

太陽エネルギー活用型ヒートポンプ暖冷房換気給湯システム搭載住宅のエネルギー自給率向上に関する研究

(その1) エネルギー自給率向上に向けた冬期シミュレーション構築とケーススタディ

Study on Improving the Energy Independence of House by Using Air-Conditioning and Hot-Water Supplying System Utilizing PVT Air Collector & Heat Pump for Houses

Construction of Winter Simulation and Case Studies for Improving the Energy Independence

学生会員 ○高橋 勇斗 (東京大学) 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 盧 炫佑 (OM ソーラー)

Yuto TAKAHASHI*¹ Masayuki MAE*¹ Kozo TAKASE*² Hyunwoo ROH*³

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

This study shows about PVT air collector and heat pump system for domestic air conditioning ventilation and hot water supply in houses. This article shows construction of simulations using CFD and thermal network calculations, and case studies with simulations to improve the energy independence.

1. はじめに

近年、戸建住宅の省エネルギー化が求められており、戸建住宅における省エネルギー基準の引き上げや、省エネルギー基準への適合義務化が進められている。これらの流れを受けて、戸建住宅の高断熱化や設備の高効率化が促進されていることに加え、熱中症やヒートショック等の熱的健康快適性への関心の高まりを背景に、様々な全館空調システムが提案されている。

本研究では全館空調システムの中でも太陽エネルギーを最大限活用しエネルギー自立を目指す「太陽エネルギー活用型ヒートポンプ暖冷房換気給湯システム (以下、本システム)」を研究対象とし、本システム搭載住宅のエネルギー自給率評価および自給率向上に向けて、室温・熱負荷シミュレーションの構築と本システム搭載住宅の設計・運用要素をパラメータとしたケーススタディを行うことで、エネルギー消費やエネルギー自給の傾向を明らかにすることを本研究の目的とする。特にエネルギー消費が大きく、エネルギー消費と太陽エネルギー活用のピークが異なる冬期の室温・熱負荷シミュレーション構築とケーススタディを行った。

2. システム概要

本システムは (表 1、図 1) ダクト式全館空調システムの 1 種である。図 2 のように本システムは挙動し、屋根面に設置された Photovoltaic and Thermal (以下、PVT) で太陽光発電および太陽熱集熱をすることで太陽エネルギー利用の最大化を目指しながら、1 台のヒートポンプ (以下、HP) による暖冷房・給湯沸上を行う。これにより、冷房時の排熱を利用した給湯沸上といったエネルギー消

表 1: 本システム能力概要

冷房	定格冷房能力[kW]	4.0	換気	定格換気風量[m ³ /h]	200
	定格冷房消費電力[kW]	1.115		定格消費電力[W]	65
	エネルギー消費効率	3.59		温度交換効率[%] (夏期/冬期)	80 / 90
暖房	定格暖房標準能力[kW]	4.0	給湯	全熱交換効率[%] (夏期/冬期)	75 / 85
	定格冷房標準消費効率[kW]	0.905		タンク容量[L]	370
	定格暖房低温能力	4.70		冬期高温消費電力[kW]	1.35
	定格暖房低温消費電力[kW]	1.700		中間期標準消費電力[kW]	1.06
	エネルギー消費効率	4.00			

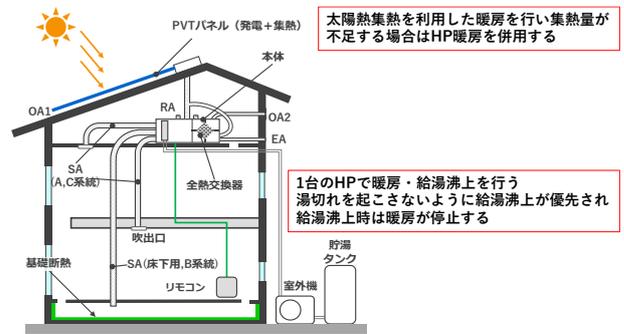


図 1: 本システム概要

	0時	6時	12時	18時	23時
太陽熱集熱利用		太陽熱集熱により暖められた取り込み外気の温度が基準を越え、リターン空気の温度が25℃以上の時に稼働する			
HP暖房	室温が設定温度となるようHP暖房を行う	太陽熱集熱だけでは暖房熱量が不足する場合はHP暖房を行う		室温が低下してくるとHP暖房を行うがHP給湯沸上と併用不可	
HP給湯沸上			日中太陽エネルギーを利用できる時にHP給湯沸上を行う	夜間もHP給湯沸上を行うが湯切れを防ぐためHP暖房よりHP給湯沸上が優先される	

図 2: 本システム冬期挙動イメージ

費の高効率化やシステムのコンパクト化、コストダウンが可能である。しかし、給湯沸上時は暖房を行うことができないため、太陽熱利用や断熱によって、給湯沸上時に室内温熱環境を快適範囲に維持することが重要となる。暖房時において空調空気は主にB系統の送風ファンから

床下用ダクトを通じて床下を送る（夏期に使用する A,C 系統からの給気も併用可能）が、空調空気は住戸内を循環した後、本体に内蔵された第一種全熱交換換気機能で熱回収を行い排気する。晴天時は PVT パネルによる太陽熱集熱を利用した暖房を行い、集熱量が不足する場合や夜間は HP 暖房を行う。本システムの運転制御について、主居室に設置された本システムのリモコンセンサが感知した温度に応じて、送風温度と合計風量が制御され熱負荷が発生する。また、各居室で送風量や送風温度は制御できないため主居室以外の室温は成り行きで決定される。

3. シミュレーション構築

3.1 シミュレーション全体概要

構築したシミュレーションフローを図3に示す。シミュレーションは主に熱回路網計算を用いて行うが、一部 CFD で空間空気循環量・経路を導出し、全館空調システム特有の空調経路を熱回路網計算上で入力する。本研究ではパッシブ標準プランをもとに作成した建物・街区モデル（表2、図4,5）を用いて、形状や規模についてより一般的なモデルでシミュレーション構築とケーススタディを行った。また、実測物件を参考に空調計画（図6）を作成した。空調時の風量合計は本システム全体風量上限とダクトによる圧損を考慮して設定し、B 系統は $400\text{m}^3/\text{h}$ 、それ以外の空調系統の組み合わせは $600\text{m}^3/\text{h}$ とする。各空調系統風量比は本システムファン風量比率から設定し、同空調系統内の吹出口風量は吹出口のある居室の床面積比から決定する。換気風量は常時 $200\text{m}^3/\text{h}$ とした。

3.2 CFD 解析条件

CFD の解析条件を表3に示す。標準年拡張アメダス気象データ（2010年版）の東京（6地域）において最低外気温度計測時を解析対象日時として定常解析を行い、解析結果を用いて空調経路を決定する。

3.3 熱回路網計算 解析・制御条件

熱回路網計算における計算条件を表4に示す。標準年拡張アメダス気象データ（2010年版）の東京（6地域）を用い、解析期間は1/1~2/28（解析助走期間は12/1~12/31）、解析間隔を1時間とした。なお、シミュレーション構築に用いた熱回路網計算ツールの制約上、今回は機器能力上限を設定していない。今後のシミュレーション精緻化における課題とする。本システムの太陽熱集熱利用の制御条件を図7に示す。「①8:00~16:59」、「②PVT 相当外気温度 > 設定温度 × 0.9」、「③リターン空気温度 ≤ 25°C」という3つの条件を満たした時太陽熱集熱利用が稼働するように制御を入力した。本システムの給湯沸上の制御条件を図8に示す。貯湯槽を10ブロック分割し、「12:00~15:59に8番目の貯湯槽ブロックの温度が65°C以下または20:00~23:59に2番目の貯湯槽ブロックが、45°C以下」という条件を満たした時、給湯沸上が稼働し、暖房が停止するように制御を入力した。

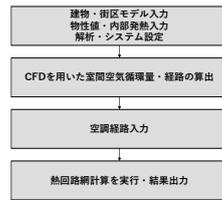


図3：シミュレーションフロー



図4：建物モデル

表2：建物モデル概要

建物モデル	パッシブ標準プラン
構造種別	木造2階建て
屋根方式	切妻
勾配	南側4寸、北側5.3寸
底長さ	全方位600mm
所在地	東京23区（6地域）
断熱方式	屋根断熱 大壁充填断熱 基礎断熱
PVTパネル積載量	8.2kW (クワトロDM410W×20)

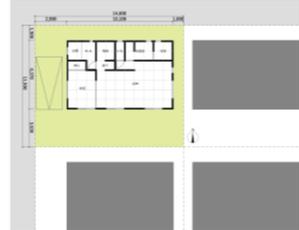


図5：街区モデル

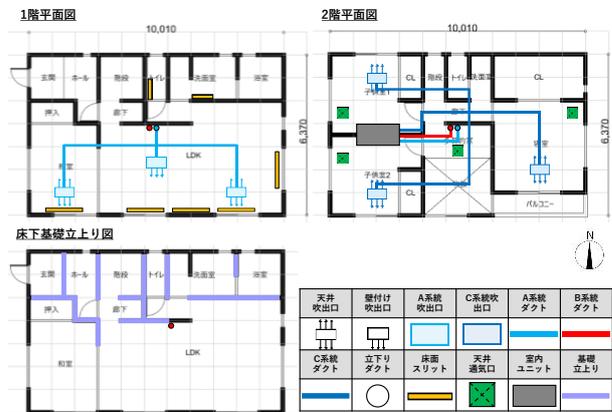


図6：空調計画

表3：CFD 解析条件

解析ソフト	FlowDesiner2021
建物モデル	パッシブ標準プラン
流体モデル	標準k-εモデル
メッシュ数	約9,500,000メッシュ
解析領域	x,y,z:10.0m,6.4m,7.3m
解析対象条件	(定常) 1.0×10 ⁻⁵ -5.0
解析対象日時	1/2 6:00
境界条件	外気温: -0.3°C 土中温度: 16.9°C
流入条件	吹出風量: 400m ³ /h B系統以外の空調系統組み合わせ: 600m ³ /h 吹出温度: 51.4°C B系統以外の空調系統組み合わせ: 41.6°C
流出条件	室内ユニット吸込口から400m ³ /h (または600m ³ /h)
内部発熱量	住宅専業主の判断基準のもとに作成

表4：熱回路網計算解析条件

解析ソフト	EESLSIM7.2	
建物モデル	パッシブ標準プラン	
気象データ	標準年拡張アメダス気象データ (2010年版) 東京（6地域）	
解析期間	1/1~2/28（助走期間12/1-12/31）	
解析間隔	1時間	
システム運転設定	暖房運転	24時間運転（給湯沸き上げ時停止） 設定温度: 22°C B系統使用時風量: 400m ³ /h B系統以外の空調系統組み合わせ使用時風量: 600m ³ /h
	換気運転	24時間運転 全熱交換換気時換気量200m ³ /h 太陽熱集熱時換気量: 200m ³ /h 4人（夫婦+子供2人）
家賃構成	給湯量・スケジュール	
在室スケジュール	住宅専業主の判断基準のもとに作成	
内部発熱量・スケジュール		

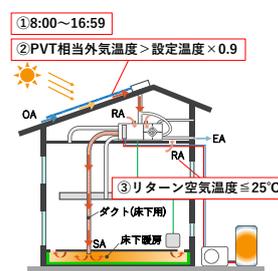


図7：太陽熱集熱の制御条件

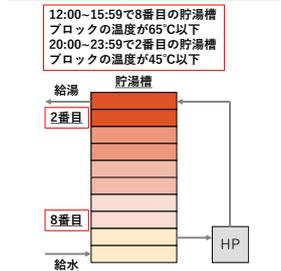


図8：給湯沸上の制御条件

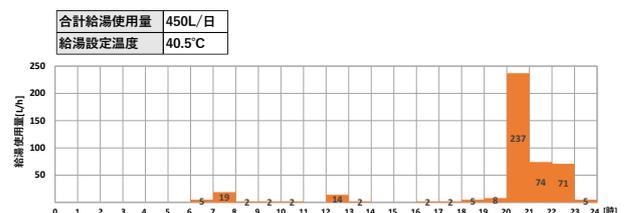


図9：給湯使用条件

3.4 消費電力算出概要

HP 暖房消費電力については平成 28 年省エネルギー基準に準拠したエネルギー消費性能の評価に関する技術情報（住宅）現行版における、ダクト式セントラル空調機のエネルギー消費性能の算定方法を用いた。HP 給湯沸上消費電力については表5に示す各外気温のCOPを線形補正したものを用いて算出した。また、ファン消費電力については図 10 を用いて各風量から算出した。

表 5：給湯沸上 COP

	外気温	COP
冬	7°C	3.32
中間期	16°C	3.77
夏	25°C	4.70

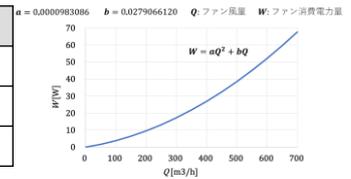


図 10：ファン風量-消費電力曲線

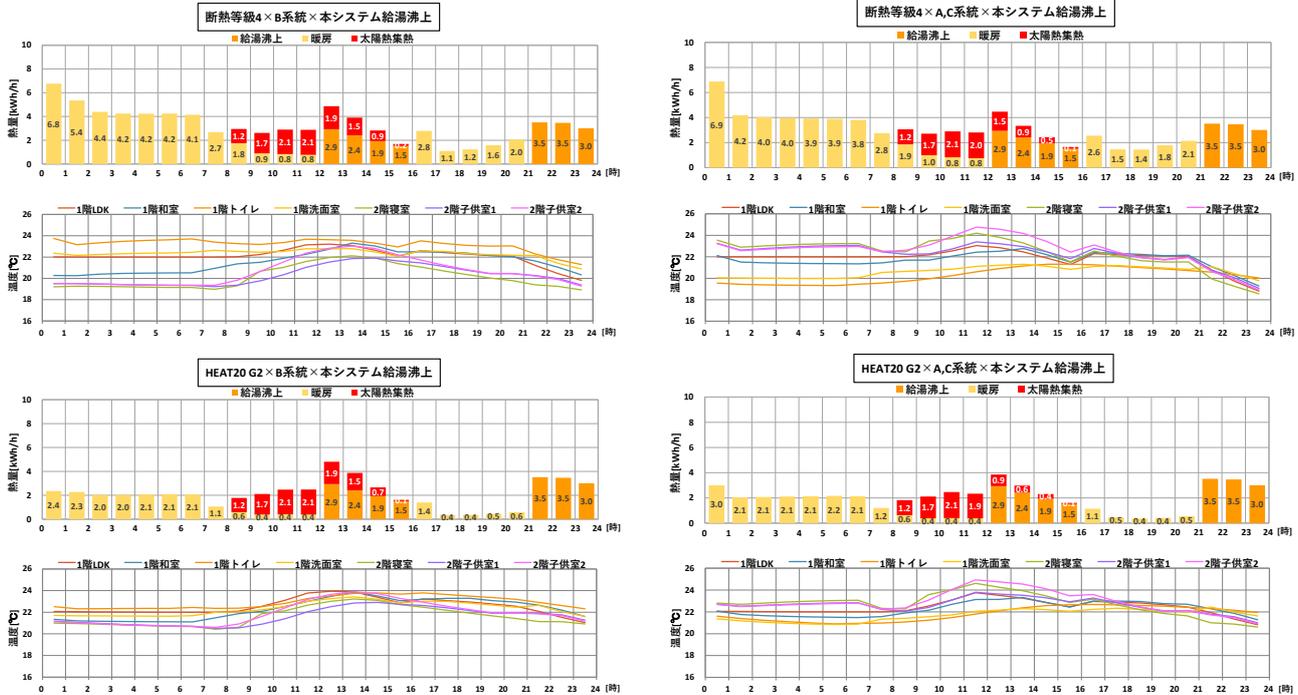


図 11：各ケース期間時刻別平均システム供給熱量・室温推移（1～2 月）

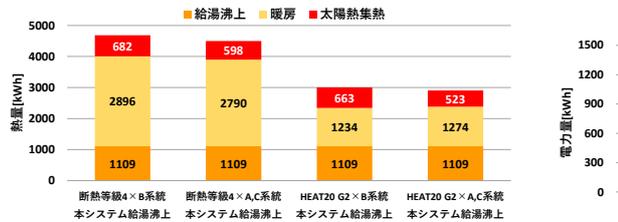


図 12：各ケース期間積算システム供給熱量（1～2 月）

4. シミュレーションを用いたケーススタディ

4.1 断熱性能×空調系統によるケーススタディ

本検討では断熱性能と空調系統をパラメータとしてケーススタディを行った。断熱性能は HEAT20 G2 レベル (U_A 値=0.46W/m²K) と断熱等級 4 レベル (U_A 値=0.81W/m²K) の 2 ケース、空調系統は B 系統と A,C 系統の 2 ケースで、計 4 ケースの比較を行った。各ケースの解析期間における時刻別平均システム供給熱量と室温推移の比較を図 11 に示す。HEAT20 G2 レベルの断熱性能であれば、いずれの空調系統において、給湯沸上時に暖房が停止していても各居室の室温が 20°C 以上と快適範囲に維持されており、設定温度に対する温度差も 1°C

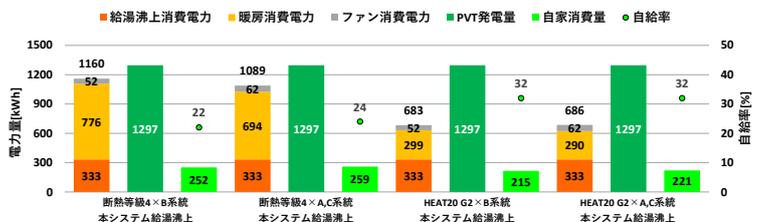


図 13：各ケース期間積算消費電力・自給率（1～2 月）

程度と小さかった。断熱性能 4 レベルの場合、0 時～7 時にかけて B 系統は 2 階居室の室温が、A,C 系統は 1 階居室が設定温度に対して 2°C 程度低く、また、暖房能力上限を超えて運転していることから、住戸全体を快適範囲に室温を維持できない恐れが示唆された。各ケースの解析期間におけるシステム供給熱量の積算値の比較を図 12 に示す。断熱性能が良いほど、空調系統による暖房熱量の差が小さかった。いずれの断熱性能においても、B 系統は A,C 系統に比較して太陽熱集熱量が大きい傾向にあり、B 系統使用時はより太陽熱集熱を利用できる可能性が示唆された。各ケースのシステム消費電力量と自給率の比較を図 13 に示す。なお、本研究ではシステム消

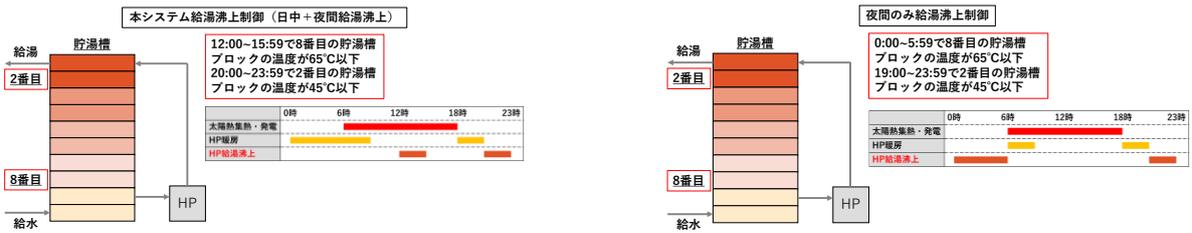


図 14：給湯沸上制御 ケーススタディ概要

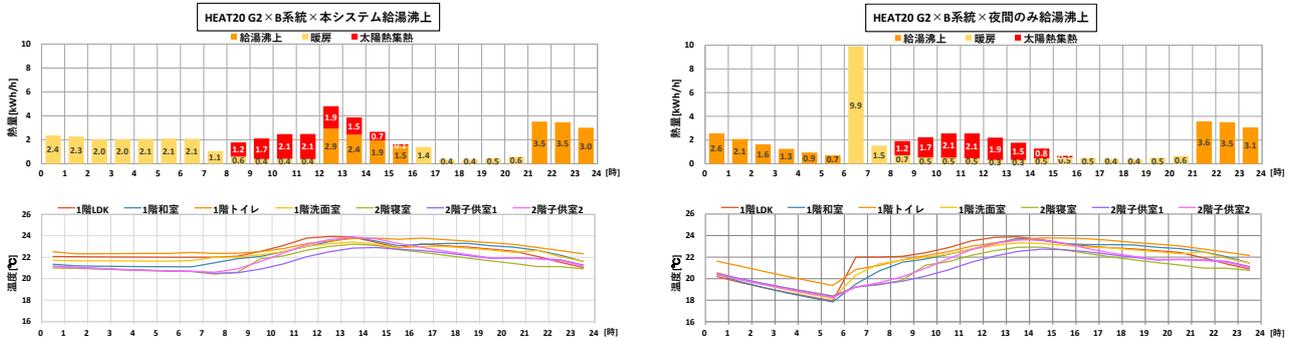


図 15：各ケース期間時刻別平均システム供給熱量・室温推移 (1~2月)

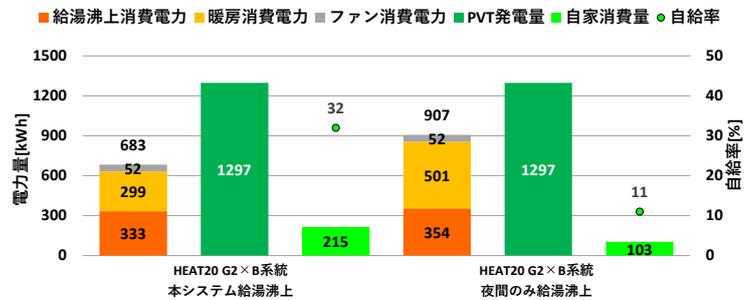
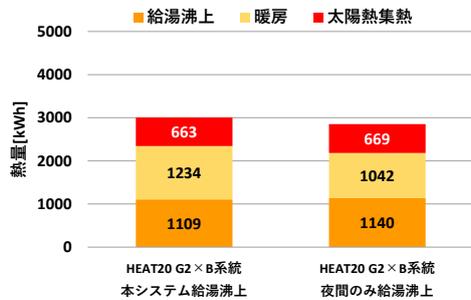


図 16：各ケース期間積算システム供給熱量 (1~2月)

図 17：各ケース期間積算消費電力・自給率 (1~2月)

費電力量に対して PVT の発電量が賄えた割合を自給率とし、家電等の消費電力は除いている。システム消費電力量や自給率は、断熱性能による差は見られたものの、空調系統による差は見られなかった。今後はこの指標を向上させるような、空調系統の運用方法も検討していく。

4.2 給湯沸上スケジュールによるケーススタディ

本検討では HEAT20 G2 レベルの断熱性能で B 系統使用時において、給湯沸上制御によるケーススタディを行った。図 14 に示すような本システム給湯沸上制御と夜間のみ給湯沸上を行う 2 ケースの比較を行った。なお、給湯使用は住宅事業主の判断基準をもとに作成したものを用いて同条件とした。各ケースの解析期間における時刻別平均システム供給熱量と室温推移を図 14 に示す。夜間のみ給湯沸上を行う場合、本システムの挙動と比較して 0 時~6 時にかけて給湯沸上が行われ暖房が停止しており、設定温度に対して 4°C 程度低下していた。また、LDK の室温が設定温度に対して大きく低下しているため、暖房稼働時に急激に暖房熱量が増加し、暖房上限能力を超えて非常に高負荷で運転する傾向が見られた。各ケースの解析期間におけるシステム供給熱量の積算値の比較は図 16 に示す通りである。各ケースのシステム消費電力量と自給率の比較を図 17 に示す。本システムの挙動の場合

は自給率が 32% 程度であったのに対して、夜間のみ給湯沸上を行う場合は 11% 程度であった。図 14 の本システムの挙動におけるシステム供給熱量の推移から、太陽光発電を行える日中に給湯沸上を行っていることがエネルギー自給率の向上に寄与していると推察され、本システムの給湯沸上制御によって太陽エネルギーをより活用できていると考えられる。

5. 総括

本研究では熱回路網計算と CFD を用いて本システム搭載住宅に近い挙動を再現した冬期シミュレーションを構築し、本システム搭載住宅の設計運用要素に関するケーススタディを行いエネルギー消費やエネルギー自給の傾向を明らかにした。

今後は年間へのシミュレーション構築の拡張とシミュレーションの精緻化を行い、エネルギー自給率向上に向けた検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 谷口景一朗, 新パッシブ標準プランの提案, 自立循環プロジェクトシンポジウム 2020,
 謝辞: 本研究は、「国土交通省サステナブル建築物先導事業 (省 CO2 先導型) 採択案件「オールタイム・リアル ZEH の推進 ~太陽熱を活用した『エネルギー自立』へ向けた取組み~」に係る技術検証」による成果の一部である。実測にご協力いただいた居住者、工務店をはじめとする関係者の皆様へ深く謝意を表します。