

Proposal of net-zero energy house by introducing environmentally friendly PV/T solar panels

Kohei TERASHIMA^{*1‡}Haruki SATO^{*2}Toshiharu IKAGA^{*3}

環境調和型 PV/T ソーラーパネルの導入による ゼロ・エネルギー・ハウス (ZEH) の提案

寺島 康平^{*1‡}佐藤 春樹^{*2}伊香賀 俊治^{*3}

Abstract

Solar energy would be the most important energy resource. The highest performance solar-energy receiver recorded utilizing 74.3 % of the solar energy in total of electricity and 40 °C hot water in summer, Yokohama, Japan, has already been reported in 2020 as a photovoltaic/Thermal (PV/T) solar panel. In this paper, the system design on introducing the PV/T solar panel to be a part of energy-supply system in a household and the simulation results are reported. Using a Monte Carlo simulation method, it can generate different energy demands at every 15 minutes through a year for various family members as the simulation calculation, while the results always follow the input existing statistics information. Not only solar-energy management in a household but also the environmental thermal load is evaluated. An example of the net-zero energy house having the best combination of the environmentally friendly PV/T and PV solar panels is presented in this paper.

Keywords: Solar energy, global warming, SDGs, PV, heat collection, PV/T solar panel

キーワード: 太陽光, 地球温暖化, SDGs, 太陽電池, 集熱, PV/T ソーラーパネル

1. はじめに

脱炭素社会の実現に向けて, 再生可能エネルギーの導入が進んでいる. その中でも太陽電池 (PV) の普及が加速しており, 世界の太陽電池容量が 2050 年には 4.6 TW 以上になると推測されている¹⁾. 一方で太陽日射下に置かれた太陽電池の発電効率は実質 15 % 程度であり, 残りの 6 倍近くの太陽エネルギーは外気温+30 °C 程度の高温のふく射熱や廃熱として大気をはじめ自然環境を温めている. 太陽電池からのふく射熱が周囲環境に与える影響については様々な研究²⁻⁶⁾が行われており, Barron-Gafford ら²⁾は大規模太陽電池プラントの上空温度が, 太陽電池を設置し

ていない土地と比較して 3~4 °C 上昇していることを明らかにしている.

家庭内エネルギー消費割合は, 日本では給湯・暖冷房が 5 割以上を占めている⁷⁾. これらの熱需要に対して太陽電池を用いて供給する場合, 電力を熱に変換する際に電力のもつ大きなエネルギー価値が利用されずに失われ, 発電時の廃熱も利用されずにそのまま環境に捨てられる結果となる. 太陽エネルギーを電力に変換し, かつ太陽エネルギーを熱にも変換して熱供給する設備が, 太陽エネルギーを主エネルギー源とする脱炭素社会の実現には望ましい. そこで太陽エネルギーを熱および電力として利用することができる PV/T (Photovoltaic/Thermal) ソーラーパネルの開発を行った⁸⁾.

*1 Faculty of science and technology, Keio University
3-14-1, Hiyoshi, Kohoku, Yokohama, Kanagawa, 223-8522, Japan
‡ e-mail: iheuko-tera@keio.jp

*2 Professor emeritus, Keio University

*3 Professor, Faculty of science and technology, Keio University

Received: November 1 2021, Accepted: January 9 2022

*1 慶應義塾大学院 理工学研究科
(〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)
‡ e-mail: iheuko-tera@keio.jp

*2 慶應義塾大学 名誉教授

*3 慶應義塾大学理工学部 教授

(原稿受付: 2021 年 11 月 1 日, 受理日: 2022 年 1 月 9 日)

このPV/Tソーラーパネルは、太陽電池に減圧沸騰集熱器（サーモサイフォン）を組み合わせ、パネル内部に置かれたPVモジュール及びパネル内部の空気から集熱して冷却するとともに適切な温度の熱供給を行う。そして、カバーガラスでふく射熱を内部に反射して大気をはじめとする自然環境への熱負荷を抑えることができる。本論文では、このPV/Tソーラーパネルの導入およびその実用化を行う熱電供給設備のシミュレーション計算を紹介することでゼロ・エネルギー・ハウス（ZEH）のシステムデザインによる提案を行う。

最終目標として、このPV/Tソーラーパネルを用いて冷房供給も行えるように、温熱を冷熱に変換するエジェクタ冷凍サイクルの開発⁹および植物の葉を模倣した多孔質セラミックスを用いた冷却装置の開発¹⁰も進めており、PV/Tソーラーパネルの冷却機能として開発を進めている。本論文では、その研究成果も考慮した提案を行う。

様々な種類のPV/Tソーラーパネルが現在までに世界各国で開発され、エネルギー供給シミュレーションによってその有効性が報告¹¹⁻¹⁵されている。本論文では自然環境への熱負荷も評価する視点を取り込み、環境調和型PV/Tソーラーパネルの導入により、4人家族構成の戸建住宅における一年間のエネルギー需要を賄える熱電供給設備のシステムデザインを試み、ゼロ・エネルギー・ハウスの可能性をシミュレーション計算により検証することで、その提案を行うものである。

2. 太陽エネルギー熱電供給のシステムデザイン

2.1 PV/Tソーラーパネル

PV/Tソーラーパネルに関しては既に報告した⁸。PV/Tソーラーパネルの写真と縦方向の断面の概要をFig. 1に示す。このPV/Tソーラーパネルは大学で開発研究しており、既製品のCIS（Copper-Indium-Selenium）PVモジュールとパネル内部のふく射熱を反射するエンボス加工を施したカバーガラス、本研究グループで開発してきた減圧沸騰集熱装置（Fig. 1のCondenser, Aluminum plate-like fin, Copper pipe and Header pipe）を組み合わせた性能試験用のPV/Tソーラーパネルである。このパネルの特徴として以下の特徴が挙げられる。

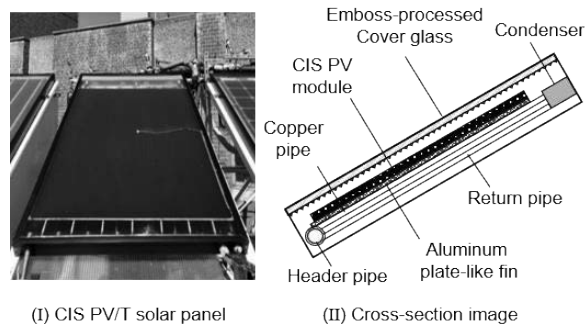
（1）サーモサイフン的一种である減圧沸騰集熱装置を用いており、集熱のための動力が不要で、伝熱媒体の熱交換経路（Fig.1のCondenser）も1 m程度と短く、伝熱損失を抑制でき、ポンプ動力も小さくなる。

（2）裏面に内部からの熱放射を外部に放出できないように反射する小さなブリズムを並べた形状のエンボス加工を施したカバーガラスを用いることで、内部に置かれたPVモジュールからのふく射熱を反射して、自然環境への熱負荷を抑制できる¹⁶。

（3）PVモジュール裏面に接着した減圧沸騰集熱装置で熱を効率的に吸収し、さらにパネル内部の空気全体が自然対流によって循環しやすくすることで、集熱効率の向上とカバーガラスを含むパネル躯体全体の冷却効果を高め、パネル全体の温度を周囲環境温度に近づけ、パネル外部への熱損失を抑制している。

（4）CIS太陽電池を採用することで、幅広い光波長域で発電が可能となり、そして高温においても発電効率が低下しにくい。

以上の特徴から、このパネルは夏季において40℃温水供給時に太陽エネルギーの74.3%の利用を記録し¹⁷、パネル内部に収められているPVモジュールの表面温度が60℃程度となっても、カバーガラスは周囲壁面とほぼ同じく45℃程度であった。



(I) CIS PV/T solar panel (II) Cross-section image
Fig. 1 Photo and Cross-section image of CIS PV/T solar panel.

2.2 太陽エネルギー熱電供給設備

2.2.1 設備概要

Fig. 2に太陽エネルギー熱電供給設備の概要を示す。本研究では、一例として夫婦（40代）および子供二人（小学生・中学生）で構成される、延床面積が126.6 m²の戸建住宅を想定した。本システムではPV/Tソーラーパネルを4枚連結する（8 m²）と仮定して、パネル設置可能面積を32 m²に設定した。

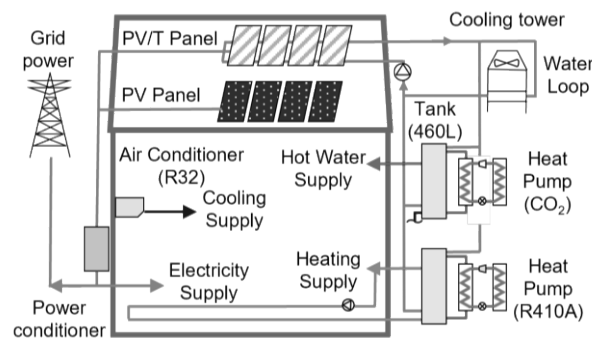


Fig. 2 Solar electricity and heat supply system.

日射時には伝熱媒体である水を熱交換器（Fig. 1のCondenser）内に流すことで温水出力させる。温水は給湯用もしくは暖房用貯湯槽に貯蔵し、温水を必要としない場合は、冷却塔を用いてPV/Tソーラーパネルを冷却することで、発電効率を向上させ、かつ環境への熱負荷を抑制する。冷却塔・給湯用貯湯槽・暖房用貯湯槽とPV/Tソーラーパネルは一つのポンプを介して接続されており、各時刻でどの回路で運転するかを判断する。給湯・暖房需要が発生した際には、貯湯槽から供給を行い、太陽熱では足りない場合は、補助電力を用いるヒートポンプで貯湯槽内の温水を加熱して供給する。電力供給は、ソーラーパネルで発電したものをパワーコンディショナーによって交流電力に変換して供給する。太陽光発電電力が余った場合は外部系統電力へ

売電し、夜間や悪天候時などの発電できない時間帯には外部系統電力から電力を戻す(購入する)ことを想定した。

2.2.2 シミュレーション条件

Table 1 に条件設定を示す。本研究では、東京都の最新の気象データである 2020 年のデータ¹⁸⁾を用いる。なお住宅の断熱性能は、次世代省エネ基準とされている Heat 20 G2 相当の値¹⁹⁾を熱損失係数として設定し、全館暖冷房を行うこととした。貯湯槽の容量は給湯・暖房共に 460 L とし、給湯用ヒートポンプ (CO₂ 作動流体のエコキュート) は、一日の給湯負荷の基準を修正 MI モード(需要温度: 40 °C, 450 L/day)とし、加熱能力を 6 kW、暖房用給湯ヒートポンプ (R-410A 作動流体) は加熱能力を 12 kW とした。なお、給湯用ヒートポンプは低温の水を高温にする際に高効率な CO₂ 作動流体を、暖冷房用ヒートポンプには昇温幅が小さい時に有効な R-410A 作動流体 (暖房用)、R-32 作動流体 (冷房用) を用いる。暖房は暖房用貯湯槽の温水をポンプで屋内に送水して床暖房を行うとし、冷房はエアコンによって行うと想定した。また暖房設定温度は 21 °C、冷房設定温度は 27 °C とし、給湯ヒートポンプの出力温度は余裕をもたせて少し高温の 65 °C、暖房ヒートポンプの出力温度は 40 °C とする。

また当然蓄電設備の導入も想定しているが、ここでは産業界や事業所などで昼の電力需要が大きいこと及び連携による安全性確保の必要性もあり、敢えて外部系統電力とのやりとりでシミュレーション計算を行う。但し、蓄電設備容量の検討も行う。

本研究では、PV/T ソーラーパネルと PV ソーラーパネルの併用を想定した PV/T ソーラーパネルの最適導入割合の検討、蓄電設備容量の検討、冷却塔の環境熱負荷削減効果の検討を行う。

3. シミュレーション方法

3.1 モンテカルロ法による需要シミュレーション

Table 1 の条件設定で 4 人家族が暮らす戸建住宅における一年間のエネルギー需要を、モンテカルロ法を用いた各住人の 15 分ごとの行動スケジュール²⁰⁾に基づいてシミュレーションを行った。住人の行動を既存の統計情報に一致するように制約を設けて乱数発生させ、その行動から給湯・暖冷房・厨房・非熱電力需要 (照明や家電に使用する電力需要) などの電力・熱需要を求めた。計算の詳細は、本研究グループの橋本らがまとめており²¹⁾、需要を各種統計情報と矛盾無く高精度に算出できることを確認している。

さて、住人の行動は、外出・睡眠・食事・入浴・調理・その他に分類される。これらの行動から、下記の計算を行った。

(1) 住人の行動から在室の有無を判断し、部屋設定温度に室温を調整するとした際の暖冷房に必要な熱量を、設定した住宅の熱損失係数を用いて計算する。なお本研究では、外気温が暖房設定温度を下回る場合、および外気温が冷房設定温度を上回る場合に暖冷房を行うと仮定しており、現状の冷房用電力消費量よりも省エネルギー利用した場合の予測計算となっている。

(2) 住人が在室している場合は照明や家電を使用するとし、テレビ等の電力消費量から必要な電力量を計算する。

(3) 入浴の行動では、入浴時間によって使用湯量を決定し、必要な熱量を計算する。

(4) 調理の行動では、世帯人数分の料理を作るために必要な熱量を計算する。

本研究で想定した戸建住宅の月ごとの需要計算結果を Fig. 3 に示す。需要は給湯・暖房・冷房・厨房・非熱電力需要の 5 種類で示している。暖冷房や給湯の需要は外気温の影響を受けるため、季節によって大きく変動する。冷房需要は全体の 3.7 % と小さいが、本研究では全館暖冷房を行う設定のため、暖房需要が全体の 47.6 % を占めている。一方で、厨房需要 (平均 4.07 MJ/day) や非熱電力需要 (平均 26.1 MJ/day) は季節によらずほぼ一定である。

Table 1 Simulation settings

Family structure	Husband and wife (Forties) with 2 children	
Weather	Tokyo, 2020	
Total floor area	126.6 m ²	
Total panel area	32 m ²	
Heat loss coefficient	1.4 W·m ⁻² ·K ⁻¹	(HEAT20 G2)
Heating and cooling	All room	
Heating (R410A heat-pump)	Capacity :	12 kW
	Power consumption :	2.2~3.7 kW
	Set temp. :	40 °C
Cooling (R32 air conditioner)	Capacity :	2~7 kW
	Power consumption :	0.24 kW~1.4 kW
	Set temp. :	27 °C
Hot water supply (CO ₂ heat pump)	Capacity :	6 kW
	Load :	450 L/day (Demand temp: 40 °C)
	Power consumption :	1.1~3.6 kW
	Set temp. :	65 °C
Cooking	IH heater	
PV panel	CIS panel (Model number: SFK-185S)	
Inclination angle	South direction, 30°	

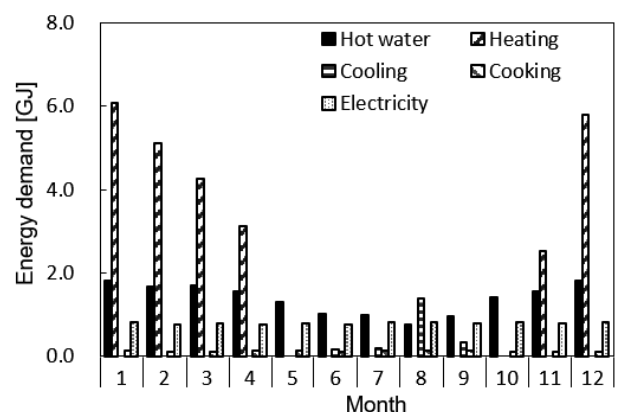


Fig. 3 Monthly demand of the simulation in 2020.

3.2 熱・電力の需給計算

システムの熱・電力の需給計算は、(1) PV/T ソーラーパネルおよびPV パネルの集熱・発電と(2) 需要に対する供給計算に分かれる。システムの集熱・発電の計算は以下の手順で行う。

(1) 給湯用貯湯槽・暖房用貯湯槽において、0時を基準として、その日の熱需要が満たせるかを判断する。判断基準は、貯湯槽内熱量が前日の需要熱量の1.2倍に達するように余裕をもって判断する。

(2) 上記(1)の条件を満たしていない場合は、まずPV/T ソーラーパネルで集熱を行う。集熱は、使用頻度が高く設定温度の低い暖房用貯湯槽を優先し、次に給湯用貯湯を開始する。PV/T ソーラーパネルからの出湯温度は、暖房は40℃、給湯は60℃を目標とし、これらの出湯温度を満たすように伝熱媒体である水の流量制御を行う。

(3) 上記(1)の条件を満たしている場合は、冷却塔を利用してPV/T ソーラーパネルを冷却する運転に切り替える。

需要に対する供給計算は以下の手順で行う。

(1) 給湯用貯湯槽・暖房用貯湯槽において、その時刻における需要に対して供給できるかを判断する。

(2) 供給が可能な場合は、その需要分の熱量を各貯湯槽から供給する。

(3) 貯湯槽内の熱量が足りない場合は補助熱源である電動ヒートポンプで貯湯槽内の温水を加熱して供給する。なお供給最低温度を、給湯は55℃、暖房は30℃とし、この温度を下回る場合は電動ヒートポンプを稼働させる。

(4) 電力需要に対しては、PV/T およびPV ソーラーパネルの発電電力を、パワーコンディショナーで交流電力に変換して供給する。発電量が不足する場合や、夜間の発電をしていない時間帯では、外部系統電力から電力を購入し、電力需要よりも発電量が多い場合は、余剰分を売電する。なお本研究では、パワーコンディショナーの変換効率を96.5%と仮定した²⁾。

3.2.1 PV/T ソーラーパネルの集熱・発電量の計算

本研究で想定したPV/T ソーラーパネルの内部水平断面構造をFig. 4に、PV/T ソーラーパネルの集熱・発電量の計算に用いる各パラメータをTable 2に示す。

PV/T ソーラーパネルの集熱量 Q_{PVT} は、実験結果から求めた以下の式で計算する。この式は集熱器の性能評価に用いられる集熱効率線図のJIS²³⁾に基づいて算出した。

$$Q_{PVT} = G(0.510 - 7.88 \frac{T_{PVT,in} - T_a}{G}) \quad (1)$$

PV/T ソーラーパネルの発電量 P_{PVT} は式(2)で計算した²⁴⁾。

$$P_{PVT} = G\tau\eta_{ref}\{1 - \beta(t_p - 25)\} \quad (2)$$

ここで日射透過率 τ は式(3)で計算した²⁵⁾。

$$\tau = \tau_{ref} \left\{ 1 - 0.1 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \right\} \quad (3)$$

式(2)はPV パネルの発電量計算式に、PV/T ソーラーパネル表面のカバーガラスの日射透過率 τ を考慮して追加した式である。

ここで式(2)に示すPV モジュール温度、すなわちPV/T ソーラーパネル内にあるPV モジュールの温度が未知であるため、熱収支式から求める。熱収支式はPV/T ソーラーパネル表面のカバーガラスの式と内部PV モジュールの式を用いる。パネル表面のカバーガラスの熱収支式を式(4)に示す。

$$Ga - h_{r,g-a}(T_g - T_{sky}) - (h_{c,p-g} + h_{r,p-g})(T_g - T_p) - h_{c,g-a}(T_g - T_a) = 0 \quad (4)$$

内部PV モジュールの熱収支式を式(5)に示す。

$$G\tau - (h_{c,p-g} + h_{r,p-g})(T_p - T_g) - (h_{c,p-b} + h_{r,p-b})(T_p - T_b) - P_{PVT} - PF \cdot Q_{PVT} = 0 \quad (5)$$

パッキングファクター PF は次式のようにPV/T ソーラーパネルの面積とPV モジュール面積の比で表される。このパッキングファクターを用いることで、PV/T ソーラーパネルで回収された熱量の内、内部PV モジュール分の熱量を計算する。

$$PF = \frac{A_p}{A_{PVT}} \quad (6)$$

まず内部PV モジュール温度を仮定し、式(4)からカバーガラスの温度 T_g を求め、それに基づいて式(5)から内部PV モジュール温度 T_p を計算し、仮定した内部PV モジュール温度との偏差を求める。仮定する内部PV モジュール温度を0.1℃ずつ変化させ、この偏差が0.1℃以内になるまで収束計算を行う。ここで求めた内部PV モジュール温度を用いて式(2)から発電量 P を計算する。

またカバーガラスと外気の対流熱伝達率 $h_{c,g-a}$ は以下の式で求める²⁶⁾。

$$h_{c,g-a} = 2.8 + 3.0v \quad (7)$$

天空温度 t_{sky} は以下の式で計算する²⁷⁾。

$$t_{sky} = 0.0552t_a^2 \quad (8)$$

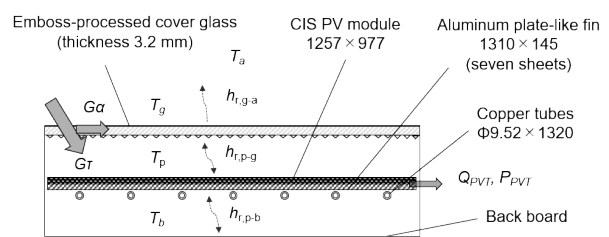


Fig. 4 The horizontal cross-section structure of a PV/T solar panel.

Table 2 Parameters of PV/T solar panel

PV panel	SFK-185S (CIS)
Temperature coefficient β	0.0033 K ⁻¹
Cover glass transmittance τ_{ref}	0.91
Nominal PV efficiency η_{ref}	15.1 %
Packing factor PF	0.93
PV panel emissivity ε_p	0.90
Cover glass emissivity ε_g	0.90
Back board emissivity ε_b	0.90

放射熱伝達率の $h_{r,g-a}$, $h_{r,p-g}$, $h_{r,p-b}$ はステファン・ボルツマンの式から以下で求める。

$$h_{r,g-a} = \sigma_{eff,g-a} \frac{T_g^4 - T_a^4}{T_g - T_a} \quad (9)$$

$$h_{r,p-g} = \sigma_{eff,p-g} \frac{T_p^4 - T_g^4}{T_p - T_g} \quad (10)$$

$$h_{r,p-b} = \sigma_{eff,p-b} \frac{T_p^4 - T_b^4}{T_p - T_b} \quad (11)$$

また各有効放射定数は以下の式で表される。ここで天空熱放射率 ε_a は1.0とする。

$$\sigma_{eff,g-a} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_a} - 1} \quad (12)$$

$$\sigma_{eff,p-g} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1} \quad (13)$$

$$\sigma_{eff,p-b} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_b} - 1} \quad (14)$$

パネル内部の熱伝達率 $h_{c,p-g}$, $h_{c,p-b}$ は以下の式で求める。

$$h_{c,p-g} = \frac{\lambda_a}{L_{p-g}} \quad (15)$$

$$h_{c,p-b} = \frac{\lambda_a}{L_{p-b}} \quad (16)$$

λ_a は $0.0241 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ とし、 $h_{c,p-g}$ で用いる上部空気層の厚み L_{p-g} は 0.01 m 、 $h_{c,p-b}$ で用いる下部空気層の厚み L_{p-b} は 0.03 m として計算する。

3.2.2 電動ヒートポンプの電力消費量の計算

ヒートポンプは作動流体ごとにCOPの近似式を作成して電力消費計算に用いる。出力温度条件を、暖房用貯湯は 40°C 、冷房は 27°C 、給湯は 65°C とし、外気温を 5°C 刻みで変化させたときの理論COPを計算し、この計算結果から近似式を作成する。なおヒートポンプの圧縮機効率 η_{com} はカタログ値から計算しており、 CO_2 作動流体は 58.3% ²⁸⁾、 R410A 作動流体は 63.9% ²⁹⁾、 R32 作動流体は 55.4% ³⁰⁾として計算した。式(17)から式(19)に各ヒートポンプのCOPの近似式および想定使用範囲を示す。

CO_2 作動流体（給湯用ヒートポンプ）の場合のCOP
(想定使用範囲：外気温 $-5 \sim 30^\circ\text{C}$ 、給水温度 $0 \sim 35^\circ\text{C}$)

$$COP_{\text{CO}_2} = \eta_{com} (6.31 - 3.79 \times 10^{-3} t_{HP,in}^2 + 0.192 t_a) \quad (17)$$

R410A 作動流体（暖房用給湯ヒートポンプ）の場合のCOP
(想定使用範囲：外気温 $-5 \sim 20^\circ\text{C}$)

$$COP_{\text{R410A}} = \eta_{com} (5.26 + 3.70 \times 10^{-3} t_a^2 + 0.122 t_a) \quad (18)$$

R32 作動流体（冷房用ヒートポンプ）の場合のCOP
(想定使用範囲：外気温 $28 \sim 40^\circ\text{C}$)

$$COP_{\text{R32}} = \eta_{com} (67.9 + 0.028 t_a^2 - 2.59 t_a) \quad (19)$$

3.2.3 冷却塔の電力消費量計算

冷却塔は文献³¹⁻³²⁾から、電力消費量の推定を行う。冷却塔の空気側の温度効率 γ は以下の式で表される。

$$\gamma = \frac{Q_{cooling}}{m_a (h_{sw} - h_{ai})} \quad (20)$$

また冷却塔の水側の交換熱量 $Q_{cooling}$ は以下の式で表される。

$$Q_{cooling} = m_w c_w (T_{cooling,in} - T_{cooling,out}) \quad (21)$$

式(20)の温度効率 γ は以下の式で表される。

$$\gamma = \frac{1 - e^{-NTU(R_h - 1)}}{1 - R_h e^{-NTU(R_h - 1)}} \quad (22)$$

$$R_h = \frac{m_w c_w}{m_a c_a} \quad (23)$$

$$NTU = \phi \left(\frac{m_w}{m_a} \right)^{0.6} \quad (24)$$

本研究で想定した冷却塔の仕様をTable 3に示す。冷却塔では、PVTソーラーパネルから出力された温水を環境水温度まで低下させると仮定し、水の質量流量はパネル4枚あたり $0.16 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ として計算する。まず式(21)から交換熱量を求め、式(20)から温度効率を算出する。その後風量を仮定し、式(22)~(24)で温度効率を決定する。以上で求めた2つの温度効率の差が 0.05 以内になる風量を求める。インバータ制御を行うと仮定すると、決定した風量から、冷却塔の電力消費量 $E_{cooling}$ は以下の式で表される。

$$E_{cooling} = E_{cooling,ref} \left(\frac{m_a}{m_{a,ref}} \right)^3 \quad (25)$$

Table 3 Parameters of cooling tower

Model	SBC-P3ES5L
Cooling heat amount	13.6 kW
Water flow rate	$0.65 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Air flow rate	$0.54 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Power consumption	0.05 kW
Cooling tower coefficient	0.6

3.2.4 貯湯槽の計算

貯湯槽の温度計算は、貯湯槽内を10層に分けることで、温度分布を再現する。ヒートポンプを稼働する場合は、貯湯槽下層の低温の温水をヒートポンプに導入して、加熱後に貯湯槽上部に戻す。熱供給を行う場合は貯湯槽上部から供給し、給湯の場合は貯湯槽下部に供給した分の水道水を補給し、暖房の場合は使用後の低温になった水を貯湯槽下部に追加する。貯湯槽の計算は式(26), (27)で行う。層ごとに、流入した温水と元々存在する温水の温度と体積、外気への熱損失から新たな水温を算出する。なお貯湯槽の熱損失は $2.84 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$ とする³³⁾。

$$\rho_w c_w V_{layer} \Delta T_m = \rho_w c_w V_{in} (T_{m-1} - T_m) + K(T_a - T_m) \quad (26)$$

$$\rho_w c_w V_{layer} \Delta T_m = \rho_w c_w V_{in} (T_{m+1} - T_m) + K(T_a - T_m) \quad (27)$$

3.2.5 ポンプ動力の計算

太陽エネルギー熱電供給システムに用いるポンプ動力 E_{pump}

は以下の式で計算する.

$$E_{\text{pump}} = \frac{\rho_w V_w g H}{\eta_{\text{pump}}} \quad (28)$$

本研究では給湯用貯湯槽・暖房用貯湯槽・冷却塔とPV/Tソーラーパネルを接続する集熱配管の全揚程をそれぞれ10mと仮定し、ポンプ効率はカタログから27.7%として計算する³⁴⁾. なお暖房用温水配管の全揚程も10mと仮定し、式(28)で計算する.

3.3 計算結果の評価

省エネルギー性は電力消費量で比較する. 環境への熱負荷は式(29)の環境熱負荷エクセルギー A_E を用いて計算する. この式は、廃熱が外気に対して行う仕事量であり、廃熱量だけでなく、廃熱温度も考慮した指標である.

$$A_E = Q_{\text{ex}} \left(1 - \frac{T_a}{T_{\text{ex}} - T_a} \ln \frac{T_{\text{ex}}}{T_a} \right) \quad (29)$$

PV/TおよびPVソーラーパネルの環境熱負荷エクセルギーは、廃熱温度は上述した熱収支式で計算したカバーガラスの温度とし、廃熱量 $Q_{\text{ex,PVT}}$ は、PV/TおよびPVソーラーパネルが受けた日射量の内、熱や電力に変換されなかった熱量であるとし、式(30)から算出する.

$$Q_{\text{ex,PVT}} = GA_{\text{PVT}} (1 - \eta_{\text{th}} - \eta_{\text{pv}}) \quad (30)$$

給湯や暖房のヒートポンプでは、外気から吸熱して温水を加熱するため、外気を冷却する. 一方で、冷房は室内の熱を外気に放出するため、外気を加熱する.

これらのヒートポンプの吸熱量(廃熱量)は、先述した理論COPで計算した際の吸熱量と出力熱量等から、近似式を作成して計算を行った. なおヒートポンプの吸熱温度は(外気温-7)°C, 廃熱温度は(外気温+7)°Cとした.

CO₂作動流体の場合の吸熱量 $Q_{\text{ex,CO2}}$

$$Q_{\text{ex,CO2}} = Q_{\text{HP}} (-0.600 \times 10^{-3} (t_{\text{HP,in}} - t_a)^2 + 6.40 \times 10^{-3} (t_{\text{HP,in}} - t_a) + 0.862) \quad (31)$$

R410A 作動流体の場合の吸熱量 $Q_{\text{ex,R410A}}$

$$Q_{\text{ex,R410A}} = Q_{\text{HP}} (4.30 \times 10^{-3} t_a + 0.811) \quad (32)$$

R32 作動流体の場合の廃熱量 $Q_{\text{ex,R32}}$

$$Q_{\text{ex,R32}} = Q_{\text{HP}} (4.60 \times 10^{-3} t_a + 0.928) \quad (33)$$

外部系統電力から電力を購入する場合、その電力を大規模発電所で発電すると仮定すると、その発電の際に生じた廃熱が環境に作用する. 発電所における廃熱は式(34), (35)で計算する. 式(34)は、購入電力量 E_{plant} を、発電所がカルノーサイクルの効率で発電すると仮定した際に、発電所で必要になる熱量 Q_{plant} の計算式であり、式(35)では発電所で投入された熱量の内、電力に変換されなかった分を発電所の廃熱として計算している.

$$Q_{\text{plant}} \left(1 - \frac{T_{\text{ex,plant}}}{T_{\text{plant}}} \right) = \frac{E_{\text{plant}}}{\eta_{\text{plant}}} \quad (34)$$

$$Q_{\text{ex,plant}} = Q_{\text{plant}} - E_{\text{plant}} \quad (35)$$

文献³⁵⁾を参考にし、発電所効率 η_{plant} は55%, 発電所熱源温度 T_{plant} は1773 K (=1500°C)と仮定する. また発電所の廃熱温度 $T_{\text{ex,plant}}$ は(海水温度+7 K)程度³⁶⁾であり、本研究では(外気温+7 K)として計算を行った.

なお冷却塔の廃熱は、水の蒸発によって外気温以下で廃熱されるとし、環境熱負荷エクセルギーは0とした.

4. PV/Tソーラーパネルのモデルの妥当性

集熱効率・発電効率の実測値と推定値の比較をFig. 5に示す. 計測データには12月23日に計測したデータを使用した. 実測では、貯湯槽からPV/Tソーラーパネルにポンプ(荏原製作所: D25SCD 5.25)を介して伝熱媒体(水)を供給し、その流量は流量計(キーエンス: FD-M5AY), 入口と出口の温度は白金測温抵抗体で測定した. また日射量は日射計(英弘精機: EKO MS-402), 発電量はMPPTを搭載した発電量計(浪越エレクトロニクス: PV-757)で計測した. この日の平均集熱効率は、実測値で32.2%, 推定値が33.9%であり、平均発電効率は、実測値で11.5%, 推定値で11.4%であった. 本モデルの不確かさに対応するASHRAE規格³⁷⁾のCV(RMSE)は、集熱効率で11%, 発電効率で2.1%となった. ASHRAEでは15%以下が望ましいモデルとしており、本モデルの妥当性は高いと判断した.

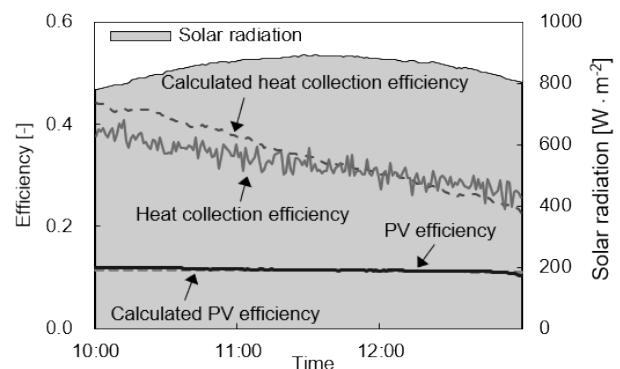


Fig. 5 Heat collection efficiency and PV efficiency of PV/T solar panel model with those of measured data.

5. シミュレーション結果・考察

5.1 ソーラーパネルの導入面積割合の検討

本研究で想定した住宅に適するパネル導入面積を計算するため、8 m²ずつ導入面積を変えて、電力消費量および環境熱負荷エクセルギーの計算を行った. Table 4に異なるPV/Tソーラーパネル面積の年間電力消費量および環境熱負荷エクセルギー、太陽エネルギー熱電供給システムにおける集熱・発電量、購入・売電量の推算結果を、Table 5にPV/TおよびPVソーラーパネルを設置せずに2.2節で示した供給を行った場合の、需要種別ごとの電力消費量およびそれらの合計値を示す.

なお本研究における電力消費量(Grid-power consumption)は、購入電力量(Buying electricity)から売電量(Selling electricity)を引いた値として計算している.

Table 4 Annual calculation results of solar-electricity and -heat supply system

PV/T solar panel area, m ²	PV solar panel area, m ²	Grid-power consumption GJ (MWh)	Environmental exergy load, GJ	Solar heat GJ	Solar electricity GJ (MWh)	Buying electricity GJ (MWh)	Selling electricity GJ (MWh)
0	32	3.02 (0.84)	3.32	0	23.6 (6.56)	20.5 (5.69)	17.5 (4.85)
8	24	0.93 (0.26)	2.74	10.3	23.3 (6.47)	18.5 (5.14)	17.6 (4.88)
16	16	0.47 (0.13)	2.22	20.7	23.0 (6.39)	17.8 (4.95)	17.3 (4.82)
24	8	0.32 (0.09)	1.70	31.4	22.7 (6.31)	17.3 (4.80)	16.9 (4.71)
32	0	0.40 (0.11)	1.16	43.1	22.4 (6.31)	16.9 (4.70)	16.5 (4.59)

5.1.1 電力消費量

Table 4 より, PV/T ソーラーパネルの導入面積が 24 m² のときに電力消費量が 0.32 GJ と最小となる. この導入面積で, Table 5 の電力消費量 25.8 GJ のほぼ全てのエネルギーを太陽エネルギーのみで供給可能となる. 本研究では全館暖房を行う想定のため熱需要が大きい, PV/T ソーラーパネルを用いて直接熱供給を行うことで, ZEH (ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス) を実現することが可能である.

システムの熱電供給の具体例として, PV/T ソーラーパネル導入面積を 24 m² とした際の, 中間期 (4 月 8 日) のシステム集熱量, 給湯・暖房需要, 貯湯槽内平均温度を Fig. 6 に, システム発電量および非熱電力需要, 電力購入量・売電量を Fig. 7 に示す.

Fig. 6 に示すように, 暖房需要は朝と夜に発生しており, 給湯需要は夜に急激に発生している. 0 時から 7 時頃までは暖房需要に対して貯湯槽の温度が不足しているため, 暖房用給湯ヒートポンプを稼働している. 日射が出ている時間帯では, 集熱温度が 40 °C 以上と低く設定されている暖房用の貯湯を優先し, 次に集熱温度を 60 °C 以上にして給湯用の貯湯を行う. これらの貯湯が完了した時点で, 冷却塔運転に切り替え, PV/T ソーラーパネルを冷却する. 夜間に発生する暖房・給湯需要に対しては貯湯槽の温水を直接供給するため, 貯湯槽平均温度は低下している.

一方で, 電力は Fig. 7 より 0 時から 7 時頃までは暖房用給湯ヒートポンプを稼働するために外部系統電力から購入している. 3.2 節で示したように, 本シミュレーションでは, ある時刻においてタンク内熱量が需要を下回っている場合にヒートポンプを稼働するため, 運転間隔が空いている. 日射が出て発電が開始されると売電にシフトし, 夜間には給湯・暖房は貯湯槽の温水を使うため, 非熱電力分のみを系統電力から購入しており, 補助熱源である電動ヒートポンプは稼働していない. このように熱需要に対して直接熱供給を行い, 非熱電力に対してのみ電力を供給することで, 電力消費量を削減することが可能となる.

Fig. 8 に PV/T ソーラーパネル面積ごとの月別電力消費量および暖冷房・給湯の熱需要合計を示す. なお電力消費量が負の値の場合は, 売電された電力消費量を表している. Fig. 8 より, 8 月などの熱需要の小さい夏季には PV/T ソーラーパネル導入面積が小さく, PV ソーラーパネル導入面積が大きい方が電力消費量を削減できる一方で, 熱需要の大きい冬季は PV/T ソーラーパネル導入面積が大きい方が電力消費量を削減可能である. 開発した PV/T ソーラーパネルは, 3.2 節に示したように太陽熱集熱器内に PV モジュールを格納した形状であり, PV モジュールの

ガラスカバーに加えて集熱器表面のカバーガラスが加わり日射の透過が妨げられること, また高温の温水を出力する条件では, PV モジュール自体が高温になることが原因となり, 通常の太陽電池よりもやや発電効率が低下している. Table 4 に示したシミュレーション結果からも, PV/T ソーラーパネル導入面積が増加するとシステム全体の発電量が減少することが分かる.

Table 5 Annual power consumption

Demand	Power consumption, GJ (MWh)
Heating	9.02 (2.51)
Cooling	0.49 (0.136)
Hot water	4.88 (1.36)
Cooking	1.86 (0.516)
Electricity	9.50 (2.64)
Total	25.8 (7.16)

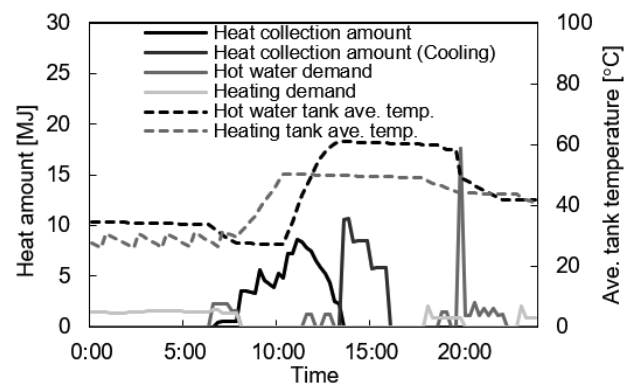
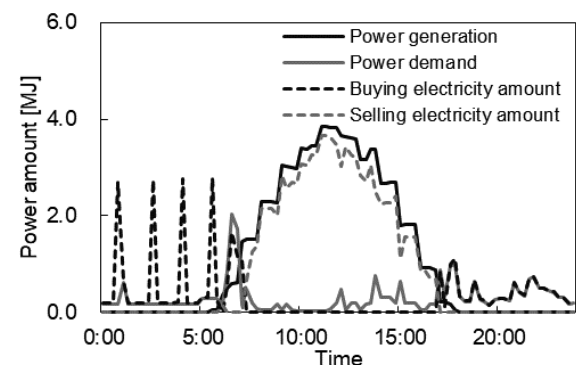
Fig. 6 Heat collection amount, hot water/heating demand, and average tank temp. vs. time on 8th April.Fig. 7 Solar electricity supply, buying/selling electricity, and electricity demand vs. time on 8th April.

Table 6 Annual calculation results of environmental exergy load at different PV/T solar panel area

PV/T panel area m ²	PV panel area m ²	PV/T panel GJ	PV panel GJ	Grid power GJ	Heat pump, GJ (Hot water)	Heat pump, GJ (Heating & Cooling)	Total exergy load (32 m ²), GJ
0	32	0	3.57	0.246	-0.198	-0.298	3.32
8	24	0.300	2.68	0.173	-0.150	-0.259	2.74
16	16	0.635	1.79	0.160	-0.125	-0.232	2.22
24	8	0.979	0.89	0.154	-0.105	-0.232	1.69
32	0	1.310	0	0.154	-0.090	-0.213	1.16

夏期のような熱需要の小さい期間は、貯湯槽への蓄熱を多く必要としないため、PV/Tソーラーパネル導入面積が大きいほど発電効率の低下が大きくなり、売電量が減少することで電力消費量削減効果が減少する。一方で冬季は熱需要が大きいため、PV/Tソーラーパネル面積が大きいほど熱需要に対して直接温水の供給を行うことができ、電力消費量を削減できる。

通年で計算した場合、本研究の想定では導入面積が24 m²の場合に最も外部系統電力 (Grid-power) の電力消費量を削減できる。

5.1.2 環境熱負荷エクセルギー

Table 6 に PV/Tソーラーパネル導入面積割合ごとの年間環境熱負荷エクセルギーを、Fig. 9 にその比較を示す。なお環境熱負荷エクセルギーは、PV/T および PVソーラーパネル、外部系統電力、冷房用エアコンの場合は正の値であり、給湯や暖房をヒートポンプで供給する場合は外気から吸熱するので負の値 (自然環境を冷やす) となる。Table 6 に示す環境熱負荷エクセルギーの合計値は、PV/T・PVソーラーパネル、外部系統電力、給湯・暖冷房ヒートポンプの環境熱負荷エクセルギーの和である。

Fig. 9 より、PVソーラーパネルからの環境熱負荷エクセルギーの値が最も大きく、外部系統電力やヒートポンプの環境熱負荷エクセルギーはPVソーラーパネルと比較すると小さい。環境熱負荷エクセルギーが大きな値となるのは、(1) 廃熱量が大きい場合、(2) 廃熱する温度が外気温よりも高い場合である。PVソーラーパネルの温度は (外気温+30) °C 程度と比較的高温であり、発電効率が15 %程度で残りの85 %が廃熱となるため、環境熱負荷エクセルギーが大きくなる一方で、PV/Tソーラーパネルの温度は外気温+10 ~ 20 °C 程度であり、集熱・発電効率を合わせると最大で日射の70 %以上を利用できるため、環境熱負荷エクセルギーを抑制できる。したがってPVソーラーパネルの導入面積が減少し、PV/Tソーラーパネル導入面積が増加するにつれて、環境熱負荷エクセルギーは低下する。

一方で外部系統電力では、廃熱量は大きいですが、廃熱温度が (外気温+7) °C と小さいため、環境熱負荷エクセルギーは比較的小さい。またヒートポンプは、暖房や給湯に使用する割合が大きいため、環境熱負荷エクセルギーは負の値となっている。

Table 6 より、PV/Tソーラーパネルの最適導入面積である24 m²の際は、PVソーラーパネルを32 m²設置した場合と比較して環境熱負荷エクセルギーを3.32 GJ から1.69 GJ まで49.1 %削減できる。このように環境熱負荷エクセルギーを用いることで、システム全体からの自然環境への熱負荷を廃熱量および廃熱温度から定量的に評価することが可能である。

5.2 蓄電池容量の検討

ゼロエネルギーハウス (ZEH) 化へのシステムデザインとして、費用対効果の高い蓄電池の導入量を、一日の平均購入電力量と仮定し、蓄電池の容量を検討する。

一日の平均購入電力量の年間平均は、PV/Tソーラーパネル導入面積を24 m²とした場合は13.1 kWh、全てPVパネルとした場合は15.5 kWh となった。太陽エネルギーを熱として暖房や給湯に直接利用することで電力消費量を削減でき、必要蓄電池容量を2.4 kWh 削減できることも明らかになった。

また、PV/Tソーラーパネル導入面積を24 m²とした場合、一日の最大購入電力量は35.5 kWh となった。完全に自立した住宅は、最大容量の蓄電池を設置する必要があるため効率的ではなく、故障時の安全性も含めて、住宅・オフィス・工場・EV等を

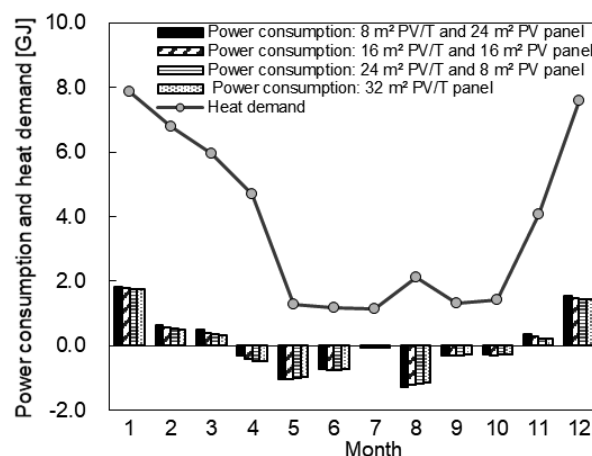


Fig. 8 Monthly power consumption at different PV/T solar panel area with heat demand.

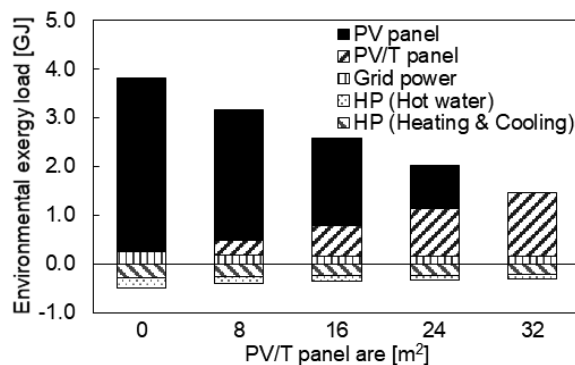


Fig. 9 Annual environmental exergy load at different PV/T solar panel area.

組み合わせた電力融通が可能なクラスター化したエネルギーマネジメントシステム (CEMS) を構築してネットワークに接続し、昼間の余剰電力は住宅以外の電力需要がある施設に供給し、太陽エネルギーが得られない夜間に外部から電力供給を受けることが可能な、蓄電池をもつ電力融通システムの構築が望まれる。

5.3 冷却塔の有無による比較

冷却塔による発電効率向上効果および環境熱負荷エクセルギー削減効果を検証するため、冷却塔の有無による計算結果の比較を行った。Table 7 に年間の集熱・発電量および電力消費量、環境熱負荷エクセルギーの計算結果を示す。Table 7 に示すように、冷却塔を設置することで集熱量が 17.6 GJ から 31.4 GJ と 1.78 倍に増加し、冷却塔によって PV/T ソーラーパネルが冷却されることで、発電量も 22.4 GJ から 22.7 GJ に増加する。電力消費量は、冷却塔を設置することで PV/T ソーラーパネルの発電量が増加する反面、冷却塔自体で電力が消費されるため、冷却塔の有無で差は無い。一方で、Table 7 より、冷却塔を導入した場合は、冷却塔を導入していない場合と比較して環境熱負荷エクセルギーを 25.2 %削減できることがわかる。

Fig. 10 に月別の PV/T ソーラーパネルの環境熱負荷エクセルギーを示す。Fig. 10 より、冷却塔を導入しない場合、夏季に環境熱負荷エクセルギーが大幅に上昇する。冷却塔を導入しない場合、夏季は熱需要が小さく、PV/T ソーラーパネルは集熱運転をせずに放置する時間が増加する。その結果 PV/T ソーラーパネルが高温となり、自然環境への熱負荷が増加する。以上から、環境熱負荷の面を考慮すれば、冷却塔の設置は有効である。

Table 7 Annual calculation results with or without cooling tower at 24 m² PV/T panel area.

	With cooling	Without cooling tower
Heat collection, GJ	31.4	17.6
Power generation, GJ (MWh)	22.7 (6.31)	22.4 (6.22)
Power consumption, GJ (MWh)	0.321 (0.09)	0.321 (0.09)
Environmental exergy load, GJ (PV/T panel)	0.980	1.31

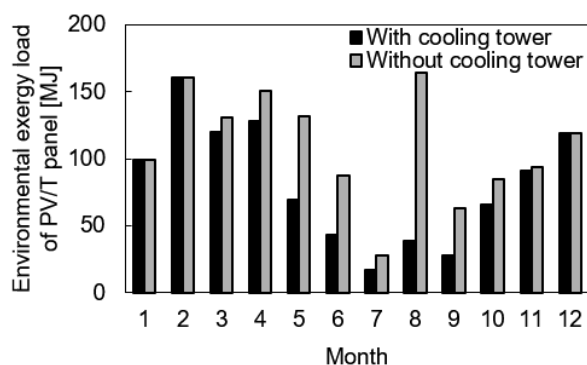


Fig. 10 Monthly environmental exergy load of PV/T panel with or without cooling tower.

6. おわりに

本論文は東京の 2020 年の気象データを用いて、床面積 126.6 m² の戸建て住宅について、4 人家族の各構成員の 15 分毎の行動スケジュールに基づくエネルギー需要シミュレーション計算を行い、PV/T および PV ソーラーパネルを組み合わせで設置した太陽エネルギー熱電供給設備のシステムデザインを紹介するとともに、自然環境への熱負荷を削減可能な太陽エネルギーによるゼロ・エネルギー・ハウス (ZEH) の可能性を立証した。本研究が、太陽エネルギー高度利用の普及に役立てば幸いである。

【謝辞】

実験に協力していただいたサンジュニア (株)、入江産業 (株)、久保田稔製陶所 (有)、東京海洋大学の小嶋満夫先生・國古直先生、本研究に携わった慶應義塾大学佐藤春樹研究室の学生に感謝いたします。本研究は潮田記念基金による慶應義塾博士課程学生研究支援プログラム、および JSPS 科研費 JP21J13148 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) IEA, 2018, Renewables 2018, <https://www.iea.org/renewables2018/heat/> (accessed 2021/8/22).
- 2) Barron-Gafford, G.A., Minor, R.L., Allen, N.A., Cronin, A.D., Brooks, A.E., Pavao-Zuckerman, M.A., 2016, The photovoltaic heat island effect: Larger solar power plants increase local temperatures, *Scientific reports* 6, 35070.
- 3) Burg, B.R., Ruch, P., Paredes S., Michel B., 2017, Effects of radiative forcing of building integrated photovoltaic systems in different urban climates, *Solar Energy* 147, 399-405.
- 4) Pham, J.V., Baniassadi, A., Brown, K.E., Heusinger, J., Sailor, D.J., 2019, Comparing photovoltaic and reflective shade surfaces in the urban environment: Effects on surface sensible heat flux and pedestrian thermal comfort, *Urban Climate* 29, 100500.
- 5) Berardi, U., Graham, J., 2020, Investigation of the impacts of microclimate on PV energy efficiency and outdoor thermal comfort, *Sustainable Cities and Society* 62, 102402.
- 6) Brito, M.C., 2020, Assessing the Impact of Photovoltaics on Rooftops and Facades in the Urban Micro-Climature, *energies* 13(11), 2717.
- 7) 経済産業省、資源エネルギー庁、2021、令和 2 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2021)、p.95.
- 8) Terashima, K., Sato, H., Ikaga, T., 2020, Development of an environmentally friendly PV/T solar panel, *Solar Energy* 199, 510-520.
- 9) Kuniyoshi, N., Takatsuka, A., Sato, H., Kojima, M., June 2019, Possibility of ejector cycle for cooling in SDGs, *Proceedings of the International Workshop on Environmental Engineering 2019, JSME*, 199-200.
- 10) Terashima, K., Seya, A., Sato, H., Ikaga, T., June 2018, A new concept of transpiration cooling system for creating a cooling air society, *Global Renewable Energy Proceedings, Yokohama, JCRE*.

- 11) Souliotis, M., Amaoutakis, N., Panaras, G., Kavga, A., Papaefthimiou, S., 2018, Experimental study and Life Cycle Assessment (LCA) of Hybrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) solar systems for domestic applications, *Renewable Energy* 126, 708-723.
- 12) Bigorajski, J., Chwieduk, D., 2019, Analysis of a micro photovoltaic/thermal PV/T system operation in moderate climate, *Renewable Energy* 137, 127-136.
- 13) Gagliano, A., Tina, G.M., Aneli, S., Nizetic, S., 2019, Comparative assessments of the performances of PV/T and conventional solar plants, *Journal of Cleaner Production* 219, 304-315.
- 14) Lazzarin, R., Noro, M., 2020, Photovoltaic/Thermal (PV/T)/ground dual source heat pump: Optimum energy and economic sizing based on performance analysis, *Energy & Buildings* 211, 109800.
- 15) Zabnienska-Gora, A., Khordehghah, Jouhara, H., 2021, Annual performance analysis of the PV/T system for the heat demand of a low-energy single-family building, *Renewable Energy* 163, 1923-1931.
- 16) 寺島康平, 佐藤春樹, 伊香賀俊治, 2021 年 11 月, 自然環境調和型 PV/T ソーラーパネルのカバーガラスが性能に与える影響の検証, 2021 年度日本太陽エネルギー学会研究発表会.
- 17) 寺島康平, 佐藤春樹, 伊香賀俊治, 2020 年 11 月, 小型化・高効率化を目的とした自然環境調和型 PV/T ソーラーパネルの開発, 2020 年度日本太陽エネルギー学会研究発表会.
- 18) 気象庁, 過去の気象データ検索, https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=44&block_no=47662&year=&month=&day=&view=p1 (accessed 2021/8/22).
- 19) 一般社団法人 20 年先を見据えた日本の高断熱住宅研究会, HEAT20 外皮性能グレード, <http://www.heat20.jp/grade/> (accessed 2021/8/22).
- 20) NHK 放送文化研究所, 2015, 国民生活時間調査 2015, NHK 出版.
- 21) 橋本英樹, 山本圭佑, 河野佑輔, 佐藤春樹, 2011 年 6 月, 住人の行動に基づく住宅エネルギー消費推定プログラムの推定結果妥当性に関する検討, エネルギー資源学会研究発表会.
- 22) Panasonic, 住宅用パワーコンディショナー, https://sumai.panasonic.jp/solar/high_pc.html (accessed 2021/8/22).
- 23) JIS A 4112, 2011, <http://kikakurui.com/a4/A4112-2011-01.html> (accessed 2021/8/22).
- 24) Mellor, A., Alvarez, D.A., Guaracino, I., Ramos, A., Lacasta, A.R., Lin L.F., Murrell, A.J., Paul, D.J., Chemisana, D., Markides, C.N., Ekins-Daukes, N.J., 2018, Roadmap for the next-generation of hybrid photovoltaic-thermal solar energy collectors, *Solar Energy* 174, 386-398.
- 25) Notton, G., Cristofari, C., Mattei, M., Poggi, P., 2005, Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite differences, *Appl. Therm. Eng.* 25, 2854-2877.
- 26) Duffie J.A., Beckman W.A., 1991, *Solar engineering of thermal processes*. 2nd ed. New York, John Wiley & Sons.
- 27) Chen, H., Zhang, H., Li, M., Liu, H., Huang, J., 2018, Experimental investigation of a novel LCPV/T system with microchannel heat pipe array, *Renewable Energy* 115, 773-782.
- 28) 三菱, 家庭用三菱エコキュート仕様表, <https://www.mitsubishielectric.co.jp/home/diahot/ecocute/pdf/spec.pdf> (accessed 2021/8/22).
- 29) 三菱, 三菱ヒートポンプ式温水システムエコヌクール, https://www.mitsubishielectric.co.jp/home/econucool/product/econucool_leo/lineup.html (accessed 2021/8/22).
- 30) ダイキン, ルームエアコン製品ラインナップ, https://www.daikinaircon.com/roomaircon/products/r_series/index.html (accessed 2021/8/22).
- 31) 高田秋一, 川原孝七, クーリングタワー, 2003, 財団法人省エネルギーセンター, pp.40-63.
- 32) 日本機械学会, 伝熱工学, 2005, pp.183-213.
- 33) サンジュニア, 太陽熱給湯システム, <https://www.sunjunior.co.jp/product/s/1212/> (accessed 2021/8/22).
- 34) SANSO, DC ブラシレスポンプ, http://www.sanso-elec.co.jp/product/inverter_pump/catalogpd22-1/ (accessed 2021/8/22).
- 35) 資源エネルギー庁, 火力発電について, 2012, <https://www.env.go.jp/committee/06earth/y0613-11/ref04.pdf> (accessed 2021/8/22).
- 36) 海洋生物環境研究所・日本エヌ・ユー・エス株式会社, 2011, 平成 22 年度国内外における発電所等からの温排水による環境影響に係る調査業務報告書, <https://www.city.ishikari.hokkaido.jp/uploaded/attachment/12445.pdf> (accessed 2021/8/22).
- 37) ASHRAE, 2014, Measurement of Energy, Demand, and Water Savings, ASHRAE Guideline 14-2014.

【記号表】

A :	面積	$[m^2]$
A_e :	環境熱負荷エクセルギー	$[kJ]$
c :	比熱	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
COP :	電動ヒートポンプの COP	$[-]$
E :	電力消費量	$[kJ]$
g :	重力加速度	$[m \cdot s^{-2}]$
G :	日射量	$[kW \cdot m^{-2}]$
H :	全揚程	$[m]$
h_{ai} :	入口空気の状態エンタルピー	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
h_c :	対流熱伝達率	$[kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
h_r :	放射熱伝達率	$[kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
h_{cw} :	入口水温の状態エンタルピー	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
K :	熱損失係数	$[kJ \cdot K^{-1}]$
L :	空気層の厚み	$[m]$
m :	質量流量	$[kg \cdot s^{-1}]$
NTU :	伝熱単位数	$[-]$
P :	発電量	$[kW \cdot m^{-2}]$
PF :	パッキングファクター	$[-]$

Q :	熱量	$[kJ] \text{ or } [kW \cdot m^{-2}]$
R_h :	熱容量流量比	$[-]$
t :	温度	$[^{\circ}C]$
T :	温度	$[K]$
v :	風速	$[m/s]$
V :	体積	$[m^3]$
α :	日射吸収率	$[-]$
β :	PV パネルの温度係数	$[K^{-1}]$
γ :	冷却路温度効率	$[-]$
ε :	熱放射率	$[-]$
η :	効率	$[-]$
θ :	日射入射角	$[rad]$
λ :	熱伝導率	$[kW \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
ρ :	水の密度	$[kg \cdot m^{-3}]$
σ :	シュテファンボルツマン定数	$[kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$
σ_{eff} :	有効放射定数	$[kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$
τ :	カバーガラスの日射透過率	$[-]$
ϕ :	冷却路特性	$[-]$

【添え字】

a :	空気	ref :	定格
b :	底板	sky :	天空
CO_2 :	CO2 作動流体ヒートポンプ	th :	集熱
com :	圧縮機	w :	水
ex :	廃熱・吸熱		
g :	カバーガラス		
HP :	ヒートポンプ		
in :	入口		
$laver$:	貯湯槽の 1 層		
m :	貯湯槽内の m 層		
out :	出口		
p :	PV モジュール		
$plant$:	外部系統電力		
$pump$:	ポンプ		
pv :	発電		
PVT :	PV/T ソーラーパネル		
$R32$:	R32 作動流体ヒートポンプ		
$R410A$:	R410A 作動流体ヒートポンプ		