \quad \dots(9)$$

$$Q_{lt} = \alpha(0.5M((H_{out} - H_{in})\rho_p Y_y + (T_{out} - T_{in})\rho_p C_p))/3600 \quad \dots(10)$$

仙台の結果を図 16 に示す。これによれば約 200MJ/日の熱損失のうち、約 51MJ を集熱暖房、約 98MJ を開口部日射熱取得と、損失分の約 75% を太陽熱で賄うことができている。エアコンによる供給分は約 32MJ であった。なお、内部発熱には人体発熱を模擬した電球の他、計測器や家電等の消費電力が含まれている。

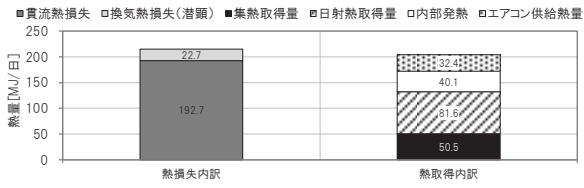


図 16 2016 年 2 月における居室熱収支 (仙台)

また同様に各物件の冬期実測期間平均の熱収支を図 17 に示す。実測期間の平均で太陽熱 (集熱取得・日射熱取得) により北海道では約 3 割、仙台では約 6 割、浜松では約 8 割、鹿児島では約 5 割 (注 3) であることから太陽熱により約 3~8 割の供給・取得熱を賄えており、エアコン供給熱量を削減できていることが分かる。

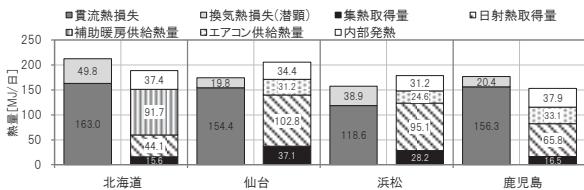


図 17 各物件の冬期における熱収支

5. 夏期実測

5-1 夏期実測概要

夏期は、各月に 1 週間程度の実測期間を設け実験を行った。冷房設定温度は 26 または 27℃ とし、浜松・鹿児島実証住宅では 2015 年 8,9 月に太陽熱除湿冷房を運転した。また模擬内部発熱の点灯、自動出湯、日射遮蔽物の操作を行った (表 4)。ここでは比較的冷房負荷が大きく、日射遮蔽及び太陽熱除湿冷房を搭載した浜松・鹿児島を中心に夏期の実測結果を示す。

表 4 夏期、中間期実測条件

	2015年					2016年	
	5月	6月	7月	8月	9月	5月	6月
集熱運転	北海道、仙台		給湯				給湯
	浜松以南	給湯		給湯+冷房			
冷暖房(設定温度)	冷房(27℃)		冷房(26℃)		暖房(20℃)	冷房(27℃)	
換気			ON				
真空断熱材建具	8時~18時開		常時開			8時~18時開	
日射遮蔽物			閉				開
模擬内部発熱		常時・100W電球4球点灯		常時・100W電球2球点灯			
給湯(自動出湯)/日			約450L・40℃			約450L・42℃	約450L・40℃

5-2 夏期室温実測状況

鹿児島及び浜松における 2015 年 8 月実測期間の実測結果を図 18、図 19 に示す。鹿児島では晴天日の日中で外気温が 30℃ を超える中、2F 居室に設置されているエアコン及び太陽熱除湿冷房 (吹き出し口は 2F) による室温制御が行われ、エアコンが設置されている 2F 居室温度は 25℃ 程度であった一方、1F 居室温度は 26℃ 程度を保ち、エアコンの消費電力量は平均で約 7.5kWh/日であった。

浜松でも同様に、晴天日の日中に外気温が 30℃ を超える中で、1F 主居室に設置されたエアコン及び太陽熱除湿冷房 (吹き出し口は 2F)

による室温制御で、1,2F 居室温度は 26~28℃ 程度を推移し、エアコンの消費電力量は平均で約 7.6kWh/日であった。また晴天日の室温挙動から、日射遮蔽物によりオーバーヒートが抑制され、室内快適性の向上に繋がっていると考えられる。

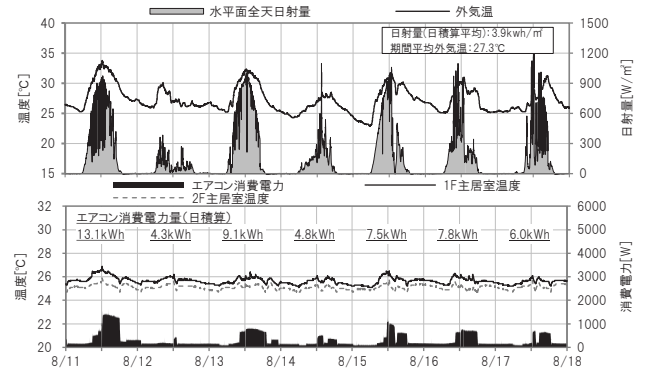


図 18 気象条件と室温状況 (鹿児島)

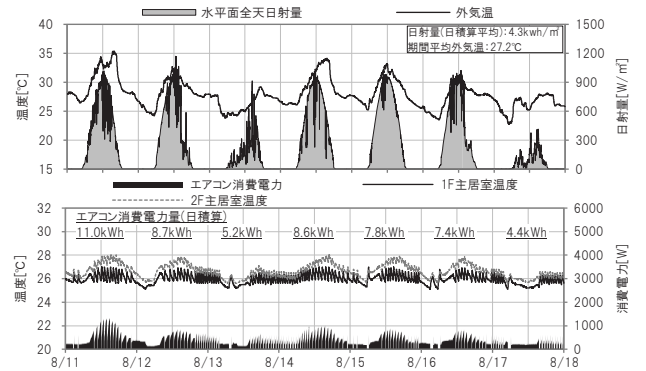


図 19 気象条件と室温状況 (浜松)

5-3 日射遮蔽物による冷房負荷削減効果

図 20 に 2015 年 9 月 10 日午前 10 時頃の鹿児島における日射遮蔽物 (外付け木製ルーバー) の有無による熱画像を示す。日射遮蔽物の有無により窓表面温度で約 3~5℃ の差があり、冷房負荷削減に寄与していると考えられる。また、2F 主居室室温は外気温と同程度だが、1F 主居室室温は外気温と比べ約 1~2℃ 低いことからオーバーヒート抑制・室内の快適性の向上にも寄与していると考えられる。

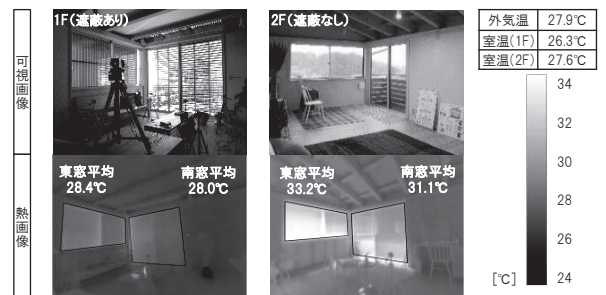


図 20 日射遮蔽物の有無による室内熱画像 (鹿児島)

5-4 太陽熱除湿冷房による冷房負荷削減効果

鹿児島において 2015 年 8 月の実測期間中、処理熱量が最も大きかった代表日 (2015 年 8 月 11 日) における太陽熱除湿冷房の挙動を図 21 に示す。日中、デシカントボックス及び気化冷却器により SA 温度は設定温度前後を推移しており、空気が除湿されていることから太陽熱除湿冷房の適切な運用がなされている。SA 絶対湿度のハ

ンチングは太陽熱除湿冷房の15分毎のバッチ制御による影響であり、小屋裏よりRAを吸い込んでいるため、RA温度は高く推移している(図21左図)。また、太陽熱除湿冷房のCOPは4~8程度(平均5.05)となっており、HBのファン動力の削減により、COPの更なる向上が期待される(図21右図)。なおCOPは太陽熱除湿冷房の処理熱量 Q_{stc} をSA・RAのエンタルピー差及び吹出し風量より算出した後、HBの消費電力で除して算出した(式(11)(12))。

$$Q_{stc} = (h_{RA} - h_{SA})\rho_p \cdot V_{stc} \quad \dots(11)$$

$$COP = Q_{stc}/P_{HB} \quad \dots(12)$$

また、実測期間における太陽熱除湿冷房処理熱量の日積算値及び時系列の推移を図22に示す。鹿児島では晴天日に集熱が行われ、太陽熱除湿冷房により最大70MJ/日程度の処理熱量を賄い、日平均で54.2MJであった。これにより期間を通して太陽熱除湿冷房による冷房負荷削減効果が確認された。

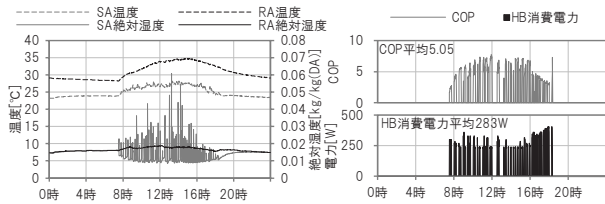


図21 太陽熱除湿冷房挙動(鹿児島 2015年8月11日)

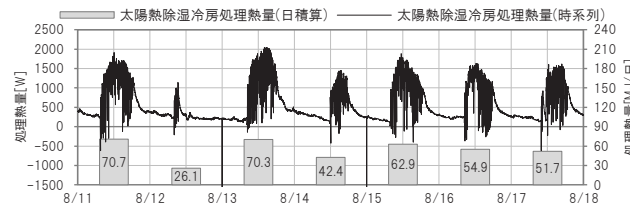


図22 太陽熱除湿冷房の日積算及び時系列処理熱量(鹿児島)

5-5 夏期居室熱収支

太陽熱除湿冷房稼働時(2015年8月)の太陽熱除湿冷房と日射遮蔽による冷房負荷削減効果を検討するため冬期と同様の方法により浜松・鹿児島島の居室熱収支を概算した(注2)。

その概算結果を図23に示す。両物件共に日射遮蔽物を設置することにより、取得熱全体の約3割を削減した。また、太陽熱除湿冷房により処理熱量のうち約1~4割を賄った。

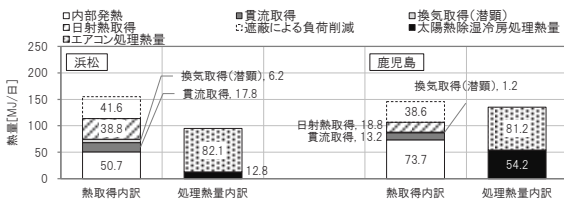


図23 2015年8月における居室熱収支(浜松・鹿児島)

6. 年間での性能評価

6-1 集熱面の集熱性能及び集熱分配

予備集熱器及びガラス集熱器の集熱量、集熱効率を図24に示す。各集熱量 Q 及び集熱効率 η_{col} は式(13)~(17)より算出した。

$$Q_{col,all} = (T_{col,out} - T_{col,in})\rho_p c_p \cdot V_{col} \quad \dots(13)$$

$$\eta_{col} = Q_{col}/I_{col} \quad \dots(14)$$

$$Q_{col,out} = (T_{HB,out} - T_{out})\rho_p c_p \cdot V_{duct} \quad \dots(15)$$

$$Q_{col,hw} = (T_{HBa,out} - T_{HBa,in})\rho_a c_a \cdot V_{anti} \quad \dots(16)$$

$$Q_{ex} = Q_{col,all} - Q_{col,out} - Q_{col,hw} \quad \dots(17)$$

予備集熱器(PVT)においては約14~20%の集熱効率であった。ガラス集熱器は、予備集熱器の半分から1/3程度の設置面積であるが同等以上を集熱できており、集熱効率は約23~34%と、より効率的に集熱できていることが分かる。

また各物件の集熱量及びその分配を図25に示す。全集熱量の分配先は、冬期では8割以上が暖房用途、中間期では暖房・給湯用途となっている。一方、夏期の浜松・鹿児島では集熱空気の一部が太陽熱除湿冷房の乾燥材(シリカゲル)の再生に用いられた。なお乾燥材の再生運転時の排気集熱量を太陽熱除湿冷房集熱量とした。

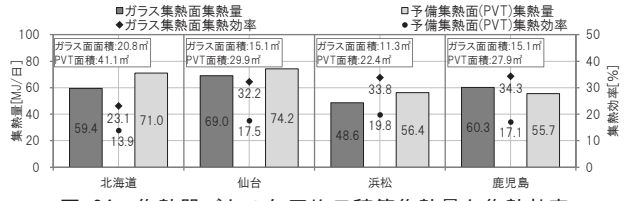


図24 集熱器ごとの年平均日積算集熱量と集熱効率

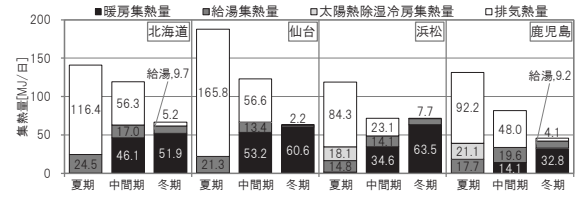


図25 季節ごとの集熱量と集熱分配

6-2 年間の給湯負荷削減効果

実測期間中は450L/日、40℃での自動出湯を行った。各物件の季節ごとの給湯負荷とその分担を図26に示す。給湯負荷 Q_{hw} 、太陽熱貯湯量 Q_{solar} 、給湯器沸き上げ量 Q_{heater} は式(18)~(20)で算出した。

$$Q_{hw} = \rho_w c_w V_{hw} \cdot (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad \dots(18)$$

$$Q_{solar} = \rho_a c_a V_{anti} \cdot (T_{a,in} - T_{a,out}) \quad \dots(19)$$

$$Q_{heater} = Q_{hw} - Q_{solar} \quad \dots(20)$$

夏期においては各物件とも給湯負荷の56~77%程度を太陽熱により貯湯できていた。冬期には集熱量の減少及び暖房負荷の発生により給湯負荷のうち太陽熱分担率が下がるものの、4~28%程度を太陽熱により賄っていた。また年間では北海道32%、仙台27%、浜松33%、鹿児島56%の給湯負荷を太陽熱により賄った。

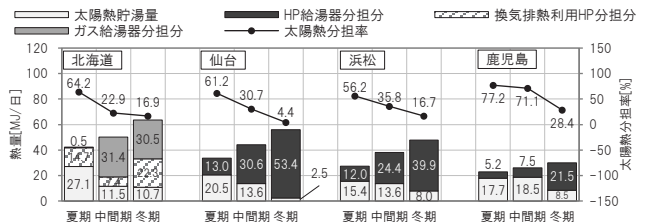


図26 季節ごとの給湯負荷分担内訳

6-3 発電・消費エネルギー

図27に各物件の発電量と消費エネルギー量(1次エネルギー)を示す(注4)。なお、その他には計測器や家電等の消費電力量が該当するが、人体発熱模擬用の電球分は除外している。

暖房負荷の大きい北海道の冬期や、冷房負荷の大きい浜松など以外では、概ね発電量が消費エネルギーを上回っていることがわかる。なお、北海道・鹿児島島の冬期については、センサー位置と制御の問題

により暖房が過剰に運転してしまっているため暖房消費エネルギーが過大になっている。また仙台・浜松では、暖房消費エネルギーが小さく、実測期間内においては無暖房化の可能性が示された。

さらに、省エネ基準のWEBプログラム²⁵⁾を用いて、年間消費エネルギー(基準値及び設計値)を算出し、暖冷房・給湯エネルギーについて実測値との比較を行った(図28)。なお、設計値については(注5)の設定とし、太陽熱利用を行わない条件で計算を行った。また実測値は、各月ごとに実測期間の日平均値を月の日数倍しそれらを年積算することで算出した。設計値と比較しても太陽熱により鹿児島は約25%、浜松以北の物件では約75%の削減が実現できており、全国における本システムの有用性が示された。

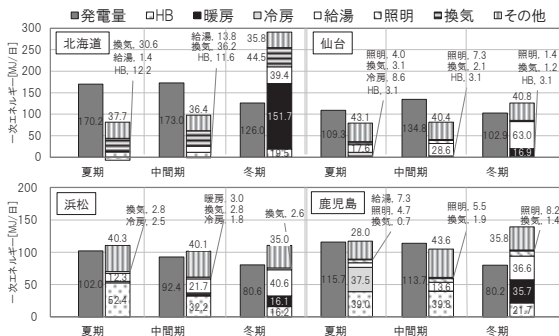


図27 各物件の発電量と消費エネルギー(1次エネルギー)

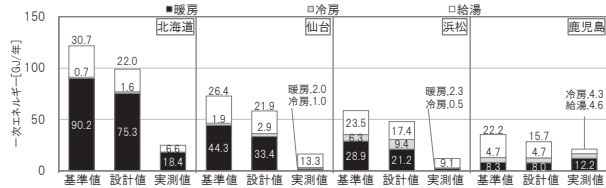


図28 各物件の年間消費エネルギーの基準値と実測値の比較

7. まとめ

本研究では、太陽エネルギー利用による暖冷房、給湯消費エネルギーの削減を目的として全国の実証住宅において年間実測を実施しその結果を報告した。主な知見を以下に示す。

- ・全物件で年間発電量が家電等を除いた消費分を上回り,ZEHを達成した。また太陽熱利用と要素技術の適用により省エネ基準の年間消費エネルギー(設計値)と比較して暖冷房、給湯消費エネルギーを大幅に削減し、全国における本システムの有用性が示された。
- ・予備集熱器(PVT)の集熱効率率は14~20%程度、ガラス集熱器は約23~34%であり、集熱性能向上による集熱量の増大が見られた。
- ・冬期においては貫流及び換気による熱損失のうち、約27~76%を開口部日射熱取得及び集熱取得により賄うことができ、補助暖房の運転を削減することができた。また温暖地(浜松)では太陽熱利用により8割程度の暖房エネルギー削減ができた。
- ・集熱分の給湯利用により、年間の給湯負荷のうち約27~56%を太陽熱により賄うことができ負荷削減に寄与した。
- ・冬期において集熱暖房及び補助暖房により概ね20℃以上を保ち、主居室PMVはほぼ全時間帯で1~1であり、安定して快適な室内環境が実現していた。
- ・水入りペットボトルが集熱暖房分を吸熱し非集熱時に徐々に放熱することで床下空間温度の低下を抑制した。また水入りペットボトルは日平均で9.0MJ程度を放熱(吸放熱比は106%)し、本

システムの蓄熱性能向上に有効であることが示された。

- ・集熱時床下供給熱量のうち約25%が対流、貫流により室内に供給され、残りの約75%は基礎・PB・PCMに蓄熱された。
 - ・真空断熱建具使用により開口部の夜間の熱貫流率は大きく減少し、また室内の放射環境改善への寄与が見られた。
 - ・窓面外部側に適切な日射遮蔽物を設置することにより、夏期における取得熱全体の約3~4割を削減した。
 - ・鹿児島実証住宅において太陽熱除湿冷房により平均54.2MJ/日の熱量を処理し、代表日におけるCOPは5.05であった。
- 今後は熱負荷計算やエネルギーシミュレーションモデルの検討を行い、実測結果との整合性を検証したうえで、各地域において本システムに関わる各要素技術の省エネルギー・快適性向上効果について、より定量的に示すことが課題といえる。

謝辞

本研究は平成26~27年度NEDO太陽熱フル活用型住宅の地域適合理化に関する研究開発(実施者:OMソーラー株式会社,小松建設株式会社,サイト工業株式会社,OM建築工房株式会社,山佐産業株式会社,株式会社アイムホーム。委託先:東京大学,東京理科大学)により実施したものである。また本研究の実施に際し、宇田川光弘名誉教授(工学院大学),二宮秀典教授(鹿児島大学),堤純一郎教授(琉球大学)に多大な助言をいただきました。その他、計画段階より竹内玄様をはじめとしたOMソーラー(株)の方々及び北瀧寛史様をはじめとした東京大学前研究室のメンバーにご協力いただきました。ここに記して関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー対策課:ZEHロードマップ検討委員会 とりまとめ, 参照2016.10.6 <http://www.meti.go.jp/press/2015/12/20151217003/20151217003-1.pdf>
- 2) 経済産業省 省エネルギー庁:ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス支援事業調査発表会2015, 参照2016.10.6 https://sii.or.jp/zeh26r/file/doc_1124.pdf
- 3) 木村建一, 宇田川光弘, 他:太陽熱暖房の実効性を中心とした建築気候図, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.385-386, 1975.10
- 4) 木村建一:ソーラーハウスKSHの運転実績について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.429-430, 1974.10
- 5) 田中俊六, 栗原潤一:流下式集熱器の性能について, 空気調和・衛生工学会論文集, No.7, pp.103-111, 1978.6
- 6) 田中俊六:太陽熱冷暖房システム,オーム社,1977年
- 7) 中村健児, 渡辺俊行, 他:太陽熱利用空気集熱式床暖房住宅の設計指針, 日本建築学会計画系論文集, 第516号, pp.31-38, 1999.2
- 8) 成哲俊, 須永修通, 他:水蓄放熱床をもつ太陽熱床暖房システムに関する実験研究, 日本建築学会環境系論文集, 第572号, pp.39-45, 2003.10
- 9) 成哲俊, 須永修通, 他:水蓄放熱床をもつ太陽熱床暖房システムの性能に及ぼす建物構成要素の影響に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第587号, pp.23-28, 2005.1
- 10) 森山実記, 中村安弘, 他:太陽熱利用住宅におけるベタ基礎を利用した蓄熱コンクリートの蓄放熱特性, 空気調和・衛生工学会論文集, No.167, 2011.2
- 11) 赤嶺嘉彦, 桑沢保夫, 他:空気集熱式ソーラーシステムの省エネルギー効果の評価に関する研究 第3報 基礎コンクリートスラブにおける蓄放熱量に関する計測結果, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2012.09
- 12) 新太陽エネルギー利用ハンドブック編集委員会:新太陽エネルギー利用ハンドブック, 日本太陽エネルギー学会, 2010
- 13) 崔榮晋, 小原克哉, 他:実験棟における冬季の床下吸放熱特性の評価 空気式太陽熱集熱を利用した住宅のシステム性能改善に関する研究 その1, 日本建築学会環境系論文集, 第79巻, 第697号, pp.271-280, 2014.3
- 14) 高瀬幸造, 崔榮晋, 他:戸建住宅における空気式太陽熱集熱システムの性

能向上に関する研究 その2 シミュレーションによる性能改善効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.641-642, 2014.10

- 15) 寺崎恒正, 寺崎和郎 共編: 世界のソーラー建築実例集, 森北出版株式会社, 1977
- 16) S.M. Bambrook, A.B. Sproul: Maximising the energy output of a PVT air system, Solar Energy, 86, pp.1857-1871, 2012.4
- 17) Yuxiang Chen, A. K. Ahienitis, et al.: Modeling, design and thermal performance of a BIPV/T system thermally coupled with a ventilated concrete slab in a low energy solar house: Part 1, BIPV/T system and house energy concept, Solar Energy, 84, pp.1892-1907, 2010.8
- 18) Raghad S. Kamel, Alan S. Fung: Modeling, simulation and feasibility analysis of residential BIPV/T+ASHP system in cold climate - Canada, Energy and Buildings, 82, pp.758-770, 2014.8
- 19) 平成 25 年住宅・建築物の省エネルギー基準解説書編集委員会: 平成 25 年省エネルギー基準に準拠した算定・判断の方法及び解説 II住宅, 建築環境・省エネルギー機構, 2013
- 20) 盧炫佑, 崔榮晋, 他: 空気式太陽熱集熱システムを採用した実証住宅に関する研究 その1 全体のシステム構成と各地に計画・建設された実証住宅5件の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.485-486, 2015.9
- 21) 森田舟哉, 井上隆, 他: 空気式太陽熱集熱システムを採用した実証住宅に関する研究 その2 CFD解析による床下蓄熱方式の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.487-488, 2015.9
- 22) 北瀨寛史, 森田舟哉, 他: 空気式太陽熱集熱システムを採用した実証住宅に関する研究 その3 光シミュレーションを用いた日射制御の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.489-490, 2015.9
- 23) 崔榮晋, 深野木託, 他: 空気式太陽熱集熱システムを採用した実証住宅に関する研究 その4 年間負荷計算による性能改善効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.491-492, 2015.9
- 24) 深野木託, 崔榮晋, 他: 空気式太陽熱集熱システムを採用した実証住宅に関する研究 その5 浜松実証住宅における実測概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.493-494, 2015.9
- 25) 国立研究開発法人建築研究所 住宅・住戸の省エネルギー性能の判定プログラム Ver.1.15.3 参照 2016.9.29 <http://house.classic.lowenergy.jp/>

注

注1) 本報で用いた式中の記号を以下に示す。

計測値			計算値		
記号	単位	名称	記号	単位	名称
T_{out}	°C	外気温	T_{in}	°C	室温の体積加重平均値
T_{in}	°C	主居室室温	Q_{total}	W	全熱熱量
T_{in}	°C	床下空間温度	Q_{heat}	W	集熱器熱熱量
T_{in}	°C	密-VF間空気温度	Q_{out}	W	外気基準暖房熱熱量
$T_{FEI,T}$	°C	水ベントル内部温度	Q_{in}	W	室温基準暖房熱熱量
T_{Hout}	°C	ハンドリングボックス出口温度	Q_{out}	W	床下基準暖房熱熱量
$T_{outlet,Toutlet}$	°C	集熱器出入口温度	Q_{out}	W	給湯熱熱量
T_{outlet}	°C	貯湯槽出口水温度(出湯温度)	Q_{ex}	W	排気熱熱量
T_{inlet}	°C	貯湯槽入口水温度(市水温度)	Q_{in}	W	対流による室内への供給熱熱量
$T_{outlet,Tin}$	°C	貯湯槽出入口不凍液温度	Q_{out}	W	太陽熱除冷処理熱熱量
$T_{Hout,Toutlet}$	°C	ヒート交換器出入口不凍液温度	Q_{ex}	W	貫流熱取得(損失)
H_{ex}	kg/kg	外気絶対湿度	Q_{ex}	W	換気熱取得(損失)
H_{in}	kg/kg	居室絶対湿度	Q_{ex}	W	基礎放熱熱
q_{ex}	W/m ²	窓表面熱流	Q_{FEI}	W	水ベントル-ル吸放熱熱
q_{ex}	W/m ²	基礎表面熱流	Q_{PCM}	W	PCM吸放熱熱
$Q_{PCM,upper},Q_{PCM,bottom}$	W/m ²	PCM上下表面熱流	Q_{water}	W	給湯負荷
V_{air}	m ³ /s	集熱風量	Q_{water}	W	太陽熱貯湯量
V_{out}	m ³ /s	立下り外気風量	Q_{water}	W	給湯器湯き上げ量
V_{acc}	m ³ /s	太陽熱冷房吹き出し風量	η_{air}	%	集熱器集熱効率
V_{ex}	m ³ /s	熱交換器不凍液流量	α	%	全熱交換効率
V_{water}	m ³ /s	出湯流量	$h_{24}h_{24}$	J/kg(DA)	太陽熱冷房RA.SAエンタルピー
P_{SB}	W	ハンドリングボックス消費電力	K_g	W/m ² -K	窓ガラス熱貫流率
J_{air}	W	集熱器熱熱面日射量	K_{win}	W/m ² -K	開口部全体熱貫流率
設計値			文献値		
U_a	W/m ² -K	外皮平均熱貫流率	c_p	J/kg-K	空気比熱
S_{ex}	m ²	外皮等面積	c_w	J/kg-K	水比熱
M	m ³	居室気積	c_a	J/kg-K	不凍液比熱
V_{water}	m ³	水ベントル総容量	ρ_a	kg/m ³	空気密度
S_{air}	m ²	基礎床蓄熱面積(断熱材非敷設部)	ρ_w	kg/m ³	水密度
S_{PCM}	m ²	PCM敷設面積	ρ_{ex}	kg/m ³	不凍液密度
			γ_w	J/kg	水の蒸発潜熱

注2) 冬期及び夏期の居室熱収支を把握するため,実測値の他,シミュレーション値と概算値を利用したため,必ずしも熱損失と熱取得(もしくは熱取得と処理熱量)がつりあわない状況と3DモデリングツールのRhinceros+Grasshopper上で動作するHoneybee(Radianceをエンジンとした光シミュレーションDAYSIMのインターフェイス)により算出した。また換気

- 熱取得 Q_{in} に関しては換気量(m³/h)を住戸気積の0.5回分とし算出した。
- 注3) 鹿児島実証住宅は天候不順に加え,敷地周辺状況(敷地南側の住宅,西側の切り立った崖による日陰が生じたこと)が原因で集熱取得及び日射熱取得量が少なかったと考えられる。
- 注4) 電力の一次エネルギー換算係数は9760kJ/kWhとし,プロパンガスは熱量99MJ/m³として算出した。
- 注5) WEBプログラムの設定は以下に示す通りである。

設定項目	北海道	仙台	浜松	鹿児島
合計床面積[m ²]	122.0	106.0	102.5	112.6
土たる層厚[m]	90.0	47.6	72.0	31.5
その他の層厚[m]	3.0	38.1	6.0	43.1
非居室[m ²]	29.0	20.3	24.5	38.1
省エネルギー基準地区区分	2	4	6	7
年間日射地域区分	A2	A2	A5	A4
外皮				
g値[W/K]	88.1	137.9	152.6	172.7
m ₀ 値	6.64	6.43	7.69	3.76
m ₁₀ 値	5.08	6.15	6.98	3.8
通風の利用		しない		
蓄熱の利用		しない		
床下空間を経由して外気を導入する換気方式の採用			しない	
暖房設備				
主たる居室への設置	ファンコンベクター		ルームエアコンディショナー	
エネルギー消費効率の区分	-	(は)	(い)	(い)
容量可変型コンプレッサーの搭載	-		しない	
その他の居室への設置			しない	
温水暖房	給湯・温水暖房一体型		-	
断熱配管の採用			する	
配管が通過する空間			全て断熱区間内	
冷房設備				
主たる居室への設置	しない		ルームエアコンディショナー	
エネルギー消費効率の区分	-	(は)	(い)	(い)
容量可変型コンプレッサーの搭載	-		しない	
その他の居室への設置			しない	
換気				
換気設備の方式		ダクト式第二種またはダクト式第三種換気設備		
比消費電力[W/(m ³ /h)]	0.43	0.43	0.37	0.51
換気回数[回/h]	0.5	0.5	0.5	0.5
熱交換型換気設備の採用			しない	
給湯				
熱源機の種類	給湯・温水暖房一体型		給湯専用型	
熱源機の種類	ガス潜熱回収型給湯温水暖房機		電気ヒートポンプ給湯機(CO2冷媒)	
JIS効率[-]	-	2.5	2.5	2.5
JIS効率(暖房部)[%]	87			
JIS効率(給湯部)[%]	86.6			
風呂機能の種類			ふる給湯機(追焚なし)	
配管方式			ヘッダー方式	
ヘッダー分岐後の配管径			ヘッダー方式分岐後のすべての配管径が13A以下	
台所水栓			2バルブ水栓以外のその他の水栓	
			手元止水機能採用する	
			水優先吐水機能採用する	
浴室シャワー水栓			2バルブ水栓以外のその他の水栓	
			手元止水機能採用する	
			小流量止水機能採用する	
洗面水栓			2バルブ水栓以外のその他の水栓	
			水優先吐水機能採用する	
浴槽の保温措置			高断熱浴槽を使用する	
太陽熱利用給湯設備の採用			しない	
照明				
主たる居室への設置			する	
白熱灯の使用			すべての機器において白熱灯を使用していない	
一灯分散照度方式の採用			しない	
調光が可能な制御の採用			しない	
その他の居室への設置			する	
白熱灯の使用			すべての機器において白熱灯を使用していない	
調光が可能な制御の採用			しない	
非居室への設置			する	
白熱灯の使用			すべての機器において白熱灯を使用していない	
調光が可能な制御の採用			しない	
発電				
太陽光発電の採用			する	
方位の異なるパネル			1面	
太陽電池アレイのシステム容量[kW]	5.5	4	3	3.58
太陽電池アレイの種類			結晶シリコン系以外の太陽電池	
太陽電池アレイ設置方式			屋根置き形	
パネル設置方位角	真南から西へ15度以上45度未満	真南から東および西へ15度未満	真南から東および西へ15度未満	真南から東へ15度以上45度未満
パネル設置傾斜角度	30	30	30	30
パワーコンディショナーの定格負荷効率[%]	96	96	96	96
コージェネレーションの種類			なし	

注6) 本実測で設定した各月の実測期間は以下の表の通りである。

	北海道	仙台	浜松	鹿児島
2015	-	-	5/16-5/22	-
	-	-	6/13-6/19	-
	7/11-7/17	7/20-7/26	7/21-7/27	7/11-7/17
	8/10-8/16	8/17-8/23	8/11-8/17	8/11-8/17
	9/8-9/14	9/15-9/21	9/8-9/14	9/8-9/14
	10/9-10/15	10/9-10/15	10/9-10/15	10/9-10/15
2016	11/14-11/20	11/14-11/20	11/14-11/20	11/14-11/20
	12/12-12/18	12/19-12/25	12/12-12/18	12/19-12/25
	1/23-1/29	1/23-1/29	1/23-1/29	1/23-1/29
	2/13-2/19	2/20-2/26	2/13-2/19	2/13-2/19
	3/7-3/13	3/7-3/13	3/7-3/13	3/7-3/13
	4/11-4/15	4/11-4/15	4/11-4/15	4/11-4/15
2017	5/16-5/20	5/16-5/20	-	5/16-5/20
	6/13-6/17	6/13-6/17	-	6/13-6/17
	-	7/4-7/8	-	-
	-	8/4-8/8	-	-

PERFORMANCE EVALUATION OF FIVE CUSTOMIZED MODEL HOUSES IN JAPAN BY ANNUAL MEASUREMENTS

Improving the performance of air-based solar system in detached houses
via maximum utilization of available solar energy, Part 1

Tatsuya KARUBE^{*1}, *Shuya MORITA*^{*2}, *Kozo TAKASE*^{*3},
Youngjin CHOI^{*4}, *Tomohiro YAMAMOTO*^{*2}, *Hideaki YOSHIDA*^{*2},
Masayuki MAE^{*5}, *Takashi INOUE*^{*6} and *Hyunwoo ROH*^{*7}

^{*1} Grad. Student, Dept. of Architecture, the Univ. of Tokyo

^{*2} Grad. Student, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science

^{*3} Assist. Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

^{*4} Project Researcher, Dept. of Architecture, the Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

^{*5} Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., the Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

^{*6} Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Tokyo Univ. of Science, Dr. Eng.

^{*7} Director, R&D Department, OM Solar Inc., Dr. Eng.

After the Great East Japan Earthquake in 2011, the energy-saving and utilizing renewable energy has been a growing issue in Japan. In houses, the energy consumption mainly goes for hot water supply, space heating and other equipment. Therefore, in housing sector, solar energy seems to be the most useful renewable energy because it can be used for both; to generate electricity and provide heating.

In this paper, we planned five model houses with air-based solar system for each climate zone defined by Japanese energy-saving standard and later evaluate their annual performances by measurement. To improve the thermal comfort and reduce energy use, the insulation level was raised beyond the Japanese energy-standard levels. In addition, we adopted some energy-saving techniques e.g. using bottled water as heat storage medium. The annual measurements showed excellent improvements in the energy-saving performance of each house compared with the energy-saving standard model in Japan.

We adopted some techniques to improve air-based solar system. For winter, we adopted: an internal protection enclosure of a Vacuum Insulation Panel (VIP) to reduce the heat loss through window during night, a heat storage medium is achieved by having water bottles and phase change material sheets under the suspended floor. Solar shading strategies were adopted in summer e.g. eaves, movable outer blinds and louvers to reduce the cooling load.

Through the annual measurements, we evaluated these techniques together with the air-based solar system, the results are as below:

- 1) Firstly, it is to confirm the excellent energy-saving performance of all the houses when compared with the energy-saving standard models in Japan.
- 2) In all houses, the efficiency of the air-based collectors are about 14 to 20% for the pre-heating photovoltaic panels, and from 23 to 34% for the glass panels.
- 3) The energy-saving from the solar system hot water supply differs from one location to another and also vary during seasons. In general, about 27 to 56% of the annual energy used for water heating could be saved.
- 4) In Hamamatsu and Sendai, the indoor thermal comfort was achieved during all the winter days with minor operation of air-conditioning.
- 5) The effect of heat storage media of water bottles and the phase change material sheets were evaluated. In the daytime, the hot air from the solar system is usually stored in these media (located under the suspended floor). In the cases when there is no solar energy or if it is not enough collected, the previously stored thermal energy is then released to the internal space.
- 6) The thermal insulation performance of VIP inner window enclosure was evaluated. In Hokkaido, heat loss through the triple-glass window is reduced to the half when VIP is closed.
- 7) The performance of solar shading strategies and the air-based solar cooling system were evaluated in summer. For houses in Hamamatsu and Kagoshima, the shading strategies and the solar cooling system decreased the cooling load by about 50% compared to the houses without these systems.

(2016年10月10日原稿受理, 2017年6月16日採用決定)