

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文概要

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

2019年12月

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。特に、平均予想温冷感申告（Predicted Mean Vote, 以下 PMV とする）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。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、エネルギーが調和する新しいデザインの可能性が広がる。本論文は、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、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もつ価値を明らかにするとともに、これらを操る技術を確立するものである。

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。被験者は男女計 25 名とし、着衣量は約 0.5 clo とした。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。

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、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設計値の日平均と実測値を比較した結果、省エネ率は 86%、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。本研究の成果により、動的な熱的快適性の価値を具体的に示すとともに、不均一・非定常な温熱環境の計測と制御に関する技術を実装した。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 中川 純 印

(2019年11月21日現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文○	<u>Jun NAKAGAWA</u> , Microclimate House, Japan Architectural Review Volume2, Issue3 July 2019 Pages 316-322
論文○	<u>中川純</u> , 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
論文○	<u>中川純</u> , 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
論文○	<u>中川純</u> , 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
論文	篠山拓真, 篠田純, <u>中川純</u> , 田辺新一, 高橋幹雄, 和田一樹, 高橋祐樹, 野沢尚子, ABWを導入したワークプレイスの環境満足度と作業効率, 日本建築学会環境系論文集, 日本建築学会, (765), 975-982, 2019-11
論文	角尾怜美, <u>中川純</u> , 他 12 名, エネマネハウス 2015 における『ワセダライブハウス』の提案と実証, 日本建築学会技術報告集, 日本建築学会, 23(54), 545-548, 2017-06
論文	眞下茜, 河野良坪, <u>中川純</u> , 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, 日本建築学会, 81(721), 307-317, 2016-03
論文	眞下茜, 河野良坪, <u>中川純</u> , 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: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, 日本建築学会, 80(715), 803-813, 2015-09
論文	遠田敦, 菊地弘祐, <u>中川純</u> , Arduino・Pachube・SketchUp と連携した建築モニタリングシステムの基礎的研究, 日本建築学会技術報告集, 日本建築学会, 16(33), 791-794, 2010
総説	<u>中川純</u> , 学びの機微, 建築雑誌, 2019-12 日本建築学会 (掲載決定)
総説	川島範久, 川島宏起, 田口知子, 谷口景一郎, <u>中川純</u> , 羽鳥達也, 前真之, 渡邊浩文, 佐野恵津子, 環境で勝つ : 建築設計の新ステージ(座談会, 第 3 部 環境で勝つ-建築設計の新ステージ, <特集>2020 年省エネ義務化:建築はそのとき), 建築雑誌, 日本建築学会, Vol.1644, p.28-33, 2013-04
講演 国際学会	<u>Jun Nakagawa</u> , 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
講演 国際学会	<u>Jun NAKAGAWA</u> , Keigo KOBAYASHI, Hiroto TAKAGUCHI, Shin-ichi TANABE, Designing of human behavior, thermal comfort and ceiling on energy, Healthy Building 2017
講演 国際学会	<u>Jun NAKAGAWA</u> and Shin-ichi TANABE, Dynamic Thermal Comfort in Architecture, ICHES 2016
講演 国際学会	<u>Jun NAKAGAWA</u> and Shin-ichi TANABE, Dynamic Thermal Comfort in Architecture and Urban Arias, Indoor Air 2016
講演 国内学会	<u>中川純</u> , 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

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 国内学会	<u>中川純</u> , 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
講演 国内学会	<u>中川純</u> , 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
招待講演 国内学会	<u>中川純</u> , 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
講演 国内学会	<u>中川純</u> , 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証, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.2016, p.1089-1090, 2016-08
講演 国内学会	<u>中川純</u> , 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
講演 国内学会	<u>中川純</u> , 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
招待講演 国内学会	<u>中川純</u> , 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
講演 国内学会	<u>中川純</u> , 河野良坪, 眞下茜, 環境工学分野における随伴変数法の適用に関する研究 (第3報) 逆解析を用いた通風開口部およびエアコン・シーリングファンの最適配置設計, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2014年, 2014-10 巻 D-13
講演 国内学会	<u>中川純</u> , 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
招待講演 国内学会	<u>中川純</u> , サイバーフィジカルシステム: 12. 行動をデザインする: 人の行動を促す人間 - 環境インタラクションデザイン「15Aの家」, 情報処理学会, 55(9), 952-954, 2014-08
招待講演 国内学会	<u>中川純</u> , 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
講演 国内学会	<u>中川純</u> , 眞下茜, 河野良坪, 乾久美子, 駅舎計画におけるシミュレーションの技術の適用に関する研究 その1: 逆解析を用いた駅舎周辺樹木の最適配置に関する設計手法の提案, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol.2013, p.1185-1186, 2013-08
講演 国内学会	<u>中川純</u> , 富樫英介, 高瀬 幸造, シミュレーションに基づく潜熱蓄熱型放射暖房システムの性能評価: (第2報) 住宅用標準モデルでのケーススタディ結果, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2011年, 2011.2 巻 E-26
講演 国内学会	<u>中川純</u> , 箱の家ではない, 日本建築学会 建築デザイン発表梗概集, 284-285, 2011-07-20
講演 国内学会	<u>中川純</u> , GPLの家, 日本建築学会 建築デザイン発表梗概集, 336-337, 2010-07-20
講演 国内学会	荒木菜那, 野元彬久, <u>中川純</u> , 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
講演 国内学会	野元彬久, 荒木菜那, <u>中川純</u> , 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

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 国内学会	篠山拓真, 田辺新一, <u>中川純</u> , 他 6 名, これからのワークスタイルに対応した ActiveDesign に関する研究 その 4: 属性がワークスタイルに与える影響—研究概要, 属性の分布—, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol. 2018, p. 5-6, 2018-07
講演 国内学会	杉野伶夫, 田辺新一, <u>中川純</u> , 他 6 名, これからのワークスタイルに対応した ActiveDesign に関する研究 その 5: 属性がワークスタイルに与える影響—属性と知的生産性の関係—, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol. 2018, p. 7-8, 2018-07
講演 国内学会	徳村朋子, 田辺新一, <u>中川純</u> , 他 6 名, これからのワークスタイルに対応した ActiveDesign に関する研究 その 6: 属性がワークスタイルに与える影響—属性と行動の関係—, 日本建築学会 学術講演梗概集, Vol. 2018, p. 9-10, 2018-07
講演 国内学会	山口真吾, <u>中川純</u> , 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
講演 国内学会	菅野颯馬, 山口真吾, 常岡優吾, 大木玲奈, <u>中川純</u> , 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
講演 国内学会	常岡優吾, 大木玲奈, 山口真吾, 菅野颯馬, <u>中川純</u> , 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
講演 国内学会	大木玲奈, 常岡優吾, 山口真吾, 菅野颯馬, <u>中川純</u> , 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
講演	その他 講演論文 (国内連名) 67 報
著書 分担共著 著書	田辺新一, <u>中川純</u> , 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, <u>中川純</u> , 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, <u>中川純</u> , 他 15 名, 建築家の読書塾, みすず書房, p. 202-208, 2016-01
特許	田辺新一, <u>中川純</u> , 他 5 名, 指向性蓄熱材, 特願 2016-11939, 2016-02
雑誌	伊香賀俊治, <u>中川純</u> , 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	<u>中川純</u> , 池原靖史, 満田衛資, E 邸, 新建築住宅特集, 新建築社, 2019-01
雑誌	<u>中川純</u> , 池原靖史, 満田衛資, ぶらさがり住居, SD2018, 鹿島出版会, 2018-12
雑誌	<u>中川純</u> , 媒介項, 新建築住宅特集, 新建築社, 2018-04
雑誌	<u>中川純</u> , 微気候の家, 新建築住宅特集, 新建築社, 2016-06
著書	山名善之, <u>中川純</u> , 他 11 組, en[縁]:アート・オブ・ネクサス, TOTO 出版, p. 76-83, 2016-04
雑誌	<u>中川純</u> , 他 3 名, 風のかたち熱のかたち建築のかたち, 新建築, 新建築社, 2015-04
雑誌	<u>中川純</u> , 他 3 名, 福島・原発避難・復興・モラルを考える, 建築ジャーナル, 2015-04
雑誌	<u>中川純</u> , 風土を読み解く, 建築技術, 株式会社建築技術, 2015-03
総説	<u>中川純</u> , 他 19 名, エコ住宅・エコ建築の考え方・進め方, オーム社, p. 17-21, 2014-02
雑誌	<u>中川純</u> , 15A の家, SD2013, 鹿島出版会, 2013-12
雑誌	<u>中川純</u> , GPL の家, 新建築住宅特集, 新建築社, 2010-06