

## [048]都市・建築学研究表紙奥付等

<https://hdl.handle.net/2324/7390841>

---

出版情報：都市・建築学研究. 48, 2025-07-15. Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



## 学位論文審査報告

氏名(本 籍) 陳 雨露(中華人民共和国)  
学位記番号 博士(工 学)人環博甲第475号  
学位授与の日付 令和6年9月25日  
学位論文題名 太陽熱を利用した住宅の自然除湿・全熱交換換気システムに関する研究

### 論文調査委員

(主 査) 九州大学 教 授 尾 崎 明 仁  
(副 査) " " 住 吉 大 輔  
" " 准教授 劉 城 準  
" 九州産業大学 " 隈 裕 子

### 論文内容の要旨

2050年カーボンニュートラルおよび2030年温室効果ガス46%排出削減(2013年度比)の実現に向け、エネルギー消費量の約3割を占める建築分野には緊要の温暖化対策が求められている。国土交通省、経済産業省、環境省の3省は、合同して2030年以降に新築される住宅に対してZEH(Net Zero Energy House)基準の省エネ性能の確保を目指し、徹底した省エネルギー対策と再生可能エネルギーの導入拡大に取り組んでいる。

「建築物省エネ法(建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律)」の施行により断熱気密性能は格段に向上しているが、性能表示は相変わらず定常伝熱に基づいた「外皮平均熱貫流率」、「日射熱取得率」あるいは「住宅事業建築主の判断基準算定用WEBプログラム」によることが多い。そのため、太陽熱、放射冷却、外気冷房などのパッシブ技術や建物躯体の吸放熱と吸放湿など、自然エネルギー利用や非定常伝熱特性が影響する構法固有の特徴は勘案されず、一辺倒な断熱気密化に拍車をかけている。ZEH基準(エネルギー消費性能基準)の断熱性能は高い水準であるが、それでも住宅用エネルギー消費量のうち約3~4割は冷暖房に使用されている。今後、住宅の断熱気密性能をいっそう強化しても冷暖房エネルギー消費量はわずかに削減される程度で、しかも温暖化により冷房用は却って増加すると推察されるため、将来のゼロエネルギー住宅を目指した更なる省エネルギーのためには新たな技術の導入が不可欠である。特に、夏季冷房時の除湿(潜熱負荷)に関しては有効な削減方法が見当たらず、喫緊の対策を要する必須の革新的省エネルギー技術と考えられている。

そこで、本研究では再生可能エネルギーを利用した除湿・冷却と太陽集熱の機能を有する熱性能可変外被・空気循環システムを開発している。本システムは、室内外の熱力学ポテンシャル差を利用して、空気循環により夏季は自然に除湿・冷却する外被システム「PDSC

system(Passive Dehumidification System utilizing Solar Collection)」に全熱交換器「ERV(Energy Recovery Ventilator)」を併用し、外気負荷の削減と室内湿度の更なる低下を実現するハイブリッド換気システム「PSE(PDSC with ERV)」である。実大の実証住宅によるフィールド実験、および熱・水分・空気連成を考慮した建築温湿度・熱負荷シミュレーションにより、本システムの温湿度制御性能および省エネルギー効果について検討している。得られた主な結果は以下のとおりである。

温度・濃度・圧力・外力等の水蒸気移動に関わる各種物理量を同次元のエネルギーポテンシャルに統一化し、熱力学関数で定義される水分ポテンシャルにより湿流の駆動力を表現して、ハイブリッド換気システムの自然除湿理論を構築した。非平衡熱力学に則り熱・水分・空気の連成現象を水分ポテンシャル勾配によるエネルギーの流れとして表すことで、PDSC外被システムの基本原理を説明するとともに、これにERVを併用したPSEハイブリッド換気システムを提案した。透湿性断熱材で仕切られた2つの空間を等温等湿に保った状態から片方の空間を加熱すると、温度上昇により高温側空間は乾燥度に関係する場のエネルギーが低下するため、低温側空間から高温側空間に水分ポテンシャル勾配が生じて貫流湿流(自然除湿)が発生する。PDSC外被システムは、室内空気を断熱材外側に設けた通気層を介して外気に空気循環し、太陽熱により通気層を加熱することで昼間に上記の状態を作るパッシブ技術である。さらに、夜間は通気層から室内に空気循環することで、断熱材が吸着剤の役割を果たしてデシカント効果による除湿機能が働く。なお、空気循環は、夏季夜間は放射冷却、冬季昼間は太陽集熱により、季節により冷房と暖房の効果を有する。PSEは、PDSC外被システムの空気循環経路と流量をERVで制御し、換気による外気負荷を削減しつつ効率的に除湿と冷却を行うハイブリッド換気システムである。

PSEハイブリッド換気システムの効果を検証するため、本システムを導入した実証住宅を下関市に設計施工し、換気方式を第3種換気、全熱交換換気、PSE換気に変更して室内熱環境を実測した。自然状態および空調状態において各換気方式の室内温湿度を比較することで、夏季の除湿効果について検討した。測定期間は異なるものの、自然状態における外気と室内の絶対湿度の差は平均で、PSE換気3.4g/kg'、全熱交換換気2.3g/kg'、第3種換気1.3g/kg'となり、PSE換気の室内湿度が最も低くなることを実証した。また、相対湿度の期間較差は、第3種換気と全熱交換換気はいずれも約15%にもなるのに対して、PSE換気は約8%と小さく、恒湿性に優れることを示した。この傾向は空調状態でも同様であり、機械除湿が働く状況でもPSE換気の優れた自然除湿効果を明らかに

した。

また、熱・水分・空気の連成を考慮した建築全体の温湿度・熱負荷計算ソフト「THERB for HAM」にPDSC外被システム、全熱交換器、およびヒートポンプ空調機熱源特性モデルの解析コードを組み込み、数値シミュレーションにより本システムの温湿度制御性能および省エネルギー性能について検討した。まず、実証住宅を対象に自然状態と空調状態の数値シミュレーションを行い、計算値と測定値を比較することで開発ソフトの高い計算精度を確認した。次に、拡張アメダス気象データを使用した数値実験により、換気方式の違い、PDSC外被システムの有無、ヒートポンプ空調機の性能が室内熱環境および潜熱負荷に及ぼす影響を明らかにした。その結果、①自然状態ではERVの室内絶対湿度は外気よりも高くなるのに対して、PDSCとPSEはそれぞれ2.0g/kg'、2.8g/kg'も低く、自然除湿の効果が大きいこと、②空調状態ではPDSCとPSEの効果はさらに増加し、ERVは外気に比べて室内絶対湿度が0.9g/kg'低い程度なのに対して、PDSCとPSEはそれぞれ2.7g/kg'、3.6g/kg'も低下すること、③第3種換気と比較して、冷房潜熱負荷はERV、PDSC、PSEの順に20%、28%、56%も低減されること、④省エネ空調モード（室内機の吹出し風量を増やすモード）では冷媒温度が高くなり除湿量が減少するため、第3種換気とERVでは室内湿度が上昇するが、PDSCとPSEは自然除湿効果が働き室内湿度はほとんど変化せず、しかも潜熱負荷が98%も削減されること、などを示した。

## 論文調査の要旨

本論文は熱性能可変外被システムPDSCと全熱交換器ERVを併用した再生可能エネルギー利用ハイブリッド換気システムPSEを構築し、その熱・水分・空気移動の原理を非平衡熱力学に則り理論的に説明するとともに、実大の実証住宅によるフィールド実験、および建築温湿度・熱負荷シミュレーションによるパラメトリック解析により、夏季の自然除湿機能、室内温湿度の制御性能、および省エネルギー効果について検討している。本システムは、冷暖房時の顕熱負荷のみならず、これまでは極めて困難であった夏季冷房時の潜熱負荷をも削減する技術であり、先進的で萌芽性・学術性に優れる。また、熱・水分・空気の複合移動を非平衡熱力学に則って解析する方法は工学的有用性が高く、建築環境工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。

氏名（本 籍） 内田 貴久（福岡県）  
学位記番号 博士（工 学）人環博甲第479号  
学位授与の日付 令和6年9月25日  
学位論文題名 くまもとアートポリス公営住宅団地の設計コンセプトと居住実態—5つの公営住宅団地におけるアンケート調査とヒアリング調査をもとに—

## 論文調査委員

|       |                  |
|-------|------------------|
| （主 査） | 九州大学 教 授 末 廣 香 織 |
| （副 査） | 〃 准教授 志 賀 勉      |
| 〃     | 〃 〃 鶴 崎 直 樹      |
| 〃     | 〃 名誉教授 菊 地 成 朋   |

## 論文内容の要旨

熊本県が建築都市文化の向上を目指して1988年に始めた「くまもとアートポリス」事業（以下KAP）は、公共建築を中心に設計者選定の全責任をコミッショナーが負うという仕組みを作り、経済的にも余裕があった当初は、著名な建築家の設計によって数多くのプロジェクトが実現した。その中には多くの公営住宅プロジェクトもあったが、当時の建築界では新しい集住形態の議論が盛んになっており、挑戦的な提案も多かった。しかし、ほとんどの居住者が建築を選んで入居したわけではない公営住宅という特性と、これまで見たことのないデザインに対する拒否感や批判があり、建築業界を超えて大きな注目を集めた。その後、公営住宅を建築家が設計することはなくなり、経済状況の悪化とともにKAPのプロジェクト数も大幅に減少してしまった。

本論文は、現在ではほぼ忘れ去られてしまった過去の挑戦的な公営住宅の建築にもう一度光を当て、約30年を経過した現在の状況と、そこで暮らす人々の生活を調査することによって、当時の設計コンセプトが意味することと、そこでの「住経験」の経過と特徴を明らかにすることを目指している。

論文は7章で構成され、第1章では、研究の目的と背景、および調査概要について説明している。調査対象として、4つのKAP公営住宅団地と1つの当時の標準的な公営住宅団地を選定し、比較研究ができるようにしている。また、特に本研究のキーワードとなっている「住経験」について既往研究との関連の中で定義を行い、30年という時間を経過した現在にこそ「住経験」についての実質的な考察ができるという意義を示している。

第2章では、熊本県の公営住宅団地の現況を調査し、入居者の収入低下、単身・二世帯の増加、高齢化、入居期間の長期化、空き家の増加が起きていることを指摘している。

第3章では、各団地の計画概要と居住者の現況について述べている。総じてKAP公営住宅団地には、多様で充

実した屋外共用スペースやテラスがあり、低層、中層、高層に加えてメゾネット住戸もあるなど、住戸タイプも環境も非常に多様で個性的な計画になっていることを指摘している。また居住者データから、KAP公営住宅団地は、標準的な公営住宅団地に比べて退去者が多く入居者が少ない傾向があり、結果として現状で1割以上空室率が高くなっていることが示された。

第4章では、各団地で実施したアンケート調査の結果を分析している。居住者の大半が単身か2人ということもあり、住戸の広さについての不満が少ないこと、間取りの評価は、住戸平面が特殊な事例については、満足と不満に二分されることなどが示された。

第5章では、各団地でおこなったヒアリング調査と居住実態調査の結果をまとめて、入居以来これまでの経緯や生活実態を明らかにしている。各住戸では、かなり詳細な調査がなされており、そのデータ自体に社会的な価値があると言える。

第6章では、KAP公営住宅団地の設計コンセプトについて整理し、調査で得られた結果と照らし合わせて考察した。その結果、コンセプトで示された共用部から見えるテラス空間については、きれいに飾り付けするなどして使いこなす居住者もいるが、設計者が意図していたテラス経由でのアクセスは実現していないこと、豊かな中庭空間は、竣工当初は団地行事などに使われていたが、高齢化が進んだ現在ではほとんど使われておらず、むしろ自主管理上の課題となっていること、住戸と住棟の多様性により、多くの居住者が、他の住戸や住棟の間取りや環境に大きな関心を持っており、コミュニケーションにも影響を与えていること、住戸内部については、間取りや設備などの不満が多く聞かれたが、それを自らの工夫で克服して、快適に住みこなしている居住者も多いこと、中庭やテラスなどの豊かな外部空間は、団地の自主管理上の課題だが、それが居住者間の助け合いや自治会活動のきっかけにもなっていることなどを明らかにして、結論とした。

第7章は、公営住宅の今後の利活用や計画への提言となっている。KAP公営住宅団地を住みこなしてきた居住者の「住経験」が、今後の新規入居者に対する情報として有意義であること、そして他の一般的な集合住宅団地では得られない「住教育」としても効果があったことを示している。

本論文は、建築家が特徴的なコンセプトを提示して設計した日本では非常に数少ない公営住宅の事例について、長年そこで暮らしてきた居住者の視点から生活史も含めて調査研究を行ったものである。一般に、社会状況は時代とともに移り変わるため、設計段階で考えたことが、長い目で見てどのような意味を持つかは、時を経なければ分からない。当時の設計コンセプトと空間が、ど

のように居住者に受け入れられ、あるいは無視され、どのような課題を抱えることになったのかを明らかにした本研究は、公営住宅の今後の管理運営や設計計画に対し、貴重な知見を与えるものである。よって、本論文は博士（工学）の学位に値するものと認める。

## 論文調査の要旨

本論文について対面およびオンラインによる試験を行い、学内外より20名を超える聴講者が参加した。その中で、階段室型住戸のコミュニティ形成、共用空間の管理運営の実態、公営住宅の課題と今後の展開可能性、研究への設計者としての視点の生かし方、今後の研究の展望などについて質疑と議論があった。いずれも十分な回答を得たので、最終試験に合格したものと認める。

---

|         |                                                                                                                                                                                                              |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏名（本 籍） | 王 恒煊（中 国）                                                                                                                                                                                                    |
| 学位記番号   | 博士（工 学）人環博甲第480号                                                                                                                                                                                             |
| 学位授与の日付 | 令和6年9月25日                                                                                                                                                                                                    |
| 学位論文題名  | Development of a Simulation Method for Urban-Scale Residential Time-Series Electricity Demand and Evaluation of the Effects of Renewable Energy Introduction（都市規模での住宅の時系列電力需要シミュレーション手法の開発と再生可能エネルギー普及効果の評価） |

## 論文調査委員

|       |                  |
|-------|------------------|
| （主 査） | 九州大学 教 授 住 吉 大 輔 |
| （副 査） | “ “ “ 尾 崎 明 仁    |
| “     | “ “ “ 趙 世 晨      |

## 論文調査の要旨

日本政府は2050年までにカーボンニュートラル社会を実現することを目標として掲げている。この目標を達成するためには、より一層の省エネルギーの実現と再生可能エネルギーの導入が不可欠である。また、普及が期待される主要な発電装置が気象条件による発電出力の時間変動が大きい太陽光発電（PV）や風力発電であることを踏まえると、余剰となる電力を吸収し、不足した時間帯に放電する蓄電池等の設備の普及も重要である。特に今後普及が予測される電気自動車（EV）は電力需給の変動を吸収する蓄電装置として期待されている。このように、都市におけるエネルギーの需給システムは今後大きく変化することが予想されるが、PVやEVをどれだけ普及させれば十分かなどを評価できるツールはほとんどな

い。また、同じ政策であっても単身世帯が多い地域や古い建物が多い地域などの地域特性によって、政策の導入効果は異なると考えられる。カーボンニュートラル社会の実現にむけて、エネルギーに関連する様々な政策が都市のエネルギーにどのような影響をもたらすのかを地域の特性も踏まえて的確に評価できる詳細なシミュレーションツールが必要である。

そこで本研究では、様々なエネルギー政策の効果を都市内の地域特性の違いも考慮して評価できる、都市規模の住宅電力需要シミュレータの開発に取り組んだ。都市内の各住宅の時系列電力需要を積み上げて計算するボトムアップシミュレーション手法により、都市全体における電力需要ピークの把握や余剰電力の算出が行えるシミュレータを作成し、住宅の省エネルギーや再生可能エネルギーの導入、EVの導入などに関する政策評価が行えるものである。本シミュレータの有用性を示すため、福岡市を対象に住宅の断熱改修政策に関する効果検証およびEVの普及による余剰電力発生状況の解析にも取り組み、福岡市内の地域ごとの特性の違いによる政策影響の違いを分析した。本論文は5章より構成される。

第1章では、本研究の背景を説明し、既往研究との比較、本研究の目的および論文の構成について述べた。

第2章では、居住者の生活スケジュールの再現に取り組んだ。住宅の時系列電力需要をシミュレートするためには、どの時間帯に家電機器や住宅設備を使うかを設定する必要があるため、居住者の生活スケジュールを再現する必要がある。特に都市規模で住宅の電力需要を再現する場合、一つの世帯の標準的な生活スケジュールではなく、多様な世帯の生活スケジュールを再現することが重要である。しかも、一つ一つの生活スケジュールは多様である必要があるが、全体としては平均的な起床時間や食事時間などがあり、都市内の生活スケジュールの総体としてはそれらを捉える必要がある。そこで、NHK国民生活時間調査のデータを用い、勤め人男性、勤め人女性など7種類の人属性の平日と休日の生活スケジュールについてそれぞれ1000パターンを設定し、1000パターンの総体が、NHK国民生活時間調査のデータと一致するように粒子群最適化(PSO: Particle Swarm Optimization)を用いて各生活スケジュールを調整する。最終的に十分に再現度の高い生活スケジュールのデータセットを7種類の人属性について作成した。さらにこれらを組み合わせると一つの世帯を構成する際、完全にランダムに組み合わせると食事時間や入浴時間が世帯の構成員で大きくばらついて実態と乖離することを避けるため、粒子群最適化を用いて食事時間や入浴時間のばらつきを考慮して世帯の組み合わせを決定する手法により、各世帯の生活スケジュールを構築した。

第3章では、ボトムアップシミュレーション手法を用

いた都市規模の住宅の時系列電力需要シミュレーションモデルの開発に取り組んだ。都市規模での計算にむけて、まず、家電機器の使用電力計算と空調用電力計算を組み合わせ、単一住宅の電力需要計算モデルの開発を行った。実際の集合住宅(住戸数93戸)のデータを用いて、様々な家電機器の使用確率を遺伝的アルゴリズムを用いて推計し、家電機器の使用電力計算モデルを構築した。また、熱負荷計算ソフトNewHASPを用いて空調用電力計算モデルを構築し、家電機器の使用電力計算モデルと合わせて単一住宅の電力需要計算モデルとした。開発したモデルを用いて対象集合住宅全体の電力需要の再現を行い、その誤差が1.45%と高精度なモデルが確立できていることを確認した。次に、都市規模での計算を行うため計算時間を短縮できる都市住宅群の集約化計算手法の開発に取り組んだ。単一住宅の電力需要計算モデルを用いて単身世帯や共働き世帯など21種類の世帯種別について、世帯種別ごとに500ケース、計10,500ケース分の電力需要計算を行い、電力需要のデータセットを作成した。国勢調査データと住宅土地統計調査データを利用して、町丁目ごとに21種類の世帯構成のそれぞれの世帯数を遺伝的アルゴリズムを用いて推定し、電力需要のデータセットと組み合わせ、各地域の電力需要を計算する手法をとった。この手法を用いて、地域内の住宅の30%以上を等級4の断熱性能に改修する断熱改修シナリオを設定し、福岡市全体の電力需要を計算した。これを断熱改修に取り組まなかった場合の電力需要の計算結果と比較して、町丁目ごとの影響の違いを検証した。断熱改修シナリオにより、福岡市全体の住宅の年間電力需要は7.6%削減され、特に都心よりも郊外で削減量が多いことを確認した。

第4章では、第3章で開発した電力需要シミュレーションモデルにPV、およびEVの計算モデルを加え、PVの余剰電力の発生状況のシミュレーションとそれを吸収するために必要なEVの普及率に関する検討を行った。EVの計算モデルは、居住者の生活スケジュールにおける外出の想定とパーソントリップ調査による移動の想定とを組み合わせ、移動時間帯と走行距離を求め、住宅に接続されている際に充放電を行う想定とした。現状のPVの普及率に合せて戸建住宅の9%の住戸、集合住宅の0.2%の住棟にPVが設置されている状況を想定し、福岡市の各町丁目について余剰電力の発生状況を分析した。その結果、戸建住宅の割合が大きい郊外の地域で余剰電力が発生すること、余剰電力が発生する地域では、断熱改修を行うことで余剰電力が平均で約2.5倍に増加することを示した。また、余剰電力をEVで吸収するためのEVの普及率を求め、多くの地域では世帯数の20%にEVが導入されれば余剰電力を吸収できること、住宅の断熱改修によって余剰電力を吸収するのに必要なEVの普及率は平均で13%

ポイント程度増加することを示した。

第5章では、各章で得られた成果を要約して総括とした。

## 論文調査の要旨

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、今後の都市のエネルギーシステムには様々な変化が求められている。第5次エネルギー基本計画での再生可能エネルギー主力電源化の方針を受けて、第6次エネルギー基本計画ではその割合を2030年までに電源構成全体の36～38%にまで拡大する目標が掲げられている。その中心となるのは、太陽光発電と風力発電であるが、これらはいずれも天候に左右されて発電量が変化する変動性再生可能エネルギーであり、発電量のコントロールが難しいことが課題である。そのため、都市のエネルギーシステムとして電力が余る場合に吸収する蓄電池や水素に変換して貯めておくシステムなど、蓄エネルギー設備の導入も必要となってくる。今後普及が期待される電気自動車は、有力な蓄エネルギー設備の一つであり、特に住宅においては太陽光発電の導入と合せてV2H設備（住宅と電気自動車間で充放電を行う設備）の導入が期待されている。こうした今後の都市のエネルギーシステムの変化を見据えたとき、都市のエネルギーシミュレーションを行い、様々なエネルギー設備をどれだけ普及させればよいのかなどを評価して、適切なエネルギー設備の普及施策を立案することが肝要である。

本論文は計算負荷が大きい都市規模での住宅群を対象とした時系列エネルギーシミュレーションを地域特性を反映しながらも効率よく行う手法を開発したものである。また、開発した手法を用いて省エネ施策としての断熱改修が都市内の様々な地域においてどのような効果をもたらすかや電気自動車がどの程度普及すれば地域内の余剰電力を吸収できるかについて検討することで、本手法の有用性を示している。本研究における成果は以下の通りにまとめられる。

- (1)住宅のエネルギー消費量に大きく影響する居住者の生活スケジュールについて、NHK国民生活時間調査のデータを基に様々な居住者個人の多様な生活スケジュールを再現する手法を開発した。具体的には、ランダムに作成した1000個の生活スケジュールが、全体としては時間ごとの行為発生確率を表すNHK国民生活時間調査の結果を再現できるよう粒子群最適化を用いてフィッティングする手法を開発した。生活スケジュールは、住宅のエネルギー消費量計算の基本データであり、他の様々な研究にも応用可能な手法といえる。
- (2)生活スケジュールに合わせて稼働する家電機器の使用確率について、集合住宅（93戸）の実測データを用いて遺伝的アルゴリズムにより推定した。さらに、上記

(1)の生活スケジュールと家電機器の使用確率、既存の空調熱負荷計算プログラムを組み合わせ、対象住宅全体の電力需要の再現を行い、その誤差が1.45%と高精度なモデルが確立できていることを示した。

- (3)都市規模での計算において、単身世帯や共働き世帯など21種類の世帯種別について、世帯種別ごとに500ケース、計10,500ケース分の電力需要のデータセットを予め作成することで、都市内の住宅のエネルギー需要を計算する手法を開発した。地域の特性に合わせて計算を行うため、国勢調査データと住宅土地統計調査データを利用して、町丁目ごとに21種類の世帯構成のそれぞれの世帯数を遺伝的アルゴリズムを用いて推定し、電力需要のデータセットと組み合わせ、各地域の電力需要を計算している。福岡市を対象とした計算では約88万世帯の計算を10,500ケースの電力データを基に補正することで、大幅な計算時間短縮を実現しつつも、地域ごとの世帯分布や建物性能の特性を考慮した計算を実現している。

- (4)上記(3)で開発した手法を用いて、地域内の住宅の30%以上を断熱等級4の断熱性能に改修する断熱改修シナリオを検討し、断熱改修の促進により福岡市全体の住宅の年間電力需要は7.6%削減され、特に都心よりも郊外で削減量が多いことを示した。また、電気自動車の計算モデルを導入し、現状の太陽光発電の普及状況において、どれだけの世帯に電気自動車を普及させれば地域ごとの電力余剰を吸収できるかを検討した。その結果、多くの地域では世帯数の20%に電気自動車が導入されれば余剰電力を吸収できることを明らかにした。こうした検討を通して、開発した都市規模での住宅の時系列エネルギーシミュレーション手法が、地域ごとの特性を反映した計算が行えること、エネルギー施策の検討に有効であることを示した。

以上要するに、本論文は都市規模での住宅の時系列エネルギーシミュレーション手法を開発し、その有用性を示したものである。その過程で構築した、統計データを再現する個々の生活スケジュールの作成手法は、他の研究においても広く応用できるものである。また、地域ごとの世帯構成の特徴などを反映した本シミュレーション手法は、従来の都市規模のエネルギー計算手法とは一線を画すものであり、学術性に優れ工学的有用性および社会貢献性が非常に高い。都市のエネルギーシミュレーションは今後のエネルギーシステムに関する施策を検討する上で非常に重要であり、本論文の成果は建築設備工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位に値するものと認める。

氏名(本 籍) 許 天心(中 国)  
学位記番号 博士(工 学)人環博甲第484号  
学位授与の日付 令和7年3月25日  
学位論文題名 日本の駅と接続する立体的歩行ネットワークに関する研究

#### 論文調査委員

(主 査) 九州大学 准教授 鶴 崎 直 樹  
(副 査) " 教 授 黒 瀬 武 史  
" 佐賀大学 " 有 馬 隆 文

#### 論文内容の要旨

日本の都市には、地上の歩道、鉄道駅等と繋がる地下街や隣接する民間施設との連絡通路、そして上空の建物間連絡通路により立体的歩行ネットワーク(以下、立体的通路網)を構築し、商業業務機能の集積や来街者の安全性・回遊性及び公共交通利便性を高めた地区がある。この立体的通路網は、高度経済成長期やバブル期等の開発時の整備、或いは渋滞緩和と交通流の円滑化を目的とした鉄道路線と駅舎の立体化整備等が基盤となっている。こうした都市と同様に福岡市天神地区では、地下鉄駅や沿道の建物群との地下街での連結や立体化された鉄道駅と商業施設上層階の連絡通路により立体的通路網が構築されている。近年、人口減少や環境問題に対し公共交通を基盤とする集約型の都市が希求される中、駅と連結する立体的通路網は都心空間の整備に貢献し得ると考えられる。

そこで本研究は、全国の鉄道駅及び駅周辺の開発で構築された立体的通路網の類型別特性と近年の整備実態を把握し(第2章)、次に、福岡市天神地区の立体的通路網の構築過程や接続部の特性を分析する(第3章)とともに、迂回距離低減性と歩行経路分散性による分析(第4章)と立体的通路網上の歩行者通行量と沿道建物の用途・規模や歩行環境との関係を明らかにし(第5章)、今後の都市デザインへの知見を得ることを目的とする。本研究は、序論、本論および結論の5章で構成されている。

第1章では序論として、研究の背景と問題意識、研究の目的、対象及び方法を述べるとともに、関連する既往研究のレビューにより本研究の位置付けを明確化しその意義について述べた。

第2章では、全国の乗降客数10万人/日以上(10万人/日以上)の鉄道駅のうち立体的通路網を有する地区を対象とし、構成の類型と整備の傾向を明らかにするとともに、駅を含む都市再生緊急整備地域における交通施設との連携的再開発に関する計画資料内の整備方針等の記述分析により、歩行空間の整備の実態を明らかにした。そして、全国の駅周辺の立体的歩行通路網は、施設間連結方法や歩行空間の形態により3類型がみられ、乗降客数の多い拠点駅では

立体的通路網を整備し、地方都市の駅や郊外駅では連絡通路など軽微に整備されていること、また、都市再生緊急整備地域内では回遊性向上、快適な歩行空間、利便性改善を主たる整備目標とする傾向にあることを明らかにした。

第3章では、史的資料をもとに福岡市天神地区内の立体的通路網の構築過程を整理するとともに、その構成要素である上空連絡通路を含む施設間通路接続部の接続形態の類型化と特性分析をおこない、福岡市天神地区の立体的通路網が地下街開業以降、同地区のまちづくり構想下で福岡市と地元企業が協働し5期にわたり整備・拡充されたこと、また、立体的通路網の地上、地下及び上空での接続形態は8種に分類でき、特に地下や上空での連結数が多いことを明らかにした。

第4章では、福岡市天神地区内立体的通路網の①迂回距離低減性と②歩行経路分散性について分析し、立地する建物から公共交通結節点(改札口)までの立体的直線距離に対し連絡通路の介在が、特に改札口設置階である建物低層部の迂回距離低減性に寄与していること、また、連絡通路の存在が移動経路の選択性を高め、立体的通路網上の媒介中心性が高い地点の緩和につながり、地上の歩行者通行量の集中を低減し歩行経路分散性を高めたことを明らかにした。

第5章では、福岡市天神地区内の地上と地下の歩行者通行量とその分布特性、沿道建物の用途と規模、幅員等歩行空間特性、沿道建物各階を起点とする公共交通結節点(改札口)への移動抵抗距離の算出、媒介中心性を用いた立体的通路網上の移動目的別歩行者集中確率の分布を推計したのち、これらの結果と終日および複数時間帯の歩行者通行量の分布との関係を分析した。そして、歩行者通行量が平日・休日ともに時間帯に関わらず地下が地上より多いこと等の相違や時間変化、立体的通路網上の歩行者通行量が、地上では平日・休日に関係なく幹線道路上の公共交通駅近傍で多く、同様に地下でも平日・休日を問わず午前中に地下鉄駅に集中し昼間時や夕方以降に駅南部に広がる傾向があることなどの特性を明らかにした。また、構築した時間帯別立体的歩行通行量の空間的自己回帰モデルより、歩行者通行量に対し、地上では全時間帯で歩道幅員、通勤通学時以外の時間帯で沿道の業務や商業用途の延床比率が寄与し、一方、地下では時間帯を問わず地下街の出入口がない広幅員歩道に歩行者通行量が多いこと、そして、地上に比べ地下の歩行者通行量の分布に対する公共交通利用、買い物、食事による歩行者集中確率が寄与することを明らかにした。さらに、通勤通学時、昼食時、帰宅時の3つの時間帯の歩行者通行量を目的変数とする空間的自己回帰分析モデルにて採用した媒介中心性に関与する説明変数について、通勤通学時は公共交通利用から業務系への通勤、昼食時は

食事、帰宅時は業務系から帰宅、飲食店、娯楽系施設など、各時間帯で可能性の高い移動目的を抽出しリンクデータ上に視覚的に表現することで分布特性を明らかにするとともに、平日・休日の終日歩行者通行量に寄与する施設立地や歩行環境を明らかにした。

最後に、第6章では前章までの成果を総括し本論文の結論とした。

## 論文調査の要旨

日本の都市には、地上の歩道、鉄道駅等と繋がる地下街や隣接する民間施設との連絡通路、そして上空の建物間連絡通路により立体的歩行ネットワーク（以下、立体的通路網）を構築し、商業業務機能の集積や来街者の安全性・回遊性及び公共交通利便性を高めた地区がある。

この立体的通路網は、高度経済成長期やバブル期等の開発時の整備、或いは渋滞緩和と交通流の円滑化を目的とした鉄道路線と駅舎の立体化整備等が基盤となっている。こうした都市と同様に福岡市天神地区では、地下鉄駅や沿道の建物群との地下街での連結や立体化された鉄道駅と商業施設上層階の連絡通路により立体的通路網が構築されている。近年、人口減少や環境問題に対し公共交通を基盤とする集約型の都市が希求される中、駅と連結する立体的通路網は都心空間の整備に貢献し得ると考えられる。

このような問題意識のもと、本研究は、全国の鉄道駅及び駅周辺の開発で構築された立体的通路網の類型別特性と近年の整備実態を把握したうえで、福岡市天神地区の立体的通路網を対象とし、その構築過程や接続部の特性を明らかにするとともに、迂回距離低減性と歩行経路分散性による分析を通じて同地区の立体的通路網の特性を明らかにし、さらに、立体的通路網上の歩行者通行量と沿道建物の用途・規模や歩行環境との関係を解明しており、これらを通じて得られた主な成果と所見は以下のようによまとめられる。

（１）全国の乗降客数10万人／日以上以上の鉄道駅で立体的歩行通路網を構築するものは、施設間連結方法や歩行空間の形態により3つに類型でき、乗降客数の多い拠点駅では立体的通路網が整備され、地方都市の駅や郊外駅では連絡通路など軽微に整備されていることや、都市再生緊急整備地域内では回遊性向上、快適な歩行空間、利便性改善を主たる整備目標とする傾向にあることなど、日本における鉄道駅を中心とする立体的通路網の整備の実態に関する有益な知見を提供している。

（２）福岡市天神地区は、地下街開業以降、同地区のまちづくり構想下で福岡市と地元企業が協働し5期にわたり立体的通路網を整備・拡充してきており、この立体的通路網の地上、地下及び上空での接続部に注目すると8種の接続形態に分類でき、特に地下や上空での連結数

が多いことなど、同地区の立体的通路網の特性を明らかにしており、鉄道駅との接続に関する計画や実現に向けた情報を提供している。

（３）福岡市天神地区における立体的通路網の①迂回距離低減性と②歩行経路分散性に関する分析を通じて、立地する建物から公共交通結節点（改札口）までの立体的直線距離に対し連絡通路の介在が、特に改札口設置階である建物低層部の迂回距離低減性に寄与し、また、連絡通路の存在が移動経路の選択性を高め、立体的通路網上の媒介中心性が高い地点の緩和につながり、地上の歩行者通行量の集中を低減し歩行経路分散性を高めたことなど、立体的通路網の有効性や効果を解明しており、今後、立体的通路網の構築を目指す地区に向けた手法や検証方法に関する知見を提供している。

（４）福岡市天神地区内の地上および地下の歩行者通行量は、平日・休日ともに時間帯に関わらず地下が地上より多く、立体的通路網上の歩行者通行量は、地上では平日・休日に関係なく幹線道路上の公共交通駅近傍で多く、同様に地下でも平日・休日を問わず午前中に地下鉄駅に集中し昼間時や夕方以降に駅南部に広がる傾向を有する。また、時間帯別立体的歩行通行量の空間的自己回帰モデルによる分析より、歩行者通行量に対し、地上では全時間帯で歩道幅員、通勤通学時以外の時間帯で沿道の業務や商業用途の延床比率が寄与し、一方、地下では時間帯を問わず地下街の出入口がない広幅員歩道に歩行者通行量が多く、そして、地上に比べ地下の歩行者通行量の分布に対する公共交通利用、買い物、食事による歩行者集中確率が寄与することを明らかにしており、立体的通路網と歩行者通行量との関係に関する有益な情報を提供している。

（５）通勤通学時、昼食時、帰宅時の3つの時間帯の歩行者通行量を目的変数とする空間的自己回帰分析モデルの構築と分析より、通勤通学時は公共交通利用から業務系への通勤、昼食時は食事、帰宅時は業務系から帰宅、飲食店、娯楽系施設など、各時間帯で可能性の高い移動目的を抽出するとともに、立体的通路網リンクデータ上に分布状況を視覚化しその特性と平日・休日の終日歩行者通行量に寄与する施設立地や歩行環境を明らかにし、立体的通路網構築の際に参考となる知見を提供している。

以上のように、本論文は、日本における鉄道駅と連結する立体的通路網の整備実態とともに、福岡市天神地区を対象とした分析を通じて、立体的通路網の特性、効果、歩行者通行量との関係および分布傾向を明らかにしたものである。これらの知見は今後、日本のみならず鉄道駅と連結する立体的通路網の構築を目指す海外の都市における計画に対し有益な示唆を与えるとともに都市計画学に貢献する成果であると言える。よって本論文は博

士（工学）の学位に値するものと認める。

氏名（本 籍） 何 清怡（中 国）  
学位記番号 博士（工 学）人環博甲第487号  
学位授与の日付 令和7年3月25日  
学位論文題名 Simulating energy use in Office Buildings  
by Modeling the Relationship between  
Psychological Factors and Occupants'  
Behavior in Japan（心理的要因と行動の  
関係のモデル化によるオフィスのエネ  
ルギー使用行動シミュレーション）

論文調査委員

（主 査） 九州大学 教 授 住 吉 大 輔  
（副 査） “ “ 尾 崎 明 仁  
“ “ 准教授 杉 山 高 志

## 論文内容の要旨

環境省の統計によると日本全体における2022年度の業務その他部門からの二酸化炭素排出量は、合計1.79億トンに達し、全体の19%を占めている。中でもオフィスビルは、業種別の延床面積が最も大きく、全体への影響が大きい建物用途である。ZEB（Zero Energy Building）やBELS（Building-Housing Energy-efficiency Labeling System）などの政策的な取組みをはじめとして、オフィスの脱炭素化、省エネルギーの取組みは進められているが、対策は十分とはいえない状況である。

対策の一つとして期待されるのは行動変容である。オフィス環境において居住者の行動とエネルギー使用の間には密接な関係があり、照明スイッチや空調設定温度の操作などの居住者の行動を変えることができれば、省エネルギーを実現できる可能性がある。

近年、建物内での省エネルギー行動について社会心理学的な研究が注目されている。環境保全に対する“態度”、他者からの期待を表す“主観的規範”、省エネルギー行動に対して能動的に行えるという感覚を表す“知覚行動制御”などの要因がエネルギー消費に影響していることが検証されており、意識と行動の関係が分析されている。

このような背景のもと、本研究では、異なる環境意識レベルがエネルギー使用行動に与える影響を定量化すること、またそれをエネルギーシミュレーションに反映する手法を構築することを目的としている。本論文は5章より構成される。

第1章では、研究の背景及び目的について説明した。意識と行動が建物のエネルギー消費に密接に関係していることを論じ、意識と行動の関係を調査した上で、それ

をエネルギーシミュレーションに反映するための研究手法について示した。

第2章では文献調査を通じて、環境意識とエネルギー使用行動の関係を定量化する手法について検討した。特に有力なモデルである計画行動理論（以下、TPBモデル）と環境（Driver）がニーズ（Needs）を生み行動（Action）に繋がるというDNAsフレームワークを組み合わせることで、エネルギー使用行動をモデル化し、エネルギーシミュレーションに繋げられる可能性があることを示した。また、TPBモデルに、“個人の道德規範”、社会的な要請に対する認識を表す“記述的規範”、“環境知識”を加えた拡張TPBモデルを提案した。

第3章では、環境心理学および環境行動学の観点から、オフィス内の省エネルギー行動意図とその影響要因の関係を分析した。実際のオフィスで働く98名を対象に環境意識に関するアンケートとスマートフォンアプリを用いて省エネルギー行動申告を行う実験を行った。実験において実際に行動を申告した49名のアンケート結果と行動の実践状況を拡張TPBモデルに当てはめて分析した。その結果、空調設定温度の設定変更、OA機器の操作などの項目において、アンケートで示された行動意図と実際の行動の申告に有意な相関が確認され、個人の環境意識からエネルギー使用行動の発生確率を予測する拡張TPBモデルの有効性が示された。さらに、WEBアンケートにより1069名から環境意識とエネルギー使用行動に関する回答を収集し、構造方程式モデリングを用いて拡張TPBモデルで設定した環境意識の各項目と行動意図の間に正の相関があること、一部の項目で影響度合いが小さいものの環境意識からエネルギー使用行動の実施を予測可能であることを示した。

第4章では、第3章の結果に基づき、空調設定温度の変更、照明機器のスイッチ操作を対象に、拡張TPBモデルをベースとした線形回帰モデルにより行動の発生確率を定量化した。また、906名を対象としたWEBアンケート結果から、環境意識や年齢、室内の居住者数と夏季の好みの空調設定温度や設定温度の変更頻度との間に相関があることを分析し、年齢や室内の居住者数、環境意識から好みの設定温度を算出するモデルを構築した。それらをマルチエージェントシミュレーションの計算モデルに取り込み、環境意識（低、中、高）、在室人数（2人、10人、20人）、年齢（30歳、40歳、60歳）の組み合わせ（27通り）で居住者を想定したオフィスについて、エネルギー消費量のシミュレーションを行った。空調設定温度の変更に関するシミュレーションでは、熱負荷とエネルギー消費量の計算にEnergyPlusを用い、マルチエージェントシミュレーションから出力される室温変化のスケジュールを入力した。その結果、初期の設定温度が設定温度の変更回数に大きく影響することを示した。ま

た、環境意識が低い居住者だけのオフィスは、環境意識が高い居住者だけのオフィスに比べて1.4倍～1.9倍程度エネルギー消費量が増加すること、中程度の環境意識のオフィスのエネルギー消費量は環境意識が低いオフィスのエネルギー消費量に近いことなどを明らかにした。さらに、照明機器のスイッチ操作に関するシミュレーションを実施し、環境意識が低い居住者だけのオフィスの消し忘れの頻度は、環境意識が高い居住者だけのオフィスに比べて1.2倍程度になることを示し、エネルギー消費量は1.3倍程度になる結果を示した。

第5章では、各章で得られた成果を総括し、今後の研究の発展について議論した。

## 論文調査の要旨

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、“行動変容”に注目が集まっている。環境省では国民・消費者の行動変容、ライフスタイル変革を強力に後押しする国民運動を「デコ活」と名づけて展開しており、様々な地方自治体ではナッジ（行動科学に基づいて省エネなどの行動を促す手法）を取入れた施策を検討する部署や組織が立ち上がっている。

行動変容によりエネルギー消費量を削減する場合、変容の対象となる行動の多くは照明機器や空調機器の操作などの建築設備を対象とした行動である。しかし、建築設備分野において、行動変容の効果の分析やその促進に関する研究は途上であり、十分に研究されていない。特に環境意識を高めることがエネルギー消費量の削減に効果があるとされているものの、環境意識の違いによるエネルギー消費量への影響を定量化した研究はほとんどみられない。

本論文は環境意識とエネルギー使用行動の関係を確率的に表現し、オフィスでのエネルギー消費量への影響を定量評価したものである。環境意識とエネルギー使用行動の関係を示すモデルについての既往研究を発展させて新たなモデルを提案し、実験およびアンケート結果の統計解析によってモデルの有用性を示している。さらに、それを用いて環境意識の違いをエネルギー使用行動の発生確率として定量化して、エージェントベースモデルを活用したエネルギーシミュレーションへと繋げている。本研究における成果は以下の通りにまとめられる。

- (1) 環境意識とエネルギー使用行動の関係を表す上で有力なモデルである計画行動理論（以下、TPBモデル）の課題を指摘し、モデルの心理的因子に、“記述的規範”、“個人の道徳規範”、“環境知識”を加えた拡張TPBモデルを提案した。
- (2) 環境意識とエネルギー使用行動に関する1,069名のWEBアンケートによる回答を、構造方程式モデリングを用いて分析した結果、拡張TPBモデルで設定

した心理的因子の各項目と行動意図の間に正の相関があることを明らかにした。これにより、拡張TPBモデルの有効性、および、環境意識からエネルギー使用行動の実施確率を予測可能であることを示した。

- (3) 実際のオフィスにおいて、スマートフォンアプリを用いて省エネルギー行動申告を行う実験を実施し、実験に参加した49名のアンケート結果と行動の実践状況を拡張TPBモデルに当てはめて分析した。その結果、空調設定温度の変更、OA機器の操作などの項目において、拡張TPBモデルによる行動意図と実際の行動との間に有意な相関があることを示した。
- (4) 個人の環境意識からエネルギー使用行動の発生確率を予測する回帰式を作成し、行動の発生確率を定量化した。これを用いて人の行動（空調の設定温度変更）を予測するエージェントベースモデルを構築し、その結果を従来のエネルギーシミュレーションの入力として利用することで、環境意識の違いがエネルギー消費量に与える影響を分析した。その結果、環境意識が低い居住者のオフィスは、環境意識が高い居住者のオフィスに比べて空調のエネルギー消費量が1.4倍～1.9倍程度増加することを示した。

以上要するに、本論文は個人の環境意識を基にエネルギー使用行動の発生確率を定量化し、環境意識の違いが建物のエネルギー消費量に与える影響を分析したものである。従来のエネルギーシミュレーションでは、人の行動は画一的なスケジュールで与えられ、環境意識の違いが計算に反映されることはなかった。本研究で新たに提案された拡張TPBモデルは、環境意識とエネルギー使用行動の関係をよりの確に表現するものであり、エネルギー使用行動のモデル化を実現し、環境意識の違いをシミュレートできるようにした点は、学術性に優れ社会貢献性が非常に高い。カーボンニュートラル社会を実現する上で、行動変容は一つの重要な方策であり、本論文の成果は建築設備工学に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士（工学）の学位に値するものと認める。

氏名(本 籍) SONG JINGYING (中 国)  
学位記番号 博士(工 学)人環博甲第488号  
学位授与の日付 令和7年3月25日  
学位論文題名 Contemporary Space Organization of  
Earthen Dwellings in Inner Mongolia  
Section of the Yellow River Basin (黄河流域の内モンゴル区間における「生土」  
住宅の空間構成に関する研究)

#### 論文調査委員

(主 査) 九州大学 教 授 趙 世 晨  
(副 査) " 准教授 プラサンナ ディ  
" " " 志 賀 勉

#### 論文内容の要旨

生土を建材として用いることは古来の建築技術の一つであり、現在でも土造住宅は世界の住宅総数の約10%を占めている。黄河流域の内モンゴル区間では、生土住宅は伝統的な住居形態として、地域住民の日常生活に深く根ざしてきた。一方、近代化の進展に伴い、伝統的な生土住宅は2つの重要な課題に直面している。一つ、現代のライフスタイルの変化により、住民の日常生活の新たなニーズを満たすため、伝統的住居は自発的な空間整備を余儀なくされている。もう一つは、多くの生土住宅が新しい建築材や近代的技术で建設された住宅に取って代わられており、地域の生活行動や住文化に大きな影響を及ぼしている。また、黄河流域の内モンゴル区間における生土住宅の空間変遷は、伝統的住宅が現代の生活にどのように適応しているかを理解するための貴重な素材でもあると考えられている。

そこで、本研究では黄河流域の内モンゴル区間における生土住宅を対象とし、現在使用されている生土住宅の空間構成を分析し、これらの住宅が外部要因の変化にどのように適応しているかを調査分析し、黄河流域の内モンゴル区間における生土住宅の空間構成を明らかにすることを目的とする。さらに、更新された住宅空間と従来の生土住宅を比較することで、これらの住宅の改修前後における空間構成や生活行動の変化を検討したうえで、地元の生活文化に適応した住宅設計に向けた知見を得ることを目指す。

本論文は5章で構成されている。

第1章では、研究の背景、目的、論文の構成を示すとともに既往研究及び本研究の枠組みについて述べた。

第2章では、黄河流域内のモンゴル区間に所在する52例の生土住宅を調査対象として選定した。その空間タイプを分類するとともに、これらのタイプが時間の経過とともにどのように変化してきたかを明らかにした。その結果、現代の生土住宅においては、複数部屋を有する空

間構造が好まれる傾向があり、特にカン(炕)・ストーブと寝室、ダイニングルーム、リビングルームの組み合わせから成る複合的な基本生活空間が特徴的であることが判明した。また、機能空間に関する分析では、現代の生土住宅が収納機能および生産機能を優先していることが示された。一方、近代的家具や家電の導入により、従来の日常活動は独立した空間へと分離される傾向が見られた。また、新たに創出された空間については、日常的な利用が十分に進んでおらず、新しい居住習慣がまだ定着していないことが確認された。次に居住空間のタイプと機能空間の関係性を検討した結果、居住空間のレイアウトが空間利用に直接的な影響を与えていることが明らかとなった。

第3章では、生土住宅の空間つながりを明らかにするため、現代の生土住宅における空間の配置特性と利用習慣に焦点を当てて、スペースシンタックスを用いて、空間の接続性に基づく空間配置の特徴を分析した。この分析ではインテグレーション及びミーン・デプスを評価指標として分析した結果、ストーブが他の内部空間と密接に結びついており、その配置が空間使用の利便性を高めていることが示された。さらに、カン・ストーブ空間が現在でも生土住宅の空間配置および日常活動の中心的な役割を担っていることが明らかとなった。

第4章では、改修された7つの生土住宅を選定し、その空間構成と配置について分析を行った。伝統的な生土住宅と改修後の住宅の空間構成を比較した結果、改修後の住宅では変化が見られるものの、依然として伝統的な生土住宅の基本的な機能空間が維持されていることが確認された。特に収納機能および生産機能が引き続き重視されていることがうかがえる。さらに住宅設備などの導入によって新たな機能空間が創出されたが、調査対象のサンプルからはこれらの新空間に対する明確な需要の高まりが示されなかった。また、室内空間構成の中心がカン・ストーブ空間から寝室、ダイニングルーム、リビングルームへと移行していることも明らかにした。

第5章では、本研究で得られた結果を総括し、考察を加えてまとめとしている。黄河流域の内モンゴル区間における生土住宅は、生活様式の変化に対して空間構成を効果的に適応させていることが明らかとなった。特に伝統的なカン・ストーブ空間を中心とする構成を維持しつつ、生活スタイルの多様化に対応した空間構成の変容が観察された。この変容は住民の生活様式の変化を反映しながらも、伝統的な生活行動が一定程度維持されていることを示している。これにより生土住宅が有する強固な文化的背景と空間適応性があるとうかがえる。

#### 論文調査の要旨

生土を建材として用いることは古来の建築技術の一つ

であり、現在でも土造住宅は世界の住宅総数の約10%を占めている。黄河流域の内モンゴル区間では、生土住宅は伝統的な住居形態として、地域住民の日常生活に深く根ざしてきた。一方、近代化の進展に伴い、伝統的な生土住宅は2つの重要な課題に直面している。一つ、現代のライフスタイルの変化により、住民の日常生活の新たなニーズを満たすため、伝統的な住居は自発的な空間整備を余儀なくされている。もう一つは、多くの生土住宅が新しい建築材や近代的技术で建設された住宅に取って代わられており、地域の生活行動や住文化に大きな影響を及ぼしている。また、黄河流域の内モンゴル区間における生土住宅の空間変遷は、伝統的な住宅が現代の生活にどのように適応しているかを理解するための貴重な素材でもあると考えられている。

そこで、本研究では黄河流域の内モンゴル区間における現在使用されている生土住宅を対象とし、その空間構成が外部要因の変化にどのように適応しているかを調査分析し、さらに更新された住宅空間と従来の生土住宅を比較することで、これらの住宅の改修前後における空間構成や生活行動の変化を検討したうえで、地元的生活文化に適応した住宅設計に向けた知見を得ることを目的としている。論文の要旨及び成果は以下のようにまとめられる。

(1) 黄河流域内のモンゴル区間に所在する52例の生土住宅を調査対象として選定し、その空間タイプを分類するとともに、これらのタイプが時間の経過とともにどのように変化してきたかを明らかにした。具体的には、現代の生土住宅においては、複数部屋を有する空間構造が好まれる傾向があり、特にカン（炕）・ストーブと寝室、ダイニングルーム、リビングルームの組み合わせから成る複合的な基本生活空間が特徴的であることを明らかにした。また、機能空間に関する分析では、現代の生土住宅が収納機能および生産機能を優先していることが示された。一方、近代的家具や家電の導入により、従来の日常活動は独立した空間へと分離される傾向が見られた。また、新たに創出された空間については、日常的な利用が進んでおらず、新しい居住習慣がまだ定着していないことが確認された。次に居住空間のタイプと機能空間の関係性を検討した結果、居住空間のレイアウトが空間利用に直接的な影響を与えていることが明らかとなった。

(2) 生土住宅の空間つながりを明らかにするため、現代の生土住宅における空間の配置特性と利用習慣に焦点を当てて、スペースシンタックスを用いて、空間の接続性に基づく空間配置の特徴を分析した。この分析ではインテグレーション及びミーン・デプスを評価指標として分析した結果、ストーブが他の内部空間と密接に結びついており、その配置が空間使用の利便性を高めている

ことが示された。さらに、カン・ストーブ空間が現在でも生土住宅の空間配置および日常活動の中心的な役割を担っていることが明らかとなった。

(3) 改修された7つの生土住宅を対象に、その空間構成と配置について分析を行った。伝統的な生土住宅と改修後の住宅の空間構成を比較した結果、改修後の住宅では変化が見られるものの、依然として伝統的な生土住宅の基本的な機能空間が維持されていることが確認された。特に収納機能および生産機能が引き続き重視されていることがうかがえる。さらに住宅設備などの導入によって新たな機能空間が創出されたが、調査対象のサンプルからはこれらの新しい空間に対する明確な需要の高まりが示されなかった。また、室内空間構成の中心がカン・ストーブ空間から寝室、ダイニングルーム、リビングルームへと移行していることも明らかにした。

以上のように、本研究は黄河流域の内モンゴル区間における生土住宅が生活様式の変化に対して空間構成を効果的に適応させていること、特に伝統的なカン・ストーブ空間を中心とする構成を維持しつつ、生活スタイルの多様化に対応した空間構成の変容を明らかにした。またその変容は住民の生活様式の変化を反映しながら、伝統的な生活行動が一定程度維持されていることを示しており、生土住宅が有する強固な文化的背景と空間適応性について重要な知見を提示し、建築学に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位に値するものと認める。

---

|         |                                                                                                                                                               |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏名（本 籍） | Fabian Estuardo Jarrin Mancero（エクアドル）                                                                                                                         |
| 学位記番号   | 博士（工 学）人環博甲第494号                                                                                                                                              |
| 学位授与の日付 | 令和7年3月25日                                                                                                                                                     |
| 学位論文題名  | Data-Driven Immersive Optimization – Enhancing Architectural Design using Virtual Reality and Computer Vision<br>データ駆動型没入型最適化-バーチャルリアリティとコンピュータビジョンによる建築設計の強化 |

#### 論文調査委員

|       |      |     |                                 |
|-------|------|-----|---------------------------------|
| (主 査) | 九州大学 | 准教授 | 古 賀 靖 子                         |
| (副 査) | 〃    | 教 授 | 末 廣 香 織                         |
| 〃     | 〃    | 准教授 | THOMAS Diego<br>Gabriel Francis |

## 論文内容の要旨

The building and construction industry faces significant challenges in achieving sustainability, innovation, and effective stakeholder engagement. However, their achievement is hindered by limited adoption of advanced technologies. This study addresses this challenge by proposing a framework named 'Data-Driven Immersive Design Optimization (DIDO)' in terms of architectural design. DIDO integrates data-driven building design, virtual reality (VR), and computer vision to enhance decision-making and optimize architectural practices. Chapter 1 discusses the transformative potential of DIDO in addressing challenges in the architectural design process. It highlights the increasing demand for sustainability, innovation, and collaboration in the building and construction industry while emphasizing limitations of heuristic-based approaches and resistance to adopting advanced technologies. The problem statement identifies the lack of a unified framework to align computational rigor with user-centered goals. The research objectives focus on developing and validating DIDO through applications in site layout planning and facade complexity analysis to enhance decision-making and better align user preferences with optimized outcomes.

Chapter 2 reviews the state of advanced technologies in architectural design, including data-driven building design, VR, and computer vision, and discusses their contributions and challenges. Data-driven building design enhances precision through performance metrics and multi-objective optimization but faces barriers such as limited data availability and industry adoption. VR fosters stakeholder engagement by providing immersive environments that improve spatial understanding and decision-making, yet adoption is hindered by high costs and resistance to change. Computer vision automates design analysis, offering insights into patterns and materials while complementing VR by enabling intuitive user experiences. However, these technologies are often applied in isolation, limiting their impact. This chapter identifies a critical gap in integrating these technologies into a cohesive framework.

Chapter 3 presents DIDO as a comprehensive methodology that integrates data-driven building design, VR, and computer vision to address architectural challenges identified in Chapter 2. DIDO consists of five components — 3D modeling, data-driven processes, VR integration, data analysis, and optimization and refinement. Those together create a seamless workflow combining computational precision with experiential insights. Evaluation metrics and validation techniques align technical optimization with stakeholder preferences. DIDO's scalability was demonstrated through applications in site layout planning and facade complexity analysis. This chapter

underscores DIDO's potential to unify advanced technologies in architectural design process.

Chapter 4 applies DIDO to site layout planning, emphasizing VR's role in enhancing stakeholder engagement, improving decision-making, and facilitating data-driven building design through an experimental study. In an immersive environment, participants evaluated three key factors of site layout planning, that is, earthwork volume, cost, and environmental impact. During the evaluation, feedback from a multi-objective optimization model was shown in real time in the immersive environment. Evaluation in the immersive environment revealed a 48.3% improvement in decision-making accuracy compared to evaluation using traditional 2D images. While variability in user experiences remains, VR enabled the participants to dynamically evaluate complex terrain and refine layouts. The findings validated DIDO's adaptability.

Chapter 5 applies DIDO to facade complexity analysis, illustrating its versatility in addressing diverse architectural challenges, through an experimental study. The chapter introduces the 'Computational Image Complexity Analysis' (CICA) system developed for this study. The CICA system combines VR and computer vision to quantify the complexity of façade design. The experimental results showed a strong correlation between CICA scores and participants preferences for design complexity, validating the system's reliability. The participants showed a consistent preference for moderate complexity. Analysis of urban streetscapes across five culturally different cities also showed the adaptability of the system.

Chapter 6 concludes the thesis by reflecting on the significance, limitations, and future potential of DIDO. It validates DIDO's ability to bridge computational rigor and user-centered design and emphasizes that DIDO will contribute to enhanced stakeholder engagement, democratized access to data analysis, and promotion of culturally sensitive design practices. However, there is room for further examination into more diverse participants, expanded datasets, and metrics that capture three-dimensional complexity and environmental factors. The chapter concludes that future research directions should include integrating real-time environmental data and exploring cross-disciplinary collaborations.

## 論文調査の要旨

本論文は、持続可能性の確保に加えて、建築設計における技術革新と利害関係者の効果的な関与を達成するという建築・建設業界の課題に対処するために、データ駆動型没入型の設計最適化（Data-driven Immersive Design Optimization ; DIDO）という枠組みを提案するものである。

第1章では、建築・建設業界における持続可能性、技術革新、効果的な協業に関する要請の高まりに焦点を置き、経験的手法の限界と高度なツールの導入に対する抵抗を強調している。その問題は、計算上の厳密性を、利用者中心の目標と適合させるような枠組みの欠如にあるとして、本研究の目的を、利用者の好みが生設計の最適解とよく適合するような意思決定プロセスの強化と定めている。そのため、データ駆動型没入型の設計最適化（DIDO）を提案し、敷地配置計画とファサードデザインにおける応用を通して、その有用性を検証すると述べている。

第2章では、データ駆動型の建築設計、バーチャルリアリティ（VR）、コンピュータビジョンを含む先端的な建築設計技術の現状をレビューし、その貢献と課題を論じている。データ駆動型の建築設計は、性能指標と多目的最適化によって精度を高めるが、データの利用可能性と業界での採用が限定的であること、VRは空間理解と意思決定を改善する没入型環境を提供するが、コストの高さと技術の変化に対する抵抗によって導入が妨げられていること、コンピュータビジョンは設計分析を自動化して、VRによる直感的なユーザー体験を補完するが、これらの技術は単独で適用されることが多いことを指摘している。

第3章では、第2章で特定した課題に対処するため、データ駆動型の建築設計、VR、コンピュータビジョンを統合する包括的な方法論としてのDIDOを提示し、その詳細を論じている。DIDOは5つの要素、すなわち3Dモデリング、データ駆動型プロセス、VRの統合、データ解析、最適化と改善で構成される。これらの組み合わせによって、計算精度と関係者の経験的理解を高めるシームレスなワークフローが実現し、関係者の好みに合う技術的な最適解が得られるとしている。

第4章では、DIDOを敷地配置計画に適用し、実験研究を通して、利害関係者の関与を強化し、意思決定を改善し、データ駆動型の建築設計を容易にするVRの役割を論じている。実験参加者は、土工量、コスト、環境への影響という敷地配置計画の主要因を、没入型環境で評価した。DIDOでは評価中に、多目的最適化モデルからのフィードバックが、没入型環境内にリアルタイムで表示される。その結果、従来の2次元画像による評価に比べて、3次元の没入型環境では意思決定の確度が48.3%向上した。本章では、VRによって利害関係者が複雑な地形を動的に評価し、配置計画を的確に行えることを示し、DIDOの適応性を証明している。

第5章では、DIDOをファサードデザインの複雑性分析に適用し、多様な設計課題に対するDIDOの汎用性を示している。本章では、本研究のために開発した「画像の複雑性コンピュータ解析（CICA）」システムを導入してい

る。CICAシステムは、VRとコンピュータビジョンを組み合わせて、エッジ密度と輪郭数からデザインの複雑性を定量評価するものである。ファサードデザインの複雑性に関する主観評価実験の結果、CICAスコアと実験参加者の好みの間に、強い相関関係があることを示している。また、日本とヨーロッパの文化的に異なる5都市の街路景観を分析し、CICAシステムの信頼性とDIDOの適応性を証明している。

第6章では、本研究を総括し、DIDOの意義、限界、将来の可能性を考察している。DIDOは建築設計において、利害関係者の関与の強化、データ分析への民主的なアクセス、文化を考慮した慣行の促進に貢献するが、より多様な参加者、拡張されたデータセット、3次元の複雑性と環境要因を捉える指標について検討の余地があるとしている。

以上要するに、本論文はデータに基づく意思決定と没入型技術による利害関係者の関与を統合した多目的最適建築設計「DIDO」という枠組みを提案し、敷地配置計画とファサードデザインの複雑性分析に関する事例研究を通して、建築設計プロセスにおけるDIDOの適応性と汎用性を検証したもので、建築・建設分野の発展に寄与するところが大きく、工学的に価値ある業績であると評価する。

よって、本論文は博士（工学）の学位に値するものと認める。

---

|         |                                                        |
|---------|--------------------------------------------------------|
| 氏名（本 籍） | 北島 千朔（福岡県）                                             |
| 学位記番号   | 博士（工 学）人環博甲第498号                                       |
| 学位授与の日付 | 令和7年3月25日                                              |
| 学位論文題名  | 「折る・切る・編む」を用いた展開構造物の設計<br>—幾何学と生物模倣に基づいた形態創<br>生手法の提案— |

|        |                  |
|--------|------------------|
| 論文調査委員 |                  |
| （主 査）  | 九州大学 教 授 末 廣 香 織 |
| （副 査）  | “ “ 准教授 佐 藤 利 昭  |
| “ “    | “ “ 齊 藤 一 哉      |

#### 論文内容の要旨

本論文は、運搬や収納の際に小さく折りたたみ、用途に応じて展開することで空間を構成する展開構造物を研究対象としている。建築分野における展開構造物は、設置場所を問わずにその場で素早く組み立てや撤去が可能であり、工場生産による精度確保や素材利用の合理化といった利点も併せ持つ。しかしながら、展開構造物を組み立てるためには、部材厚みに起因する折りたたみ時

の干渉、部品製造方法の複雑さ、施工時の安全性確保といった課題を解決しなければならない。

本論文では、展開構造物が空間を構成する際の操作として、面的な形の変化に基づいて、「折る」「切る」「編む」の三つの方法を提示し、これらの操作を用いた設計手法によって、展開構造物を実現する際の各課題を解決することを目的としている。また従来の設計手法を拡張するために、生物の構造と機能を工学的に応用する生物模倣の考え方も用いている。

本論文は第1章から第5章で構成される。

第1章では、建築分野における展開構造物の概要を述べるとともに課題を整理し、展開構造物の形状変化の操作を「折る」「切る」「編む」の3つに大別して、それぞれの背景と特徴について述べている。また、生物模倣の関連研究についても整理している。

第2章では、昆虫の翅の中で最もコンパクトに折りたたむことが可能であるハサミムシの後翅の展開における「折る」操作に着目した。この翅にはほぼ厚みがないが、それを建築的に利用する場合には厚みのある素材が必要なため、厚板の折りたたみ時にも材料同士が干渉しない設計方法を開発した。折りたたみが可能な幾何学条件について整理し、異なる山谷折り線の割り当て方法を基に2つの折りたたみモードを提案した。

第3章では、キヌガサタケの菌網の展開方法を「切る」操作としてモデル化し、二次元加工が可能な切り紙パターンを生成する手法を提示した。キヌガサタケの菌網は、展開前は傘の中に小さく折りたたまれているが、展開後は網目構造となって高い展開率を実現している。この応用によって、小さな平面素材から巨大な展開構造物の製造が可能となる。本章では、菌網の展開方法の分析から幾何学的な条件を抽出した後にモデル化を行い、二次元加工が可能な切り線パターンを算出する方法を提示した。

第4章では、レシプロカル・フレームの「編む」操作に着目し、展開によって立体的な構造物を施工する方法を提示した。レシプロカル・フレームは、短小な構成部材同士が相互に支持することで大スパンを構築できる。ここでは、任意の曲面形状に測地線グリッドを配置する展開構造の設計手法にレシプロカル・フレームの仕組みを組み込んだ。短小部材を用いて2次元平面上に構成されたユニットを展開することで、最終的に3次元曲面を形成する方法を提示した。さらに実大スケールの仮設構造物を試行建設によって建設し、レーザー 3Dスキャンによる形状比較検討を行った。

第5章では、「折る・切る」のそれぞれについて立体形状へと展開する方法を提示した。「折る・切る・編む」という操作でできあがった展開構造物は、面内に不連続な部分をつくれば、非可展面と呼ばれる曲面も

作成できる。本章では、可展面と非可展面について概説し、ハサミムシの後翅の展開図と、キヌガサタケの菌網を模倣して得られた切り紙パターンの設計方法に操作を加え、立体形状へと展開する方法について詳述した。また、それぞれについてワーキングモデルを用いて展開時の挙動を確認した。

第6章では、展開構造物を建築へ応用する際の課題に対して、「折る」「切る」「編む」という3つの操作とその設計手法から得られた各成果を総括し、考察を加えてまとめとしている。

本論文は、微分幾何学、生物模倣、折り紙工学といった一般の建築分野に留まらない広範囲の手法を取り入れることで展開構造物の新しい設計手法の確立を試みている。ここで「折る」「切る」「編む」という3つの操作をそれぞれ異なる課題に対応させているが、こうした成果は、建築での展開構造物の設計手法に新しい可能性を示すものと言える。

## 論文調査の要旨

本論文について対面およびオンラインによる試験を行い、学内外より20名を超える聴講者が参加した。その中で、剛体折り可能性、展開率の確認方法、建築への展開における素材の課題、建築での仮設と本設の認識、本研究の強みと今後の研究の展望などについて質疑と議論があった。いずれも十分な回答を得たので、最終試験に合格したものと認める。