

Study on Natural Energy Usage and Energy Independence in Wooden Detached House (Part2) Evaluation of Outside Air Load Reduction for Roof Thermal Collection and Prediction of Energy Self-Sufficiency Rate by Solar Power Generation

Toshiaki KOIZUMI^{*1‡} Toyohiro NISHIKAWA^{*2} Masanori MOCHIDA^{*3} Hiroo MARUYA^{*4}

木造戸建て住宅の自然エネルギー利用と エネルギー自立に関する研究 (第二報) 屋根集熱による外気負荷削減効果と太陽光発電による エネルギー自給率予測

小泉 寿明^{*1‡}

西川 豊宏^{*2}

持田 正憲^{*3}

丸谷 博男^{*4}

Abstract

In our previous report, we evaluated the outside air load reduction effect of the natural energy ventilation system by roof thermal collection and earth tube of house located in the city of Fujisawa (Kanagawa Prefecture). In this report, we evaluated the outside air load reduction effect, surveyed the electric power consumption and predicted energy self-sufficiency rate of wooden house located in the city of Kasukabe (Saitama Prefecture). The results the outside air load of this system is about 36 % reduction compared to the case without system. In addition, the annual electric power consumption of the measured house was 6,796 kWh/year, and the energy self-sufficiency rate with the introduction of solar power generation and electricity storage system reached 81.1% at 5 kW of solar power generation. It was expected that energy independence would be possible by reducing the outside air load of this system, optimizing of control conditions for switching, or energy conservation behavior by residents.

Keywords: Wooden detached house, Natural energy, Yearly measurements,

Roof thermal collection, Electric power consumption, Energy self-sufficiency rate

キーワード：木造戸建て住宅，自然エネルギー，年間実測，屋根集熱，電力消費量，エネルギー自給率

1. はじめに

前報⁽¹⁾では、神奈川県藤沢市(地域区分 7)に所在する屋根集熱及びアースチューブを利用した自然エネルギー利用換気システムを有する木造戸建て住宅を対象に、実居住下の実測データに基づき、当システムの外気取入れ状況を確認し外気負荷削減効果を評価した。その結果、屋

根集熱もしくはアースチューブを経由した外気取入れ温度と外気温度の関係から年間を通じて有効な昇温・予冷処理が成されていることを確認した。

本報では、埼玉県春日部市(地域区分 6)に所在する木造戸建て住宅において、外気取入れ経路に屋根集熱面を利用した換気システムの全熱交換器一次側における外気負荷削減効果を評価することに加え、実居住下での電力消費量の調査を行い太陽光発電によるエネルギー自給率の

*1 Graduate Student, Kogakuin University
1-24-2 Nishishinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 163-8677, Japan
‡e-mail: da15123@g.kogakuin.jp

*2 Prof., School of Architecture, Kogakuin Univ., Dr.Eng.,

*3 MOCHIDA Building Engineering

*4 President of Arts and Architecture

Received: November 24, 2020, Accepted: February 15, 2021

*1 工学院大学大学院 工学研究科 建築学専攻 修士課程
(〒163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2)

‡e-mail: da15123@g.kogakuin.jp

*2 工学院大学 教授 博士(工学)

*3 MOCHIDA 建築設備設計事務所

*4 一級建築士事務所 株式会社エアーアンドエーセントラル

(原稿受付：2020年11月24日，受理日：2021年2月15日)

予測を行った。なお、本論文は、関連する既発表論文⁽²⁾の内容の精査と新たな知見を加えたものである。

2. 実測建物とシステム概要

実測建物は、埼玉県春日部市に所在する延床面積約 120 m²の木造2階建ての住宅である(Table 1)。外気負荷を削減する目的で、太陽熱利用による屋根集熱・夜間放射冷却を利用した自然換気システムが導入されている。

Fig.1 にシステム系統図を示す。実測建物は Table 2 の制御条件により、外気取入れ経路の切替え(屋根集熱面経由もしくは屋根軒下経路)を行っている。取入れた外気は、2階居室天井より還気された空気と全熱交換器で熱交換し1階、2階床下を経由した後に、居室へ給気される。また、2階居室天井から還気された空気は、全熱交換器を通過した後、2階床下空間を経由して居室に給気される。外気取入れ経路の切替え条件は、夏期は、夜間放射冷却が期待できる 23 時の時刻切替え、冬期は、屋根集熱面において

Table 1 Overview of measured building

| | |
|-------------------------------|--|
| Location | Kasukabe City, Saitama Prefecture |
| Total floor area | Approx 120 m ² |
| Total air volume | Approx 290 m ³ |
| Heat transmission coefficient | U _A : 0.58 W/(m ² · K) |
| Outer wall | 0.36 W/(m ² · K) |
| Window glass | 2.33 W/(m ² · K) |
| Heat transmission coefficient | |
| Solar heat gain coefficient | η _A : 1.6 |

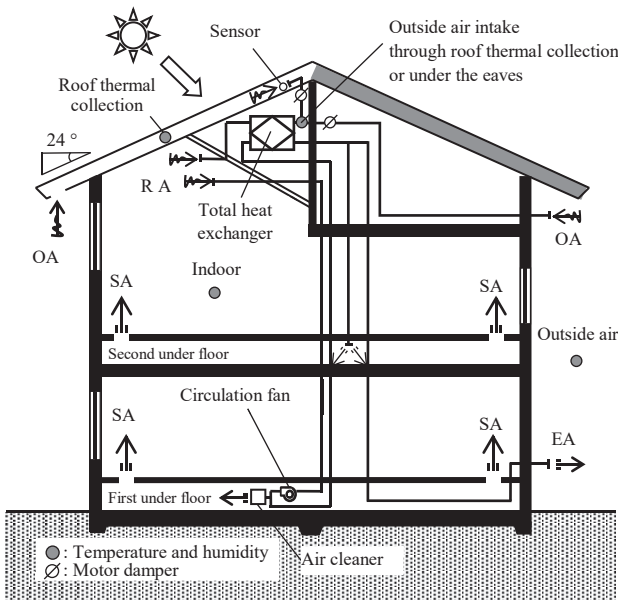


Fig.1 System diagram

Table 2 Control conditions for switching outside air intake route in this system

| | Intake outside air of the roof thermal collection | Intake outside air of under the eave |
|--------|---|--------------------------------------|
| Summer | 23:00~5:00 | 5:00~23:00 |
| Winter | At 22 °C higher | At 20 °C lower |

太陽集熱が得られている内部温度 22 °C以上での温度切替えになっている。

Table 3 に実測建物の計測概要を示す。実測データは 2016年7月1日~2017年6月30日まで計測しており、屋上(及び屋外)では水平面日射量、屋根表面温度、外気温湿度を、室内では床下、1階、2階、小屋裏の温湿度、基礎コンクリート表面温度を 10 分間隔で計測している。電力消費量は Fig.2 に示すように用途ごとに 1 分間隔で計測した。また、吹出口からの風量は、竣工時の試運転調整後に熱線風速計で測定した。なお、日射量は 2016年10月22日~同年12月2日、2017年3月4日~同年6月30日まで欠測のため気象庁データ(東京都千代田区)を使用した。

Table 3 Outline of system and measurement

| | |
|-------------------------|--|
| Roof thermal collection | Area : 47.3 m ² The pitch of a roof : 24 ° Use material : Galvalume steel sheet, Vent layer, Waterproof, Moisture permeation roofing, Sheathing roof board, Heat barrier seat, Rafter |
| Total heat exchanger | Air volume : 170 m ³ /h |
| Building direction | 24 degrees from the south to the west |
| Measuring period | 2016/7/1~2017/6/30 |
| Measuring points | Humidity : Air outlet, Air inlet, Indoor, Outside air, etc. Surface temperature : Foundation, Underground, Roof, Radiation heating and cooling Solar radiation : Horizontal solar radiation Electric power consumption : Total amount, Hot water supply, Heating and colling Total heat exchanger, etc. Wind velocity : Air outlet, Air inlet |
| Measuring sensor | Temperature and humidity, Accuracy : Temperature ± 0.3 °C · Humidity ± 5 %, Electric current, Accuracy : ± 2.0 % rdg, ± 0.13 % f. s. Helio-meter, Accuracy : ± 0.5 % lower |
| Measuring interval | Temperature, humidity, Surrounding weather: 10 minute Electric power consumption : 1 minute Wind velocity : At the time of completion |

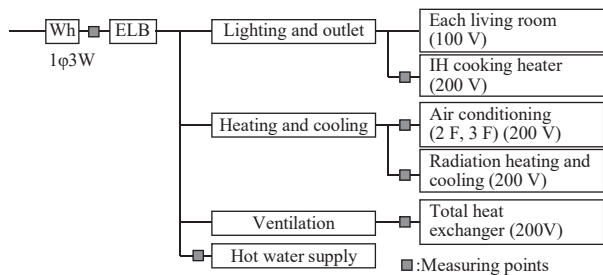


Fig.2 Electric power system and measuring points

3. 実測結果

3.1 実測期間内の外界気象と室内温湿度

Fig.3 に実測建物で計測した室内外温度及び日射量のデータを日平均で示す。室内温度(2階リビング)は、14.9~28.2 °Cで周期的に変化し、評価期間での平均は 23.4 °Cであった。これに対し、夏期は日射の影響の少ない軒下部からの取入れが主になるため、外気取入れ温度は、外気温度と同等であるが、冬期は屋根集熱により、外気温度に比べ高い温度で取入れられている。

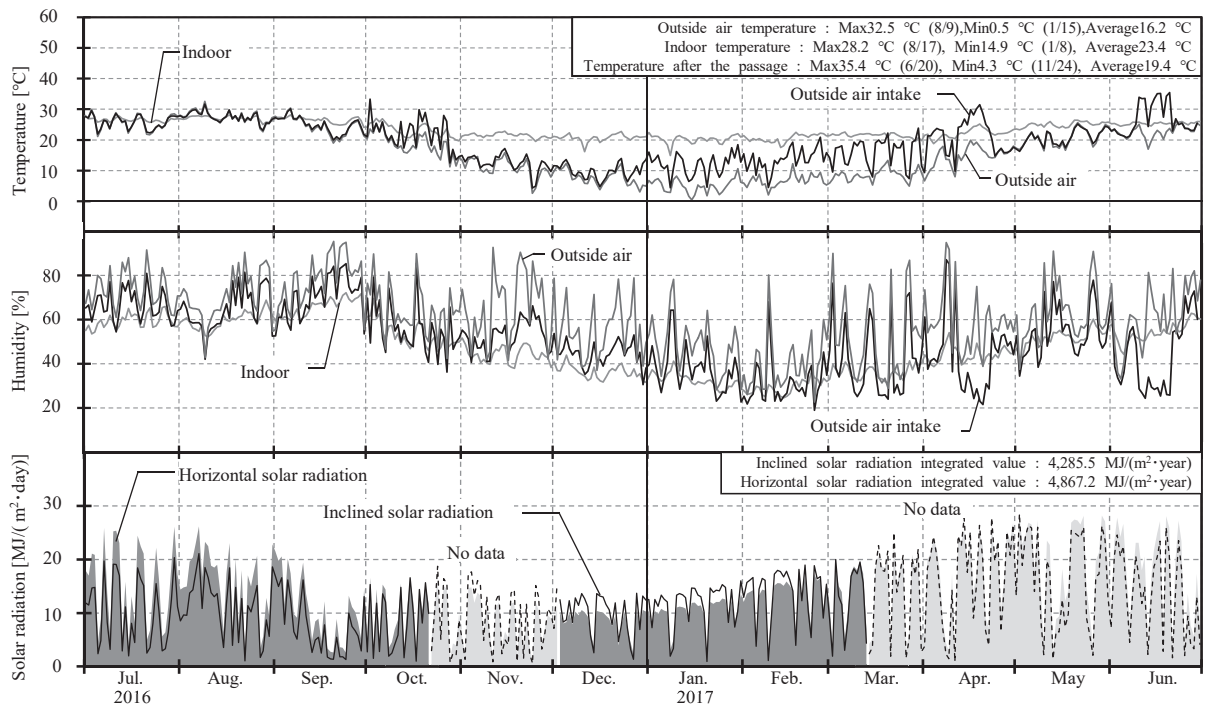


Fig.3 Weather data and indoor temperature over a year

3.2 室内外温度の比較

Fig.4 に実測期間における外気と室内乾球温度の関係を示す。計測データは一時間平均値で、外気温度は $-4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ～ $37.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ の年間変動であるのに対し、室内温度は屋根集熱面を経由した予冷・昇温された外気を床下から居室へ給気されていることや、居室に設置された冷暖房機器(エアコン・輻射冷暖房)でコントロールされていることから $13.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ～ $29.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ の変動幅で推移し、年間を通じて概ね良好な室内熱環境が保たれていた。

3.3 外気取入れ温度の年間推移

Fig.5 に年間を通じた屋根集熱面経由の外気取入れと外気温湿度の推移を示す。夏期・冬期運転期間において、冷暖房負荷が最大になりうる日の屋根集熱における予冷・昇

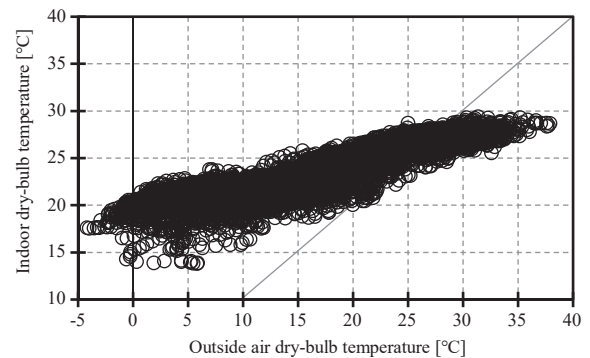


Fig.4 Relationship between indoor dry-bulb temperature and outside air dry-bulb temperature

温効果を確認するため、外気温度と屋根集熱面経由の外

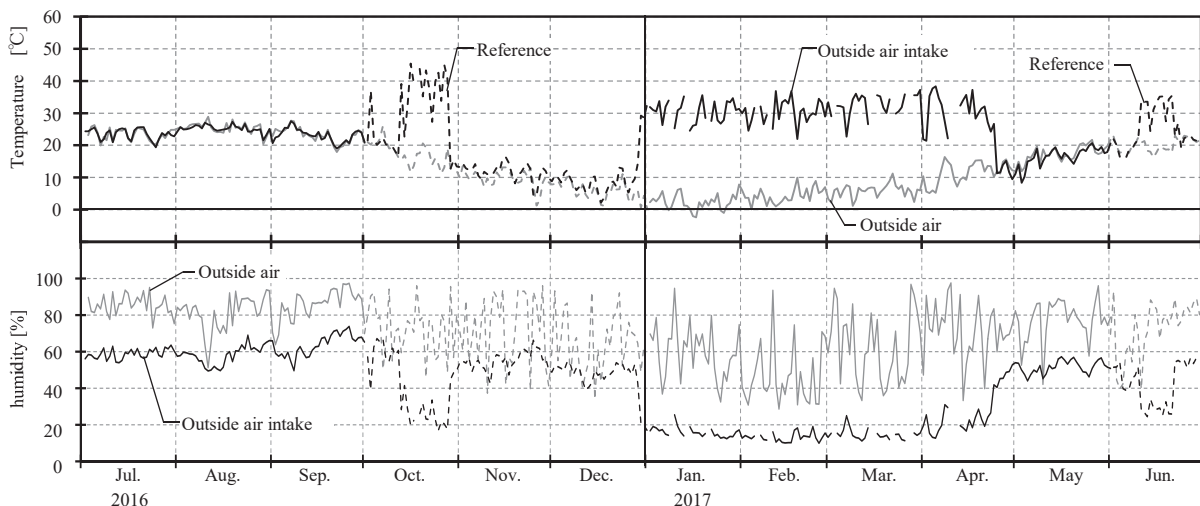


Fig.5 Outside air intake temperature through roof thermal collection

気取入れとの温度差が最大になる日を代表日とした。

夏期運転の期間では、8月31日3時において外気温度と屋根集熱面経由の外気取入れ温度との差が最大となり、外気温度より2.5℃低い18.4℃で外気取入れされていた。また、冬期運転の期間では、2月28日13時における温度差が最大となり、外気温度より35.2℃高い44.6℃であった。なお、2016年10月～12月は手動による外気取入れ経路の切替えに誤操作があったこと、中間期(2017年6月)は頻繁に夏期・冬期運転モードを切替えていたことから評価においては参考値とした。

3.4 自然エネルギー利用換気システムの外気取入れ状況

Fig.6に屋根集熱面及び軒下経由の外気取入れ時間を示す。屋根集熱面経由の外気取入れは3,454時間で年間の4割程度、軒下経由の外気取入れは5,281時間で年間の6割程度であった。外気取入れ経路の切替えは、夏期は時刻、冬期は屋根集熱温度で行われており、入居時における基本操作や切替え時期の説明により、一部の期間を除いて概ね良好な運転が成された。

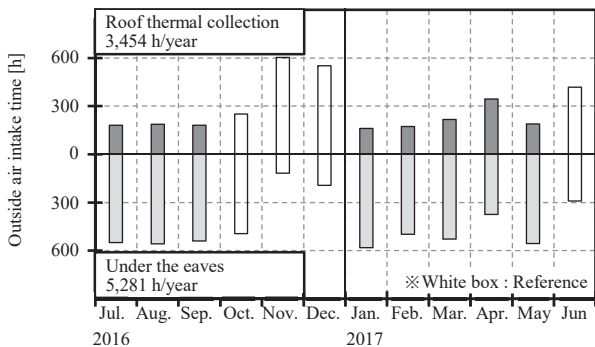


Fig.6 Outside air intake temperature through roof thermal collection and under the eaves

実測期間中の日平均外気温度が最高・最低となった日の前後3日間の連続7日間を夏期と冬期の代表週に選定し外気取入れ状況を評価した。

Fig.7に屋根集熱面経由の外気と室内エンタルピーの関係を示す。夏期においては、屋根集熱面経由の空気が概ね外気より低く、外気が61.3～75.0 kJ/kg(DA)の変動幅に

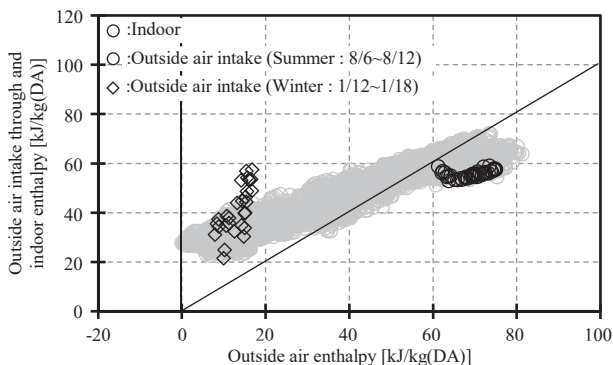


Fig.7 Relationship of outside air intake through roof thermal collection and indoor

対して、外気取入れは53.0～59.1 kJ/kg(DA)で推移していた。一方、冬期において外気取入れエンタルピーは、室内エンタルピーと同等以上の外気が室内に取入れられている。

Fig.8に夏期代表週、Fig.9に冬期代表週における外気取入れ状況を時系列で示す。夏期代表週における外気取入れ温度は、夜間において外気温度に比べ同等もしくは概ね低いに対し、絶対湿度は外気よりも低く推移していることから予冷・除湿効果が確認された。一方、冬期代表週は、日中において外気取入れ温度が外気温度よりも高く、太陽熱による昇温効果が確認された。なお、日中における外気取入れ絶対湿度は、屋根集熱面経由の通気屋内で吸収された水分を放湿し高くなったと推察される。

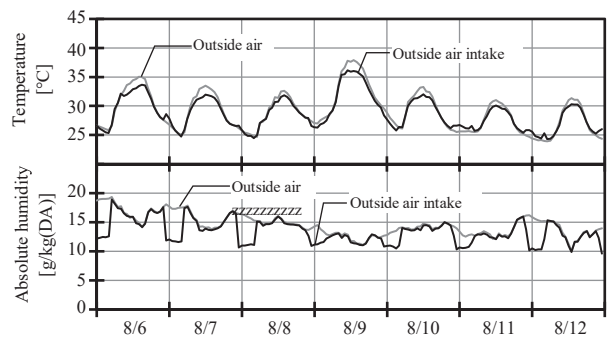


Fig.8 The state of outside air intake for a week in summer

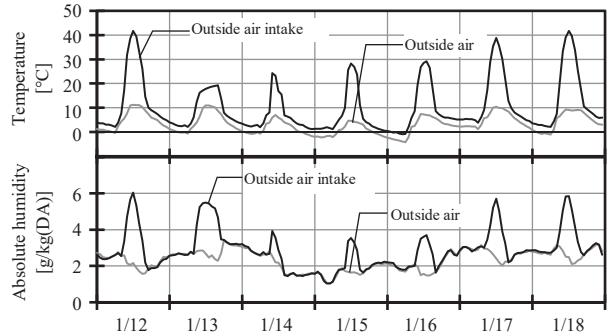


Fig.9 The state of outside air intake for a week in winter

Fig.10に屋根集熱面経由の外気取入れ温度差(外気取入れ-外気)の発生時間頻度分布を示す。Fig.6で示した年間における屋根集熱面経由の外気取入れ時間3,454時間の内熱損失が868時間、熱取得が2,586時間であった。屋根集熱面経由の外気取入れ温度差は、夏期(6月～8月)において、-2.7～32.3℃の範囲で推移しており、同期間の熱損失となる時間数は210時間、熱取得となる時間数は574時間であった。また、冬期(12月～2月)において、-3.3～35.3℃の範囲で推移しており、同期間の熱損失となる時間数は251時間、熱取得となる時間数は636時間であった。このことから、屋根集熱面においては年間を通して、熱取得となる時間が多く、冬期の外気負荷削減に寄与していると判定される。

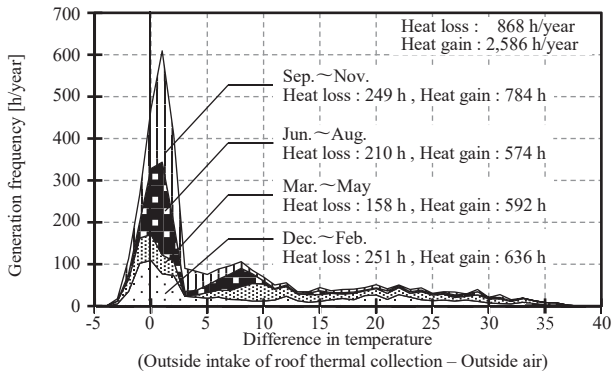


Fig.10 Difference in intake temperature through roof thermal collection

Fig.11 に軒下経由の外気取入れ温度差の発生時間頻度分布を示す。年間における軒下経由の外気取入れ時間 5,281 時間の内、熱損失が 1,129 時間、熱取得が 4,152 時間であった。軒下経由の外気取入れ温度差は、夏期(6 月～8 月)において-1.9～5.0℃の範囲で推移しており、同期間の熱損失となる時間数は 716 時間、熱取得となる時間数は 683 時間であった。冬期(12 月～2 月)において、-0.7～15.4℃の範囲で推移しており、同期間の熱損失となる時間数は 2 時間、熱取得となる時間数は 1,271 時間であった。年間を通して屋根集熱面経由の外気取入れ温度差に比べて変動幅が小さいことから、屋根集熱面経由と軒下経由の外気取入れ切替が概ね良好に成されていた。なお、屋根集熱面経由の外気取入れ時に軒下経路のダクト内で停滞した空気が暖房室温から熱取得したことや運転切替後の直後の熱的履歴(一部、外気取入れ切替の誤操作を含む)の影響から、軒下からの外気取入れ温度が外気温度より昇温されているが、概ね外気負荷削減に寄与していた。

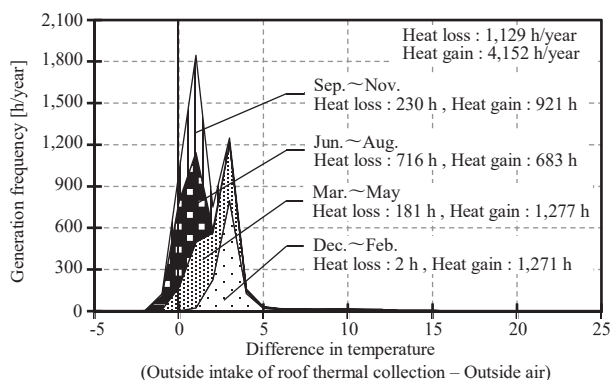


Fig.11 Difference in intake temperature through under the eaves

4. 自然エネルギー利用換気システムによる外気負荷削減効果

4.1 屋根集熱面経由の外気取入れによる予冷・昇温熱量

自然エネルギー利用換気システムによる外気負荷削減量は、計測データをもとに、各外気取入れ経路の通過前後のエンタルピー差(式(1))によって算出した。

$$q_{hc} = \rho V_{ex}(h_{hc} - h_o) \quad (1)$$

Fig.12 に外気取入れ予冷・昇温熱量を月積算で示す。7 月～9 月は夏期運転モードで稼働しているため、屋根集熱面での夜間放射冷却により、外気取入れは熱損失であり外気が予冷されて室内へ取入れられている。一方、1 月～4 月は冬期運転モードで稼働しているため、太陽熱により外気取入れは熱取得となり外気が昇温されていることが確認された。なお、Fig.5 同様に 2016 年 10 月～12 月、2017 年 6 月は参考値とした。

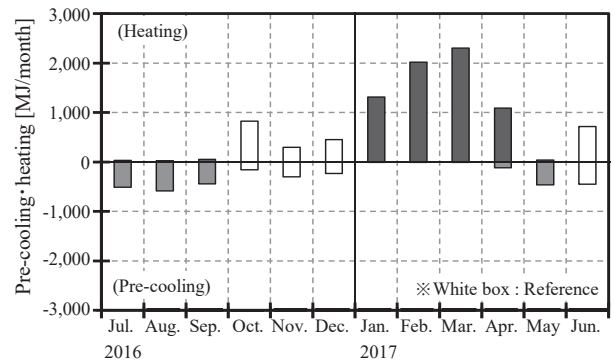


Fig.12 Outside air intake pre-cooling・heating

4.2 年間の外気負荷削減効果

Fig.13 は、年間積算での外気負荷削減を示す。内訳として室内エンタルピーを実居住下の計測データとした場合の自然エネルギー利用換気システムによる外気負荷は 22,081 MJ/年で、屋根集熱面及び軒下経由の外気取入れ予冷熱量 3,255 MJ/年と昇温熱量 9,151 MJ/年が削減され、外気の直接取入れによる外気負荷(式(2)から算出) 34,487 MJ/年に比べて 36.0%の削減である。

$$q_{ol} = \rho V_{ex}(h_i - h_o) \quad (2)$$

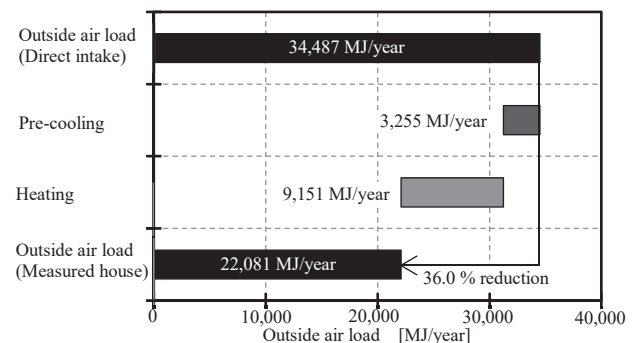


Fig.13 Outside air load reduction effect

Fig.14 は室内エンタルピーを基準とした場合のシステムによる外気負荷と外気直接取入れの外気負荷の関係を比較したものである。データは実測期間における時間平均値であり、外気取入れ経路の切り替えが適切に行われていた 2016 年 7 月～同年 9 月、2017 年 1 月～同年 5 月を評価対象期間とした場合の近似線の傾きは 0.61 であることから、外気負荷の削減率は、最適な運転切替運転によ

り約39%になると予想される。

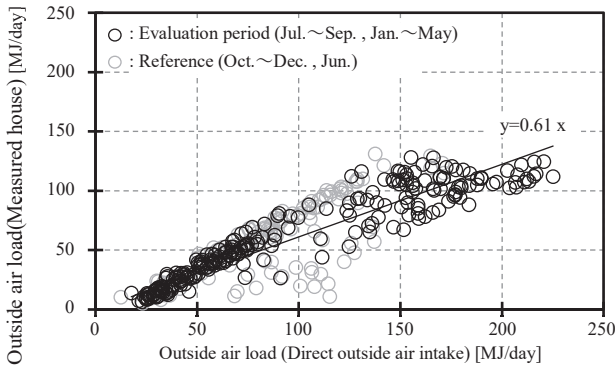


Fig.14 Relationship of outside air load for the natural energy ventilation system

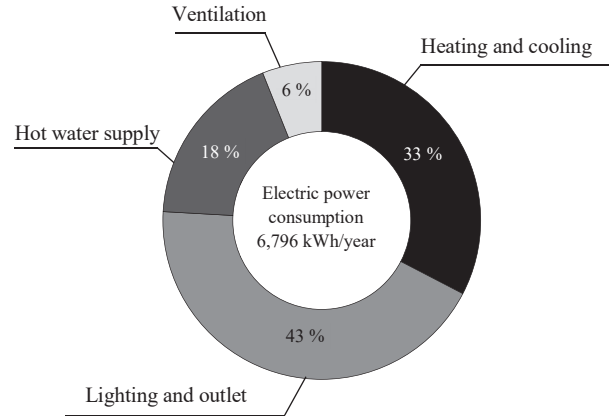


Fig.16 Annual electric power consumption

5. 太陽光発電によるエネルギー自給率の予測

5.1 実測建物における電力消費量

Fig.15 に実測建物の各用途における月別電力消費量を示す。電灯・コンセント，換気の電力消費量は年間を通じて概ね一定であり，給湯は冬期に，冷暖房は夏期，冬期増加している。

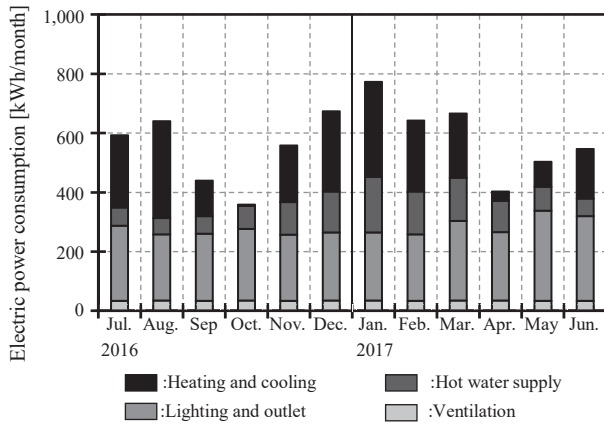


Fig.15 Electric power consumption of each use

Fig.16 に実測建物の用途別年間電力消費量を示す。年間の電力消費量は 6,796 kWh/年で，内訳として冷暖房は全体の 33%，電灯・コンセントは 43%，給湯は 18%，換気は 6%を占めている。年間を通して，温湿度コントロールは輻射冷暖房を主体としたこと，就学前の子ども二人が居住しており入浴時間を集約したことから，冷暖房負荷の割合が大きく，給湯負荷の割合が小さくなったと推察される。

5.2 太陽光発電量の試算とエネルギー自給率の予測

実測建物に太陽光発電パネル(1 kW・3 kW・5 kW)設置を想定した場合のエネルギー自給率を予測評価する。評価は太陽光発電量⁽³⁾(式(3))及び Table 4 を用いて算出)と電力消費量を一次エネルギーに換算⁽⁴⁾し，電力消費量を基

準として太陽光発電量との差により予測評価する。

$$E_p = K \cdot H_A \cdot P_{AS} \cdot f / G_s \quad (3)$$

Table 4 Setting assumption of solar power generation

| | | |
|--|---------------------------------------|------------------------------|
| Roof area | 47.3 m ² | |
| The pitch of a roof | 24 ° | |
| Building dire | 24 degrees from the south to the west | |
| Pannel area (Occupancy ratio of panel) | 1 kW | 6.7 m ² (14.2 %) |
| | 3 kW | 19.7 m ² (41.6 %) |
| | 5 kW | 32.8 m ² (69.3 %) |
| Power generation efficiency | 15.2 % | |

Fig.17 は，基本ケース(直接外気取入れを行った場合)，実測建物，実測建物に太陽光発電パネルを設置した場合(1 kW・3 kW・5 kW)の一次エネルギー消費量に実測建物の延床面積を除いたものと，各ケースのエネルギー削減量を示したものである。実測建物のケースは，基準ケースに比べシステムによる外気負荷削減の効果で 15.8%の省エネルギー性が期待できる。また，太陽光発電によるエネルギー削減率は 1 kW・3 kW・5 kW のケース各々で 27.6%・37.0%・40.6%となり，3 kW を超えるケースで余剰電力の発生が顕著であった。

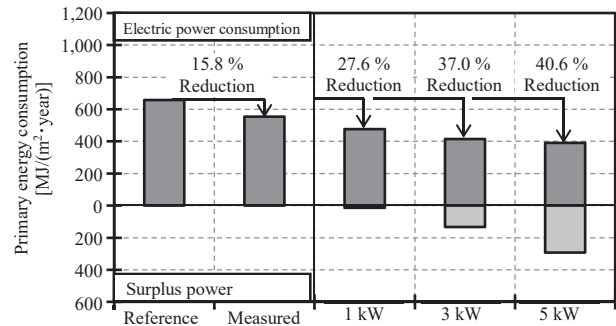


Fig.17 Reduction in primary energy consumption of measured house

Fig.18 は太陽光発電に加え，蓄電システムを利用した場合における実測建物のエネルギー自給率(式(4)を用いて算出)を試算したものである。

$$P = E_p / E_U \quad (4)$$

実測建物において太陽光発電により期待されるエネルギー自給率は、1 kWで14.1%、3 kWで25.2%、5 kWで29.5%算出された。また、蓄電システムにより余剰電力分を吸収したエネルギー自給率は、蓄電システムを導入無しに比べ、1 kWで2.1%、3 kWで23.5%、5 kWで51.6%上昇し、各ケースで16.2%、48.7%、81.1%に達していた。

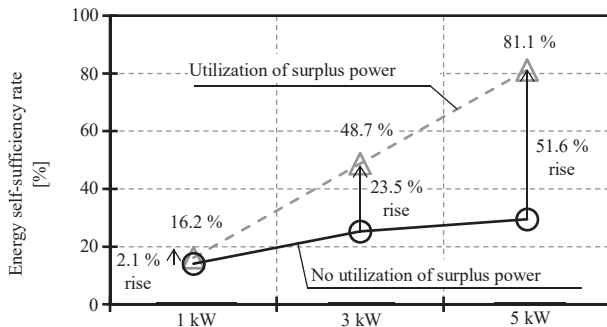


Fig.18 Energy self-sufficiency rate of measured house

6. おわりに

埼玉県春日部市に所在する木造戸建て住宅を評価対象とし、実居住下における実測データを基に年間での外気負荷削減効果の評価と太陽光発電量を試算し、電力消費量の実測データからエネルギー自給率の予測を行った。その結果、実測建物の外気負荷は、直接外気取入れを行った場合の外気負荷に対し約36%の外気負荷削減が達成された。また、実測建物の年間電力消費量は6,796 kWh/年であり、太陽光発電及び蓄電システムを導入したエネルギー自給率は太陽光発電5 kWにおいて81.1%に達した。

以上のことから、当システムによる外気負荷削減や運転の最適化、居住者による一層の節電行動によりエネルギー自立は可能だと予想された。

次報ではこれまでの知見を踏まえ、自然エネルギー利用換気システム及び太陽光発電パネルを導入している東京都日野市の木造戸建て住宅における外気負荷削減効果の評価とエネルギー自立性の評価を行う予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり関係者の皆様には、多大な協力を頂きました。ここに記し深謝します。

使用記号

| | |
|--------------------------------|-----------------------|
| q_{hc} : 屋根集熱面による昇温・予冷熱量 | [kJ] |
| q_{ol} : 外気負荷 | [kJ] |
| ρ : 空気密度(=1.26) | [kg/m ³] |
| V_{ex} : 全熱交換器の風量(=170) | [m ³ /h] |
| h_o : 外気エンタルピー | [kJ/kg] |
| h_i : 室内エンタルピー | [kJ/kg] |
| h_{hc} : 外気取入れエンタルピー | [kJ/kg] |
| E_p : 太陽光発電量 | [MJ] |
| K : 総合設計係数 | [-] |
| H_A : 傾斜面日射量 | [kWh/m ²] |
| P_{AS} : 太陽電池アレイ出力(=1, 3, 5) | [kW] |
| G_S : 標準状態による日射強度(=1.0) | [kW/m ²] |
| f : 一次エネルギー換算係数(=9.76) | [MJ/kWh] |
| P : エネルギー自給率 | [-] |
| E_U : 電力消費量 | [MJ] |

参考文献

- 1) T. Nishikawa, M. Mochida, H. Maruya, T. Koizumi, Study on Natural Energy Usage and Energy Independence in Wooden Detached House (Part1) Evaluation of Outside Air Load Reduction for Roof Thermal Collection and Earth Tube Based on Yearly Measurements, Journal of Japan Solar Energy Society, **46** (6), 55-60 (2020).
- 2) T. Watanabe, T. Nishikawa, H. Maruya, Reduction in External Air Load of Wooden House with Ventilation System Using Natural Energy and Prediction of Energy Autonomy by Solar Power Generation, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2018) (Nov. 2018), 275-278, Matsue, Shimane, Japan.
- 3) JIS C 8907, 太陽光発電システムの発電電力量推定方法, 5-6 (2005)
- 4) 経済産業省 資源エネルギー庁, エネルギーの使用の合理化等に関する法律 省エネ法の概要, 7 (2017), 経済産業省, 東京