埼玉県さいたま市における建物レベルの CO_2 排出量推定

村上拓*・堤田成政**

Estimation of Building-Level CO_2 Emissions in Saitama City, Saitama Prefecture

Taku Murakami*, Narumasa Tsutsumida**

Abstract: The increase in carbon dioxide (CO_2) emissions and the resulting global warming have become common challenges. The Paris Agreement of 2015 declared a global commitment to reduce greenhouse gas emissions, and each country has set its own targets to work toward reducing CO_2 emissions. To formulate effective emission reduction strategies, it is essential to understand in detail where and how much CO_2 is currently being emitted. Here, we developed a building-level bottom-up CO_2 emission estimation method to understand the spatial distribution of emissions, in order to support the formulation of effective reduction strategies. The proposed bottom-up approach utilizes 3D building data and building-specific emission factors to estimate and visualize emissions for each individual building. This enables high-resolution carbon mapping and contributes to spatially targeted emission reduction planning. Additionally, the method allows integration with urban planning data, supporting decision-making in cities. The proposed framework is expected to support more accurate and practical CO_2 reduction strategies at an urban scale.

Keywords: CO_2 排出(CO_2 emission)，ボトムアップアプローチ(Bottom-up approach)，3D 都市モデル(3D city model)，高解像度炭素マッピング(High-resolution spatial carbon mapping)

１．はじめに

人間活動の拡大に伴う CO_2 などの温室効果ガスの排出量の増加は，地球温暖化の進行の一因であるとされており（IPCC, 2023)，異常気象の頻発化や激甚化などを通して我々の生活に悪影響を及ぼす可能性がある．また，世界のエネルギー消費の約 3 分の 2 及び CO_2 排出量全体の 70％以上は都市域に由来するとされており（UNDCCC, 2020)，気候変動対策において都市は主要な CO_2 排出源であると考えられている．そのため都市域での温室効果ガスの排出を抑制し，持続可能な社会の実現を目指すことが急務である．

こうした背景を受けて，2015 年の国連気候変動枠組み条約締約国会議で採択されたパリ協定では，産業革命以前の水準と比べて，気温上昇を 2℃未満，可能であれば 1.5℃未満に抑えることを全世界的に目指すことが決められた（UNFCCC, 2016)．この目標の達成に向け，各国が適切な排出削減目標を設定し CO_2 排出量削減の動きが活発化してきている．日本政府においても 2030 年度の温室効果ガス 46%削減(2013 年度比)，2050 年のカーボンニュートラル実現という国際公約を掲げた(環境省，2021)．各省庁や自治体は脱炭素社会の実現に向け，排出削減目標の設定や，温室効果ガスの排出量の算定，排出削減に取り組んでいる．こうした削減目標を達成するためには，都市構造をコントロールする都市計画情報などの都市計画と連動した低炭素化施策が重要となる．そのため，効果的な削減案の立案とその進捗を定期的に評価するためには，CO_2 排出量や，その空間的分布を高い空間解像度で把握することが求められる．

CO_2 排出量推定やその空間分布分析の分野では，これまで多くの研究が進められており，手法は大きく「ボトムアップ型」と「トップダウン型」の 2 つに大別できる．トップダウン型の手法は衛星観測データを用いて大気中の CO_2 濃度を測定する手法である．衛星観測データが公開されており容易に利用が可能であるため，多くの研究で用いられてきた．しかし Li et al. (2024)は，衛星観測データの粗い空間解像度が CO_2 濃度検出に大きな影響を与えることを示し、特に 1 km を超える粗い空間解像度では小規模排出源の検出が困難になることを指摘した．

* 学生会員 村上拓 埼玉大学大学院理工学研究科 （Saitama University）
〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 E-Mail：t.murakami.386@ms.saitama-u.ac.jp
** 正会員 堤田成政 埼玉大学大学院理工学研究科 （Saitama University）

また Fuentes Andrade et al. (2024)は，大気中の乱流や風速変動が CO_2 濃度検出の不確実性に大きな影響を及ぼす点を指摘した．これらの制約から，トップダウン型手法では市区町村レベルといった高い空間分解能での CO_2 排出量の詳細な分析には限界があるとされている．

一方，ボトムアップ型の手法は，建物の現場調査から得られたエネルギー消費データや，道路ごとの交通量データなどの詳細なデータを使用することで CO_2 排出量を推定する手法である．Yamagata et al. (2018) は，建物ポイントデータを用いて都市域における季節変動を考慮した CO_2 排出量の可視化を行っており，都市スケールでのボトムアップ型手法を用いた CO_2 排出量推定の有効性を示している．Khamchiangta et al. (2024) は延べ床面積を含んだ建物データと Local Climate Zone データを用いてバンコクの地域気候帯に関連した炭排出強度の可視化を行なった．ボトムアップ型の手法は家庭部門や産業部門など部門ごとの排出量を算定でき，さらにトップダウン型の手法と比較し，より高い空間解像度での CO_2 排出分析が可能である．しかし，手法で必要とされるデータが整備されていない地域が多いため，ボトムアップ型の手法で CO_2 排出量推定に取り組んだ研究は依然として数少なく，特に都市構造をコントロールする都市計画と組み合わせて排出源を評価した分析は実現されていない．都市型自治体においては，都市計画を適切にコントロールすることで排出源削減を実現できる可能性があり，そのためには建物単位での排出量推定を行えるボトムアップ型の手法が不可欠であると言える．こうした課題に対して，近年国土交通省が公開した都市 3D モデルは新たなデータ基盤として有用である可能性がある．

そこで本研究では低炭素社会実現に向けた効果的な都市計画の立案に向け，建物 3D データに基づくボトムアップ型の CO_2 排出量推定法を提案する．本手法は，より建物レベルでの CO_2 排出特性を明らかにでき，排出削減のための具体的かつ効果的な都市計画の戦略を立案するための定量的な情報を提供できる．本研究では、埼玉県さいたま市を事例とするが、本手法は 3D 都市モデルが整備されている都市で適用可能であるため，汎用性が高い点に特徴がある．

２．対象地域

本研究では，一例として埼玉県さいたま市を対象地域とする．さいたま市は人口約 133 万人を有し，住宅地や商業地，工業地など多様な土地利用が混在している．環境省が公表する「自治体排出量カルテ」では，さいたま市の CO_2 排出量は，国全体や都道府県の排出量をさいたま市の人口，従業者数，製造品出荷額などの統計指標に基づいて按分する「標準的手法」を基に産業部門や業務部門等の部門ごとに推計している．2022 年度における，さいたま市の全部門からの CO_2 排出は計 $5,330\times10^3$t と推定されている(環境省)．また，さいたま市は事務事業活動に伴う温室効果ガス排出量の算定を独自に行っている．市役所庁舎や学校などの公共施設における電気・ガス・燃料油の使用量，さらに公用車の燃料使用量などを基礎データとして収集し，それぞれに対応する排出係数を乗じて CO_2 排出量を算定しており．2022 年度は計 110×10^3t と推定されている（埼玉県さいたま市，2025)．

２．データ

２.１　3D 都市モデル

国土交通省 PLATEAU プロジェクトによって公開されている 3D 都市モデルデータは，航空測量等に基づき取得され，1 つ 1 つの建物について，位置や 16 区分の使用用途，延べ床面積等の属性情報が含まれている．このデータは 2025 年 6 月時点で，約 250 都市で整備されており，2025 年度末までに約 300 都市，2027 年度末までに約 500 都市への整備拡大が予定されている．本研究ではさいたま市内の約 49 万件の建物データを使用した．例として大宮駅周辺の 3D 都市モデルデータを図 1 に示す．

２.２　CO_2 排出源単位データ

建物用途別の排出源単位データには日本ビルエネルギー総合管理技術協会のデータを用いた．このデータは 2022 年度に実施した 514 棟への現地調査によって作成され，16 区分に分けられた建物の使用用途ごとの $1m^2$ あたりの電気・ガス・油などのエネルギー消費量やそれに基づく CO_2 排出源単位($1m^2$ あたりに排出される CO_2 量)の情報を含む．

２.３　都市計画決定情報

国土交通省の都市計画決定情報は，2022 年度に地方公共団体等の情報収集・データ整備による「都市計画決定 GIS データ」を基に作成されており，都市計画法に基づいて定められた都市計画区分等の情報を含んでいる．図 2 にさいたま市における都市計画決定情報を示す．

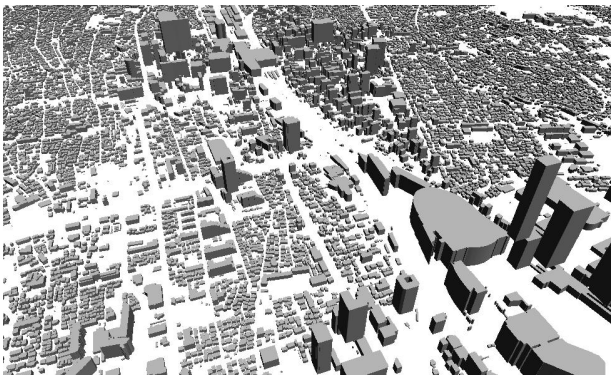


図 1：大宮駅周辺における 3D 都市モデル

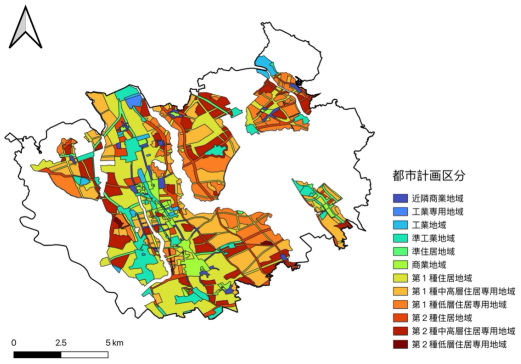


図 2：さいたま市の都市計画区分.

3. 研究手法

3.1 排出量推定

建物のエネルギー消費量は，建物の使用用途や延床面積と強い相関を示す(日本ビルエネルギー総合管理技術協会，2024)． 具体的には，事務所，デパート，飲食店，ホテル，マンションのエネルギー消費量と延べ床面積の相関係数は，それぞれ 0.91，0.93，0.95，0.94，0.97 である(日本ビルエネルギー総合管理技術協会，2024)．そこで本研究では延べ床面積に応じて建物からの CO_2 排出量推定を行う．建物の使用用途ごとの CO_2 排出源単位データ($1m^2$ あたりの CO_2 排出量)と，3D 都市モデルから取得した建物ごとの延べ床面積を掛け合わせることで，1 つ 1 つの建物から排出される CO_2 量を推定する（式 1）.

$$CO_2Emission = \sum_b \sum_c (EF_c * A_{b,c}) \quad (1)$$

EF_cは建物の使用用途cにおける排出源単位，$A_{b,c}$は使用用途cにおける建物bの延べ床面積を表す．また$CO_2Emission$は，さいたま市内の建物から排出される CO_2 排出総量を表す．本研究では，3D 都市モデルの建物の使用用途と排出源単位データの建物の使用用途を合わせるため，最終的に建物を民間事務所，官庁用事務所，デパート，ホテル，マンション，文化施設，分類外施設の 7 つの使用用途に分類し排出量推定を行った.

3.2 排出量と都市計画区域

各建物の重心を基準点として図 2 の都市計画区域に空間照合し，建物ごとに都市計画区分を判定した．その上で，都市計画区分ごとに CO_2 排出量を集計し，当該区分の面積で除した面積当たりの排出量（排出密度）を算出した.

4. 結果

本研究ではボトムアップ型の手法で 1 つ 1 つの建物からの CO_2 排出量を算出することにより，市域全体からの排出量推定とその空間分布の可視化を行った．図 3 に CO_2 排出の空間的分布を示す． 大宮駅やさいたま新都心駅，武蔵浦和駅周辺が CO_2 排出量の多いホットスポットであることが明らかになった．また本手法では，さいたま市内の公共施設からの CO_2 排出は 113×10^3t-CO_2/年と推定され，2023 年度における，さいたま市が公表する 65×10^3t-CO_2/年（埼玉県さいたま市，2025）の約 1.7 倍多くの推定量となった．全ての建物からの CO_2 排出に関しては，$16,391\times10^3$t-CO_2/年という推定結果となり環境省が公開する自治体カルテ （2022 年度)の $4,086\times10^3$t-CO_2/年(環境省)と大きく異なる推定結果となった．この違いの要因として，(1)本研究では，建物が使用されているか否かを区別できていないため，使用されていない建物からも CO_2 が排出されていると計算され，排出量を過大評価している可能性がある；(2)本研究では，建物 3D モデルデータの 16 つの建物使用用途を 7 つの使用用途にまとめて再分類しており，これにより過大評価している可能性がある；(3)環境省の推定手法に用いられている「人口や従業員の数，製造額と CO_2 排出量が比例する」という仮定により， 環境省報告書では，さいたま市からの CO_2 排出量が過小評価されている可能性がある；以上の 3 つの可能性が考えられる.

また図 4 に都市計画区分ごとの CO_2 排出量を，図 5 に都市計画区分ごとの CO_2 排出密度を示す．排出量では都市計画区域外からの排出が最も多く，次いで商業地域，準工業地域の順で多い CO_2 排出量を示した．排出密度では商業地域が最も高い値を示し，次いで工業地域，工業専門地域，準工業地域が高い CO_2 排出密度を示した．反対に住居地域では排出総量，排出密度ともに低い値となった．このことから特に商業地域や準工業地域での優先的な省エネルギー化が排出量削減に有効であると考えられる.

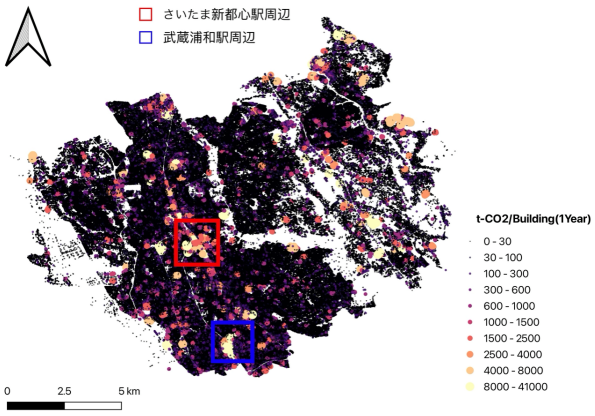


図 3：さいたま市における建物由来の CO_2 排出分布

5．おわりに

本研究では，さいたま市を対象にボトムアップ型の手法を用いた CO_2 排出量の推定とその空間的分布の可視化を行なった．従来のトップダウン型手法では不可能であった高い空間解像度での排出量推定と都市計画と組み合わせた排出特性分析が可能になり，ボトムアップ型の手法により都市レベルでの排出削減施策検討に有益な知見が得ることができた．本研究による排出量推定は年間 $16,391\times10^3$t-CO_2 となり，環境省の排出量推定に比べて過大評価となった．建物ごとの CO_2 排出量の実測が難しいため、結果の妥当性検証が課題となっている．しかしながら，対象地域内の相対評価は可能であるため、低炭素社会実現に向けた都市計画立案に寄与するものである．本手法は，建物３D データが取得可能な他都市においても展開可能であり、環境負荷の低減と持続可能な社会の構築に役立てていきたい．

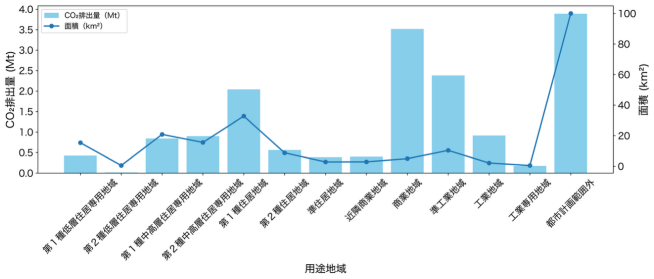


図 4：都市計画区分ごとの CO_2 排出量と面積

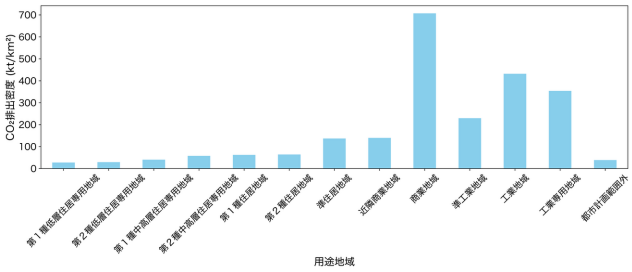


図 5：都市計画区分ごとの CO_2 排出密度

謝辞

本研究は，国土交通省，環境省，埼玉県さいたま市が公開するデータを使用した．さらに日本ビルエネルギー総合管理技術協会による建物用途別エネルギー消費量および CO2 排出源単位データを利用することで実現した ．ここに記して謝意を表したい．

参考文献

環境省 (2021) 地球温暖化対策計画．<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/211022.html>
環境省 自治体排出量カルテ．<https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/tools/karte.html >
国土交通省 (2024) PLATEAU(3D 都市モデル) ．<https://www.mlit.go.jp/plateau/>
埼玉県さいたま市 (2025) さいたま市の事務事業における温室効果ガス排出量推計．<https://www.city.saitama.lg.jp/001/009/015/013/002/p097087.html >
日本ビルエネルギー総合管理技術協会(2024) 建築物エネルギー消費量調査報告書［第 46 報］.
Fuentes Andrade, D.; Reuter, M.; Bovensmann, H.; Burrows, J.P. (2024) A method for estimating localized CO_2 emissions from co-located satellite XCO_2 and NO_2 images. *Atmospheric Measurement Techniques*, **17**, 1145-1163.
Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023) *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC.
Khamchiangta, D. and Yamagata, Y. (2024) Mapping urban carbon emissions in relation to local climate zones: Case of the building sector in Bangkok Metropolitan Administration, Thailand. *Energy and Built Environment*, **5**(3), 337-347.
Li, Z.; Fan, M.; Tao, J.; Xu, B. (2024) Impacts of spatial resolution and XCO_2 precision on satellite capability for CO_2 plumes detection. *Sensors, 24(6)*, 1881.
Yamagata, Y., Yoshida, T., Murakami, D., Matsui, T. Akiyama, Y.(2018). Seasonal urban carbon emission estimation using spatial micro big data. *Sustainability*, **10**(12), 4472.
United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2015). The Paris Agreement, 2015.
United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2020) Urban Climate Action Is Crucial to Bend the Emissions Curve. <https://unfccc.int/news/urban-climate-action-is-crucial-to-bend-the-emissions-curve>