

空気式太陽熱集熱システムを採用した戸建住宅に関する研究
 (第6報) シミュレーションを用いた床下付加蓄熱による熱性能改善効果の検討
 A Study of Detached Houses with Air-Based Solar Heating System

Part6. Evaluation of load reduction using additional heating mass by CFD simulation and thermal network analysis.

学生会員 ○山本 遼子 (東京大学) 正会員 森田 舟哉 (元東京理科大学)
 学生会員 永田 卓也 (東京大学) 正会員 崔 榮晋 (東京大学)
 正会員 高瀬 幸造 (東京理科大学) 正会員 前 真之 (東京大学)
 特別会員 井上 隆 (東京理科大学) 正会員 盧 炫佑 (OMソーラー)

Ryoko YAMAMOTO*1 Shuya MORITA*2 Takuya NAGATA*1 Youngjin CHOI*1

Kozo TAKASE*2 Masayuki MAE*1 Takashi INOUE*2 Hyunwoo ROH *3

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

To apprehend the performance of solar heating system, we have been studying detached houses using bottled water as heat storage medium by CFD simulation and thermal network analysis. In this paper, we introduce the results of simulation and confirmed the difference of indoor thermal comfort and the energy consumption for heating and hot water supply from each climate zone in Japan.

1. はじめに

本報では、日本全国における空気集熱式太陽熱集熱システム(以下、本システム)を搭載した住宅の断熱性能ごとの負荷削減効果及び暖房期快適性を検証することを目的とした。熱負荷計算シミュレーション及びCFD解析を用いて床下に導入した付加蓄熱体による熱性能改善効果及び付加蓄熱体が室内快適性に及ぼす影響を検討する。

2. シミュレーション条件

2.1 省エネ地域区分ごとの代表地点選定

日本全国において本システムの性能を検証するにあたり、地域ごとの日射量がシステム性能に大きな影響を与えたと考えられる。そこで、拡張アメダス標準年気象データ(2000年)を用いて暖房期暖房度日(18-18)及び暖房期日平均日射量[Wh/m²]を算出し、その偏差値が50に近い点を各地域の代表地点として選定した。その手法及び結果を表1に示す。また、同様に6地域の暖房期日射量地域区分(H1~H5)についても代表地点を選定した。以降の検討では、これらの代表地点の気象データを用いる。

表1: 気象データ代表地点及び算出方法

気象データ	拡張アメダス標準年データ	地域区分	代表地点	各地点_数値(暖房期)		代表期間	
計算地域	アメダス観測点842地点	地域区分	地点	暖房度日	日平均日射量		
算出方法	- 暖房期暖房度日(18-18)及び暖房期日平均日射量を算出し、その偏差値が50に近い点を代表地点とする。 - 該当地点が複数の場合、人口が多い方を選択する。 ※暖房期間は事業主基準の暖房負荷計算条件に従う。 ※8地域はほとんど暖房負荷がないため除外	1地域(I a)	北海道遠軽	4441	4092	2/1-2/3	
		2地域(I b)	北海道岩見沢	3905	3931	2/10-2/12	
		3地域(II)	青森県三戸	3157	3708	2/12-2/14	
		4地域(III)	長野県長野	2723	4733	2/17-2/19	
		5地域(IV a)	岡山県津山	2199	4376	2/23-2/25	
		6地域(IV b)	山口県山口	1684	4522	2/11-2/13	
		7地域(V)	鹿児島県鹿屋	1309	4617	2/23-2/25	
		地域区分	H1	H2	H3	H4	H5
		6地域	鳥取県鳥取	福岡県太宰府	山口県山口	東京都練馬	愛知県南知多

2.2 標準住宅モデルの設定

実住宅を想定したシミュレーションでは、モデル形状や規模等による影響が大きい。そこで、本報では東京大学前研究室で実施した図面調査(ハウスメーカーのHP上で閲覧可能な図面133件を対象とした)をもとに作成された標準住宅のプランを一部改変した住宅モデルを採用した(表2、図1・以下、標準モデル)。延床面積127m²となっている。また、本システムの床下付加蓄熱体は500mlの水入りペットボトルを採用した(図2・以下、水PET)。標準モデルは日射熱取得を最大限利用するため南面に大開口を持ち、吹抜けのある開放的な空間構成となっている。なお、別途行った本システム搭載住宅100物件の図面調査より延床面積と吹抜面積の中央値が121.6m²、8.3m²であることから、標準モデル採用の妥当性を確認した。

表2: 標準住宅モデル仕様詳細

延床面積	127.5m ² (うち吹抜け9.9m ²)	地域区分	U _a 値	η _a 値	部位ごとU値[W/m ² K]			
					屋根	外壁	南面開口部	基礎
外皮等表面積	341.0m ²							
住戸気積	306.1m ³	1~3地域	0.32	1.7	0.13	0.20	1.70 (0.39)	0.32
集熱面面積	[PV]24.8m ² [ガラス]8.3m ²	4~5地域	0.40	1.9	0.18	0.25	1.90 (0.46)	0.49
開口部面積	30.6m ² (南面21.1m ²)	6~7地域	0.52	2.2	0.19	0.38	2.33 (0.51)	0.49

※開口部()内はη値、基礎はU値

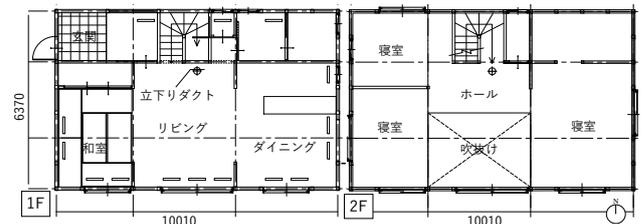


図1: 標準住宅モデル平面図

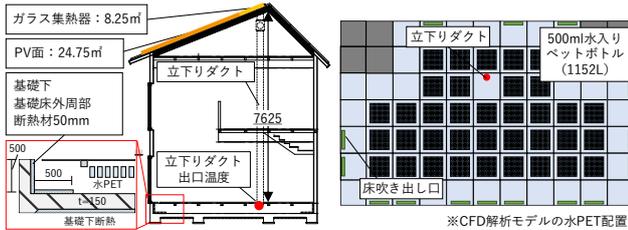


図 2：標準住宅モデル 断面図及び水 PET 配置図

3. 床下蓄熱体の有効範囲及び適正風量の検討

3.1 CFD 解析概要

床下空間の気流性状は複雑で気流ムラも大きいので、立下りダクトから離れた水 PET は蓄熱体として機能せず、暖房負荷を増大させる可能性もある。そこで、床下空間を対象として CFD 解析を用い、有効蓄熱範囲を検討した。解析には汎用ソフトの FlowDesigner2017 を用い、日平均外気温が 1, 2 月の平均外気温に近い晴天日 2 日間を各代表期間とした (表 1)。各室の日射熱取得量や立下りダクト出口温度、土壌温度等の境界条件は、東京大学前研究室で開発した熱回路網計算ツール ExTLA を用いて算出した。ExTLA は、Microsoft Office Excel の循環参照や反復計算機能を用い Gauss-Seidel 法により連立方程式の収束計算を行っている。入力条件算定フローを図 3、CFD 解析条件と ExTLA 計算条件を表 3、表 4 に示す。なお、解析モデルには床下に設置可能である最大本数 2304 本の水 PET を設定し、風量は 600m³/h (換気回数 2 回/h) とした。

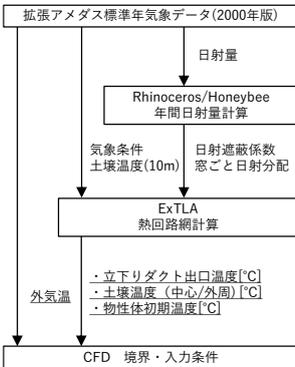


図 3：入力条件算定フロー

表 3：CFD 解析条件(床下空間)

解析コード	FlowDesigner2017	
流体モデル	標準k-εモデル	
収束判定条件	(非定常) 1.0×10 ⁻²⁵	
解析領域サイズ	X, Y, Z=10.01m, 6.37m, 0.7m	
解析期間	各代表地点ごと	
計算時間間隔	10分間隔	
境界条件	外気	気象データ外気温 表面熱伝達率18.6W/m²K
	土壌	接触温度固定・外周部/中心部別 乱流強度10%/長さスケール比0.01
流入条件	風量	集熱時300m³/h~900m³/h 循環時300m³/h
	温度	風量ごとにExTLAにより算出
流出条件	自由流出	

表 4：ExTLA 計算条件(床下空間)

使用ツール	ExTLA (非定常一次元熱回路網計算)	換気	非集熱時のみ 0.5回/h
建物モデル	標準住宅モデル(床下空間)	設定室温	暖房20°C
気象データ	拡張アメダス標準年データ(2000年版)	暖房時間	7:00-10:00, 12:00-14:00, 16:00-0:00
計算期間	1/1-12/31 (助走計算:1年間)	遮蔽率	Honeybeeシミュレーション値
計算時間間隔	10分	日射熱取得量	Honeybeeシミュレーション値
内部発熱	13.26kW/h/日	出湯量	40°C・450L/日

3.2 CFD 解析による床下蓄熱体の有効範囲検討

三戸 (3 地域) と山口 (6 地域) において、水 PET の平均温度が最高となる時刻での床下温度コンタ及び水 PET の温度分布を図 4 に示す。三戸は山口と比較して日射量が少なく、立下りダクトからの吹出温度が低下する傾向があるため、暖房設定温度の 20°C を下回る水 PET の範囲が山口よりも大きくなっている。一方で、山口においては全ての水 PET 温度が 20°C を上回り有効に機能している。表 5 に、各地域の有効蓄熱容量及び有効蓄熱範囲を示す。

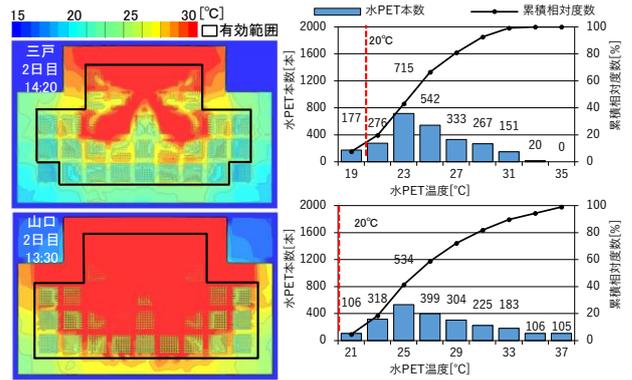


図 4：床下温度コンタ及び水 PET の温度分布

表 5：有効蓄熱容量及び有効蓄熱範囲

	1地域	2地域	3地域	4地域	5地域	6地域	7地域
有効蓄熱容量	352L	544L	1088L	1152L	1152L	1152L	1152L
有効蓄熱範囲							

■ 有効ブロック □ 無効ブロック
※各ブロック (水PET64本) において、32本以上が有効に機能している場合にブロック全体を有効と判断した。

3.3 CFD 解析による適正運転風量の検討

前項の検討結果を踏まえ、各地域で有効な水 PET 容量における居室への熱伝達性状を検証するため、CFD 解析により運転風量を検討した。風量は 300~900m³/h の範囲で変化させ、その他の解析条件は前項同様とした。図 5 に各風量ごとの立下りダクト吹出温度の入力値を示す。

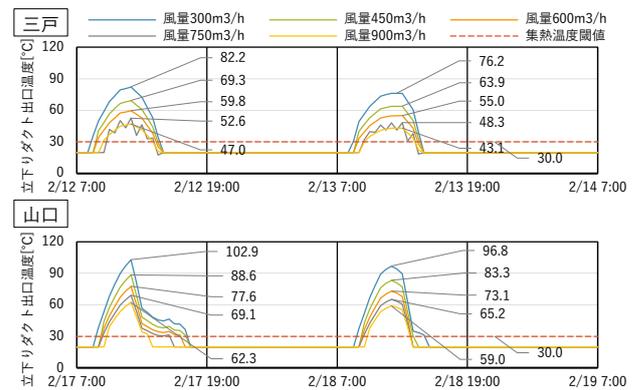


図 5：各風量ごとの立下りダクト吹出温度

3.4 運転風量ごとの熱伝達性状の把握

各風量での温度コンタ及び熱収支を示す (図 6、図 7)。居室供給熱量 (貫流) 及び基礎吸放熱については CFD 解析の熱流値から算出し、居室供給熱量 (対流) 及び水 PET 吸放熱量は図 8 のように算出した。小風量時は吹出温度が高いため、立下りダクト近傍の水 PET は高温となる。しかし、小風量であるため立下りダクトから離れた位置まで暖気が届かず、水 PET の温度ムラが大きくなる傾向がある。山口では、風量 600~900m³/h で水 PET の温度ムラが小さくなり、均一に温められていることが分かる。さらに、水 PET の吸熱量は風量 600m³/h 時に最大となり、最適風量は 600m³/h と言える。それに対して三戸では、水 PET の本数が少ないため、水 PET の温度ムラは小さくなる。なお、吸熱量は風量 600m³/h において最大となった。運転風量が大きくなると、床からの貫流による居室供給

熱量は減少する傾向がある。また、750~900 m³/h 程度の大風量で運転するとダクト吹出温度が下がるため、特に寒冷地では居室への供給熱量(対流)が負の値となる可能性がある。この点からも、寒冷地では300~600 m³/h 程度の小風量から中風量での運転が適切であると考えられる。

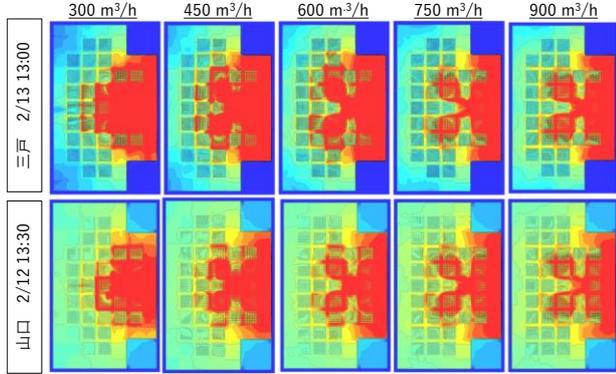


図 6: 各風量ごとの温度コンタ

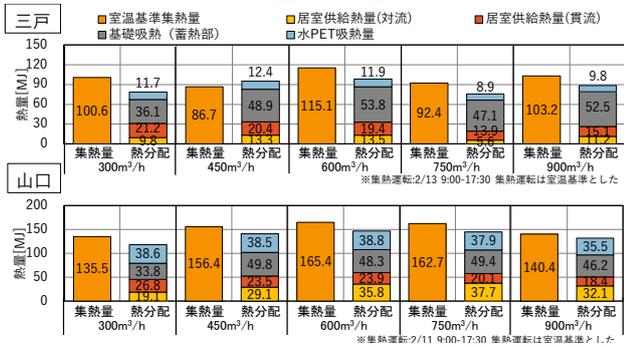


図 7: 各風量ごとの熱収支

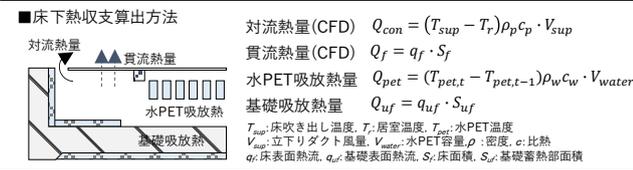


図 8: 床下熱収支算出方法

4. 蓄熱手法ごとの熱性能及び負荷削減効果の検証

4.1 CFD 解析概要

前項の結果を踏まえ、集熱風量を 600 m³/h として蓄熱手法ごとの熱伝達性状把握及び室内快適性を検証した。検討 case1~3 を表 6 に示す。解析は標準モデル全体を対象とし、ある程度の暖房負荷が想定される 6 地域の代表地点気象データを用いた(表 1)。CFD 解析条件、CFD 入力条件を示す(図 9、表 7)。なお、集熱温度 30°C を超える時間を集熱暖房運転、その他は室内循環運転(RA:2F 天井部)とし、空間全体に内部発熱 13.26 kWh/日を与えた。

表 6: 蓄熱手法検討ケース

	case1	case2	case3
モード	現状	水PETあり	水PETあり
断熱	基礎床外周部のみ断熱	基礎床外周部のみ断熱	基礎床上全面断熱
蓄熱部位	基礎床コンクリート	基礎床コンクリート	水PET(1152L)
蓄熱容量	17.03 MJ/°C	21.85 MJ/°C	4.82 MJ/°C

※コンクリートは有効蓄熱厚み0.2mとして算出

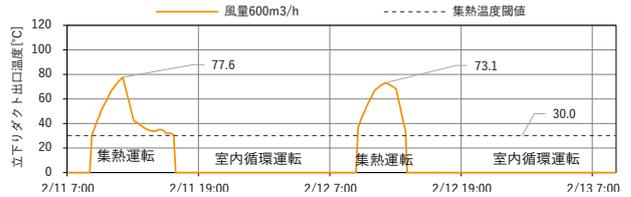


図 9: 立下りダクト吹出温度

表 7: CFD 解析条件(床下及び居室空間)

使用ツール	FlowDesigner2017	境界条件	外気	気象データ外気温
流体モデル	標準k-εモデル	土壌	表面熱伝達率18.6W/m ² K	
収束判定条件	(非定常) 1.0×10 ⁻²⁵	流入条件	風量	集熱時600m ³ /h 循環時300m ³ /h
解析領域サイズ	X, Y, Z=10.01m, 6.37m, 5.3m	流出条件	温度	ExTLAにより算出
解析期間	2/11 7:00 - 2/13 7:00	自由流入・有効開口率40%		
計算時間間隔	10分間隔			

4.2 CFD 解析による蓄熱手法ごとの熱伝達性状把握

2/12 における主居室室温を示す(図 10)。case2, 3 で室温のピーク時間に 30 分程度遅れが見られた。また、case1, 2 と比較して case3 は循環運転時の室温が 1°C 程度高く推移したが、朝方ではそのほかと同程度となっており、case2 が最も室温変動が小さいことがわかる。次に床下熱収支を示す(図 11)。水 PET の導入により基礎床への吸熱量は 2 割程度減少し、全体の吸熱量及び循環時の居室供給熱量(貫流+対流)は 6 割程度上昇が見られ、基礎の吸放熱比にも改善が見られた。また case2, 3 について比較すると基礎床上断熱を行うことで、水 PET への吸熱量は 4 割程度増加し、循環時の居室供給熱量も微増した。ただし、case3 は吸熱分のほぼ全量を翌朝までに放熱しており、翌日が曇天日の場合、室温維持効果は望めないと考えられる。

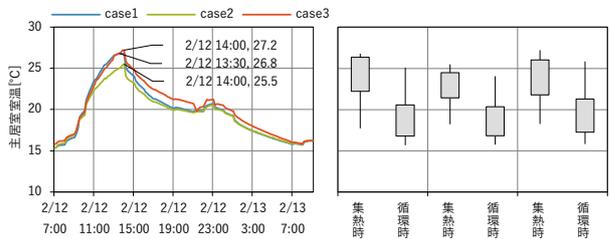


図 10: 蓄熱手法ごとの室温(左)と室温分布箱ひげ図(右)

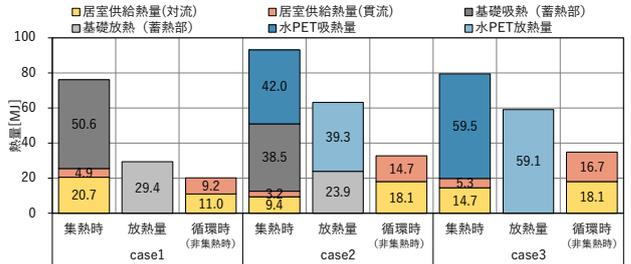


図 11: 蓄熱手法ごとの蓄熱部熱収支(2/12 9:00-2/13 9:00)

4.3 熱回路網計算概要

熱回路網計算ツール ExTLA を用い自然室温及び暖房負荷を算出することで、蓄熱手法ごとの負荷削減効果及び室温安定効果を検証した。なお、計算には前項同様に 6 地域の代表地点気象データを用い、前章の結果から集熱風量 600 m³/h、循環風量 300 m³/h とした。ExTLA の計算条件を表 8、冬期の集熱運転条件を図 12 に示す。

表 8 : ExTLA 計算条件

使用ツール	ExTLA (非定常一次元熱回路網計算)
建物モデル	標準住宅モデル (床上床下回路網)
気象データ	拡張アメダス標準年データ(代表地)
計算期間	1/1-12/31 (動走計算:1年間)
計算時間間隔	10分 (5.4は1時間)
内部発熱	13.26kWh/日
換気	非集熱時のみ 0.5回/h
設定室温	冷房26℃・暖房20℃ (負荷計算のみ)
暖房時間	7:00-10:00, 12:00-14:00, 16:00-0:00
出湯量	40℃・450L/日

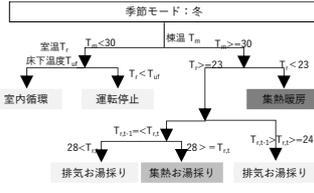


図 12 : 冬期集熱運転条件

4.4 室内循環運転条件の把握

まず、室内循環の開始条件を把握するために室内循環運転による蓄熱分の取り出し及び循環ファンの運転条件による暖房負荷削減効果を検討した(図13)。室内循環運転で蓄熱分を積極的に室内に搬送することで約15%暖房負荷を削減し、暖房期快適時間率^{*1}は約5.5%上昇した。循環ファン運転条件について大差は見られないが、床下空間温度が居室室温よりも高い場合に運転すると負荷削減効果が得られることから、以降の検討では床下空間温度が居室温度を上回る場合に循環運転を行うものとした。

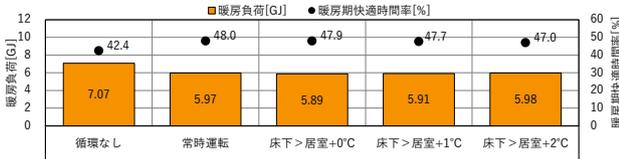


図 13 : 室内運転条件による暖房負荷及び快適時間率

4.5 蓄熱手法ごとの暖房負荷削減効果

次に、表6の蓄熱手法ごとの暖房負荷削減効果を検討した(図14)。基礎床コンクリート及び水PETを蓄熱部位とする case2 が最も暖房負荷削減効果及び室温安定性が高く、基礎床コンクリートのみの case1 からさらに1~2割の暖房負荷を削減していることがわかる。基礎床上断熱を導入した case3 については、本気象条件及び水容量においては優位性が見られなかった。また、断熱性能が高いほど蓄熱による負荷削減率が大きくなること示された。以下の検討では case2 の蓄熱手法を採用した。

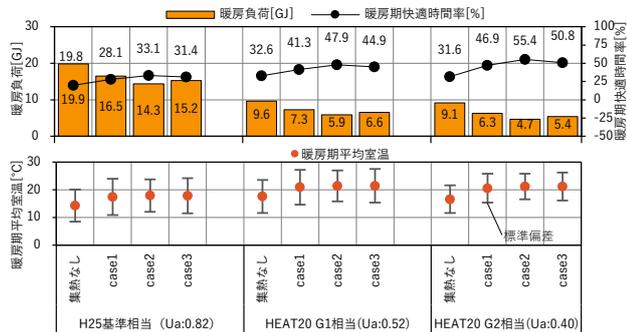


図 14 : 蓄熱手法ごとの暖房負荷削減効果及び室内快適性

5. 本システムの地域別適応性の検証

5.1 熱回路網計算概要

本システムの地域別適応性を検証するため、本システム搭載住宅と未搭載住宅について、給湯・暖房負荷及び暖房期の快適時間率を算出した。計算ツールには熱回路網計算ツール ExTLA を用い、自然室温を基準として負荷計算を行った。断熱性能は各地域ごとに H25 省エネルギー

基準相当、HEAT20 G1、G2 相当とした。図 15、16 に結果を示す。断熱性能向上により年間暖房負荷は 16~57%削減され、快適時間率は 0~14%増加した。さらに本システムを搭載することで、未搭載の場合と比較して暖房負荷は 13~46%、給湯負荷は 20~55%削減された。また、床下蓄熱により夜間室温が上昇するため快適時間率は日中で 0.8~21%、夜間で 3~35%向上した。最も快適時間率が向上したのは 7 地域であった。4~7 地域の温暖地では快適時間率が 34~66%となりし、本システムの効果が顕著にみられる。一方、1~3 地域では快適時間率の向上は 21~28%にとどまった。表 9 に 3、6 地域の断熱性能別熱性能改善効率を示す。3 地域では暖房負荷削減率が 35.6%、6 地域では 65%の負荷削減が削減された。

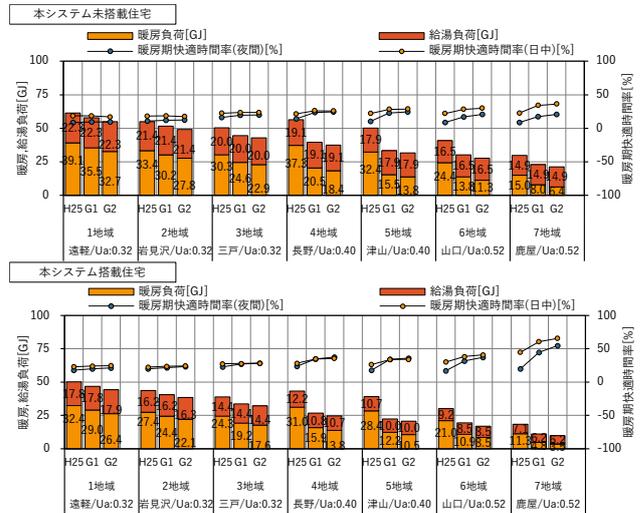


図 15 : 地域ごとの熱性能改善効率 (断熱性能別)

表 9 : 地域ごとの断熱性能別熱性能改善効率

3地域_三戸		H25		G1		G2	
断熱性能		H25		G1		G2	
本システム		×	○	×	○	×	○
U₀値 [W/m²K]		0.46		0.34		0.28	
負荷削減率	暖房	0.0%	11.3%	19.0%	30.0%	24.4%	35.6%
	給湯	0.0%	31.4%	0.0%	31.8%	0.0%	31.4%
暖房期間 快適時間率 (自然室温時)	日中	22.4%	27.0%	23.6%	28.0%	23.6%	28.6%
	夜間	16.1%	22.3%	19.3%	26.8%	20.1%	28.1%
6地域_山口		H25		G1		G2	
断熱性能		H25		G1		G2	
本システム		×	○	×	○	×	○
U₀値 [W/m²K]		0.46		0.34		0.28	
負荷削減率	暖房	0.0%	14.1%	43.4%	55.5%	53.8%	65.3%
	給湯	0.0%	44.5%	0.0%	48.3%	0.0%	48.6%
暖房期間 快適時間率 (自然室温時)	日中	22.1%	30.1%	28.3%	38.3%	29.9%	40.8%
	夜間	8.6%	16.9%	17.2%	31.9%	20.7%	37.3%

*負荷削減率はH25基準の断熱性能を持つ本システム未搭載住宅を基準として比較した。

6. まとめ

本報では、全国を対象として本システム搭載住宅の地域別適応可能性について CFD 解析を用いた検討を行った。1~3 地域では負荷削減効果が小さく、暖房負荷削減率は 25~36%、快適時間率は 21~28%の向上にとどまったのに対し、4~7 地域では 63~77%の暖房負荷が削減され、快適時間率は 34~66%向上することが明らかになった。

*1 : 本システムはパッシブ手法であるため、許容範囲を広めにとり暖房期のうち居室 PMV が 1-1 (PPD 約 28%) におさまる時間の割合を快適時間率とした。PMV の算出に当たっては met=1.1, clo=1.0, RH=40% とし、風速は流入風速を気積の 2/3 で除した値とした。また MRT は面積加重平均室温とした。

[参考文献] 山本 龍, 空気を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 1-5 報, 空気調和・衛生工学会学術講演集 2016.9