

住宅における動的な熱的快適性に関する研究
Dynamic Thermal Comfort in Home

2020年2月

中川 純
Jun NAKAGAWA

博士論文

住宅における動的な熱的快適性に関する研究

Dynamic Thermal Comfort in Home

2020年2月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科
建築学専攻 建築環境研究

中川 純
Jun NAKAGAWA

住宅における動的な熱的快適性に関する研究

Dynamic Thermal Comfort in Home

目次

1章 序論	pp.1~16
1.1. はじめに	
1.2. 本研究の目的	
1.3. 関連する既往研究と本研究の位置づけ	
1.3.1. 非定常・不均一環境に関する既往研究	
1.3.2. 環境調整行動に関する既往研究	
1.3.3. 本研究の位置づけ	
1.4. 本論文の構成	
参考文献	
2章 動的な熱環境を有した住宅設計の事例研究	pp.17~34
2.1. はじめに	
2.2. 住宅設計概要	
2.3. デザインの特徴	
2.4. 構造計画	
2.5. 環境計画	
2.5.1. 人体熱モデルによる検討	
2.5.2. 熱負荷計算	
2.5.3. 風の感度解析	
2.6. まとめ	
参考文献	
3章 ウェアラブルデバイスの開発	pp.35~70
3.1. はじめに	
3.2. 研究目的	
3.3. 研究方法	
3.3.1. 開発の方針と仕様	
3.3.2. システム概要	
3.3.3. 計測システムの検証	
3.4. 実測調査	
3.4.1. 実測概要	
3.4.2. 実測方法	
3.5. 環境測定結果	

3.5.1.	空気温度・相対湿度	
3.5.2.	気流速度	
3.5.3.	照度	
3.5.4.	快不快申告	
3.6.	温熱環境の絶対量と快不快申告の関係	
3.7.	温熱環境の変化量と快不快申告の関係	
3.8.	まとめ	
	参考文献	
4章	潜熱蓄熱材を用いた住宅用空気式床暖房システムの開発	pp.71~98
4.1.	はじめに	
4.2.	PCMを用いた空気式床暖房システムの構成	
4.3.	モデルの開発	
4.3.1.	モデルの定式化	
4.3.2.	パラメータの設定	
4.3.3.	ケーススタディ	
4.4.	設計法の検討	
4.4.1.	最適化の定義	
4.4.2.	設計条件	
4.4.3.	相変化温度の決定方法	
4.4.4.	PCM厚の決定方法	
4.5.	まとめ	
	参考文献	
	注	
5章	室内環境自動制御技術の開発	pp.99~146
5.1.	はじめに	
5.2.	研究方法	
5.3.	実験住宅概要	
5.3.1.	市販 ECHONET Lite 機器の実装プロパティ調査	
5.3.2.	プロパティデータ取得事例	
5.4.	過酷環境制御システム	
5.4.1.	熱中症の概要	
5.4.2.	寒冷環境におけるリスク	
5.4.3.	JOS-2による温熱環境調整による機器の自動制御手法	
5.4.4.	検証システムの構成	
5.4.5.	検証用アプリケーションの構成	
5.4.6.	評価試験	
5.4.7.	センサ評価試験の結果・考察	
5.5.	家庭内消費電力制御システム	
5.5.1.	生活スケジュールの想定	

5.5.2.	家庭用電気製品の消費電力	
5.5.3.	家庭内消費電力の模擬	
5.5.4.	機器制御アルゴリズムの検討	
5.4.5.	検証システムの構成	
5.5.6.	検証用アプリケーションの構成	
5.5.7.	評価試験	
5.5.8.	評価試験の結果・考察	
5.6.	まとめ	
	参考文献	
6章	既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案	pp.147~178
6.1.	はじめに	
6.2.	実証住宅設計概要	
6.2.1.	平面構成	
6.2.2.	立面構成	
6.2.3.	断面構成	
6.3.	建築環境計画	
6.3.1.	各所における部位別構成材	
6.3.2.	ロτζア	
6.3.3.	屋根裏通気層	
6.3.4.	可動式水平膜	
6.4.	設備計画	
6.4.1.	計画概要	
6.4.2.	導入設備	
6.4.3.	創蓄連携システム	
6.4.4.	日射量予測を用いた機器制御手法	
6.4.5.	IoTを用いた制御システム	
6.5.	実測結果	
6.5.1.	実測概要	
6.5.2.	実測条件	
6.5.3.	実測項目	
6.5.4.	目標値	
6.5.5.	運用条件	
6.5.6.	実測結果	
6.6.	まとめ	
	参考文献	
7章	総括	pp.179~184
	研究業績	
	謝辞	

1章 序論

1.1 はじめに

「快適」という言葉には様々な様相がある。温熱6要素の物理式から導かれた人体の熱負荷と、被験者実験に基づく温冷感を統計処理し、人体の熱負荷を結ぶことで求められる熱的な快適性¹⁾の指標もあれば、寒い日に窓を開けて、空調機の風量を最大にしてお酒を飲む、これも快適と感ずる行為である。西沢立衛の設計による「森山邸」は、空間構成の開放感から、訪れるたびに快適とは何かと考えさせられる。開口部から降り注ぐ光の驟雨は、熱的には不利な条件だが、快適性に寄与していることは間違いない。

ヴァルター・ベンヤミン²⁾は知覚による芸術作品の受容の歴史の変遷を、日常生活における建築の受容の仕方を例に説明する。

建築物は二重のしかたで、使用することと鑑賞することによって、受容される。あるいは、触覚的ならびに視覚的に、といったほうがいいだろうか。(中略)触覚的な受容は、注目という方途よりも、むしろ慣れという方途を巡る。建築においては、慣れをつうじてこの受容が、視覚的な受容をさえも大幅に規定してくる。

多木浩二³⁾は「触覚的」とは「時間をかけ、思考にも媒介され、多次元化した経験にともなう知覚(中略)『触覚』とは時間を含み、多次元であり、何よりも経験であり、かつ再現のできないもの」と述べている。触覚的な受容とは時間的・経験的に生じた「慣れ」のことであり、私たちの建築経験は、時間をかけた「慣れ」による触覚的な受容から形成されており、この触覚的な受容は、視覚的な受容をも包摂していると述べている。

先の森山邸は、訪れるたびに視覚的な快感（快樂）を味わう。しかし、長い時間の滞在となると、中間期は常に快適だが、暑さや寒さの厳しい季節は長く滞在することが難しいと感ずることがある。しかし、階段を降りて地下室に入ると、開放感を望むことはできないが、空間全体の放射温度が安定しているため快適と感ずる。地下室に数十分ほど滞在した後、不快と感じた上階に戻ると環境を受容することができるようになる。住宅内に存在する熱的・空間的な「不均一性」と、上階と地下を行き来するときに感ずる熱的・時間的な「非正常性」により、不快とは感ずない空間に変容する。この受容の過程に内在する触覚的なプロセスには、従来の環境工学的な分野では捕まえない重要な概念が潜んでいるのではないか。



図 1-1 森山邸

1.2 本研究の目的

建築の熱的快適性の評価は、建築空間における温熱環境などの物理的な条件に対して、人体の熱平衡理論をあてはめることによって体系化されてきた歴史がある。特に、PMVは不特定多数の滞在者と、室内が比較的均質である時に、温熱環境6要素を用いて算定するため、長期滞在を目的とした空調されたオフィス空間の温熱快適性評価には非常に有効な手段といえる。しかし、建築空間は滞在空間と移動を伴う空間の総体である。そのため、温熱環境が時間的に一定ではなく、温熱環境の空間的な偏在による不均一性についても評価をする必要が求められている。また、更なる省エネルギーを実現するためには、不均一・非定常な温熱環境を意図的に作り出すことで、環境調整行動を誘発することも有効である。

これらの背景から、本論文では、温熱環境の不均一性と非定常性(図1-2, 1-3)を動的と捉え、その価値を評価し、これらの温熱環境を設計者もしくは居住者が操ることができる技術を提案して実践することを目的としている。そのために、住宅設計および計測機器の開発を通して、動的な温熱環境を評価する方法を提案する。加えて、住宅の温熱環境を動的に操るための手段として、潜熱蓄熱材を用いた床暖房、ならびに家電等の自動制御システムの開発を行う。さらに、これらの技術を統合し、改修型ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス(Net Zero Energy House以下ZEHとする)の計画を行い、実際に建設し検証を行う。

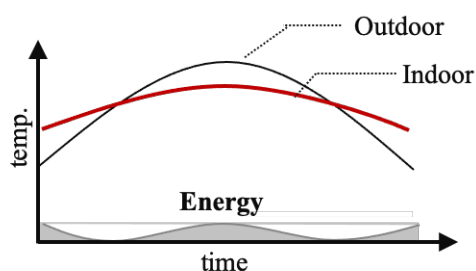


図 1-2 非定常モデル



図 1-3 不均一モデル

1.3 関連する従来研究と本研究の位置づけ

不均一・非定常な温熱環境を前提とした既往文献、および居住者・執務者の環境調整行動に関する既往文献の要約を概観し、本研究の位置づけを行う。

1.3.1 温熱環境に関する既往研究

1) Adaptive Model

de Dear and Brager⁴⁾ は世界各地の自然換気ビル (naturally ventilated buildings) と全館空調ビル (centrally controlled buildings) において快適温度を分析した。ここで自然換気ビルとは、執務者が自由に開閉可能な屋外に面した窓があるビルのことを指す。本研究では、実測の対象としたそれぞれの建物に室内作用温度に対する温冷感の直線回帰を行い、熱的中立温度を導出したのち、適温感による補正をかけることで快適温度を算出した。その結果、自然換気ビルと全館空調ビルの双方において外気 ET* と快適温度に線形の相関があることを示した。さらに、気流速度の変化や着衣量の調節などの行動的適応による補正をかけることで、全館空調ビルの快適温度は PMV の熱的中立温度の予測値と一致することを示した。一方で、自然換気ビルでは外気 ET* に対する快適温度の変化が大きく、幅広い温度域で快適であることを示した。de Dear and Brager は、この差を環境制御への期待といった心理的適応の違いに由来するものであると結論付けた。そして、平均外気温度に応じた快適作用温度の範囲を、80%と 90%の受容域と共に示す adaptive model を提案した。本論文において提示された adaptive model は、ASHRAE55 の 2004 年版より導入された、自然換気により温熱環境が調節されている空間の熱的快適域の基準に反映されている。本モデルは自然換気オフィスに対する提案であったが、間欠空調やハイブリッド空調が行われている空間にも適用する事例も報告されており、設備容量の縮小や設定温度の緩和の理由とされているが、更なる省エネルギーを実現するための不均一・非定常な温熱環境を伴った本格的な議論はまだなされていない。

2) 半屋外環境の熱的快適性に関する考察

中野ら⁵⁾は「半屋外環境」を室内環境と屋外環境の間に位置する環境グレードの区分として定義し、建築温熱環境計画における位置づけを明らかにした。半屋外環境では室内環境のような厳密な環境制御性は求められず、外乱による環境変動をあえて許容し、滞在者による温熱環境への適応も考慮して、建築・設備による一体的な熱的快適性の実現を目指すべきとしている。省エネルギーへの配慮が不可欠である社会背景を考慮した際に、多様な建築空間に一律の環境基準を適用することはエネルギーロスに繋がるため、半屋外環境では室内とは異なる制御目標値の設定が求められる。特に半屋外環境では制御点としての快適温度ではなく、制御範囲としての熱的快適域を計画の目標とするべきであると述べている。

本論文では、まず温熱環境適応研究をレビューし、行動的適応と共に心理的適応が熱的快適性評価に大きく影響することを示した。また、環境適応に影響する「環境の文脈」を社会、建物、個人の3要素に分類することを提案した。さらに、半屋外環境における環境適応を考慮した熱的快適性の概念図を示し、建築と設備が温熱環境6要素に還元されない建築的文脈要素として熱的快適性に寄与しうることを示した。最後に熱的快適域に関する既往研究を複数レビューし、既存の温熱環境基準には日本の環境の文脈が十分に考慮されていない点を指摘した。半屋外環境の熱的快適域の提案には、日本特有の社会的・建築的文脈を考慮しながら、実測調査に基づいた研究が必要である。今後、Adaptiveな熱的快適域と行動的適応に関する調査を並行して行うことが重要であり、調査時の環境の文脈を定義したうえで成果が提示されるべきであると結論付けられたが、「環境の文脈」を形成する具体的な建築要素の解明にはまだ至っていない。

3) Delight

Brager ら⁶⁾は本論文の序文において、建築分野では居住者に喜び (delight) をもたらす、熱的に動的かつ不均一な環境を、低エネルギーに創出する運用方法を見出すべきであると述べている。現行の快適性基準においては、20%未満の居住者に不満足を抱かせることを前提としているが、実際にはその目標値にすら到達していないことを指摘している。また、狭い温度域を目標とした多くの温熱環境の制御目標は、夏季の過冷却などにエネルギーロスを生じさせていることも同様に、現状の課題として挙げている。こうした背景の中、Brager らは建築内の温度をより広い幅や変動を持った緩い目標域に設定し、居住者ごとに個別に制御可能なシステムを提供することで、効率的な省エネルギーを達成することを提案している。従来の大多数が不満でない快適な環境を創出するという環境制御の考え方から、個人ごとの満足を達成する手法へのパラダイムシフトが必要であることが論じられている。

本論文では、従来の環境制御手法の経済面におけるデメリットや、十分に快適性を得られていない事実を既往文献のレビューなどを通じて述べたうえで、個人に環境への満足の機会を提供する Personal Comfort System (PCS) を紹介している。これらは、従来空調機で制御していた温湿度ではなく、風や伝導熱、放射熱の環境を個人毎に調整可能としたシステムである。PCS は部位別温冷感を改善することで、全身の快適性の向上を目指したものであるが、詳細な効果の検証には今後実験により更なる知見の蓄積が求められる。従来の中立を理想とした環境設計を上回る温熱環境の体験を提供するものとして提案されているが、具体的な数値は示されていない。

4) 住宅のリビングにおける熱的快適性

勝野ら⁷⁾は一般住宅の夏季の温熱環境の実測及び熱的主観申告調査を行い、自然換気時や冷房使用時の快適温度を求め、Adaptive Model との比較を行った。関東地方（東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県）の59軒（一戸建て40軒、集合住宅19軒）を調査対象として、2011年夏季に温熱環境の継続的に調査した。居住者には調査期間中に可能な限り1日に6回の申告を要求し、その時点での温冷感などを調査した。「暑くも寒くもない」に相当する温度を快適温度とし、実際の室温と寒暑感申告の一次回帰式を求めた。平均値は冷房不使用時で26.0°C、冷房使用時で26.9°Cと冷房の使用の有無により快適温度に差が生じることが分かったが、自発的な環境選択（自然換気もしくは冷房使用）に関する分類がなされたいない。

5) 生理的な変化による適応 (馴化)

暑熱環境の適応では、刺激により体温調節機能が変化し、体温上昇を抑え、高温負荷に耐えられるようになる^{8~9)}。高温環境下で体温の上昇を少なくするためには放熱能力を向上させる機転と熱産生量(代謝量)を減少させる機転がある。二つの機転を比べると前者の方が割合として大きい。放熱能力の向上では皮膚血流量が増加^{10~11)}し、安静状態においても汗が分泌されるようになる^{12~13)}。寒冷環境の適応では脂肪組織のような熱伝導率が小さい組織を増やすことで身体の断熱性を向上させ、非ふるえ熱産生(NST)を増加させることで体感能力を増加させる。また、温度馴化により体温調節反応発言閾値(セットポイント)が移動するため、暑熱と寒冷刺激を交互に加えた場合、中性温域は拡大する¹⁴⁾ことが分かっている。

6) CBE モデル (Center for Built Environment Advanced Human Thermal Comfort Model)

床暖房、タスク空調や車室環境など、人体の周辺環境が不均一の場合、PMVでは適切に評価をすることはできない。PMVは人体を球として表しているため、一般的に熱的に不均一な環境に適用することは難しいとされている。そこで、人体を詳細に部位分割したモデルを用いることで、熱的に不均一な環境における熱的快適性評価が可能となる。Zhangらにより提案^{15~18)}された非定常・不均一空間における温冷感・快不快感予測モデルは皮膚温および深部温を用いて温熱環境に対する心理反応を予測する。CBEモデルはロジスティック関数からなる定常環境での温冷感予測項、および皮膚温と深部体温の時間導関数で示される非定常環境での温冷感予測項で構成される。また、人体19部位における係数と部位別快不快感予測モデルが示されている。モデルの入力項目は実測値もしくはCBEモデルで予測された部位別温冷感および全身温冷感である。定常・均一な温熱環境に加え、非定常・不均一な温熱環境にも適用可能であるため、建築への意識的適応が求められる。

1.3.2. 環境調整行動に関する既往研究

1) オフィスビルに窓開閉行動

金ら¹⁹⁾は、高層オフィスビルにおいて自然換気の開閉行為に関する物理的、心理的要因を分析することで自然換気システムの効果について考察した。東京都港区の高層オフィスビル（ダブルスキンファサードの室内側に手動で開閉可能な自然換気窓を有する）を調査対象とした。窓の開放、閉鎖において申告項目ごとにどの程度開閉の自由度が高いかを「かなり自由」「自由」「少し自由」「自由ではない」の4段階の点数を設け、その合計値を各項目の重要度と捉え比較した。開放理由では、「換気」「温度調節」などの温熱環境的な要素が強く働いていることが示された。一方閉鎖要因では、外の騒音やにおい、雨など外からの侵入の要素が強く働いていたため、このような物理的要因に対応できる構造や容易に閉鎖できる工夫が必要であると考察された。

2) 熱帯気候下における窓開閉状況

久保田ら²⁰⁾は、日本の集合住宅地と比較して風通しがいいマレーシアの集合住宅地において居住者窓開放の状況を調べ、冷房使用の削減0につながっているかに関して、アンケートを用いて調査した。調査の結果、集合住宅における風通しはいい傾向にあることが示唆されたが、夜間の窓の開放が少ないことが判明した。一方で夜間の冷房使用率は高くなっている傾向が示された。窓を開けない理由としては、「雨の侵入」「埃、空気の汚れ」「虫の侵入」といった理由が上位を占めており、建築や窓付近の性能の低さや網戸の設置率の低さなどが懸念されると考えられる。夜間の自然換気による省エネルギー効果が認められている一方で、窓が開けられないという現状が判明した。

3) 窓開放行動への影響要因

浅輪ら²¹⁾は、窓を開放して自然を取り込むような開放的な住まい方に関わる行動特性を明らかにすることを目的に、一戸建ての4軒の住戸に着目し、梅雨時期から初秋にかけての4ヶ月間に実施した窓開閉と冷房使用の実態調査に基づき行動分析を行った。調査結果から得られた結果が窓開閉と冷房使用に及ぼす影響を調べるため、各要素を因子として一元配置の分散分析による有意差検定を行った。得られたF値を比較してその大小を検討し、各因子の影響度の相対的な評価を行った。窓開閉に着目すると、住戸による行動特性にばらつきが見られた。時期の違いが窓開閉に大きく影響を及ぼすことが示され、時間帯によって窓の開け方が大きく異なることが判明した。外気温については全体的に効果量が大きかった。冷房使用に関しては、いずれの住戸も時期、時間帯、外気温の効果量が大きいことがわかった。その中でも時間帯の方が、もしくは外気温の方が効果量の大きい住戸に分かれ、1日の中で周期的・習慣的な特性が強い住戸、外気温に対して応答的な行動をとる住戸の特性に分かれていると考えられる。

1.3.3. 本研究の位置づけ

PMV¹⁾などの熱的快適性の評価は、温冷感を算出するために計算式を「温冷感＝人体の熱負荷の関数」と「人体の熱負荷＝温熱6要素の関数」の二つに分け、温熱6要素の物理式から導かれた人体の熱負荷と、被験者実験に基づく温冷感を統計処理して人体の熱負荷を結ぶことで求めている。一方、de Dearらの研究は、行動的・心理的適応により、自然換気を用いたオフィスの熱的快適条件が空調されたオフィスとは異なることを報告している。厳密な環境制御が行われている実験室において行われた結果に基づくPMVでは、快適温熱環境範囲が比較的狭い範囲になっていると指摘している。本来は自然換気オフィルに対する提案であったが、アダプティブ・モデルは間欠空調やハイブリッド空調が行われている空間にも適用する事例も報告されており、設備容量の縮小や設定温度の緩和の理由とされているが、更なる省エネルギーを実現するための不均一・非定常な温熱環境を伴った議論はまだなされていない。

建築的な観点から中野らの既往研究を概観すると、建築が人間の感覚に与える影響を「環境の文脈」という観点からまとめているが、これを形成する具体的な建築要素の解明には至っていないことが分かる。Bragerらの研究は、従来の中立を理想とした環境設計を上回る温熱環境の体験を提供するものとして提案されているが、具体的な数値は示されていない。また、生理的な変化による適応に関する研究を実践的な視点から概観すると、不均一・非定常な温熱環境を意図的に作り出すことで、省エネルギー効果が期待できる建築が可能になると思われる。CBEモデルに関しても、定常・均一な温熱環境に加え、非定常・不均一な温熱環境にも適用可能であるため、建築への意識的適応が求められる。居住者の観点から勝野らの研究を概観すると、自発的な環境選択（自然換気もしくは冷房使用）に関する分類がなされたいないことが分かる。環境調整行動における窓開閉に関する既往研究は窓の開閉要因に関するものであり、建築の設計にフィードバックすることは難しいことが分かる。

本論文は、不均一・非定常な温熱環境を、設計者もしくは居住者が操る技術を確立することで、居住者が主体的に環境調整行動をする住宅の設計を可能にすることを目的としている。人間の行動と不均一・非定常な温熱環境との関係を考えることで、人間、環境、エネルギーを調和する新しいデザインによる可能性の実践的検証と位置づけることができるのではないかと。

1.4 本論文の構成

本論文は書きに示す全 7 章から構成されている。本研究の構成フローを図 1-4 に示す。

第 1 章では、研究背景と本研究の目的を述べるとともに、国内、海外における既往研究の概観から本研究の位置づけを行った。

第 2 章では、居住者による主体的な環境調整行動を誘発することを目的として、不均一・非定常な温熱環境を意図的に作った住宅の設計事例について述べた。

第 3 章では、不均一・非定常な温熱環境を計測するウェアラブルデバイス「YUHO (遊歩)」を、オープンソースハードウェアとスマートフォンを用いて開発し、YUHO を用いて実測調査を行った。

第 4 章では、不均一・非定常な温熱環境を建築の設計段階で操る技術として、PCM を用いた住宅用空気式床暖房システムについて述べた。PCM の相変化現象を含む床の非定常伝熱解析を行う物理モデルを開発し、数値計算に基づいて最適な PCM 仕様を決定するための線図を開発した。

第 5 章では、住宅内標準通信プロトコルである ECHONET Lite を用いて、人間の主体的な行動を保しつつ、快適性を維持しながら家電の消費電力のピークを操るシステムの開発と実証を行った。

第 6 章では、築 40 年の 2 階建て鉄骨造の工業化住宅を想定した改修型 ZEH の実証住宅を提案した。計画の内容を報告するとともに、実証実験によりその効果を有用性が実証された。

第 7 章では、各章の研究成果を総括した。

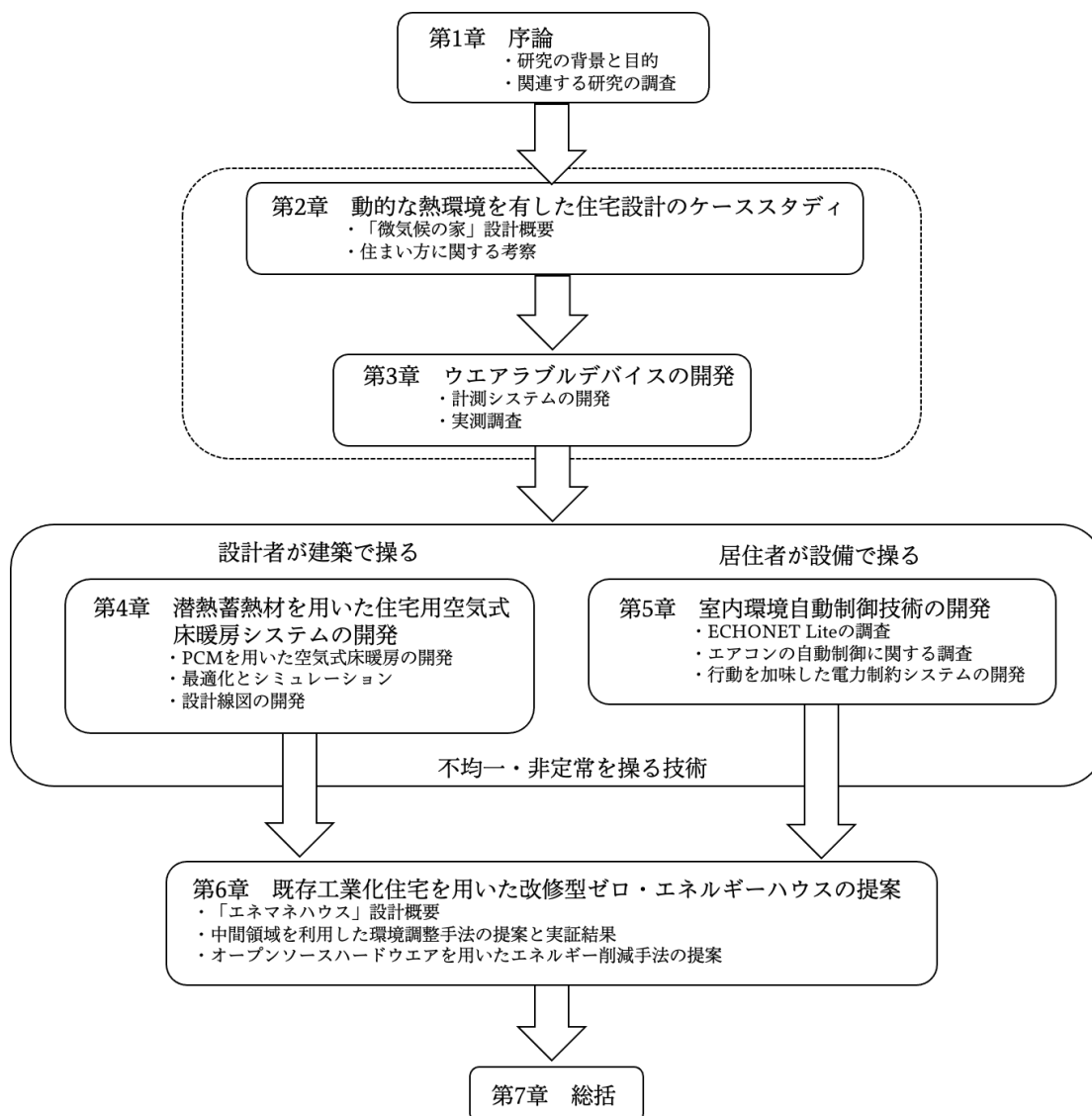


図 1-4 本研究の構成フロー図

参考文献

- 1) P.O.Fanger : Thermal Comfort, Danish Technical Press,1970
- 2) ヴァルター ベンヤミン :「複製技術時代の芸術」, 晶文社クラシックス, 1999
- 3) 多木浩二 :「ベンヤミン「複製技術時代の芸術作品」精読」, 岩波現代文庫, 2000
- 4) de Dear, Richard and Brager, G. S. : Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, ASHRAE Transactions, 104(1a), pp.145-167, 1998
- 5) 中野淳太, 田辺新一 : 温熱環境適応研究の日本における温熱環境計画への応用とその課題, 日本建築学会環境系論文集, 第 79 巻, 第 701 号 p.597-606, 2014 年 7 月
- 6) Gail Brager, Hui Zhang and Edward Arens : Evolving opportunities for providing thermal comfort, Building Research & Information, Vol.43, pp.274-287, 2015
- 7) 勝野二郎, リジナル H.B., 宿谷昌則: 夏季のリビングに置ける居住者の快適温度と熱的適応に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 80 巻, 第 707 号 p. 13-20, 2015 年 1 月
- 8) 中山昭雄 :「温熱生理学」, 理工学社, 1987
- 9) S. Robinson, D. B. Dill, J. W. Wilson, M. Nielsen, Adaptions of white men and negroes to prolonged work in humid heat, Am. J. Trop. Med., 21, pp.261-287, 1941
- 10) C. H. Williams : Effect of acclimatization on the rate / rectal temperature relationship, J. Appl. Physiol., 22, pp.27-30, 1967
- 11) D. I. Abramson : Circulation in the extremities, Academic Press, New York, 1967
- 12) A. B. Hertzman : Vasomotor regulation of cutaneous circulation, Physiol. Rev., 39, pp.280-306, 1959
- 13) E. F. Adolph : The initiation of sweating in response to heat, Am. J. Physiol., 145, pp.710-715, 1946
- 14) J. Bligh : Temperature regulation in mammals and other vertebrates, pp.285-287, 1973
- 15) Zhang Hui, Edward Arens, Charlie Huizenga, Taeyoung Han: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts, Buildings and Environment 45 (2010), pp.380-388, 2010.
- 16) Zhang Hui, Edward Arens, Charlie Huizenga, Taeyoung Han: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part II: Local comfort of individual body parts, Buildings and Environment 45 (2010), pp.389-398, 2010.
- 17) Zhang Hui, Edward Arens, Charlie Huizenga, Taeyoung Han: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part III: Whole-body sensation and comfort, Buildings and Environment 45 (2010), pp.399-410, 2010.
- 18) Zhang Hui, Edward Arens, Yin Zhao, Qianchuan Zhao: Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: part IV: Adaptive neutral setpoints and smoothed whole-body sensation model, Buildings and Environment 72 (2014), pp.300-308, 2014.
- 19) 金政秀, 川口知真, 田辺新一: 執務者による自然換気窓の開閉行為に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 643 号, p1075-1082, 2009 年 9 月
- 20) 久保田徹: ジョホールバル市の集合住宅団地における冷房使用状況と窓の開閉状況に関する実態調査, 日本建築学会環境系論文集, 第 72 巻, 第 616 号, p83-89, 2007 年 6 月

- 21) 浅輪貴史, 梅干野晁, 武澤秀幸, 清水敬示:戸建住宅における窓開閉・冷房使用の行動特性と影響要因解析屋外空間の微気候と居住者の開放的な住まい方との関わりに関する研究その2, 日本建築学会環境系論文集, 第593号, p87-94, 2005年7月

2章 動的な熱環境を有した住宅設計の事例研究

2.1 はじめに

居住者による主体的な環境調整行動を誘発することを目的として、不均一・非定常な温熱環境を意図的に作った住宅の設計事例について述べる。本研究で扱う住宅によって、不均一・非定常な温熱環境においても、快適性を担保することによって、居住者の環境調整行動を誘発するデザインについて考察したい。

2.2 住宅設計概要

都心部の大通りから一本入った、古い住宅街に建つ住宅である。夏は新宿御苑で冷やされた心地よい風が吹くが、冬はマンションやオフィスビルの影となり、日射は期待できない。地震に強いこと、駐車場を確保すること、ローコストであることが求められ、その他の要望は一切なかった。これを、どんな空間であっても棲まうことは可能だというクライアントの強い意思と受け止め、設計の条件とした。また、間口の狭い敷地において、駐車場と耐震性を両立するため、L字型の断面を持つ単純なボリュームを鉄骨造で構築すること、および夏季にいくつかの窓を開けると室内に気持ちの良い風が吹くこと、冬季は日射が期待できないため適切なエネルギーを投入することで人体に負荷のかからない程度の室温になることを、設計における制約条件とした。

敷地に存在する微気候と、居住者を取り巻く環境を媒介する建築を考えるにあたって、はじめに人体および建築の外皮の条件から検討を行った。一般に、冬季の住宅における熱的な条件は着衣量に応じて3つのパターンに分かれる。はじめにクライアントの体格および着衣量からPMV¹⁾が0になる条件を求め、これをリビングの要求温度とした。寝具をまとった寝室、着衣量がゼロとなる脱衣所・浴室は、各居室の利用時間に応じて、人体の深部体温の変動を許容範囲におさめる温度とした。居室内に1500Wの熱量を投入することで、これらの目標値を実現するための外皮性能を、熱負荷計算で求めた。このとき、すべての居室は空気で繋がっている必要があり、要求温度の高い脱衣所・浴室は上階に、要求温度の低い寝室は下階に配置することで、温熱環境の偏在を伴った条件が空間の機能配置を規定することになった。

次に、夏季における広域風環境解析から、敷地に流れる風の条件をいくつか求め、それらを境界条件として設定し、L字型の居室内に0.3m/sの微気流が流れるように、ファサードの開口位置およびスラブの位置を、流体の感度解析を用いて求めた。開口部は、外皮性能から求めた制約条件をあてはめた。床に段差を設けながらも鉄骨量を減らしコストを抑えるため、張弦梁を用いたブレース付きラーメン構造を採用した。

物理的な存在である建築と、そこに棲まう人間が、これらを媒介する技術によって対話を行うことが重要である。機械設備によるお膳立てのない建築において、困難を伴いながらも対話の末に得られるであろう快適な環境を担保することで、クライアントの主体性に基づく快適性を導く必要がある。



図 2-1 配置図

2.3 デザインの特徴

図 2-2 は内観である。構造を現しとしたブレース付きラーメン構造で柱、梁に用いられている H 鋼はすべて 100mm となっている。スキップフロアによりすべての居室の空気を繋ぎ、1 階から 3 階にかけての温度ムラに合わせてそれぞれのフロアの機能を決定している。スラブはキャストプレートにモルタル金ごて仕上げとなっている。

図 2-3 は西面ファサードである。縦に 2 本ある配管は浴室とトイレの排水である。配管の経はキャンチレバーを支える構造体と同じである。横に開く窓はウインドキャッチャーとなっている。

図 2-4 に平面図を示す。1 階に駐車場と寝室、2 階にリビング、キッチン、トイレを配置した。キッチンはスキップフロアとなっており、リビングから 540mm の高さである。3 階は居室および脱衣所、風呂を配置した。脱衣所と風呂、および居室は階段室から 540mm あがったところに配置した。床は 30mm と構造材の H 鋼 100 となっているため、410mm の抜けた空間がある。図 2-5 に断面図を示す。



図 2-2 内観



図 2-3 外観

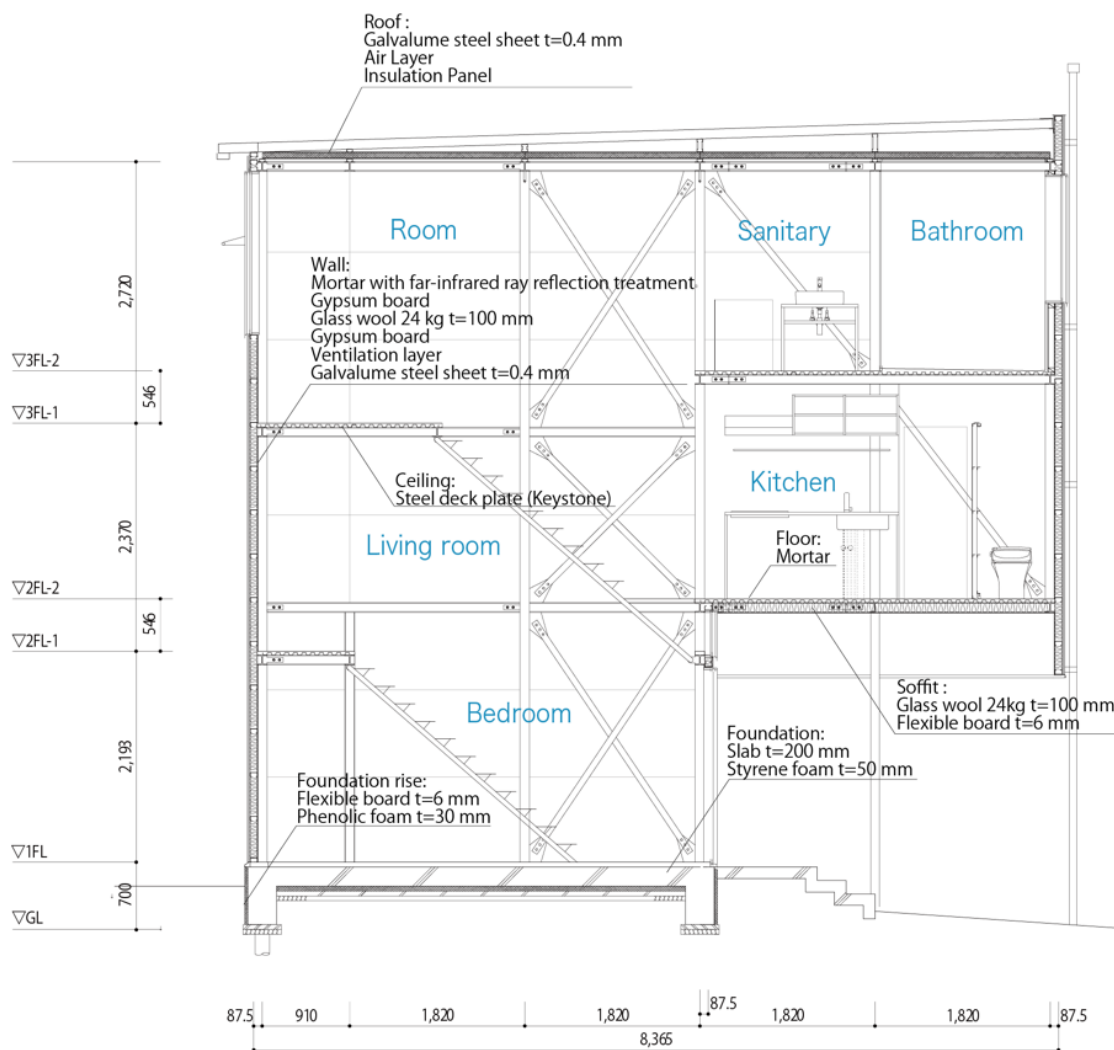


図 2-5 断面図

2.4 構造計画

全て重量鉄骨 H100 で構成することで大幅なコストダウンを実現させた。アクソメを図 4 に示す。建方の後、構造躯体の錆がある程度定着した後にウレタンを塗布することで、さび止めの代用とした。柱を 1 本抜いた状態の鉛直荷重の応力状態に対して、全ての部材が短期許容応力度以下に納まることを確認することで、耐火被覆を省略した。

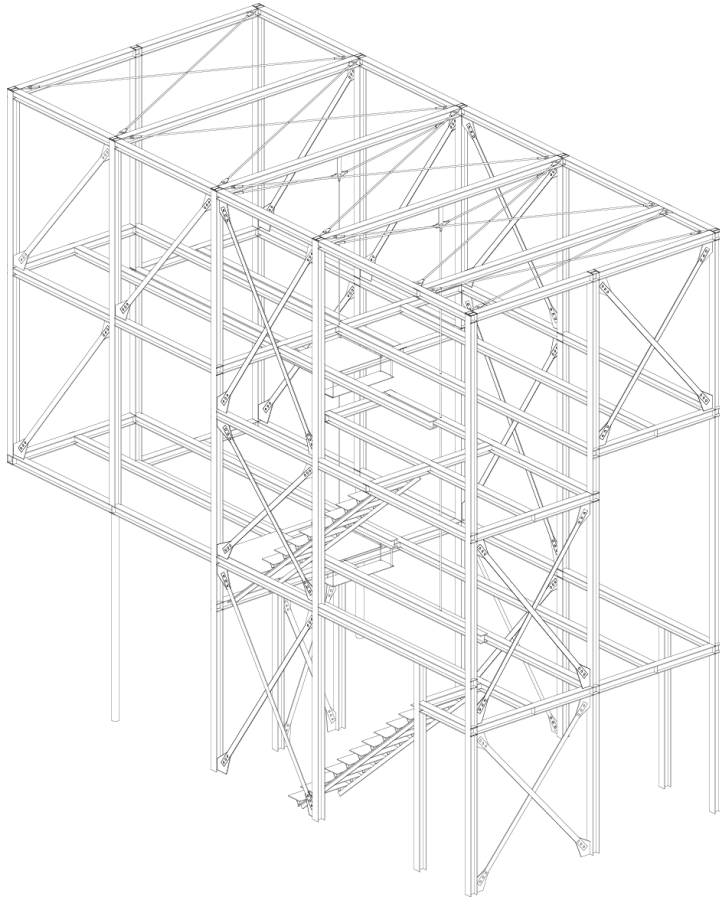


図 2-6 構造アクソメ図

2.5 環境計画

ZEHをはじめとする環境建築は設備機器がコンセプトになることが多い。しかし、これらの設備機器は時代とともに陳腐化するため、建築の歴史の文脈で議論することは難しいと感じている。「微気候の家」では、時代の制約を受けない物理量のみを扱うことで、建築の陳腐化を避けることを考えた。

はじめに、人体熱モデルを用いて冬季における各居室に相応しい環境室温を求め、つぎにその室温を満たすように熱負荷計算を用いて冬期の外皮性能を求める。次に風環境解析を用いて夏季の通風を担保した。

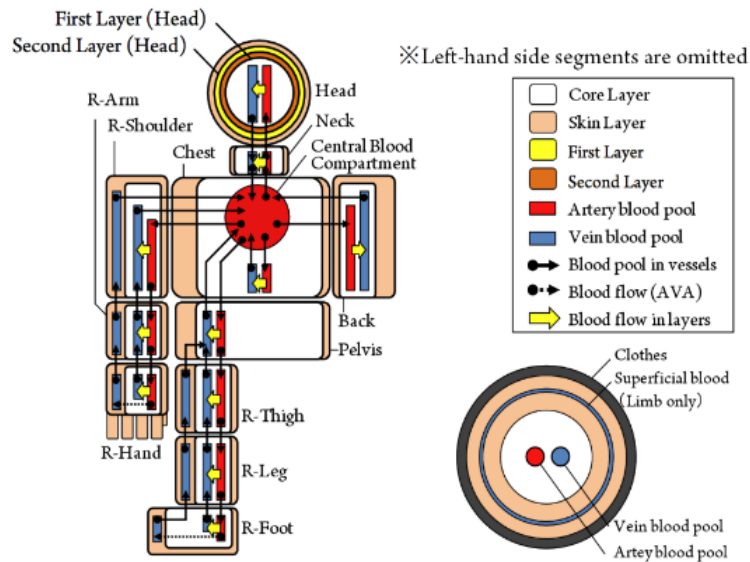
2.5.1 人体熱モデルによる検討

人体熱モデル JOS-2²⁾を用いて各居室に相応しい環境室温を求める。JOS-2は、JOS(2002)を基に、特に頭部皮膚温の非定常過程における予測精度の向上を図ったモデルである。本モデルは、人体部位別着衣量、代謝量、各部位の温熱環境4要素により設定される曝露環境条件を入力することにより、皮膚温・コア温・ぬれ面積率などの生理反応を数値計算により予測する。

非定常・不均一温熱環境における人間の心理反応は、皮膚温やコア温、顕熱損失量の時間変化率が大きな影響を与える可能性が高いと考えられている。すなわち、ある非定常・不均一な温熱環境での心理反応を評価するには、一度生理反応予測を介する必要があると言える。そのため生理反応の動的変化の予測が必要不可欠であると言える。JOSでは、詳細な血管モデルと体温調節機構の再現を行い、定常温熱環境下での予測は十分な精度が得られていた。一方、モデルの煩雑さを避けるため、各部位は2層のみの分割になっており、前身である65MN(2001)時の4層から単純化がなされた。そのため、非定常過程における応答性に欠ける問題点が見られ、その影響は、衣服に覆われることのない頭部において顕著であった。

JOS-2 は上記の JOS モデルの問題点を改善したモデルである。具体的には、JOS の頭部を 2 層から 4 層に変更した他、物性値の見直しを行っている。JOS-2 の妥当性の検証として、定常条件については Werner による実験結果、非定常・不均一条件については小林らによる実験結果との比較が行われている。定常条件下では、いずれの部位についても JOS-2 のほうが JOS よりも高い精度となっており、各種体温調節機構が適切に作用することにより、皮膚温に与える影響を的確に計算することが可能である。非定常・不均一条件下では、応答の速さ・大きさ共に実測値を再現できており、各種物性値が妥当なものであることが確認されている。収束値についても十分な精度が得られ、各種体温調節機構が適切に動作していることが示されている。平均皮膚温予測値も実測値と良い一致を見せており、不均一環境においても適切な予測がなされていることが示されている。図 2-7 に JOS-2 血流モデル概念図を示す。

裸体時、および布団を掛けた状態における深部体温の変化を求めた。脱衣所は 2 分間、寝室は 6 時間における深部体温の変遷を、人体に負荷のかからない範囲にある条件を各居室の室温と定義した。上図は、就寝時の各室温における深部体温の変化を表すグラフである。環境室温が 20°C、15°C において深部体温は安定しているが、それ以下の温度の場合、ふるえ産熱が生じ、睡眠の質が低下することが分かった。下図は、服を脱いだ状態の各室温における深部体温の変化を表すグラフである。人体は、裸になると非ふるえ産熱によって深部体温を上げようとするが、環境温度が低いと産熱が間に合わず体に負荷がかかる。



Kobayashi Y, Tanabe S. Development of human thermoregulation model JOS-2 with a detailed vascular system. Build Environ. 2013;66:1-10.

図 2-7 人体熱モデル概念図

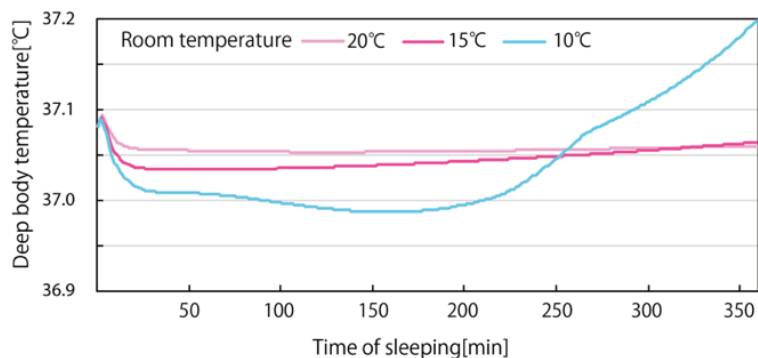


図 2-8 睡眠時間と深部体温の経時変化

就寝時、環境室温が 20°C、15°Cにおいて深部体温は安定しているが、それ以下の温度の場合、ふるえ産熱が生じ、睡眠の質が低下する。

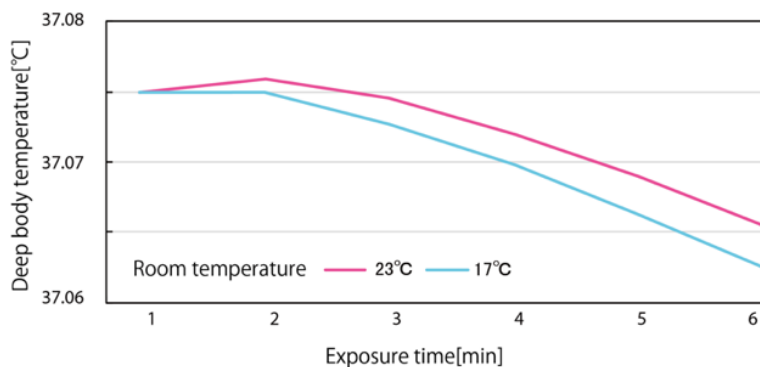


図 2-9 暴露時間（裸の状態）と深部体温の経時変化

人体は、裸になると非ふるえ産熱によって深部体温を上げようとするが、環境温度が低いと産熱が間に合わず人体に負荷がかかる。

2.5.2 熱負荷計算

冬季における建築の外皮性能の検討に用いた。敷地周辺はマンション、オフィスビルが乱立し、ダイレクトゲインはほとんど期待できなかつたため、最小限の熱源で生活する方法を考えた。上下温度差を利用して、人体熱モデルから導いた各居室の温度（室温の低くなる場所に寝室を、高くなる場所に浴室・脱衣所を設けた）に沿ってプランを決定した。居室の2階に1500Wの熱源を置いた時、人体熱モデルにより算出された温度（寝室15度、脱衣所23度）になるような外皮性能を求めた。全ての空間の温度を均一にするとエネルギー消費量は大きくなる。温度ムラを許容し、それに応じて住み手の行動を促すことで消費エネルギーを削減することは可能である。

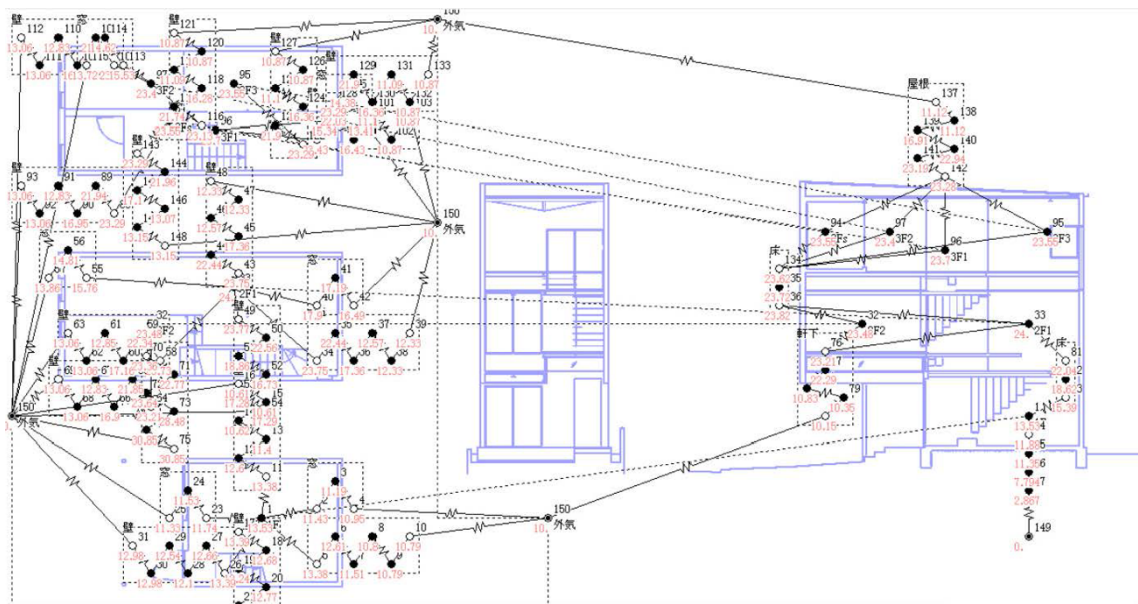


図 2-10 熱負荷モデル

2.5.3 風の感度解析

四谷という土地柄、谷に沿って風が流れることがわかっていたので、CFD から求めた風の強さに応じて、建物内に風を取り込む開口部およびスラブのあり方を考えた。室内の風速を 0.3m/s 程度に近づけるための開口部とスラブ位置を、感度解析を用いて求めた。感度解析は、目的を達成するために適切なパラメーターを直接算出するノンパラメトリック解析で、随伴変数法^{3) 4) 5)}を用いて算出される。室内のボリュームに対して、平均風速が 0.3m/s になるように外部の風速に応じて開口部の開口感度を求め、感度の高いところに窓を配置した。最適化された窓の開閉パターンは、クライアントにはあえて伝えていない。自らが生活の中で最適なパターンを発見することが重要なコンセプトになっている。

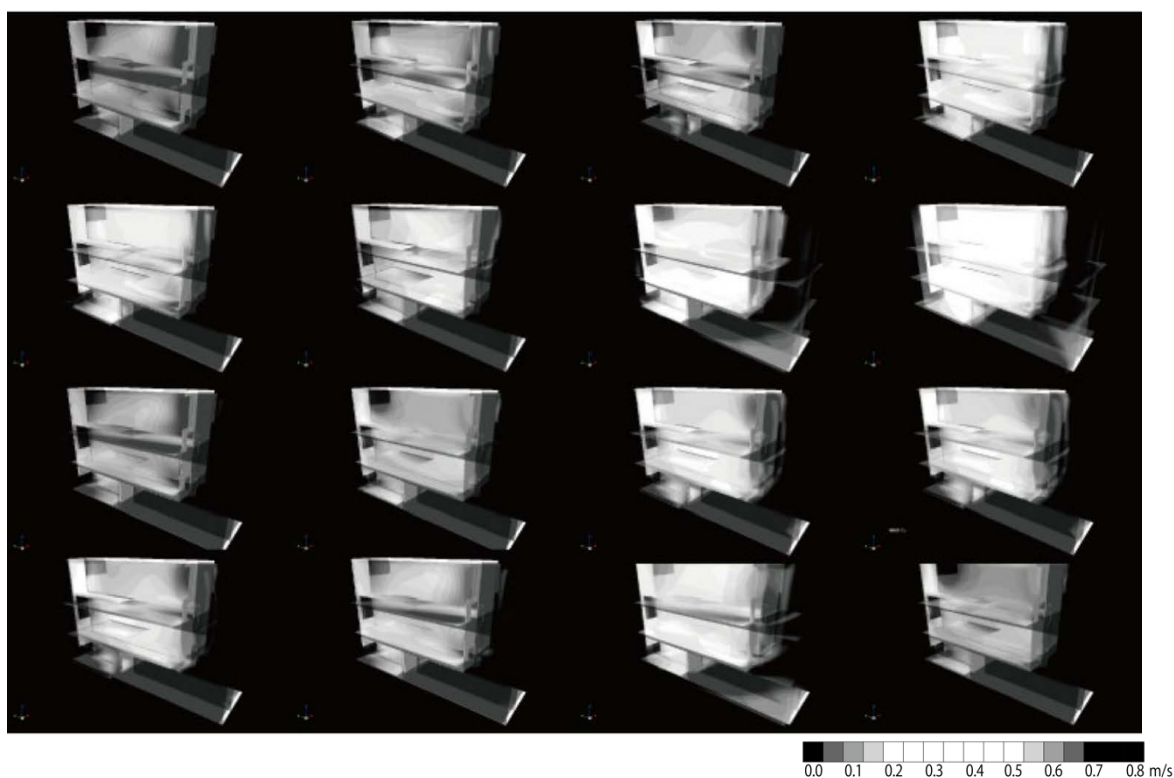


図 2-11 CFD 解析モデル結果

前面道路に沿って流れる南からの風を想定し、風速 0.2m/s~3.2m/s (0.2m/s 刻) で解析を行った。居室内のボリュームに平均風速が 0.3m/s に近い風速になるように、7 箇所 3 段階とした開口部の開閉パターンを随伴変数法で最適化し、得られた結果に対して順解析を行った。図 2-11 は解析結果である。最適化された窓の開閉パターンは、クライアントには伝えない関係から、ここでは開閉パターンの表記は省略する。

2.6 まとめ

高層のマンションに囲まれ、環境的にはあまり恵まれていない敷地においても、夏季の風をうまく利用すること、冬季は建築の計画の工夫によって、快適性を担保しつつ、不均一・非定常な温熱環境を実現した。特に、住まい手の窓を開けるといった行為と、上下階を移動するという行為によって、より少ないエネルギーで生活することが可能になった。人間の行為を建築の性能に組み込むことは出来ないが、人間の必要な行為を導くようなデザインを心がけることは重要である。特に、窓を開けるといった人間の行為を媒介することで、住み手の主体的な「行為」の反復と「気づき」が蓄積し、人間自身が建築にかかるエネルギーを最小化するための漸進的な最適化プロセスへ参与することも可能になるのではないか。

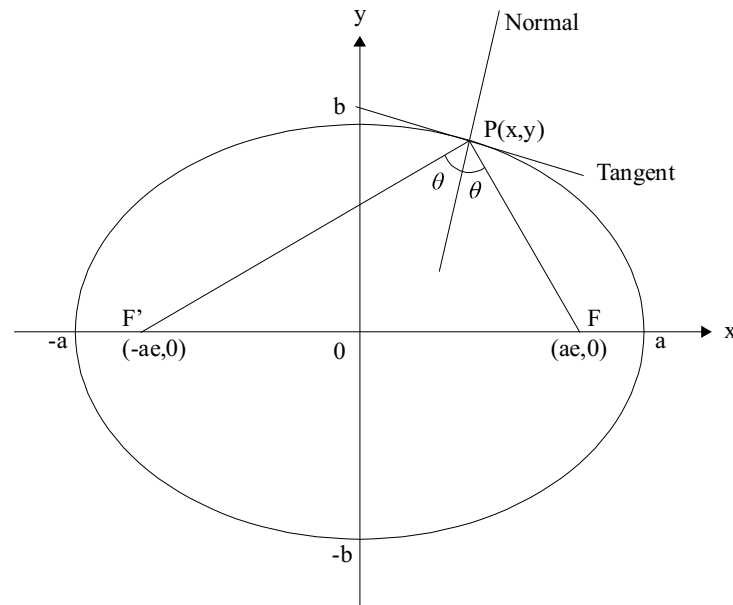


図 2-12 楕円モデル

本研究は建築設計のケーススタディであるが、ここで設計者と居住者および技術の関係について考察したい。技術哲学者のピーター・ポール・フェルベーク⁶⁾は、技術が人間の活動を媒介することで、人間の認識能力や行為、価値観に影響を及ぼすと述べており、技術に近接するためには「設計の文脈」と「使用の文脈」を分けて考える必要があると述べている。ここで、設計者と居住者をふたつの焦点とする楕円について考えてみたい。図2-12に楕円モデルを示す。楕円には二つの焦点がある。点Pという集合を仮定したとき、点Pと二つの焦点のそれぞれの距離の和が一定であることが楕円の定義である。点Pにおける接線に垂直な法線によって分断された二つの焦点と点Pの内角は等しい角度になる。点Pを操る技術（場合によっては操られる技術となる）として、ふたつの焦点をそれぞれ設計者と居住者と定義するならば、技術は設計者と居住者のふたつの焦点を等価に見ていると解釈できる。さらに点Pと各焦点までの距離を考えると、割合こそ変わるが、どちらか一方がゼロになることはない。技術を表す点Pと設計者を表す焦点Fとの距離が最大になったとしても、技術の点Pと居住者を表す焦点F'との距離が0になることはない。

本研究では、楕円軌道を描く技術と、ふたつの焦点の関係性、つまり設計者がお膳立てするわけでもなく、また居住者に過度の期待をするわけでもないというバランスのもとで設計しており、この状態を担保するために、あえて不均一・非定常な温熱環境を目指した。居住者の環境調整行動を誘発するためには、居住者の行為を阻害する要因を設計者が操る技術で取り除いたうえで、居住者が操ることが出来るレベルの行為＝技術を担保する必要があると考えられる。設計者がエネルギー削減のために動的な温熱環境を構築し、かつエネルギー削減のために環境調整行動が可能な開口部を設計したことを居住者に理解してもらい、居住者が開けるべき開口部を探すという行動のトリガーを加えることが重要である。居住者の主体的な「行為」の反復と「気づき」が蓄積することで、居住者が建築にかかるエネルギーを最小化するための漸進的な最適化プロセスへ参与することが可能になるのではないだろうか。

参考文献

- 1) Fanger P.O. :Thermal comfort: analysis and applications in environmentalengineering. Perspect Public Health. 1970;92:164-164.
- 2) Kobayashi Y, Tanabe S. :Development of human thermoregulation model JOS-2 with a detailed vascular system. Build Environ. 2013;66:1-10.
- 3) 眞下茜, 河野良坪, 中川純, 桃瀬一成, 池島薫, 乾久美子:風速低減を目的とした樹木の最適配置に関する設計手法の提案, 日本建築学会環境系論文集 , 第 80 巻, 第 715 号, 803-813, 2015 年 9 月
- 4) 眞下茜, 河野良坪, 中川純, 桃瀬一成, 池島薫, 乾久美子:冬季の風速低減および夏季の排熱促進を目的とした駅舎内間仕切り壁の最適配置に関する設計手法の提案, 日本建築学会環境系論文集 , 第 81 巻, 第 721 号, 307-317, 2016 年 3 月
- 5) AKL FlowDesigner.Air flow simulation tool for architects. 2018. <http://www.akl.co.jp/en/>, Accessed October 10, 2018
- 6) Verbeek P. Moralizing Technology: Understanding and Designing the Morality of Things. Chicago, IL/London: University of Chicago; 2011.

3章 ウェアラブルデバイスの開発

3.1 はじめに

建築環境工学と建築デザイン・建築計画学の融合を志向するためには、建築空間に必然的に生じる温熱環境の分布と、人間の行動との関係性を踏まえた人間、環境、エネルギーが調和する新しいデザインについて考える必要がある。例えば、屋外からオフィス執務空間に至るプロセスにおいて省エネを実現するために、移動空間をあえて不均一な温熱環境として、滞在者が執務室に至る温熱履歴を踏まえた上で快適と思える空間を計画・設計する必要がある。このとき、不均一な温熱環境における比較的短いサイクルにおける温熱履歴と心理的・生理的反応を定量的に把握した上で評価し、非定常な熱的快適性の範囲に納まる程度のリズムをもった温熱環境について、感度解析を用いて設計することができれば、快適性と省エネルギー性をともに実現する手法として、人間の行動を機軸に据えたヒューマンファクターによる新しい手法を確立することができると考えられる。また、エントランスやアトリウム等の移動空間は、必ずしも温熱環境を均一に保つ必要はなく、分布を考えることでエネルギー消費量を削減することが可能である。さらに、エネルギーを削減して移動空間を非空調空間としたとき、屋外環境もしくは半屋外空間と同等の環境になる。中野ら¹⁾は駅舎のように移動を伴う非空調空間においては厳密な環境制御を行うことができないため、制御点としての熱的中立温度を求めるのではなく、制御範囲としての熱的快適域を求めることが重要であると述べている。また、非空調空間に短時間滞在した時における熱的快適域・受容域を算定することで、非空調空間においても我慢を強くない温熱環境計画の可能性を提示している。

滞在を前提とした空間と移動を伴う空間の温熱環境は、各空間との連続性と関連性において評価する必要があると考えられる。中村²⁾は「人体を、行動を伴った時間的連続体と捉えたうえで、人体が建築空間の中にあるときの環境の温度」と居住環境温度を定義している。長谷部ら³⁾は屋外環境から屋内環境へ移動する際の温熱感を計測するための移動計測カートを開発し、過渡的環境の評価を試みた。また、鶴飼ら⁴⁾は屋外環境から執務空間に移動した滞在者は空調にインパクトを求めため、屋外から執務空間に至る移動空間で温熱履歴をリセットするべきであると述べており、空間の連続性と関連性の観点から具体的な提案を行っている。建築計画学の視点では「快適」を「快い状態に適する」行動を伴った概念と捉えており、快・不快の判定には微細な環境の差異から導かれた動的な熱的快適性が重要な概念となると考えられる。

また、近年は、建築の設計においては BIM を用いることが主流になりつつある。設計時に作成したモデルを各種シミュレーションソフトに転用する方法も研究されており、簡単なシミュレーションであれば意匠設計者自らが基本設計の段階で解析を行うことも可能になった。ある数値目

標を入力するとソフトウェア自身が最適解を導くアルゴリズムを実装したソフトウェア⁵⁾も実用化されている。意匠設計者が空間と環境の関係性を空間のシークエンスとして捉えるならば、不均一環境を空間に適用することで温熱履歴を空間デザインの要素として取り込むことが可能になるだろう。このとき問題になるのがシミュレーションソフトに入力する数値目標の設定で、意匠設計者が思い描く空間、たとえば洞窟から森林に移動し、森林から川辺に移動した時のような行動を伴った身体感覚と、数値化された温熱環境を橋渡しする具体的な数値情報が不足しており、環境の目標値に入力すべき数値が設計者の意図をうまく反映しないという問題がある。この問題を解決するためには、環境のセンシングを、身体感覚を鍛えるツールとして日常のレベルにまで拡張して行う必要がある。

情報通信分野ではウェアラブルなセンシングを指向する動きがあり、現在ではこの課題を克服する技術が揃いつつある。具体的には、環境情報をセンシングするための手段としてオープンソースのマイコンがある。例えば、Arduino は Processing 言語を実装しており、基板には Atmel AVR マイクロコントローラと簡単な入出力端子を具備している。ハードウェア情報は無償で公開されており、多くの互換機が存在している。Arduino はスタンドアロンもしくは PC と接続することを念頭に設計されていたが、スマートフォンと連携するデバイスの登場により、インターフェイスをスマートフォンに代用することも可能になった。スマートフォンは GPS 位置情報、ジャイロセンサ、電子コンパス、加速度センサ、輝度センサ等を実装している。また、API (Application Programming Interface) が公開されているのでマイクやカメラといったデバイスも風圧 (圧力) や照度センサに転用することによって、それ自体をウェアラブルなセンシングデバイスとして扱うことも可能になった。これらのデバイスを用いることで情報量が飛躍的に増え、時間精度の高いセンシングが可能になることで、非正常な現象を計測することも可能になった。

本研究では、不均一・非正常な温熱環境を計測するウェアラブルデバイス「YUHO (遊歩)」を、オープンソースハードウェアとスマートフォンを用いて開発することで、従来では難しかった移動を伴った人体の近傍における不均一・非正常な温熱環境の測定と評価を行う。

3.2 研究目的

本研究は、人間の行動や心理・生理を加味しながら、我々はどのようなときに快適・不快と感じるかをライブ状態で計測し、そこから不均一・非定常な熱的快適性に関する知見を得ることを目的としている。まず(1)人間の行動と心理量・生理量を加味しながら環境を計測するウェアラブルデバイスを開発し、次に(2)このデバイスを用いて計測し、(3)得られたデータと評価から不均一・非定常な熱的快適性の評価を行う。

3.3 研究方法

3.3.1 開発の方針と仕様

人間の行動や心理を加味しながら、どのようなときに快適と感じるかを簡易な方法で計測する。そのためには計測という行為が負担になるのではなく、被験者（ユーザー）にとって気持ちよく楽しい体験になるようにデザインする必要がある。また無意識と意識の境界をモニタリングすることも重要だと考えられているので、ひとまず計測するという行為自体を極力減らすことを考えた。そこでセンサ自体を体の一部、たとえばリュックサックや洋服の襟などに固定できる程度の大きさで制作し、適宜スマートフォンで値を読み取り、アプリケーションを操作している時だけ計測をしている感覚になるようデザインする必要がある。バックグラウンドではソフトウェアを操作していないときも計測を続けているが、この意識的に値を読み取る行為とバックグラウンドでの計測の差異が意識と無意識を区別するトリガーとなる。

気づきや発見がもたらされる仕組みを組み込むことで計測自体が楽しくなり、より継続的に計測できるのではないかと考えた。センサの値を読み取るだけではなく、被験者がある環境を体験したとき、その感覚を計測データと一緒にアンカーするインターフェイスも一緒に考えた。これらの気づきや発見における一連の操作をヴァルター・ベンヤミンのパサージュ論における「遊歩者（フラヌール）」に準え、本デバイスを「YUHO」と名付ける。

求められる仕様としては、空気温度・相対湿度・照度・風速センサを備え、アナログセンサについてはキャリブレーションの手間を低減する必要がある。また設置型のセンサとの差別化を図るため、被験者の近傍においてカジュアルに計測できるように電池で長時間駆動する必要がある。またスマートフォンによって位置情報や行動、時刻や心理量の申告を1秒間隔で記録し、これらの情報を可視化・分析するためサーバにデータを蓄積する必要がある。

放射温度に関しては、簡易グローブ球では熱容量があるため、日射の有無を正確に表してはいない。そのため、都市の熱的快適性を計測するためには、長波と短波を分けて計測する上下長短波放射計が有用である。しかし、大変高価であること、かつ移動計測に難があることから「YUHO IR」を開発する。6面で計測し、かつYUHOと同じ時定数で計測する必要がある。

3.3.2 システム概要

システムの概要を示す。「YUHO」とスマートフォンを Bluetooth で接続することにより「YUHO」からスマートフォンに送られてきた空気温度、相対湿度、照度、風速の情報を記録しつつ、スマートフォンに内蔵されている GPS 位置情報、時刻および活動量を毎秒記録する。またアプリケーションで入力した情報（快・不快の強度）についても合わせて記録する。人体の近傍で計測を行うため、据え置き型のセンサとは異なり、歩いた時に生じる風速も計測・評価の対象とする。

「YUHO」のシステム概略図を図 3-1、プロトタイプ基板を図 3-2、回路図を図 3-3 に示す。基板にはマイコン、温湿度計、照度計、風速センサ、Bluetooth BLE を組み込んだ。マイコンは「ATSAMD21」を採用した。照度計は「TSL2591」、温湿度計は「SHT25」、風速計は「wind sensor」を採用した。Bluetooth は「Koshian」に搭載されているモジュールを組み込んだ。

PMV を求めるため 6 面放射温度計である「YUHO IR」(図 3-4) を開発した。今回採用したセンサは感度波長帯が $6\sim 16\mu\text{m}$ の非接触温度センサであることから、日陰では上下長短波放射計と非常に似た特性を表しているが、日射環境においては短波を計測していないため、日射センサなども追加をする必要がある。しかし、通信の際に I2C のアドレスが重複することから、現時点においてはシステムを大幅に変更する必要があるため統合は難しい状況である。プロトタイプ基板を図 3-4 に示す。放射線センサには「TMP007」を用いた。マイコンの速度、および通信速度に余力がないため「YUHO」との連動は叶わなかったが、別途マイコンとリアルタイムクロックを用いて SD カードに 6 面の放射温度および時刻を記録することで測定データを整合させた。

各種センサは ASHRAE 及び ISO 等に準拠するべきであるが、本研究では時定数を優先してデバイスの開発を行うことで既往研究とは異なる解像度のデータが得られるようにした。

/

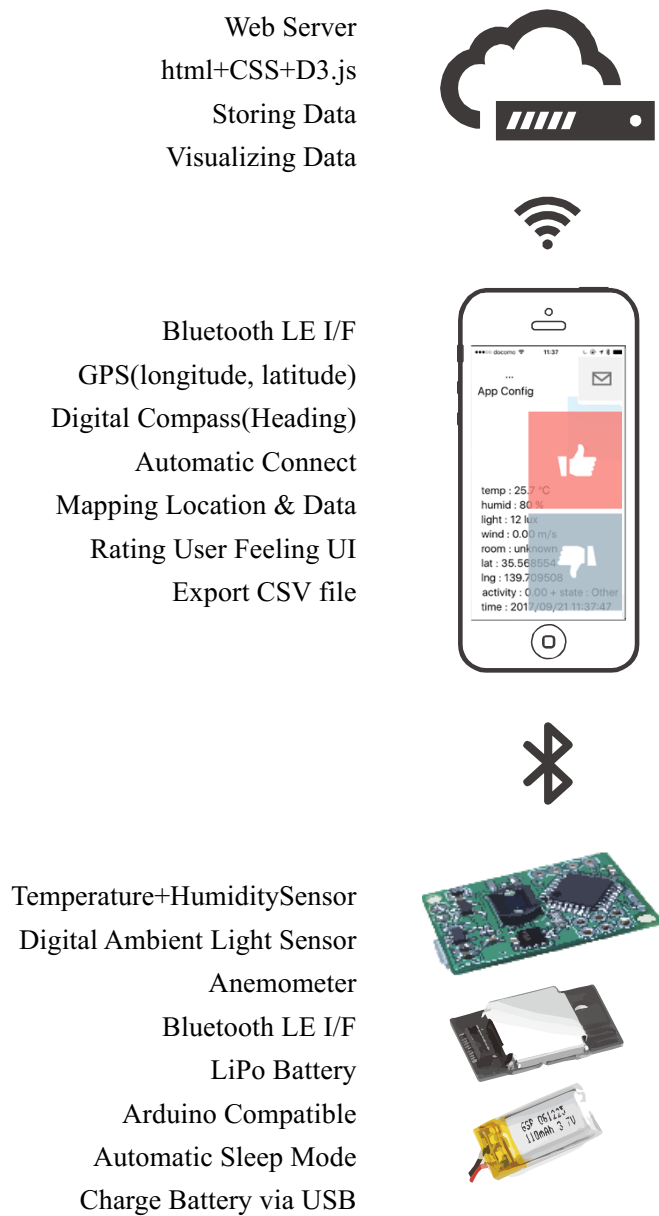


図 3-1 YUHO システム概略図

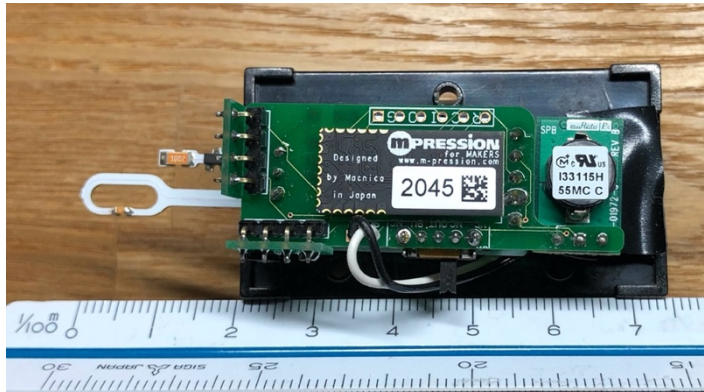


図 3-2 YUHO

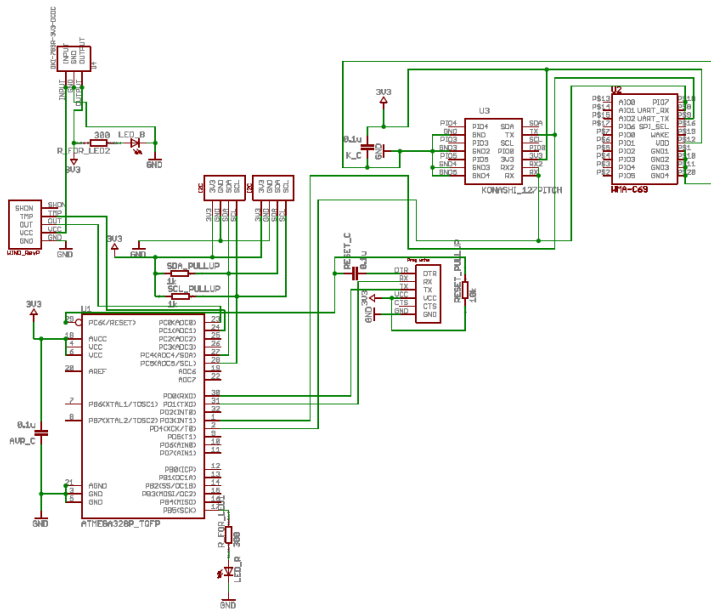


図 3-3 YUHO 回路図

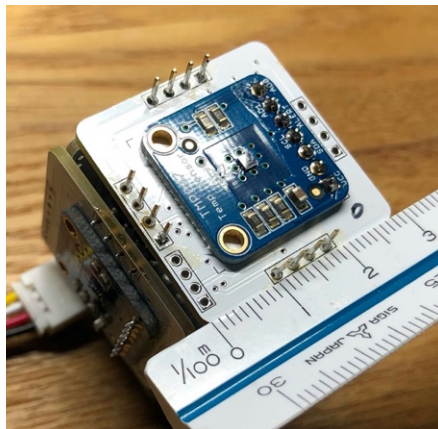


図 3-4 YUHO IR

図 3-5 は計測モードのインターフェイスで、照度、空気温度、相対湿度、風速、GPS、活動量、室内位置情報、快・不快の申告を行う。快・不快の申告は 1 秒間に最大 6 回程度認識できる仕様になっている。「YUHO」とスマートフォンで取得したデータは CSV 形式で書き出すことが可能で、Wi-fi または携帯回線経由でサーバへ送り googlemaps に D3.js (Javascript) を用いて可視化するインターフェイスを開発した。可視化は風速等の環境情報や快・不快の申告の強さを半透明の円で表現し地図上にプロットした。(図 3-6)

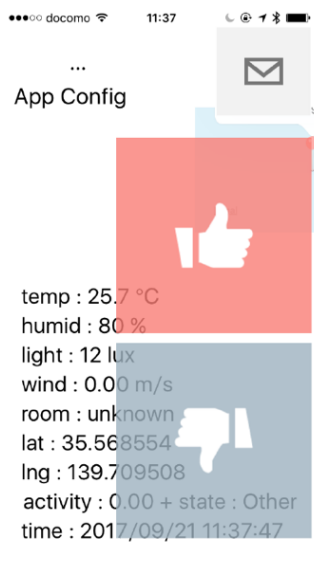


図 3-5 インターフェイス

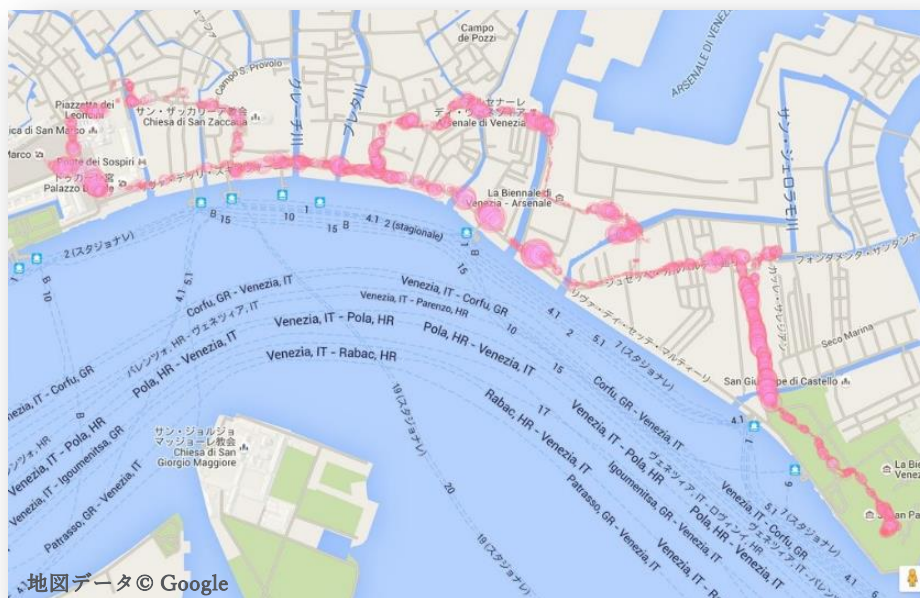


図 3-6 GoogleMapsAPI を用いて計測データを D3.js で可視化可能

3.3.3 計測システムの検証

温湿度センサはデジタルセンサであるためキャリブレーションを行う必要はないが、チップの発熱を拾わないように2秒に1回チップに通電して計測し、データの書き込みは毎秒行う仕様とした。また、照度センサについてもデジタルセンサであるためキャリブレーションを行う必要はない。しかし筐体によっては形態係数が変わるため、ケーシングについては注意が必要である。

風速センサは発熱体とサーミスタによって構成されており、温度と風速の関係を機械学習によって算出した計算式を用いて数値化し、それをアナログデータでマイコンが取得する仕様になっている。9.00Vの電圧をかけた状態では0.01m/sから25m/s程度の風速に対応する。ただし給電時の電圧と発熱体およびサーミスタにわずかな個体差があり、これが風速の値に影響を及ぼすため、線形性は担保されているが、風洞試験機でのキャリブレーションは必須になる。発熱体の個体差に関する関数を参照することによって、1次式の補正式でキャリブレーションが可能になったため、2点の風速値を計測することでキャリブレーションが可能になった。

放射温度については、簡易グローブ球、および長短波放射計と比較を行った。「YUHO IR」、簡易グローブ球、および長短波放射計を移動計測カートに設置して日陰、日なた等を移動することでデータを比較した。(図3-7)

式1~4に上下二方向の長短波放射計から放射温度を算出する式を記す。放射温度は測定した上下面の短波、長波長量から渡邊ら⁶⁾の手法で算出した。

$$MRT_{2dir} = \left[\frac{Direct + Diffuse + Longwave}{\epsilon_p \cdot \sigma \cdot f_{df}} \right]^{0.25} - 273.2 \quad \text{式(1)}$$

$$Direct = a_s \cdot f_p \cdot I^* \quad \text{式(2)}$$

$$Diffuse = a_s \cdot f_{eff} \cdot \frac{(I_{dir} + S \uparrow)}{2} \quad \text{式(3)}$$

$$Longwave = \frac{\epsilon_p \cdot f_{eff} \cdot (L \uparrow + L \downarrow)}{2} \quad \text{式(4)}$$

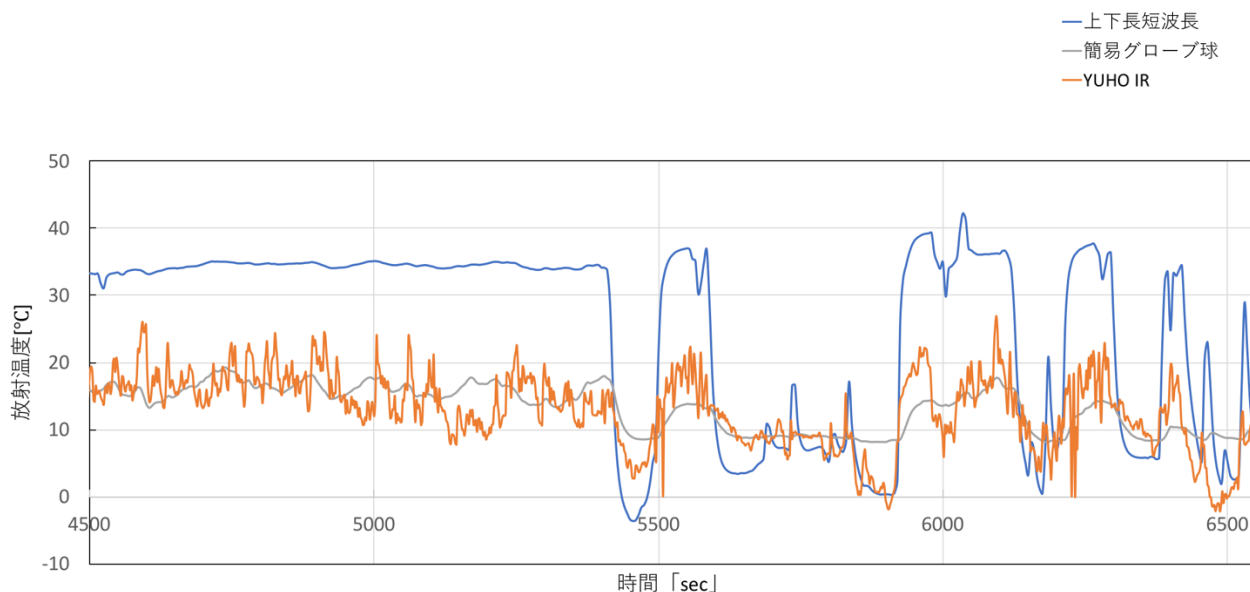


図 3-7 YUHO IR, 簡易グローブ球, 長短波放射計の比較

MRT_{2dir} : 上下 2 方向の長短波放射量から算出した平均放射温度[°C]

aS : 短波長に対する吸収率(=0.7)[-]

aL : 長波長に対する吸収率(= $\epsilon p=0.97$)[-]

$Direct$: 直達日射による人体受熱量[W/m²]

$Diffuse$: 拡散日射による人体受熱量[W/m²]

$Longwave$: 長波長放射による人体受熱量[W/m²]

$S\downarrow$: 下向き短波長放射量[W/m²]

$S\uparrow$: 上向き短波長放射量[W/m²]

$L\downarrow$: 下向き長波長放射量[W/m²]

$L\uparrow$: 上向き長波長放射量[W/m²]

I^* : $S\downarrow$ から分離した法線面直達日射量[W/m²]

IdH : $S\downarrow$ から分離した水平面拡散日射量[W/m²]

fp : 人体投射面積率[-]

$feff$: 人体有効放射面積率(=0.91)[-]

3.4 実測調査

本章では、YUHO を用いた温熱環境評価および実測の概要と結果について述べる。

3.4.1 実測概要

YUHO を用いて実測を行った。2020 年に開催される予定であった東京五輪マラソンを想定し、東京駅周辺（ルート A：皇居周辺，ルート B：日本橋周辺）において 2016 年 8 月 14 日から 9 月 9 日の 10:00 から 13:00 に実施した。被験者は健康な学生男女計 25 名（男性 20 名，女性 5 名）とし、着衣量は約 0.5 clo となる服装を指定した（男性：ポロシャツまたは T シャツ，長ズボン，靴下，靴，女性：長袖ワンピース，靴下，靴）⁷⁾。図 3-8 に東京五輪マラソンコース，図 3-9 に測定コース，表 3-1 に実測被験者人数表，図 3-10 に実測風景を示す。また，図 3-11 に被験者と YUHO の位置関係を示す。

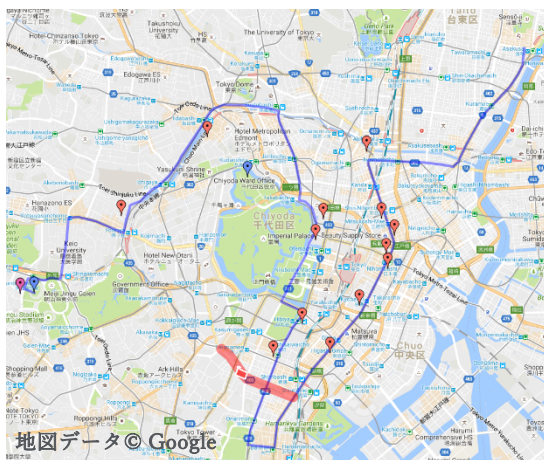


図 3-8 東京五輪マラソンコース

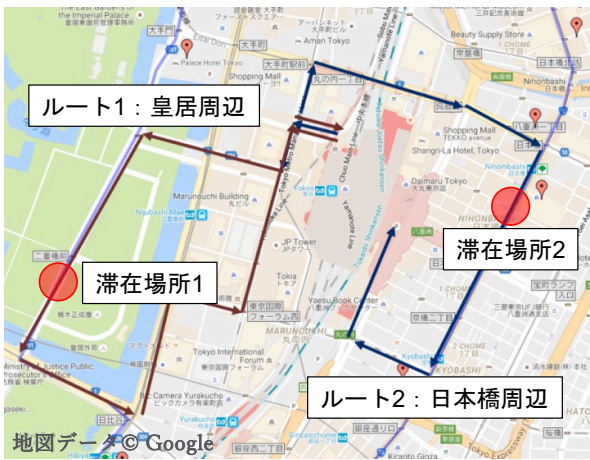


図 3-9 測定コース



図 3-10 実測風景



図 3-11 被験者と YUHO の位置関係

表 3-1 実測被験者人数表

日付	男性 [名]	女性 [名]	合計 [名]
8月14日	2	0	2
8月15日	3	0	3
8月16日	3	1	4
8月21日	2	2	3
8月23日	4	0	4
8月25日	2	2	4
9月9日	4	0	4
	20	5	25

3.4.2 実測方法

図 3-12 に実測手順，表 3-2 に実測条件，表 3-3 に測定項目および測定機器を記す．図 3-13 に YUHO 申告イメージ，図 3-14 に Web プログラム申告イメージを示す．被験者に対して YUHO の数が不足しているため，Web 申告プログラムによって心理量の申告を代用した．温熱環境測定として，YUHO は人体近傍の空気温度，相対湿度，気流速度，照度を測定することが可能である．FLIR⁸⁾ を用いてサーモ画像の撮影を行った．また，9 月 9 日のみ簡易グローブ球を用いてグローブ温度の測定を行った．生理量は，代謝量を iPhone 内蔵の加速度センサーを用いて測定した．心理量は快不快感をスマートフォン上（iPhone または iPad）の Web プログラムを用いて測定し，すべての測定間隔を 1 秒とした．マラソン観戦者を想定し，被験者は西早稲田駅から東京駅へ電車移動し，東京駅から測定コースを歩行移動した．実験開始から終了までの約 170 分間，被験者は web プログラムで申告を行い，FLIR での測定は屋外空間のみとした．なお，前室（早稲田大学 55 号館 S 棟 906 号室）の環境条件は快適とされる PMV が±0 となる温熱環境とした．YUHO での測定は①～⑩のすべての間で行い，FLIR でのサーモムービーの撮影は⑤～⑦の屋外環境時のみ行った．

被験者には快適と思った時に赤いボタンをタッチしてもらい，不快と感じた時にグレーのボタンをタッチしてもらった．快不快の度合いに応じて連打してもらおうこととし，申告の個人差を少なくするために，実測前に快不快申告の練習を行った．

- ① 前室（早稲田大学 55 号館 S 棟 906）へ入室，実験準備（10 分）
- ② 前室から西早稲田駅へ移動（徒歩 5 分）
- ③ 西早稲田駅から東京駅へ移動（電車 30 分）
- ④ 東京駅到着
- ⑤ 温熱履歴を揃えるため，屋外歩行を 10 分間行う
- ⑥ 屋外滞在 15 分間行う
- ⑦ 屋外歩行を 30 分間行う
- ⑧ 東京駅から西早稲田駅へ移動（電車 30 分）
- ⑨ 西早稲田駅から前室へ移動（徒歩 5 分）
- ⑩ 前室滞在（早稲田大学 55 号館 S 棟 906）を 40 分間行う



図 3-12 実測手順

表 3-2 実測条件

測定項目	前室	半屋外環境 (駅)	屋外環境
曝露時間[min]	30	なしゆき	10,15,30
空気温度[°C]	25	なしゆき	なしゆき
放射温度[°C]	25	なしゆき	なしゆき
気流速度[m/s]	0.1	なしゆき	なしゆき
相対湿度[%]	50	なしゆき	なしゆき
着衣量[clo]	0.5		
代謝量[met]	1.0	2.0	1.0, 2.0

表 3-3 測定項目および測定機器

	測定項目	測定機器	測定間隔
環境	空気温度	YUHO(HTU21DF)	1s
	相対湿度	YUHO(HTU21DF)	1s
	気流速度	YUHO(wind sensor)	1s
	照度	YUHO(TSL2591)	1s
	グローブ温度※	T&D おんどとり (RTR-502) 簡易グローブ球	1s
	周辺表面温度	FLIR	10s
生理量	代謝量	iPhone	1s
心理量	全身快申告(good)	YUHO/webプログラム	1s
	全身不快申告(bad)	YUHO/webプログラム	1s

※備考：グローブ温度の測定は9月9日のみ

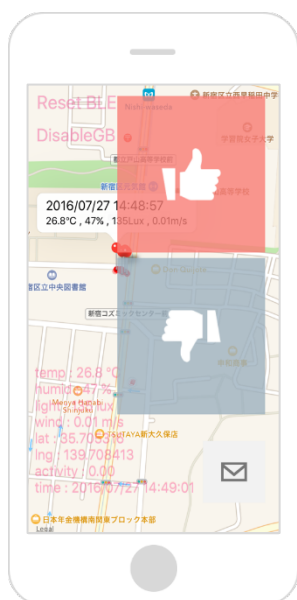


図 3-13 YUHO 申告

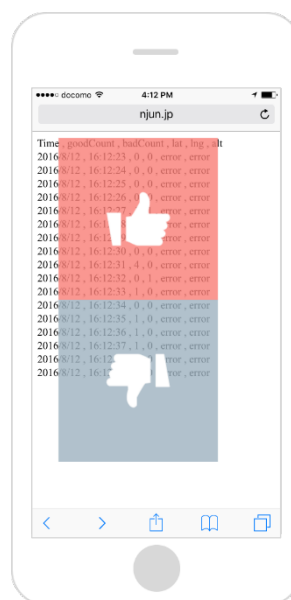


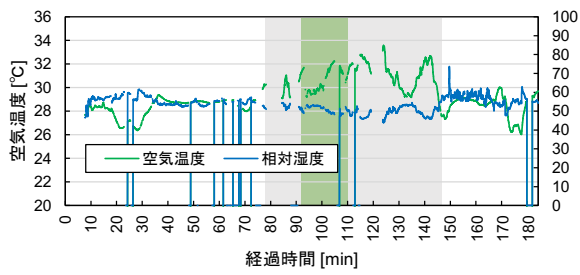
図 3-14 Web プログラム申告

3.5 環境測定結果

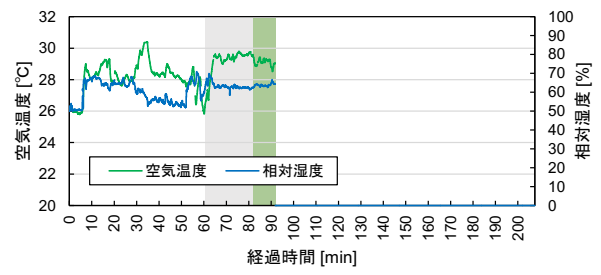
以下に YUHO で取得した環境測定結果を示す。データ損失の危険性をできるだけ避けるため、実測中に何度か、その時点までのデータの送信を行った。また、Bluetooth 接続が途切れてしまった時間に関しては、グラフの線が途切れている。なお、8月23日は雷雨により実測中止とした。

3.5.1 空気温度・相対湿度

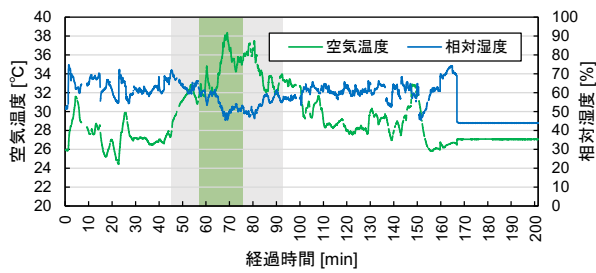
図 3-15 に空気温度・相対湿度測定結果を示す。実測時の空気温度・相対湿度は地上 1.1 m の点において測定した。8月15日は曇りであり、屋外の空気温度は歩行中と滞在中のいずれも約 30°C、相対湿度は約 70%であった。8月15日を除く全ての実測日は晴天であり、屋外の空気温度は概ね 30°C を超え、相対湿度は 50%から 60%を推移する結果となった。また、ルート 1 の場合、屋外滞在地点は日射環境下であり、ルート 2 の場合、屋外滞在地点は日陰環境下であった。そのため、ルート 2 における屋外滞在中の空気温度は、屋外歩行中の空気温度と比較し、低い結果となった。



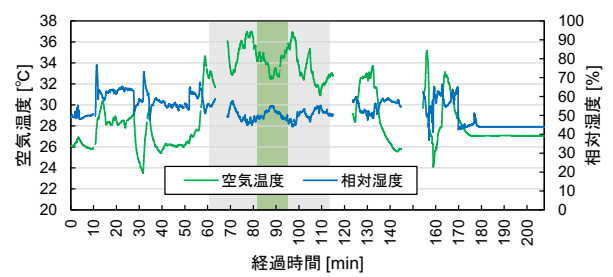
(a) 8月14日 (ルート1_晴天)



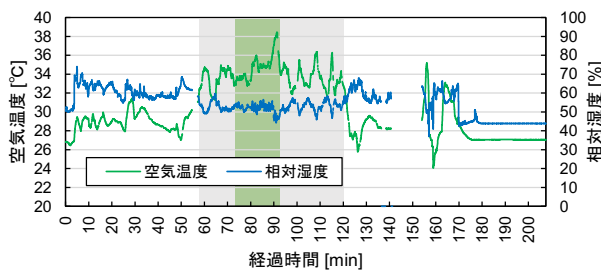
(b) 8月15日 (ルート2_曇り)



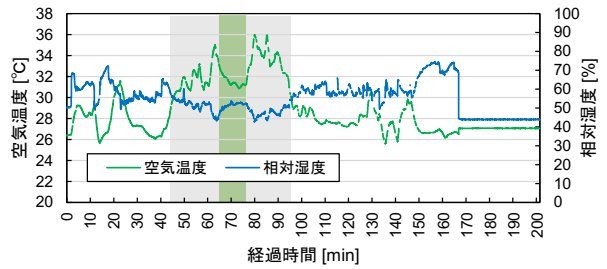
(c) 8月16日 (ルート1_晴天)



(d) 8月21日 (ルート2_晴天)



(e) 8月25日 (ルート1_晴天)



(f) 9月9日 (ルート2_晴天)

図 3-15 空気温度・相対湿度測定結果

3.5.2 気流速度

表 3-4 に気流速度の目安，図 3-16 に気流速度測定結果を示す．実測時の気流速度は地上 1.1 m の点において測定した．駅舎における電車の通過時に瞬間的に気流速度が上昇した場合を除き，屋外の気流速度は，移動中の屋内の気流速度と比較し，大きいことが確認された．屋外における気流速度の平均値は約 2.0 m/s であり，最大値は約 12 m/s であった．

表 3-4 気流速度の目安

風力階級	名称	基準説明	気流速度[m/s]
0	平穏	静穏。煙はまっすぐ昇る	0.0~0.2
1	至軽風	風向きは煙でなびくのが分かる程度	0.3~1.5
2	軽風	顔に風を感じる	1.6~3.3
3	軟風	木の葉や細かい小枝が絶えず動く	3.4~5.4
4	和風	砂埃が立つ	5.5~7.9
5	疾風	池や沼の水面に波頭がたつ	8.0~10.7
6	雄風	傘はさしにくい	10.8~13.8
7	強風	樹木全体がゆれる	13.9~17.1

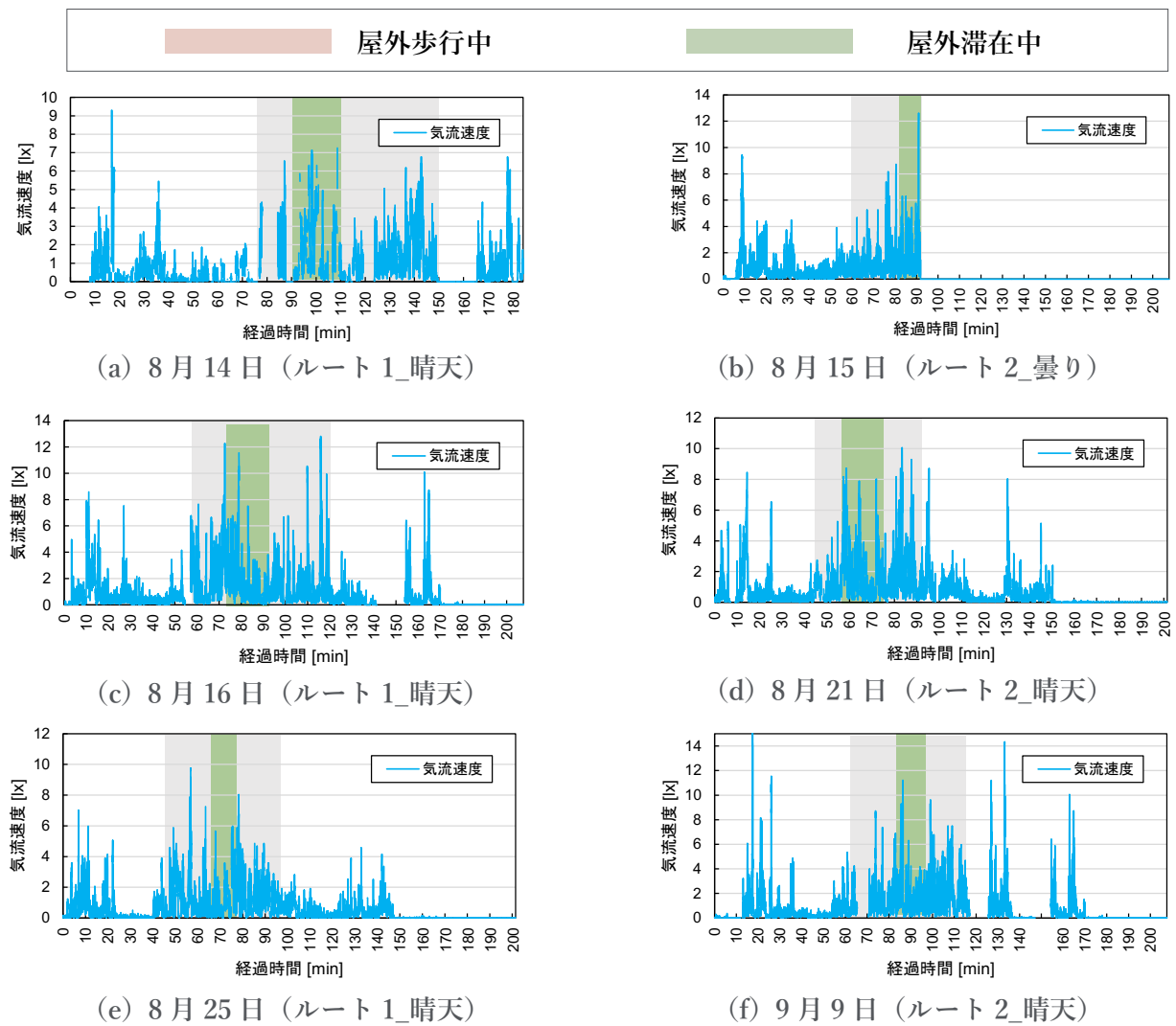


図 3-16 気流速度測定結果

3.5.3 照度

表 3-5 に照度の目安，図 3-17 に照度測定結果を示す．実測時の照度は地上 1.1 m の点において測定した．8 月 15 日は曇りであり，屋外の空気温度は歩行中と滞在中のいずれも約 30°C，相対湿度は約 70%であった．8 月 15 日を除く全ての実測日は晴天であり，屋外の日射環境下での照度は概ね 100,000 lx を超え，日陰滞在時は約 10,000 lx であった．曇りの 8 月 15 日に関しては 10,000 lx を下回る結果となった．

表 3-5 照度の目安

日射環境	照度[lx]	備考
日向	100000	直射日光が当たる場所
薄雲	50000	薄雲による散乱光で空全体が明るい状態
明るい日	30000	雲による散乱光で空全体が明るい状態
普通の日	15000	厚い雲による散乱光の状態
暗い日	5000	雨、雷など
日陰	10000	

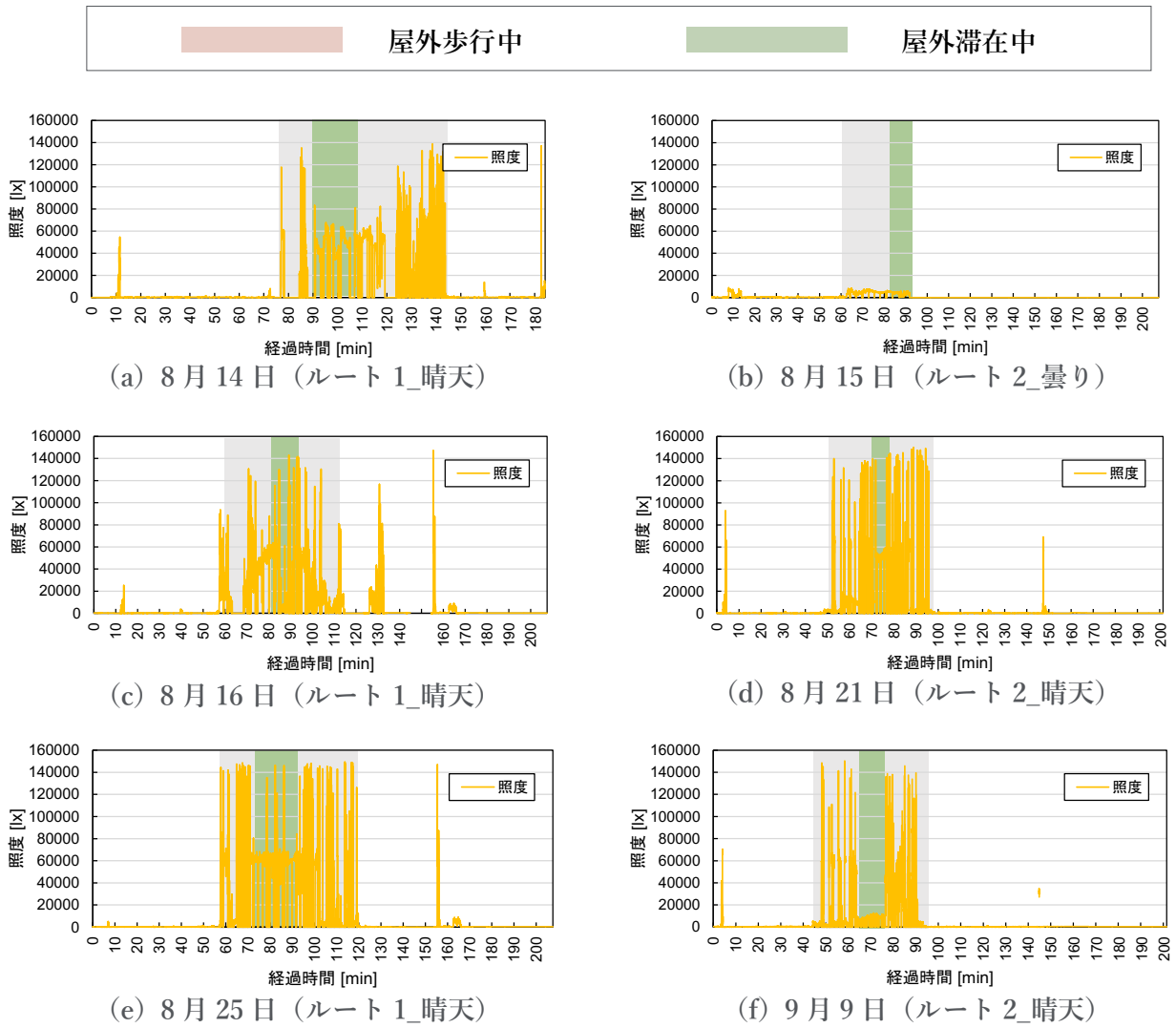


図 3-17 照度測定結果

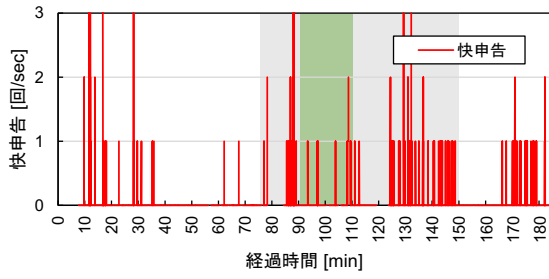
3.5.4 快不快申告

図 3-18 に快不快申告測定結果を示す。8月15日は曇りであり、屋外環境における不快申告は多く見られなかった。8月15日を除く全ての実測日は晴天であり、屋外環境において不快申告が多い傾向が顕著であった。また、屋内を移動した際、駅舎における電車の通過による突風等によって快不快申告が見られた。

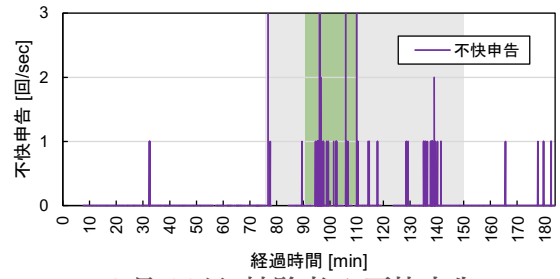
図 3-18 (c) に代表されるように、屋内環境から屋外環境へ移動した瞬間に不快申告が見られる場合や屋外滞在直後に不快申告が見られる場合が存在した。これらは人体への流入熱量が原因と考えられる。これは、暑熱環境からクールスポットに入った瞬間に感じる積極的快適感と同様のものと考えられる。人体への流入熱量と快不快感、人体の皮膚温度や深部体温の変化量と快不快申告がどのように関係するのか把握することで、積極的快不快感を建築設計に活かすことができると考えられる。積極的快不快感と温熱環境の変動の関係性の把握は、今後の課題としたい。

事前に申告の練習は行っていたが、申告方法に個人差が見られた。例えば屋外日射環境下において不快申告を行う場合、申告ボタンを連打する被験者と、瞬間的に不快を感じた場合のみ申告を行う被験者に分かれた。また、申告ボタンを連打する場合においても個人差が見られた。ゆえに、今回のような実測において、人間一般の申告の傾向を把握することは難しいと思われる。屋外においては環境変動が大きいため、同様の実測を行う際には、事前にある温熱環境において被験者がどのように申告を行うかを測定し、その標準偏差を算出することが望ましい。

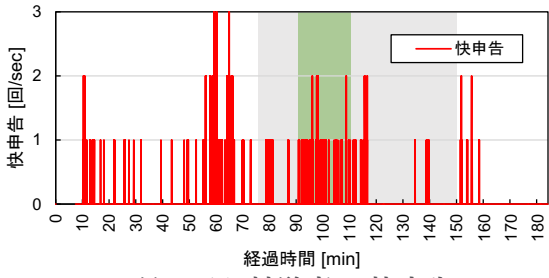
今回の実測によって快不快申告方法の個人差が大きくなったことが明らかになった。今後は、ある特定の個人の情報を多く集めることで、その個人の申告の傾向を掴むことを考えている。



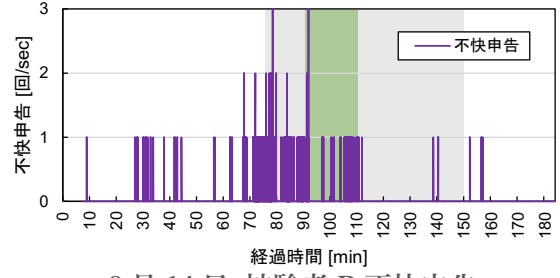
8月14日_被験者A 快申告



8月14日_被験者A 不快申告

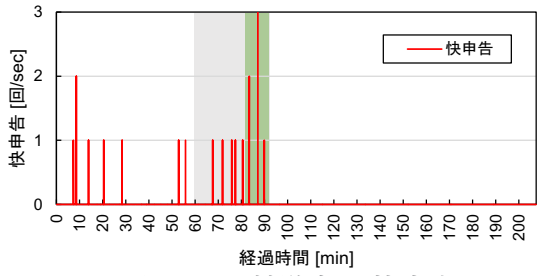


8月14日_被験者B 快申告

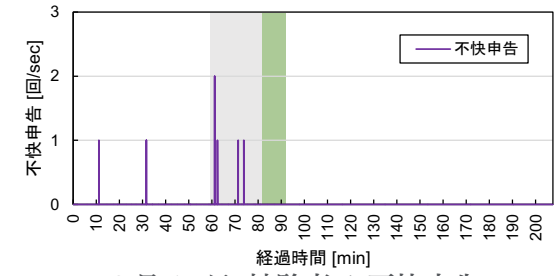


8月14日_被験者B 不快申告

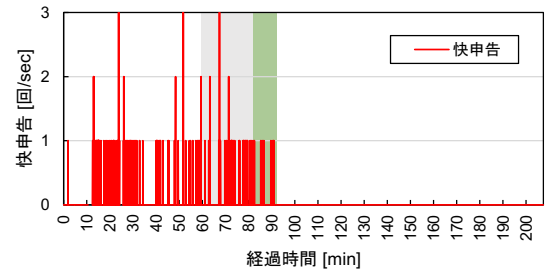
(a) 8月14日 (ルート1_晴天)



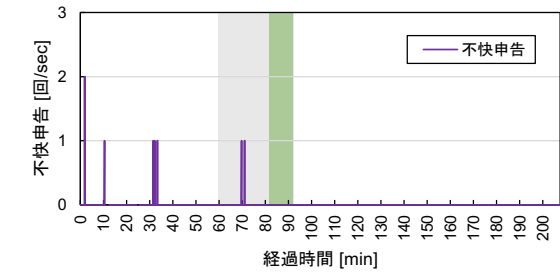
8月15日_被験者A 快申告



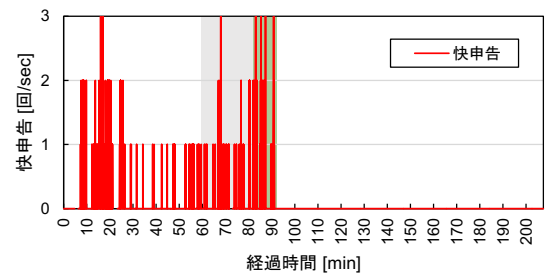
8月15日_被験者A 不快申告



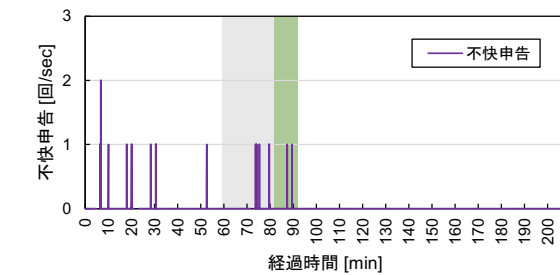
8月15日_被験者B 快申告



8月15日_被験者B 不快申告

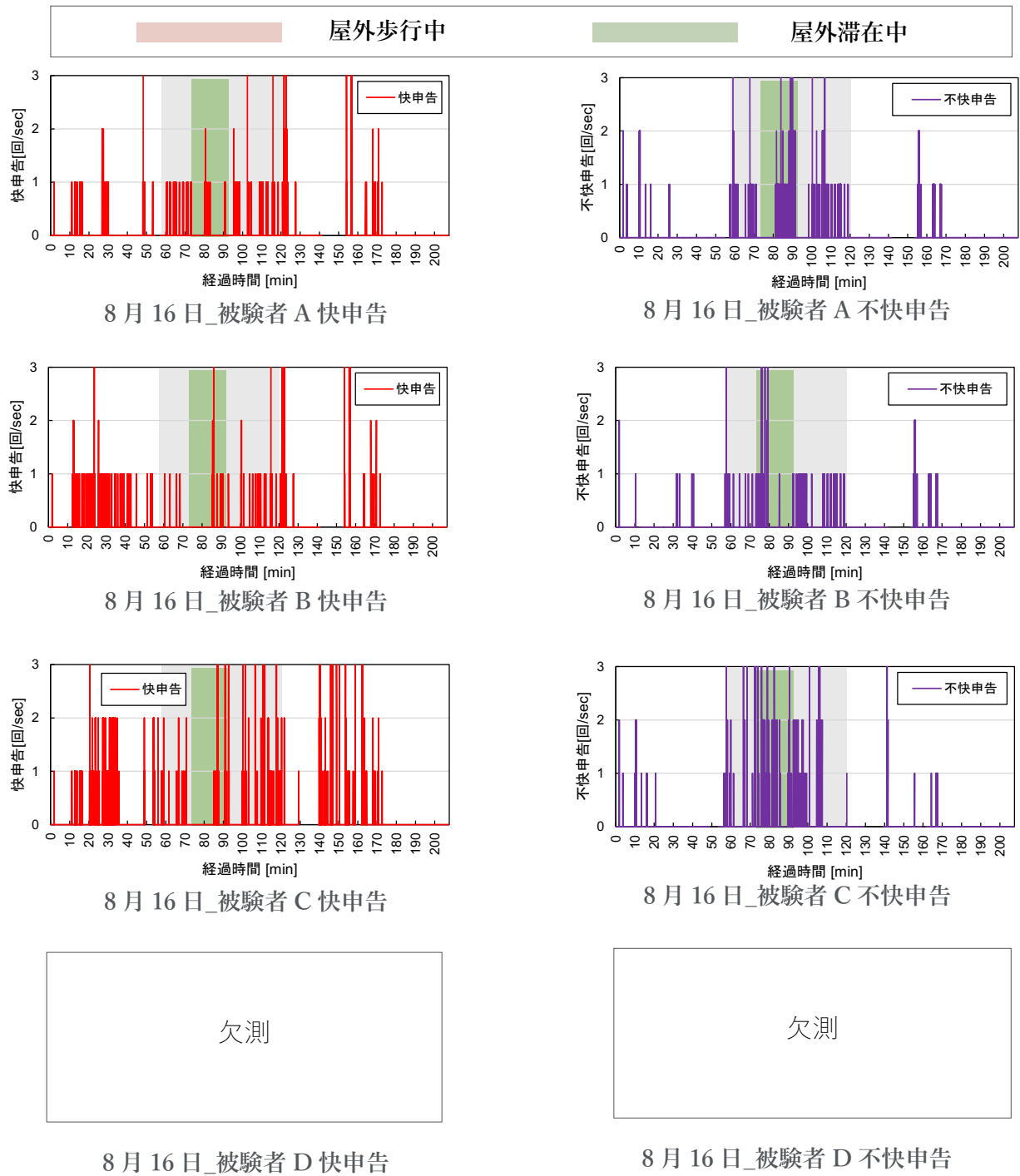


8月15日_被験者C 快申告

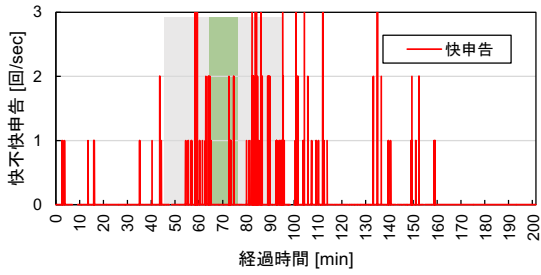


8月15日_被験者C 不快申告

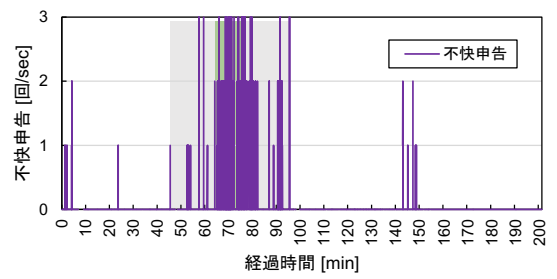
(b) 8月15日 (ルート2_曇り)



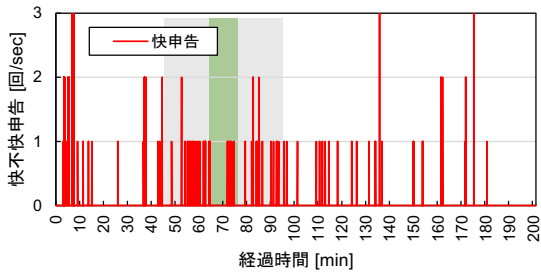
(c) 8月16日 (ルート1_晴天)



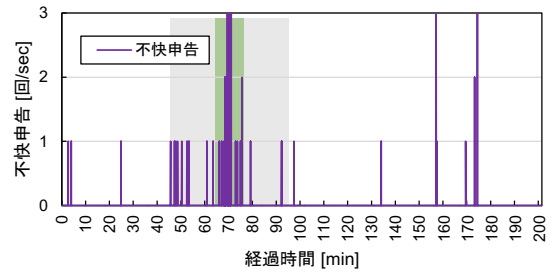
8月21日_被験者A 快申告



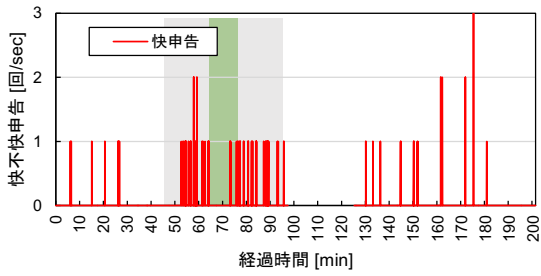
8月21日_被験者A 不快申告



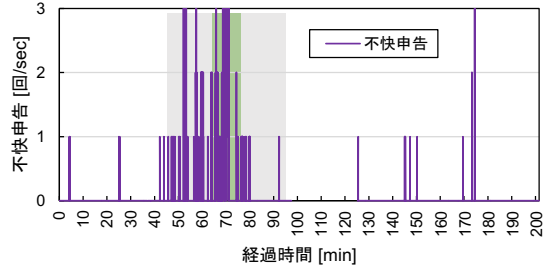
8月21日_被験者B 快申告



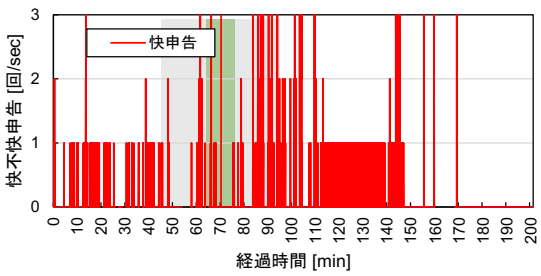
8月21日_被験者B 不快申告



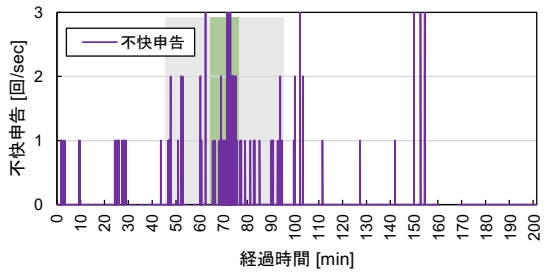
8月21日_被験者C 快申告



8月21日_被験者C 不快申告

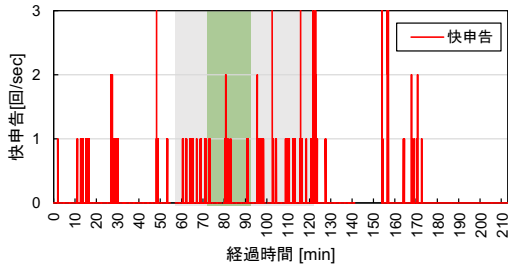


8月21日_被験者D 快申告

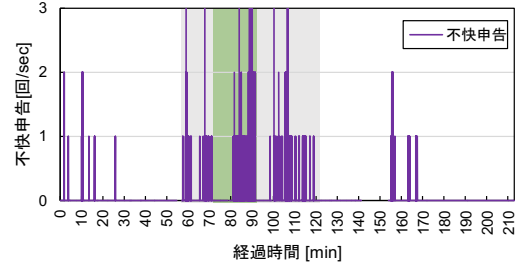


8月21日_被験者D 不快申告

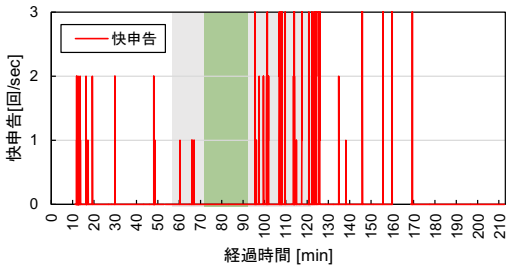
(d) 8月21日 (ルート2_晴天)



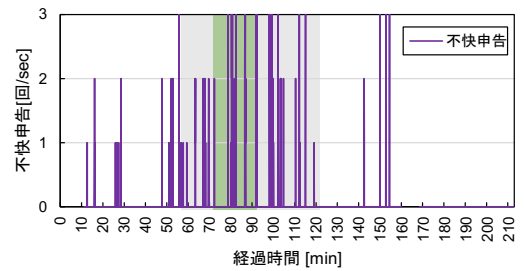
8月25日_被験者A 快申告



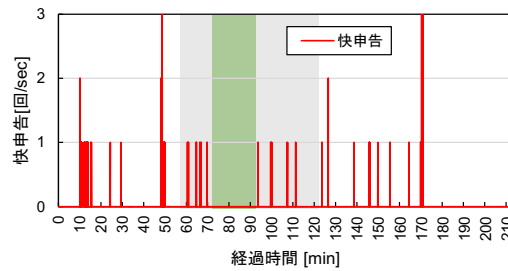
8月25日_被験者A 不快申告



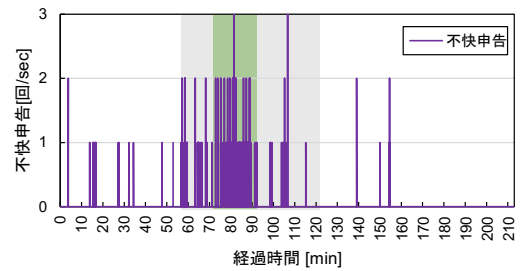
8月25日_被験者B 快申告



8月25日_被験者B 不快申告



8月25日_被験者C 快申告



8月25日_被験者C 不快申告

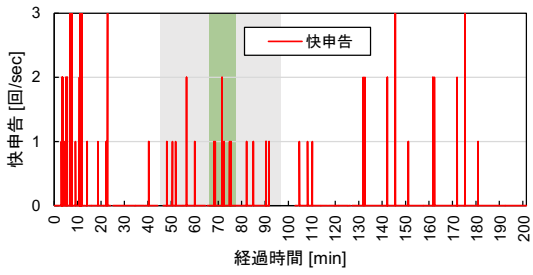


8月25日_被験者D 快申告

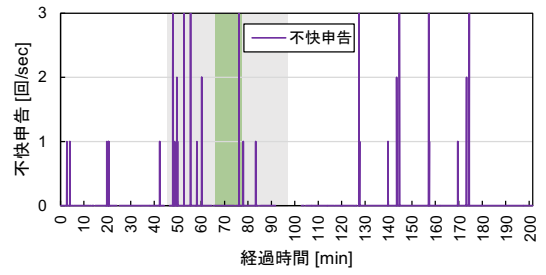


8月25日_被験者D 不快申告

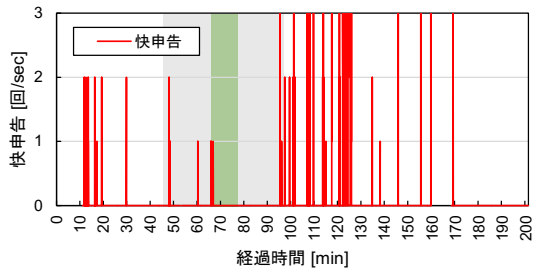
(e) 8月25日 (ルート1_晴天)



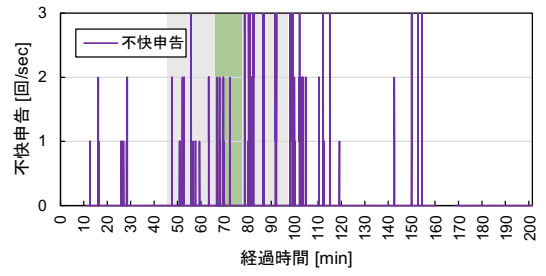
9月9日_被験者 A 快申告



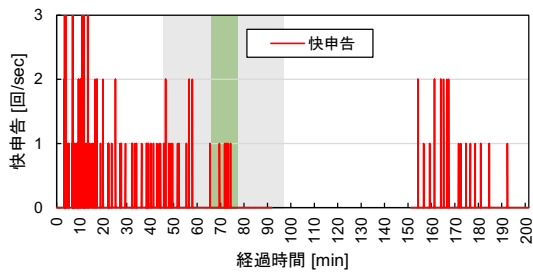
9月9日_被験者 A 不快申告



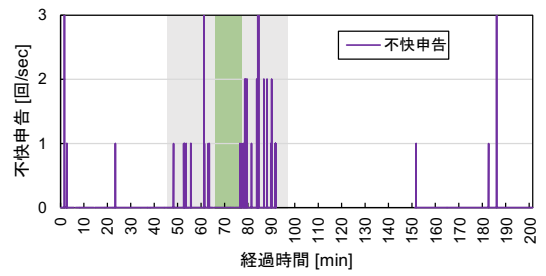
9月9日_被験者 B 快申告



9月9日_被験者 B 不快申告



9月9日_被験者 C 快申告



9月9日_被験者 C 不快申告



9月9日_被験者 D 快申告



9月9日_被験者 D 不快申告

(f) 9月9日 (ルート2_晴天)

図 3-18 快不快申告結果

3.6 温熱環境の絶対量と快不快申告の関係

曇りであった8月15日を除く全実測日の屋外歩行時と屋外滞在時における全被験者の快不快申告と温熱環境絶対量の分析を行った。空気温度、相対湿度は60秒移動平均値、気流速度、照度、快不快申告は10秒移動平均値を算出し、1秒ごとの快不快申告と温熱環境の分析を行った。快不快申告値は最大で1秒あたり3回としたが、3回以上の申告が見られた場合はその申告回数を3回とした。

空気温度に関して、図3-19に空気温度と快不快申告の関係を示す。空気温度が低いほど快申告が多く、空気温度が高いほど不快申告が多くなる傾向が見られた。特に、空気温度30°C以下の場合に快申告、32°C以上の場合に不快申告が多く見られた。

相対湿度に関して、図3-20に相対湿度と快不快申告の関係を示す。相対湿度が高いほど、不快申告が多くなるように思われたが、相対湿度が低いほど不快申告が多く、相対湿度が高いほど快申告が多くなる傾向が見られた。特に、相対湿度50%以下の場合に不快申告、60%以上の場合に快申告が多く見られた。

気流速度に関して、図3-21に気流速度と快不快申告の関係を示す。夏季屋外において、気流速度が大きいほど快申告が多くなるように思われたが、気流速度の絶対量と快不快申告の間に有意な相関は見られなかった。

照度に関して、図3-22に照度と快不快申告の関係を示す。夏季屋外において、照度が小さいほど快申告が多くなり、照度が大きいほど不快申告が多くなるように思われたが、照度の絶対量と快不快申告に有意な相関は見られなかった。照度が大きいほど日射量が大きく、日射による放射熱も大きい。そのため、照度60klx付近において不快申告が多いように見えるが、これは日射による放射熱によるものであると考えられる。

温熱環境絶対量と快不快申告においては、空気温度が高いほど不快申告が多く、相対湿度が低いほど不快申告が多くなる傾向が見られた。気流速度および照度に関しては有意な相関を見ることができなかった。気流速度、照度に関しては変化量の大きさが快不快申告に影響を与えられたため、それぞれの変化量に着目して分析を行った。

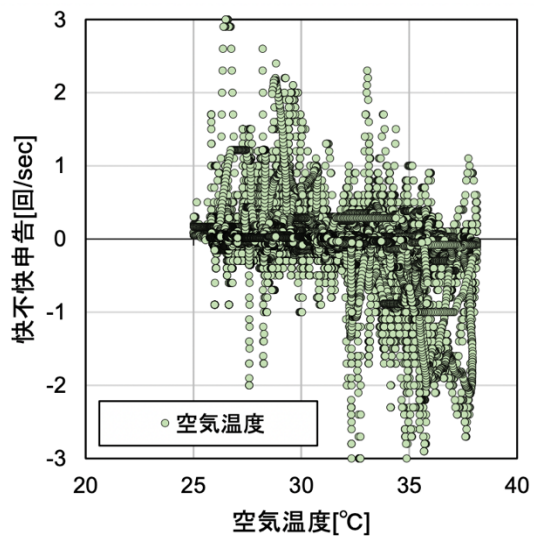


図 3-19 空気温度と快不快申告の関係

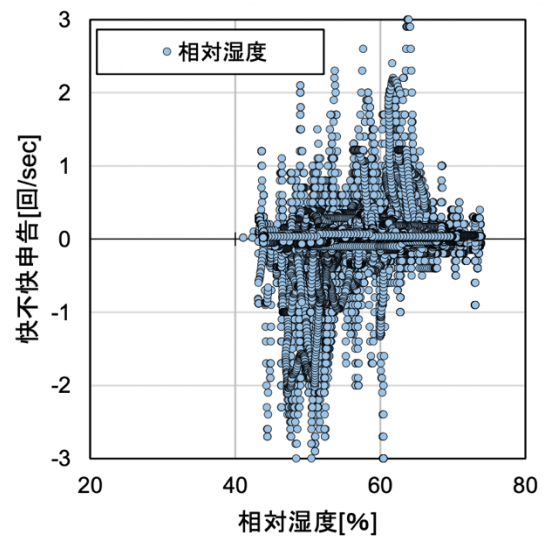


図 3-20 相対湿度と快不快申告の関係

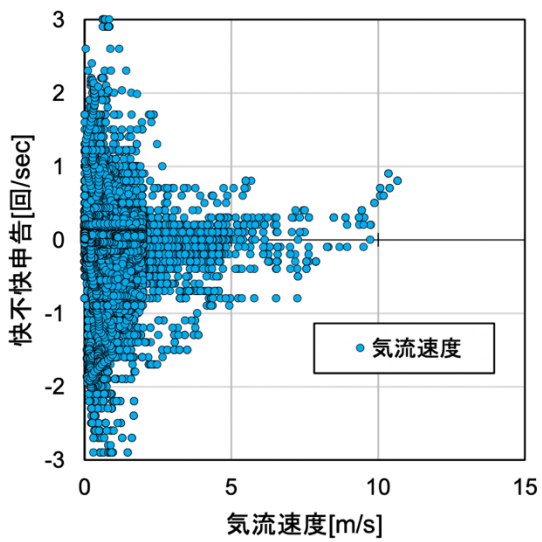


図 3-21 気流速度と快不快申告の関係

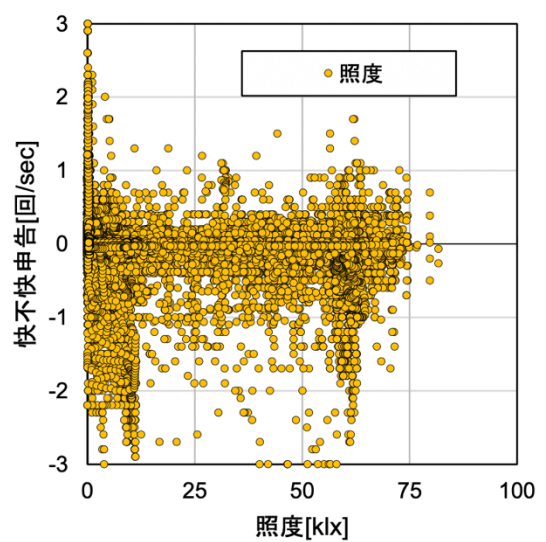


図 3-22 照度と快不快申告の関係

3.7 温熱環境の変化量と快不快申告の関係

3.6において、空気温度絶対量と快不快申告の関係、相対湿度絶対量と快不快申告の関係は見られたものの、気流速度絶対量と快不快申告の関係、照度絶対量と快不快申告の関係に関しては有意な相関を見ることができなかった。そこで、曇りであった8月15日を除く全実測日の屋外歩行時と屋外滞在時における全被験者の快不快申告と温熱環境変化量の分析を行った。気流速度、照度、快不快申告の10秒移動平均値を算出し、1秒ごとの変化量と快不快申告の分析を行った。

気流速度に関して、図3-23に気流速度変化量と快不快申告の関係を示す。正の気流速度変化量が大きくなるほど快申告が多くなる傾向が見られた。理由として、気流速度の変動によって熱損失量が増加したことが考えられる。そのため、冬季においては気流速度変化量が大きくなるほど不快申告が多くなり、夏季と逆の結果が得られると思われる。

照度に関して、図3-24に照度変化量と快不快申告の関係を示す。正の照度変化量が大きいほど不快申告が多く見られ、負の照度変化量が大きいほど快申告が多く見られた。照度が大きいほど日射量が大きく、日射による放射熱も大きい。正の照度変化量が大きいということは、日陰環境から日射環境へ移動したことを表し、負の照度変化量が大きいということは、日射環境から日陰環境へ移動したことを表す。このことから、日陰環境から日射環境へ移動した場合に不快申告、日射環境から日陰環境へ移動した場合に快申告が多くなることが示された。

温熱環境変化量と快不快申告の関係において、夏季の都市内を移動する場合、快不快申告は空気温度変化量、相対湿度変化量とは相関が見られなかった。気流速度に関しては、正の変化量が大きくなるほど快申告が多くなる傾向が見られた。照度に関しては、正の変化量が大きいほど不快申告が多く見られ、負の変化量が大きいほど快申告が多く見られた。

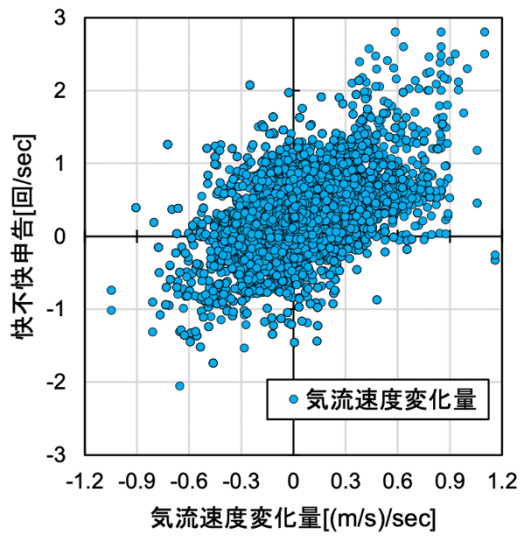


図 3-23 気流速度変化量と快不快申告の関係

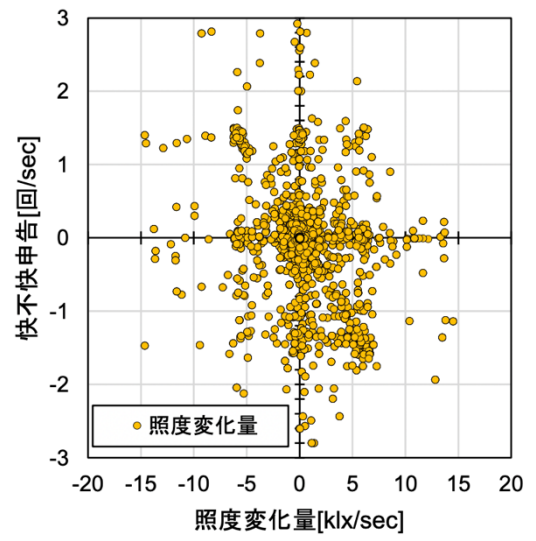


図 3-24 照度変化量と快不快申告の関係

3.8 まとめ

オープンソースハードウェアの Arduino, bluetooth モジュール, 各種センサーとスマートフォンを組み合わせることで動的な環境と心理量を計測可能なウェアラブルセンサー「YUHO」を開発した。また, 本システムにより, 被験者が良いと思った環境の物理情報を得ることが可能になったため, 環境情報と心理量について, 行動履歴を含めて可視化することが可能になった。計測したデータを CSV 形式で抽出し googlemaps に可視化することも可能になった。また 6 面放射温度計「YUHO IR」を開発し, 上下長短波放射計と理論式から取得データの比較を行った。扱う情報量が増えたため「YUHO」に統合するためには通信システムについて再考しなければならない(マイコンを変えることで解決できる可能性がある)。短波長放射計, および風向を求めるセンサーの開発も必要である。

東京駅周辺において実測を行うことにより以下の知見が得られた。

- 1) 屋内環境から屋外環境への移動等の温熱環境が急変した場合や屋外歩行から屋外滞在をした瞬間に快不快申告が見られた。
- 2) 快不快申告は空気温度, 相対湿度の絶対値と相関があり, 気流速度, 照度の絶対量とは相関が見られなかった。
- 3) 気流速度の変化量と快不快申告にはある一定の傾向が見られた。

本研究の成果から多くのデータを効率的に集めることができるようになった。本研究の手法を使って新規の法則性を発見することは重要であるが, 複雑なデータから人間一般の快適性を示すモデルを作ることは難しいと考えられる。入力変数が多く, また物理式の介在がないため, 統計的な係数に終始する可能性がある。しかし, 大量のデータが手に入り情報処理速度が向上した時代においては, 理論検討による「モデル」ではなく「メタモデル」という概念が重要になってくると思われる。今後は, 豊富に集めたデータから, 人間一般の快適性を表現するモデルを作るのではなく, メタモデルを提案したうえで, 豊富なデータから特定の人間のみ適用可能なプロファイルを生成し, メタモデルに照会することで都度新たな個別モデルを作る情報処理が必要ではないだろうか。

参考文献

- 1) 中野 淳太, 田辺 新一: 環境適応研究の半屋外温熱環境計画への展開 鉄道駅舎における熱的快適域と熱的受容域, 日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(環境工学 II), 427-430, 2014 年 9 月
- 2) 中村 泰人: 生気象学的建築学の思想, 日本建築学会計画系論文報告集 (373), 11-20, 1987 年 3 月
- 3) 長谷部礼子, 林立也, 堀川晋, 田辺新一, 木村建一: 屋上から屋内に連続する空間における温熱感の研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, 環境工学 II, 1996, 351-352, 1996 年 7 月
- 4) 鶴飼真成, 市川勇太, 野部達夫: 室内温熱環境の受容度に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 2014(環境工学 II), 1329-1330, 2014 年 9 月
- 5) 眞下茜, 河野良坪, 中川純, 桃瀬一成, 池島薫, 乾久美子: 冬季の風速低減および夏季の排熱促進を目的とした駅舎内間仕切り壁の最適配置に関する設計手法の提案: 随伴変数法を用いた CFD 逆解析の活用に関する研究, 日本建築学会環境系論文集 第 81 巻, 第 721 号, 307-317, 2016 年
- 6) 渡邊慎一, 堀越哲美: 測定に基づいた屋外における平均放射温度の算出方法, 日本生気象学会雑誌 49(2), 49-59, 2012 年
- 7) Lee, Juyoun, Typical Clothing Ensemble Insulation Levels for Sixteen Body, Center for the Built Environment UC Berkeley, 2013-04-02,
- 8) <http://www.flir.jp/flirone/content/?id=62912> (2016/08/24 閲覧)

4章 潜熱蓄熱材を用いた住宅用空気式床暖房の開発

4.1 はじめに

建築に転用可能な素材が開発されると、生産方法の合理化を行うだけでなく、素材の価値を高めるために、部品化や複合化のプロセス¹⁾をたどることになる。潜熱蓄熱材（Phase-Change Material, 以下 PCM とする）は建築に転用された素材としては比較的新しい部類に入るが、部品化や複合化の提案とともに、素材が持つ熱性状のシミュレーション、および熱的快適性や省エネルギーの観点から多数の研究³⁻¹⁷⁾がなされている。武田ら^{4, 5)}は PCM を用いた暖房装置を考案し、その効果をシミュレーションで確認した。高山ら⁶⁾は太陽熱空気集熱器と PCM による外気負荷削減装置を開発し、実測とシミュレーションにより妥当性を確認した。草間ら⁷⁾は PCM 内装左官材を開発し効果を確認した。いずれの研究も PCM を部品化・複合化して効果を検証するものであり、遷移域における挙動、および熱媒体との熱交換に関する議論がなされている。また、PCM はその遷移域において単位体積当たりの熱容量が大きいいため、木造住宅など熱容量の小さい建築の温熱環境を安定化する。さらに、熱源のピークシフトに寄与する可能性⁸⁾が示されており、現代においては重要な技術と考えられている。特に温熱環境の安定化とピークシフトは、不均一・非定常な温熱環境を操るためには不可欠な技術であるが、PCM は水やコンクリートなどの安価な顕熱蓄熱材と比較すると、流通量に伴う製造コストが普及の妨げとなっているため、部品化や複合化に際しては比較的安価なシステムを構築する必要があると考えられる。

PCM を用いた床暖房において、篠崎ら⁹⁾は発熱体上部に PCM を設置し、これらを顕熱蓄熱材であるコンクリートで覆ったシステムを考案し、設計および運用指針を示した。高瀬ら¹⁰⁾は温水を熱媒体とした上で、すだれ状の配管と PCM を一体化したシステムを開発し、熱交換量の優位性を確認した。また、室温と床表面温度の関係からその有効性を示したが、システムに特殊な配管を採用しているため、現場での工種が増えると考えられる。

一方、藤田ら¹¹⁾は住宅の床チャンバー内に PCM で構成された蓄熱体を床下に設置した床下暖房において、床下温度と室温、および PCM の挙動について報告し、熱源と PCM の相変化温度、および使用量についての決定法を示した。長野ら¹²⁾はオフィス用の多孔 OA フロアに PCM を組み込んだシステムを考案し、数値計算を行った。これらの床下空調や床吹出し空調は、床チャンバーに PCM の複合部材を据えることで、通常の施工プロセスを変えることなく導入が可能である。一般に、床チャンバーを利用して床材と対流方式で熱交換する方法は、配管等の設備が不要なため、施工の手間とコストにおいて優位性があると考えられる。しかし、床チャンバーを利用した空調において、床自体を暖める空気式床暖房に PCM を用いた研究は極めて少ない。

本研究では、不均一、非定常な温熱環境を、設計者が建築の熱容量を最小限のエネルギーとすることを目的としている。PCM の時間推移を伴った熱性状に着目し、熱源に家庭用エアコンもしくは空気式太陽熱集熱器を想定した上で、床を構築するための施工プロセスを変更することなく、蓄熱材への加熱の手段を対流方式とした比較的安価な住宅用空気式床暖房システムを開発する。また、本システムの最適設計を行うために、放熱時間の長さや放射温熱環境の安定性に着目した「安定化効率」を用いて最適化を定義するとともに、シミュレーションに基づいて最適を実現する PCM 仕様（厚みと相変化温度）を決定するための線図を開発することで、任意の温度域を実現する手法を開発する。

4.2 PCM を用いた空気式床暖房システムの構成

本研究で開発した空気式床暖房の構成を図 4-1 に示す。熱源には家庭用エアコンもしくは空気式太陽熱集熱器を想定しており、気密性能と断熱性能が担保された床チャンバー内に暖気を送ることで蓄熱層に熱を伝達し、床材に放熱する。床材はフローリングとした。蓄熱層は PCM とし、必要に応じて PCM の下に水封入層を配置する。床表面温度を安定化させるため、PCM は床材裏面に配置する必要がある。また、システム全体のコストを抑えるため、PCM を厚くすることのみで熱容量を担保するのではなく、安価な水封入層を併用することで必要な熱容量を確保する。蓄熱層から床材に熱を伝導するため、蓄熱層と床材を密着する spring-effect heat-conductive metal plate (以下 SHP とする) を開発した。SHP は 0.35 mm の安価な板金を一定の形状に折り曲げることで、床材の裏面への密着性を担保するばね効果と、強度の向上を実現した。また、通常の板金工事の範囲で製作が可能のため、水切り等の工事と併用可能であり、施工の工種を増やす必要がない。図 4-2 に SHP の断面形状を示す。PCM もしくは水封入層が任意の厚さであっても、SHP のバネ効果により蓄熱層が床材の裏側に密着する。さらに、板金を折り曲げることによって、SHP は住宅における大引間の 910mm スパンを飛ばすことが可能である。一般的な床工事において、大引きの直交方向に根太を施工する際に SHP と蓄熱層を根太間に配することで、通常の床工事の工程を変えることなく、床材裏面に密着する蓄熱層を設けることが可能である。

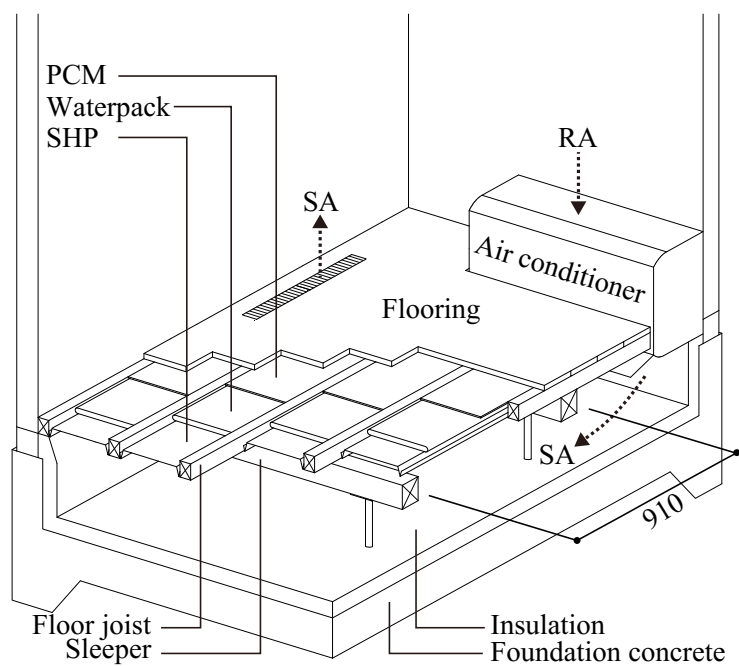


図 4-1 空気式床暖房の構成

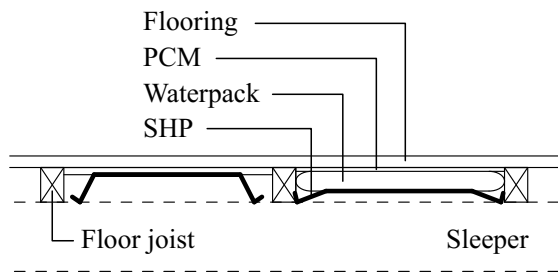


図 4-2 SHP の断面形状

4.3 モデルの作成

前章で開発したシステムについての設計検討を可能にするため、PCMの相変化現象を含む床の非定常伝熱を表現可能な物理モデルを開発した。

4.3.1 定式化

質点系でモデル化を行う。図 4-3 に床の熱流モデルを示す。灰色の丸が境界条件であり、床上と床下の空気温度とする。周囲の物体は空気温度に等しく、放射温度=空気温度と仮定する。放射熱伝達に関しては放射熱伝達率を用いて計算を行った(パラメータは後述)。フローリング、PCM、水封入層はそれぞれ熱容量を持つ質点とし、二重丸で表現する。SHPは熱伝導率が高く、厚さも0.35mmで熱容量が小さく、熱的には影響が小さいため、本モデルでは考慮外とした。

フローリング、PCM、水封入層の温度(T_{flr} , T_{pcm} , T_{wat})の時間変化はそれぞれ、相互の質点までの熱抵抗 R [$m^2 \cdot K/W$]と温度を用いて式(1)~式(3)の微分方程式で表現できる。これを時間間隔 Δt [s]で後退差分法すれば式(4)、式(5)となり、現在温度 T^* から将来温度 T を求めることができる。また、上記の3点の温度が求まれば、熱容量を持たない境界の温度(T_{up} , T_{mid1} , T_{mid2} , T_{bk})は隣接する質点の温度から計算できる。なお、PCMまたは水封入層の厚みを0とする場合には、式(5)において $\Delta t/C_{pcm}$ または $\Delta t/C_{wat}$ を1とし、各層の熱抵抗 R_{pcm} または R_{wat} を0とすれば良い。また、計算の結果、PCMが前タイムステップと異なる相(固相、液相、遷移相)になった場合には、異なる相の熱容量によって温度を更新してしまうことになるため、過剰(または過小)な温度変化を式(6)で補正する^{注1)}。 T_{pcm} は補正前の温度、 $T_{pcm,cor}$ は補正後の温度、 T_{pc} は相変化温度(凝固点または融解点)、 $C_{pcm,old}$ は相変化前の相の熱容量、 $C_{pcm,new}$ は相変化後の相の熱容量である。

境界条件は床上空気温度 $T_{a,up}$ と床下空気温度 $T_{a,bk}$ である。ただし、 $T_{a,bk}$ は加熱運転時には給気温度 T_{spp} とし、運転停止時には $T_{a,up}$ と等しいと仮定した。

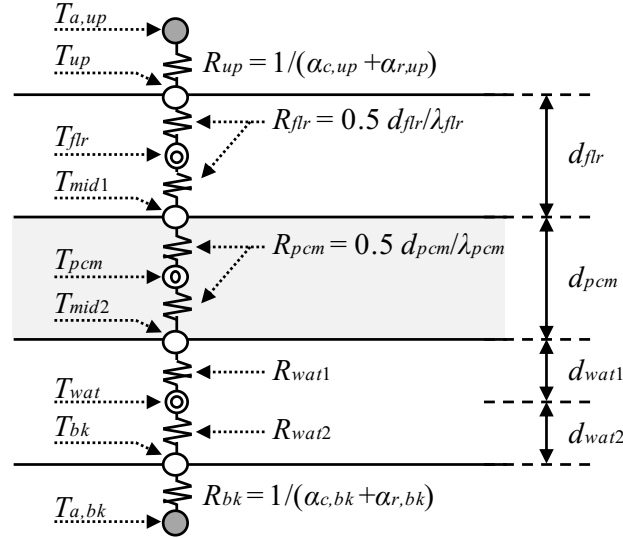


図 4-3 床の熱流モデル

$$C_{flr} \frac{dT_{flr}}{dt} = \frac{T_{a,up} - T_{flr}}{R_{up} + R_{flr}} + \frac{T_{pcm} - T_{flr}}{R_{flr} + R_{pcm}} \quad (1)$$

$$C_{flr} \frac{dT_{flr}}{dt} = \frac{T_{a,up} - T_{flr}}{R_{up} + R_{flr}} + \frac{T_{pcm} - T_{flr}}{R_{flr} + R_{pcm}}$$

$$C_{pcm} \frac{dT_{pcm}}{dt} = \frac{T_{flr} - T_{pcm}}{R_{flr} + R_{pcm}} + \frac{T_{wat} - T_{pcm}}{R_{pcm} + R_{wat1}} \quad (2)$$

$$C_{wat} \frac{dT_{wat}}{dt} = \frac{T_{pcm} - T_{wat}}{R_{pcm} + R_{wat1}} + \frac{T_{a,bk} - T_{wat}}{R_{wat2} + R_{bk}} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} T_{flr}^* + a_1 T_{a,up} \\ T_{pcm}^* \\ T_{wat}^* + c_2 T_{a,bk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + a_1 + a_2 & -a_2 & 0 \\ -b_1 & 1 + b_1 + b_2 & -b_2 \\ 0 & -c_1 & 1 + c_1 + c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{flr} \\ T_{pcm} \\ T_{wat} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\Delta t / C_{flr}}{R_{up} + R_{flr}}, & b_1 &= \frac{\Delta t / C_{pcm}}{R_{flr} + R_{pcm}}, & c_1 &= \frac{\Delta t / C_{wat}}{R_{pcm} + R_{wat1}} \\ a_2 &= \frac{\Delta t / C_{flr}}{R_{flr} + R_{pcm}}, & b_2 &= \frac{\Delta t / C_{pcm}}{R_{pcm} + R_{wat1}}, & c_2 &= \frac{\Delta t / C_{wat}}{R_{wat2} + R_{bk}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$T_{pcm,cor} = T_{pc} + \frac{C_{pcm,old}}{C_{pcm,new}} (T_{pcm} - T_{pc}) \quad (6)$$

4.3.2 パラメータの設定

1) 床上空気の熱伝達率 $\alpha_{c,up}$

床上空気の対流熱伝達率 $\alpha_{c,up}$ [W/(m²·K)]は平均ヌセルト数 Nu [-]を用いて式(7)で計算した。 λ_a [W/(m·K)]は空気の熱伝導率である。また、代表長さ l_{spn} [m]は、PCMの連続的な敷設が可能である大引間距離 (0.91m) とした。床上では床面の加温による自然対流により熱交換が行われるとし、ヌセルト数は式(8)で計算した^{2) 注2)}。 Gr [-]と Pr [-]はそれぞれグラスホフ数とプラントル数であり、式(9)、式(10)で計算した。ただし、 g [m/s²]は重力加速度、 l [m]は代表長さ、 β [1/K]は体積膨張率、 ν [m²/s]は動粘性係数、 α [m²/s]は熱拡散率、 T_h [°C]は高温側温度、 T_c [°C]は低温側温度である。

$$\alpha_{c,up} = \frac{\lambda_a Nu}{l_{spn}} \quad (7)$$

$$Nu = \begin{cases} 0.14(GrPr)^{1/3} & (T_c < T_h) \\ 0.60(GrPr)^{1/5} & (T_h \leq T_c) \end{cases} \quad (8)$$

$$Gr = gl^3\beta|T_h - T_c|/\nu^2 \quad (9)$$

$$Pr = \nu/\alpha \quad (10)$$

2) 水封入層における熱抵抗 R_{wat}

水封入層では、下部の温度が上部よりも十分に高い場合など、一定の条件を満たせば自然対流が生じる。この自然対流効果を反映するため、式(11)に示すように平均ヌセルト数 Nu を用いて熱抵抗 R_{wat} [$m^2 \cdot K / W$]を計算した^{注2)}。ただし λ_{wat} [$W / (m \cdot K)$]は水の熱伝導率、 d_{wat} [m]は水封入層の厚みである。

Nu は、密閉無限水平流体層の計算式 (式(12)、式(13)²⁾) に従い、レイリー数 Ra_l [-] (式(14)) を用いて計算した。ただし、 Ra_l が臨界レイリー数 Ra_{cr} [-] (=1708)を下回る場合には自然対流は生じず、 $Nu=1.0$ である。

$$R_{wat} = \frac{d_{wat}}{\lambda_{wat} Nu} \quad (11)$$

$$Nu = \left[\left\{ 1 + 1.466 \left(1 - \frac{Ra_{cr}}{Ra_l} \right) \right\}^{15} + \left\{ \frac{Ra_l f(Pr)}{1420} \right\}^5 \right]^{1/15} \quad (12)$$

$$f(Pr) = \{ 1 + (0.5/Pr)^{9/16} \}^{-16/9} \quad (13)$$

$$Ra_l = GrPr \quad (14)$$

3) 床下の熱伝達率

加熱時には強制対流による熱伝達が生じると推測できる。床下面の風速は大引や根太の存在により影響を受け、また、吹き出し口の位置によっても変化するが、既往研究¹³⁾によれば平均的には0.3~1.0 m/s程度であり、対流熱伝達率 $\alpha_{c,bk}$ は2~8W/(m²·K)程度の範囲にある。そこで本研究では2 W/(m²·K)と8 W/(m²·K)の場合についてそれぞれ計算を行って、感度を確認する方針とした。

図4-1に示したように、床チャンバーは断熱材で囲うため、放熱時には床下空間と断熱材を介して熱が逃げることになる。従って、加熱運転停止時の R_{bk} は非密閉空気層と60 mmのポリスチレンフォーム（熱伝導率=0.034 W/(m²·K)）の合成抵抗である1.8 m²·K/Wとした。

4) PCM の物性とモデル化

PCM は相変化に伴い物性が変化する。本モデルで用いた熱物性を表 4-1 に示す。計算の各タイムステップにおいて PCM の温度を確認し、相変化時には表 4-1 の熱物性を再設定した。厳密には、配合を変えて PCM の相変化温度を変化させると、相変化に要する熱も変わるが、いくつかの材料を確認したところ、10%以内の差異であったため、以下の検討では相変化温度の違いに関わらず表 4-1 の熱物性を共通して用いた。

図 4-4 に本研究における PCM のモデル化の方法を示す。状態変化に必要なエネルギーを表現するために、遷移域において固相および液相とは異なる比熱で計算を行った。このような手法で用いる比熱は「見かけの比熱」と呼ばれており、多くの既往研究において用いられている手法である。相変化中の見かけの比熱の設定方法に関してはいくつもの提案¹³⁻¹⁷⁾があるが、本研究では相変化中で一定値を用いる方法¹³⁾とした。また、多くの PCM はヒステリシスを持ち、凝固の開始・終了点と融解の開始・終了点が異なるため、融解途中で凝固過程に移行する場合や、逆の場合などには、ヒステリシスの存在が計算結果に大きく影響する可能性がある³⁾。しかし、本研究は設計線図の作成が主目的であり、完全に融解した後に完全に凝固する 1 サイクルの運転を前提とした計算を行う。従って、本研究のモデルでは、凝固開始点=融解終了点= T_{fz} [°C]、融解開始点=凝固終了点= T_{ml} [°C]とし、開始と終了の温度差は 0.5°C とした。

表 4-1 熱物性

	Solid	Equilibrium	Liquid
volumetric specific heat [kJ/(m ³ ·K)]	1,500	-	1,500
latent heat [kJ/m ³]	-	170,576	-
heat conductivity [W/(m·K)]	0.432	0.270	0.229

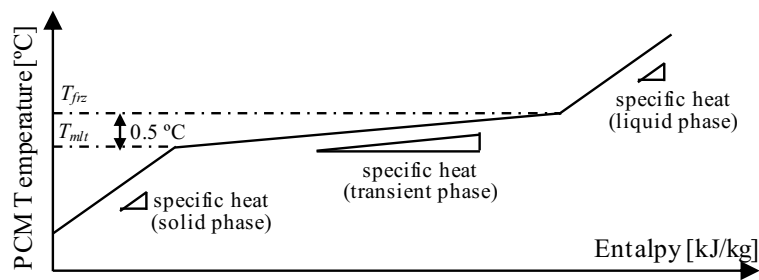


図 4-4 PCM のモデル化の方法

5) その他のパラメータ

床上下表面の放射熱伝達率は、放射率を 0.9、平均温度を 300 K とし、 $5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ で固定値とした。床材の熱伝導率 λ_{flr} は $0.12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、容積比熱は $500 \text{ kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ 、厚み d_{flr} は 0.015 m とした。従って、熱抵抗 R_{flr} は $0.125 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 、熱容量 C_{flr} は $7,500 \text{ J}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ である。

4.3.3 ケーススタディ

床の層の構成を変えて傾向を確認した。シミュレーションのケース一覧を図 4-5 に示す。Case A が基準であり、PCM 厚を 2 倍にしたものが Case B、PCM を取り除いたものが Case C、水封入層を取り除いたものが Case D である。これらの床に対して 3.5 時間の加熱と 10.5 時間の放熱を行った。床下空気温度は加熱中が 45°C、放熱中が 25°C、床上空気温度は 25°C で一定とした。

床上からの放熱の熱流と PCM の温度の推移を図 4-6 に示す。基準である Case A は加熱開始後 30 分程度で相変化が始まり、2 時間程度で完全に液相となる。PCM を 2 倍に増やした Case B では、加熱終了直前に液相となり、潜熱容量を使い切っているため、Case A よりも安定した放熱が行われる時間が長い。水だけの Case C は加熱時に最も大きく温度が上昇し、放熱の速度も Case A より早い。水封入層がない Case D は、開始 2 時間程度で PCM が液相となり、3 時間程度で定常状態となる。PCM の凝固開始点は 30.0 °C、終了点は 30.5°C であり、PCM を含む Case A, B, D のいずれも 30.0 ~ 30.5 °C の範囲で温度変化の推移がほぼ水平に広がっていることが確認できる。

Case A		Case B		Case C		Case D	
Wood	15 mm	Wood	15 mm	Wood	15 mm	Wood	15 mm
PCM	5 mm	PCM	10 mm	Water pack	30 mm	PCM	5 mm
Water pack	30 mm	Water pack	25 mm				

図 4-5 シミュレーションのケース一覧

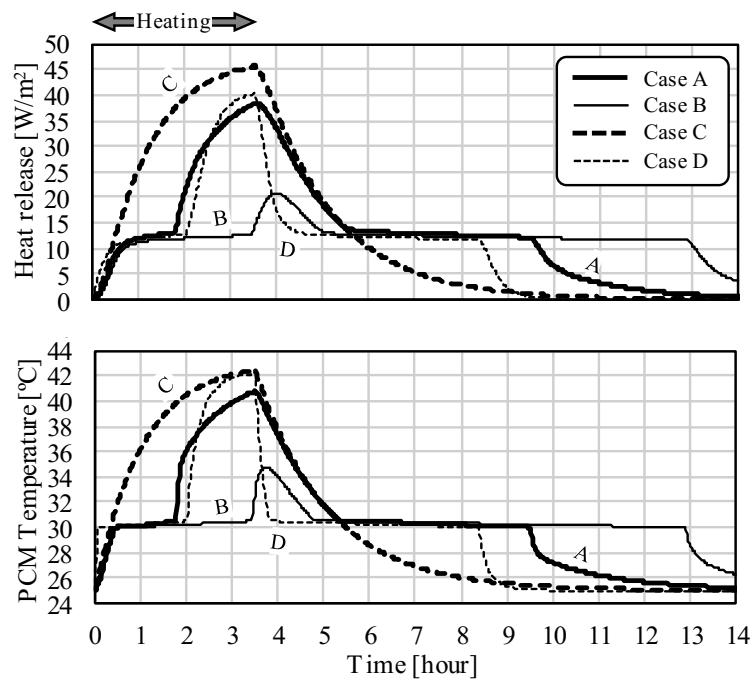


図 4-6 床上からの放熱の熱流と PCM の温度の推移

4.4 設計法の検討

本システムを設計する際には、具体的な PCM の仕様（相変化温度と厚み）を選択する必要がある。そこで、本章では、本システムにおける最適化の定義を行うとともに、前章の物理モデルを用いて最適な PCM 仕様を導き出す手法について検討した結果を報告する。

4.4.1 「最適化」の定義

PCM を導入した床の上側表面温度の時間推移は、理想的には図 4-7 のようになる。 Δt_{chg} の範囲では、床下に暖気を流して加熱を行っている。加熱開始時の PCM の状態が固相であったとすると、加熱によって温度が上昇するため、表面温度も速やかに上昇する。PCM の温度が上がり遷移域に入ると、PCM の温度がほぼ一定となり、表面温度も安定する。さらに加熱を続けると PCM が液相に移り、再び温度上昇が加速するため、表面温度も急速に高まる。加熱を停止すると、以上の逆の経過をたどる。

PCM を導入することの 1 つの大きな目的は温熱環境の安定化にあるため、設計条件としては、目標とする床表面温度の範囲を決める必要がある。これが図 4-7 の下限温度 T_{lmt} [°C] と上限温度 T_{ult} [°C] である。そして、この温度帯で放熱できた時間数を有効放熱時間 Δt_{rls} [sec] と定義する（図 4-7 着色部）。現実には加熱時間帯（ Δt_{chg} ）においても上下限範囲内の表面温度で放熱が行われるが、この時間は Δt_{rls} に含めない。加熱時間帯の放熱を有効とみなすのであれば、そもそも蓄熱材を介さずに直接に空気による対流暖房を行うか、熱容量の小さいパネルによる放射暖房を行う方が効率的であるためである。PCM という蓄熱材を用いたシステムの評価であるため、加熱が終了した後の放熱時間の挙動に対して「最適」を定義することが合理的であると思われる。

Δt_{chg} の間に床下から床に対して供給された熱量を Q_{chg} [J/m²] とする。また Δt_{rls} を Q_{chg} [J/m²] で除した値を、安定化効率 η_{stb} [s/(J/m²)] と定義する（式(15)）。すなわち η_{stb} は、床下からの単位投入熱量あたりで、設計目標範囲内に床上表面温度がどれだけ維持できたかを表す指標である。本研究では、この η_{stb} を最大化することを最適化と定義する。この他にも、例えば Δt_{chg} の間に床上に放熱された熱量を式(15)の分子にとることで無次元の指標とすることも考えられるが、これでは許容温度範囲内で短期的に大きく放熱した方が、長期的に安定的に放熱するよりも高く評価される可能性がある。従って、温熱環境の安定化という PCM の評価指標としては妥当ではないと思われる。

$$\eta_{stb} = \frac{\Delta t_{rls}}{Q_{chg}} \quad (15)$$

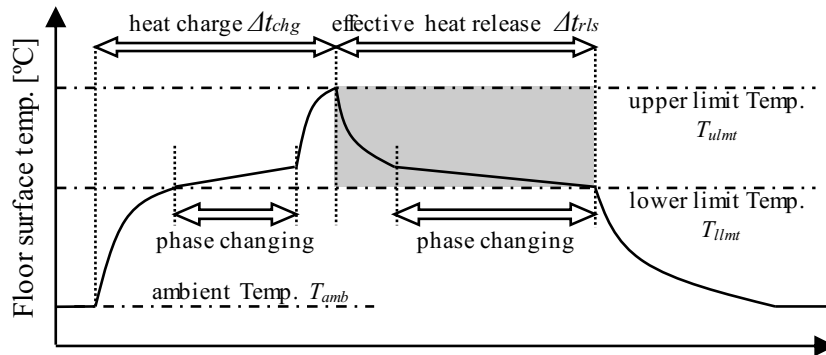


図 4-7 PCM を導入した床の上側表面温度の時間推移

4.4.2 設計条件

PCM 仕様の設計に先立ち決定しておく条件は、室温、床上表面の上下限温度、放熱時間の 3 つである。室温は一般の対流方式の空調システムの場合と同様に決定する。床上表面温度は、全体の空調システムの構成によって異なる。仮に、主たる暖房は室内設置の家庭用エアコンなどで行い、床暖房システムには放射温熱環境の安定化としての役割を担わせるのであれば、床表面温度は室温に対してあまり高い値に設定する必要はない(室温 22 °C に対して床表面温度 24 °C など)。逆に、補助的な加熱源を持たず、床暖房システムにすべての暖房機能を担わせるのであれば、室内空気に対して十分な熱流が発生するだけの高い表面温度を設定する必要がある(室温 22 °C に対して床表面温度 30 °C など)。放熱時間は居住者の生活スケジュールに即して決定する。なお、室温は蓄放熱時間帯中、一定に保たれることを前提とするため、例えば外出時に蓄熱を行って帰宅後の放熱を期待するというような、大きく室温が揺れ動くことを前提とした運用に対しては本研究で作成する線図はそのまま適用することはできない^{注 3}。

4.4.3 相変化温度の決定方法

PCM は配合によって相変化温度を調節することができる。そこで、凝固点 T_{frz} と PCM 厚を変化させて蓄熱時間ごとに安定化効率 η_{stb} を計算した結果を図 4-8 に示す。ただし d_{wat1} と d_{wat2} は 5 mm, $T_{a,bk}$ と $T_{a,up}$ は 24 °C, T_{ulmt} は 28 °C, T_{llmt} は 26 °C, T_{spy} は 45 °C とした。いずれの凝固点においても、それぞれの PCM 厚で η_{stb} が極大値を示す蓄熱時間 Δt_{chg} が存在することがわかる。また、PCM の厚みが増えると極大値を示す Δt_{chg} は長い側へ移動する。これは、大きな PCM の蓄熱量を活用しきるだけの十分に長い蓄熱時間が必要となるためである。

上記の条件においては、多くの PCM 厚で凝固点が 30 °C のときに η_{stb} が極大値を取る。また、31 °C や 32 °C における η_{stb} に比較して、29 °C における η_{stb} は非常に小さい。すなわち、最適な凝固点に比較して低い温度を設定してしまうと η_{stb} が急速に低下する。これは以下の理由による。有効放熱時間 Δt_{rfs} を最大化するためには、相変化が有効放熱時間内に行われることが必要である。一方で、図 4-7 からわかるように、無駄な加熱エネルギーの発生を回避するためには、蓄熱完了時点での表面温度は上限温度 T_{ulmt} を下回る必要がある。従って、放熱完了時の表面温度が下限温度と一致するとき、 Δt_{rfs} は最大化することになる。このため、表面温度の推移は図 4-7 に示すように下限表面温度ぎりぎりを沿うことになる。このとき、凝固点を低く変更すると、相変化中の表面温度の多くが下限表面温度を下回ることになる。これが最適温度よりも凝固点を低く設定した場合に η_{stb} が大きく低下する理由である。

設計条件に合わせてシミュレーションを繰り返せば、最適な凝固点を把握することができるが、簡易的には以下の方法で推定できる。仮に最適な PCM が選定されたとすれば、上記の通り、有効放熱時間完了時点においては、床表面温度はほぼ一定の値を取り続けてきたことになる。従って、表面の熱流は定常状態に近いと言える。そこで、PCM から床上空気までの定常熱流式 (式(16)) を用いて、床上表面温度 T_{up} に下限温度 T_{llmt} を代入して PCM 温度 T_{pcm} について解けば式(17)が得られ、これが最適凝固点 $T_{frz,opt}$ の近似値である。式(17)の右辺の R_{pcm} は PCM の厚みが確定しなければ得られないが、床材の熱抵抗 R_{fr} に比較して小さく、また、先の検討により、凝固点が大きく算出されることは安全側であることがわかっているため、十分に大きい PCM 厚を仮定 (本研究では 20mm) して計算を行う。式(17)を用いて、室温と下限表面温度から最適凝固点を得る線図を作成した結果を図 4-9 に示す。図 4-8 の計算条件である $T_{a,up} = 24$ °C と $T_{llmt} = 26$ °C を本図にあてはめて凝固点を求めると $T_{frz,opt} \approx 30$ °C となり、ほぼ最適な温度が得られることがわかる。

$$\frac{T_{up} - T_{a,up}}{R_{up}} = \frac{T_{pcm} - T_{up}}{2R_{flr} + R_{pcm}} \quad (16)$$

$$T_{frz,opt} \approx T_{lmt} + \frac{2R_{flr} + R_{pcm}}{R_{up}} (T_{lmt} - T_{a,up}) \quad (17)$$

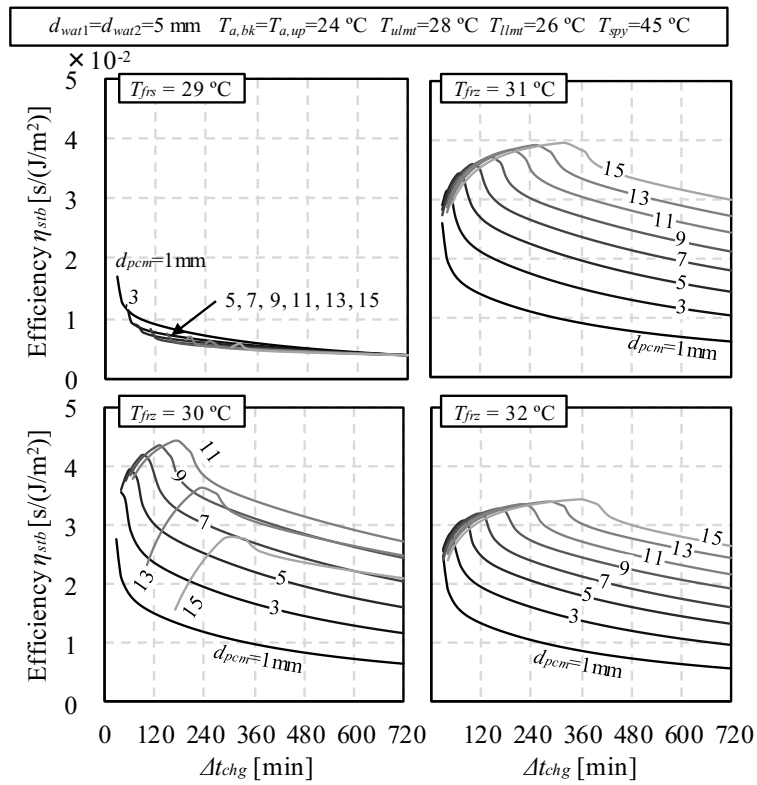


図 4-8 各凝固点 T_{frz} および PCM 厚における蓄熱時間ごとの安定化効率 η_{stb}

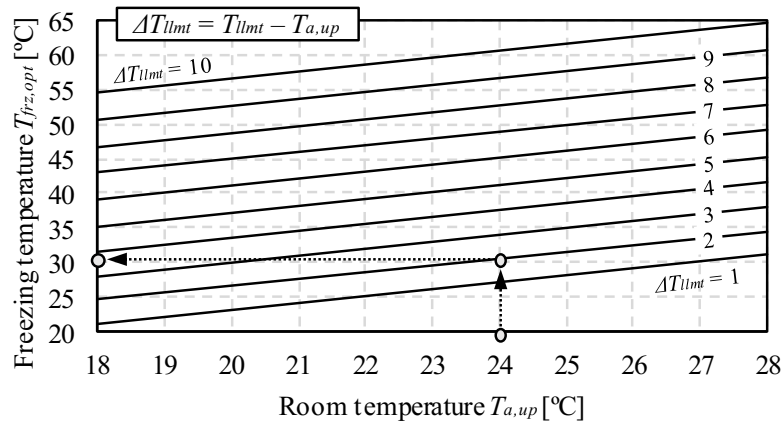


図 4-9 室温と下限表面温度による最適凝固点チャート

4.4.4 PCM厚の決定方法

前章で開発したモデルを用いて、いくつかの条件において安定化効率 η_{stb} が最大化する PCM 厚と、そのときに必要となる蓄熱時間を計算した。計算結果を図 4-10~図 4-13 に示す。ただし $T_{ulmt} = T_{llmt} + 5^\circ\text{C}$ とした。図 4-10 と図 4-11 は加熱時の床下対流熱伝達率を $2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ とした場合、図 4-12 と図 4-13 は $8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ とした場合の結果である。左列と右列はそれぞれ水封入層の厚みを 0 mm とした場合と 20 mm とした場合である。また、床下給気温度 T_{spy} と室温 $T_{a,up}$ との温度差を変化させて上下段に表示した。同じ図中に描かれている複数の線は、表面温度下限値と室温の差を表している。

設計放熱時間（横軸）が長くなるほど、必要な PCM が厚くなり、蓄熱時間も長くなることがわかる。また、対流熱伝達率が大きい場合 ($8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) には熱流が大きくなるため、PCM 厚を増やし、短めの蓄熱時間で運用することが最適となることがわかる。

具体例を上げて図表の使用方法を解説する。暖房時の設計室温を 23°C 、床下給気温度を 38°C 、放熱時間を 240 min とする。対流熱伝達率を $2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ とし、水封入層を導入しないとすれば、図 4-10 の左上の線図を用いる。床上表面温度下限値を 24°C (室温 $+1^\circ\text{C}$) とすれば、横軸の 240 min の値を読み取り、PCM の最適厚みは 0.8 mm となる。同様に床上表面温度下限値を 25°C (室温 $+2^\circ\text{C}$) とすれば、最適厚みは 1.7 mm となる。このとき、必要な蓄熱時間は図 4-11 を用いることでそれぞれ、約 30 min と 120 min となる。一方で、床上表面温度下限値を 26°C (室温 $+3^\circ\text{C}$) とした場合には 3°C の線と交わず、解が存在しない。これは、室温との温度差が大きいため床上への放熱が大きくなり、蓄熱が完了しない (PCM が相変化するまで加熱できない) ということを意味している。

水封入層を導入する場合も線図の使用方法は同じであるが、描かれた線が原点から離れている点に注意を要する。例えば、図 4-12 の右上の線図で放熱時間が 240 min の場合の値を読むと、温度差が 1°C の場合には最適厚みは 0 mm である。これは、 60 min の放熱時間を得るためには、 20 mm の水封入層があれば十分で、PCM の導入が不要であるということの意味している。

図 4-10~図 4-13 は、放熱時の床下空気温度 $T_{a,bk}$ が床上空気温度 $T_{a,up}$ と等しいと仮定した線図であり、階下も空調空間である 2 階の床を想定している。しかし、1 階床のように床下温度が外気に近く温度差が大きい場合には階下への相対的に放熱量が大きくなり、最適厚が変化することが予想される。そこで、床上下温度差を 20°C にした場合の計算も行った。結果を図 4-14~図 4-17 に示す。階下への放熱量が大きくなった結果、相対的に厚い PCM が最適となる傾向が表れている。

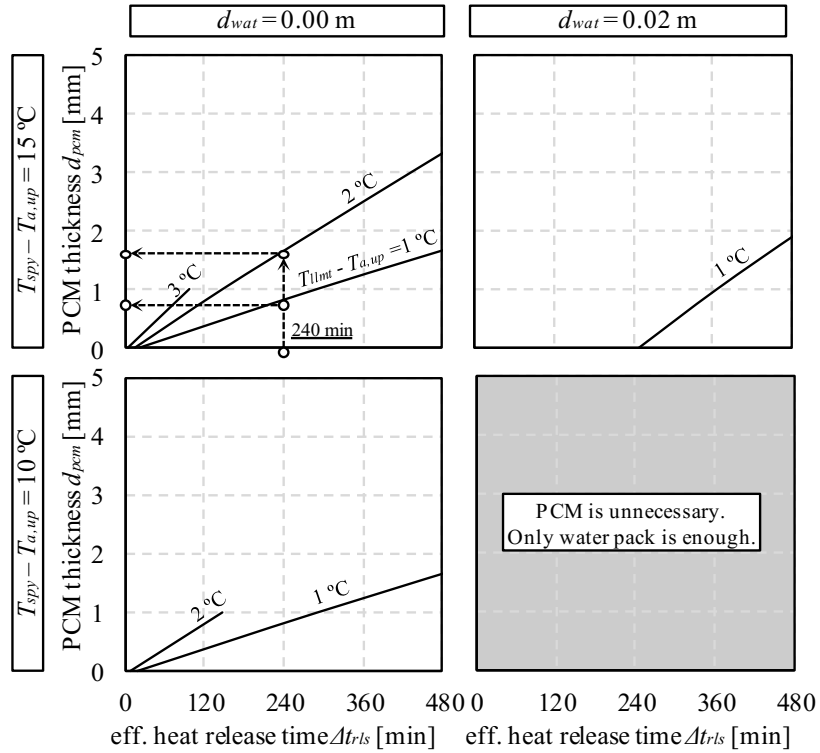


図 4-10 安定化効率 η_{stb} が最大化する PCM 厚 ($\alpha_{c,bk}=2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $T_{a,bk}=T_{a,up}$)

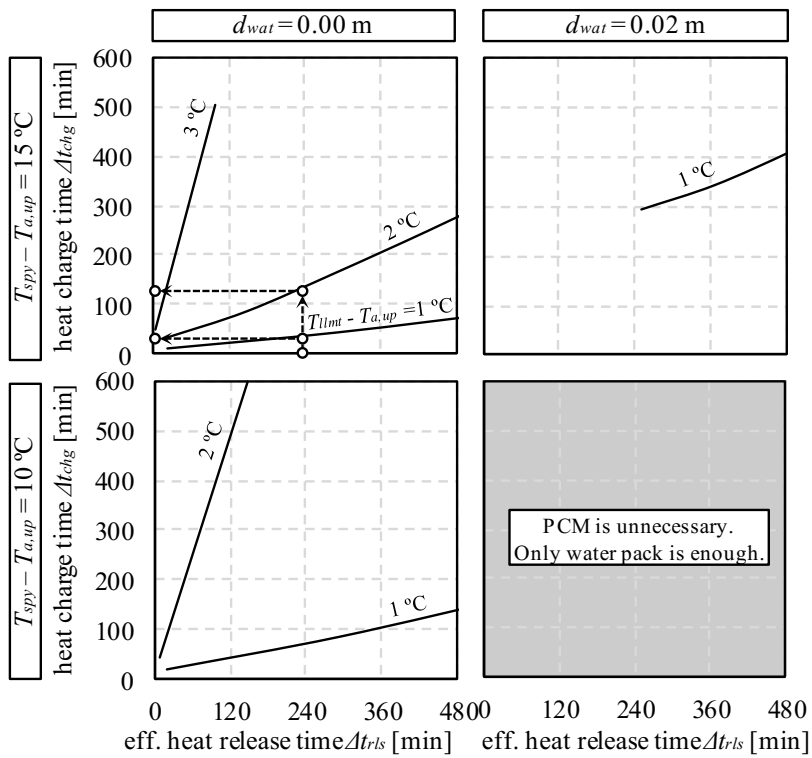


図 4-11 安定化効率 η_{stb} が最大化する蓄熱時間 ($\alpha_{c,bk}=2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, $T_{a,bk}=T_{a,up}$)

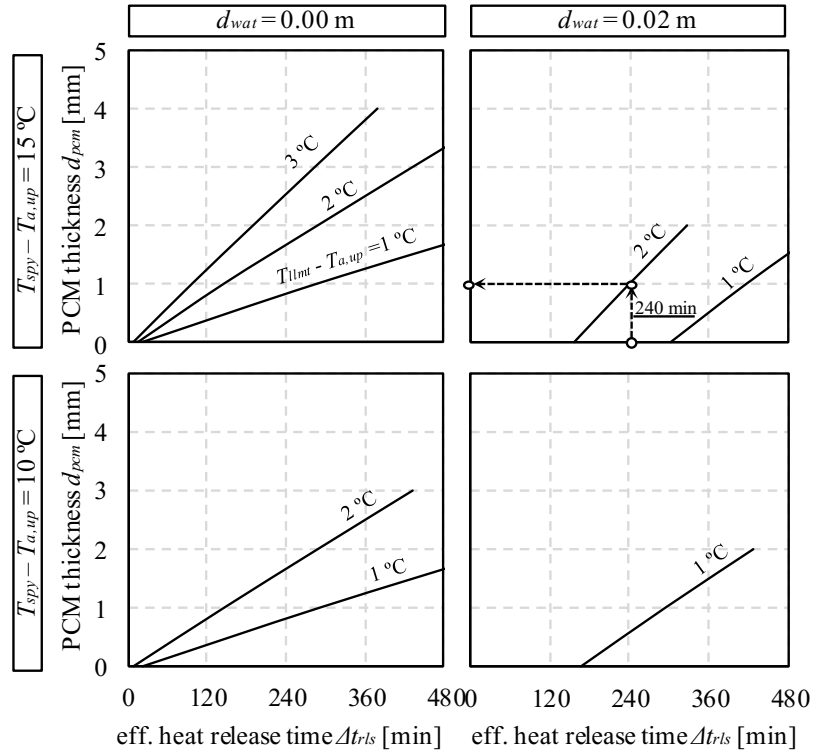


図 4-12 安定化効率 η_{stb} が最大化する PCM 厚 ($\alpha_{c,bk} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $T_{a,bk} = T_{a,up}$)

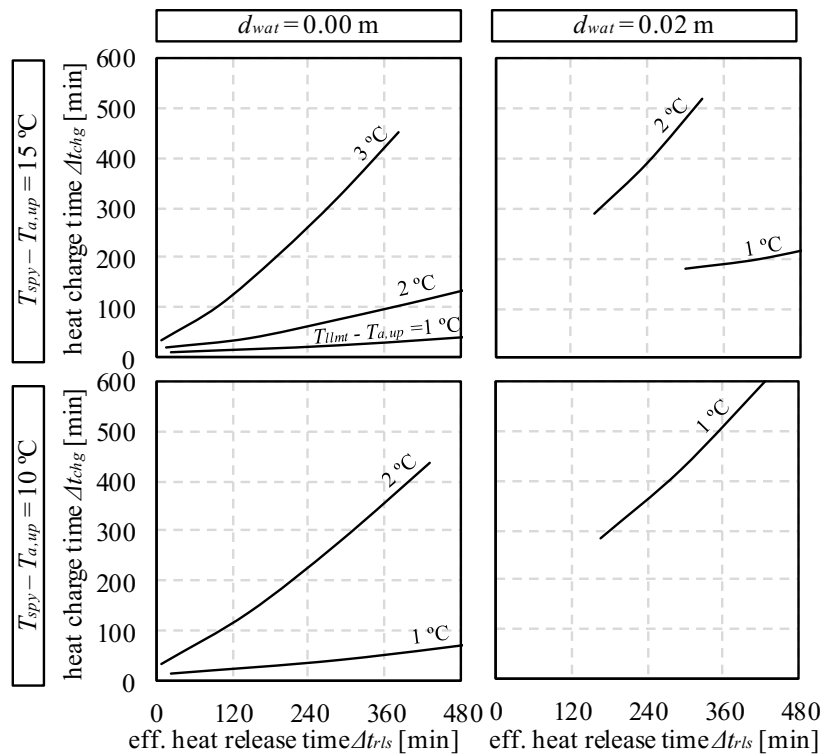


図 4-13 安定化効率 η_{stb} が最大化する蓄熱時間 ($\alpha_{c,bk} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $T_{a,bk} = T_{a,up}$)

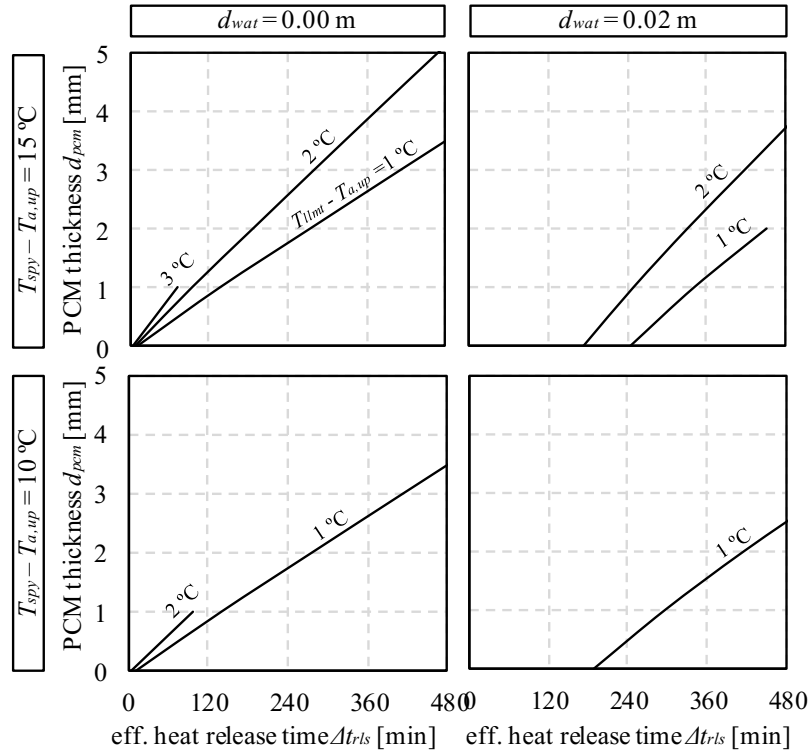


図 4-14 安定化効率 η_{stb} が最大化する PCM 厚 ($\alpha_{c,bk} = 2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $T_{a,bk} = T_{a,up} - 20$)

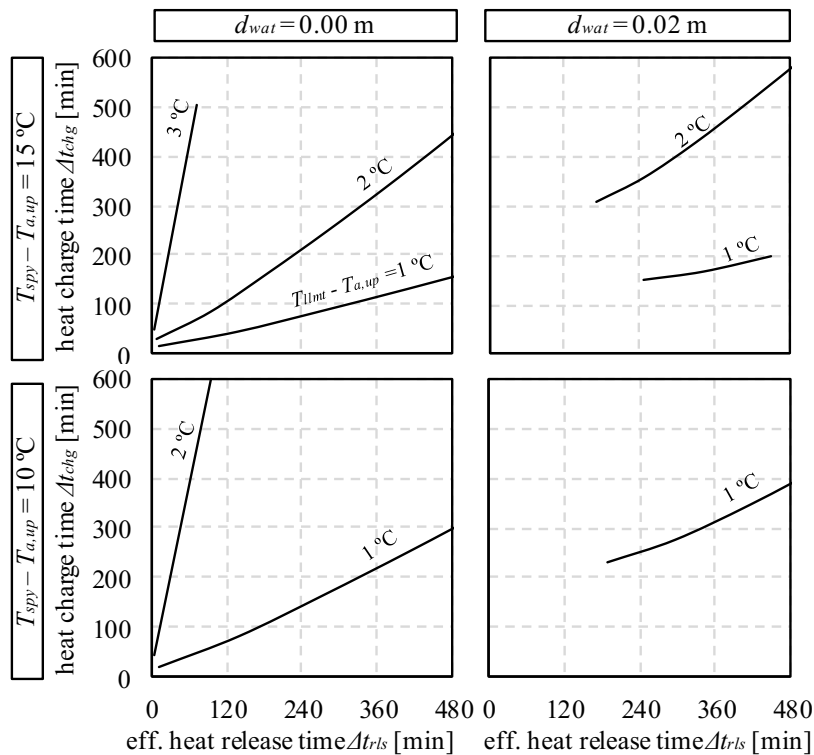


図 4-15 安定化効率 η_{stb} が最大化する蓄熱時間 ($\alpha_{c,bk} = 2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $T_{a,bk} = T_{a,up} - 20$)

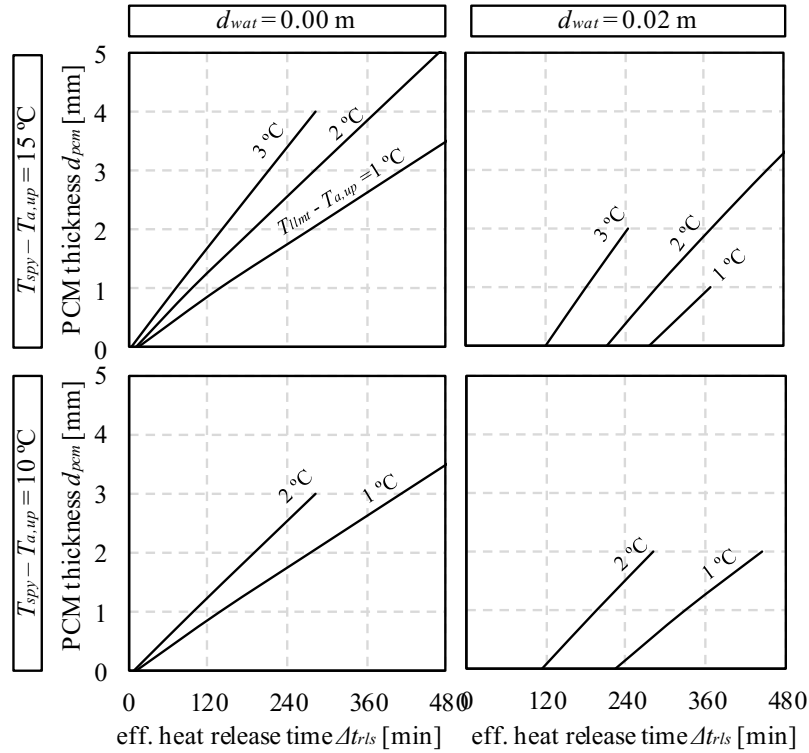


図 4-16 安定化効率 η_{stb} が最大化する PCM 厚 ($\alpha_{c,bk} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $T_{a,bk} = T_{a,up} - 20$)

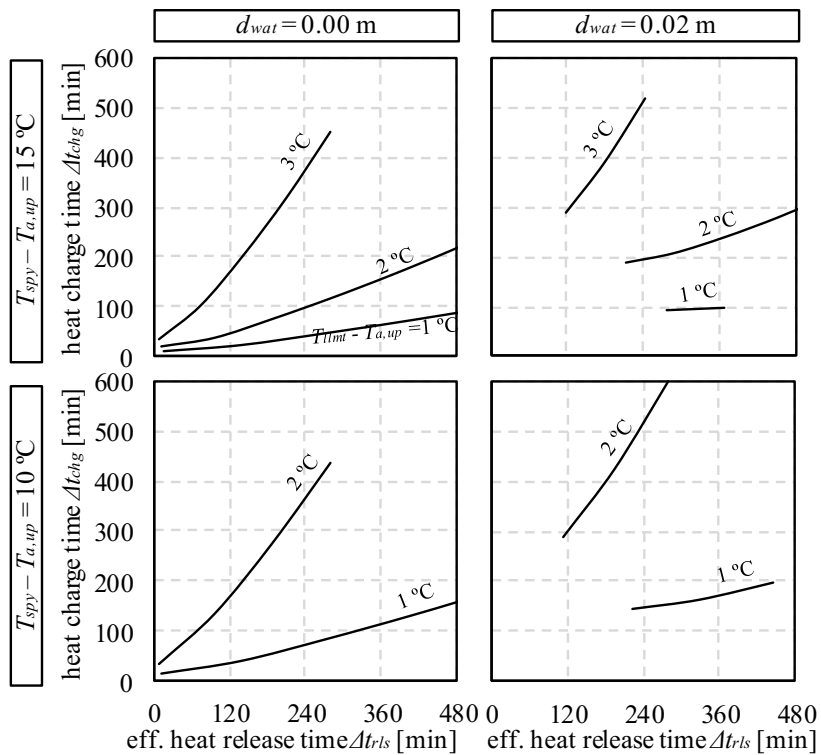


図 4-17 安定化効率 η_{stb} が最大化する蓄熱時間 ($\alpha_{c,bk} = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $T_{a,bk} = T_{a,up} - 20$)

4.5 まとめ

設計者が住宅における動的な温熱環境を操るために、潜熱蓄熱材と水封入層を用いた新しい住宅用空気式床暖房システムを開発した。具体的には、潜熱蓄熱材の熱性状を利用し、熱源に家庭用エアコンもしくは空気式太陽熱集熱器等の対流式加熱方式を用いても、時間変動の少ない床暖房システムを実現した。さらに、床を構築するための施工工程を変更することなく、板金を一定の形状に折り曲げることで強度を確保し、大引の 910 mm スパンを飛ばすことで、蓄熱層を床裏に密着する住宅用空気式床暖房システムを考案した。また、室温、床上表面の上下限温度、放熱時間に着目し「安定化効率」を用いてシステムの最適化を試みた。潜熱蓄熱材の相変化現象を含む床の非定常伝熱解析を行う物理モデルを開発し、数値計算に基づいて最適な潜熱蓄熱材および水封入層の仕様を決定するための線図を提案した。

「安定化効率」を用いて最適化された PCM 仕様（相変化温度と厚み）を決定できる線図を開発することで、不均一・非定常な温熱環境を、最小限のエネルギーで実現することが可能になった。今後は、実測データとの照合による精度検証を進め、線図の拡充を図る必要がある。

参考文献

- 1) Glass & Architecture Winter 1999, 旭硝子, 1999
- 2) 伝熱工学資料 改訂第5版, 日本機械学会, 2009
- 3) 芹川真緒, 佐伯智寛, 館林恵介, 崔榮晋, 前真之: 潜熱蓄熱材の熱特性の測定法および熱的挙動の計算法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第82巻, 第740号, 853-862, 2017年10月
- 4) 武田仁, 中山卓士, 入口泰尚: 潜熱蓄熱材(PCM)の住宅暖房への適用: ナイロンポリ充填型PCM暖房装置の開発とその利用方法の検討, 日本建築学会計画系論文集, 第67巻, 第551号, 53-59, 2002年1月
- 5) 武田仁, 山本未生: 潜熱蓄熱材(PCM)の住宅暖房への適用: 潜熱蓄熱材利用壁式暖房装置の製作と有効性, 日本建築学会計画系論文集, 第67巻, 第558号, 43-48, 2002年8月
- 6) 高山裕香子, 森太郎, 石戸谷裕二, 松永潤一郎, 羽山広文, 菊田弘輝: 寒冷地における太陽熱空気集熱器と潜熱蓄熱材を組み合わせた外気負荷削減装置の開発 個別要素の特性によるシステム効果の数値解析, 日本建築学会環境系論文集, 第80巻, 第708号, 117-126, 2015年2月
- 7) 草間友花, 石戸谷裕二, 三浦誠, 宮崎智仁: 潜熱蓄熱(PCM)内装左官材のパッシブ蓄熱効果に関する研究 基本的熱性能試験の測定方法及び実験棟における環境改善効果と省エネルギー効果に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻, 第722号, 367-374, 2016年4月
- 8) 高村秀紀, 宮路凱, 山羽基: 住宅における床下に設置する潜熱蓄熱材の利用に関する研究(第3報)温暖地の戸建住宅における潜熱蓄熱材を利用した床下暖房システムの性能評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演集文集, 209-212, 2016.9
- 9) 篠崎正弘, 渡辺俊行, 龍有二, 林徹夫: 潜熱・顕熱式電気床暖房システムの設計・運転指針に関する提案, 日本建築学会環境系論文集, 第69巻, 第579号, 29-36, 2004年5月
- 10) 高瀬幸造, 前真之, 赤嶺嘉彦, 河野良坪, 佐藤誠, 坂本雄三: 実在住宅における温水ヒートポンプ熱源を利用した潜熱蓄熱式床暖房システムの効果的な運転に関する研究 その1 システムの概要と実測による評価, 日本建築学会環境系論文集, 第77巻, 第673号, 175-184, 2012年3月
- 11) 藤田浩司, 岩前篤, 松下敬幸, 中川浩, 横山弘嗣, 石津京二: 潜熱蓄熱材を用いた蓄熱型床下暖房に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第63巻, 第626号, 479-486, 2008年4月
- 12) 長野克則, 武田清香, 持田徹, 嶋倉一實, 中村卓司: 粒状潜熱蓄熱材を適用した躯体蓄熱床吹出し空調システムに関する研究: 第1報 小型実験システムの構築およびその蓄放熱特性, 日本建築学会環境系論文集, 第69巻, 第579号, 21-28, 2004年3月

-
- 13) 石田建一: 潜熱蓄熱パネルを用いたふく射冷房シミュレーション, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.1041-1044, 1994年10月
 - 14) K. Darkwa and P. W. O Callaghan: Simulation of phase change drywalls in a passive solar building, Applied Thermal Engineering, Vol. 26, Issue 8-9, pp. 853-858, June 2006
 - 15) Ylenia Cascone and Marco Perino: Estimation of the thermal properties of PCMs through inverse modelling, Energy Procedia, Vol. 78, pp. 1714-1719, Nov. 2015
 - 16) Vasken Dermardiros, Yuxiang Chen and Andreas K. Athienitis: Modelling of an active PCM thermal energy storage for control applications, Energy Procedia, Vol. 78, pp. 1690-1695, Nov. 2015
 - 17) Helmut E. Feustel: Simplified Numerical Description of Latent Storage Characteristics for Phase Change Wallboard, May 1995
 - 18) 井口雅登, 坂本雄三: 温熱シミュレーションによる熱負荷の分析, 日本建築学会環境系論文集, 第78巻, 第694号, 939-945, 2013年12月

注

注 1) 厳密には相変化に伴う熱容量の変化に関する誤差補正だけでなく熱伝導率の変化に関しても誤差補正を行う必要がある。しかし、この誤差は以下に示すように極めて小さい。例えば本稿図 4-5 の Case A の構成において、PCM からフローリングへの熱抵抗は、固相では $0.081 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ 、遷移相では $0.074 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ である。従って、相変化を無視することの熱流の誤差は約 10% となる。一方、本モデルではタイムステップを 1 秒としており、仮に PCM とフローリングの温度差が $10 \text{ }^\circ\text{C}$ であったとしても、1 秒あたりの温度変化は $0.018 \text{ }^\circ\text{C}$ となる（フローリングの熱容量は $7.5 \text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ）。従って、このときに熱流の誤差がもたらす温度変化の誤差は $0.0018 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度である。加えて、このような誤差の正負は相変化の方向によって逆となり打ち消し合うため、計算の進行によって大きく蓄積するものではない。以上の理由により、本研究では上記の誤差補正は省略した。

注 2) 無次元数の計算のためには熱媒の温度などが必要となる。厳密な値を得るためには各タイムステップにおいて収束計算を行う必要があるが、本モデルではタイムステップを 1 秒としており、誤差は小さいと予想できるため、前タイムステップ（1 秒前）の温度を用いることとした。

注 3) 本研究で狙う運用は以下のとおりである。燃料電池やソーラーパネルなどの分散型エネルギーや再生可能エネルギーの積極的な導入が推奨されており、今後は需要家へのエネルギーフローを考慮したシステムの開発が不可欠となると考えられる。この問題に対しては需要家がエネルギーの供給量に応じて需要量を変動させるデマンドレスポンスによる負荷調整が期待されている。本研究では、比較的短い時間のピークシフトを目的に PCM による蓄放熱を行うことを前提としているため、蓄熱時間帯は居住者の在室時間帯となり、設計上は室温を一定値として取り扱う。従って、本文に記載の外出時の蓄熱という運用や、あるいは、安価な深夜電力の活用を目的に就寝時に自然室温の中で蓄熱を行い、起床後の放熱を期待するような運用の場合には、本図はそのままでは利用できない。

5章 室内環境自動制御技術の開発

5.1 はじめに

省エネや家庭内エネルギー制御の高度化へ向け、HEMS の導入が進められている。経産省が普及に向けた各種施策にもかかわらず、現時点で HEMS そのものが広く普及したとは言えない状態にあり、また機能的にも見える化が主体の状況である。今後、電力小売り自由化など周辺状況の進展にも伴い、家庭内エネルギー分析・制御に対するニーズが高まる事が想定される中、HEMS と接続される家電機器については、宅内標準通信プロトコルである ECHONET Lite^{1~4)}を装備した機器、もしくはアダプタの追加などにより後から対応可能とした機器が広く市販される状況となっており、市場側は HEMS による機器制御導入に対して“レディ”の状態と言える。しかし、ECHONET Lite では、同種機器（例：家庭用エアコン）においても、取得できる情報、制御できる内容が異なるケースが多い為、自動制御の実現へ向けては、実際の市販機器における実装内容の把握が必要である。

制御対象に関しては、一般家庭におけるエアコンのエネルギー消費量割合は比較的高く、宅内のエネルギー制御においてエアコンの制御手法は重要になると考えられる。省エネが求められる中で、季節や時間による環境の変動に合わせた制御が必要であることに加えて、これらは人間の心理（温熱感や気流感）や健康性に大きく影響することから、制御の目標を人間の心理や健康性に置くことが生活の質を高める上で重要と考えられる。本研究では、ECHONET Lite 対応家電機器の実装状況調査と ECHONET Lite 機器搭載センサによる環境計測、および人体に対する過酷温熱環境の検討と前述計測データによる過酷温熱環境の検出と機器の自動制御を行ったうえで、ECHONET Lite 機器および ECHONET Lite 非対応の機器を含めて計測・制御を行い、快適性と消費電力低減の高次元での同時達成をすることが目的である。居住者が家電を操ることで、人間の行動を加味しながら、非定常・不均一な温熱環境を操る技術を確立することを目指した。また、居住者が操作出来ない領域に過酷温熱環境の検出と機器の自動制御の機能を組み込むことでフルプルーフを担保した。

5.2 研究方法

早稲田大学 EMS 新宿実証センター、および早稲田大学で利用する実験住宅に導入済みの市販 ECHONET Lite 対応エアコンおよび市販 ECHONET Lite 対応スマートタップについて、HEMS-GW との接続により実装プロパティを調査する。

文献調査、および人体熱モデルによる解析から、暑熱環境、寒冷環境における危険回避に対応した家電動作のための閾値を検討する。上述のセンサについて情報の利用可否、有効性確認に関する実験を行った上で、センサ情報を用いて寒冷環境における家電動作閾値判定のアルゴリズムを試作し、ECHONET Lite 実機器を用いて実験を行う。

次に、生活者の消費電力パターンをもとに、1秒単位で計測した家電機器の消費電力データをマージすることで、消費電力のピークを可視化する。これらの波形から電力の制約条件を決め、その制約条件を超えない制御アルゴリズムを作成し、実験によって有効性と問題点を確認する。

5.3 実験住宅概要

早稲田大学 EMS 新宿実証センターの見取り図を図 5-1 に示す。実証センターには、4軒のスマートハウスが有り、各々に独立した設備が備え付けられている。

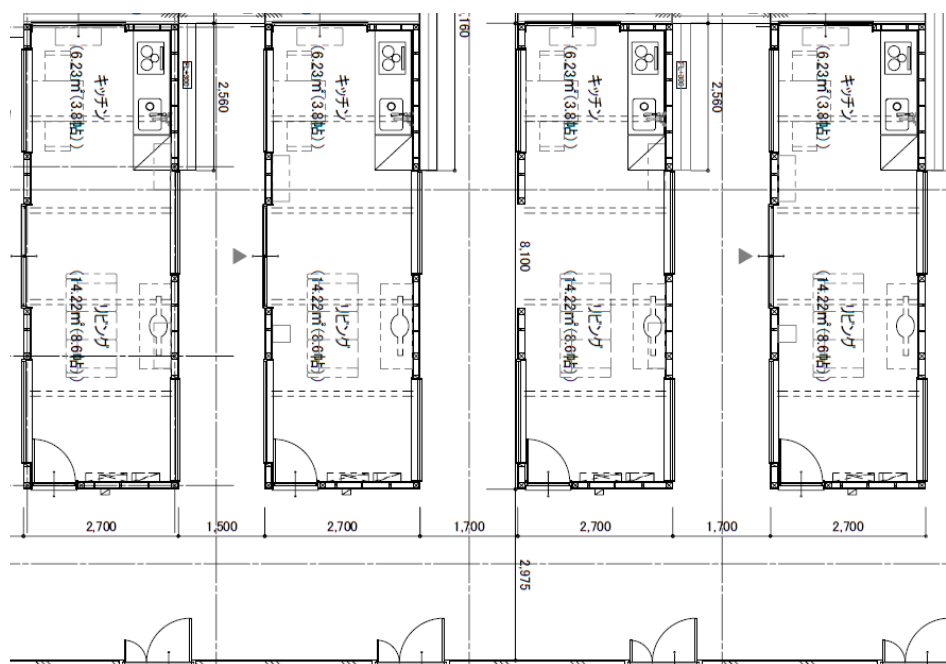


図 5-1 早稲田大学 EMS 新宿実証センターの見取り図

5.3.1 市販 ECHONET Lite 機器の実装プロパティ調査

市販品機種で、ECHONET Lite 接続可能な製品について、実装プロパティの調査を行った。ここでは、調査対象機種と調査結果について記述する。なお、調査方法は、各機器個別に電源を接続し、実際に動作させた上で HEMS からネットワーク経由で実装プロパティを確認する方式に依っている。（通信接続確認を兼ねて実施）

ECHONET Lite では、規格上多くのプロパティが定義されているが、実装必須のものは少なく、多くはメーカー判断での実装となっている。しかし、これまでメーカー間の実装状態の差を明らかにした例は少ないため、保有機種の実装プロパティを調査した。

以下に、エアコンについて、実装プロパティ調査結果をまとめる。

1) 調査対象機種

調査対象エアコンの一覧を、表 5-1 に示す。

表 5-1 調査対象エアコン

設置場所	メーカー	記号
新宿実証センター	D 社	A
	T 社	B
	T 社	C
実験住宅	T 社	D
	D 社	E
	S 社	F
	F 社	G
	D 社	H

2) 実装プロパティ一覧

以下、エアコン8機種、各々の実装プロパティ一覧を、

- ・ プロファイルオブジェクトスーパークラス (表 5-2)
- ・ ノードプロファイルクラス (表 5-3)
- ・ 機器オブジェクトスーパークラス (表 5-4)
- ・ 家庭用エアコンクラス (表 5-5)

の順に示す。表の記載方法は、ECHONET Lite 規格 (Ver1. 12 及び、機器オブジェクト詳細規定 Release G Revised) で規定されているプロパティ一覧中に各機器の実装有無を示している。(実装有り=“○“) なお、上記の表の順序、及び実装有無の表示方法は、以下の他機種も同様である、

表 5-2 プロファイルオブジェクトトスーパークラス一覧

No	プロパティ名称	EPC	プロパティ内容	アクセス	必須	実装有無 (機種記号は表 5-1 参照)							
						A	B	C	D	E	F	G	H
1	異常発生状態	0x88	異常発生有無	Get							○	○	
2	メーカーコード	0x8A	コンソーシアム規定	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	事業場コード	0x8B	メーカー毎指定	Get		○					○		
4	商品コード	0x8C	メーカー毎指定	Get		○					○		
5	製造番号	0x8D	メーカー毎指定	Get		○	○	○	○				
6	製造年月日	0x8E	YYMD 形式	Get		○							
7	状態アナウンス プロパティマップ	0x9D	(規格参照)	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8	Set プロパティ マップ	0x9E	(規格参照)	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9	Get プロパティ マップ	0x9F	(規格参照)	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○

表 5-3 ノードプロファイルクラス一覧

No	プロパティ名称	EPC	プロパティ内容	アクセス	必須	機種記号 (表 5-1 参照)							
						A	B	C	D	E	F	G	H
1	動作状態	0x80	装置の ON/OFF	Set/Get	Get ○	○	○	○	○	○	○	○	○
2	規格 Version 情報	0x82	ECHONET Lite バージョン情報	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	識別番号	0x83	下位層 ID+メーカー規定	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4	異常内容	0x89	(規格参照)	Get		○				○	○	○	○
5	個体識別情報	0xBF	(規格参照)	Set/Get		○	○	○	○	○			○
6	自ノードインスタンス数	0xD3	自ノード保持のインスタンスリスト数	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
7	自ノードクラス数	0xD4	自ノード保持クラス数	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8	インスタンスリスト通知	0xD5	インスタンス構成変化時のインスタンスリスト	Anno	○	注	注	注	注	注	注	注	注
9	自ノードインスタンスリスト S	0xD6	インスタンスリスト	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10	自ノードクラスリスト S	0xD7	クラスリスト	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注) 0xD5 は, 未確認. (確認試験は, HEMS からの Get コマンドにより実施)

表 5-4 機器オブジェクト スーパークラス一覧

No	プロパティ名称	EPC	プロパティ内容	アクセス	必須	機種記号 (表 5-1 参照)							
						A	B	C	D	E	F	G	H
1	動作状態	0x80	装置の ON/OFF	Set/Get	Get	○	○	○	○	○	○	○	○
2	設置場所	0x81	設置場所	Set/Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	規格 Version 情報	0x82	APENDIX リリース番号	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4	識別番号	0x83	下位層 ID+メーカー規定	Get					○		○	○	
5	瞬時消費電力計測値	0x84	瞬時消費電力 (W)	Get			○	○	○	○	○	○	○
6	積算消費電力計測値	0x85	積算消費電力 (Wh)	Get		○		○	○	○	○	○	○
7	メーカー異常コード	0x86	メーカー毎規定	Get			○	○	○		○		
8	電流制限設定	0x87	電流制限設定 (%)	Set/Get			○						
9	異常発生状態	0x88	異常発生の有/無	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10	異常内容	0x89	(規格参照)	Get		○	○	○	○	○	○	○	○
11	メーカーコード	0x8A	コンソーシアム規定	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12	事業場コード	0x8B	メーカー毎規定	Get		○	○	○	○		○	○	
13	商品コード	0x8C	メーカー毎規定	Get		○	○	○	○		○	○	
14	製造番号	0x8D	メーカー毎規定	Get		○						○	
15	製造年月日	0x8E	YYMD 形式	Get		○	○	○	○				
16	節電動作設定	0x8F	節電動作の状態	Set/Get				○	○		○	○	
17	遠隔操作設定	0x93	公衆回線経由有/無	Set/Get					○				
18	現在時刻設定	0x97	HHMM 形式	Set/Get								○	
19	現在年月日設定	0x98	YYYYMMDD 形式	Set/Get								○	
20	電力制限設定	0x99	制限設置値 (W)	Set/Get				○	○				
21	積算運転時間	0x9A	(規格参照)	Get			○	○	○				
22	SetM プロパティマップ	0x9B	(規格参照)	Get	○	注	注	注	注	注	注	注	注
23	GetM プロパティマップ	0x9C	(規格参照)	Get	○	注	注	注	注	注	注	注	注
24	状態アナウンスプロパティマップ	0x9D	(規格参照)	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
25	Set プロパティマップ	0x9E	(規格参照)	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
26	Get プロパティマップ	0x9F	(規格参照)	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○

表 5-5 機器オブジェクト 家庭用エアコンクラス

No	プロパティ名称	EPC	プロパティ内容	アクセス	必須	機種記号 (表 5-1 参照)							
						A	B	C	D	E	F	G	H
1	動作状態	0x80	装置の ON/OFF	Set/Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2	節電動作設定	0x8F	節電動作状態	Set/Get	○			○	○		○	○	
3	運転モード設定	0xB0	自動/冷房/暖房/除湿/送風/その他	Set/Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4	温度自動設定	0xB1	Auto/非 Auto 設定	Set/Get								○	
5	急速動作モード設定	0xB2	通常/急速/静音	Set/Get									
6	温度設定値	0xB3	設定値	Set/Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
7	除湿モード時 相対湿度設定値	0xB4	設定値	Set/Get		○	○	○	○	○			
8	冷房モード時 温度設定値	0xB5	設定値	Set/Get									
9	暖房モード時 温度設定値	0xB6	設定値	Set/Get									
10	除湿モード時 温度設定値	0xB7	設定値	Set/Get									
11	定格消費電力値	0xB8	冷房/暖房/除湿/ 送付氏消費電力 (W)	Get									
12	消費電流計測値	0xB9	計測値	Get			○	○	○				
13	室内相対湿度計 測値	0xBA	計測値	Get		○	○	○	○	○	○		
14	室内温度計測値	0xBB	計測値	Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
15	ユーザリモコン 温度設定値	0xBC	設定値	Get									
16	吹き出し温度計 測値	0xBD	計測値	Get									
17	外気温度計測値	0xBE	計測値	Get		○	○	○	○	○	○	○	○
18	相対湿度設定値	0xBF	設定値	Set/Get									
19	風量設定	0xA0	8段階で設定	Set/Get	○	○	○	○	○	○	○	○	○
20	風向自動設定	0xA1	上下・左右の Auto/非 Auto 設 定	Set/Get							○		
21	風向スイング設 定	0xA3	スイング上下・ 左右の設定状態	Set/Get		○	○	○	○	○		○	○
22	風向上下設定	0xA4	5 パターンで設 定	Set/Get									
23	風向左右設定	0xA5	31 パターンで設 定	Set/Get									
24	特殊状態	0xAA	状態	Get									
25	非優先状態	0xAB	状態	Get									
26	換気モード設定	0xC0	排気/OFF/吸気	Set/Get			○	○					
27	加湿モード設定	0xC1	設定	Set/Get									

28	換気風量設定	0xC2	風量レベル	Set/Get													
29	加湿量設定	0xC4	加湿量レベル	Set/Get													
30	搭載空気清浄方法	0xC6	電気集塵・クラスタイオン	Get			○	○	○			○					
31	空気清浄機能モード設定	0xC7	方式毎設定	Set/Get			○	○	○								
32	搭載リフレッシュ方法	0xC8	マイナスイオン/クラスタイオン	Get			○	○									
33	リフレッシュ機能モード設定	0xC9	方式毎設定	Set/Get													
34	搭載自己洗浄方法	0xCA	オゾン洗浄/乾式	Get													
35	自己洗浄機能モード設定	0xCB	方式毎設定	Set/Get					○								
36	特別運転モード設定	0xCC	状態	Set/Get												○	
37	内部動作状態	0xCD	コンプレッサ/サーモ状態	Get													
38	強制サーモモード設定	0xCE	設定	Set/Get													
39	空気清浄モード設定	0xCF	設定	Set/Get									○				
40	ON タイマ予約設定	0x90	予約入/切	Set/Get		○	○	○	○								
41	ON タイマ時刻設定値	0x91	設定値	Set/Get													
42	ON タイマ相対時間設定値	0x92	設定値	Set/Get		○	○	○	○								
43	OFF タイマ予約設定	0x94	予約入/切	Set/Get		○	○	○	○								
44	OFF タイマ時刻設定値	0x95	設定値	Set/Get													
45	OFF タイマ相対時間設定値	0x96	設定値	Set/Get		○	○	○	○								

注) 一部, SetM/GetM (配列対応) コマンドに対応したプロパティがあるが, ECHONET 時のみの対応であり ECHONET Lite では非対応の為, 表からは SetM/GetM 表記を削除した.

5.3.2 プロパティデータ取得事例

ここでは、今回調査した2機種について、機器オブジェクトの Get に対して、実際に機器側から送信されたデータの例を記す。

表 5-6 にエアコン機種 E, 表 5-7 にエアコン 機種 F のプロパティデータ取得例を示す。機器オブジェクト単位の為、スーパークラスと個別機器クラスをまとめて収集しており、表記方法もデータに則りまとめて記載している。準拠する APPENDIX の番号などの違い、実装内容の違いが見られる。

表 5-6 エアコン機種 E プロパティデータ取得例

EPC	EPC_Description	EDT	EDT_Description
0x80	動作状態	0x31	OFF=0x31
0x81	設置場所	0x00	未設定
0x82	規格 version 情報	0x00004300	Ver. C
0x83	識別番号	0xfe000008fcc2de445fde00000000000000	
0x84	瞬時消費電力計測値	0x0064	100W
0x85	積算消費電力計測値	0x00000000	0Wh
0x88	異常発生状態	0x42	0x42 異常無し
0x89	異常内容	0x0000	
0x8A	メーカーコード	0x000008	
0x9D	状態アナウンスプロパティマップ	0x04808188b0	
0x9E	Set プロパティマップ	0x078081a0a3b0b3b4	
0x9F	Get プロパティマップ	0x140d01010d090100000101090800020a02	
0xA0	風量設定	0x41	自動=0x41
0xA3	風向スイング設定	0x31	スイング OFF=0x31
0xB0	運転モード設定	0x41	自動=0x41
0xB3	温度設定値	0xfd	設定温度 29 度
0xB4	除湿モード時相対湿度設定値	0x32	50%
0xBA	室内相対湿度計測値	0x32	50%
0xBB	室内温度計測値	0x1a	26 度
0xBE	外気温度計測値	0x7e	0x7E=計測値返信不可

表 5-7 エアコン機種 F プロパティデータ取得例

EPC	EPC_Description	EDT	EDT_Description
0x80	動作状態	0x31	OFF=0x31
0x81	設置場所	0x00	未設定
0x82	規格 version 情報	0x00004500	Ver.E
0x84	瞬時消費電力計測値	0x0001	1W
0x85	積算消費電力計測値	0x00000000	0Wh
0x86	メーカー異常コード	0x080000050000000000000000	各メーカー毎規定
0x88	異常発生状態	0x42	0x42：異常無し
0x89	異常内容	0x0000	
0x8A	メーカーコード	0x000005	
0x8B	事業場コード	0x313034	各メーカー毎規定
0x8C	商品コード	0x41592d453232455800000000	各メーカー毎規定
0x8F	節電動作設定	0x42	0x42：通常動作
0x9D	状態アナウンスプロ パティマップ	0x0e80818688898fa0a1b0b3cff1f2f3	
0x9E	Set プロパティマップ	0x0880818fa0a1b0b3cf	
0x9F	Get プロパティマップ	0x1f8d858188818191000101090901020a13	
0xA0	風量設定	0x41	自動=0x41
0xA1	風向自動設定	0x41	Auto=0x41
0xB0	運転モード設定	0x41	自動=0x41
0xB3	温度設定値	0x19	設定温度 26 度
0xB A	室内相対湿度計測値	0x35	0-100%
0xBB	室内温度計測値	0x1a	26 度
0xBE	外気温度計測値	0x7e	0x7E=計測値返信 不可
0xC6	搭載空気清浄方法	0x02	0x02= クラスタ イオン方式のみ搭 載
0xCF	空気清浄モード設定	0x42	OFF=0x42
0xF0	カスタム	0x041622a1150041000000000000000000 00000000000000000000000000000000	
0xF1	カスタム	0x3141	
0xF2	カスタム	0x3131	
0xF3	カスタム	0x3131	
0xF4	カスタム	0x00000000	
0xF5	カスタム	0x00000000	
0xF6	カスタム	0x00000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000000	

5.4 過酷環境制御システム

ECHONET Lite 機器および ECHONET Lite 非対応の機器を含めての計測・制御を行うにあたり、居住者が操作を誤っても危険が生じないように、また危険な使い方ができないような構造とするために、過酷温熱環境の検出と機器の自動制御を組み込む必要がある。たとえば、季節や時間による環境の変動に合わせた制御が必要であるにもかかわらず、居住者が高齢の場合、皮膚感覚の低下により過酷環境であることに気づかない場合が考えられる。特に、温熱環境は人の心理（温熱感や気流感）や健康性に大きく影響することから、制御の目標を人の心理や健康性に置くことが生活の質を高める上で重要と考えられる。歴史をたどると様々な温熱環境の指標が提唱されているが、近年の真夏日の増加と省エネ意識の高まり等から、過酷な温熱環境による熱中症などの健康被害を回避するための制御についても必要性も高まっている。

5.4.1 熱中症の概要

熱中症は高温環境下で、体内の水分や電解質である塩分（ナトリウムなど）のバランスが崩れ、体温調節機能の破綻などにより発症する障害の総称である。図 5-2 に体温調節機能のメカニズムを示す。平常時の体温調節は深部体温の上昇を感知した場合、発汗と蒸発によって体の熱を奪い去る形で熱を放散させる。また、四肢部位、皮膚表面の血流を増加させて熱伝達を行い、顕熱として熱を放散する。熱放散によって深部体温の過度の上昇を抑え、一定の温度を保持する。体温調節機構に異常がある場合、脱水によって汗がかけない状態となる。

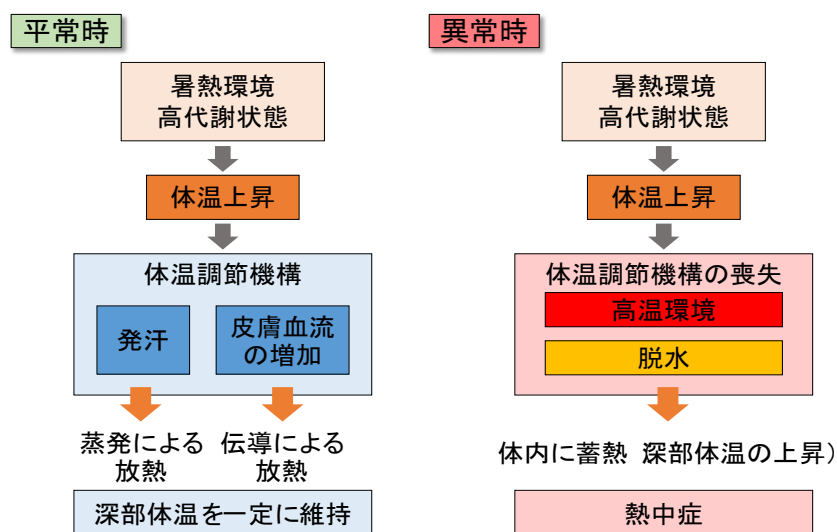


図 5-2 体温調節機能のメカニズム

表 5-8 に熱中症の症状と重症度分類を示す。高温環境の場合、熱が放散されず深部体温が上昇することで熱中症となり、様々な症状が現れる。熱中症は症状別に重症度が分類される。1度で熱ストレス熱失神・熱痙攣などの症状を引き起こし、2度が熱疲労、3度で熱射病となる。環境省「熱中症保険マニュアル」⁵⁾に記載されている。

表 5-8 熱中症の症状と重症度分類

分類	I 度	II 度	III 度
症状	めまい・失神 「立ちくらみ」という状態で、脳への血流が瞬間的に不十分になったことを示す 筋肉痛・筋肉の硬直 筋肉のこむら返りであり、発汗に伴う塩分の欠乏により生じる 手足のしびれ・気分の不快	頭痛・吐き気・嘔吐・倦怠感・虚脱感 体がぐったりする、力が入らないなど いつもと様子が違う程度のごく軽い意識障害を認めることがある	II度の症状に加え 意識障害・けいれん・手足の運動障害 呼びかけや刺激への反応がおかしい 全身のけいれん、真直く走れない・歩けない 高体温 体に触ると熱いという感触。肝機能異常、腎機能障害、血液凝固障害
診断	熱ストレス（総称）、熱失神、熱けいれん	熱疲労	熱射病

熱中症発生リスクの指数として湿球黒球温度（WBGT）が用いられる。WBGTは乾球温度、自然湿球温度、黒球温度より求めた空気温度、湿度、放射温度の三点を加味して屋外・屋内の温熱環境を評価する指標である。WBGTは熱中症発生リスクと相関が高く、環境省の熱中症予防情報や日本体育協会のガイドラインに採用されている。WBGTの算出式を式(1)、式(2)に示す。WBGTが25℃未満であれば、熱中症リスクは低いとされる。28℃以下であれば中等度以上の活動や激しい運動の際は十分な休息と水分補給が推奨される。28℃~31℃の場合、室内にいても室温の上昇に注意しなければならない。31℃以上の場合、高齢者においては安静にしているだけでも熱中症となる可能性があるため、外出はなるべく避け、空調利用を適切に行い、涼しい環境で過ごすことが推奨されている。夏季の東京ではWBGTが31℃以上になることも多く、熱中症のリスクが高いといえる。熱中症発生リスクの目安を表5-9に示す。

$$WBGT（屋内） = 0.7T_w + 0.3T_g \tag{1}$$

$$WBGT（屋外） = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T \tag{2}$$

T：乾球温度(℃)

T_w：自然湿球温度(℃)

T_g：黒球温度(℃)

表 5-9 熱中症発生リスクの目安

温度基準	生活活動の目安	注意事項
危険 (31℃以上)	すべての生活活動でおこる危険性	高齢者においては 安静状態でも発生 する危険性が大きい 外出はなるべく避け、 涼しい室内に移動 する
嚴重警戒 (28~31℃)		外出時は炎天下を避け、 室内では室温の上昇 に注意する
警戒 (25~28℃)	中等度以上の生活活動でおこる危険性	運動や激しい作業をする際は定期的に 十分に休息 を取り入れる
注意 (25℃未満)	強い生活活動でおこる危険性	一般に危険性は少ないが激しい運動や重労働時には発生する危険性がある

5.4.2 寒冷環境におけるリスク

急速な血管収縮により血圧が大きく上下し、失神・不整脈・心不全・脳梗塞を起こすリスクが高まる。特に冬期の風呂場など暖房されていない環境で発生リスクが高い。血圧上昇に関しては既往研究^{6,7)}により、室温が10℃低下すると収縮期の血圧が4.3mmHg高くなることが指摘されている。起床時に血圧が一時的に上昇するモーニングサージは室温に関係なく見られる現象である。起床時は一過性の血圧上昇が見られる。室温が低い時、モーニングサージが大きくなってしまいう事例が知られている。これによって脳梗塞・心不全のリスクが高まっていることが指摘されている。

イギリス保健省は冬期室内温度指針を報告⁸⁾している。指針では冬期昼間居室の推奨温度の下限を21℃、許容温度の下限を18℃としている。夜間就寝時の最低推奨環境は18℃であるとしている。上記の温度を下回る場合、疾患のリスクが高まるとしている。

16℃で呼吸器系疾患、12℃血圧上昇や心疾患、5℃低体温症のリスクが懸念されるため、16℃がリスク判断の目安となる。深刻なリスクである低体温症は、深部体温・コア温度が35℃以下に低下した場合に認定される。寒冷環境で体から熱が奪われ、熱産生が追い付かない状態、熱産生量が低下した状態、体温調節機能が低下した高齢者に多く見られる。重症度別に3度で分類され、軽度では震えによる熱産生、運動失調の症状が現れる。深部体温が32℃以下になると震えによる熱産生ができなくなり、心室細動、心拍数の低下が起きる。深部体温が28℃以下になると筋肉の硬直、心拍数の低下、低血圧、心不全となる。

5.4.3 JOS-2による温熱環境調整による機器の自動制御手法

過酷温熱環境による人体への影響を最小限に抑える JOS-2 制御ロジック⁹⁾について述べる。JOS-2 は、JOS (2002) を基に、特に頭部皮膚温の非定常過程における予測精度の向上を図ったモデルである。本モデルは、人体部位別着衣量、代謝量、各部位の温熱環境 4 要素により設定される曝露環境条件を入力することにより、皮膚温・コア温・ぬれ面積率などの生理反応を数値計算により予測する。

非定常・不均一温熱環境における人間の心理反応は、皮膚温やコア温、顕熱損失量の時間変化率が大きな影響を与える可能性が高いと考えられている。すなわち、ある非定常・不均一な温熱環境での心理反応を評価するには、一度生理反応予測を介する必要があると言える。そのため生理反応の動的変化の予測が必要不可欠であると言える。

(1) 暑熱環境の空調起動の目安時間

体水分量が 1 %減少するとどのの渴きを感じ、水分補給を行う。高齢者は加齢による口渴中枢の機能低下により、どのの渴きを感じにくく、脱水症状を自覚しにくい。加えて、高齢者は腎機能の低下による水分・電解質の再吸収量の減少、食事量の低下による摂取水分量の減少、トイレの回数を減らすことなど諸要因により水分を摂らない傾向があり、脱水症状に陥りやすい。このような背景より、高齢者の熱中症リスクを低減させるためには、自覚症状が出る前に空調起動や水分補給を促す必要性がある。人体熱モデルを用いて温熱環境の条件別に体水分量が 1 %減少するまでの時間を試算した。その結果、35 °C条件で 180 分間、30 °C条件で 330 分間の暴露により、体水分量の 1 %を失う結果となった。高齢に伴う体温調節機能の低下を考慮して、人体熱モデルの試算値よりも時間を短縮し、35 °C条件で 150 分間、30 °C条件で 300 分間暴露し続けた状態を目安とした。

(2) 寒冷環境の空調起動の目安時間

寒冷環境暴露時の深部体温の変動について、人体熱モデルを利用して予測し、空調起動条件の目安を検討した。温熱環境の条件を 10 °C として暴露しつづけた状態で試算した結果、寒冷曝露開始後 70 分間の体温低下幅が大きく、温度、ふるえ産熱能力によらず同様の傾向が示された。また、70 分以降は緩やかに減少し定常状態に至るため、体温が冷え切る前に温める必要があるといえる。そのため、寒冷環境側の空調起動の目安は体温の低下量・低下の勾配を指標とした。本研究においては 10 °C 以下が 70 分続いた場合を空調起動の目安とした。

(3) 体温回復に要する時間

暑熱環境・寒冷環境に暴露された後に実際に体温が回復するまでにかかる時間を人体熱モデルにおいて検討を行った。暑熱環境では 90 分までが回復量が大きく、その後徐々に定常に至ることが示された。また、寒冷環境では 250 分までが回復量が大きく、その後徐々に定常に至ることが示された。そのため、本研究では暑熱環境では危険域となる時間に加え 90 分、寒冷環境では 250 分までを積算する時間とし、より安全側の評価を行うこととした。図 5-3 に環境温度の変化時における体温変動の経時変化を示す。

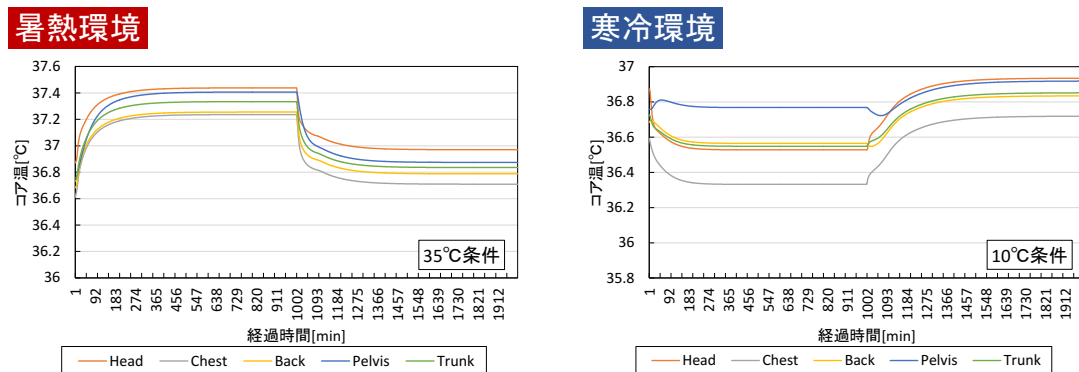


図 5-3 環境温度の変化時における体温変動の経時変化

室温変動の中で30℃を超えた時間とその時の温度による絶対量を積算し、空調起動の判定を行う。積算値が規定を超えた段階で空調を強制的に起動する制御とした。図5-4に積算対象の絶対量の概念図を示す。

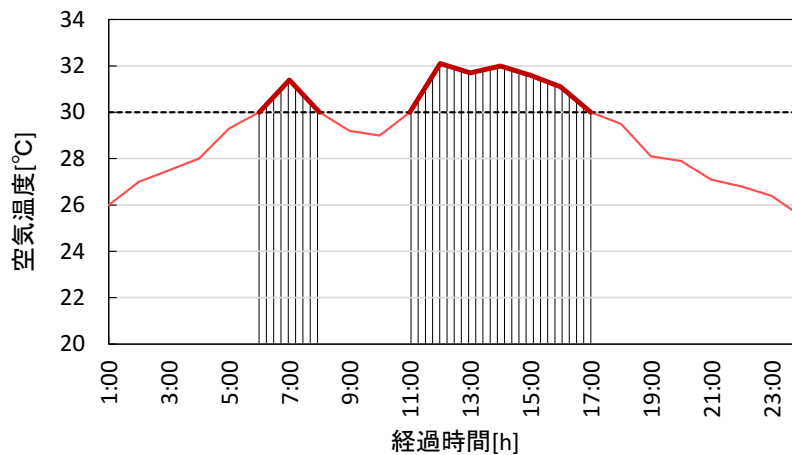


図 5-4 環境温度の変化時における体温変動の経時変化

温度帯により単位時間当たりの生理負担は異なる。各温度帯別に生理的負担の閾値は異なるため、生理負担の変化に合わせて積算する値を補正する必要がある。本研究では閾値を一点に定める補正係数を掛け合わせることで、リスク評価の絶対量を算出した。温度帯によって閾値が異なるため、閾値を一点に定めるように重み付けを行った。気象庁は一日の最高気温が30℃以上の日を真夏日と定義しているため、本研究では30℃の場合の閾値を基準とした。空気温度が30℃の場合300分で閾値に達するため、閾値絶対量は30℃×300分=9000とした。寒冷側も同様に積算を行い閾値絶対量を9000とした。まず、代表3点（30℃：300分、35℃：150分、40℃：60分）における温度と空調起動時間を人体熱モデルより決定した。次に代表3点（30℃：9000、35℃：5250、40℃：2400）における起動に至るまでの絶対量を算出した。その後、30℃における絶対量9000と等しくなるよう各温度別の係数（30℃：1.00、35℃：1.71、40℃：3.75）を決定し、3点の係数よりもっとも相関の高い近似式を算出した。表5-10に補正係数試算条件を、図5-5、表5-5に空気温度毎の補正係数を示す。

表 5-10 補正係数試算条件

寒冷		暑熱	
閾値絶対量	1800	閾値絶対量	9000
絶対量 Q_{cold}	$Q_{cold} = T * A * \text{min}$	絶対量 Q_{warm}	$Q_{warm} = T * B * \text{min}$
補正項A	$A = 1243.6T^{-2.648}$	補正項B	$B = 0.0182e^{0.1322T}$

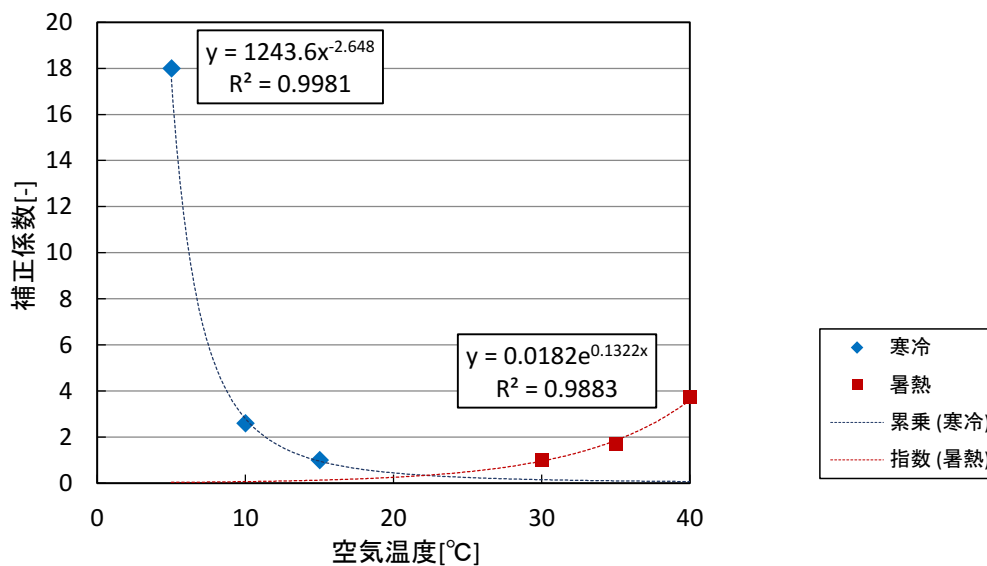


図 5-5 空気温度毎の補正係数

表 5-11 補正係数試算条件

寒冷環境		暑熱環境	
空気温度	補正係数A	空気温度	補正係数B
0.0	0.00	30.0	0.96
0.5	7764.14	30.5	1.03
1.0	1243.00	31.0	1.10
1.5	425.66	31.5	1.17
2.0	199.00	32.0	1.25
2.5	110.34	32.5	1.34
3.0	68.15	33.0	1.43
3.5	45.34	33.5	1.53
4.0	31.86	34.0	1.63
4.5	23.34	34.5	1.74
5.0	17.66	35.0	1.86
5.5	13.73	35.5	1.99
6.0	10.91	36.0	2.12
6.5	8.83	36.5	2.27
7.0	7.26	37.0	2.42
7.5	6.05	37.5	2.59
8.0	5.10	38.0	2.77
8.5	4.35	38.5	2.95
9.0	3.74	39.0	3.16
9.5	3.24	39.5	3.37
10.0	2.83	40.0	3.60
10.5	2.49		
11.0	2.20		
11.5	1.95		
12.0	1.75		
12.5	1.57		
13.0	1.41		
13.5	1.28		
14.0	1.16		
14.5	1.06		
15.0	0.97		

図 5-6 に平均空気温度と空調起動時間の目安を示す。空調起動の時間平均でその温度帯が続いた場合に空調を起動する時間の目安を示す。なお、閾値の条件を調節することでより細かなチューニングが可能である。

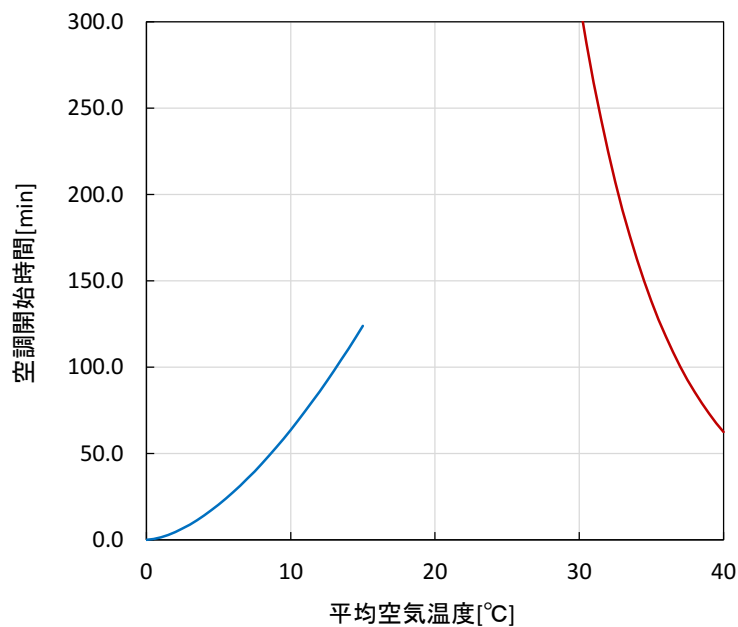


図 5-6 平均空気温度と空調起動時間の目安

5.4.4 検証システムの構成

図 5-7 に EMS 新宿実証センタースマートハウスの Room1 及び Room2 の平面図を示す。本研究では、市販エアコンが設置された EMS 新宿実証センタースマートハウスの Room1 及び Room2 を用いて検証を行った。実験スマートハウス Room1 には T 社製の市販エアコン、Room2 には D 社製の市販市販エアコンが設置されている。双方のスマートハウスには制御対象以外のエアコンも設置されているため、それらを室内環境シミュレーション用のエアコンとして、必要に応じて作動させ室内環境を構築した。また、市販エアコンは ECHONET Lite 通信機能を有しており、それらと通信制御が可能である。ホームゲートウェイをそれぞれのハウスに設置した。さらに、比較検証目的のため、室温計測用のセンサをエアコンの RA にも設置した。

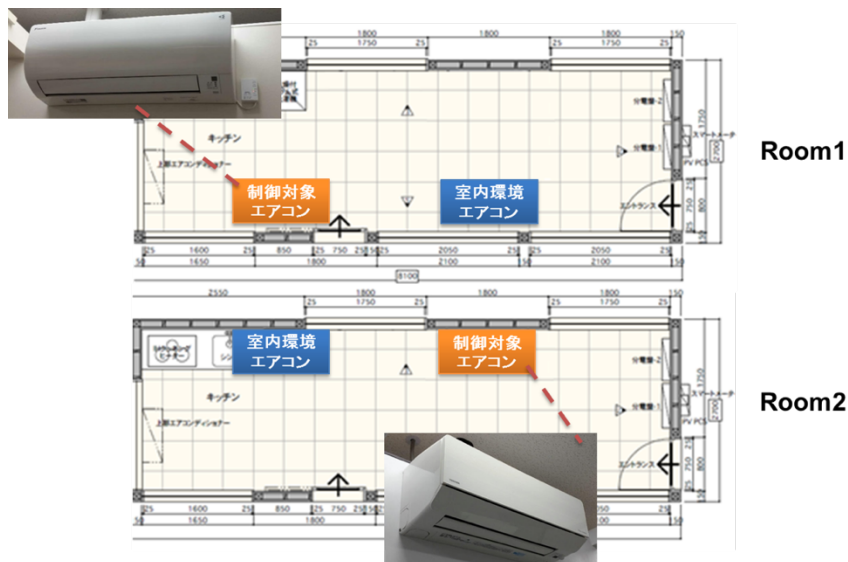


図 5-7 EMS 新宿実証センタースマートハウスの Room1 及び Room2 の平面図

5.4.5 検証用アプリケーションの構成

検証用アプリケーションは図 5-8 に記すように、ECHONET Lite 対応市販エアコン（制御対象）、ホームゲートウェイ、アプリケーションサーバ、PC/スマホ等のブラウザより構成した。ホームゲートウェイはエアコンと ECHONET Lite 通信を行い、アプリケーションサーバの情報取得・動作指令に関する通信を仲介する。アプリケーションサーバはホームゲートウェイを介してエアコンより取得した室内温度情報を元に第3章に示した絶対量計算を行い、閾値を超えた場合にエアコンへ動作指令を送信する。一方で、それら情報を Web ブラウザへ送信し、Web アプリケーションがそれら情報を用いて UI を構築する。

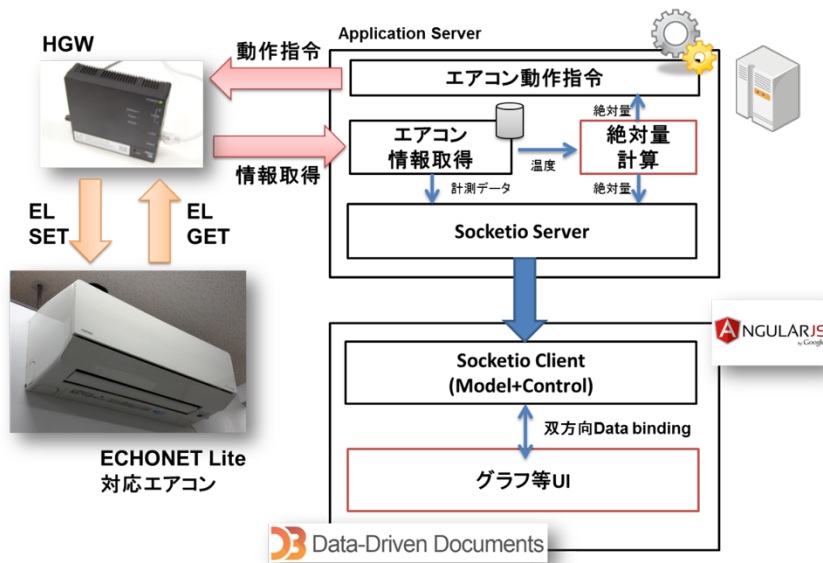


図 5-8 検証用アプリケーションのアーキテクチャ

検証用アプリケーションの Web UI では図 5-9 に記すように、過去室温の履歴、絶対量、危険度（現在絶対量 / 絶対量閾値）、現在のエアコン動作状態をイメージとして確認することが出来る。

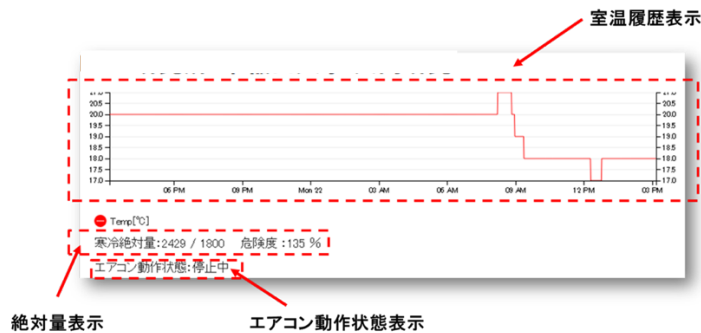


図 5-9 検証用アプリケーションのアーキテクチャ

5.4.6 評価試験

本研究では、ECHONET Lite 対応市販エアコンを用いて暑熱環境・寒冷環境時にエアコンを動作させられるかどうかのポイントとなる。そのため、まずは ECHONET Lite で取得出来るエアコンのセンサ情報の妥当性検証を行うためのセンサ評価試験を事前に行った。その上で、システム評価試験をさらに実施した。

市販エアコンのセンサ情報の妥当性を検証するために、前述したエアコン以外の温湿度センサを室内（エアコン上部とエアコン下床面）に配置した。その上で、エアコンが停止している状態、及び動作させた状態等、複数パターンの試験を実施し、エアコン自身のセンサ値と外部センサのセンサ値を比較することで、妥当性検証を行った。

5.4.7 センサ評価試験の結果・考察

図 5-10, 図 5-11 に

Room1 の温度試験

Room2 の温度試験

の順にエアコン運転の複数パターン結果を以下に記す。5.4.5 で述べたように、検証用アプリケーションの Web UI は、過去室温の履歴、絶対量、危険度（現在絶対量 / 絶対量閾値）、現在のエアコン動作状態を確認するためのものであり、本研究においてはデータを取得していないため、動作状態の確認用のインターフェイスとして実装した。各状態における「AC 動作」の値はエアコンへの設定温度を示しており、今回の実験では、段階的下降、段階的上昇、単純 ON・OFF 時の設定温度の違いなどを考慮し、各 4 パターンの計測を実施した。

Room1 エアコンに関して、概ね外部センサと同様の計測が可能なものの、エアコン始動時、温度変更時に外部センサに比べて、急速に温度変化が起こるケースがある。また、エアコン停止時に一時的にセンサ値が上昇する特徴がある。原因詳細は不明だが、エアコンの温度値を計測しているセンサの内部取り付け位置が関与していることが推測される。一方、Room2 のエアコンの温度値はエアコン動作時も含め、概ね外部センサと同様の計測が出来ている。このように状況によっては、エアコン動作中（過渡状況）のエアコンセンサ値は不正確な場合があることがわかった。しかし、エアコン停止時のセンサ値は安定計測出来ているため、本研究における絶対量計算・閾値逸脱判定に関してはエアコンセンサ値を使用可能であると判断した。

— エアコン動作 — エアコン取得温度 — エアコン吸い込み口温度 — 室温

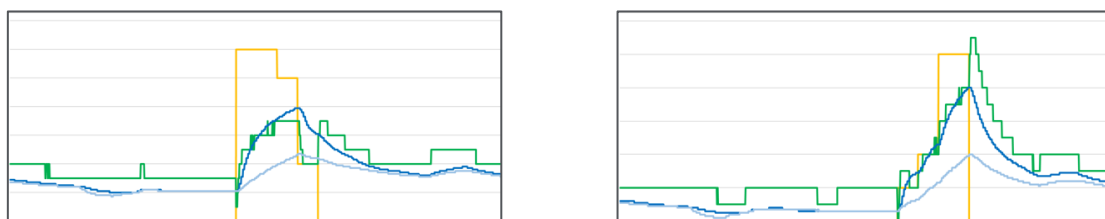


図 5-10 Room1 の温度試験

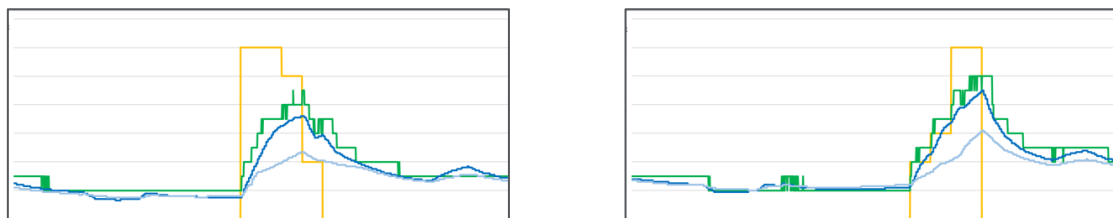


図 5-11 Room2 の温度試験

センサ評価試験の結果をうけて、エアコン自身のセンサ値を用いたシステム評価試験を Room1, Room2 の異なるメーカーの市販エアコンに対して実施した。試験時期が冬季であるため、寒冷環境におけるシステム評価とした。外部センサの配置はセンサ評価試験と同様である。

また、評価試験を実施するスマートハウスは温熱環境が良好のため、そのままの環境では寒冷環境の絶対量閾値の逸脱が困難であることが予想された。そのため、システム動作確認にフォーカスし、絶対量計算に使用する室内温度は計測室温マイナス 5℃の値を使用することとした。システム評価試験実施日の正午まで室温計測のみを行い、正午時点で計測室温マイナス 5℃の値を用いた絶対量計算及びエアコン制御機能を開始し、24 時間経過させた。

図 5-12 に空気温度と絶対量の経時変化、図 5-13 に PMV と絶対量の経時変化を示す。絶対量の上昇／下降に従い、寒冷環境の閾値である 1800 を境にエアコンの動作／停止が正常に動作していることを確認した。前述したように、Room1 と Room2 のエアコンは双方 ECHONET Lite 対応であるが、メーカーの異なる市販エアコンである。それらエアコンに対して実施したシステム評価試験における、動作ソフトウェアは完全に同一である。即ち、異なるメーカーのエアコンにおいても、本システムが機能することを確認することが出来た。市販エアコン等の機器から温度情報を取得できることで、本研究で提案して暑熱・寒冷環境の判断、PMV の近似などが可能となり、暑いあるいは寒い温熱環境を自動的に緩和することが可能になった。

— エアコン動作 — エアコン取得温度 — 絶対値

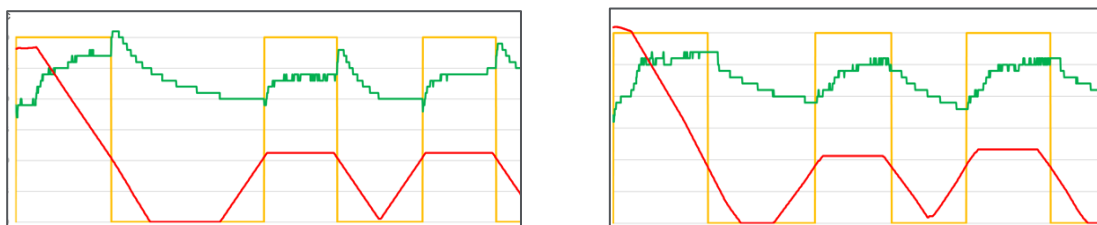


図 5-12 空気温度と絶対量の経時変化

— PMV — 絶対値

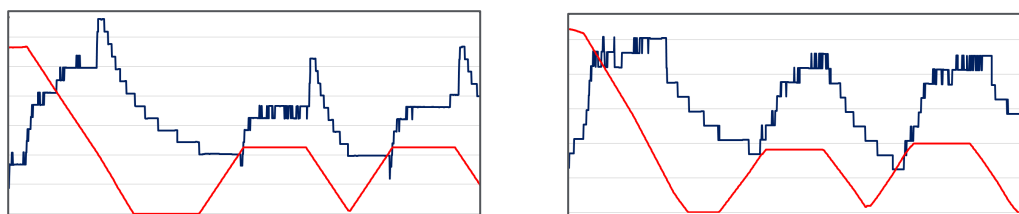


図 5-13 PMV と絶対量の経時変化

5.5 家庭内消費電力制御システム

ECHONET Lite 対応のスマートタップを用いて複数の家電の制御を行う。快適域および消費電力が、設定した閾値を超えない様にエアコンおよび複数の家電を制御するアルゴリズムを開発し、設定した快適域が狭いと家電の利用に制限があるが、快適域を比較的広く設定することでエアコンよりも家電の利用を優先できるシステムが構築できることを実証することで、人間の行動を加味しながら非定常・不均一な温熱環境を操る技術を確立することを目指す。

5.5.1 生活スケジュールの想定

検証用アプリケーションによる評価試験に向けて家庭内消費電力を模擬するため、生活スケジュール、および家庭用電気製品（以下、家電製品）に関して調査した結果と考察を述べる。

家庭内消費電力を模擬するため、家庭内での一般的な生活スケジュールを調査する必要がある。したがって本研究では、空気調和・衛生工学会が出版している生活スケジュール自動生成プログラムである『SCHEDULE Ver.2.0』¹⁰⁾ を使用し、居住者の行動スケジュールに伴う使用家電製品の種類とその使用時間帯を調査した。

『SCHEDULE Ver.2.0』とは、空気調和・衛生工学会 住宅の消費エネルギー計算小委員会・住宅用エネルギーシミュレーション小委員会によって作成された生活スケジュール自動生成プログラムである。プログラムに任意の家族構成と室構成を入力することにより、最小間隔 15 分単位で居住者の行動スケジュール及び使用家電製品、生活行為に伴う室内発熱パターン、給湯パターンを想定することを可能とする。発熱パターンとは、主に人体からの熱負荷を表す。これらの居住者の時刻別行動パターンは、NHK が 1990 年に 10 才以上の国民 90,240 人を対象として実施した「国民生活時間調査」の結果に基づき作成されているため、日本人の一般的な生活スタイルが反映されている。

本研究では一例として共働き 4 人家族の家庭内消費電力を模擬することとした。図 5-14 に共働き 4 人家族（平日）の居室別室内発熱パターン、表 5-12 に共働き 4 人家族（平日）の行動スケジュールを示す。朝夕の炊事時や洗面使用時に発熱量が高いことが示された。特に 18:00～18:30 の炊事時に合計発熱量が約 1400W となり、瞬時的な発熱量のピークが見られた。

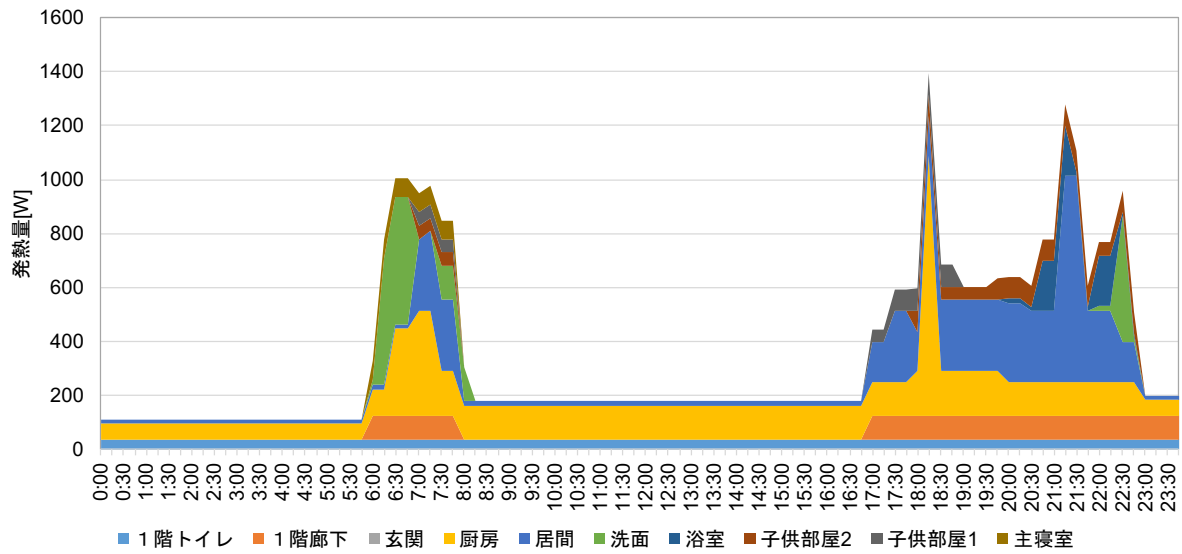


図 5-14 共働き 4 人家族 (平日) の居室別室内発熱パターン

表 5-12 共働き 4 人家族 (平日) の行動スケジュール

世帯人数		4							
世帯構成		核家族 勤め人 (男), 勤め人 (女) 子供 (中学生), 子供 (小学生)							
		勤め人 (男)		勤め人 (女)		子供 (中学生)		子供 (小学生)	
時	分	部屋名	行為	部屋名	行為	部屋名	行為	部屋名	行為
0	0	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	15	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	30	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
1	45	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	0	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	15	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
2	30	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	45	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	0	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
3	15	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	30	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	45	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
4	0	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	15	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	30	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
5	45	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	0	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	15	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
6	30	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	45	主寝室	睡眠	主寝室	睡眠	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
	0	洗面	洗顔	洗面	洗顔	子供部屋2	睡眠	子供部屋1	睡眠
7	15	居間	着がえ	居間	着がえ	洗面	洗顔	洗面	洗顔
	30	居間	テレビ	居間	テレビ	居間	テレビ	居間	テレビ
	45	居間	新聞	居間	テレビ	子供部屋2	着がえ	子供部屋1	着がえ
8	0								
	15								
	30								
9	45								
	0								
	15								
10	30								
	45								
	0								
11	15								
	30								
	45								
12	0								
	15								
	30								
13	45								
	0								
	15								
14	30								
	45								
	0								
15	15								
	30								
	45								
16	0								
	15								
	30								
17	45								
	0								
	15								
18	30								
	45								
	0								
19	15								
	30								
	45								
20	0								
	15								
	30								
21	45								
	0								
	15								
22	30								
	45								
	0								
23	15								
	30								
	45								

5.5.2 家庭用電気製品の消費電力

前項で作成された共働き 4 人家族の生活スケジュールにおいて使用が想定される家電製品に対し、実際の製品を用いて消費電力プロファイルの計測を行った。既往研究¹¹⁾より、家庭内で消費された電力量のピーク値が、測定間隔 1 分の場合には、測定間隔 1 秒の場合と比べて最大 30%低下することが示されている。したがって、本研究では瞬時的な消費電力のピーク値を把握するために、消費電力の測定間隔を 1 秒とした。

既往研究^{11, 12)}では、戸建モデル住宅の住宅用分電盤に電力測定器のクランプ式電流センサを取付け、1 秒間隔の回路別の電力値を測定している。洗濯機、アイロン、掃除機、スタンド照明に関しては、学生宅において使用家電設備のコンセントに電力量測定器を介すことで、新たに電力値を計測した。

居間の家電製品に関しては、照明、掃除機、アイロン、電話機において電力消費の変動が小さく、同じ出力で稼働している間は一定の電力消費となる傾向が見られた。パソコンとテレビに関してはそれぞれ 20W、100W を軸に、10~20W の細かい電力消費の変動が見られた。

厨房の家電製品に関しては、IH、食洗器、炊飯器において、各稼働段階に応じて 1 秒毎に最大約 3000W の差で大きく変動し、一時的にピーク値に達する傾向が見られた。IH は電力消費の最大値が約 3280W であり、すべての家電製品の中で最も高いピーク値が計測された。炊飯器は炊飯時のピークは約 1400W であり約 1 時間で炊飯が終了すること、また保温時には約 50W の電力が消費されることが確認された。3 時間以降に 200W 程度消費するが、原因は不明であるため、別機種での計測も必要と思われる。食洗器において、洗浄時のピークは約 1050W であり、約 1 時間で洗浄が終了することが確認された。

その他の居室の家電製品に関しては、ドライヤーにおいて強弱の出力の違いにより約 250W と約 1200W の異なる電力消費の変動が見られた。洗濯機の電力消費は一時的に 310W のピークが見られ、洗浄と脱水の一連の流れが約 40 分で終了することが確認された。

測定した家電製品全体の中で厨房機器に電力消費の値が大きく変動が大きいものが多い傾向が見られた。これらの機器を同時に使用する炊事時において、瞬時的に一日の電力消費のピークが訪れる可能性が高いことが示唆された。

5.5.3 家庭内消費電力の模擬

一般的な家庭内における瞬時的な消費電力のピークや変動を模擬するため、SCHEDULE Ver.2.0を使用して作成した共働き4人家族の生活スケジュールに対し、1秒間隔で測定された実家電製品の消費電力プロファイルを補完することで、家庭内消費電力の模擬を行った。なお、本検証では家庭内消費電力のピークが訪れることが予想される夕飯の炊事時を含む17:00~23:00の6時間を対象に、家庭内消費電力プロファイルの作成を行った。

1) 想定住宅概要

照明の設置台数を決めるため、既往文献¹³⁾を参考に想定する住宅の規模を決定した。図5-15に想定住宅平面図を示す。延床面積は125.86m²の2階建ての住宅を想定した。既往研究^{11, 12)}で電力量の測定を行ったモデル住宅と、総延床面積や個室の延床面積が似ていることから、照明の台数は既往研究と同様とした。10畳の居間と8畳の主寝室においては対象の照明が3台、6畳の和室・洋室・各子供部屋においては2台、その他の居室においては1台設置されていることを想定した。

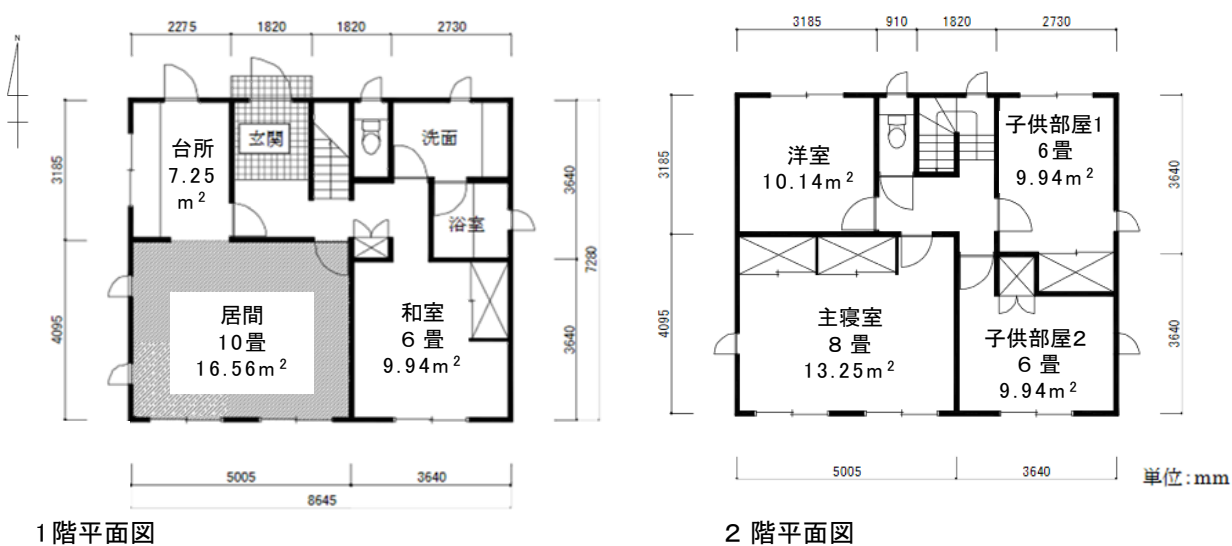


図5-15 想定住宅平面図

2) 家庭内消費電力の模擬

表 5-13 に共働き 4 人家族の生活スケジュール (17:00~23:00)、図 5-16 に共働き 4 人家族の家庭内消費電力プロファイル (17:00~23:00) を示す。SCHEDULE Ver.2.0 で作成された共働き 4 人家族の生活スケジュールを基に使用されている家電製品を決定し、15 分間隔の生活スケジュールに対し 1 秒間隔の消費電力プロファイルを補完することで家庭内消費電力プロファイルを作成した。具体的な補完の方法として以下の手法をとった。照明・スタンド・換気扇・電話機に関しては負荷の変動が少ないため、スケジュールにおける稼働期間中、実測のピーク値で一定として用いた。ドライヤーは生活スケジュール最大出力で 5 分間運転と考えた。冷蔵庫に関しては扉の閉じている時間が長いと考え、生活スケジュールにおける稼働期間中、実測値の負荷の小さい期間の変動を繰り返し用いた。テレビ・PC は負荷の変動が見られたため、生活スケジュールにおける稼働期間中に実測値を繰り返し用いた。IH・炊飯器・食洗器は 1 回の運転に負荷プロファイルの区切りがあったため、スケジュールにおける開始時刻から、実測値の負荷の変動が開始したと想定し、実測した一続きの負荷を用いた。

表5-13 共働き4人家族の生活スケジュール (17:00~23:00)

時刻	居間		厨房		洗面		浴室		主寝室		子供部屋1		子供部屋2	
	在室	家電	在室	家電	在室	家電	在室	家電	在室	家電	在室	家電	在室	家電
17:00	母	照明・電話・スタンﾄ照明・PC		冷蔵庫										
17:15	小学生	照明・電話	母	冷蔵庫・照明・電子レンジ・炊飯器										
17:30	中学生	照明・電話・テレビ	母	冷蔵庫・照明・炊飯器・H									小学生	照明・スタンﾄ
17:45	中学生	照明・電話・テレビ	母	冷蔵庫・照明・炊飯器・H									小学生	照明・スタンﾄ
18:00		照明・電話	母	冷蔵庫・照明・H									小学生	照明・スタンﾄ
18:15	母	照明・電話		冷蔵庫									小学生	照明・スタンﾄ
18:30	母 中学生	照明・電話・テレビ		冷蔵庫									小学生	照明・スタンﾄ
18:45	母 中学生	照明・電話・テレビ		冷蔵庫									小学生	照明・スタンﾄ
19:00	母 中学生 小学生	照明・電話・テレビ		冷蔵庫										
19:15	母 中学生 小学生	照明・電話・テレビ		冷蔵庫										
19:30	父 母 中学生 小学生	照明・電話・テレビ		冷蔵庫・照明										
19:45	父 母 小学生	照明・電話・テレビ		冷蔵庫・食洗器								中学生	照明・スタンﾄ	
20:00	父 母 小学生	照明・電話・テレビ・スタンﾄ照明・PC		冷蔵庫・食洗器								中学生	照明・スタンﾄ	
20:15	父 母 小学生	照明・電話・テレビ・スタンﾄ照明・PC		冷蔵庫・食洗器								中学生	照明・スタンﾄ	
20:30	父 母 小学生	照明・電話・テレビ・アイロン		冷蔵庫・食洗器	小学生	照明						中学生	照明・スタンﾄ	
20:45	父 母	照明・電話・テレビ・アイロン		冷蔵庫	小学生	照明	小学生	照明・換気扇				中学生	照明・スタンﾄ	
21:00	母	照明・電話・テレビ		冷蔵庫	父 小学生	照明	父 小学生	照明・換気扇				中学生	照明・スタンﾄ	
21:15	母 小学生	照明・電話・テレビ		冷蔵庫	父	照明	父	照明・換気扇				中学生	照明・スタンﾄ	
21:30	父 小学生	照明・電話・テレビ		冷蔵庫	母	照明	母	照明・換気扇				中学生	照明・スタンﾄ	
21:45	父	照明・電話・テレビ		冷蔵庫	母	照明	母	照明・換気扇				中学生	照明・スタンﾄ	小学生
22:00	父	照明・電話・テレビ		冷蔵庫	中学生	照明・ドライヤー	中学生	照明・換気扇	母	照明・スタンﾄ			小学生	
22:15	父	照明・電話・テレビ		冷蔵庫	中学生	照明	中学生	照明・換気扇	母	照明・スタンﾄ			小学生	
22:30	父	照明・電話・アイロン		冷蔵庫	中学生	照明・ドライヤー			母	照明・スタンﾄ			小学生	
22:45	父	照明・電話		冷蔵庫					母	照明・スタンﾄ	中学生		小学生	

消費電力のピーク値が生じた時刻は 17:45:44 で、瞬時的に 5030W の消費電力のピークが訪れることが示された。炊事の時間帯は 3000W を超える時間が複数回生じており、生活スケジュールの中でも最も消費電力が大きい時間帯であることが示された。食後のピーク値は 2400W、入浴後・アイロン時のピークは 2600W となり一時的に消費電力の大きい時間が確認された。炊事時、食後、入浴後・アイロン時を除いた時間帯は照明、スタンド、冷蔵庫の待機電力などにより約 380～570W で変動の少ない消費電力となっている。

以上より、家庭内消費電力のピークは瞬時的であり、個々の家電製品の使用に依存することが示された。このことから、家庭内消費電力の平準化に向け、家庭内の消費電力を管理し、閾値を設けて家電製品の使用制限や、家電製品の稼働の少ない時間帯にエアコンによる蓄冷熱を行うことが重要であることが示唆された。

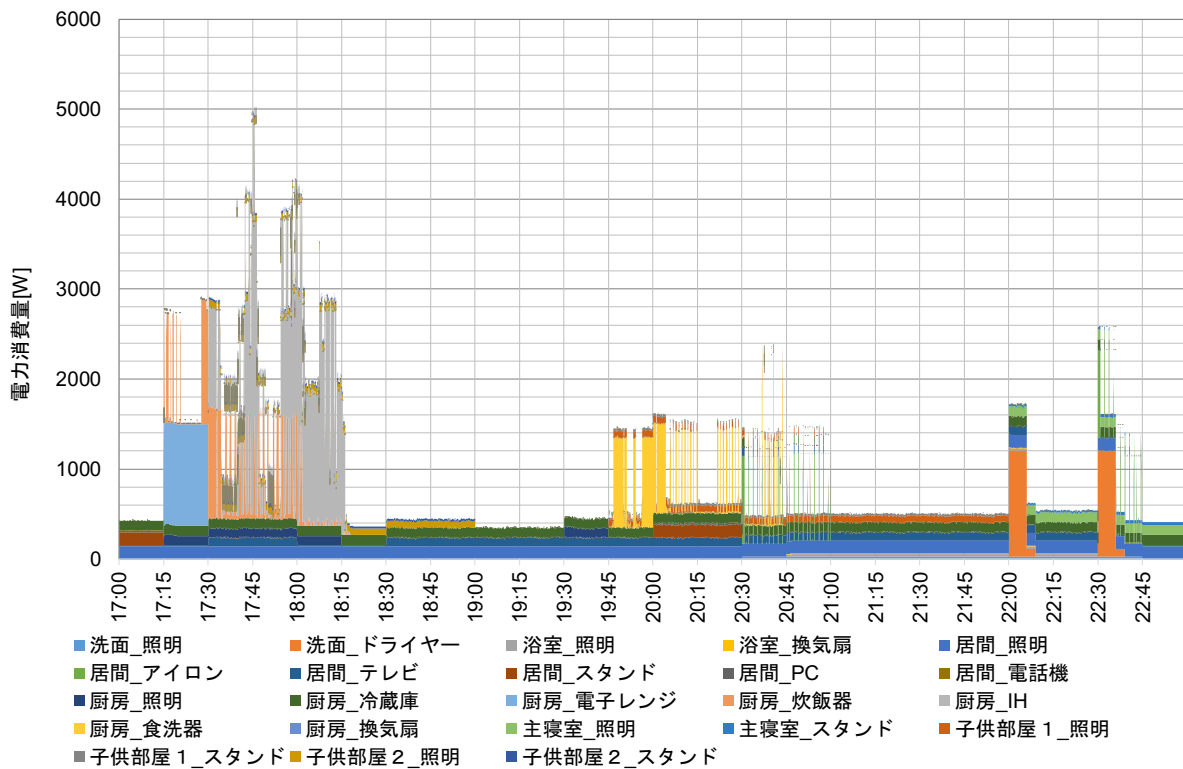


図 5-16 共働き 4 人家族の家庭内消費電力プロファイル (17:00～23:00)

5.5.4 機器制御アルゴリズムの検討

本研究では、人間の主体的な行動を保しつつ、快適性を維持しながら消費電力のピークを抑えることを目的としている。そのため、機器制御に関しては人間の主体的な行動を入力値としたシステムを構築する必要がある。機器制御のアルゴリズムチャートを図5-17に示した。制御アルゴリズムの起動周期は、消費電力のピークを抑えることが目的のため1秒が相応しいと考えるが、ECHONET Liteのプロトコルの関係から実装時には30秒間としている。そのため、システムの評価は制御アルゴリズムを30秒間隔で起動・運用した結果となっている。

はじめに消費電力の制約を決める。実験では2400Wを消費電力の閾値とした。次に環境の快適性のレベルを決める。たとえばPMV(Predicted Mean Vote) $\leq \pm 0.5$ を「快適モード」、 $PMV \leq \pm 1$ を「エコモード」、 $PMV \leq \pm 1.2$ を「もっとエコモード」と定め、「エコモード」を採用したときは、消費電力量が少ないときは $PMV \leq \pm 0.5$ と快適であるが、より電力を消費する時間においては $PMV \leq \pm 1$ と許容範囲を広げ、空調機の電力消費を削減することで、はじめに定めた消費電力の閾値を超えないように制御を行う。

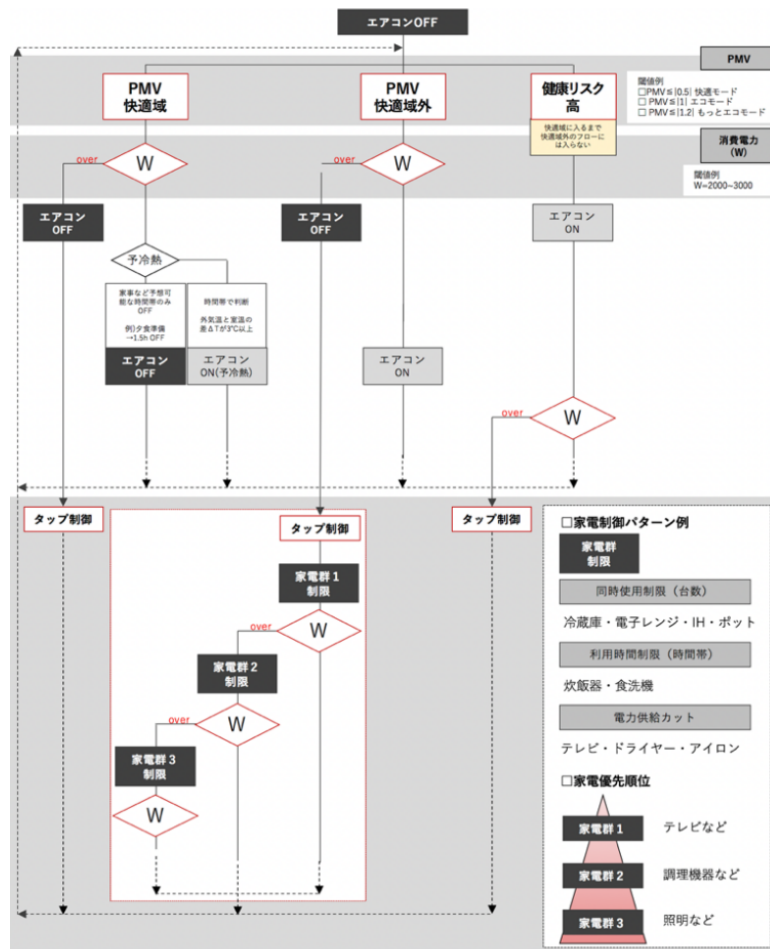


図5-17 機器制御アルゴリズムチャート

(1) 空調制御

消費電力ピークが閾値を超えない範囲で人間自らが設定した快適性のモードを担保するため、あらかじめ設定した快適域におさまっているかどうか、また快適域から大きく外れて健康リスクが高くなっていないかどうかを、エアコンの温度センサから ECHONET Lite を通じて抽出する。

PMV が選択したモードの範囲内におさまっており、かつ消費電力が制約の範囲内のときは、住宅の断熱性能により予冷熱を行う時間が異なる。断熱性能が高ければエアコンを OFF にし、断熱性能が低い場合は室内外の温度差が 3 度以上になったときはエアコンを ON にして予冷熱を行う仕様とする。昼食や夕食を作る時間帯など、消費電力が制約値を超えた場合はエアコンを OFF にする。

PMV が選択したモードの閾値範囲からはずれており、かつ消費電力が制約の範囲内のときは、PMV が快適範囲におさまるまでエアコンを運転する。消費電力が制約値を超えた場合はエアコンを OFF にし、スマートタップの制御に移行する。PMV と消費電力の制約は、消費電力の制約を優先するものとし、温熱環境が健康リスクを考慮すべき状態になったときは強制的にエアコンを運転し、スマートタップでの制御に移行する。

(2) スマートタップ制御

スマートタップは電力計およびリレー回路が組み込まれており、ECHONET Lite を通じて制御する。本研究ではスマートタップに優先順位をつけて、消費電力が閾値を超えたときに、スマートタップに接続された家電に対してリレーを用いて 1 回 OFF にする。家電の電力の復帰は人間が必要に応じて復旧するものとする。これらの制御はカスケードで行われ、都度消費電力の閾値と照らし合わせて ON/OFF の制御が行われる。全てのスマートタップで ON/OFF の判定が済んだ段階で、再度エアコンの制御に移行する。

ある設定した電力の閾値を超えないように ECHONET Lite 機器を制御することが目的であるが、制御のプロセスに人間の行動を誘発する要素を入れることが最大の特徴である。たとえば設定した電力の閾値を超えそうになったとき、人間自らが行動を起こして電力を制御する仕組みが重要となる。これは特に難しいことではなく、たとえば炊飯器を使っているときにドライヤーの仕様を避けるといった行動を意味する。一方で、炊飯器とドライヤーを、電力平準化の観点から同時に使用することを意識的に避けることは極めて難しい。住戸単位での電力平準化は発電設備を縮小するだけでなく、バーチャルパワープラントをはじめとした次世代広域ネットワークを基盤とした電力制御システムにも影響を与えると考えられるため、人間の行動を加味した上で電力の自動制御の手法を、手動と自動の相互インタラクションの中で導く手法を検討することは重要と考えられる。

本システムは、ECHONET Lite 機器はエアコンおよびスマートタップを用いており、ドライヤーや電子レンジ、炊飯器などの ECHONET Lite に非対応の家電をスマートタップ経由でシステムに組み込むことで自動制御を担保した。家庭内消費電力の模擬結果から、炊事の時間帯に消費電力のピークを迎えることから、この時間帯に使われる機器を自動もしくは手動にて使用する時間をシフトし、消費電力ピークを抑える必要がある。また、同時に快適性の観点から、エアコンを用いて居室内環境を、消費電力ピークを抑えながら維持する必要がある。

エアコンの制御に関しては快適性の範囲を手動にて指定する。人間の意思を反映することでシステムに人間の主体性を担保した。具体的には、 $PMV \leq \pm 0.5$ を「快適モード」、 $PMV \leq \pm 1$ を「エコモード」、 $PMV \leq \pm 1.2$ を「もっとエコモード」として運用し、消費電力ピーク時の家電の使用状況と温熱環境を主体的にバタするシステムとした。エアコンは温湿度を自動的に取得し、その値から PMV を自動で判断する。PMV が選択モードの閾値範囲内にあるという前提で、消費電力が閾値におさまるときはそのまま運転するが、閾値を超えたときは運転を停止する。ただし、温湿度センサの値から健康リスクが高いと判断された場合はエアコンを ON にし続けて、他のスマートタップを全て切ることとする。

エアコンのモードについては、初期設定にて「エコモード」を採用した場合、熱環境を許容できなければ「快適モード」を手動で選択し直すことが可能である。これは行動の変容を意味しており、温熱環境による気づきがシステムへの信頼感に繋がる。ここで、もう少し温熱環境がタフでも問題ないと感じたならば、手動でモードを変更することが可能である。多少温熱環境が不満であっても問題ないと認識したときには、「もっとエコモード」を選択することで環境を受容し、システムだけではなく自らの決定に対しても信頼感を得ることが可能になる。またエネルギーの削減に繋がることを理解しているならば自己肯定感も醸成されると思われる。

スマートタップは電力を計測することは可能だが、ここでは電力の閾値をサーバから自動で取得し、閾値を超えたときは優先順位の高いスマートタップから OFF にする。このプロセスにおいて、居住者による意思決定と行動がなされたことに留意したい。本インタラクションは、人間がスマートタップに繋がれた家電の動作から使用電力状況を確認し、ブレーカーがオフになる（制約条件に達する）体験に近い状況を経験することで、主体的に使用する家電の選択や調整を行うことを導く。人間の主体的な選択と調整の結果、制約の目標値を維持することもあれば、強制的にスマートタップが家電の電源がオフになることもあり得るだろう。この試行錯誤の繰り返しの中で、居住者の気づきが蓄積していき、システムは強化される。また人間は日々の暮らしの中で、外乱である屋内外の環境と相互作用を繰り返している。温熱環境の変化は人間の温冷感に影響する。この温熱環境の変化は、エアコンのモード設定だけではなく、居住者による窓やドア、ルーバーの開閉という操作によって調整され、さらに使用エネルギーに反映されることになる。このように人間の振る舞いと外部環境を含んだ建築の全体性は、相互に影響する不可分な存在になることで、主体的にエネルギーを身体化しつつ、環境調整行動を自己組織化することになると考えられる。

5.5.5 検証システムの構成

EMS 新宿実証センターの実験スマートハウスを用いて検証を行った。実験スマートハウスには、エネルギーマネジメントの各種研究を遂行すべく、スマートメータや分電盤といった計測器をはじめ、需要家が有するエネルギー機器の内、国が重点8機器と定義している蓄電池や給湯器、エアコン等を具備している。それ以外の生活家電も実機を取り揃え、ECHONET Lite 等の宅内通信による可制御機器と非可制御機器を組み合わせることで実験を行うことが可能となっている。また、実験空間は住環境を模して気密されており、エネルギーマネジメントに加え温熱環境も加味した簡易的な実験も実施することが出来る。本実験では、それら機器の内、表 5-14 に記す機器を利用した。

表 5-14 実験機器一覧

実験機器（本報告書での呼称）	メーカー
分電盤	P 社
スマートタップ	K 社
エアコン	D 社
エアコン	M 社
ドライヤー（ドライヤー）	P 社
電気鍋（鍋）	P 社
電子レンジ（レンジ）	P 社
電気ヒーター（ヒーター）	H 社
瞬間湯沸かし器（ティファール）	T 社

5.5.6 検証用アプリケーションの構成

検証用アプリケーションは、エアコンやスマートタップといった ECHONET Lite 機器、ホームゲートウェイ、アプリケーションコンピュータから構成される。それら実装概要を図 5-18 に記す。ホームゲートウェイは ECHONET Lite 機器と ECHONET Lite 通信を行い、REST インタフェースを提供する。アプリケーションコンピュータはホームゲートウェイの REST インタフェースを利用して、ECHONET Lite 機器より消費電力等の動作状態を取得し、最終的に制御指令を行う。アプリケーションコンピュータ内のソフトウェアは、各機器からの情報収集部、PMV 計算部、制御ロジック演算部、各機器の制御部より構成される。

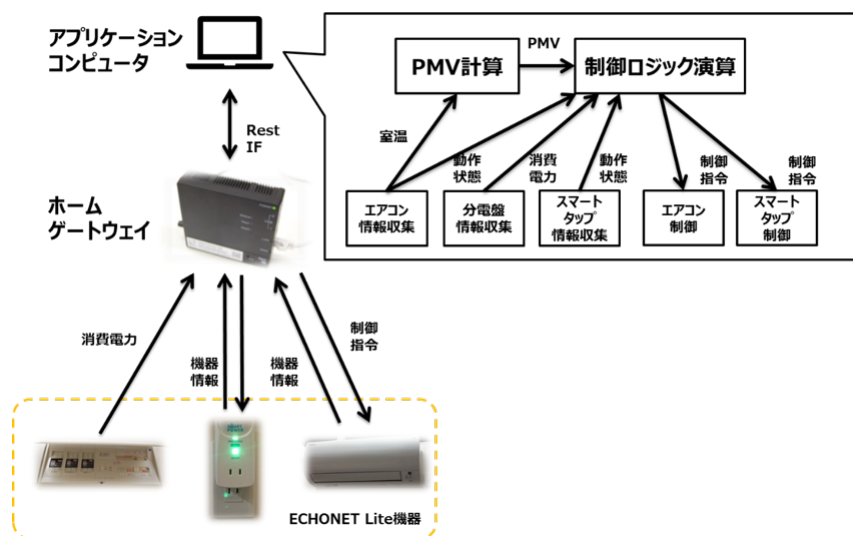


図 5-18 検証用アプリケーション実装概要

5.5.7 評価試験

家庭内消費電力を平準化する機器制御アルゴリズムの評価を目的に、スマートタップ及びECHONET Lite 対応市販エアコンの導入された実験スマートハウスにて実験を行った。エアコンの稼働条件の異なる2条件で実験を行った。実験期間は2017年3月6日、実験場所はEMS新宿実証センター内の実験スマートハウス1室で行った。

夕飯の炊事時の際に家庭内の電力消費のピークが生じることが示唆されたため、17:00~23:00の家庭内消費電力を簡易的に模擬した負荷を実験スマートハウス内で与え、機器制御アルゴリズムに準じた検証用アプリケーションによる評価試験を行った。

1) 家電稼働条件

17:00~23:00の6時間(15分間隔)の生活スケジュールに対し、実験においては2時間の実験時間内で実験スマートハウス内にある家電製品を5分間隔で稼働し、簡易的にスケジュールに準じた負荷を与えた。

表5-15に稼働機器と想定機器の対応一覧を示す。実験スマートハウス内に設置されている鍋、ドライヤー、ティファール、レンジ、ヒーターの5種の家電製品の中から、生活スケジュールで想定される使用家電製品の中で制御優先度が高い製品と稼働時の平均消費電力の値に近い製品を手動で稼働させて、生活スケジュールに則った家庭内の消費電力プロファイルを模擬した。タップ制御順序はある閾値に対してスマートタップを用いて家電製品の使用を制御する際の番号を示しており、値が小さいほど稼働の優先順位が低く、使用が制限される順序を示している。

表5-15 稼働機器と想定機器の対応一覧

稼働機器 (実験スマートハウス内)	平均消費電力[W]	想定機器 (生活スケジュール上)	Tap制御 順序
ティファール	1130	ティファール	1
ヒーター	330	テレビ	2
レンジ	840	レンジ	3
鍋	1050	IH・食洗器	4
ドライヤー	1120	ドライヤー・炊飯器	-

表 5-16 に実験運用スケジュールを示す。実験運用としては、経過時刻 0:15~0:40 の区間が夕飯炊事時を想定し、1:20~1:40 の区間に食後の片付け及び入浴後を想定したスケジュールとした。消費電力の大きい厨房機器が 2 台程度同時に稼働可能な値として 2400W の閾値を設けた。なお本実験においては、スマートタップの制御に関係がなく、常に一定値で電力を消費している照明や家電製品の待機電力等の想定は省略しており、閾値もこれらの消費電力を引いた値で想定している。

表 5-16 実験運用スケジュール

経過時刻	想定機器の消費電力[W]							閾値[W]
			tap4		tap3	tap2	tap1	
	炊飯器	ドライヤー	H	食洗器	レンジ	テレビ	ティファール	
0:00						330		2400
0:05						330		2400
0:10						330		2400
0:15	1120		1050		840	330	1130	2400
0:20	1120		1050		840	330		2400
0:25	1120		1050			330		2400
0:30	1120					330		2400
0:35	1120					330		2400
0:40						330		2400
0:45						330		2400
0:50						330		2400
0:55						330		2400
1:00						330		2400
1:05						330		2400
1:10						330		2400
1:15						330		2400
1:20				1050	840	330		2400
1:25				1050	840	330	1130	2400
1:30				1050		330		2400
1:35		1120		1050		330		2400
1:40						330		2400
1:45						330		2400
1:50						330		2400
1:55						330		2400

図 5-19 に消費電力合計値と閾値を示す。制御の閾値を 2400W とし、エアコンを稼働しない場合、0:15 にティファール、テレビ、レンジの使用が制限され、0:30 にテレビの使用が可能となり、さらに 1:25 においてティファール、1:35 においてテレビの使用が制限され、1:40 においてテレビの使用が可能となることが確認できる。炊事時及び食後の片付けと同時にティファールの利用を行うことが難しいことが確認でき、居住者が自発的に電力平準化に向けた行動をとる必要性が生じることが示唆された。

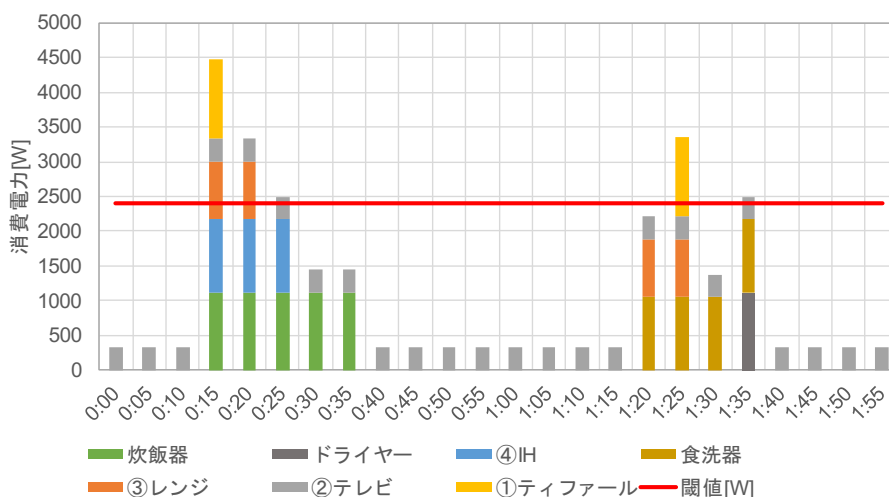


図 5-19 想定消費電力合計値と閾値

2) エアコン稼働条件

実験を行うにあたり、実験スマートハウス内の隣り合った2台のエアコンを使用した。表5-17にエアコンの制御条件を示す。

実験スマートハウスは屋内に施設してあり外気による暖房負荷が生じないため、1台目（エアコン1）は外気負荷を模擬した運転を行うこととした。室内温度設定は18°Cの冷房とし、出力を「中」として実験中連続で稼働させた。

2台目（エアコン2）は、ECHONET Lite による制御を行った。エアコン内で測定される情報から計算されるPMVが指定した範囲内に収まった際に運転を停止させる制御とした。また、今回実験に使用したエアコンは停止時において室温が取得できずPMVが算出されないため、運転停止後5分に一度エアコンを稼働し、PMVを判定する制御とした。ここでPMVは、代謝量1.1met、着衣量0.8clo、気流速度0.1m/s、相対湿度40%を一定値で制御に入力することによって算出している。

また、暖房負荷模擬用エアコン（エアコン1）の消費電力は、需要家の消費電力より除外することで、エネルギーマネジメントに影響を与えないようにした。

表5-17 エアコンの制御条件

	エアコン1	エアコン2	
設定室内温度	18°C (冷房)	24°C (暖房)	
稼働条件	連続運転	条件① PMV \leq ±0.1…停止	条件② PMV \leq ±0.5…停止
		PMV<-0.1,0.1<PMV…運転	PMV<-0.5,0.5<PMV…運転

5.5.8 評価試験の結果・考察

1) 条件① エアコン停止条件 $PMV \leq \pm 0.1$

図 5-20 に消費電力プロファイルと PMV (条件①) を示す。実験開始 3 分ほどで PMV が設定範囲内に達した際にエアコンの停止が確認された。0:15 において、4500W の消費電力のピーク値が確認された。ECHONET Lite を利用したネットワークでの一般的な計測周期は早くても 30 秒程度であり、今回の制御ソフトウェアも 30 秒周期での動作としている。このため、スマートタップの制御も 30 秒間隔となっているが、今回のケースでは、4500W 到達後にティファールが遮断され、次の 30 秒周期でテレビが OFF となり、更に次の周期でエアコンが OFF となり、この 3 装置の制御により、ピーク到達後 1 分 30 秒後に消費電力の値が約 2100W となり閾値を下回った。閾値を下回ったことによりスマートタップの制限が解除され、テレビの稼働が可能となり、さらにテレビが稼働することで消費電力の閾値を超え、30 秒後にテレビが停止し消費電力が閾値を下回る変動を繰り返した。1:25 にティファールを稼働予定としていたが、スマートタップによって稼働が制限された。

ECHONET Lite プロトコル利用時の計測・アルゴリズム起動周期制約のため制御速度に限界があることから、消費電力の閾値を超過する時間帯が多く見られたが、機器制御アルゴリズムに則った家電製品の制御が行われていることが確認された。

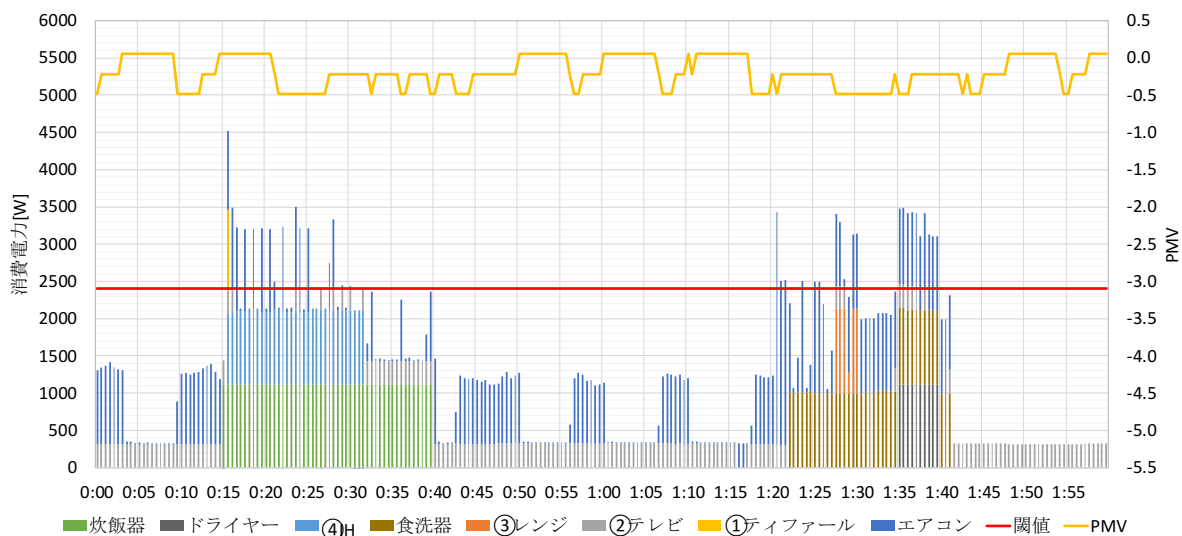


図 5-20 消費電力プロファイルと PMV (条件①)

2) 条件② エアコン停止条件 $PMV \leq \pm 0.5$

図 5-21 に消費電力プロファイルと PMV (条件②) を示す。PMV が設定範囲内に達した際にエアコンの停止が確認され、停止後約 5 分間隔で PMV 算出のため短時間のエアコンの稼働が見られた。0:15 において、PMV の低下によるエアコンの稼働と炊飯器、IH、テレビの稼働が重なり、5400W の消費電力のピーク値が確認された。その後ティファールとレンジを稼働させたが、それぞれ 30 秒後と 1 分後にスマートタップにより使用が停止され閾値を下回った。閾値を下回った後は条件①と同様の変動を繰り返した。1:25 のティファール稼働に関しても同様に、スマートタップにより稼働が制限された。

スマートタップや ECHONET Lite による制御速度に限界があることにより、消費電力の閾値を超過する時間帯が多く見られたが、機器制御アルゴリズムに則った家電製品の制御が行われていることが確認された。また、条件①と比べ PMV の許容範囲を広げたことによりエアコンの稼働時間は減少したが、許容範囲を逸脱した際にエアコンの出力が大きくなるため、他の家電製品との稼働時間の調整が求められることが示された。

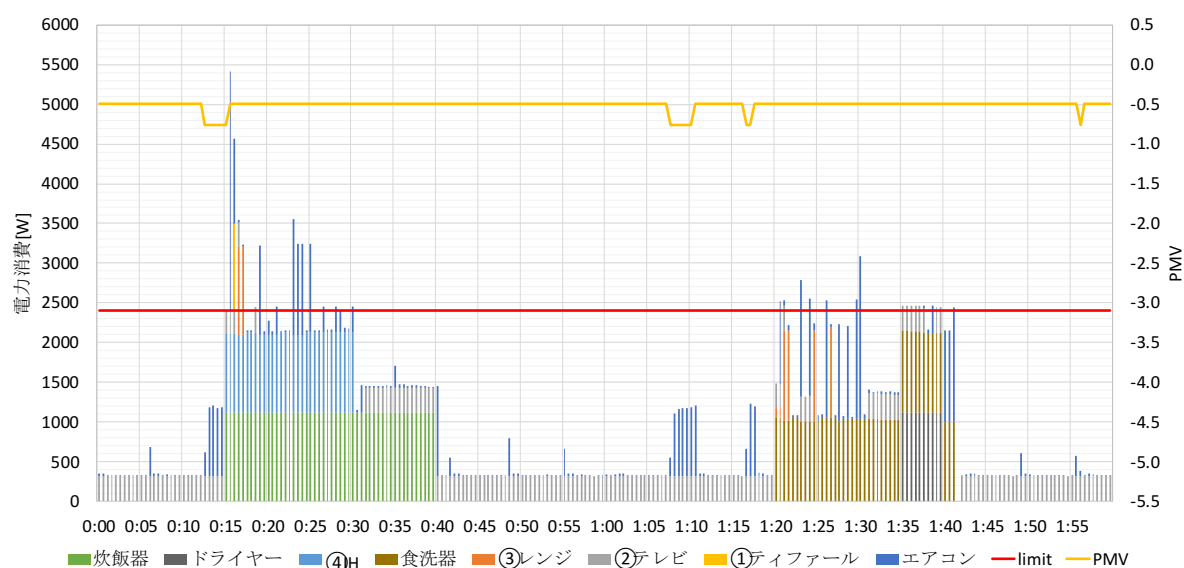


図 5-21 消費電力プロファイルと PMV (条件②)

5.6 まとめ

一般家庭への ECHONET Lite 対応家電機器の導入が進んでいるが、現状ではリモコン代替の操作機能の活用がメインであり、内蔵センサの活用事例は少ない。本研究では、ECHONET Lite 機器内蔵センサの室内環境自動制御への適用に着眼し、市販 ECHONET Lite 機器について、保有する複数機種・複数機器に関して、実際に HEMS と通信させた上で、実装されているプロパティを調査した。当初の想定以上にセンサ情報など室内環境自動制御へ利用できる可能性のある情報が公開されている事が判明した。さらに、市販エアコンのセンサ値について、近傍に設置した別センサの計測値と比較する事で、制御への使用可能性などの検討を行った。特定メーカーの機器では、機器動作中のセンサ挙動に特徴のあることが判明したが、機器停止中のデータは比較的安定している事が判った。

ECHONET Lite 機器および ECHONET Lite 非対応の機器を含めての計測・制御を行うにあたり、居住者が操作を誤っても危険が生じないように、過酷温熱環境の検出と機器の自動制御を組み込むために、アルゴリズムを検討し、機器を自動制御する仕組みを実装して、動作の検証を行い良好な結果を得た。また、機器実装センサの情報を利用した PMV 計算を実施し提案の絶対値との差について明らかにした。

スマートタップと ECHONET Lite により機器制御アルゴリズムに則った家電製品の制御が行われていることが確認された。従って、暑いあるいは寒い環境を自動的に緩和しつつ、快適域および消費電力が、設定した閾値を超えない様にエアコンおよび複数の家電を制御することが可能になった。設定した快適域が狭いと家電の利用に制限があるが、快適域を比較的広く設定することでエアコンよりも家電の利用を優先できるシステムを構築した。とくに、1:25 においてティファールの稼働が困難であったことから、電力平準化に向け厳しい閾値を設ける場合は、居住者側が個々の家電製品の消費電力プロファイルを把握し、自主的に使用時間をシフトする行動をとることが重要であることが示唆されたことから、人間の行動を加味しながら非定常・不均一な温熱環境を操ることが可能になった。

一方で、ECHONET Lite の制御アルゴリズム起動周期の設定により、スマートタップによる制御が 30 秒後に判定されるため、大きく閾値を逸脱する時間帯が繰り返し生じている。これらの対策として、スマートタップに対して接続する家電製品の消費電力を学習させ、家電製品を稼働させた場合に閾値を逸脱する可能性がある際は、稼働前から使用を制限する仕組みを設ける、もしくは別のシステムを媒介することで、適切な時定数で制御をする必要があると考えられる。

本研究により、デマンドレスポンスを見据えたシステムを実装することができたが、ECHONET Lite 機器実装センサについては、メーカー依存の様子などが有ることが判った。こうしたセンサを広く利活用するには、メーカー・機種に関して更に広範な実装状況の調査と行うとともに、利用に際しての注意事項などをメーカーが広く公開する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) ECHONET Lite 規格書 Ver.1.12
- 2) ECHONET Lite 通信ミドルウェア仕様
- 3) http://echonet.jp/wp/wp-content/uploads/pdf/General/Standard/ECHONET_lite_V1_12_jp/ECHONET-Lite_Ver.1.12_02.pdf (2016/03/02 閲覧)
- 4) APPENDIX ECHONET 機器オブジェクト詳細規定 Release G Revised http://echonet.jp/wp/wp-content/uploads/pdf/General/Standard/Release/Release_G_revised/Appendix_G_revised.pdf (2016/03/02 閲覧)
- 5) 熱中症環境保健マニュアル「日常生活における熱中症予防指針」Ver.1, 日本生気象学会, 2007
- 6) 伊香賀俊治, 堀進悟, 三宅康史: 住環境と熱中症, 日本臨床 70(6), 1005-1012, 2012年6月
- 7) 海塩渉, 伊香賀俊治, 大塚邦明, 安藤真太郎: 冬季実測に基づく室内温熱環境が24時間血圧変動に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I (2014), 127-128, 2014年9月
- 8) English Housing Survey: HOMES 2010, Department for Communities and Local Government, 2012
- 9) Kobayashi Y, Tanabe S. Development of human thermoregulation modelJOS-2 with a detailed vascular system. Build Environ. 2013;66:1-10.
- 10) 生活スケジュール自動生成プログラム SCHEDULE Ver.2.0, 空気調和・衛生工学会, 2000.3
- 11) 竹中大史, 海野玄陽, 遠藤彰, 田辺新一: 細粒度電力測定データを用いた住宅の電力消費分析 その2: 生活パターン推定と測定間隔の違いによる影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I (2013), 669-670, 2013年8月
- 12) 海野玄陽, 竹中大史, 遠藤彰, 田辺新一: 細粒度電力測定データを用いた住宅の電力消費分析 その1: 世帯特性が電力消費構造に与える影響, 海野ら, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I (2013), 667-668, 2013年8月
- 13) 宇田川光弘: 標準問題の提案(住宅用標準問題), 日本建築学会環境工学委員会熱分科会 第15回熱シンポジウム, 1985, 23-33, 1985年

6章 既存工業化住宅を用いた

改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案

6.1 はじめに

日本の住宅ストック数は全世帯数を上回り、空き家問題などが顕在化している。日本の総住宅数に対する空き家率は2013年時点で13.5%¹⁾に達し、全国で103万戸²⁾が利活用可能と推計されている。また、ZEHの標準化や導入の動機付け等を目標とした施策が進められる一方で、過剰となっている住宅ストックに対する改修型ZEHの普及目標は定められていない。


さらに、ZEH等の普及に伴う太陽光発電（以下、PV）等の再生可能エネルギーの導入促進により、宅内で消費しきれなかった余剰電力の逆潮流が発生し、都市配電網の電圧上昇・周波数調整に問題を生じさせることが懸念されている。加えて、2019年以降固定価格買取制度が順次終了し売電価格が下落することによって、余剰電力の積極的な自家消費が経済的に優位になることが見込まれている。

以上の背景から、有用なストックとして残る既存工業化住宅に対し、既存ならではの魅力を活かしつつ、現代の環境ニーズに適合した環境性能を付与する改修手法の知見獲得が求められている。さらに、自然エネルギーの有効活用や、デマンドレスポンス（以下、DR）など都市規模のエネルギーマネジメントへ対応していくことが求められているため、本研究では、本論文で確立した不均一・非定常を操る要素技術を統合した実証住宅の報告を行う。一般社団法人環境共創イニシアチブが主催する「エネマネハウス2017」の一環として、今回は大阪府大阪市で開催され、2017年10月～11月に15日間で実証住宅を施工、11月に実測、12月に一般展示を行った。

6.2 実証住宅設計概要

表 6-1 に本実証住宅の概要を示す。本実証住宅は築 40 年の 2 階建て鉄骨造の工業化住宅を想定した改修案であり、①既存住宅の躯体を活用した ZEH とすること、②ZEH のデザインの幅を拡張すること、③自然エネルギーを有効活用すること、④DR に対応したエネルギー運用を可能とすることを旨とした設計を行った。なお、設計期間、施工期間が短いことから、実際には既存住宅を改修するのではなく、改修後を想定した住宅を新築した。

表 6-1 本実証住宅の概要

建設地	大阪府大阪市		
構造	鉄骨造		
階数	地上2階		
建築面積	66.03 m ²		
延べ床面積 [m ²]	全体	79.11	
	1F	63.31	
	2F	15.8	
階高 [m ²]	リビング	4.37	
	1F居室	2.2	
	2F居室	2.2	

6.2.1 平面構成

図 6-1 に 1 階平面図，図 6-2 に 2 階平面図を示す。ZEH のデザインを拡張するため，本実証住宅では ZEH の基準を満たす高断熱の新設壁を，既存の低断熱壁の内外を縫うように配置した。既存の低断熱壁は，通常の改修工事では熱的に不利になるため前面に出ることはないが，本計画では既存低断熱壁を，自然エネルギーを取り込むために最大限利用することを考えた。異なる機能を持った平面を重ねることによって，住宅内に高断熱壁に囲まれた高断熱な居住空間と，入れ子によって生まれた低断熱の不均一・非定常な温熱環境を伴った緩衝空間が生まれる。この緩衝空間は「ロτζァ」と名付けられ，住空間と屋外との緩衝空間として，住宅が社会に接続するための空間として機能するだけでなく，季節に合わせた環境調整の機能も担っている。また，既存低断熱壁を残しつつ，新設壁を内外に配置する本手法により，デザインやプランニングの自由度を獲得することで，多様化するライフスタイルへ対応する。設備機器は更新の簡略化を目的に北東側の増築部と東側の屋外設備置場に集約した。

平面計画で用いられた寸法体系には ALC パネルの幅である 610mm を等分した 305mm とその整数倍のグループと，WOOD.ALC の基本幅である 450mm に関連するグループに二種類がある。前者の寸法体系は鉄骨のピッチも含むため，平面計画において構造計画と最も密接な連関を生む。X11 通りと X12 通りの間および Y7 通りと Y8 通りの間は，北東の新設部分と南西の新設部分を構造別棟とするために設けられたエキスパンションジョイントのクリアランスであり，305mm の幅である。後者の 450mm に関連する寸法体系の例としては，断熱パネルの支持材のピッチが挙げられる。

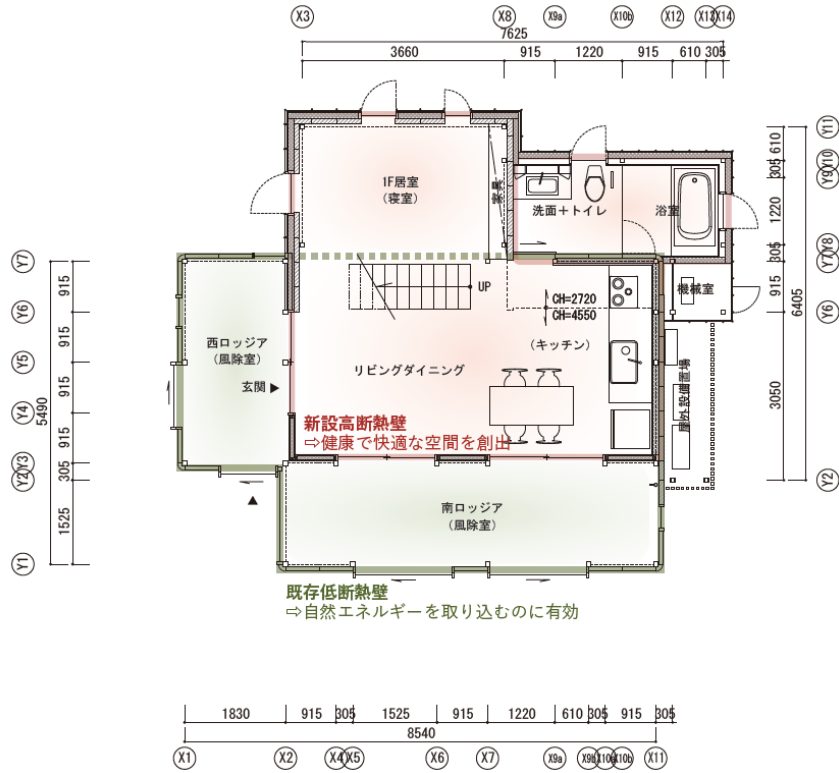


図 6-1 1階平面図

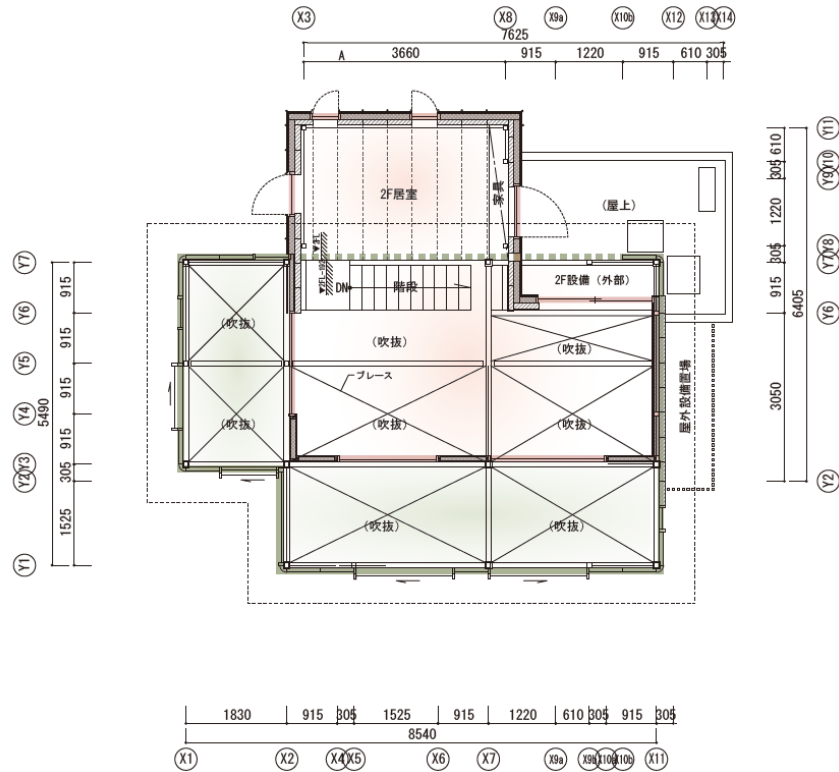


図 6-2 2階平面図

6.2.2 立面構成

図 6-3 に立面図，図 6-4 に外観を示す。南・西立面はロτζアを構成する既存低断熱壁が現れることで既存住宅の外観を継承した。さらに，従来の ZEH では採用されることのなかった大開口の単板ガラスのスチールサッシを用いることが意匠上の特徴となっている。更に，ALC パネルとガルバリウム鋼板の無機質材から構成される外壁は，木質の内観との対比を生み，改修により得られた新たな住空間を際立たせている。

南面および西面の高さ約 5.5m の大型建具には車輪とレールが設けられており，手動で開閉することが可能である。レール端の車輪止めは，ルーズホールにボルトを留めているため，開口幅の施工誤差を吸収することが可能な設計となっている。スライド式の大開口は，太陽光や風を取り込む環境装置としてのみならず，内外の視線や動線をダイナミックに繋ぎ，外部の人々とのコミュニケーションを媒介するインターフェイスとしても位置づけている。



図 6-3 立面図（左上：南側，左下：北側，右上：東側，右下：西側）



図 6-4 外観（左：南側，右，北側）

6.2.3 断面構成

図 6-5 に長手断面図，図 6-6 に短手断面図を示す。既存の躯体よりも高い位置に高断熱の新設躯体を挿入し，低断熱のボリュームと高断熱の新設ボリュームの間に屋根裏通気層を設けた。低断熱なボリュームと高断熱の新設ボリュームとの間に生じた屋根面に平行な間隙を通気層としている。通気層には開閉可能な窓が取り付けられており，夏季や中間期は窓を開放することで，屋根面で受熱し，伝達する熱を通気により排除し，室内の熱負荷を減少させる。冬季は窓を閉じることで，屋内外の緩衝空間となり，室内の熱の損失を防ぐ中空の断熱層となる。

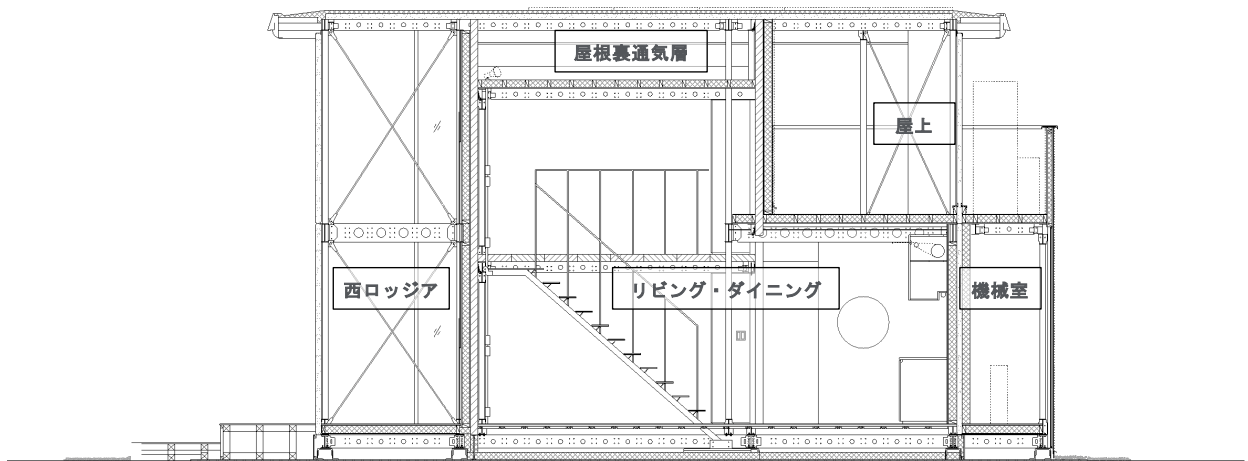


図 6-5 長手断面図

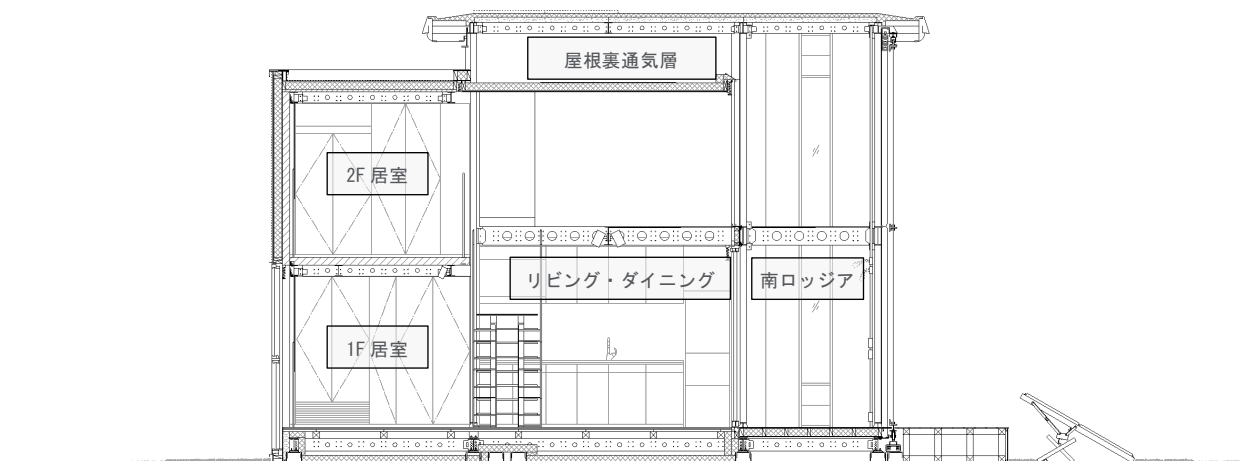


図 6-6 短手断面図

6.3 建築環境計画

6.3.1 各所における部位別構成材

図 6-7 に部位別構成材の配置，表 6-2 に各所における部位別構成材および性能値を示す。既存低断熱ラインは既存住宅を想定し，外皮の壁と天井は既存 ALC パネルの現し，窓は単板ガラスのスチールサッシとし，既存住宅の表情を残した。新設高断熱ラインは 4 種類の壁構成，2 種類の屋根構成，樹脂複合サッシと Low-E トリプルガラスの窓により外皮平均熱貫流率（UA 値） $0.35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ を実現した。特に，ロτζアとリビング間の新設壁は，真空断熱材，シート型潜熱蓄熱材，高性能フェノールフォームを用いることで，高い断熱性能（熱貫流率 $0.05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ （実測値））と蓄熱性能を担保しながら，壁厚 105 mm を実現した。

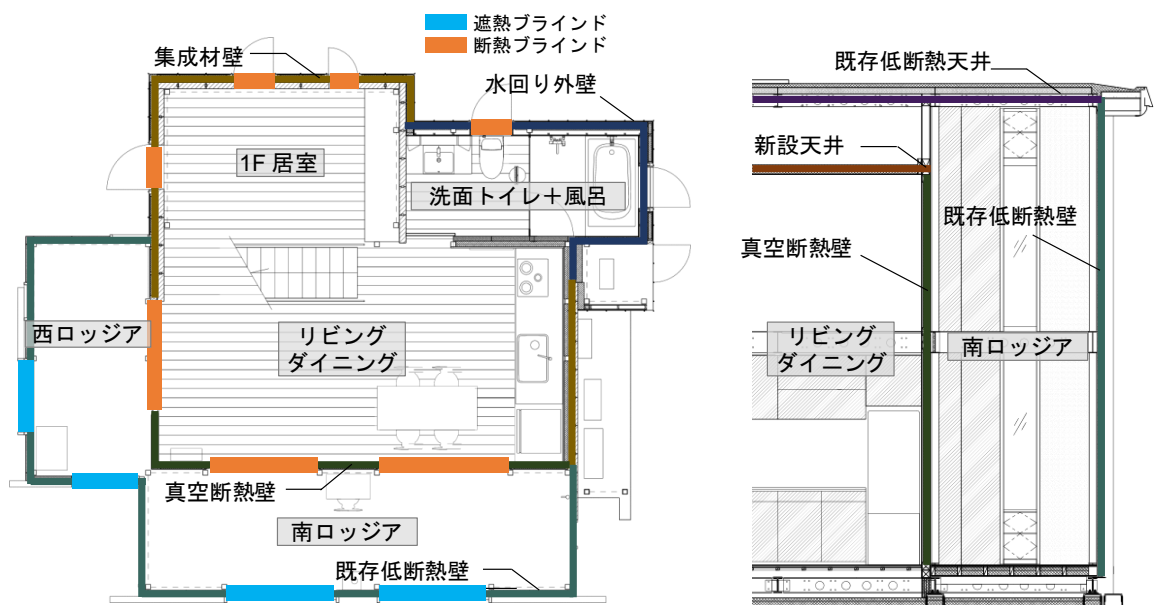


図 6-7 部材別構成材の配置

表 6-2 各所における部位別構成材および性能値

	構成	熱貫流率 [W/(m ² ・K)]		構成	熱貫流率 [W/(m ² ・K)]		
壁	真空断熱壁 (105mm)	0.07	新設天井 (120.5mm)	シナベニヤ t5.5 白塗装 構造用合板 t9 高性能フェノールフォーム t60 高性能フェノールフォーム t45	0.17		
	化粧ベニヤ t9.5 高性能フェノールフォーム t25 真空断熱材 t20 真空断熱材 t30 スポンジ シート型潜熱蓄熱材 t3 気密シート 蓋ベニヤ t3 化粧ベニヤ t=5.5			高分子防水シート ガラス繊維クロス 勾配スタイロフォーム t45 ALCパネル t75			
	集成材壁 (255mm)	0.15	既存屋根 (120mm)	ガルバリウム鋼板 t0.4 縦ハゼ葺き t18 構造用合板 t9 透湿防水シート 構造用合板 t9 高性能フェノールフォーム t45 高性能フェノールフォーム t60 構造用合板 t9 気密シート WOOD.ALC t105	2.27		
				低断熱窓		アルミサッシュ 単板ガラス	6.51
				高断熱窓		アルミ・樹脂複合サッシュ ガス入りLow-Eトリプルガラ ス	
	水回り外壁 (252mm)	0.18	床 (457mm)	ガルバリウム鋼板 t0.4 縦ハゼ葺き t18 下地合板 t9 透湿防水シート 構造用合板 t11.5 高性能フェノールフォーム t60 構造用合板 t11.5 高性能フェノールフォーム t45 気密シート 非密閉空気層 化粧シナベニア t5.5	0.16		
既存低断熱壁	ALCパネル t75			1.85			

6.3.2 ロジgia

居住者の環境調整行動によって、不均一・非定常な温熱環境を操ることを目的としてロジgiaを設けた。図 6-8 に南ロジgia内観、図 6-9 にロジgiaおよび屋根裏通気層の季節毎の運用ダイヤグラムを示す。居住者が季節や時間に応じてロジgiaの内外の窓を開閉することで冷暖房負荷を削減する。夏季は屋外側の窓を開放し、屋根を庇とすることで居室内への直達光を防ぐ。中間期は内外の窓を開放し、居室内に自然通風による採涼効果をもたらす。冬季は内外の窓を閉め、熱的な緩衝空間とし室内からの熱損失を抑制する。また、日射熱の取得に有効な単板ガラスの大開口によってロジgia内の温度が居室よりも高くなった際には、居室側の窓を開放しロジgia内の暖気を室内へと流入させ、暖房負荷を削減する。



図 6-8 南ロτζア内観

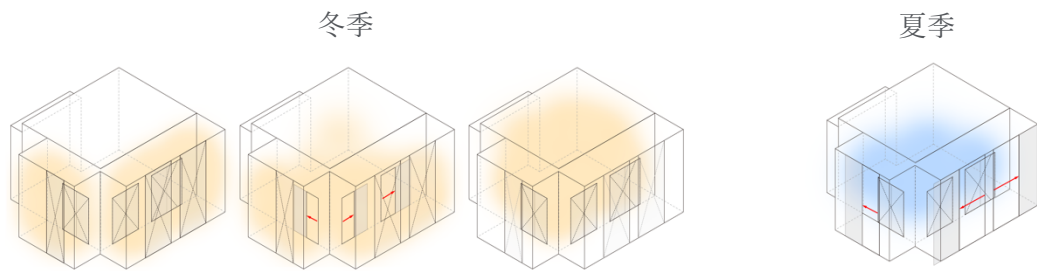


図 6-9 ロτζアの季節毎の運用ダイヤグラム

6.3.3 屋根裏通気層

屋根裏通気層には開閉可能な窓が取り付けられており、夏季や中間期は窓を開放することで、屋根面で受熱した日射熱を通気により排除し、室内の熱負荷を減少させる。冬季は窓を閉じることで室内の熱の損失を防ぐ中空の断熱層となる。

6.3.4 可動式水平膜

図 6-10 に可動式水平膜、図 6-11 に可動式水平膜の取付け位置を示す。可動式水平膜はリビング上の鉄骨梁に沿って張られるポリエステル製ロールスクリーンであり、高い遮熱効果を持つ。ブラインド等と異なり室外への眺望を確保しつつ、直射日射を均一に透過・拡散させる。2階居室を使用しない場合は、水平膜を張りリビングの空調領域を縮小し、空調効率を向上させる。



図 6-10 可動式水平膜 (左：可動式水平膜, 右：巻き付けロール)

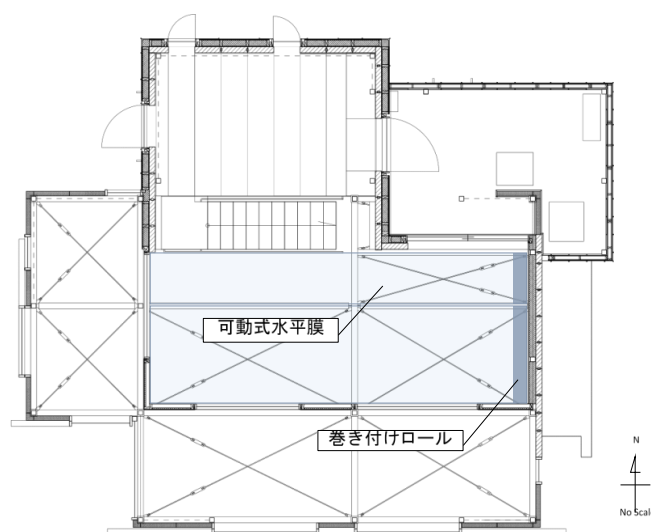


図 6-11 可動式水平膜の取付け位置

6.4 設備計画

6.4.1 計画概要

本実証住宅における設備計画では、省エネルギー性と快適性に加え、自然エネルギーによる創エネルギーを効率よく活用すること、DR に対応するために電力需給を調整可能とすることを目指した。また、設備計画の普遍性・汎用性の観点から、高効率な設備機器の導入だけではなく、市販の設備機器の設置方法や運用方法の工夫による効果を期待した提案を中心に行った。

空調設備には第 4 章で開発した市販の壁掛け用エアコンを使用した潜熱蓄熱式床下チャンバー空調、換気設備には全熱交換器および自然換気窓、給湯設備には太陽熱集熱器と HP 給湯器の併用システム、照明設備には調光機能・人感センサー付き LED 照明を計画した。

本住宅には、創エネルギー設備だけでなく、蓄電池と HP 給湯器の 2 つの蓄エネルギー設備を搭載している。設備機器の運用方法として、日射量予測システムの予測値に応じた HP 給湯器の稼働時間や、蓄電池の（もしくは、からの）放電量の決定や、全熱交換器の OA 吸い込み口の季節に応じた切り替えなど、季節、時刻、天気ごとに異なる効率的な運用計画を行う。さらに、今後普及が見込まれる DR・バーチャルパワープラント（以下、VPP）などの都市規模のエネルギーマネジメントへの対応も目指し、太陽光発電・太陽熱集熱器の創エネルギー設備と蓄電池・HP 給湯器の蓄エネルギー設備を連携させることで、消費エネルギーの削減に加え、自家消費率の向上を図った。

また時々刻々と変化する自然エネルギーをより有効に使うことを目的に、本計画では居住者の環境調整に対する意識の触発とともにライフスタイルへの提案も行った。ロτζアの最適運用を学習するシステム、ならびに細かな電力需要の変動にさらに対応できるよう、IoT を用いた「勝手に ECHONET Lite」および居住者の環境調整行動を促す通知システムを提案することで、ECHONET Lite 単独では難しかった制御を実装した。

6.4.2 導入設備

図6-12, 表6-3に導入設備一覧を示す。空調には高効率エアコン（定格冷房能力2.2kW, 定格暖房能力2.5kW）を用いた。通常の壁面への設置に加え、汎用空調機を床下に吹き出すように設置した潜熱蓄熱式床下チャンバー空調の計画も行った。換気設備は全熱交換器を用いた。照明設備はLED照明を使い、時間帯や作業に応じた適切な照度設定と自動消灯を可能とし電力消費量の削減を図った。

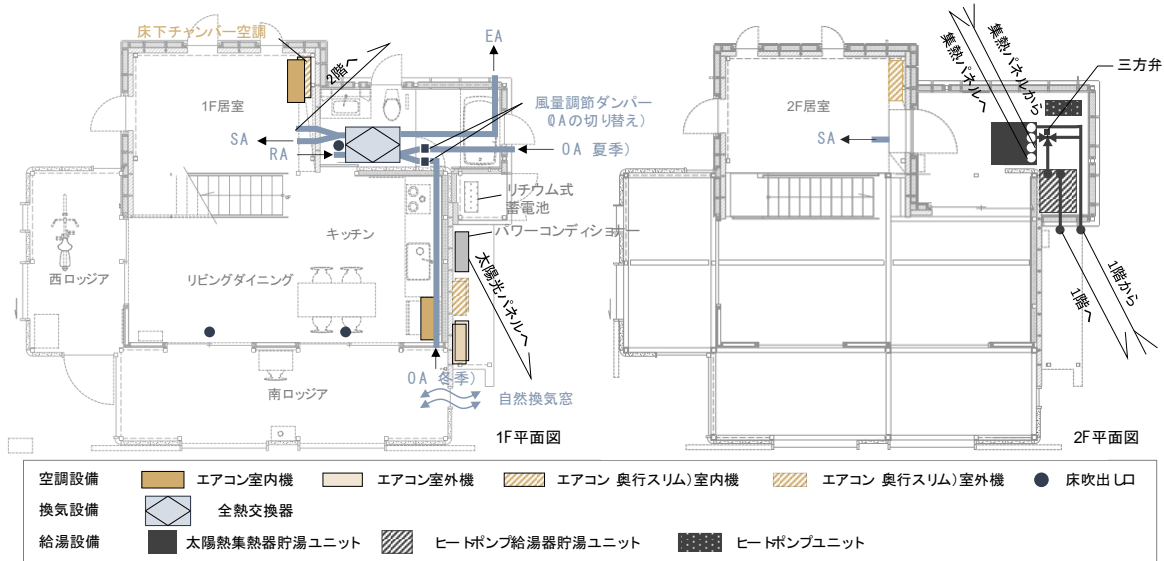


図 6-12 導入設備一覧

表 6-3 導入設備一覧

空調設備	実測用	ルームエアコンによる冷暖房
	展示用	ルームエアコンによる空気式床冷暖房
換気設備	夏季	全熱交換器による第一種換気（外気より給気）
	中間期	第三種換気
	冬季	全熱交換器による第一種換気（南ロジヤより給気）
照明設備		調光機能付きLED照明, 人感センサ付きLED照明
給湯設備		太陽熱集熱器とHP給湯器の併用
発電設備	実測用	太陽光発電
	展示用	Pata-Pata PVシステムによる太陽光発電

6.4.3 創蓄連携システム

図 6-13 に創蓄連携設備の構成を示す。本実証住宅は PV パネル・太陽熱集熱パネルによる創エネルギー設備と、蓄電池・貯湯タンクによる蓄エネルギー設備を導入した。創エネルギー設備で生成したエネルギーの消費先や貯蓄先を、ECHONET-Lite を用いた HEMS により制御する創蓄連携システムを構築した。日射量予測を利用し、PV パネルによる発電の余剰電力を蓄電池の充電とヒートポンプ給湯器（HP 給湯器）の給湯に用いることで、住宅内での自家消費・電力負荷の平準化の実現と、将来的な DR への対応が可能なシステムを計画した。

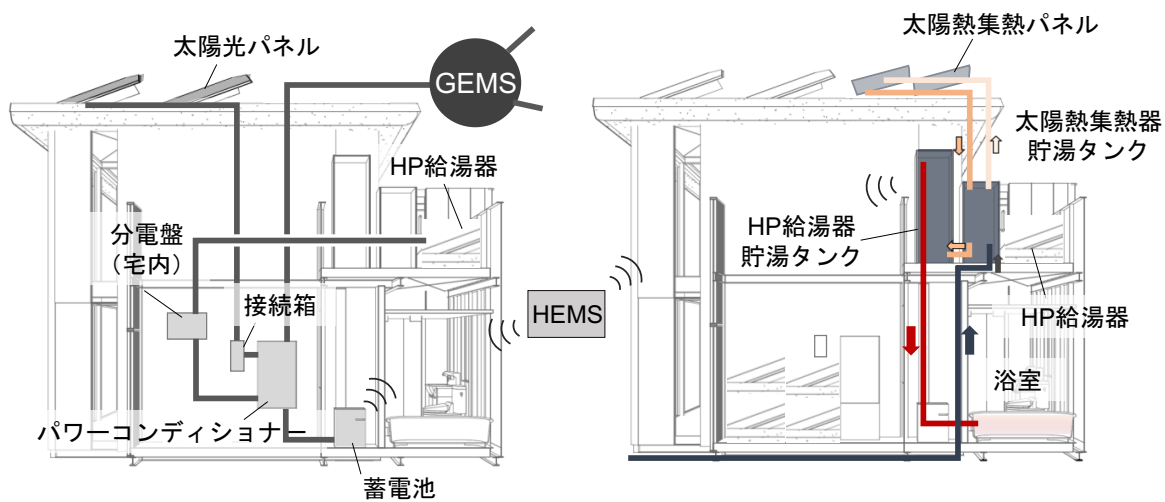


図 6-13 創蓄連携システム構成（左：電気設備，右：給湯設備）

1) 電気設備

図6-14に電気設備概要、表6-4に太陽光発電モジュール・蓄電池の仕様を示す。本住宅の創エネルギー設備には、合計3.5kWのPVパネルを年間で最も発電効率が高い31°で建物南側地上に14枚と5.6kWhの容量をもつ蓄電池を設置した。

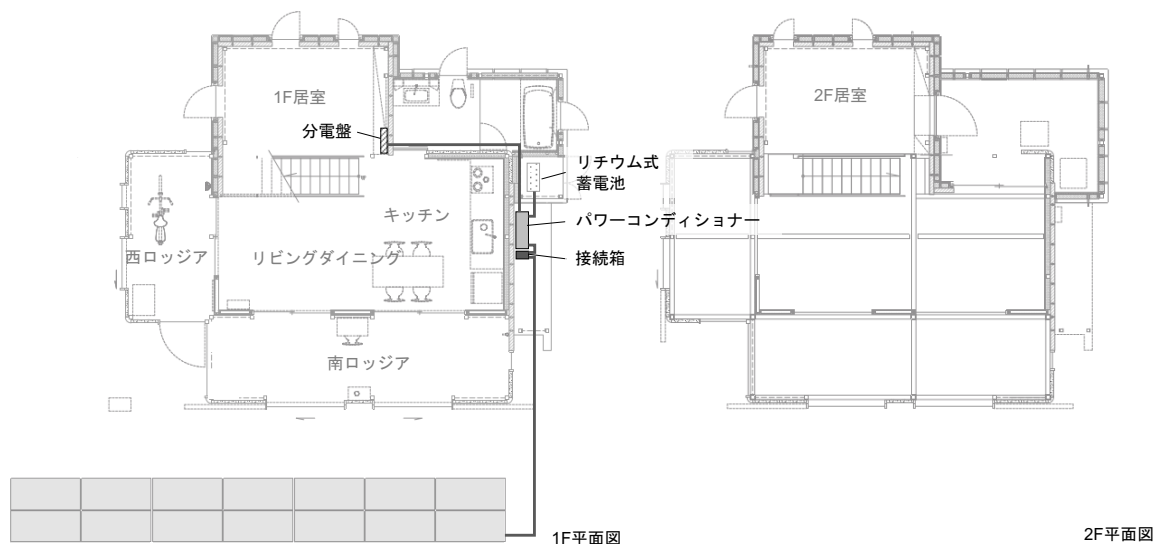


図 6-14 電気設備概要

表 6-4 太陽光モジュール・蓄電池の仕様

設備名	最大出力 [W]	枚数	合計最大出力 [kW]	モジュール変換効率
太陽光モジュール	250	14	3.5	19.5%
設備名	蓄電容量 [kWh]	入出力定格電力 [kW]		
リチウムイオン蓄電池	5.6	充電	1.5	
		放電	2.0	

2) 給湯設備

図 6-15 に給湯設備概要，表 6-5 に太陽熱集熱器・HP 給湯器の仕様を示す。本実証住宅では太陽熱集熱器と HP 給湯器を併用した集熱併用給湯システムを提案した。集熱器貯湯タンクを HP 給湯器の貯湯タンクの市水流入口に接続し HP 給湯器の稼働時間短縮を図った。

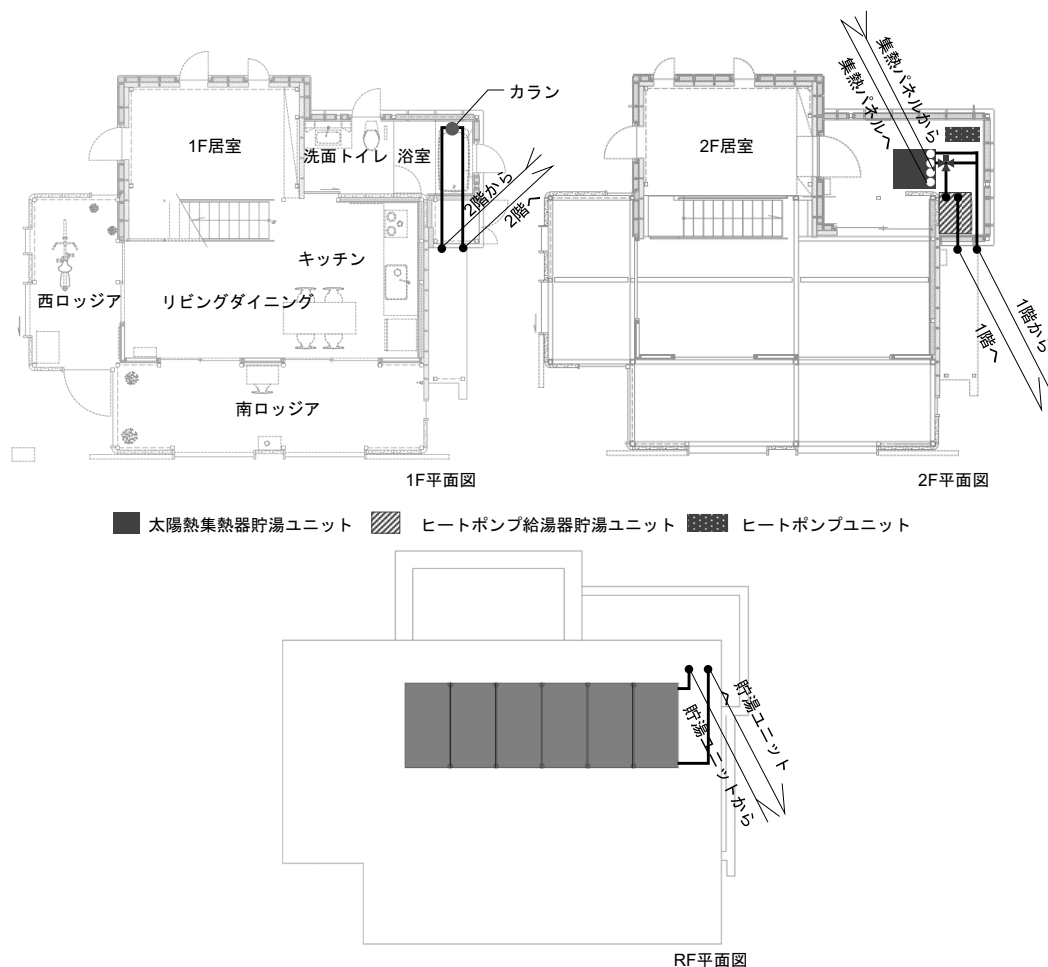


図 6-15 給湯設備概要

表 6-5 太陽熱集熱器・HP 給湯器の仕様

設備名	タンク容量 (L)	集熱方式	給湯給水方式	消費電力 (W)		パネル面積
				制御	3	
太陽熱集熱器	200	強制循環式	水道直結	集熱運転時	13~75 (可変)	11.7㎡
設備名	タンク容量 (L)	定格能力 (kW)		定格消費電力 (kW)	沸き上げ温度範囲 (°C)	
ヒートポンプ給湯器	370	中間期	4.5	0.895	約65~90°C	
		冬季	4.5	1.5		

6.4.4 日射量予測を用いた機器制御手法

図 6-16 に日射量予測に基づく制御イメージ、表 6-6 に日射量予測手法概要を示す。日射量予測手法³⁾を用いた日射量予測値を受け、発電量に換算し HP 給湯器と蓄電池のスケジュール制御を行った。過去の日射量と気象データの実測値が紐づけられたデータベースから、39 時間先までの気象予測データを用いて全天日射量の予測を行った。発電量は、斜面日射量を推定後、モジュール変換効率とパネル面積から算出した。予測された当日および翌日の発電量を元に、HP 給湯器の稼働開始時刻と、稼働時間、蓄電池の充電量の制御を行った。HP 給湯器の稼働開始時刻は PV 発電によって HP 給湯器の電力消費を賄える時間とし、稼働時間は発電量が多い晴天日には長く、発電量の少ない天候不順日は短くなるようにした。蓄電池は充電時間を調整することで、充電量を変化させ余剰電力の逆潮流量の平準化を目指した。

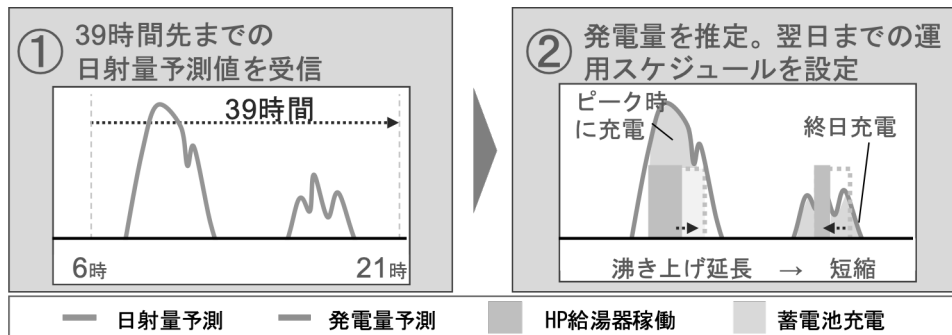


図 6-16 日射量予測に基づく制御イメージ

表 6-6 日射量予測手法概要

日射量	予測対象地点	実証住宅（大阪市）	緯度34.703	経度135.493
	予測用データ地点	大阪管区気象台	緯度34.682	経度135.518
	予測値	全天日射量[W/m ²]	7:00-16:00の各1時間平均値	
	予測入力値	毎日6:00のMSM-GPV		
	予測協力	早稲田大学 先進理工学研究科電気・情報生命専攻 若尾真治研究室 Just-In-Time Modeling 信頼区間推定・点推定		
発電量	斜面日射量変換	Erbsモデル 傾斜角31度		
	発電量換算	モジュール変換効率 19.5% , パネル面積 17.9m ²		

6.4.5 IoT を用いた制御システム

省エネルギーを目的に住宅と設備を制御する際に、制御に住み手が介在し運用法を継続的に、長期的に学習していくシステムとして IoT (Internet of Things) を用いた制御システムを提案した。住み手が温熱環境を五感で知覚し主体的な調整を繰り返す中で居住環境の構築方法を徐々に修得すると考え、全自動化しないことで、人間を媒介したシステムとした。住み手の変化と、それに呼応するように建築も変化し続けられるレジリエントな住環境形成を目指した。

1) ロジック窓開閉通知システム

ロジック窓の開閉のタイミングに関しては、日中に窓を開ける際は室内とロジック窓の温度差に住み手は直感的かつ即時的に感じることができるが、窓を閉める際は寒さを感じてからでは既に室温が低下しているため遅い。そのため、ロジック窓の開閉すべきタイミングを視覚的、触覚的に居住者に伝え、行動を促進することが求められる。

図 6-17 にロジック窓通知システム概略図を、図 6-18 に回路図を示す。マイコンは arduino、温度センサーは HTU21DF を用いた。居室とロジック窓に設置したセンサーは iOS 端末と bluetooth で接続した。iOS 端末は天気予報 API から情報を収集し、センシングした値とデータセットを参照することで居室内の空調負荷が最小となる窓の開閉パターンを求めた。晴天の場合、ロジック窓と居室の室温の差が 0 になる時刻に通知を行った。

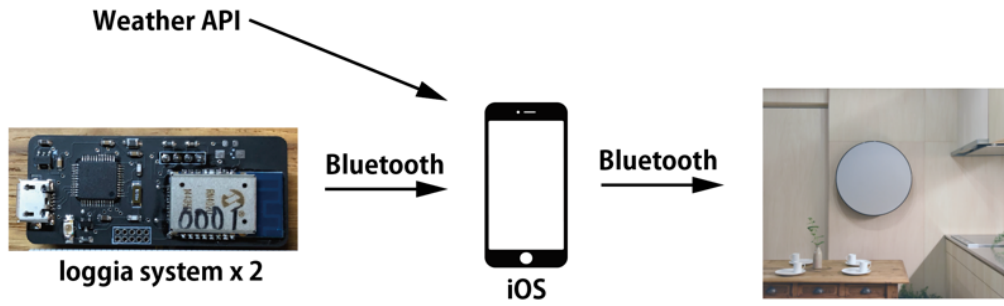


図 6-17 ロggia通知システム概略図

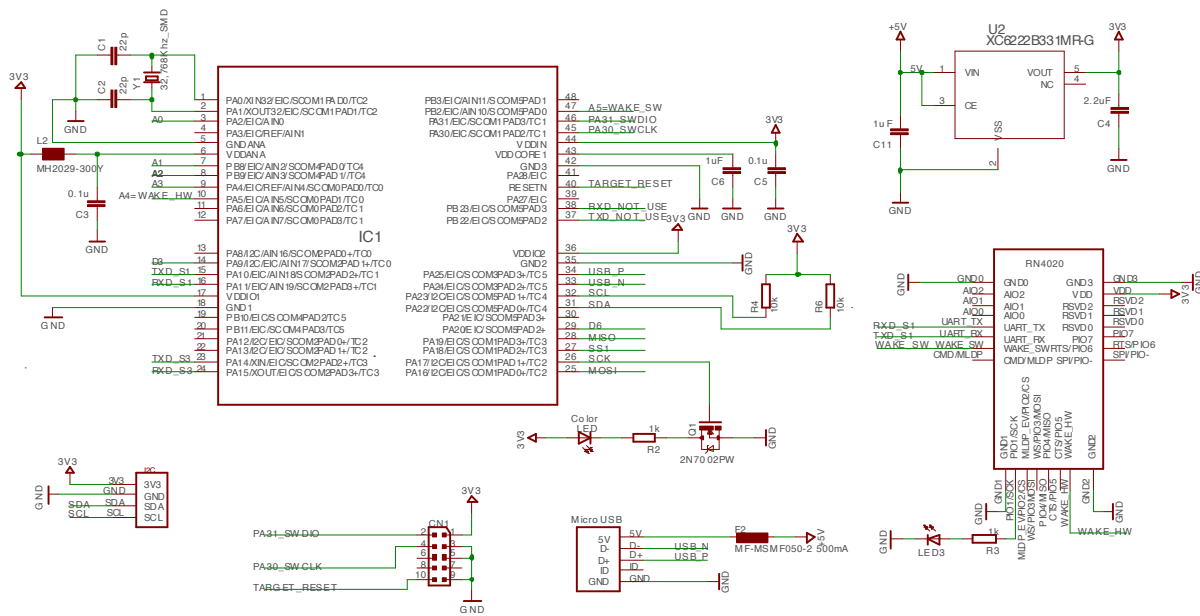


図 6-18 ロggia通知システム回路図

2) 勝手に ECHONET Lite

次世代の ZEH を考えるにあたって、コンセント負荷に対しても積極的な提案が必要である。住み手の「意思」を取り込み、エネルギーの使い方を学習し、電力ピークを抑え、熱的快適性を維持することが重要である。エネルギーの平準化、特に買電の平準化を住み手が意識的に行うことをサポートするシステムは、日本においては発電所の数を減らすことに貢献することを意味している。住み手が消費電力の閾値を設定し、次に居住環境の快適性レベルを設定する。快適性レベルに合わせた PMV により空調を停止するなどし電力を平準化する。閾値を超えた場合、触覚的な手段でエネルギーの使用量を住み手に伝え、行動変容を促す。試行錯誤の繰り返しの中でシステム自体が強化されるにしたがって人間が賢くなることが予想される。

コンセント負荷に制約を与える「勝手に ECHONET Lite」のシステム概略を図 6-19 に示す。デバイス A は送電網の系統から入ってくる購入した電力を計測する。デバイス B はリレー回路、デバイス C はインタラクション（皿を揺らして音を出す）デバイスである。デバイス A で計測する電力（太陽光での発電分および蓄電池からの放電を差し引いた値）が iOS で設定した閾値を超えると、デバイス C が皿を鳴らし始める。たとえば 1200W という閾値を設けたにもかかわらず、ドライヤーなどで 2000W 消費した場合は皿がうるさくなる。10 秒以上皿が鳴り続けると強制的にドライヤーを繋いでるコンセントがデバイス B によって電力を遮断する仕組みになっている。iOS で設定する閾値は、再生可能エネルギー分の発電量を考慮した上で、DR 信号を反映した変動的な値を設定することも可能である。

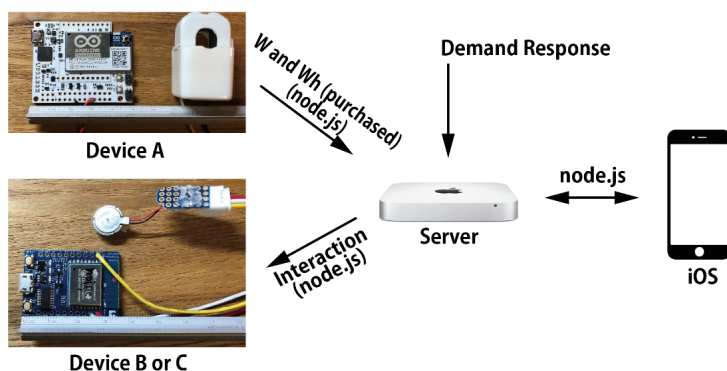


図 6-19 勝手に ECHONET Lite

6.5 実測結果

6.5.1 実測概要

温熱環境の実測は2017年11月18日0:00～11月21日19:00, 2017年11月24日0:00～11月28日19:00の2期に分けて「エネマネハウス2017」の競技対象期間に行われた。9:00～12:00, 14:00～18:00は人体負荷として学生3人が在室した。なお, 期間中の平均外気温は10.4℃であった。

6.5.2 実測条件

図6-20に人体負荷・給湯負荷・家電負荷の前提条件を示す。一般的な3人世帯の生活を模擬した実測を行うため, 第1期, 第2期の実測期間において9:00～12:00, 14:00～18:00は学生3人が在室して給湯出湯等のタスクや, 設備の運用等を行った。

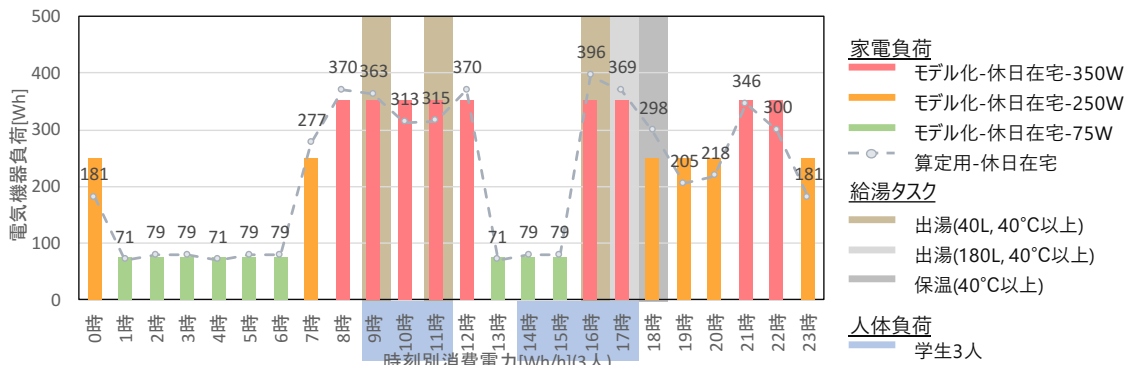


図 6-20 人体負荷・給湯負荷・家電負荷の前提条件

表6-7に日毎の特別条件を示す。表に示した日においては特別条件として指定した時間に窓開けや来客等のタスクを行った。

表 6-7 日毎の特別条件

	第1期	第2期				
	11/21	11/24	11/25	11/26	11/27	11/28
午前	10:00		9:00 10:30	9:00		9:00 11:30
午後	17:00	14:00	14:15 17:00	14:15 14:30	14:15	14:15

- 出湯40L
- 出湯180L
- 照明全灯10分
- 来客
- 窓開け10分

6.5.3 測定項目

表 6-8 に測定項目，図 6-21 に測定位置を示す．評価項目はエネルギーとして，エネルギー消費量，発電量，日負荷率の 3 項目，室内環境としてグローブ温度，相対湿度，CO₂ 濃度，昼光率，内外音圧レベル差の 5 項目の計 7 項目が対象とされた．そのための計測項目として，分電盤電力，グローブ温度，相対湿度，CO₂ 濃度，照度，音圧，浴槽温度を測定した．なお，測定値はリアルタイムで把握できないよう隠されている．また評価対象外項目として，WOOD.VIP 壁と集成材壁の断熱性能の測定を行った．

表 6-8 測定項目

		測定箇所・測定高さ	測定間隔	測定機器
エネルギー	電力消費量	分電盤	30分積算	市販HEMS A SEG)
	売買電力量			
	太陽光発電量	PVパネル	30秒間隔	HEMSGW (ECHONET Lite規格)
	蓄電池放電可能量	蓄電池		
	HP給湯器 給湯可能量	HP給湯器		
	日射量	屋外ストックルーム屋根	1分間隔	弘精機 小型日射計 ML-01 (換算係数 44.1μV/(W/m ²)) + T&D RTR-505-V
室内環境	空気温度	リビング (0.1m,1.1m,2.1m,3.1m (可動式水平幕より上部) の4点) キッチン、1F居室、洗面トイレ、南ロτζア (各点0.1m,1.1mの2点) 西ロτζア、2F居室、屋上 (各点1.1mの1点)	1分間隔	T&D TR-72WF
	相対湿度			
	CO ₂ 濃度	リビング、1F居室 (各点1.1m)	1分間隔	espec CO2 Recorder RSW-20S
	照度	確認用に任意で使用	任意	KONICA MINOLTA T-10A
	エアコン吹出し温度	リビング、1F居室の壁エアコンの吹出し口	1分間隔	T&D TR-72WF
給湯システム	給湯システム温度	市水、HP給湯器出湯、HP給湯器流入、集熱給湯器出湯	1分間隔	T&D RTR-502
	流量	HP給湯器出湯	1分間隔	愛知時計電機 MND20-TCU (換算係数 18.6 ml/P) + T&D RTR-505-V
	浴槽内温度	浴槽出湯、浴槽内上部、浴槽内下部	1分間隔	T&D RTR-502

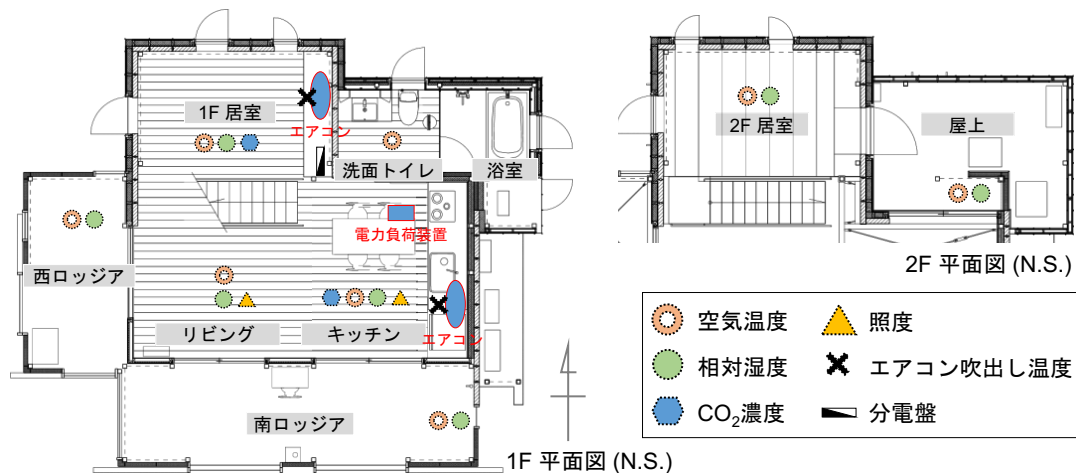


図 6-21 測定位置

6.5.4 目標値

表 6-9 に室内環境目標値を示す。室内環境が快適な室内環境を示す目標値の範囲内となるような室内環境を目指した。

表 6-9 室内環境目標値

空気温度	21.2~25.2°C	CO ₂ 濃度	800ppm 未満
相対湿度	40~70%	照度(10:00~15:00)	全天空照度に対する室内水平面照度の割合が4%以上

式 (1) ~式 (5) にエネルギーの評価指標を示す。エネルギーは系統との電力需給の状態を評価するため、系統に与える負荷に関して日負荷率、自給率、自家消費率の 3 つの指標を用いた。実証実測評価にあたりエネルギー消費量、日負荷率が競技における評価指標であった。

$$\text{ZEH 達成率 (発電量)} = \frac{\text{発電量 [Wh]}}{\text{その他を除く該当日の電力消費量 [Wh]}} \quad \text{式 (1)}$$

$$\text{ZEH 達成率 (基準値)} = \frac{\text{その他を除く該当日の発電量} - \text{発電量 [Wh]}}{\text{その他を除く基準値の電力消費量 [Wh]}} \quad \text{式 (2)}$$

$$\text{自家消費率} = \frac{\text{発電量} - \text{売電量 [Wh]}}{\text{発電量 [Wh]}} \quad \text{式 (3)}$$

$$\text{自給率} = \frac{\text{発電量} - \text{売電量 [Wh]}}{\text{電力消費量 [Wh]}} \quad \text{式 (4)}$$

$$\text{日負荷率} = \frac{\text{(買電量} + \text{売電量) の 1 日の平均値 [Wh]}}{\text{(買電量} + \text{売電量) の 30 分平均値の 1 日の最大値 [Wh]}} \quad \text{式 (5)}$$

6.5.5 運用条件

6.5.4 に示した室内環境目標，エネルギー指標に対して，実測期間中に主に行った運用方法を以下に示す。

1) 窓・ブラインド

窓は窓開け条件時以外全てを閉めた状態を基本とした。断熱ブラインドはロτζィア内側窓のもの以外は，2F 居室の吹抜け側を含む全てを閉鎖した。ロτζィア内側窓の断熱ブラインドは，昼光導入のため 10:00～15:00 は開放し，15:00 以降は全て閉鎖した。遮熱ブラインドは 10:00～15:00 は開放を基本とした。他の時間帯においては，日射が少ない場合は閉鎖する運用を行った。

2) 可動式水平幕

18 日は吹抜けの一部のみ，18 日以外は常時吹抜け全面に幕を張った状態した。

3) エアコン

リビング壁エアコンを主とし，1F 居室のエアコンを補助的に使用した。18:00～8:00 はリビング壁エアコンを設定温度 23～24℃ で運転し，他の時間においては空気温度が目標値に満たない場合のみ使用した。

4) 全熱交換器

吹出し口を 1F 居室のみとし，人が在室する時間帯に風量 160 m³/h で運転させた。

5) 照明

15:00～18:00 の時間帯にリビングの水平面照度が 200 lx を下回る場合のみ使用した。

6.5.6 実測結果

1) 南ロτζア窓の開閉運用による環境調整効果

図 6-22 に空気温度の経時変化，図 6-23 に CO₂ 濃度の経時変化を示す。高断熱域の基準値を超える温度上昇と来客条件による CO₂ 濃度上昇を抑えるために，南ロτζア内が 23 °C を超えた 11:00~12:00，14:00~15:00 は南ロτζア内側窓を開放し，高断熱域と南ロτζア内の空気を混合させた。また，27 日 12:00~14:00 の不在時間は窓を閉め，遮熱ブラインドを下げた。これらの環境調整により，高断熱域のオーバーヒートを防ぎ目標温度域内に空気温度を維持した。27 日 14:15 に内外共に窓開けを行った際の空気温度の変動に比べ，南ロτζア内側窓のみ開閉した際の変動が小さかったため，南ロτζアが外部との熱的中間領域として機能し温熱環境調整に有用であることが確認された。

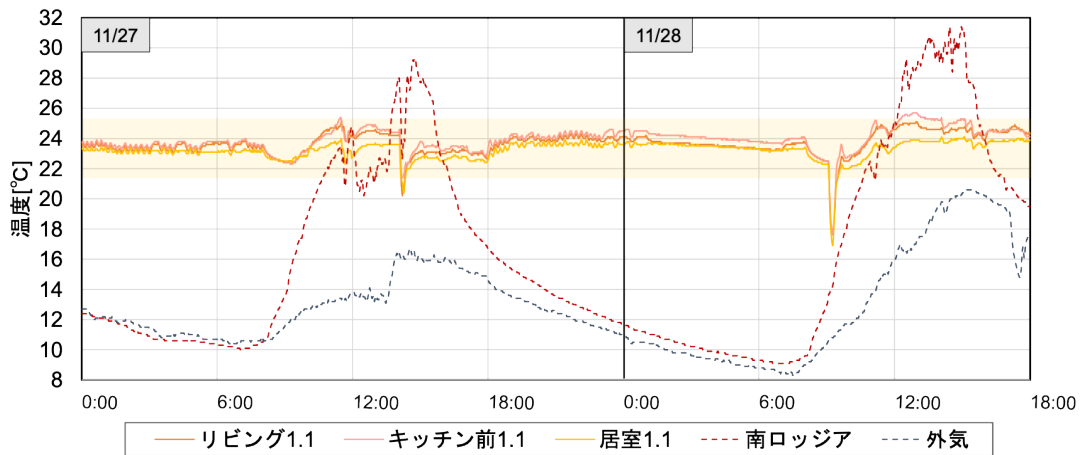


図 6-22 空気温度の経時変化

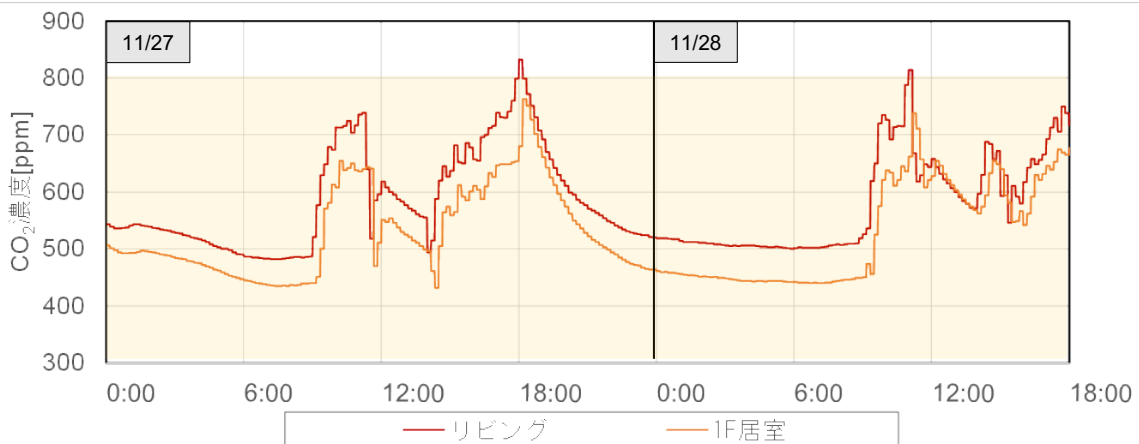


図 6-23 CO₂ 濃度の経時変化

2) 室内環境評価

窓開け時に著しい温度低下が見られたものの、実測期間中において高断熱域の空気温度は約94%、相対湿度は約95%、CO2濃度は約99%の時間で目標値内を推移し、快適性の高い住空間であることが実証された。更に各室の温度差が小さく、健康被害対策が実現していることが示された。リビングの照度においても目標値を99%の時間で達成しており、昼光導入が適切に成されていることが示された。

3) エネルギー実測結果

図6-24に代表日の電力利用波形、表6-10に日ごとのエネルギー評価結果を示す。25～26日は26日の発電量が少ないことが予測され、25日にHP給湯器の稼働時間を増やした。一方で、同様の条件であった19～20日は稼働時間の調整を行わなかった。発電量が少なかった20日と26日の比較より、稼働時間の調整によって、日中の買電量が大幅に削減され、自給率と日負荷率の向上を確認した。蓄電池の制御に関しては、制御を行った27日は、同程度の発電量で制御を行わなかった19日に比べ日負荷率が29%増加した。実測競技上の特別な制御条件を設けた日を含む実測期間日平均が自家消費率72%、自給率61%、日負荷率18%となり、HP給湯器と蓄電池の制御によりエネルギー的に自立性の高い運用を実現した。

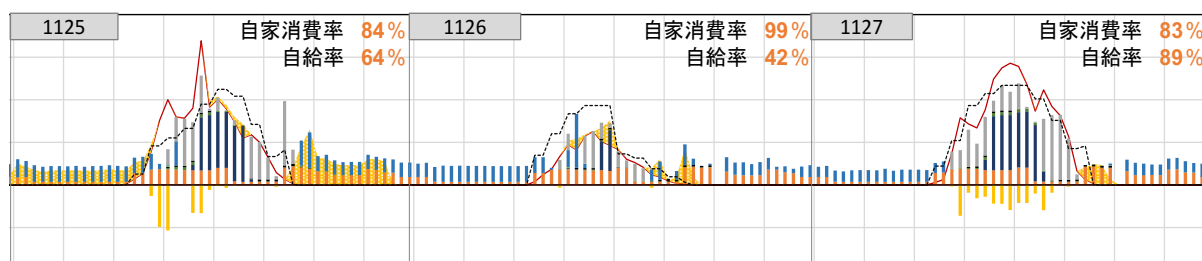


図 6-24 代表日の電力利用波形

表 6-10 日ごとのエネルギー評価結果

エネルギー評価指標	第1期				第2期					日平均
	11/18	11/19	11/20	11/21	11/24	11/25	11/26	11/27	11/28	
自家消費率	100%	90%	98%	65%	53%	84%	99%	83%	41%	72%
自給率	13%	90%	22%	81%	84%	64%	42%	89%	64%	61%
日負荷率	37%	26%	25%	18%	38%	14%	54%	55%	18%	18%

図 6-25 に日積算電力消費量の実測値と設計値の比較を示す。実測値の日平均データと比較するため、エネルギー消費性能計算プログラムで試算した年間の一次エネルギー消費量の基準値と設計値を 1 日分に換算した。実測値の日平均の省エネ割合は基準値から 86%削減となった。また ZEH 達成率は 106%となった。

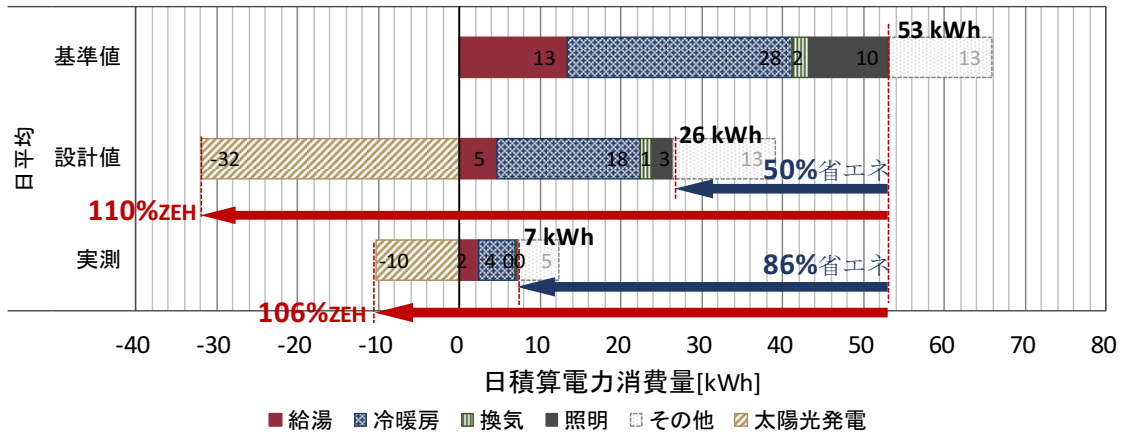


図 6-25 日積算電力消費量の実測値と設計値の比較

6.6 まとめ

既存住宅の改修型 ZEH として提案された本実証住宅の計画および、性能、実測結果に関する報告を行った。高断熱化や高性能設備、太陽光発電の導入などにより、BEI 値は 0.30 となり、BELS（建築物省エネルギー性能表示制度）の最高等級★5（ファイブスター）を獲得した。また、実測より運用段階での『ZEH』達成を確認した。さらに、不均一・非定常な温熱環境を伴った ZEH デザイン、再生可能エネルギーによる発電量の変動に合わせた設備制御、住み手と共に居住環境の構築方法の学習を行う IoT デバイスの提案など、設計者と居住者の技術のバランスを担保した未来の ZEH に対するビジョンを示した。

参考文献

- 1) 総務省：2013 年度住宅・土地統計調査, 2013
- 2) 国土交通省：空き家の現状と論点, 2015
- 3) 鈴木孝宣, 後藤悠主, 寺園隆宏, 若尾真治, 大関崇：Just-In-Time Modeling に基づく日射
量子測手法の開発, IEEJ Trans.PE, Vol.131, No.11, pp912-919, 2011 年 11 月

7章 総括

7 総括

本論文では、居住者が主体的に環境調整行動をする住宅の設計を可能にするため、既往研究調査、および事例研究と実測調査を行い、温熱環境の不均一性と非定常性がもつ価値を明らかにするとともに、これらを操る技術を考究した。

第1章では、本研究の目的を述べるとともに、既往研究の概観から本研究の位置づけを行った。

第2章では、居住者による主体的な環境調整行動を誘発することを目的として、不均一・非定常な温熱環境を意図的に作った住宅の設計事例について述べる。本研究で扱う3階建ての住宅は、スキップフロアで上下階の空気が繋がっていることから、上下方向に不均一な温熱環境となっている。冬季において要求される室温の高い脱衣所・浴室は3階に、要求室温の低い寝室は1階に配置することで、不均一な熱的条件を空間の機能配置に利用した。2階のリビングの要求室温は居住者の体格および着衣量からPMVが0になる条件とした。寝具をまとった寝室、着衣量が0となる脱衣所・浴室の要求室温は、各居室の利用時間に応じて、人体の深部体温の変動を許容範囲におさめるようにした。リビングに1500Wの熱を投入した時に各居室の要求室温を実現するための外皮性能を熱負荷計算で求めた。次に、夏季における広域風環境解析から、敷地に流れる風の条件を求め、それらを境界条件として設定した。2階のリビングに0.3m/sの微気流が流れるようにファサードの開口位置を、随伴変数法を用いた流体の感度解析によって求めた。不均一・非定常な温熱環境においても、快適性を担保することによって、居住者の環境調整行動を誘発するデザインを行った。

第3章では、不均一・非定常な温熱環境を計測するウェアラブルデバイス「YUHO (遊歩)」を、オープンソースハードウェアとスマートフォンを用いて開発した。気温、湿度、照度、風速、位置情報、および被験者の活動量と申告量を1秒間隔で計測することで、従来では難しかった移動を伴った不均一・非定常な温熱環境を測定・評価することが可能になった。YUHOを用いて東京駅周辺を実測調査した。実測の結果、快不快感の経時変化から、屋内環境から屋外環境への移動等の温熱環境が急変した場合や屋外歩行から屋外滞在をした瞬間に快不快申告が見られた。また、快不快申告は空気温度、相対湿度の絶対値と相関があり、気流速度、照度の絶対量とは相関が見られなかった。一方、気流速度の変化量と快不快申告にはある一定の傾向が見られた。従来の快適性の指標では評価しえない温熱環境においても快申告を計測したことから、不均一非定常環境を計測し評価をすることは重要であることが分かった。

第4章では、不均一・非定常な温熱環境を操る技術として、潜熱蓄熱材(Phase-Change Material, 以下 PCM とする)を用いた住宅用空気式床暖房システムについて述べた。PCM の時間推移を伴った熱性状に着目し、熱源に家庭用エアコンもしくは空気式太陽熱集熱器を想定した上で、床を構築するための施工工程を変更することなく、蓄熱材への加熱手段を対流方式とした比較的安価な住宅用空気式床暖房システムを開発した。気密性能と断熱性能が担保された床チャンバー内に暖気を送ることで蓄熱層に熱を伝達し、床材から室内へ放熱する。蓄熱層は PCM とし、必要に応じて PCM の下に水封入層を配置する。熱を蓄熱層から床材に伝導するため、蓄熱層と床材を密着する Spring-effect Heat-conductive metal Plate (以下 SHP とする)を開発した。SHP は 0.35 mm の板金を一定の形状に折り曲げることで、床材の裏面への密着性を担保するばね効果と、強度の向上を実現した。また、実験に先だって本システムの最適設計を行うために、放熱時間と放射温熱環境の安定性に着目して最適化を定義するとともに、PCM の相変化現象を含む床の非定常伝熱解析を行う物理モデルを開発し、数値計算に基づいて最適な PCM 仕様を決定するための線図を開発した。一般に、PCM はその遷移域において単位体積当たりの熱容量が大きいいため、木造住宅など熱容量の小さい建築の温熱環境を安定化するために利用される。本研究において開発した線図を用いることで、任意の温熱環境を実現することが可能になった。

第5章では、住宅内標準通信プロトコルである ECHONET Lite を用いて、人間の主体的な行動を保しつつ、快適性を維持しながら消費電力のピークを操るシステムを開発した。エアコンを含む複数の家電の制御によって消費電力のピークを操作するためには、居住者の快・不快に基づいて制御する必要がある。エアコンにおいて ECHONET Lite で取得可能な情報と制御可能な実装内容を調査することで、実装状態の差を明らかにした。室温を計測するセンサーの仕様が異なるため、同一環境においても機器によって取得する情報が異なることが分かった。次に、エアコンに実装された共通のプロパティを利用して、センサーの差異が反映されないように時定数を調整した上で、暑いあるいは寒い環境を自動的に緩和するシステムを構築した。また、ECHONET Lite 対応のスマートタップについても調査を行った。計測だけではなく電源の ON/OFF 制御も可能であるため、エアコンとスマートタップを用いて複数の家電の制御を行った。快適域および消費電力が、設定した閾値を超えない様にエアコンおよび複数の家電を制御するアルゴリズムを開発した。設定した快適域が狭いと家電の利用に制限があるが、快適域を比較的広く設定することでエアコンよりも家電の利用を優先できるシステムが構築できることを実証した。

第6章では、築40年の2階建て鉄骨造の工業化住宅を想定した改修型ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス (Net Zero Energy House 以下 ZEH とする) の実証住宅を提案した。①既存住宅の躯体を活用した ZEH とすること、②ZEH のデザインの幅を拡張すること、③自然エネルギーを有

効活用すること、④デマンドレスポンスに対応したエネルギー運用を可能とすることを目指した設計を行った。なお、実際には既存住宅を改修するのではなく、改修後を想定した住宅を新築した。本実証住宅は、ZEHの基準を満たす高断熱の新設壁が、既存の断熱性能の低い躯体の内外を縫うような平面構成となっている。異なる機能を持った平面を重ねることによって、住宅内に高断熱壁に囲まれた高断熱な居住空間と、新旧の壁に挟まれた低断熱の緩衝空間（ロτζア）を配置した。ロτζアは住空間と屋外との緩衝空間として季節に合わせた環境調整を担っており、居住者の主体的な環境調整行動を通知システムによって支援した。冷暖房は高効率エアコンと、展示用に吹き出し口が床下になるように設置した蓄熱式床下チャンバー空調とし、蓄熱層はPCMの下に水封入層を配した指向性蓄熱材を実装した。また、太陽光発電パネル・太陽熱集熱パネルによる創エネルギー設備と、蓄電池・貯湯タンクによる蓄エネルギー設備を導入した。創エネルギー設備で生成したエネルギーの消費先や貯蓄先を、ECHONET-Liteを用いたホームエネルギーマネジメントシステムにより制御する創蓄連携システムを構築した。日射量予測を利用し、太陽光発電パネルによる発電の余剰電力を蓄電池の充電とヒートポンプ給湯器の給湯に用いることで、住宅内での自家消費・電力負荷の平準化の実現と、デマンドレスポンスへの対応が可能なシステムを計画した。「エネマネハウス 2017」の競技期間中に行われた実測調査においてロτζアの有効性が確認された。日射量予測値から推定した発電量を元にヒートポンプ給湯器の稼働開始時刻と、稼働時間、蓄電池の充電量を制御した。また、蓄電池は余剰電力の逆潮流量を平準化するべく充電量の調整を行った。その結果、エネルギーの自家消費率、自給率、日負荷率の日平均値はそれぞれ72%、61%、18%となり、自立性の高い運用を実現した。エネルギー消費性能計算プログラムで試算した一次エネルギー消費量の基準値と実測値を比較した結果、ZEH達成率（基準値）は106%となり、計画の有用性が実証された。

第7章では、総括を行った。

本論文では、住宅の設計事例、独自に開発した計測装置、潜熱蓄熱材を用いた住宅用空気式床暖房システム、および住宅内標準通信プロトコルを用いたシステムにより、動的な温熱環境を評価するとともに、これらを操る方法に関して考究した。また、これらの要素技術をZEHの設計において統合し、実物件を建設した上で検証を行った。

研究業績

研究業績

本論文に関連する研究業績

査読論文

Jun NAKAGAWA, Microclimate House, Japan Architectural Review Volume2, Issue3 July 2019
Pages 316-322

中川純, 田辺新一, 潜熱蓄熱材を用いた住宅用空気式床暖房システムの研究, 日本建築学会環境系論文集, 日本建築学会, 84(757), 271-280, 2019-03

中川純, 池原靖史, 渡辺直哉, 小林達宏, 田辺新一, 秋元孝之, 林泰弘, 若尾真治, 常岡優吾, 山口真吾, 大木玲奈, 菅野颯馬, 野元彬久, 丸山由香, 荒木菜那, 山品太輝, 既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案, 日本建築学会技術報告集, 日本建築学会, 25(59), 239-242, 2019-02

中川純, 微気候の家, 建築雑誌作品選集 : Selected Architectural Designs, 日本建築学会, (1696), 22-23, 2017-03

国際学会予稿集・発表

Jun Nakagawa, Yuka Maruyama, Tianshu Xu, Yugo Tsuneoka, Akihisa Nomoto, Ryoya Furukawa, Shingo Yamaguchi, Shin-ichi Tanabe, Takashi Akimoto, Research on energy reduction methods using IoT (Internet of Things), Indoor Air 2018

Jun NAKAGAWA, Keigo KOBAYASHI, Hiroto TAKAGUCHI, Shin-ichi TANABE, Designing of human behavior, thermal comfort and ceiling on energy, Healthy Building 2017

Jun NAKAGAWA and Shin-ichi TANABE, Dynamic Thermal Comfort in Architecture, ICHES 2016

Jun NAKAGAWA and Shin-ichi TANABE, Dynamic Thermal Comfort in Architecture and Urban Arias, Indoor Air 2016

国内学会予稿集・発表

中川純, 常岡優吾, 山口真吾, 大木玲奈, 菅野颯馬, 丸山由香, 望月洋佑, 山品太輝, 渡辺直哉, 小林達宏, 田辺新一, 秋元孝之, 既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案と実証評価 その5: IoTを用いたエネルギー削減手法の提案, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.2018, p.319-320, 2018-07

山口真吾, 中川純, 他 10 名, 既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案と実証評価その1: 建築計画の概要, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.2018, p.311-312, 2018-07

菅野颯馬, 山口真吾, 常岡優吾, 大木玲奈, 中川純, 丸山由香, 徐天舒, 山品太輝, 渡辺直哉, 小林達宏, 田辺新一, 秋元孝之, 既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案と実証評価 その2: 温熱環境に関する運用計画と冬季実測結果, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.2018, p.313-314, 2018-07

常岡優吾, 大木玲奈, 山口真吾, 菅野颯馬, 中川純, 廣川由樹, 渡辺直哉, 小林達宏, 田辺新一, 秋元孝之, 林泰弘, 若尾真治, 既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案と実証評価 その3: 自立的なエネルギー運用を目指した設備・制御計画, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.2018, p.315-316, 2018-07

大木玲奈, 常岡優吾, 山口真吾, 菅野颯馬, 中川純, 廣川由樹, 渡辺直哉, 小林達宏, 田辺新一, 秋元孝之, 林泰弘, 若尾真治, 既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案と実証評価 その4: エネルギー運用に関する冬季実測結果, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.2018, p.317-318, 2018-07

荒木菜那, 野元彬久, 中川純, 他 10 名, 既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案(その1)「わたしの家」計画概要, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.2018, p.76-77, 2018-07

野元彬久, 荒木菜那, 中川純, 大木玲奈, 菅野颯馬, 田辺新一, 青島啓太, 志手一哉, 秋元孝之, 池原靖史, 小林達宏, 渡辺直哉, 既存工業化住宅を用いた改修型ゼロ・エネルギーハウスの提案(その2)提案住宅の特徴と部位の構成材, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.2018, p.78-79, 2018-07

中川純, 微気候の家, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.2017, p.100-101, 2017-07

中川純, 宮嶋裕基, 瀧本晃裕, 光岡正隆, 広橋亘, 林泰弘, 田辺新一, ECHONET Lite を用いた自動制御の提案, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2016 年, 2016.3 巻 J-61

中川純, ゼロ・エネルギー・ハウスの計測と制御, 日本建築学会 研究協議会, 2016-08

中川純, 小松昇平, 島村知弥, 角尾怜美, 高口洋人, 田辺新一, ゼロ・エネルギー・ハウスの提案と実証 (第3報) ヒューマンファクターを考慮したエネルギー制御システムの提案と実装, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.2016, p.1089-1090, 2016-08

中川純, 田辺新一, 建築・都市における動的な熱的快適性に関する研究 (第1報) ウエアラブルセンシングデバイスの開発, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2015 年, 2015-06 巻 C-27

中川純, 田辺新一, 建築・都市における動的快適性に関する研究: その1 移動計測装置の開発, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.2015, p.85-88, 2015-09

中川純, 田辺新一, 建築における動的快適性に関する基礎的研究, 年次大会予稿, 画像電子学会, 2015-06

中川純, 眞下茜, 河野良坪, 逆解析を用いた通風開口部の最適配置設計, 日本建築学会学術講演梗概集, Vol.2014, p.777-778, 2014-09

中川純, 田辺新一, 主体的快適性の基礎的研究(1), 日本建築学会 研究協議会, 2014-05

特許・著書・雑誌

- (特許) 田辺新一, 中川純, 他 5 名, 指向性蓄熱材, 特願 2016-11939, 2016-02
- (著書) 田辺新一, 中川純, 他 21 名, 快適な温熱環境のしくみと実践, 空気調和・衛生工学会, p.186-188, 2019-04
- (著書) 田辺新一, 長澤夏子, 高口洋人, 小林恵吾, 中川純, ゼロ・エネルギーハウス—新しい環境住宅のデザイン, 萌文社, 第 4 章, p.113-132, 2017-11
- (著書) 難波和彦, 中川純, 他 15 名, 建築家の読書塾, みすず書房, p.202-208, 2016-01
- (雑誌) 伊香賀俊治, 中川純, 川島範久, 住宅の創造力を広げる環境工学, 新建築住宅特集, 新建築社, 2019-06
- (雑誌) 中川純, 媒介項, 新建築住宅特集, 新建築社, 2018-04
- (雑誌) 中川純, 微気候の家, 新建築住宅特集, 新建築社, 2016-06

謝辭

謝辞

本論文は、筆者が早稲田大学大学院在学中に行った研究成果をとりまとめたものです。沢山の方々に貴重なご助言、ご協力をいただきました。これまでお世話になった方々に心から深甚の謝意を表します。

終始丁寧なご指導ご鞭撻を賜りました早稲田大学教授 田邊新一先生に心より感謝の意を表します。研究生活のはじめから今日まで、研究内容のみならず、研究に取り組む姿勢や研究を展開する知恵など、大変多くのことを学ぶことができました。また、国際学会への参加など視野を広げる意義を教えてくださいました。本当にありがとうございました。

早稲田大学教授 長谷見雄二先生、高口洋人先生、芝浦工業大学教授 秋元孝之先生には学位論文審査の労をお執りいただき、大変貴重なご助言と暖かいご支援を賜りました。秋元先生、高口先生には本論文の中核となる「エネマネハウス」等の貴重な機会をいただきました。深く感謝申し上げます。

工学院大学准教授 富樫英介先生には、研究の初期段階から論文執筆まで大変丁寧なご指導を賜りました。心より感謝いたします。また、実務家であった筆者が研究を始める機縁も富樫先生にいただきました。重ねて深くお礼申し上げます。

お茶の水女子大学准教授 長澤夏子先生、早稲田大学先進グリッド技術研究所次席研究員 光岡正隆先生、招聘研究員 広橋亘先生にも貴重なご助言とご協力を頂きました。記して感謝申し上げます。また、「エネマネハウス」では、池原靖史様、太原豊様、渡辺直哉様をはじめ、多くの先生方、企業の方々にお世話になりました。心よりお礼を申し上げます。

早稲田大学田辺研究室のみなさまにも大変お世話になりました。特に、宮嶋裕基様、丸山由香様、野元彬久様、常岡優吾様、菅野颯馬様、高橋好斗様には多大なるご協力をいただきました。また、尾方壮行先生、對馬聖菜先生、金ジョンミン様にも大変お世話になりました。記して心からの謝意を表します。

最後に、大変多くの方々からの激励やご助力に支えられ、本論文をまとめることができましたことを厚く御礼申し上げます。いつも私を支えてくださった家族に心からの感謝を記します。

2020年2月 中川 純
