

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

第1報 実証住宅5件の概要及びCFD解析による床下蓄熱方式の検討

A Study of Demonstration Houses with Air-Based Solar System

Part1. Specification of Five Demonstration Houses and CFD Analysis of Underfloor Heat Storage Method

学生会員	○森田 舟哉 (東京理科大学)	技術フェロー	井上 隆 (東京理科大学)
正会員	前 真之 (東京大学)	正会員	高瀬 幸造 (東京理科大学)
正会員	崔 榮晋 (東京大学)	学生会員	深野 木 託 (東京大学)
学生会員	軽部 達也 (東京大学)	正会員	盧 炫佑 (OMソーラー)

Shuya MORITA*¹ Takashi INOUE*¹ Masayuki MAE*² Kozo TAKASE*¹

Youngjin CHOI*² Taku Fukanoki*² Tatsuya KARUBE*² Hyunwoo ROH*³

*¹ Tokyo University of Science *² The University of Tokyo *³ OM Solar

We analyze and measure five demonstration houses with air-based solar system. In this paper, we introduced specification of five demonstration houses at first. Then we performed CFD analysis of underfloor heat storage method for the improvement of system performance. Moreover, we calculated convective heat transfer coefficient of additional thermal mass (Water in PET bottles) for thermal load calculation.

1. はじめに

本研究では、外部気象条件の多様な全国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・建設を行っている空気式太陽熱集熱システム（以下、本システム）を用いた実証住宅を対象とする。ここでは、従来型仕様の本システムを採用した場合と比較した際、暖房・給湯・冷房消費エネルギーの半減を実証することを目標としている。既往研究¹⁾にて検討した性能向上に関する検討内容を考慮し、高効率ガラス集熱器を採用したうえ、集熱量及び暖房負荷に応じて床下付加蓄熱材（水入りペットボトル）を適宜設置するシステムを基本としている（図1）。これに加えて本研究で対象とした実証住宅では、真空断熱材を内蔵した夜間断熱補強用室内建具、床裏等への潜熱蓄熱体含有建材（以下、PCM建材）の設置を行うことで、本システムの性能向上を図っている（図2）。また、温暖地以南の3件では、本システムにバッチ式太陽熱利用デシカント冷房機能を追加したものを採用し、太陽熱を使用した冷房消費エネルギー削減可能性についても検証を行う。

2. 設計段階のシミュレーション検討と建物仕様の決定

本研究で検討対象とした実証住宅は2014年4月より設計検討を開始し、次以降で示す内容について検証した。まず、本システムの性能向上にとって肝要となる床下空間での温風の吹き出し方式の検討や床下空間における付加蓄熱材の設置方法について検討を行った。また、外壁面の日射解析による冷房負荷低減のための外付けルーバーの

検討を実施した。そして、これらのシミュレーション結果を反映し、さらに給湯・暖冷房を連成した熱負荷計算を行った結果を鑑みて、各実証住宅の断熱や蓄熱体設置に関する仕様を決定した。表1に各実証住宅の建物・建築の概要を示す。

本報では、CFDを用いた付加蓄熱材設置による床下蓄熱の検討結果（伊達、仙台、浜松）を報告する。

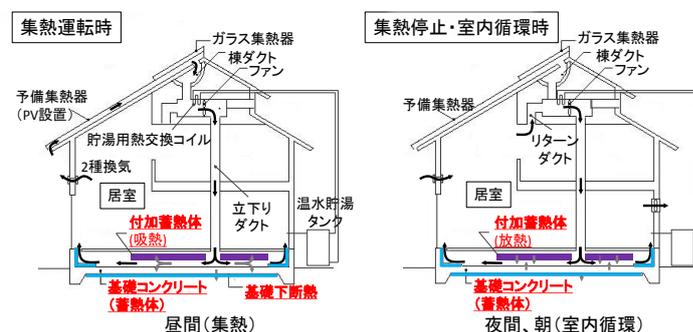


図1 本システムの概要(冬期)

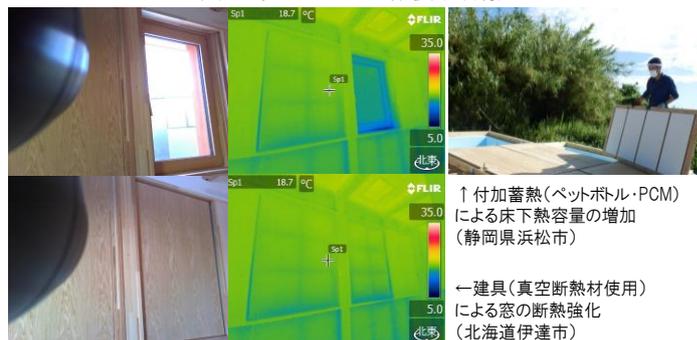


図2 夜間断熱補強用室内建具とPCM建材施工状況

表1 各実証住宅の建物概要

	省エネ地域区分	伊達	仙台	浜松	鹿児島	沖縄
		2地域	4地域	6地域	7地域	8地域
気候条件	冬期日射量区分	H3	H2	H4	H2	定義なし
	年間日射量区分	A2	A2	A5	A4	A4
	年間日平均	2969.3	3347.4	4133	3910.3	3933
	全天日射量[Wh/m ²] 冬期日平均	2660.1	3143.4	3422	2908.4	2721.6
	暖房期間	10月1日～6月18日	10月5日～5月26日	11月17日～4月16日	12月18日～3月14日	1月1日～3月5日
建物条件	延床面積	106.4	106	79	117.6	237.3
	開口部面積 (うち南面開口面積)	24.0 (9.8)	51.8 (31.0)	29.6 (12.6)	46.8 (17.5)	42.5 (11.3)
	外皮等面積合計	288.7	283.32	253.5	315	599.3
	q値	71.8	127	128.7	192.8	815.1
熱性能	Ua値	0.25(0.46)	0.46(0.75)	0.51(0.87)	0.62(0.87)	1.37(-)
	nc	1.8(-)	3.3(-)	2.7(2.8)	1.2(2.7)	2.3(3.2)
	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
部位ごとの 断熱仕様・構成	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 付加:A種押出法ポリスチレン2種 t=30	充填:セルローズファイバー-55K t=105		A種押出法ポリスチレン 1種 t=25
	主な窓 (U値)	木製サッシ+Low-EトリプルAr封入ガラス	木製サッシ+真空ガラス	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	木製断熱積層構造	木製断熱積層構造	木製断熱積層構造	木製断熱積層構造	未定
太陽熱利用 システム 採用状況	予備集熱面 (PVパネル)面積[m ²]	38.4	20.9	34.5	27.9	24.4
	ガラス集熱面面積[m ²]	22.8	9.4	11.5	10.7	9.4
	太陽熱暖房・給湯	○	○	○	○	○
	太陽熱冷房	○	○	○	○	○
補助暖冷房機	壁面温水パネル 加温ボックス (立下りダクト内)	エアコン1台 (1階)	エアコン1台 (1階)	エアコン2台 (1,2階に各一台)	未定	
給湯器	潜熱回収型ガス給湯器 ダクト式第3種換気	壁付式第1種換気	壁付式第3種換気	壁付式第1種換気	未定	
換気システム(非集熱時)						
夜間断熱用 真空断熱材使用建具	○	○	○	○	○	
付加蓄熱材	○ 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床裏に施工 厚さ4.8mm, 潜熱量9MJ	1F床裏に施工 厚さ9mm, 潜熱量10MJ	1F床裏・天井に施工 厚さ4.8mm, 潜熱量14MJ	1F床裏に施工 厚さ9mm, 潜熱量10MJ	潜熱量7MJを採用予定	

※ 伊達・仙台・浜松・鹿児島については各物件が竣工してから、2014年12月から2015年3月にかけて順次計測を開始している。沖縄については2015年4月現在、施工中。

※ 伊達・浜松では相変化温度約25℃、仙台・鹿児島では相変化温度約30℃のPCMを採用した。

※ この4物件では、PCM含有マイクロカプセルを含んだシート状のPCM建材となっている。

※ 沖縄では相変化温度約26.3℃のPCMを用い、裏面を切り欠き、PCM入りアルミバックを充填したフローリング建材を用いる予定である。

3. 竣工後における実測データ分析

また2014年12月以降、竣工後に得られた実測データについて分析を行っている。実測では各実証住宅にて、140点程度の計測を行っている。計測項目の概要については、図3に示す通りである。また時々刻々と変動しやすい日射量についても適切に評価するため、本システムの運転状況の把握にとって重要な計測ポイントについては10秒間隔で、室温等の比較の変動が小さいものについては1分間隔で計測している。第3報では、2015年3月、4月に行った、沖縄を除く4物件の本システムのみ運転時の自然室温と実運用を想定した補助暖房等を併用した際の実測結果について報告する。

4. CFDを用いた蓄熱検討

本検討は、既製システムの吸放熱の改善のため、床下吹き出し方式検討および床下空間に水入りペットボトルを用いた付加蓄熱材の検討をCFD(解析にあたっては汎用ソフトのFlowDesignerを使用)にて行い、最大限に集熱量を活用できる仕様の決定を目的とする。

既往研究²⁾で別途建設した実験棟における実験データについて、CFD解析ではより概ね良好な再現結果を得られたため、本研究では、この手法を用いて床下空間に付加蓄熱材を設置予定である伊達、仙台、浜松を対象としたシステム設計検討を行った。

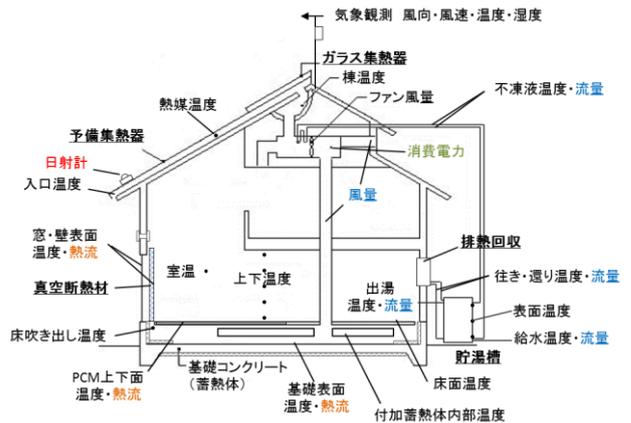


図3 各実証住宅における計測箇所の概要

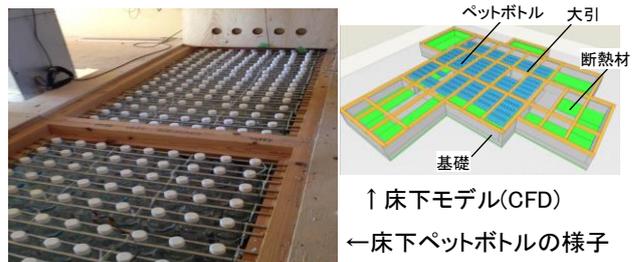


図4 床下ペットボトルの様子及びシミュレーションモデル

そこで本報ではより詳細に検討を行った浜松を中心に報告する。図4に床下に設置されるペットボトルの様子とシミュレーションで用いたモデルを示す。

4.1 浜松における付加蓄熱材の検討

本検討では基礎及び付加蓄熱材の吸放熱量の比較を行うため床下空間のみ再現している。

4.2 検討モデル、条件および計算方法

図5に検討フロー、表2に本検討の解析条件を示す。検討種類は床下吹き出し方式検討、配置検討、容量検討、容器検討の4種の検討を行った。床吹き出し方式検討では初期設計モデルに加え、北側の基礎に温風を当てるダクト短モデル、床下中央部までダクトを引っ張り分岐させる2方向吹き出しモデルの3モデルにおいて検討を進めた(図6)。配置検討の概要は図7に示す。

床吹き出し方式検討、配置検討は2L水入りペットボトルを1000L床下に設置し、容器検討で用いる水パックは水を20Lのパックに入れたものを設置した。また、計算は初めに非集熱時の室内循環を想定した定常計算を行った際の計算結果が収束した後、その解を初期条件とし、集熱時を7:00~17:00(非集熱時は17:00~翌日7:00)として非定常計算を行った。

4.3 付加蓄熱材における吸放熱量の結果

図8に4種の検討における付加蓄熱材の吸放熱量を示す。床吹き出し方式検討モデルは吸放熱量においてダクト短モデルの吸放熱量が最も大きいが、これは中央にある基礎立ち上がりに吹き出した空気が当たり、基礎等の吸放熱量が他の検討より大きくなっている。また、北面に温かい空気が溜まり、南面のダイニングや東面の寝室床下に十分に空気が流れない。よって、付加蓄熱材の設置を考慮に入れ、ダクト短モデルではなく2方向吹き出しモデルを本検討において最適なモデルとした。

図9に12:00における横置き・上置き、縦置き・上置き、縦置き・下置きのyz面の床下温度分布を示す。結果から配置検討は吊るされた横5本×縦10本に配置された縦置き・上置きモデルが最も吸放熱量が大きくなった。縦置きは、横置きと比べ居室床面との距離が広く、床下空間に大きく露出していること、また温められた空気は上昇する性質があるため下置きより吸放熱量が大きくなった。図10に12:00、翌日7:00における縦置き・上置きの間隔の違いによるxy面の床下温度分布を示す。2cm間隔に配置された2cmモデルは横6.5cm、縦9cm間隔に配置された縦置きモデルと比べ、狭い間隔で配置されているため空気が流れにくく、吸放熱量は小さくなった。

また、付加蓄熱量については、1500Lモデルが最適となった。2000Lモデルでは吸熱量が大きくなり放熱量が小さくなるが、これは容量を増加させたことにより、付加蓄熱材同士の間隔が狭まり放熱量が減ったためである。容量増加は居室空間を低温安定に導くため、吸放熱量が頭打ちとなる1500Lを最適なモデルと判断した。

そして、最後の容器検討では2L水入りペットボトルが最適モデルとなった。水パックは施工上、下置きとなり上



表2 解析条件

解析領域		15m(方向) × 15m(y方向) × 1.5m(z方向)
乱流モデル	標準k-εモデル	
	メッシュ	380万~990万メッシュ
流入条件	定常計算	立下りダクト: 720m/h 温度: 20°C (室内循環を考慮)
	非定常計算	立下りダクト: 720m/h 温度: 集熱運転を考慮
流出条件		自動計算、吹き出し口開口率: 40%(グリル考慮) 乱れの強さ: 10% 長さスケール: 0.05m
収束判定条件	定常計算	1 × 10 ⁻⁴
	非定常計算	1 × 10 ⁻²
物性値		設計図から拾った仕様を設定
非定常解析計算対象期間		24時間
計算時間間隔		1min
躯体、蓄熱体温度		初期温度20°C
基礎外周の境界条件		7°C, 0.625 (m ² ·°C/W)
床表面の境界条件		20°C, 0.043 (m ² ·°C/W)
地盤の境界条件		7°C, 11°C, 15°Cと3層に分割、熱抵抗は自動計算

図5 検討フロー

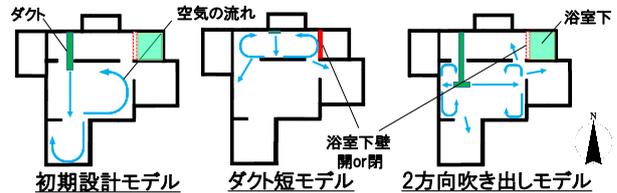


図6 床下吹き出し方式検討概要



図7 配置検討概要

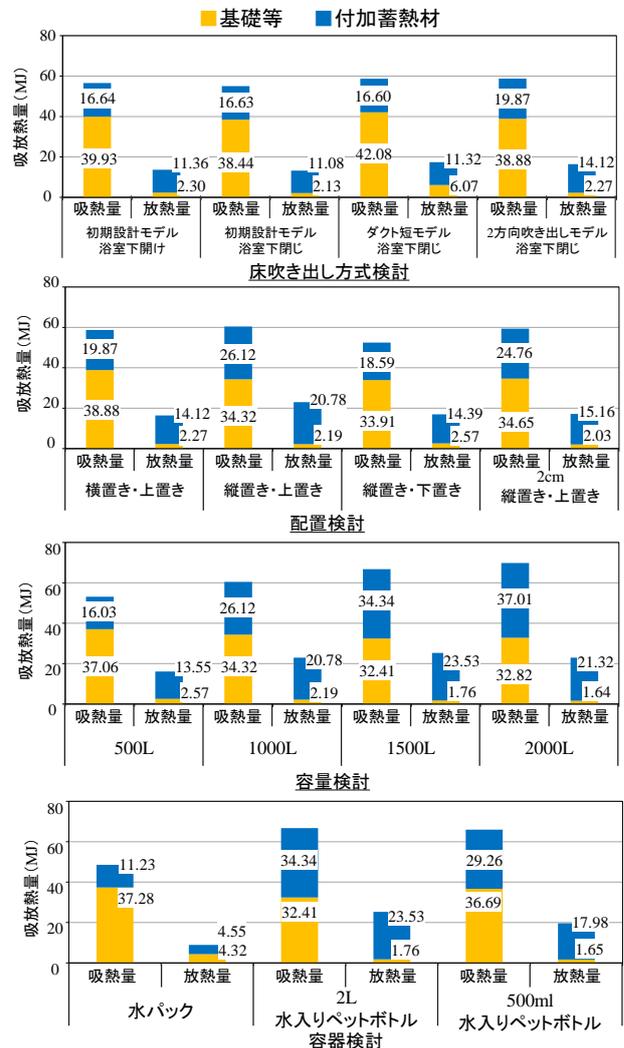


図8 付加蓄熱材吸放熱量の違い

昇する空気に接しないため小さい吸放熱量を示し、500ml水入りペットボトルは2L水入りペットボトルと比べ、表面積は約2.5倍と大きい水入りペットボトル間が狭まるため小さい吸放熱量を示した。

4.4 付加蓄熱材の対流熱伝達率

本検討で最も吸放熱量を大きく示した2L水入りペットボトル縦置き・上置き(1500L)モデルに関して、以下の式により対流熱伝達率の算出を行った。

$$\text{対流熱伝達率 } \alpha_c = H_s / (T_a - T_s) \dots\dots\dots(式1)$$

H_s : 蓄熱材表面熱流束 [W/m²]

T_a : 蓄熱材近傍空気温度 [°C]

T_s : 蓄熱材表面温度 [°C]

その結果、対流熱伝達率は集熱時が6.79W/m²・K、非集熱時が6.16 W/m²・Kという値が得られた。

5. その他物件における付加蓄熱材検討の結果

伊達、仙台においても、現在配置されている付加蓄熱材の検討を行った。解析条件は境界条件以外、浜松と同様の条件となっており、各境界条件等は図11のモデル図に示す(集熱時:7:00~17:00、非集熱時:17:00~翌日7:00)。伊達、仙台における12:00、翌日7:00の床下温度分布図を図12にそれぞれ示す。結果より、伊達、仙台の両方において、日中温められた付加蓄熱材が翌朝に放熱できている様子が確認された。また、容量の差により、浜松と比べ全体の吸放熱量自体は少ないが、付加蓄熱材設置による床下吸放熱量の改善を確認することができた(図13)。

最後に浜松同様、式1を用いて付加蓄熱材の対流熱伝達率を算出し(伊達…集熱時:9.40W/m²・K 非集熱時:8.33W/m²・K、仙台…集熱時:7.70W/m²・K 非集熱時:6.73W/m²・K)、次報の熱負荷計算においては、これらの対流熱伝達率を入力条件として計算を行う。

6. まとめ

本研究にて検討対象とする空気式太陽熱集熱システムの冬期・夏期の運転概要及び全国5か所に建設を行った実証住宅の概要について示し、竣工後の実測評価における検討項目について紹介した。また、その設計段階のシミュレーションとしてCFDによる床下蓄熱検討を行い、付加蓄熱材の吸放熱量及び対流熱伝達率を算出し、床下空間への付加蓄熱材(水入りペットボトル)設置が本システムにおいて有効であることを示した。

[参考文献]

- 1) 崔、高瀬ら：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1~2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.639-642、2014.9
- 2) 軽部ら：空気集熱式太陽熱暖房システムにおける蓄熱部位で吸放熱量に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、2015年9月(投稿中)

[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、鹿児島大学、琉球大学)により実施したものである。関係各位に感謝の意を表します。

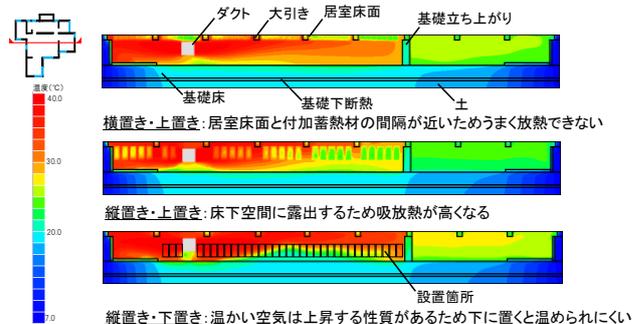


図9 12:00におけるyz面 床下温度分布図

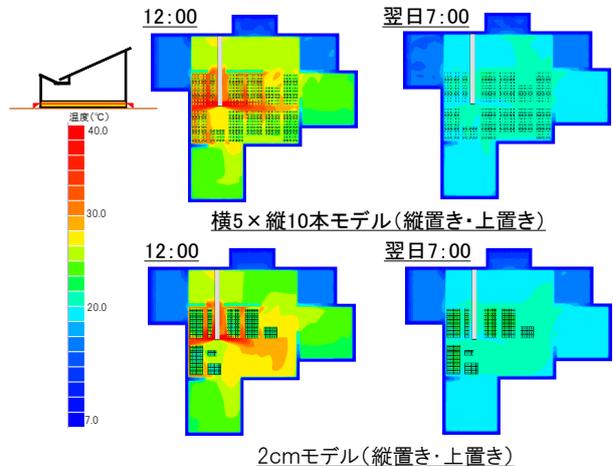


図10 12:00、翌日7:00におけるxy面 床下温度分布図

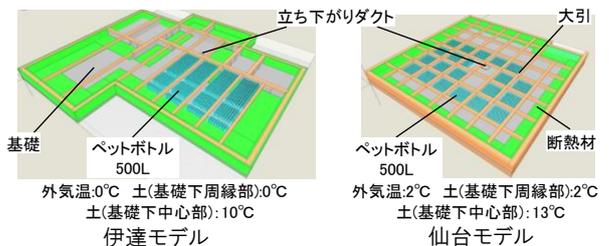


図11 伊達、仙台床下モデル(CFD)

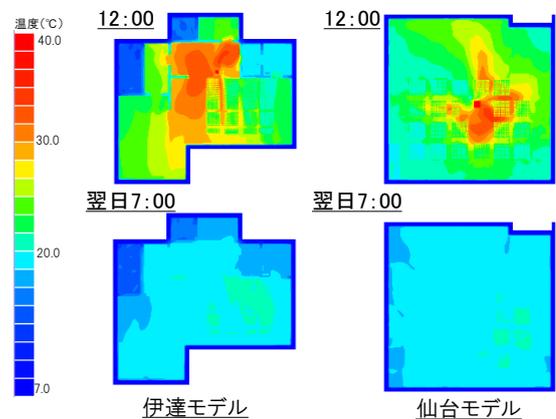


図12 伊達、仙台におけるxy面 床下温度分布図

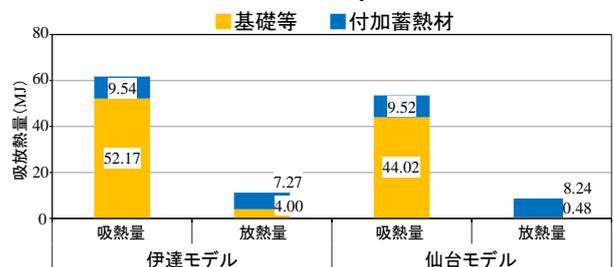


図13 伊達、仙台における付加蓄熱材吸放熱量