

空気式太陽熱集熱暖房方式を利用した住宅のシステム性能改善効果に関する研究

A study on the improvement of system performance in the residential building using air-based solar heating system

学生会員 ○北潟 寛史 (東京大学) 学生会員 崔 榮晋(東京大学)
 正会員 高瀬 幸造 (東京大学) 正会員 小原 克哉(東京大学),
 正会員 佐藤 誠 (佐藤エネルギーリサーチ) 正会員 前 真之(東京大学)
 正会員 盧 炫佑 (株OM ソーラー) 正会員 駒野 清治(OM ソーラー)

Hiroshi KITAGATA*, Youngjin CHOI*, Kozo TAKASE*, Katsuya OBARA*, Makoto SATOH**,

Masayuki MAE*, Hyunwoo ROH***, Seiji KOMANO***

*The University of Tokyo, **Sato Energy Research, ***OM Solar

The purpose of this study was to propose a method of heat storage for stabilizing the room temperature and reducing the heating load under Air-based Solar Heating System. By implementing this method to the interior of the living room and appropriately adjusting room temperature, the improvement in room temperature stability and the reduction of the heating load was clearly obtained using thermal network simulations.

1.はじめに

1.1 背景と目的

家庭消費エネルギーの半分以上を占める給湯・暖房用途を太陽熱エネルギーで賄うことが期待されている。本研究では一例として、空気集熱式太陽熱利用暖房を対象とする。

本方式は、屋根面に空気式太陽熱集熱パネルを設置し、日中暖められた空気を小屋裏のエアハンドリングボックスによって送風する。昼間は立下りダクトを通じて床下空間に屋根で暖められた空気を放出し、基礎コンクリートに蓄熱させつつ室内に温風を吹き出す。夜間は蓄熱された熱が放熱されることで室温低下を抑制する。しかし従来のシステムでは建物の熱容量が小さく、蓄放熱によるタイムシフト効果が不十分なため、朝方の冷え込みや日中のオーバーヒートなどの課題がある。

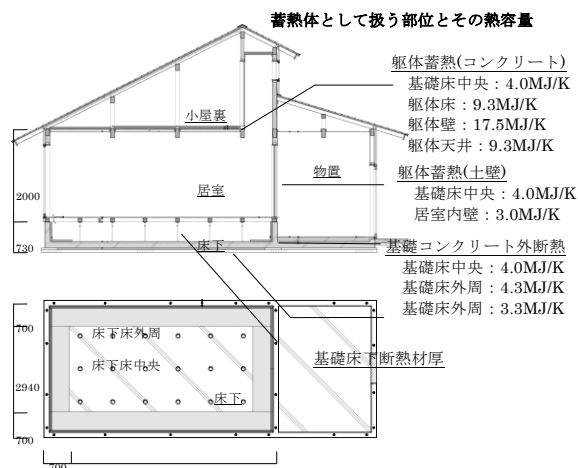
1.2 研究のながれ

まず実測データから集熱量、蓄熱量、放熱量、暖房負荷等の計算精度の確認を行った。対象としたのは、図1、表1に示した静岡県浜松市に建設された実験棟である。予備集熱面で外気を予熱し、断熱性能の高いガラスパネルでさらに加熱し、室内の床下空間に放出する(図2、表2)。本システムでは予備集熱面(従来は鉄板が多く用いられた)がPVパネルであるため集熱とともに発電が可能である。PV・ガラスパネル面積比率を変更し、回収可能な太陽エネルギー(集熱量と発電量の和)を比較し、本システムの太陽エネルギー利用率の高い構成を確認した。その上で暖房システムとしての性能向上を目指し、シミュレーションにより蓄熱部位に関する検討を行い、集熱および蓄放熱部の適切な設計手法を整理した。

2.実験棟における熱収支把握

ここでは一例として、実験棟において得られた実測データの2013年1月11日午前6時～1月12日午前6時の24時間(図

3, 4)について、空気集熱式暖房における熱収支を図5に示す。なお、ダイレクトゲインの影響を避けるため南の窓には遮光シートによる日射遮蔽を施した。エアコンは6時～23時に設定室温20℃で運転した。その結果、集熱量に対する基礎部への蓄熱量は35%、蓄放熱比(24時間積算の放熱量/蓄熱量)は24%となった。この結果は赤嶺らによる一般住宅における実測結果¹⁾(基礎部への蓄熱量は約4割、蓄放熱比は約2割)とほぼ一致している。基礎部への蓄熱量が小さいのは、実験棟の合計集熱面積約20㎡に対して基礎床中心面積は約8㎡と小さいためである。現状では18時～23時の暖房負荷は16MJ、18時～翌朝6時では42MJであり、夜間暖房負荷が生じないように室温を維持するための放熱量は現状の5.4MJの10倍程度必要である。それを実現するためには、放熱過程の熱損失削減、蓄熱量の増加、集熱量の増加という3つの選択肢が考えられる。集熱量の増加だけでは日中にオーバーヒートを引き起こすリスクが高まるため、集熱量の適切な設計がなされることが重要である。一方、蓄熱量の増加が実現できれば室への投入熱量のうち、対流成分が小さくなるためオーバーヒートが緩和され、同時に必要放熱量も確保される。



6370 図1 実測対象物件

以上をふまえ、まずシステムでの太陽熱・太陽光発電トータルでの利用効率を検討したうえで、蓄放熱量増加のための検討を行った。

3. シミュレーション計算精度の検証

3-1 計算方法

負荷計算および集熱器の計算には前真之研究室で開発したMicrosoft Excelを利用した非定常一次元熱負荷計算ツールExTLAを用いる。集熱器部分については佐藤らのモデル²⁾を採用した。その精度検証を、実験棟における実測値と汎用熱負荷計算ソフトを用いて行った。

3-2 集熱器の実測値との精度検証

実験棟における快晴日データ（2012年12月19日～20日）のPV出口温度とガラスパネル出口温度の実測値と、これをもとにした集熱部の計算値を図6に示した。PV集熱部入口温度は実測値を入力し計算した。ガラスパネルの出口温度は実測値よりも計算値の方がやや低い。PV出口温度はほぼ一致しており、精度よく計算されていた。

3-3 躯体の汎用熱負荷計算ソフトとの精度検証

汎用熱負荷計算ソフトSimheatを用いて単室における自然室温、および各壁表面温度、熱流の精度検証を行った。表3、図7に検証で用いた建物概要を示す。図8のように、室温と熱流はほぼ一致し、精度が確認された。

4. 太陽熱とPVの併用に関する検討

集熱と発電との併用が可能となり、太陽エネルギーを最大限活用することが期待されている。PVモジュールでは発電分だけ吸収日射量が減るため、集熱量が減少し適切な暖房効果を得られないリスクがある。発電・集熱の両方を考慮した、PVモジュールとガラスの適切な組み合わせ方については、現状把握されていない。そこで、実験棟集熱面積19.3㎡において暖房期間積算集熱量と発電量（一次エネルギー換算）のシミュレーション計算を行った。その結果を図9、10に示す。なお一次エネルギー換算にあたり、受電端効率を37%と仮定し発電量[MJ/日]を2.7倍とすることで一次エネルギー換算値とした。ここから、ガラス集熱器比率によらず、鉄板よりもPVにした方が集熱量と発電量の和が大きいことが確認できる。さらにその和が最大となるPV：ガラス集熱器の比率は75：25であった。次に年積算で見ても同様の結果となった。これより、PVと太陽熱を組み合わせることのエネルギー面での優位性を示すことができた。今後夏期中間期の冷房負荷削減量も考慮した検討が課題である。

5-1. 基礎床下断熱材厚さ

床下空間から土中への熱損失を検討するため、基礎下断熱材厚さを0mm/50mm/100mm/200mmと変化させ比較を行った（図11）。本章では室温・熱流について、最寒期に晴天・曇天・晴天となる1月14～16日の結果を解説する。室温・暖房負荷ともに基礎下断熱材の有無、厚さによる影響は小さい。しかし現状のExTLAでは一次元熱伝導の計算のため土

表1 実測対象物件仕様

敷地：静岡県浜松
竣工：2012年3月
構造：木造平屋
延床面積：23.19㎡
(床下外周断：14.91㎡)
(床下中心：3.23㎡)
真積：102.15㎡
(床下：12.75㎡)
(専有：62.27㎡)
(小部屋：27.13㎡)

集熱面積：19.3㎡(幅3.56m)
(予備集熱部：13.95㎡)
(ガラス集熱部：5.34㎡)
Q値：2.7W/mK
(天井：フェノール系30mm)
(壁：真性断熱W16K t=100mm)
(窓：LOW-E複層ガラス50mm)
(基礎：スチール3種 t=50mm)
(床下断熱：無し)
開口部：Low-E断熱ガラス
(熱貫流率：2.33W/mK)
(高：3.8m/長：0.9m)

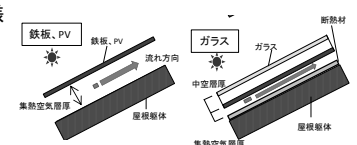


図2 集熱パネルモデル

表2 集熱パネル仕様

	検計用		実験棟	
	鉄板	PV	ガラス	ガラス
面積[m ²]	13.96	13.96	5.34	5.34
幅[m]	3.56	3.56	3.56	3.56
流れ方向長さ[m]	3.92	3.92	1.5	1.5
集熱空気層厚[m]	0.04	0.04	0.024	0.024
空気層断面積[m ²]	0.14	0.14	0.09	0.09
中空層厚[m]	-	-	0.034	0.034
方位角[°]	0	0	0	0
傾斜角[°]	26.6	26.6	26.6	26.6
断熱材熱貫流率[W/m ² ·K]	-	-	-	1
発電効率[%]	-	12.8	-	-

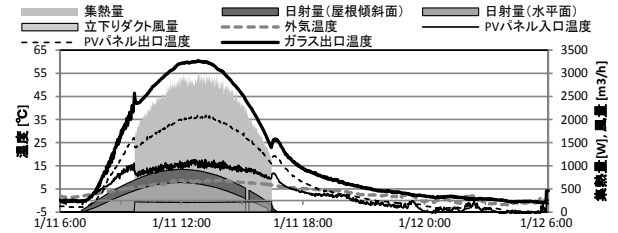


図3 実験棟実測データ (2013. 1. 11. ~12.)

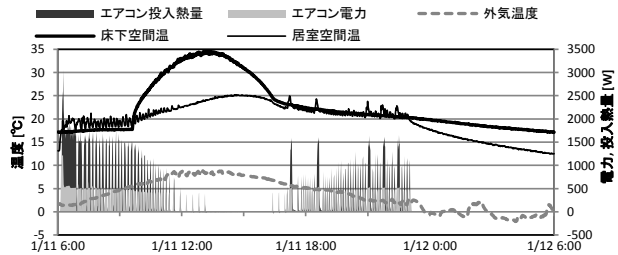


図4 実験棟実測データ (2013. 1. 11. ~12.)

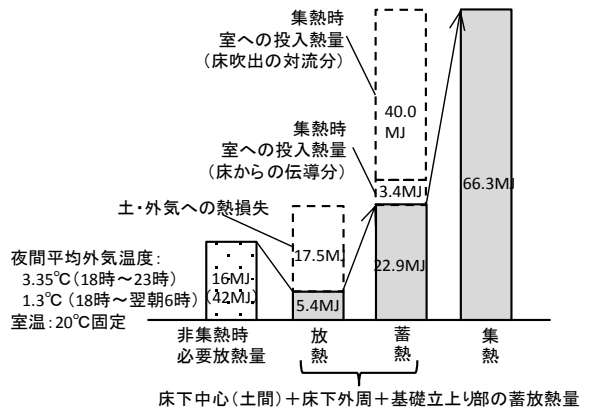


図5 空気式集熱式実験棟における熱収支 (2013. 1. 11.)

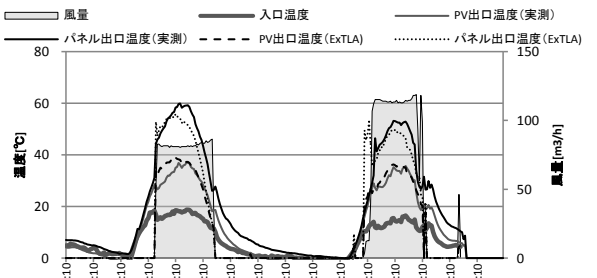


図6 集熱部における実測値、シミュレーション値の比較

中における熱の水平方向の熱移動を考慮できておらず、土のモデルを修正した上での計算が課題となる。

5-2.基礎立ち上がり断熱材

床下空間から外気への熱損失を検討するため、基礎立ち上がり断熱材厚さを 0mm/50mm/100mm/200mm と変化させ比較を行った。また現状のシステムにおいて基礎立ち上がりは内断熱となっているが、基礎立ち上がりコンクリートも蓄熱体として利用するため、外断熱の場合も検討した。基礎を内断熱とした際の断熱材厚さについては断熱材なしの場合と断熱材 50mm の場合で室温大きな差がみられたが、100mm、200mm と断熱材を厚くしてもその効果は小さい(図 12)。内断熱と外断熱の比較では、外断熱とした場合に居室室温は安定しており、基礎立ち上りを外断熱として蓄熱部位を増加させた効果が認められた(図 13)。

5-3.躯体蓄熱(コンクリート)

次に躯体側に熱容量を持たせるため、コンクリートによる熱容量増加の効果を検討した。床 200mm の場合、床・全壁 200mm の場合、床・全壁・天井 200mm の場合について比較した(図 14)。その結果、床のみ配置した場合でも、床下付加蓄熱の場合に比べて、室温変動の平準化効果が認められた。さらに、床・全壁、床・全壁・天井に配置した場合で、極めて安定した室温変動となった。しかし住宅において躯体コンクリートの量を増やすことは建設コストや LCCO2 の増加を招くことが指摘される。躯体上では、最小限の熱容量の付加での室温安定化実現の検討が必要となる。

5-4.躯体蓄熱(土壁)

最後に、LCCO2 に考慮しつつ躯体蓄熱を増加させることを目的とし、全壁に土壁を使用した際の効果を検討した。全壁を土壁 50mm とした場合、日中のオーバーヒートを抑えつつ、非集熱時の室温低下の軽減については効果が認められた(図 15)。

6.蓄熱手法ごとの自然室温・暖房負荷に関する考察

ここまでで蓄熱部位を変化させた熱回路網計算による自然室温の比較検討を行い、蓄熱手法ごとの温度変動を整理した。

また、各種の建物条件における暖房負荷を検討するため、6時~23時に室温設定温度を 20℃とした暖房負荷計算結果についても示した。なお、ここでは集熱時にオーバーヒートして室温が 28℃以上になった際には集熱を停止するという制御を加えた。暖房負荷計算における冬期通算での熱収支を図 16 に示す。

まず基準ケースでは断熱なしと比べ、較差が 1.5℃小さくなるものの、蓄熱量の不足から集熱時のオーバーヒートが防げず、室温が 30℃を超えることがあった。

表 3 精度検証・建物条件

気象データ	気象アメダス標準年データ
地域	東京
開口方位	南
開口寸法	2000mm×2000mm
構造(熱容量)	木造
床材(熱容量)	フローリング(12mm)
断熱材	等級3 グラスウール32K:厚さ55mm,壁35mm,床45mm
窓の種類	普通複層ガラス(A6)+アルミサッシ
換気回数	常時0.5回
内部発熱	0W

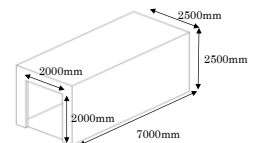


図 7 解析モデル

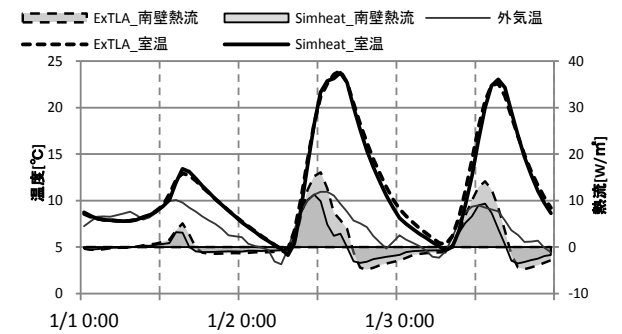


図 8 ExTLA と汎用シミュレーションソフト結果比較

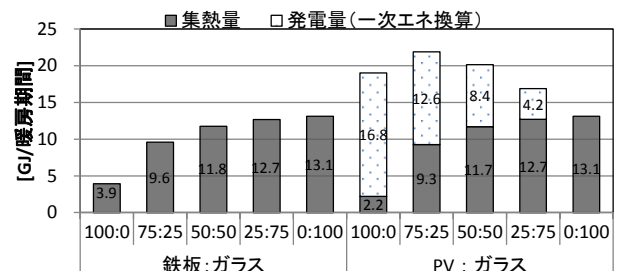


図 9 暖房期間積算エネルギー利用量 (11/1~3/31)

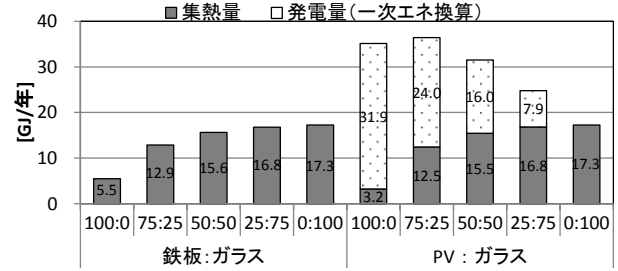


図 10 年積算エネルギー利用量 (1/1~12/31)

表 5 シミュレーションモデル

構造	延べ床面積	Q値	ExTLAモデル
木造平屋建	23㎡	2.7W/㎡k	
天井断熱材	壁断熱材	屋根断熱材	
フェノールフォーム t=80mm	高性能GW16K t=100mm	GW32K t=50mm	
基礎断熱材	開口部(Low-E断熱ガラス)		
スタイロフォーム3種B t=50mm	熱貫流率: 2.33 W/㎡K 南: 3.6 ㎡/北: 0.9 ㎡		

表 6 シミュレーション条件

外気条件	動走期間	計算時間間隔	換気条件
標準年拡張アメダスデータ(浜松)	1年間	1時間	集熱時 エアハンドリングダクト 非集熱時 エアハンドリングダクトは
評価対象日(1/14/1:00AM-1/16/23:00PM)			

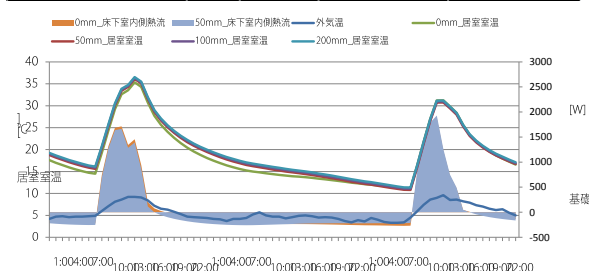


図 11 基礎下断熱材厚さによる居室室温比較

基礎外断熱とした場合には、基礎をすべて蓄熱部位として利用するためにオーバーヒートを低減でき、内断熱と比較して暖房負荷の削減効果も大きかった。なお、温暖地では外断熱とした際、シロアリ被害についても留意する必要がある、課題を残す。床をコンクリートとした場合には、室温平準化効果が大きく、暖房負荷は基準ケースと比較して74%削減されたが、施工性やLCCO2の観点からは課題もある。これを解決するため、土壁で躯体に熱容量をもたせたケースでも居室の室温はある程度安定し、暖房負荷は基準ケースに比べて43%削減された。これらの結果に配慮しつつ居室の温度を安定させる方法として、基礎の外断熱と土壁の組み合わせが現実的かつ効果的であると考え、計算を行った結果、暖房負荷は17.5%となり大きな性能向上が認められた。

7. 室温設定に関する検討

6章の検討では暖房設定温度を20℃としたが、これを18℃に設定することによる負荷削減効果を見ることとした。これは、蓄熱の工夫による朝の室温向上にともない、着衣量の調節等によって許容できる室温を低めに許容することができれば朝の立ち上がりの暖房負荷を低減することができ、大幅な暖房エネルギー削減効果が認められるとの考えによる。この結果、土壁と基礎外断熱の組み合わせを暖房設定温度18℃とした場合、現状に比べ暖房負荷は3.5%であった。

8. まとめと今後の課題

本研究では、空気式集熱暖房システムに関して、以下の知見を得た。基礎を外断熱とすることにより、基礎での有効熱容量を増やすことができ、室温平準化・暖房負荷削減に効果的である。また、躯体にもある程度の熱容量を持たせることでさらなる効果が期待できることが示された。なお今回は1次元での熱回路網計算を行ったが、土壌と基礎間での熱のやりとりについては課題を残しているといえる。

【謝辞】 本研究は平成23-24年度NEDO太陽熱エネルギー活用型住宅技術開発助成事業（実施者：OMソーラー㈱、東京大学、工学院大学）により実施したものである。また、実験に際してOMソーラー㈱メンバーと東京大学前研究室メンバーのご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

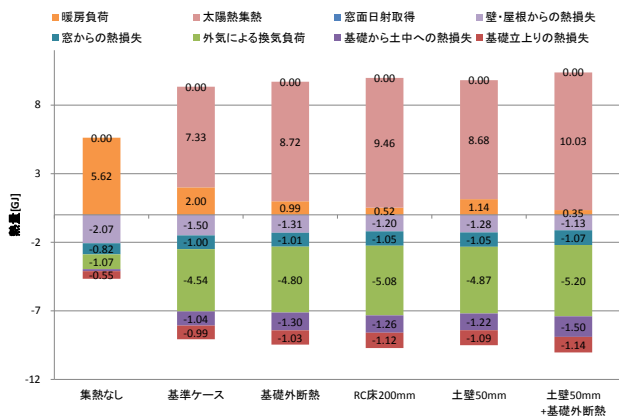


図16 各ケース熱収支比較

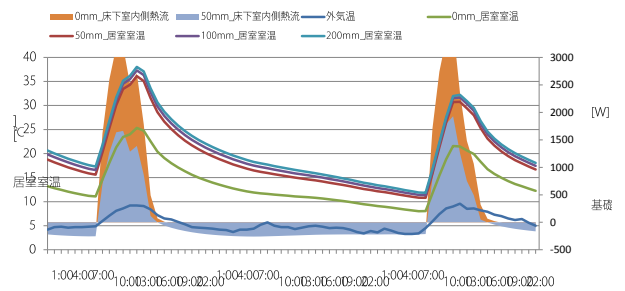


図12 基礎立ち上がり断熱材厚さによる居室室温比較

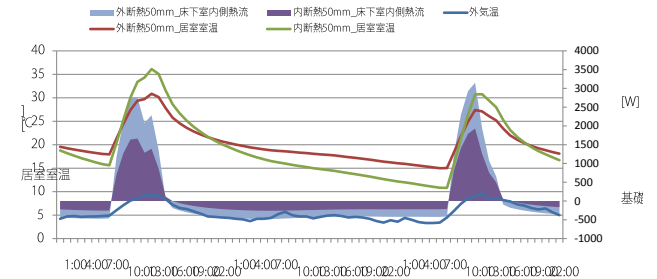


図13 基礎外断熱による居室室温比較

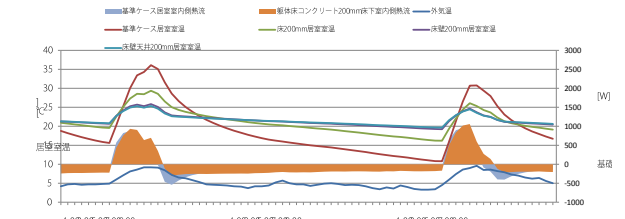


図14 躯体蓄熱(コンクリート)による居室室温比較

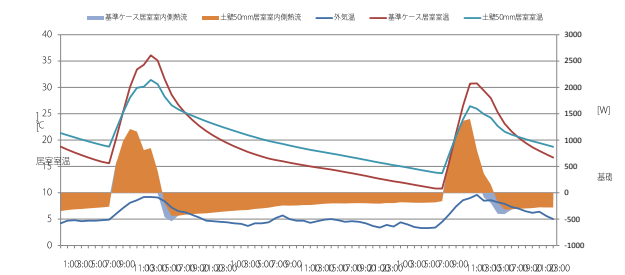


図15 躯体蓄熱(土壁)による居室室温比較

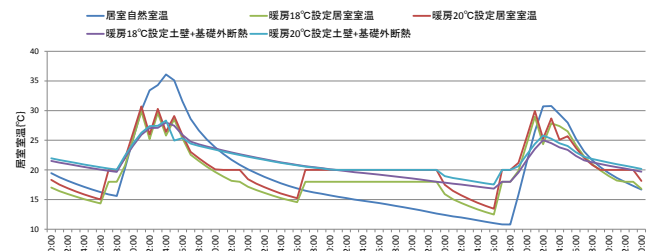


図17 基準ケース、土壁、土壁+基礎外断熱負荷計算時室温変動

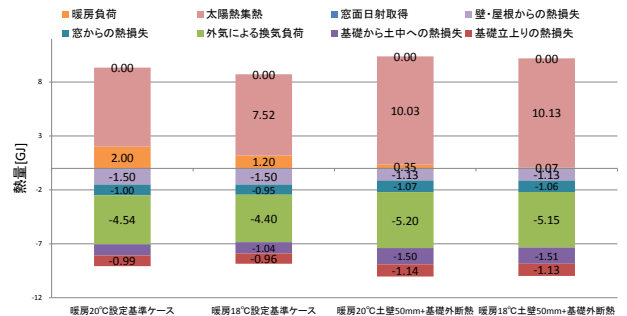


図18 基準ケース、土壁、土壁+外断熱熱収支