



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	太陽熱利用型パッシブ換気システムの実用化に関する研究
Author(s)	松永, 潤一郎
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16127号
Issue Date	2024-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16127
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/93638
Type	doctoral thesis
File Information	Junichiro_Matsunaga.pdf



博士論文

太陽熱利用型パッシブ換気システムの
実用化に関する研究

2024 年 8 月

松永潤一郎

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	2
1.2 研究の目的	4
1.3 既往研究と本研究の位置付け	5
1.3.1 太陽エネルギーの活用	5
1.3.2 パッシブ換気	6
1.3.3 換気システムの持つ課題と取り組み	8
1.4 本論文の構成と概要	10
参考文献	12
第2章 壁付太陽熱集熱パネルの定量的評価	17
2.1 はじめに	18
2.2 壁付太陽熱集熱パネルの概要	19
2.3 太陽熱集熱パネルの集熱量予測シミュレーションの構築	20
2.3.1 集熱量の計算方法	20
2.3.2 集熱量計算のための熱容量の同定	21
2.3.3 太陽熱集熱パネルに入射する日射量とファン風量の関係	23
2.3.4 実建物による実測と集熱量予測シミュレーションとの比較	24
2.4 集熱量予測のための入射日射量	26
2.4.1 全天日射量の直散分離	26
1) 新しい直散分離に関する簡易手法の構築	26
2) 本研究モデルと既往モデルとの比較	27
2.4.2 透過日射量の算定法	32
1) 日射量を求める基本式	32
2) 太陽熱集熱パネルへの日射の透過率の算定	32
2.5 第2章のまとめ	34
参考文献	35
第3章 太陽熱利用型パッシブ換気システムの性能評価	36
3.1 はじめに	37
3.2 太陽熱利用型パッシブ換気システムの概要	37
3.3 実建物における性能評価	38
3.3.1 建物概要	38
3.3.2 測定項目と測定期間	39
3.3.3 給気予熱効果	42
1) 太陽熱集熱パネルの稼働状況	42
2) 日照日の集熱性能	43
3) 冬期における期間集熱性能	44

4) 太陽熱集熱パネルの集熱効率	45
3.3.4 太陽熱利用型パッシブ換気システムの換気負荷低減効果.....	46
3.4 集熱量予測シミュレーションと実測結果の比較	47
3.5 第3章のまとめ	48
参考文献	49
第4章 一次エネルギー及び二酸化炭素排出量の評価	50
4.1 はじめに	51
4.2 検討条件	51
4.2.1 検討換気システム	51
4.2.2 検討地域.....	54
4.2.3 エネルギー換算係数	55
4.2.4 換気システムのエネルギー計算方法.....	56
4.3 太陽熱集熱パネルの設置条件	57
4.4 検討結果	59
4.4.1 一次エネルギー消費量比較	59
1) 換気システム別一次エネルギー消費量.....	59
2) 地域別一次エネルギー消費量比較	61
4.4.2 地域別二酸化炭素排出量比較.....	63
4.5 第4章のまとめ	66
参考文献	67
第5章 ライフサイクルコストの試算と評価.....	68
5.1 はじめに	69
5.2 各換気システムのメンテナンスについて	69
5.2.1 太陽熱利用型パッシブ換気システム.....	69
5.2.2 第三種換気システム	70
5.2.3 第一種熱交換換気システム	70
5.2.4 換気システム本体交換の実態.....	71
1) ファン交換工事	71
2) ダクトについて	73
5.3 計算条件とコスト試算	74
5.4 検討結果	75
5.4.1 ヒートポンプ暖房方式の場合.....	75
5.4.2 ガス暖房方式の場合	78
5.4.3 ライフサイクルコスト内訳	82
5.5 第5章のまとめ	85
注	86
参考文献	86
第6章 総括.....	87

6.1 本研究のまとめ	88
6.2 今後の課題と展望.....	89
6.2.1 課題について	89
1) 積雪の影響.....	89
2) 影の影響	89
3) デザイン的な課題.....	90
6.2.2 展望について	91
1) 他の換気システムとの組み合わせ	91
2) 窓の代わりの SAH	93
3) 夏の活用方法	93
4) 別荘建築への活用.....	93
5) JIS への適合評価	93
6.3 おわりに	94

第1章 序論

1.1 研究の背景

2050 年の脱炭素社会を目指し、再生可能エネルギーの拡大と省エネルギー技術のさらなる革新が必要である。また、2022 年に始まった、ウクライナとロシアの戦争に端を発する世界的なエネルギー価格の急激な上昇や、安全保障上のエネルギー確保の問題、さらにエネルギー使用量の大幅な削減の必要性が生じている。日本における家庭分野のエネルギー消費は 2018 年度で約 15%¹⁾と無視できない割合である。

住宅における省エネルギー化を推進するため、2025 年には現行省エネルギー基準の義務化が予定されている。さらに、2030 年には新築される住宅・建築物について、使用するエネルギー（暖房・冷房・換気・給湯・照明・その他）を創るエネルギーが上回るネット・ゼロ・エネルギー・ハウス（ZEH）水準への引き上げが予定されている²⁾。

近年の省エネルギー技術の進歩で、高性能建材が増えており、特に窓と断熱材の高性能化が進んでいる。2022 年 10 月に改定された住宅性能表示制度では、より高性能な住宅への誘導基準が引き上げられ、日本の基準もヨーロッパの誘導水準に近づいた³⁾。

このように、外皮性能が向上し断熱部位からの熱損失が減少すると、換気による熱損失の割合が相対的に大きくなる（図 1.1）。そのため、この換気負荷を減らすために様々な換気システムが開発され、市場に製品投入されている。

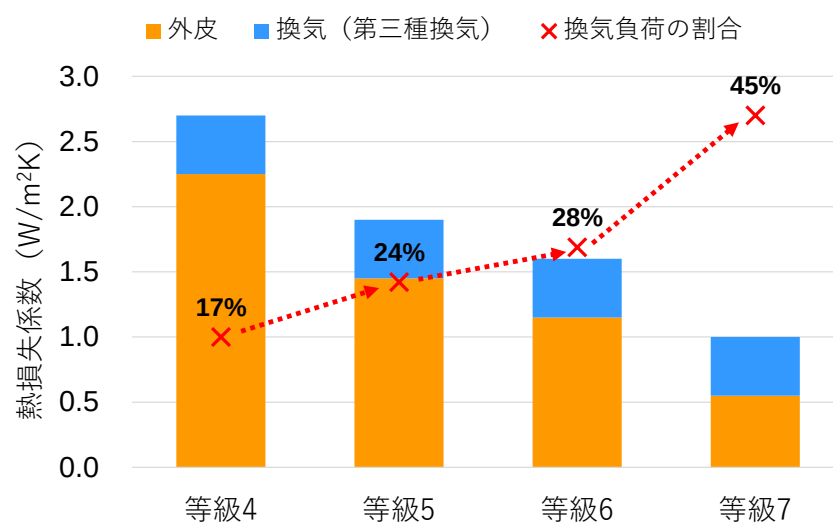


図 1.1 断熱等級による換気負荷と外皮からの熱損失割合

24 時間換気システムは、2003 年に施行された改正建築基準法（シックハウス法）⁴⁾で常時換気が求められることとなり、すべての新築住宅に設置が義務付けられている。また、2019 年 12 月に発生した新型コロナウイルス感染症の世界的流行により、換気的重要性に対する認識が高まった。建物における換気は、居住者の健康を守るために極めて重要であり、感染症対策としても換気の果たす役割は非常に大きい。

現在、住宅において第三種換気システム（以後第三種換気）が最も広く普及し、一般的に使用されている。しかし、住宅の高性能化に伴い、換気負荷を抑制するために、第一種熱交換換気システム（以後熱交換換気）の採用が増えている。

熱交換換気は、室内の汚れた空気を排出する際に、換気システムに内蔵されている熱交換素子に排気を通過させることで、排気の熱を回収し、新鮮な外気にその熱を伝達する仕組みで、換気負荷を減らすことが可能なシステムである。しかし、換気システムの運転には、空気を搬送するエネルギーが必要である。第三種換気では排気ファン 1 台の使用となるが、熱交換換気では熱交換を行うために排気ファンと給気ファンの 2 台を使用する必要がある、さらに、空気抵抗の高い熱交換器を通過させるために、空気搬送動力が増加してしまう。依光ら⁵⁾の研究で、各種換気システムの年間一次エネルギー消費量の試算で、熱の回収量が少ない温暖地においては、熱交換換気が必ずしも省エネルギーに繋がらないことが報告されている。したがって、換気システムの省エネルギー化には、換気負荷の低減と空気搬送動力の両方の省エネルギー化が重要である。

また、換気システムは設備であり、その動作を確保するためには、定期的なメンテナンスが不可欠である。ビルなどの建築物においては、「建築物における衛生的環境の確保に関する法律」でメンテナンスが法的に求められているが、個人住宅においては、その管理は所有者である個人に委ねられている。その結果、エアコンの清掃ですら 4 割は 2~10 年以上行っていない実態⁶⁾があり、居住者が、天井裏などに隠れている換気システムのメンテナンスを行うことは容易ではない。換気システムの検討には、省エネルギー性能だけでなく、イニシャルコストやランニングコスト、そしてメンテナンス性とそのコストまで含む、長期的な視点で総合的に評価する必要がある。

近年、この空気搬送動力を削減できる技術として、パッシブ換気システム（以後パッシブ換気）に注目が集まっている。パッシブ換気は、煙突効果を利用し、室内外温度差によって生じる浮力と風圧力を駆動力とした換気システムである。機械換気システムが普及する以前から換気手法として一般的に認識されており、25 年以上前から北海道大学や北海道立寒地建築研究所（旧北方建築総合研究所）を中心に研究開発が進められ、1999 年に「パッシブ換気システム設計施工マニュアル」⁷⁾が取りまとめられている。道営住宅を始め、北海道における住宅への普及が進み、本州においてもパッシブ換気の採用事例が増え、注目されている。建物の換気方法の一つとして、機械換気システムと同様に、公的な技術基準⁸⁾や 2012 年から始まった札幌版次世代住宅基準⁹⁾においても省エネルギー手法としても認められており、令和 6 年度の北方型住宅 ZERO においても、誘導基準として評価されている。

パッシブ換気のメリットは、機械的な駆動部分がないため故障する部品がなく、フィルターなども使用しないため、メンテナンスの負担が大幅に軽減されることである。居住者のメンテナンス不足が引き起こす、換気量低下による空気質の悪化を防ぐことができる点も優れている。しかし、パッシブ換気の駆動力は自然であるため、機械換気システムに比べて換気量のコントロールが難しい。換気量が過剰になると、熱損失が大きく

なり不快感をもたらす可能性がある一方、換気量が少なすぎると、室内空気の質（IAQ）が悪化するおそれがある。

一方、再生可能エネルギーの活用が社会的にも注目される中、住宅の省エネルギーに利用可能な太陽エネルギーでは、特に太陽光発電の普及が著しい。しかし、太陽エネルギーを熱としてそのまま利用する手法であれば、エネルギー変換効率が40~60%と太陽光発電の10~15%より高い¹⁰⁾。このため、給湯や暖房など、熱の利用をバランスよく検討することで、より効率的な省エネルギー効果を発揮することが可能となる。太陽エネルギーを熱として利用する手法には液体式と空気式があるが、換気負荷や暖房エネルギーとして利用するために空気集熱に着目をした。この分野では、屋根空気集熱式ソーラーシステムの研究が多く行われている。しかし、「温暖地版自立循環型住宅への設計ガイドライン」¹¹⁾の屋根空気集熱式ソーラーシステムの計画では、集熱量を確保するために、外気導入量を8m³/min（480m³/h、24時間換気として設定している160m³/hの3倍）以上の能力で使うことが推奨されている。熱容量の小さい空気を利用し、効率よく暖房エネルギーとして利用するためには、24時間換気システムとして必要な換気回数0.5回/hと比べ、1.5回/h以上の大きな風量が必要となる。その結果、空気搬送動力による一次エネルギー消費が、創エネした熱エネルギーを相殺してしまう。また、集熱量と蓄熱によるタイムシフト効果と、暖房に必要な熱量のアンバランスによるオーバーヒート¹²⁾、集熱のために乾燥した外気を、24時間換気の必要量に対して過剰に取り込むことにより引き起こされる、冬期の過乾燥発生の可能性などの課題がある。

1.2 研究の目的

本研究では、住宅の省エネルギー技術の向上に伴い、相対的に熱損失の割合が大きくなる換気負荷を低減するために、再生可能エネルギーとして利用可能な太陽エネルギーに着目し、外部電源を必要としない自立型として開発された壁付の太陽熱集熱パネル（以後SAH）をパッシブ換気と組み合わせて、給気を予熱して換気負荷を低減させることを目的とした「太陽熱利用型パッシブ換気システム」（以後PVSAH）の開発を行う。

このSAHは、24時間換気の風量以下で運用することで必要ファン動力を抑え、内蔵された太陽光発電パネルが発電する電力で送風動力を賄う完全自立型のシステムとなっている。屋根空気集熱方式のような、過剰な外気導入による冬期の過乾燥を引き起こす可能性も低い。制御を含め、極めて簡素な設備であり、初期投資を抑えることで、設備投資に対する費用対効果を確保しようとするものである。主に使用する冬期は、太陽高度が低いことから、壁設置でも太陽熱利用が可能であり、集熱空気を直接屋内に取り込むことも、システムの低廉化に寄与している。また、SAHの動作時には、外気を強制的に供給する第二種換気システム（以後第二種換気）として機能するため、パッシブ換気システムの課題である温度差や風力の減少による換気量の低下を補い、室内空気質の

維持にも寄与する。そして、SAH もパッシブ換気と同様、日々のメンテナンスを必要としないため、メンテナンス不足による動作不良が発生しない点も相性がよい。

本システムの開発にあたり、SAH の性能評価と省エネルギー効果を定量的に予測する手法の構築、PVSAH の実測と換気負荷の低減効果、さらに、省エネルギー性能及びライフサイクルコストについて明らかにし、実用化することを目的とする。

1.3 既往研究と本研究の位置付け

本研究は、換気システムに起因するエネルギー使用量の削減を目指し、換気負荷低減と空気搬送動力低減の2つの側面から省エネルギー化の検討を行う。換気負荷低減については、再生可能エネルギーである太陽エネルギーを活用し、空気搬送動力がかからないパッシブ換気に組み合わせる。また、各種換気システムのメンテナンスや運用上の課題についても考慮し、以下にそれぞれの既往研究について取りまとめた。

1.3.1 太陽エネルギーの活用

これまで多くの SAH に関する研究がある。壁式集熱方式の SAH の性能向上に関する研究について、宮沢ら¹³⁾は、性能試験を行い集熱板の種類、日射量・給気量・日射吸収率・外部風速・面積など、様々な条件の違いによる集熱性能を明らかにしており、図子ら¹⁴⁾及び小金井ら¹⁵⁾は、集熱性能の実測調査を行っている。Singh ら¹⁶⁾は、建物の壁に一体化したテーパー状の太陽熱ヒーターを開発し、集熱効率を 70%向上させる技術を開発し、Hosseini ら¹⁷⁾は、SAH の集熱のためのフィンによる影の影響に関する研究を行い、より高い効率が得られる形状について提案を行っている。

SAH の実測による評価を行った研究として、Wang ら¹⁸⁾は、既往研究の調査から、吸熱層をすり抜けるタイプのパネルが最も集熱効率が高いと位置付け、ニュージーランドの気候で異なる流量における集熱効率の実測調査を行い性能について報告している。

また、集熱した熱を取り込むためには空気搬送のエネルギーが必要となるが、得られた熱エネルギーから送風動力を減算したものが最終的に得られたエネルギーとなるため、少ないエネルギーで温風を運ぶ技術が重要となる。Zhao ら¹⁹⁾は、PV を内蔵し、自家発電された電気でファンの運転を行うことで、送風動力がかからない SAH の提案を行い、その性能について報告がされており、Potter ら²⁰⁾は、この送風動力を少なくするため、少ない空気抵抗で高い集熱効率を得られる新しいフィン形状の提案を行っている。

計算モデルの構築を行なった研究で、Rodono ら²¹⁾は、空気加熱と自然対流に関する計算モデルを作り、SAH の設計のために、材料と寸法を最適化するための、実用的なツールを開発している。また、Ho ら²²⁾は、一般的に広く使用されている外装用の鋼板を活用して集熱を行い、その効果の予測を可能とする計算モデルを示している。Dissa ら²³⁾は、

農産物の乾燥のための SAH について、実環境での集熱性能を評価するために、非定常計算モデルを構築し、集熱器の温度を適切に予測することを可能としている。

一方、屋根集熱方式の研究で、岩田ら²⁴⁾は、実測による温度状況の把握を行っており、北野ら^{25),26)}は、設計条件（暖房負荷、室温設定温度、コレクターの特性、蓄熱層の種類、日射量や集熱設定温度など）から、適切なコレクター面積や蓄熱槽の容量、集熱時及び放熱時の風量を求める太陽熱暖房システムの簡易設計法の構築を行い、藤岡ら^{27),28)}は、冬期の空気集熱式太陽熱利用システムの、実測による集熱特性把握と夏期における給湯用の温度予測シミュレーション構築を行い、宇田川ら²⁹⁾は、屋根一体型太陽熱集熱暖房・給湯の予測を可能とするシミュレーションプログラムを構築している。中村ら³⁰⁾は、方位や建物仕様、熱容量、蓄熱部位や集熱部の長さ・傾斜角、搬送経路や運転方法など、様々な要素を変数とするシミュレーションにより、暖房効果の違いを計算し設計指針の提案を行っているが、実測との比較検討まではされていない。

また、Yu ら³¹⁾は、太陽熱で集熱した空気を北側の部屋へはファンで送り、南側の部屋は自然対流で暖房を行うハイブリッドシステムの提案と実測を行い、双方の部屋で平均室温 17°C が維持可能であったことが報告されており、Banda³²⁾は、ルーマニアにおける実測で、約 50% の集熱効率が得られた SAH を、室内空気質の改善を目的とした SAH の必要面積を決定するための計算モデルを作り、住宅とオフィスビルでケーススタディーを行い、最適面積の提案が行われている。Li ら³³⁾は、冬期における小学校で、二酸化炭素濃度を 1000ppm 以下に維持が可能な省エネルギーな換気装置として SAH の提案を行っている。しかし、メンテナンスを居住者自身が行う必要がある住宅では、シンプルで負担の少ないシステムの提案が必要であることが報告されている。

このように、SAH の性能評価やそれぞれのシステムのシミュレーション構築、暖房への適応の可能性について明らかにされているが、住宅の換気の省エネルギー化を目的とした研究は見られない。また、太陽熱集熱パネルの実建物への導入効果と、省エネルギー効果が容易にシミュレーション可能となれば、再生可能エネルギーを活用した住宅の普及に寄与することが期待できる。

1.3.2 パッシブ換気

パッシブ換気システムのイメージを図 1.2 に示す。パッシブ換気の駆動力は自然のエネルギーであるため、機械換気システムと比較して換気量の制御が難しい。換気量が多すぎると熱損失が大きくなり不快感が生じる。一方、換気量が少なすぎると IAQ が低下するという課題がある。

こうしたパッシブ換気の課題について、Shaw ら³⁴⁾は、地下室全体に暖房システムを有する 2 階建て実験住宅を用いて、以下の 4 つの手法【(1) 外壁に設けた開口から地下室空間へ外気を導入、(2) 暖房システムに接続された給気管を通して外気を導入、(3) (1) に地下室から屋根上に直接通じる煙突を設置、(4) (2) に地下室から屋根上に直接通じる煙突

を設置】で、外気の導入方法や煙突の有無などの各条件における実験を行い、気密性、中性帯位置、内外温度差から換気回数を求める数式を提案した。

福島ら³⁵⁾は、基礎断熱で断熱・気密化された床下空間に、暖房システムの放熱器を設置し、給気管を用いて外気を導入し、室内空間の最上部に設けられた煙突から排気を行うパッシブ換気を提案した。このシステムは、床下空間で暖められた新鮮外気を循環させるため、床下空間に通じるガラリ付開口や間仕切壁内を通気ダクトとして利用している。このシステムを備えた2階建て実験住宅で、換気量や室内温度の測定を行い、暖房期の換気量は概ね設計換気量を満足したこと、熱損失の増加は換気回数0.5回/hの熱損失に比較して10%であったことなどを示した。

パッシブ換気の換気負荷を削減させる取り組みとして、Southall³⁶⁾は、温度・湿度・CO₂センサーを用いたデマンドコントロールにより、建物の暖房用エネルギー消費量を、大幅に削減できることをシミュレーションにより示している。一方、パッシブ換気の空気搬送動力の省エネルギー性を活かしながら、機械換気システムを併用してIAQを向上させるハイブリッド換気システムの提案もされている。Turnerら³⁷⁾は、パッシブ換気に住宅用換気コントローラーを組み合わせることで、機械ファンと機械式フローダンパーの制御を行い、過換気と換気不足を防ぐシステムを提案し、より少ないエネルギーでIAQの基準を満たすことが可能であることをシミュレーションで示した。Jreijiryら³⁸⁾は、CO₂センサーや人感センサーを組み合わせたデマンドコントロールにより、ファンの消費電力を削減しつつ、居住者の高濃度の二酸化炭素への暴露を削減可能であることが、シミュレーションによって示している。以上のようにパッシブ換気の設計や空気搬送動力の低減を目的とする研究が中心で、給気に熱エネルギーを得て換気負荷を減らすような研究は非常に少ない。

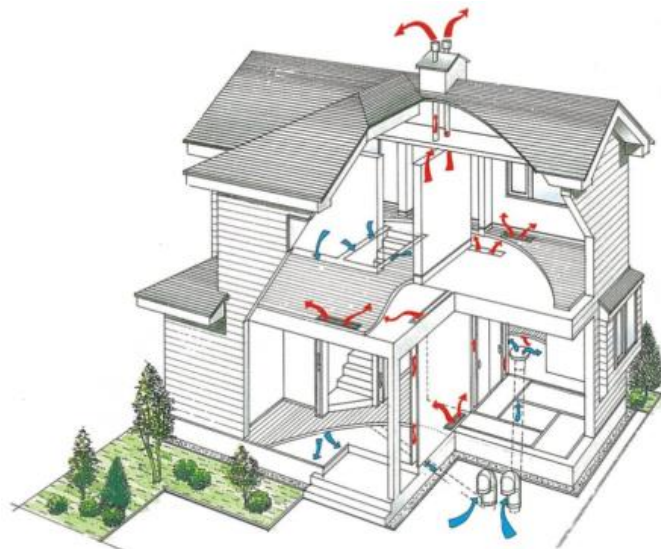


図 1.2 パッシブ換気システムイメージ（出典：パッシブシステム研究会）

1.3.3 換気システムの持つ課題と取り組み

熱交換換気は、熱回収を行うことで換気負荷を低減させるメリットがある一方で、熱交換器の空気抵抗の増加や、給気と排気それぞれの空気搬送に必要な、ファン動力増加というデメリットが存在する。Laverge ら³⁹⁾は、これらのトレードオフについて検討し、温暖な気候では、熱回収効果が限定的であり、空気搬送動力が小さくならないと効果が得られないことから、換気システムの選択にはイニシャルコストとメンテナンスコストまで含めて検討すべきと提案している。一方、寒冷な気候では、熱交換換気は有利であるが、さらに省エネルギー性能を高めるためには、より低い空気搬送動力と圧力損失の少ないシステムが必要であると報告されている。Dodoo ら⁴⁰⁾は、地域暖房システムを採用している建物において、熱交換換気による暖房負荷のエネルギー削減と、空気搬送の消費電力の関係について評価を行っている。地域暖房システムの場合、熱供給システムの効率が省エネルギー効果に与える影響が大きく、熱交換換気による暖房エネルギー削減量の割合は小さい。また、熱交換換気の暖房エネルギー消費量の削減より、建物の気密性能や空気搬送動力の影響が大きく、特に気密性の低い建物には熱交換換気が適さないことが指摘されている。Wu ら⁴¹⁾は、オフィスビルでの年間シミュレーションに基づき、熱交換換気の暖房エネルギー削減と、空気搬送動力の増加によるトレードオフについて検討を行っている。TRNSYS を用いた計算で、外気条件によって、空気搬送動力が熱回収量を上回り、省エネルギーに働かない期間があることが示されている。そのため、熱回収が可能な期間に、ファンの運転を最適化するための ON-OFF 制御を提案し、熱交換換気の省エネルギー効果を、最大化する手法が示されている。Fouiha ら⁴²⁾は、熱交換換気のトレードオフについて、1日単位での視点から検討を行った。オフィスビルの場合、日中の使用時間が長く、日射によって暖房負荷が減少することから、熱交換換気は有利となることが報告されている。一方、住宅の場合には、熱交換換気は第三種換気よりは省エネルギーだが、温暖な気候帯である HDD1800 以下では、湿度制御機能を持つデマンドコントロール換気（以後 DCV）の方が、有利であることが指摘されている。また、熱交換効率が高く低消費電力の熱交換換気に対しても、DCV は有利となり、熱交換換気が必ずしも省エネルギーとならない場合があることが報告されている。以上のように熱交換換気の空気搬送動力の評価が重要であることが示されている。

Zhang ら^{43),44)}は、寒冷地で熱交換換気を使用する時の、デフロスト運転に関する検討を行っている。熱交換換気（顕熱交換）は、外気が低温の時に熱交換素子が結氷してしまうため、それを溶かすためのデフロスト運転が必要となる。このデフロスト運転にもエネルギーを消費するが、一般的に省エネルギー計算には考慮されていない。この課題を改善するため、顕熱と潜熱の両方を回収可能とする全熱交換（全熱）の提案を行っている。全熱交換換気は、顕熱のみを回収する熱交換換気より耐霜性が高く、熱回収性能の低下が少ない。デフロスト運転による増加エネルギーについてシミュレーションを行った結果、全熱交換換気のほうが顕熱交換換気より省エネルギー性が優れていることが

報告されている。このように、デフロストに伴う課題についても十分検討する必要がある。

また、熱交換換気は、熱交換器の性能維持のために、フィルター清掃などのメンテナンスが必要である。メンテナンス頻度は、フィルターの無い換気システムより高く、居住者によるメンテナンス負担が発生する。Fisk ら⁴⁵⁾は、熱交換換気の省エネルギー性や費用面について、地域やエネルギー源の違いで比較を行った。その結果、熱交換換気は、メンテナンスの負担やコストに関して課題があることを指摘している。条件によっては、熱交換換気が、必ずしも費用対効果が高くないことが示されている。

Dorer ら⁴⁶⁾は、熱交換換気が、省エネルギーのための重要な選択肢である一方で、施工の難しさや騒音問題、メンテナンスなど様々な課題があることを指摘している。特に居住者によるメンテナンスの負担は大きく、有償サービスを利用するとコストが発生する。また、定期的なフィルター交換費用に加え、長期的にはモーターなどの部品のメンテナンスコストも発生する。熱交換換気は、適切にメンテナンスがされないと、空気質の維持が困難となる。これらの課題は、省エネルギー性能の評価には考慮されないが、換気システムの検討において、重要な視点であることが示されている。

熱交換換気は、IAQ の維持と省エネルギー性の向上を目的として使用されているが、その性能は、実験室での試験による固定値に基づいて計算されている。しかし、Choi ら⁴⁷⁾の熱交換換気の実測によると、熱回収効率は 25%から 75%の間で変化し、固定値ではないことが示されている。固定値で計算した場合と、現場で測定した変動した熱交換効率で比較すると、暖房エネルギー消費量が 69%増加することが分かった。このことから、固定値による計算では、省エネルギー効果が過大評価される可能性があるため、実際の現場での性能変動を考慮する必要があることが示唆されている。

Maier ら⁴⁸⁾は、実住宅における 4 種類の異なる換気システムの、運用上の課題について調査を行った。熱交換換気は、10%~30%の省エネルギー効果を示したが、二酸化炭素濃度に関する空気質の視点では、第三種換気のほうが、熱交換換気より良好な結果となっていた。しかし、居住者のアンケート調査では、それぞれのシステムにおける室内空気環境と快適性についての明らかな差は見られなかった。居住者は、快適性を向上させるために窓を開けて温熱環境を調整しており、二酸化炭素濃度と窓開け、そして、二酸化炭素濃度と快適感には強い相関関係が見られた。このように、居住者は風量の調整ではなく窓開けを行うことで快適性を向上させており、その結果、熱の損失が生じていた。窓による換気は、人間の習慣と密接に関係しており、人間の行動が省エネルギーに大きな影響を与えていることが示されている。そのため、機械的な省エネルギー対策だけで目的を達成することは困難であり、机上の計算だけでは、省エネルギー対策が十分に機能しないことが示唆されている。

一方、熱交換以外の手段で、換気の熱損失を低減するデマンドコントロールに着目し省エネルギーに取り組んでいる事例もある。Laverge ら⁴⁹⁾は、4 種類のデマンド制御方法による省エネルギー化の可能性を検討し、換気負荷を 25~60%削減可能であると報告している。Cho ら⁵⁰⁾は集合住宅において、空気清浄機とデマンド制御を組み合わせた熱交

換気省エネルギーのポテンシャルについて、実測及びシミュレーションで検討を行い、従来のシステムに比べ、エネルギー使用量を約 20%削減できる可能性があると報告している。Fisk ら⁵¹⁾は、センサーを用いた DCV について文献調査を行った。特に、稼働率が変動するオフィスでは、CO₂ センサーが多く使用され、数年で投資回収が可能な費用対効果の高いシステムであることが示されている。しかし、住宅において省エネルギー効果は期待できるが、センサーが高価なため費用対効果が低い場合が多いと報告されている。

Guyot ら⁵²⁾の調査では、ベルギー、フランス、オランダなどで、20 以上の DCV が認証され広く利用されている。文献のレビューで、デマンドコントロールによって IAQ を損なうことなく、換気負荷を最大 60%削減可能であることが示されている。

このように、換気システムには省エネルギー性能以外にも様々な課題があり、熱交換以外の省エネルギー手法の開発と選択肢の拡充により、条件に合わせた換気システムの提案が可能になると考えられる。

1.4 本論文の構成と概要

本論文は 6 章により構成されており、各章の概要は以下の通りである（図 1.3）。

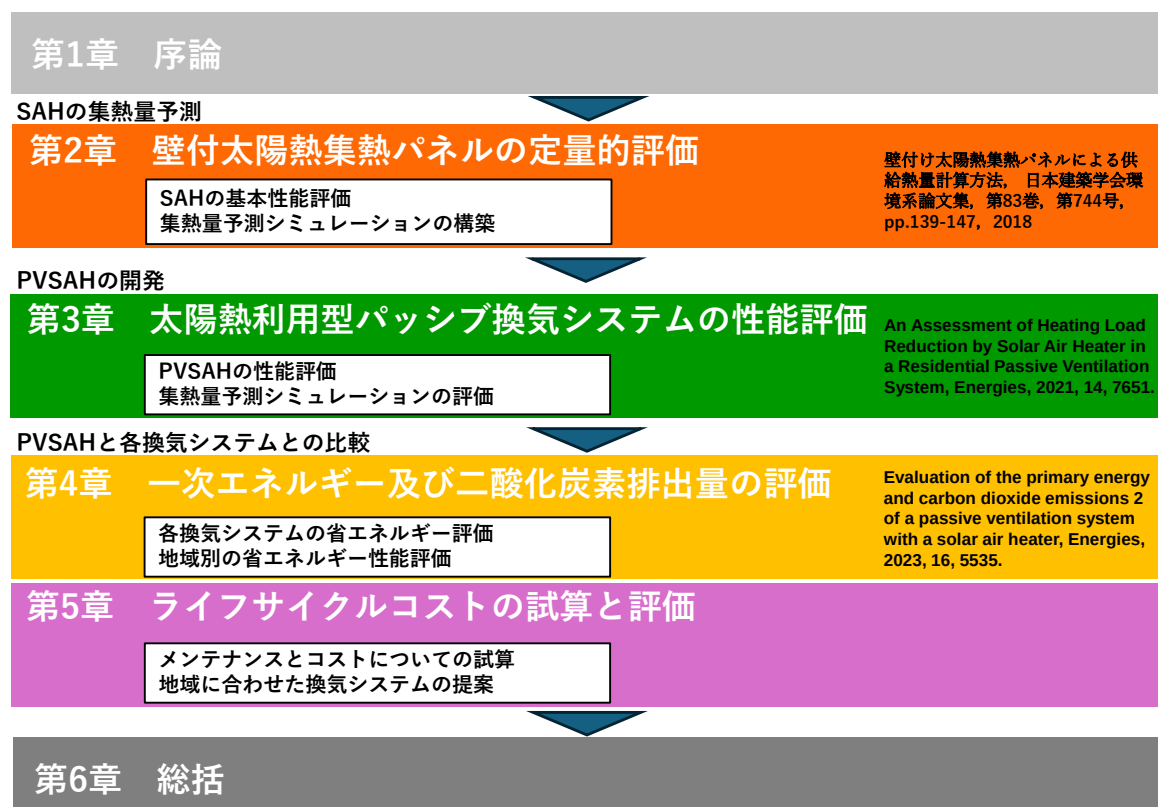


図 1.3 本論文の構成

第1章「序論」では研究の背景と目的を述べ、関連する既往研究について概説し、本研究の位置付けを示した。

第2章「壁付太陽熱集熱パネルの定量的評価」では、再生可能エネルギーの利用が可能となる太陽熱集熱パネルの基本性能を実験的に明らかにし、集熱量予測シミュレーションの構築と、一般的に入手可能な全天日射量を用いて全国各地の集熱量予測ができるように、日射の直散分離に関する簡易手法の構築を行う。その上で、実建物に太陽熱集熱パネルを実装し評価を行う。

第3章「太陽熱利用型パッシブ換気システムの性能評価」では、内外温度差によって生じる浮力と風圧力を駆動力とし、空気搬送動力の削減効果とメンテナンス負担の軽減効果が期待できるパッシブ換気システムを活用し、外気導入部分に壁付太陽熱集熱パネルを組み合わせた「太陽熱利用型パッシブ換気システム」の開発を行う。本システムは、給気を予熱し換気負荷を低減させることを目的としている。実建物へ実装し評価を行い、集熱量と換気負荷の低減効果に加えて、集熱量予測シミュレーションの再現性について評価を行う。

第4章「一次エネルギー及び二酸化炭素排出量評価」では、一般的に広く普及している第三種換気システムと、換気負荷を減らすために近年採用が増えている第一種熱交換換気システムを比較対象とし、本システムの省エネルギー性能の評価を行う。第一種熱交換換気システムは換気負荷を低減させるメリットがある一方、デメリットとして熱交換器の空気抵抗の増加と、給気と排気をそれぞれファンで空気を搬送する必要があるため、空気搬送動力が増加する。換気分の冷暖房負荷だけでなく空気搬送動力も含めた換気に関わる省エネルギー性能の評価を行う。その際、太陽熱集熱パネルの地域別の設置角度の有効性についても検討を行う。それらを前提条件とし、換気システム別に一次エネルギー及び二酸化炭素排出量を比較し、将来的に二酸化炭素排出係数が削減されていくことを踏まえ、排出係数が変化した場合の評価も行い、地域特性に合わせたシステムの提案を行う。

第5章「ライフサイクルコストの試算と評価」では、実際に居住者が採用するシステムの検討を行う上で、省エネルギー性能の評価と同時に、実際にかかるコストがシステム選定に与える影響が大きい。また、運用エネルギー以外にもメンテナンスについても費用がかかることから、それらを含めたライフサイクルコストの評価が重要である。そこで、市場調査に基づいて実際のコストを試算し、各システムにおける50年間のライフサイクルコストの評価を行い、本システムの有効性について検討する。

第6章「総括」では本論文で得られた知見を総括し、今後の課題や展望について述べる。

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁：エネルギー白書 2024（令和 6 年 6 月 4 日閣議決定），p.88,
https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2024/pdf/whitepaper2024_all.pdf
(2024.07.01 参照)
- 2) 国土交通省住宅局 脱炭素社会に向けた住宅・建築物の省エネ対策等のあり方検討
会：脱炭素社会に向けた住宅・建築物における省エネ対策などのあり方・進め方に
関するロードマップ(2021.08),
<https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/content/001419725.pdf> (2024.05.01 参
照)
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課, 今後の住宅・建築物の省エネルギー対策のあり方（第
三次答申）及び建築基準制度のあり方（第四次答申）について～社会資本整備審議
会 答申～ 報道発表資料, p.52, 2022.02.01
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001487807.pdf>, (2024.05.01 参照)
- 4) 国土交通省：建築基準法に基づくシックハウス対策について, 2003.07.01,
https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_tk_000043.html
(2024.05.01 参照)
- 5) 依光剛志, 嶋田祐典, 田島昌樹：温暖地・蒸暑地における住宅用パッシブ技術の導入
に関する検討 その 2 換気と暖冷房に関する省エネルギー性能の検討, 日本建築学
会大会学術講演梗概集, pp.857-858, 2016.08,
- 6) 株式会社富士通ゼネラル：「エアコン暖房・クリーニング」の意識調査を実施,
2023.11.30, [https://www.fujitsu-general.com/shared/jp/pdf-fcjp-news-23-Y08-35-
04.pdf](https://www.fujitsu-general.com/shared/jp/pdf-fcjp-news-23-Y08-35-04.pdf) (2024.05.01 参照)
- 7) 財団法人北海道建築指導センター：パッシブ換気システム設計・施工マニュアル,
1999. 03, https://www.hro.or.jp/upload/24249/passive_manual.pdf (2024.05.01 参
照)
- 8) 財団法人環境建築・省エネルギー機構：国土技術政策総合研究所・独立行政法人建
築研究所監修「温暖地版自立循環型住宅への設計ガイドライン」, pp.258-281,
2015.08,
- 9) 札幌市：札幌版次世代住宅基準について,
<https://www.city.sapporo.jp/toshi/jutaku/10shien/zisedai/zisedai.html>, (参照
2024.05.07)
- 10) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成 21 年度業務用太陽熱利用
システムの導入検討ガイドライン, 2009.12,
[http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/attaka_eco/reference/pdf/
donyu-kento/donyu-kento.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/attaka_eco/reference/pdf/donyu-kento/donyu-kento.pdf), (参照 2016.05.03)

- 11) 財団法人環境建築・省エネルギー機構：国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所監修「温暖地版自立循環型住宅への設計ガイドライン」，pp.102-111，2015.08，
- 12) 北潟寛史，崔榮晋，高瀬幸造，佐藤誠，盧炫佑，小原克哉，前真之，駒野清治：空気式太陽熱集熱暖房方式を利用した住宅のシステム性能改善効果に関する研究，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.381-384，2013.09，
- 13) 宮沢千顕，倉山千春，田代辰一郎，齋尾梨沙：太陽熱集熱板の横並び性能評価 その1 測定機器、装置及び試験体概要，その2 屋内測定結果，その3 気流確認及びフィールドテストとの比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.117-122，2008.07，
- 14) 関子正志：金属多孔板を用いた空気式太陽熱集熱器の性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.487-488，1999.09，
- 15) 小金井真，柏瀬芳昭：太陽熱集熱外壁材に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2，pp.459-460，2000.09，
- 16) Singh, A.P.; Kumar, A.; Akshayveer; Singh, O.P. Natural convection solar air heater: Bell-mouth integrated converging channel for high flow applications. *Build. Environ.* 2021, 187, 107367. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107367>.
- 17) Hosseini, S.S.; Ramiar, A.; Ranjbar, A.A. The effect of fins shadow on natural convection solar air heater. *Int. J. Therm. Sci.* 2019, 142, 280–294. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.04.015>.
- 18) Wang, Y.; Boulic, M.; Phipps, R.; Plagmann, M.; Cunningham, C. Experimental Performance of a Solar Air Collector with a Perforated Back Plate in New Zealand. *Energies* 2020, 13, 1415. <https://doi.org/10.3390/en13061415>.
- 19) Zhao, Y.; Meng, T.; Jing, C.; Hu, J.; Qian, S. Experimental and numerical investigation on thermal performance of PV-driven aluminium honeycomb solar air collector. *Sol. Energy* 2020, 204, 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.047>.
- 20) Pottler, K.; Sippel, C.M.; Beck, A.; Fricke, J. Optimized finned absorber geometries for solar air heating collectors. *Sol. Energy* 1999, 67, 35–52. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00036-0).
- 21) Rodonò, G.; Volpes, R. Heat transfer calculation in a free convection air solar collector. *Energy Build.* 1998, 27, 21–27. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00022-4).
- 22) Ho, K.T.K.; Loveday, D.L. Covered profiled steel cladding as an air heating solar collector: Laboratory testing, modelling and validation. *Energy Build.* 1997, 26, 293–301. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00010-8).
- 23) Dissa, A.O.; Ouoba, S.; Bathiebo, D.; Koulidiati, J. A study of a solar air collector with a mixed “porous” and “non-porous” composite absorber. *Sol. Energy* 2016, 129, 156–174. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.048>.

- 24) 岩田剛, 久保秀人, 相良和伸: ソーラーハウスの性能評価に関する研究 その1 実験住宅の概要と実測結果, 同題, その2 システムの成績係数と蓄放熱について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.417-420, 1996.09,
- 25) 北野博亮, 相良和伸: 空気集熱式太陽熱暖房システムの簡易設計法に関する研究, 日本建築学会環境系論文集 第582号, pp.45-52, 2004.08,
https://doi.org/10.3130/aije.69.45_4
- 26) 北野博亮, 相良和伸: 空気集熱式太陽熱暖房システムの最適蓄熱槽容量に関する理論的検討, 日本建築学会計画系論文集 第532号, pp.29-35, 2000.06,
https://doi.org/10.3130/aija.65.29_3
- 27) 藤岡雄太, 久保隆太郎, 酒井幸司, 石原修: 空気集熱式太陽熱利用システムに関する研究 その1 集熱パネルの集熱特性と冬期実測によるシステムの性能解析, 日本建築学会九州支部研究報告 第46号, pp.117-120, 2007.03,
- 28) 藤岡雄太, 久保隆太郎, 酒井幸司, 石原修: 空気集熱式太陽熱利用システムに関する研究 その2 夏季実測における性能解析と温度予測シミュレーション, 日本建築学会九州支部研究報告 第46号, pp.121-124, 2007.03,
- 29) 宇田川光弘, 佐藤誠, 盧炫佑: 屋根一体型太陽熱集熱暖房・給湯システムのシミュレーション その1 計算モデル、その2 住宅における空気集熱暖房・給湯システム計算例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.1145-1148, 2009.08,
- 30) 中村健児, 渡辺俊行, 林徹夫, 龍有二, 赤司泰義: 太陽熱利用空気集熱式床暖房住宅の設計指針, 日本建築学会計画系論文集 第516号, pp.31-38, 1999.02,
https://doi.org/10.3130/aija.64.31_1
- 31) Yu, Z.; Ji, J.; Sun, W.; Wang, W.; Li, G.; Cai, J.; Chen, H. Experiment and prediction of hybrid solar air heating system applied on a solar demonstration building. *Energy Build.* 2014, 78, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.003>.
- 32) Budea, S. Solar Air Collectors for Space Heating and Ventilation Applications- Performance and Case Studies under Romanian Climatic Conditions. *Energies* 2014, 7, 3781–3792. <https://doi.org/10.3390/en7063781>.
- 33) Li, X.; Zheng, S.; Tian, G.; Zhang, L.; Yao, W. A new energy saving ventilation system assisted by transpired solar air collectors for primary and secondary school classrooms in winter. *Build. Environ.* 2020, 177, 106895.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106895>.
- 34) Shaw, C.Y.; Kim, A.K. Performance of passive ventilation systems in a two-storey house. In *Proceedings of the 5th AIVC Conference*, 1–4 October 1984, US, 11.1-11.27 (Paper 11). <https://www.aivc.org/resource/performance-passive-ventilation-systems-two-storey-house>

- 35) 福島明, 絵内正道, 宮浦睦明, 本間義規: 基礎断熱した床下空間を利用したパッシブ換気・暖房方式の実住宅への適用: 寒冷地のパッシブ換気に関する研究その2, 日本建築学会計画系論文集, 第532号, pp.51–56, 2000.06,
https://doi.org/10.3130/aija.65.51_2.
- 36) Southall, R.G. An assessment of the potential of supply-side ventilation demand control to regulate natural ventilation flow patterns and reduce domestic space heating consumption. *Energy Build.* 2018, 168, 201–214.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.005>.
- 37) Turner, W.J.N.; Walker, I.S. Using a ventilation controller to optimise residential passive ventilation for energy and indoor air quality. *Build. Environ.* 2013, 70, 20–30.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.004>.
- 38) Jreijiry, D.; Husaunndee, A.; Inard, C. Numerical study of a hybrid ventilation system for single family houses. *Sol. Energy* 2007, 81, 227–239.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.03.013>.
- 39) Laverge, J.; Janssens, A., Heat recovery ventilation operation traded off against natural and simple exhaust ventilation in Europe by primary energy factor, carbon dioxide emission, household consumer price and exergy, *Energy and Buildings*, 2012, 50, 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.04.005>
- 40) Doodoa, A.; Gustavsson, L.; Sathrea, R., Primary energy implications of ventilation heat recovery in residential buildings, *Energy and Buildings*, 2011, 43, 1566–1572.
- 41) Wu, W.; Fang, Z.; Ji, W.; Wang, H., Optimal operation condition division with profit and losses analysis of energy recovery ventilator, *Energy and Buildings*, 2016, 124, 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.019>
- 42) El Fouiha, Y.; Stabat, P.; Rivièreb, P.; Hoang, P.; Archambault, V., Adequacy of air-to-air heat recovery ventilation system applied in low energy buildings, *Energy and Buildings*, 2012, 54, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.008>
- 43) Zhang, J.; Fung, A., Experimental study and analysis of an energy recovery ventilator and the impacts of defrost cycle, *Energy and Buildings*, 2015, 87, 265–271.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.050>
- 44) Zhang, J.; Fung, A., Experimental and numerical investigation of the thermal impact of defrost cycle of residential heat and energy recovery ventilators, *Energy and Buildings*, 2015, 97, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.034>
- 45) Fisk, W.; Turiel, I., Residential Air-to-Air Heat Exchangers: Performance, Energy Savings, and Economics, *Energy and Buildings*, 1983, 5, 197–211.
[https://doi.org/10.1016/0378-7788\(83\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0378-7788(83)90005-1)
- 46) Dorer, V.; Breer, D., Residential mechanical ventilation systems: performance criteria and evaluations, *Energy and Buildings*, 1998, 27, 247–255.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00049-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00049-2)

- 47) Choi, Y.; Song, D.; Seo, D.; Kim, J., Analysis of the variable heat exchange efficiency of heat recovery ventilators and the associated heating energy demand, *Energy and Buildings*, 2018, 172, 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.066>
- 48) Maier, T.; Krzaczek, M.; Tejchman, J., Comparison of physical performances of the ventilation systems in low-energy residential houses, *Energy and Buildings*, 2009, 41, 337–353. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.10.007>
- 49) Laverge, J.; Van Den Bossche, N.; Heijmans, N.; Janssens, A., Energy saving potential and repercussions on indoor air quality of demand controlled residential ventilation strategies, *Energy and Buildings*, 2011, 46, 1497–1503. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.023>
- 50) Cho, W.; Song, D.; Hwang, S.; Yun, S., Energy-efficient ventilation with air-cleaning mode and demand control in a multi-residential building, *Energy and Buildings*, 2015, 90, 6–14. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.002>
- 51) Fisk, W.; De Almeida, A., Sensor-based demand-controlled ventilation: a review, *Energy and Buildings*, 1998, 29, 35–45. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00029-2)
- 52) Guyot, G.; Sherman, M.; Walker, I., Smart ventilation energy and indoor air quality performance in residential buildings: A review, *Energy and Buildings* 2018, 165, 416–430. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.051>

第2章 壁付太陽熱集熱パネルの定量的評価

2.1 はじめに

本研究では、再生可能エネルギーの活用手法として、空気式太陽熱集熱に着目した。検討を行う SAH は、熱容量の小さい空気を利用し、効率よく暖房エネルギーとして利用するために、大風量が必要な暖房としてではなく、24 時間換気システムの給気予熱での活用を目的とした。風量を抑えることで、送風動力を小さくすることが可能となり、内蔵された太陽光発電パネルで発電した電力を用いて送風エネルギーを賄う完全自立型のシステムとなっている。加えて、暖房目的ではないため、集熱した熱を夜間の暖房エネルギーとして利用するための、集熱と蓄熱によるタイムシフト効果の検討も不要となる。また、主に使用する冬期は、太陽高度が低いため、壁面設置でも太陽熱を効率的に利用が可能で、集熱した空気を直接屋内に取り込めることも、ファン動力の低減化に寄与している。このように、制御を含めて極めて簡素な設備なため、初期投資を抑え換気負荷低減による設備投資対効果を確保しようとするものである。

しかし、地域の気候条件に応じた集熱効果の予測手法が確立しておらず、その効果を定量的に示すことができていない。そこで本章では、当該 SAH を用いた省エネルギー設計のために、太陽エネルギーの利用効果を、定量的に予測可能とする集熱量予測シミュレーションを構築する。また、基本的な集熱性能について実験による評価を行い、一般的に入手可能な全天日射量を用い、全国各地の集熱量予測ができるように、日射の直散分離に関する簡易手法についても構築する。さらに、実建物に SAH を実装し、その評価を通して集熱量予測シミュレーションの実用性を明らかにする。

2.2 壁付太陽熱集熱パネルの概要

本研究で検討した SAH（図 2.1）は、外気を太陽熱で加温して室内に導入することにより、換気によって発生する暖房負荷を低減させることが可能で、室内温度環境の向上も見込まれる。特に、外気が直接導入される排気型換気システムと組み合わせることで、SAH より供給される給気が、外気の予熱として作用するので非常に相性がよい。エネルギー消費量削減の観点から、今後の普及が期待される。

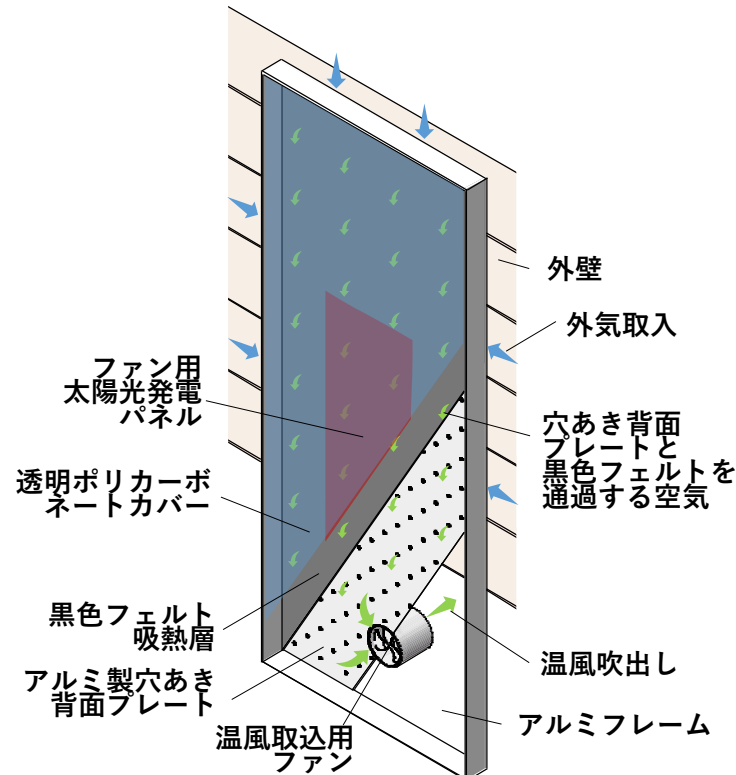


図 2.1 SAH の概要

表 2.1 に、SAH の概要を示す。SAH は、日射取得面が断熱性を持つ 2 層の透明なポリカーボネートになっている。外気は、SAH 裏面のパンチングされた小穴から取り入れられ、フェルト状の吸熱層を通過しながら SAH 内に入る。SAH 内で太陽熱により加温した空気は、内蔵ファンによって室内に供給される。ファンの駆動エネルギーは、SAH に内蔵されている発電パネルの電力で稼働するため、外部からのエネルギーを必要としないシステムとなっている。1 台当たりの実集熱面積は、 1.39m^2 （ $1974\text{mm} \times 704\text{mm}$ ）で、SAH の最大能力は約 $100\text{m}^3/\text{h}$ の外気を約 30°C 加温することが可能で、最大約 1000Wh の能力を持っている。ファン風量は、コントローラーの調整により、 $60 \sim 110\text{m}^3/\text{h}$ で変化させられる。装置の設置は、日射取得を考慮して南側外壁面に設置する。

表 2.1 SAH の仕様

寸法(高さ×幅×厚)(mm)	1974×704×55
重量(kg)	14
ファン風量(m ³ /h)	60~110
ファン消費電力(W)	3.7
太陽光発電パネル出力(W)	12
接続ダクト径(mm)	125
暖房効果(外気+)(°C)	30
最大集熱能力(W)	1000

2.3 太陽熱集熱パネルの集熱量予測シミュレーションの構築

2.3.1 集熱量の計算方法

建物に取り付けた SAH の集熱量を正確に予測するためには、集熱量の時間変動を計算する必要がある。SAH (図 2.2) の集熱量 (室内供給熱量) は、式(2-1)で表される。式(2-2)、式(2-3)は、SAH の中空層における熱収支の時間変動を示す。式(2-2)の $\bar{M}$ は、装置内の空気と構成部材の熱容量を合わせたもので、相当熱容量と定義した。 $\bar{M}$ が求まれば、これらの式に数値を入力し、入射日射量に対し室内供給熱量とパネル前面及び背面の熱損失をマイナスすることで、SAH 内温度 (吹出し温度と同等と仮定) の計算が可能となる。これらの数値が求まり、温度の時間変動がわかると、時間変動を考慮した集熱量の計算が可能となる。

$$Q_C = 0.348Q_p(T_p - T_o) \quad \cdots(2-1)$$

$$\bar{M} \frac{dT}{dt} = J_R A_F - Q_C - U_F A_F (T_p - T_o) - U_B A_B (T_p - T_o) \quad \cdots(2-2)$$

$$\bar{M} = M_A + M_B \quad \cdots(2-3)$$

$$\eta = Q_C / J_R \quad \cdots(2-4)$$

Q_C	SAH 集熱量 (室内供給熱量)	W
Q_p	ファン風量	m ³ /h
$\bar{M}$	相当熱容量	J/K
M_A	SAH 内空気の熱容量($c\rho V$)	J/K
M_B	周囲部材の熱容量の一部	J/K
J_R	SAH 内に入射する日射量	W/m ²
U_F	SAH 前面熱貫流率	W/(m ² K)

U_B	SAH 背面熱貫流率	$W/(m^2K)$
A_F	SAH 前面面積	m^2
A_B	SAH 背面面積	m^2
T_p	SAH 内温度（吹出し温度）	$^{\circ}C$
T_o	外気温度	$^{\circ}C$
t	時間	s
η	SAH 集熱効率	%

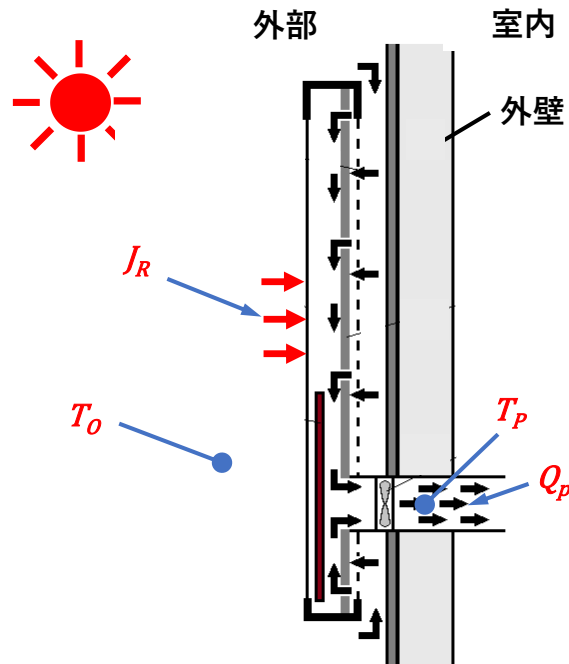


図 2.2 SAH の断面図

2.3.2 集熱量計算のための熱容量の同定

表 2.2 に、 $\overline{M}$ を同定するための実験概要について示す。SAH を図 2.3, 図 2.4 のように設置して、SAH への鉛直面日射量及び各点における温度、吹出し温度を測定した。日射量の測定は、瞬間の雲や影の影響を大きく受けるため、測定誤差を最小限にするために測定間隔を瞬時値の 1 秒とし、測定結果を 1 分平均にして評価を行なった。

M_B は、実測結果と式(2-2)、式(2-3)による計算との誤差が最小になるように最小二乗法で同定した結果、5057J/K となった。図 2.5 に、実測結果と計算結果を、図 2.6 に、実測値と計算値の相関関係を示す。誤差は、実測値から計算値を引き計算値で割って算出した。実測値と計算値の誤差は、平均 1.8%で良好な相関を示しており、本計算式で集熱量の時間変動を予測できると判断できる。



図 2.3 実験装置（表側）



図 2.4 実験装置（裏側）

表 2.2 実験概要

測定年月日	2011 年 2 月 16 日
測定場所	東京都練馬区
設置方位	真 南
SAH 鉛直面日射量	日射計 PCM-01（ブリード製）
吹出し温度	T型熱電対＋サーミック 2300A（江藤電気製）
風 量	KNS-235（コーナー札幌製）

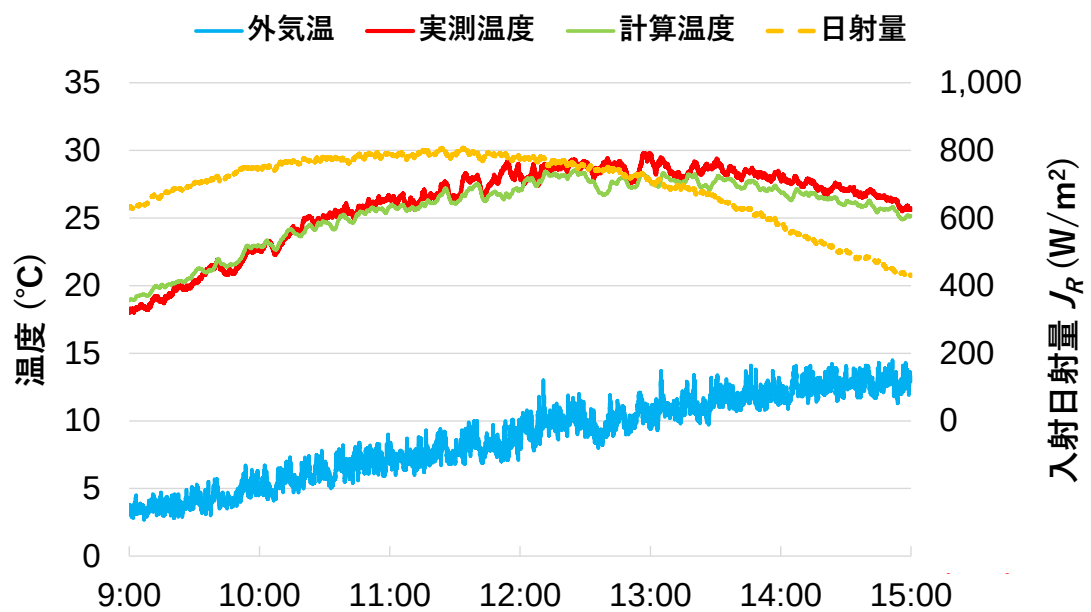


図 2.5 吹出し温度の測定値と計算値

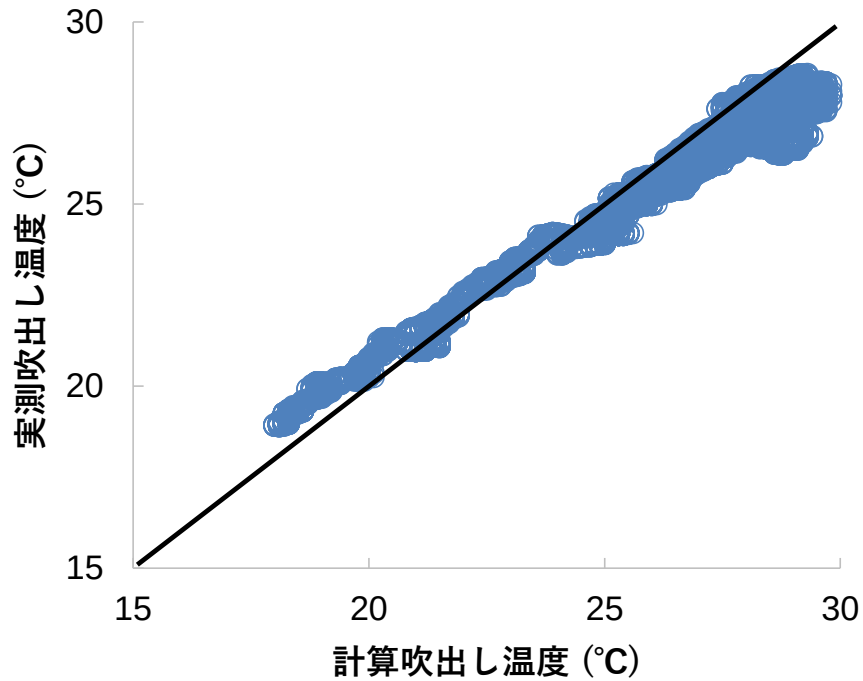


図 2.6 吹出し温度の測定値と計算値の相関関係

2.3.3 太陽熱集熱パネルに入射する日射量とファン風量の関係

本機器は、内蔵された太陽光発電パネルで発電した電気を使用して送風ファンの運転を行う。発電量が日射量によって変動するとそれに伴いファン風量も変動するため、常に一定の風量とはならない。そこで、前述の図 2.3、図 2.4 及び表 2.2 の実験装置を使用して、SAH への入射日射量とファン風量の関係性を実測し、その結果を図 2.7 に示す。シミュレーションにおける Q_p ：風量は、この結果から得られた近似式を用い計算を行った。

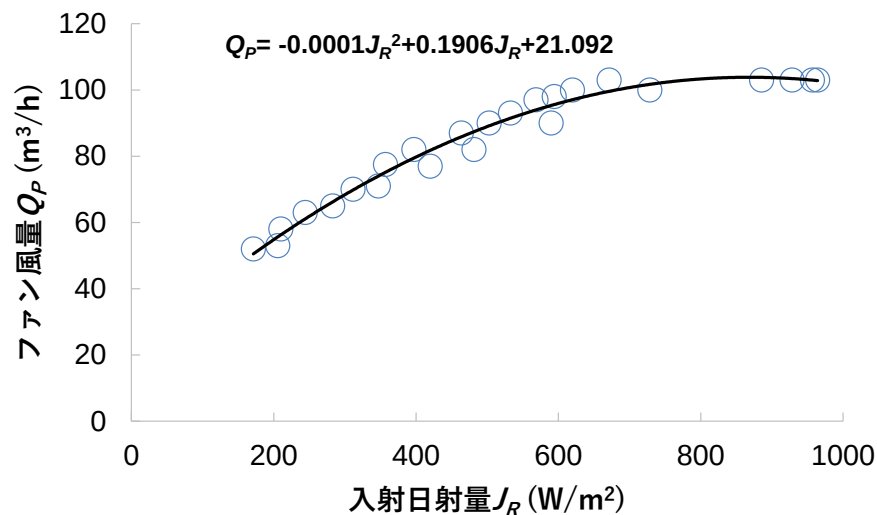


図 2.7 SAH への入射日射量とファン風量

2.3.4 実建物による実測と集熱量予測シミュレーションとの比較

北海道千歳市において、SAH を実際に導入した住宅で実測を行った事例を示す。対象住宅は図 2.8 に示したもので、建物概要を表 2.3、測定概要を表 2.4 に示す。SAH の風量については、図 2.7 より求め、入射日射量が分かれば集熱量の予測が可能となることから、室内吹出し温度の計算値と実測値の比較が可能となる。

代表日の計算値と実測値の吹出し温度の変動を図 2.9 に示す。この測定で吹出し空気温度の最高値は外気温度+35℃（外気温度が 0℃に対し吹出し温度が約 35℃）であり、日射量に応じて吹出し温度が上昇していることも確認できた。また、図 2.10 の相関関係からも、吹出し温度の計算値と実測値はよく一致しており、実住宅においても計算式が有効であることが確認できた。



図 2.8 測定住宅

表 2.3 測定概要

竣工	2012 年 3 月
住所	北海道千歳市
床面積	129.13 m ²
換気	第三種換気システム

表 2.4 測定項目と測定器

測定日	2012/12/1
SAH 鉛直面日射量	日射計 PCM-01（プリード製）
吹出し温度	T型熱電対＋サーミック 2300A（江藤電気製）
外気温度	T型熱電対＋サーミック 2300A（江藤電気製）
SAH 裏面温度	T型熱電対＋サーミック 2300A（江藤電気製）

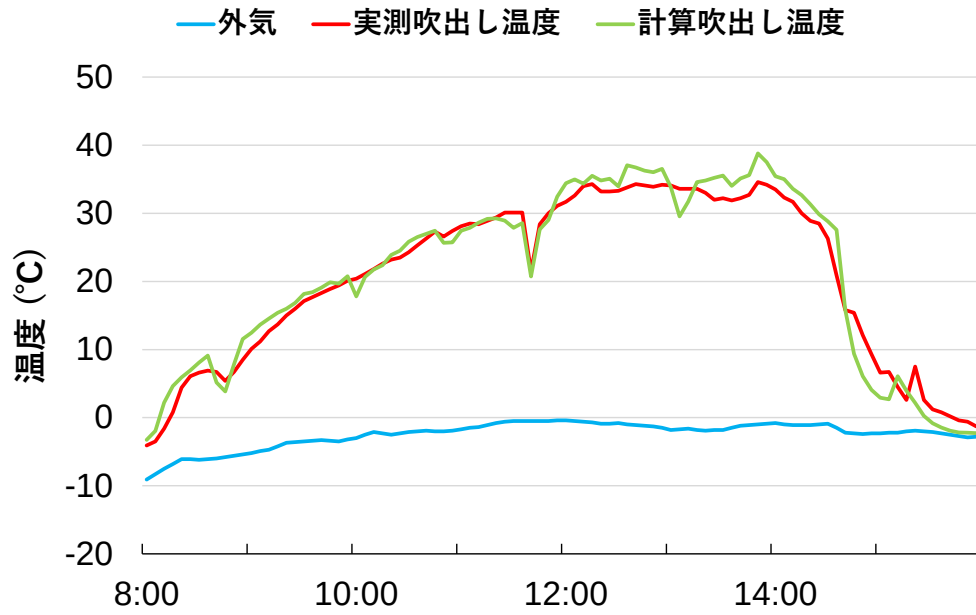


図 2.9 吹出し空気温度の実測値と計算値

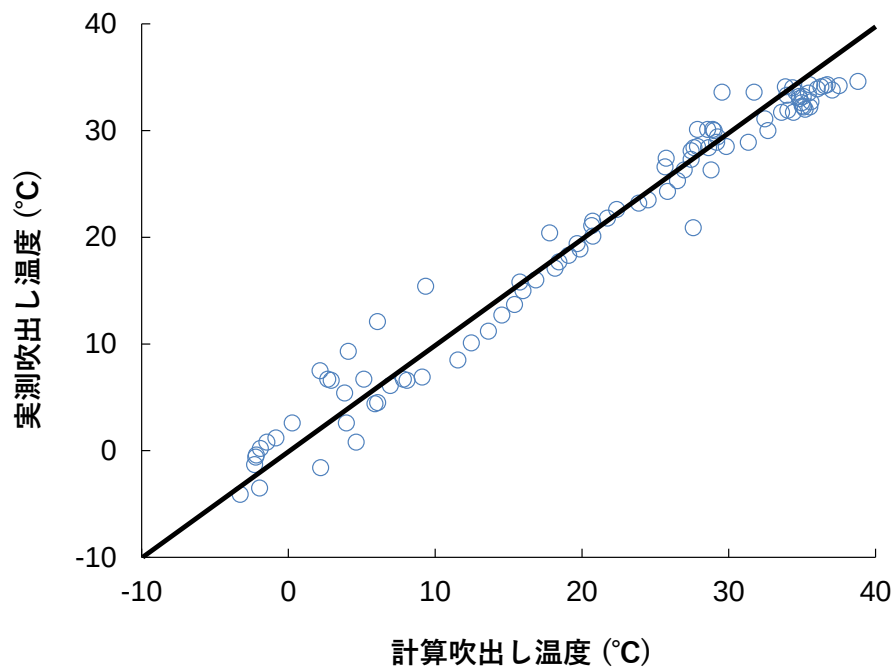


図 2.10 吹出し空気温度の実測値と計算値の相関関係

2.4 集熱量予測のための入射日射量

2.4.1 全天日射量の直散分離

直散分離に関する研究は数多く存在するが、その中でも Nagata モデルが有名で、住宅の次世代省エネルギー基準の適合判定や、SMASH¹⁾（多数室の動的熱負荷計算プログラム）においても使用されている。しかし、快晴時を前提としているため、本研究の様々な気象条件での集熱量を計算するためには適さない。EA 気象データに収録されている日射量は、気象台で観測された水平面全天日射量、または日照時間などから推定された水平面全天日射量である。その全天日射量を直散分離する手法として、EADatNavi に付属している直散分離プログラム SplitG では、Nagata モデル、Udagawa モデル、Erbs モデル、Watanabe モデル、Perez モデルの 5 つのモデルが採用されている。この 5 モデルについて 1/2 開口角が(2.5°)の直達日射計による直達日射量を、RMSE (Root Mean Square Error) と MBE(Mean Bias Error)を評価指標に用い、推定誤差の比較を行った結果、Perez モデルが開口角(2.5°)の直達日射計による法線面直達日射量の観測値に最もよく一致していることから、SplitG では Perez モデルが推奨法として位置付けられている。しかし Perez モデルで計算を行うためには、計算に必要な係数の算出過程が公開されておらず、一般に入手可能な全天日射量だけでは設計評価を行うことができない。

1) 新しい直散分離に関する簡易手法の構築

そこで、本研究では、アメダス気象データを開発している(株)気象データシステムが発行している技術解説「直散分離と斜面日射量の計算」²⁾を参考にし、Perez モデルの結果に近づくように検討を行い、容易に直散分離を行うことが可能な新しい簡易手法として式(2-5)~式(2-8)を構築した。

$$K_t = \frac{I_G}{I_0 \sin h} \quad \dots(2-5)$$

$$P = \left\{ \frac{K_t - 0.27}{0.73} \right\}^{\sin h} \quad \dots(2-6)$$

$$I_b = I_0 P^{\frac{1}{\sin h}} \quad \dots(2-7)$$

$$I_d = I_G - I_b \cdot \sin h \quad \dots(2-8)$$

K_t	晴天指数	-
I_G	水平面全天日射量	W/m ²
P	大気透過率	-
I_b	法線面直達日射量	W/m ²
I_d	水平面天空日射量	W/m ²

I_o	太陽定数	1367W/m ²
h	太陽高度	°

2) 本研究モデルと既往モデルとの比較

既往モデルを代表して、SMASH¹⁾で使用されている Nagata モデルと、SplitG で推奨法として位置付けられている Perez モデルの2モデルを比較対象とし、2000 年版標準年 EA 気象データを用いて直散分離を行い本研究モデルとの比較を行った。時系列の比較は1/1~1/10 の10 日間を代表して行い、相関関係の比較は年間を通して検討を行った。

a) 大気透過率

大気透過率の時系列の比較結果を図 2.11 に、相関関係を図 2.12 に示す。本研究モデルと比較して Nagata モデルは時系列で最高値が高い値を示しているが、概ね高い相関を示している。Perez モデルは透過率が下がると低い値で推移しているが、集熱量が得られる高めの値では、相関関係が確認できる。

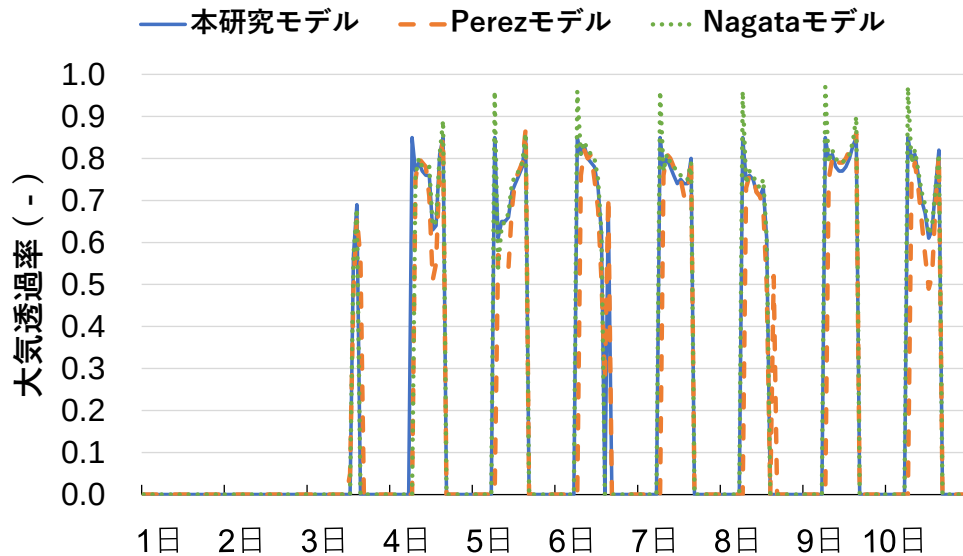


図 2.11 本研究モデルと他モデルとの大気透過率の比較

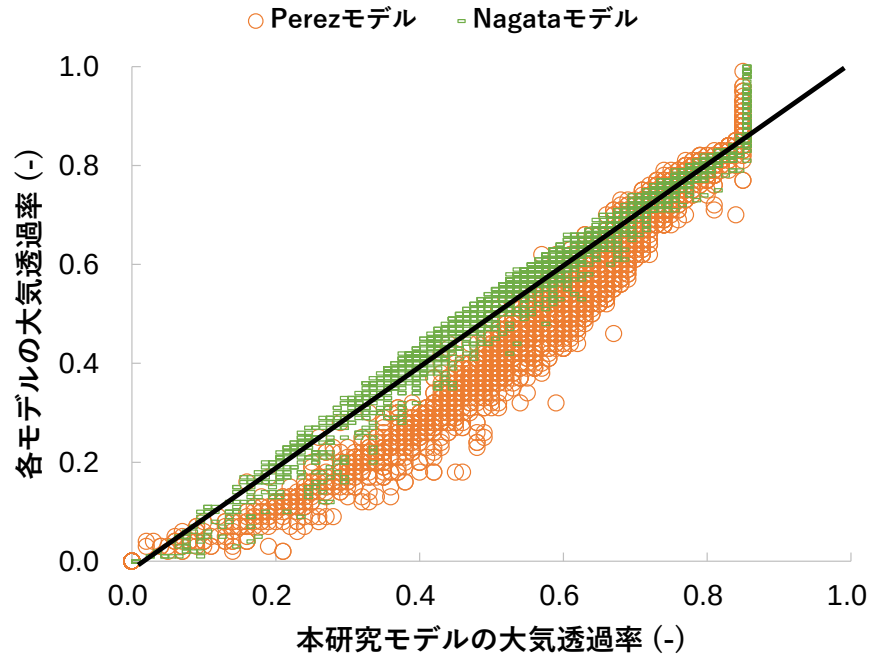


図 2.12 本研究モデルと他モデルとの大気透過率の相関関係

b) 法線面直達日射量と水平面天空日射量

法線面直達日射量の時系列の比較結果を図 2.13、相関関係を図 2.15 に示し、水平面天空日射量の時系列の比較結果を図 2.14、相関関係を図 2.16 に示す。時系列比較で、法線面直達日射量では、本研究モデルに対し Nagata モデルは最大値が若干高めに出ており、Perez モデルは日射量が少ない時に低くなる傾向が見られるが、両モデルともよく一致している。水平面天空日射量では、Perez モデルが本研究モデルに対し最大値が大きくなっていた。

相関関係で、Perez モデルは本研究モデルに対し法線面日射量では低め、水平面天空日射量では高めとなっており、反対の特性を持っていることが示されている。Nagata モデルは双方とも本研究モデルと高い相関関係を示している。

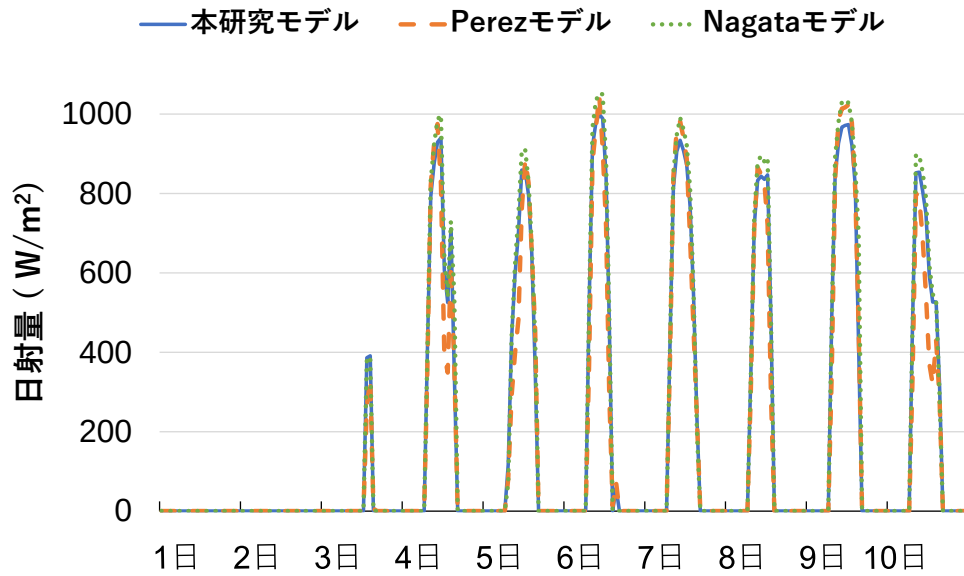


図 2.13 本研究モデルと他モデルとの法線面直達日射量の比較

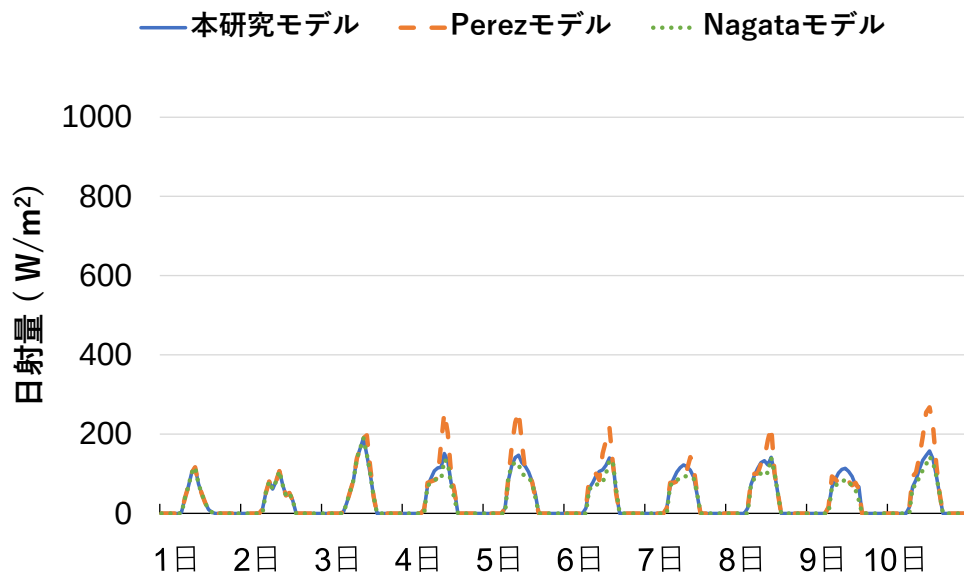


図 2.14 本研究モデルと他モデルとの水平面天空日射量の比較

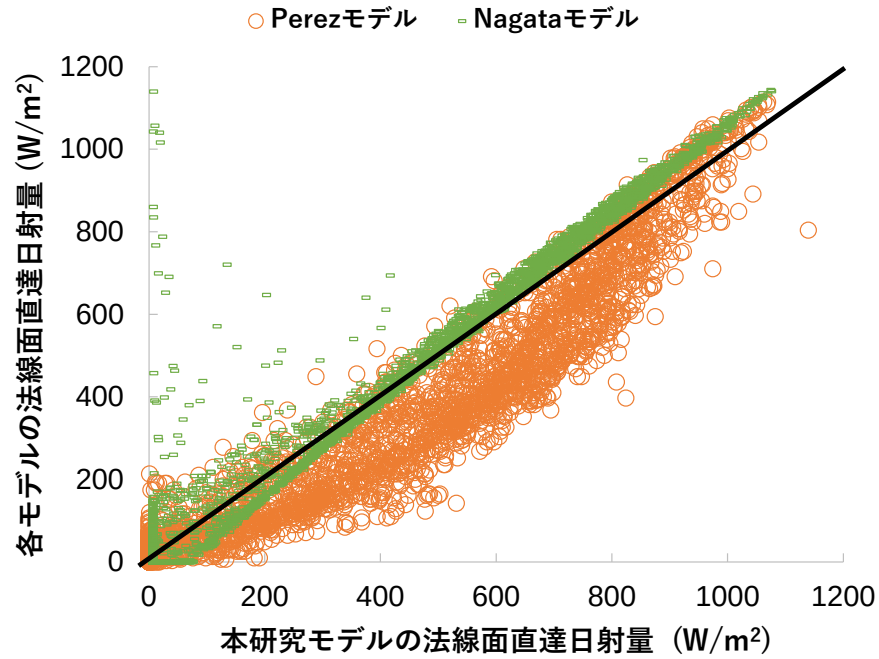


図 2.15 本研究モデルと他モデルとの法線面直達日射量の相関関係

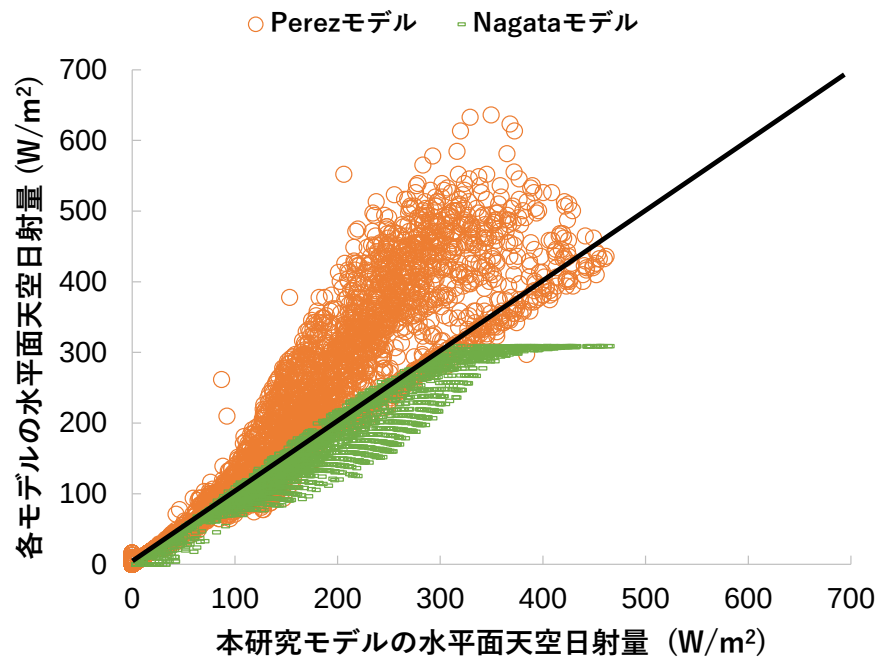


図 2.16 本研究モデルと他モデルとの水平面天空日射の相関関係

c) 南鉛直面の入射日射量

直散分離されたデータを使い、南鉛直面の入射日射量を計算した結果の時系列比較を図 2.17 に示す。昼の最大値では Perez モデルと Nagata モデルは、本研究モデルよりやや高くなっているが、その差はわずかであった。図 2.18 の相関関係から、集熱量計算に

使用する南鉛直面の入射日射量について、本研究モデルは両モデルとも良好な一致がみられた。

以上の結果から、本研究モデルが既往のモデルと比較して、十分高い近似値が得られることが確認できた。

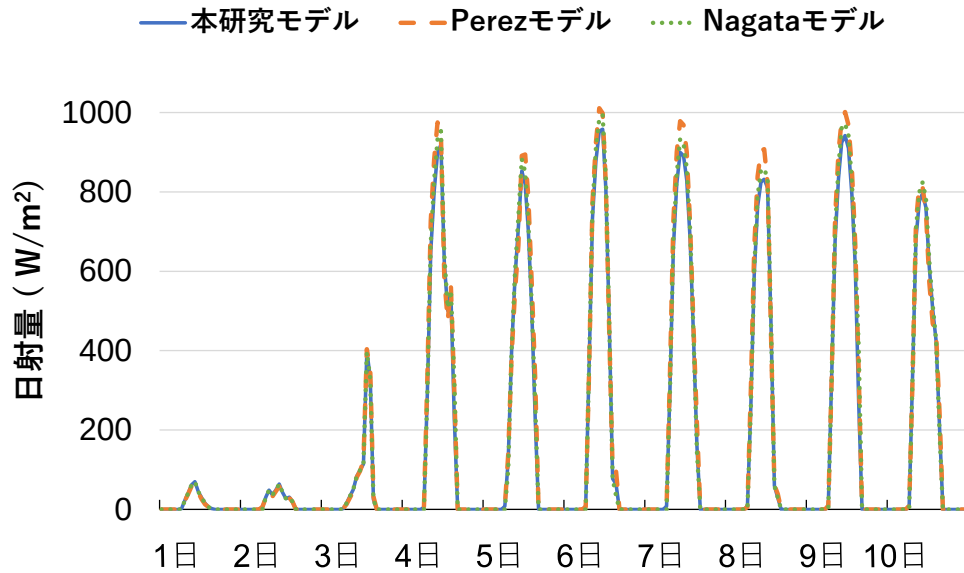


図 2.17 本研究モデルと他モデルとの南鉛直面入射日射量の比較

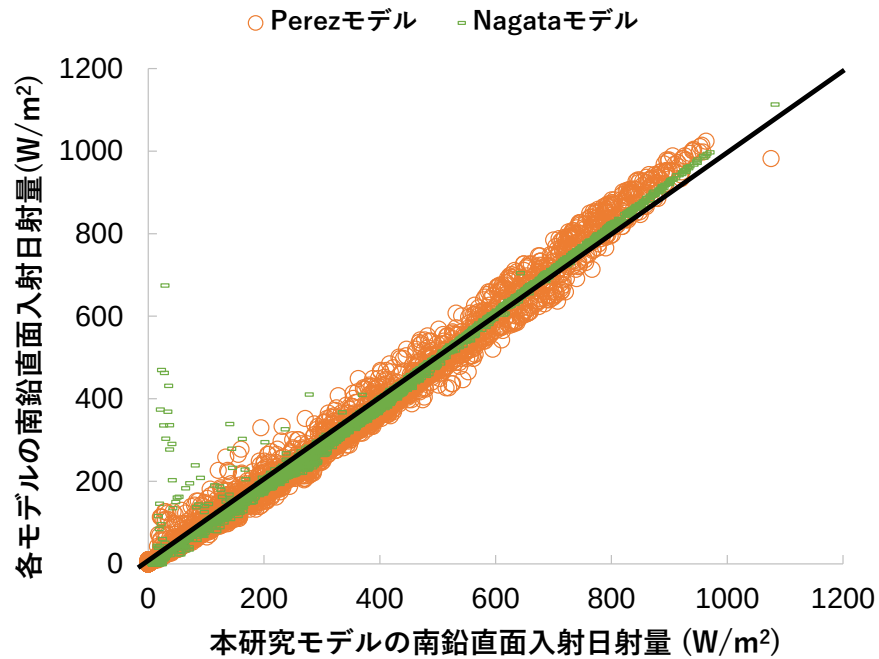


図 2.18 本研究モデルと他モデルとの南鉛直面入射日射の相関関係

2.4.2 透過日射量の算定法

1) 日射量を求める基本式

SAH 表面から透過する日射量は、直散分離したあとの直達成分と天空成分から、式(2-10)で拡散日射量を求める。そして、直達日射量の透過率と拡散日射の透過率を求め、式(2-9)で透過日射量を求める。

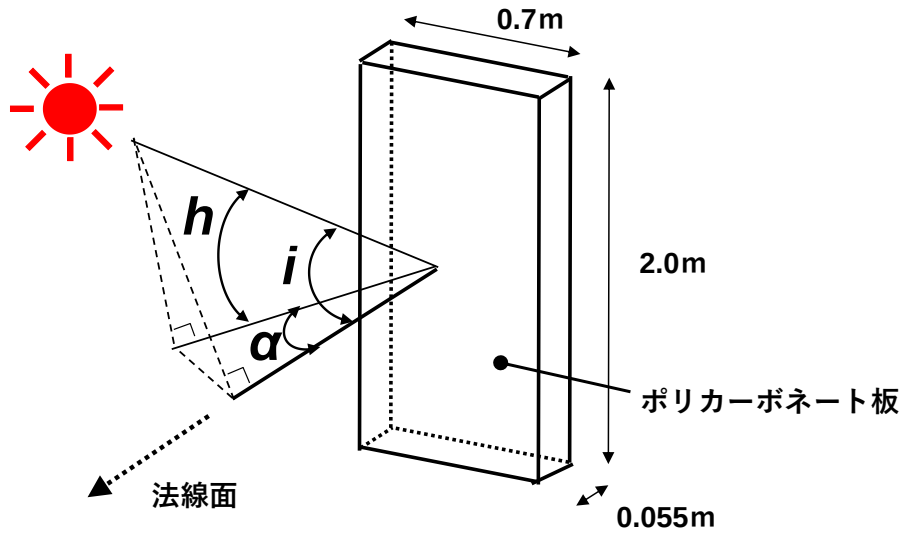
$$J_R = I_b \tau_b + I_f \tau_f \quad \dots(2-9)$$

$$I_f = I_d + \frac{1 - \cos \theta}{2} \rho_g (I_b \sin \theta + I_d) \quad \dots(2-10)$$

I_b	法線面直達日射量	W/m ²
ρ_g	水平地表面のアルベード	-
I_f	拡散日射量	W/m ²
τ_b	直達日射透過率	-
τ_f	拡散日射透過率	-
I_d	水平面天空日射量	W/m ²
θ	SAH の設置角度	radian

2) 太陽熱集熱パネルへの日射の透過率の算定

図 2.19 のように太陽高度と太陽方位角によって入射角は時々刻々と変化する。今回の SAH には、日射取得面にポリカーボネートが使用されているが、その値が不明なため、直達日射の透過率 τ_b については、図 2.20 の 3 mm のガラスの入射角と透過率の関係の値³⁾を用い、ペアガラス相当に換算し総合透過率として計算し、実測に合うように最小二乗法で係数を求めた。なお、拡散日射透過率 τ_f については、60°の時の値⁴⁾を用いて計算を行った。



h : 太陽高度 $[\circ]$ 、 α : 太陽方位角 $[\circ]$ 、 i : 入射角 $[\circ]$

図 2.19 直達日射量入射角

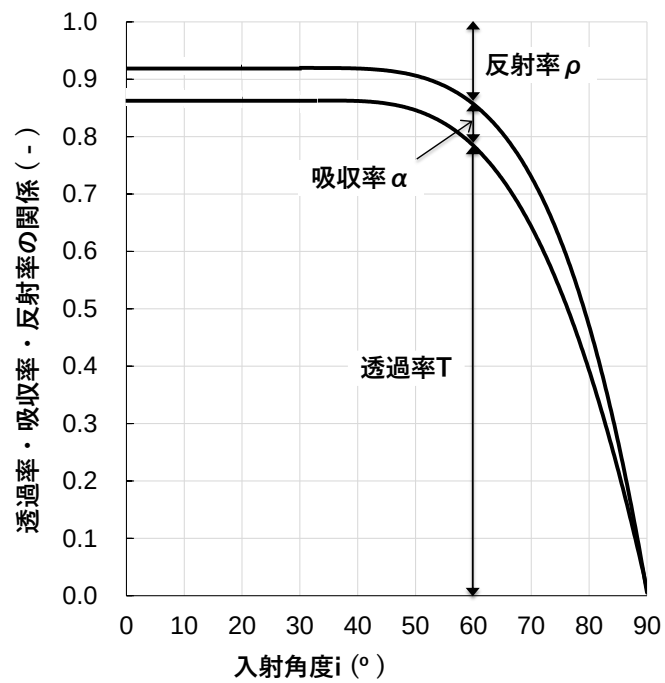


図 2.20 3mm ガラスの入射角と日射透過率

2.5 第2章のまとめ

再生可能エネルギーの利用が可能となる壁付の SAH を対象に、基本性能を実験的に明らかにし、集熱量予測シミュレーション手法を構築した。また、実建物でシミュレーションの再現性を確認した。以下得られた知見を示す。

- 1) 対象とした SAH の送風性能や日射透過性能を実測により明らかにし、集熱量の時間変動を考慮した集熱量予測シミュレーションを構築した。周囲部材の熱容量の一部を求めるために、実験装置を用い、実測値と計算値を最小二乗法で同定し、周囲部材の熱容量の一部を同定した ($M_B = 5057 \text{ J/K}$ 。実測と計算の比較を行なった結果、高い再現性が得られた。
- 2) 北海道千歳市の実住宅に壁付の SAH を設置し、提案した集熱量予測シミュレーションから算出した計算値と実測値を比較した結果、よく一致し実用上十分な精度で計算可能であることを明らかにした。
- 3) 一般的に入手可能な全天日射量で、容易に直散分離を可能とする簡易手法を構築した。既往モデルの Nagata モデルと Perez モデルの2モデルとの比較で、十分近似値が得られることを示した。

SAH の基本性能が明らかになり、集熱量の予測が可能であることを示した。

参考文献

- 1) 財団法人環境建築・省エネルギー機構：SMASH for windows Ver.2, 2000,
- 2) 株式会社気象データシステム：技術解説「直散分離と斜面日射量の計算」, 2014.07,
<http://www.metds.co.jp/wp/wp-content/contents/documents/technical-writing/tyokusan.pdf> (参照 2016.05.20)
- 3) 井上書院：最新建築環境工学 改訂 4 版, pp.206-207, 2015.02,
- 4) 井上書院：最新建築環境工学 改訂 4 版, p.208, 2015.02,

第3章 太陽熱利用型パッシブ換気システムの性能評価

3.1 はじめに

パッシブ換気システムは、内外温度差によって生じる浮力と風圧力を駆動力とした換気システムで、空気搬送動力の削減効果とメンテナンス負担の軽減効果が期待できる。機械換気システムが普及する以前から、換気手法として一般的に認識されており、機械換気システムと同様、公的な技術基準^{1),2)}が示されている。パッシブ換気のメリットは、機械的な駆動部分がないため故障する部品がなく、フィルターなども使用しないため、メンテナンスの負担が大幅に軽減されることである。また、居住者のメンテナンス不足が引き起こす、換気量低下による空気質の悪化を防ぐことができる点も優れている。

本章では、再生可能エネルギーとして利用可能な太陽エネルギーを、換気の省エネルギー化を目的として活用するために、福島ら³⁾が提案したパッシブ換気の外気導入部分に、エネルギーを全く使用せず熱エネルギーの供給が可能な自立型のSAHを組み合わせ、給気を予熱し換気負荷を低減させる「太陽熱利用型パッシブ換気システム」（以後PVSAH）の開発を行う。

このシステムは、SAHの動作時には第二種換気として強制的に外気を供給するため、パッシブ換気システムの持つ課題である、温度差や風力の減少による換気量の低下を補い、室内空気質の維持に寄与する。また、SAHもパッシブ換気と同様、日々のメンテナンスを必要としないため、メンテナンス不足による動作不良が発生しない点も相性がよい。本システムを実建物へ実装し、集熱量及び換気負荷の低減効果の評価及び、集熱量予測シミュレーションの再現性についての評価を行う。

3.2 太陽熱利用型パッシブ換気システムの概要

図3.1に、本研究で開発を行うシステムの概要を示す。

本システムは、パッシブ換気システムの外気取入れ口にSAHを設置し、外気はSAHを通して床下へ供給される。床下は、基礎断熱された給気チャンバーとなっており、ここに導入された外気は、床下の暖房で加温され上昇する。上昇した空気は、ガラリや上昇壁を通じて1階及び2階の室内へ供給され、その一部の空気は、高所に設置された排気口を通して煙突から外へ排出される。煙突は温度差による圧力差を最も得られるように、高い位置へ設置する。換気と暖房を兼ねた空気が、家の中を循環した後、下降ガラリから床下へリターンエアーとして戻る。下降ガラリには熱源がなく、相対的に床下の温度が低くなる場所に設置することで、リターンエアーが床下へ戻りやすくなる。室内空気がリターンエアーとして床下に戻ることで、家全体の空気が循環する仕組みとなっている。

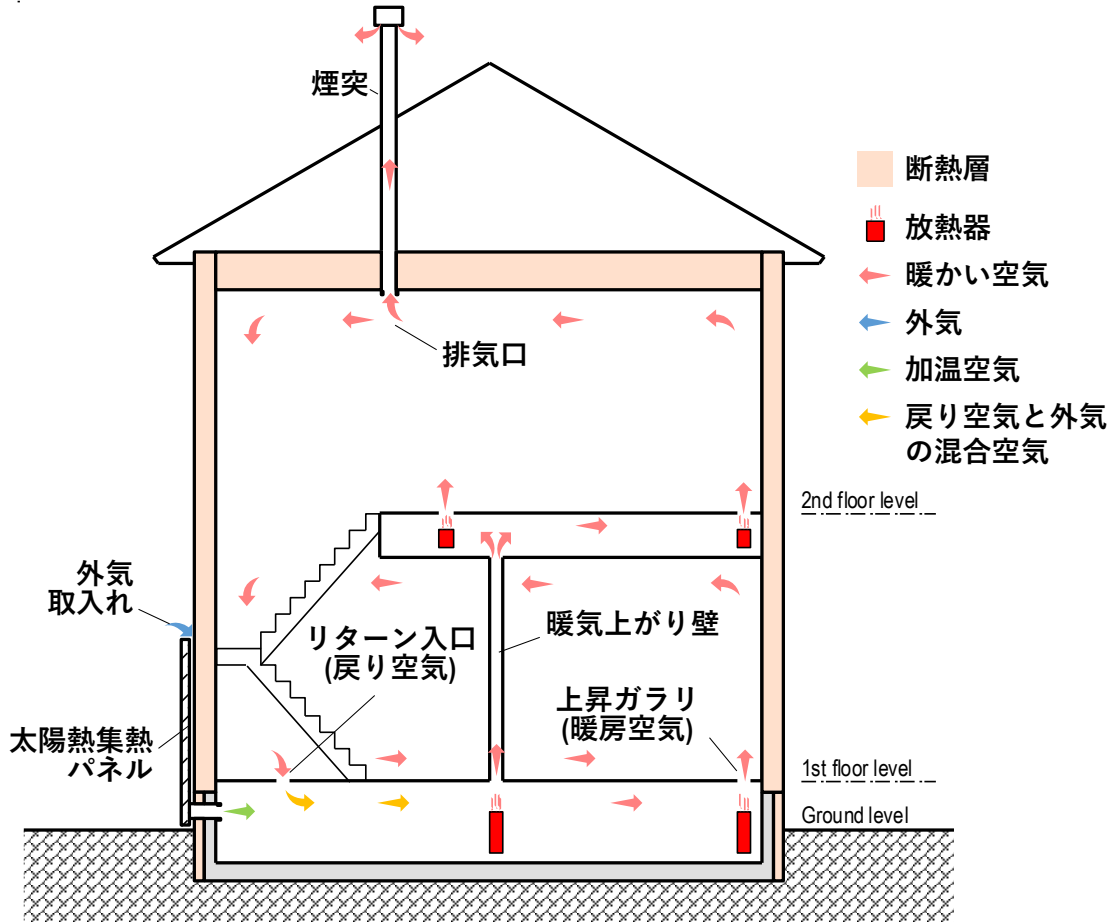


図 3.1 太陽熱利用型パッシブ換気システム概要

3.3 実建物における性能評価

3.3.1 建物概要

北海道札幌市に建築された、木造 2 階建て住宅で実測を行った。図 3.2 に、建物写真を、表 3.1 に、建物概要を示す。点線で囲った部分が給気口を兼ねた SAH となっている。建設地である札幌市は、最寒月の平均外気温は -4.6°C 、最深積雪 80cm、累計降雪量 550cm 以上の多雪地域である。

SAH は南面外壁に 2 台設置され、パッシブ換気の給気口を兼ねている。床面積は約 125m^2 で家族構成は 4 人、暖房は床下に設置された放熱器に温水を流して行っている。

表 3.1 建物概要

建築地	北海道札幌市
竣工日	2015 年 6 月
居住人数	大人 2、子供 2
延床面積	125.87m ² (1 階 65.42m ² , 2 階 60.45m ²)
建物気積	352.76m ³
熱損失係数(Q 値)	0.79(W/m ² ・K)
相当隙間面積(C 値)	0.3(cm ² /m ²)
熱貫流率(U 値)	天井 : 0.08(W/m ² ・K) 壁 : 0.12(W/m ² ・K) 窓 : 0.91(W/m ² ・K)



図 3.2 SAH 設置状況

3.3.2 測定項目と測定期間

図 3.3 に、実測を行った建物の平面図及び測定機設置状況について、表 3.2 に、測定概要を示す。室内・室外の温度・湿度・二酸化炭素濃度・給気吹出し部・SAH・排気廻りの風速・温度・湿度、その他に入射日射量、暖房使用量などの項目について測定を行った。解析に使用した測定データは、2015 年 10 月~2016 年 5 月のデータを使用した。集熱性能の評価にあたり、日照が得られた日で検討を行うため、日照時間が 4 時間以上あ

る日を「日照日」として選定し、集熱時間は8時~16時で設定した。気象庁のデータから1月の1日あたりの日照時間を算出した結果を図3.4に示す。なお、SAHの集熱性能評価は西側のパネル1台で、集熱量の評価は2台で行う。また、表3.3に、測定期間中の室内環境を示す。室内の温湿度及び空気環境は良好に保たれていた。

表 3.2 測定概要

測定項目	測定項目	測定器	測定間隔
外気温	℃	気象庁データ	60分
床下北	℃, %RH	おんどとり TR-72Ui	30分
床下中央	ppm, °C, %RH	おんどとり TR-76Ui	30分
玄関	℃, %RH	おんどとり TR-72Ui	30分
1階リビング南	ppm, °C, %RH	おんどとり TR-76Ui	30分
リビンググローブ温度	℃	熱電対+おんどとり TR71A	30分
1階キッチン	℃, %RH	おんどとり TR-72Ui	30分
1階和室	℃, %RH	おんどとり TR-72Ui	30分
1階洗面所	℃, %RH	おんどとり TR-72Ui	30分
階段	℃, %RH	おんどとり TR-72Ui	30分
2階吹抜付近	ppm, °C, %RH	おんどとり TR-76Ui	30分
2階主寝室	ppm, °C, %RH	おんどとり TR-76Ui	30分
2階東寝室	℃, %RH	おんどとり TR-72Ui	30分
2階西寝室	℃, %RH	おんどとり TR-72Ui	30分
2階排気口部	℃, %RH	おんどとり TR-72Ui	30分
ポーチ部外気	℃, %RH	おんどとり TR-72Ui	30分
西側 SAH 吹出し部	℃, %RH	おんどとり TR-72Ui	30分
	m/s	カノマックス Model6332D	10分
東側 SAH 吹出し部	℃, %RH	おんどとり TR-72Ui	30分
	m/s	カノマックス Model6332D	10分
SAH 入射日射量	W	ブリード PCM-01N	5分
SAH 設置部外気温度	℃	熱電対+サーミック	30分
SAH 背面温度(上部)	℃	熱電対+サーミック	30分
SAH 背面温度(中央)	℃	熱電対+サーミック	30分
SAH 背面温度(下部)	℃	熱電対+サーミック	30分

- : 温湿度計(30分間隔) [TR-72Ui : T&D社製] ■ : CO2+温湿度計 (30分間隔) [TR-76Ui : T&D社製]
 ● : 日射計 (5分間隔) [PCM-01N : プリード社製] ▲ : 風速計 (10分間隔) [Model 6332D : カノマックス社製]

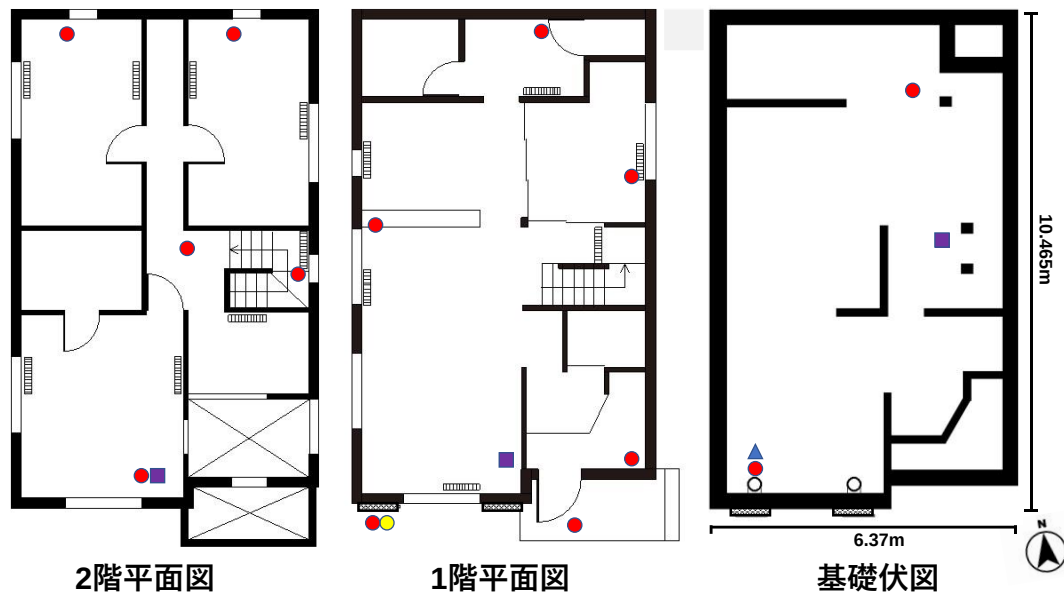


図 3.3 平面図及び測定機設置状況

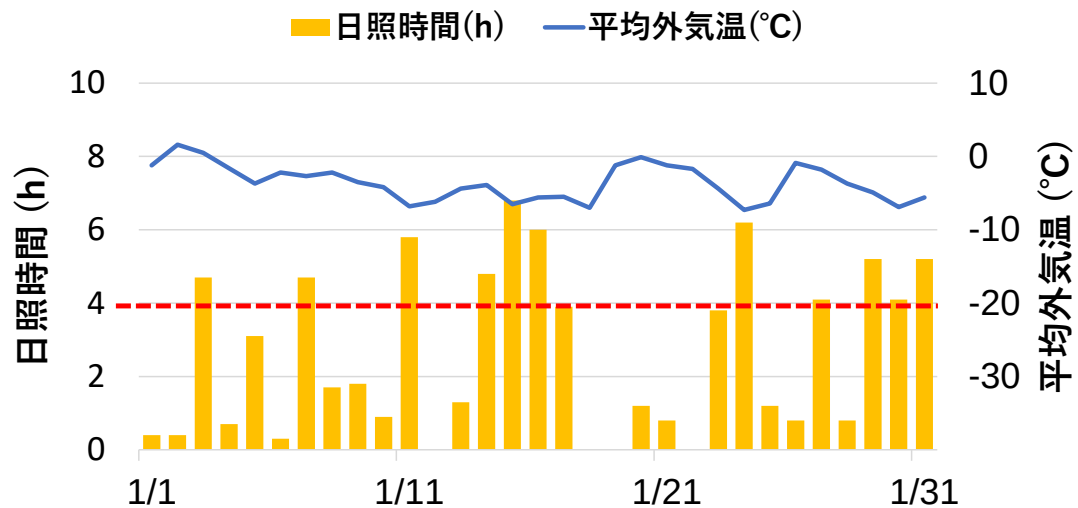


図 3.4 気象庁データによる 1 日あたり日照時間

表 3.3 測定期間中の室内環境

測定項目	平均	標準偏差
外気温度 (°C)	4.1	7.1
室内温度 (°C)	21.5	1.4
室内相対湿度 (%)	50.3	4.7
室内 CO ₂ 濃度 (ppm)	743	192

3.3.3 給気予熱効果

1) 太陽熱集熱パネルの稼働状況

図 3.5 及び図 3.6 に、測定期間中の SAH 吹出し温度と 1 時間あたりの集熱量の測定結果を示す。1/13~1/21 に日射計の不具合によりデータ欠落があるが、鉛直面日射量と集熱量及び SAH からの吹出し温度が、それぞれ連動していることが確認できる。天候により効果の大小はあるが、吹出し温度が外気に 20~30℃の加温がされていることや、集熱量が得られていることが確認できる。5月後半は太陽高度が高くなるため、鉛直面日射量の減少や影の影響などで集熱量が大きく減少していた。

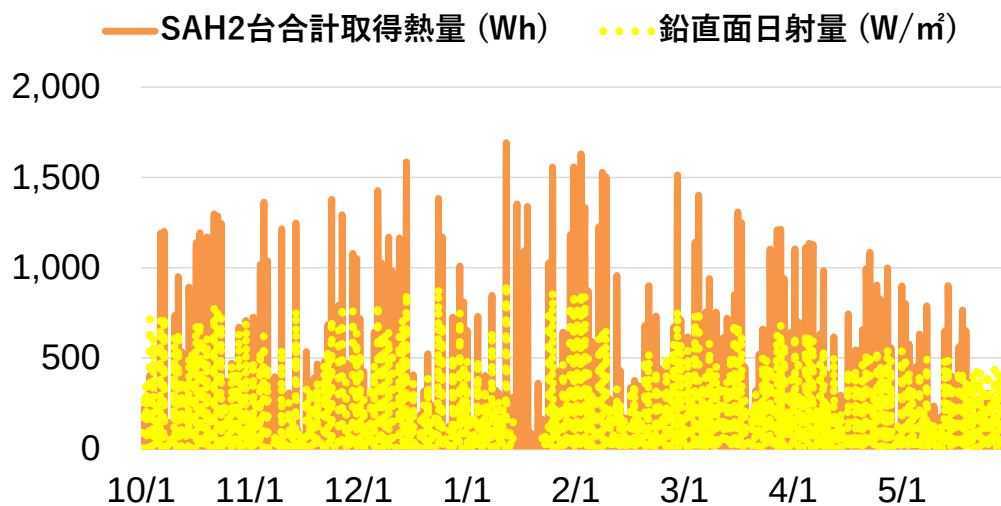


図 3.5 測定期間中の SAH の集熱量と日射量

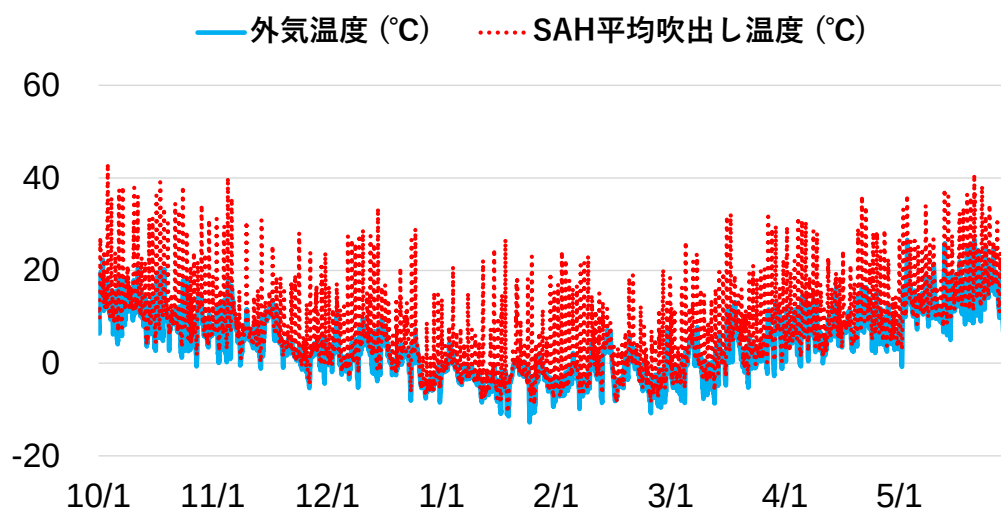


図 3.6 測定期間中の SAH の吹出し温度

2) 日照日の集熱性能

図 3.7 に、1 月の日照日における SAH の時間帯別の昇温効果（SAH 吹出し温度－外気温度）と集熱量を箱髭図で示す。1 月の日照日は 11 日間であった（図 3.4）。昇温効果の評価は、測定器を設置した西側の SAH 1 台分で行なった。

昇温は、最大で約 30℃、SAH1 台の 1 時間あたり最大集熱量は約 0.85kWh、最も集熱量が多い 11 時の平均では 0.55kWh の集熱量が得られていた。標準偏差は昇温で 6.8℃、集熱量で 0.23kWh と大きく、日照の影響の差が表れていた。また、1 月は 9 時前と 14 時以降の日射取得が得られなかった。太陽高度が低い 1 月は隣家の影響を受けたためである。

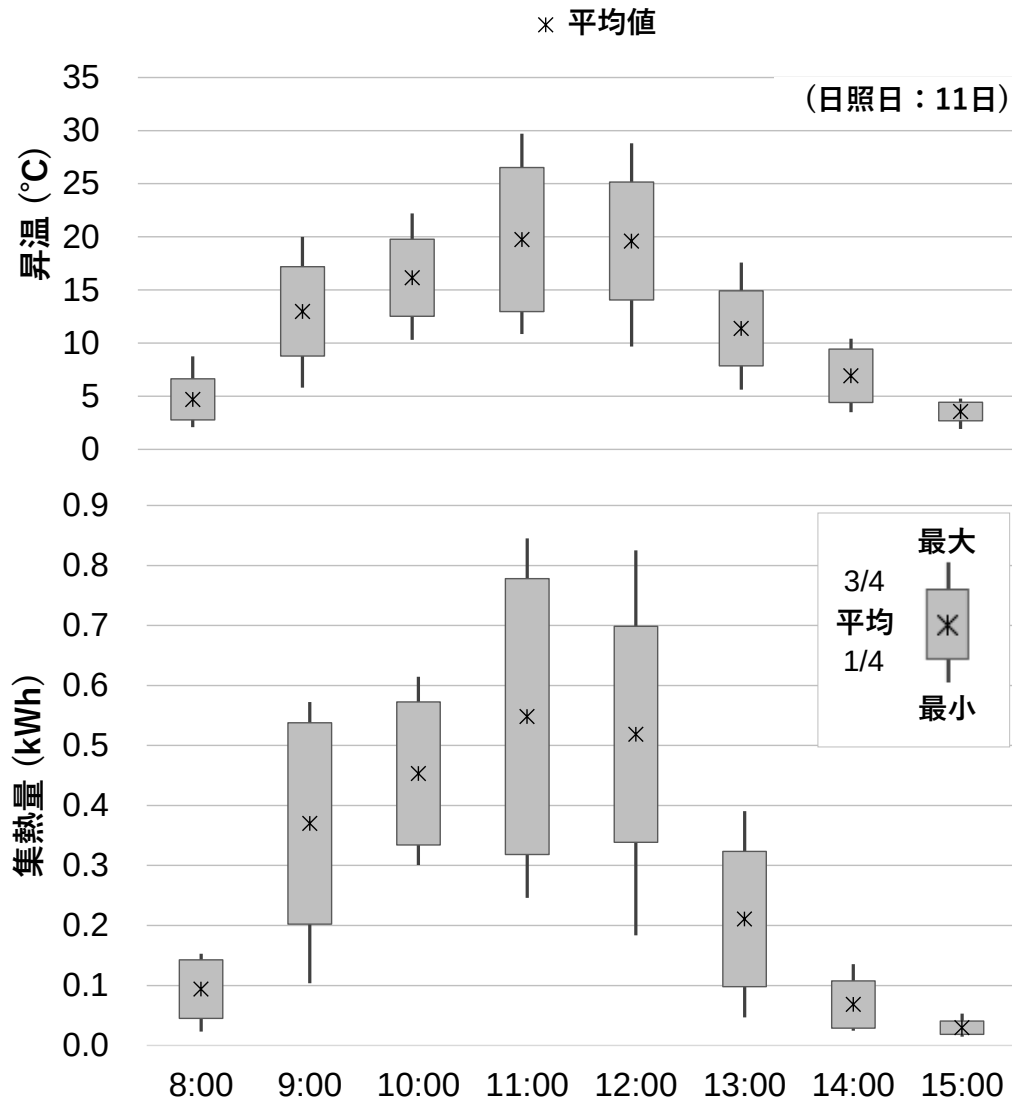


図 3.7 1 月の日照日における SAH の時間帯別の昇温効果と集熱量

3) 冬期における期間集熱性能

次に、日照日以外も含めた、2015年10月~2016年5月の測定期間のSAHの月別の日平均集熱量と日平均入射日射量を、図3.8に、箱髭図で示す。1~3月には最大値で7.0kWh/日以上集熱量が得られており、2月には7.3kWh/日の最大集熱量が得られていた。標準偏差の最大値は1月の約2.0kWhとなり、日照の影響を大きく受けていた。このように天候の影響を受けていても、月別の日平均集熱量の最低は、11月で2.0kWh/日、最大で3月の3.2kWh/日となった。期間の平均では2.5kWh/日の集熱量となった。

以上のことから、天候の影響を受けるものの、SAHの集熱性能が一定の効果を持ち、暖房負荷の軽減に寄与することが示された。

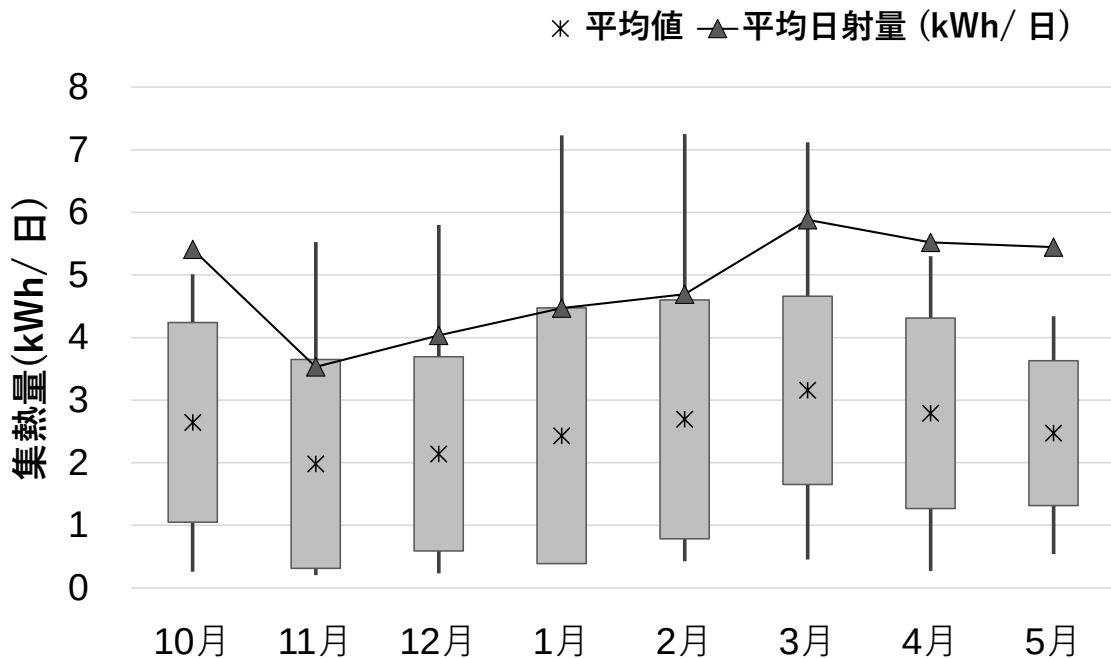


図 3.8 SAH2 台の月別日平均集熱量と日平均入射日射量

4) 太陽熱集熱パネルの集熱効率

SAH の効率を、実測により明らかにするため、図 3.9 に、1 日平均した SAH の入射日射量と集熱量の関係を示す。実測で発生するばらつきの原因は、外部風の影響、玄関フレームの影、雪や汚れの付着、日射計への影の影響などの理由が考えられる。実測での平均集熱効率は約 58%で、定格である 60%と同等の効果が得られており、日射量に応じた集熱がされていることが確認できた。

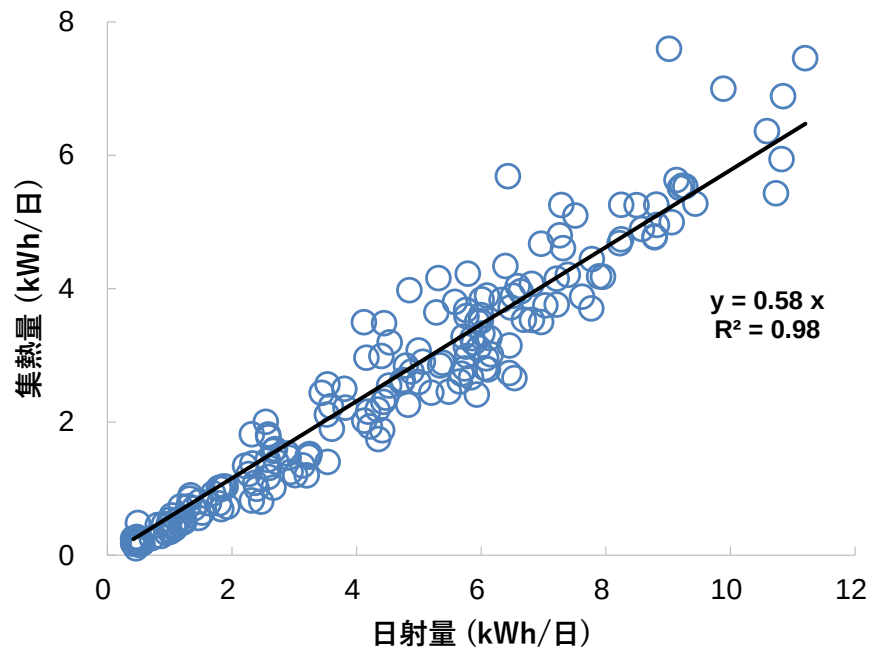


図 3.9 入射日射量と集熱量の関係

3.3.4 太陽熱利用型パッシブ換気システムの換気負荷低減効果

図3.10に、集熱量と換気負荷の関係及び、SAHの集熱量が換気負荷を低減した割合である換気負荷低減率について示す。データは1日単位で合計し、月別に算出して評価を行なった。図中の髭は、平均値に標準偏差を示したものとなっている。

換気負荷低減効果は、最寒月を含む12月から2月までの期間で18%~20%、10月~11月及び3月~4月で22%~40%、5月で47%の削減効果が得られた。期間平均では、約25%の換気負荷が低減可能であることが確認できた。

また、1月と5月や10月と2月のように、集熱量は同程度でも換気負荷の違いで低減率が大きく変わることや、12月と3月のように換気負荷が同程度でも、日射量の違いにより集熱量の差が生じ、換気負荷削減率が異なる結果となった。

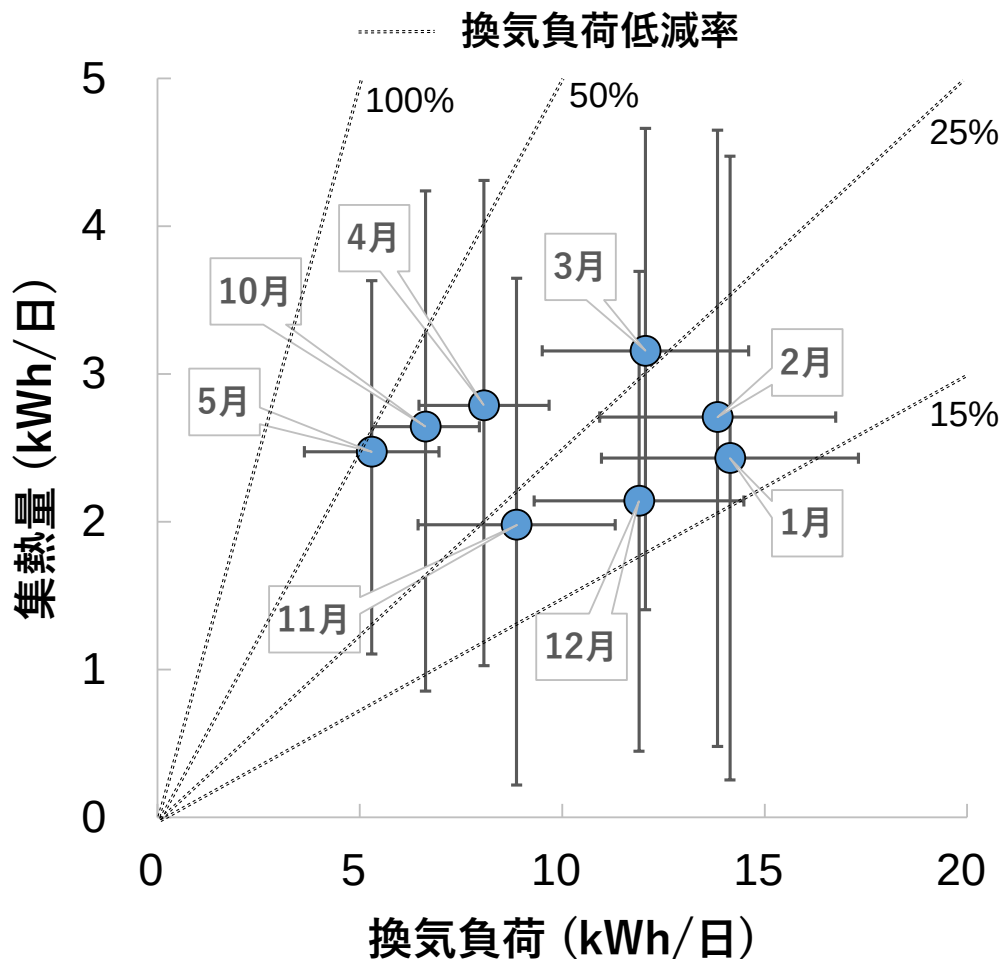


図 3.10 集熱量と換気負荷の関係

3.4 集熱量予測シミュレーションと実測結果の比較

本研究で作成した、集熱量予測シミュレーションによる集熱量と実測による集熱量の関係を、1日単位で合計し月別に平均して算出したものを図 3.11 に示す。日射量は実測値を使用して計算を行った。誤差率について、実測値から計算値を差し引き計算値で割って平均した結果、ほぼ 0% となった。また、決定係数は 0.89 となり高い相関性を示し、本予測シミュレーションの再現性が高いことが確認できた。

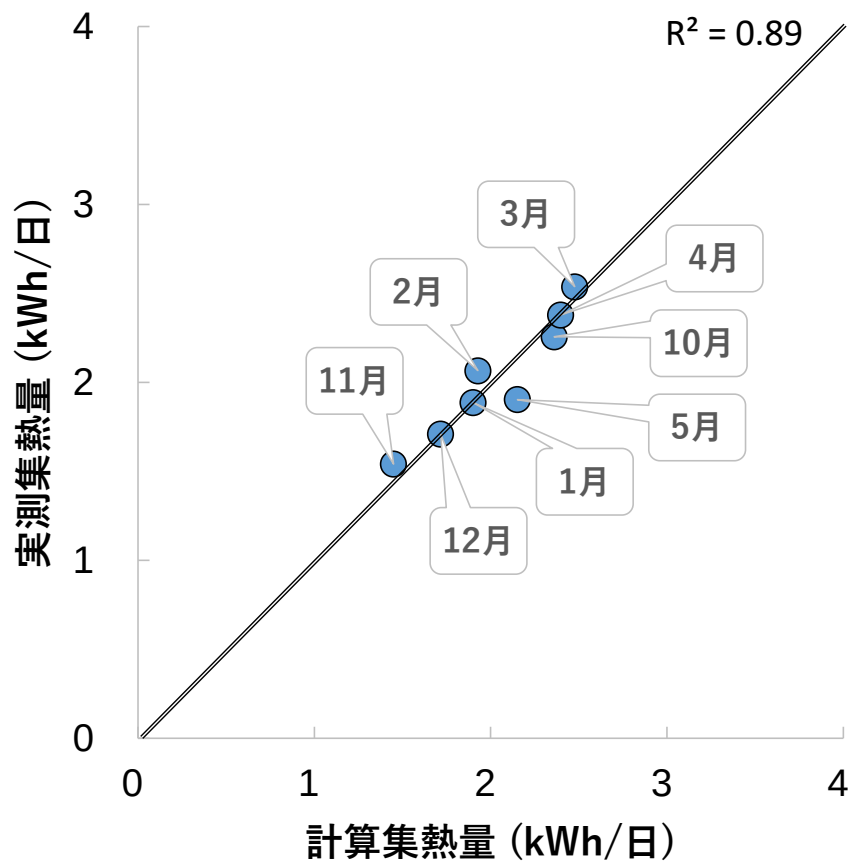


図 3.11 SAH の予測シミュレーションと実測の集熱量の関係

3.5 第3章のまとめ

省エネルギー性に優れたパッシブ換気に、再生可能エネルギーを活用するための SAH を給気部分に組み合わせ、換気負荷を低減させる「太陽熱利用型パッシブ換気システム」の開発を行なった。実測による評価と集熱量予測シミュレーションの再現性の評価を行い、得られた知見を以下に示す。

- 1) 実建物での実測を行なった結果、SAH の昇温効果は最大で約 30℃、SAH1 台の 1 時間あたりの最大集熱量は 0.85kWh、最も集熱量が得られている時間帯である 11 時の平均で 0.55kWh の集熱量が得られていた。標準偏差は昇温で 6.8℃、集熱量で 0.23kWh と、日照の影響を大きく受けていた。また、太陽高度が低い 1 月は隣家の影響で 9 時前と 14 時以降は日射取得が制限された。
- 2) 2 月には最大で 7.3kWh/日の集熱量が得られていた。日照がない日も含めた日平均集熱量では、最低で 11 月の 2.0kWh/日、最大で 3 月の 3.2kWh/日となった。期間平均で 2.5kWh/日の集熱量が得られていた。
- 3) 実測による SAH の集熱効率率は約 58%であった。
- 4) SAH の換気負荷低減率は、11 月~2 月で 18%~22%、それ以外の季節で 26~47%、期間平均で約 25%の換気負荷低減効果があった。
- 5) 集熱量予測シミュレーションと実測の比較で、決定係数 0.89 と高い相関関係を示した。

本研究で、換気負荷の低減効果と、集熱量予測シミュレーションの再現性が高いことが確認出来た。また、本システムが、換気負荷を低減可能な手法の一つとして有効であることが明らかになった。

参考文献

- 1) 財団法人環境建築・省エネルギー機構：国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所監修「温暖地版自立循環型住宅への設計ガイドライン」，pp.258-281, 2015.08,
- 2) 札幌市：札幌版次世代住宅基準，
<https://www.city.sapporo.jp/toshi/jutaku/10shien/zisedai/zisedai.html> (参照 2024.05.07)
- 3) 福島明，絵内正道，宮浦睦明，本間義規：基礎断熱した床下空間を利用したパッシブ換気・暖房方式の実住宅への適用：寒冷地のパッシブ換気に関する研究その2，日本建築学会計画系論文集, 第 532 号, pp.51-56, 2000.06,
https://doi.org/10.3130/aija.65.51_2.

第4章 一次エネルギー及び二酸化炭素排出量の評価

4.1 はじめに

近年、換気負荷を減らすために、様々な換気システムが開発され市場に製品投入されており、特に熱交換換気の採用が増えている。しかし、熱交換換気は、熱回収を行うことで換気負荷を低減化させるメリットがある一方で、熱交換器の空気抵抗の増加や、給気と排気それぞれの空気搬送に必要なファン動力の増加という課題がある。従って、換気システムの省エネルギー性能の評価には、換気負荷の低減だけでなく、空気搬送動力の低減も含めた省エネルギー化が必要である。

そこで、熱回収の代わりに再生可能エネルギーを活用し、かつ空気搬送動力を使用しない「太陽熱利用型パッシブ換気システム」の省エネルギー性能について、一般的に広く普及している第三種換気と、近年採用が増加している熱交換換気との比較検討を行った。評価は換気分の冷暖房負荷だけでなく、空気搬送動力まで含めて行い、換気システム別に、一次エネルギー消費量及び二酸化炭素排出量の比較を行う。その際、SAHの実用的で効果的な設置角度についても地域別に検討を行う。さらに、2050年の脱炭素社会を目指す上で、将来的に二酸化炭素排出係数が変化していくことを踏まえ、排出係数の変化を考慮した評価を行い、地域特性にあわせたシステムの提案を行う。

4.2 検討条件

4.2.1 検討換気システム

本研究で評価を行う換気システムは、本研究で開発したPVSAHと一般に多く採用されている第三種換気、近年の住宅の高性能化に伴い採用が増加している熱交換換気で行い、その概要の一覧を表4.1及び図4.1に示す。日本の省エネルギー基準において、換気システムの空気搬送動力は比消費電力（以後SFP）として評価を行っている。SFPとは1時間あたり1Whのエネルギーでどれくらいの風量を搬送できるかを表している。SFP及び熱交換効率については、日本の省エネルギー基準¹⁾におけるデフォルト値を採用した。PVSAHは温度差が少なくなる中間期及び夏期は自然換気的能力が落ちる。従って、これらの期間は、第三種換気を運転して換気を行う条件でSFP評価を行った。換気回数は、日本の標準値でもあり、換気回数に関する国際調査²⁾から得られた0.5回/hとした。PVSAHに搭載されているSAHの集熱効率は、定格で60%であるが、検討は式(2-4)から算出した値を使用した。なお、建物条件は、自立循環型住宅（一般モデル（木造軸組み工法））の床面積120m²、気積は288m³にて検討を行った。

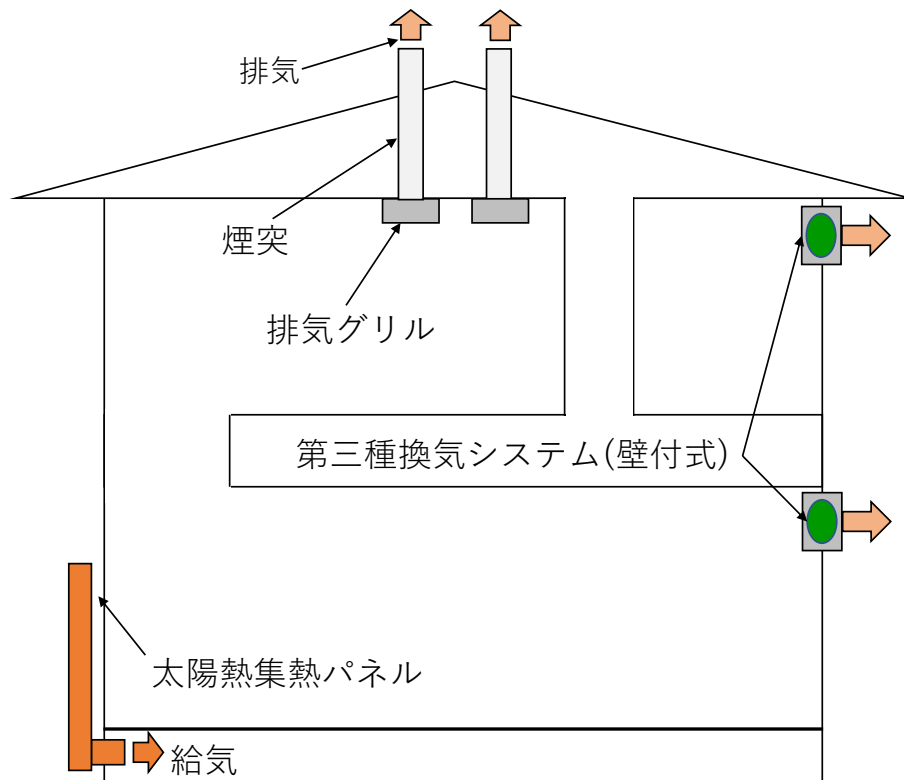
表 4.1 比較検討する換気システム

システム		比消費電力 (W/(m ³ /h))	換気回数 (回/h)	温度交換 効率(%)	SAH 集熱 効率(%)
太陽熱利用型 パッシブ換気 システム	暖房期間	0.00	0.5	-	60[定格効率]
	暖房期間以外	0.24		-	-
第三種換気システム		0.24		-	-
第一種熱交換換気システム		0.49		80	-

※計算モデルは自立循環型住宅(一般モデル(木造軸組み工法))とする。

延床面積：120.8m²、室容積：289.92m³

※日本の省エネルギー基準におけるデフォルト値を採用



(a) 太陽熱利用型パッシブ換気システム

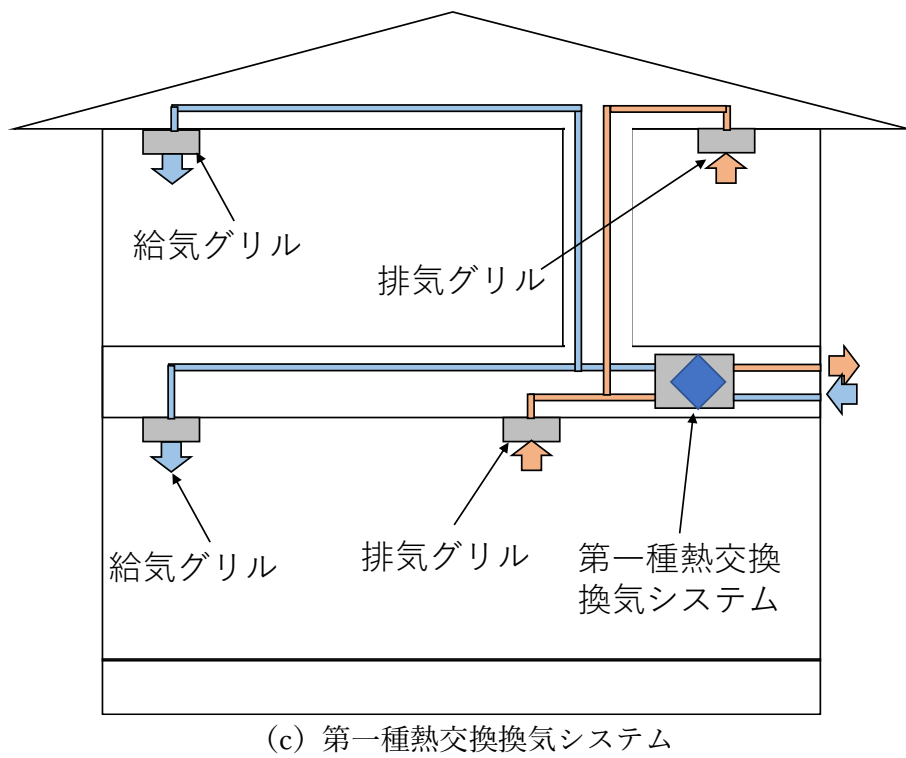
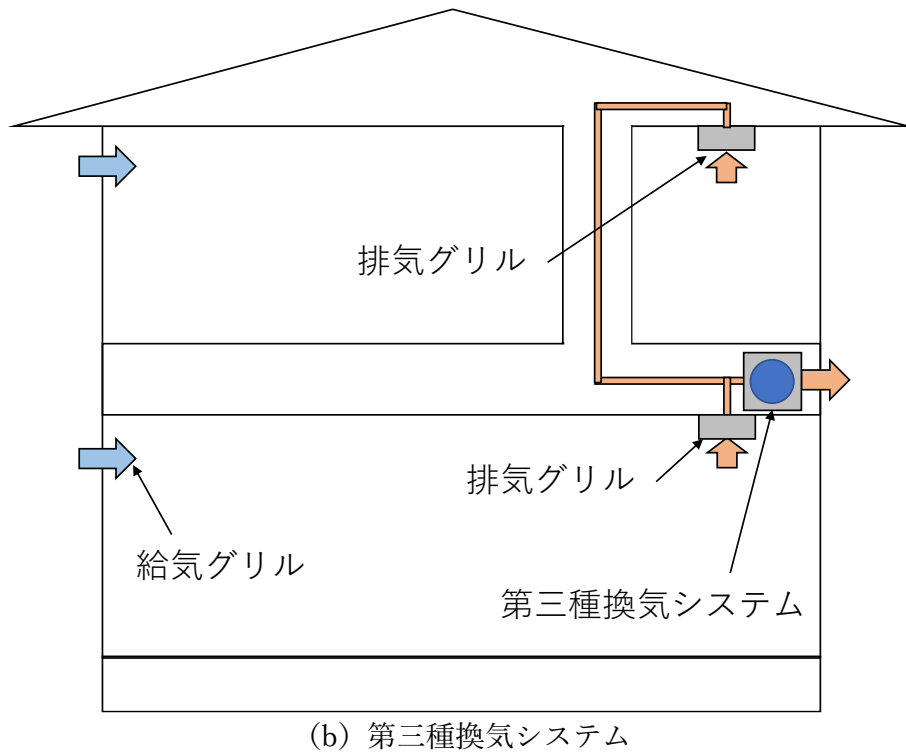


図 4.1 各換気システム概要図

4.2.2 検討地域

図 4.2に示すとおり、日本の省エネルギー基準¹⁾は、degree-dayによって8地域に区分されており、その地域別に省エネルギー効果の検討を行った。検討地域の選定にあたり、暖房需要が少ない蒸暑地域である8地域及び人口5万人以下の市町村しかない1地域は除外し、各地域別に人口が多い代表的な都市を選んだ。選定した各都市の特性及び冷暖房の条件を表 4.2に示す。気象データは、拡張アメダス気象データ（2010年版標準年）⁴⁾を用いた。degree-dayは、省エネルギー基準で使用されているDD-18を採用し、冷暖房の期間は、省エネルギー基準技術情報¹⁾から引用した。冷暖房のヒートポンプ（以後HP）効率は、冷暖房熱負荷簡易計算法プログラム計算仕様書⁵⁾に基づき、ガス熱効率は、日本の省エネルギー基準のデフォルト値である0.87を使用した。

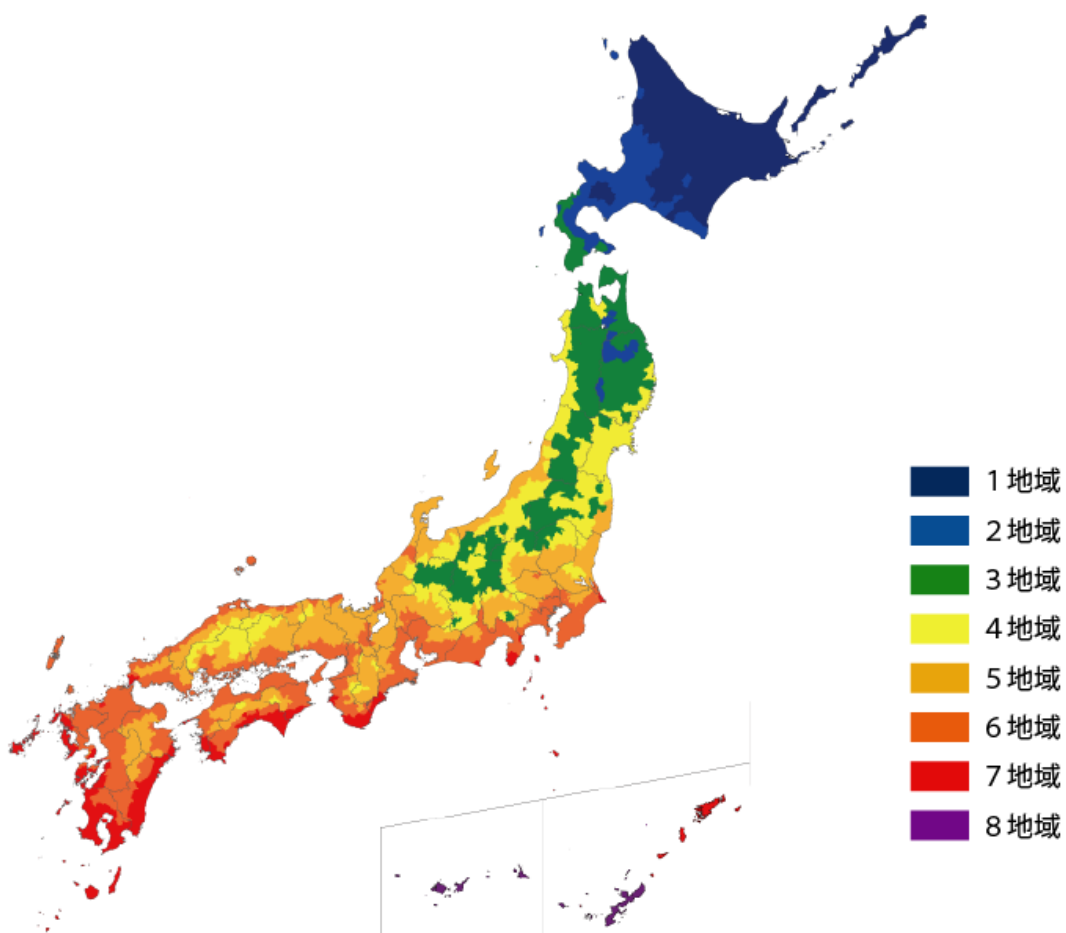


図 4.2 省エネルギー基準における地域区分

表 4.2 検討地域と地域特性及び冷暖房条件

都市名	地域区分	緯度・経度	暖房度日 (HDD18-18)	最高気温 (°C) 最低気温 (°C)	年間降雪量 (cm)	年間日射量 (MJ/m ²)	暖房期間 冷房期間	暖房 APF 冷房 APF	ガス 効率
札幌	2	北緯 43° 03' 51"	4499	32	479	4436	9/26~6/4	3.2	0.87
		東経 141° 20' 49"	~3500	-11.4			7/15~8/31	6.6	
盛岡	3	北緯 39° 42' 13"	3499	31.9	209	4548	9/30~5/31	3.8	
		東経 141° 09' 09"	~3000	-12.2			7/10~8/31	6.6	
長野	4	北緯 36° 39' 05"	2999	35.7	163	5354	10/1~5/30	4.6	
		東経 138° 10' 52"	~2500	-8.2			7/10~8/31	6.4	
仙台	5	北緯 38° 16' 08"	2499	35.4	59	4495	10/10~5/15	5.1	
		東経 140° 52' 19"	~2000	-4.2			7/6~8/31	5.7	
東京	6	北緯 35° 41' 22"	1999	35.2	8	4713	11/4~4/21	5.6	
		東経 139° 41' 30"	~1500	-0.5			5/30~9/23	6.2	
鹿児島	7	北緯 31° 33' 37"	1499	34.6	2	5223	11/26~3/27	5.7	
		東経 130° 33' 29"	~500	-0.3			5/15~10/13	6.3	

※冷暖房期間は省エネルギー基準技術情報¹⁾を使用

※冷暖房の HP 効率は冷暖房熱負荷簡易計算法プログラム計算仕様書⁵⁾を使用

※ガス熱効率は日本の省エネルギー基準のデフォルト値を使用

4.2.3 エネルギー換算係数

電力及びガスの一次エネルギー換算係数について表 4.3に示す。この係数は、自立循環型住宅設計技術資料⁶⁾の数値を使用した。また、一次エネルギーの単位あたりの二酸化炭素排出係数について表 4.4に示す。日本の目標である、2050年脱炭素社会を達成するためには、二酸化炭素排出係数を低減する必要がある。二酸化炭素排出量の係数は、電源の構成により大きく変化する。IEA資料⁷⁾の2019年における日本の排出係数は、0.44(kg・CO₂/kWh)となっている。そこで、現在の日本における二酸化炭素排出量の評価を行い、今後、排出係数が改善されることを想定し、排出係数の変化を段階的にレベル設定した。レベル3にはフランスの値を、レベル2はイギリスの値、レベル1はドイツの2019年時の排出係数(kg・CO₂/kWh)を用いた。

表 4.3 一次エネルギー単位あたりの換算係数

エネルギー種類	単位あたり換算係数	単位発熱量
電力	9.76 MJ/kWh	1.000 kWh/kWh
ガス	45.00 MJ/m ³	12.083 kWh/m ³

※自立循環型住宅設計技術資料⁶⁾の値を使用

表 4.4 一次エネルギー単位あたりの二酸化炭素排出係数

レベル	日本の排出係数 (2019 年)	レベル 1	レベル 2	レベル 3
二酸化炭素排出係数 (kg・CO ₂ /kWh)	0.44	0.33	0.18	0.04

※IEA 資料⁷⁾から作成

4.2.4 換気システムのエネルギー計算方法

換気システムの換気負荷について検討を行うにあたり、換気システム別にそれぞれ式(4-1)、式(4-4)、式(4-6)を構築した。SAHの集熱量については第2章の式(2-1)及び式(2-2)を使用する。外気温は拡張アメダス気象データから算出し、室温は20℃設定として計算を行った。換気システムの空気搬送動力については、第三種換気及び熱交換換気は式(4-5)、式(4-7)を使用した。PVSAHは、暖房期間は換気に送風ファンを使用しないため式(4-2)で、暖房期間以外については式(4-3)にて計算を行う。各換気システムの性能は表 4.1、冷暖房の期間と効率については表 4.2、一次エネルギー換算は表 4.3、二酸化炭素排出係数は表 4.4に示した数値を用いた。

太陽熱利用型パッシブ換気システム

$$Qu = (T_i - T_o)0.348Q - Q_c \quad \cdots(4-1)$$

$$E = 0 \quad \text{※暖房期間} \quad \cdots(4-2)$$

$$E = FQ \quad \text{※暖房期間以外} \quad \cdots(4-3)$$

第三種換気システム

$$Qu = (T_i - T_o)0.348Q \quad \cdots(4-4)$$

$$E = FQ \quad \cdots(4-5)$$

第一種熱交換換気システム

$$Qu = (T_i - T_o)0.348Q(1 - \eta_t) \quad \cdots(4-6)$$

$$E = FQ \quad \cdots(4-7)$$

Q_u	換気熱損失	W
Q	換気量	m ³ /h
Q_c	SAH 集熱量	W
T_o	外気温	℃
T_i	室温	℃
E	消費電力	Wh
F	比消費電力	W/(m ³ /h)
t	時間	s
η_t	熱交換器温度交換効率	%

4.3 太陽熱集熱パネルの設置条件

SAHの取付けは、壁面設置だけでなく集熱量を増加させるために角度をつけた設置も可能である。本章では、様々な地域で検討を行うことから、各地域におけるSAHの効果的で実用的な設置条件の検討を行った。はじめに、設置角度による暖房期間の集熱量について計算した結果を図 4.3に示す。設置角度は、地面に対して垂直（壁面設置）の場合は(90°)、水平の場合は(0°)とする。集熱量は、角度が緩くなるに従い上昇し、各地域とも集熱量が最大になる設置角度は(40°)~(50°)となり、壁面設置の場合より集熱量は40%~50%上昇する。しかし、(70°)設置で30%~40%の集熱量上昇となるが、そこから設置角度を緩くしても、集熱量の上昇率は低下し、最大集熱量である(40°)設置の集熱量に対し10%程度しか上昇がなく、(30°)設置にすると(40°)設置よりも集熱量が減少してしまう結果となった。したがって、最大集熱量が得られる設置角度は(40°)~(50°)であるが、建物からの張り出しを抑えたい場合は、(70°)設置までに抑えるとバランスが良い。

つづいて、SAHの設置角度別の換気負荷を図 4.4に、換気負荷の削減率を図 4.5に示す。SAHを壁面設置(90°)で設置することで、換気負荷の削減が15~20%可能となる。しかし、そこから設置角度を変えて集熱量を向上させても、本研究では換気負荷を超えたオーバーヒート分（補助暖房効果分）は計算に不算入であることもあり、換気負荷全体からみた減少割合は小さく、削減率は最大で2~3%の向上に留まる。また、積雪地では角度をつけた設置の場合、積雪による影響で集熱時間が減少し、集熱量が計算値より減少する可能性がある。以上のことから、本研究では、寒冷地での積雪や温暖地における台風などの強風の影響、建物から張り出すことによる障害などを考慮し、デザインの的にも有利な壁面設置（90°）での検討を行うこととした。しかし、換気負荷を超えたSAHの余剰集熱分（オーバーヒート）は、補助暖房として省エネルギーに寄与するため、条件が許せば角度をつけた設置は、追加コストをかけずにエネルギー効率を高めることができるため、より望ましい。

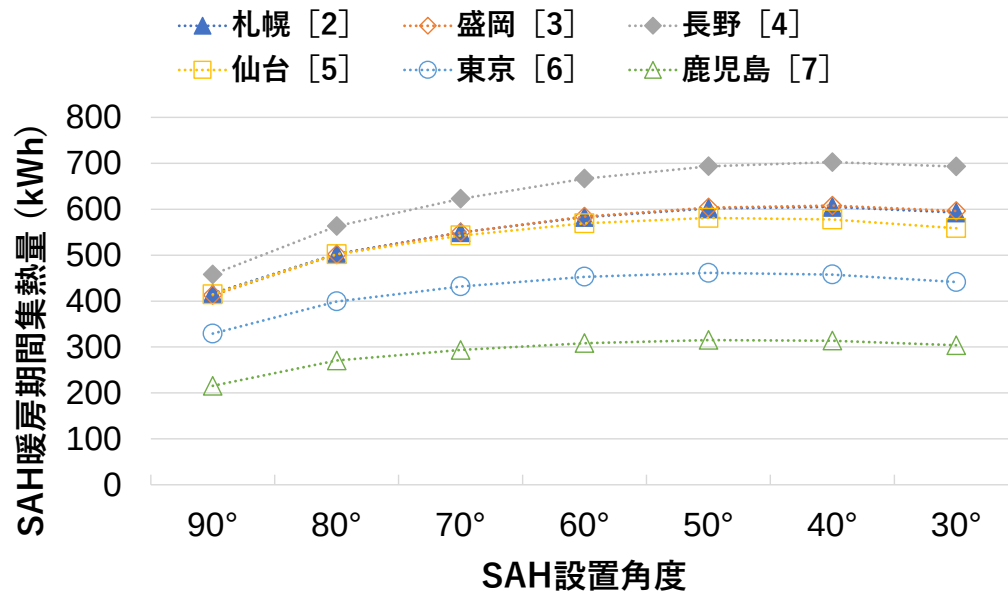


図 4.3 SAH の設置角度による集熱量比較

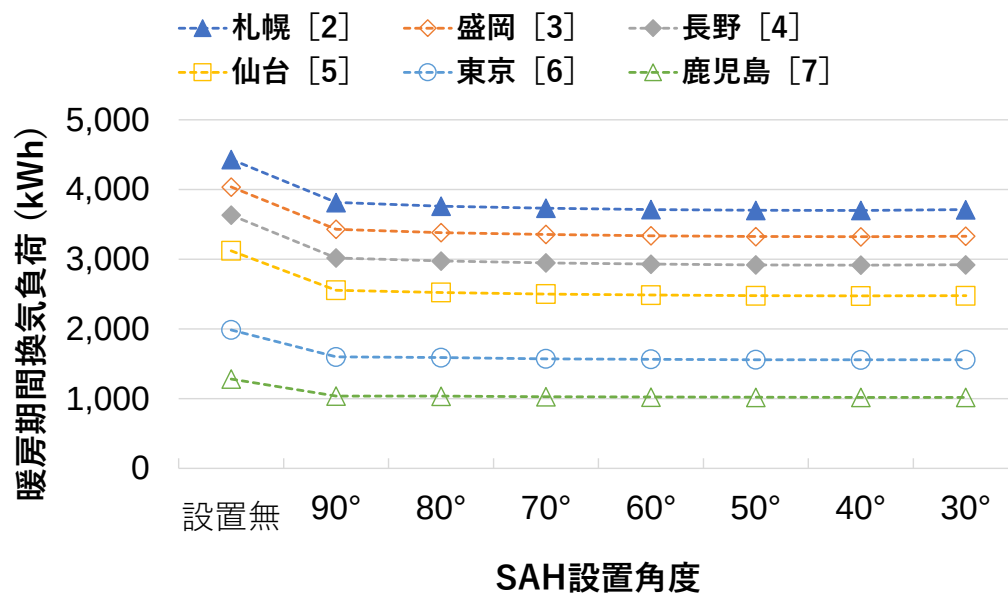


図 4.4 SAH の設置角度による換気負荷比較

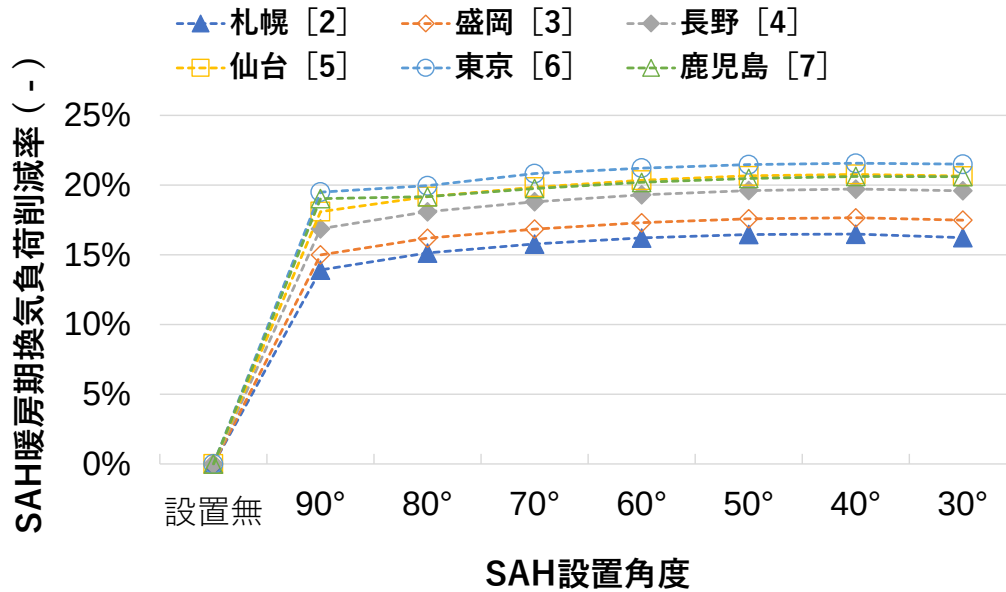


図 4.5 SAH による換気負荷削減率

4.4 検討結果

4.4.1 一次エネルギー消費量比較

1) 換気システム別一次エネルギー消費量

各換気システムの特徴を把握するために、6地域（東京）における、HPを用いた冷暖房の場合の月別一次エネルギー消費量について図 4.6，図 4.7，図 4.8に示す。SAHの設置は壁設置(90°)にて検討を行った。

PVSAHは、暖房期に空気搬送動力が発生しないため、大きな省エネルギーが可能となっている。また、SAHによって得られた集熱量は、換気負荷の削減となる。それを越えた分は、補助暖房効果分として省エネルギーに寄与するが、本研究では換気負荷のみで評価を行うため、補助暖房効果分はグラフ表示のみ行い、省エネルギー効果の計算には不算入とした。なお、換気負荷の削減分は、グラフにマイナス値で示した。PVSAHの年間一次消費エネルギー量は4.6GJ/年となり、一般的な第三種換気の6.6GJ/年と比べ大きく削減できている。

一方、熱交換換気は、暖房負荷が発生しない時期も年間を通して空気搬送動力を消費するため、換気負荷を大幅に上回るエネルギーを消費する。また、冬期の換気負荷の削減に対し、夏期の冷房時の換気負荷は相対的に少なく、省エネルギー効果は限定的である。その結果、熱交換換気の年間一次消費エネルギーは6.8GJ/年となり、第三種換気と

比較しても、0.2GJ/年の増エネルギーとなった。熱交換換気はPVSAHと比べ大幅に消費エネルギーが多くなる結果となった。

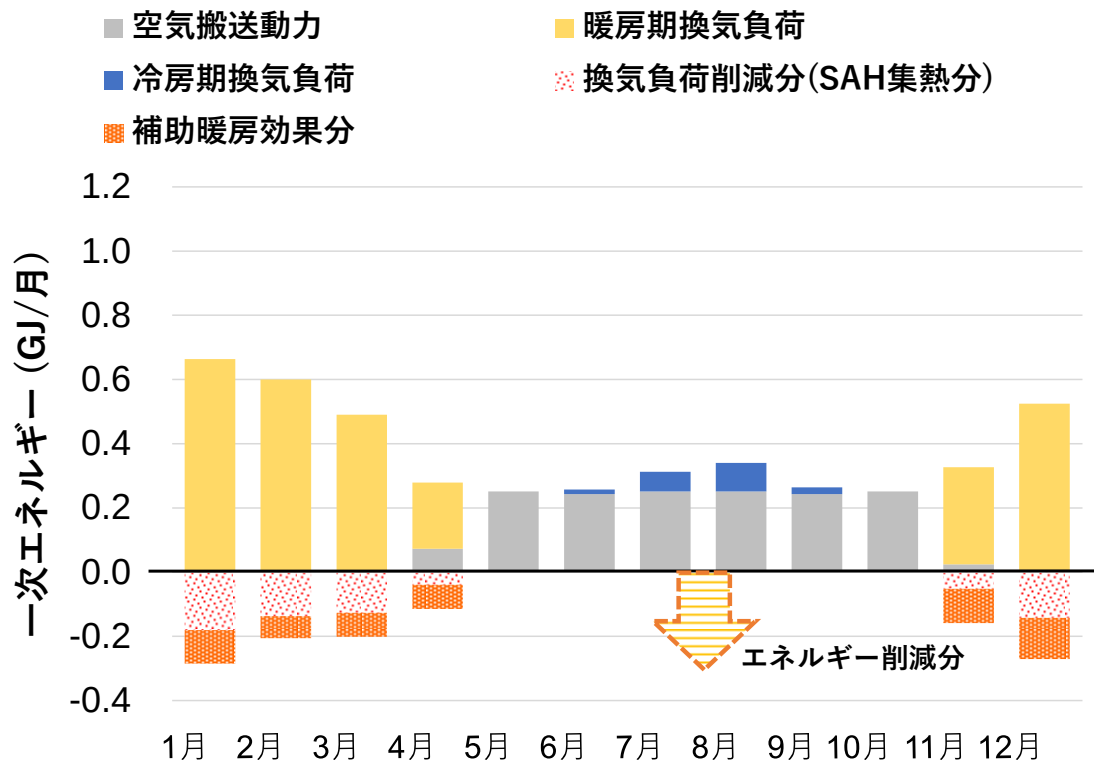


図 4.6 パッシブ換気システムにおける月別一次エネルギー消費量

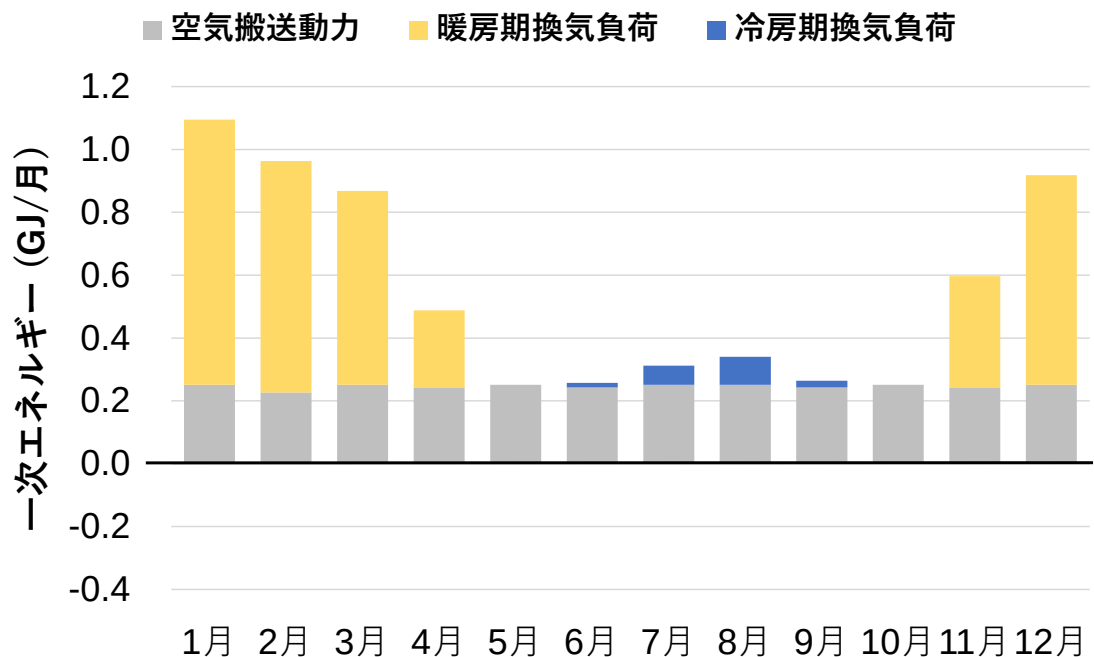


図 4.7 第三種換気システムにおける月別一次エネルギー消費量

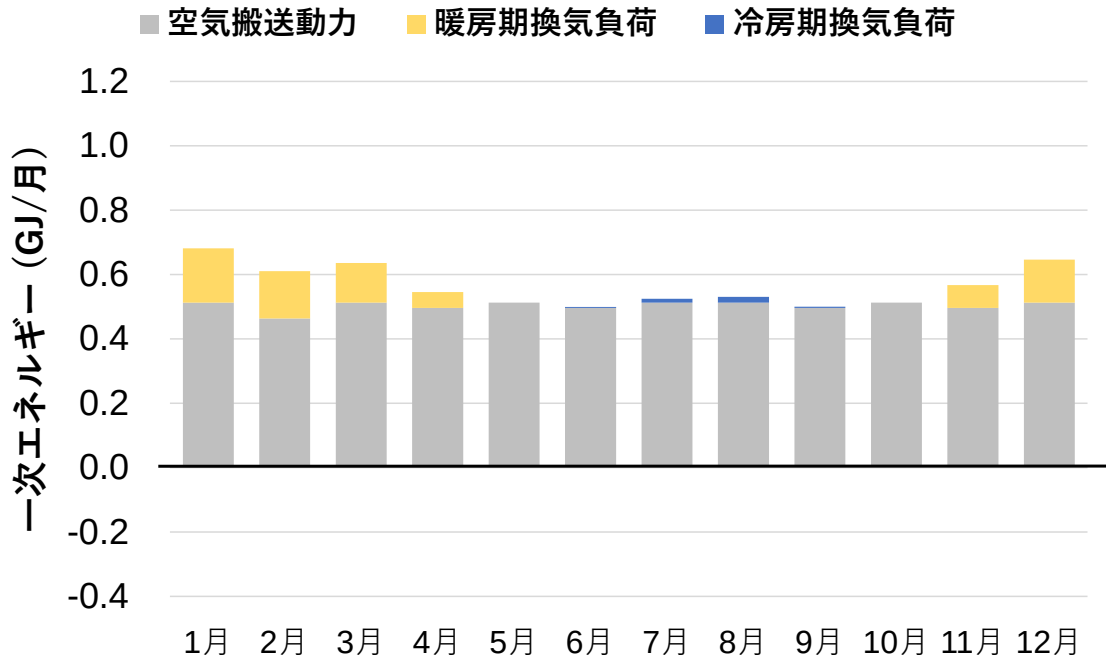


図 4.8 第一種熱交換換気システムにおける月別一次エネルギー消費量

2) 地域別一次エネルギー消費量比較

各換気システムの、一次エネルギー消費量評価を地域別に行った。HP冷暖房の場合を図 4.9、ガス暖房の場合を図 4.10に示す。HP暖房の場合、寒冷地である2地域~3地域では、熱交換換気が省エネルギー効果が最も高いシステムとなった。一方、4地域以南では、熱回収がないPVSAHでも、熱交換換気より優れた省エネルギー性能を示した。6地域~7地域においては、熱交換換気は、第三種換気と比較しても増エネルギーとなることが明らかになった。温暖地では、熱交換による熱の回収量が減少し、相対的に空気搬送動力エネルギーの割合が高くなるため、空気搬送動力の使用が少ないPVSAHや第三種換気が、省エネルギーとなる傾向が見られた。

一方、ガス暖房+HP冷房の場合、暖房のエネルギー効率が低く、暖房エネルギーの使用量が多いため、使用エネルギー全体に対する空気搬送動力の割合が下がる。そのため、熱回収装置を持つ熱交換換気が省エネルギーとなる。2地域~6地域では、熱交換換気が高い省エネルギー性能を示し、7地域で、PVSAHが熱交換換気より省エネルギーとなった。

しかし、PVSAHは、熱交換換気が省エネルギーな地域において第三種換気より優れた省エネルギー性能を示しており、熱交換換気で発生するデフロストの発生がなく、故障やメンテナンスリスクが少ない点を考慮すると熱交換換気以外に選択可能な省エネルギー換気システムである。さらに、ガス暖房の場合、今後、省エネルギー技術の進化や、HP暖房への交換などにより、暖房効率が向上する可能性もあるため、PVSAHの利用価値は将来的に高まる可能性が高い。

以上のことから、暖房エネルギー効率が高く、熱交換換気の省エネルギー効果が限定的な温暖地域では、特にPVSAHが高い省エネルギー性能を発揮することが明らかになった。

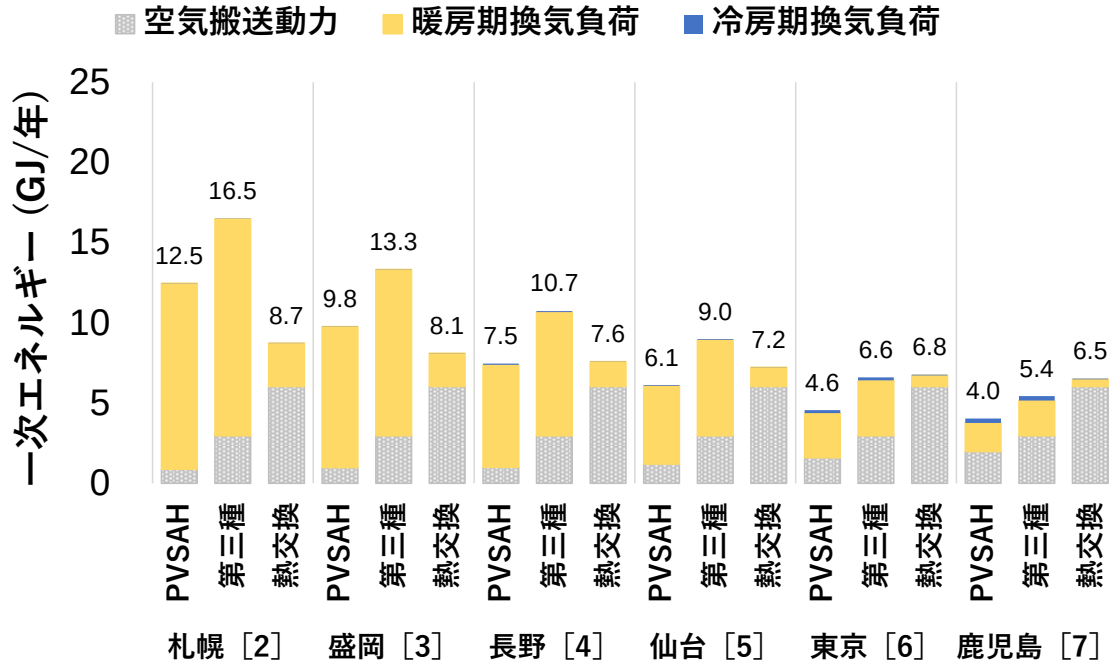


図 4.9 HP 暖房による換気システム別一次エネルギー消費量比較

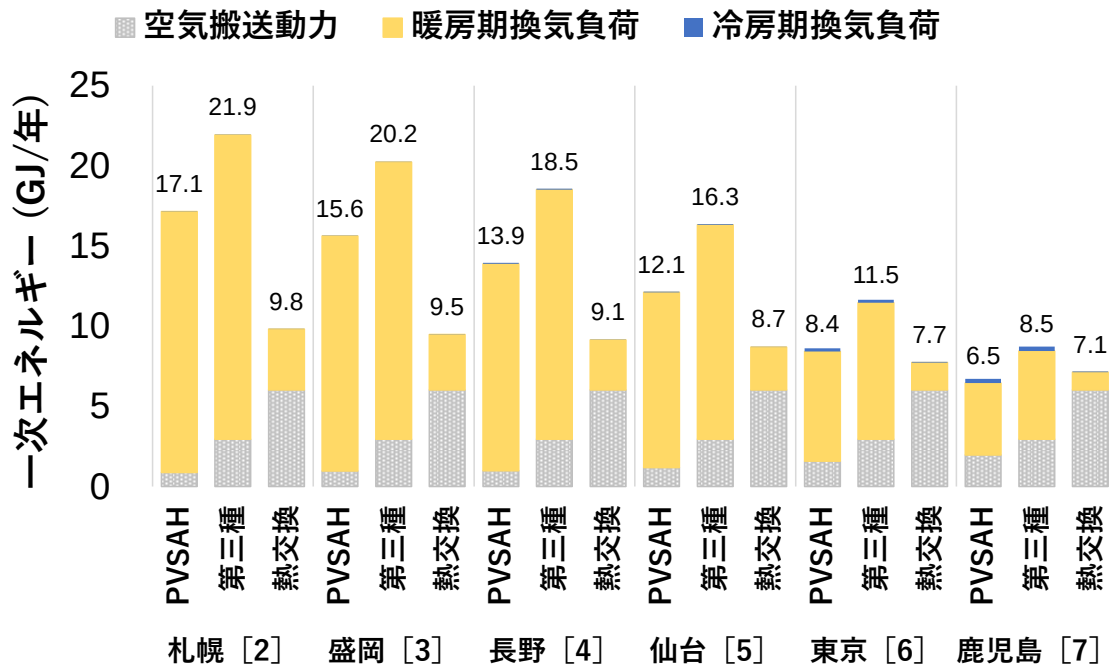


図 4.10 ガス暖房による換気システム別一次エネルギー消費量比較

4.4.2 地域別二酸化炭素排出量比較

地域別に、各換気システムの年間二酸化炭素排出量の比較を行った結果について、HP冷暖房を図4.11に、ガス暖房+HP冷房を図4.12に示す。二酸化炭素排出量の計算には、表4.4の係数を使用し、SAHの設置は、一次エネルギー消費量の評価と同様に、壁設置(90°)にて検討を行った。

HP冷暖房の場合、熱交換換気は、換気負荷が大きい寒冷地において二酸化炭素排出量を大きく削減できるが、換気負荷が小さい温暖地では、空気搬送動力が少ない換気システムの二酸化炭素排出量が少なくなった。暖房Degree-Day（以後暖房DD）2750で、PVSAHが熱交換換気と逆転し二酸化炭素排出量が少なくなり、暖房DD2750以南の地域では、PVSAHが最も二酸化炭素排出量が少なくなる。第三種換気でも、暖房DD1500を境に、熱交換換気を下回り二酸化炭素排出量が少なくなる。温暖な気候では、熱交換換気の二酸化炭素排出量削減効果が限定的であることが示されている。以下に二酸化炭素排出量が少ない順に取りまとめた。

- ・暖房DD 2750以上：熱交換換気<PVSAH<第三種換気
- ・暖房DD 1500~2750：PVSAH<熱交換換気<第三種換気
- ・暖房DD 1500以下：PVSAH<第三種換気<熱交換換気

また、将来的に再生可能エネルギーが普及し、二酸化炭素排出係数が減少することが考えられる。その場合、各換気システムによる二酸化炭素排出量の差は、レベルの向上に伴い縮小することが示されている。特に二酸化炭素排出係数が最も低いレベル3では、換気システムの差が最大になる2地域において、熱交換換気の二酸化炭素排出量が36kg/年に対し第三種換気が68kg/年と差が32kg/年に縮小し、換気システムによる二酸化炭素排出量の差が非常に少なくなる。このため、換気システムの選定には、イニシャルコストやメンテナンスを含むランニングコストといった省エネルギー性能以外の要素も重要となる。

ガス暖房+HP冷房の場合、暖房エネルギーに使用するガスの二酸化炭素排出量の割合が大きいため、暖房エネルギーの削減量が多い熱交換換気の二酸化炭素排出量が少なくなっていた。また、ガスの二酸化炭素排出係数が変化しないため、電力の二酸化炭素排出係数が変化しても、レベルによる二酸化炭素排出量の削減量の変化は少ない結果となった。

以上のことから、故障やメンテナンス負担が少なくシンプルなシステム構成であるPVSAHは、省エネルギー技術の進化や、ガス暖房からHP暖房への交換などにより、暖房効率が向上する可能性もあるため、長期的に使用することを考慮すると、メリットが高まる可能性が高い。

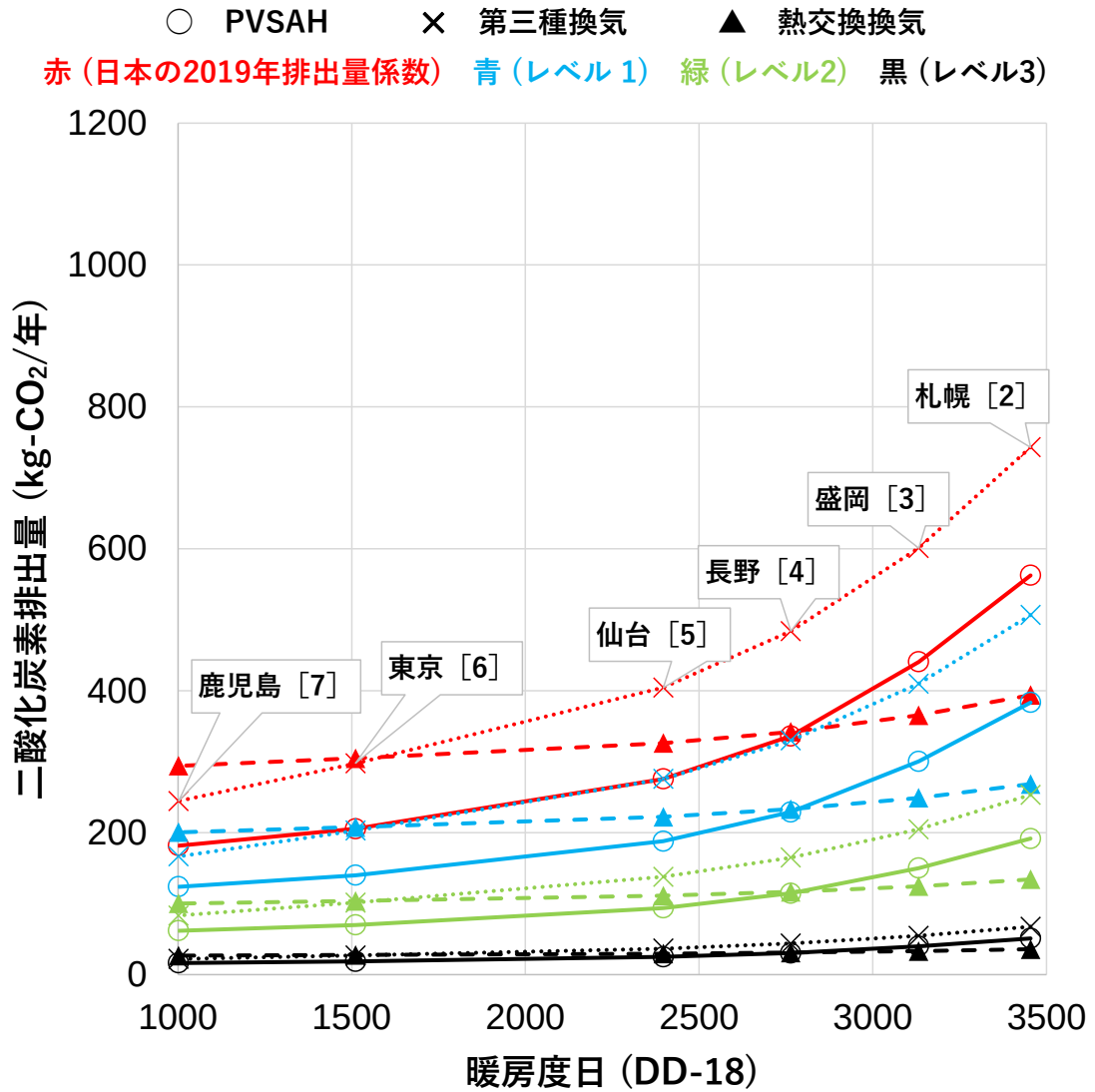


図 4.11 HP 暖房における二酸化炭素排出係数別年間二酸化炭素排出量比較

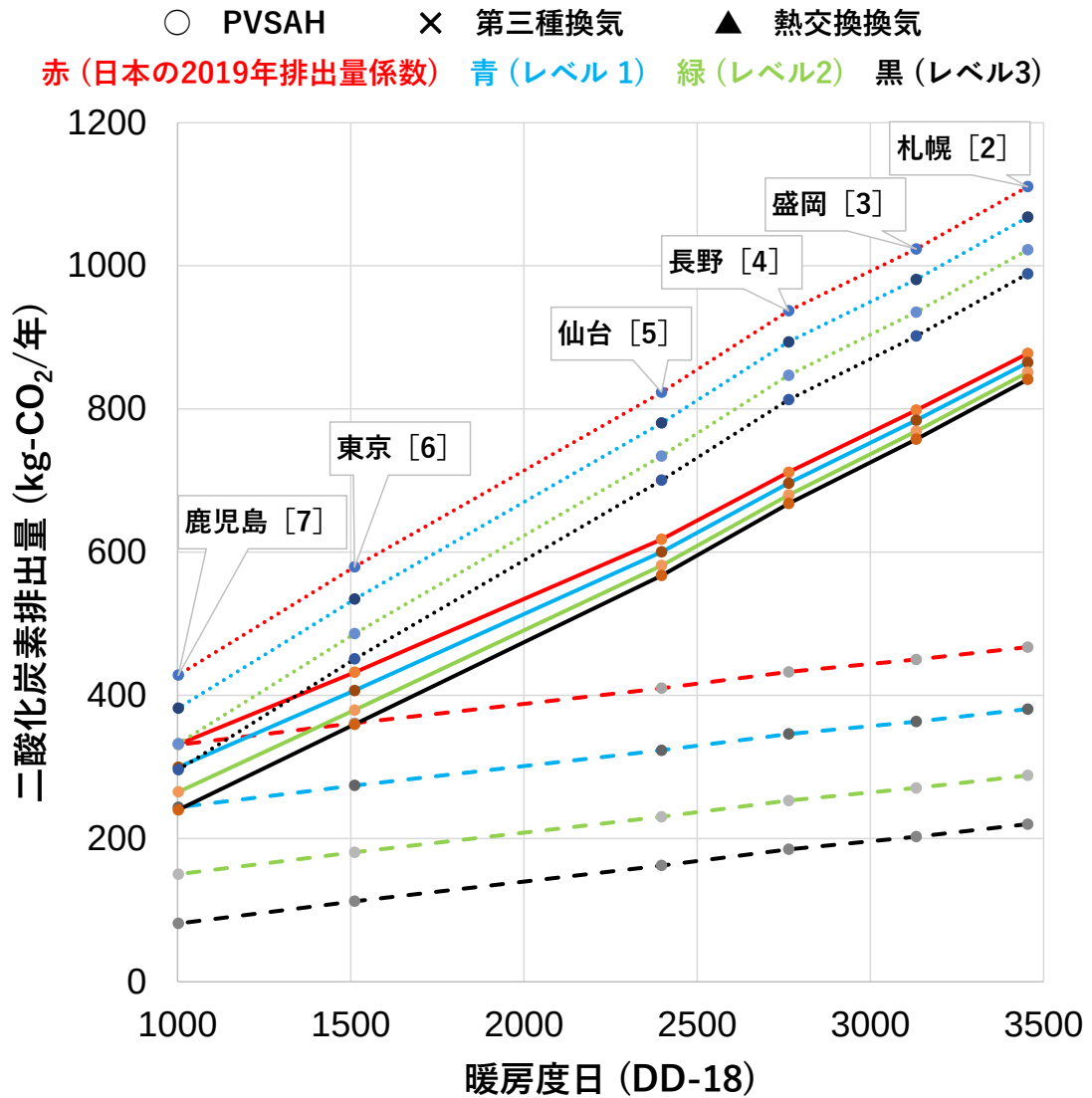


図 4.12 ガス暖房における二酸化炭素排出係数別年間二酸化炭素排出量比較

4.5 第4章のまとめ

換気に関わるエネルギー評価を行うに当たり、換気負荷だけではなく空気搬送動力も含めた評価を行った。開発した PVSAH と第三種換気、熱交換換気の省エネルギー性能の比較を行い、得られた知見を以下に示す。

- 1) 外気導入部に使用される SAH の設置角度は、積雪の影響や台風などの強風の影響、建物から突起することによる障害などを考慮し、壁面設置である(90°)が最も汎用性が高く十分効果も得られると判断した。
- 2) 換気システム別の月別一次エネルギー消費量評価を、HP 冷暖房の6地域(東京)で行った。PVSAH は暖房期に空気搬送動力が不要で、SAH による換気負荷の削減効果が得られることから、最も省エネルギーとなった。熱交換換気は、年間を通して大きな空気搬送動力が発生し、換気負荷の削減分はトレードオフされてしまうため、結果的に増エネルギーとなり、最も一次エネルギーを消費してしまう結果となった。
- 3) 地域別に一次エネルギー消費量評価を行った。暖房効率が高い HP 暖房の場合、熱交換換気は寒冷地である2地域~3地域では省エネルギーとなるが温暖地になると逆に増エネルギーとなった。PVSAH は4地域では熱交換換気と同レベル、5地域以南では最も高い省エネルギー性能を示した。また、6地域~7地域において熱交換換気は第三種換気に対しても増エネルギーとなった。また、暖房効率が低いガス暖房の場合、7地域で PVSAH が熱交換換気と同等となるが、それ以外の地域では熱交換換気が省エネルギーとなった。
- 4) 地域別に二酸化炭素排出量比較を行った。HP 冷暖房の場合、寒冷地では熱交換換気の二酸化炭素排出量が少なくなるが、温暖地では、空気搬送動力が少ない PVSAH の二酸化炭素排出量が少なくなった。二酸化炭素排出量が少ない順番で整理すると、「暖房 DD 1500 以下：PVSAH<第三種換気<熱交換換気、暖房 DD 1500~2750：PVSAH<熱交換換気<第三種換気、暖房 DD 2750 以上：熱交換換気<PVSAH<第三種換気」の順となった。ガス暖房+HP 冷房の場合、暖房エネルギーの削減量が大きい熱交換換気が最も二酸化炭素排出量が少なくなった。

寒冷地では熱交換換気、温暖地では PVSAH が省エネルギーとなるが、HP 冷暖房の場合、二酸化炭素排出係数が小さくなると換気方式の差が少なくなる。また、熱交換換気で発生するデフロストがなく、故障やメンテナンスリスクが少ない PVSAH は、熱交換換気以外に選択可能な省エネルギー換気システムである。さらに、省エネルギー技術の進化や暖房効率の上昇を考慮すると、PVSAH は、将来的に利用価値が高まる可能性があることが確認できた。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人建築研究所：建築物のエネルギー消費性能に関する技術情報.
<https://www.kenken.go.jp/becc/index.html> (参照 2024.05.07)
- 2) 吉野博, 村上周三, 赤林伸一, 倉渕隆, 加藤信介, 田辺新一, 池田耕一, 大澤元毅, 澤地孝男, 福島明, 足立真弓：先進諸国における住宅の必要換気量の基準に関する調査, 日本建築学会技術報告集, No.19, pp.189-192, 2004.06,
<https://doi.org/10.3130/aijt.10.189>
- 3) Matsunaga J, Kikuta K, Hirakawa H, Mizuno K, Tajima M, Hayashi M, Fukushima A, An Assessment of Heating Load Reduction by Solar Air Heater in a Residential Passive Ventilation System, *Energies*, 2021, 14, 7651. <https://doi.org/10.3390/en14227651>
- 4) 株式会社気象データシステム：拡張アメダス気象データ（標準年 EA 気象データ）2010 年度版, <https://metds.co.jp/product/ea/eadata/> (参照 2024.05.07)
- 5) 公益社団法人 空気調和・衛生工学会：SHASE-S112-2019, 冷暖房熱負荷簡易計算法.
- 6) 財団法人環境建築・省エネルギー機構：国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所監修, 「温暖地版自立循環型住宅への設計ガイドライン」, 2015.08,
- 7) International Energy Agency, Annual GHG emission factors for World countries from electricity and heat generation, Data and Statistics 2019).

第5章 ライフサイクルコストの試算と評価

5.1 はじめに

前章において、換気システムの一次エネルギー及び二酸化炭素排出量の比較を行った。しかし、一般の居住者にとって、換気システムの選択をする際に重要視する要素は「環境に優しい」といった理由よりも、実際に支払うコストであると考えられる。そこで本章では、このコストに焦点をあてた検討を行う。

換気システムは設備であり、定期的なメンテナンスが必要不可欠である。例えば、熱交換換気では、性能維持のためにフィルター清掃が必要であり、フィルターを使用しないシステムと比較してメンテナンスの頻度が高くなる。既往研究^{1),2),3)}のアンケート調査によれば、推奨される清掃頻度が守られていないことが指摘されており、居住者によるメンテナンスには多くの課題がある。また、井前ら⁴⁾の研究では、フィルターの清掃が適切に行われていない場合、実質的な換気が損なわれることが示されている。換気システムの停止は、短期的には気づかれにくく、すぐに健康被害が現れるわけではないが、Indoor Air – Silent Killer⁵⁾でも述べられている通り、正しい換気が行われなければ、知らず知らずのうちに健康を害する可能性が高まる。高性能な換気システムであっても、メンテナンス不足により換気機能が低下すると、その性能を発揮することができない。その点、フィルターを使用しない第三種換気やパッシブ換気は、メンテナンス負担の上で有利となる。また、高性能機器は機械部品が多いため、部品の寿命によりメンテナンス負担が増える傾向がある。このように、コスト以外にも検討すべき事項は多く存在する。そこで本章では、換気システム別にライフサイクルコストを試算し、比較検討を行い、PVSAHの有効性について評価を行う。

5.2 各換気システムのメンテナンスについて

居住者が行うメンテナンスについて、換気システム別に以下に取りまとめた。メンテナンス頻度については表 5.1 に取りまとめたものを示す。PVSAH のメンテナンス負担が大幅に少ないことが確認できる。

5.2.1 太陽熱利用型パッシブ換気システム

・SAH~給気口

SAH のファン及び太陽光発電パネルは、故障時に部品を交換。給気口にはフィルター類は使用していないため、日常のメンテナンスは不要。ただし、汚れは発生するため、必要に応じて適宜清掃を行う。

- ・ 空気循環用ガラリ及び通気壁

フィルターなど障害がないため、特別なメンテナンスは不要。

- ・ 排気口～煙突

内外温度差による浮力や風圧力を駆動力として使用するため、ファンなどの機械部品がなく、メンテナンスも不要。排気グリルは目詰まりを起こすことはないが、汚れは発生するため必要に応じて適宜清掃を行う。

- ・ 第三種換気システム（壁付）

暖房期間以外の、パッシブ換気の換気量が減少したときに、換気量を補うための換気システムであるため、最もシンプルな壁付式第三種換気システムを採用している。駆動部分であるファンの羽根の清掃や、故障時の交換などメンテナンスが必要となる。ただし、運転時間は暖房期間以外が中心で、通常の換気システムより運転時間が大幅に少ないため、ファンの寿命や汚れの頻度も低い。また、故障時は、壁体内に設置されているスリーブ管の中に挿入されているファンを、簡単に交換することが可能なシステムとなっている。

5.2.2 第三種換気システム

- ・ 給気口及び排気口

給気口のフィルターの定期的な清掃及び交換を行う。排気口は汚れが付着するため、適宜清掃を行う。

- ・ 換気システム本体

定期的なファンの羽根の清掃と故障時にはモーター交換が発生する。モーター交換ができない場合は換気システム本体の交換が必要となる。

※ファンの羽根の清掃の代わりに、フィルターで汚れを取る仕組みのシステムの場合、フィルター清掃での対応となる。フィルタータイプは、羽根の清掃タイプよりフィルターの目詰まりによる風量低下が起こりやすく、メンテナンス頻度も高くなる傾向がある。

5.2.3 第一種熱交換換気システム

- ・ 給気口及び排気口

給気口・排気口の汚れの付着に応じて、適宜清掃を行う。給気口・排気口にフィルターを使用するタイプの場合は、フィルターの定期的な清掃及び交換を行う。

・換気システム本体

熱交換素子の汚れを防ぐためにフィルターがあり、そのフィルターの清掃が3ヶ月に1回程度、フィルターの交換が1～2年に1回程度必要となる。また、熱交換素子も長期間使用すると、フィルターで取り切れない汚れが付着し、性能低下や排気の匂いの付着が発生するため、10年に1回程度の交換が必要となる。モーターの故障時にはファンの交換が発生するが、給気用と排気用と2台ファンの交換が必要となる。モーター交換ができない場合は、換気システム本体の交換が必要となる。また、様々な制御を行うためのセンサーが搭載されている場合、それらのメンテナンスも必要となる。

表 5.1 換気システム別メンテナンス頻度

頻度	PVSAH	第三種換気	熱交換換気
3ヶ月			本体フィルター清掃
1年		給気口フィルター清掃 ファン清掃	
2年	ファン清掃	給気口フィルター交換	本体フィルター交換
10年			熱交換素子交換
15年	壁付ファン交換 SAH ファン及び発電パ ネル交換	モーター交換	モーター交換
30年		換気システム本体交換	換気システム本体交換

5.2.4 換気システム本体交換の実態

換気システムは、耐用年数を超えるとさまざまな部品が故障し、修理交換が必要となる。このような費用はランニングコストとしてライフサイクルコストに計上される。部品が供給されている間は、部品交換で対応可能であるが、廃番や部品のストックが欠品となると、換気システム本体の交換が必要となる。換気システム本体の交換時に、点検口や作業スペースの問題で、本体だけを交換することができない場合、解体工事や復旧作業が発生するため大きな費用が発生する。第三種換気システムにおける実際の事例を通して以下にポイントをまとめた。

1) ファン交換工事

換気システムの交換において、現状の点検口をそのまま利用して本体を交換することが可能である場合、図 5.1 のように一職種による工事業業者での対応が可能である。本ケースは、天井点検口が 600 mm角で、かつ天井裏の懐が十分あり、手を入れての作業が可

能であった。しかし、天井点検口が小さい場合や交換する換気システム本体の大きさが大きくなる場合、また、作業スペースが確保できず天井裏でのダクト接続が難しい場合など、既存の点検口では交換工事が不可能な場合、図 5.2 のように、一部天井を解体して工事を行う必要がある。このケースは天井点検口が 450 mm 角しかなく、本体の取外しそのものが不可能であった。天井解体や復旧にあたり、大工工事やクロス工事など多数の工事が発生するため、15 万円以上の追加費用が発生する。

建物は長期にわたり使用することを想定しており、10 年以上が経過すると製造終了の機種が増えることが予想される。後継機種がない場合は、他のシステムを選定しなければならず、その場合、システム設計費用が更に追加費用として発生することにも留意しておくことが重要である。



(i) 故障換気システム本体（交換前）



(ii) 故障換気システム本体取外し



(iii) 取外し後



(iv) 交換換気システム本体取付け



(v) 交換換気システム本体取付け完了



(vi) 完成

図 5.1 換気システム本体交換工事（天井解体なし）



(i) 故障システム本体（交換前）



(ii) 天井解体&換気システム本体取外し後



(iii) 天井復旧&ファン交換完了

図 5.2 換気本体交換（天井解体あり）

2) ダクトについて

ダクトについて、換気風量が確保できており、目詰まりやダクトの変形などがなく、状態が良ければそのまま活用する。掃除機のホースをダクト内に挿入することで、簡易的に清掃することも可能である。しかし、小口径の場合やフレキシブルダクトの種類、使用状況によっては、目詰まりの発生などで再利用が難しい場合もある。その場合、天井を一部解体してダクトの交換工事が発生する。このようにならないように、極力ダクトが短くなるように計画を行い、耐久性の高いダクトを採用し、丁寧に確実な施工を行うことが重要である。以上のように新築時の換気システム計画時に、長期的な換気システムの維持を考え、検討を行っておくことは大変重要なポイントである。

5.3 計算条件とコスト試算

換気システムの導入を検討する際、一般的にはイニシャルコストとランニングコストの検討が行われているが、メンテナンスコストも含むライフサイクルコスト全体での検討はあまり行われていない。そこで、省エネルギー性に優れた熱交換換気と、メンテナンス負担が少ない第三種換気、および再生可能エネルギーを使用して換気負荷を低減するPVSAHの比較検討を行う。検討を行う換気システムとその性能は表4.1に、検討条件を表5.2に、検討する地域と冷暖房の条件は表4.2に示す。計算には自立循環型住宅への設計ガイドライン⁶⁾の省エネルギー効果の推計に使われている一般モデルを使用し、24時間連続暖房で断熱部位からの熱損失は計算に含めず、換気負荷のみで検討を行った。また、ライフサイクルコストの試算には、各換気システムのイニシャルコスト、ランニングコスト、メンテナンスコストについて表5.3に示した情報を使用した。この値の算出には「住宅用機械換気設備の計画と性能評価」⁷⁾をベースに、各換気システムメーカーのカタログや、実際に採用している建設会社及び施工会社のヒアリングを元に策定した。換気システムの換気負荷については、換気システム別にそれぞれ式(4-1)、式(4-4)、式(4-6)を使用して計算をおこなった。

表 5.2 検討条件

計算モデル	自立循環型住宅：一般モデル(木造軸組み工法) 延床面積：120.8 m ² 、室容積：289.92 m ³
気象データ	拡張アメダス気象データ（2010年版標準年）
電気	¥31/kWh ^(注1)
都市ガス	¥188.5/m ³ ^(注2)

表 5.3 各換気システムのライフサイクルコストと頻度について^(注3)

システム種類	項 目	交換頻度	費 用
パッシブ 換気システム	パッシブ換気システム部材	初期費用	¥350,000
	SAH		¥150,000
	換気システム取付費用		¥150,000
	第三種換気システム（壁付式）		¥100,000
	SAH ファン・太陽光発電パネル部材	15 年	¥30,000
	換気システム交換費用（材工）		¥100,000
第三種 換気システム	換気システム部材	初期費用	¥280,000
	換気システム取付費用		¥150,000
	給気口用フィルター代	2 年	¥ 5,000
	モーター交換	15 年	¥90,000
	モーター交換費用		¥40,000
	換気システム本体費用（リプレース用）	30 年	¥100,000
	交換工事費用		¥120,000
第一種熱交換 換気システム	換気システム部材	初期費用	¥500,000
	換気システム取付費用		¥300,000
	本体フィルター代	2 年	¥8,000
	熱交換素子	10 年	¥70,000
	モーター（2 台分）	15 年	¥180,000
	モーター交換費用		¥40,000
	換気システム本体費用（リプレース用）	30 年	¥190,000
	交換工事費用		¥120,000

5.4 検討結果

換気システム別に 50 年間のライフサイクルコストの推移について、HP 暖房方式の場合を図 5.3, 図 5.4, 図 5.5, 図 5.6, 図 5.7, 図 5.8 に、ガス暖房方式の場合を図 5.10, 図 5.11, 図 5.12, 図 5.13, 図 5.14, 図 5.15 のグラフに示す。また、地域別に 50 年間のライフサイクルコストを示したものを図 5.9, 図 5.16 に示す。

5.4.1 ヒートポンプ暖房方式の場合

イニシャルコストについては、PVSAH と熱交換換気はほぼ同等で、第三種換気が大幅に低コストとなっている。HP 暖房方式の場合、PVSAH は、全ての地域で最も低コストな換気システムとなった。PVSAH は、再生可能エネルギーの活用による省エネルギー効

果と、運用開始後の費用であるランニングコストとメンテナンスコストが、熱交換換気より非常に少ないことから、運用年数が増えるほど差が開き、2 地域（札幌）において50 年で60 万円程度低コストとなった。3 地域（盛岡）以南では換気負荷が減り、熱回収の効果が減少するため差が更に広がる結果となった。熱交換換気は、すべての地域においてイニシャルコスト及びメンテナンスコストや空気搬送エネルギーの増加分を換気負荷の減少分でまかないきれないため、最もコストがかかる換気システムとなり、7 地域においては第三種換気と比べ130 万円のコスト増となった。

第三種換気に対する PVSAH の総費用の逆転時期は、2 地域で 26 年、3~5 地域で 30 年、6 地域では 35 年、7 地域では 45 年であった。温暖地になるほど換気負荷が減少するため、イニシャルコストが安価な第三種換気に対して、総費用が逆転するのに時間がかかっていた。

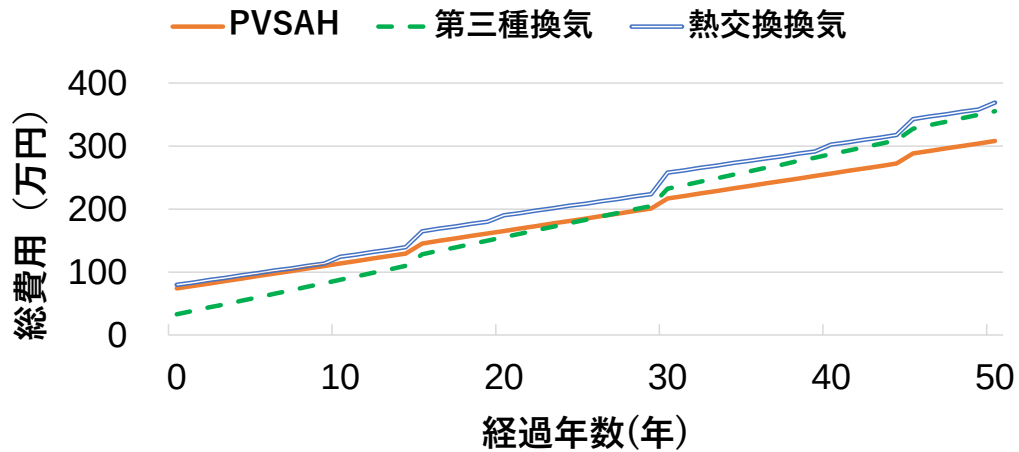


図 5.3 札幌 [2 地域] におけるライフサイクルコスト推移 (HP 暖房)

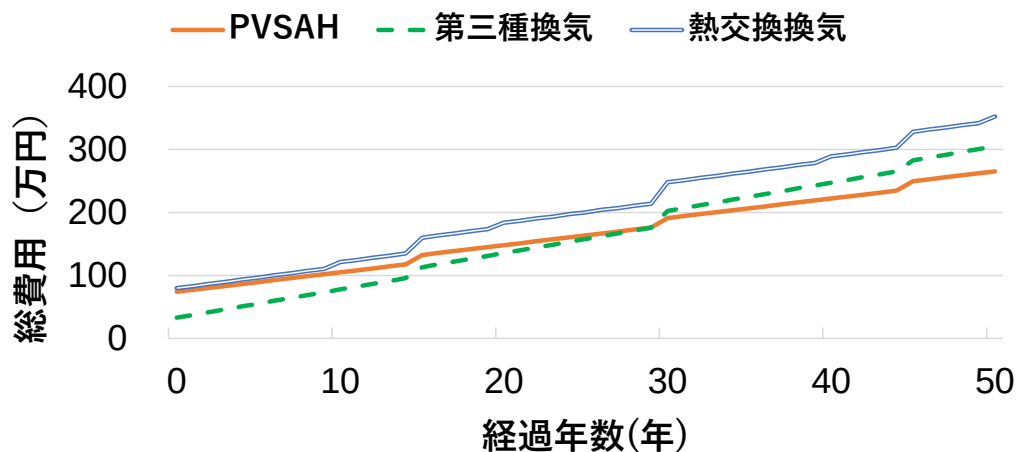


図 5.4 盛岡 [3 地域] におけるライフサイクルコスト推移 (HP 暖房)

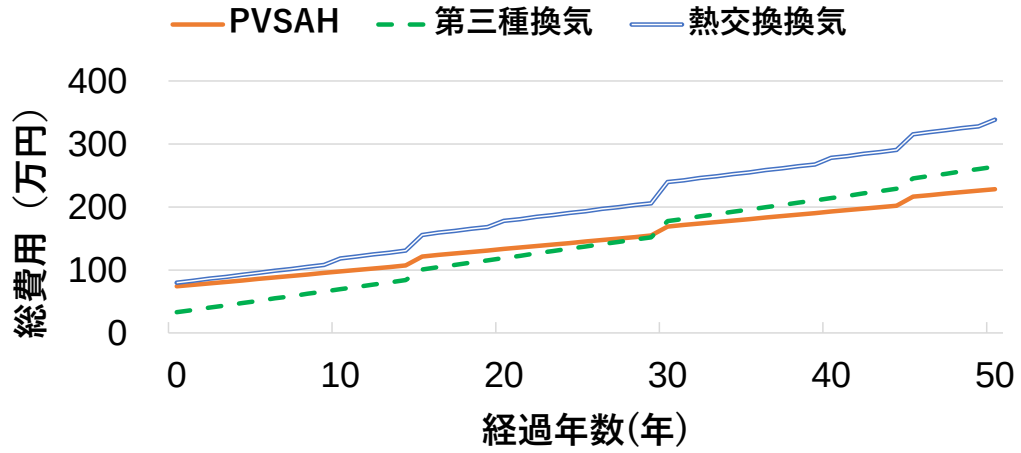


図 5.5 長野 [4 地域] におけるライフサイクルコスト推移 (HP 暖房)

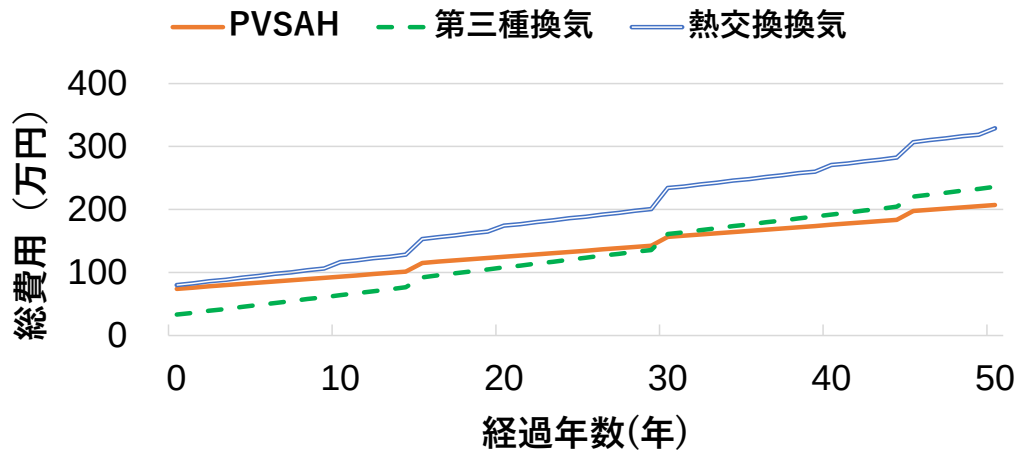


図 5.6 仙台 [5 地域] におけるライフサイクルコスト推移 (HP 暖房)

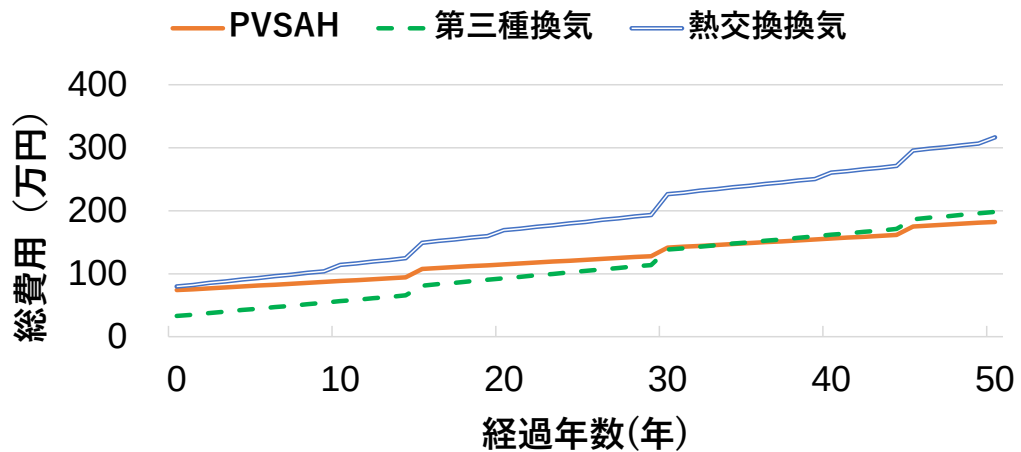


図 5.7 東京 [6 地域] におけるライフサイクルコスト推移 (HP 暖房)

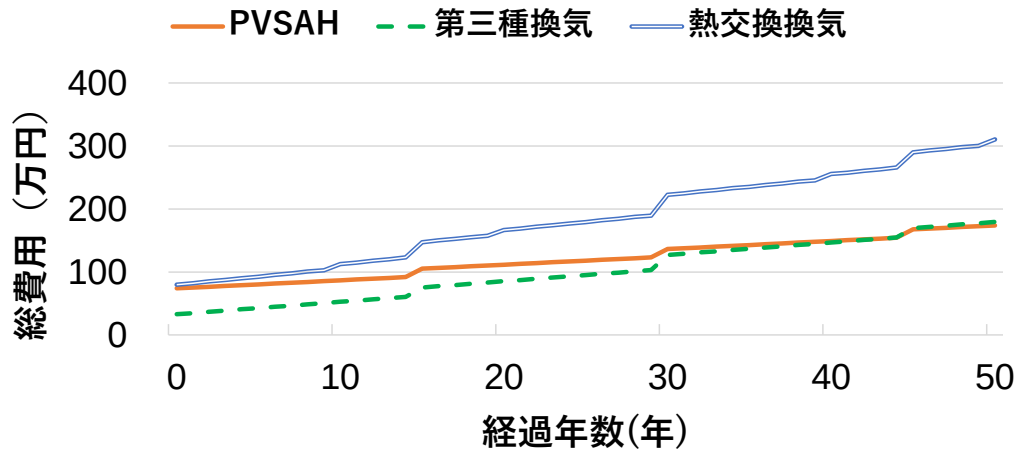


図 5.8 鹿児島 [7 地域] におけるライフサイクルコスト推移 (HP 暖房)

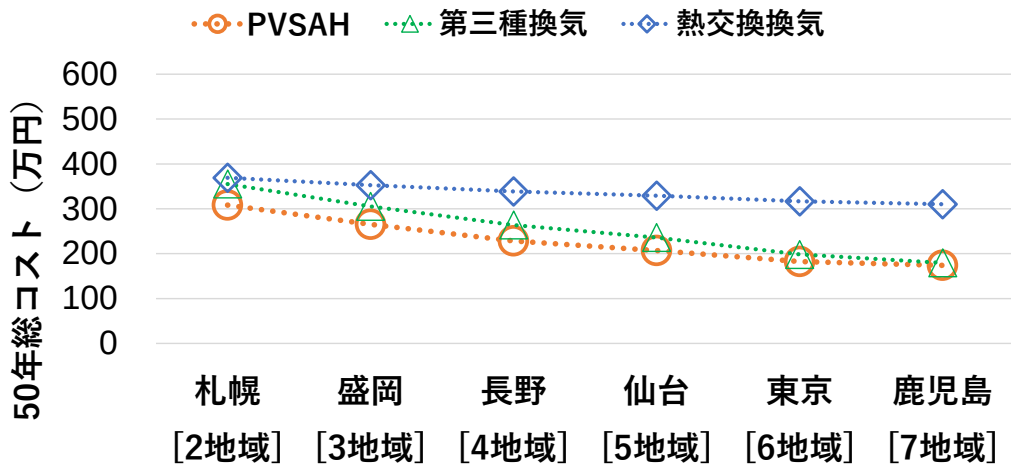


図 5.9 地域別ライフサイクルコスト比較 (HP 暖房)

5.4.2 ガス暖房方式の場合

ガス暖房の場合、二次エネルギー単価が高くエネルギー効率が HP 暖房より低いため、換気負荷が大きくランニングコストに影響を与える。その結果、相対的に熱回収の効果が高くなる 2 地域~3 地域において熱交換換気が最も低コストとなった。温暖地域になるほど熱交換換気の熱回収の効果が減少するため、4 地域では、ランニングコストと熱の回収効果がほぼ同等となるため、熱交換換気と PVSAH のライフサイクルコストも同程度となった。5 地域以南になると熱交換換気の熱回収量が減少するため、ランニングコストが大きくなり、年を追うごとに PVSAH との差が広がる結果となった。従って、4 地域以南では PVSAH が最も低コストとなり、6 地域~7 地域においては、熱交換換気は第三種換気に対しても高コストとなった。イニシャルコストが最も安価な第三種換気との総費用の逆転時期について、PVSAH の場合、2 地域~5 地域で 20 年強、6 地域~7 地域で 30 年強となる。熱交換換気の場合は 2 地域~3 地域で 15 年強、4 地域~5 地域で 25 年前後、

6 地域~7 地域では逆転しない結果となった。50 年間のライフサイクルコストで比較すると、2 地域で熱交換換気は第三種換気に対し 100 万以上低コストとなるが、7 地域では PVSAH に対し熱交換換気は 100 万円弱の高コストとなっていた。以上のことから、地域特性に合わせた換気システムの検討が重要なことがわかった。また、2 地域においても PVSAH は第三種換気に対して 70 万円低コストとなるので、メンテナンス負担を考慮した場合、熱交換換気以外の省エネルギー換気システムとして PVSAH の検討も有効な選択肢であると考えられる。

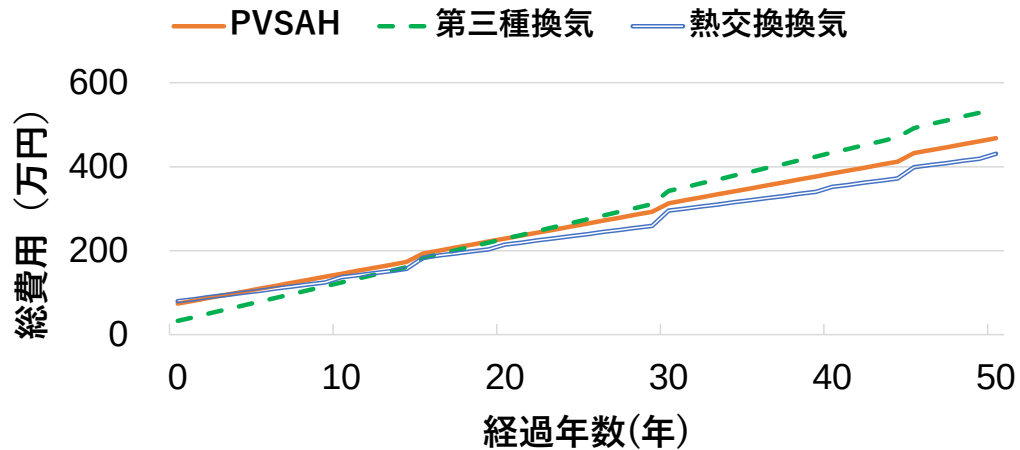


図 5.10 札幌 [2 地域] におけるライフサイクルコスト推移(ガス暖房)

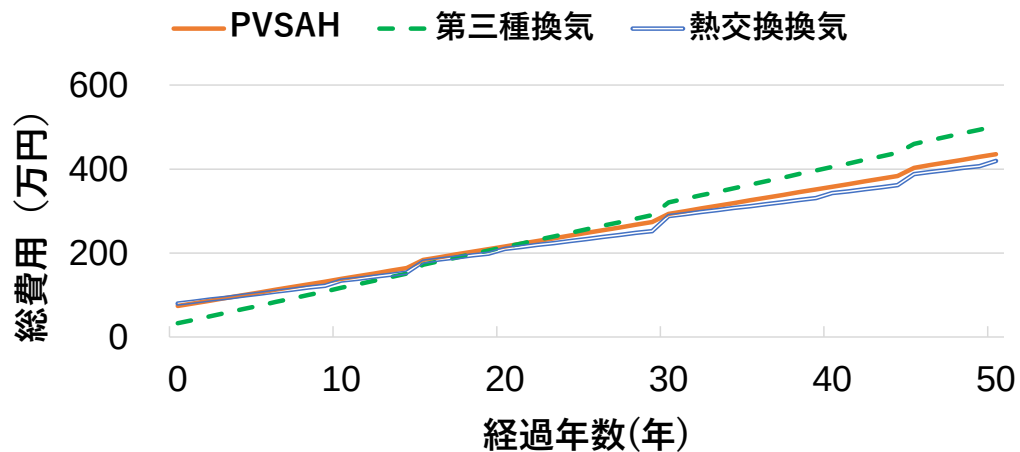


図 5.11 盛岡 [3 地域] におけるライフサイクルコスト推移 (ガス暖房)

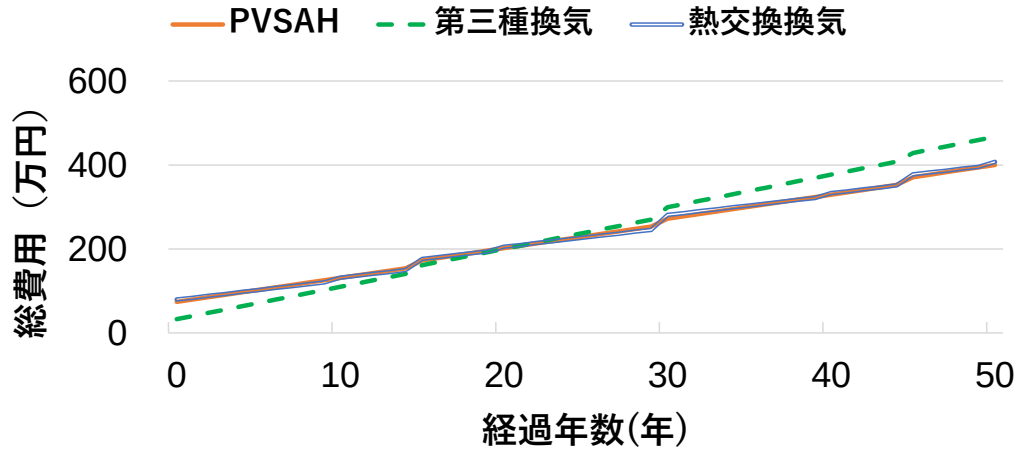


図 5.12 長野 [4 地域] におけるライフサイクルコスト推移 (ガス暖房)

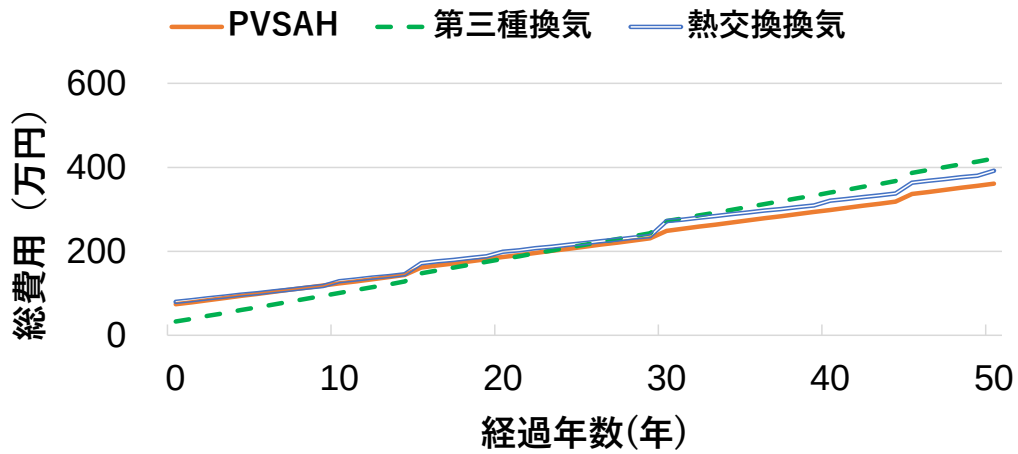


図 5.13 仙台 [5 地域] におけるライフサイクルコスト推移 (ガス暖房)

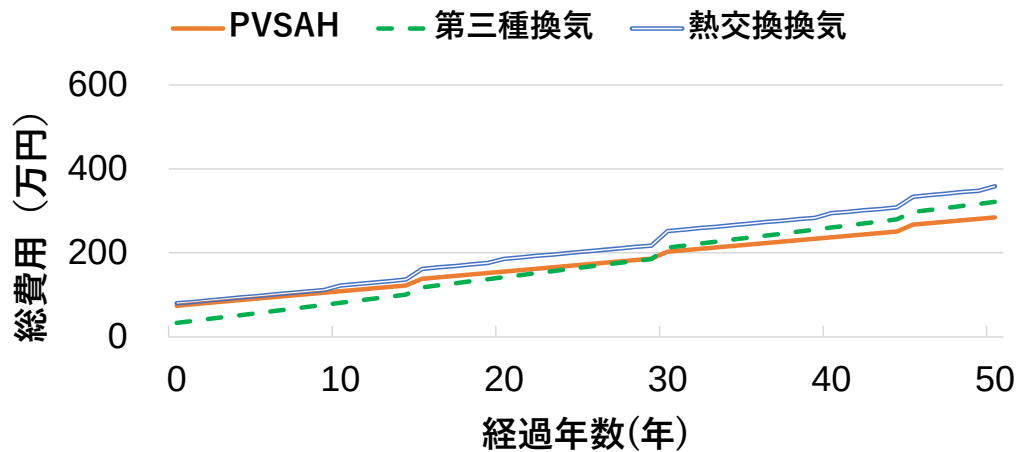


図 5.14 東京 [6 地域] におけるライフサイクルコスト推移 (ガス暖房)

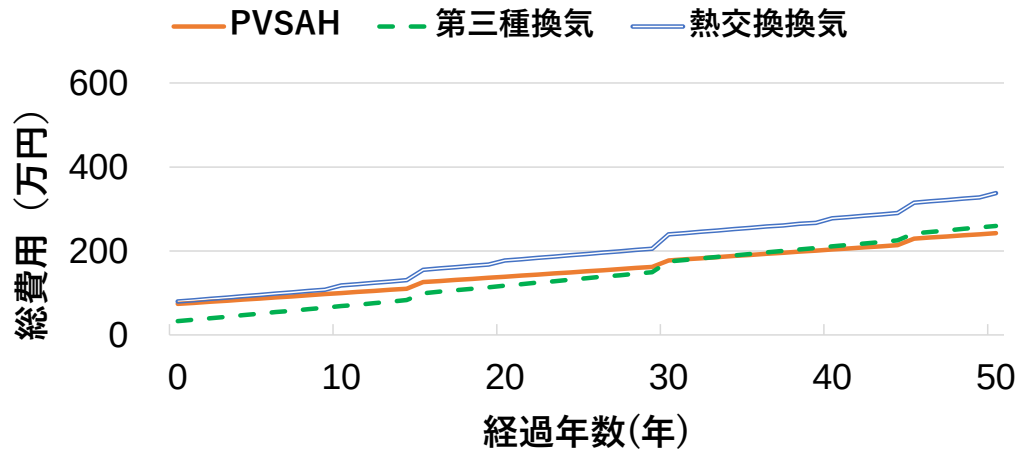


図 5.15 鹿児島 [7 地域] におけるライフサイクルコスト推移 (ガス暖房)

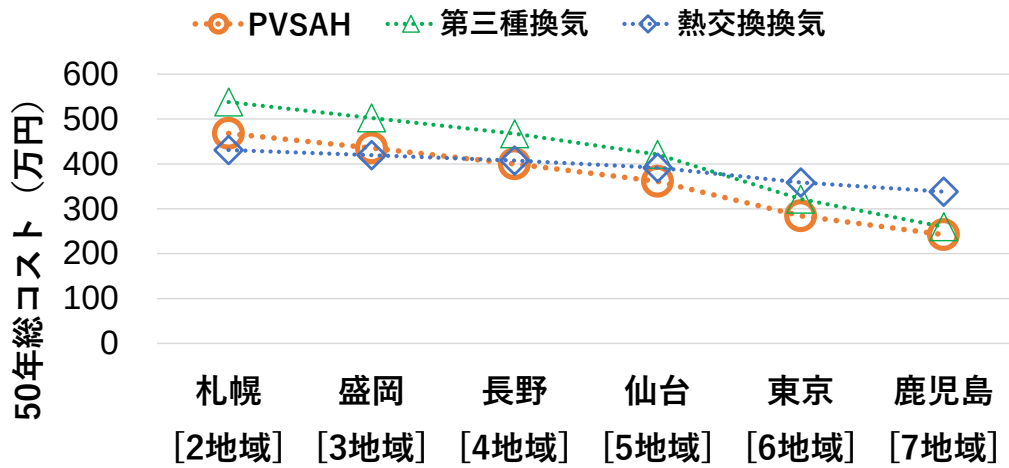


図 5.16 地域別ライフサイクルコスト比較 (ガス暖房)

5.4.3 ライフサイクルコスト内訳

次に、換気システム別のライフサイクルコスト内訳を図 5.17、図 5.18 に、ライフサイクルコスト割合を図 5.19、図 5.20 に示す。熱交換換気は、換気負荷の低減では有利であるが、メンテナンスコストと空気搬送動力が大きな割合を占め、結果的に全体のコストに大きな影響を与えている。特に温暖地においては、省コストに繋がりにくい。

HP 暖房の場合、2 地域で PVSAH の換気負荷が 60%、メンテナンスコストが 17%であるのに対し、熱交換換気の換気負荷が 19%、メンテナンスコストが 59%と、ほぼ逆転しており、メンテナンスコストが大きな割合を占めている。温暖地においては、7 地域では熱交換換気のメンテナンスコスト割合が 70%となり、換気負荷は 4%の割合となるため、熱回収のメリットがほとんど得られないことが示されている。

ガス暖房の場合、2 地域の換気負荷が PVSAH で 73%、熱交換換気が 31%であり、メンテナンスコスト割合は PVSAH で 11%、熱交換換気で 51%である。換気負荷の割合が大きく、また、エネルギーコストも高いことから熱回収のメリットが得られている。しかし、7 地域では、PVSAH の換気負荷が 41%、ランニングコストが 29%であるのに対し、熱交換換気の換気負荷がわずか 12%、メンテナンスコストが 64%と、やはりメンテナンスコストが占める割合が大きく、熱回収のメリットが減少してしまう。

これらの結果から、ガス暖房のように二次エネルギー単価が高い場合、換気負荷のコスト低減効果が大きいため、熱交換換気はメリットが得られやすい。一方、HP 暖房のように、二次エネルギー単価が安価でエネルギー効率が高い場合、PVSAH のようなランニングコストが安価な換気システムのメリットが大きくなる。いずれにしても、空気搬送動力とメンテナンスコストの改善が重要であることが示唆されている。

また、メンテナンスの容易さとメンテナンス不足による換気不良リスクまで考慮すると、居住者の特性によっては、PVSAH はすべての地域において、有効な換気システムである。

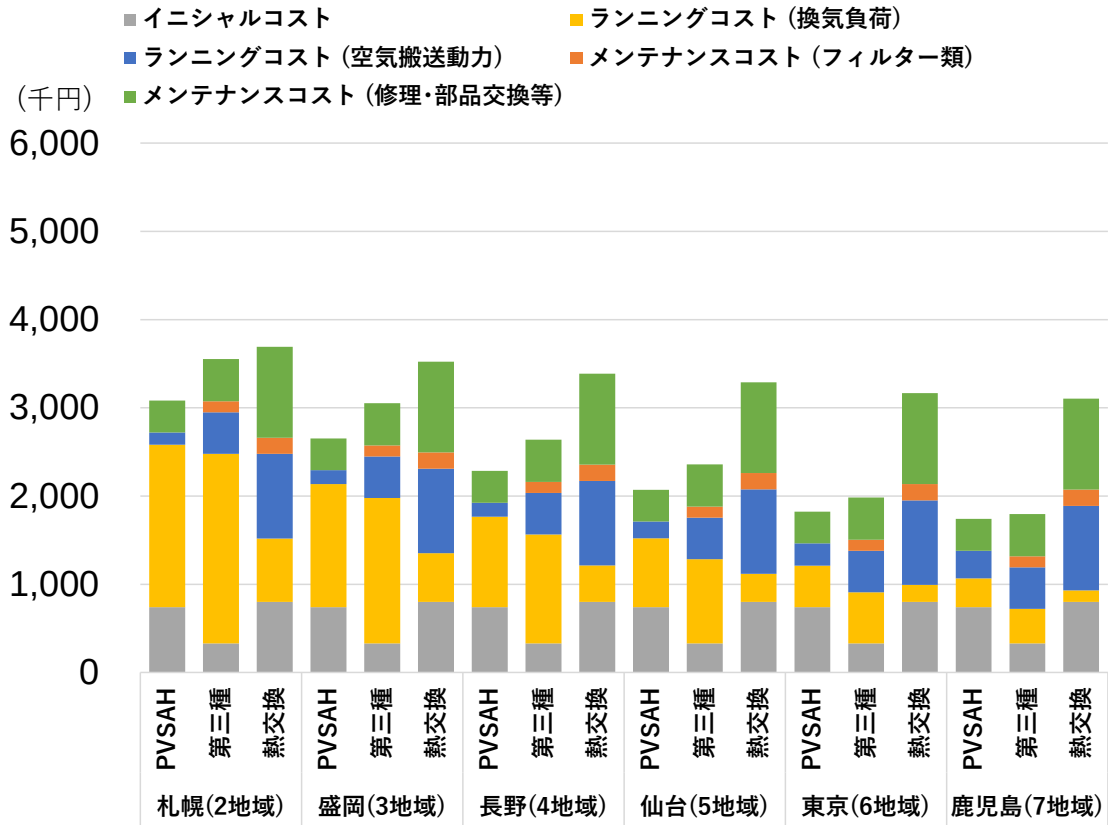


図 5.17 換気システム別ライフサイクルコスト内訳 (HP 暖房)

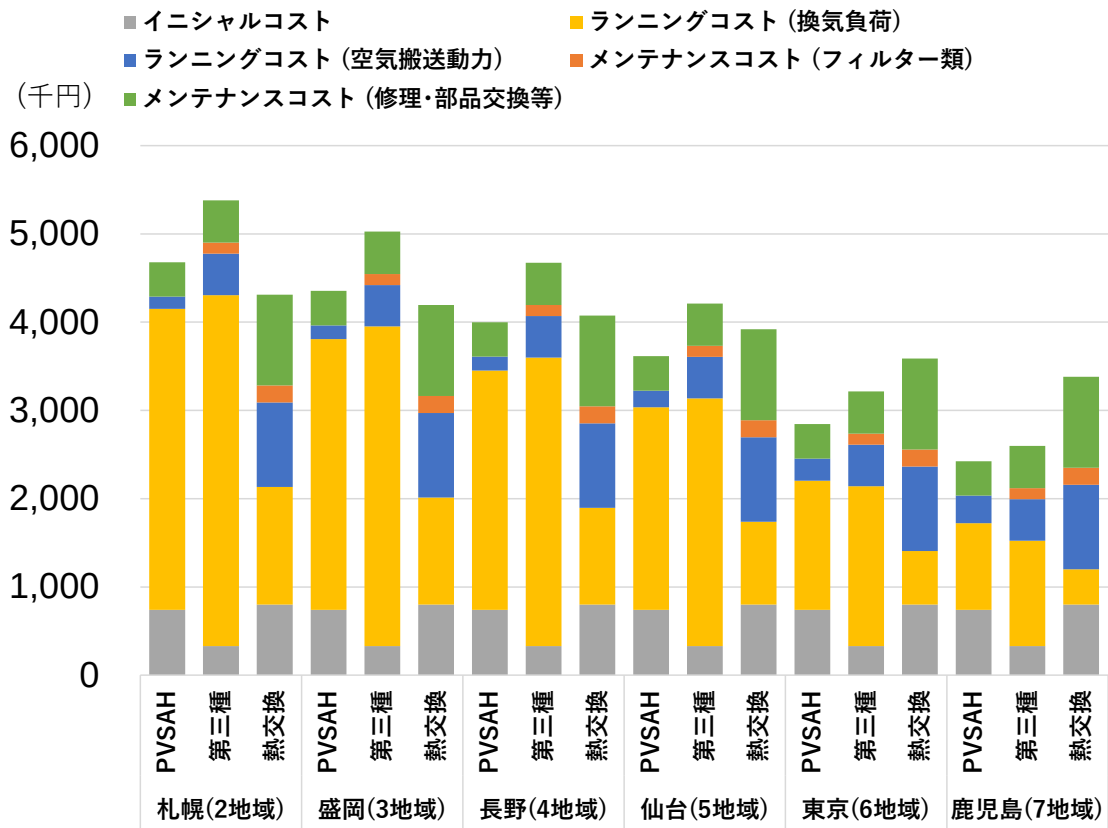


図 5.18 換気システム別ライフサイクルコスト内訳(ガス暖房)

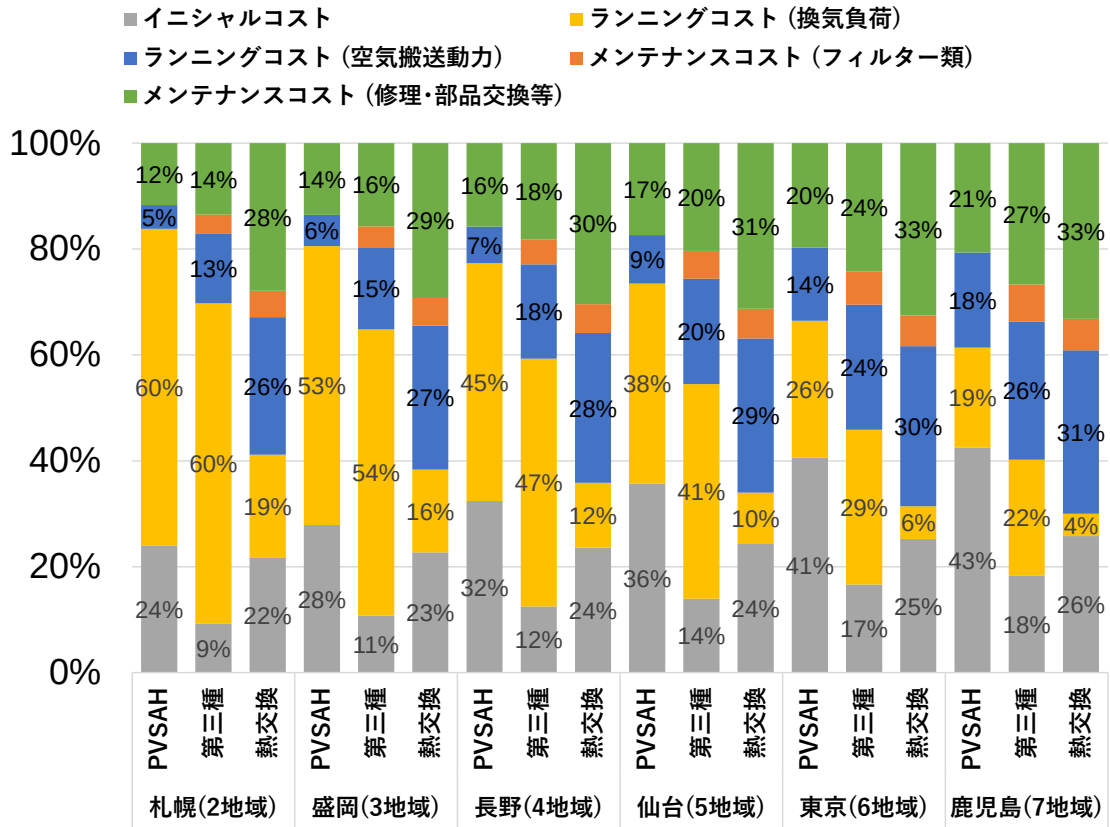


図 5.19 換気システム別ライフサイクルコスト割合 (HP 暖房)

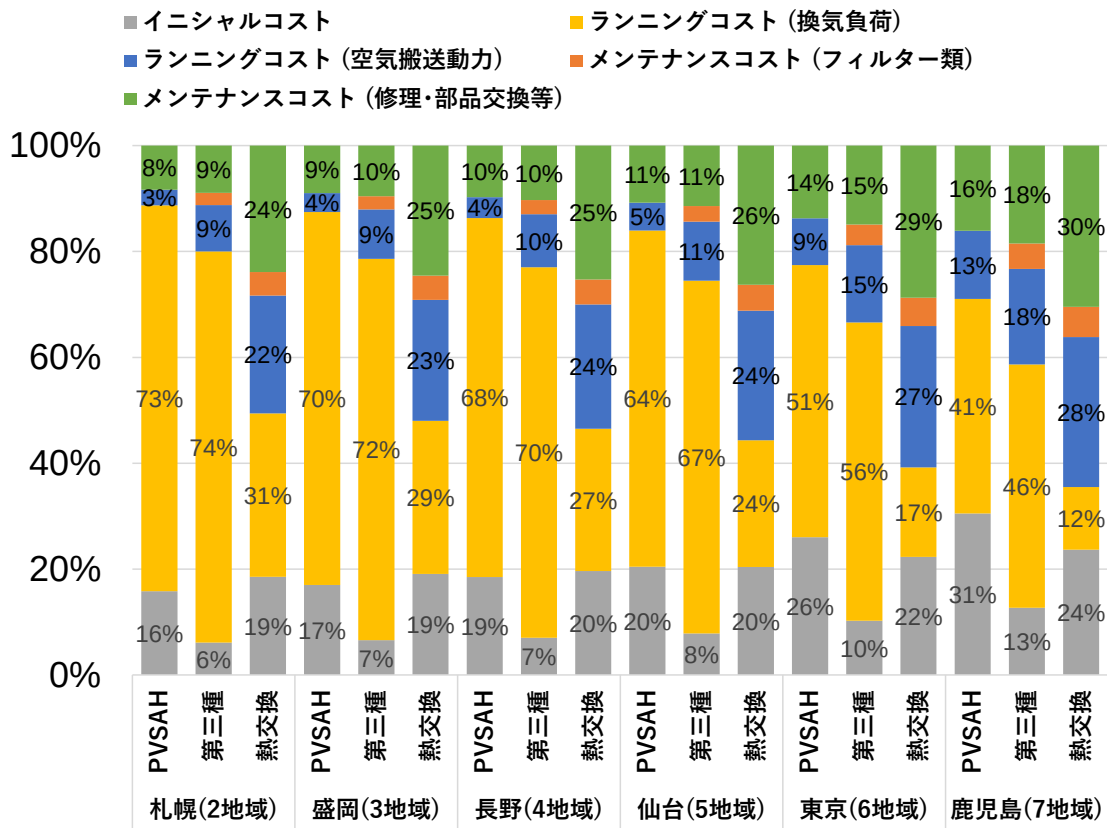


図 5.20 換気システム別ライフサイクルコスト割合 (ガス暖房)

5.5 第5章のまとめ

換気システムの選択において、居住者の関心が高い実際にかかるライフサイクルコストについて、運用エネルギー以外のイニシャルコストやメンテナンスコストまで含めた50年間の試算を行い、各換気システムの評価を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 二次エネルギー単価が安価でエネルギー効率の高い HP 暖房の場合では、少ないエネルギーで換気負荷を賄えるため、熱回収のために使用する空気搬送コストやメンテナンスコストが大きな割合を占める熱交換換気がすべての地域で高コストとなり、PVSAH は全ての地域で最も低コストな換気システムとなった。PVSAH と熱交換換気のイニシャルコストは、ほぼ同レベルであるが、2 地域において 50 年間で 60 万円程度の差が開いたのは、熱回収のメリットより再生可能エネルギーによる省エネルギー効果とメンテナンスコストの少なさが大きく寄与していた。
- 2) 二次エネルギー単価が高価で、エネルギー効率が悪いガス暖房の場合では、熱回収の効果が高くなる。その結果、寒冷地である 2~3 地域では熱交換換気が最も低コストとなるが、換気負荷が小さくなる 4 地域以南では PVSAH が低コスト、6~7 地域では空気搬送動力やメンテナンスコストの割合が上昇するため熱交換換気が最も高コストとなった。地域特性や居住者の意識なども加味して、検討を行うことが重要となる。
- 3) ライフサイクルコストについて分析を行った結果、熱交換換気は、メンテナンスコストと空気搬送動力が大きな割合を占める。従って、熱交換換気は、この2つのコストを改善することが重要である。一方、PVSAH は、空気搬送動力とメンテナンスコストが非常に少なく、かつメンテナンス負担が少ないことから、すべての地域において、有効な換気システムである。

以上のことから、ライフサイクルコストの妥当性及び居住者のメンテナンスの実行性を総合的に判断した結果、PVSAH が有用であることを明らかにした。

注

- 注1) 公益社団法人全国家庭電気製品公正取引協議会が制定している 2023 年 11 月時点の電気料金の目安単価, <https://www.eftc.or.jp>
- 注2) 新電力ネット 2023 年の全国のガス料金単価を平均して算出,
https://pps-net.org/gas_unit
- 注3) 換気システムメーカー：パナソニックエコシステムズ(株)、三菱電機(株)、日本ステイバー(株)、日本住環境(株)、ケイ・マック(株)のカタログ及び、施工会社：ミツヤジーホーム(株)、(株)テンプラス、平野商事(株)、三浦真オフィスなどからのヒアリングの上算出した。

参考文献

- 1) 松下和彦, 山田裕巳：換気システムの汚染に関する調査 その 1 換気システムのお手入れに関する居住者意識と行動の調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.1035-1036, 2005.09,
- 2) 萬羽郁子, 東実千代, 阿部弘明, 池田浩己：関西の戸建て住宅における 24 時間機械換気の意識とメンテナンスの実態調査 その 2 居住者アンケートの結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.1303-1304, 2012.09,
- 3) 高木理恵, 吉野博, 藤川光利, 和田浩行：住宅 25 戸における機械換気システムの給排気口の風量とメンテナンスに関する調査, 日本建築学会東北支部研究報告集, 第 70 号, pp.57-61, 2007.06,
- 4) 井前貴正, 峰野悟, 瀬戸裕直, 田島昌樹, 澤地孝男, 津田学志：実験集合住宅における全館換気の清掃と消費電力に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp.1307-1308, 2008.09,
- 5) Eurovent, Indoor Air – Silent Killer, 2004, https://www.iaqmatters.org/wp-content/uploads/2022/03/svensk_ventilation_2004.pdf (2024.05.01 参照)
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所監修：温暖地版 自立循環型住宅への設計ガイドライン, 一般財団法人環境建築・省エネルギー機構, 2015.08,
- 7) 澤地孝男, 田島昌樹ら：住宅用機械換気設備の計画と性能評価, 一般財団法人環境建築・省エネルギー機構, 2016.09,

第6章 総括

6.1 本研究のまとめ

本研究では、再生可能エネルギーの活用として、外部電源を必要としない自立型として開発された壁付の SAH を、メンテナンス負担が少なく、メンテナンス不足による動作不良を起こらないパッシブ換気に組み合わせ、給気を予熱し換気負荷を低減させる事を目的とした「太陽熱利用型パッシブ換気システム」の開発を行った。

以下に各章の要点をまとめる。

第 1 章「序論」では、研究の背景と目的を述べ、関連する既往研究について概説し、本研究の位置付けを示した。

第 2 章「壁付太陽熱集熱パネルの定量的評価」では、再生可能エネルギーの利用が可能となる太陽熱集熱パネルの基本性能を実験的に明らかにし、それに基づく集熱量予測シミュレーションを構築した。また、一般的に入手可能な全天日射量を用いて全国各地の集熱量予測ができるように、日射の直散分離に関する簡易手法を構築した。その上で、実建物に太陽熱集熱パネルを実装し評価を行い、集熱量予測が可能であることを示した。

第 3 章「太陽熱利用型パッシブ換気システムの性能評価」では、内外温度差によって生じる浮力と風圧力を駆動力とし、空気搬送動力の削減効果とメンテナンス負担の軽減効果が期待できるパッシブ換気システムを活用し、外気導入部分に壁付太陽熱集熱パネルを組み合わせた「太陽熱利用型パッシブ換気システム」を提案した。本システムは、給気を予熱し換気負荷を低減させることを目的としたシステムとなっている。実建物へ実装し評価を行い、集熱量と換気負荷の低減効果に加えて、集熱量予測シミュレーションが有効であることを示した。

第 4 章「一次エネルギー及び二酸化炭素排出量評価」では、一般的に広く普及している第三種換気システムと、換気負荷を減らすために近年採用が増えている第一種熱交換換気システムを比較対象とし、本システムの省エネルギー性能の評価を行った。第一種熱交換換気システムは換気負荷を低減させるメリットがある一方、デメリットとして熱交換器の空気抵抗の増加と、給気と排気をそれぞれファンで空気を搬送する必要があるため、空気搬送動力が増加する。従って、換気に関わる省エネルギー性能の評価は、換気分の冷暖房負荷だけでなく空気搬送動力も含めて行った。その際、太陽熱集熱パネルの設置角度について地域別に検討し、その効果と実用性の面からすべての地域において鉛直である壁面設置が有効であると判断した。それらを前提条件とし、換気システム別に一次エネルギー及び二酸化炭素排出量を比較した。さらに、2050 年の脱炭素社会を目指す上で、将来的に二酸化炭素排出係数が削減されていくことを踏まえ、排出係数が変化した場合の評価を行い、地域特性に合わせたシステムを提案した。

第 5 章「ライフサイクルコストの試算と評価」では、実際に居住者が採用するシステムの検討を行う上で、省エネルギー性能の評価と同時に、実際にかかるコストがシステム選定に与える影響が大きい。また、運用エネルギー以外のメンテナンスについても費

用がかかることから、それらを含めたライフサイクルコストの評価が重要である。そこで、市場調査に基づいて実際のコストを試算し、各システムにおける 50 年間のライフサイクルコストの評価を行った。二次エネルギー単価が高いガス暖房の場合、熱回収の効果が大きくなるため、第一種熱交換換気システムが有利となった。それに対し、二次エネルギー単価が安価で高効率なヒートポンプ暖房の場合や換気負荷が少ない地域では、メンテナンスコストと空気搬送動力の増加分で熱回収メリットを上回る費用が発生する。そのため、ライフサイクルコストの妥当性及び居住者のメンテナンスの実行性を総合的に判断した結果、本システムが有用であることを明らかにした。

第 6 章「総括」では、本論文で得られた知見を総括し、今後の課題や展望について述べた。

6.2 今後の課題と展望

6.2.1 課題について

1) 積雪の影響

本研究では、PVSAH そのもののメンテナンスについて、負担が少ないと提案した。しかし、システム本体以外の要因であるが積雪寒冷地における雪の影響によってメンテナンスが発生する可能性がある。SAH パネル前面の積雪や屋根からの落雪などにより日照が遮られてしまった場合、メンテナンスとして適切に除雪を行う必要がある。このようにならないように、SAH の設置位置を少し高いところに計画し、無落雪屋根の選択や屋根の流れ方向の検討により落雪をコントロールするなど、建築的に工夫をした設計を行うことが重要である。

2) 影の影響

都市部の住宅密集地では、隣棟間隔が狭く 1 階の南面外壁に日照が十分得られないケースも少なくない。その場合、SAH の設置を 2 階外壁や庇の一部として高い位置への設置を検討することも必要となる。その場合、温かい空気を床下へ送る必要があるため、ダクトスペースの確保や追加のブースターファン（太陽光発電パネルも別途追加設置）の使用が必要となる。また、1 階天井裏（2 階床下）のスペースをチャンバーとして活用し直接吹き出すことで、ダクトスペースや追加ファンの使用が不要な仕組みの検討も、今後の課題として必要である。

3) デザイン的な課題

本システムは南面の外壁に SAH を設置するが、建物との一体感が損なわれるため、意匠的に工夫をすることも重要である。例えば、建築的に屋根に収める手法図 6.1 や壁に収める手法図 6.2 も考えられる。またこの場合、化粧として太陽光が透過するカバーとして使用するポリカーボネートやサッシが、SAH に入る空気を事前に温める新たな給気予熱空間を作ることになるため、更に昇温効果を高めることが可能となる。新築住宅において、外観の意匠も重要な要素であり、今後も様々な工夫と提案を行っていく予定である。



図 6.1 屋根に収めた事例（ポリカーボネートと一体化、北海道南幌町）



図 6.2 壁に収めた事例（サッシと一体化、北海道十勝清水町）

6.2.2 展望について

1) 他の換気システムとの組み合わせ

本研究では、換気負荷という冬の活用に焦点をあてた検討を行ったが、SAH の温風の供給は床下へ行うため、基礎断熱された床下の除湿（特に初年度に多い基礎コンクリートからの発湿）にも活用が可能である。また、夏期の換気量確保にもつながり夏の利用としても適応が可能である。更に、SAH への空気導入を室内空気で行い、内気循環を行うことで室温を上昇させる暖房エネルギーとしての活用も可能である図 6.3。また、第二種換気システムや第三種換気システムの給気に組み合わせる手法図 6.4 及び図 6.5 や、熱交換のない第一種換気システムの給気に予熱装置として組み合わせる手法図 6.6 も考えられる。このように更なる活用の方法について今後も引き続き検討を行っていく予定である。

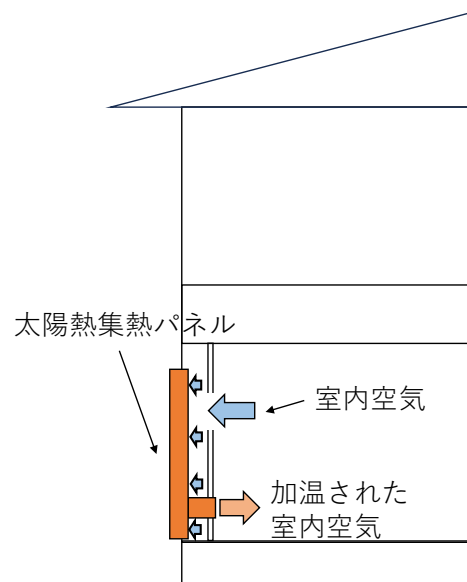


図 6.3 内気循環による室内空気の加温

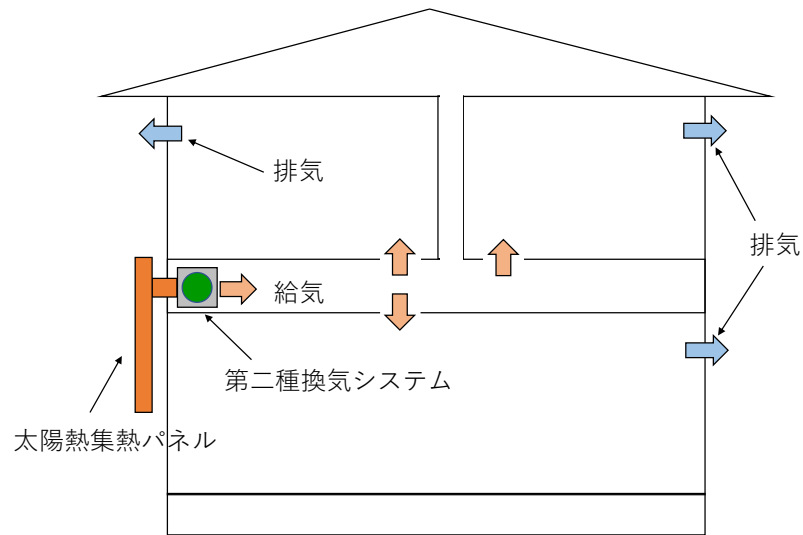


図 6.4 第二種換気システムとの組み合わせ

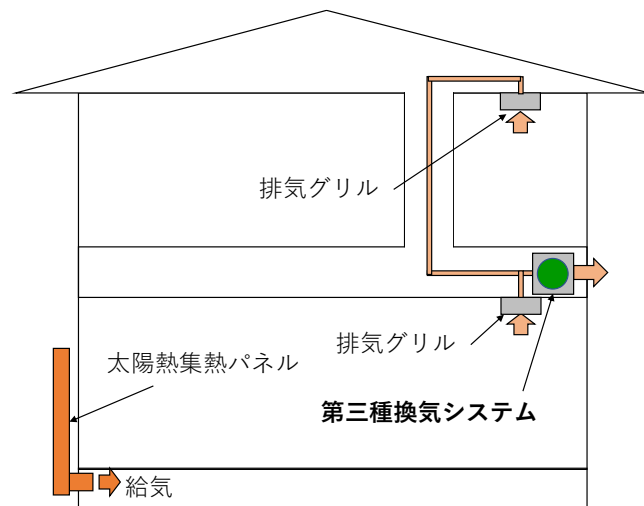


図 6.5 第三種換気システムとの組み合わせ

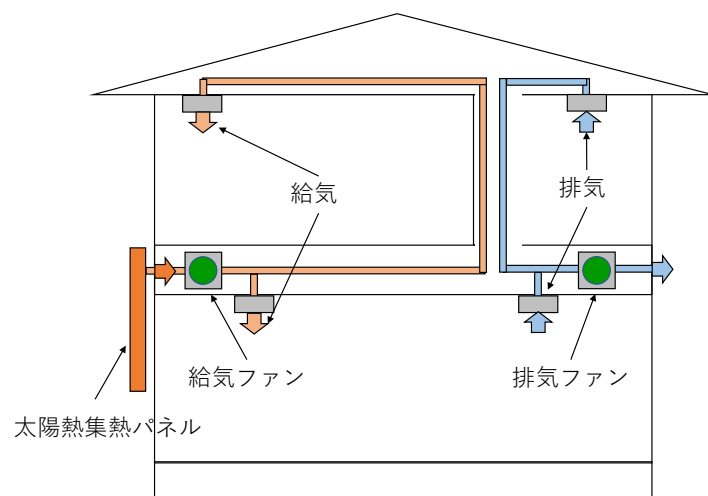


図 6.6 非熱交換第一種換気システムとの組み合わせ

2) 窓の代わりの SAH

近年、超高性能な断熱住宅が増えており、窓からの日照がオーバーヒートを引き起こす事例が増えている。窓は日射を取得することが可能で、非常に大きな暖房エネルギーとなるが、コントロールができずオーバーヒートにつながる事例も少なくない。SAH は窓の代わりに太陽エネルギーを取得できるため、日射取得のための窓を最低限とすることが可能となりオーバーヒートのコントロールが容易である。このような提案についても今後検討を重ねていく予定である。

3) 夏の活用方法

a) 夏期の基礎断熱された床下空間の湿気対策

夏期に、基礎断熱された床下空間がコンクリートの発湿や温度と湿度が高い外気が床下に供給されることにより、床下が湿潤状態になるが、SAH を使用することで、換気と温風による除湿効果が期待できる。

b) 任意の場所の湿気対策

SAH の温風を分岐させ、任意の場所へ温風吹き出しを行えるようにダンパーで制御することで、その場所の湿気対策を行うことが可能である。物置や共働きにより洗濯物を外へ干して外出できない場合の部屋干しスペースなどの利用が期待できる。

c) 排熱型のヒートポンプ（給湯用）への応用

SAH の温風を分岐させ、給湯用 HP の室外機へ温風吹き出しを行えるようにダンパー制御することで、HP の効率を向上させることが可能となる。

4) 別荘建築への活用

別荘建築において、使用していない期間に PVSAH はエネルギーを使用することなく、建物の換気と温風による除湿効果を得ることが可能となる。特に温度差が少なくなる暖房期間以外も SAH が第二種換気として機能するため、一年を通して効果が得られる。

5) JIS への適合評価

今後の普及を目指し、省エネルギー計算プログラムへの反映ができるように SAH の JIS 適合化のための検討も行っていく予定である。

6.3 おわりに

新型コロナウイルス感染症の世界的な流行に伴い、換気の重要性に対する認識が高まり、脱炭素社会を目指すために高性能な換気システムの提案がされているが、換気システムには適切なメンテナンスが不可欠で、換気不良による IAQ の悪化を居住者が正しく判断することは難しいため、実際に適切に働いていない換気システムも少なくない。居住者によるメンテナンスが難しい場合は、外部に委託することも解決策の一つである。本研究では、メンテナンスは、居住者自身が行うものとして検討を行ったため、外部委託費用の計算は行なっていないが、外部委託を考慮すると、メンテナンスコストはさらに増加し、全体の費用が更に大きくなることが予想される。居住者にとって省エネルギー性能や二酸化炭素排出量削減も重要であるが、ライフサイクルコストも重要な判断材料であり、実際に支払わなければならないコストを抑えられる換気システムを選択する傾向は高いと考えられる。

再生可能エネルギーの活用を可能とした本システムの実用化により、省エネルギー性、ライフサイクルコストにすぐれ、メンテナンス負担が少ない換気システムの実現が可能となった。

今後、PVSAH を普及させるためには、建築技術の向上と普及のための啓発活動や、周囲環境に対応した SAH の最適設置方法に関する検討、そして、ライフサイクルコストは物価の変動や製品の改良や開発により変動することに留意する必要がある。

本研究が、確実な換気を行いつつ省エネルギー性能を向上させる換気システムの選択肢を増やし、居住者にとって最適な選択肢を示すことが可能となれば、本研究の果たす役割は大きい。

謝辞

この論文は、社会人博士に挑戦してみないか？とお言葉をかけていただきました福島明博士（北海道科学大学名誉教授）のお声がけから始まりました。まさか博士後期課程への挑戦ができるとは夢にも思っておりませんでした。とてめありがたい機会をいただくことができました。その後、なかなか進まない研究に、「声をかけ続けることが僕の仕事だから」と、常に気にかけていただき、大変大きな支えとなりました。研究全般を通して多大なる励ましとご指導頂き本当に感謝しております。

そもそも、私は研究の世界に入るきっかけとなりましたのは、2004年度の日本建築学会大会で発表させていただいた田島昌樹博士（豊橋科学技術大学教授）と行った共同研究が始まりで、梗概の執筆と発表をしてみないか？という一言から始まりました。その後も研究の方法や分析の仕方など、基礎をご指導いただき、今回の研究に至ることができました。特に第二章、第三章に該当する論文では福島博士とともに多大なるご指導頂き本当に感謝しております。

太陽熱集熱パネルの開発においては、土屋喬雄博士（東洋大学名誉教授）に多大なるご指導をいただき、第二章に該当する論文をとりまとめることができました。土屋博士には、私が業界で駆け出しであった30年ほど前に、住宅の断熱に関するご相談から始まり、大変長くわたって様々なご指導頂き、どれほど勉強になったかわかりません。本当に感謝しております。

本研究の第三章及び第四章の作成にあたっては平川秀樹博士（北海道科学大学准教授）に、お忙しい中、大変多くの時間を割いて頂き、多大なるご指導及びご助言を頂きました。本当に感謝しております。集熱量予測シミュレーションプログラムの作成には、水野敬太氏（株式会社ミサワホーム総合研究所）に多大なるご協力を頂きありがとうございます。

本論文の審査にあたり、暖かく的確なご指摘、そしてご指導を頂きました長野克則博士（北海道大学教授）と森太郎博士（北海道大学教授）に篤く御礼申し上げます。

そして、所属研究室である林基哉博士（北海道大学教授）には、節目節目で幅広い知識と経験から頂くご指導で論文の完成度を大きく高めることができました。主査である菊田弘輝博士（北海道大学准教授）には、所属研究室の直属の先生として本当に親身にそして細かく丁寧なご指導をいただき、今回博士課程を終了することができました。本当にありがとうございます。

また、本論文作成に当たり暖かく応援いただきました研究室の大先輩である繪内正道博士（北海道大学名誉教授）及び羽山広文博士（北海道大学名誉教授）、本間義規博士（国立保健医療科学院統括研究官）にも感謝の意を評します。

最後に、実験や測定に協力いただきましたお施主さまや工務店様、学生の方々など全ての関係者様、社業の合間で行う研究のため、業務のフォローして頂いた社員一同、そして、一番の理解者となり支えてくれた妻に感謝の意を表したいと思います。

本論文の完成で、多くの先生方との研究の成果をここに取りまとめることができましたのはこの上ない喜びです。本当にありがとうございました。

2024 年 8 月 松永潤一郎