

Study on Natural Energy Usage and Energy Independence in Wooden Detached House (Part 1) Evaluation of Outside Air Load Reduction for Roof Thermal Collection and Earth Tube Based on Yearly Measurements

Toyohiro NISHIKAWA^{*1‡} Masanori MOCHIDA^{*2} Hiroo MARUYA^{*3} Toshiaki KOIZUMI^{*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（第一報） 年間実測に基づく屋根集熱とアースチューブによる外気負荷削減の評価

西川 豊宏^{*1‡}

持田 正憲^{*2}

丸谷 博男^{*3}

小泉 寿明^{*4}

Abstract

To evaluate the effectiveness of using natural energy in wooden houses, this study uses long-term measurements in actual homes to measure the extent to which the outside air load is reduced by solar heating and thermal storage, etc., and clarify the level of energy independence achieved by solar power. In this report, we used annual measurement data from houses located in the city of Fujisawa (Kanagawa Prefecture) to check outside air intake situation and the outside air load reduction effect of the natural energy ventilation system. The results the outside air load of this system is 10944 MJ / year, which is a 40.5% reduction compared to outside air load of 18394 MJ / year due to the direct intake. Roof thermal collection is 2936 MJ/year and reheating・pre-cooling of earth tube is 3842 MJ/year・640 MJ/year. Therefore outside air load was reduced good balance in each outside air intake route.

Keywords: Wooden detached house, Natural energy, Earth tube, Roof thermal collection, Yearly measurements
キーワード：木造戸建て住宅，自然エネルギー，アースチューブ，屋根集熱面，年間実測

1. はじめに

地球温暖化や資源枯渇等が問題になる中で住宅分野におけるエネルギー消費削減も課題となっており，我が国のエネルギー基本計画⁽¹⁾において「2030年までに新築住宅の平均で ZEH（ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス）の実現を目指す」ことが政策目標とされており，その具体化が推進されている．ZEH 化のための建築主の費用負担に対する補助やインセンティブ付与は，その動機付けに寄与するものであるが省エネルギーやエネルギー効率を向上させるための要素技術の高度化とその根拠は，今

後より重要となる．

本研究は，これまで蓄積された多くの既往研究^(2, 3)を参考に，実居住下の長期実測から太陽熱や地中熱，躯体蓄熱等による木造住宅における自然エネルギー利用の有効性を評価し，電力消費量と太陽光発電量の関係からエネルギー自立性の程度を明らかにするものである．本報では，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，実居住下において一年間にわたり連続計測した実測データに基づき，自然エネルギー利用による外気負荷削減の効果を評価する．なお，本論文は，関連する既発表論文^(4,7)の内容の精査と新たな知見を加えたものである．

*1 Prof., School of Architecture, Kogakuin Univ., Dr.Eng.,
1-24-2 Nishishinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 163-8677, Japan
‡e-mail: t-nskw@cc.kogakuin.ac.jp

*2 MOCHIDA Building Engineering

*3 President of Arts and Architecture

*4 Graduate Student, Kogakuin University

Received: September 16 2020, Accepted: October 24 2020

*1 工学院大学 教授 博士(工学) (〒163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2)

‡e-mail: t-nskw@cc.kogakuin.ac.jp

*2 MOCHIDA 建築設備設計事務所

*3 一級建築士事務所 株式会社エーアンドエーセントラル

*4 工学院大学大学院 工学研究科 建築学専攻 修士課程

(原稿受付：2020年9月16日，受理日：2020年10月24日)

2. 実測建物とシステム概要

実測を行った建物は、神奈川県藤沢市に所在する延床面積約 150 m² の木造二階の戸建て住宅である (Table 1). この戸建て住宅には、アースチューブもしくは屋根集熱面経由で外気を取入れており、自然エネルギーとして太陽熱と地中熱を利用している. リビングルームには補助的な冷暖房機器として空冷ヒートポンプエアコンと薪ストーブが設置されている.

Fig.1に示す通り、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にて熱交換される. その後、取入れ外気は熱交換後に、1階、2階の床下に吹き出され、基礎コンクリートに蓄熱された後、居室へ給気される. 一方、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に、2階の床下空間を経由して居室に給気する

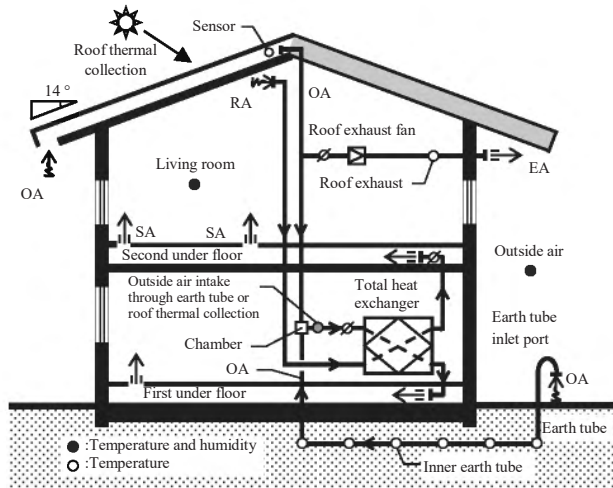


Fig.1 System diagram

Table 1 Overview of evaluated building

Location	Fujisawa City, Kanagawa Prefecture
Total floor area	Approx 150 m ²
Total air volume	Approx 300 m ³
Heat transmission coefficient	U _A : 0.78 W/(m ² · K)
Solar heat gain coefficient	η _A : 3.8

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

	Intake outside air of the earth tube	Intake outside air of the roof thermal collection
Summer	5:00~19:00	19:00~5:00
Winter	At 18.5 °C lower	At 22 °C higher

Table 3 Outline of system and measurement

Earth tube	Length : 18 m Tube diameter : 200 mm Buried depth : 2 m Use material : Polyvinyl chloride pipe
Roof thermal collection	Area : 40.95 m ² The pitch of a roof : 14 ° Thickness of the vent layer : 40 mm Use material : Galvalume · Spandrel Galvalume steel sheet, Moisture permeation · thermal barrier, Waterproof sheet, Waterproof plywood, Phenolic foam, Moisture-proof airtight film
Building direction	23 degrees from the south to the west
Total heat exchanger	Air volume : 170 m ³ /h Consumed electric power : 103 W
Roof exhaust fan	Air volume : 390 m ³ /h Consumed electric power : 23 W
Measuring period	2013/6/16~2014/6/15
Measuring points	Humidity : Air outlet, Air inlet, Indoor, Outside air Temperature : Inner duct, Inner earth tube (Air volume : Air outlet, Air inlet)
Measuring sensor	Temperature and humidity, Accuracy : Temperature ± 0.3 °C · Humidity ± 5 %RH Temperature, Accuracy : ± 0.3 °C
Measuring interval	At 5-minute interval : 6/16~9/7 At 15-minute interval : 9/8~11/29 At 10-minute interval : 11/30~6/15

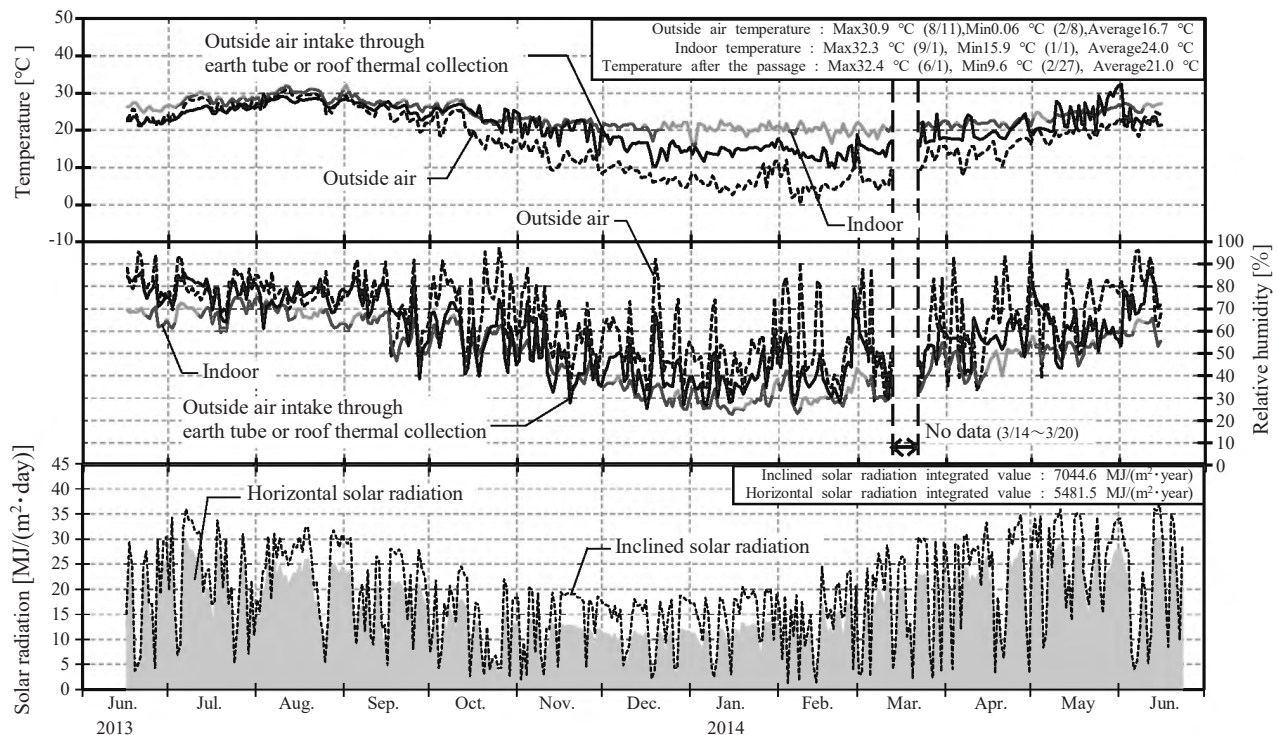


Fig.2 Weather data and indoor temperature over a year

ことで、室内空気を適度に循環させている。また、外気取入れは、Table 2 に示す条件に従って、夏期が時刻、冬期が屋根集熱面内部の温度により切り替わる制御となっている。外気取入れがアースチューブ経由の場合、屋根集熱面内部の空気は、排気ファンにより排熱されている。なお、夏期・冬期共に設定の切り替えは、居住者の生活スタイルや温熱感により任意に変更可能となる配慮が施されている。計測は、屋内外及び全熱交換器に接続されるダクト内に温湿度センサーを設置し、5分、10分、15分間隔でそれぞれ自動計測を行い、居住者が通常の生活となった2013年6月16日～2014年6月15日のデータを評価対象（2014年3月14日～同年3月20日欠測）とした。

3. 実測結果

3.1 実測期間内の外界気象と室内温湿度

Fig.2 に年間の日平均温湿度及び日射量を示す。実測建物が所在する藤沢市（建築物省エネ法：地域区分 7）の気象観測所における1992年～2015年の年平均外気温度16.1℃に対して、実測建物にて計測した年平均外気温度は16.7℃であり、平年に比べて高い。また、実測建物における日平均室温の年間平均温度は24.0℃であり、最高32.2℃（9月1日）～最低15.9℃（1月1日）で推移した。但し、日平均が最高、最低となった日は、居住者が不在であったため、在宅日に限定すると最高30.9℃（8月19日）、最低16.3℃（2月19日）になる。なお、日射量はNPO法人シティ・ウォッチ・スクエアによる実測建物近傍での気象観測値を用いた。

3.2 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。データは計測データの一時間平均値で、外気温度

は-1.2℃～35.0℃の年間変動であるのに対し、室内温湿度は居住者による通風・換気と薪ストーブによる暖房でコントロールされていることから12.5℃～34.5℃の変動幅で推移した。年間を通じて概ね良好な室内熱環境が保たれているが、一部で室内温度が28.0℃を超え、外気より高い時間帯（居住者不在時間含む）が出現していたため、夏期においては適度な冷房が必要と判定された。

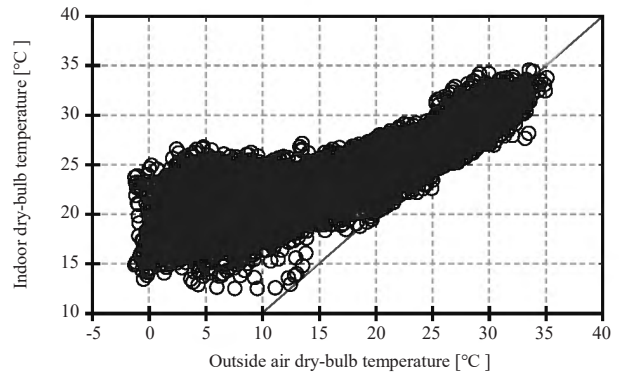


Fig.3 Relationship between indoor dry-bulb temperature and outside air dry-bulb temperature

3.3 外気取入れ温度の年間推移

Fig.4 に年間を通じた外気取入れ経路（アースチューブ・屋根集熱面）の温度と外気温度の推移を示す。Table 2 に示したシステムの制御条件は、2013年10月18日に切り替えられており2013年6月16日～10月17日は夏期運転、2013年10月18日～2014年6月9日は冬期運転である。アースチューブ経由の外気取入れ温度は、評価期間において6.3～29.7℃であり、同じ期間の外気温度0.1～30.9℃に比べて温度差が小さくなっている。夏期運転の期間では、7月12日において外気温度とアースチューブ通過後の温度との差が最大となり、外気温度より3.4℃低い

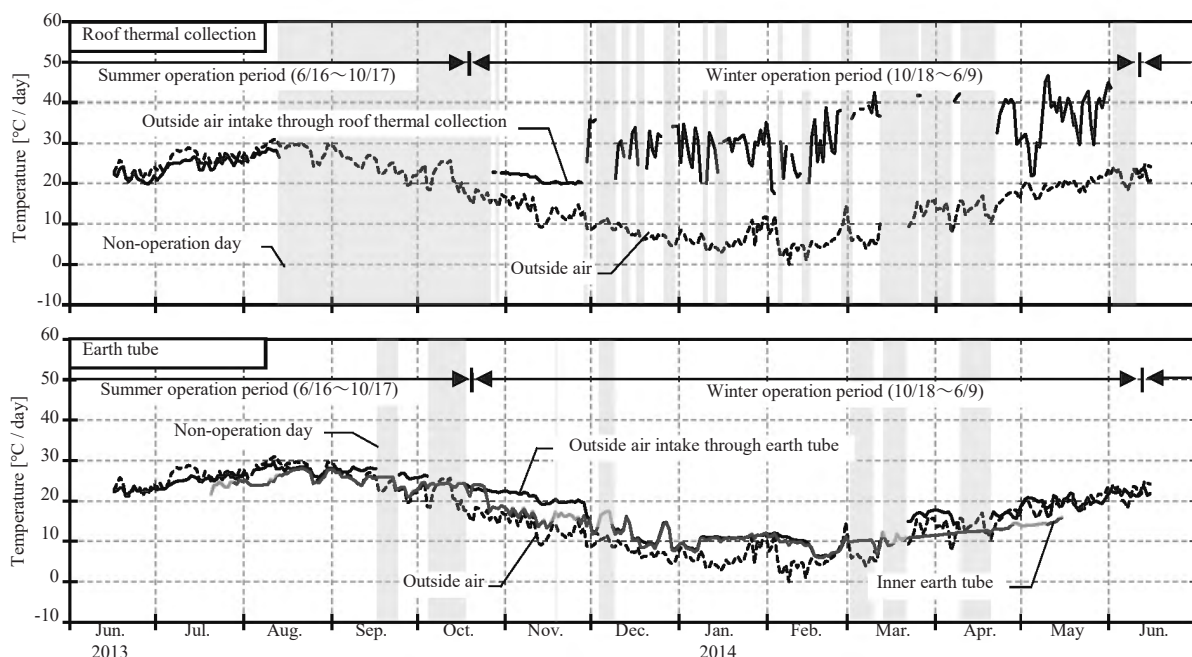


Fig.4 Operation of earth tube and roof thermal collection

25.4℃で外気取入れされていた。また、冬期運転の期間では、2月8日における温度差が最大となり、外気温度より10.8℃高い10.9℃での外気取入れとなり、さらに屋根集熱面経由の外気取入れを含めると最大で28.6℃、平均で16℃の昇温となった。

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.5 に屋根集熱面及びアースチューブ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1,636時間で年間の2割程度、アースチューブ経由の外気取入れは5,819時間で年間の8割程度であった。外気取入れ経路の切り替えは、夏期は時刻で、冬期は屋根集熱温度で制御されているため、外界気象に対する切り替え条件の最適化は必要になるが、温暖な立地条件であることから、概ね良好な稼働状況であったと判定される。

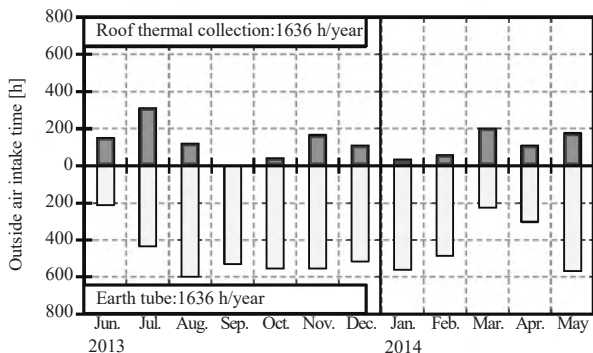


Fig.5 Outside air intake time through earth tube and roof thermal collection

Fig.6 に屋根排熱温度（夏期）・外気取入れ温度（冬期）と室内温度の関係を示す。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日に選定し、外気取入れ温度の状況の評価した。夏期においては概ね外気を超える屋根集熱面経由の空気を排気ファンで室外へ排出しており、屋根集熱面内の中空層温度の上昇を抑制し、外皮負荷削減に寄与していると予想される。一方、冬期では室内温度と同等以上の外気が室内に取入れられており、外気負荷削減に寄与している。

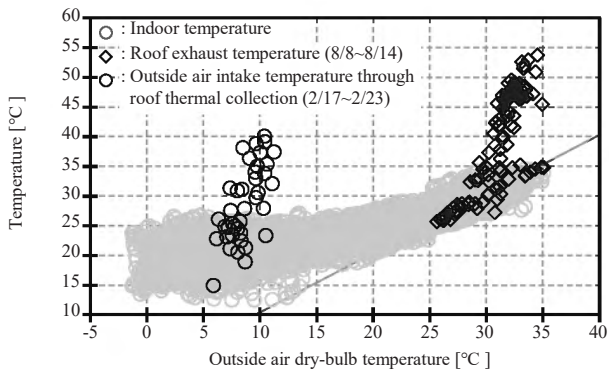


Fig.6 Relationship of roof exhaust temperature(summer)・outside air intake temperature(winter) and indoor temperature

Fig.7 にアースチューブ経由の外気取入れ温度（夏期・冬期）と室内温度の関係を示す。Fig.6と同じ代表日において、夏期はアースチューブ経由の温度が概ね外気や室内温度より低く、外気温度が25.6~35.1℃の変動幅に対して取入れ温度は24.6~29.8℃の変動幅で推移している。一方、冬期は外気温度を超える取入れ温度となっており、夏期と同様に外気温度の変動幅に対して取り込み温度の変動幅は小さい。このことから、夏期・冬期ともにアースチューブによる外気負荷の削減が概ね達成されていることが確認された。

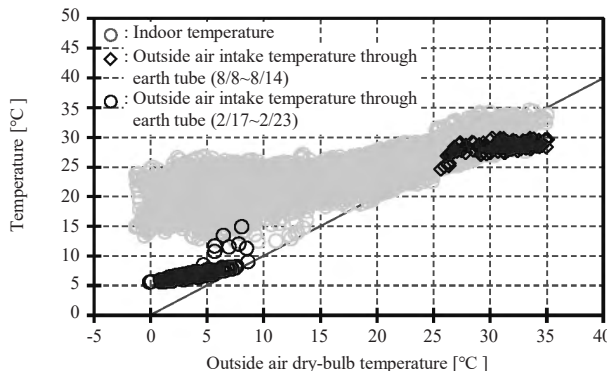


Fig.7 Relationship of outside air intake temperature(summer・winter) through earth tube and indoor temperature

アースチューブ経由の外気取入れと屋根集熱面からの排気は連動している。Fig.8 は屋根集熱面の頂部から室外へファンにより排気された排熱量を月別に示したものである。排熱量は夏期の7月から9月にかけて大きく、屋根面から室内への通過熱負荷の削減に寄与している。年間稼働時間はアースチューブ経由の外気取入れ時間と等しく5,819時間であるため、排気ファンの電力消費量1,170 MJ（一次エネルギー換算値：式(1)から算出）に対し2,730 MJ（式(2)から算出）の年間積算排熱量が得られている。

$$Q_{RE} = P_{re} t f \tag{1}$$

$$q_{re} = c p V_{re} (\theta_{re} - \theta_o) \tag{2}$$

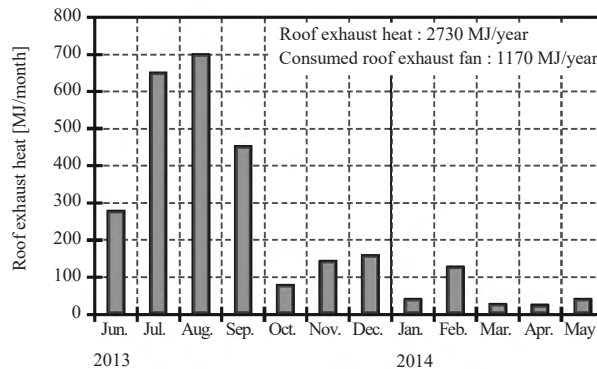


Fig.8 Roof exhaust heat by months

3.5 外気と取入れ空気温度差の発生頻度

Fig.9 に屋根集熱面出入口における温度差の発生時間の頻度分布を示す。屋根集熱面通過後と外気の温度差は、

夏期（6月～8月）において、 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲に分布しており、同期間の熱損失となる時間数は222時間、熱取得となる時間数が521時間であった。また冬期（12月～2月）においては、 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+28\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲に分布しており、同期間で熱損失となる時間数は3時間、熱取得となる時間数が198時間であったことから、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、冬期の外気負荷の削減に寄与していると判定される。

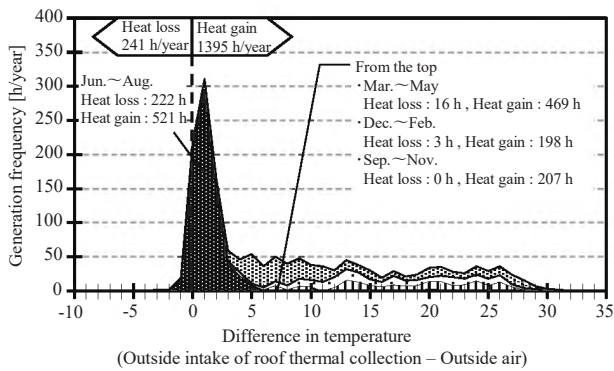


Fig.9 Difference in intake temperature through roof thermal collection panel

Fig.10 にアースチューブ出入口における温度差の発生時間の頻度分布を示す。アースチューブ経由の取入れ温度と外気の温度差は夏期（6月～8月）において、 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲に分布しており同期間の熱損失となる時間数は1,034時間、熱取得となる時間数が489時間であった。また、冬期（12月～2月）においては、 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲に分布しており同期間で熱損失となる時間数は22時間、熱取得となる時間数が1,540時間であったことから、アースチューブ稼働時間のうち、夏期は68%、冬期は99%に当たる時間数が外気負荷の削減に寄与していると判定される。

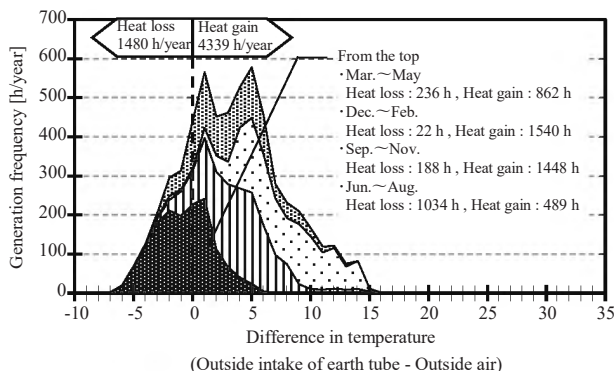


Fig.10 Difference in intake temperature through earth tube way

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

4.1 屋根集熱とアースチューブによる取入れ外気の昇温・予冷熱量

自然エネルギー利用換気システムによる昇温・予冷熱量

を式(3)、式(4)から求め、Fig.11 に屋根集熱面経由の外気取入れによる昇温・予冷熱量を月別に示した。夏期運転の期間となる6月～9月は、屋根集熱面経由の外気は排気ファンにより排熱されるため、昇温・予冷熱量とも僅かである。一方、冬期運転の期間となる10月～5月は屋根集熱面からの熱取得があり、外気が昇温されて室内へ取入れられる。同様に、Fig.12 にアースチューブ経由の外気取入れによる昇温・予冷熱量を示す。夏期の6月～8月ではアースチューブによる予冷熱量が、10月から5月は外気の昇温効果が得られており、地中熱による外気負荷削減効果が確認された。

$$q_{hc} = c\rho V_{ex}(\theta_{hc} - \theta_o) \quad (3)$$

$$q_{et} = c\rho V_{ex}(\theta_{et} - \theta_o) \quad (4)$$

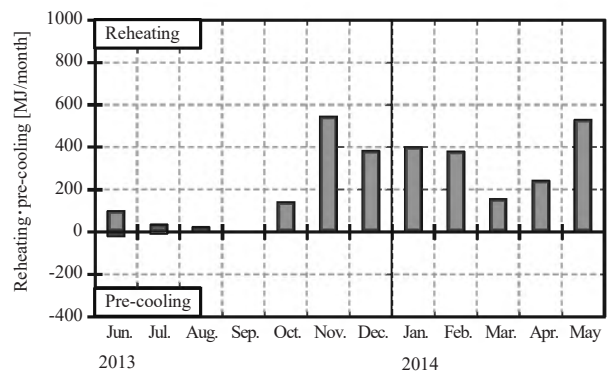


Fig.11 Outside air intake reheating・pre-cooling through roof thermal collection

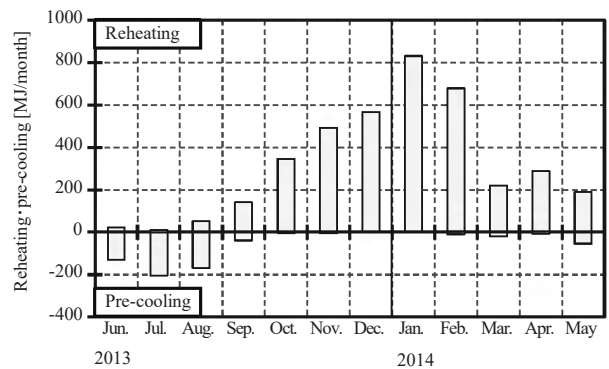


Fig.12 Outside air intake reheating・pre-cooling through earth tube

4.2 外気負荷削減効果の年間評価

Fig.13 は、室内温度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。グラフ中のデータは、実測期間における時間平均値であり、近似線の傾きが0.597であることから、外気取入れによる負荷が当システムにより平均で約40%に低減されている。また、年間積算での外気負荷削減の内訳はFig.14に示す通りである。室内温度を基準として算出した当システムの外気負荷は10,944 MJ/年で、外気の直接取入れによる外気負荷（式(5)から算出）18,394 MJ/年に比べて40.5

%の削減である。削減量 7,449 MJ/年のうち屋根集熱量は 2,936 MJ/年、アースチューブによる昇温・予冷熱量はそれぞれ 3,842 MJ/年、640 MJ/年であることから、それぞれの外気取入れ経路においてバランス良く負荷が削減されていた。 $q_{ol} = cpV_{ex}(\theta_i - \theta_o)$ (5)

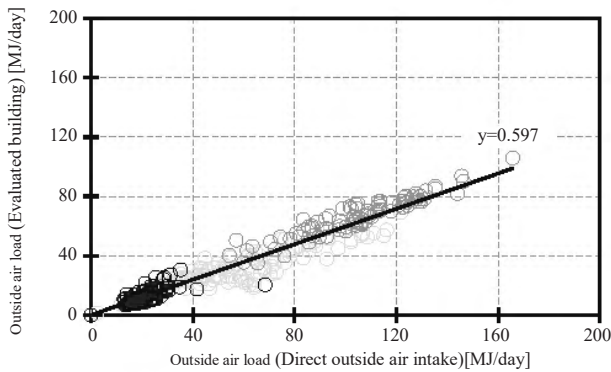


Fig.13 Relationship of outside air load for the natural energy ventilation system

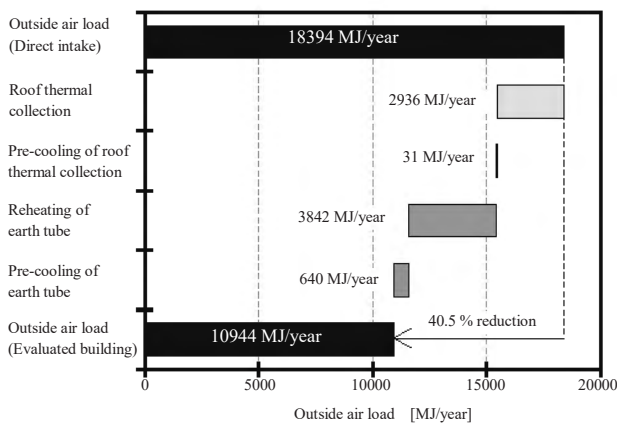


Fig.14 Outside air load reduction effect of the natural energy ventilation system

5. おわりに

神奈川県藤沢市に所在する屋根集熱面及びアースチューブを用いた自然エネルギー利用換気システムを導入した木造戸建て住宅の実居住下での年間実測から外気負荷削減の評価を行った。その結果、外気温度と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。また、室内温度の実測データを基準に算出した外気負荷は 10,944 MJ/年で、外気直接取入れによる外気負荷が 18,394 MJ/年であることから、当システムにより年間約 40 %の外気負荷削減になった。次報では、自然エネルギー利用換気システムが導入された埼玉県春日部市の実居住の木造戸建て住宅における電力消費量の調査結果と太陽光発電による電力自給率の予測について報告する予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり林陽生様、龍口元哉様には実測調査を始め多大な協力を頂きました。また、計測作業やデータ集計においては、本学建築学部西川研究室の多くの学生より協力を頂きました。ここに記し深謝します。

使用記号

q_{re} : 屋根排熱量	[kJ]
q_{hc} : 屋根集熱面による昇温・予冷熱量	[kJ]
q_{et} : アースチューブによる昇温・予冷熱量	[kJ]
q_{ol} : 外気負荷	[kJ]
P_{re} : 排気ファンの電力消費量(=23)	[W]
t : 稼働時間	[h]
f : 一次エネルギー換算係数(=9.76) ⁽⁸⁾	[kJ/Wh]
c : 比熱(=1.0)	[kJ/(kg·K)]
ρ : 空気密度(=1.166)	[kg/m ³]
V_{ex} : 全熱交換器の風量(=168)	[m ³ /h]
V_{re} : 屋根排気ファンの風量(=390)	[m ³ /h]
θ_o : 外気温度	[°C]
θ_i : 室内温度	[°C]
θ_{hc} : 屋根集熱経由の外気取入れ温度	[°C]
θ_{et} : アースチューブ経由の外気取入れ温度	[°C]

参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁, 第5次エネルギー基本計画, 35 (2018), 経済産業省, 東京.
- 2) K. Nakamura, T. Watanabe, T. Hayashi, Y. Ryu, Y. Akashi, Guideline of Plan of Solar House with Solar Air Collector and Floor Heating System, Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), 64 (516), 31-38 (1999).
- 3) T. Mitamura, H. Harasawa, Y. Gomibuchi, Earth Heat Utilization in the Central Air-conditioning House Field Measurement in the Show House Equipped with an Earth Tube System, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2013) (Nov. 2013), 563-566, Naha, Okinawa, Japan.
- 4) T. Nagao, T. Nishikawa, F. Kobayashi, The study on whole-house air conditioning ventilation system utilizing natural energy (Part 1) The survey on reducing fresh air load of ventilation system in actual building, Architectural Institute of Japan, Summaries of technical papers of annual meeting (2014) (Sep. 2014), 633-634, Kobe, Hyogo, Japan.
- 5) K. Togano, T. Nishikawa, F. Kobayashi, M. Yoshino, The study on whole-house air conditioning ventilation system utilizing natural energy (part 2) Appraise the amount of fresh air load reduction to earth tube and solar thermal collector in year, Architectural Institute of Japan, Summaries of technical papers of annual meeting (2015) (Sep. 2015), 571-572, 2015.9, Isehara, Kanagawa, Japan.
- 6) F. Kobayashi, T. Nishikawa, The study on whole-house air conditioning ventilation system utilizing natural energy of wooden detached houses (Part 1) System compendium and seasonal survey, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2014) (Nov. 2014), 97-100, Iwaki, Fukushima, Japan.
- 7) F. Kobayashi, T. Nishikawa, M. Yoshino, The study on whole-house air conditioning ventilation system utilizing natural energy of wooden detached houses (Part 2) To evaluate outside air load reducing effect by means of changed operating condition system, Proceedings of JSES/JWEA Joint Conference (2015) (Nov. 2015), 127-130, Miyazaki, Miyazaki, Japan.
- 8) 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.