

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

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

申 請 者

中川 純

Jun NAKAGAWA

建築学専攻 建築環境研究

2020年2月

熱的快適性の評価は、建築空間における温熱環境要素に対して、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。不特定多数の滞在者と室内が比較的均質である場合の温熱快適性評価には非常に有効な手段である。しかし、建築空間は人間が滞在する空間と移動を伴う空間の連続体であるため、温熱環境の非定常性と空間分布についても評価をする必要がある。また、不均一・非定常な温熱環境を意図的に作り出すことで、省エネルギー効果を伴った環境調整行動を誘発することもできる。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に関して提案し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している。加えて、住宅の温熱環境を動的に操るための手段として、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っている。さらに、これらの技術を統合し、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っている。

本論文は 7 章で構成されている。審査の要旨は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の目的を述べるとともに、背景および既往の研究について概観している。

第 2 章では、動的な温熱環境を意図的に作りだした住宅の設計事例について報告している。居住者の行動を事前に体温調節モデルを用いて予測することで不均一な温熱環境を意図的に配置している。これを実現する外皮性能を、熱負荷計算および数値流体解析を用いた逆解析により求めている。住宅の動的な温熱環境を操る技術に関して、設計者ならびに居住者の視点から考察している。その結果から、居住者による環境調整行動の可能性を見出している。建築環境工学的な分野に貢献するだけでなく、環境と人間の行動に関する重要な知見が得られており、価値ある成果と認められる。

第 3 章では、気温、湿度、照度、風速、位置情報、および被験者の活動量を 1 秒間隔で計測する装置、および被験者の心理量を申告させるソフトウェアを、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ている。従来では難しかった移動中の動的な温熱環境を、心理量を含めて同時に測定する装置を開発した点が独創的である。さらに、本装置を実際の街路空間の評価に用い、利用可能な水準まで高精度化している。センサ部の改良やソフトウェアの工夫は、今後広く適用可能な成果である。

第 4 章では、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ている。具体的には、蓄熱効果を利用し、熱源に出力変動のある家庭用エアコン等を用いても、室温変動の少ないシステムを高効率に実現している。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、比較的簡易なシステムを考案している。また、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、室温、床上表面の上下限温度、放熱時間に着目して放射温熱環境の安定性の最適化を試みている。これらの成果を用いて、設計者が仕様を決定するための線図を提案している。実際にシステムを構築し、計画が可能になる線図を開発したことは高く評価できる。また、本開発に関しては特許申請を行っている。

第5章では、居住者が快適性を維持しながら消費電力のピークを低減するエアコンと家電の連携制御システムを開発している。具体的には、温熱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ている。エアコンで設定した快適温度域が狭すぎると家電の利用に制限が生じるが、居住者の健康を担保しながら快適温度域を広くすることで、家電の利用がより自由になるシステムが構築できることを実証している。本システムは、デマンドレスポンスへの対応も見据えており、居住者の快適性、利便性を確保する提案は、実社会においても応用可能と考えられ、高く評価できる。

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の実証住宅を建設している。本実証住宅は、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。それにより、住宅内に高断熱壁に囲まれた居住空間と、新旧の壁に挟まれた緩衝空間が配置され、意図的に不均一・非定常な温熱環境を作り出している。また、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する装置を開発している。冷暖房は第4章の成果を活用した高効率エアコンを用いた蓄熱式床下チャンバー空調としている。加えて、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蓄連携システムを構築している。日射量予測を利用することで、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システムを実現している。実測調査において緩衝空間の有効性を明らかにするとともに、日射量予測値から推定した発電量をもとに制御を行うことで、自立性の高い運用が可能であることを証明している。「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、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%となった。建築計画の有用性を実証できたことから、価値ある成果として認められる。

第7章では、各章の研究成果を総括している。

本論文では、住宅設計の実践、独自に開発した計測装置、住宅用空気式床暖房システム、およびエアコンと家電の連携制御システムにより、動的な温熱環境を評価するとともに、操る方法に関して考究している。また、これらの要素技術を統合し、ZEHの計画、建設、検証に繋げている。以上、本論文は建築環境学の発展に大きく寄与するものであり、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。

2020年2月

審査員 主査 早稲田大学理工学術院 教授
工学博士（早稲田大学） 田邊 新一 _____

早稲田大学理工学術院 教授
工学博士（早稲田大学） 長谷見雄二 _____

早稲田大学理工学術院 教授
博士（工学）早稲田大学 高口 洋人 _____

芝浦工業大学建築学部 教授
博士（工学）早稲田大学 秋元 孝之 _____