

Study on Natural Energy Usage and Energy Independence in Wooden Detached House (Part3) Evaluation of Outside Air Load Reduction by Roof Thermal Collection and Energy Independence by Solar Power Generation and Storage

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 (第三報) 屋根集熱による外気負荷削減と太陽光発電・蓄電による エネルギー自立性の評価

小泉 寿明^{*1‡}

西川 豊宏^{*2}

持田 正憲^{*3}

丸谷 博男^{*4}

Abstract

In this study, we aim to evaluate the effect of reduction of the outside air load of a natural energy ventilation system and also determine the energy independence of solar power generation and storage with respect to the actual power demand. To this end, measurements of a residential wooden detached house located in Hino City, Tokyo, were performed. Based on the residential data obtained through the measurements, we evaluated the energy independence of the natural energy ventilation system and the solar power generation and storage system. Although the thermal collection efficiency of the roof thermal collection surface decreased owing to the installation of the solar power generation panel, the ventilation operation proved effective in reducing the outside air load. Additionally, while the average annual energy independence rate was 27 %, the average annual energy self-sufficiency rate was 90 %.

Keywords: Wooden detached house, Roof thermal collection, Outside air load, Solar power generation and storage, Energy independence

キーワード: 木造戸建て住宅, 屋根集熱, 外気負荷, 太陽光発電・蓄電, エネルギー自立性

1. はじめに

本研究は、実居住下の木造戸建て住宅の実測を行い、自然エネルギーを利用した換気システムの外気負荷削減の効果を評価するとともに、実際の電力需要に対する太陽光発電・蓄電によるエネルギーの自立性を明らかにすることを目的としている。

第一報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、外気負荷削減の効果を評価した。また、第二報²⁾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、外気負荷削減の程度に加え、実居住下での電力消費量に基づく太陽光発電によるエネルギー自給率の予測を行った。

これらの実測で得られた知見を基に本報では、Table 1 に示す東京都日野市(地域区分 6)に所在する延床面積約 110 m²の木造 2 階建ての住宅において、太陽光発電・蓄電

*1 Toshiba Corporation
33, Shin-isogoCho, Isogo-ku, Yokohama, Kanagawa, 235-0017, Japan
‡e-mail: toshiaki2.koizumi@toshiba.co.jp

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

*3 Prof., School of Architecture, Musashino Art.Univ., B.E.,

*4 President of Arts and Architecture

Received: March 26,2021, Accepted: June 1,2021

*1 株式会社東芝 (研究当時 工学院大学大学院生)
(〒253-0017 神奈川県横浜市磯子地区新磯子町 33)
‡e-mail: toshiaki2.koizumi@toshiba.co.jp

*2 工学院大学 教授 博士(工学)

*3 武蔵野美術大学 教授 学士(工学)

*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: 2021 年 3 月 26 日, 受理日: 2021 年 6 月 1 日)

システムを有した際のエネルギー自給率とエネルギー自立性の評価を行う。なお、本論文は、関連する既発表論文³⁻⁶⁾の内容の精査と新たな知見を加えたものである。

Table 1 Overview of measured building

Location	Hino City, Tokyo
Total floor area	Approx 110 m ²
Total air volume	Approx 310 m ³
Building skin Heat transmission coefficient	U _A : 0.47 W/(m ² · K)
Building skin Solar heat gain coefficient	η _A : 1.4

2. 実測概要

2.1 自然エネルギー利用換気システムの概要

実測建物の換気システムは Fig.1 に示す通り、屋根集熱面もしくは軒下経路で外気を取入れるものであり、夏期が夜間放射冷却、冬期が太陽集熱による外気負荷削減を目的としている。屋根集熱及び軒下からの外気取入れ経路の切替えは、Table 2 に示すように夏期が時刻、冬期が屋根集熱内部温度による制御となっている。2019年3月18日～7月9日及び10月12日～11月30日は、屋根集熱内部温度が25℃以上に上昇すると屋根集熱面経由に、24℃以下に降下すると軒下経由に切替わる制御としたが、12月1日～翌年3月17日は太陽光発電パネルにより屋根集熱効率が低下したため、屋根集熱内部温度を16℃以上、15℃以下に変更した。取入れ後は、全熱交換器を利用した給気と室内空気の循環を行っており、浴室に設置された24時間機械換気とエアバランスしている。

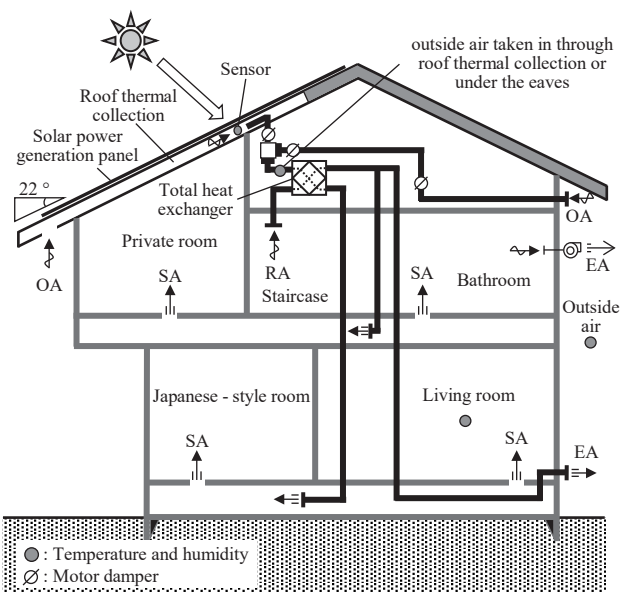


Fig.1 Overview of the natural energy ventilation and solar power generation systems and measured points

2.2 太陽光発電・蓄電システムの概要

Table 3 に太陽光発電・蓄電システムの概要を示す。南側屋根面に公称最大出力 4.5 kW (250 W×18 枚)、変換効率

Table 2 Control conditions for switching the outside air intake route by the natural energy ventilation system

Outside air intake route	Summer	Winter
Roof thermal collection	23:00～5:00	
Under the eaves	5:30～23:30	

18.3%の太陽光発電パネルが設置されており、蓄電池は実効容量 8.8 kWh のリチウムイオン電池が使用されている。

太陽光発電量が多い晴天日は、発電された電力量が建物内で優先使用され、余剰分は逆潮流(売電)している。太陽光発電量が少ない曇天日や雨天日は、電力需要に応じて蓄電池から電力供給される。蓄電池は主に夜間電力(1時～6時)より充電する。なお、停電時は、自動的に自立運転に切替わり、発電された電力が優先的に建物内で使用され、余剰分は蓄電池に充電、不足分は蓄電池から特定の系統(IHクッキングヒーター、給湯、一部の電灯・コンセント)へと使用される。

Table 3 Overview of solar power generation and storage system

Solar power generation panel	Maximum output	4.5 kW
	Conversion efficiency	18.3 %
Power conditioner	Rated output	Single phase 4.0 kW
	Conversion efficiency	96.0 %
Storage battery	Type	Lithium-ion battery
	Execution capacity	8.8 kWh
	Charging time	1:00～6:00
	Discharging time	6:00～1:00

2.3 計測概要

Table 4 に実測建物の計測概要を示す。実測期間は2019年3月18日～2020年3月17日で、外気、室内、床下、小屋裏の温湿度を10分間隔でデータ計測している。

Table 4 Outline of system and measurement

Roof thermal collection	Area : 53.8 m ² The pitch of a roof : 22 ° Use material : Galvalume steel sheet, Vent layer, Solid cedar, Thermal barrier sheet, Rafter, Structural plywood
Total heat exchanger	Air volume : 170 m ³ /h
Building direction	0 °(South)
Measuring period	2019/3/18～2020/3/17
Measuring points	Humidity : Air outlet, Air inlet, Indoor, Outside air, etc. Surface temperature : Radiation heating and cooling Electric power consumption : Total amount, Hot water supply, Heating and colling, Kitchen(IH), Total heat exchanger, etc. Smart meter : Commercial power supply, Electric power selling, Solar power generation, Charge・Discharge Wind velocity : Air outlet, Air inlet
Measuring accuracy	Temperature and humidity, Accuracy : Temperature ± 0.3 °C・Humidity ± 5 %, Electric current, Accuracy : ± 2.0 % rdg, ± 0.13 % f. s.
Measuring interval	Temperature, humidity: 10 minute Electric power consumption : 10 minute Wind velocity : At the time of completion

また、電力消費量は Fig.2 に示すように全系統、冷暖房、換気、給湯、厨房(IH クッキングヒーター動力のみ)を 10 分間隔で計測し、スマートメータでは買電量、売電量、太陽光発電量、蓄電池の充電・放電量を 1 時間間隔で計測している。なお、換気設備のエアバランスについては、吹出口・吸込口からの風量を竣工時の試運転調整後に熱線風速計で計測し、日射量は気象庁データ(東京都千代田区)を使用した。

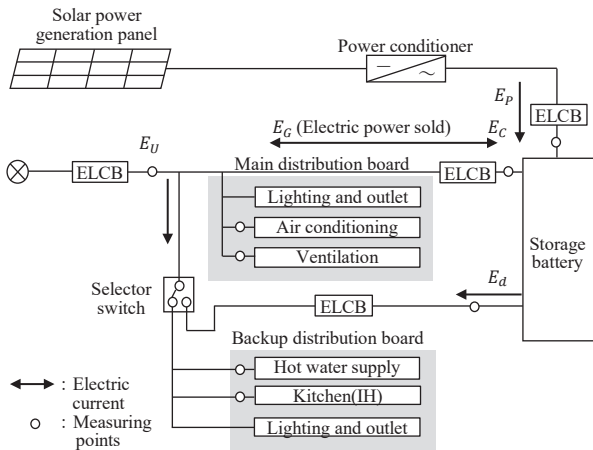


Fig.2 Overview of electric power system and measured points

3. 実測結果

3.1 実測期間内の室内外温度の比較

Fig.3 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、1 時間平均値で外気温度は-3.2 °C~37.7 °Cの年間変動幅であるのに対し、室内温度(1 階リビ

ング)は屋根集熱面に経由した外気を居室へ給気していることや、居室に設置された冷暖房機器(主に輻射冷暖房)でコントロールされていることから 16.9 °C~29.6 °Cの変動幅で推移し、年間を通じて概ね快適な室内熱環境であった。

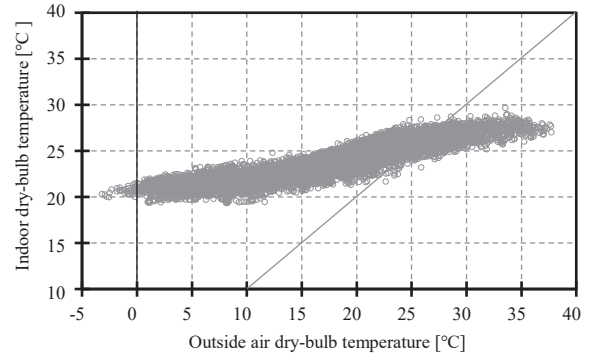
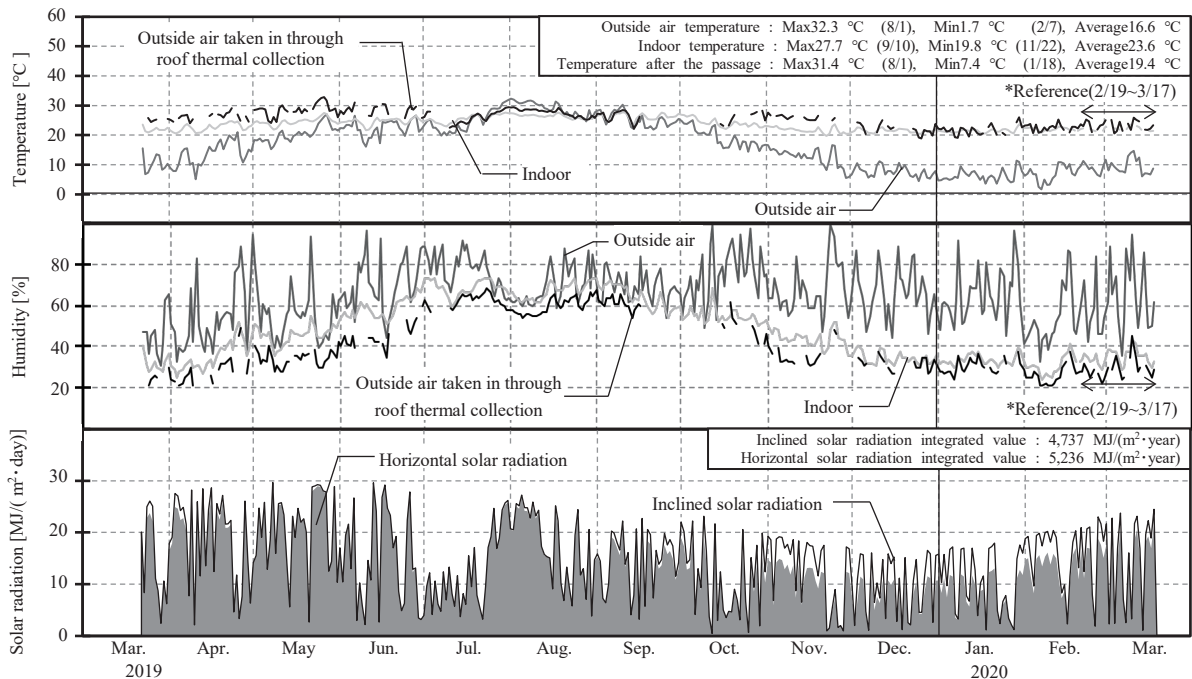


Fig.3 Relationship between indoor dry - bulb temperature and outside air dry-bulb temperature

3.2 外界気象と室内温湿度の年間推移

Fig.4 は実測建物で計測した室内外及び屋根集熱面経由の外気取入れ温湿度(日平均)、日射量(日積算)を示したものである。室内温度(1 階リビング)は、最低 19.8 °C、最高 27.7 °Cであり、評価期間での平均は 23.6 °Cであった。屋根集熱面経由の外気取入れ温度は、夏期が夜間放射冷却により、8 月 14 日 2 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(外気温度 27.9 °Cが 27.3 °C)となった。また、冬期においては太陽熱により 2 月 7 日 12 時において温度差が最大(外気温度 4.7°Cが 21.8 °C)となった。



*Reference: Calculated for multiple regression analysis
 (Objective variable : Indoor of temperature and humidity, Explanatory variables : air outlet in the first floor and air inlet in the second floor)

Fig.4 Outside air intake temperature and humidity indoors, outdoors, and via the roof thermal collection surface measured in the actual building, amount of solar radiation

4. 自然エネルギー利用換気システムによる外気負荷の削減効果

4.1 外気取入れ状況

Fig.5 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 1,975 時間で年間の 2 割程度、軒下経由の外気取入れは 6,723 時間で年間の 8 割程度であった。外気取入れ経路の切替は、夏期は時刻、冬期は屋根集熱温度で行われており、居住者の基本操作や機能の理解もあり、概ね設計意図に沿った運転が成された。

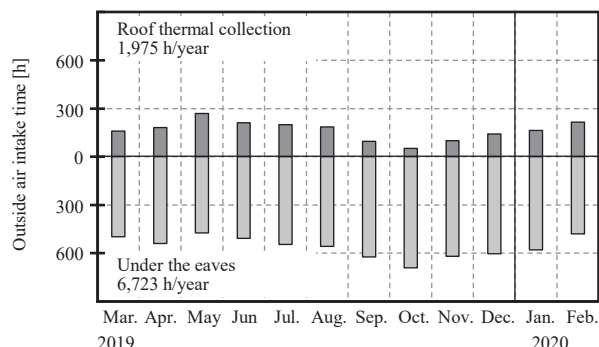


Fig.5 Time required for intake of outside air via the roof thermal collection surface or under the eaves per month

Fig.6 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。本報の実測建物における温度差は、 $-3.4\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 17.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲で推移しており、年間での取入れ時間は 1,975 時間であった。また、集計の結果夏期の夜間で温度差 $2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、冬期の屋根集熱により $11\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ の時間が多い。この集計結果への比較として太陽光発電パネル無しの前報におけるデータを重ねると、集熱温度の低下と取入れ時間の減少が明らかである。

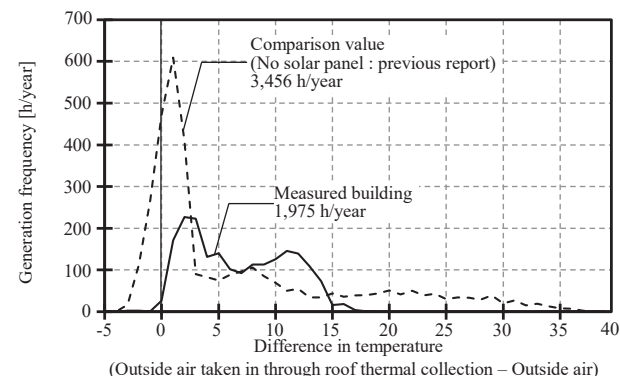


Fig.6 Difference in temperature from that of outside air taken in through the roof thermal collection surface

Fig.7 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。本報の実測建物における集計結果と前報の集計結果は概ね同様であることから、外気取入れ経路の切替が適切であることが確認されたが、年間での取入れ

時間が 6,723 時間と前報の実測建物 5,281 時間に比べて 2 割程度増加している。

この様に、太陽光発電パネル設置による屋根集熱面の集熱効率の低下が生じたが、切替え条件を適切に調整したことから、システムとして外気負荷削減に寄与する外気取入れが成されていた。

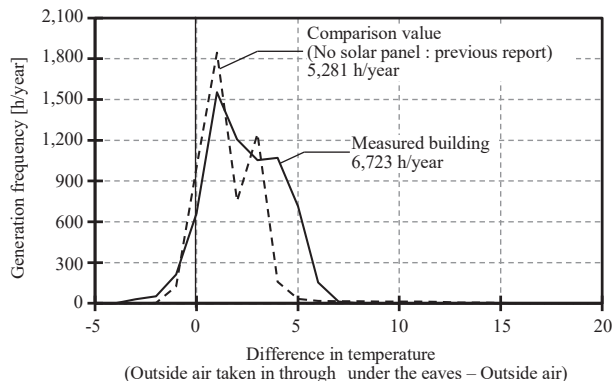


Fig.7 Difference in temperature from that of outside air taken in through the under the eaves

4.2 外気の予冷・昇温熱量

Fig.8 に外気の予冷・昇温熱量を月積算で示す。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。2019年7月～9月の期間において予冷熱量が、3月～5月及び11月～翌年2月において昇温熱量が得られていることから、夏期・冬期ともに外気負荷削減に寄与している。

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

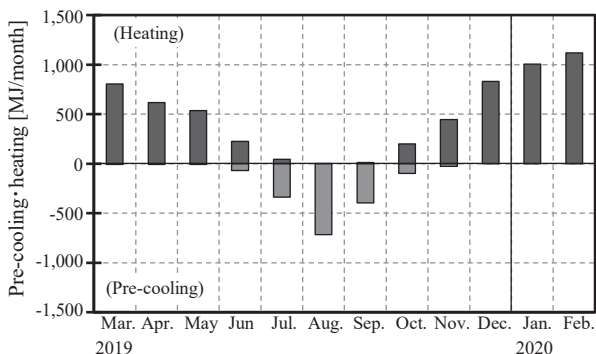


Fig.8 Amount of heat for pre-cooling/heating required from the natural energy ventilation system per month

4.3 年間の外気負荷削減効果

Fig.9 は、実測建物における自然エネルギー利用換気システムの外気負荷の削減効果を年間積算で評価したものである。実際の外気負荷は、式(2)から算出し、それによると年間 $19,860\text{ MJ/年}$ となり、自然エネルギー利用換気システムによる予冷・昇温熱量はそれぞれ $1,659\text{ MJ/年}$ 、 $5,842\text{ MJ/年}$ であり、この集計結果を踏まえると直接外気取入れをした場合の外気負荷は $27,362\text{ MJ/年}$ となる。よって年間積算値から見た外気負荷削減率は約 27%となる。

また、削減率は天候により変化するため、外気負荷の1日平均により外気負荷の削減率を評価したものを Fig.10 に示す。実測建物の外気負荷と直接外気取入れた場合の外気負荷との関係から、近似線の傾き 0.74 であった。日平均値による分散度を概観すると、プロットは概ね近似線付近に集約されており、安定的な外気負荷削減の効果が得られている。

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

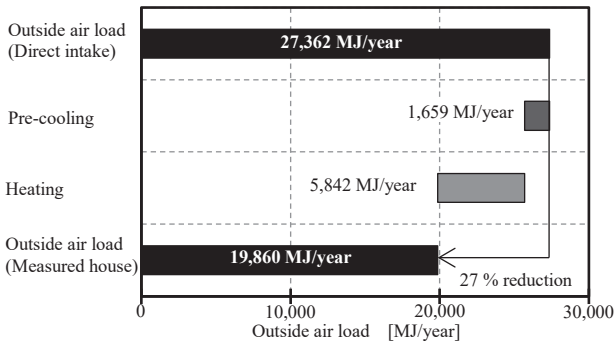


Fig.9 Outside air load reduction effect from the natural energy ventilation system per year

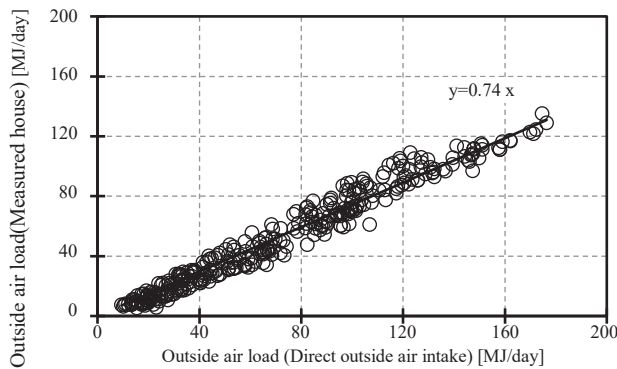


Fig.10 Relationship of outside air load for the natural energy ventilation system

5. 太陽光発電によるエネルギー自立性

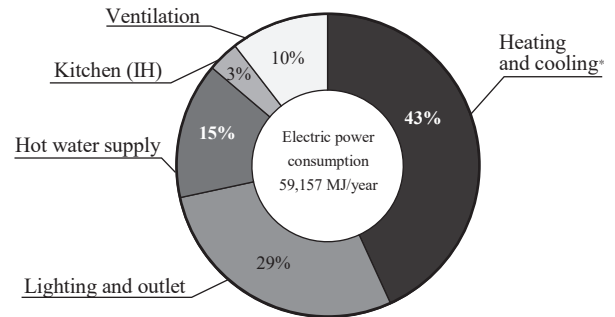
5.1 実測建物の電力消費量

実測建物における電力消費量と太陽光発電量の計測データの関係からエネルギー自立性の評価を行う。電力消費量は式(3)に示すように建物内で使用された電力量及び太陽光発電量から売電量と蓄電池に充電した電力量の差し引きによって算出した。

$$E_U = E_B + E_P + E_d - E_G - E_C \quad (3)$$

Fig.11 に実測建物の用途別年間電力消費量を示す。データは、一次エネルギーに換算⁹⁾した電力消費量を示している。年間の電力消費量は 59,157 MJ/年で、内訳として冷暖房は全体の 43%、電灯・コンセントは 29%、給湯は 15%、厨房が 3%、換気は 10% を占めている。年間を通して、輻射冷暖房による室温コントロールを主体としたことや

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い。



*Radiation air-conditioning was always in progress while the resident was at home, except for during a part of the interim period.
 The hot and cold water (outward) temperature settings for the radiation air-conditioning were arbitrarily chosen by the resident at 12–20 °C in summer and 28–38 °C in winter.

Fig.11 Annual electric power consumption by application

5.2 エネルギー自立性の評価

実測建物におけるエネルギー自立性は、既往研究⁸⁾や ZEH の評価手法⁹⁾を参考にした。式(4)、式(5)は、いずれも電力消費量に占める太陽光発電の自家消費量であり、式(4)が太陽光発電による余剰電力を評価に含まない「エネルギー自立率」、式(5)が余剰電力を評価に含む「エネルギー自給率」の定義式で、毎時データの積算を月単位で算出し、評価した。

$$SER = (E_P - E_G) / E_U \times 100 \quad (4)$$

$$P = E_P / E_U \times 100 \quad (5)$$

Fig.12 に実測建物のエネルギー自給率及びエネルギー自立率を示す。エネルギー自立率は年平均 27% であることから、自家消費せず系統電力への逆潮流が多い結果であった。特に冷暖房用の電力消費が増加する期間では、エネルギー自立率が上昇する傾向にあり、8 月において最も高く (35%)、冷暖房用電力消費が少ない 10 月において最も低い (19%)。一方、雨天の日が多く太陽光発電量が減少した 7 月と、冷暖房使用により電力消費量が増加した夏期、冬期のエネルギー自給率は 100% を下回るのに対し、中間期は電力消費量が少なく、晴天日が多いことから、自給率は最大で 155% (5 月) に上昇した。

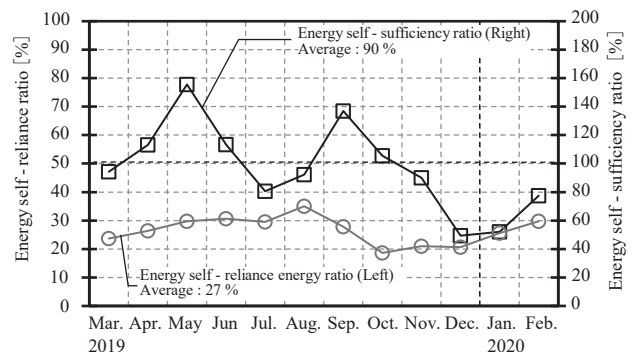


Fig.12 Energy self-sufficiency ratio and energy self-reliance ratio

Fig.13 に実測建物における基準建物(直接外気取入れを

行った場合), 実際の電力消費量と太陽光発電量の内訳を示す。実測建物における自然エネルギー利用換気システムによる一次エネルギー削減率は 11%であり, 太陽光発電・蓄電システムによる自家消費の削減量 15,659 MJ/年を加えると削減率は 35%となる。また, 太陽光発電・蓄電システムの自家消費量を差し引いた電力消費量 43,498 MJ/年と売電量 36,880 MJ/年との収支は 6,618 MJ/年で, 一次エネルギー削減率は 90%であった。

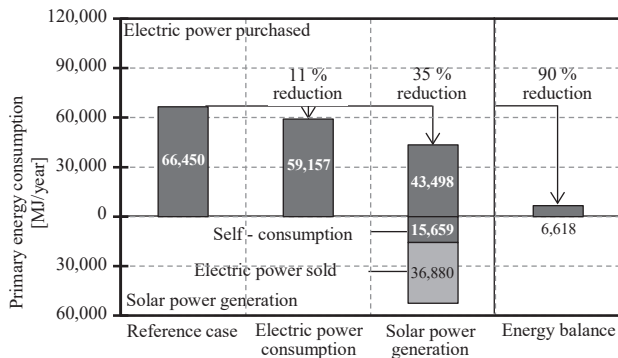


Fig.13 Annual reduction in primary energy consumption

6. おわりに

東京都日野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自然エネルギー利用換気システムと太陽光発電・蓄電システムにおけるエネルギー自立性の評価を行った。

その結果, 太陽光発電パネル設置による屋根集熱面の集熱効率の低下が生じるものの, 外気負荷削減に有効な換気運転が行われていた。また, 太陽光発電量の自家消費率を示すエネルギー自立率は, 年平均で 27%であったが, 余剰電力を評価に含むエネルギー自給率は, 年平均で 90%である。

住宅の温熱環境は居住者による任意調整の選択度が高く一定ではないことから, 温熱環境と省エネルギー性との関係については今後の研究課題としたい。また, 立地する気象特性や居住者の家族構成, 生活様式によりエネルギー消費特性は大きく変化するが, 本研究で得られた実居住下での実測結果が自然エネルギーによる外気負荷削減や太陽光発電によるエネルギー自立性を評価するうえでの参考になれば幸いである。

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。また, 本研究のデータ分析は, 工学院大学建築学部の笠井孝孝君, 谷田徳臣君, 八木時央君にご協力頂きました。ここに記し深謝します。

使用記号

U_A : 外皮平均熱貫流率	[W/(m ² · K)]	η_A : 日射熱取得率(冷房期)	[-]
q_{hc} : 屋根集熱面による 予冷・昇温熱量	[kJ/h]	V_{ex} : 全熱交換器の 風量(=170)	[m ³ /h]
ρ : 空気密度(=1.26)	[kg/m ³]	h_o : 外気エンタルピー	[kJ/kg]
h_{hc} : 外気取入れエンタルピー	[kJ/kg]	h_i : 室内エンタルピー	[kJ/kg]
q_{ot} : 外気負荷	[kJ/h]	E_U : 電力消費量	[MJ/年]
E_B : 買電量	[MJ/年]	E_P : 太陽光発電量	[MJ/年]
E_d : 蓄電池放電量	[MJ/年]	E_G : 売電量	[MJ/年]
E_C : 蓄電池充電量	[MJ/年]	SER : エネルギー自立率	[%]
P : エネルギー自給率			

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. Koizumi, T. Nishikawa, M. Mochida, H. Maruya, 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, Journal of Japan Solar Energy Society, **47** (2), 75-81 (2021).
- 3) N. Kondo, T. Koizumi, T. Nishikawa, H. Maruya, Study on energy independence evaluation of wooden house using sunlight and solar heat. (Part1) Architectural overview and summer survey., Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2019) (Oct. 2019), 99-102, Aomori, Aomori, Japan.
- 4) M. Mochida, T. Nishikawa, N. Kondo, H. Maruya, T. Koizumi, Study on energy independence evaluation of wooden house using sunlight and solar heat (part1) Evaluation building outline and actual measurement data., Architectural Institute of Japan, Summaries of technical papers of annual meeting (2020) (Sep. 2020), 1255-1256, Chiba, Chiba, Japan.
- 5) N. Kondo, T. Nishikawa, M. Mochida, H. Maruya, T. Koizumi, Study on energy independence evaluation of wooden house using sunlight and solar heat (part2) Evaluation of external air load reduction effect and energy independence., Architectural Institute of Japan, Summaries of technical papers of annual meeting (2020) (Sep. 2020), 1257-1258, Chiba, Chiba, Japan.
- 6) M. Mochida, T. Nishikawa, T. Koizumi, Study on energy independence evaluation of wooden house using sunlight and solar heat, The Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, Technical papers of annual meeting (2020) (Sep. 2020), 265-268, Online.
- 7) 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
- 8) T. Tanaka, T. Kajiyama, M. Yokoi, T. Kumagai, T. Kawase, etc., Study on energy evaluation of net zero energy building in operation phase part1-analysis of energy performance and proposal of new evaluation index, Transactions of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan, **259**, 1-9, (2018).
- 9) 経済産業省 資源エネルギー庁, 令和元年度 ZEH ロードマップ委員会 とりまとめ, 38-40 (2020), 経済産業省, 東京.