

論文審査の要旨及び担当者

No.1

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	中山 俊
論文審査担当者	主 査	政策・メディア研究科委員	環境情報学部教授	厳 網林
	副 査	政策・メディア研究科委員	政策・メディア研究科教授	ショウ ラジブ
		政策・メディア研究科委員	総合政策学部教授	古谷 知之
		政策・メディア研究科委員	環境情報学部准教授	宮本 佳明
		東京都立大学	都市環境学部准教授	一ノ瀬 雅之
学力確認担当者：				
中山俊君の博士論文は、「エネルギー・水・食料からみた都市の脱炭素化に向けた密度制御手法の検証」と題したものである。 「密度」は主要な都市計画技術として、時代とともに変遷しながら持続可能な都市の実現に寄与してきた。そして今日、都市の脱炭素化において、建築物部門のエネルギー消費量の抑制に向けた新たな密度論が展開されている。日本では、2008年の都市計画運用指針において、容積率の最高限度割増における総合的環境負荷低減が盛り込まれた一方で、近年の都市再開発における建築物の高層化は、延床面積あたりのエネルギー消費量を増加させ、環境効率を悪化させることが指摘されている。すなわち、容積率の割増自体がCO₂を増大させる可能性を内包している。これまでに、建物の高さや階数とエネルギー消費効率に関する研究報告はあるものの、その知見は都市や国によって違いが見られ、日本においては未だ十分に解明されていない。また、多くの既往研究は運輸交通部門に焦点を当てており、建築物部門について建築と都市から体系的に捉えた研究の蓄積は極めて限定的である。本研究は、このような背景を踏まえ、建築と都市という二つのスケールから、容積率と環境負荷の関係性を実証的に検証し、新たな密度制御手法の提示を目的としている。東京都中央区を主たる研究対象として、建物の資源消費構造をエネルギー・水・食料から捉え、①容積率の違いによる資源消費由来の炭素排出量への影響、②割増容積率が適用された建物における資源消費の低減余地の可能性を明らかにし、都市再開発を通じた環境負荷低減を実現するための密度制御手法を提示している。 本学位論文は、全8章から構成される。 第1章では研究の背景と目的を提示し、持続可能な都市の形成における密度の重要性とその歴史を整理している。エベネザー・ハワードの明日の田園都市以降、時代の目的に応じて人口密度・建築人口密度、建築密度によって議論されてきた。その上で、現代の都市管理上の目的として脱炭素化が着目されており、環境負荷低減による容積率割増という密度制御手法が用いられているが、科学的根拠が欠如している現状を指摘した。その上で、容積率の増加が炭素排出に及ぼす影響と割増容積率が適用された建物の脱炭素余地を検証する必要性を示した。 第2章では、既往研究について文献調査を実施し、都市の脱炭素化の体系化と本研究のアプローチを構築した。密度制御と環境負荷に関するシステマティックレビューを通じて、都市と建築を横断した体系的な実証研究が不足している現状を明らかにした上で、炭素会計とエネルギー監査が体系的な検証に不可欠であることを指摘している。特に炭素会計は都市を対象に建物単位でCO₂排出量を推計でき、エネルギー監査は個別の建物				

を対象にその脱炭素余地を特定できる。なお、従来の建物全体のエネルギー消費量を一括で扱うエネルギー監査では、建物の特性に応じた効率的な省エネ施策の特定が困難であることも明らかにした。さらに、建物はエネルギー・水・食料といった資源消費のノードとして捉え、各セクターの炭素排出について調査を行った。その結果、従来のエネルギーセクターのみを対象とした評価では世界の炭素排出量の約 5 割しか対象とできないのに対し、建物で消費される水・食料セクターまで包含することで約 7 割まで対象範囲を拡大できることを明らかにした。しかし、建物単位で複数セクターの炭素会計を行う場合、従来の産業連関表を用いたトップダウン型の手法では対応できない。そのため、各種統計データや実測値など、様々なデータを統合して炭素排出量を積み上げていくボトムアップ型の手法の確立が不可欠であることを指摘している。

第 3 章では、方法論の構築として、ボトムアップ型 CIF を具体化した SPBCA (Service Point-Based Carbon Accounting)の方法論と、エネルギー監査 BDEAM (BEMS-Driven Energy Audit Method)の方法論を確立している。SPBCA においては、食料セクターの炭素会計を可能とするため、消費地ではなくサービス提供地点を基準とした炭素会計の方法論を体系化し、地理情報システムを基盤としたシステムを構築している。BDEAM においては、BEMS および建物の空間用途や建築設備の業界基準を用いて、エネルギー・水の消費パターンをより詳細に分析できる手法を確立している。これらの方法論を用いて、東京都中央区を対象とした容積率の違いによる資源消費由来の炭素排出量への影響、および割増容積率が適用された建物における資源消費の低減余地の可能性という二つの実証課題へのアプローチを提示している。

第 4 章では、一都三県を対象として食料セクターの炭素会計を SPBCA を用いて実施し、その空間分布特性を詳細に検討している。都心から 5km 圏内では食料セクターの炭素排出量のうち内食が 55.5%、外食が 35.0%を占める一方、この比率は中心部からの距離とともに大きく変化し、25km 地点では内食が 87.7%に達することを明らかにしている。さらに、内食と外食の排出量の間には強い負の相関 (-0.97) が見られ、都心からの距離に応じて明確なトレードオフ関係が存在することを実証している。加えて、中食の炭素排出量は圏央道沿いと湾岸エリアで特異的に高く、これらの地域における産業構造と中食需要との関連性を示唆した。以上より、土地人口密度だけでなく、建築密度も食料消費及び CO₂ 排出量に影響を及ぼしていることが明らかとなった。

第 5 章では、東京都中央区を対象としてエネルギー・水・食料セクターの炭素会計を実施し、容積率との関係性を詳細に分析している。中央区に所在する 19 棟を対象として、実測値が得られたエネルギーと水の消費量について、推計値との相関分析を行った結果、エネルギーについては 0.90、水については 0.87 という高い相関係数を得ている。また、容積率 500%から 700%まで延床面積あたりの炭素排出量は上昇する一方、700%から 900%では横ばいとなり、さらに割増容積率で建設された 1300%の超高層ビル 2 棟では、容積率 400%から 500%と同等の環境効率を示すことが明らかとなり、割増容積率による環境負荷低減効果が確認された。

第 6 章では、東京都中央区に所在する割増容積率が適用された業務商業複合ビルを対象に BDEAM を適用し、追加コストを要しない範囲で実施可能な脱炭素化余地を検討している。データ包絡分析 (DEA) を用いたベンチマーキングの結果、対象建物の空調を除く全ての建築設備において性能改善の余地があることを明らかにし、特に照明設備において深夜帯の不要な点灯による電力消費が年間約 75,055kWh (オフィスフロアの年間

電力消費量の 5.3%) に上ることを示している。さらに、具体的な改善策として 5 つの施策を特定し、これらの実施により少なくとも 10.1%の炭素排出量削減が可能であることを明らかにした上で、限界削減費用分析によりこれらの施策が経済的にも実行可能であることを実証している。

第 7 章では、第 4 章から第 6 章までの分析結果を総括した上で、東京都中央区のデータを中心に、エネルギー・水・食料の 3 セクターから見た密度制御の妥当性と可能性を論じている。容積率 1300%への割増によって環境負荷低減が可能なのは、エネルギー部門のみを考慮した場合の指定容積率 800%以上の場合に限られ、食料と水も考慮すると実現が困難である可能性を示している。その上で、建物に対して総じて中程度の容積率割増を均等に適用するのではなく、一部の建物に限定して容積率を割増し、その他のエリアでは容積率を抑制する容積移転が、全体としての環境負荷低減に寄与する可能性が高いことを明らかにしている。さらに、従来の隣接街区間での移転に留まらず、都心部と郊外部の間での広域的な容積率移転の必要性についても言及した。

第 8 章では、本研究の結論を述べるとともに、本研究の限界と克服すべき課題について論じている。今後の研究課題として、運輸交通部門の考慮、建築物の炭素会計における周辺環境の影響の考慮、容積率運用における客観的な指標体系の構築、継続的な原単位データベースの更新という 4 つの課題を提示している。

以上のように、エネルギー・水・食料から建物の資源消費構造を定量的に捉え、容積率の増加がもたらす環境負荷について定量的に解明した。具体的には、1300%まで容積率を割り増した建物では容積率 400-500%と同等の環境効率が達成可能であること、建物の特性により 10%以上の追加的な省エネ余地が存在すること、また食料セクターの炭素排出強度がエネルギーセクターに匹敵することを明らかにし、容積移転の重要性を示した。本研究の学術的意義は、建物単位の炭素会計 SPBCA とエネルギー監査 BDEAM という新たな方法論をデータ基盤と併せて開発し、高密な都市空間の確保と環境負荷の低減と両立させるための新たな密度制御手法を提示した点にある。また、SPBCA を脱炭素型まちづくりのためのベースライン提供ツールとして、BDEAM を個別建物の脱炭素化支援ツールとして実装し、平時のデータ収集から定期的なベンチマーキング、問題設備の特定と診断、運用改善という継続的な改善サイクルを可能にしたことで、脱炭素型まちづくりの方策に悩むデベロッパーや行政を支援できるようにもなった。一方で、本研究は東京都中央区という特殊な地域を主な対象としており、また運輸交通部門を含めていないことから、他の地域への適用可能性については更なる検討が必要である。また、本手法による都市と建築の継続的なモニタリングにおいては、それを支えるデータベースの管理手法の確立が求められる。しかしながら、学位審査委員会は、本研究が上記のような限界を認識した上で、都市の密度制御と脱炭素化という喫緊の課題に対して、理論と実証の両面から重要な知見をもたらしたと判断するものである。

中山俊君は総合政策学部、政策・メディア研究科修士課程を経て、博士課程に進学した者である。学部 4 年から本研究の原点でもある JST/Belmont Forum 国際共同研究に参加し、国内・国外チームの学生交流とプロジェクトマネジメントをリードした。本学位論文は東京圏しか扱っていないが、同プロジェクトにおいて国際共同研究論文も発表し、優れた実績を上げている。この経験と実績から著者は独立的に研究を遂行していくために必要となる高度な研究能力ならびにその基礎となる豊かな学識、さらに研究成果を社

論文審査の要旨及び担当者

No.4

会に発信、還元するための優れた協調力と信頼感を有していることが、本論文において明確に示されたと判断される。

よって、学位審査委員会は中山俊君が博士（政策・メディア）を受ける資格があることを認めた。