

博士論文

壁通気構法と太陽熱利用設備を用いた
省エネルギー住宅に関する研究

林 侃

論文の内容の要旨

論文題目 壁通気構法と太陽熱利用設備を用いた省エネルギー住宅に関する研究

氏 名 林 侃

本論文は「壁通気構法と太陽熱利用設備を用いた省エネルギー住宅に関する研究」と題して、環境問題への関心の高まりから、室内の温熱環境を快適に維持するために、低炭素社会に向けた住宅・建築物分野における省エネ策に着目し、壁体内通気住宅における壁通気構法の省エネ性能の評価手法の提案、及び住宅における太陽熱利用設備を予測するモデルの開発と性能向上を目指すシステムの提案を行なう。

近年の省エネ意識の高まりにより、エネルギー消費量の低減が重要な課題となっている。家庭部門のエネルギー消費量が増えている傾向があり、家庭部門における冷暖房消費量及び給湯消費量では合わせて家庭部門の半分以上を超えている。低炭素社会を実現するためには、家庭部門における冷暖房消費量及び給湯消費量を削減させる技術の開発が期待されている。

家庭部門におけるエネルギー消費量の低減には、まずエネルギー需要自体の低減が必要であり、具体的には建物の断熱性能強化や昼光利用などの自然エネルギー利用による建物のエネルギー需要低減、エネルギー需要に対するエネルギーシステム容量や運用の最適化などが国内外問わず検討されている。

更なるエネルギー消費量低減策として、太陽光発電や太陽熱温水などの再生可能エネルギーの利用が期待され、自然エネルギーを活用し、熱需要に見合った再生可能エネルギーシステムを開発し、給湯・暖房両方に利用する必要がある。

そのため、本研究では、建物に対する壁通気構法の省エネ性能の評価手法、及び家庭用設備に対する太陽熱利用設備の性能向上に着目し、省エネ対策の検討を行う。

以下に博士論文構成を要約する。

第 1 章では、本研究の研究背景、研究目的および論文の構成を述べる。さらに、今まで重要な研究について紹介し、その問題点を指摘し、本研究の位置付けを明確にする。

第 2 章では、壁通気住宅に関する研究及び太陽熱利用設備システムに関する研究に関する既往研究をまとめて紹介する。また、建築環境工学におけるエネルギーシミュレーションについて説明する。現在ビルディングシミュレーションにおいて主に用いられるネットワークモデルの原理、計算方法をそれぞれ説明する。

第 3 章では、実住宅における夏季実測を行ない、同じ外断熱の内側に通気層をもつ仕様で通気がある場合とない場合の比較を行うことにより、各室および壁通気層の熱的性状を把握し、壁体内の通気自体の効果を把握した。屋裏ファンを使用していたため、各壁の流速分布が均一にされ、壁体内通気の平均通気量が $467.6 \text{ m}^3/\text{h}$ となっている。小屋裏の温度差は、日射が強い時に、 -2°C より低い温度差がみられ、最大温度差が -4°C まで下がり、

床下空気における -2°C の温度差と比較すると、壁通気による効果が顕著にみられる。

第4章では、IBEC 標準住宅モデルを使用し、壁通気構法を使用する住宅の壁体内通気を含む建物内空調・熱輸送性状に関するシミュレーションモデルを作成してシミュレーションを行った。外気温の変化に応じて通気量は増減するが、どの壁面も上昇する方向に一定量の通気が得られることが確認できた。感度解析では、各要素単体を変化させた場合通気壁、小屋裏通気口、床下通気口の順に高い感度を示した。また、壁体内通気構法に関して充填断熱構法との比較では、現在の仕様の場合壁体内通気構法は充填断熱構法に対し、比較的薄い断熱材と通気の効果により、空調時にそれほど大きな冷房負荷の増加を伴うことなく、非空調時には自然室温の低下により快適性の向上を期待できる構法といえる。また、小屋裏ファンの導入による強制換気を行なうことで、夏季において空調時に冷房負荷の削減効果が顕著にみられ、非空調時に自然室温の低下及び快適性の向上を期待できると考えられる。

第5章では、家庭分野における太陽熱を利用した設備を対象に、住宅のエネルギーシステムのシステムシミュレーションモデル、および居室の温熱環境を予測するモデルの作製を行う。貯湯タンク、太陽集熱器、床暖房、熱交換器などの設備システムを充実させて、実際に利用されている太陽熱利用システムを TRNSYS で再現できた。また、シミュレーションの結果を検証するため、実測の結果との比較が必要となる。実測時の天気情報でシミュレーションの気象データを作成し、室内の長波放射計算を形態係数による詳細放射計算を導入し、シミュレーションは実測結果とよく一致しており、シミュレーション結果の信頼性を検証した。

第6章では、既存の家庭分野における太陽熱を利用した設備モデルを踏まえ、床暖房熱源機の効率向上による一次エネルギーの削減を目的とした、熱源機の効率向上を目指すシステムモデルを提案し、新しいシステムモデルを構築した。また、新しいシステムに基づき、給湯需要の違い、タンクの断熱と容量の違いによる一次エネルギー消費量比較を行うことにより、新しいシステムモデルの性能評価と有効性検討を行った。床暖房戻り熱媒の温度の低下によって床暖房の熱源機効率が上がることを確認できたが、熱媒温度低下による床暖房側熱源機でのガス消費量の増大、床暖房の戻り熱媒の熱をタンクに蓄熱することによる太陽熱有効集熱量の減少、タンク内の水温が高くなることによるタンクの熱損失量の増加により、提案したシステムの方が既存システムに比べ一次エネルギー消費量が増大する結果となった。

第7章では、全体のまとめを行い、本研究の成果を総括し、今後の展望を示した。

目次

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的	1-1
1.2 本論文の構成	1-4
1.3 参考文献	1-6

第2章 既往研究と検討手法

2.1 既往研究	2-1
2.2 ネットワークモデルに基づくエネルギー解析	2-5
2.3 参考文献	2-13

第3章 実測による壁通気住宅の実態把握

3.1 はじめに	3-1
3.2 実測住宅の概要	3-1
3.3 実測方法	3-3
3.4 壁通気なしケースの実測結果	3-5
3.5 壁通気有りケースの実測結果	3-8
3.6 各ケースの比較と考査	3-12
3.7 まとめ	3-13
3.8 参考文献	3-14

第4章 自然通気及び強制通気による夏期における熱的性能評価

4.1 はじめに	4-1
4.2 研究目的	4-1
4.3 研究方法	4-2
4.4 通気量に対する各部開口面積の感度分析	4-10
4.5 通気がない場合、通気がある場合、充填断熱構法による比較	4-15
4.6 強制換気による壁体内通気住宅の性能評価	4-23
4.7 参考文献	4-29

第5章 実験及び数値解析による太陽熱利用設備の構築及び精度検証

5.1 研究目的	5-1
5.2 研究対象の構成	5-2
5.3 TRNSYS を用いたシステムシミュレーション概要	5-10

5.4 計算結果の検討と考察	5-27
5.5 床暖房システム	5-41
5.6 まとめ	5-48
5.7 参考文献	5-49

第6章 太陽熱利用設備の性能向上の提案及び有効性検討

6.1 研究目的	6-1
6.2 研究対象システムの説明	6-2
6.3 TRNSYS を用いたシステムシミュレーション概要	6-11
6.4 シミュレーション結果と検討・考察	6-23
6.5 まとめ	6-39
6.6 参考文献	6-40

第7章 まとめ

7.1 各章の主要な結論	7-1
7.2 今後の展望	7-3

Appendix

Appendix 1 論文リスト

第 1 章

序論

1.1. 研究の背景と目的

本研究は、環境問題への関心の高まりから、室内の温熱環境を快適に維持するために、低炭素社会に向けた住宅・建築物分野における省エネ策に着目し、壁体内通気住宅における壁通気構法の省エネ性能評価手法の提案、及び住宅における太陽熱利用設備を予測するモデルの開発と性能向上を目指すシステムの提案を行なう。

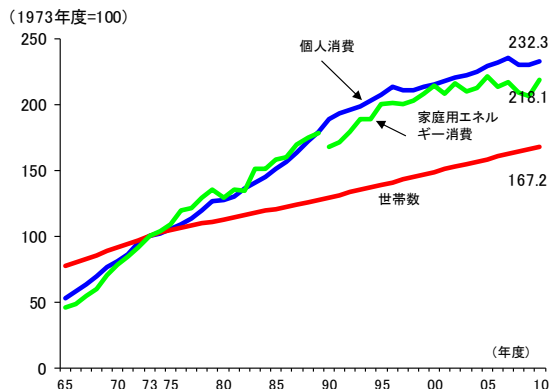


図 1.1 家庭部門におけるエネルギー消費の推移^[1-1]

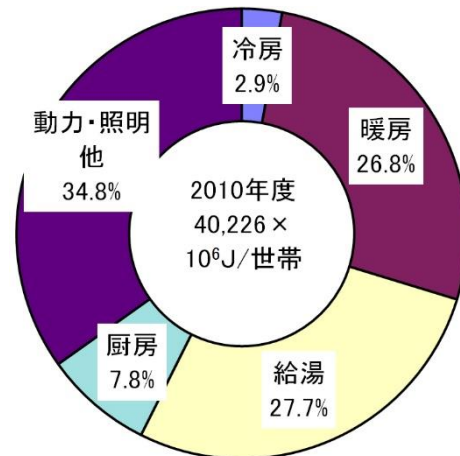


図 1.2 世帯当たりのエネルギー消費原単位と用途別エネルギー消費^[1-1]

近年の省エネ意識の高まりにより、エネルギー消費量の低減が重要な課題となっている。図 1.1 に家庭部門におけるエネルギー消費の推移を示す。家庭部門のエネルギー消費量が増えている傾向がある。図 1.2 に世帯当たりのエネルギー消費原単位と用途別エネルギー消費を示す。家庭部門における冷暖房消費量及び給湯消費量はそれぞれ 28.7%、27.7%を占め、合わせて家庭部門の半分以上を超えている。低炭素社会を実現するために、家庭部門における冷暖房消費量及び給湯消費量を削減させる技術の開発が期待されている。

家庭部門におけるエネルギー消費量の低減には、まずエネルギー需要自体の低減が必要であり、具体的には建物の断熱性能強化や昼光利用などの自然エネルギー利用による建物のエネルギー需要低減、エネルギー需要に対するエネルギーシステム容量や運用の最適化などが国内外問わず検討されている。

更なるエネルギー消費量低減策として、太陽熱温水や太陽光発電などの再生可能エネルギーの利用が期待され、自然エネルギーを活用し、熱需要に見合った再生可能エネルギーシステムを開発し、給湯・暖房両方に利用する必要がある。

そのため、本研究では、建物に対する壁通気構法、及び家庭用設備に対する太陽熱利用設備に着目し、住宅における省エネ対策の検討を行う。

1.1.1 日本の家造り

日本の伝統的な民家は、高温高湿な気候に対応し、自然素材の吸放湿性の高さをうまく利用した家造りが行なわれてきた。これらの民家が持つ構造的、材料的特徴としては、茅葺き屋根、土壁、土間が挙げられる。茅葺き屋根は茅草が何層にも重ねられて葺かれているため、数十センチの厚みを持ち、断熱性能に優れている。

このように、日本の歴史の中で高温・多湿な気候に応えるべく機知に富んだ環境調整手法が生み出されてきた。しかしながら、夏季の高温・多湿な気候に旨をおいて造られてきた風通しのよい家は、冬季には隙間風が侵入し、室内の温熱環境面から見ると劣悪であったに違いない。さらに、伝統的な建築技法は、工期が長く職人による手作業のために価格も高いという欠点がある。そのため、ビニルクロスや合板などの施工性がよく量産可能で安価な材料が主流となり始め、快適な住環境への要求が高まるとともに、気密性能の高いプレハブ住宅が徐々に増えてきた。また、日本の標準的な木造住宅では、壁にグラスウールなどの断熱材が施されているようにもなってきた。これにより、家全体も和風から洋風に変わり、壁体の断熱性能、ドアや窓の気密性能が高まった結果、冬季の温熱環境が改善されてきた。しかしその反面、日射、内部発熱などの影響により、夏場では、屋根面が日射を受けて、小屋裏空間内の空気温度が上昇し、住宅内の温熱環境が悪化することがあげられる。冬場では、実際の生活面から多くの水蒸気発生により、露点温度以下に温度低下した建築部材面で結露の発生が生じる問題などがよく発生している。

また、近年では、地球環境保護の問題意識が高まり、地球環境の観点に基づく省エネルギーの社会的要請に伴い、住宅の高気密・高断熱に関する取り組みが行なわれている。住宅の省エネルギー基準は1980年に制定され、1992年（新省エネルギー基準）、1998年（次世代省エネルギー基準）、それ以降段階的に断熱・気密性能の基準が改正されている。2009年の改正では、施工技術・施工精度の向上から気密性に関わる定量的基準が削除され、気密化の確保は広く普及したと考えられる。それに伴って、全国的にも住宅建築における断熱材の普及率は上昇傾向にあり、断熱性能が飛躍的に向上している。こうした高断熱・高気密化は、室内の温熱環境の快適性向上や省エネルギーなど得られる利点は多い。

今日、輸入住宅の代表として、海外における断熱気密化の手法が導入され、日本における住宅の構法や材料、設備等が変化していく中、昔ながらの風土に根ざした家造りの考え方が影をひそめつつある。こうした傾向により、冬季における室内の温熱環境が改善されたことも確かではあるが、その一方で新たに生じた問題も数限りない。特に、夏季における結露や高湿度など、現代の住宅における室内湿度の問題は、伝統的建築には見られなかったものである。日本の歴史的な家造りに代わって、気候の全く異なる海外の手法を新たに取り入れ

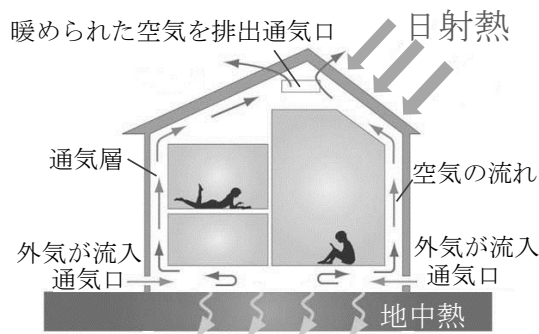


図 1.3 夏季システム概略

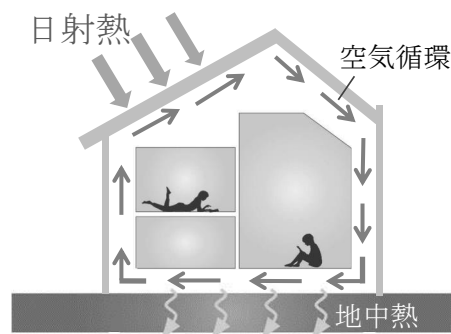


図 1.4 冬季システム概略

たことによって生じた問題は、また別の視点からこれらに対する解決策を見出さなくてはならないことは言うまでもない。

環境問題への関心の高まりから、室内の温熱環境を快適に維持するためにパッシブ手法を用いることも求められている。これらに有効な方法の一つとして、戸建て住宅の壁の内部に連続した通気層を設けて躯体内全体の通気を行う壁通気構法というシステムがある。季節を問わず壁体内で生じた結露水や雨水侵入の乾燥に役立つ他、夏季には排湿、排熱及び冷気の通風（図 1.3 参照）、冬期には暖気の伝達という役目（図 1.4 参照）を果たす。壁体内通気住宅にはすでに多くの適用例があるが（具体的に第 2 章で論ずることにする）、実住宅では小屋裏を介して開口部が互いに影響することにより、例えば通気方向が下向きになるなど、複雑な状況となっていることも予想されるため、通気部仕様の設計上の妥当性に関して通気層の特性を考慮した上で更なる吟味が必要とされる。

本研究では壁通気構法に対して、実測を用いて、通気部の仕様、通気量の設計妥当性の検証を行う。また、壁通気構法による小屋裏の空気温度下降効果が顕著にみられるとともに、IBEC 標準住宅モデルを使用し、実測で得られたデータの導入により、夏期における強制換気による壁体内通気住宅の性能を把握し、シミュレーションを行う。また、壁体内通気構法の効果を検証する上で、一般的に普及している住宅構法である充填断熱構法との比較を行う。

1.1.2 家庭分野の設備

また、これからの住宅は、安全・安心・快適・健康・省エネであることが指向される。それを目指す具体的な研究開発の例がスマートハウスであり、ここ数年の間にハウスメーカー、エネルギー供給会社、大学等で研究開発を開始する例が増加している。現在行われている研究開発は、太陽光発電、太陽熱利用、燃料電池、蓄電池などを設備した実験住宅で、HEMS を用いて住宅内のエネルギー需要を適切にマネジメントすることにより、エネルギーを含む総合的な性能を実証的に確認しようとするものが多い。

一方、上記住宅エネルギー設備の特性と建物の属性を組み込んだ上で、立地する地域の気象データを考慮して年間エネルギーシミュレーションを実施した例は少ない。高性能なスマートハウスを開発し、普及させるためには建築オーナーの生活スケジュールや建物特性、

立地エリアの気候・風土に合わせて建物と設備の性能を最大限に発揮させる設計や使い方が必要になる。そのため、スマートハウスのシミュレーターが開発段階（および普及段階）で活用されることが望まれる。本研究では、家庭分野の設備を対象に、住宅のエネルギーシステムのシステムシミュレーションモデル、および居室の温熱環境を予測するモデルの提案を行うことも一つの目的とする。

1.2. 本論文の構成

第1章では、本研究の研究背景、研究目的および論文の構成を述べる。さらに、今まで重要な研究について紹介し、その問題点を指摘し、本研究の位置付けを明確にする。

第2章では、壁通気住宅に関する研究及び太陽熱利用設備システムに関する研究の既往研究をまとめて紹介する。また、建築環境工学におけるエネルギーシミュレーションについて説明する。現在ビルディングシミュレーションにおいて主に用いられるネットワークモデルの原理、計算方法をそれぞれ説明する。

第3章では、実住宅における夏季実測を行ない、同じ外断熱の内側に通気層をもつ仕様で通気がある場合、及び通気がない場合の比較を行うことにより、各室および壁通気層の熱的性状を把握し、壁体内の通気自体の効果を把握する。

第4章では、IBEC 標準住宅モデルを使用し、壁通気構法を使用する住宅の壁体内通気を含む建物内空調・熱輸送性状に関するシミュレーションモデルを作成してシミュレーションを行い、住宅全体の通気性状の確認および各部開口面積の感度解析の検討を行い、自然通気がある場合及びない場合および充填断熱構法との比較、及び強制換気による壁体内通気住宅の性能評価を検討する。

第5章では、家庭分野における太陽熱を利用した設備を対象に、住宅のエネルギーシステムのシステムシミュレーションモデル、および居室の温熱環境を予測するモデルの作製を行う。また、シミュレーションの結果を検証するため、実測の結果との比較が必要となる。実測時の天気情報でシミュレーションの気象データを作成し、室内の長波放射計算を形態係数による詳細放射計算を導入し、シミュレーションは実測結果とよく一致し、シミュレーション結果の信頼性を確認する。

第6章では、既存の家庭分野における太陽熱を利用した設備モデルを踏まえ、床暖房熱源機の効率向上による一次エネルギーの削減を目的とした、熱源機の効率向上による新しいシステムモデルを提案し、新しいシステムモデルを構築する。また、新しいシステムに基づき、給湯需要の違い、タンクの断熱と容量の違いによる一次エネルギー消費量比較を行うことにより、新しいシステムモデルの性能評価と有効性検討を行う。

第7章では、各章のまとめを行い、本研究の成果を総括し、今後の展望を示した。

以上をまとめて本論文のフローを示す。

壁通気構法と太陽熱利用設備を用いた省エネルギー住宅に関する研究

第1章 序論 <ul style="list-style-type: none"> ■ 研究背景と目的 ■ 論文の構成
第2章 既往研究と検討手法 <ul style="list-style-type: none"> ■ 壁通気住宅に関する既往研究 ■ 太陽熱利用設備システムに関する既往研究 ■ ネットワークモデルに基づくエネルギー解析の基本原則
壁通気構法による実態把握及び性能評価の検討
第3章 実測による壁通気住宅の実態把握 <ul style="list-style-type: none"> ■ 実測住宅の概要 ■ 実測方法及び実測条件 ■ 壁通気住宅の温熱性状の把握
第4章 自然通気及び強制通気による夏期における熱的性能評価 <ul style="list-style-type: none"> ■ 通気経路の縮流部の面積の感度分析 ■ 通気がない場合、通気がある場合、充填断熱構法による比較 ■ 強制通気による夏期の性能検討
太陽熱を利用した設備システムによるモデル構築と性能向上の検討
第5章 実験及び数値解析による太陽熱利用設備の構築及び精度検証 <ul style="list-style-type: none"> ■ 太陽集熱器を利用した床暖房と給湯併用の設備システムの構築 ■ 実測結果との比較による作製したモデルの精度検証
第6章 太陽熱利用設備の性能向上の提案及び有効性検討 <ul style="list-style-type: none"> ■ 熱源機の効率向上を目指す新しいシステムモデルの提案 ■ 新しいシステムモデルの性能評価と有効性検討
第7章 まとめ <ul style="list-style-type: none"> ■ 論文全体のまとめ ■ 今後の課題

図 1.3 本論文のフローチャート

1.3 参考文献

- [1-1] エネルギー白書 2012, 経済産業省, 2012
- [1-2] 環境ビジネス, 特別企画「検証! ビル・工場の省エネツール (建物の環境配慮)」, 2006年12月号、http://www.kankyo-business.jp/eo/eo_tool01.html
- [1-3] 富士経済, 産業分野のエネルギー需要実態を調査 <https://www.fuji-keizai.co.jp/market/10118.html>

第 2 章

既往研究と検討手法

2.1 既往研究

2.1.1 壁通気住宅に関する既往研究

近年では木造住宅における温熱環境の問題改善に関する研究が注目されている。室内の温熱環境を快適に維持するためにパッシブ手法を用いることも求められている。これらに有効な方法の一つとして、戸建て住宅の壁の内部に連続した通気層を設けて躯体内全体の通気を行うシステムがある。季節を問わず壁体内で生じた結露水や雨水侵入の乾燥に役立つ他、夏季には排湿、排熱及び冷気の通風、冬期には暖気の伝達という役目を果たす。

壁体内通気住宅にはすでに多くの適用例がある。

蔵重ら^[2-11]は、スモークワイヤー法を使用した通気層内部の気流速度の可視化実験により、通気層における換気流量と浮力の関係について検討した。また、通気層内部における熱と湿気の複合移動を模型実験により定量的に解析するとともに、数式モデルを提案し、その妥当性を検証した。

尾崎ら^[2-21]は、水分ポテンシャルへの応力の影響について検討するために、液相水分流の駆動力に μ を用いた応力場における気相・液相水分流を考慮した熱・水分複合移動解析モデルを提案した。

梅野ら^[2-31]は、壁体内通気層の通気量の実態を把握するため、実験住宅において通気層の通気量を測定し、外気と通気層の温度差、外部風向・風速が通気量に及ぼす影響を検討した。外気条件が通気量に及ぼす影響を明らかになっている。

松村ら^[2-41]は、在来軸組工法の特徴である壁体内部の通気性を、特に夏季に生かすべく計画した一工法に基づいた実験住宅の測定を通じ、北海道におけるエ法自体の問題点、改良すべき点、壁内の気流性状などを明かになっている。

田島ら^{[2-51],[2-61]}は、外断熱通気工法における壁体内通気層の熱性状及び通気特性の定量的把握を目的として、内部通気層をもつ実験住宅及び実大壁体模型での夏季実測結果を分析した。また、在来軸組工法の特徴である壁体内部の通気性を、特に夏季に生かすべく計画した一工法に基づいた実験住宅の測定を通じ、北海道におけるエ法自体の問題点、改良すべき点、壁内の気流性状などを明かになっている。

近本ら^{[2-71],[2-81]}は、輻射熱を抑制するアルミ反射材を壁体内に貼り、その室内側に発泡ウレタンを吹き付ける工法に着目し、ラスウールを用いた充填断熱工法と、ウレタン遮熱工法による実験棟をそれぞれ作成した。両棟において室内温熱環境、壁体部材間温度や電力消費量を測定し、断熱性能の比較、評価を行った。アルミにより輻射熱伝達を抑制したため、結果として熱貫流率以上の性能を発揮したものを明らかにしている。

高木ら^[2-91]は、壁体内通気層を利用した床下給気型第一種換気システムを組み込んだ実験住宅を対象に、換気性能を測定した。実験を通じて、換気量を明らかにし、実験住宅における空気の流れが意図された通りに各室に行き渡るかどうか、また、壁体内通気層と室内空間との間に設けた給気ガラリによってどのように変化するかを、空気齢や空気交換効率等の換気効率指標を用いて評価した。また、高木ら^[2-101]は、壁体内通気層を利用した換気と空調併設型システムを採用し、換気システムにより導入した新鮮空気と空調システムで温度を調節した空気を床下・壁体内通気層・小屋裏など建物全体に循環させ、建物の耐久性を高めると共に、輻射効果により冷暖房負荷を低減させることを検証するために、夏期・中間期・

冬期の実測調査を通して、換気および空調システムの性能を評価した。

2.1.2 太陽熱利用設備システムに関する既往研究

これからの住宅は、安全・安心・快適・健康・省エネであることが指向される。それを目指す具体的な研究開発の例がスマートハウスであり、ここ数年の間にハウスメーカー、エネルギー供給会社、大学等で研究開発を開始する例が増加している。現在行われている研究開発は、太陽光発電、太陽熱利用、燃料電池、蓄電池などを設備した実験住宅で、HEMSを用いて住宅内のエネルギー需要を適切に管理することにより、エネルギーを含む総合的な性能を実証的に確認しようとするものが多い。

一方、上記住宅エネルギー設備の特性と建物の属性を組み込んだ上で、立地する地域の気象データを考慮して年間エネルギーシミュレーションを実施した例は少ない。高性能なスマートハウスを開発して普及させるために、建築オーナーの生活スケジュールや建物特性、立地エリアの気候・風土に合わせて設備と建物の性能を最大限に発揮する設計や使い方が必要になる。そのため、スマートハウスのシミュレーターが開発段階（および普及段階）で活用されることが望まれる。

太陽熱利用設備システムにはすでに多くの適用例がある。

岩田・相良ら^{[2-11],[2-12]}は、戸建住宅を対象とした実測による温度状況の把握を行うとともに、シミュレーションによる蓄放熱量の検討を行っている。

中村ら^[2-13]は、シミュレーションにより、建物性能、集熱・蓄熱部位、運用方法などの条件による快適性の差異を検討し、設計指針を提案している。

桑沢・前ら^{[2-14],[2-15]}は、実測により、建物の温度性状及び熱利用の実態を詳細に把握し、集熱効率に関する実験及びシミュレーションを行い、空気集熱式ソーラーシステムによる省エネ効果を定量的に評価した。まず、実測概要、及び夏期・冬期の温度状況や集熱量の計測結果について報告した。次に、暖房集熱時における熱利用状況を明らかにし、暖房エネルギー削減効果に関する計測を行なった。

崔ら^[2-16]は、水または空気を利用した集熱方式を検討し、同一条件での性能を評価、比較する。また、太陽熱利用の特性上、昼間の時間帯のオーバーヒートが発生するので、基礎のコンクリート厚さの変化による蓄熱効果を検討し、気候の特性による地域の検討と暖房スケジュールによる暖房負荷の変化を検討した。

伊藤ら^[2-17]は、新たな太陽熱利用システムの実現を目指している。実施した各要素技術の実験結果に基づいてシステムの解析を行い、開発システムの性能を推定したので、その結果を報告する。また、小池ら^[2-18]は、気象庁の数値予報を利用して沸上量制御に資する情報を給湯機が得るためのシステム開発を実施し、太陽熱利用システムの集熱量を予測するシステムの概要を示した。

また、相曽ら^[2-19]は、集熱効率の向上を目指した集熱器の開発について報告した。屋根断熱構造パネルを下地として集熱器を設置することは、集熱効率向上に寄与することがわかった。

また、立松ら^[2-20]は、これらの各開発要素の実使用条件下における課題抽出や、システムの総合効率評価のため、4人家族を想定した給湯負荷を与えての実棟実験を行った。実棟実験により、 $\Delta\theta/\text{I}$ の頻度分布について知見が得られ、集熱器の開発にフィードバックした。

また、伊藤ら^[2-21]は、実験結果に基づいて、システムシミュレーションによる年間性能の予測結果について報告する。システムシミュレーションにより、開発したシステムの年間性能を推定した。効率の向上により、従来システムに比較して年間給湯負荷を 25%以上削減できると予想されるシステムを開発できた。

前ら^{[2-22],[2-23]}は、屋根で集熱した太陽熱を熱媒搬送して蓄熱材と床材を一体化した床ユニットへ蓄熱し、蓄熱材からの直接熱伝導により床仕上げ材を暖めることで熱ロスの低減と直接足元を暖める快適性、ヒを回りつつ簡素で高効率な暖房方式を検討した。測定に関しては、集中計測室を設けてできるだけ温湿度データ等を無線通信させることにより、居住実験においても日常生活と同じ感覚でらせる測定体制の整備ができた。また、夏期での地冷熱を活用した換気システムの省エネ効果について実験結果を報告し、各ケース 1 日分の実験結果での比較、および開口部日射遮蔽仕様と換気方式以外に差異はないという前提ではあるが、開口部日射遮蔽と床下空気活用第 2 種換気に関して、夏期室温低下と空調消費電力量削減の有効性を伺える結果が得られた。

坂本ら^[2-24]は、既に一般化している高断熱、床暖房、ヒートポンプ、潜熱蓄熱材という要素技術の採用を前提にして、太陽熱を利用した合理的で実用的な暖房システムの構築を行い、システム性能の検証のために建設した実験棟を紹介し、次世代省エネルギー基準相当の性能を持つことを確認した。また、深澤ら^[2-25]は、窓面透過日射量と床面入射日射量を室外の日射量測定値で予測できる式を導いた。測定値と予測値はよく一致しており、予測式は妥当であると確認した。また、金ら^[2-26]は、床に敷設されている潜熱蓄熱式床暖房パネルによる、昼間の日射蓄熱量の再放熱が夜間の冷房負荷に及ぼす影響を確認し、その対策としての日射遮蔽の効果について検討を行った。その結果、PCM パネルの有無による冷房負荷の差はあまり見られなかったが、PCM パネルが昼間に日射を蓄熱し、夜間に再放熱をする挙動を確認できた。

梶井らと川島ら^{[2-27],[2-28]}は、温水利用の下、潜熱蓄熱式床暖房パネルの最適設計に必要な基礎データの取得を目的とし、人工環境試験室において特性把握実験を行った。実験の正当性の確認を行った。また、渋谷ら^[2-29]と高瀬ら^[2-30]は、温水利用の下、潜熱蓄熱式床暖房パネルの最適設計に必要な基礎データの取得を目的とし、人工環境試験室において特性把握実験を行った。異なる構造の PCM パネルにおける温水蓄熱での挙動を把握した。また、金ら^[2-31]は、深夜電力で稼動する温水 HP による蓄熱量を調節することで、昼間の入射日射による蓄熱量への影響を確認し、システムの日射熱利用率を向上させるための温水 HP の運転方法により、日射による PCM パネルへの蓄熱量の変動や実験棟の熱収支量を検討した。

河野ら^[2-32]は、一定に制御された人工環境実験室内で人工太陽装置を用い日射量を一律に与えた際の、仕上げ材ごとの PCM パネルの蓄放熱に関する特性把握実験を行った。また、福本ら^[2-33]は、PCM の有効活用のケーススタディとして、前報の結果を受け日射蓄熱に有利であった仕上げ材を PCM パネルに適用し、熱負荷計算を用いて気象条件(外気温、日射量)が変化する際の室温等の挙動を、通常フローリング仕上げの場合や RC 造等と比較し、建物居室における性能予測を行った。シミュレーションにより、Q 値が小さく a/R が大きな仕上げ材の方が日射を効率的に利用でき、モデルでは Q 値 1.6 程度で仕上げ材を黒タイルにすることで潜熱域を最大限利用できた。

また、金ら^[2-34]は、ヒートポンプと日射ダイレクトゲインを利用した蓄熱式床暖房システ

ムを再現できるシミュレーションツールを用いて、実使用時のエネルギー消費量を計算することでシステムのエネルギー性能を検討した。エアコンの同程度の期間消費電力量で床暖房を使用できることを確認できた。

2.2 ネットワークモデルに基づくエネルギー解析

2.2.1 ネットワークモデル

ネットワークモデル (Network model) は、建物や空調系システム全体を、部屋やシステム構成要素を代表する「節点」の集合として扱い、それらの節点を開口や隙間、ダクト等の換気系統を代表する「枝」により接合することで、各節点間の空気の輸送を解析する解析手法である^[2-35]。(図 2-1)

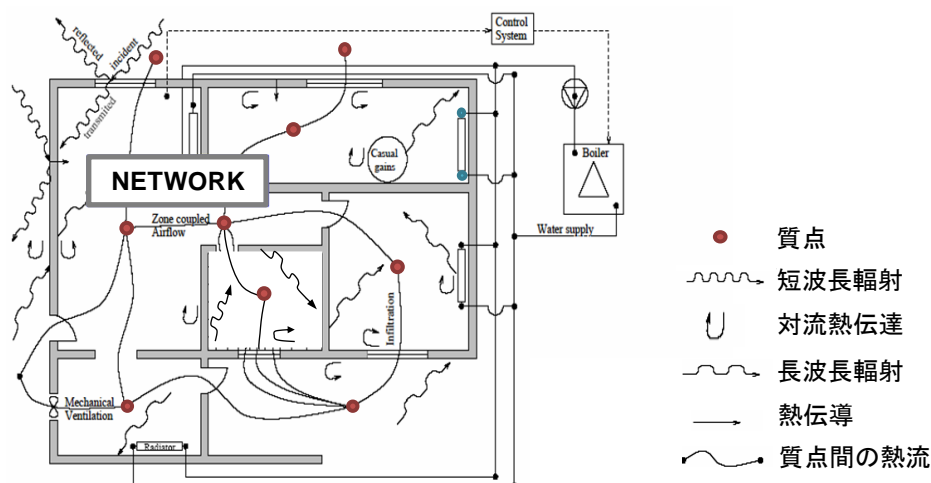


図 2-1 ネットワークモデルの概念図

建物内の熱や物質の輸送（移動）はネットワーク化したモデルで近似されることが多い。このネットワークモデルで負荷や制御要素の時間変動解析が行なわれる。3 次元の様相を示す室内空間の値は、空調される室内では熱や物質がよく混合し、その性状は空間積分平均値などで良く代表されるため、輸送経路ではなく節点として解析され、室内の空間分布は解析されない。従来はこのノード点の値を環境制御目標に保つため、期間で必要となるエネルギー量が算出される。

ネットワークモデルは、一般的な建築空間であれば、適度な数の空間と結合要素により解析が可能であるため、PC を使用してもわずかな計算時間で解の得られる汎用性の高い解析モデルである。換気系統を解析するためには、COMIS^[2-36]、CONTAM^[2-37]等のコードが開発されており、また Energy+^[2-38]、TRNSYS^[2-39]及び AE-SimHeat^[2-40]等の熱解析ソフトとの連携により熱と換気の連成解析が容易に行えることから、その利用は研究のみならず、実務においても広く行われている。

しかし、ネットワークモデルは室内に熱や物質の完全混合の仮定を設けているため、室内気流の 3 次元性に依存する空間内の熱や物質の移流・拡散分布は考慮されていない。環境の不均一分布が発生しやすい空間において、室内で生じる複雑な 3 次元輸送を空間解像の不

十分なネットワークモデルで近似する手法は、必然的に多くの調整すべき経験定数を必要としモデルの汎用性が限られる。

2.2.2 ネットワークモデルの基礎方程式

ネットワークモデルでは、壁体の熱抵抗（熱伝導熱抵抗、対流熱抵抗、輻射熱抵抗）、熱容量、キルヒホッフの式²⁻⁴¹⁾などの連立方程式を解く必要がある。線形方程式は素直に解けそうですが、非線形な場合は繰り返し計算が必要となる。

(1) 節点空気の対流熱取得

節点空気の対流熱取得には、式(2-1)～式(2-3)に示すように内壁面から室内空気に伝達された対流熱量、外気側から室内に流入した浸透熱量、人体、機器、照明などの室内の内部発熱体からの対流熱量及び気流により隣接する節点から流入する対流熱量がある。図 2-2 には、節点空気の対流熱取得を示す。

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent,i} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} \quad \cdots(2-1)$$

$$\dot{Q}_{inf,i} = \dot{V}_{inf,i} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{outside} - T_{air,i}) \quad \cdots(2-2)$$

$$\dot{Q}_{vent,i} = \dot{V}_{vent,i} \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{ventilation,i} - T_{air,i}) \quad \cdots(2-3)$$

ここで、

$\dot{Q}_{surf,i}$: 内壁面から室内側に伝達された対流熱量 [kJ/h]

$\dot{Q}_{inf,i}$: 外気側から室内に流入する浸透熱量 [kJ/h]

$\dot{Q}_{vent,i}$: 空調や換気による熱取得 [kJ/h]

$\dot{Q}_{g,c,i}$: 内部発熱体（人体、機器、照明、ラジエーターなど）からの対流熱量 [kJ/h]

$\dot{Q}_{cplg,i}$: 気流により隣接する節点 j から節点 i に流入する対流熱量 [kJ/h]

\dot{V} : 流量 [m³/h]

C_p : 空気の比熱 [kJ/kg・K]

ρ : 空気の密度 [kg/m³]

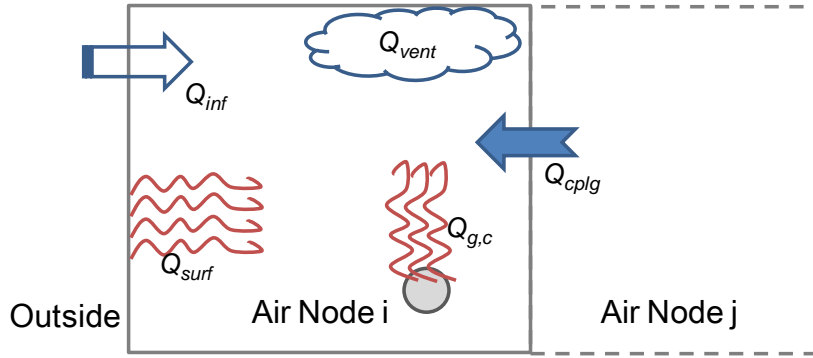


図 2-2 節点空気の大気熱取得

(2) 壁体の熱取得

式(2-2)、図 2-3 に放射による壁体の熱取得を示す。内壁面の放射熱取得は内部発熱体からの長波放射熱、窓など透明な外皮から室内に入射した日射熱取得、壁面間の長波放射熱取得及びほかの特別定義された放射熱（ユーザ定義など）の和となる。

$$\dot{Q}_{r,w_i} = \dot{Q}_{g,r,i,w_i} + \dot{Q}_{sol,w_i} + \dot{Q}_{long,w_i} + \dot{Q}_{wall-gain,w_i} \quad \dots\dots(2-2)$$

ここで、

\dot{Q}_{r,w_i} : surface node の放射熱取得 [kJ/h]

\dot{Q}_{g,r,i,w_i} : 内部発熱体からの放射熱取得 [kJ/h]

\dot{Q}_{sol,w_i} : 日射熱取得 [kJ/h]

\dot{Q}_{long,w_i} : 壁面間の長波放射による放射熱取得 [kJ/h]

$\dot{Q}_{wall-gain,w_i}$: 特別定義の壁面の放射熱取得 [kJ/h]

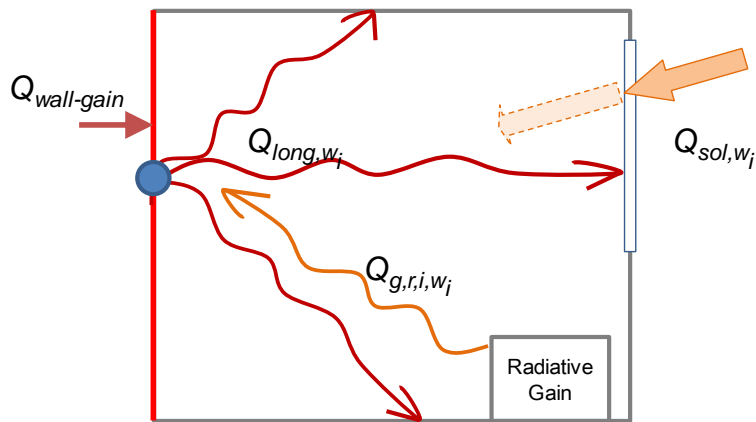


図 2-3 放射による壁体の熱取得

図2-4に、壁体表面の熱流と温度を示す。外気から外壁表面に伝達される熱量は式(2-3)で計算できる。

$$\dot{q}_{comb,s,o} = \dot{q}_{c,s,o} + \dot{q}_{r,s,o} \quad \cdots(2-3)$$

ここで、

$\dot{q}_{comb,s,o}$: 外気から外壁表面に伝達される熱量 [kJ/h]

$\dot{q}_{c,s,o}$: 外壁表面への対流熱量

$\dot{q}_{r,s,o}$: 外壁表面への天空放射交換熱量

外壁表面への対流熱量、天空放射交換量及び仮想天空温度は式(2-4)、式(2-5)、式(2-6)で定義される。

$$\dot{q}_{c,s,o} = h_{conv,s,o} (T_{a,s} - T_{s,o}) \quad \cdots(2-4)$$

$$\dot{q}_{r,s,o} = \sigma \cdot \varepsilon_{s,o} (T_{s,o}^4 - T_{fsky}^4) \quad \cdots(2-5)$$

$$T_{fsky} = (1 - f_{sky}) \cdot T_{a,s} + f_{sky} \cdot T_{sky} \quad \cdots(2-6)$$

ここで、

$h_{conv,s,o}$: 外壁表面の対流熱伝達率 [kJ/h m² K]

$T_{a,s}$: 外壁表面付近の外気温度 [K]

$T_{s,o}$: 外表面温度 [K]

σ : シュテファン・ボルツマン常数 2.0411*10⁻⁷ [kJ/h m² K⁴]

$\varepsilon_{s,o}$: 外表面の長波長放射率 [-]

T_{fsky} : 長波放射交換計算用仮想天空温度 [K]

T_{sky} : 天空温度 [K]

f_{sky} : 外壁面から見た天空形態係数 [-]

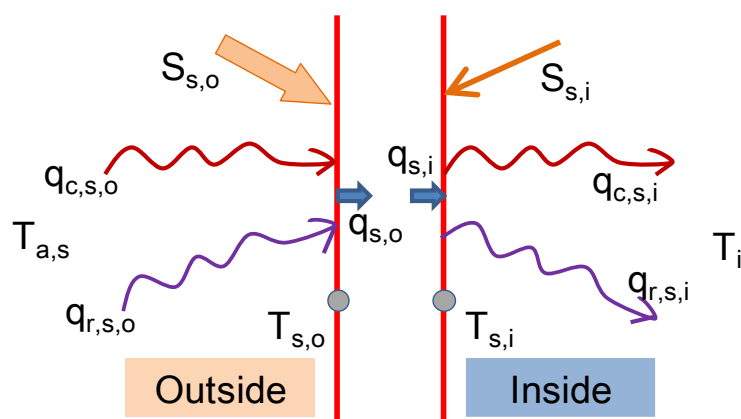


図 2-4 壁体表面の熱流と温度

ここで、

$S_{s,i}$: 室内側の壁面に吸収された日射と内部熱源の放射熱フラックス

$S_{s,o}$: 屋外側の壁面に吸収された日射放射熱フラックス

$\dot{q}_{r,s,i}$: ゾーンの中の他の壁面との長波放射熱伝達の正味量

$\dot{q}_{r,s,o}$: 屋外側の全ての長波放射熱伝達の正味量

$\dot{q}_{s,i}$: 壁体の内壁面における伝導熱フラックス

$\dot{q}_{s,o}$: 壁体の外壁面から壁体に流入する熱フラックス

$\dot{q}_{c,s,i}$: 内壁面から室内側空気への対流熱フラックス

$\dot{q}_{c,s,o}$: 境界または屋外側の空気から外壁面への対流熱フラックス

$T_{s,i}$: 内壁面の温度

$T_{s,o}$: 外壁面の温度

$T_{a,s}$: 外表面付近の大気温度

2.2.3 非定常熱伝導の算出

壁体内の非定常熱伝導の計算には、レスポンスファクター法、状態空間法、有限差分法などが用いられている。本研究はプログラムの応用範囲、拡張性と柔軟性を考えた上、TRNSYS

を選択した。TRNSYS では、壁体内の非定常熱伝導の計算にレスポンスファクター法が用いられる。カナダの Stephenson と Mitalas によって発表された伝熱関数関係式に基づいて壁体をモデル化する^{[2-42][2-43][2-44]}。任意の壁体に対して、内外壁面における伝導熱流は下式で求められる。

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,i}^k \quad \cdots(2-7)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,o}^k \quad \cdots(2-8)$$

ここで、 a_s, b_s, c_s, d_s はタイムシリーズの係数、z-transfer 関数によって定まる。

表面温度と表面熱フラクスのタイムシリーズ方程式は等時間間隔で解析される。上添え字 k はタイムシリーズを表し、現時点は $k=0$ 、前の 1 ステップは $k=1$ 。

窓面は熱容量なしの外壁（2 節点モデル）として取り扱われる。日射が部分的に窓を透過できるが、内部長波輻射は窓を通さない。長波輻射は窓の表面にしか吸収されないと仮定している。

$$a_s^0 = b_s^0 = c_s^0 = U_{g,s} \quad \cdots(2-9)$$

$$a_s^0 = b_s^0 = c_s^0 = d_s^0 = 0 \quad (k > 0) \quad \cdots(2-10)$$

2.2.4 相似則による床暖房の設定

壁体のレスポンスファクターを求めるため、タイムシリーズの時間間隔の係数を求める必要がある。しかし、壁体の構造によって、薄い建材層などのような係数を計算できない場合がよくある。その際に、TRNBUILD のファイルが保存できなく、タイムベースを調整してくださいというエラーが発生する。今回のシミュレーションにおいて床冷暖房条件は TRNBuild の設定の中で「Active Layer」を用いた床の境界条件設定を行った。Active Layer の床暖房設定は図 3.2.2 に示される。しかし、実際の床暖房の構造を再現する際に、断熱層や空気層などの小さい厚さを持つ壁体層のレスポンスファクターは上記の理由で計算できなかった（ d_1 を薄くすることができない）。

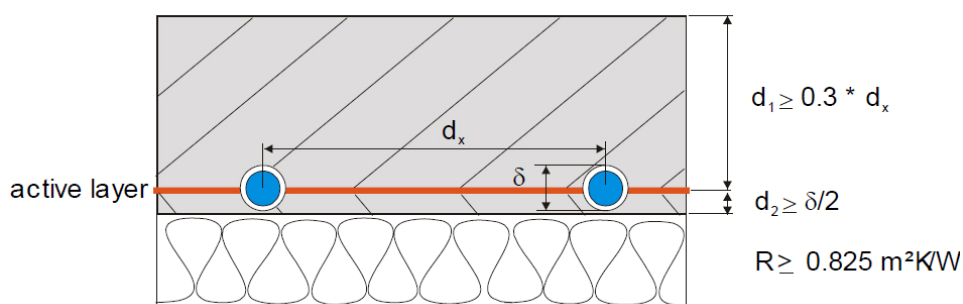


図 3.2.2 Active Layer の設定条件

そのため、今回は熱伝導の相似則を用いて建材層の厚さを TRNSYS の下限値にし、材料の熱伝導率、比熱または密度を合わせて調整することで、同じ応答係数を求めることに期待する。すなわち、図 3.2.3 に示すように TRNSYS において、壁体の構成に係わらず、同一のレスポンスファクターであれば、同じ熱応答性能になり、室内空気に同じ影響を与える。

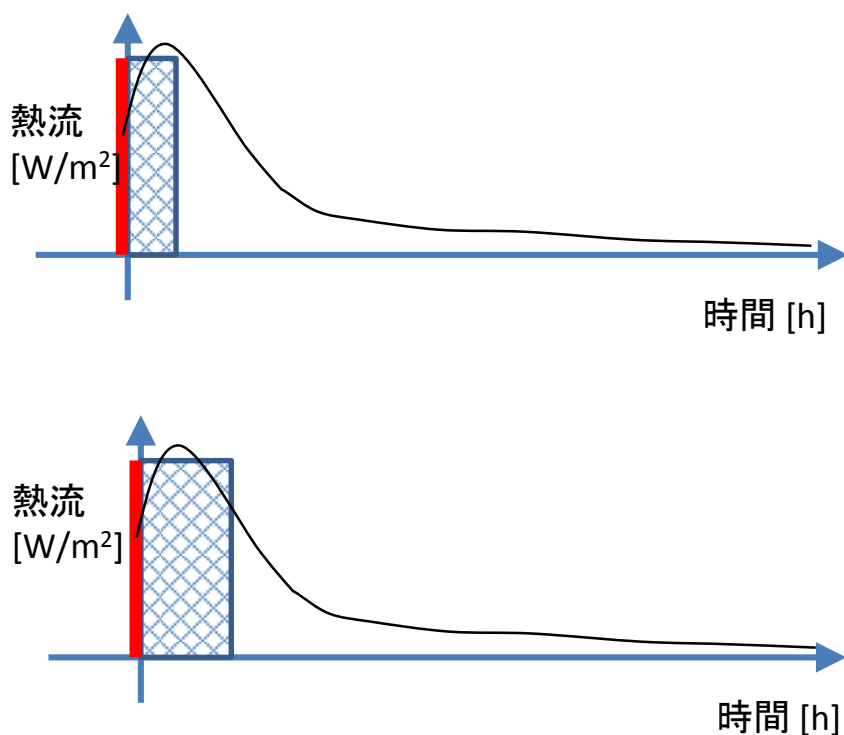


図 3.2.3 壁体の物性値の調整によるレスポンスファクターの同一

ここで、熱伝導のフーリエ数 Fo を用いて壁体物性値の変更値を求める。フーリエ数は、固体内に蓄えられる熱エネルギーに対する熱伝導で伝わる熱エネルギーの割合である。フーリエ数を一致させれば、熱伝導の特徴が相似する。

$$Fo = \alpha t / L^2$$

.....式(3-5)

α : 熱拡散率 (温度拡散率) $= \lambda / \rho c$ (m^2/s)

λ : 熱伝導率 [$W/(m.K)$]

t : 無次元時間

L : 長さ (距離) [m]

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ \frac{T_0}{t_0} \cdot \frac{\partial \left(\frac{T}{T_0} \right)}{\partial \left(\frac{t}{t_0} \right)} &= \alpha \frac{T_0}{L_0^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \left(\frac{x}{L_0} \right)} \left(\frac{\partial \left(\frac{T}{T_0} \right)}{\partial \left(\frac{x}{L_0} \right)} \right) \\ \frac{\partial T'}{\partial t'} &= \frac{\alpha t_0}{L_0^2} \frac{\partial^2 T'}{\partial x'^2} \end{aligned}$$

$$Fo_1 = Fo_2$$

$$\alpha_1 t / L_1^2 = \alpha_2 t / L_2^2$$

$$\alpha_1 / \alpha_2 = (L_2 / L_1)^2$$

$$(\lambda / \rho c)_1 / (\lambda / \rho c)_2 = (L_2 / L_1)^2$$

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \cdot \left(\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1} \right) = \left(\frac{L_2}{L_1} \right)^2 \quad \text{.....式(3-6)}$$

従って、壁体の厚さ L 、熱伝導率 λ 、密度 ρ および比熱 c を式 (3-6) によって調整すればよい。

第2章の参考文献

- [2-1] 蔵重裕行・渡辺俊行・須貝高・龍有二・尾崎明仁・赤司泰義・小野公平・佐藤章造：通気層の熱・湿気移動に関する研究その1 換気流量と浮力の関係,日本建築学会大会学術講演梗概集,D-2,pp.285-286,1995.8
- [2-2] 尾崎明仁・須貝高・渡辺俊行・龍有二・赤司泰義・蔵重裕行・宮副泰彰：応力水分ポテンシャルと気相・液相水分流を考慮した熱・水分複合移動解析モデル、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2,pp.265-266,1997-07-30
- [2-3] 梅野徹也・瀬戸裕直・銚井修一・本間義規・齋藤宏昭：壁体内通気層における通気量の実態把握,日本建築学会大会学術講演梗概集,D-2,pp.839-840,2011.7
- [2-4] 松村良夫・横地省一・高橋茂信・佐々木隆：壁体内通気型断熱建物の室内環境の研究その1 研究目的と概要,日本建築学会大会学術講演梗概集,D,pp.1255-1256、1994.7
- [2-5] 田島美沙子・上森清美・酒井孝司・石原修：外断熱通気工法における通気層内の熱・通気特性に関する研究:第2報、夏季・冬季における通気層内伝熱特性,日本建築学会研究報告中国・九州支部,pp.301-304,1996.3
- [2-6] 田島美沙子・上森清美・酒井孝司・石原修：外断熱通気工法における通気層内の熱・通気特性に関する研究（その1）、日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー協会合同研究発表会講演論文集、pp. 371・374. 199S. 11.
- [2-7] 近本智行・田嶋圭一・酒向真考：通気層とアルミ反射材の複合工法による熱負荷低減効果の検証(その1)冬期における実験結果,日本建築学会大会学術講演梗概集,D-2,p107-108,2012年9月
- [2-8] 近本智行・田嶋圭一・酒向真考：通気層とアルミ反射材の複合工法による熱負荷低減効果の検証(その2)夏期における通気層排熱・伝熱特性の定量的評価、学術講演梗概集 2013(環境工学 II),67-68,2013-08-30
- [2-9] 高木理恵・吉野博：壁体内通気層を利用した床下給気型第一種換気システムの性能評価実験,日本建築学会技術報告集,第18号, 187-190, 2003年12月
- [2-10] 高木理恵・吉野博：壁体内通気層を利用した換気・空調併設型システムの性能評価実測その1 夏期における実測調査結果について,日本建築学会大会学術講演梗概集,D-2,pp.683-684、2005.7
- [2-11] 岩田, 相良, 久保：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, pp. 417-420, 1996年9月
- [2-12] 岩田, 相良, 木村：ソーラーハウスの性能評価に関する研究その3 蓄熱コンクリートの蓄放熱量について, 同題その4 太陽熱依存率について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp. 447-450, 1997年9月
- [2-13] 中村, 渡辺, 林, 龍, 赤司：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年2月
- [2-14] 桑沢保夫・赤嶺嘉彦・前真之・中村正吾・盧絃佑：空気集熱式ソーラーシステムの省エネルギー効果の評価に関する研究:(第1報)実測概要と夏期・冬季の計測結果, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集,2063-2066,2010-08-12

- [2-15] 赤嶺嘉彦・桑沢保夫・前真之・中村正吾・盧絃佑：空気集熱式ソーラーシステムの省エネルギー効果の評価に関する研究:(第2報)暖房集熱時の熱移動と暖房エネルギー削減効果の計測結果,空気調和・衛生工学会学術講演会論文集,2067-2070,2010-08-12
- [2-16] 崔榮晋・草川研二・高瀬幸造・前真之：異なる方式の戸建木造住宅用太陽熱暖房における性能比較と運用方法に関する研究,空気調和・衛生工学会学術講演会論文集,24(2),2135-2138,2012-08-20.
- [2-17] 伊藤一哉・坂部芳平・立松宏一・村田さやか・北谷幸恵・鈴木大隆・相曽一浩・松本稔樹・前真之・岩前篤：屋根一体型高効率真空集熱・負荷応答蓄熱等を用いた創エネルギーシステムの技術開発その1:開発要素技術の単体実験結果に基づくシステムシミュレーション結果、日本建築学会学術講演梗概集.D-2,環境工学II,2010(2010):171-172.
- [2-18] 小池克也・伊藤一哉・坂部芳平・鈴木大隆・前真之・岩前篤、屋根一体型高効率真空集熱・負荷応答蓄熱等を用いた創エネルギーシステムの技術開発その2:気象対応型制御システムの概要、日本建築学会学術講演梗概集.D-2,環境工学II,2010(2010):173-174.
- [2-19] 相曽一浩・坂部芳平・立松宏一・北谷幸恵・鈴木大隆・村上知徳・松本徹、屋根一体型高効率真空集熱・負荷応答蓄熱等を用いた創エネルギーシステムの技術開発その3:真空平板型集熱器の開発、日本建築学会学術講演梗概集.D-2,環境工学II,,2011,1063-1064.
- [2-20] 立松宏一・坂部芳平・村上知徳・村田さやか・鈴木大隆・相曽一浩・松本稔樹、屋根一体型高効率真空集熱・負荷応答蓄熱等を用いた創エネルギーシステムの技術開発その4:実棟実験による検証、日本建築学会学術講演梗概集.D-2,環境工学II,2011,1065-1066.
- [2-21] 伊藤一哉・坂部芳平・村上知徳・立松宏一・村田さやか・鈴木大隆・松本徹、屋根一体型高効率真空集熱・負荷応答蓄熱等を用いた創エネルギーシステムの技術開発その5:システムシミュレーションによる年間性能予測、日本建築学会学術講演梗概集.D-2,環境工学II,2011,1067-1068.
- [2-22] 前真之,赤嶺嘉彦,河野良坪,天野至康,松枝伸明,川島範久,海法圭、太陽熱や地冷熱を活用した戸建住宅向け省エネルギー暖冷房システムの構築に関する研究:(その1) 開発システムのコンセプトと居住型実験住宅における温熱環境性能測定条件、日本建築学会大会学術講演梗概集.D-2,環境工学II、2011,1077-1078.
- [2-23] 松枝伸明,前真之,赤嶺嘉彦,河野良坪,天野至康,川島範久,海法圭、太陽熱や地冷熱を活用した戸建住宅向け省エネルギー暖冷房システムの構築に関する研究:(その2) 居住型実験住宅における夏期の日射遮蔽と地冷熱活用による空調エネルギーへの影響、日本建築学会大会学術講演梗概集.D-2,環境工学II,2011,1079-1080.
- [2-24] 坂本雄三,金秀耿,河野良坪,佐藤誠,井田浩文,宮島賢一,前真之、ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発:その1.蓄熱式床暖房システムと実験棟の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集.D-2,環境工学II,2010,1087-1088.

- [2-25] 深澤由梨,金秀耿,河野良坪,佐藤誠,赤嶺嘉彦,前真之,坂本雄三、ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発:その 2.実験棟における室内入射日射量に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集.D-2,環境工学 II,2010,1089-1090.
- [2-26] 金秀耿,河野良坪,佐藤誠,櫻井良一,金田一清香,赤嶺嘉彦,坂本雄三、ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発:その 3.蓄熱式床暖房パネルが冷房負荷に及ぼす影響と日射遮蔽による効果の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集.D-2,環境工学 II,2010,1091-1092.
- [2-27] 梶井浩史,川島宏起,金秀耿,河野良坪,佐藤誠,赤嶺嘉彦,坂本雄三、ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発:その 4.潜熱蓄熱式床暖房パネルの最適設計を目的とした特性把握実験の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集.D-2,環境工学 II,2010,1093-1094.
- [2-28] 川島宏起,金秀耿,河野良坪,梶井浩史,佐藤誠,赤嶺嘉彦,坂本雄三、ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発:その 5.潜熱蓄熱式床暖房パネルの最適設計を目的とした特性把握実験の結果、日本建築学会大会学術講演梗概集.D-2,環境工学 II,2010,1095-1096.
- [2-29] 渋谷周平,高瀬幸造,赤嶺嘉彦,佐藤誠,河野良坪,前真之,坂本雄三、ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発:その 6.潜熱蓄熱式床暖房システムを用いた住宅における測定概要、日本建築学会大会学術講演梗概集.D-2,環境工学 II,2010,1097-1098.
- [2-30] 高瀬幸造,渋谷周平,赤嶺嘉彦,佐藤誠,河野良坪,前真之,坂本雄三、ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発:第 7 報潜熱蓄熱式床暖房システムを用いた住宅における実測結果、日本建築学会大会学術講演梗概集.D-2,環境工学 II,2010,1099-1100.
- [2-31] 金秀耿,河野良坪,佐藤誠,赤嶺嘉彦,梶井浩史,前真之,坂本雄三、ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発:(その 8)冬季における温水 HP 運転方法による日射熱利用に関する検討、日本建築学会大会学術講演会論文集,22(3),1967-1970.
- [2-32] 河野良坪,星川力,川島宏起,佐藤誠,高瀬幸造,赤嶺嘉彦,坂本雄三、ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発:その 10.人工太陽装置を用いた仕上げ材ごとの PCM パネルの蓄放熱特性把握、日本建築学会大会学術講演梗概集.D-2,環境工学 II,2011,503-504.
- [2-33] 福本雅彦,星川力,川島宏起,河野良坪,佐藤誠,高瀬幸造,坂本雄三、ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発:その 11.日射の効率的利用を目的とした PCM パネルの性能予測シミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集.D-2,環境工学 II,2011,505-506.
- [2-34] 金秀耿,宮島賢一,河野良坪,前真之,坂本雄三、ヒートポンプと日射利用による快適性の高い省エネ型蓄熱式床暖房の研究開発:その 12.シミュレーションを用いた他種暖房方式とのエネルギー消費量の比較、日本建築学会大会学術講演梗概集.D-2,環境工学 II,2011,507-508.

- [2-35] 樋山恭助, CFD 解析とマクロモデル解析を融合したシミュレーション手法の開発と建築環境デザイン、博士論文、2010
- [2-36] Air In filtration and Ventilation Centre (AIVC):Technical Note AIVC29 Fundamentals of Multizone Air Flow Model-COMIS,(1990)
- [2-37] CONTAM Multizone airflow and contaminant Transient systems simulation program, online available <http://www.bfrl.nist.gov/IAQanalysis/CONTAM/>
- [2-38] Energy Plus : Energy Simulation Software
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus>
- [2-39] TRNSYS Transient systems simulation program, online available
<http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>
- [2-40] AESim/Heat : SimulationProgramforDynamicHeatLoadhttp://www.ae-sol.co.jp/_src/sc278/AESimH.pdf
- [2-41] 北山直方、図解伝熱工学の学び方、オーム社、1982.01
- [2-42] Stephenson, D.G. and Mitalas, G.P., " Calculation of Heat Conduction Transfer Functions for Multi-Layer Slabs, "ASHRAE Annual Meeting, Washington,D.C.,August22-25,1971.
- [2-43] Mitalas, G.P. and Arseneault, J.G., " FORTRAN IV Program to Calculatez-Transfer Functions for the Calculation of Transient Heat Transfer Through Walls and Roofs ",Division of National Research Council of Canada, Ottawa.
- [2-44] 松尾陽、横山浩一、石野久彌、川元昭吾 : 空調設備の動的熱負荷計算入門、1980 年、日本建築設備士協会

第 3 章

実測による壁通気住宅の実態把握

3.1 はじめに

この壁通気構法に対して、第3章と第4章では実測とシミュレーションを用いて、通気部の仕様、通気量の設計妥当性の検証、自然室温の低下と期間冷房負荷の削減の検討を目的とする。本章では実住宅における夏季実測を行ない、同じ外断熱の内側に通気層をもつ仕様で通気がある場合と通気がない場合の比較を行うことにより、各室および壁通気層の熱的性状を把握し、壁体内の通気自体の効果を確認する。

本章で得られた結果は、壁通気構法による小屋裏の空気温度下降効果が顕著にみられるとともに、今後、IBEC 標準住宅モデルを使用し、実測で得られたデータの導入により、夏期における強制換気による壁体内通気住宅の性能を把握し、シミュレーションを行う。また、壁体内通気構法の効果を検証する上で、一般的に普及している住宅構法である充填断熱構法との比較を行う。

3.2 実測住宅の概要

3.2.1 実測住宅の構成

実測対象は、東京都世田谷区に位置する壁通気住宅、平成14年竣工のH邸である。図3.1、図3.2に実測住宅の外観と二階の内観を示す。H邸は、ロフトのある木造2階建てである。図3.3に実測住宅の一階と二階の平面図を示す。一階は 5460×10010 [mm] で構成され、リビングやキッチン、洗面所などがある。二階は 5460×10010 [mm] で構成され、書斎と3つの洋室がある。ロフトは屋根の内側が見える構造になっている。図3.4に実測住宅の平面詳細図を示す。



図 3.1 実測住宅の外観



図 3.2 二階の内観

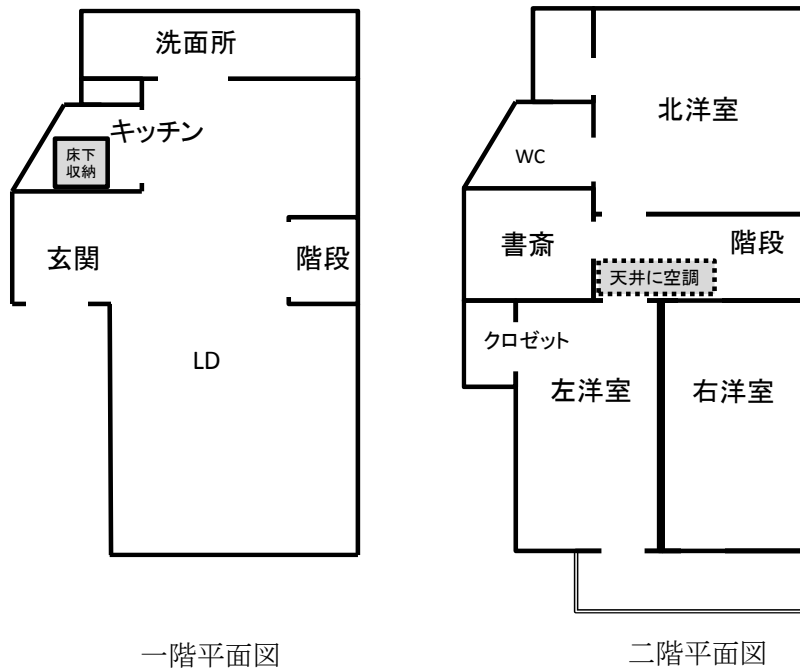


図 3.3 実測住宅の平面図

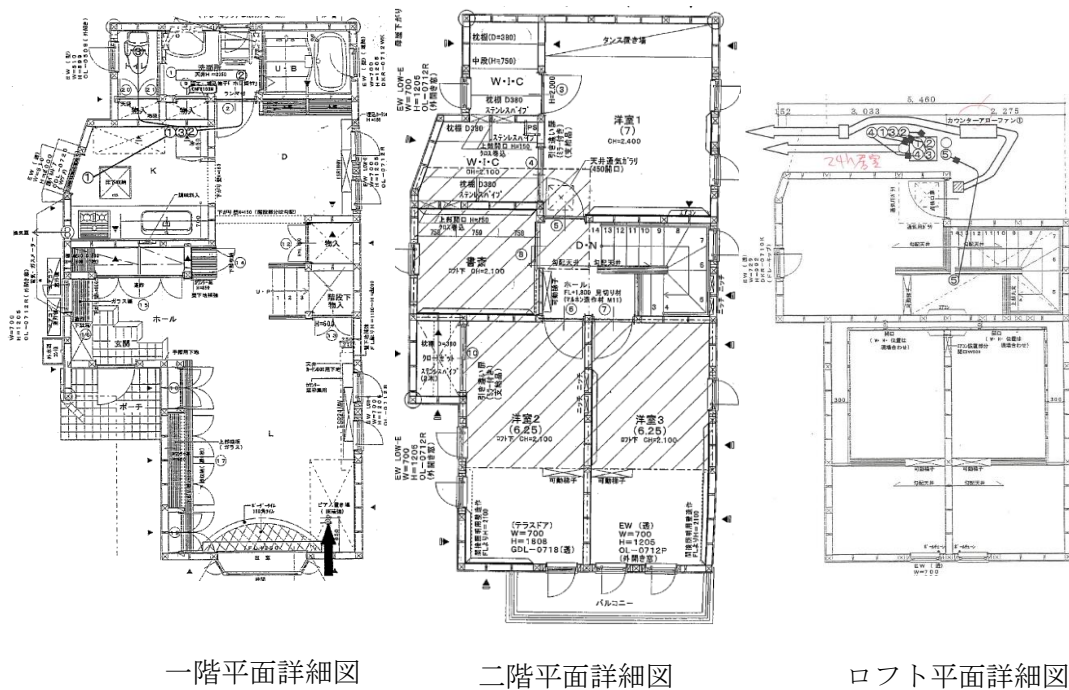


図 3.4 実測住宅の平面詳細図

3.2.2 壁通気システムの概要

住宅の外壁の内部に連続した通気層を設けて躯体内全体の通気を行うシステムがあり、ロフトに設置している小屋裏ファンでコントロールされる。壁通気構法の壁の外張り断熱材には溝があり、壁の内部で空気が通るようになっている。また、床下に開閉可能な換気口を設置し、夏季には手動スイッチで換気口を開くことができる。小屋裏ファンによる壁体内に上昇流が生じることにより、熱くなる時、壁体内の空気は上の換気口から出ていき、下の換気口から吸い込んだ外気が床下で冷却され、上へ吸い上げられる。こうした壁体内の空気の流れによって、壁の内部や屋根裏の熱が溜まらないようにしている。空調は二階の天井、ロフトの近くに設置し、住宅全体の温度制御をコントロールしている。

3.3 実測方法

3.3.1 実測条件

実測は夏期（2014年8月21日～9月9日）において行なった。表3.1に壁通気の有無、壁体内通気量、実測期間などの実測条件を示す。8月21日～22日に換気口を閉めて、壁通気なしとして実測を行なった。9月5日～6日壁通気有りのケースでは、換気口を開けて設定風量を強運転の630m³/hに設定し、実測を行なう。

表 3.1 実測条件

	床下換気口開閉	通気方式	壁体内通気量	実測期間
壁通気なし	×	×	0	8月21日～8月22日
壁通気あり	○	機械通気	630 m ³ /h	9月5日～9月6日

3.3.2 換気量の制御

室内の換気は第3種機械換気を合わせて制御する。換気量は、居住人数の4人及び25 m³/h・人の必要換気量から算出した100 m³/hの常時運転に設定する。壁体内通気では、壁通気有りのケースは、設定風量を常時運転の630m³/hに設定し、実測を行なう。

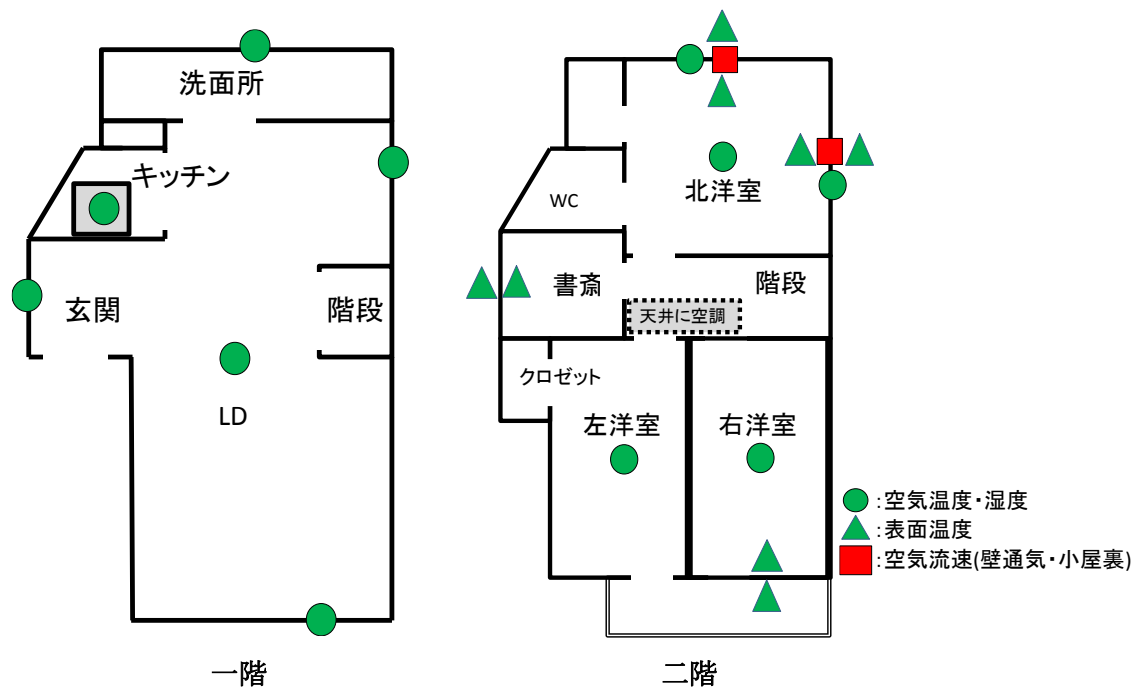


図 3.5 測定点の配置



空気温度・湿度



壁体内通気の空気温度・風速

図 3.6 実測の風景

3.3.3 測定点の配置

測定点の配置は図 3.5 に示す。空気温度・相対湿度を測定するおんどりを使用し、一階、二階、床下空間、東壁の壁通気層出口、北壁の壁通気層出口、小屋裏空間および外気の空気温度・相対湿度を測定した。また、熱電対付きのおんどりを使用し、各壁の外表面温度と内表面を測定した。風速計を使用し、各壁通気層の入り口および出口における空気流速を測定した。図 3.6 に実測の風景を示す。

3.4 壁通気なしケースの実測結果

3.4.1 代表室温及び日射量の時間変動

図 3.7 に、8 月 21 日～22 日の壁通気なしケースの代表室温及び日射量の時間変動を示す。いずれの日も 14 時ごろに気温のピークをもつ一般的な晴れの日である。一階と二階の室温は日射の影響で上昇し、12 時以降は空調が動くため温度が下降し、28℃付近に変動し

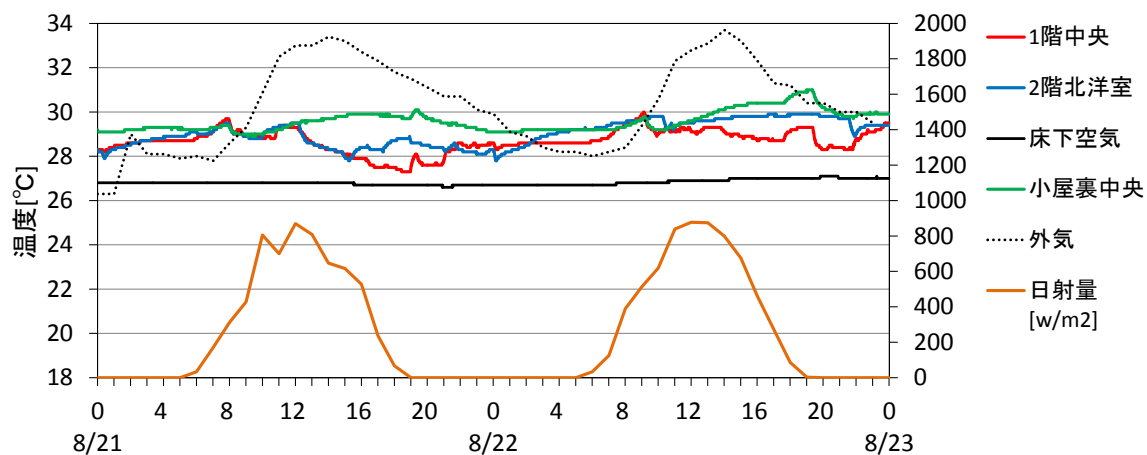


図 3.7 壁通気なし_代表室温及び日射量の時間変動

ている。小屋裏の温度は空調運転の影響を受けにくく、強い日射の影響で 31℃の高温になっている。床下の空気温度は日射および外気の影響を最も受けにくく、27℃に安定している。

3.4.2 壁表面温度の時間変動

図 3.8 に、南壁および西壁の表面温度の時間変動を示す。南壁の外壁が日射の影響を強く受けるため、44℃の高温になっているのに対し、内壁は壁の断熱性能および室温の影響により、31℃まで上昇している。西壁の外壁も日射の影響を強く受けるため、12 時ごろ 44℃の高温になっている一方、内壁は空調運転の影響により、29℃になっている。床下の表面温度

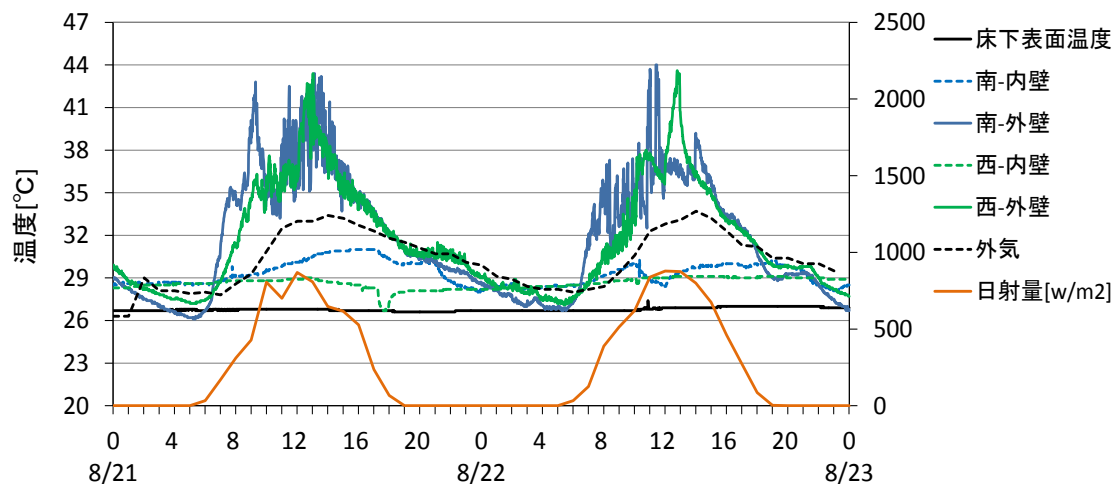


図 3.8 壁通気なし_壁表面温度の時間変動

は日射および外気の影響を最も受けにくく、27℃に安定している。

3.4.3 壁体内通気の出口における温度

図 3.9 に、壁体内通気の出口における温度を示す。一日目では、東壁が日射の影響を強く受けるため、朝 6 時から壁体内通気層の温度が上がり、12 時ごろ 31℃の高温になっているのに対し、北壁は日射の影響を受けにくいため、30℃まで上昇している。二日目も同様な傾向がみられるが、東壁が日射の影響をより強く受けるため、午後 31.3℃の高温になっているのに対し、北壁は日射の影響を受けにくいため、30.7℃まで上昇し、小屋裏中央と同時に最高温度になっている。

3.4.4 内壁における表面温度の時間変動

図 3.10 に、南壁、北壁および西壁の内壁における表面温度の時間変動を示す。一日目では、南壁の外壁が日射の影響を強く受けるため、内壁は壁の断熱性能の影響により、31℃まで上昇している。北壁および西壁の外壁が日射の影響をより弱く受けるため、内壁は壁の断熱性能の影響により、29℃まで上昇している。二日目では南壁および北壁が接している部屋に空調が使用しているため、南壁および北壁の内壁が同様に 30℃に安定している。

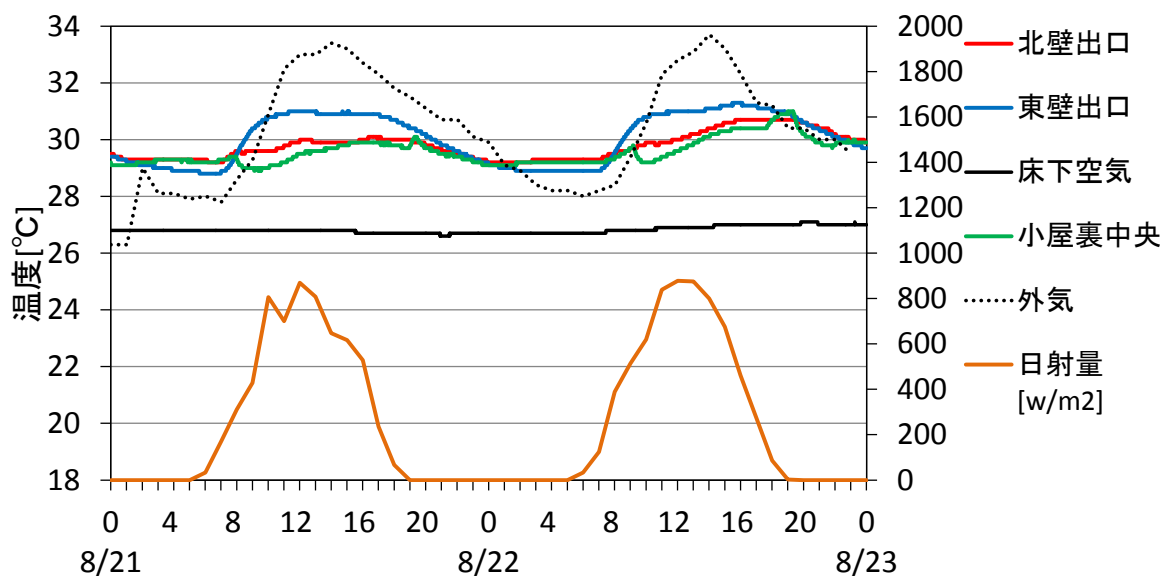


図 3.9 壁通気なし_壁体内通気の出口における温度

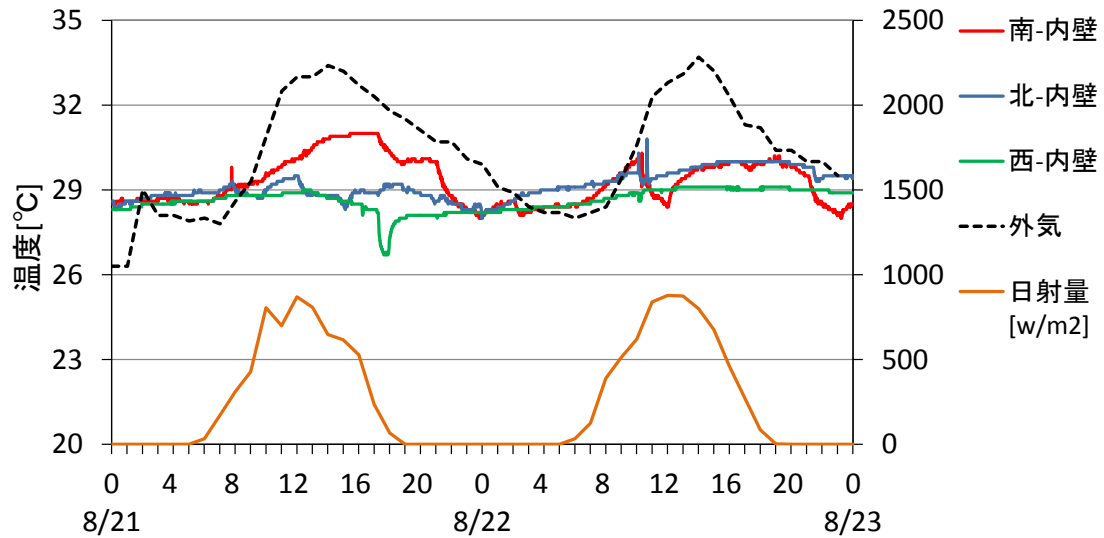


図 3.10 壁通気なし_内壁における表面温度

3.4.5 外壁における表面温度の時間変動

図 3.11 に、南壁、北壁および西壁の外壁における表面温度の時間変動を示す。南壁の外壁が日射の影響を強く受けるため、44℃の高温になっているのに対し、西壁の外壁が一時に44℃まで上がるが、35～40℃までの温度上昇が多くみられる。北壁の外壁が日射の影響をより弱く受けるため、39℃までになっている。

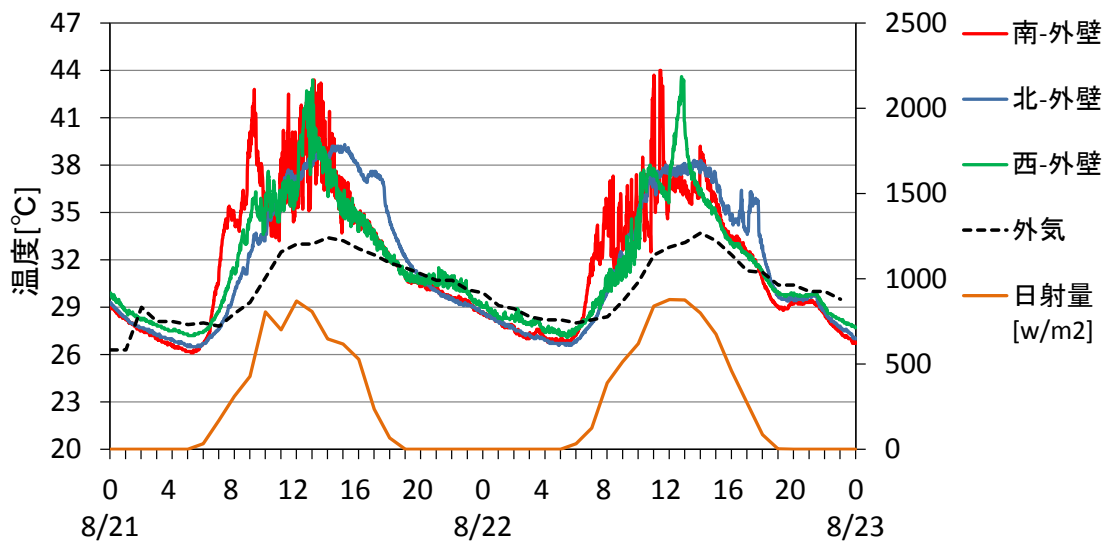


図 3.11 壁通気なし_外壁における表面温度

3.5 壁通気有りケースの実測結果

3.5.1 代表室温及び日射量の時間変動

図 3.12 に、9 月 5 日～6 日の壁通気有りのケースの代表室温及び日射量の時間変動を示す。いずれの日も一般的な晴れの日である。2 日間とも空調は使用していない。一階と二階の室温は日射の影響で上昇し、29℃付近に変動している。小屋裏の温度は強い日射の影響で 30℃の高温になっている。床下の空気温度は日射および外気の影響を最も受けにくく、25℃～26℃に安定している。

図 3.13 に、南壁および西壁の表面温度の時間変動を示す。南壁の外壁が日射の影響を強く受けるため、41℃の高温になっているのに対し、内壁は壁の断熱性能および室温の影響により、午後に 31℃まで上昇している。西壁の外壁も日射の影響を強く受けるため、12 時ごろ 38℃の高温になっているのに対し、内壁は空調運転の影響により、29℃になっている。床下の表面温度は日射および外気の影響を最も受けにくく、23～24℃に安定している。

3.5.2 壁表面温度の時間変動

図 3.13 に、南壁および西壁の表面温度の時間変動を示す。南壁の外壁が日射の影響を強く受けるため、40℃の高温になっているのに対し、内壁は壁の断熱性能および室温の影響により、30℃まで上昇している。西壁の外壁も日射の影響を強く受けるため、12 時ごろ 38℃の高温になっているのに対し、内壁は壁の断熱性能の影響で、29℃になっている。床下の表面温度は日射および外気の影響を最も受けにくく、23～24℃に安定している。

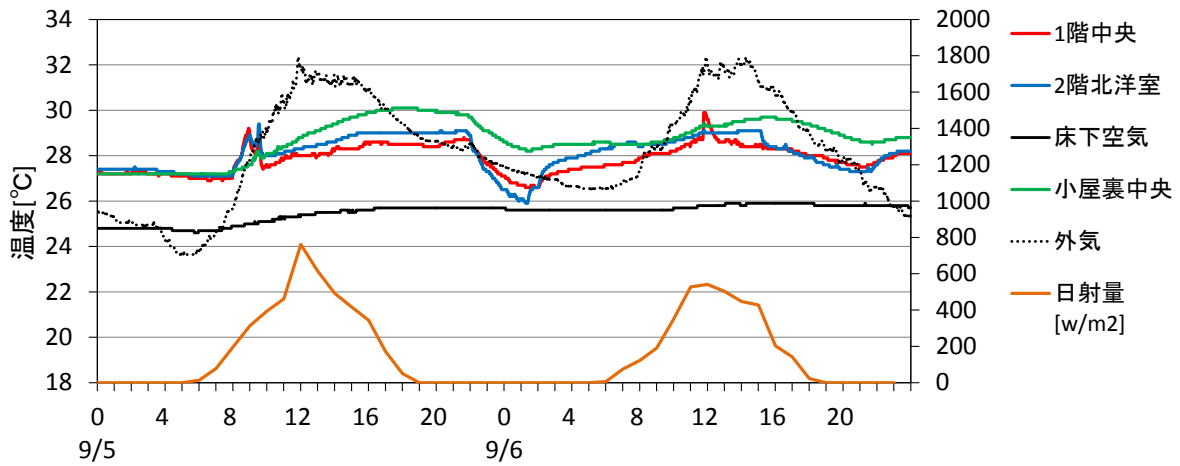


図 3.12 壁通気有り_代表室温及び日射量の時間変動

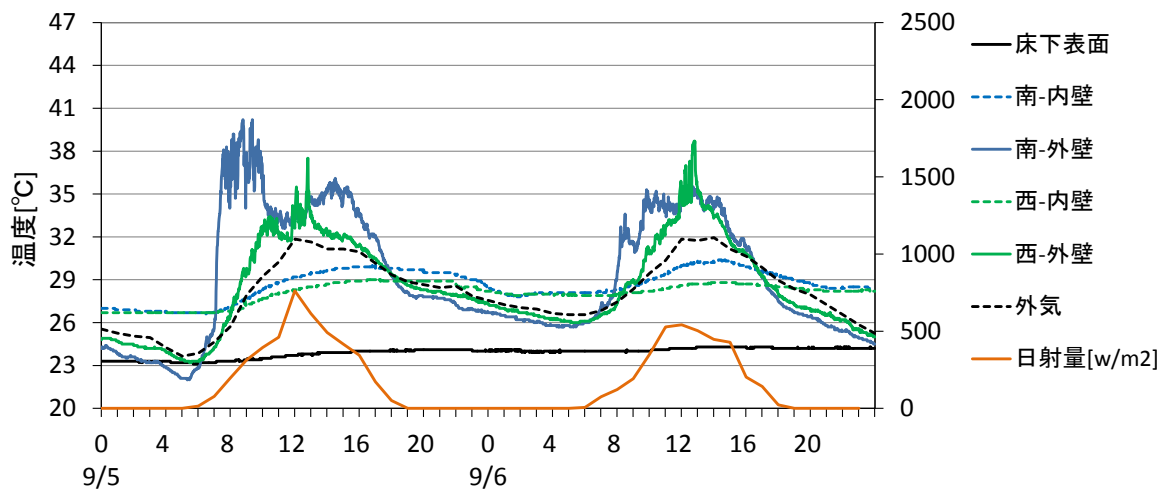


図 3.13 壁通気有り_壁表面温度の時間変動

3.5.3 壁体内通気の出口における温度

図 3.14 に、壁体内通気の出口における温度を示す。外壁が日射の影響を強く受けるため、床下空間からの空気が外壁の熱量を吸収し、朝 6 時から壁体内通気層の温度が上がり、出口における空気温度が 30℃になっている。各壁体内通気層の空気はすべて床下空気から流れるので、各壁の出口における空気温度がほぼ均一に分布している。床下空間の空気温度が吸込む外気の影響より暖められているため、24.7℃～26℃の大幅な変動がみられる。

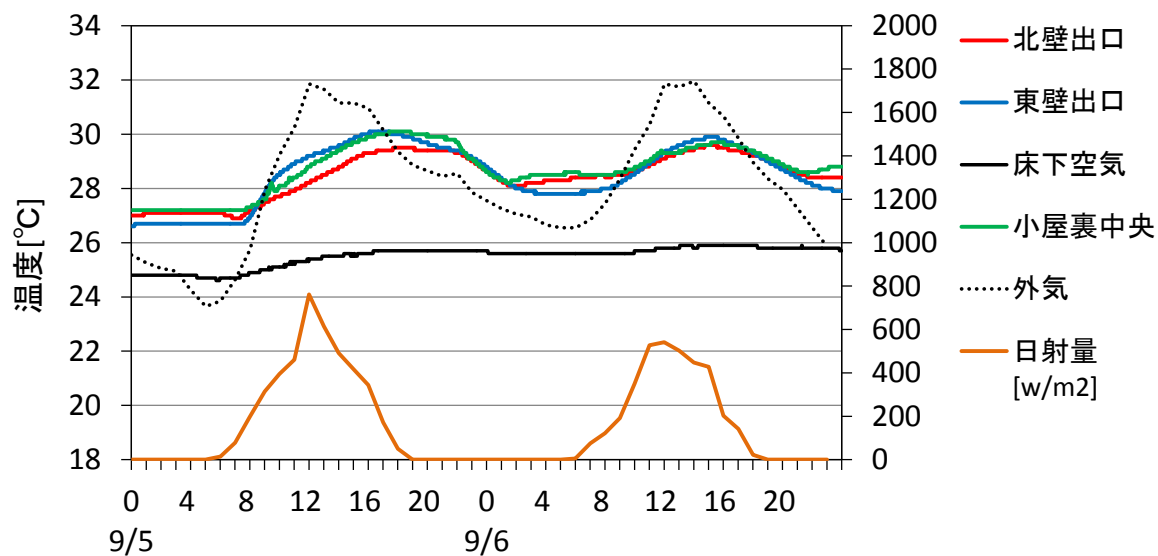


図 3.14 壁通気有り_壁体内通気の出口における温度

3.5.4 内壁における表面温度の時間変動

図 3.15 に、南壁、北壁および西壁の内壁における表面温度の時間変動を示す。一日目では、南壁の外壁が日射の影響を強く受けるため、内壁は壁の断熱性能の影響により、 30°C まで上昇している。北壁および西壁の外壁が日射の影響をより弱く受けるため、内壁は壁の断熱性能の影響により、 29°C まで上昇している。二日目では、南壁の外壁が日射の影響を強く受けるため、内壁が 30.5°C まで上昇している。北壁と西壁の内壁表面温度がそれぞれ 30°C と 29°C になっている。

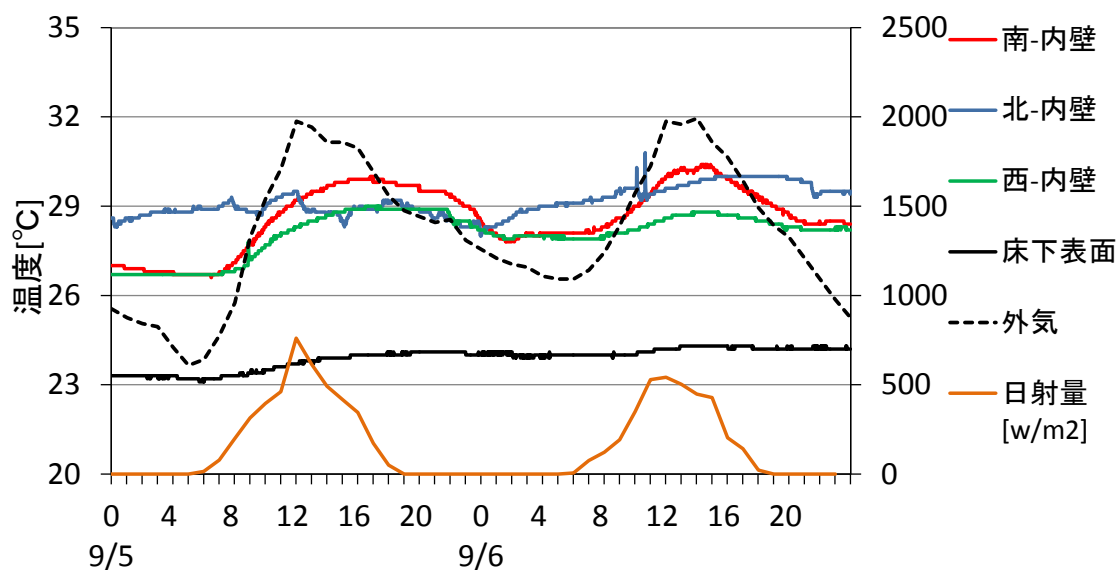


図 3.15 壁通気有り_内壁における表面温度

3.5.5 外壁における表面温度の時間変動

図 3.16 に、南壁、北壁および西壁の外壁における表面温度の時間変動を示す。南壁の外壁が日射の影響を強く受けるため、40℃の高温になっているのに対し、西壁の外壁が一時に38℃まで上がるが、35℃ぐらいの高温が多くみられる。北壁の外壁が日射の影響をより弱く受けるため、外壁内表面では33℃までになっている。

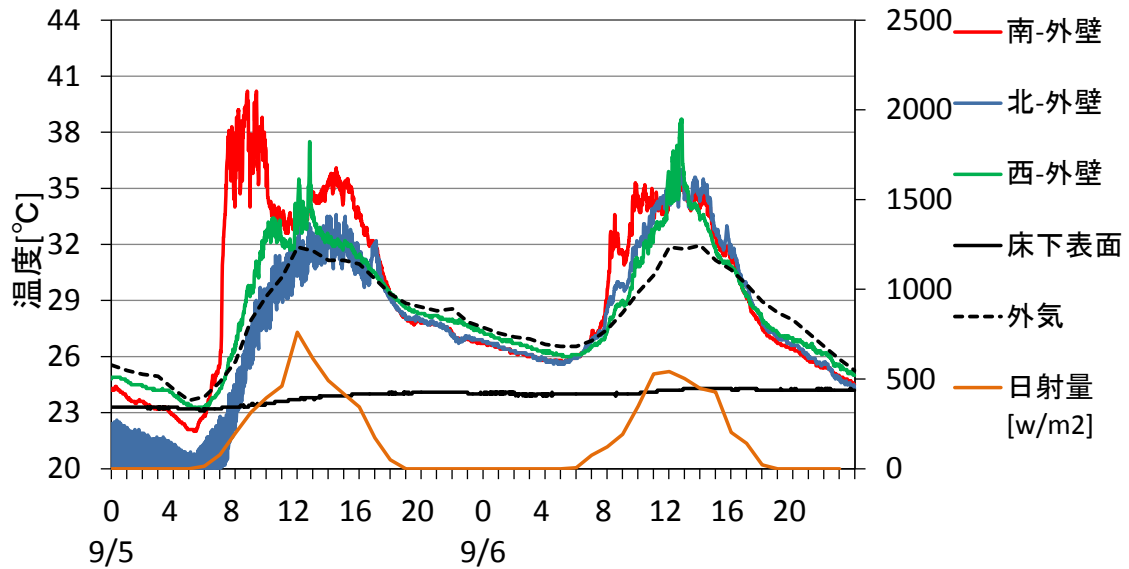


図 3.16 壁通気有り_外壁における表面温度

3.6 各ケースの比較と考査

3.6.1 外壁の表面温度および小屋裏の空気温度の変化

実住宅の測定条件によって、北壁と東壁の壁体内通気流量が測定可能となる。小屋裏ファンを使用していたため、各壁の流速分布が均一にされる。北壁の平均流速が 0.048m/s となり、東壁の平均流速が 0.063m/s となっている。日射の影響により東壁の流速が北壁より速いと考えられる。住宅全体の通気壁長さが 23.4m となり、平均流速を含めて計算すると、壁体内通気の平均通気量が $467.6\text{ m}^3/\text{h}$ となっている。

3.6.2 外壁の表面温度および小屋裏の空気温度の変化

図 3.17 に、小屋裏空間、外壁の表面温度および床下空気の通気有りと通気なしによる温度差の時間変動を示す。各値は通気なしの値から、通気有りの値を引いたものである。床下空気の温度差は -2°C となっている。小屋裏の温度差は、日射が強い時に、 -2°C より低い温度差がみられ、最大温度差が -4°C まで下がり、床下空気における -2°C の温度差と比較すると、壁通気による効果が顕著にみられる。西壁の外壁における表面温度の差は、日射が強い時に、大幅な温度下降がみられ、12 時ごろ最大 -10°C の温度差がみられる。南壁の外壁における表面温度の差は、時間帯によって大きな温度変動があるが、日射が強い午後などで大きな温度下降がみられる。日射が最も強い 12 時ごろ最大 -10°C の温度差がみられ、壁通気による大きな温度下降効果が顕著にみられる。

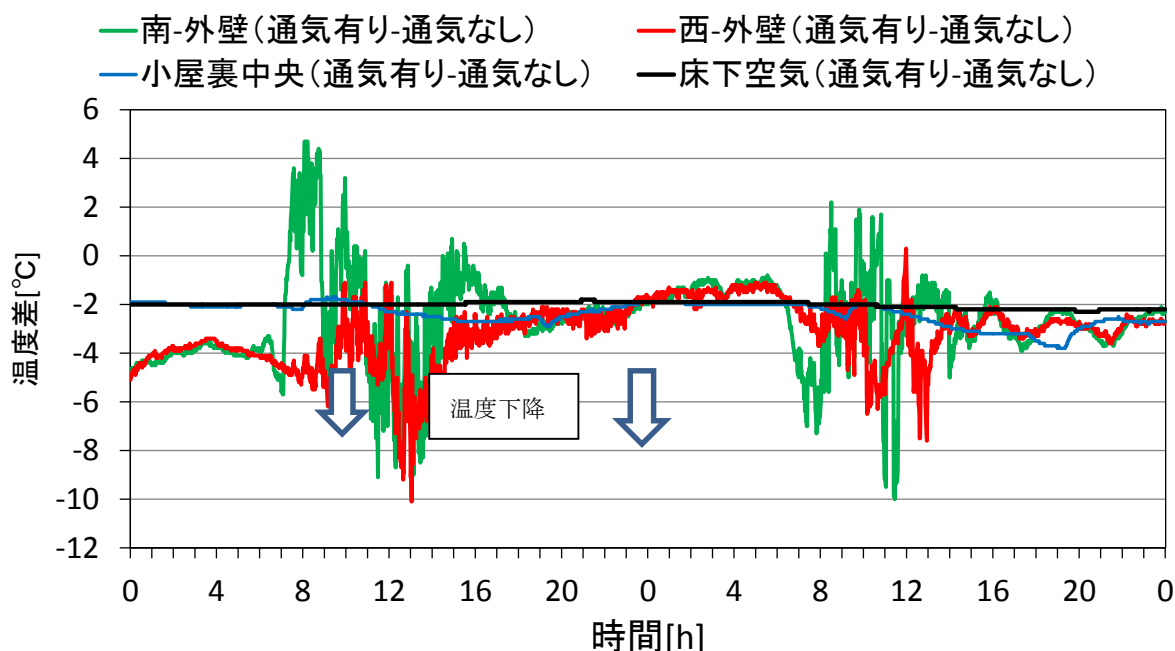


図 3.17 通気有りと通気なしの温度差

3.7 まとめ

本章では、実住宅における夏季実測を行ない、同じ外断熱の内側に通気層をもつ仕様で通気がある場合とない場合の比較を行うことにより、各室および壁通気層の熱的性状を把握し、壁体内の通気自体の効果を確認する検討を行なった。

本章で得られた結果は、外壁における表面温度は、壁通気による大きな温度下降効果が顕著にみられる。また、小屋裏空間の温度差は、壁通気構法による小屋裏の空気温度下降効果が顕著にみられる。

今後、IBEC 標準住宅モデルを使用し、実測で得られたデータの導入により、夏期における強制換気による壁体内通気住宅の性能を把握し、シミュレーションを行う。また、壁体内通気構法の効果を検証する上で、一般的に普及している住宅構法である充填断熱構法との比較を行う。

3.8 参考文献

- [3-1] 松村良夫・横地省一・高橋茂信・佐々木隆：壁体内通気型断熱建物の室内環境の研究 その1 研究目的と概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、1255-1256、1994.7
- [3-2] 蔵重裕行・渡辺俊行・須貝高・龍有二・尾崎明仁・赤司泰義・小野公平・佐藤章造：通気層の熱・湿気移動に関する研究 その1 換気流量と浮力の関係、日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp. 285-286, 1995.8
- [3-3] 梅野徹也・瀬戸裕直・鈴木修一・本間義規・齋藤宏昭：壁体内通気層における通気量の実態把握、日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp. 839-840, 2011.7
- [3-4] 松村良夫・横地省一・高橋茂信・佐々木隆：壁体内通気型断熱建物の室内環境の研究その1 研究目的と概要、日本建築学会大会学術講演梗概集,D,pp.1255-1256、1994.7
- [3-5] 田島美沙子・上森清美・酒井孝司・石原修：外断熱通気工法における通気層内の熱・通気特性に関する研究:第2報、夏季・冬季における通気層内伝熱特性、日本建築学会研究報告中国・九州支部,pp.301-304,1996.3

第 4 章

自然通気及び強制通気による夏期における熱的 性能評価

4.1 はじめに

前章（第3章）では、壁通気住宅における夏季実測を行ない、同じ外断熱の内側に通気層をもつ仕様で通気がある場合とない場合の比較を行うことにより、各室および壁通気層の熱的性状を把握し、壁体内の通気自体の効果を確認する検討を行なった。前章で得られた結果は、外壁における表面温度は、壁通気による大きな温度下降効果が顕著にみられる。また、小屋裏空間の温度差は、壁通気構法による小屋裏の空気温度下降効果が顕著にみられる。

壁通気構法を標準住宅に導入するため、標準住宅における壁通気量・気候条件などの特性を踏まえたエネルギー消費量、温熱環境などの全体的な熱的性能評価を検討する必要がある。しかし、時間的、費用的な制約によってすべての住宅を検討することが客観的に不可能である。したがって、数値解析による検討手法が適切な手段であると考えられている。

4.2 研究目的

本章では、IBEC 標準住宅モデルを使用し、壁通気構法を使用する住宅の壁体内通気を含み建物内空調・熱輸送性状に関するシミュレーションモデルを作成してシミュレーションを行い、通気部の仕様、通気量の設計妥当性および夏期における熱的性能評価について検討を行う。本章では、下記の内容で検討を行う。

① 住宅全体の通気性状の確認および各部開口面積の感度解析

住宅全体にわたり十分な通気が生じていることの確認を行った。また、感度解析による通気部仕様の数値的検討を行った。

② 自然通気がある場合、ない場合および充填断熱構法との比較

同じ外断熱の内側に通気層をもつ仕様で通気がある場合とない場合の比較を行うことにより、壁体内の通気自体の効果の検証を行ってきた。また、壁体内通気構法の効果を検証する上で、一般的に普及している住宅構法である充填断熱構法との比較を行った。夏期の総冷房時間が短くなり、期間冷房負荷が低減されることが確認できた。

③ 強制換気による壁体内通気住宅の性能評価

IBEC 標準住宅モデルを使用し、小屋裏ファンの導入により、夏期における強制換気による壁体内通気住宅の性能の把握のため、シミュレーションを行なった。小屋裏ファンの流量の変更により、各通気壁の流速の性状を把握し、小屋裏ファンの導入効果が得られることを確認することを目的としている。夏期の総冷房時間が短くなり、期間冷房負荷が低減されることが期待できる。この効果に関して定量的に評価を行った。

4.3 研究方法

4.3.1 シミュレーションプログラム

シミュレーションは熱計算プログラム TRNSYS を用いた。TRNSYS(TRaNsient SYstem Simulation)は省エネルギー化と快適性を両立させる建築環境を設計することを目的とした温熱環境シミュレーションプログラムの1つである。最初は負荷計算を目的として、開発されたものではなく、太陽熱システムによる動的シミュレーション及び設計のために作られた。アメリカの Wisconsin 大学で開発され、現在はドイツ、フランスなど世界各国で開発が継続されている。

TRNSYS は熱負荷計算において「伝達関数法(Transfer Function)」を基にしており、モジュール構成を用いているため拡張性及び交換性にその長所を持つ。建物の動的熱負荷計算以外にも HVAC システムの解析及び規模算定、太陽熱システムの解析、制御システムの分析等設備システムにおいて応用性を発揮する。また、建物と設備システムを含む全体システムの解析を通じて設備または建物の総合的な評価が可能である。

TRNSYS で冷暖房に費やされるエネルギー量及び熱負荷を算出するために、多様なモジュールを用いる。計算目的に合わせ概略的な熱負荷計算のためのデグリーデー法や伝達関数法を用いた詳細な方法すべてを提供する。モジュールの1つである Type 56 では伝達関数法を基にして壁、天井、床などをモデリングする。壁体の内外側すべてを対象にすべての放射熱交換(太陽からの短波及び他の壁体、天空からの長波すべて)を考慮する。複数室で構成された建物に対するデータを入力するのが複雑である。TRNSYS では、「TRNBuild」を用いて建物データを入力して複数室の設定を行い、「Simulation Studio」で Type 56 としてシミュレーションに利用される。これには壁体および窓の構成、各材料の物性地及び設定温湿度、在室者、照明器具の数等といった室内条件をファイル形式で作る。図 4.1 にプログラムの概要を示す。

4.3.2 空気流れの設定

ゾーン相互間、建物外部から内部への隙間風、換気装置での空気流動は TRNFLOW による連成により計算される。多数室空気流動モデルは「Node」と呼ばれる節点と「Link」と呼ばれる連結でネットワークされる。「Node」は建物外界環境と部屋を表し、「Link」は開口部、ドア、隙間、換気口はもちろん、ダクト、ファンなどの換気系統を表す。解析においての空気流動モデルは入力 Node 温度から始まり、各 Link に対応する空気流量を計算する。これらの空気流動は最終的に室内温度を出力とする熱負荷モデルで使用される。図 4.2 に熱・換気を同時に計算するモデルの概要を示す。

IBEC 住宅モデルの熱負荷計算では 0.5 回/h の換気回数に一部の部屋における局所換気で換気負荷を計算する。Node の設定は窓とドアの開口部は「Large Opening」とし、他の壁面は「Crack」として設定した。TRNFLOW の連成では第 3 種換気を行うと想定し、計 5 室において排気ファンの境界条件として入力した。ファンの仕様は、IBEC 住宅モデルの熱負荷計算における局所換気量想定値に合わせた市販品のカタログを参照した。

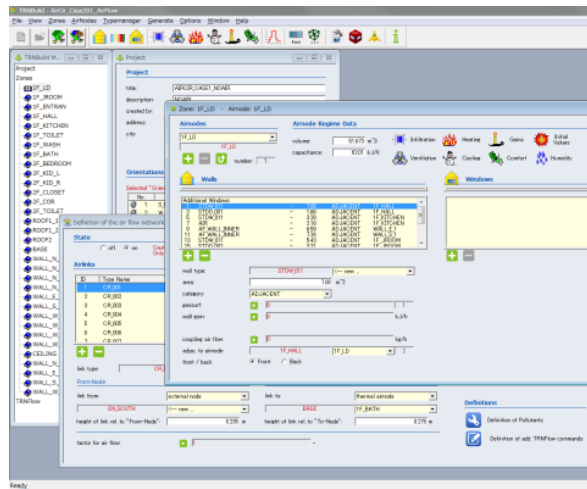


図 4.1 表示画面

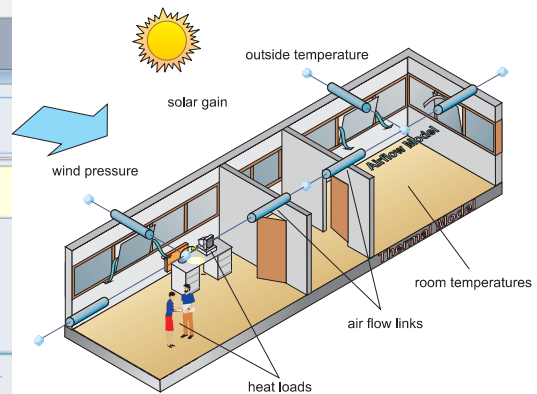


図 4.2 熱・換気を同時に計算するモデル

4.3.3 IBEC の標準住宅モデルの概要

図 4.3 及び表 4.1、表 4.2 に検討対象空間の概要と基本データを示す。検討対象住宅として、図 4.3 に示した建築環境・省エネルギー機構によって提案されている住宅モデル(以下、IBEC 住宅モデルと呼ぶ)を用いる。住宅モデルは延べ床面積 120.07m^2 の木造の 2 階建てであり、居室は 1 階に LD、キッチン、和室、2 階に洋室と寝室の計 5 室から構成される。この住宅モデルは日本の気候区分によって開口部面積等の詳細部分が異なる 2 つのモデルが提案されており、本研究においては東京都の気候に対応した建物モデルを用いて検討する。このモデルにおいて、人員、空調、内部発熱、換気などの標準スケジュールが、生活調査に基づいて定められている。

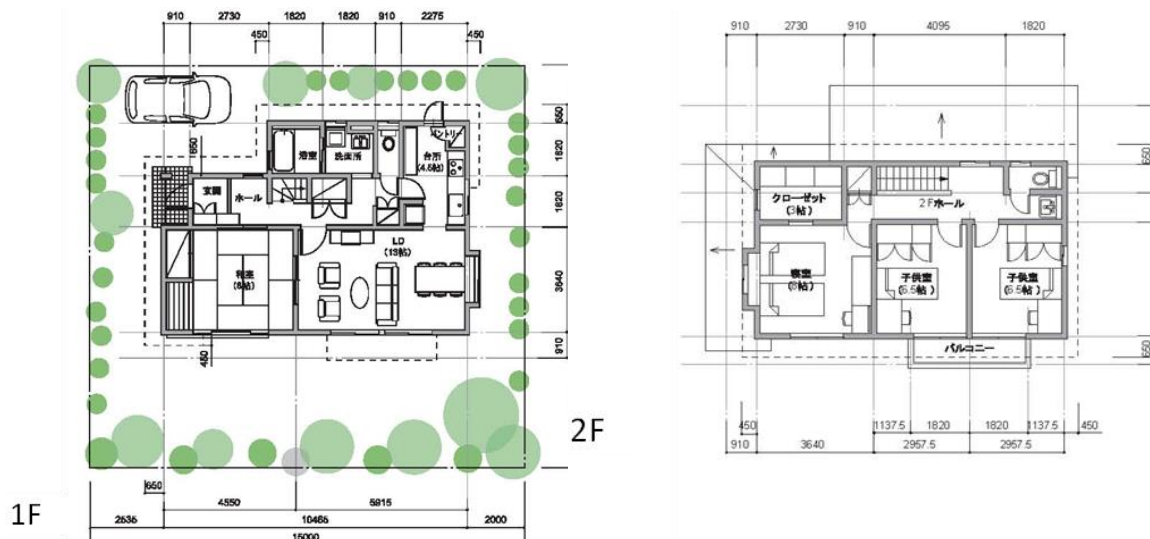


図 4.3 検討対象空間

表 4.1 検討対象空間の概要

階	室名称	床面積(m ²)	天井高(m)	容積(m ³)
1	居間(L)及び食堂室(D)	21.53	2.4	51.67
	台所(K)	8.28	2.4	19.87
	和室	16.56	2.4	39.74
	浴室	3.31	2.4	7.94
	洗面所・トイレ	4.97	2.4	11.93
	廊下・玄関	13.25	2.4	31.80
1階小計		67.90	-	162.95
2	主寝室	13.25	2.4	31.80
	子供室	10.77	2.4	25.85
	子供室	10.77	2.4	25.85
	クローゼット	4.97	2.4	11.93
	トイレ	3.32	2.4	7.97
	廊下・階段	9.11	2.4	21.86
2階小計		52.17	-	125.26
合計		120.07	-	288.21

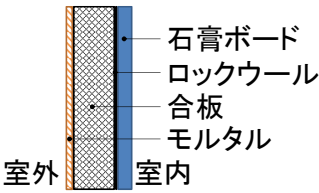
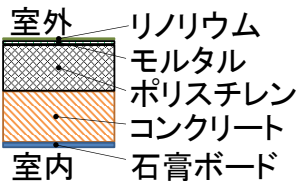
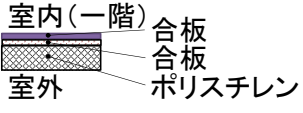
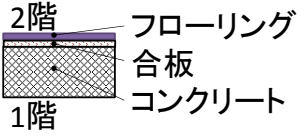
表 4.2 検討対象空間における開口部の仕様

階	室名称	方位	窓面積(m ²)
1	居間(L)及び食堂室(D)	南	6.62
		東	1.66
	台所(K)	東	0.73
	和室	南	3.31
	洗面所・トイレ	北	0.56
2	主寝室	南	3.31
		西	0.83
	子供室	南	3.31
	子供室	南	3.31
		東	0.83
	トイレ	北	0.41
	廊下・階段	北	0.83

4.3.4 IBEC の標準住宅モデルによる壁体の設定

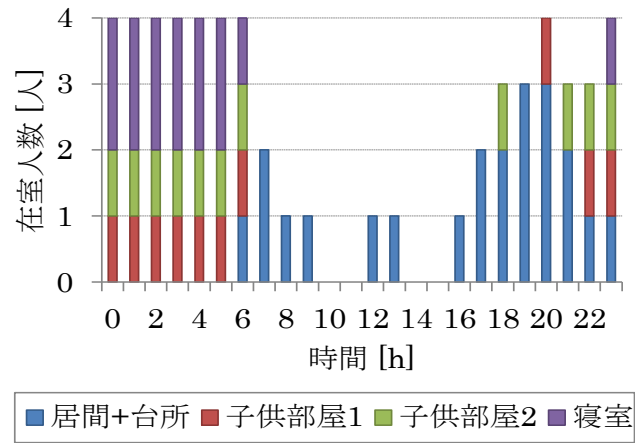
表 4.3 に建物外皮の境界条件詳細を示す。建物外皮及び開口部の境界条件は、次世代省エネルギー基準に従う物性値（熱損失係数 2.7 相当）をそれぞれ用いる。窓は複層ガラスを想定し、2.9 W/m・K である。各壁面における熱橋は考慮しない。

表 4.3 検討対象空間における開口部の仕様

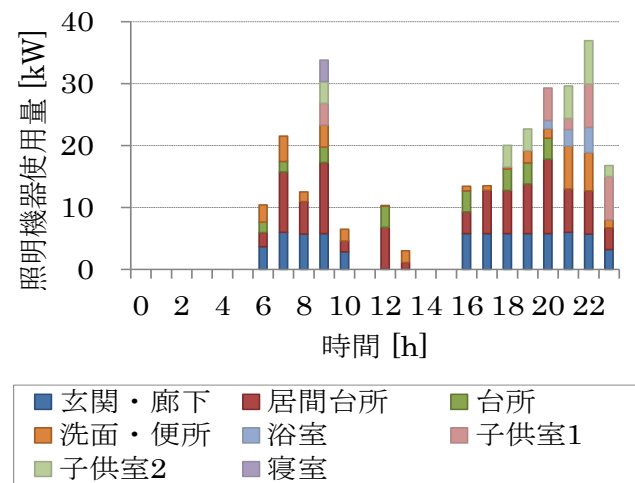
(a) 外壁					
		厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率： 0.383)	比熱 (kJ/kg・K)	密度 (kg/m ³)
	石膏ボード	13	0.211	1.0	900
	ロックウール	89	0.036	0.9	80
	合板	1	0.150	1.2	800
	モルタル	30	1.400	1.0	2000
(b) 屋根					
		厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率： 0.293)	比熱(kJ/kg・ K)	密度 (kg/m ³)
	リノリウム	2	0.169	1.0	1000
	モルタル	6	0.700	1.0	1400
	ポリスチレン	90	0.031	1.25	20
	コンクリート	100	1.400	1.0	800
	石膏ボード	9	0.350	1.0	1200
(c) 床（一階）					
		厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率： 0.398)	比熱(kJ/kg・ K)	密度 (kg/m ³)
	合板	12	0.150	1.2	800
	合板	15	0.150	1.2	800
	ポリスチレン	54	0.025	1.25	15
(d) 床（中間の床）					
		厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率： 1.687)	比熱(kJ/kg・ K)	密度 (kg/m ³)
	フローリング	12	0.140	1.2	650
	合板	12	0.150	1.2	800
	コンクリート	100	0.389	1.0	800
(f) 間仕切り					

4.3.5 空調、内部発熱のスケジュール

居住者の家族構成は4人家族と設定した。各部屋における在室者、照明および機器からの発熱スケジュールを図4.4に示す。表4.4に空調スケジュールを示す。



(a) 在室者スケジュール



(b) 照明設備スケジュール

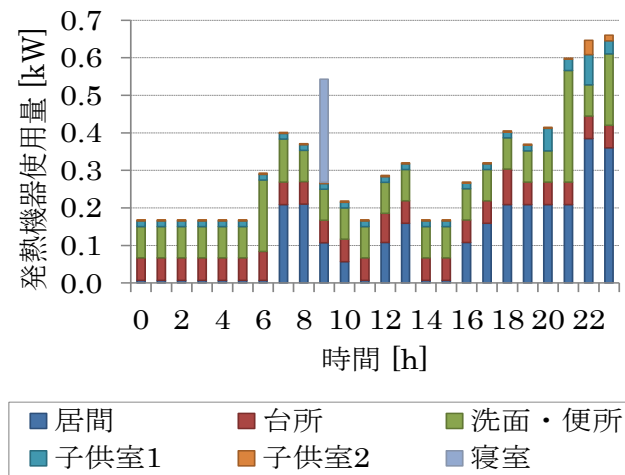


図 4.4 在室者、照明設備、発熱機器スケジュール

表 4.4 空調スケジュール

		時間	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0
居間台所 (LDK)	暖房	平日																									
	休日																										
	冷房	平日																									
	休日																										
子供室1	暖房	平日																									
	休日																										
	冷房	平日																									
	休日																										
子供室2	暖房	平日																									
	休日																										
	冷房	平日																									
	休日																										
寝室	暖房	平日																									
	休日																										
	冷房	平日																									
	休日																										

*矢印は空調時間帯、網掛け部分は就寝時を示す。

4.3.6 壁通気住宅の壁体ゾーンの設定

壁体内の通気層にあたる空間を想定して、建物の外周部に壁体ゾーンを新たに設定した。壁体ゾーンは図 4.5 と図 4.6 に水色で示す。

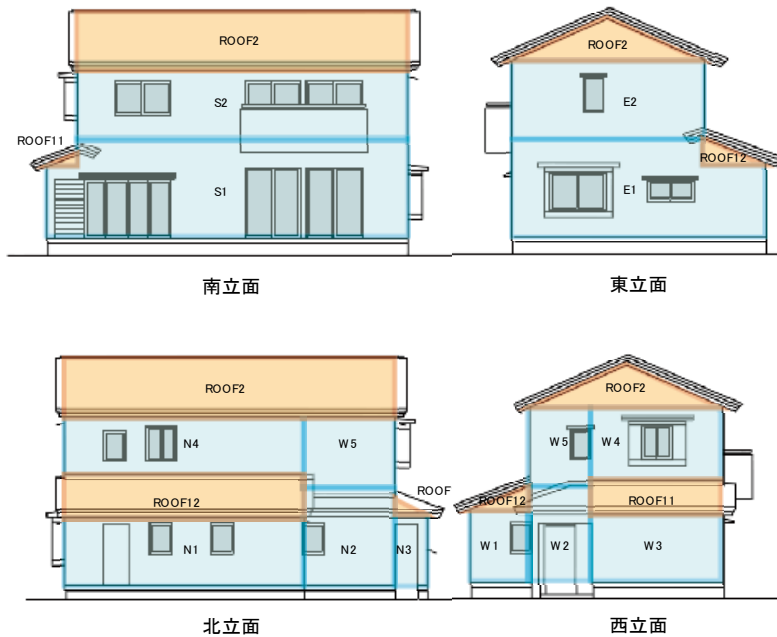


図 4.5 立面図

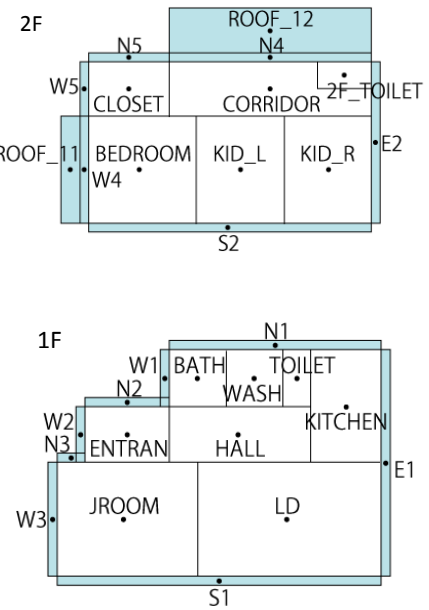


図 4.6 平面図

4.3.7 エアリンクの設定

TRNFlow 内で、各ノードをつなぐエアリンクに関して、圧力差と質量流量の関係は以下の式に基づいて計算される。

$$\dot{m} = \alpha A \sqrt{\Delta p \cdot 2 \rho} [\text{kg/s}]$$

\dot{m} : 質量流量[kg/s] α [-] A : 開口面積[m^2] Δp : 圧力差[Pa] ρ : 空気の密度[kg/m^3]

したがて、各エアリンクで αA の値の設定が必要となる。今回は実験等により各箇所の α の値を測定することができないため、一般的な値として一律に $\alpha=0.6$ と想定をして、各箇所の開口面積 A のみを個別に設定した。

床下から壁体内を経由して棟に至る空気流通経路の中で、図 4.7 の丸印の部分が大きな抵抗となりうる。したがって、これらの個所にエアリンクを設け、その開口面積を入力した。

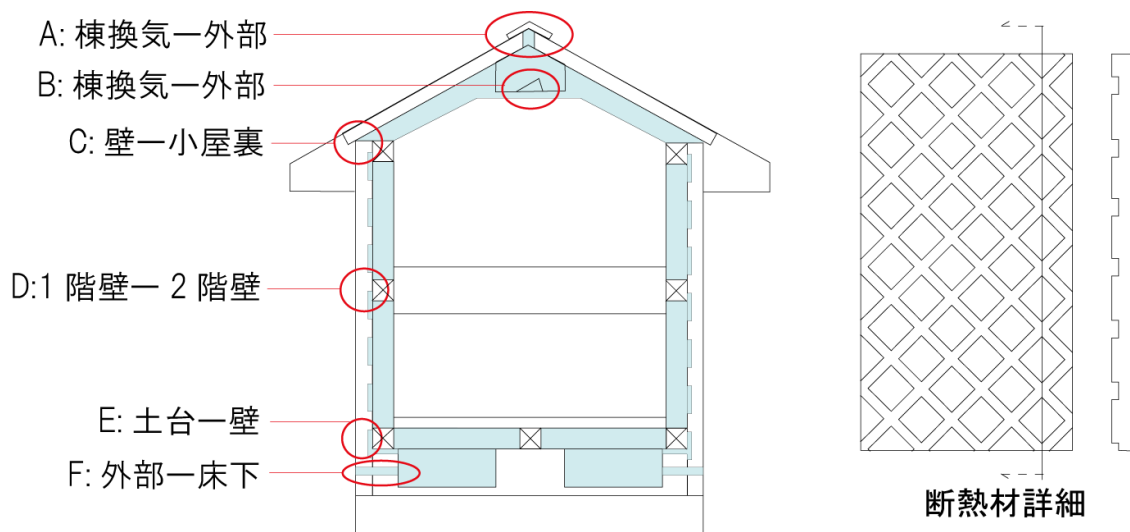


図 4.7 空気流通経路のうち抵抗となる部分

以上を踏まえ、図 4.8、図 4.9 に示すようにエアリンクを設定した。エアノードを黒丸、それらをつなぐエアリンクを青の線で示す。南側、東側の壁面など 1, 2 階で連続する壁面は、図 4.7 の D の抵抗部分を設定するために 1, 2 階でそれぞれのノードに分割してエアノードでつないで接続している。

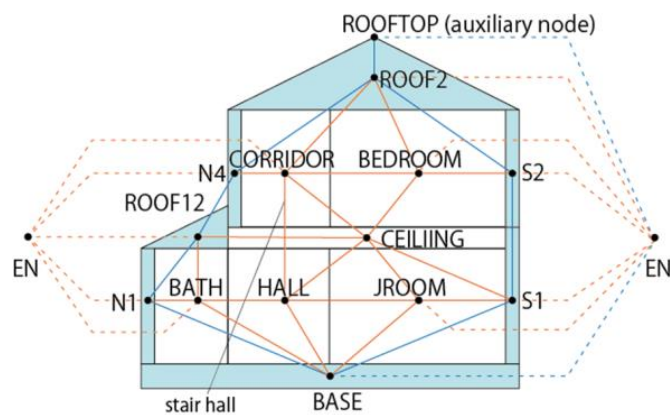


図 4.8 エアリンクの断面図

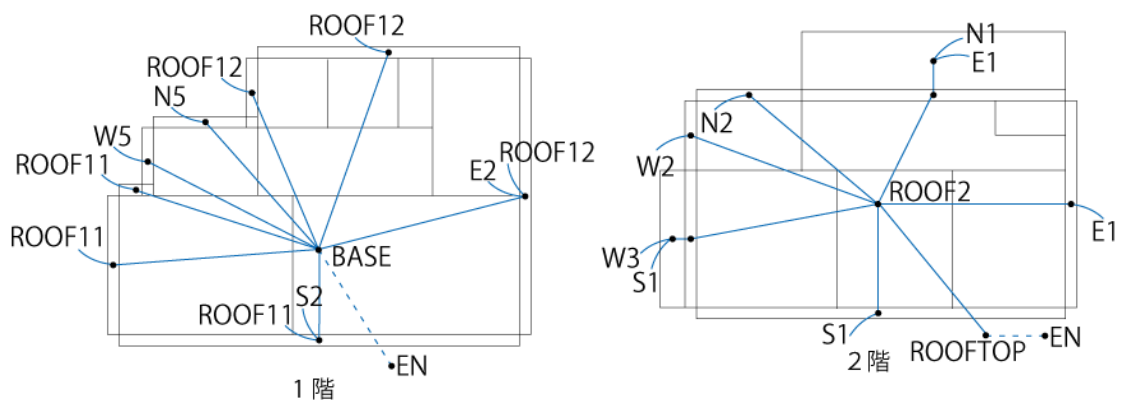


図 4.9 エアリンクの平面図

4.4 通気量に対する各部開口面積の感度分析

IBEC の標準住宅モデルに基づいて、シミュレーションモデルを作成して夏期におけるシミュレーションを行い、各部の基本的な通気性状を検討した。さらに、通気経路内各部の仕様検討のため、各部の開口面積を変更した際の通気量に対する影響の大きさの分析を行った。

4.4.1 シミュレーション概要

夏期のシステムの概略を図 4.10 に示す。夏期は小屋裏最上部と基礎側面に設けた通気口を解放することで自然換気による通気が生じ、外気が床下から壁体内と小屋裏を通り棟から排気される。その際に導入空気が床下空間で冷却されると同時に、小屋裏の熱気が排出される効果が期待できる。冬期は、通気経路内で空気が循環するよう通気口を閉じる。以下、室内の空気質維持のための全般換気・局所換気を「換気」、壁体内の通気層を介した空気の流通を「通気」として区別する。室内の換気経路と壁体内の通気層とは独立している。

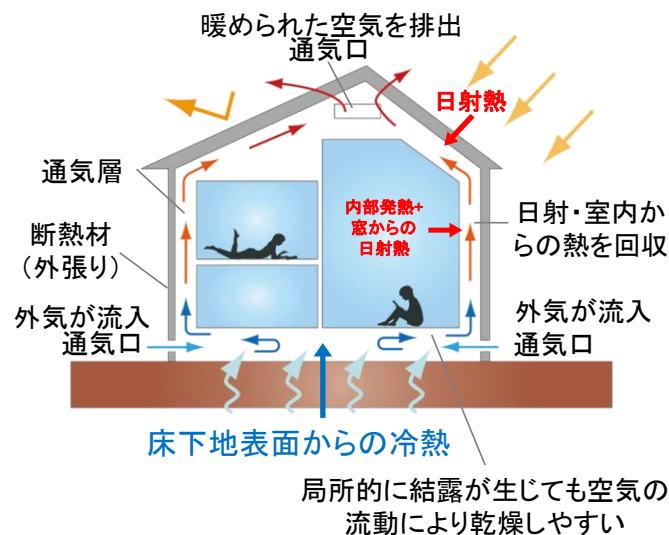


図 4.10 夏期のシステムの概略

4.4.2 計算条件

設定条件を表 4.5 に示す。モデルを単純化した上で基本的な通気性状のポテンシャルを把握するため、室同士あるいは室内・通気層間の漏気、対流による室同士の空気流通は想定しておらず、通気層以外の空気流通はない条件で検討を行った。通気層についても、水平方向に隣接する外壁の間での通気は考慮していない。建物自体の性能の比較のため、換気、空調はなしの条件とした。気象データは標準年の拡張アメダス気象データを使用し、無風の条件とした。

4.4.3 解析ケース

通気経路各部の開口面積を変更した際の、住宅全体の通気量に対する影響の大きさを検討するために、通気抵抗となる通気壁、小屋裏通気口、床下通気口の3要素それぞれの開口面積の値を0.5倍もしくは5倍に変更した。要素の組み合わせを含め、表4.6の11ケースを設定した。

表 4.5 設定条件

建物 計算条件	通気壁-室外側		押出法ポリスチレンフォーム 50mm +空気層 15mm+タイル 10mm
	通気壁-室内側		石膏ボード 13mm
	通気層厚さ		120mm
	屋根		押出法ポリスチレンフォーム 50mm +空気層 30mm+合板 10mm+スレート 5mm
	基礎		ビーズ法ポリスチレンフォーム (EPS) 50mm+コンクリート 150mm+EPS 50mm
	内壁・天井・床		$U=3.125 \text{ W/m}^2\text{K}$, $4.082 \text{ W/m}^2\text{K}$, $4.082 \text{ W/m}^2\text{K}$
	窓		複層ガラス $U=1.8 \text{ W/m}^2\text{K}$, 遮蔽係数=0.5
	内部発熱		あり (IBEC の標準スケジュールに従う)
	空調		なし
	床下地表面温度		夏季における 1m 深の平均地中温度 21.3°C から算出
	気象データ		拡張アメダス (標準年 2000 年版, 東京)
	外部風		なし
	計算期間		7/21-8/21 (+助走期間 3 日)
エアリンク	開口面積 $A[\text{m}^2]$	①壁体-各部, 壁体同士	$0.00299 \text{ m}^2/\text{m}$ (壁面単位長さあたりの開口)
		②棟通気ユニット-外気 (EN)	0.0919
		③小屋裏 (ROOF2)-棟通気ユニット (ROOFTOP)	0.0755
		④外気 (EN)-床下空間 (BASE)	0.0720
	各定数		$\alpha=0.6$, $\rho=1.2$, $n=0.5$

表 4.6 解析ケース

	①通気壁	②③小屋裏通気口	④床下通気口
Case1	-	-	-
Case2	$\times 5$	-	-
Case3	-	$\times 5$	-

Case4	—	—	× 5
Case5	× 0.5	—	—
Case6	—	× 0.5	—
Case7	—	—	× 0.5
Case8	—	× 5	× 5
Case9	—	× 0.5	× 0.5
Case10	× 5	× 5	× 5
Case11	× 0.5	× 0.5	× 0.5

4.4.4 解析結果

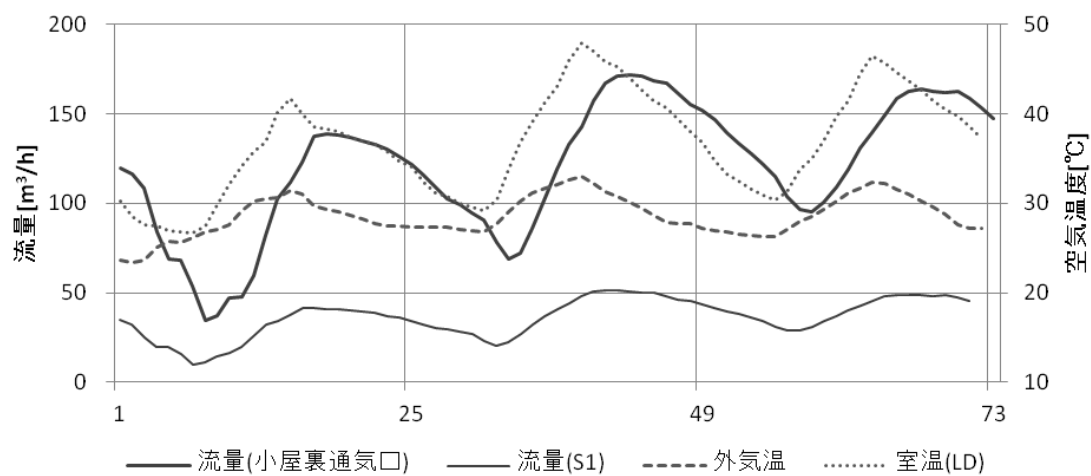


図 4.11 夏期の代表ケース (Case1)

図 4.11 に代表ケース (Case1) に関して、代表日 3 日間 (8/8～8/10) における小屋裏の通気量と外気温、LD の室温の関係を示す。以下、流量は通気経路上の上方向を正として表す。室温は外気温とは同時に変動し、ピークの時間帯が一致している。全体の流量 (小屋裏通気口) はその両者に対し 2・3 時間遅れて増減し、期間平均で $114.8\text{m}^3/\text{h}$ の流量が得られたが、この時間遅れに関してはさらに検討を要する。各壁面の代表として S1 内の流量を示すが、全体の流量にほぼ比例するように増減し、正の値を維持している。また、図 4.12 に壁面ごとの壁面単位長さあたりの期間平均流量を示した (淡色は 1 階、濃色は 2 階の壁面を表す)。すべての壁面は正の流量をとり、1 階の平均で壁面 1m あたり $3.80\text{m}^3/\text{h}$ 、2 階の平均で壁面 1m あたり $3.14\text{m}^3/\text{h}$ の流量がみられた。

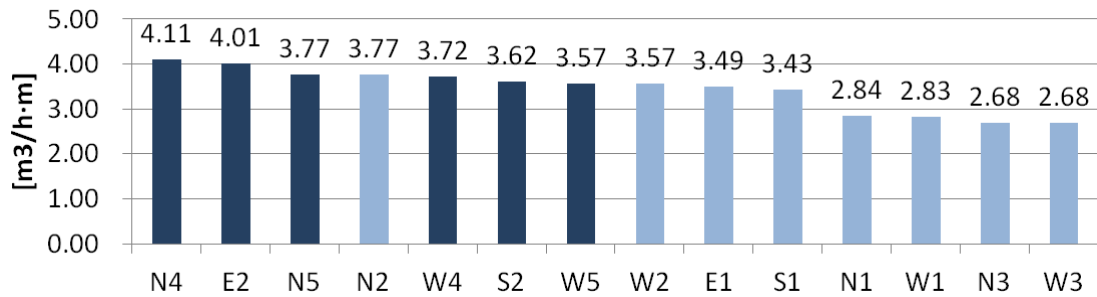


図 4.12 壁面ごとの単位壁面長さあたり期間平均流量

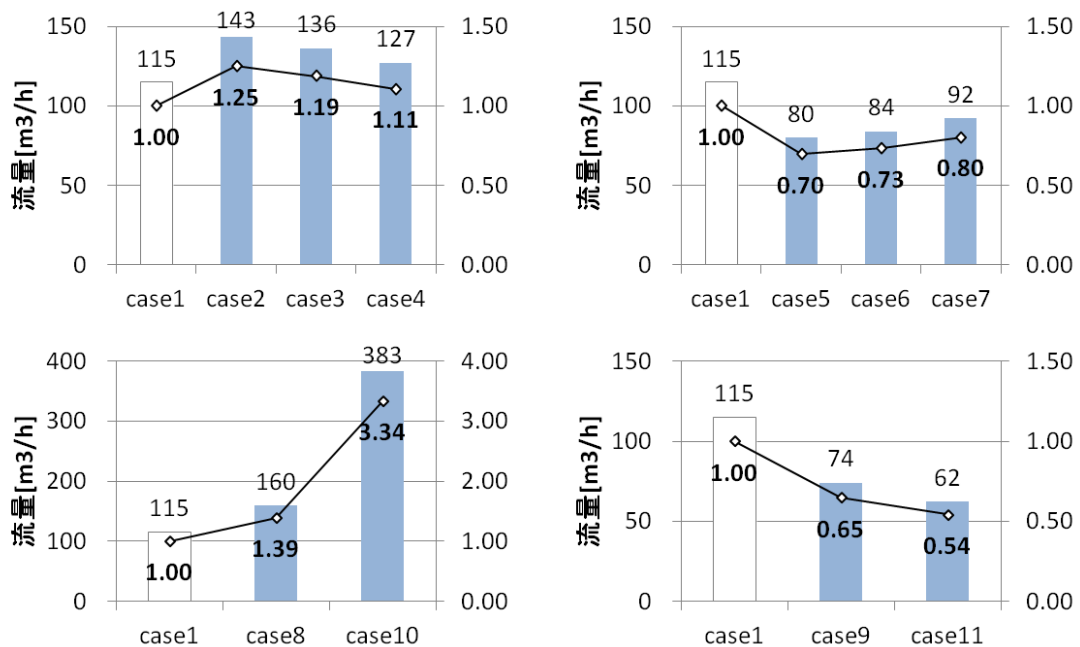


図 4.13 ケースごとの期間平均総流量の比較

感度解析の分析を図 4.13 に示す。各要素単体で開口面積を 5 倍にした場合 (Case2-Case4)、0.5 倍にした場合 (Case5-Case7) とともに通気壁、小屋裏通気口、床下通気口の順で通気量に大きな影響を与えた。また、各要素について 5 倍にした場合より 0.5 倍にした場合の方が高い感度を示している。

複数の要素を 5 倍にした場合 (Case8, Case10)、通気口の 2 要素のみ (Case8) に比べて全ての要素の場合 (Case10) が大きく流量が増大した。一方 0.5 倍にした場合 (Case9, Case11)、通気口の 2 要素のみを変更 (Case9) するだけで大きく流量が減少した。この結果は、通気経路全体の流量は経路内で最も通気抵抗が大きい箇所の抵抗の大きさに依存していることを示していると考えられる。

各箇所単体で変更した場合の感度分析を図 4.14 に示す。各箇所単体による開口面積を変更した場合、通気壁>小屋裏通気口>床下通気口の順に高い感度が得られた。開口面積の倍率に対して流量の変動は小さいことが考えられる。

複数箇所を変更した場合の感度分析を図 4.15 に示す。3 箇所すべてを 5 倍にすると、流量が大きく増加する一方、1 つまたは 2 つの要素を 1/2 倍にすることだけで流量が大きく低下することがわかった。通気量を増やすためには 3 要素全てを変更することが効果的に考えられる。将来、通気量を定量的に最適化する研究を行う予定である。

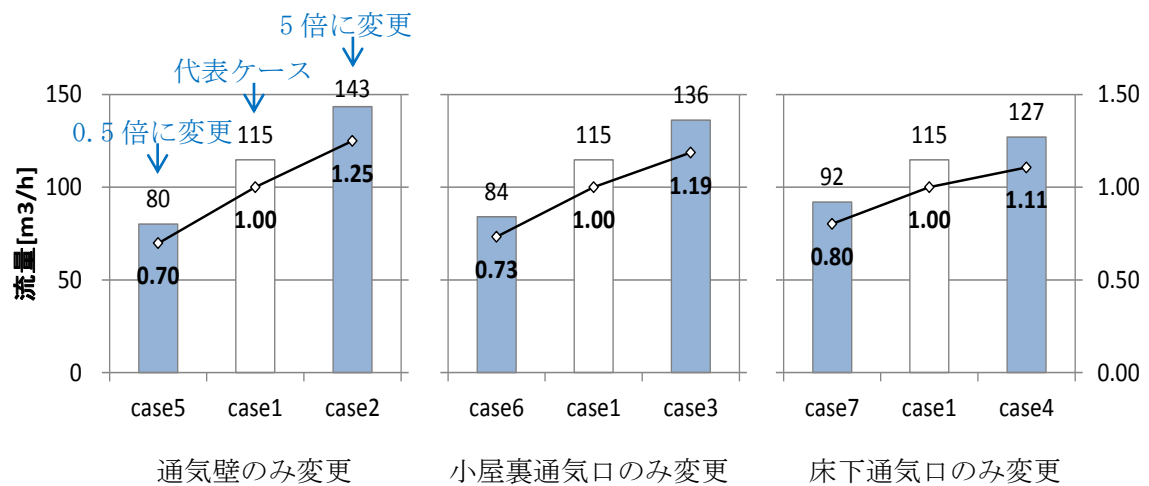


図 4.14 各箇所単体で変更した場合の感度分析

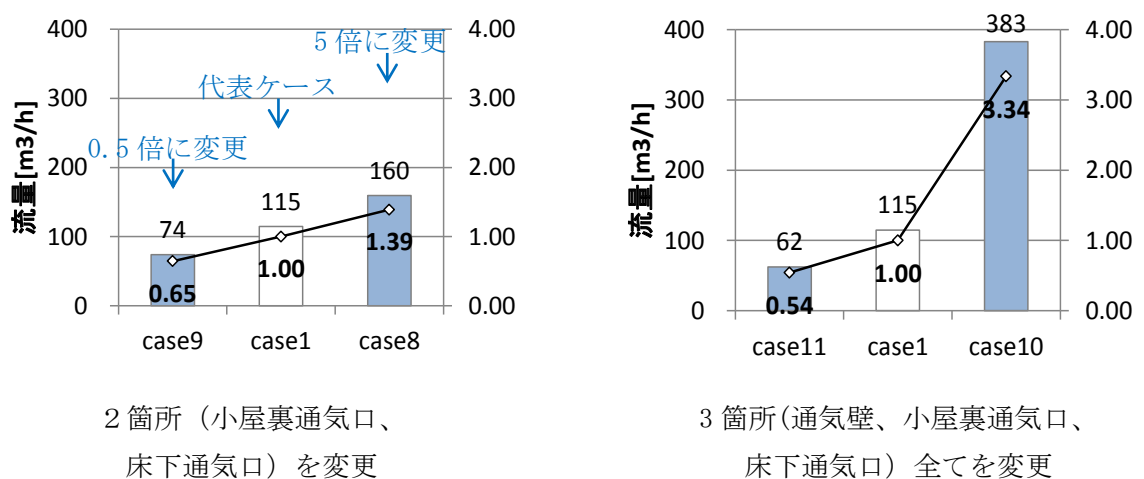


図 4.15 複数箇所を変更した場合

4.4.5 まとめ

外気温の変化に応じて通気量は増減するが、どの壁面も上昇する方向に一定量の通気が得られることが確認できた。感度解析では、各要素単体を変化させた場合通気壁、小屋裏通気口、床下通気口の順に高い感度を示した。各部の仕様変更を行う場合には、この順に効果の大きさが期待できる。ただし、開口面積の変化と比べて改善効果の絶対量は小さくなる。また、3要素全ての開口面積を大きくした場合に通気量が大きく増加する一方、少なくとも一つの要素で開口面積を小さくすると通気量が大きく減少する。

4.5 通気がない場合、通気がある場合、充填断熱構法による比較

IBEC 標準住宅モデルを使用して、通気がない場合をもとにし、充填断熱構法を採用した場合と壁体内通気構法を採用した場合での、夏期における自然室温と冷房負荷の比較を行う。

4.5.1 建物モデル

壁体内通気構法の建物モデルとして、IBEC 標準住宅モデルを元にして壁体の外側に床下から小屋裏まで連続した通気層を設けたシミュレーションモデルを作成した。今回の検討では、隙間風や部屋間の空気の移動も考慮した、実際の室内環境に近いモデルとしている。充填断熱の場合は、IBEC 標準住宅の仕様をそのまま用いた。

建物モデルの諸元を表 4.7 に示す。通気を行わない状態での壁面の断熱性能は、充填断熱の場合 $K=0.399 \text{ W/m}^2\text{K}$ 、壁体内通気の場合 $K=0.526 \text{ W/m}^2\text{K}$ で異なる。

表 4.7 各構法の建物モデルの設定値

	充填断熱	壁体内通気
外壁	$K=0.399 \text{ W/m}^2\text{K}$	$K=0.526 \text{ W/m}^2\text{K}$
屋根	$K=4.081 \text{ W/m}^2\text{K}$	$K=0.549 \text{ W/m}^2\text{K}$
天井	$K=0.229 \text{ W/m}^2\text{K}$	$K=4.082 \text{ W/m}^2\text{K}$
窓	$K=3.28 \text{ W/m}^2\text{K}$	$K=3.28 \text{ W/m}^2\text{K}$
すきま風	$C=2.0 \text{ cm}^2/\text{m}^2$	$C=2.0 \text{ cm}^2/\text{m}^2$

表 4.8 通気構法の諸元

通気壁-室外側	押出法ポリスチレンフォーム 50mm+空気層 15mm+タイル 10mm
通気壁-室内側	石膏ボード 13mm
通気層厚さ	120mm
屋根	押出法ポリスチレンフォーム 50mm+空気層 30mm+合板 10mm+スレート 5mm
基礎	ビーズ法ポリスチレンフォーム (EPS) 50mm+コンクリート 150mm+EPS 50mm
内壁・天井・床	$U=3.125 \text{ W/m}^2\text{K}$, $3.98 \text{ W/m}^2\text{K}$, $0.469 \text{ W/m}^2\text{K}$
窓	複層ガラス $K=3.28 \text{ W/m}^2\text{K}$, 遮蔽係数=0.5
すきま風	$C=2 \text{ cm}^2/\text{m}^2$

表 4.9 充填断熱構法の諸元

外壁	石膏ボード 13mm+グラスウール 89mm+木 1mm+モルタル 30mm
屋根	合板 12mm+鋼材 1mm
基礎	コンクリート 150mm
内壁・天井・床	$U=3.125 \text{ W/m}^2\text{K}$, $0.229 \text{ W/m}^2\text{K}$, $0.469 \text{ W/m}^2\text{K}$
窓	複層ガラス $K=3.28 \text{ W/m}^2\text{K}$, 遮蔽係数=0.5
すきま風	$C=2 \text{ cm}^2/\text{m}^2$

表 4.10 エアリンクの設定値

開口 面積 $A[\text{m}^2]$	①壁体各部, 壁体同士	0.00299 m^3/m (壁面単位長さあたりの開口)
	②棟通気ユニット-外気(EN)	0.0919
	③小屋裏(ROOF2)-棟通気ユニット (ROOFTOP)	0.0755
	④外気(EN)-床下空間 (BASE)	0.072
	各定数	$\alpha=0.6$, $\rho=1.2$, $n=0.5$

4.5.2 計算条件

計算条件を表 4.11 に示す。計算は 6 月から 9 月の 4 か月間 (+助走期間 3 日間) 行った。今回は床下空間の地表面温度を 20°C と固定して与えた。

空調は設定温度を 28°C としてスケジュールに従った冷房を行い、その場合の顕熱負荷を計算した。表 4.4 に空調を行う部屋についての間欠運転スケジュールを示す。図 4.4 に在室者スケジュールなどを示すが、これらの部屋では空調スケジュールはおおむね内部発熱に近いスケジュールで与えられている。全体的な特徴として、LDK では在室者が昼間に集中するため主に昼間に冷房を行い、その他の部屋では主に就寝時である夜間に冷房を行っている。

表 4.11 計算条件

内部発熱	あり (IBEC の標準スケジュールに従う)
全般換気・局所換気	あり (IBEC の標準スケジュールに従う)
空調	なし (自然室温計算時) / あり
床下地表面温度	東京の夏季における 1m 深の平均地中温度 21.3°C から算出
気象データ	拡張アメダス (標準年 2000 年版, 東京)
外部風	なし
計算期間	6/1-9/31 (+助走期間 3 日)

4.5.3 解析結果

4.5.3.1 自然室温

6月、8月のピーク日（いずれも平日）の外気温の時間変動を図 4.16 に、いずれの日も14時ごろに気温のピークをもつ一般的な晴れの日である。

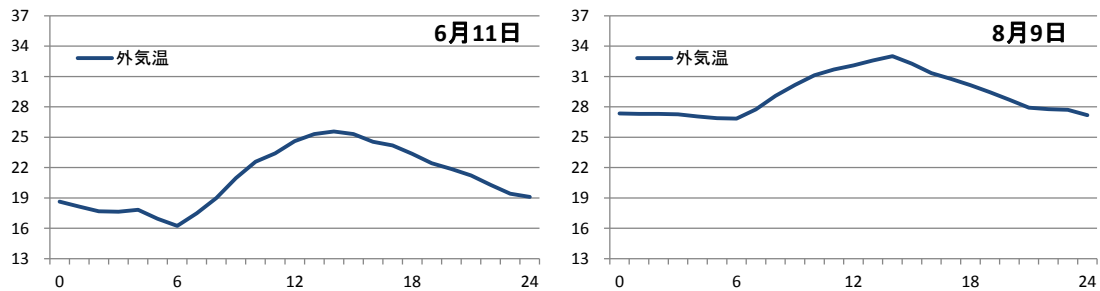


図 4.16 代表日（6月ピーク日と8月ピーク日）における外気温の変動

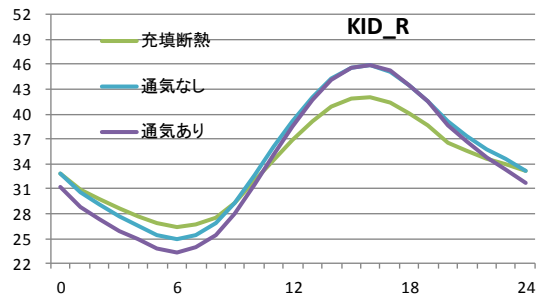
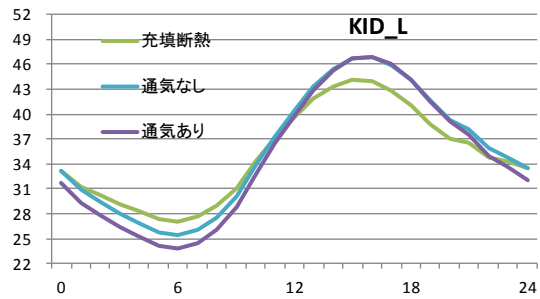
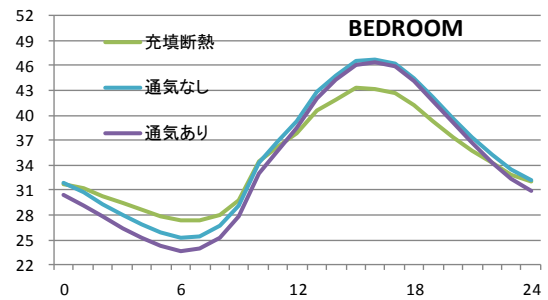
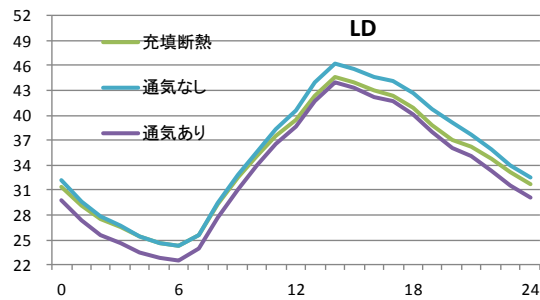
4つの空調室で空調を行っていない場合の室温である自然室温の時間変動を図 4.17 に示す。計算は内部発熱、換気負荷など空調以外の要素は含んだ条件で行っている。LD については、一つの空間としてつながっている LDK のうち LD の領域の室温を示している。

6月の代表日において、一日の変動に関して、LD では充填断熱と壁体内通気で比較的近い傾向で変動しているのに対し、その他の部屋では充填断熱の変動幅が小さくなっている。結果として、どの部屋も在室時間帯は 1～2°C 室温が低下している状態となった。設定したスケジュールから、LD では内部発熱が昼間に集中している一方その他の3室では発熱が夜間に集中している。また、今回の条件では充填断熱は断熱性能が通気なしケースより大きく、また通気ありケースは室温より低温の外気の影響を受けるため、見かけ上の断熱性能が通気なしケースよりさらに小さくなると考えられる。したがって、充填断熱ケースでの室温は内部発熱の影響を最も受けやすく、LD では昼間の発熱が充填断熱の室温変動を大きくする方向に働き、反対にその他の室では昼間に発熱がなく夜間に発熱があることが室温変動を大きくする方向に働いていると考えられる。

各月で平均した自然室温を図 4.18～4.20 に示す。図 4.18 は4室の平均の値を示したものであり、充填断熱と比較して通気ありケースの室温は 0.3°C から 0.6°C 低く、4か月の期間平均では 0.5°C 低下した。また、一日の室温変動から室温の低下は在室時に集中していたため、図 4.19 に各部屋の在室時間帯の室温のみを抽出して平均をとったものを表した。在室時間帯のみを考えると、充填断熱と比較して通気ありケースの室温は 1.1°C から 1.5°C 低く、期間平均では 1.3°C の低下となった。

図 4.20 に、各部屋についての月平均自然室温を示す。いずれも在室時間帯のみを抽出して平均をとっている。最も月平均の変化が大きいのは8月の寝室で、2.1°C の低下がみられた。期間平均では LD が最も変化が大きく、0.9°C の低下となった。なお、すべての部屋で、いずれの月においても充填断熱に比べて通気ありの自然室温は低い結果となっている。

6月11日 (6月ピーク日)



8月9日 (8月ピーク日)

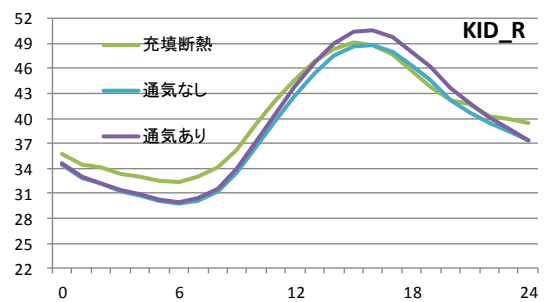
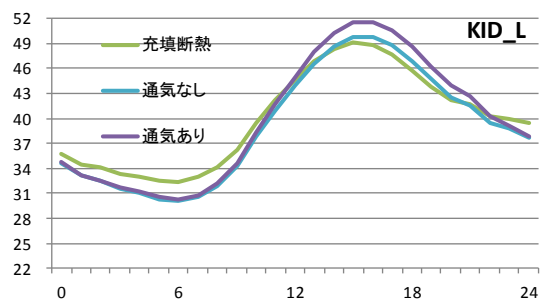
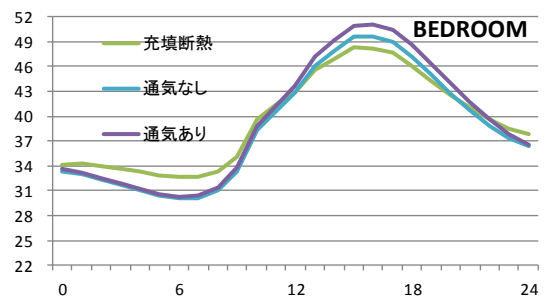
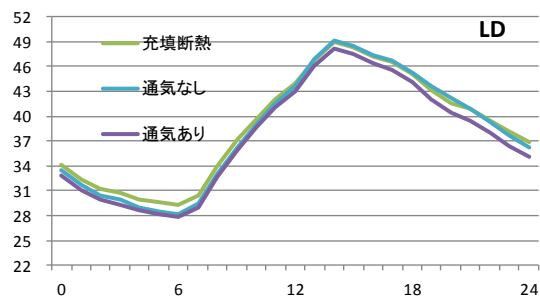


図 4.17 代表日における自然室温の時間変動

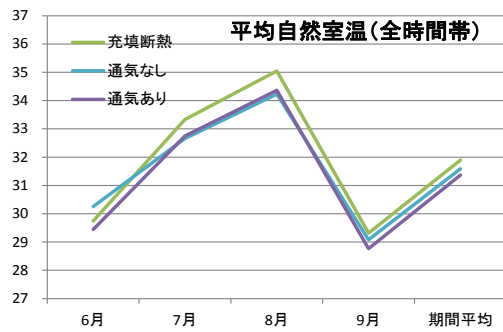


図 4.18 月平均自然室温

表 4.12 月平均自然室温

[°C]	6月	7月	8月	9月	期間 平均
充填断熱	29.7	33.3	35.0	29.3	31.9
通気なし	30.3	32.7	34.2	29.1	31.6
通気あり	29.4	32.7	34.4	28.8	31.4

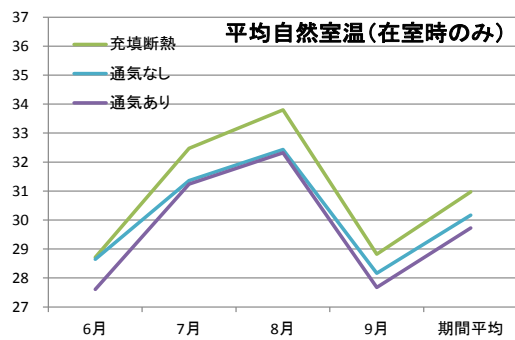


図 4.19 在室時平均自然室温

表 4.13 在室時平均自然室温

[°C]	6月	7月	8月	9月	期間 平均
充填断熱	28.7	32.5	33.8	28.8	31.0
通気なし	28.6	31.4	32.4	28.2	30.2
通気あり	27.6	31.2	32.3	27.7	29.7

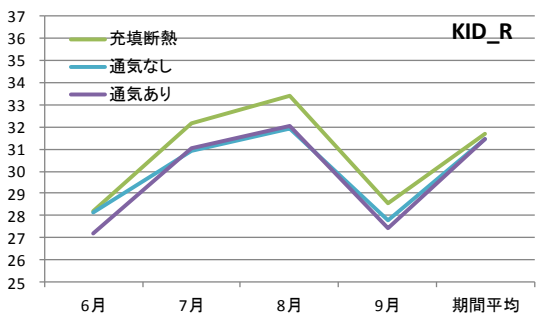
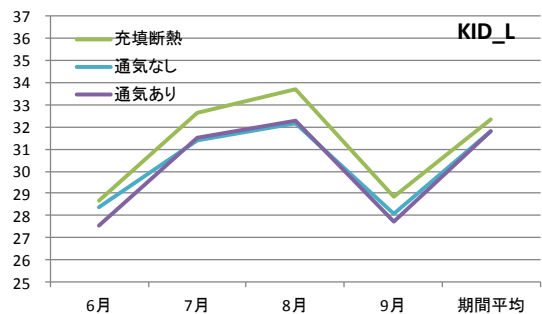
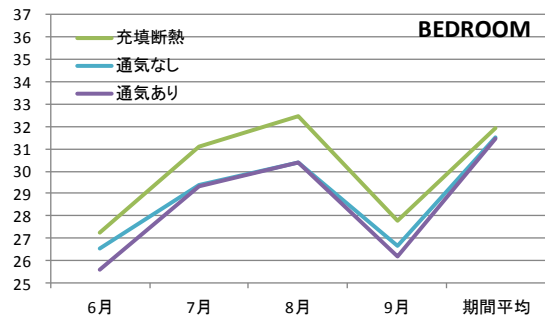
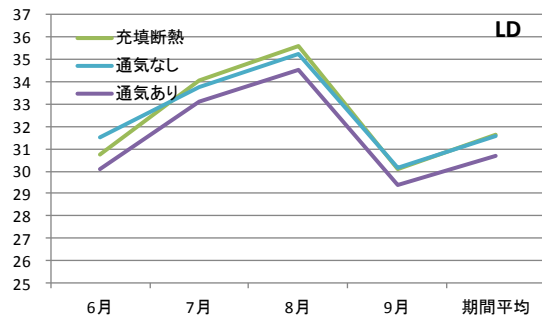


図 4.20 各室の在室時平均自然室温

4.5.3.1 冷房負荷

図 4.21 に、6 月から 9 月までの月別に空調室 4 室すべての負荷を合計した積算冷房負荷を示す。各月とも、空調負荷は通気なしケースが最も大きく、その次に通気ありケースが充填断熱ケースよりわずかに大きい結果となった。

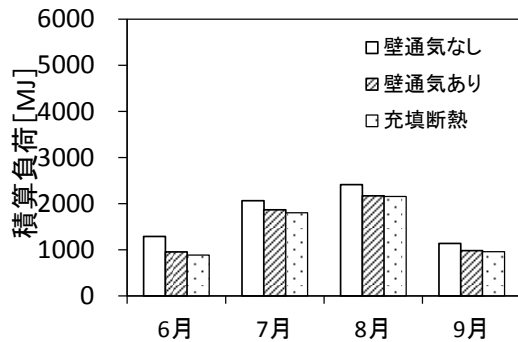


図 4.21 月別積算冷房負荷

表 4.14 月別積算冷房負荷

積算冷房負荷					
[MJ]	6 月	7 月	8 月	9 月	期間計
壁通気なし	1288	2064	2415	1138	6905
壁通気あり	954	1868	2172	982	5976
充填断熱	887	1801	2154	960	5803

空調時間

[h]	6 月	7 月	8 月	9 月	期間計
壁通気なし	166	271	276	163	877
壁通気あり	130	246	248	141	765
充填断熱	149	283	313	173	918

図 4.22 に部屋別の 6 月から 9 月までの積算冷房負荷を示す。LDK では通気の影響が大きく、通気なしケースに比べて通気ありケースの負荷が大きく削減されている。LDK と子供室 L および R では、充填断熱ケースに比べて通気ありの場合の負荷がわずかに大きい。一方、寝室では充填断熱より通気ありの場合に負荷が小さい。

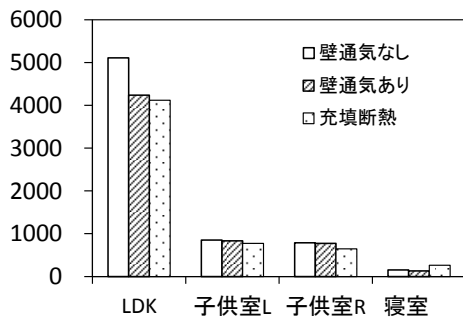


表 4.15 各空調室の積算冷房熱負荷

積算冷房負荷

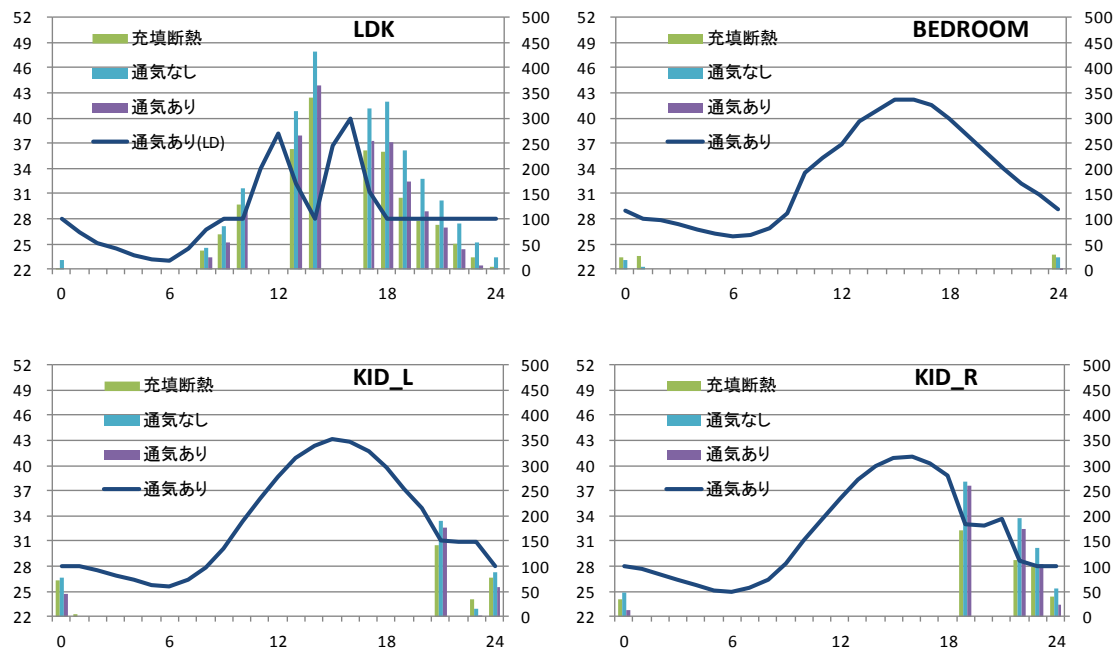
[MJ]	LDK	子供室 L	子供室 R	寝室
壁通気なし	5110	853	786	155
壁通気あり	4238	833	774	132
充填断熱	4121	775	645	262

図 4.22 各空調室の積算冷房熱負荷
(6～9 月)

この室ごとの違いについての考察のため、各室の冷房負荷の時間変動について検討する。図 4.23 に、代表日 (6 月ピーク日と 8 月ピーク日) における、空調を行っている 4 室 (LDK、寝室、子供室 L、子供室 R) の冷房負荷と室温 (通気ありケースのみ) の時間変動を示す。

傾向が顕著に表れている 8 月のピーク日に注目する。LDK の 10 時から 21 時の時間帯や子供室の 19 時以降など負荷の大きい時間帯は、充填断熱に比べて通気ありケースの冷房負荷が大きい。一方、子供室の 1 時から 7 時までの時間帯や寝室の全ての時間帯において、

6月11日（6月ピーク日）



8月9日（8月ピーク日）

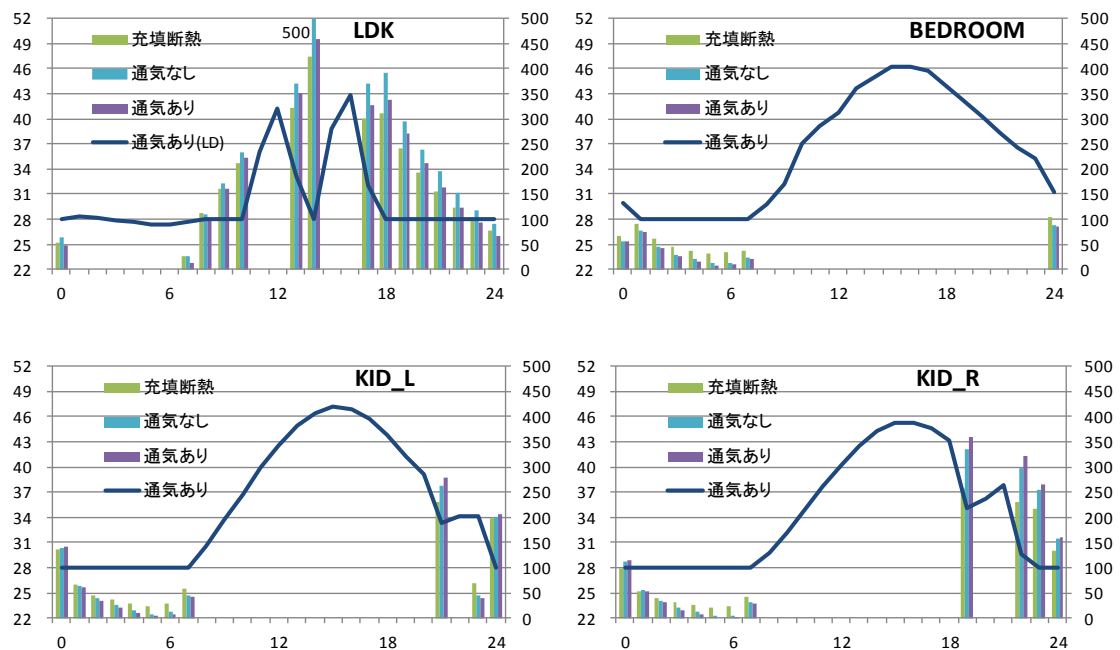


図 4.23 代表日における各構法の冷房負荷と室温の時間変動

充填断熱より通気ありのケースの冷房負荷が小さくなっている。全体として、負荷の大きい時間帯は充填断熱に比べて通気ありケースの冷房負荷が大きくなり、負荷の小さい時間帯は充填断熱の冷房負荷が大きくなる傾向がある。したがって、負荷が元々小さく、さらに負荷の小さい夜間のみに冷房を行なう寝室で通気ありケースの冷房負荷が小さいという結果

がみられた。6月についても傾向は同じである。

なお、図 4.24 と図 4.25 に、通気なしと通気ありのケースで断熱材の厚みを充填断熱と等しくした場合(外壁 $K=0.344$, 屋根 $K=0.354$)の空調負荷の結果を示す。この場合、通気ありケースの冷房負荷が減少して、充填断熱とほぼ同様の値となる。部屋別にみると、子供室と寝室で通気ありケースの冷房負荷が増加し、LDK で大きく減少した。このことは、断熱性能が向上したことで、LDK で昼間に空調を行なう際に室外に逃げる冷熱が減少した一方、その他の部屋で夜間に室外に逃げる熱が減少したためだと考えられる。

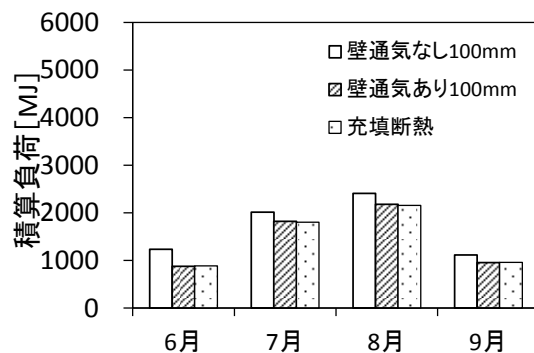


図 4.24 月別積算冷房負荷

表 4.16 月別積算冷房負荷

積算冷房負荷					
[MJ]	6 月	7 月	8 月	9 月	期間計
壁通気なし 100mm	1234	2015	2406	1114	6769
壁通気あり 100mm	876	1823	2180	955	5835
充填断熱	887	1801	2154	960	5803

空調時間					
[h]	6 月	7 月	8 月	9 月	期間計
壁通気なし	197	295	314	191	998
壁通気あり	147	268	294	163	872
充填断熱	149	283	313	173	918

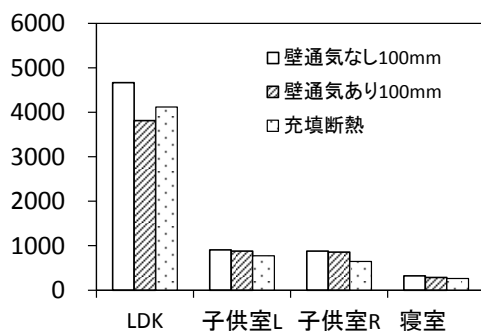


図 4.25 各空調室の積算冷房熱負荷
(6～9 月)

表 4.17 各空調室の積算冷房熱負荷

積算冷房負荷				
[MJ]	LDK	子供室 L	子供室 R	寝室
壁通気なし 100mm	4665	905	877	323
壁通気あり 100mm	3812	880	856	286
充填断熱	4121	775	645	262

4.5.4 まとめ

壁体内通気構法に関して充填断熱構法との比較のため、IBEC 標準住宅を元にした住宅モデルを作成し、夏期における自然室温と冷房負荷を算出した。

自然室温に関して、充填断熱ケースと比較して通気ありケースでは期間平均で 0.5°C の低下がみられ、在室時間帯のみに着目すると平均で 1.3°C の室温低下がみられた。

冷房負荷に関して、充填断熱ケースと比較して通気ありケースでは期間平均でわずかに冷房負荷が増加するが、通気なしケースと比べると 13%削減されており通気の効果は確認

できる。

結論として、現在の仕様の場合壁体内通気構法は充填断熱構法に対し、比較的薄い断熱材と通気の効果により、空調時にそれほど大きな冷房負荷の増加を伴うことなく、非空調時には自然室温の低下により快適性の向上を期待できる構法といえる。

4.6 強制換気による壁体内通気住宅の性能評価

これまでに同じ外断熱の内側に通気層をもつ仕様で通気がある場合とない場合の比較を行うことにより、壁体内の通気自体の効果の検証を行ってきた。今回の検討では、IBEC 標準住宅モデルを使用し、小屋裏ファンの導入により、夏期における強制換気による壁体内通気住宅の性能の把握のため、シミュレーションを行なった。小屋裏ファンの流量の変更により、各通気壁の流速の性状を把握し、小屋裏ファンの導入効果が得られることを確認することを目的としている。

4.6.1 建物モデル

強制換気による壁体内通気住宅の建物モデルとして、IBEC 標準住宅モデルに基づいて壁体の外側に床下から小屋裏まで連続している通気層を設けたシミュレーションモデルを作成し、小屋裏にファンを設置した（図 4.26）。

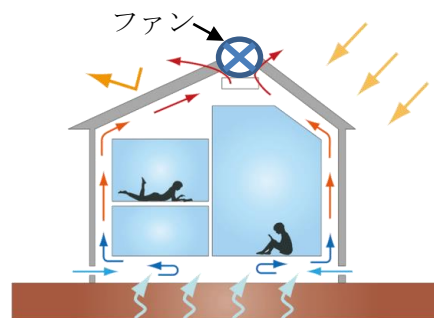


図 4.26 各箇所単体で変更した場合の感度分析

4.6.2 計算条件

対象地域を東京とし、計算期間は 6 月 1 日～9 月 31 日（+助走期間 3 日間）として検討を行った。気象条件は標準年の拡張アメダス気象データを使用した。小屋裏ファンの流量の違いによる通気に着目した検討を進めるため、屋外風は無風の条件とした。IBEC 標準住宅モデルによる在室者、発熱のスケジュールを使用した。空調スケジュールは、IBEC の標準住宅モデルによるスケジュールを使用し、部分間欠運転、設定値は室温 28℃、相対湿度 60% とした。計算ケースは、表 4.18 に示すように、ファン設定風量を 150 [m³/h]、300 [m³/h]、600 [m³/h] の 3 つの運転モードに設定し、壁体内通気無しによるケースを加えて合計 4 ケースで空調ありとなしの条件で室温の低下効果と冷房負荷の削減効果の検討を行った。

表 4.18 計算ケース

	小屋裏ファン流量 (m ³ /h)	倍数 (-)
Case 0	0 (off)	-
Case 1	150	0.5
Case 2	300	1
Case 3	600	2

4.6.3 解析結果

壁面ごとの期間平均流量を図 4.27 に示し、全ての壁面も上昇方向の流速をとる。流量が 300 m³/h の場合、1 階の平均で 54.0cm/s、2 階の平均で 66.9cm/s の流速がみられた。流量は 300 m³/h から、150 m³/h、600 m³/h に変更した時、壁面ごとの期間平均流量も 0.5 倍、2 倍に変更した。東側及び南側の壁の流速は西側と北側の壁よりやや速いと見られた。東南側の壁は日射の影響を最も受けやすいためだと考えられる。

流量が 300 m³/h のケースを代表ケースとして、自然室温と強制換気による室温の低下量を図 4.28 に示している。居室では 1.5℃～3.5℃の温度低下がみられた。屋根部で大きな変動がみられ、最大 4.8℃の温度低下がみられた。期間を通じて平均 2.6℃の室温低下がみられた。

流量が 300 m³/h のケースを代表ケースとして、8 月のピーク日の壁面の方角ごとの流速を図 4.29 に示している。各壁面の流量は外気温の影響を受けにくく、安定している。N1、N3、W1、W3 の流速は最も低く、45～50cm/s で変動している。

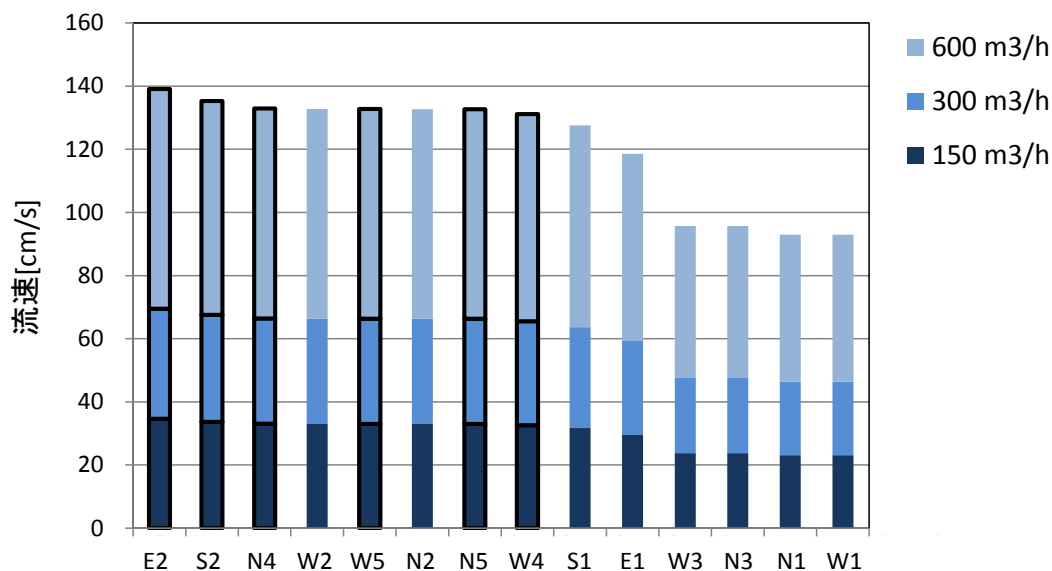


図 4.27 壁面ごとの期間平均流量（上昇する方向を正とする）

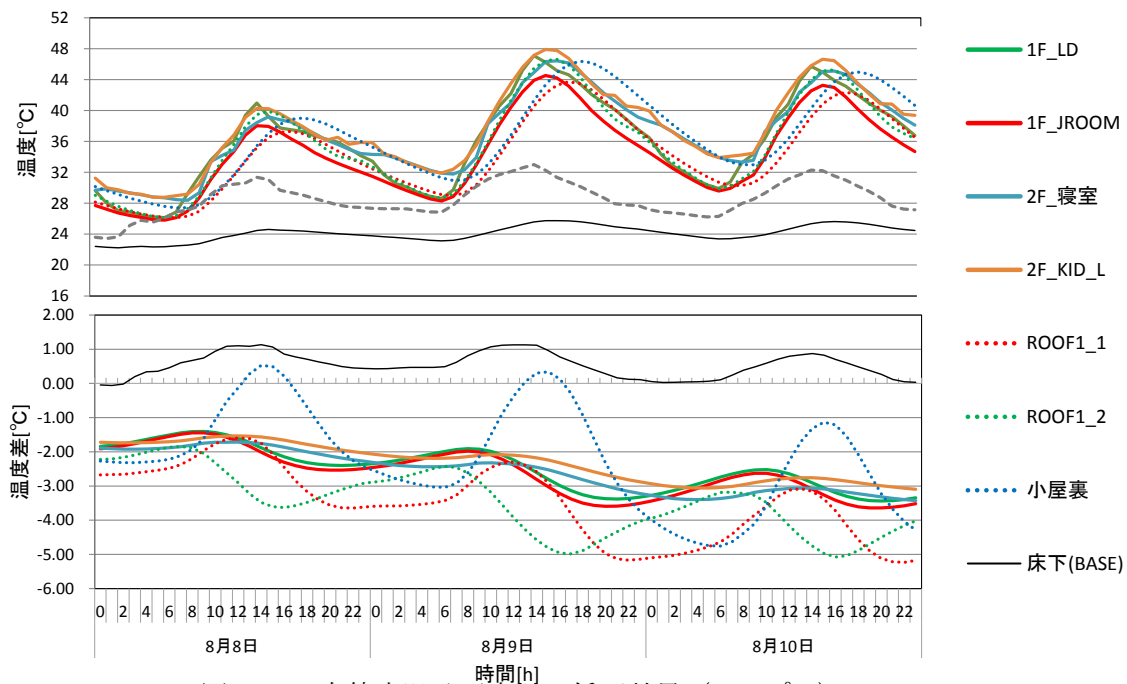


図 4.28 自然室温及び室温の低下効果 (300 m³/h)

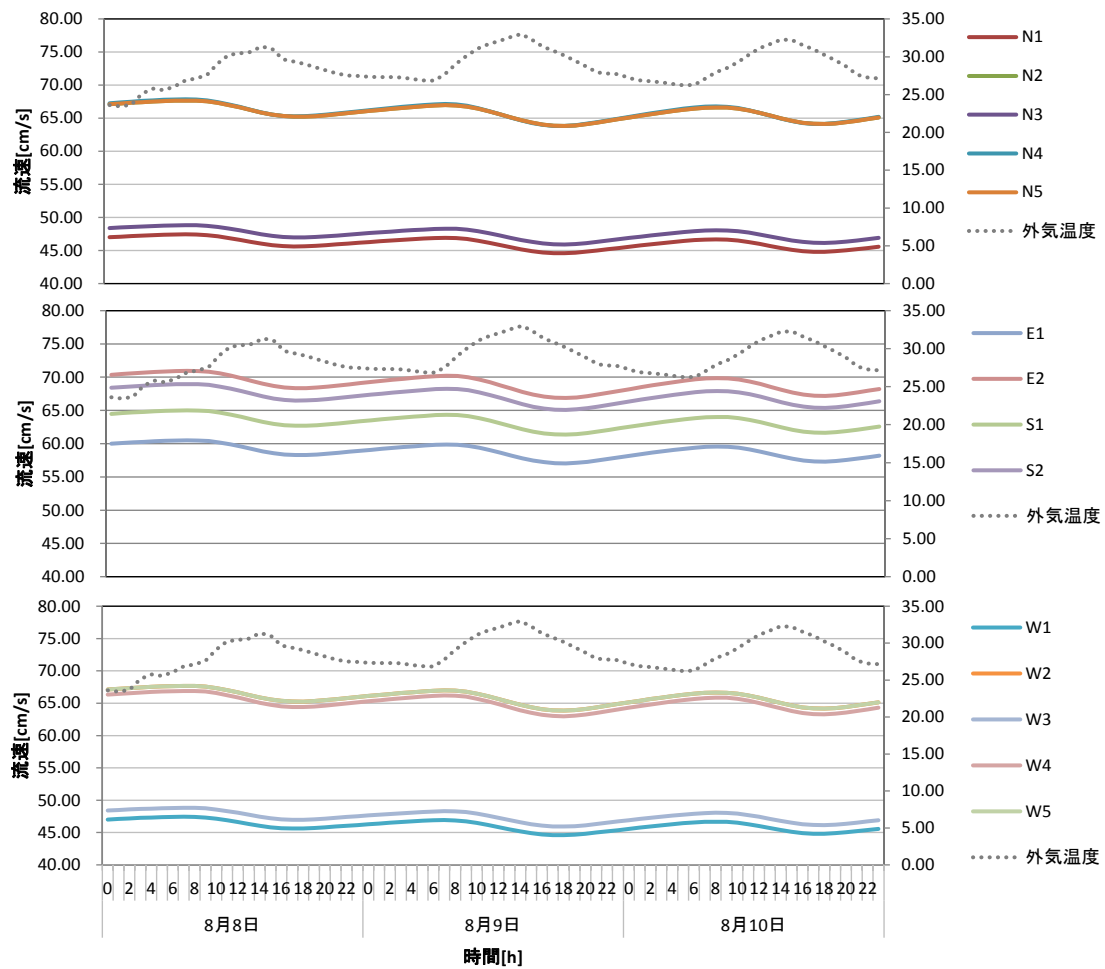


図 4.29 壁面の方角ごとの流速 (300 m³/h)

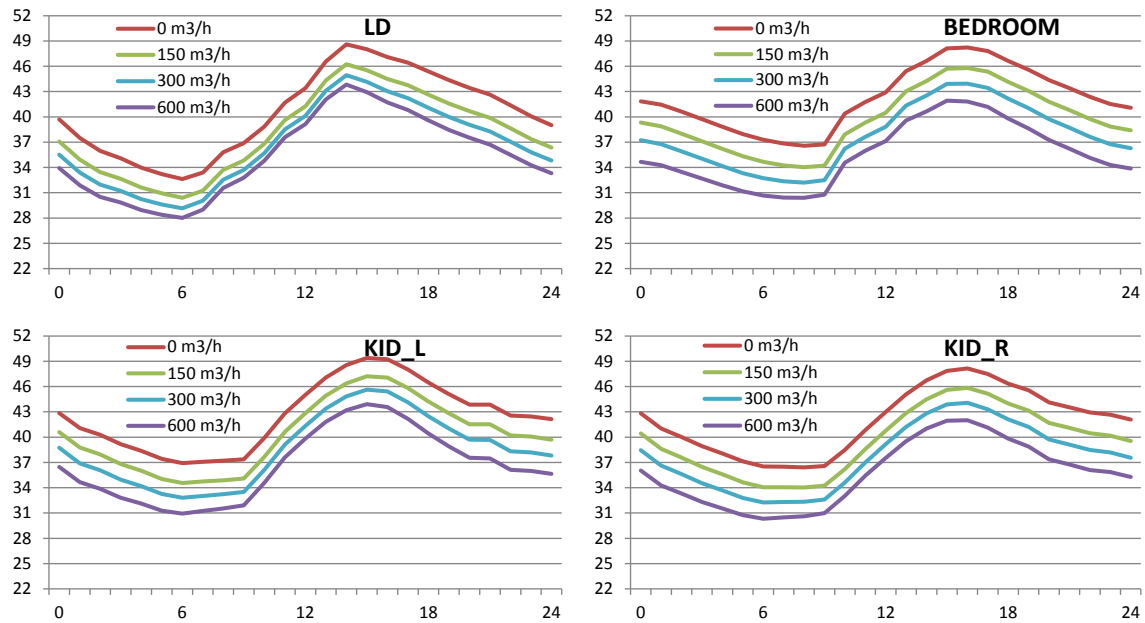


図 4.30 代表日(8月9日)における自然室温の時間変動

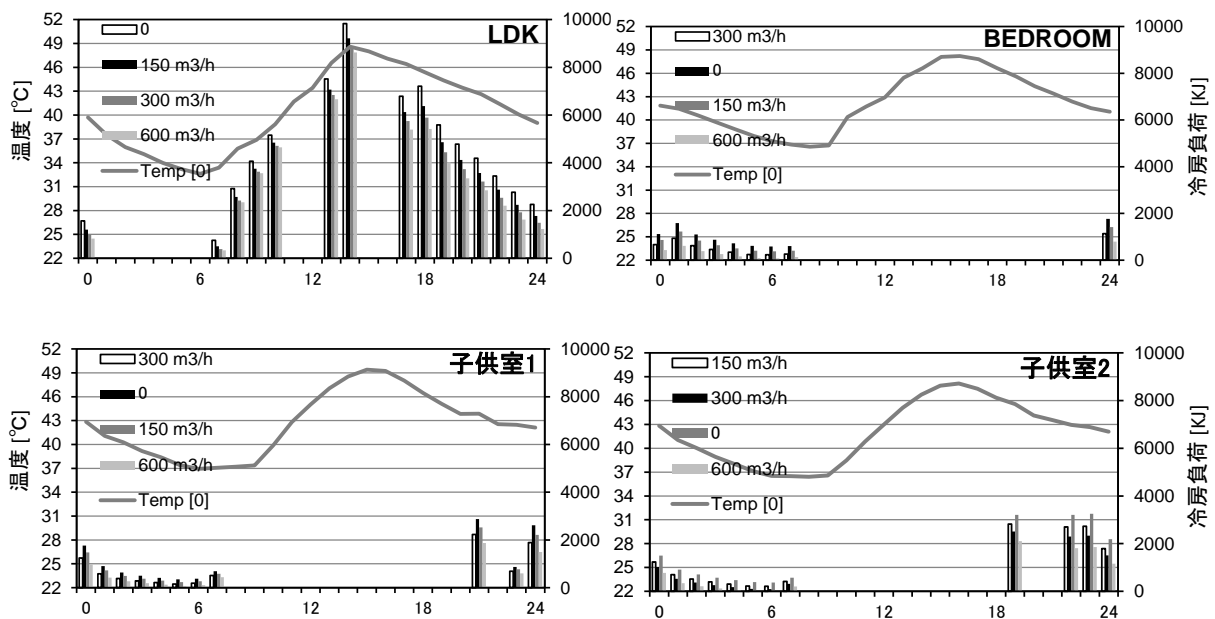


図 4.31 代表日(8月9日)における冷房負荷の時間変動

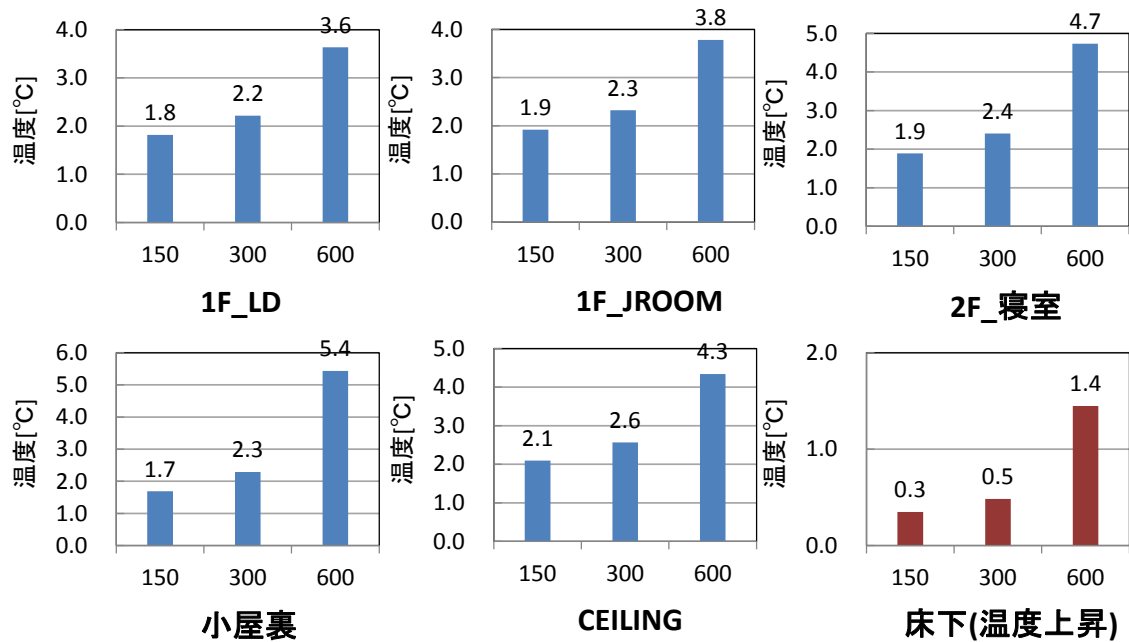


図 4.32 各エアノードにおける温度低下量

8月のピーク日において4つの空調室で空調を行っていない場合の室温である自然室温の時間変動を図4.30に示す。昼間の変動に関して、LDでは流速の違いによる自然室温が比較的小さい差で変動しているのに対し、その他の空調室では流速の違いにより、自然室温の差が大きいと見られた。設定したスケジュールから、LDでは内部発熱が昼間に集中している一方、その他の3室では発熱が夜間に集中している。隙間風・漏気なしなどの条件により、体積が最も大きいLDでは壁体内通気の影響を受けにくいと考えられる。

8月のピーク日において空調を行っている4室（LDK、寝室、子供室1、子供室2）の冷房負荷と室温（通気なしケースのみ）の時間変動を図4.31に示している。LDKの12時から21時の時間帯や子供室の19時以降など負荷の大きい時間帯は、通気ありケースの冷房負荷の削減効果が顕著にみられた。一方、子供室の1時から7時までの時間帯や寝室の全ての時間帯において、通気ありのケースの削減効果が日中より小さくなっている。全体として、負荷の大きい時間帯は通気ありケースの冷房負荷の削減効果が大きくなり、負荷の小さい時間帯は削減効果が小さくなる傾向がある。したがって、負荷が元々小さく、さらに負荷の小さい夜間のみに冷房を行なう子供室と寝室で通気ありケースの冷房負荷の削減効果が小さいという結果がみられた。

各エアノードにおける温度低下量を図4.32に示している。床下以外のエアノードで温度

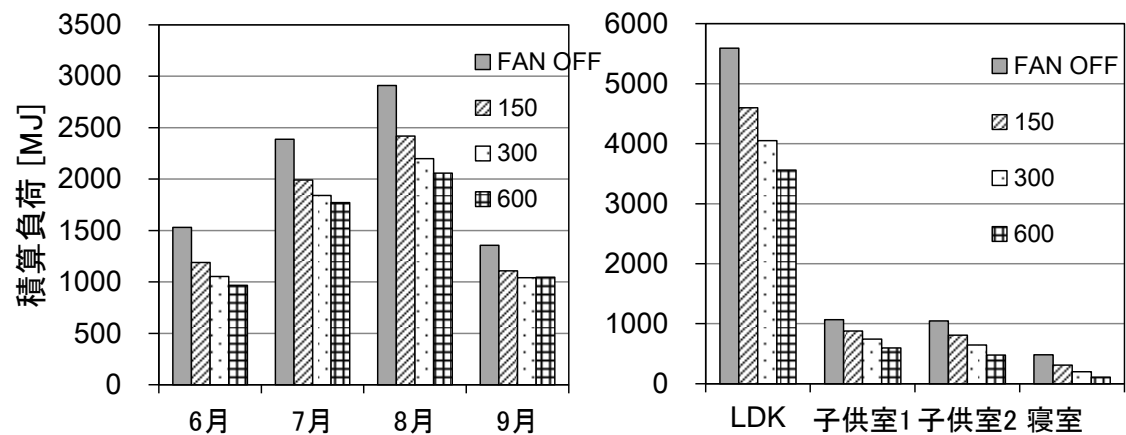


図 4.32 冷房顕熱負荷の削減効果

低下効果が顕著に見られた。ファンの流量を変更した場合、換気量が大きいほど、温度低下効果が大きくなる傾向がある。

各室及び各月における冷房熱負荷の削減効果を図 4.32 に示す。流量が 300m³/h の場合、気温が最も高い 8 月で平均的に 17%の冷房負荷の削減効果が見られた。流量が 150 m³/h、300 m³/h、600m³/h に設定した時、積算空調負荷は期間平均でそれぞれ 17%、25%、29%の削減効果が見られた。LDK の空調負荷は最も高いが、負荷の低減効果は最も低いと見られた。シミュレーションによる削減結果が顕著に見られたが、隙間風・漏気なしなどの条件により、実際より省エネ的な結果が得られたと考えられる。

4.6.4 まとめ

夏期で小屋裏ファンによる強制通気を導入することにより、小屋裏ファンの流量は 0.5 倍、2 倍に変更した時、壁面ごとの期間平均流速も 0.5 倍、2 倍に変更した。ファンの流量が大きいほど、温度低下効果が大きくなる傾向がある。期間を通じて、流量が 150 m³/h、300 m³/h、600m³/h に設定した時、積算の空調負荷はそれぞれ 17%、25%、29%が削減されることが分かった。シミュレーションによる削減結果が顕著に見られたが、隙間風・漏気なしなどの条件により、実際の削減効果より大きいと考えられる。小屋裏ファンの導入により、夏季において空調時に冷房負荷の削減効果が顕著にみられ、非空調時に自然室温の低下及び快適性の向上を期待できると考えられる。

結論として、小屋裏ファンの導入による強制換気を行なうことで、夏季において空調時に冷房負荷の削減効果が顕著にみられ、非空調時に自然室温の低下及び快適性の向上を期待できると考えられる。

4.7 参考文献

- [4-1] 松村良夫・横地省一・高橋茂信・佐々木隆：壁体内通気型断熱建物の室内環境の研究 その1 研究目的と概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、1255-1256、1994.7
- [4-2] 建築環境・省エネルギー機構：住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説
- [4-3] 三浦昌生・尾島俊雄：東京における地中温度分布に関する実測調査研究、日本建築学会計画系論文報告集 (348), 11-18, 1985.2
- [4-4] 吉富透悟・加藤信介・林侃・樋山恭助・手塚純一：シミュレーションによる壁体内通気住宅の性能評価 その1 通気量に対する各部開口面積の感度分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、433-434、2013.8
- [4-5] 林侃・加藤信介・吉富透悟・樋山恭助・手塚純一：シミュレーションによる壁体内通気住宅の性能評価 その2 自然室温低下及び冷房負荷削減効果について、日本建築学会大会学術講演梗概集、435-436、2013.8
- [4-6] 林侃・加藤信介・吉富透悟：シミュレーションによる壁体内通気住宅の性能評価 その3 冬期における自然室温上昇及び暖房負荷削減効果について、日本建築学会大会学術講演梗概集、2014.9

第 5 章

実験及び数値解析による太陽熱利用設備の構築 及び精度検証

5.1 研究目的

第 3 章と第 4 章では壁通気構法に対して、実測とシミュレーションを用いて、通気部の仕様、通気量の設計妥当性の検証、自然室温の低下と期間冷房負荷の削減の検討を行なった。本章では、家庭分野における太陽熱を利用した設備を対象に、住宅のエネルギーシステムのシステムシミュレーションモデル、および居室の温熱環境を予測するモデルの作製を行う。貯湯タンク、太陽集熱器、床暖房、熱交換器などの設備システムを充実させて、実際に利用されている太陽熱利用システムを TRNSYS で再現できた。下記のステップで現実をよく再現できるシミュレーションを行った。

1. 実際に利用されている太陽熱利用システムを TRNSYS で再現する

貯湯タンク、太陽集熱器、床暖房、熱交換器などの設備システムを構築し、実際に利用されている太陽熱利用システムを TRNSYS で再現することを行った。

2. 実測結果との比較によるシミュレーションの妥当性の検証

実測時の天気情報でシミュレーションの気象データを作成し、室内の長波放射計算を形態係数による詳細放射計算を導入した。シミュレーションの結果を検証するため、実測結果との照合を行った。

5.2 研究対象の構成

5.2.1 太陽集熱器

5.2.1.1 太陽集熱器の概要

太陽熱は再生可能エネルギーの一つである。太陽熱を使用し温水を作り、給湯や冷暖房に利用できるシステムとなる。現在、日本で広く使われているのは、戸建住宅用太陽熱温水器であるが、様々な建物で使用されている。図 5.2.1.1 に太陽集熱器システムのイメージを示す。

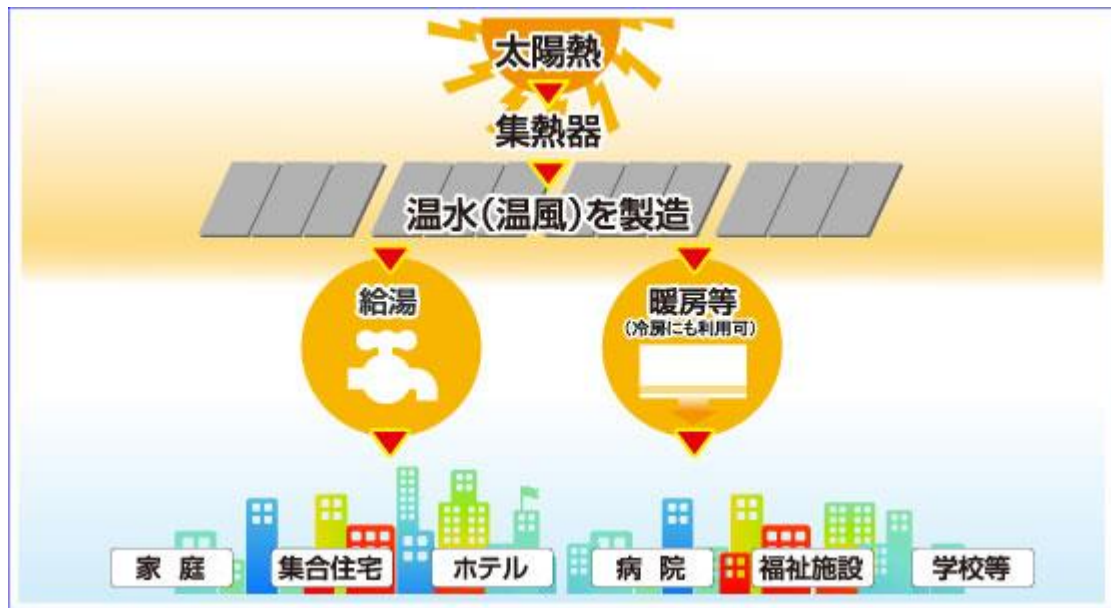




図 5.2.1.1 太陽集熱器システムのイメージ

出典：経済産業省エネルギー庁 http://www.enecho.meti.go.jp/attaka_eco/system/

太陽集熱器は太陽の光エネルギーを熱エネルギーに変更し、伝熱媒体に伝える役割をしている。一般的な太陽集熱器は、水式集熱器と空気式集熱器の2つに分けられる。水式集熱器としては、真空管型集熱器と平板型集熱器がある。表 5.2.1.1 に太陽集熱器の分類を示す。

表 5.2.1.1 太陽集熱器の分類

分類	集熱器	特徴
水式	平板型集熱器 	金属の受熱箱内部における集熱板を配置し、集熱器が平板状になっている。表面は耐熱強化ガラスで覆われ、下部は太陽熱が逃げないように、断熱材が使われている。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 既存の設備に接続が可能 ・ 比較的安価である

		<ul style="list-style-type: none"> ・ 傾斜角度を付ける必要がある ・ 水漏れ、凍結の心配がある
	真空管集熱器 	太陽集熱器が真空のガラス管で作られ、ガラス管における内部の集熱部に不凍液などの熱媒を通す。真空による放熱しにくくなるため、高温集熱に有利である <ul style="list-style-type: none"> ・ 既存の設備に接続が可能 ・ 集熱効率が良く、集熱面積が少ない ・ 水平設置が可能 ・ 高温集熱に有利 ・ 水漏れ、凍結の心配がある
空気式	空気式集熱器 	ガラスが設置している集熱面を設置し、屋根における空気を暖め、暖かい空気を集める。水漏れ、凍結の心配がない。建築物との一体化が可能でデザイン性が優れている。 <ul style="list-style-type: none"> ・ 水漏れ、凍結の心配がない ・ 建築との一体化が可能でデザイン性に優れている ・ ダクトが大きく施工スペースが必要 ・ 集熱空気を直接暖房に使用するので、利用効率が高い

5.2.1.2 シミュレーション対象の太陽集熱器の仕様

今回対象となる集熱器 TF-S2011A は強制循環型のソーラーシステムに用いられる集熱器である。集熱器の仕様は表 5.2.1.2 に示している。

表 5.2.1.2 集熱器仕様表

品名	TF-S2011A
メーカー型式	BOSCH SCQ-201
集熱器総面積 (m ²)	2.09
有効集熱面積 (m ²)	1.94
外形寸法 (mm)	20261032×67
質量 (kg)	30
保有水量 (L)	0.8
耐圧	0.3MPa (3kgf/cm ²)
流量	0.8～1.6L/min

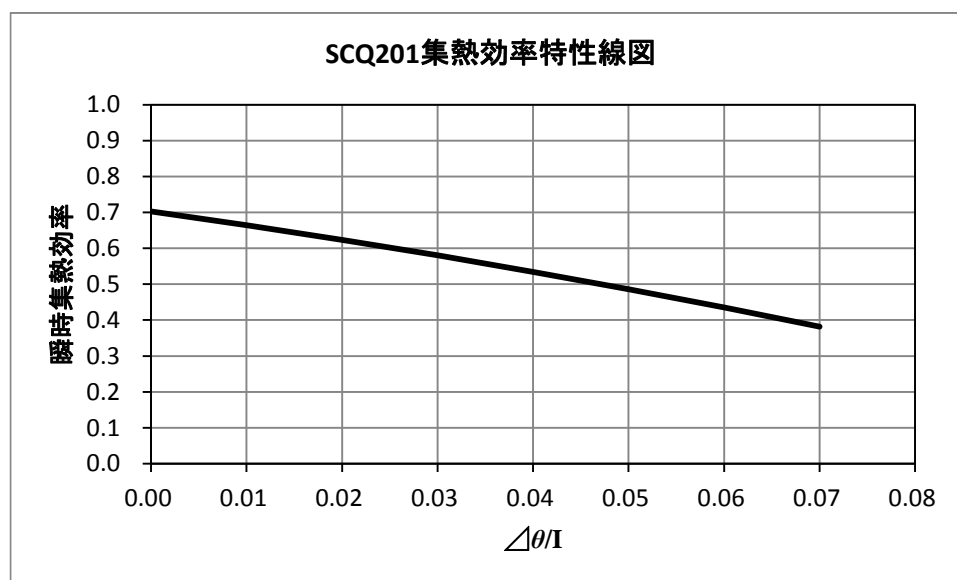
配管サイズ		φ20.7mm
外装		枠材・背面：アルミニウム、角部：樹脂（PA6 GF30）
外装色		シルバー
集熱体	材質	銅 ハープ型 黒色クロムコート（選択吸収面処理）
	構造	
	表面処理	
透過体		半強化白板ガラス（t=3.2mm）
断熱材		ロックウール（t=25mm）
集熱量		3633Wh/m ² 日（13079KJ/ m ² 日）
使用熱媒		ソーラーネツバイ○○-33T

5.2.1.3 TF-S2011A の集熱性能

1) 試験条件

屋内外の別	屋内
集熱器総面積	2.09(m ²)
集熱面放射強度	平均 924(W/ m ²)
集熱媒体質量流量	平均 139.0(kg/h)
風速	3±1(m/s)
周囲温度	平均 31.6(°C)
対地傾斜角	約 45(度)
入射角	0(度)

2) 集熱効率特性線図



$\Delta\theta$: 集熱媒体平均温度と周囲温度の差 (K)

I : 集熱面放射強度 (W/m²)

瞬時集熱効率 η

(二次近似)

$$\eta = a_0 - a_1 \cdot \Delta\theta / I - a_2 \cdot (\Delta\theta / I)^2$$

$$a_0 = 0.703$$

$$a_1 = 3.716$$

$$a_2 = 12.42$$

(一次近似)

$$\eta = b_0 - b_1 \cdot \Delta\theta / I$$

$$b_0 = 0.711$$

$$b_1 = 4.609$$

3) 集熱器 1 台あたりの集熱量 (W・h/日)

$\Delta\theta$ (K)	評価基準日射量 W・h(m ² 日)		
	5814	4651	3448
5	8092	6375	4656
10	7594	5855	4178
20	6668	4989	3248
35	5260	3639	2050
50	3967	2404	1012
65	2695	1363	226
80	1641	475	0

4) 単位面積当たりの集熱量

評価基準日射量 5814 W・h(m² 日)、 $\Delta\theta$ が 10K の時の単位面積当たりの集熱量は 3633 W・h(m² 日)である。

WESTON 長寿命ブライン ECO の密度、沸点、動粘度および比熱は図 5.2.1.2～図 5.2.1.5 に示している。

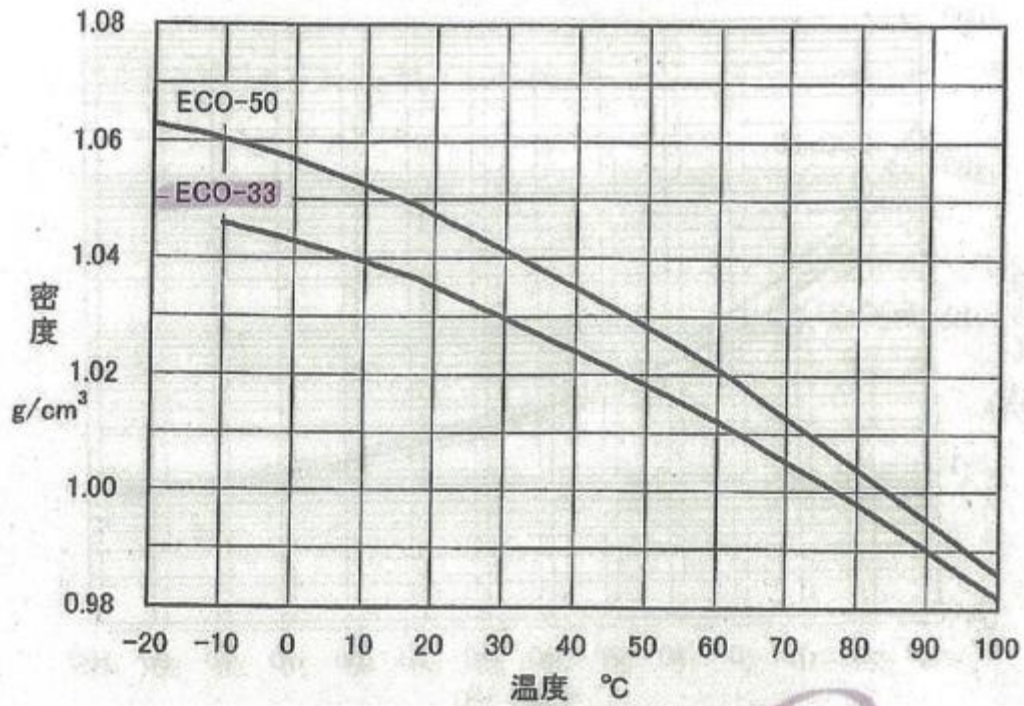


図 5.2.1.2 WESTON 長寿命ブライン ECO の密度

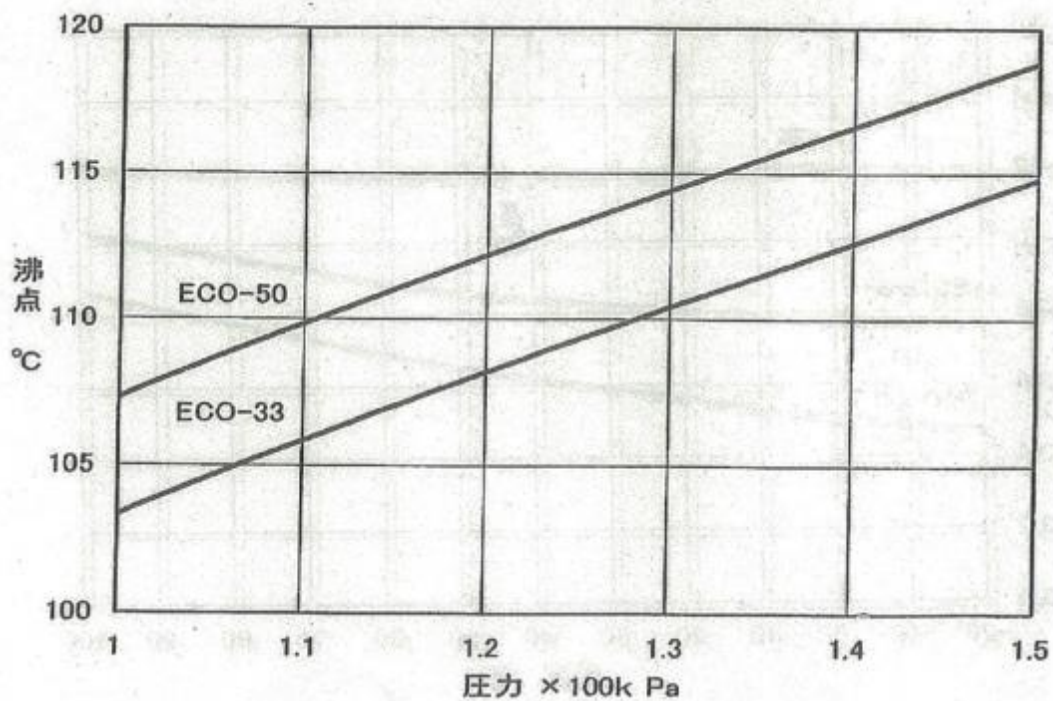


図 5.2.1.3 WESTON 長寿命ブライン ECO の沸点

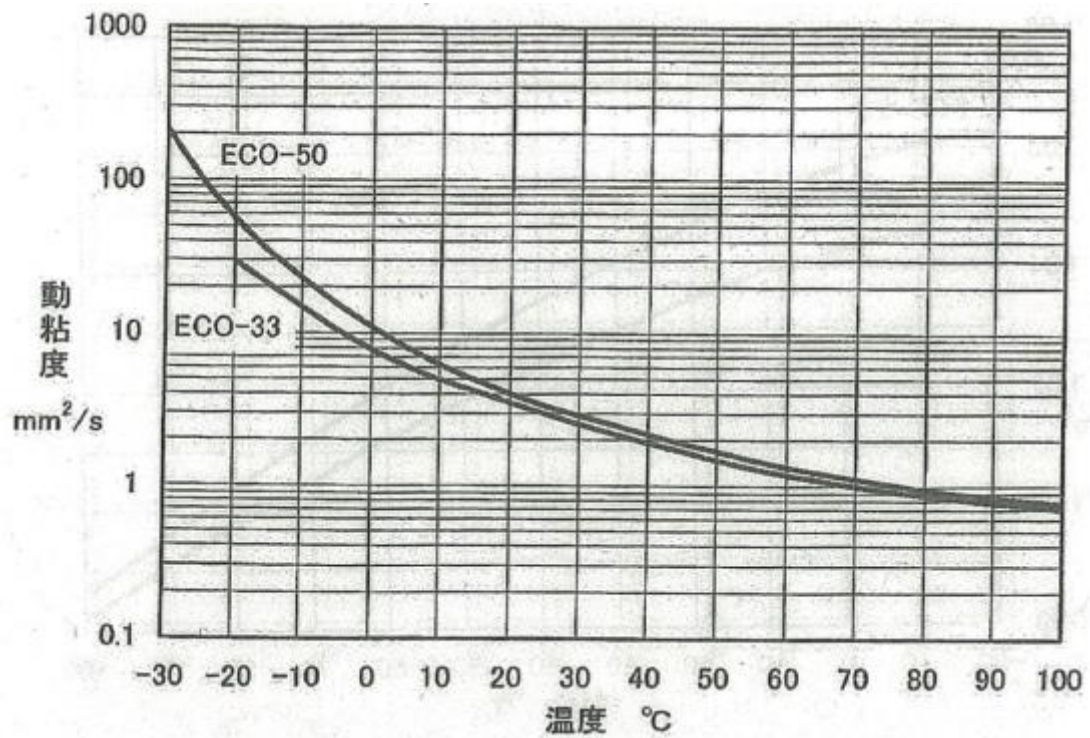


図 5.2.1.4 WESTON 長寿命ブライン ECO の動粘度

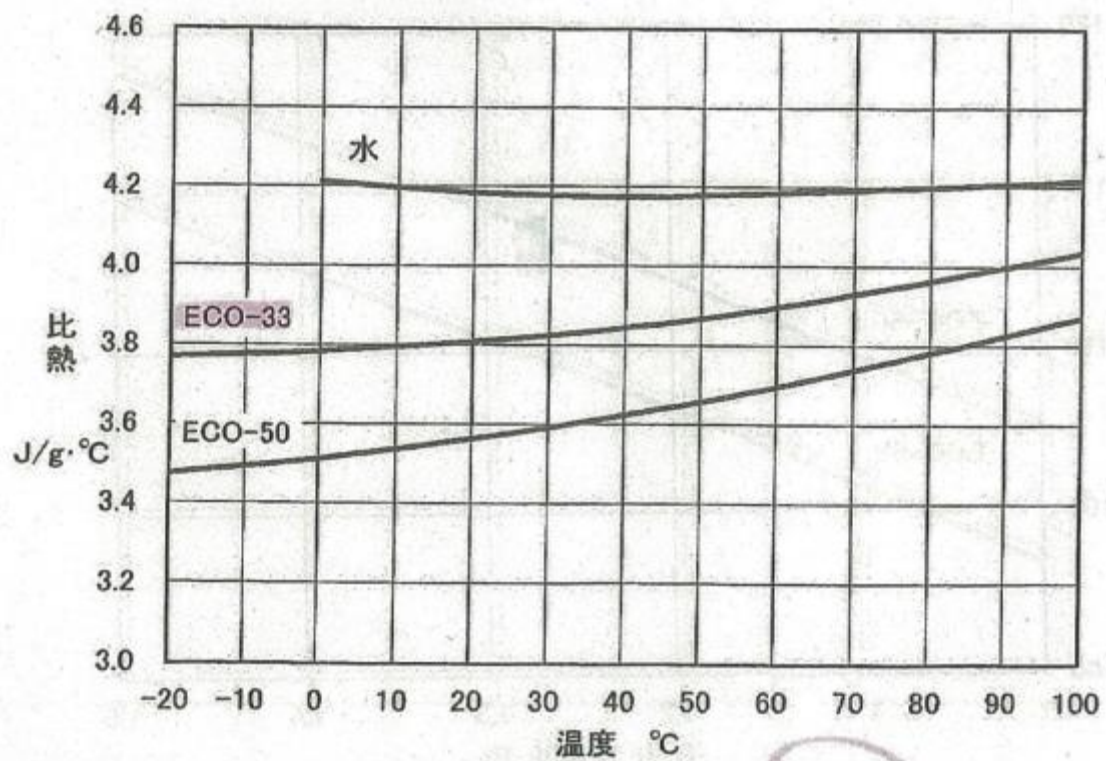


図 5.2.1.5 WESTON 長寿命ブライン ECO の比熱

5.2.2 床暖房と給湯併用の設備システム

システム全体のしくみは図 5.2.2.1、計測システムは図 5.2.2.2 に示す。太陽集熱器で太陽熱を吸収し、暖められた熱媒の熱を水と熱交換をさせて床暖房と給湯のお湯として利用する。貯湯運転時、システムは太陽熱パネル、熱交換器、三方弁、貯湯ユニット及び補助熱源機により構成される。給水量は給湯量に合わせて、貯湯ユニットの貯湯タンクは満水状態で保っている。貯湯タンクの熱貫流率を与え室外温度による熱損失も考慮される。

ポンプにより、熱媒を集熱器と熱交換器の間で循環させる。貯湯タンク内の貯湯は、熱媒と水の間で熱交換することにより水温が上がる。貯湯の水温は給湯温度より低い場合、補助熱源機により貯湯を温め、設定温度に達してから室内に供給する。なお、貯湯の水温は給湯温度より高い場合、常温の給水と混合し給湯する。

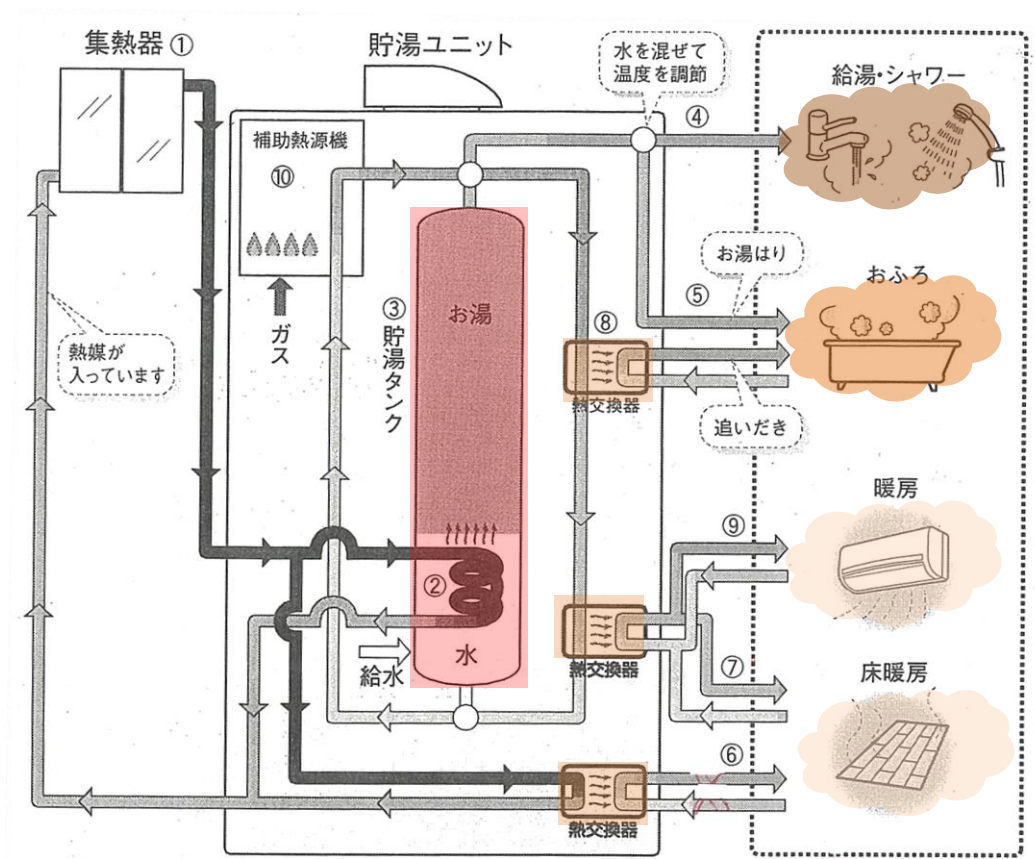


図 5.2.2.1 システム全体のしくみ

図 5.2.2.3 に本研究のシミュレーションで簡略されたシステム構成となる。全体の熱源は太陽集熱器となり、熱量が不足の場合、熱源機を利用する方針である。システムは床暖房システムと給湯システムの 2 部分によって構成される。太陽集熱器の集熱はまず床暖房システムに利用され、熱交換した後の水温が 45℃以上になる場合、そのまま部屋に供給す

る。45℃になっていない場合、熱源機を通して 45℃に加熱され、部屋まで流す。床暖房システムを OFF にしても室内温度を 22℃の前後にキープできる場合、太陽集熱器の集熱量をタンクの水で蓄熱される。

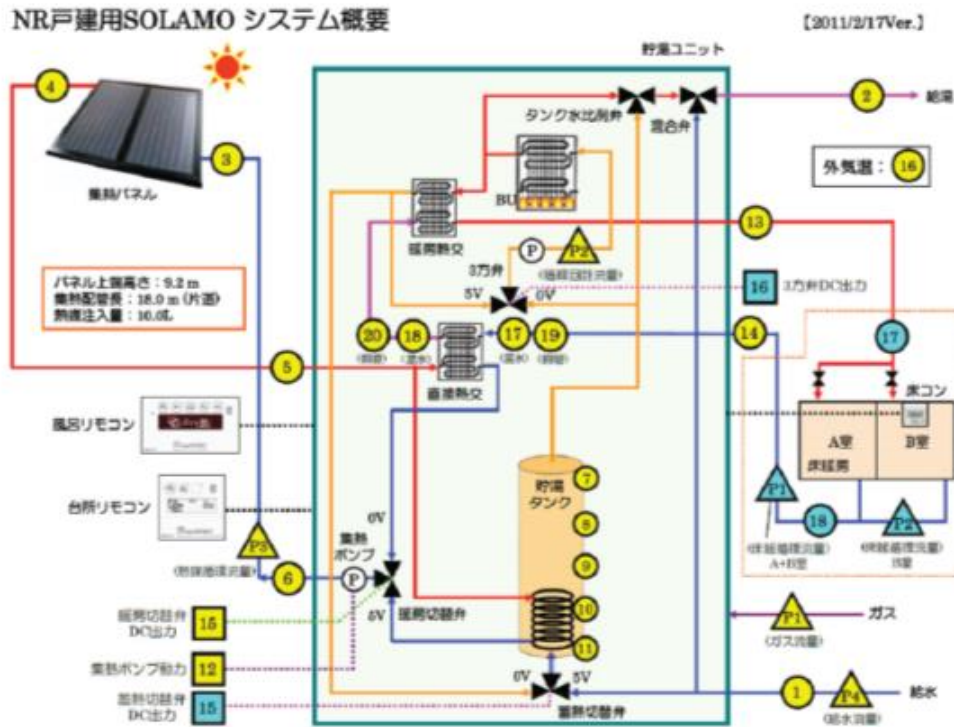


図 5. 2. 2. 2 計測システム

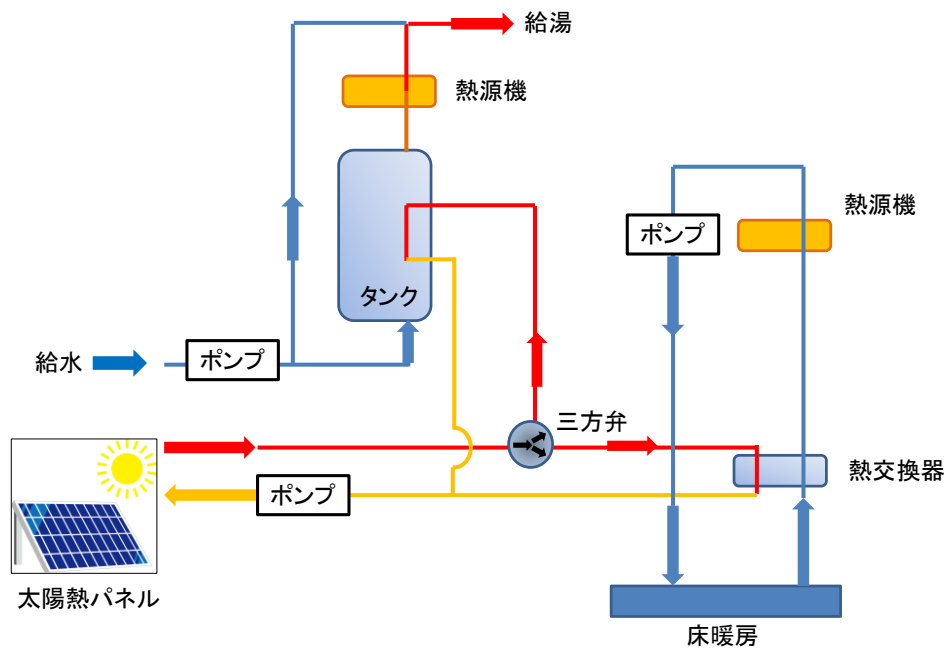


図 5. 2. 2. 3 単純化されたシステムの構成

5.3 TRNSYS を用いたシステムシミュレーション概要

5.3.1 シミュレーションプログラム

シミュレーションは熱計算プログラム TRNSYS を用いた。TRNSYS(TRaNsient SYstem Simulation)は省エネルギー化と快適性を両立させる建築環境を設計することを目的とした温熱環境シミュレーションプログラムの1つである。最初は負荷計算を目的として、開発されたものではなく、太陽熱システムによる動的シミュレーション及び設計のために作られた。アメリカの Wisconsin 大学で開発され、現在はドイツ、フランスなど世界各国で開発が継続されている。

TRNSYS は熱負荷計算において「伝達関数法(Transfer Function)」を基にしており、モジュール構成を用いているため拡張性及び交換性にその長所を持つ。建物の動的熱負荷計算以外にも HVAC システムの解析及び規模算定、太陽熱システムの解析、制御システムの分析等設備システムにおいて応用性を発揮する。また、建物と設備システムを含む全体システムの解析を通じて設備または建物の総合的な評価が可能である。

TRNSYS で冷暖房に費やされるエネルギー量及び熱負荷を算出するために、多様なモジュールを用いる。計算目的に合わせ概略的な熱負荷計算のためのデグリーデー法や伝達関数法を用いた詳細な方法すべてを提供する。モジュールの1つである Type 56 では伝達関数法を基にして壁、天井、床などをモデリングする。壁体の内外側すべてを対象にすべての放射熱交換（太陽からの短波及び他の壁体、天空からの長波すべて）を考慮する。複数室で構成された建物に対するデータを入力するのが複雑である。TRNSYS では、「TRNBuild」を用いて建物データを入力して複数室の設定を行い、「Simulation Studio」で Type 56 としてシミュレーションに利用される。これには壁体および窓の構成、各材料の物性値及び設定温湿度、在室者、照明器具の数等といった室内条件をファイル形式で作る。

5.3.2 建物に関する設定

図 5.3.2.1 及び表 5.3.2.1、表 5.3.2.2 に検討対象空間の概要を示す。検討対象住宅として、図 5.3.2.1 に示した建築環境・省エネルギー機構によって提案されている住宅モデル(以下、IBEC 住宅モデルと呼ぶ)を用いる。住宅モデルは延べ床面積 120.07m²の木造の2階建てであり、居室は1階にLD、キッチン、和室、2階に洋室と寝室の計5室から構成される。この住宅モデルは日本の気候区分によって開口部面積等の詳細部分が異なる2つのモデルが提案されており、本研究においては東京都の気候に対応した建物モデルを用いて検討する。

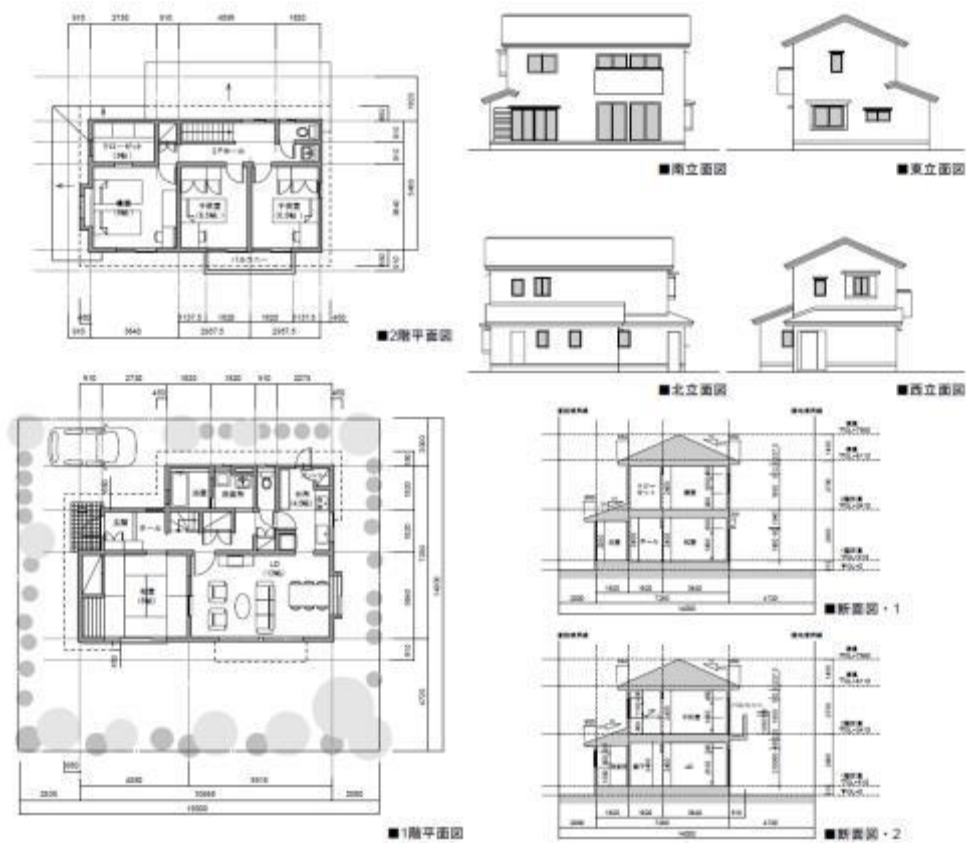


図 5.3.2.1 検討対象空間

表 5.3.2.1 検討対象空間の概要

階	室名称	床面積(m ²)	天井高(m)	容積(m ³)
1	居間(L)及び食堂室(D)	21.53	2.4	51.67
	台所(K)	8.28	2.4	19.87
	和室	16.56	2.4	39.74
	浴室	3.31	2.4	7.94
	洗面所・トイレ	4.97	2.4	11.93
	廊下・玄関	13.25	2.4	31.80
1階小計		67.90	-	162.95
2	主寝室	13.25	2.4	31.80
	子供室	10.77	2.4	25.85
	子供室	10.77	2.4	25.85
	クローゼット	4.97	2.4	11.93
	トイレ	3.32	2.4	7.97
	廊下・階段	9.11	2.4	21.86

2 階小計	52.17	-	125.26
合計	120.07	-	288.21

表 5.3.2.2 検討対象空間における開口部の仕様

階	室名称	方位	窓面積(m ²)
1	居間(L)及び食堂室(D)	南	6.62
		東	1.66
	台所(K)	東	0.73
	和室	南	3.31
	洗面所・トイレ	北	0.56
2	主寝室	南	3.31
		西	0.83
	子供室	南	3.31
	子供室	南	3.31
		東	0.83
	トイレ	北	0.41
	廊下・階段	北	0.83

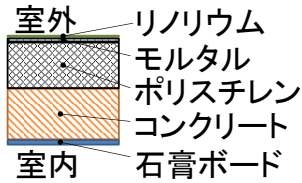
5.3.2.1 建物壁体の設定

表 5.3.2.3 に建物外皮の境界条件詳細を示す。建物外皮及び開口部の境界条件は、次世代省エネルギー基準に従う物性値（熱損失係数 2.7 相当）をそれぞれ用いる。窓は複層ガラスを想定し、2.9 W/m・K である。各壁面における熱橋は考慮しない。

表 5.3.2.3 建物外皮の境界条件詳細

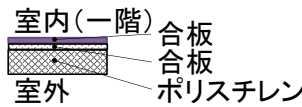
(a) 外壁		厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率：0.383)	比熱(kJ/kg・K)	密度 (kg/m ³)
	石膏ボード	13	0.211	1.0	900
	ロックウール	89	0.036	0.9	80
	合板	1	0.150	1.2	800
	モルタル	30	1.400	1.0	2000

(b) 屋根



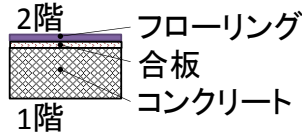
	厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率: 0.293)	比熱(kJ/kg・K)	密度 (kg/m³)
リノリウム	2	0.169	1.0	1000
モルタル	6	0.700	1.0	1400
ポリスチレン	90	0.031	1.25	20
コンクリート	100	1.400	1.0	800
石膏ボード	9	0.350	1.0	1200

(c) 床 (一階)



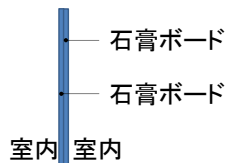
	厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率: 0.398)	比熱(kJ/kg・K)	密度 (kg/m³)
合板	12	0.150	1.2	800
合板	15	0.150	1.2	800
ポリスチレン	54	0.025	1.25	15

(d) 床 (中間の床)



	厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率: 1.687)	比熱(kJ/kg・K)	密度 (kg/m³)
フローリング	12	0.140	1.2	650
合板	12	0.150	1.2	800
コンクリート	100	0.389	1.0	800

(f) 間仕切り



	厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率: 0.398)	比熱(kJ/kg・K)	密度 (kg/m³)
石膏ボード	12	0.350	1.0	1200
石膏ボード	12	0.350	1.0	1200

5.3.2.2 相似則による床暖房の設定

TRNSYS では、壁体内の非定常熱伝導の計算にレスポンスファクター法が用いられる。カナダの Stephenson と Mitalas によって発表された伝熱関数関係式に基づいて壁体をモデル化する。任意の壁体に対して、内外壁面における伝導熱流は下式で求められる。

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,i}^k \quad \dots\dots(3-1)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,o}^k \quad \dots\dots(3-2)$$

ここで、 a_s 、 b_s 、 c_s 、 d_s はタイムシリーズの係数、z-transfer 関数によって定まる。表面温度と表面熱フラックスのタイムシリーズ方程式は等時間間隔で解析される。上添え字 k はタイムシリーズを表し、現時点は $k=0$ 、前の 1 ステップは $k=1$ 。窓面は熱容量なしの外壁（2 節点モデル）として取り扱われる。日射が部分的に窓を透過できるが、内部長波輻射は窓を通さない。長波輻射は窓の表面にしか吸収されないと仮定している。

$$a_s^0 = b_s^0 = c_s^0 = U_{g,s} \quad \dots\dots(3-3)$$

$$a_s^0 = b_s^0 = c_s^0 = d_s^0 = 0 \quad (k > 0) \quad \dots\dots(3-4)$$

壁体のレスポンスファクターを求めるため、タイムシリーズの時間間隔の係数を求める必要がある。しかし、壁体の構造によって、薄い建材層などのような係数を計算できない場合がよくある。その際に、TRNBUILD のファイルが保存できなく、タイムベースを調整してくださいというエラーが発生する。今回のシミュレーションにおいて床冷暖房条件は TRNBuild の設定の中で「Active Layer」を用いた床の境界条件設定を行った。Active Layer の床暖房設定は図 5.3.2.2 に示される。しかし、実際の床暖房の構造を再現する際に、断熱層や空気層などの小さい厚さを持つ壁体層のレスポンスファクターは上記の理由で計算できなかった（ d_1 を薄くすることができない）。

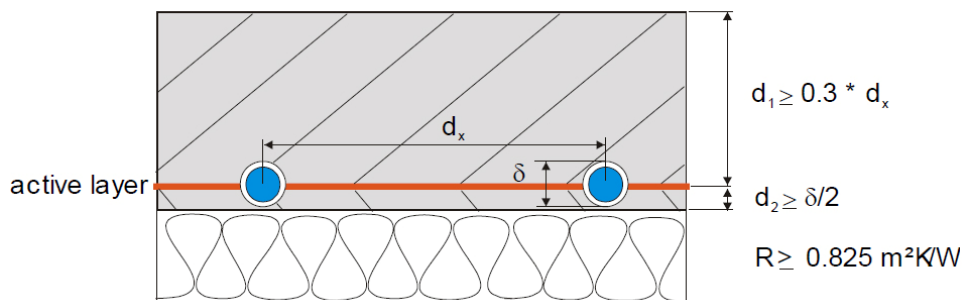


図 5.3.2.2 Active Layer の設定条件

そのため、今回は熱伝導の相似則を用いて建材層の厚さを TRNSYS の下限値にし、材料の熱伝導率、比熱または密度を合わせて調整することにより、同じ応答係数を求めることが期待されている。すなわち、図 5.3.2.3 に示すように TRNSYS において、壁体の構成に係わらず、同一のレスポンスファクターであれば、同じ熱応答性能になり、室内空気と同じ影響を与える。

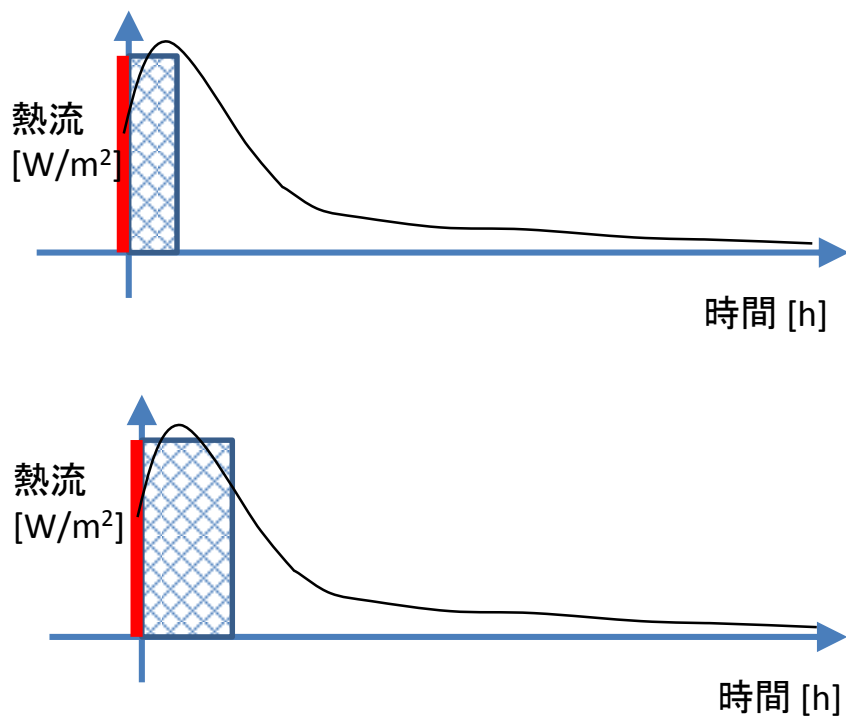


図 5.3.2.3 壁体の物性値の調整によるレスポンスファクターの同一

ここで、熱伝導のフーリエ数 Fo を用いて壁体物性値の変更値を求める。フーリエ数は、固体内に蓄えられる熱エネルギーに対する熱伝導で伝わる熱エネルギーの割合である。フーリエ数を一致させれば、熱伝導の特徴が相似する。

$$Fo = \alpha t / L^2$$

……………式(3-5)

α : 熱拡散率 (温度拡散率) $= \lambda / \rho c \text{ (m}^2/\text{s)}$

λ : 熱伝導率 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$

t : 無次元時間

L : 長さ (距離) $[\text{m}]$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \\ \frac{T_0}{t_0} \cdot \frac{\partial \left(\frac{T}{T_0} \right)}{\partial \left(\frac{t}{t_0} \right)} &= \alpha \frac{T_0}{L_0^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \left(\frac{x}{L_0} \right)} \left(\frac{\partial \left(\frac{T}{T_0} \right)}{\partial \left(\frac{x}{L_0} \right)} \right) \\ \frac{\partial T'}{\partial t'} &= \frac{\alpha t_0}{L_0^2} \frac{\partial^2 T'}{\partial x'^2} \end{aligned}$$

$$Fo_1 = Fo_2$$

$$\alpha_1 t / L_1^2 = \alpha_2 t / L_2^2$$

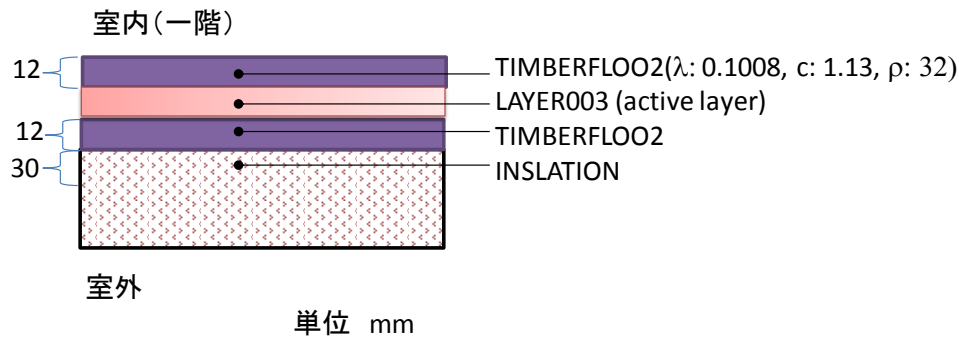
$$\alpha_1 / \alpha_2 = (L_2 / L_1)^2$$

$$(\lambda/\rho c)_1/(\lambda/\rho c)_2=(L_2/L_1)^2$$

$$\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) \cdot \left(\frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}\right) = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^2 \quad \dots\dots\dots \text{式 (3-6)}$$

従って、壁体の厚さ L 、熱伝導率 λ 、密度 ρ および比熱 c を式 (3-6) によって調整すればよい。今回変更された床暖房の構成と各層建材の物性値は表 5.3.2.4 に示す。

表 5.3.2.4 床（一階、床暖房適用）



	厚(mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率：0.386)	比熱(kJ/kg・K)	密度(kg/m ³)
合板	12	0.150	1.2	800
Active Layer	-	0.350	-	-
合板	15	0.150	1.2	800
ポリスチレン	54	0.025	1.25	15

5.3.2.3 3D 形状による詳細放射計算モデルの導入

検討対象空間のモデリングは SketchUp を用いて 3D モデリングを行う。SketchUp は多数室モデルを作成するためのアプリケーションとして利用され、プラグインとして動作する。TRNBuild で建物のデータを作成する際に、その前段階として 3D の画面上で建物の形状を入力することができる。TRNbuild でも形状データの入力が可能であるが、図面からの拾い出しと入力になる。TRNSYS 3D では形状を効率良く作成することができる。図 5.3.2.5 に Sketch Up による検討対象空間の 3D モデリングを示す。図 5.3.2.5 の紫色の形状は「Shading Group」と呼ばれる遮蔽物で日射遮蔽物として扱われ、これを使って開口部の直達日射の影響が考慮できる。

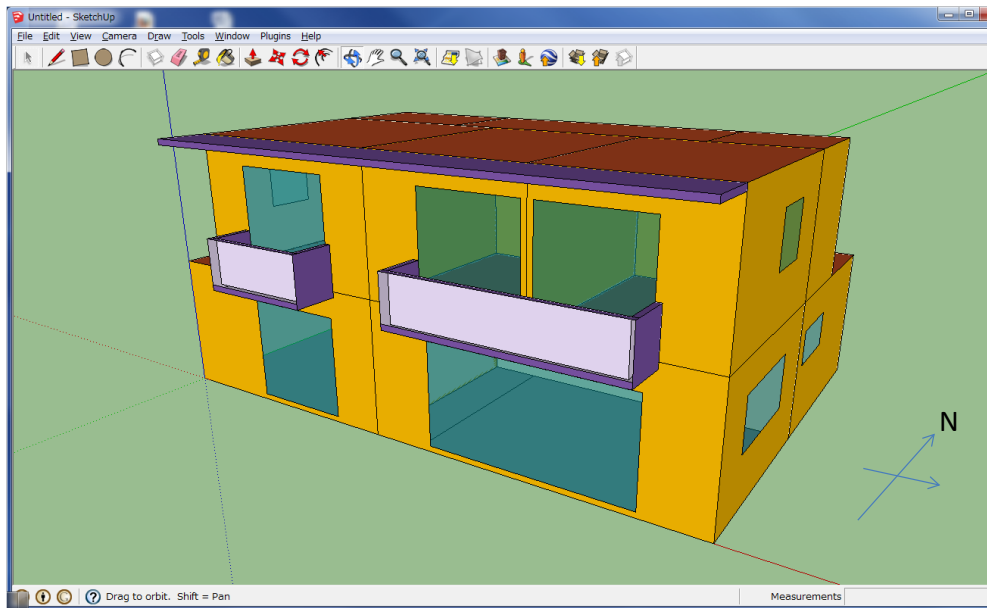


図 5.3.2.5 Google Sketch Up による検討対象空間の 3D モデリング

従来、TRNSYS に代表されるネットワークモデルは、計算対象の形状を考慮せず、壁面と室内空気との熱交換および壁面の間の熱交換は総合熱伝達率を用いて計算する。3D モデリングの導入により、TRNSYS では形態係数の計算をはじめ、直達日射、天空日射、長波長放射の詳細な計算が可能である。図 5.3.2.6 に長波長放射における室温計算仕組みの概念を示す。Standard Model では各壁面の表面温度と室内側の総合熱伝達係数により T_{star} が計算され、次に対流熱伝達係数によって T_{air} が計算される。Detailed Model では各壁面からの形態係数が計算され、各壁間において相互的に対流熱伝達及び放射熱伝達の計算によって T_{air} が決定される。

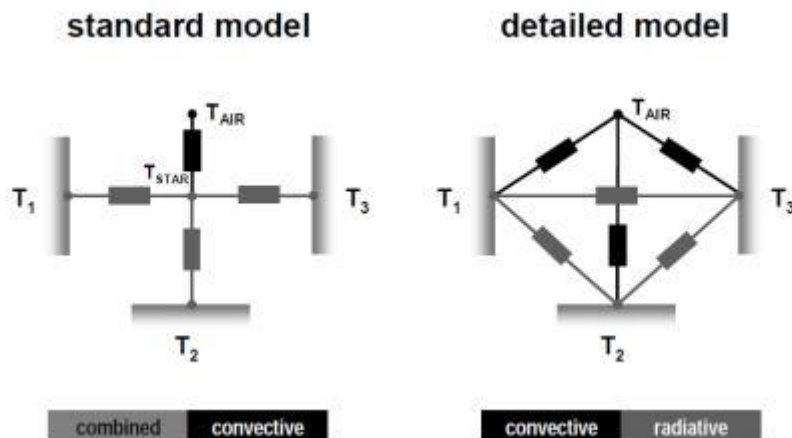


図 5.3.2.6 長波長放射における室温計算仕組みの概念

5.3.2.4 空気流の設定

ゾーン相互間、建物外部から内部への隙間風、換気装置での空気流動は TRNFLOW による連成により計算される。多数室空気流動モデル(図 5.3.2.7 参照)は「Node」と呼ばれる節点と「Link」と呼ばれる連結でネットワークされる。「Node」は建物外界環境と部屋を表し、「Link」は開口部、ドア、隙間、換気口はもちろん、ダクト、ファンなどの換気系統を表す。解析における空気流動モデルは入力 Node 温度から始まり、各 Link に対応する空気流量を計算する。これらの空気流動は最終的に室内温度を出力とする熱負荷モデルで使用される。

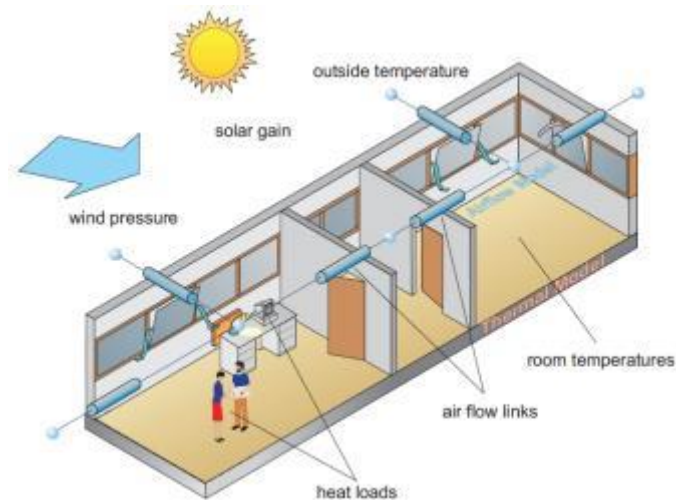


図 5.3.2.7 自然換気によるオフィスの熱及び空気流動モデル(例)

IBEC 住宅モデルの熱負荷計算では 0.5 回/h の換気回数に一部の部屋における局所換気で換気負荷を計算する。図 5.3.2.8 に TRNFLOW の連成における Node 設定詳細を示す。Node の設定は窓とドアの開口部は「Large Opening」とし、他の壁面は「Crack」として設定した。TRNFLOW の連成では第 3 種換気を行うと想定し、計 5 室において排気ファンの境界条件として入力した。ファンの仕様は、IBEC 住宅モデルの熱負荷計算における局所換気量想定値に合わせた市販品のカタログを参照した。ゾーン間のリンク設定の詳細は附録 2 に参照。

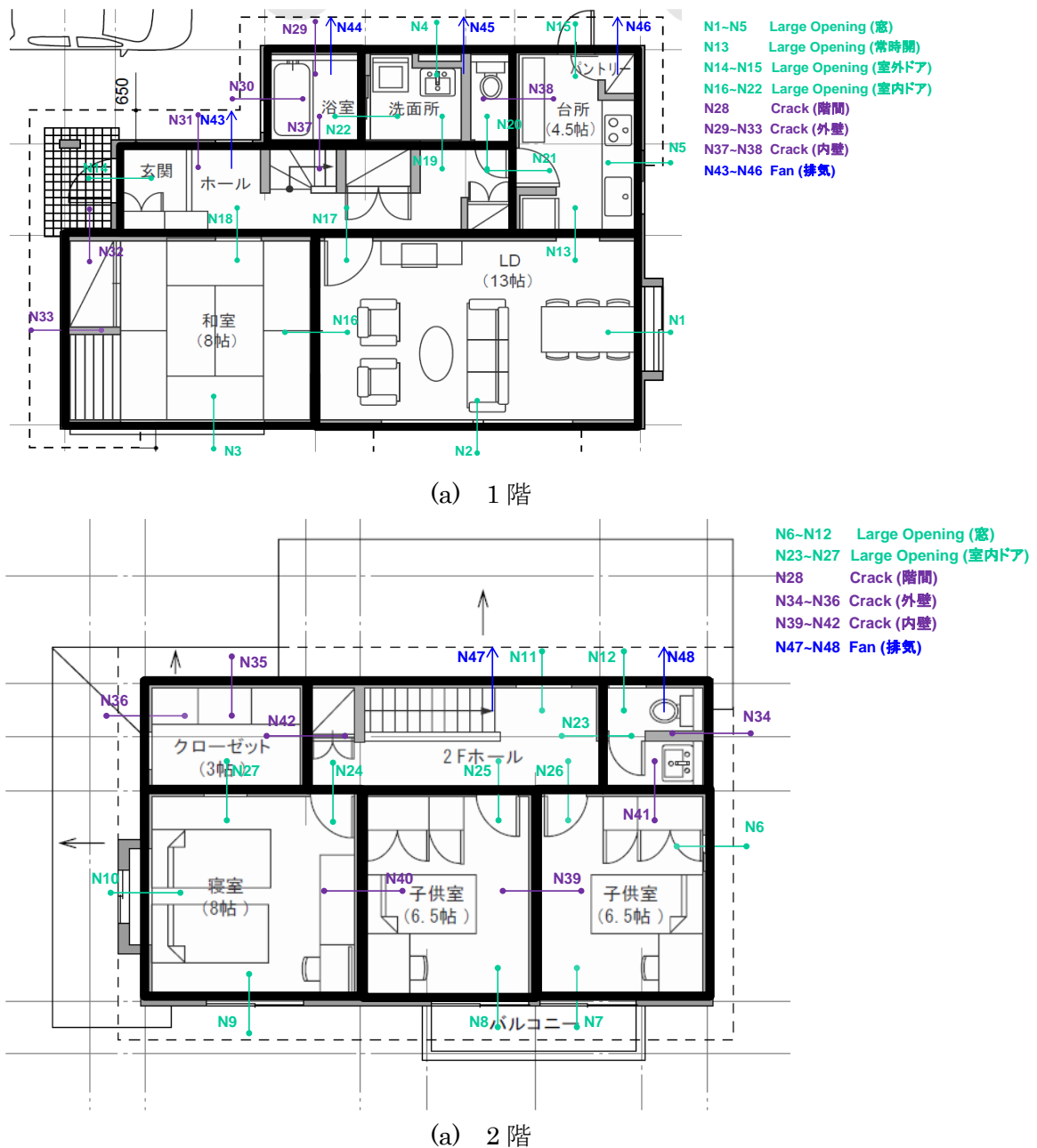
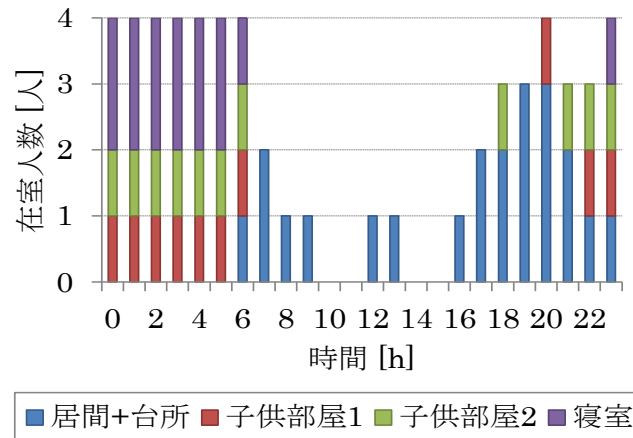


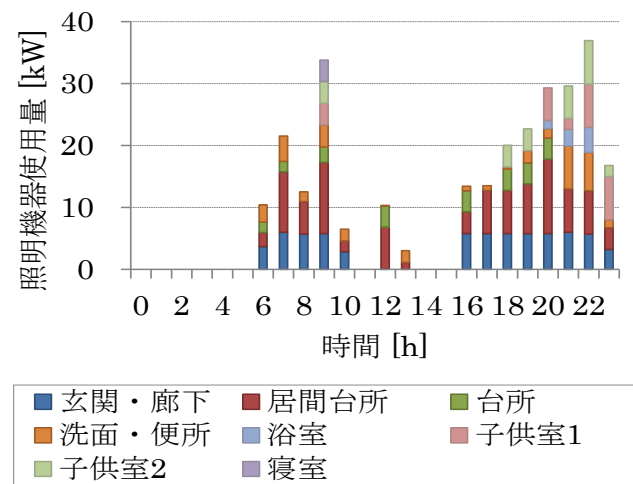
図 5.3.2.8 TRNFLOW における Node 設定詳細

5.3.2.5 内部発熱のスケジュール

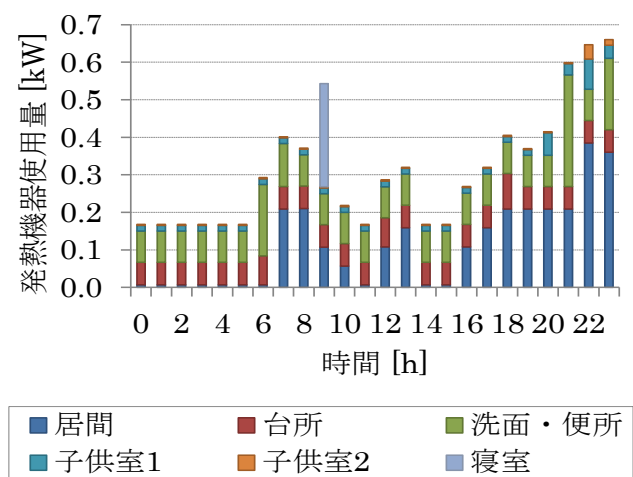
居住者の家族構成は 4 人家族と設定した。各部屋における在室者、照明および機器からの発熱スケジュールを図 5.3.2.9 に示す。



(a) 在室者スケジュール



(b) 照明設備スケジュール



(c) 発熱機器スケジュール

図 5.3.2.9 在室者、照明設備、発熱機器スケジュール

5.3.3 気象データの作成

気象庁で公開されている2011年2月24日～2011年5月30日の東京のデータをもとに、Type99を用いて気象データを作製した。図5.3.3.1に作製した気象データの入力画面を示す。最初の2行目～6行目では、経度、緯度、グリニッジ標準時間、データの読み取り間隔、およびデータの読み込み開始位置をそれぞれ指定した。7行目～18行目では、表5.3.3.1に示す気象条件の設定項目を入力した。表5.3.3.1に含まれる設定項目の詳細を表5.3.3.2に示す。ここで、各時刻における水平方向の日射量、法線方向の日射量、水平方向の大気拡散放射量の値については気象庁で公開されていないため、ここではすべて0とし、解析に必要な各傾斜面への放射量は、水平面への全放射量と外気温、相対湿度から推算した。参考として、傾斜面への放射量を見積もるためにTRNSYSに搭載されている推算モデルを表5.3.3.3に示す。また、解析に必要な大気放射量の値についても同様に、気象庁で公開されていないため、ここでは標準気象データの大気放射量の年間平均値339W/m²を一定値として与えて表現した。19行目以降の<data>では、表5.3.3.1で設定した項目の値を1時間ごとに入力した。ここで、<data>の第一行は対象とする年の1月1日0時の値として入力する必要がある。もし、1月1日0時以外の日時の値をデータの開始として第一行に入力した場合、その時刻における太陽高度が正しく計算されないため注意が必要である。

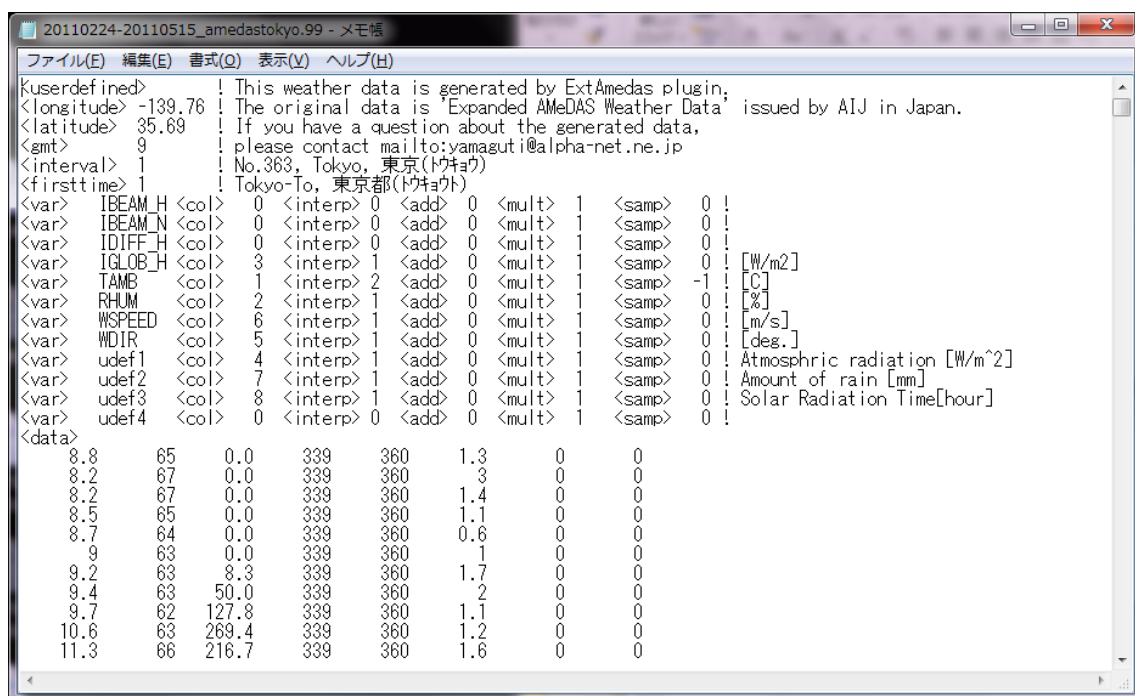


図 5.3.3.1 Type99 を用いた気象データの入力画面

表 5.3.3.1 気象条件の設定項目

<var>	設定項目	和訳	単位	<col>	<interp>	<add>	<mult>	<samp>
IBEAM_H	Beam radiation on horizontal	水平方向の日射量		0	0	0	1	0
IBEAM_N	Beam radiation at normal incidence	法線方向の日射量		0	0	0	1	0
IDIFF_H	Sky diffuse radiation on horizontal	水平大気拡散放射量		0	0	0	1	0
IGLOB_H	Global radiation on horizontal	全天日射量	[W/m ²]	3	0	0	1	0
TAMB	Ambient temperature	気温	[C]	1	0	0	1	0
RHUM	Relative humidity of ambient air	相対湿度	[%]	2	1	0	1	0
WSPEED	Wind speed	風速	[m/s]	6	1	0	1	0
WDIR	Wind direction	風向	[deg.]	5	1	0	1	0
udef1	Atmospheric radiation	大気放射量	[W/m ²]	4	0	0	1	0
udef2	Amount of rain	降水量	[mm]	7	0	0	1	0
udef3	Solar Radiation Time	日照時間	[hour]	8	0	0	1	0
udef4				0	0	0	1	0

表 5.3.3.2 設定項目の詳細

<col>	変数を入力するコラムの番号。もし0を入力した場合、対象の変数は読み飛ばされ、出力結果として0が反映される。
<interp>	補完方法。0: 補完しない、1: 線形補完、2: 5点のスプライン補完
<add>	付加係数(ai)の設定。
<mult>	増倍率(mi)の設定。
<samp>	サンプリングの設定。-1: 現在の時刻から1ステップ後の時刻の間に値を持たせる。0: 現在の時刻の±0.5ステップの間に値を持たせる。1: 1ステップ前の時刻から現在の時刻の間に値を持たせる。

表 5.3.3.3 TRNSYS に搭載されている大気放射量の推算モデル

タイプ	変数の組合せと推算方法
(a)	水平面への日射量と水平面への拡散放射量から推算
(b)	水平面への全放射量と水平面への拡散放射量から推算
(c)	水平面への全放射量と水平面への法線日射量から推算
(d)	水平面への全放射量と外気温、相対湿度から推算(Reindlの完全相関式)
(e)	水平面への全放射量からのみ推算(Reindlの省略型相関式)

5.3.4 太陽集熱器のモデル化

TRNSYS は、開発の当初、主に太陽熱集熱システムを動的に解析するためのプログラムであった。その後、様々な研究者により様々な空調システムの要素や機器モデルなどが組み込まれ、現在最新版の TRNSYS はすでに空調システムの動的な解析を行うことができるようになっている。TRNSYS のライブラリに平板型と真空型集熱器の熱性能をシミュレート

できるモジュールがある。ソーラーコレクタを直列および並列に接続することができる。実際の集熱器を再現するため、ユーザーは標準テストで確定された効率曲線のデータを解析に入れる必要がある。表 5.3.4.1～表 5.3.4.3 に Type1b のパラメータ、インプットおよびアウトプットを示す。また、全体のシミュレーションにおいては、モジュール Type1b を用いた。

表 5.3.4.1 太陽集熱器モジュールのパラメータ

Type1b パラメータ	説明
Number in series [-]	シリーズ内の集熱器の数 (This parameter is used to specify how many collectors are hooked up in a series arrangement) 結果に影響を与えない
Collector area [m ²]	集熱器の全面積 The total area of the solar collector array consistent with the supplied efficiency parameters (typically gross area and not net area)
Fluid specific heat [KJ/kg. K]	集熱器の中の液媒の比熱
Efficiency mode [-]	集熱器の入口温度、出口温度、および平均温度の三つの温度で太陽集熱器の効率方程式を表すことができる。利用される温度によって、効率モードを 1、2、3 に設定する (1 : 入口; 2 : 出口 ; 3 : 平均)
Tested flow rate [kg/h. m ²]	集熱効率パラメータを決めるための測定単位面積当たりの質量流量。測定データがない場合、現在の運用条件下での流量を設定していい。
Intercept efficiency [-]	効率対 (温度差/入射太陽放射線) 曲線の関連パラメータ : Intercept efficiency: Y 軸のインターセプト、係数 a0 Efficiency slope: 効率勾配、係数 a1 Efficiency curvature: 効率曲線の曲率、係数 a2
Efficiency slope [kJ/h.m ² .K]	
Efficiency curvature [kJ/h.m ² .K ²]	
Optical mode 2 [-]	太陽入射がオフノーマルの場合、効率パラメータを修正する四つの方法がある (Optical mode 1-4)。このパラメータは一定、変更の場合、Type1a、Type1c、Type1d などを使用
1st-order IAM [-]	Incidence Angle Modifier (IAM) 集熱器テストは通常晴天の日に行われる。それで、透過率と吸収率の積はビーム放射のノーマル

2nd-order IAM [-]	<p>入射値とほぼ接近している。</p> <p>修正係数を用いて効率インターセプトを修正する。Modifier = $1 - b_0 * S - b_1 * S^2$</p> <p>1st-order IAM : b_0、 2nd-order IAM: b_1</p>
-------------------	---

表 5.3.4.2 太陽集熱器モジュールのインプット項目

インプット	説明
Inlet flow rate [kg/h]	入口における流体の流量、一般的にポンプのアウトプットとつなぐ
Inlet temperature [C]	入口における流体の温度、一般的にポンプのアウトプットとつなぐ
Ambient temperature [C]	環境温度、気象データモジュールが提供
Incident radiation [KJ/h.m ²]	入射放射量、気象データモジュールが提供 Total radiation on tilted surface
Total horizontal radiation [KJ/h.m ²]	全水平方向の放射量、気象データモジュールが提供 Total radiation on horizontal →
Horizontal diffuse radiation [KJ/h.m ²]	水平方向の天空放射量、気象データモジュールが提供 Sky diffuse radiation on horizontal →
Ground reflectance [-]	地面反射率、気象データモジュールが提供
Incidence angle [degrees]	太陽光入射角、気象データモジュールが提供 Angle of incidence for tilted surface →
Collector slope [degrees]	平板の傾き、気象データモジュールが提供 Slope of tilted surface →

表 5.3.4.3 太陽集熱器モジュールのアウトプット項目

アウトプット	説明
Outlet temperature [C]	出口における流体の温度
Outlet flow rate [kg/h]	出口における流体の流量
Useful energy gain [kJ/h]	単位時間当たりの取得した有用エネルギー

5.3.5 制御システムの設定

今回のシミュレーションでは、主に 2 種類の手段でポンプの運転動作を制御する。それ

それはスケジュール制御となる。

スケジュール制御は最も単純であり、Type14 を用いて各時刻におけるポンプの ON/OFF 状態を先に決める。

室温制御は Type2-AquastatH を利用した。制御ポイントとなる室温および変動幅をパラメータとして設定し、室内温度を観測しながら、ポンプの動作を制御する手法である。使用の際に、ポイントになるのはモジュールに自己ループを付けることである。即ち、モジュールのアウトプットを自分のインプットとして与える。これによって、ある程度の予測ができるので、室温を設定目標とおりになることができる。

5.3.6 システム全体の構成

図 5.3.7.1 に TRNSYS シミュレーションにおけるシステム全体の仕組みを示している。

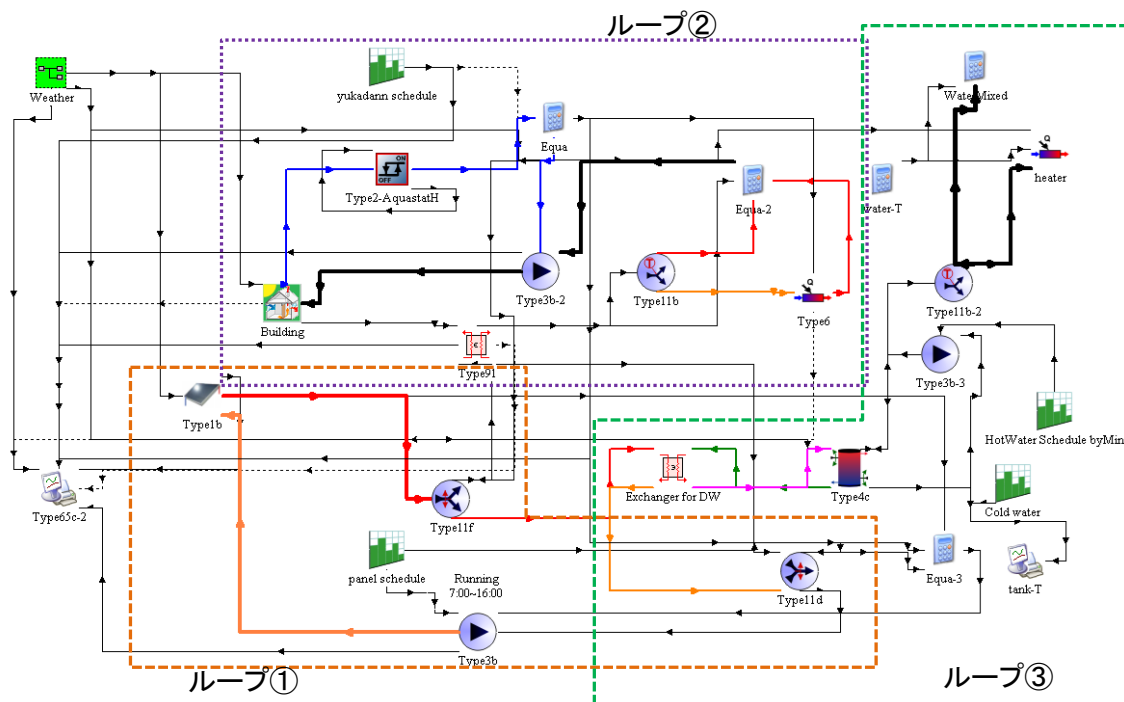


図 5.3.7.1 シミュレーションにおけるシステム

ループ①は太陽集熱器の熱媒の循環となっている。熱媒は太陽熱を吸収して温度を上昇する。高温熱媒はまず分流器 (Type11f) を通過し、床暖房の運転状況によって、床暖房システムに流れるか、給湯システムのタンクに流れるかを決められる。床暖房が運転している場合、床暖房の使用に優先する。

ループ②は床暖房の水循環となっている。熱交換器 a において高温熱媒と熱を交換して、暖められた水が 45°C 以上になっているかどうか temping valve (Type11b) で判断される。 45°C 以上の場合、そのまま床暖房に使われ、 45°C 以上になっていない場合、熱源機によっ

て 45℃までに加熱され、床暖房の給水として部屋に流される。床暖房システムの稼働期間の 7:00～23:00 の間において、循環ポンプを常に ON の状態になる。しかし、室内温度を設定上限温度以上にならないように制御モジュール (Type2) を入れた。

ループ③は給湯システムの水循環となっている。床暖房システムが OFF の状態のみ、熱媒は給湯の方に流され、タンクの中の貯水と熱を交換する。お湯を使う際に、水道の冷水がタンクの中へ補充される。給湯の使用スケジュールは Type14 で定義する。また、給湯温度は基本 45℃であり、タンクの水温がそれより高い場合、水道水と 45℃に混合させて供給する。水温が 45℃以下の場合、熱源機で加熱して供給する。

5.4 計算結果の検討と考察

5.4.1 概要

解析結果と実験結果を比較するため、代表とする 4 月 1 日、4 月 12 日および 4 月 28 日の結果を示す。三つのケースの設定は表 5.4.1.1 に示される。M1 給湯修正スケジュールを表 5.4.1.2 と図 5.4.1.1 に示す。

表 5.4.1.1 各ケースの解析設定

番号	項目	設定内容
ケース①	対象日時	2011 年 4 月 1 日 0 時～24 時
	天候	快晴
	給湯スケジュール	23:10～23:50 放出
	給湯温度	60℃
	暖房運転	7:00～23:00 設定室温 22℃
ケース②	対象日時	2011 年 4 月 12 日 0 時～24 時
	天候	快晴
	給湯スケジュール	修正 M1 モード（4 人家族想定）
	給湯温度	42℃
	暖房運転	7:00～23:00、設定室温 22℃
ケース③	対象日時	2011 年 4 月 28 日 0 時～24 時
	天候	晴
	給湯スケジュール	修正 M1 モード（4 人家族想定）
	給湯温度	42℃（一定）
	暖房運転	無し

表 5.4.1.2 給湯スケジュール（修正 M1 休日在宅）

給湯開始時刻	給湯流量[L]	給湯開始時刻	給湯流量[L]
7:15	10	19:30	20
7:55	10	19:35	20
8:10	10	19:40	20
8:30	10	19:45	20
8:35	10	19:50	20
8:40	10	19:55	20
11:55	12	20:45	150
12:45	20	21:15	25
12:50	20	21:20	25
12:55	20	21:45	5
16:00	9	22:15	25

18:00	3	22:20	25
18:05	25	22:25	5
18:10	25	22:30	25
18:15	3	22:35	25
18:25	12	22:45	11

給湯流量[L]

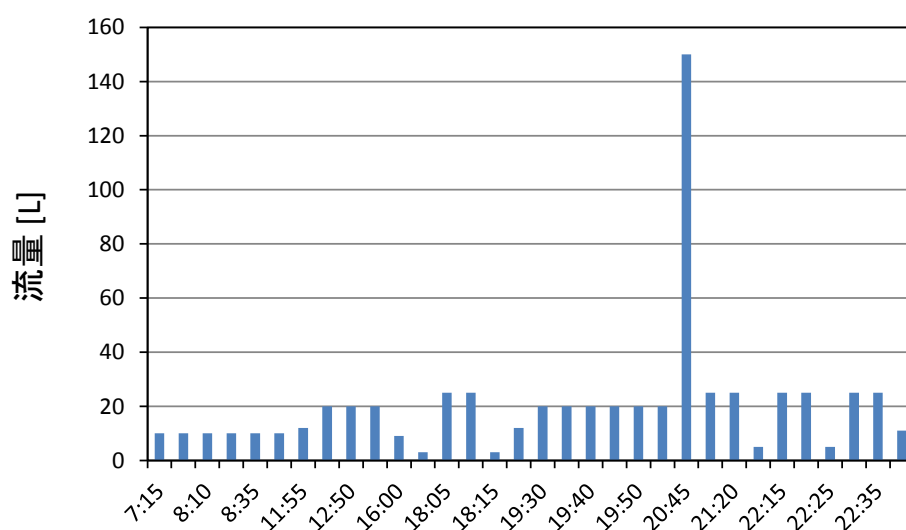


図 5.4.1.1 給湯流量のスケジュール (修正 M1)

5.4.2 床暖房システム

5.4.2.1 ケース 1 (2011 年 4 月 1 日)

実測とシミュレーション両方の室温を 22℃に設定したため、図 5.4.2.1 に 24 時間の室温変動を示しており、床暖房運転期間の 7:00～23:00 の間室温は 22℃の前後に一致することが分かる。実測では、床暖房の立ち上がり運転を設けており、7 時から 8 時までの 1 時間において給水温度を 60℃～70℃の高温水で供給する。シミュレーションでは、立ち上がり運転を設定しなかったため、室温は実測と比べ、若干低くなっている。

立ち上がり運転のため、床表面温度も同じ傾向を示している。7 時からの 1 時間では、実測の床表面温度がシミュレーションの結果より高くなっている。その後、室温を 22℃に維持するには、シミュレーションの方は床表面温度が若干高くなっている。それは、実測の建屋は IBEC の標準住宅と完全には一致していない原因と思われる。シミュレーションでは、南向きの大きな窓があり、詳細放射モデル計算によって床に吸収された熱量を床表面の温度上昇に反映される。

図 5.4.2.3 に集熱器パネルの熱媒の温度と日射量を示す。シミュレーションと実測の結果

大体一致していることが見られる。実測では特別な制御手法によって、20分サイクルとなっており、シミュレーションより、ある程度の振動が生じている。

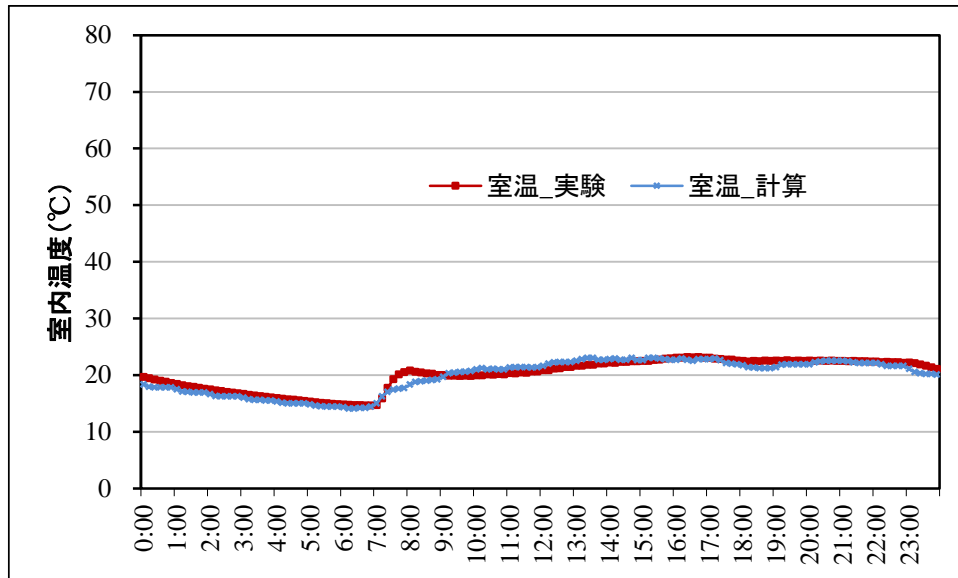


図 5.4.2.1 リビングルームの室内温度

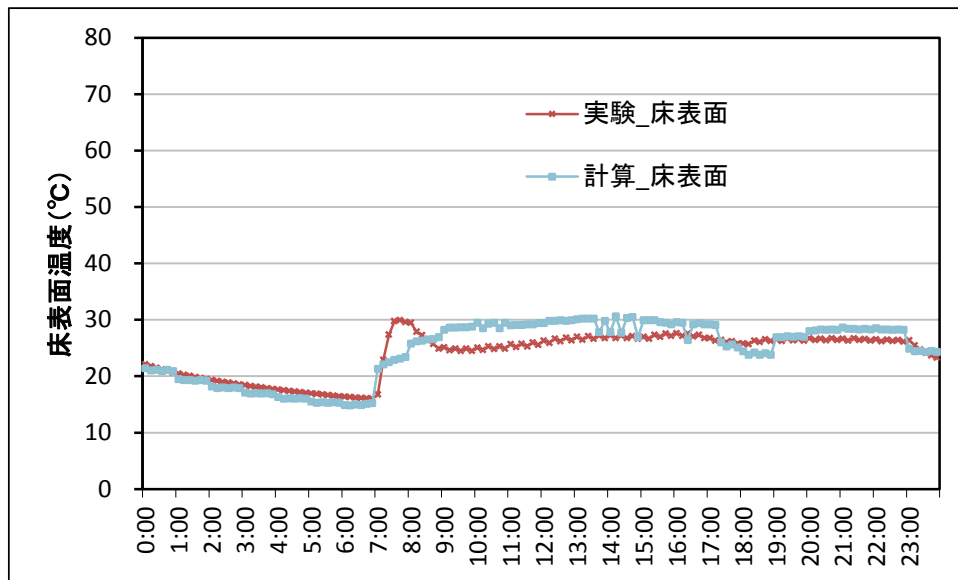


図 5.4.2.2 床表面温度

図 5.4.2.4 と図 5.4.2.5 に床暖房システムの給水・還水温度を示す。立ち上がり段階以外シミュレーションの結果が実験と大体一致していることがわかった。また、制御手法の違いによって、実測値は 20 分サイクルで振動するが、シミュレーションでは、設定とおりに

45℃の温水を提供する。給水・還水温度が落ちた箇所は室内温度制御に応じて床暖房システムのポンプがOFFとなる状態と対応する。

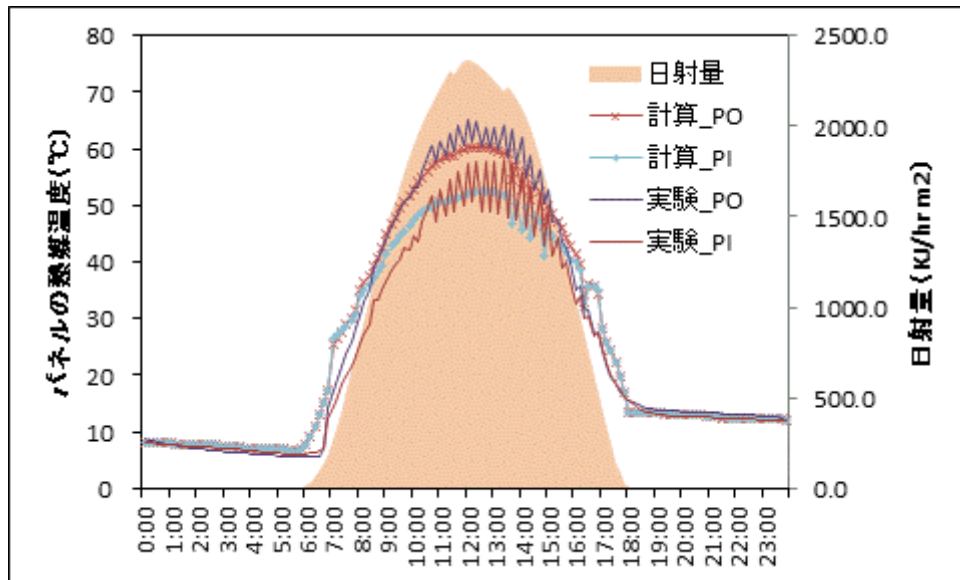


図 5.4.2.3 集熱器パネルの熱媒温度

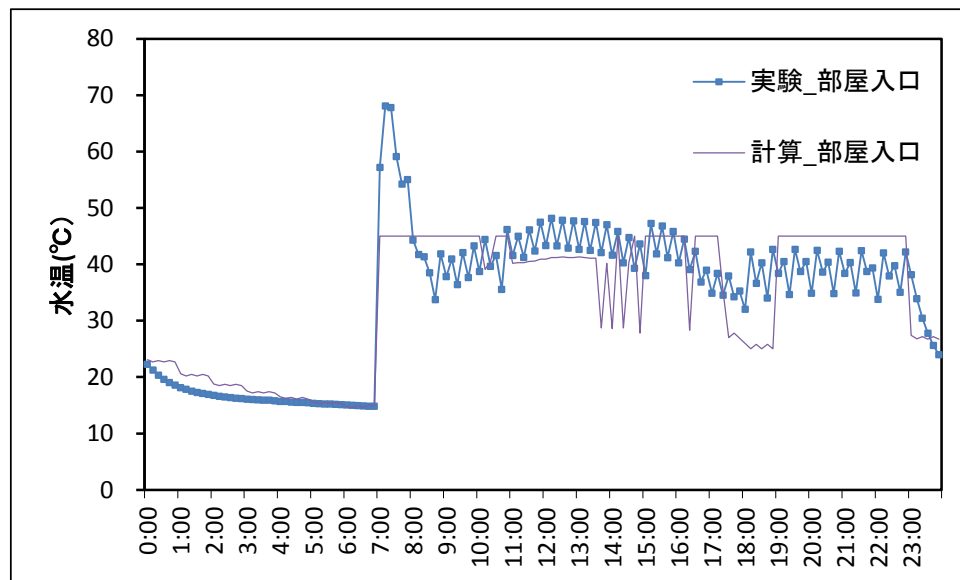


図 5.4.2.4 床暖房システムの給水温度

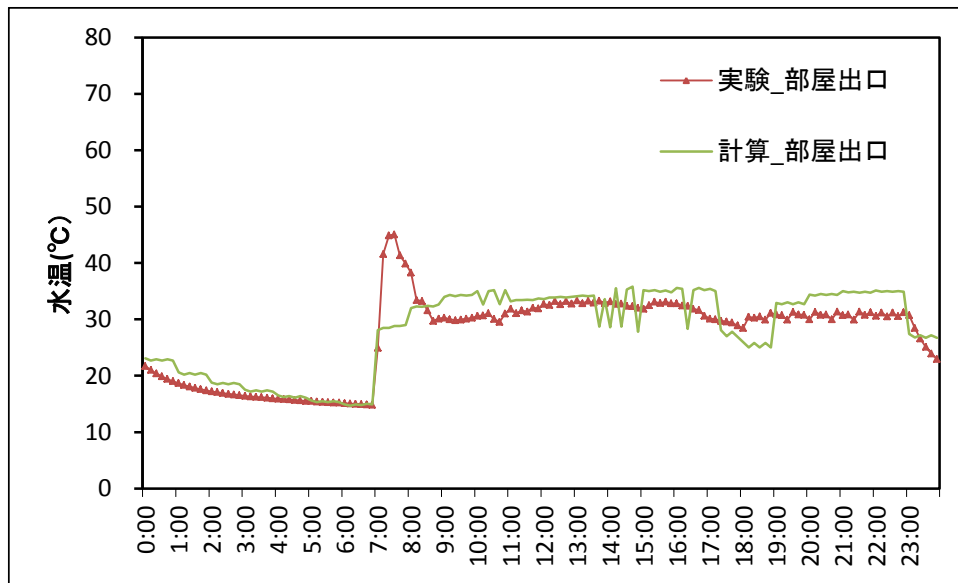


図 5.4.2.5 床暖房システムの還水温度

5.4.2.2 ケース 2 (2011 年 4 月 12 日)

ケース 2 の床暖房システムはケース 1 と同じ 7 時から 23 時まで運転し、給湯システムの運転スケジュールが異なる。図 5.4.2.6 にリビングルームの室内温度変化を示しており、立ち上がり運転の段階において、実測値が計算値より高くなっており、他の時間帯では計算は実測とほぼ一致している。

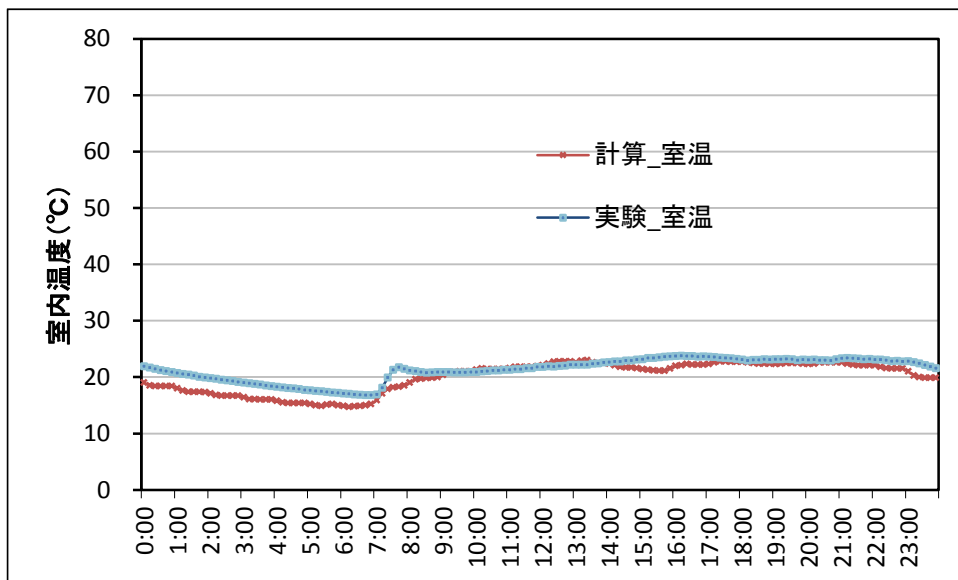


図 5.4.2.6 リビングルームの室内温度

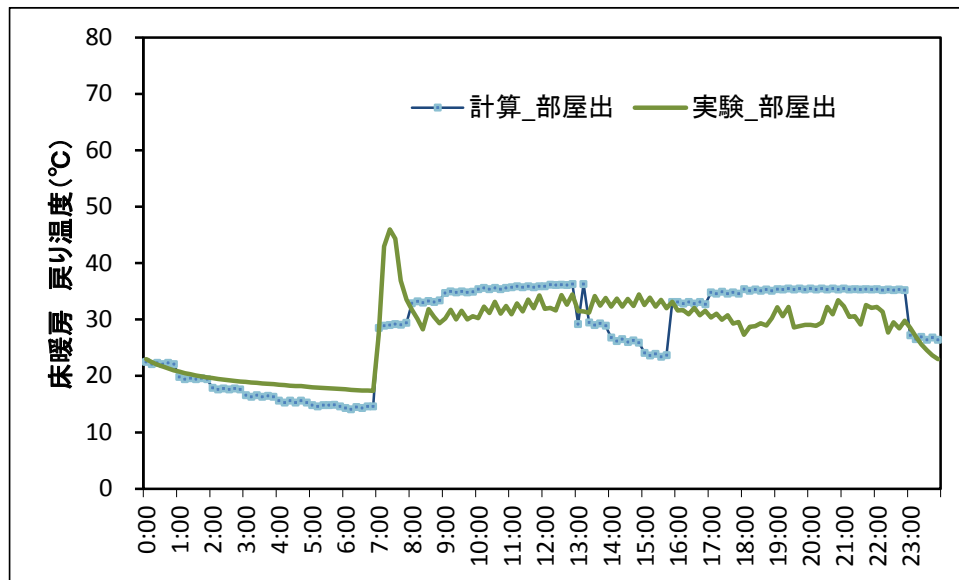


図 5.4.2.7 床暖房システムの還水温度

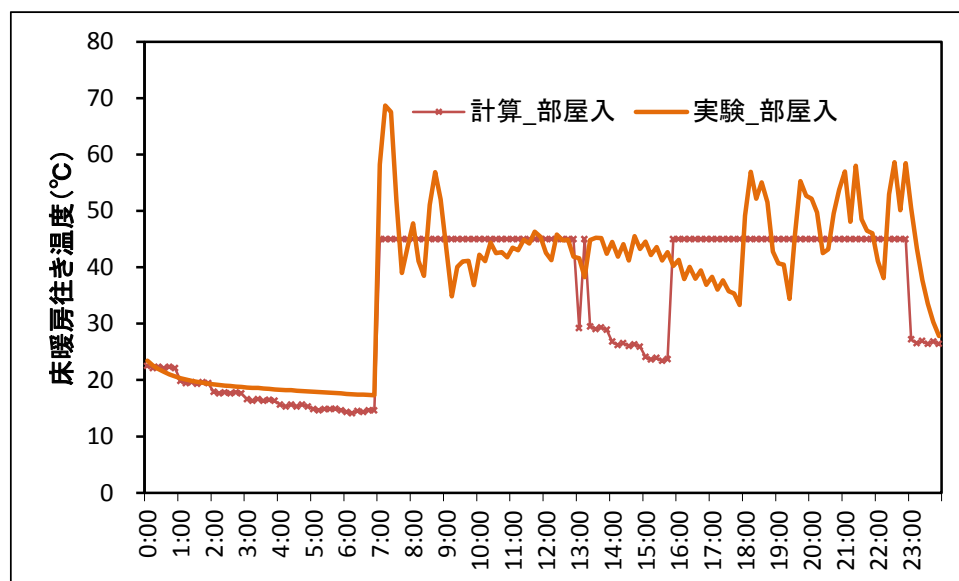


図 5.4.2.8 床暖房システムの給水温度

図 5.4.2.7 と図 5.4.2.8 に床暖房システムの給水・還水温度を示す。実測では特定の制御手法を利用したため、実測値全体は大幅に振動している結果に対して、シミュレーションでは、給水温度を 45°C に設定したので、穏やかな変化となっている。立ち上がり段階以外、シミュレーション結果は実測の平均値とほぼ一致する。

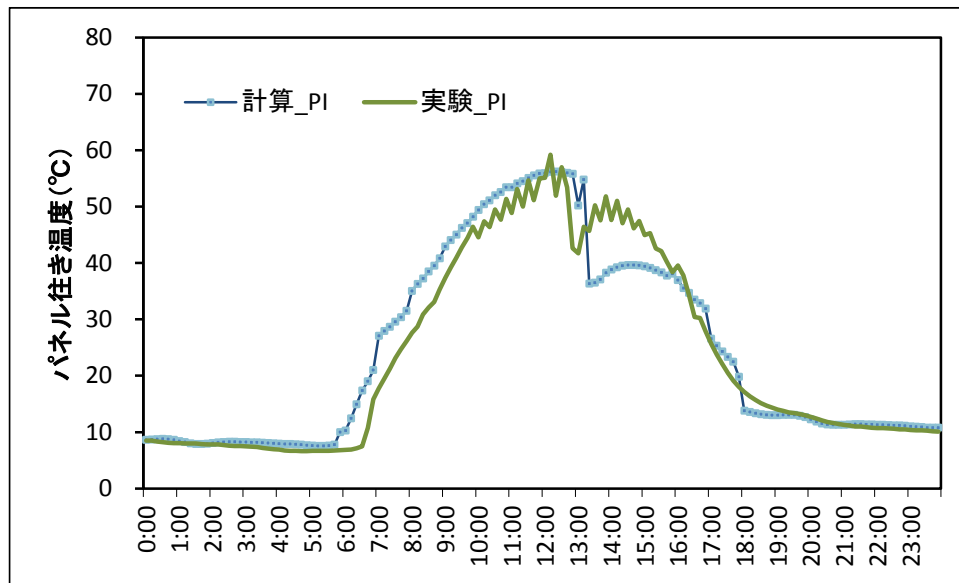


図 5.4.2.9 集熱器パネルの熱媒の行き温度

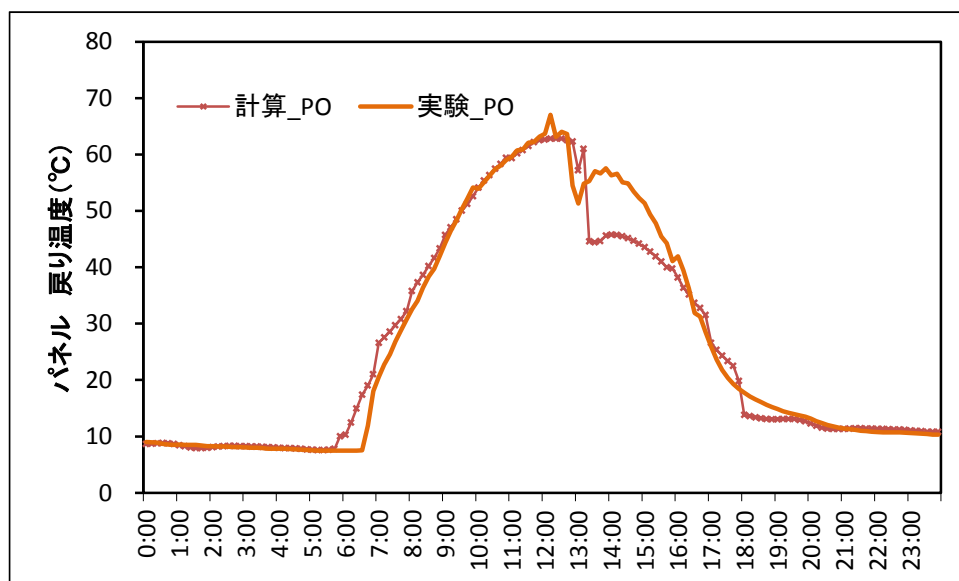


図 5.4.2.10 集熱器パネルの熱媒の戻り温度

図 5.4.2.9 と図 5.4.2.10 に集熱器パネルの熱媒の行き・戻り温度を示す。シミュレーションの計算値は実測結果とよく対応していることがわかった。

5.4.3 給湯システム

5.4.3.1 ケース1（2011年4月1日）

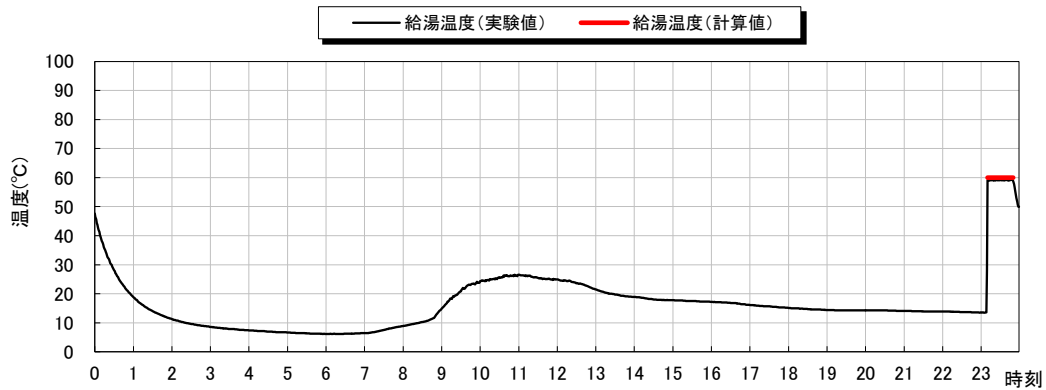


図 5.4.3.1 給湯温度

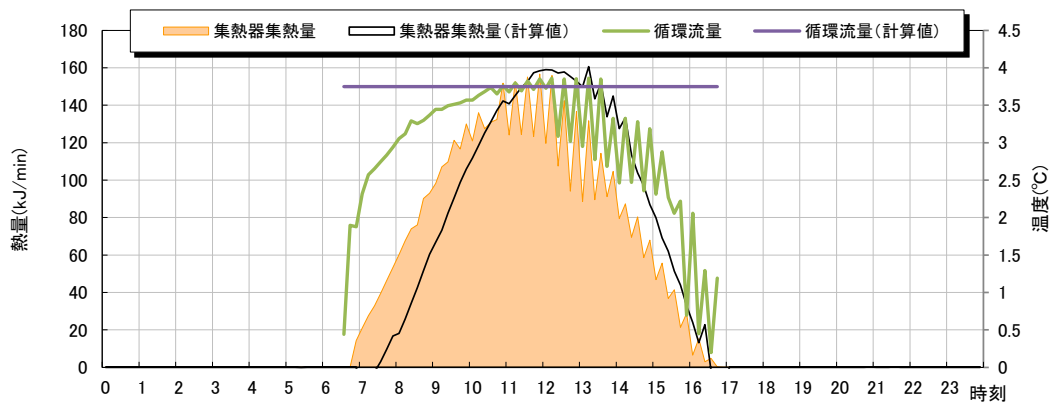


図 5.4.3.2 集熱器循環流量の比較

昼間で床暖房のみを行なっているケース1について、日射が5時半から始まるとともに、計算結果では太陽集熱器パネルの行きと戻り温度が両方上昇しているが、実験結果では6時半から温度が上がり、行きと戻りの温度差が出ると見られる。両方とも最高温度が12時頃に出て、実験結果では激しく変動しているが、計算結果では13時まで安定し、13時から14時の間に変動している。全体的見ると、計算結果と実験結果とともに、日射の増減に変化する傾向となっている。

集熱器熱量を見ると、計算結果は実験結果より集熱が遅くなり、実験で7時から集熱量がだんだん上がり、計算で1時間の遅れがみられる。給湯温度の比較を見ると、給湯時間は23時10分~50分となるため、昼間でお湯が使用しないため、太陽熱が使わず、夜間で温水を出ると見られる。実験で23時前に給湯の水温が常温になり、23時10分~50分に60°Cのお湯が出るとみられる。

5.4.3.2 ケース 2 (2011 年 4 月 12 日)

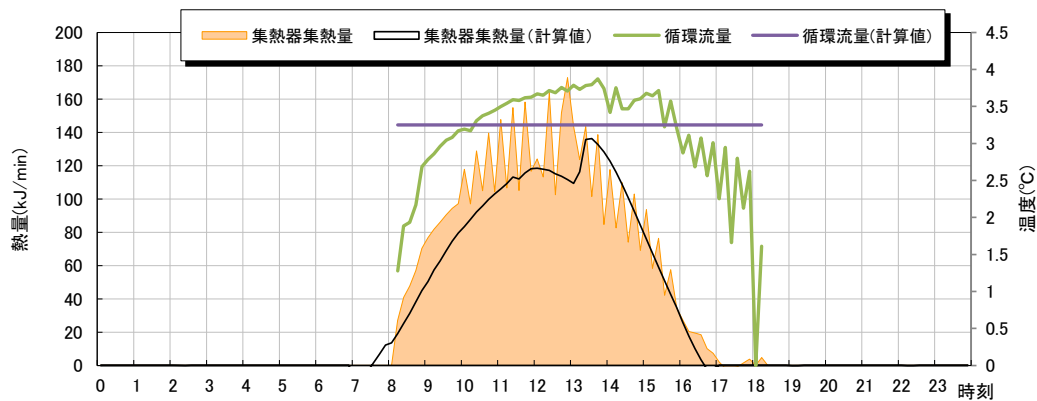


図 5.4.3.3 集熱器循環流量

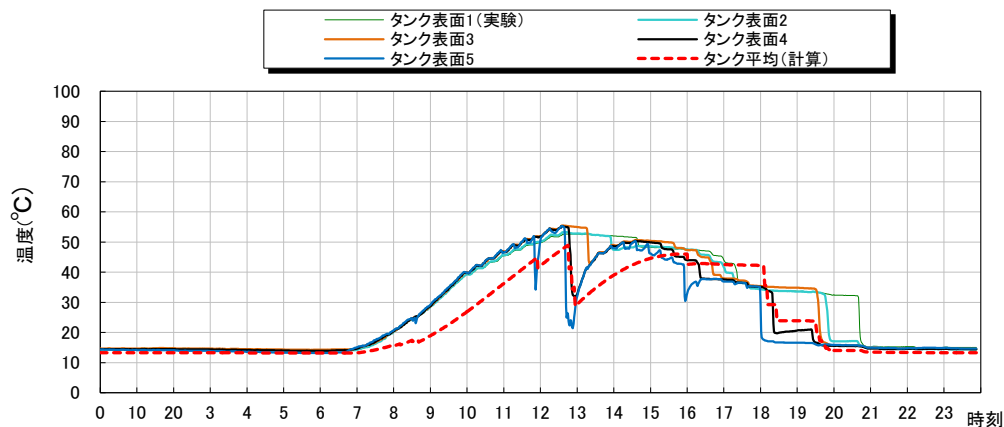


図 5.4.3.4 貯水タンクの温度比較

ケース 2 の計算結果について、日射が 5 時半から始まるとともに、熱交換器での熱交換が 7 時半から始まると見られる一方、実験結果では 7 時から太陽集熱器パネルの往きと戻りの温度差がみられる。実験結果と同様に、パネル温度の計算値と実験値とは 12 時まで上昇し、往き温度及び戻り温度がほぼ同様になっている。12 時以降のお湯供給により、熱媒の温度が急下降になり、計算値と実験値がほぼ同様な傾向がみられる。

タンクの水温を見ると、実験で 12 時まで 55°C に上昇し、計算で 49°C まで上がり、6°C の温度差が見られる。お湯の供給により、13 時ごろ急に下がり、30°C まで下降し、実験値より 6°C 高くなっている。その後、パネル熱媒温度の影響を受け、計算値は実験値より 5°C 低くなっている。16 時以降、計算の平均値は実験とほぼ同様になっている。全体的に見ると、実験でタンク水温が 20°C ほどの温度分布がみられ、計算で 13°C の温度分布がみられる。

集熱器熱量を見ると、計算結果は実験結果より集熱が早くなり、実験で 8 時から集熱量がだんだん上がり、計算で 30 分の早さがあり、7 時半から集熱が開始することが分かった。

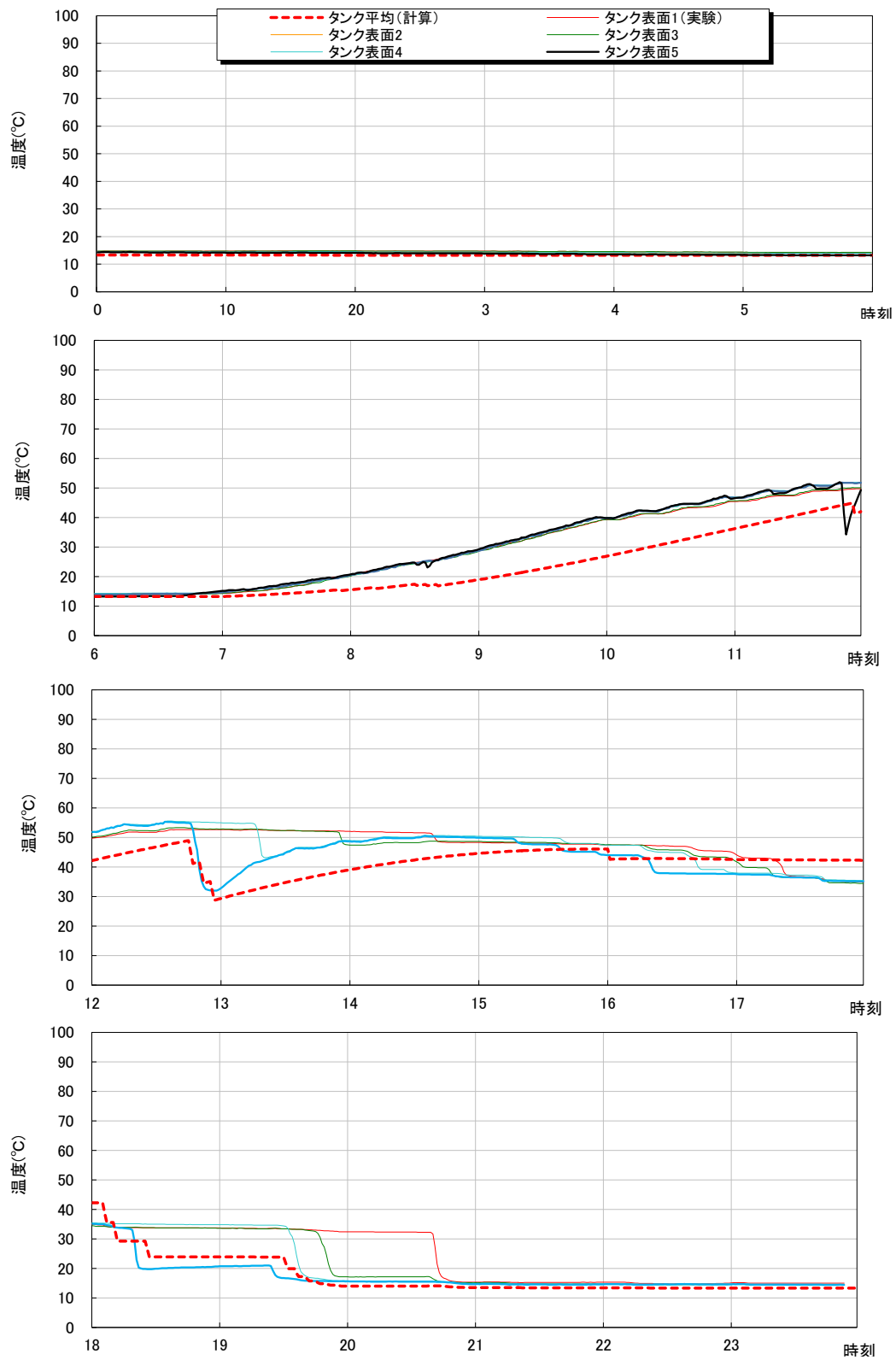


図 5. 4. 3. 5 給湯温度

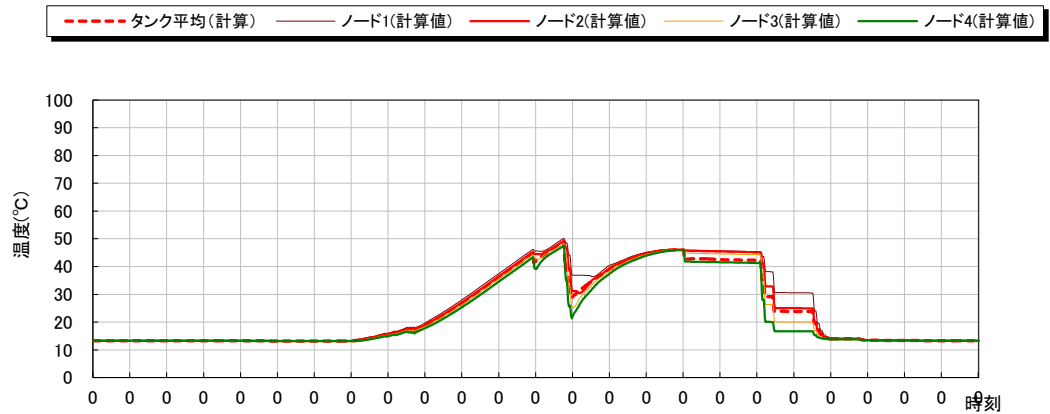


図 5.4.3.6 貯水タンクにおける各ノード点の計算値

5.4.3.3 ケース 3 (2011 年 4 月 28 日)

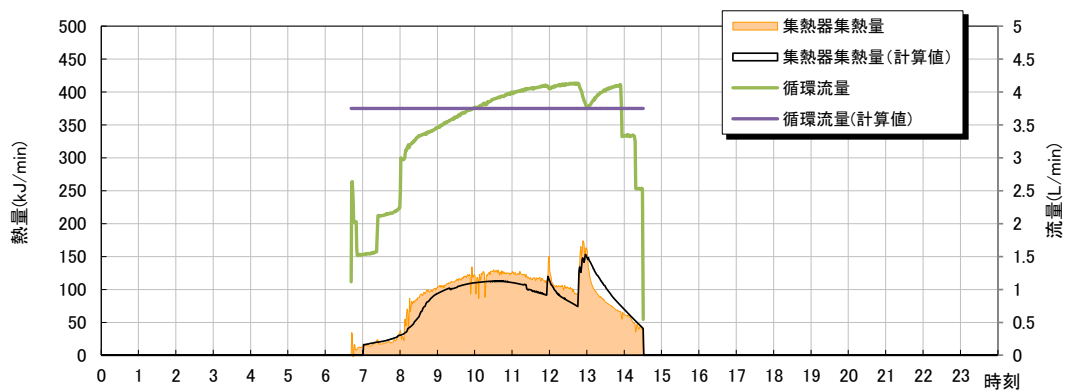


図 5.4.3.7 集熱器循環流量

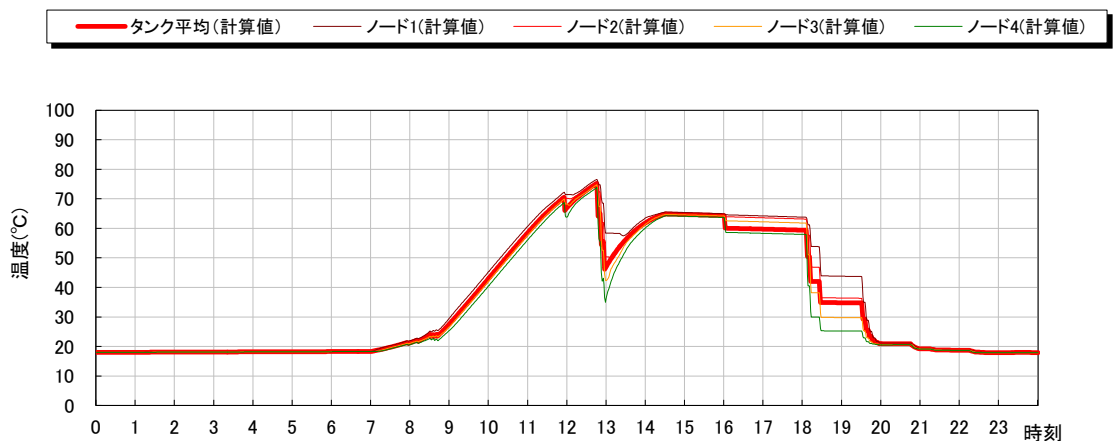


図 5.4.3.8 貯水タンクにおける各ノードの計算値

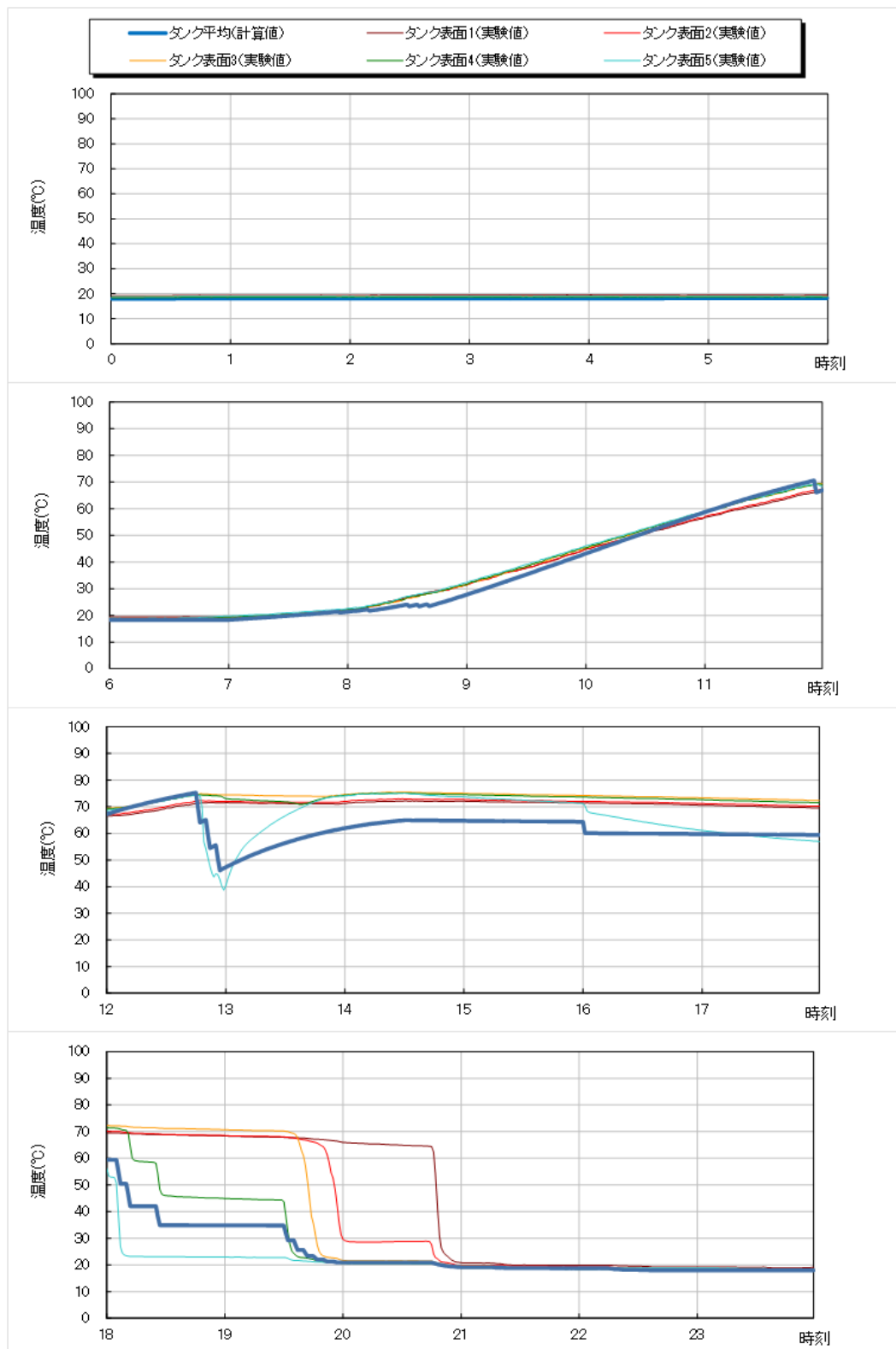


図 5.4.3.9 貯水タンク水温 実験値と計算値の比較

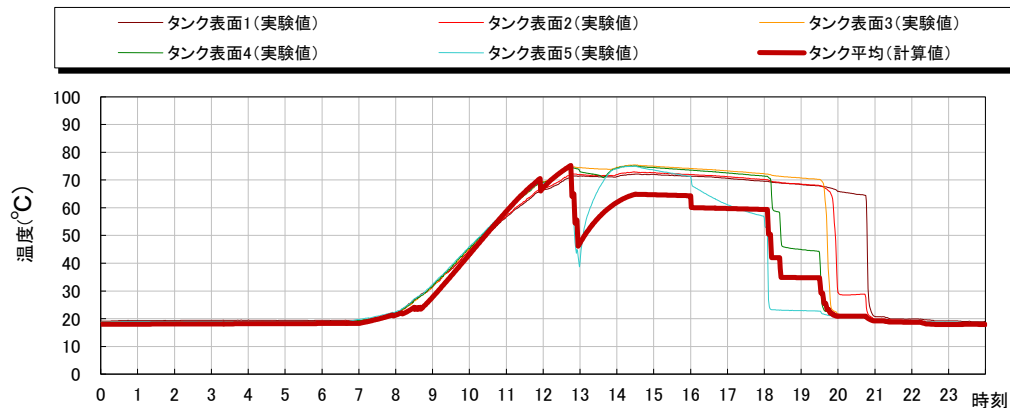


図 5.4.3.10 貯水タンクの温度の比較

給湯のみを行なっている CASE1 について、水平面日射量が大きかった晴天の実気象データを使用し、数値解析により実験結果との比較を行った。

日射が 6 時ごろから始まるとともに、太陽集熱器パネルの行きと戻り温度が両方上昇している。七時ごろ行きと戻りの温度差が出て、実験結果と同様に、熱交換器での熱交換が始まると見られる。パネル温度の計算値と実験値とは 12 時まで上昇し、行き温度が 2°C の差がみられ、戻り温度がほぼ同様になっている。12 時以降のお湯供給により、熱媒の温度が急下降になり、計算値と実験値がほぼ同様になっている。13 時から 14 時半の間、実験値と計算値が大きな差がみられ、最大 13°C の差がみられる。それは実験の熱媒流量が高くなる影響をうけているものと考えられる。なお、その時の集熱器熱量はほぼ同様になっている。その後、日射量が少なくなり、行きと戻りの温度が下降している。

タンクの水温を見ると、計算値が実験値と同様に、12 時まで 75°C に上昇している。お湯の供給により、13 時ごろ急に下がり、 45°C まで下降し、実験値より 2°C 高くなっている。その後、パネル熱媒温度の影響を受け、計算値は実験値より 8°C 低くなっている。全体的に計算結果を見ると、タンク水温が 20°C ほどの温度分布がみられ、実験結果より低い。

集熱器熱量を確認すると、解析結果と実験結果はほぼ同様になっているが、実験で 14 時半に集熱量がゼロになり、集熱が停止と考えられる。実験結果と比較するため、14 時半に集熱停止を条件として使用して計算した。

5.4.4 考察

解析結果と実験結果と比較すると、実験結果が実際の天気条件や設備状況などの影響を受けて変動しているが、計算結果が相対的に安定している。タンクの水温を見ると、計算結果の温度分布がかなり安定し、実験結果より低いとみられる。部屋の室内温度を見ると、解析結果と実験結果とはほぼ同様とみられるが、実験結果を概ね再現することができたと言える。集熱器熱量を見ると、解析結果は実験結果より集熱が遅くなり、ほぼ 1 時間の遅

れがみられる。

床暖房のみのケースでは、床暖房の入口と出口温度を見ると、日射が強い時間帯、計算値が急に低くなり、熱交換が止まる原因は日射のため、部屋の室内温度が設定温度に達し、床暖房がオフにすることになるものと推測している。

3つのケースから見ると、床暖房及び給湯システムを使用することによる生活スケジュールの違いによって、実験結果を概ね再現することができると考えられる。

5.5 床暖房システム

本章では、TRNSYS を用いた床暖房システムの解析モデルの構築について述べる。人工気候室内実験室で計測された床暖房運転時の温熱環境データの実測値をもとに床暖房モデルの構築を行った。

5.5.1 床暖房システムを含む建屋の構成

図 5.6.1.1 に床暖房システムを含む人工気候室内実験室の平面図を示す。実験住宅は、木質在来工法平屋建てであり、床、屋根、窓および外壁の断熱性能が可変である。ここでは外気に 2 面接した C 室を測定対象とした。C 室には床暖房が敷設率 70% で敷設されている。図 5.6.1.2 に測定位置と各計測機器を示す。各 Pole に熱電対が高さ方向に 8 点設置されており、合計 40 点の平均値を室温として計測した。

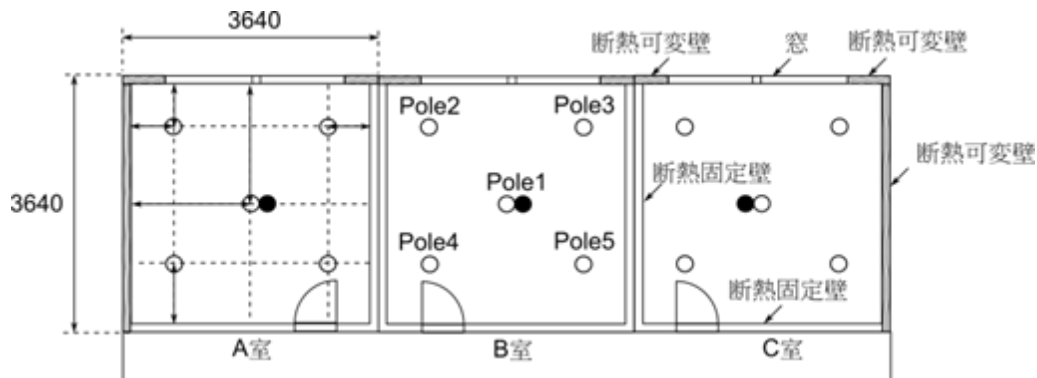


図 5.6.1.1 人工気候室内実験室

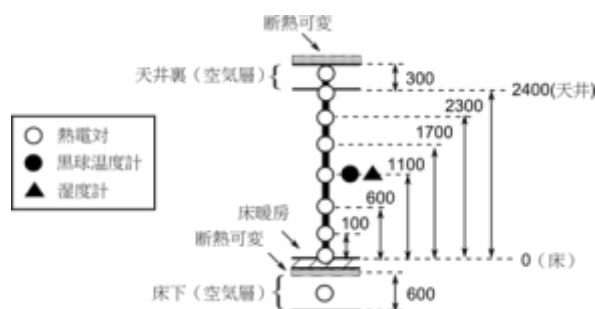
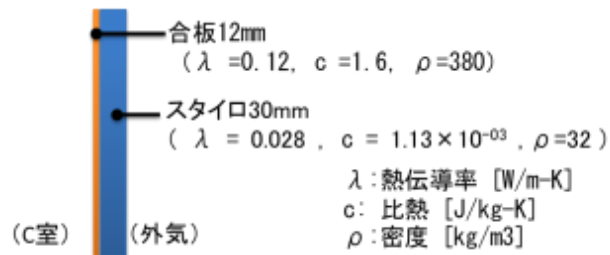
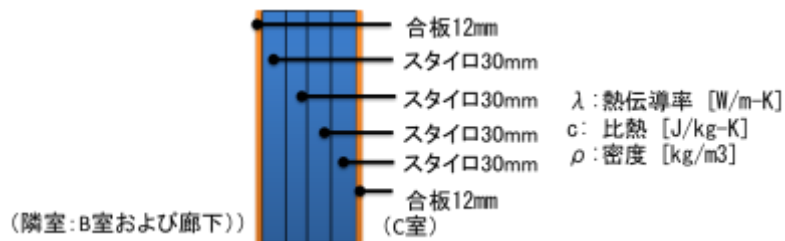


図 5.6.1.2 測定位置と各計測機器

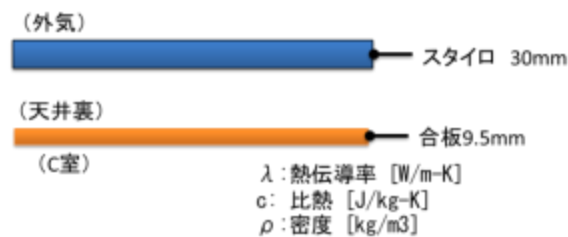
図 5.6.1.3 に C 室の壁構造を示す。ここでは、断熱性能が住宅事業建築主判断基準地域区分IVb において次世代省エネ基準の条件を満たすよう、可変部の断熱材厚さを設定した。予備試験として、図 5.6.1.3 の壁構造で、換気回数を 0.5 回/時、外気温 5℃、隣室（B 室）温度を 20℃一定に制御した場合、Q 値が 2.63W/m²であることが確かめられた。



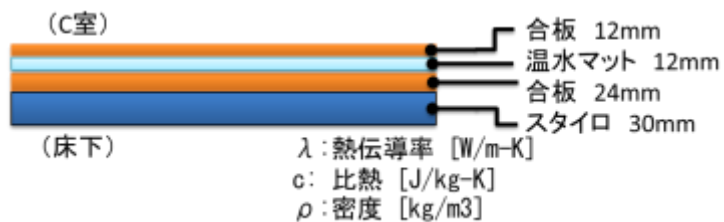
(a) 外壁



(b) 内壁



(c) 天井



(d) 床



(e) 窓およびドア

図 5. 6. 1. 3 壁構造

5.5.2 人工気候室実験室を用いた床暖房立ち上がり性能試験

表 5.6.2.1 に測定条件を示す。今回は、換気回数、外気温、および隣室の B 室の室温をそれぞれ一定になるよう制御した条件で試験を行った。測定対象である C 室の室温、廊下空気温度、天井裏空気温度、および床下空気温度については成り行きとした。表 5.6.2.2 にそれぞれの初期条件を示す。また、表 5.6.2.3 に床暖房の設定条件を示す。

表 5.6.2.1 測定条件

項目	単位	値
換気回数	回/時	0.5
外気温	°C	4.7
B室室温	°C	20

表 5.6.2.2 初期条件

項目	単位	値
C室室温	°C	7.8
廊下空気温度	°C	14
天井裏空気温度	°C	7.8
床下空気温度	°C	7.8

表 5.6.2.3 床暖房の条件

項目	単位	値
マットタイプ	-	はやわざ
コントローラータイプ	-	R60
設置室温	°C	26
温水流量	L/min	1.5

5.5.3 解析条件

図 5.6.3.1 に Google sketch up で作製した実験室の外観を示す。対象とする C 室の天井裏、床下、廊下、および B 室に相当する箇所に空間を設置し、実測値に合わせてそれぞれの室温を与えた。

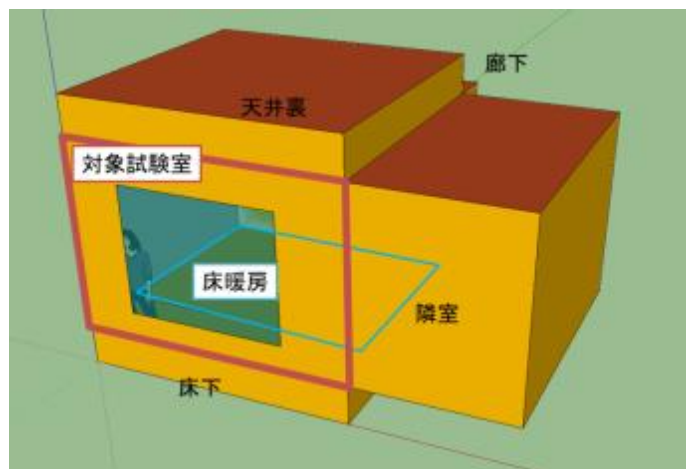


図 5.6.3.1 解析対象

表 5.6.3.1 に C 室に隣接する空間の設定条件に示す。実際には、床暖房を起動した場合、廊下空気温度、天井裏空気温度、および床下空気温度は時間とともに変化するが、ここでは簡易化のためそれぞれの実測値について床暖房起動後 300 分間の平均値を与えて表現した。図 5.6.3.2 に参考とした C 室に隣接する空間温度の時間変化の実測値を示す。

表 5.6.3.1 C 室に隣接する空間の設定条件

項目	単位	値
B室室温	℃	20
廊下空気温度	℃	15
天井裏空気温度	℃	12
床下空気温度	℃	8.5

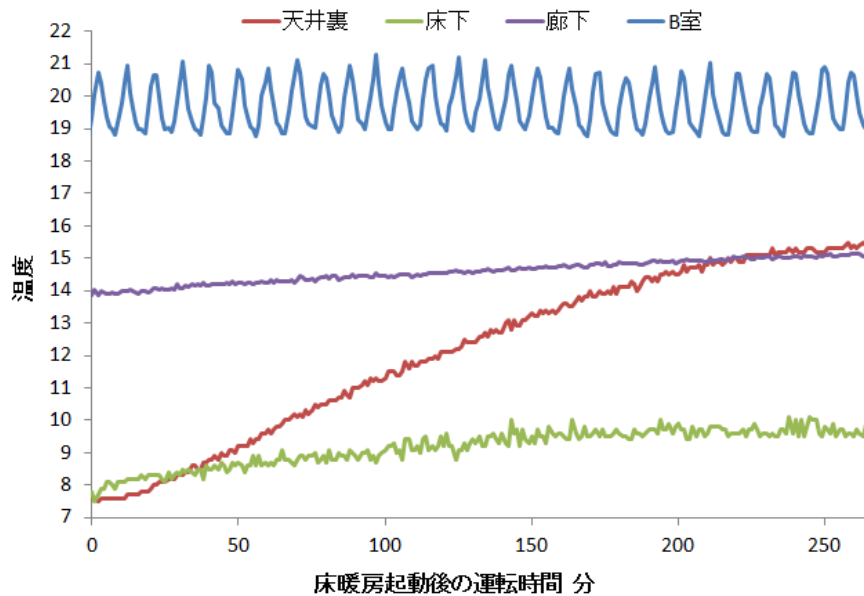


図 5.6.3.2 C室に隣接する空間温度の時間変化

図 5.6.3.3 に解析条件として設定した床の壁構造を示す。ここでは、床暖房を Active layer を用いて表現した。実際には対象とする床の壁構造は、図 5.6.2.3(d)に示したように、温水パネルが厚さ 12mm および 24mm の合板の間に設置されているが、Active layer を用いる場合にはソフトウェアの制約上、温水パイプ間の間隔に応じて設定可能な合板の厚みに制約があるため、ここでも実際とは厚みが異なる仮想合板を設置し、熱伝導相似則を満たすよう熱伝導率と比熱を調整することで表現した。



図 5.6.3.3 床の壁構造

表 5.6.3.2 解析条件

	厚み [mm]	熱伝導率 [W/m-K]	比熱 [J/kg-K]	密度 [kg/m3]
仮想合板	24	0.24	0.80	380
合板	12	0.12	1.60	380

表 5.6.3.3 に Active layer の設定条件を示す。Active layer の設定は、対象とする温水パ

ネルの仕様に合わせて設定した。ただし、温水温度については簡易化のため 60℃一定とした。なお、床暖房の設定室温は 26℃とし、±2℃の範囲で ON-OFF 運転を行うよう設定した。

表 5.6.3.3 Active layer の設定条件

項目	単位	値
水の比熱	kJ/kgK	4.18
パイプ中心間の距離	m	0.0750
パイプ外形	m	0.00720
パイプ壁面厚さ	m	0.00100
パイプ壁面の熱伝導率	kJ/hmK	1.80
温水流量	L/min	1.5
温水温度	℃	60

5.5.4 解析値と実測値との比較

図 5.6.4.1 に室温、床表面温度、および天井表面温度の解析値と実測値の比較を示す。室温について解析値と実測値がよく一致していることが確かめられた。また、床表面温度および天井表面温度についてもおよそ実験値を再現することが示された。一方、床表面温度について、床暖房起動開始から 60 分の間については解析値と実測値が乖離している。これは、TRNSYS の特性上、対象空間の熱容量が小さい場合に 60 分間隔ごとに温度履歴がステップ状に表現されることによるものと考えられる。また、床暖房起動後 200 分以降の床表面温度の解析値が実測値と比べて振動しているが、これは解析では単純化のため床暖房の制御を ON-OFF 制御としたためである。

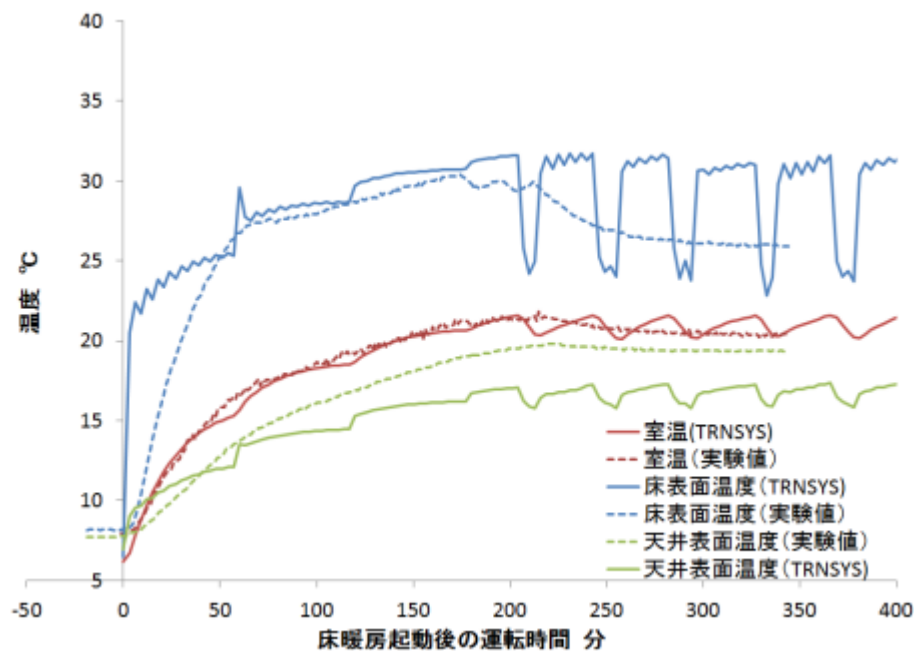


図 5.6.4.1 解析値と実測値の比較（室温・床表面温度・天井表面温度）

図 5.6.4.2 に温水温度と温水の建屋内放熱量について解析値と実測値の比較を示す。これより、温水温度および温水の建屋内放熱量の時間履歴について解析値は実験値をおよそ再現できていることが確かめられた。

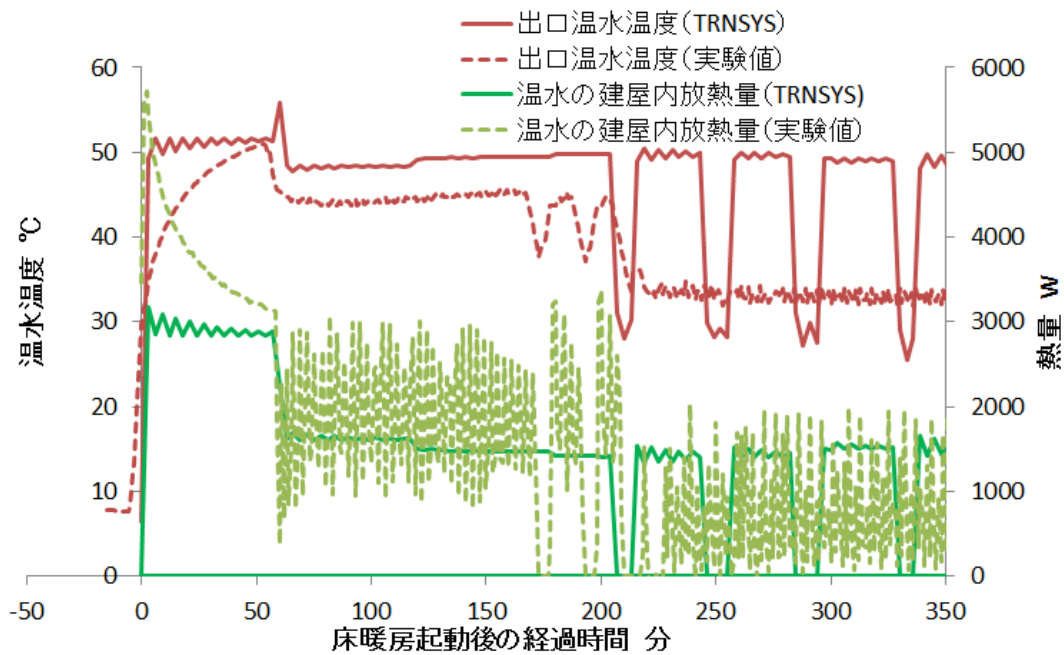


図 5.6.4.2 解析値と実測値の比較（温水温度・温水の建屋内放熱量）

5.6 まとめ

本章では、家庭分野における太陽熱を利用した設備を対象に、住宅のエネルギーシステムのシステムシミュレーションモデル、および居室の温熱環境を予測するモデルの作製を行う。また、シミュレーションの結果を検証するため、実測の結果との比較が必要となる。実測時の天気情報でシミュレーションの気象データを作成し、室内の長波放射計算を形態係数による詳細放射計算を導入し、シミュレーションは実測結果とよく一致している。シミュレーション結果の信頼性を確認した。

5.7 参考文献

- [5-1] Stephenson, D.G. and Mitalas, G.P., "Calculation of Heat Conduction Transfer Functions for Multi-Layer Slabs," ASHRAE Annual Meeting, Washington, D.C., August 22-25, 1971.
- [5-2] Mitalas, G.P. and Arseneault, J.G., "FORTRAN IV Program to Calculate z-Transfer Functions for the Calculation of Transient Heat Transfer Through Walls and Roofs", Division of National Research Council of Canada, Ottawa.
- [5-3] 財団法人建築環境・省エネルギー機構、「住宅事業建築主の判断基準の概要」、2009
- [5-4] Wisconsin Univ., TRNSYS User's Manual, 2010
- [5-5] 財団法人建築環境・省エネルギー機構、「住宅事業建築主の判断基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説」、2009
- [5-6] 経済産業省エネルギー庁 http://www.enecho.meti.go.jp/attaka_eco/system/
- [5-7] 拡張アメダス気象データ, 2000 年, 日本建築学会
- [5-8] Weber, Andreas, et al. "TRNFLOW, a new tool for the modeling of heat, air and pollutant transport in buildings within TRNSYS." Proc. of the 7-th IBPSA Conference. Vol. 3. 2003.
- [5-9] Hottel, Hoyte, and Austin Whillier. "Evaluation of flat-plate solar collector performance." Trans. Conf. Use of Solar Energy; Vol. 3. 1955.

第 6 章

太陽熱利用設備の性能向上の提案及び有効性検討

6.1 研究目的

第 5 章では、家庭分野における太陽熱を利用した設備を対象に、住宅のエネルギーシステムのシステムシミュレーションモデル、および居室の温熱環境を予測するモデルの作製を行う。貯湯タンク、太陽集熱器、床暖房、熱交換器などの設備システムを充実させて、実際に利用されている太陽熱利用システムを TRNSYS で再現できた。

太陽熱の有効利用による一次エネルギーの消費量の削減を目的としたシステムであり、太陽熱は床暖房需要に対し優先的に供給され、床暖房需要がない時間帯はタンクに蓄熱される仕組みであった。ただしこの場合床暖房の戻り熱媒温度が比較的高くなっており、そのまま床暖房回路側の熱源機に供給すると、熱源機の効率が低くなる可能性がある。

本章では、床暖房熱源機の効率向上による一次エネルギーの削減を目的とした、性能向上のシステムを提案し、モデルを構築し、性能向上の性能評価を行うことにした。新しいシステムに基づき、給湯需要の違い、タンクの断熱と容量の違いによる一次エネルギー消費量比較を行った。

6.2 研究対象システムの説明

6.2.1 システムの仕組み

便宜のため、第 5 章のシステムをシステム A、第 6 章の性能向上のシステムをシステム B と標記する。

6.2.1.1 システム A の構成

システム A の仕組みは図 6.1 に示す。太陽集熱器で暖められた熱媒の熱を床暖房システムの熱媒やタンクの水に蓄熱することで、床暖房と給湯に利用する。

太陽集熱器で集熱され、かつ床暖房システムが稼働している場合は、太陽集熱器の熱媒が床暖房回路の熱交換器で床暖房システムの熱媒を加熱し、太陽集熱器に戻る (①→②→③→④)。その際、加熱された床暖房システムの熱媒温度が 60°C より高い場合、熱源機を通過するが加熱されることなくそのままリビングの床暖房システムに供給される。一方 60°C より低い場合は、暖房用の熱源機で 60°C まで加熱されてからリビングの床暖房システムに供給される (⑦→⑧→⑨)。

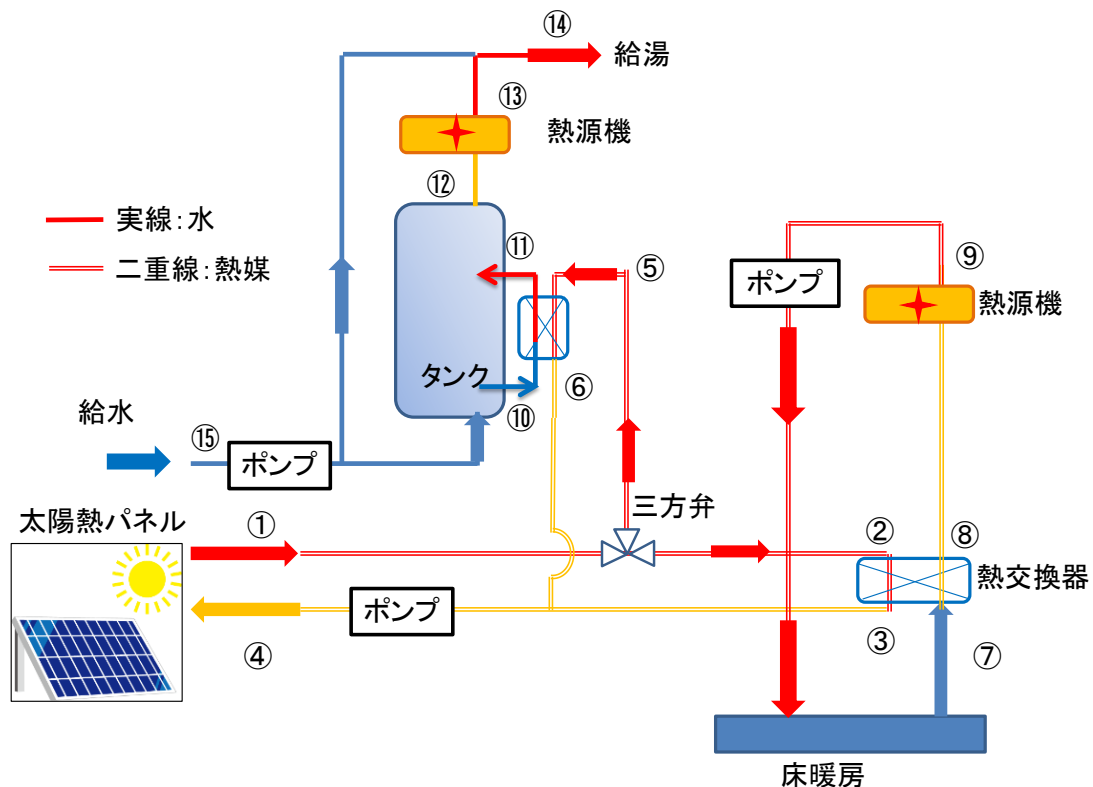


図 6.1 システム A の構成

太陽集熱器での集熱があるが床暖房が稼働していない場合は、太陽集熱器の熱媒はタンク側の熱交換器においてタンクの水を加熱し、その後太陽集熱器に戻る (①→⑤→⑥→④)。

なおタンクの水は給湯需要のみに利用される。タンクからの送出温度が 40℃未満の場合、給湯用の熱源機で 40℃まで加熱して温水を供給する (15→10→11→12→13→14)。タンクの出湯温度が 40℃を超えた場合、熱源機が稼働せず、給水(15)と混合して 40℃に調整し供給される (15+13→14)。

システム A は太陽熱を優先的に暖房需要に供給することを重視している。太陽熱利用により暖房用熱源機でのガス消費量削減による一次エネルギー消費量の削減が期待されるが、床暖房回路の熱媒の戻り温度が高くなるため、熱源機効率低下による一次エネルギー消費量増大の可能性も想定される点に注意が必要である。

6.2.1.2 システム B の構成

システム B のしくみは図 6.2 に示す。太陽集熱器で暖められた熱媒の熱をタンクの水に蓄熱するだけでなく、床暖房システムの熱媒の戻り温度がタンク水温より高い場合には床暖房システムの熱媒の熱もタンクの水に蓄熱することで、太陽熱・床暖房システムの熱媒の熱の両方を給湯に利用する。一方で暖房には太陽熱を一切利用せず、熱源機のみでの供給となる。

太陽集熱器で集熱され、かつ床暖房システムが稼働している場合は、太陽集熱器の熱媒がタンク側の熱交換器においてタンクの水を加熱し、太陽集熱器に戻る (1→2→3→4→5) が、タンクの水温が 70℃を超えた場合は太陽集熱器のポンプが止まる。

太陽集熱器での集熱がなく、かつ床暖房システムが稼働している場合は、リビングの床暖房システムの熱媒の戻り温度とタンクの水温と比較し、熱媒温度の方が高いとタンク側の熱交換器でタンクの水を加熱する。その後暖房用熱源機で 60℃まで加熱され、部屋に供給される (9→3→4→6→7→8)。一方タンクの水温の方が高いと、熱媒はタンクに行かず暖房用熱源機で 60℃まで加熱され、リビングの床暖房システムに供給される (9→7→8)。

タンクの水は給湯需要に用いられるが、タンク出湯温度が 40℃未満の場合は給湯回路側の熱源機で 40℃まで加熱して温水を供給する (15→10→11→12→13)。タンク出湯温度が 40℃以上となる場合、熱源機が稼働せず、冷水と 40℃に混合して提供される (15→13→14)。

タンク中の冷水は太陽集熱器の熱媒に加熱され、給湯時間帯に利用される。タンクの出湯温度が 40℃未満の場合、給湯回路側の熱源機が水を 40℃までに加熱して温水を提供する (10→11→12→13→14→15)。タンクの出湯温度が 40℃を超えた場合、熱源機が稼働せず、給水(10)と混合して 40℃に調整し供給される (10+14→15)。

システム B では床暖房システムの熱媒の熱をタンクの水に蓄熱するため、床暖房回路側の熱源機に入る熱媒温度が通常より低くなっており、床暖房回路側の熱源機効率の上昇に伴う一次エネルギー消費量の削減が期待される。ただしタンクの水には床暖房システムの熱媒の熱と太陽熱の両方を蓄熱するため、太陽熱のみを蓄熱する場合に比べ太陽熱の集熱量が低減する可能性がある。

本研究では、一次エネルギーを低減させる要因と増大させる要因を持つシステム A と B を全く同じ条件で運用した場合の一次エネルギー消費量比較を行うと共に、新しいシステムであるシステム B の運用条件についてパラメータスタディを行うことで、システム B のシステム最適化検討のための知見とすることを目的として研究を行う。

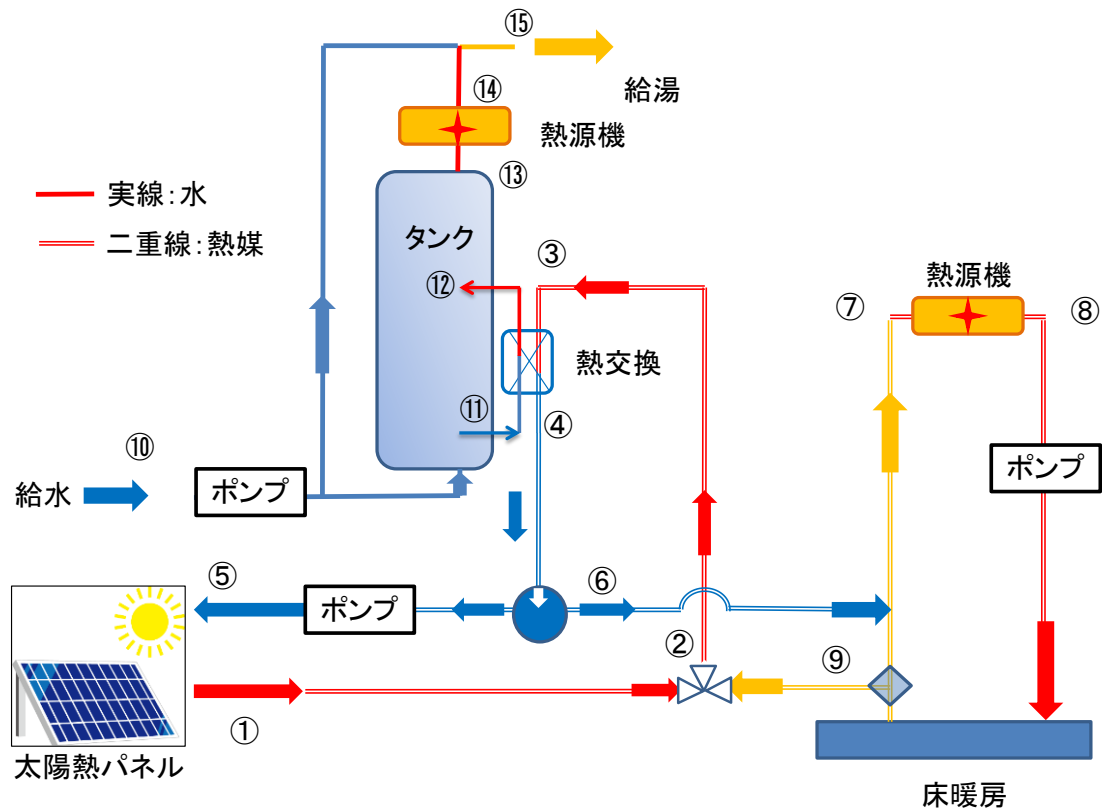


図 6.2 システム B の構成

6.2.2 システムにおける各機器の仕様

① 太陽集熱器の設定

今回のシミュレーションで再現する太陽熱集熱器の集熱効率特性線図を図 6.3 に示す。評価基準日射量は $5814 \text{ W} \cdot \text{h}(\text{m}^2 \text{ 日})$ 、 $\angle \theta$ が 10K の時の単位面積当たりの集熱量は $3633 \text{ W} \cdot \text{h}(\text{m}^2 \text{ 日})$ となる。

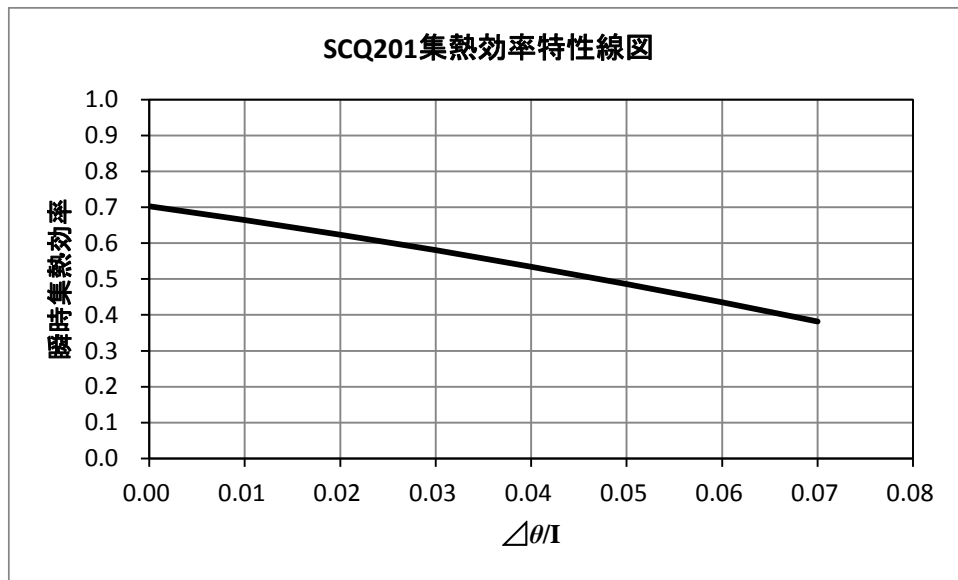


図 6.3 太陽集熱器の集熱効率特性線図

$\Delta\theta$: 集熱媒体平均温度と環境温度の差 (K)

I : 集熱面放射の強度 (W/m^2)

瞬時集熱効率 η

(二次近似)

$$\eta = a_0 - a_1 \cdot \Delta\theta/I - a_2 \cdot (\Delta\theta/I)^2$$

$$a_0 = 0.703$$

$$a_1 = 3.716$$

$$a_2 = 12.42$$

(一次近似)

$$\eta = b_0 - b_1 \cdot \Delta\theta/I$$

$$b_0 = 0.711$$

$$b_1 = 4.609$$

シミュレーションモデルとしてモジュール Type1b を用いた。表 6.2.1 にモジュール Type1b の設定条件を示す。

表 6.2.1 太陽熱集熱器の設定条件

設定項目	設定値と説明
シリーズ内の集熱器の数	1 (*どんな値に設定してもシミュレーション結果に影響を与えない)
集熱器の全面積	4m ²
集熱器の中の液媒の比熱	3.85[kJ/kg・K]
効率モード	2 (*集熱器の出口温度で太陽熱集熱器の効率方程式を表す)
測定質量流量	34.75[kg/h・m ²]
Y 軸のインターセプト a ₀	0.711
効率勾配 a ₁	15
効率曲線の曲率 a ₂	0
パネル傾斜角	35°
パネル方位	真南
地表面反射率	0.2

②タンクの設定

タンクに関する設定条件を表 6.2.2 に示す。タンク内の温度分布は考慮せず、均一とした。基準タンクとした容量 90L のタンクにおける熱損失係数は 2.43W/K であるが、タンク容量のパラメータスタディを行うため単位表面積当たりの入力が必要となる。したがって、基準タンクの熱損失係数が 2.43W/K になるような単位表面積当たりの熱損失係数、8.7kJ/h・m²・K を導出し、この値を用いた。

表 6.2.2 タンクの設定値

設定項目	設定値
入口位置	2
タンク容量	0.09[m ³]
流体比熱	4.19[kJ/kg・K]
流体密度	1000[kg/m ³]
タンクの熱損失係数	8.7[kJ/h・m ² ・K]
沸点	100[°C]
冷水供給温度	10 [°C]
高温側の流量	120 [kg/h]
低温側の流量	120 [kg/h]

③熱交換器の設定

熱交換器における熱量は式 2.1 で計算する。

$$\frac{Ka_t}{m_h c_h} = \ln \frac{t_c - t_{h1}}{t_c - t_{h2}} \quad (2.1)$$

ここで、K：熱交換器の熱通過率 228567.9[W/m²・K]

a_t：熱交換器の全伝熱面積 0.00105[m²]

m_h：戻り温水の流量 66.667[g/s]

c_h：戻り温水熱媒の比熱 3.85[J/g・K]

t_c：タンク水温[K]

t_{h1}：戻り温水熱媒の入口温度[K]

t_{h2}：戻り温水熱媒の出口温度[K]

式 2.1 を用いて試算した結果、熱交換器の交換効率が 0.61 となったため、この交換率を入力値として熱交換器に設定した。なお、シミュレーションの結果が式 2.1 を使った場合の計算結果と一致することは確認済みである。今回のシミュレーションでは、熱交換器のコンポネント TYPE91 を用いた。給湯回路における熱交換器（熱媒と水）と床暖房回路における熱交換器（熱媒と熱媒）の設定条件を表 6.2.3 に示す。

表 6.2.3 熱交換器の設定

設定項目	設定値
(a) 給湯熱交換器	
熱交換効率	0.61[-]
熱源側の流体比熱	3.85[kJ/kg・K]
負荷側の流体比熱	4.19[kJ/kg・K]
(b) 床暖房熱交換器	
熱交換効率	0.61[-]
熱源側の流体比熱	3.85[kJ/kg・K]
負荷側の流体比熱	3.85[kJ/kg・K]
熱源側の流量	120 [kg/h]
負荷側の流量	120 [kg/h]

④熱源機の設定

熱源機の設定を表 6.2.4 に示す。流体を設定温度に加熱できるように定格容量を大きめに設定した。加熱需要熱量が定格容量の設定値を超えない場合には、熱源機の出口水温の計算結果が設定値に影響されず、設定温度となる。

床暖房の熱源機効率（ボイラー効率）はステップごとの戻り水温によって、式 2.2 で計算

する。図 6.4 に示すように戻り水温が高くなるほど、熱源機効率が低くなる傾向があるが、戻り温度 20℃の時、効率が約 87.5%、戻り温度 55℃の時、効率が約 80%であり、戻り温度が 35℃変わっても効率は 10%も変わらない。

$$c\% = 0.0021T_i^2 - 0.3767T_i + 94.833 \quad (2.2)$$

ここで、 $c\%$ ：熱源機効率（ボイラー効率）[-]

T_i ：熱源機戻り水温[℃]

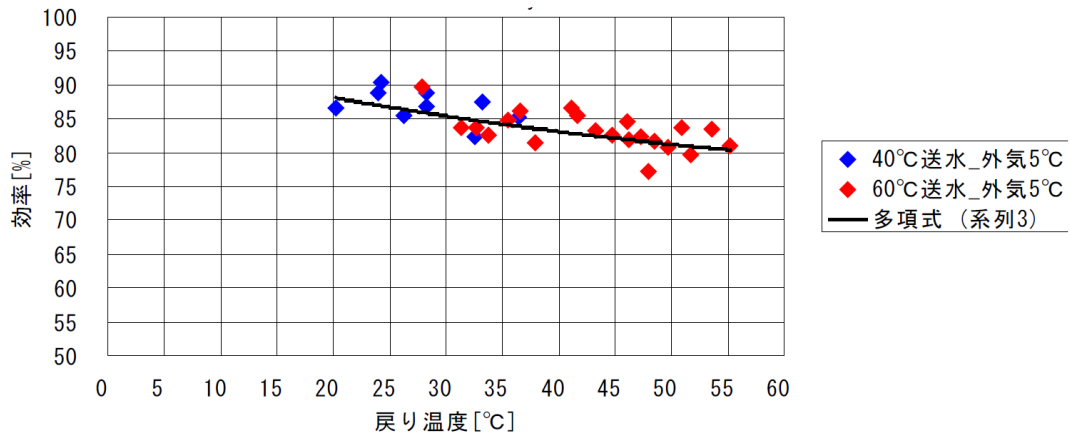


図 6.4 戻り水温による熱源機効率の変化

表 6.2.4 熱源機の設定

設定項目	設定値
(a) 床暖房熱源機	
定格容量	10000 [kJ/h]
流体の比熱	3.85 [kJ/kg・K]
加熱設定温度	60 [℃]
熱源機効率（ボイラー効率）	式 3.2 で計算する
燃焼効率	1 [-]
(b) 給湯熱源機	
定格容量	10000 [kJ/h]
流体の比熱	4.19 [kJ/kg・K]
加熱設定温度	40 [℃]
熱源機効率（ボイラー効率）	0.95[-]
燃焼効率	1 [-]

6.2.3 想定条件を用いた熱負荷の計算結果

シミュレーション結果の妥当性検証のため、想定条件を用いて各熱負荷を概算する。

6.2.3.1 給湯負荷

4人世帯：M1 スタンダードモード

	合計[L/日]	うち浴槽分[L/日]	給湯負荷[MJ/日]※
平日大	550	180	69.0
平日中	450	180	56.5
平日小	350	180	43.9

※算出条件：水温 10℃、給湯温度 40℃と仮定

6.2.3.2 床暖房負荷

①換気負荷を除く暖房負荷：

<http://www.yukadanbou-kaiteki.com/qa/purchase/03/>

(リンナイ株式会社) の算出方法を用いる

暖房負荷の計算式： $q = A \times Q \times \Delta T$ より算出

q ：暖房負荷(W)

A ：暖房している部屋面積(m²)

Q ：熱損失係数は 2.7(W/m²・K) 次世代省エネ基準Ⅳ地域

ΔT ：室内と室外の温度差(K)

- ・暖房部屋面積[m²]：21.53 (IBEC 標準戸建てモデルの床暖房を敷設する部屋の面積)
- ・熱損失係数[W/ m²・K]：2.7 (次世代省エネ基準Ⅳ地域)
- ・室内と室外の温度差[℃]：19 (室内温度：24℃、室外温度：5℃とした)
- ・床暖房使用時間[h]：8 (6:00-10:00, 18:00-22:00)
- ・ガスシステム効率：85%

$$\begin{aligned}
 q[\text{MJ/日}] &= \frac{A \times Q \times \Delta T}{\text{ガスシステム効率}} \times 1 \text{ 日の使用時間[h]} \\
 &= \frac{21.53[\text{m}^2] \times 2.7[\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \times 19[\text{K}] \times 8[\text{h}]}{0.85} \\
 &= 37.4[\text{MJ/日}]
 \end{aligned}$$

②換気量負荷

換気による必要熱量は、1日に必要な換気量[m³/日]を算出し、その換気量に含まれる室内空気(24℃)が換気によって外気 5℃の空気に置き換わり、それを空調で 24℃に温める場合に必要の熱量と定義した。

<http://www.mitsubishielectric.co.jp/factory/sofuki/kanki/01.html>

(三菱電機の HP)の算出方法を用いる

必要換気量[m³/h]＝毎時必要換気回数[回/h]×部屋の容量[m³]

- ・ 毎時必要換気回数[回/h]：0.5
- ・ 部屋の容量[m³]：51.67
- ・ 換気時間[h/日]：24 （常に換気していると仮定した）
- ・ 空気の容積比熱[W/m³・K]：0.35
- ・ 室内外の温度差[℃]：19 （室内温度：24℃、室外温度：5℃とした）

必要換気熱量＝14.8 [MJ/日]

従って必要な暖房負荷は、①＋②で算出し、52.3MJ/日となる。

6.2.3.3 太陽熱集熱量

- ・ METPV データより算出：方位：真南、傾斜角：35°
- ・ パネル面積[m²]：4
- ・ 日射量[MJ/m²・日]：15.95 （2月の平均日射量を使用）
- ・ 平均集熱効率(仮定値)：40%

$$\begin{aligned}
 (\text{太陽熱集熱量[MJ/日]}) &= (\text{パネル面積[m}^2\text{]}) \times (\text{日射量[MJ/m}^2 \cdot \text{日]}) \times (\text{平均集熱効率}[\%]) \\
 &= [\text{m}^2] \times [\text{MJ/m}^2 \cdot \text{日}] \times 40[\%] \\
 &= 25.5 \quad [\text{MJ/日}]
 \end{aligned}$$

6.2.3.4 熱収支の確認

給湯負荷モード	給湯負荷[MJ/日]	暖房負荷[MJ/日]	太陽熱集熱量[MJ/日]
平日大	69.0	52.3	25.5
平日中	56.5		
平日小	43.9		

6.3 TRNSYS を用いたシステムシミュレーション概要

6.3.1 シミュレーションプログラム

シミュレーションは熱計算プログラム TRNSYS を用いた。TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation) は省エネルギー化と快適性を両立させる建築環境設計を行うことを目的とした温熱環境シミュレーションプログラムの 1 つである。最初は負荷計算を目的として開発されたものではなく、太陽熱システムの動的シミュレーション及び設計のために作られた。アメリカの Wisconsin 大学で開発され、現在はドイツ、フランスなど世界各国で開発が継続されている。

TRNSYS は熱負荷計算において「伝達関数法(Transfer Function)」を基にしており、モジュール構成を用いているため拡張性及び交換性にその長所を持つ。建物の動的熱負荷計算以外にも HVAC システムの解析及び規模算定、太陽熱システムの解析、制御システムの分析等設備システムにおいてそのメリットを発揮する。また、建物と設備システムを含む全体システムの解析を通じて設備または建物の総合的な評価が可能である。

TRNSYS で冷暖房に費やされるエネルギー量及び熱負荷を算出するために多様なモジュールを用いる。計算目的に合わせ概略的な熱負荷計算のためのデグリーデー法や伝達関数法を用いた詳細な方法すべてを提供する。モジュールの 1 つである Type 56 では伝達関数法を基にして壁、天井、床などをモデリングする。壁体の内外側すべてを対象にすべての放射熱交換（太陽からの短波及び他の壁体、天空からの長波すべて）を考慮する。複数室で構成された建物に対するデータを入力するのは複雑である。TRNSYS では「TRNBuild」を用いて建物データを入力して複数室の設定を行い、「Simulation Studio」で Type 56 としてシミュレーションに利用される。これには壁体および窓の構成、各材料の物性地及び設定温湿度、在室者、照明器具の数等といった室内条件をファイル形式で作る。

6.3.2 建物の設定条件

図 6.5 及び表 6.3.1、表 6.3.2 に検討対象空間の概要を示す。検討対象住宅として、図 6.2 に示した建築環境・省エネルギー機構によって提案されている住宅モデル（以下、IBEC 住宅モデルと呼ぶ）を用いる。負荷計算に使用する戸建住宅は、延べ床面積 120.07m² の木造 2 階建て、居室は 1 階に LDK と和室、2 階に寝室と洋室の計 5 室から成る。この住宅モデルは日本の気候区分によって開口部面積等の詳細部分が異なる 2 つのモデルが提案されており、本研究においては東京都の気候に対応した建物モデルを用いて検討する。

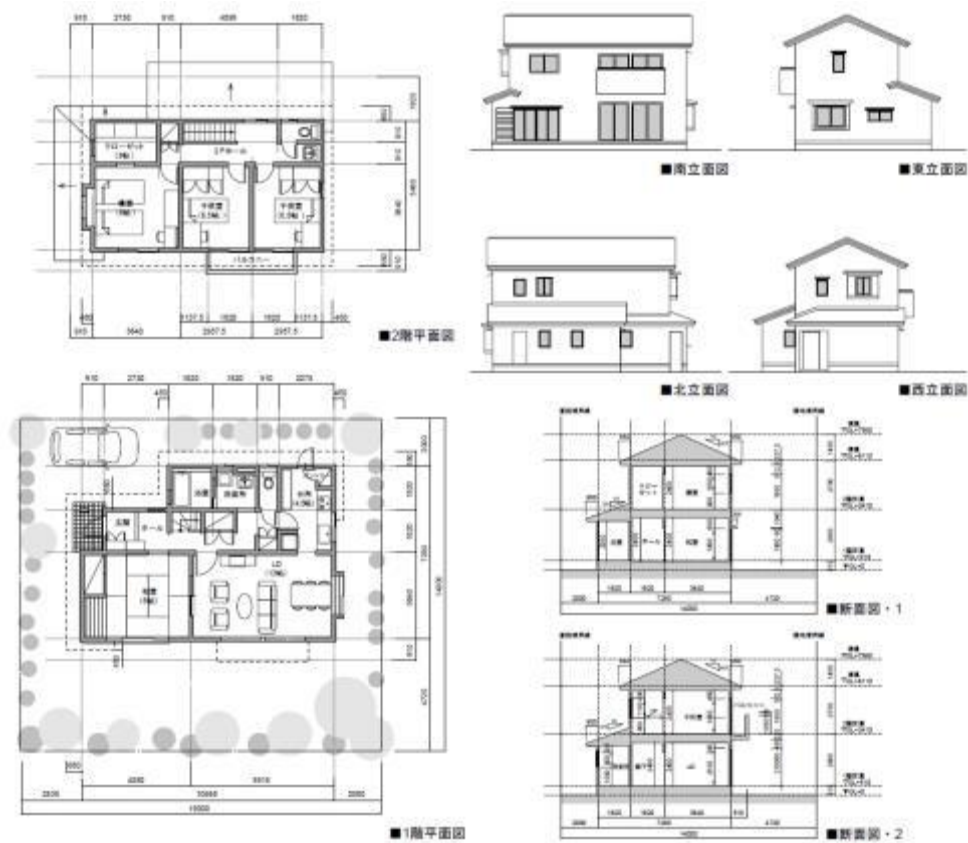


図 6.5 検討対象空間

表 6.3.1 検討対象空間の概要

階	Zone 番号	室名称	床面積 (m ²)	天井高(m)	容積(m ³)
1	Zone1	和室	16.56	2.4	39.74
	Zone2	居間(L)及び食堂室(D)	21.53	2.4	51.67
	Zone3	台所(K)	8.28	2.4	19.87
	Zone4	廊下・玄関	13.25	2.4	31.80
	Zone5	浴室	3.31	2.4	7.94
	Zone6	洗面所・トイレ	4.97	2.4	11.93
	1 階小計		67.90	-	162.95
2	Zone7	主寝室	13.25	2.4	31.80
	Zone8	クローゼット	4.97	2.4	11.93
	Zone9	子供室 1	10.77	2.4	25.85
	Zone10	子供室 2	10.77	2.4	25.85
	Zone11	廊下・階段	9.11	2.4	21.86
	Zone12	トイレ	3.32	2.4	7.97

	2 階小計	52.17	-	125.26
	合計	120.07	-	288.21

表 6.3.2 検討対象空間における開口部の仕様

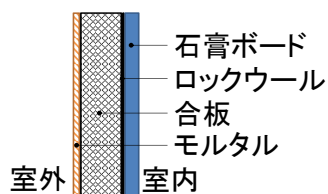
階	Zone 番号	室名称	方位	窓面積(m ²)
1	Zone2	居間(L)及び食堂室(D)	南	6.62
			東	1.66
	Zone3	台所(K)	東	0.73
	Zone1	和室	南	3.31
	Zone6	洗面所・トイレ	北	0.56
2	Zone7	主寝室	南	3.31
			西	0.83
	Zone9	子供室 1	南	3.31
	Zone10	子供室 2	南	3.31
			東	0.83
	Zone12	トイレ	北	0.41
	Zone11	廊下・階段	北	0.83

6.3.2.1 建物壁体の設定

表 6.3.3 に建物外皮の境界条件詳細を示す。建物外皮及び開口部の境界条件は、次世代省エネルギー基準を満たす物性値（熱損失係数 2.7 相当）をそれぞれ用いる。窓は複層ガラスを想定し、2.9 W/m・K である。各壁面における熱橋は考慮しない。

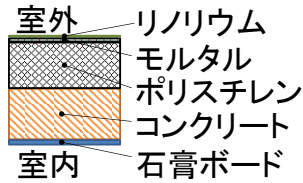
表 6.3.3 建物外皮の境界条件詳細

(a) 外壁



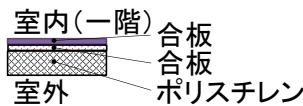
	厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率： 0.383)	比熱 (kJ/kg・K)	密度 (kg/m ³)
石膏ボード	13	0.211	1.0	900
ロックウール	89	0.036	0.9	80
合板	1	0.150	1.2	800
モルタル	30	1.400	1.0	2000

(b) 屋根



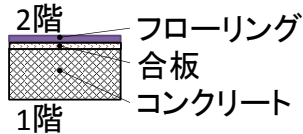
	厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率： 0.293)	比熱 (kJ/kg・K)	密度 (kg/m³)
リノリウム	2	0.169	1.0	1000
モルタル	6	0.700	1.0	1400
ポリスチレン	90	0.031	1.25	20
コンクリート	100	1.400	1.0	800
石膏ボード	9	0.350	1.0	1200

(c) 床（一階）



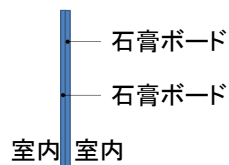
	厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率： 0.398)	比熱 (kJ/kg・K)	密度 (kg/m³)
合板	12	0.150	1.2	800
合板	15	0.150	1.2	800
ポリスチレン	54	0.025	1.25	15

(d) 床（中間の床）



	厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率： 1.687)	比熱 (kJ/kg・K)	密度 (kg/m³)
フローリング	12	0.140	1.2	650
合板	12	0.150	1.2	800
コンクリート	100	0.389	1.0	800

(f) 間仕切り



	厚 (mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率： 0.398)	比熱 (kJ/kg・K)	密度 (kg/m³)
石膏ボード	12	0.350	1.0	1200
石膏ボード	12	0.350	1.0	1200

6.3.2.2 床暖房の設定

リビング室における床暖房（敷設面積 15.07m²）の構成は表 6.3.4 に示す。TRNBUILD の Zone 設定における床の Active Layer を用いて床暖房を設定した。しかし、壁体の構造

によって、薄い建材層などの応答係数を計算できない場合、建物の設定情報となる TRNBUILD のファイルが保存できなくなる。今回 IBEC の標準住宅の床暖房の構造を再現する際に、断熱層や空気層などの小さい厚さを持つ壁体層の応答係数は上記の理由で計算できなかったため、熱伝導の相似則を用いて建材層の厚さを TRNSYS の下限値にし、材料の熱伝導率、比熱または密度を合わせて調整することで、同じ応答係数を求めることにした。すなわち、TRNSYS において、壁体の構成に係わらず、同一の応答係数であれば、同じ熱応答性能になり、室内空気に同じ影響を与える。

表 6.3.4 床（一階、床暖房適用）

室内(一階)				
12		TIMBERFLOO2(λ : 0.1008, c: 1.13, ρ : 32)		
		LAYER003 (active layer)		
12		TIMBERFLOO2		
30		INSULATION		
室外				
単位 mm				
	厚(mm)	熱伝導率(W/m・K) (熱貫流率: 0.386)	比熱(kJ/kg・K)	密度(kg/m ³)
合板	12	0.150	1.2	800
Active Layer	-	0.350	-	-
合板	15	0.150	1.2	800
ポリスチレン	54	0.025	1.25	15

6.3.2.3 空気流れ設定

ゾーン相互間、建物外部から内部への隙間風、換気装置での空気流動は TRNFLOW による連成により計算される。多数室空気流動モデルは「Node」と呼ばれる節点と「Link」と呼ばれる連結でネットワークされる。「Node」は建物外界環境と部屋を表し、「Link」は開口部、ドア、隙間、換気口はもちろん、ダクト、ファンなどの換気系統を表す。解析においての空気流動モデルは入力 Node 温度から始まり、各 Link に対応する空気流量を計算する。これらの空気流動は最終的に室内温度を出力とする熱負荷モデルで使用される。

IBEC 住宅モデルの熱負荷計算では 0.5 回/h の換気回数に一部の部屋における局所換気で換気負荷を計算する。図 6.6 に TRNFLOW の連成における Node 設定詳細を示す。Node の設定は窓とドアの開口部は「Large Opening」とし、他の壁面は「Crack」として設定した。TRNFLOW の連成では第 3 種換気を行うと想定し、計 5 室において排気ファ

ンの境界条件として入力した。ファンの仕様は、IBEC 住宅モデルの熱負荷計算における局所換気量想定値に合わせた市販品のカタログを参照した。ゾーン間のリンク設定の詳細は附録 2 を参照。

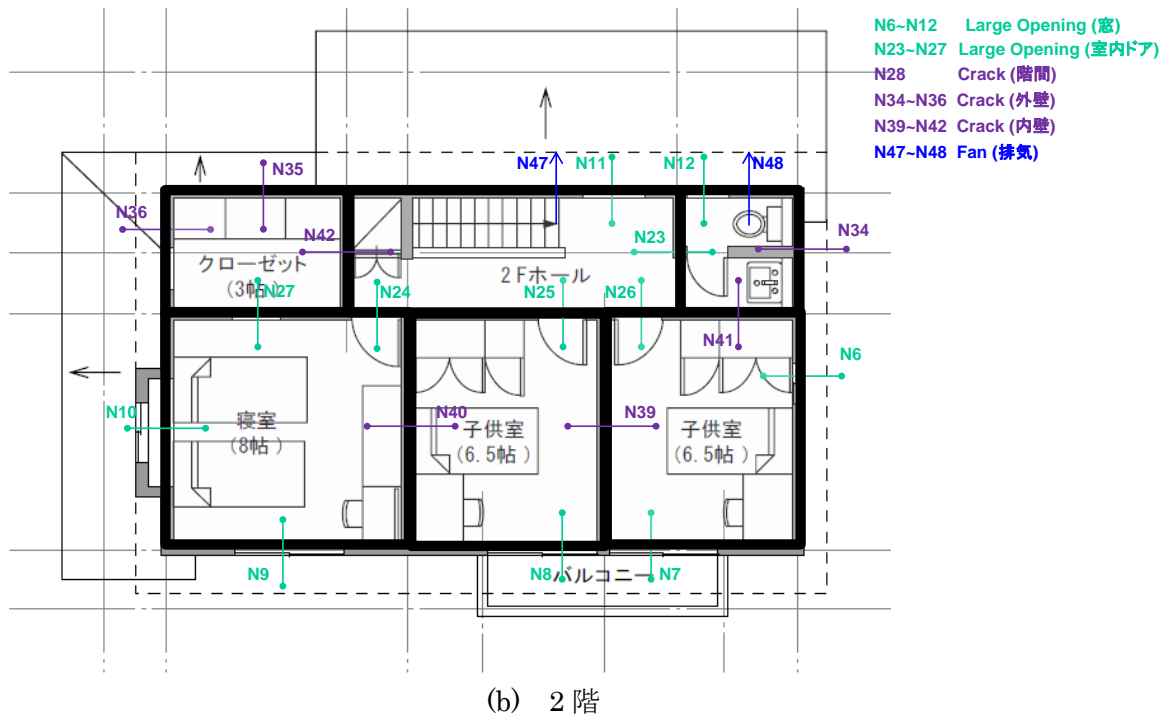
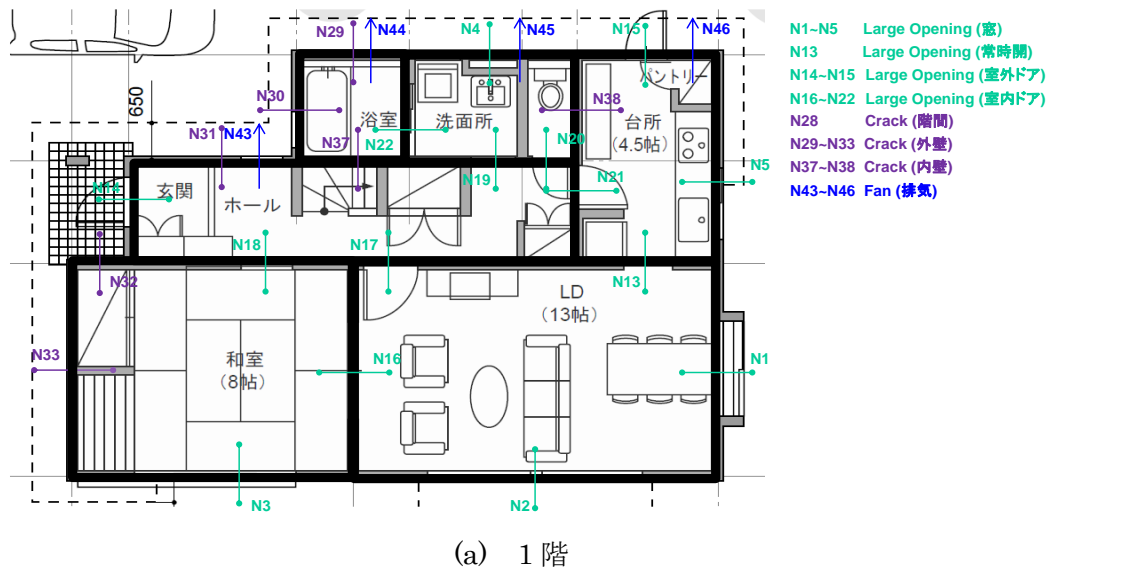


図 6.6 TRNFLOW における Node 設定詳細

質量流量係数 C と空気流れの指数 n の代表例を表 6.3.5 に示す。

表 6.3.5 質量流量係数 C と空気流れの指数 n の代表例 [Orme 1988]

Component	C [kg/s/m@1Pa]	n
window new weather stripped	$\leq 3.33 \cdot 10^{-5}$	0.6
window old weather stripped	$6.67 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$	0.6
external doors weather stripped	$1.0 \cdot 10^{-4} - 1.0 \cdot 10^{-3}$	0.6
internal doors	$1.3 \cdot 10^{-3} - 2.4 \cdot 10^{-3}$	0.6
brick wall plastered [kg/s/m ² @1Pa]	$2.0 \cdot 10^{-5} - 2.5 \cdot 10^{-5}$	0.85
wall/ceiling joint caulked (masonry/concrete)	$8.0 \cdot 10^{-6} - 1.8 \cdot 10^{-5}$	0.6

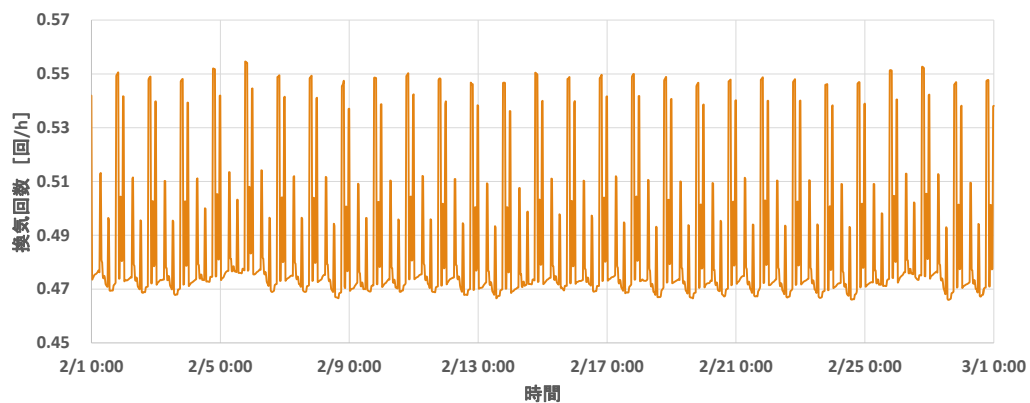


図 6.3 換気回数の確認 (リビング+キッチン)

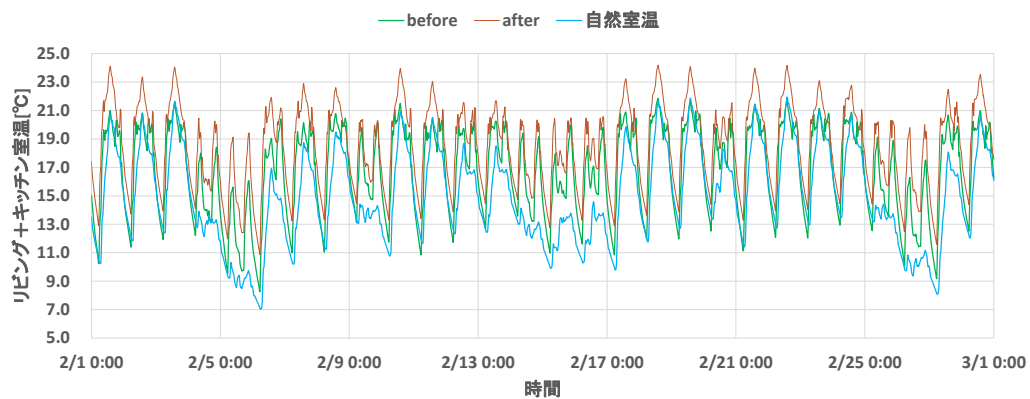
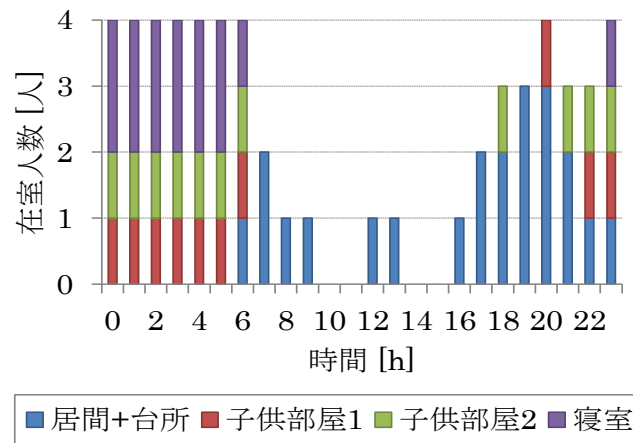


図 6.7 建物モデルの修正による室温の確認

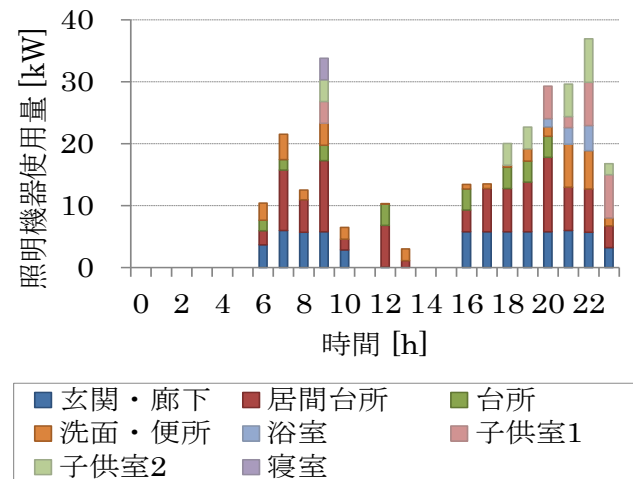
新しいシステムの設定では、IBEC 標準住宅の仕様とおり、キッチンとリビングの間の Large opening を常時開放に設定したが、冷氣侵入が多くなることが分かった。室温を 20℃前後に維持できるため、隙間風の設定を表 6.3.5 に示す代表例の設定値に変更し、リビングとキッチンの 2 月の換気回数が 0.5 回前後になっていることと、室温が 20℃前後に維持していることを確認した。その結果が図 6.6 と図 6.7 に示している。

6.3.2.4 内部発熱の設定スケジュール

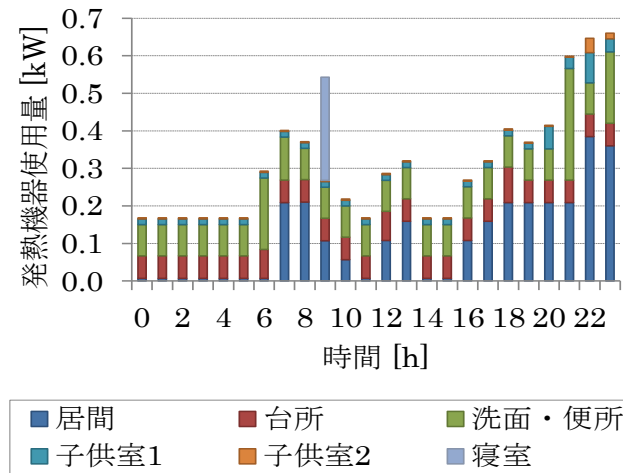
居住者の家族構成は 4 人家族と設定した。各部屋における在室者、照明および機器からの発熱スケジュールを図 6.8 に示す。



(a) 在室者スケジュール



(b) 照明設備スケジュール



(c) 発熱機器スケジュール

図 6.8 在室者、照明設備、発熱機器スケジュール

6.3.3 太陽集熱器の設定

2.2 システムにおける各機器の仕様 ①太陽集熱器の設定を参照のこと。

6.3.4 タンクの設定

2.2 システムにおける各機器の仕様 ②タンクの設定を参照のこと。

6.3.5 熱交換器の設定

熱交換器における熱量は式 3.1 で計算する。

$$\frac{Ka_t}{m_h c_h} = \ln \frac{t_c - t_{h1}}{t_c - t_{h2}} \quad (3.1)$$

ここで、K：熱交換器の熱通過率 228567.9[W/m²・K]

a_t：熱交換器の全伝熱面積 0.00105[m²]

m_h：戻り温水の流量 66.667[g/s]

c_h：戻り温水熱媒の比熱 3.85[J/g・K]

t_c：タンク水温[K]

t_{h1}：戻り温水熱媒の入口温度[K]

t_{h2}：戻り温水熱媒の出口温度[K]

式 3.1 を用いて試算した結果、熱交換器の交換効率が 0.61 である。この交換率を入力値として熱交換器に設定し、シミュレーションの結果が式 3.1 を使った場合の計算結果と一致することを確認した。今回のシミュレーションでは、熱交換器のコンポーネント TYPE91 を用いた。給湯回路における熱交換器（熱媒と水）と床暖房回路における熱交換器（熱媒と熱

媒) の設定条件は表 6.3.6 に記載される。

表 6.3.6 熱交換器の設定

設定項目	設定値
(a) 給湯熱交換器	
熱交換効率	0.61[-]
熱源側の流体比熱	3.85[kJ/kg・K]
負荷側の流体比熱	4.19[kJ/kg・K]
(b) 床暖房熱交換器	
熱交換効率	0.61[-]
熱源側の流体比熱	3.85[kJ/kg・K]
負荷側の流体比熱	3.85[kJ/kg・K]
熱源側の流量	120 [kg/h]
負荷側の流量	120 [kg/h]

6.3.6 熱源機の設定

2.2 システムにおける各機器の仕様 ④熱源機の設定を参照のこと。

$$c\% = 0.0021T_i^2 - 0.3767T_i + 94.833 \quad (3.2)$$

ここで、 $c\%$ ：熱源機効率（ボイラー効率）[-]

T_i ：熱源機戻り水温[°C]

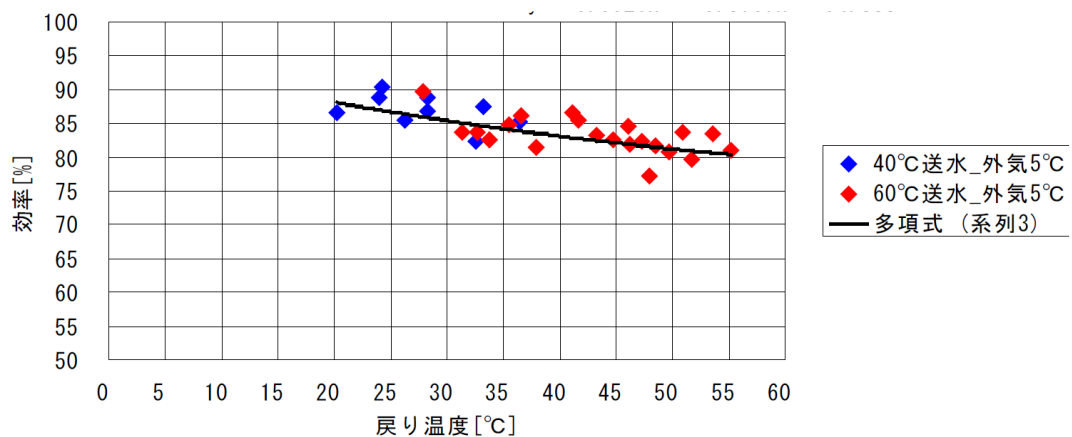


図 6.9 戻り水温による熱源機効率の変化

表 6.3.7 熱源機の設定

設定項目	設定値
(a) 床暖房熱源機	
定格容量	10000 [kJ/h]
流体の比熱	3.85 [kJ/kg・K]
加熱設定温度	60 [°C]
熱源機効率 (ボイラー効率)	式 3.2 で計算する
燃焼効率	1 [-]
(b) 給湯熱源機	
定格容量	10000 [kJ/h]
流体の比熱	4.19 [kJ/kg・K]
加熱設定温度	40 [°C]
熱源機効率 (ボイラー効率)	1 [-]
燃焼効率	1 [-]

6.3.7 制御システムの設定

6.3.7.1 システム A の制御

床暖房の基本稼働時間は 6:00~10:00 と 18:00~22:00 であり、スケジュールの設定は TYPE14 を用いて行う。上記の稼働時間内は ON (=1)のシグナルを床暖房のポンプに発信し、稼働時間外は OFF (=0)のシグナルを床暖房のポンプに発信する。

室内温度の制御は TYPE2 を用いて行う。室内温度を観測しながら、ポンプの動作を制御する。モジュールに自己ループを付け、即ち、モジュールのアウトプットを自分のインプットとして与えることによって、ある程度室温変化の予測ができるので、頻繁的に ON/OFF 信号をシフトせずに、室温を設定目標とおりにすることができる。

室内設定温度が $20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ であり、 20.5°C を越えようとする際、OFF 信号を出し、 19.5°C より低くなる場合、ON 信号を出す。TYPE2 の制御信号と TYPE14 のスケジュール信号は計算器 Yukadan Sig において掛け算をし、両方もが 1 である場合、床暖房のポンプが稼働する。

太陽集熱器のポンプの ON/OFF シグナル出力は計算器モジュールである Solar Sig で判定される。水平面全日射量 > 0 とタンクの水温 $\leq 70^{\circ}\text{C}$ の 2 つの条件を同時に満たつ場合、ポンプの制御信号が 1 であり、それ以外の場合は太陽熱集熱しなく、ポンプの制御信号が 0 である。

床暖房ポンプの信号が分流器 TYPE11f に送られる。信号が 1 である場合、太陽集熱器から出る熱媒流体は床暖房の熱交換器に流れて行く。信号が 0 である場合、熱媒流体は給湯

側の熱交換器に流れて行き、タンク中の水を加熱する。

床暖房ポンプの信号が合流器 TYPE11d にも送られる。床暖房からの戻り熱媒と給湯側からの戻り熱媒をその信号の値により合流した後、太陽集熱器に戻ってくる。

給湯温度が 40℃に設定したため、タンクの出湯温度によって、40℃より高くなっている場合、10℃の冷水と混合させて供給する。冷水とタンクの温水の混合割合は計算器 WaterMixed で計算する。出湯温度が 40℃未満の場合、給湯熱源機で 40℃までに加熱して供給する。

6.3.7.2 システム B の制御

床暖房の稼働スケジュールと室温制御の両方で床暖房のポンプの ON/OFF 動作をコントロールする。この部分に関してはシステム A の制御と一致するため、詳しくは 3.7.1 に参照。

制御の中心となるのが計算器 main control であり、床暖房の高温戻り熱媒がタンクに行くか、太陽集熱器からの熱媒がタンクに行くか、ここで判断して制御する。床暖房の高温戻り熱媒によるタンクの蓄熱は下記の 3 つの条件が全て満たす場合のみ行われる。

- ① 太陽熱集熱は行われていない：水平面全日射量=0
- ② 床暖房が稼働している：計算器 Yukadan Sig=1
- ③ 床暖房戻り熱媒温度 \geq タンクの出湯温度

以上の 3 つの条件が全て揃っている場合、main control から 1 の信号を出し、それ以外の場合、0 の信号を出す。この信号は同時に床暖房側の計算器 Floorheating と太陽集熱器側の計算器 Solarback に送られ、太陽集熱器の戻り熱媒温度と床暖房の戻り熱媒温度を計算する。

太陽集熱器のポンプの ON/OFF シグナル出力は計算器モジュールである Solar Sig で判定される。水平面全日射量 >0 とタンクの水温 $\leq 70^{\circ}\text{C}$ の 2 つの条件を同時に満たす場合、ポンプの制御信号が 1 であり、それ以外の場合は太陽熱集熱しなく、ポンプの制御信号が 0 である。

給湯温度が 40℃に設定したため、タンクの出湯温度によって、40℃より高くなっている場合、10℃の冷水と混合させて供給する。冷水とタンクの温水の混合割合は計算器 WaterMixed で計算する。出湯温度が 40℃未満の場合、給湯熱源機で 40℃までに加熱して供給する。

6.4 シミュレーション結果と検討・考察

6.4.1 シミュレーションケースの設定

まず基本となる Case0 と Case1 の解析を実施し、結果を比較した。その後、新築システムに基づいて、給湯需要の違い（Case2-1~Case2-3）とタンクの容量、断熱性の違いによる（Case3-1~Case3-8）比較を行った。基本ケースの設定は表 6.4.1、給湯需要のケース設定は表 6.4.2、タンクの容量、断熱性のケース設定は表 6.4.3 に示す。給湯スケジュール M1 スタンダード平日大、平日中、平日小は図 6.10 と表 6.4.4 に示す。

表 6.4.1 基本ケースの設定

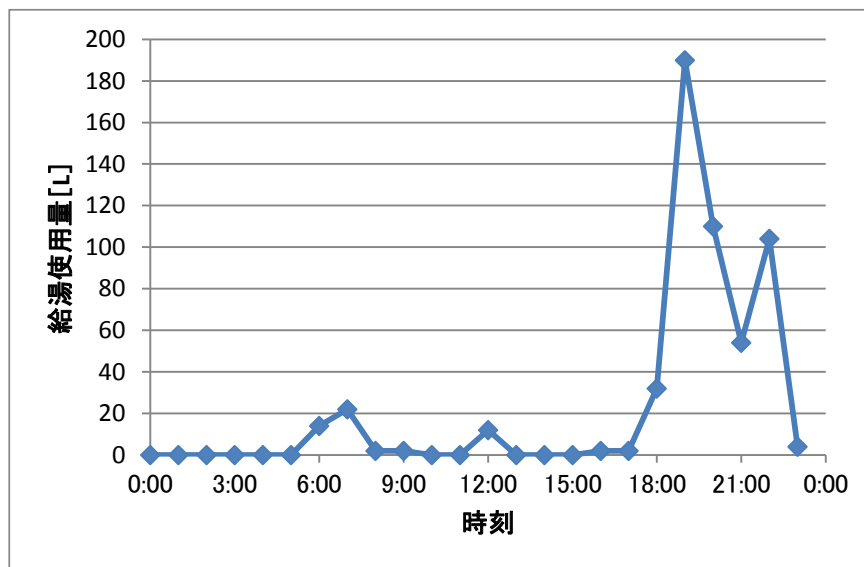
ケース		集熱なし	Case0 (基本ケース)	Case1 (基本ケース)
検討目的		太陽熱集熱なしの比較	一次エネルギー比較	
システム	システム	熱源機のみ	システム A	システム B
	熱のやり取り		タンク→床暖房回路	床暖房回路→タンク
	システムの目的		太陽熱の有効利用による 一次エネルギー削減	「床暖房熱の給湯利用」、 「床暖房熱源機効率向上」 による一次エネルギー削減
給湯スケジュール		M1 スタンダード「平日中」		
タンク容量 [L]		90L		
断熱性能 [kJ/h・m ² ・K]		8.7		

表 6.4.2 給湯需要のケース設定

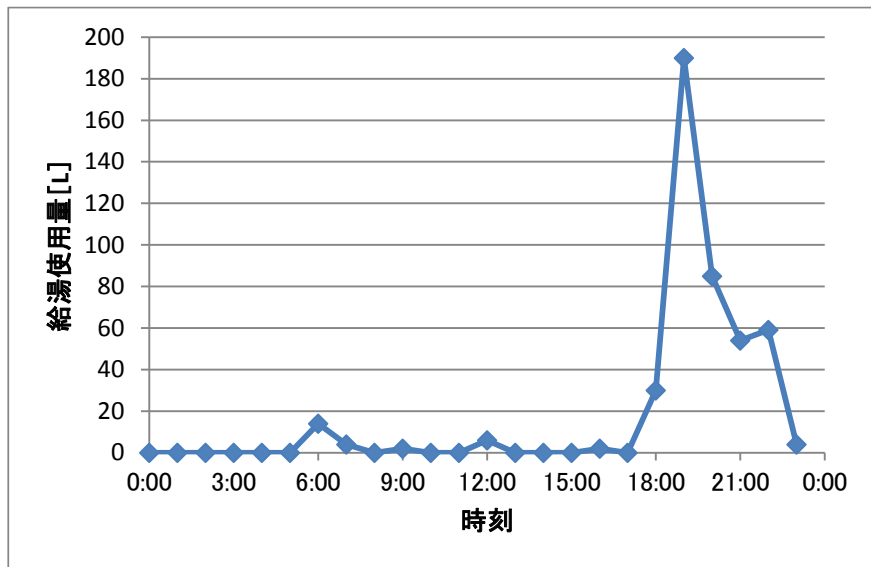
		Case2-1	Case2-2
検討目的		「給湯スケジュール」の違いによる一次エネルギー比較	
システム	システム	システム B	
	熱のやり取り	床暖房回路→タンク	
	システムの目的	「床暖房熱の給湯利用」、 「床暖房熱源機効率向上」による一次エネルギー削減	
給湯スケジュール		M1 スタンダード「平日大」	M1 スタンダード「平日小」
タンク容量 [L]		90L	
断熱性能 [kJ/h・m ² ・K]		8.7	

表 6.4.3 タンクの容量と断熱性のケース設定

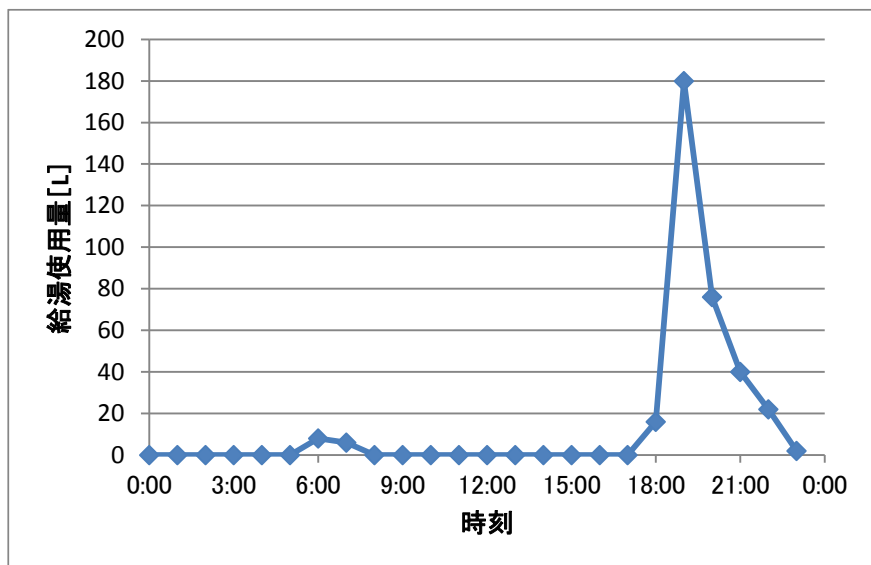
		Case 3-1	Case 3-2	Case 3-3	Case 3-4	Case 3-5	Case 3-6	Case 3-7	Case 3-8
検討目的		Case2-2 との「タンク容量」、「断熱性能」の違いによる一次エネルギー比較							
システム	システム	新しいシステム B							
	熱のやり取り	床暖房回路→タンク							
	システムの目的	「床暖房熱の給湯利用」,「床暖房熱源機効率向上」による一次エネルギー削減							
給湯スケジュール		M1 スタンダード「平日中」							
タンク容量 [L]		50L	200L	50L	90L	200L	50L	90L	200L
断熱性能[kJ/h・m ² ・K]		8.7	8.7	4.35	4.35	4.35	0	0	0



(a) M1 スタンダード平日大



(b) M1 スタンダード平日中



(c) M1 スタンダード平日小

図 6.10 給湯スケジュール

表 6.4.4 給湯スケジュール

時刻	平日大使用量 [L]	平日中使用量 [L]	平日小使用量 [L]
0:00	0	0	0
1:00	0	0	0
2:00	0	0	0
3:00	0	0	0
4:00	0	0	0
5:00	0	0	0
6:00	14	14	8
7:00	22	4	6
8:00	2	0	0
9:00	2	2	0
10:00	0	0	0
11:00	0	0	0
12:00	12	6	0
13:00	0	0	0
14:00	0	0	0
15:00	0	0	0
16:00	2	2	0
17:00	2	0	0
18:00	32	30	16
19:00	190	190	180
20:00	110	85	76
21:00	54	54	40
22:00	104	59	22
23:00	4	4	2
合計	550	450	350

6.4.2 基本ケースの結果

6.4.2.1 各部屋室温の確認

2/26~2/28 の 3 日間において、集熱なし、Case0 と Case1 のリビングとキッチンの室内温度の時間履歴が図 6.11 に示される。床暖房システムの入口熱媒温度が同じく 60℃であるため、3 つのケースの室温がよく一致しており、床暖房の稼働時間帯においては 20℃前後に維持されていることが見られる。



図 6.11 リビング+キッチン室温

6.4.2.2 床暖房熱源機の一次エネルギー消費量

2.3 節の概算値、集熱なし、Case0 と Case1 の 2 月における一次エネルギー消費量、およびそれに基づいて計算した日平均値は図 6.12 と図 6.13 に示す。床暖房の戻り熱媒の熱量がタンクに蓄えられることにより、床暖房戻り熱媒温度が下がることから床暖房用熱源機でのガス消費量が増えるため Case1 の床暖房の一次エネルギー消費量が高くなっていると考えられる。太陽熱集熱量のみが蓄熱される Case0 と比べ、Case1 では床暖房の高温戻り熱媒の熱もタンクに蓄熱され給湯需要に使用されるため、Case1 の給湯一次エネルギー消費量が低くなっている。

しかし、2 月のシステム全体による一次エネルギー消費量では、Case1 が Case0 より 360MJ 高くなっている。その理由は 3 点あり、1 つ目は先にも述べたが、床暖房の戻り熱媒をタンクに蓄熱することで熱媒温度が下がり、床暖房用熱源機でのガス消費量が増えることと考えられる。2 つ目として、床暖房の戻り熱媒をタンクに蓄熱することでタンクの水温が高くなり、タンク熱損失量が大きくなることも理由として挙げられる。3 つ目として床暖房の戻り熱媒をタンクに蓄熱することにより太陽熱集熱量が減少することが挙げられる。

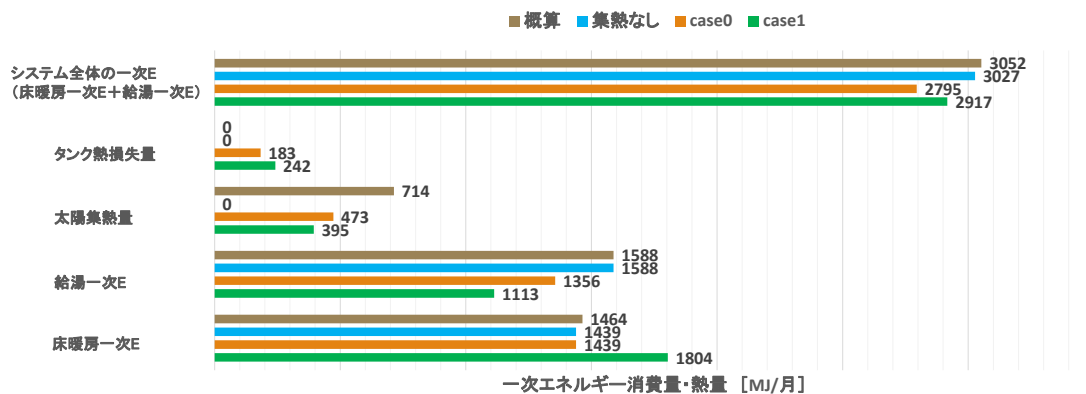


図 6.12 一次エネルギー消費量 (2 月)

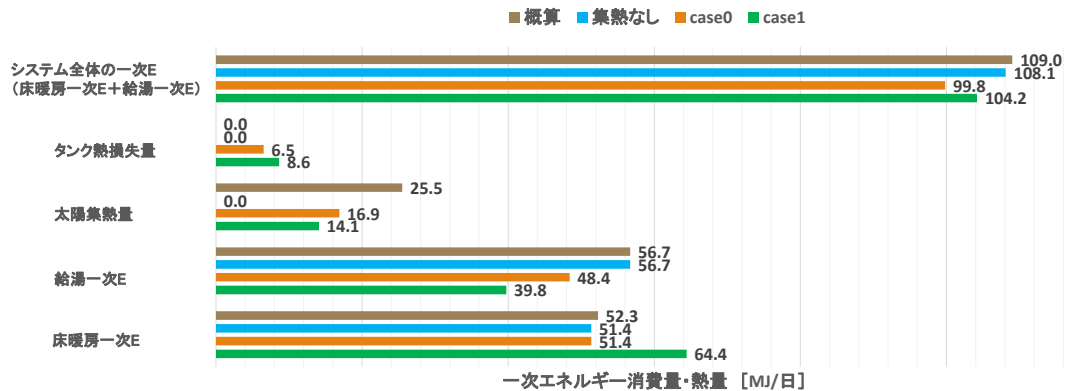


図 6.13 2 月の一次エネルギー消費量の日平均値

また集熱なしと Case0 の結果を比較すると、Case0 では太陽熱集熱量を優先的に床暖房に利用するよう制御されているものの、両者の床暖房用熱源機の一次エネルギー消費量が等しいという結果が得られた。太陽熱が床暖房に利用されるための必要条件は、床暖房が稼働すること及び太陽集熱器の出口の熱媒温度が床暖房戻り熱媒温度より高いことである。しかし、今回の床暖房の稼働時間帯が朝の日射量の少ない 6:00~10:00 と日射がない 18:00~22:00 であることや、床暖房戻り熱媒温度が 40℃以上であり、稼働時間帯の集熱器出口熱媒温度より高くなっているため、太陽熱が床暖房に利用される必要条件を満たしていない。図 6.14 と図 6.15 に快晴日と雲の日の集熱器出口温度と床暖房戻り水温、床暖房運転信号が示しており、太陽熱が床暖房に利用される必要条件を満たしていないことが見て取れる。したがって、今回のシミュレーション結果では、床暖房熱源機の一次エネルギー消費量が同じとなったと考えられる。

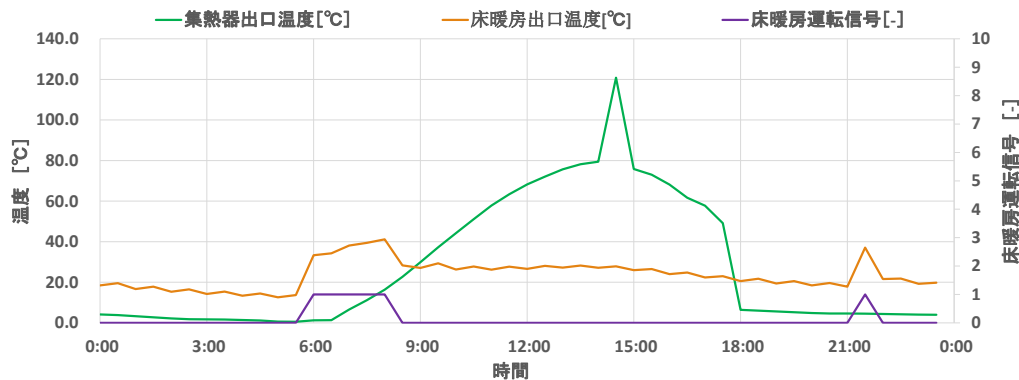


図 6.14 2 月 1 日（快晴）における温度の時間履歴

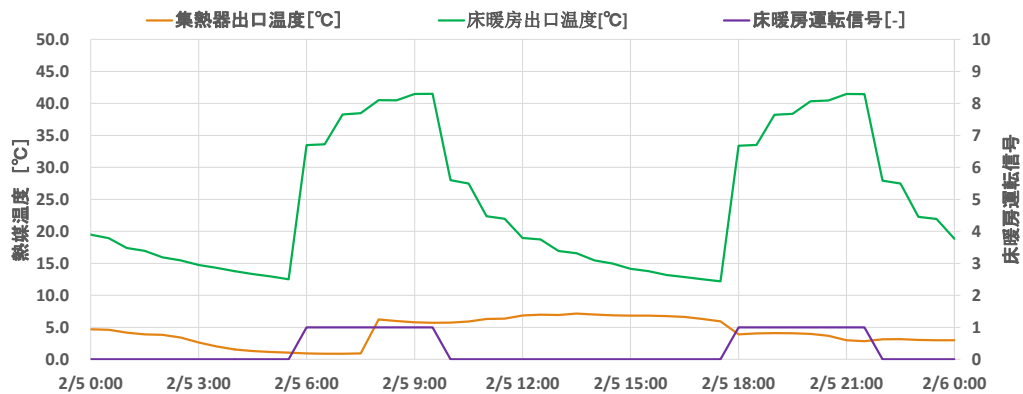


図 6.15 2月5日（曇り）における温度の時間履歴

6.4.2.3 床暖房熱源機効率

床暖房戻り熱媒温度を下げることで、床暖房熱源機の効率が上昇したことは図 6.16 の 2/26~2/28 の床暖房熱源機効率の時間履歴に示される。2月の熱源機平均効率を図 6.17 に示す。Case1の熱源機効率は0.851であり、Case0と集熱なしの場合の熱源機効率は0.835であることが分かった。

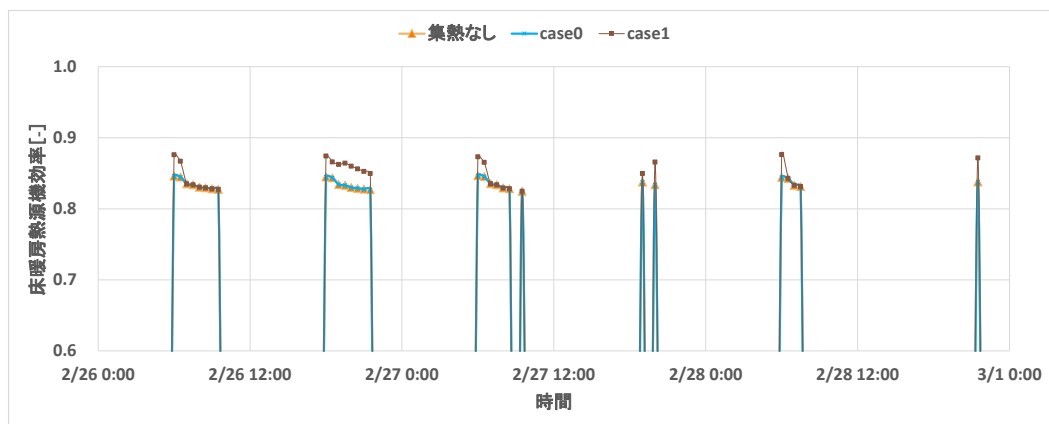


図 6.16 床暖房熱源機効率

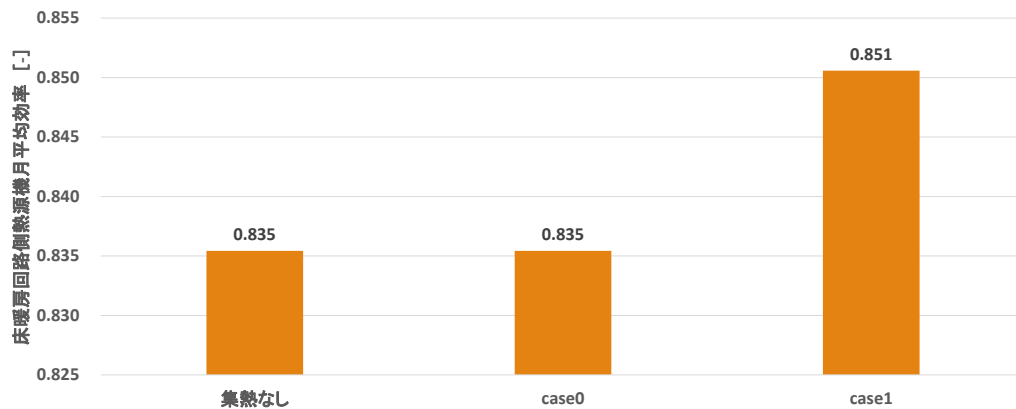


図 6.17 床暖房熱源機の月平均効率

6.4.2.4 タンク入口・出口水温

Case0 と Case1 のタンク入口・出口水温は図 6.20 と図 6.21 に示す。ここで、タンク入口という場所は、図 6.18 の⑪と図 6.19 の⑫であり、タンク出口という場所は、図 6.18 の⑩と図 6.19 の⑪である。

Case0 における日射およびタンク蓄熱がない場合、Case1 における日射がない場合には、床暖房戻り熱媒による蓄熱があるため、タンクの水温が上昇することが分かった。

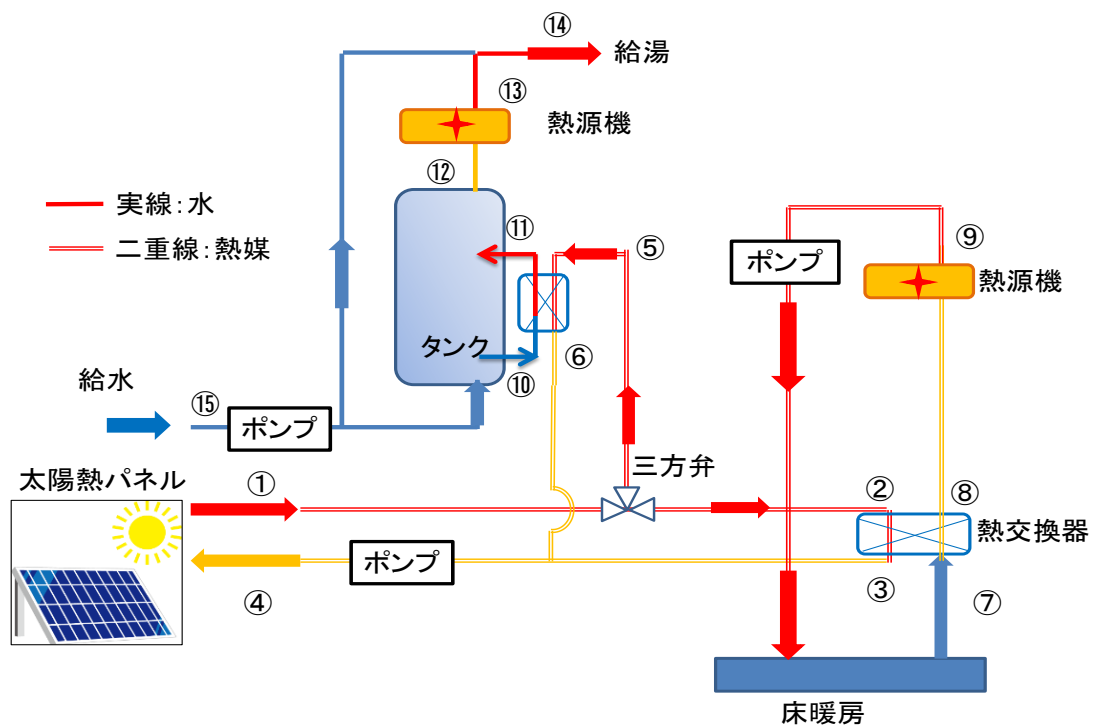


図 6.18 システム A の構成 (再)

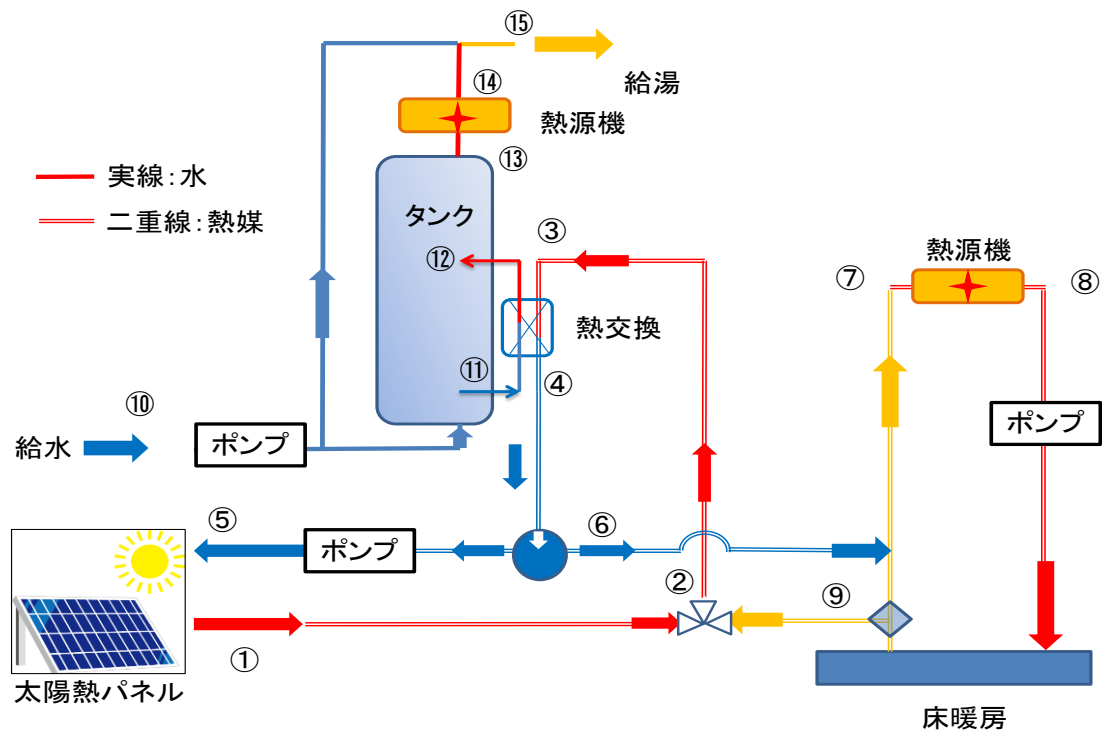


図 6.19 システム B の構成 (再)

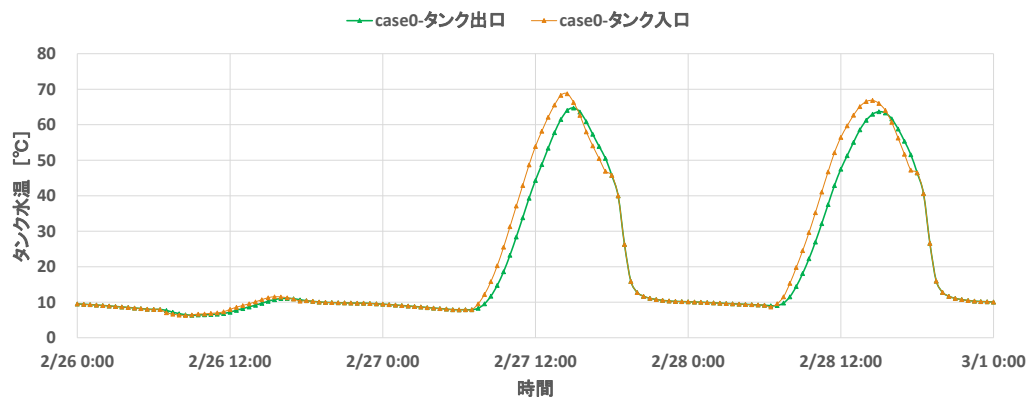


図 6.20 タンク水温 (Case0)

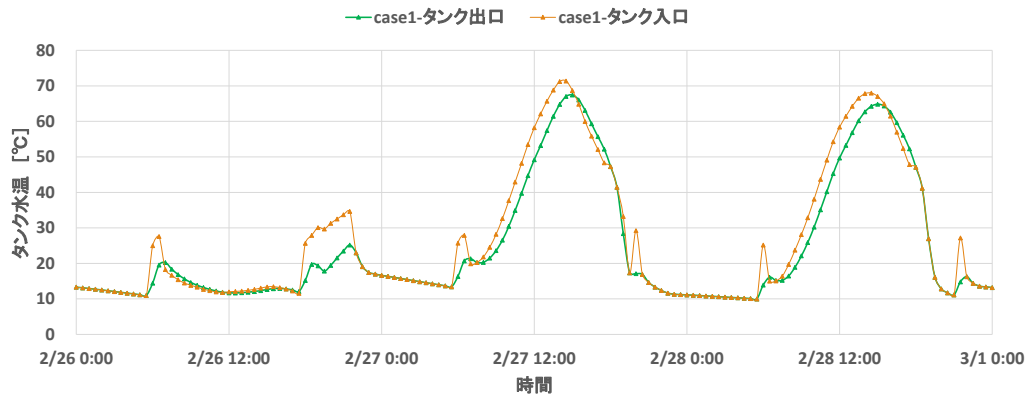


図 6.21 タンク水温 (Case1)

6.4.2.5 太陽熱集熱器入口・出口熱媒温度

太陽熱集熱器入口熱媒温度は図 6.18 の④と図 6.19 の⑤における熱媒温度を指す。太陽熱集熱器出口熱媒温度とは図 6.18 の①と図 6.19 の①における熱媒温度のことである。Case0 と Case1 の太陽熱集熱器入口・出口温度は図 6.22 と図 6.23 に示す。

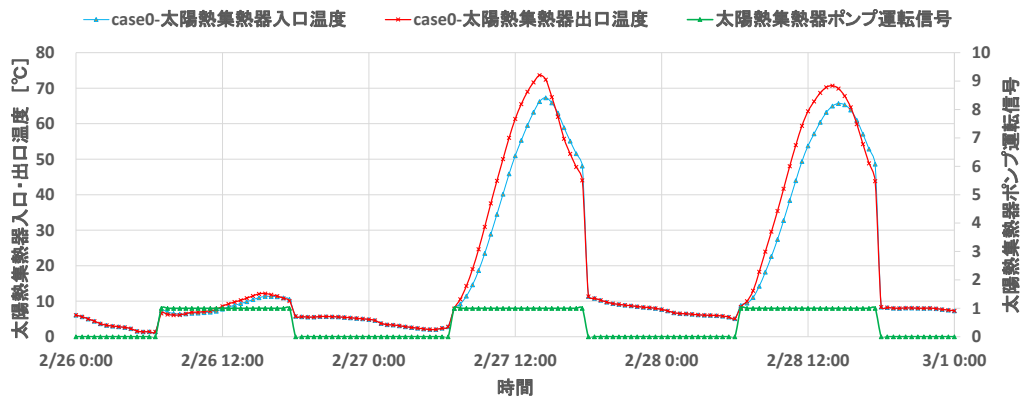


図 6.22 太陽熱集熱器入口・出口熱媒温度 (Case0)

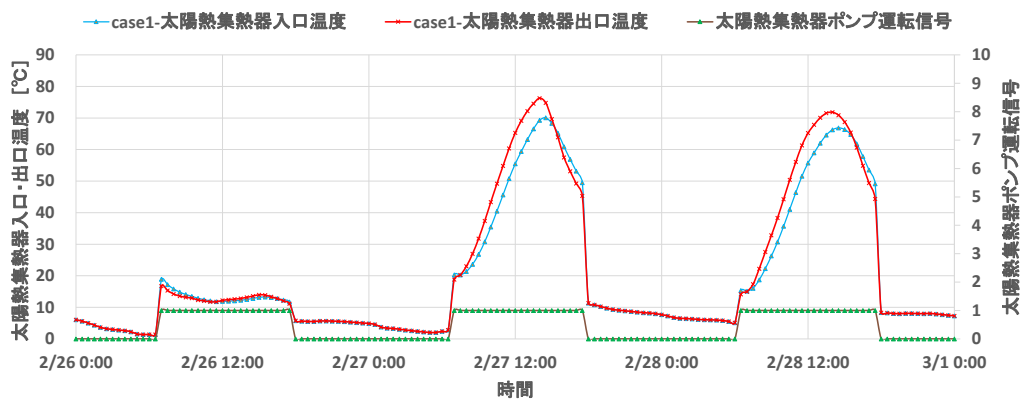


図 6.23 太陽熱集熱器入口・出口熱媒温度 (Case1)

6.4.2.6 床暖房行き・戻り熱媒温度

床暖房行き熱媒温度は図 6.18 の⑨と図 6.19 の⑧における熱媒温度を指す。太陽熱集熱器出口熱媒温度とは図 6.18 の⑦と図 6.19 の⑨における熱媒温度のことである。Case0 と Case1 の床暖房行き・戻り熱媒温度は図 6.24 と図 6.25 に示す。

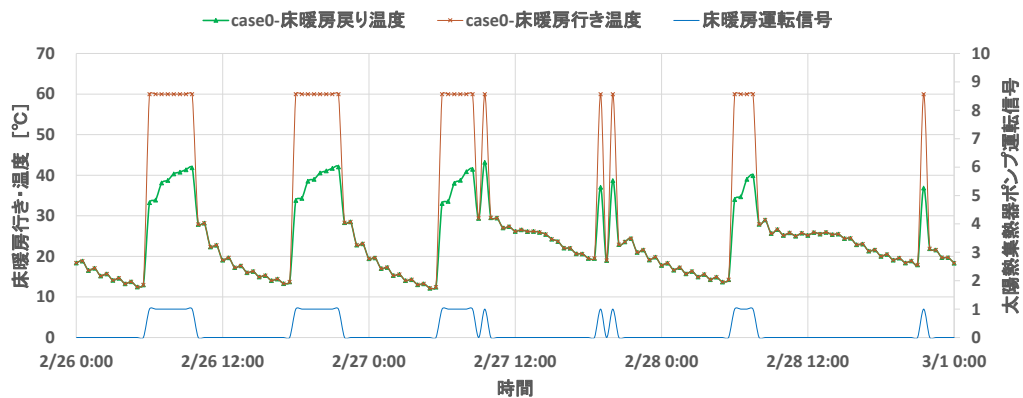


図 6.24 床暖房行き・戻り熱媒温度 (Case0)

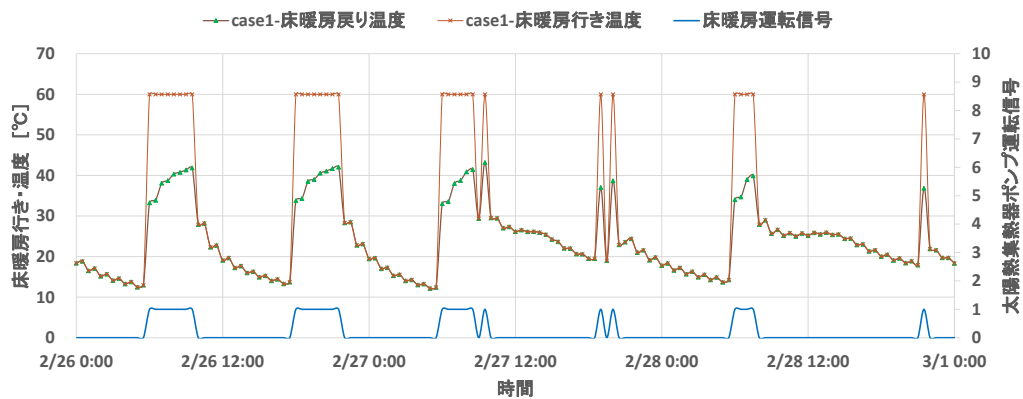


図 6.25 床暖房行き・戻り熱媒温度 (Case1)

6.4.3 給湯需要の違いによる比較・検討

基本ケースである Case1 をベースにして給湯需要のみを異なる設定値にする場合の給湯一次エネルギー、床暖房一次エネルギー、太陽集熱量、タンク熱損失量およびシステム全体の一次エネルギー消費量を検討する。2月の一次エネルギー消費量は図 6.26、2月の月平均一次エネルギー消費量は図 6.27 に示す。

給湯需要量が大きいほど給湯一次エネルギー消費量は大きくなった。また給湯需要量の上昇に伴い太陽集熱有効熱量が増大するが、給湯需要に利用されるためタンク内の平均湯

温は高くならず、タンクの熱損失量が減少する傾向が見られる。

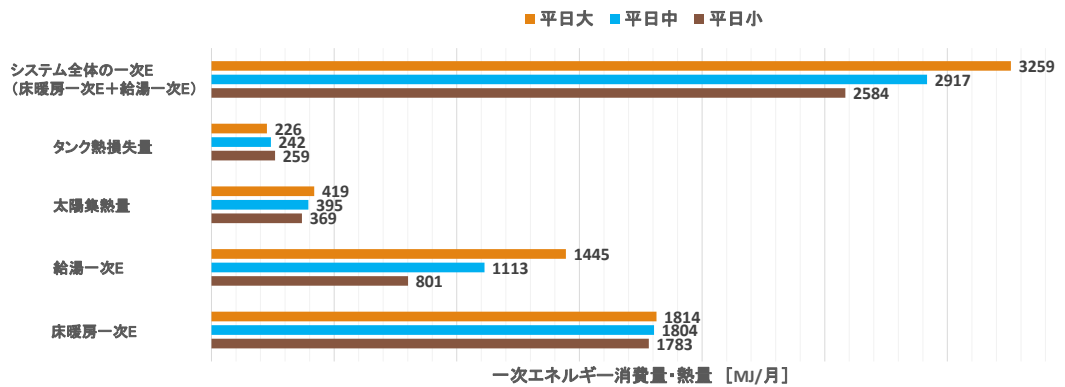


図 6.26 2 月の一次エネルギー消費量 (Case2-1, Case1, Case2-2)

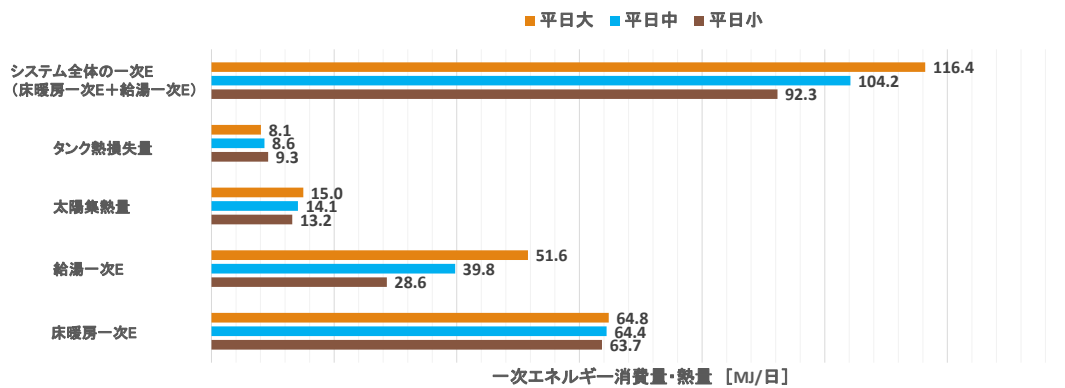


図 6.27 2 月の一次エネルギー消費量の日平均値 (Case2-1, Case1, Case2-2)

6.4.4 タンクの容量・断熱による比較・検討

基本ケースである Case1 をベースにしてタンクの容量と断熱性の違いによる給湯一次エネルギー、床暖房一次エネルギー、太陽集熱量、タンク熱損失量およびシステム全体の一次エネルギー消費量を検討する。2 月の一次エネルギー消費量は図 6.28、2 月の月平均一次エネルギー消費量は図 6.29 に示す。

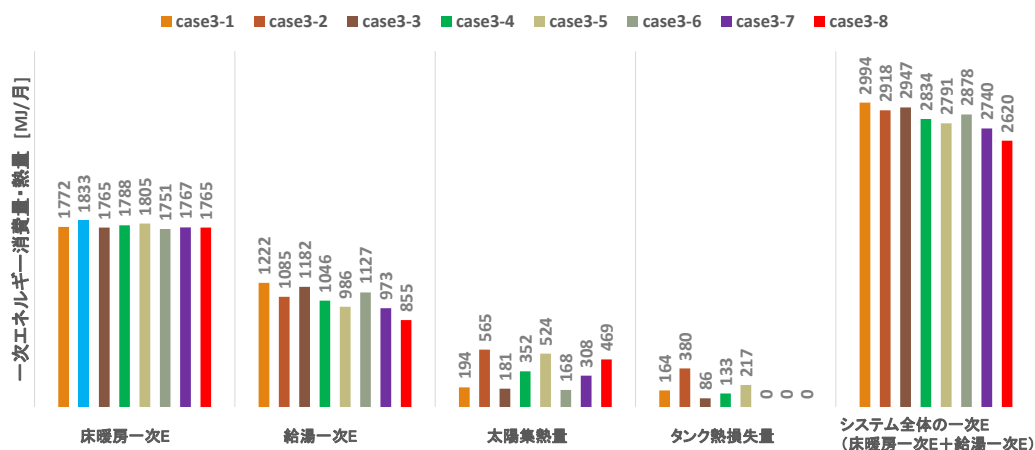


図 6.28 2月の一次エネルギー消費量 (Case3-1～3-8)

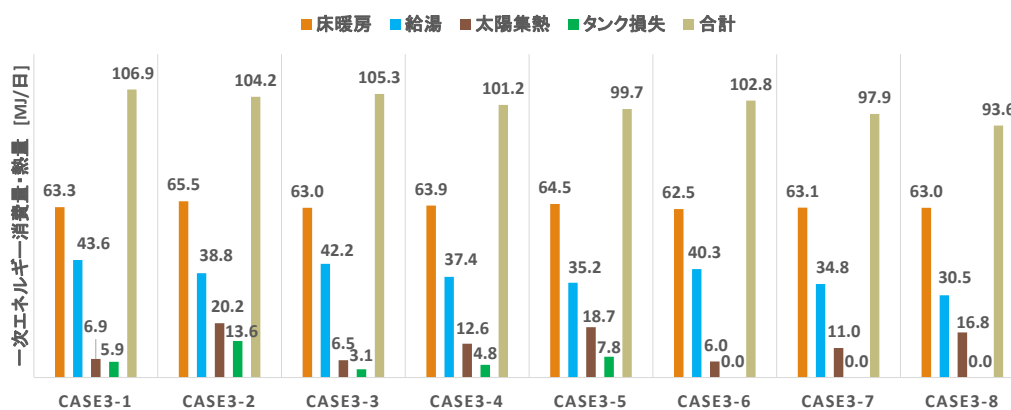


図 6.29 2月の一次エネルギー消費量の日平均値 (Case3-1～3-8)

6.4.4.1 タンク容量の違いによる比較

図 6.30～図 6.32 には熱損失係数が大、中、小の 3 つの場合において、タンク容量の違い (50L、90L、200L) による比較を検討する。いずれの場合にも、タンクの容量が大きいほど、太陽熱集熱量が増えるため、給湯一次エネルギー消費量が減少することが分かった。ただし容量が増大するとタンクの表面積が増えるため、タンクの熱損失量が増える傾向が見られる。システム全体では、タンクの容量を大きくすることにより、一次エネルギー消費量が削減できることが分かった。

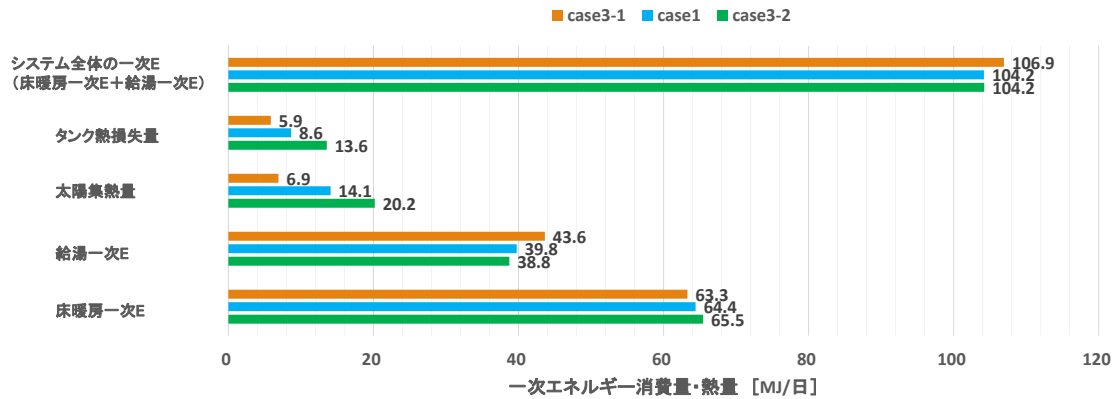


図 6.30 タンク容量の違い (熱損失係数：大)

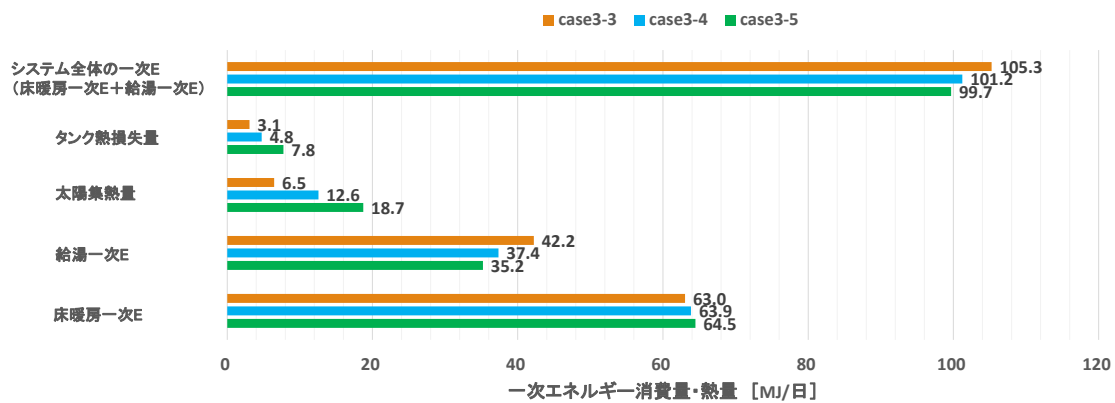


図 6.31 タンク容量の違い (熱損失係数：中)

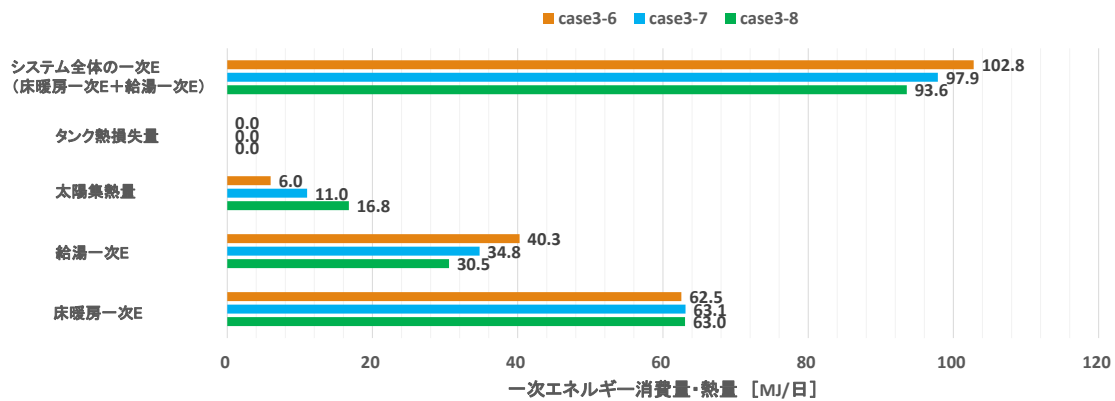


図 6.32 タンク容量の違い (熱損失係数：小)

6.4.4.2 タンク断熱の違いによる比較

図 6.33~図 6.35 にはタンク容量が小、中、大の 3 つの場合において、タンクの熱損失係数の違い ($8.7\text{kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$ 、 $4.35\text{kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$ 、 $0\text{kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$) による比較を検討する。いずれ

の場合にも、タンクの熱損失係数が小さいほど、タンクの熱損失量が小さくなり、給湯一次エネルギー消費量が低下することが分かった。一方で熱損失係数が小さくなると、タンクの熱損失量が小さくなることにより、太陽熱の有効集熱量が減少する傾向が見られた。ただしシステム全体の一次エネルギー消費量を見ると、タンクの熱損失係数が小さいほど一次エネルギー消費量が削減できることが分かった。

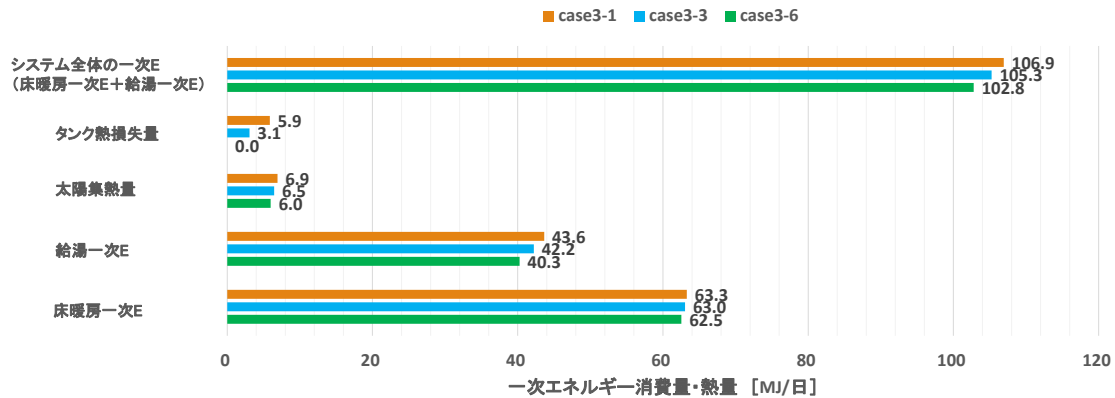


図 6.33 タンク断熱性の違い (50L)

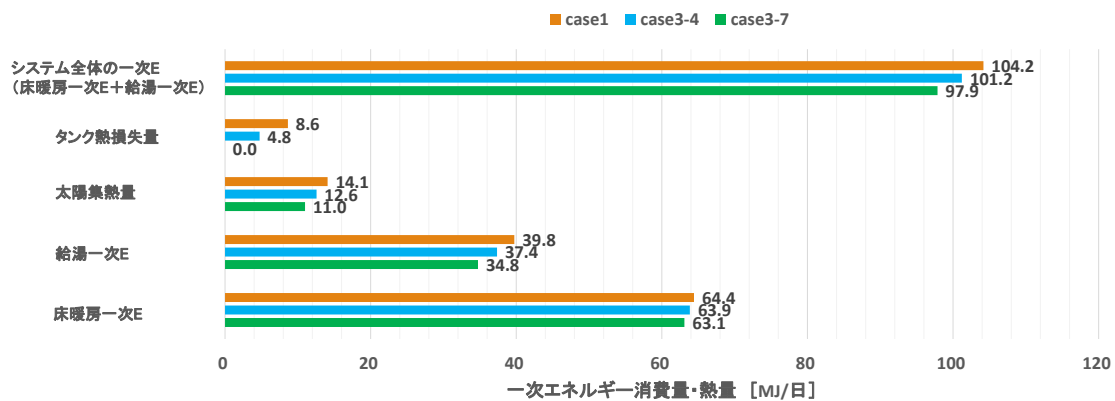


図 6.34 タンク断熱性の違い (90L)

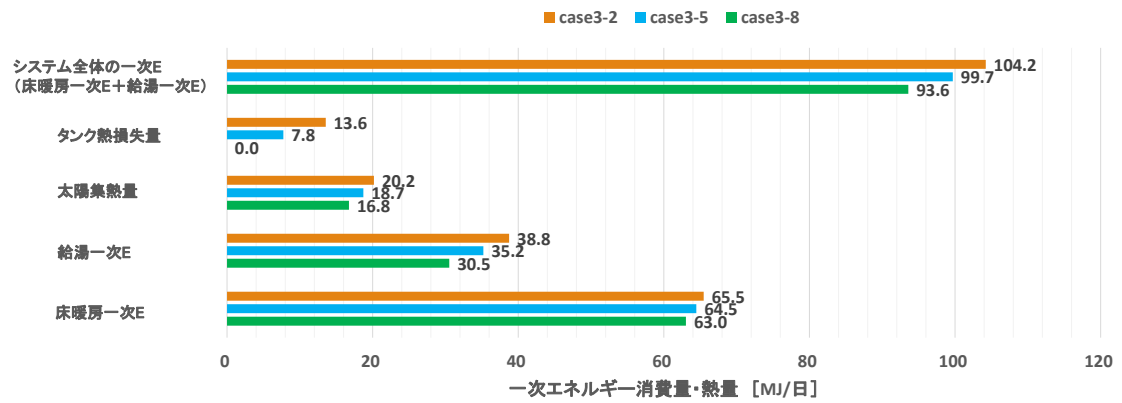


図 6.35 タンク断熱性の違い (200L)

6.5 まとめ

本章では、床暖房熱源機の効率向上による一次エネルギーの削減を目的として、TRNSYSを用いて性能向上のシステムのモデルを構築し、既存システムとの性能比較を行った。また、様々な要素によるシステム利用の最適化研究の第一ステップとして、新しいシステムに基づき、給湯需要の違い、タンクの断熱と容量の違いによる一次エネルギー消費量を比較した。

床暖房戻り熱媒の温度の低下によって床暖房の熱源機効率が上がることを確認できたが、熱媒温度低下による床暖房側熱源機でのガス消費量の増大、床暖房の戻り熱媒の熱をタンクに蓄熱することによる太陽熱有効集熱量の減少、タンク内の水温が高くなることによるタンクの熱損失量の増加により、新しいシステムの方より一次エネルギー消費量が増大する結果となった。

6.6 参考文献

- [6-1] Stephenson, D.G. and Mitalas, G.P., "Calculation of Heat Conduction Transfer Functions for Multi-Layer Slabs," ASHRAE Annual Meeting, Washington, D.C., August 22-25, 1971.
- [6-2] Mitalas, G.P. and Arseneault, J.G., "FORTRAN IV Program to Calculate z-Transfer Functions for the Calculation of Transient Heat Transfer Through Walls and Roofs", Division of National Research Council of Canada, Ottawa.
- [6-3] American Society of heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1972.
- [6-4] 財団法人建築環境・省エネルギー機構、「住宅事業建築主の判断基準の概要」、2009
- [6-5] Wisconsin Univ., TRNSYS User's Manual、2010
- [6-6] 財団法人建築環境・省エネルギー機構、「住宅事業建築主の判断基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説」、2009
- [6-7] 東京大学、東京ガス 住宅の環境・エネルギー総合シミュレーションに用いる設備モデルの作製に関する研究、2014.3
- [6-8] 金政一、加藤信介 家庭用燃料電池の排熱を利用した住宅における省エネかつ快適な冷暖房方式に関する研究(その 2)床暖房適用のための排熱有効利用方法検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, pp. 561-564, 2012,
- [6-9] 中川友貴、大森敏明、金政一、張偉栄、加藤信介, シミュレーションによるスマートハウスの温熱環境とエネルギーの予測 (その 3) 標準的な住宅シミュレーションによるスマートハウスの温熱環境とエネルギーの予測 (その 3) 標準的な住宅の評価モデルの構築, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 2013.
- [6-10] 林侃、張偉栄、加藤信介, 島貫友貴: 太陽集熱器を利用した家庭用設備システムに関する研究 (その 1) 床暖房と給湯併用の設備システムの数値解析及び実測による精度検証, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, pp. 109-112, 2014,
- [6-11] 住宅の環境・エネルギー総合シミュレーションに用いる設備モデルの作成に関する研究 (2013 年度東京大学・東京ガス共同研究報告書)
- [6-12] 経済産業省エネルギー庁 http://www.enecho.meti.go.jp/attaka_eco/system/
- [6-13] 拡張アメダス気象データ, 2000 年, 日本建築学会
- [6-14] 東京ガス、ガス温水床暖房 [後付け・リフォーム用]、p23、2011.1
- [6-15] Weber, Andreas, et al. "TRNFLOW, a new tool for the modeling of heat, air and pollutant transport in buildings within TRNSYS." Proc. of the 7-th IBPSA Conference. Vol. 3. 2003.
- [6-16] Hottel, Hoyte, and Austin Whillier. "Evaluation of flat-plate solar collector performance." Trans. Conf. Use of Solar Energy; Vol. 3. 1955.

第 7 章

まとめ

本研究では、環境問題への関心の高まりから、室内の温熱環境を快適に維持するために、低炭素社会に向けた住宅・建築物分野における省エネ策に着目し、壁体内通気住宅における壁通気構法の省エネ性能評価と性能向上手法の提案、及び住宅における太陽熱利用設備を予測するモデルの開発と新しいシステムの提案を行なう。

ここでは全体のまとめとして各章の主要な結論を総括すると共に、今後取り組むべき課題に関して述べる。

7.1 各章の主要な結論

第1章では、本研究の研究背景、研究目的および論文の構成を述べる。さらに、今まで重要な研究について紹介し、その問題点を指摘し、本研究の位置付けを明確にする。

第2章では、壁通気住宅に関する研究及び太陽熱利用設備システムに関する研究に関する既往研究をまとめて紹介する。また、建築環境工学におけるエネルギーシミュレーションについて説明する。現在ビルディングシミュレーションにおいて主に用いられるネットワークモデルの原理、計算方法をそれぞれ説明する。

第3章では、実住宅における夏季実測を行ない、同じ外断熱の内側に通気層をもつ仕様で通気がある場合とない場合の比較を行うことにより、各室および壁通気層の熱的性状を把握し、壁体内の通気自体の効果を把握した。屋裏ファンを使用していたため、各壁の流速分布が均一にされ、壁体内通気の平均通気量が $467.6 \text{ m}^3/\text{h}$ となっている。小屋裏の温度差は、日射が強い時に、 -2°C より低い温度差がみられ、最大温度差が -4°C まで下がり、床下空気における -2°C の温度差と比較すると、壁通気による効果が顕著にみられる。

第4章では、IBEC 標準住宅モデルを使用し、壁通気構法を使用する住宅の壁体内通気を含む建物内空調・熱輸送性状に関するシミュレーションモデルを作成してシミュレーションを行い、住宅全体の通気性状の確認および各部開口面積の感度解析の検討を行い、自然通気がある場合及びない場合および充填断熱構法との比較、及び強制換気による壁体内通気住宅の性能評価を検討した。感度解析では、各要素単体を変化させた場合通気壁、小屋裏通気口、床下通気口の順に高い感度を示した。また、壁体内通気構法に関して充填断熱構法との比較では、自然室温に関して、充填断熱ケースと比較して通気ありケースでは期間平均で 0.5°C の低下がみられ、在室時間帯のみに着目すると平均で 1.3°C の室温低下がみられた。冷房負荷に関して、充填断熱ケースと比較して通気ありケースでは期間平均でわずかに冷房負荷が増加するが、通気なしケースと比べると 13%削減されており通気の効果は確認できる。また、小屋裏ファンの導入による強制換気を行なうことで、夏季におい

て空調時に冷房負荷の削減効果が顕著にみられ、非空調時に自然室温の低下及び快適性の向上を期待できると考えられる。

第5章では、家庭分野における太陽熱を利用した設備を対象に、住宅のエネルギーシステムのシステムシミュレーションモデル、および居室の温熱環境を予測するモデルの作製を行う。貯湯タンク、太陽集熱器、床暖房、熱交換器などの設備システムを充実させて、実際に利用されている太陽熱利用システムを TRNSYS で再現できた。また、シミュレーションの結果を検証するため、実測の結果との比較が必要となる。実測時の天気情報でシミュレーションの気象データを作成し、室内の長波放射計算を形態係数による詳細放射計算を導入し、シミュレーションは実測結果とよく一致しており、シミュレーション結果の信頼性を検証した。

第6章では、既存の家庭分野における太陽熱を利用した設備モデルを踏まえ、床暖房熱源機の効率向上による一次エネルギーの削減を目的とした、熱源機の効率向上による新しいシステムモデルを提案し、新しいシステムモデルを構築する。また、新しいシステムに基づき、給湯需要の違い、タンクの断熱と容量の違いによる一次エネルギー消費量比較を行うことにより、新しいシステムモデルの性能評価と有効性検討を行う。床暖房戻り熱媒の温度の低下によって床暖房の熱源機効率が上がることを確認できたが、熱媒温度低下による床暖房側熱源機でのガス消費量の増大、床暖房の戻り熱媒の熱をタンクに蓄熱することによる太陽熱有効集熱量の減少、タンク内の水温が高くなることによるタンクの熱損失量の増加により、提案したシステムの方が既存システムに比べ一次エネルギー消費量が増大する結果となった。

第7章では、全体のまとめを行い、本研究の成果を総括し、今後の展望を示した。

7.2 今後の展望

以上のように本論のテーマである「壁通気構法と太陽熱利用設備を用いた省エネルギー住宅に関する研究」に関してのまとめを行ったが、各章の細部には今後の課題が残されている。そのため、以下の検討項目を考えられる。

- ① 壁通気住宅の検討対象を拡張し、様々な対象地域、壁仕様に対する検討、及び通気量を定量的に最適化する研究を行う予定である。
- ② 太陽熱利用設備システムの最適化を目標とし、様々な条件に応じて最適なシステム形式を検討する予定である。
- ③ 検討される対象建物を集合住宅へ拡張し、集合住宅における太陽熱利用設備システムの性能評価を行う。

Appendix

Appendix 1

発表論文リスト

1. 査読付き論文（筆頭著者）

- 1) 林侃, 加藤信介：壁体内通気住宅の性能向上に関する研究 シミュレーションによる自然通気及び強制通気による夏期と冬期における性能評価（その1）, 日本建築学会環境系論文集、2015年7月、第80巻、第713号
- 2) Kan Lin, Shinsuke Kato, Field Experiments on Mechanical Double-skin System of Room-side Air Gap in a Residential House, Energy Procedia, under 2nd review.

2. 国際会議発表論文（筆頭著者）

- 3) Kan Lin, Shinsuke Kato, Togo Yoshidomi, and Kyosuke Hiyama : Double-skin system of room-side air gap applied to detached house (Part 1): Simulation Analysis for reduction of cooling load in the forced ventilated wall of detached house. AIVC2013 Conference , 25-26 September, Athens 2013（国際会議）
- 4) Kan Lin, Shinsuke Kato, Togo Yoshidomi: Simulation Analysis for Airflow and Reduction of Cooling Load in the Forced Active Ventilated Wall of Detached House. Indoor Air2014 Conference, 7-12 July, HongKong 2014（国際会議）
- 5) Kan Lin, Shinsuke Kato : Simulation analysis for indoor temperature increase and reduction of heating load in the detached house with buoyancy ventilated wall in winter. AIVC2014 Conference , 24-25 September, Poland 2014（国際会議）
- 6) Kan Lin, Shinsuke Kato : Simulation-Based Comparison for Reduction of Cooling Load between External Wall Insulation System and Double-skin System of Room-side Air Gap Applied to Detached House. ROOMVENT 2014 Conference ,19-22 October, Brazil 2014（国際会議）
- 7) Kan Lin, Shinsuke Kato : Simulation-Based Comparison of Thermal Performance between Insulation System and Ventilated Wall System for Room-side Air Gap Applied to Detached House. Greenstock2015, 19-21 May, Beijing, China.（国際会議）

3. 国内会議発表論文（筆頭著者）

- 8) 林侃・加藤信介・吉富透悟・樋山恭助・手塚純一：シミュレーションによる壁体内通気住宅の性能評価その2 自然室温低下及び冷房負荷削減効果について、2013年日本建築学会大会学術講演梗概集、435-436、2013.8（国内会議）

- 9) 林侃・加藤信介・吉富透悟・樋山恭助・手塚純一：シミュレーションによる壁体内通気住宅の性能評価その3 冬期における自然室温上昇及び暖房負荷削減効果について、2014年日本建築学会大会学術講演梗概集、643-644、2014.9（国内会議）
- 10) 林侃，張偉榮，加藤信介，島貫友貴：太陽集熱器を利用した家庭用設備システムに関する研究(その1) 床暖房と給湯併用の設備システムの数値解析及び実測による精度検証，2014年空気調和・衛生工学会大会、109-112、2014.9（国内会議）
- 11) 林侃・加藤信介：シミュレーションによる壁体内通気住宅の性能評価その4 夏期における断熱構法との比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、643-644、2015.9（国内会議）

4. 筆頭著者以外

- 12) Togo Yoshidomi, Kan Lin, Shinsuke Kato, and Kyosuke Hiyama : Double-skin system of room-side air gap applied to detached house (Part 2): Simulation Analysis for reduction of cooling load in the forced ventilated wall of detached house. AIVC2013 Conference , 25-26 September, Athens 2013
- 13) 吉富透悟・加藤信介・林侃・樋山恭助・手塚純一：シミュレーションによる壁体内通気住宅の性能評価 その1 通気量に対する各部開口面積の感度分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、433-434 、2013.8

【課程博士】

研究活動リスト

学生証番号	37-127212
氏名	林 侃
博士論文題目	壁通気構法と太陽熱利用設備を用いた 省エネルギー住宅に関する研究

1. 査読付き論文（筆頭著者）

- 1) 林侃, 加藤信介：壁体内通気住宅の性能向上に関する研究 シミュレーションによる自然通気及び強制通気による夏期と冬期における性能評価（その1），日本建築学会環境系論文集、2015年7月、第80巻、第713号
- 2) Kan Lin, Shinsuke Kato, Field Experiments on Mechanical Double-skin System of Room-side Air Gap in a Residential House, Energy Procedia, under 2rd review.

2. 国際会議発表論文（筆頭著者）

- 3) Kan Lin, Shinsuke Kato, Togo Yoshidomi, and Kyosuke Hiyama : Double-skin system of room-side air gap applied to detached house (Part 1): Simulation Analysis for reduction of cooling load in the forced ventilated wall of detached house. AIVC2013 Conference , 25-26 September, Athens 2013（国際会議）
- 4) Kan Lin, Shinsuke Kato, Togo Yoshidomi: Simulation Analysis for Airflow and Reduction of Cooling Load in the Forced Active Ventilated Wall of Detached House. Indoor Air2014 Conference, 7-12 July, HongKong 2014（国際会議）
- 5) Kan Lin, Shinsuke Kato : Simulation analysis for indoor temperature increase and reduction of heating load in the detached house with buoyancy ventilated wall in winter. AIVC2014 Conference , 24-25 September, Poland 2014（国際会議）
- 6) Kan Lin, Shinsuke Kato : Simulation-Based Comparison for Reduction of Cooling Load between External Wall Insulation System and Double-skin System of Room-side Air Gap Applied to Detached House. ROOMVENT 2014 Conference ,19-22 October, Brazil 2014（国際会議）
- 7) Kan Lin, Shinsuke Kato : Simulation-Based Comparison of Thermal Performance between Insulation System and Ventilated Wall System for Room-side Air Gap Applied to Detached House. Greenstock2015, 19-21 May, Beijing, China.（国際会議）

3. 国内会議発表論文（筆頭著者）

- 8) 林侃・加藤信介・吉富透悟・樋山恭助・手塚純一：シミュレーションによる壁体内通気住宅の性能評価その2 自然室温低下及び冷房負荷削減効果について、2013 年日本建築学会大会学術講演梗概集、435-436、2013.8（国内会議）
- 9) 林侃・加藤信介・吉富透悟・樋山恭助・手塚純一：シミュレーションによる壁体内通気住宅の性能評価その3 冬期における自然室温上昇及び暖房負荷削減効果について、2014年日本建築学会大会学術講演梗概集、643-644、2014.9（国内会議）
- 10) 林侃，張偉榮，加藤信介，島貫友貴：太陽集熱器を利用した家庭用設備システムに関する研究(その1) 床暖房と給湯併用の設備システムの数値解析及び実測による精度検証，2014年空気調和・衛生工学会大会、109-112、2014.9（国内会議）
- 11) 林侃・加藤信介：シミュレーションによる壁体内通気住宅の性能評価その4 夏期における断熱構法との比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、643-644、2015.9（国内会議）

4. 筆頭著者以外

- 12) Togo Yoshidomi, Kan Lin, Shinsuke Kato, and Kyosuke Hiyama : Double-skin system of room-side air gap applied to detached house (Part 2): Simulation Analysis for reduction of cooling load in the forced ventilated wall of detached house. AIVC2013 Conference , 25-26 September, Athens 2013
- 13) 吉富透悟・加藤信介・林侃・樋山恭助・手塚純一：シミュレーションによる壁体内通気住宅の性能評価 その1 通気量に対する各部開口面積の感度分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、433-434、2013.8

5. その他（研究活動を示すもの）

- 1) アジアシンポジウム（日中韓交流会）
 - ◆ 日本（東京大学）、研究発表 2013.11
 - ◆ 中国（清華大学）、研究発表 2014.10
- 2) 慶応大学伊香賀研究室との研究交流会、年間4回
 - ◆ 研究発表 2013.10
 - ◆ 研究発表 2015.5
- 3) 東京大学、京都府立大学、神奈川大学、東京都市大学の研究交流会、年間3回
 - ◆ 研究発表 2013.4
 - ◆ 研究発表 2014.4
- 4) 数値流体勉強会 2週間1回