

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

1-1909 建物エネルギーモデルとモニタリングによる
炭素排出量・人工排熱量の高精度な推計手法の開発
(JPMERF20191001)
令和元年度～令和3年度

Development of High Accuracy Estimation Method for Carbon and Anthropogenic Heat Emissions with
a Building Energy Model and Monitoring Data

〈研究代表機関〉

埼玉県環境科学国際センター

〈研究分担機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所
国立研究開発法人産業技術総合研究所
明星大学
東京大学

〈研究協力機関〉

防衛大学校
東京電力ホールディングス株式会社
国立研究開発法人国立環境研究所

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和4年5月

目次

I. 成果の概要	・・・・・・・・・・	1
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究目標		
4. 研究開発内容		
5. 研究成果		
5-1. 成果の概要		
5-2. 環境政策等への貢献		
5-3. 研究目標の達成状況		
6. 研究成果の発表状況		
6-1. 査読付き論文		
6-2. 知的財産権		
6-3. その他発表件数		
7. 国際共同研究等の状況		
8. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
II-1 大気モニタリングによる起源別のCO ₂ ・熱排出量推定	・・・・・・・・・・	14
(国立研究開発法人国立環境研究所、国立研究開発法人産業技術総合研究所)		
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-2 都市気象・建物エネルギーモデルの改良と検証	・・・・・・・・・・	27
(明星大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所)		
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-3 数理モデルの開発・インベントリ及び簡易推計ツールの作成	・・・・・・・・・・	44
(埼玉県環境科学国際センター、東京大学 大学院新領域創成科学研究科)		
要旨		

7. 研究開発目的	
8. 研究目標	
9. 研究開発内容	
10. 結果及び考察	
11. 研究目標の達成状況	
12. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細 53
IV. 英文Abstract 59

I. 成果の概要

課題名 1-1909 建物エネルギーモデルとモニタリングによる炭素排出量・人工排熱量の高精度な推計手法の開発

課題代表者名 原 政之 (埼玉県環境科学国際センター温暖化対策担当
専門研究員)

重点課題 主：【重点課題③】 環境問題の解決に資する新たな技術シーズの発掘・活用

副：【重点課題⑦】 気候変動への適応策に係る研究・技術開発

行政要請研究テーマ (行政ニーズ) (1-7) 建物エネルギーモデルによる炭素排出量・人工排熱量の簡易推計手法の開発

研究実施期間 令和元年度～令和3年度

研究経費

107,135千円 (合計額)

(各年度の内訳：令和元年度：35,999千円、令和2年度：35,919千円、令和3年度：35,217千円)

研究体制

(サブテーマ1) 大気モニタリングによる起源別のCO₂・熱排出量推定 (国立研究開発法人国立環境研究所)

(サブテーマ2) 都市気象・建物エネルギーモデルの改良と検証 (明星大学)

(サブテーマ3) 数理モデルの開発・インベントリ及び簡易推計ツールの作成 (埼玉県環境科学国際センター)

研究協力機関

防衛大学校、東京電力ホールディングス株式会社、国立研究開発法人国立環境研究所

本研究のキーワード

人工排熱、炭素排出、建物エネルギーモデル、暑熱環境対策、ゼロカーボンに向けた都市計画

1. はじめに (研究背景等)

現在、世界人口の55%は都市に集中し、温室効果ガスの70%は都市から排出されている。更に、気候変動に対し脆弱な人口も都市に集中している。IPCC第5次報告書では、今世紀中に地球温暖化(以下、GW)による2~5℃の昇温だけでなく、世界の大都市では都市ヒートアイランド現象(以下、UHI)による1~2℃の昇温も重なることにより、熱波が頻発すると纏められている。この為、都市の気候変動対策はその重要性を増しつつあり、暑熱環境の悪化を始めとした気候変動への適応策

及び緩和策の推進が求められている。

以上の都市での対策の設計に際しては、UHI・GWの両因子としての人工排熱量・炭素排出量（以下、熱・CO₂排出量）の正確な推計が必要である。その推計には主にインベントリ分析が用いられてきたが、手順が煩雑であり、実際の熱・CO₂排出量との比較検証も殆どなされない為、推計の精度・不確実性ともに不明である場合が多い。また、人口や土地利用の変化等に伴う熱・CO₂排出量の将来変化を予測する簡易手法も開発されていない。それら排出量の将来予測を気候変動適応策の設計や低炭素社会を目指した都市計画の策定に反映させる為にも、そのような簡易手法の開発が望まれている。

2. 研究開発目的

本研究では、実測ベースの熱・CO₂排出量との比較検証を通じ、従来手法と異なり、精度や不確実性の定量化まで踏み込んだ都市での新たな熱・CO₂排出量の推計手法を開発することを目的とした。実測では、排出源毎の熱・CO₂排出量を放射性炭素同位体比や酸素濃度の計測等に基づき推計可能な独自の観測手法を駆使する。同手法で得られる熱・CO₂排出量を活用し、都市での気象と建物エネルギー収支の独自数値モデルを改良・適用する事で得られる熱・CO₂排出量の予測精度を検証する。検証後のモデル計算に、土地利用・建物用途や人口等の容易に入手可能な情報を組合せ、統一的な手法で国や地方自治体が都市スケールの熱・CO₂排出量を推計できる手法の構築を目的とした。

3. 研究目標

全体目標	本研究では、大気モニタリングデータや電力実消費量データで検証した建物エネルギーモデルを用いて、民生部門の熱・CO ₂ 排出量インベントリの高精度化を行い、国や地方自治体における環境政策の計画策定等に資することができる炭素排出量・人工排熱量を推定するための手法を確立することを最終目的とする。
サブテーマ1	大気モニタリングによる起源別のCO ₂ ・熱排出量推定
サブテーマリーダー/所属機関	寺尾 有希夫/国立研究開発法人国立環境研究所
目標	世界で初めての試みとなるCO ₂ と熱輸送量、 ¹⁴ C ₂ 、O ₂ とCO ₂ 濃度、そしてエアロゾル組成の同時観測を都市域(東京都渋谷区の代々木サイト)で行い、排出起源毎の熱・CO ₂ 排出量の定量化を行う。これまでに実測データが無かった夏季と冬季の起源別CO ₂ ・熱排出量の1時間値を他サブテーマに提供し、サブテーマ2で開発される都市気象・建物エネルギーモデルの検証に利用し、ひいてはサブテーマ3で開発される排出インベントリの検証に貢献する。
サブテーマ2	都市気象・建物エネルギーモデルの改良と検証
サブテーマリーダー/所属機関	亀卦川 幸浩/明星大学
目標	サブテーマ1で取得される熱・CO ₂ 排出量等のモニタリングデータを用い、都市気象・建物エネルギーモデルの改良と検証を行う。検証後のモデルを東京や大

	阪等の国内主要都市域に適用し、省エネ等の対策導入の影響を加味した数値実験を行う。その結果を解析する事で、熱・CO ₂ 排出量の原単位等のインベントリ推計の基礎データを作成し、サブテーマ3に提供する。以上により民生部門を対象とした熱・CO ₂ 排出量インベントリの高精度化に寄与する。
サブテーマ3	数理モデルの開発・インベントリ及び簡易推計ツールの作成
サブテーマリーダー /所属機関	原 政之/埼玉県環境科学国際センター
目標	研究対象領域(首都圏)において、高精度かつ不確実性も考慮した熱・CO ₂ 排出量インベントリを作成する。作成した熱・CO ₂ 排出量インベントリ、サブテーマ2でのモデリングの結果に基づき、入手が容易な統計データのみから熱・CO ₂ 排出量インベントリが作成できる数理統計モデルを開発する。作成した数理統計モデルを利用し、簡易に省エネ等の対策導入の影響を考慮したインベントリを推計可能なツール(簡易インベントリ作成ツール)を作成する。政策担当者を対象としたニーズ調査を行い、その結果を簡易推計ツールの設計に反映させる。研究全体を統括する。

4. 研究開発内容

世界的な都市への人口集中に伴い、都市の気候変動対策はその重要性を増しつつある。その対策の設計に際しては、都市ヒートアイランド現象と地球温暖化の両気候変動の因子としての人工排熱量・炭素排出量(以下、熱・CO₂排出量)の正確な推計が必要である。このため、各サブテーマにおいて、大気モニタリングを通じた熱・CO₂排出量実測データを取得・解析、気象条件と建物空調エネルギー需要の動的関係を模擬可能な独自の都市気象・建物エネルギーモデルの改良・適用および熱・CO₂排出量のモデル計算、熱・CO₂排出量推計のための数理統計モデルの構築および熱・CO₂排出量簡易インベントリ推計ツールの開発を行った。それぞれの内容の詳細について以下に示す。

<サブテーマ1>

都市域におけるCO₂と熱の排出量について、都市ガスや自動車燃料といったエネルギー起源別に排出量を実測するために、東海大学代々木キャンパス(東京都渋谷区富ヶ谷、以下代々木サイトと呼ぶ)に設置した観測システムを用いて、(1)CO₂と熱の総排出量、(2)酸素(O₂)とCO₂濃度、(3)大気中CO₂の放射性炭素同位体比(¹⁴CO₂)、(4)エアロゾル組成、の大気モニタリングを実施した。¹⁴CO₂は化石燃料には含まれないが生物呼吸には含まれること、更にガソリンと天然ガスの燃焼ではO₂が異なる比率で消費されることを利用し、CO₂総排出量を起源ごと(生物呼吸、ガソリン燃焼、天然ガス燃焼)に分離した。また、大気中のエアロゾル組成の観測から、エアロゾルの石炭燃焼・石油系燃料燃焼起源の判別を行い、CO₂排出源との関連を解析した。排熱量については、観測される顕熱輸送量を自然起源の建物表面と道路からの顕熱(太陽からの放射)、人為起源の建物排熱(空調および換気による排出)、人為起源の自動車排熱に分別した。さらに、人為起源の建物排熱は都市ガス起源および電気起源に分別した。このようにして得られた結果を他サブテーマに提供し、サブテーマ2の建物エネルギーモデルおよびサブテーマ3のインベントリの検証に利用した。

<サブテーマ2>

都市気象・建物エネルギーモデルのサブモデルである建物エネルギーモデル(以降BEM)につい

て、空調エネルギー消費量の予測精度を向上させ、ひいては建物起源の排熱とCO₂排出量の予測を高精度化すべく、BEMとその入力パラメータに関する改良を行った。BEM内部での電力と都市ガス等のエネルギー需要量予測値に対し、CO₂排出係数を乗じ、BEMよりCO₂排出量の予測値を出力できるよう当該モデルを改良した。加えて、BEMへの主要な入力パラメータとして、①建物躯体の構造と熱物性、②空調熱負荷成分としての建物内部発熱、③空調システムの熱源機器構成と運転スケジュール、に関連するパラメータを改訂した。①では、国内の住宅（ストック）がそれぞれの時点の省エネルギー基準を充足しているかの内訳について、国土交通省の調査結果を引用し、住宅建築の壁体構造と関連する熱物性値を現実的設定に改めた（表2.1）。その際、後述する代々木地区でのモデル検証のため、同地域における建物の公開写真の画像解析より壁面上での窓面積率を同定し、①の壁体設定へ反映した。②については、東京電力管内の配電用変電所による供給エリア別の電力実需要データより非空調用途の電力消費量を推計し、従来と比べリアルかつ高空間解像度の内部発熱量を設定した。③では、業務系建物の規模（延床面積）に応じて変化する各種熱源機器の導入割合と、外気温に応じた空調スペースの建物内での増減を表現するスケジュールパラメータを、それぞれ改訂した。

以上の改良後のモデルとパラメータを東京の代々木地区に適用し、同地区でサブテーマ1が実施した先進的観測にもとづく起源別の熱・CO₂排出推計量や電力実需要量、更には地表面近傍熱収支に関わる気象観測量とそれらのモデル計算結果との比較を通じ、都市気象・建物エネルギーモデルの検証を行った。この検証を経たモデルによる熱・CO₂排出量の予測値を、サブテーマ3が担当するCO₂・排熱インベントリの都市圏スケールでの機械学習推計ツールの開発に学習データとして活用すべく、より広域でのモデル検証を試みた。都市気象・建物エネルギーモデルを夏季と冬季の東京都市圏に広域適用し、上述の東京電力管内での高解像度電力実需要量分布と地上気温の気象庁観測値の両者の再現性の視点から、モデルを検証した。加えて、モデルを夏季の大阪市域にも適用し、同域での休日に対する平日のエネルギー消費と排熱の増加に伴う気温上昇が冷房需要増をもたらす事で追加的に何%の冷房電力消費増を平日に誘発し得るかを表す「排熱フィードバック感度」に着目した検証も行った。この検証では、大阪で実施された地上気温と電力需要の多地点通年観測の既往研究データより実測ベースの「排熱フィードバック感度」を定量化し、モデルによりシミュレートされた気温・電力需要にもとづく当該感度との比較を行った。これらの検証を通じ、都市気象・建物エネルギーモデルが代々木地区のみならず様々な街区条件下の熱・CO₂排出量に関して高精度な学習データを生成可能である事の確認を試みた。

更に、サブテーマ3の機械学習推計ツールが、将来の気候変動下や温暖化対策の導入想定下での熱・CO₂排出量の予測にも適用可能となるよう、それら気候変動や対策が熱・CO₂排出量に及ぼす影響の学習データも生成すべく、上述の検証を経たモデルを対策効果や気候変動影響の予測計算に適用した。温暖化対策については、①ZEB・ZEHによる建物省エネ、②都市の地表緑化、③非大気熱源空調の採用による空調排熱ゼロ化、④太陽光発電普及、の4つの対策シナリオを夏季と冬季の東京都市圏にあてはめ、都市気象・建物エネルギーモデルにより熱・CO₂排出量への各対策の効果を推計した。加えて、サブテーマ1の大気観測データとの集中的な比較検証を通じ、予測精度面での不確実性が極小化された代々木地区への都市気象・建物エネルギーモデルの適用において、将来気候変動を考慮した数値実験を行った。モデルに入力する大気境界条件に対し、現在気候+1℃（産業革命以降+2℃相当）の気候変動による気温・湿度等への擾乱成分を上乗せし、変更後の境界条件下で都市気象・建物エネルギーモデルを駆動する疑似温暖化手法による数値実験を行った。その結果を解析することで、将来気候変動に伴う熱・CO₂排出量への影響についても推計を行い、当該影響が反映された学習データも生成した。

<サブテーマ3>

建物エネルギーモデルによる結果を解析し得られた原単位等を利用し、建物からの熱・CO₂排出量推計と他部門の既存の推計手法とを組み合わせ、モニタリングとの検証を重ねることによって数

理統計モデルを構築し、高精度な熱・CO₂排出量のインベントリ推計を行った。また、この知見に基づいて簡易に全国で建物省エネ等施策の影響を考慮可能な熱・CO₂排出量インベントリ推計が可能となるツール（簡易インベントリ作成ツール）を作成した。地方自治体の行政担当者を対象としたニーズ聞き取り調査を行い、簡易インベントリ作成ツールの設計に反映させた。また、簡易インベントリ作成ツールについて行政で利活用を進めるため、行政担当者への説明を行い、実際の地方自治体の計画等へ簡易インベントリ作成ツールを記載した。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

本研究では、サブテーマ1で大気モニタリングを通じた起源別の熱・CO₂排出量実測データを取得・解析し、その実測データを用いて、サブテーマ2で気象条件と建物空調エネルギー需要の動的関係を模擬可能な独自の都市気象・建物エネルギーモデルを改良・適用し、熱・CO₂排出量のモデル計算を行い、サブテーマ3で熱・CO₂排出量推計のための数理統計モデルの構築および熱・CO₂排出量簡易インベントリ推計ツールの開発を行った。

サブテーマ1では、まず、O₂濃度観測とCO₂総排出量から、都市ガス消費量と石油消費量の年平均の日内変動を推定することに成功した。観測データから、統計データに基づくCO₂総排出量は特に夜間に観測結果に比べて過大評価となっており、代々木街区の家庭・飲食店のガス消費統計が実態より過大評価になっていることが示唆された(図1.3)。この起源別CO₂排出量の実測データはサブテーマ2および3において、建物エネルギーモデルおよび数理統計モデルを改良するために使用された。放射性炭素同位体比 $\Delta^{14}\text{C}$ 観測から、冬季のCO₂濃度変動の73%が化石燃料起源、27%が生物起源であることがわかった(図1.4)。エアロゾル組成観測から、湾岸域からの石炭燃焼の影響が示唆されたイベントの検出が可能となった(図1.5)。

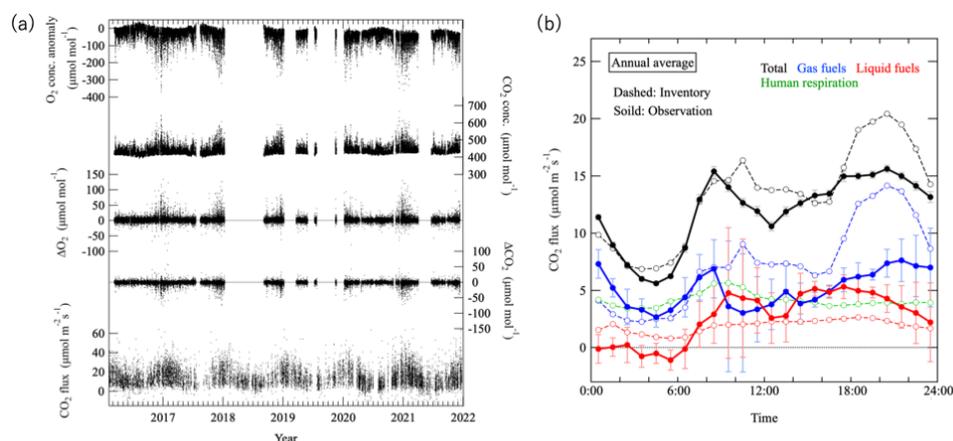


図1.3 (a) (上から順に)代々木サイトの高度52mで観測された大気中O₂およびCO₂濃度、2高度間の濃度差 ΔO_2 および ΔCO_2 (52m-37m)、および渦相関法で観測したCO₂総排出量。(b)大気観測から得られたCO₂総排出量(黒実線)、都市ガス消費量(青実線)、石油消費量(赤実線)および人口統計データから得られた人間呼吸量(緑破線)。比較のため、統計データに基づくガス消費(青破線)と石油消費量(赤破線)も併せて示した。(Ishidoya et al., 2020)

熱排出量観測では、人工排熱を交通起源、都市ガス起源、電気起源に分離評価することに成功し、既存インベントリでは得られていなかった季節ごとの人工排熱量の日変化を得ることができた(図1.6)。これらの実測された都市ガスおよび交通起源の人工排熱はサブテーマ2における建物エネルギーモデルの改良に使用され、既存インベントリよりも現実に即したモデルパラメータの同定が行われた。さら

に、全起源からの総排出量がサブテーマ3の数理統計モデル開発において、モデル精度評価の基準として使用された。このように本課題においては、実測により得られた人工排熱量によって、モデルが現実に即したものとなっている妥当性を担保できている(図1.7)。

新型コロナウイルス感染症(COVID-19)が蔓延し、2020年4月7日から5月25日にかけて第一回緊急事態宣言が発令された。そこで、緊急事態宣言下のCO₂排出量の変化を、代々木サイトで観測されたCO₂フラックスとO₂濃度を用いて起源別に定量化した(図1.8)。2020年4~5月の緊急事態宣言下の代々木街区のCO₂排出量は、例年より20%±3%減少したことが明らかとなり、その主要因は交通量の減少が原因であると考えられた。また、ガス燃焼起源CO₂の微増も観測された。CO₂とCO濃度の相関関係も、CO₂フラックスとO₂濃度観測から得られた結果と整合的であった。このように、我々の地上大気観測は、COVID-19の蔓延に伴う人為CO₂排出の急激な変化を検出することに成功した。解析に用いた観測データは、DOI付きでオープンデータとして一般公開した。

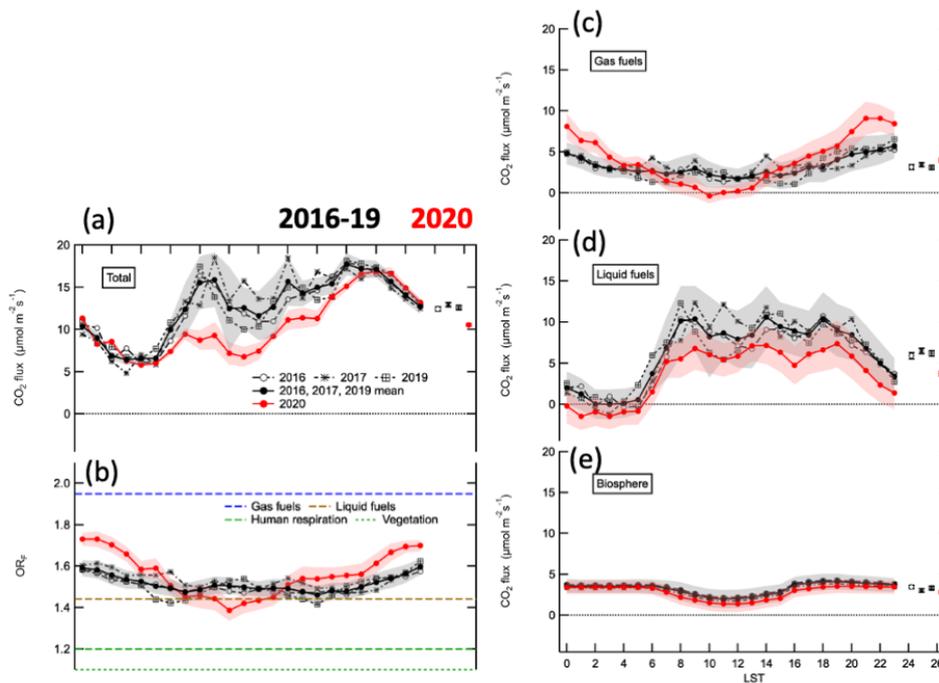


図1.8 代々木サイトで観測された (a) 総CO₂フラックス、(b) OR、(c) ガス燃焼起源CO₂フラックス、(d) 石油燃焼起源CO₂フラックス、(e) 生物起源CO₂フラックスの日変動。黒が2016~2019年4~5月、赤が2020年4~5月を示す。(Sugawara et al. (2021) Fig.3を改変)

次に、サブテーマ2の成果の概要を以下に記す。まず、都市気象・建物エネルギーモデルとその入力パラメータに関する改良の効果を確認すべく、夏季の東京都圏を対象に数値実験を行った。その結果、改良後のモデルとパラメータは、電力実需要量の空間分布を改良前と比べ、より高精度に再現可能であった(図2.2、図2.3)。この改善された精度を有する電力需要表現に応じた人工排熱の変化は、都心事務所街を除く殆どの街区域の地上気温に対して影響を与えない程度に小さく、改良後もモデルによる気温の再現精度は維持された。以上により一連のモデルとパラメータ改良の妥当性を確認できた。

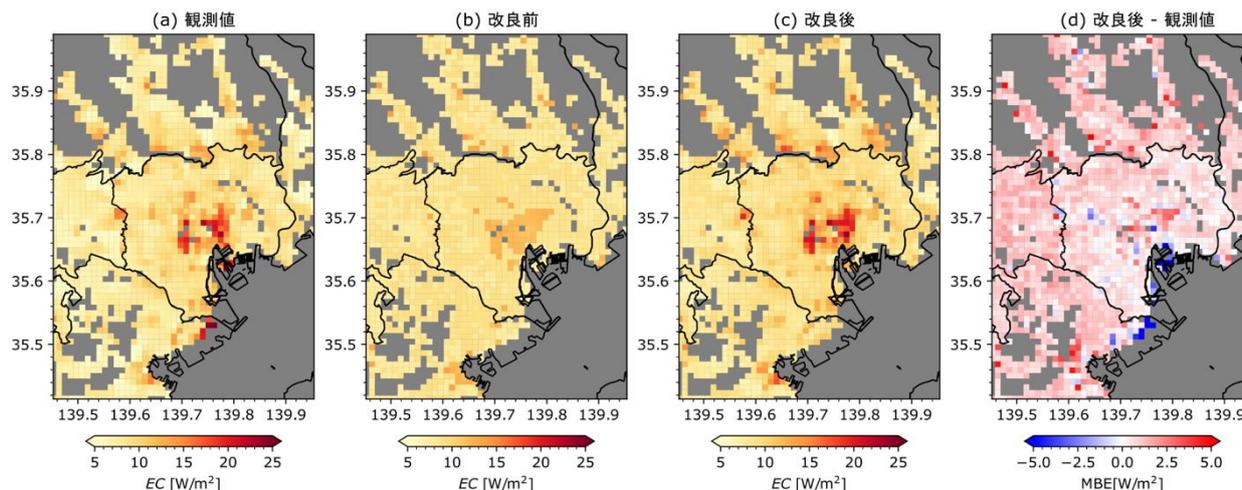


図2.2 2018年7-8月の平均電力需要 (EC) の(a)実測, (b)改良前, (c)改良後, および(d)改良後と実測値の差の分布

更に、改良後のモデルとパラメータを東京の代々木地区に適用し、放射・熱フラックスを要素とする地表面付近熱収支に関するサブテーマ1の観測資料と東京電力より提供された同地区での電力実需要量を検証資料として、夏季・冬季を対象に都市気象・建物エネルギーモデルの検証を行った。その結果、モデルには当該街区域から上空へ輸送される顕熱フラックスを過大評価する傾向が認められるものの、その点を除き熱収支の再現性は良好であり（図2.4）、その精度は世界で最もよく用いられている都市キャノピー大気層を対象とした類似気象モデルと遜色ない事を確認できた。加えて、電力需要についても良好な再現性が確認された（図2.4）。更に、モデルにより算出された夏季代々木地区での建物冷房排熱量について、サブテーマ1での各種観測にもとづき推計された当該排熱量との比較を行った結果、両者の排熱水準とその時間変化の傾向は概ね一致した（図1.7）。以上の代々木地区での検証を経たモデルを東京都市圏に適用した夏季の広域検証の結果、地上気温の予測誤差は 2°C 前後に収まり（図2.5）、他の都市気象モデルと遜色ない精度が確認される一方、電力需要量については域内の各 1km^2 格子にて10%~20%程度の再現精度が解析された。この精度は都市気象モデルを電力需要予測に適用した場合の精度としては先行研究を上回るものであった。一方、冬季の広域検証では、地上気温について最大 3°C 弱に達する予測誤差が認められ（図2.8）、電力需要については事務所街での昼間の暖房電力需要の過少予測が示されたものの、住宅街では夏季と同程度の良好な電力需要の再現性が確認できた（図2.9）。以上、冬季における一部の問題点を除き、東京都市圏スケールでの気温と電力需要の広域再現性が概ね検証されたモデルを更に夏季の大阪市域に適用し、排熱フィードバック感度の視点からも検証を重ねた。その結果、都市気象・建物エネルギーモデルは、観測ベースで約1割に達する排熱フィードバックによる冷房電力消費の押し上げ効果を定量的に再現可能であった。更に排熱フィードバックは夏季地上気温の昇温に対し1割~2割程度の自己強化をもたらす事がモデル計算より示された。これにより、都市気候学の古典的課題の一つとされてきた排熱フィードバック効果に関わる重要な知見が得られた。以上、代々木地区での街区スケールから東京と大阪の都市圏スケールに渡る多様な街区構造下にて、地上気象と民生部門の熱・ CO_2 排出量を左右する建物空調排熱や広域電力需要分布のモデルによる再現性が検証できた。

最後に、以上の総合的検証を経た都市気象・建物エネルギーモデルを4つの温暖化対策シナリオとともに東京都市圏に適用し、夏季と冬季の対策効果を解析した（表2.2、表2.3）。対象とした対策中、代表的ヒートアイランド対策である地表緑化と空調排熱ゼロ化の両ケースでは、整合的に他対策に比しやや大きな夏季の気温低減効果（最大 0.2°C 程度の低減）が予測された。しかし、それらの気温変化が建物冷房エネルギー需要を減少させる事で副次的にもたらされる CO_2 排出に対する削減効果は1%程度にと

どまるものであった。また、エアコン等のヒートポンプ暖房に伴う負の排熱（大気からの採熱）とボイラー等の燃焼系の正の排熱（大気への放熱）から成る暖房排熱の両者をゼロ化する冬季の空調排熱ゼロ化では、前者の削減量が後者を上回り、排熱量がやや増加する結果、0.2℃程度の冬季の気温上昇と1%程度の民生部門のCO₂排出減が模擬された。一方、省エネ策としての建物省エネケースでは、住宅街で20%（夏）～30%（冬）、事務所街で30%（冬）～40%強（夏）のZEB・ZEHの定義に概ね整合した省エネとCO₂排出削減の効果が予測され、それに伴う排熱の増減への応答として概ね0.1℃未満にとどまる気温変化も模擬された。加えて、太陽光発電普及ケースでは、運用時（発電時点）のCO₂排出をゼロとみなし、電力需要の充足量に応じ系統電力由来のCO₂排出が日単位で格子毎に削減される計算を行った。その結果、CO₂排出削減でみて大きな効果が認められ、住宅街区では夏季に50%超に達する建物省エネケースと比較しても大きな効果が予測された一方で、電力需要充足率が低下する事務所街では建物省エネケースを下回る20%～30%のCO₂削減が模擬された。この太陽光発電ケースでは、建物屋根面上にて太陽電池パネルの放射・熱収支も模擬した結果、地上気温に対する影響はネグリジブルであった。なお、CO₂排出削減に対する建物省エネと太陽光発電の両効果の合計は夏季に80%程度に達し、民生部門でのカーボンニュートラル実現の可能性も示唆された。更に代々木地区を対象に産業革命以降+2℃（現在気候+1℃）相当の気候変動を加味した疑似温暖化手法による数値実験を行った。その結果（図2.13）、モデルは夏季・冬季ともに1℃の気温上昇と共に、上述した東京都市圏での広域検証で算出された電力需要の気温感応度（図2.7と図2.10中の $\Delta EC/\Delta T$ ）に整合した電力需要増減と排熱変化（夏季の増加と冬季の減少）をシミュレートした。以上、都市気象・建物エネルギーモデルは、主な温暖化対策と将来気候変動がもたらす気温と熱・CO₂排出量への影響に関しても、概ね合理的な予測結果を出力可能である事が示された。

表2.2 各対策ケースによる夏季の気温・人工排熱量・CO₂排出量への影響。括弧内は標準偏差。

対策ケース	建物用途	気温変化量(℃)	人工排熱変化量(W/m ²)	CO ₂ 排出変化率(%)
建物省エネ	事務所	-0.06 (0.02)	-14.53 (6.77)	-44.34 (3.85)
	集合住宅	-0.07 (0.02)	-3.43 (1.33)	-24.79 (1.30)
	戸建住宅	-0.04 (0.01)	-2.08 (0.69)	-24.81 (1.16)
緑化	事務所	-0.11 (0.04)	-0.11 (0.26)	-0.36 (0.34)
	集合住宅	-0.17 (0.04)	-0.58 (0.21)	-0.94 (0.36)
	戸建住宅	-0.20 (0.04)	-0.42 (0.17)	-0.90 (0.31)
空調排熱ゼロ	事務所	-0.16 (0.06)	-52.80 (18.90)	-1.05 (0.45)
	集合住宅	-0.10 (0.03)	-21.49 (6.08)	-0.55 (0.18)
	戸建住宅	-0.07 (0.02)	-11.78 (3.31)	-0.42 (0.16)
太陽光発電	事務所	-0.01 (0.00)	-0.23 (0.16)	-28.65 (8.00)
	集合住宅	-0.05 (0.02)	-0.51 (0.21)	-52.46 (9.42)
	戸建住宅	-0.03 (0.01)	-0.24 (0.10)	-55.38 (6.83)

表2.3 各対策ケースによる冬季の気温・人工排熱量・CO₂排出量への影響。括弧内は標準偏差。

対策ケース	建物用途	気温変化量(°C)	人工排熱量変化量(W/m ²)	CO ₂ 排出変化率(%)
建物省エネ	事務所	-0.01 (0.03)	-0.96 (1.24)	-30.95 (5.54)
	集合住宅	-0.02 (0.06)	5.28 (1.53)	-29.01 (2.23)
	戸建住宅	0.11 (0.07)	2.53 (0.77)	-29.30 (1.43)
緑化	事務所	-0.12 (0.01)	-0.01 (0.14)	0.42 (0.27)
	集合住宅	-0.15 (0.02)	-0.10 (0.03)	0.72 (0.19)
	戸建住宅	-0.18 (0.03)	-0.04 (0.02)	1.00 (0.19)
空調排熱ゼロ	事務所	0.16 (0.04)	8.71 (4.66)	-0.83 (0.43)
	集合住宅	0.17 (0.03)	8.94 (2.83)	-0.86 (0.23)
	戸建住宅	0.19 (0.04)	5.47 (1.44)	-1.07 (0.29)
太陽光発電	事務所	-0.03 (0.01)	-0.03 (0.12)	-21.27 (7.37)
	集合住宅	-0.01 (0.01)	-0.06 (0.03)	-18.76 (3.21)
	戸建住宅	-0.02 (0.01)	-0.09 (0.03)	-19.85 (1.97)

以上、従来は表現不能であった建物熱収支や日々の気象変化と将来の気候変動、および排熱フィードバックの一連の効果と各種温暖化対策導入の影響までが加味された高精度な熱・CO₂排出量学習データをモデルより生成し、サブテーマ3のCO₂・排熱インベントリの機械学習向けに提供できた。これらの成果をもって、サブテーマ2では研究目標を達成すると共に、都市気候学分野の古典的課題である排熱フィードバック効果の定量化をも成し得た点で、当初目標を上回る成果を挙げる事ができた。

以上により、排出源毎の熱・CO₂排出量を大気モニタリングに基づき推計する手法を開発し、実測ベースで得られた熱・CO₂排出量を活用し、都市での気象と建物エネルギー収支の独自数値モデルを改良・適用する事で得られる熱・CO₂排出量の予測精度を検証した。また検証後のモデル計算に土地利用・建物用途や人口等の容易に入手可能な情報を組合せ、統一的な手法で国や地方自治体が都市スケールの熱・CO₂排出量を推計できる手法を開発した。これらに基づいて、施策の影響まで簡易に評価することが可能な簡易インベントリ作成ツールを作成した。

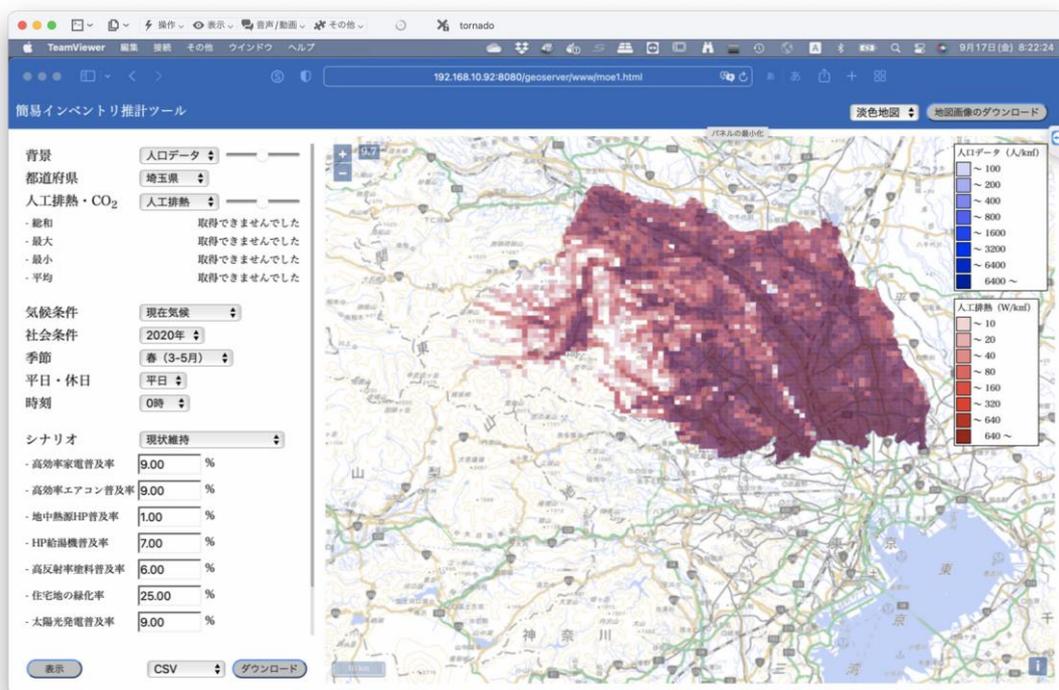


図2.3 簡易インベントリ作成ツール実行例

簡易インベントリ作成ツールについては、令和3年に策定された県全体の上位計画である埼玉県DXビジョンロードマップ (<https://www.pref.saitama.lg.jp/a0104/ai/dxvisionroadmap.html>) への県内での今後の展開についての計画が記され、埼玉県環境部温暖化対策課およびエネルギー環境課において今後利活用される方向で検討されている。以上のように、地方自治体における政策立案に利活用することができた。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

埼玉県庁の環境部長・副部長に対して簡易インベントリ作成ツールに関して説明を行った。また埼玉県庁内の担当部署（温暖化対策課、エネルギー環境課）において、簡易インベントリ作成ツールに関して紹介し行政施策への展開についてヒアリングを行った。これらの結果、令和3年に策定された県全体の上位計画である埼玉県DXビジョンロードマップ

(<https://www.pref.saitama.lg.jp/a0104/ai/dxvisionroadmap.html>) への簡易インベントリ作成ツールの県内での今後の展開についての計画が記された（ビジョンロードマップp.104に記載）。埼玉県DXビジョン・ロードマップについては、令和3年12月埼玉県議会地方創生・行財政改革特別委員会にて、令和4年1月5日に記者発表されている。

また、埼玉県環境科学国際センターが令和3年度に発行した研究シーズを取り纏めた冊子である埼玉県環境科学国際センターシーズ集第3版に簡易インベントリ作成ツールの紹介を掲載した。このシーズ集については、令和4年1月21日に公開、記者発表が行われた。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

上記の埼玉県DXビジョンロードマップにおいて、今後簡易インベントリ作成ツール利活用について記載しており、R4に県庁内、R5に県内市町村向けに説明会などツールの普及を行うことを予定している。また、埼玉県庁内の担当部署（温暖化対策課、エネルギー環境課）において、簡易インベントリ作成ツールの利活用結果やツールの拡張を検討している。具体的には、埼玉県環境部エネルギー環境課においては運輸分野の熱・CO₂排出量の推計を可能にする拡張の検討、埼玉県環境部温暖化対策課においては、温暖化対策実行計画（区域施策編）改定に際しての簡易インベントリ作成ツールの利活用を検討している。

また、COVID-19の蔓延に伴う社会活動制限によるCO₂排出量の減少を捉えた代々木の大气観測データ（CO₂フラックス、O₂、CO₂、CO）5件をいち早くオープンデータとして公開した。このデータは、人間活動の変化がCO₂排出量に与える影響を直接観測した貴重な例として、今後広い分野で活用されることが期待される。

5-3. 研究目標の達成状況

課題全体としては、大気モニタリングデータや電力実消費量データで検証した建物エネルギーモデルを用いて、民生部門の熱・CO₂排出量インベントリの高精度化を行い、国や地方自治体における環境政策の計画策定等に資することができる炭素排出量・人工排熱量を推定するための手法を確立することを最終目的としていたが、サブテーマごとの達成状況を以下に挙げたとおり、当初の課題目標で想定した以上の成果を挙げる事ができた。

<サブテーマ1>

当初目標に掲げていた、世界で初めての試みとなるCO₂と熱輸送量、¹⁴CO₂、O₂とCO₂濃度、そしてエア

ロゾル組成の同時観測を都市域(東京都渋谷区の代々木サイト)で行い、排出起源毎の熱・CO₂排出量の定量化を行った。また、サブテーマ2、3へのデータ提供も行い建物エネルギーモデルや排出インベントリ推計ツールの検証に貢献した。これらに加えて、COVID-19緊急事態宣言下におけるCO₂排出量減少を大気観測から排出源別に評価し、観測データをオープンデータとして公開した点で、当初目標を上回る成果を挙げる事ができた。

<サブテーマ2>

当初目標に掲げていた、都市気象・建物エネルギーモデルの改良と検証を行い、東京や大阪等の国内主要都市域に適用し、その省エネ等の対策導入の影響を加味した数値実験を行った。また、その結果を解析し、現況気候下のみならず将来気候下での熱・CO₂排出のインベントリ推計の基礎データを作成し、サブテーマ3に提供しインベントリ推計の高精度化に寄与した。これらに加えて都市気候学分野の古典的課題である排熱フィードバック効果の定量化をも成し得た点で、当初目標を上回る成果を挙げる事ができた。

<サブテーマ3>

当初目標に掲げていた、研究対象領域における、熱・CO₂排出量インベントリを作成した。また、作成した熱・CO₂排出量インベントリ、サブテーマ2でのモデリングの結果に基づき、入手が容易な統計データのみから熱・CO₂排出量インベントリが作成できる数理統計モデルを開発した。作成した数理統計モデルを利用し、簡易インベントリ作成ツールを作成し、政策担当者を対象としたニーズ調査を行い、その結果を簡易インベントリ作成ツールの設計に反映させた。また、簡易インベントリ作成ツールを地方自治体の計画・施策立案に利活用した。以上により、当初想定通りの目標を達成した。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

10件

<主な査読付き論文>

- 1) N. KANEYASU, S. ISHIDOYA, Y. TERA0, Y. MIZUNO and H. SUGAWARA: ACS Earth and Space Chem., 4 (2), 297-304, doi: 10.1021/acsearthspacechem.9b00314 (2020) (IF: 3.475), Estimation of PM2.5 emission sources in Tokyo Metropolitan area by simultaneous measurements of particle elements and oxidative ratio in air.
- 2) S. ISHIDOYA, H. SUGAWARA, Y. TERA0, N. KANEYASU, N. AOKI, K. TSUBOI and H. KONDO: Atmos. Chem. Phys., 20 (9), 5293-5308, doi:10.5194/acp-20-5293-2020 (2020) (IF: 6.133), O₂:CO₂ exchange ratio for net turbulent flux observed in an urban area of Tokyo, Japan, and its application to an evaluation of anthropogenic CO₂ emissions.
- 3) H. SUGAWARA, S. ISHIDOYA, Y. TERA0, Y. TAKANE, Y. KIKEGAWA and K. NAKAJIMA: Geophysical Research Letters, 48, e2021GL092600. doi:10.1029/2021GL092600 (2021) (IF: 4.720), Anthropogenic CO₂ emissions changes in an urban area of Tokyo, Japan, due to the COVID-19 pandemic: A case study during the state of emergency in April-May 2020.
- 4) 寺尾有希夫, 石戸谷重之: 大気化学研究, 45(045A01) (2021), 大都市における温室効果ガスと関連物質の大気観測.
- 5) Y. TAKANE, Y. OHASHI, C. S. B. GRIMMOND, M. HARA, and Y. KIKEGAWA: Environmental

Research Communications, 2, 015004 (2020), (IF:2.104), DOI: [10.1088/2515-7620/ab6933](https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab6933), Asian megacity heat stress under future climate scenarios: Impact of air-conditioning feedback.

- 6) 高根雄也、伊藤享洋：天気, 68, 149-163 (2021), DOI: [10.24761/tenki.68.3_149](https://doi.org/10.24761/tenki.68.3_149), なぜ浜松で歴代最高気温41.1°Cが観測されたか？-実況と過去の高温事例との比較による考察-
- 7) K. NAKAJIMA, Y. TAKANE, Y. KIKEGAWA, Y. FURUTA, and H. TAKAMATSU: Urban Climate, 35, 100728 (2021), (IF:5.731), DOI: [10.1016/j.uclim.2020.100728](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100728), Human behavior change and its impact on urban climate: Restrictions with the G20 Osaka Summit and COVID-19 outbreak.
- 8) Y. KIKEGAWA, K. NAKAJIMA, Y. TAKANE, Y. OHASHI, T. IHARA: Applied Energy, 307, 118227 (2022), (IF:9.746), DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.118227](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118227), A quantification of classic but unquantified positive feedback effects in the urban-building-energy-climate system.
- 9) K. NAKAJIMA, Y. TAKANE, S. FUKUBA, K. YAMAGUCHI, and Y. KIKEGAWA: Energy and Buildings, 256, 111729 (2022), (IF:5.879), DOI: [10.1016/j.enbuild.2021.111729](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111729), Urban electricity-temperature relationships in the Tokyo Metropolitan Area.
- 10) Y. HIRANO, T. IHARA, M. HARA and K. HONJO: Sustainability, 12(11), 4678 (2020) (IF: 2.592), DOI: [10.3390/su12114678](https://doi.org/10.3390/su12114678), Estimation of direct and indirect household CO2 emissions in 49 Japanese cities with consideration of regional conditions

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	4件
口頭発表（学会等）	22件
「国民との科学・技術対話」の実施	16件
マスコミ等への公表・報道等	9件
本研究に関連する受賞	1件

7. 国際共同研究等の状況

本研究については、口頭発表記載の通り、AGU Fall Meeting 2019における2件発表を含め、国際学会において7件の発表を行い、関係者との共有と意見交換を行っている。また、人工排熱推計を専門としているアリゾナ州立大学都市気候研究センター長であるDavid Sailor教授と意見交換を随時オンラインで行っている。また、令和2年度においては、先述のDavid Sailor教授、他1名の都市気候研究者を招へい予定であったが、新型コロナウイルス感染症パンデミックに伴い、世界的な状況を勘案し見合わ

せた。

8. 研究者略歴

研究代表者：原 政之

筑波大学大学院生命環境科学研究科修士課程修了、博士（理学）、海洋研究開発機構 技術研究員、現在、埼玉県環境科学国際センター 温暖化対策担当 専門研究員

研究分担者：

1) 寺尾 有希夫

筑波大学大学院博士課程地球科学研究科修了、博士（理学）、ハーバード大学工学応用科学部
ポストドクトラルフェロー、現在、国立環境研究所地球環境システム領域 主任研究員

2) 石戸谷 重之

東北大学大学院 理学研究科 地球物理学専攻 博士課程後期修了、博士（理学）、東北大学大
学院 理学研究科 COEフェロー、現在、産業技術総合研究所 環境創生研究部門 研究グループ
長

3) 兼保 直樹

北海道大学大学院 工学研究科 修士課程修了、博士（工学）、資源環境技術総合研究所 研究
官、現在 産業技術総合研究所 環境創生研究部門 研究グループ付

4) 亀卦川 幸浩

東北大学大学院 理学研究科修了、博士（工学）、みずほ情報総研 主事研究員、現在、明星大
学 理工学部教授

5) 高根 雄也

筑波大学大学院生命環境科学研究科修了、博士（理学）、現在 国立研究開発法人産業技術総
合研究所 主任研究員

6) 中島 虹

首都大学東京都市環境科学研究科修了、博士（理学）、現在国立研究開発法人産業技術総合
研究所 産総研特別研究員

7) 井原 智彦

東京大学大学院 工学系研究科 地球システム工学専攻修了、博士（工学）、東京大学大学院
新領域創成科学研究科 准教授

8) Du Jiaoman

法政大学大学院 理工学研究科 応用情報工学専攻修了、博士（工学）、現在、東京大学大学院
新領域創成科学研究科 特任研究員

II. 成果の詳細

II-1 大気モニタリングによる起源別のCO₂・熱排出量推定

国立研究開発法人国立環境研究所 地球システム領域 炭素循環研究室 寺尾 有希夫
 国立研究開発法人産業技術総合研究所 環境創生研究部門 石戸谷 重之・兼保 直樹
 <研究協力者> 防衛大学校 地球海洋学科 菅原 広史

[要旨]

東京都渋谷区の代々木サイトにおいて、熱とCO₂の総排出量、放射性炭素同位体比 (¹⁴CO₂)、酸素濃度 (O₂)、エアロゾル組成等の大気モニタリングと建物表面温度の計測を実施し、排出起源毎のCO₂・熱排出量を推定した。CO₂排出量については、総排出量とO₂観測から、統計データに基づくCO₂総排出量は特に夜間に観測結果に比べて過大評価となっていること、夜間の都市ガス消費量の統計データは観測に基づく推定値に比べて大幅に過大評価となっていること、石油消費量の統計データと観測に基づく推定値の乖離は都市ガスの場合に比して小さいこと、が明らかとなった。また、¹⁴CO₂観測から、化石燃料起源CO₂と生物起源CO₂の比率には季節変化があること、冬季のCO₂濃度変動の73%が化石燃料起源で27%が生物起源（植物呼吸と人間呼吸）であること、がわかった。エアロゾル組成観測からは、石炭燃焼イベントの検出に成功した。熱排出量については、人工排熱を電気起源、交通起源、都市ガス起源、建物起源に分離して評価することに成功し、既存インベントリでは得られていなかった季節ごとの人工排熱量の日変化を得た。また、我々の地上大気観測は、新型コロナウイルス感染症の蔓延に伴う人為CO₂排出の急激な変化を検出することに成功した。2020年4～5月の緊急事態宣言下の代々木街区のCO₂排出量は例年より20%±3%減少し、その主要因は石油燃焼起源CO₂の減少（交通量の減少）であることが明らかになった。

本サブテーマ1では大気モニタリングから起源別CO₂・熱排出量の1時間値を導出し、得られた値はサブテーマ2で開発された都市気象・建物エネルギーモデルとサブテーマ3で開発された排出インベントリの検証に使用された。O₂を用いたCO₂排出量の起源別推定、エアロゾル組成観測結果、緊急事態宣言下の代々木街区のCO₂排出量減少について、それぞれ国際誌で誌上発表を行った。また、観測データ5件をDOI付きで一般公開した。以上から、研究目標を十分達成したと考える。

1. 研究開発目的

本推進費課題は、都市での気象と建物エネルギー収支の数値モデルで得られる熱・CO₂排出量と、土地利用・建物用途や人口等の容易に入手可能なインベントリ情報を組合せ、国や地方自治体が都市スケールの熱・CO₂排出量を推計できる簡易で高精度な推計ツールの構築を目的とする。数値モデルと排出インベントリを用いた熱・CO₂排出量の高精度化には、実測データと比較・検証して確からしさを示す必要があるが、検証に利用できる熱・CO₂排出量の実測データの取得はこれまで困難であった。

そこで、本サブテーマ1は、これまでにない先端的で高度な大気モニタリングを実施し、サブテーマ2で開発される都市気象・建物エネルギーモデルの検証とサブテーマ3で開発される簡易・高精度推計ツールの検証に資する実測データを提供することを目的として設定された。これまで熱とCO₂の総排出量の観測例はあったものの、数値モデルや排出インベントリの検証を行う際には排出源毎の熱・CO₂排出量の情報が必要である。そこで、本サブテーマでは、熱とCO₂の総排出量の観測と同時に放射性炭素同位体比 (¹⁴CO₂)、酸素濃度 (O₂)、エアロゾル組成、建物表面温度等の計測を実施し、排出起源毎の熱・CO₂排出量を推定することを目的とする。

2. 研究目標

世界で初めての試みとなるCO₂と熱輸送量、¹⁴CO₂、O₂とCO₂濃度、そしてエアロゾル組成の同時観測を都市域(東京都渋谷区の代々木サイト)で行い、排出起源毎の熱・CO₂排出量の定量化を行う。これまでに実測データが無かった夏季と冬季の起源別CO₂・熱排出量の1時間値を他サブテーマに提供し、サブテーマ2で開発される都市気象・建物エネルギーモデルの検証に利用し、ひいてはサブテーマ3で開発される排出インベントリの検証に貢献する。

3. 研究開発内容

本研究では、都市域におけるCO₂と熱の排出量について、都市ガスや自動車燃料といったエネルギー起源別に排出量を実測するために、東海大学代々木キャンパス(東京都渋谷区富ヶ谷、以下代々木サイトと呼ぶ)に設置した観測システムを用いて、(1) CO₂と熱の総排出量、(2) 酸素(O₂)とCO₂濃度、(3) 大気中CO₂の放射性炭素同位体比(¹⁴CO₂)、(4) エアロゾル組成、の大気モニタリングを実施した(図1.1)。¹⁴CO₂は化石燃料には含まれないが生物呼吸には含まれること、更にガソリンと天然ガスの燃焼ではO₂が異なる比率で消費されることを利用し、CO₂総排出量を起源ごと(生物呼吸、ガソリン燃焼、天然ガス燃焼)に分離した。また、大気中のエアロゾル組成の観測から、エアロゾルの石炭燃焼・石油系燃料燃焼起源の判別を行い、CO₂排出源との関連を解析した。このように、CO₂と熱のフラックス、¹⁴CO₂、O₂とCO₂濃度、そしてエアロゾル組成観測を同時に行い解析する研究は世界で初めての試みである。

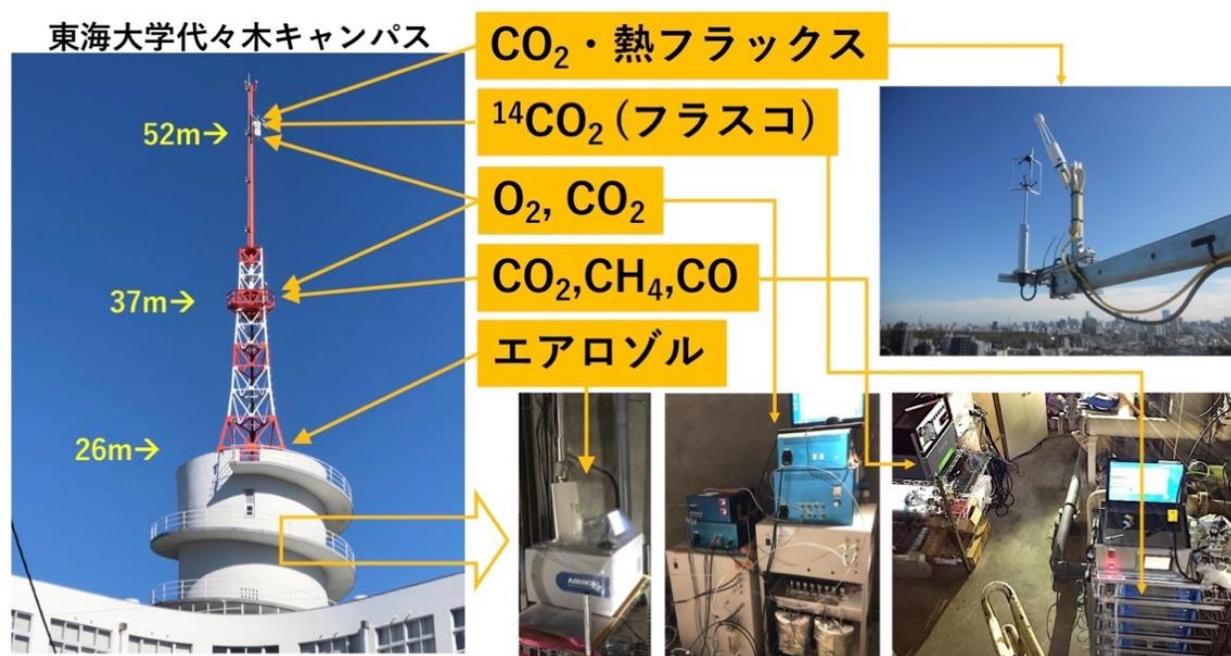


図1.1 代々木サイトにおける大気モニタリング装置

3.1 CO₂と熱の総輸送量

CO₂と熱(顕熱、潜熱)の総輸送量の観測には渦相関法を用いた。渦相関法は乱流による大気の動きと濃度・温度変動を同時に計測しその相関を計算することで、鉛直方向の輸送量を求める方法である。物質や熱の種類によらずセンサ高度を通過した総輸送量を直接測定することができる。この手法では鉄塔自体や直近の建物による風の乱れが誤差要因となるため、測定機材はそれらの影響を受けにくい鉄塔上端に設置した。測定機材は超音波風速計(Gill WindmasterPro)およびCO₂・H₂O濃度変動計(Licor LI7500)である。0.1秒ごとの計測値に対して地形性上昇流の補正、密度変動の補正、横風による温度誤差等の補正を行ない、30分ごとの総輸送量を求めた。得られた輸送量は渦相関法の前提条件となる定

常性や乱流変動特性についての品質検査を行い、解析に耐えうるデータのみを抽出した。また、温湿度計および正味放射計（上下および短長波放射量を測定）による計測も鉄塔上端で行い、輸送量の解析およびサブグループ2でのモデル検証に使用した。

3.2 大気中O₂およびCO₂濃度

大気中O₂およびCO₂濃度の観測には、磁気式酸素計および非分散型赤外分析計を検出器として採用した連続観測装置を用いた¹⁾。O₂およびCO₂濃度の測定精度は、標準ガス分析における分析計出力の2分移動平均値の標準偏差としてそれぞれ約 1 ppmおよび0.06 ppmである。本観測では、傾度法によりCO₂総排出量と濃度の高度勾配を関係付けることで、CO₂総排出量におけるO₂:CO₂交換比 (Oxidative Ratio; OR = $-\Delta O_2 \Delta CO_2^{-1}$ (molmol⁻¹)) を導出し、CO₂総排出量を起源ごとに案分することを目指す。そのため大気試料を鉄塔上の高度52mと37mの取入口から10分毎に交互に分析計に導入し、時間内挿した値を用いてO₂およびCO₂濃度の2高度間濃度差 (ΔO_2 および ΔCO_2) を計算した。傾度法でのO₂およびCO₂の総排出量 (F_OおよびF_C) とそのOR (OR_F) および乱流拡散係数 (K) の関係は以下の通りである。

$$F_O = -K \Delta O_2 \Delta z^{-1} \quad (1-1)$$

$$F_C = -K \Delta CO_2 \Delta z^{-1} \quad (1-2)$$

$$OR_F = -F_O F_C^{-1} = -\Delta O_2 \Delta CO_2^{-1} \quad (1-3)$$

また、都市ガス消費、石油消費および人間呼吸によるOR値としてそれぞれOR_G = 1.95、OR_L = 1.44およびOR_R = 1.2を採用し (OR_GおよびOR_L値はKeeling (1988)²⁾より、OR_R値は糖質・脂質・蛋白質の呼吸商の逆数の平均として推定)、CO₂総排出量に占める都市ガス消費、石油消費および人間呼吸量をそれぞれF_G、F_LおよびF_Rとした場合、代々木街区では石炭消費と植物活動の寄与が無視できると仮定すると (CO₂総排出量のフットプリント内に石炭工場はなく、植生面積は夏季および冬季にそれぞれ9および2%と極めて小さい)、F_OとF_Cについて以下の収支式が成り立つ。

$$F_O = -(OR_G F_G + OR_L F_L + OR_R F_R) \quad (1-4)$$

$$F_C = F_G + F_L + F_R \quad (1-5)$$

従って、式(1-3)、(1-4)および(1-5)を組み合わせると解析し、人間呼吸量F_Rを人口統計データや¹⁴C観測から推定して与えることにより、未知量であるF_GとF_Lを分離して見積もることが可能となる。

3.3 大気中¹⁴C

大気CO₂中の放射性炭素同位体 (¹⁴C) の観測データは、国立環境研究所が受託した環境省委託業務 (平成31年度GOSATシリーズを用いた温室効果ガス排出量把握精度改善に関する技術開発委託業務、等) で実施したものを主に使用した。¹⁴C分析のための大気試料を専用の2.5 Lガラスフラスコに採取し、小型炭素用加速器質量分析計NIES-CAMSを用いて¹⁴C量を分析した。放射性炭素同位体比 $\Delta^{14}C$ は、放射壊変を考慮した測定試料と標準試料の¹⁴C/¹²Cの比 $\delta^{14}C$ に、同位体分別効果を考慮した $\Delta^{14}C = \delta^{14}C - 2(\delta^{13}C + 25)(1 + \delta^{14}C/1000)$ で定義される。

観測されたCO₂濃度とその $\Delta^{14}C$ 値を用いて、化石燃料燃焼起源CO₂量を以下で推定することができる。大気二酸化炭素の収支は

$$CO_2^{obs} = CO_2^{bg} + CO_2^{bio} + CO_2^{ff} + CO_2^{ocn} \quad (1-6)$$

$$CO_2^{obs} \Delta^{14}C^{obs} = CO_2^{bg} \Delta^{14}C^{bg} + CO_2^{bio} \Delta^{14}C^{bio} + CO_2^{ff} \Delta^{14}C^{ff} + CO_2^{ocn} \Delta^{14}C^{ocn} \quad (1-7)$$

ここで、上付き文字 obs, bg, bio, ff, ocn はそれぞれ観測した値、大気のパックグラウンド、陸域生物圏、化石燃料燃焼、海洋を表す。 $\Delta^{14}C^{ff}$ は定義から-1000‰である (¹⁴C量はゼロ)。また、 $\Delta^{14}C^{bio}$ は主に植物呼吸によるもので大気のパックグラウンド値に近いと仮定し ($\Delta^{14}C^{bio} = \Delta^{14}C^{bg}$)、また近年は海洋と大気との $\Delta^{14}C$ の差は無視できるほど小さい ($\Delta^{14}C^{ocn} = \Delta^{14}C^{bg}$) ことを考慮すると、化石燃料起源CO₂量 (CO₂^{ff}) は³⁾

$$CO_2^{ff} = CO_2^{obs} (\Delta^{14}C^{bg} - \Delta^{14}C^{obs}) / (\Delta^{14}C^{bg} + 1000) \quad (1-8)$$

$\Delta^{14}C^{bg}$ は、国立環境研究所地上モニタリングステーション波照間 (沖縄県竹富町) で観測されたバックグラウンド大気中の $\Delta^{14}C$ データから推定した。

3.4 エアロゾル組成

ORによる燃焼発生源推定では、代々木が都心部にあることから石炭燃焼の影響は考慮から外したが、東京湾岸に立地する火力発電所および製鉄所における石炭燃焼からの気塊が代々木に及ぼす影響をモニタリングする必要がある。そのために、PM_{2.5}中の元素組成とORの測定を同時に行い、石炭燃焼がどの程度検出可能かを確認した。代々木サイトの屋上（地上29m）からアルミパイプを通して16.7L min⁻¹の流量で大気を吸引し、蛍光X線（XRF）分析とβ線吸収法によるPM_{2.5}測定器（堀場製作所 PX-375）を用いて、4時間平均での金属成分濃度とPM_{2.5}濃度を連続的に測定した。XRF分析から得られた金属成分濃度値は、Inductively-Coupled Plasm（ICP）質量分析計を用いて検証を行った。本研究ではXRF分析で得られたFe, Cu, Cr, Ni, Pb, Znの6元素の濃度データを補正無しで使用した。

3.5 人工排熱量

人工排熱量について、以下の手法で検討を行った。観測される顕熱輸送量（Hobs、Wm⁻²）は

$$\text{Hobs} = \text{Hnat_building} + \text{Hanp_building} + \text{Hanp_car} \quad (1-9)$$

ここで、Hnat_buildingは自然（太陽からの放射）起源（nat）の建物表面と道路からの顕熱、Hanp_buildingは人為起源（anp）の建物排熱（空調および換気による排出）、Hanp_carは人為起源の自動車排熱である。室内において人体が発した熱は人口密度から推定すると0.4 Wm⁻²程度であり、他の項目と比べるとかなり小さいため無視した。Hanp_buildingは都市ガス起源および電気起源に分別される。

$$\text{Hanp_building} = \text{Hanp_gas} + \text{Hanp_elec} \quad (1-10)$$

ここで、Hanp_gas、Hanp_elec、Hanp_carを評価するために、以下の手法を提案し計算を行った。

まず、Hnat_building を地表面熱収支モデルにより求める。建物および道路表面での熱収支は、

$$(1-\alpha) S + L = \text{Hnat_building} + \ell E + G + \sigma T_s^4 \quad (1-11)$$

と書ける。αは日射反射率、Sは短波放射量、Lは長波放射量、σT_s⁴は表面からの長波放射でσはステファンボルツマン定数、T_sは表面温度である。式中の顕熱Hnat_buildingおよび潜熱ℓE（ℓは単位質量あたりの水の蒸発潜熱、Eは蒸発量）をバルク法によりパラメタリゼーションする。

$$\text{Hnat_building} = c \rho C_H U (T_s - T_a) \quad (1-12)$$

$$\ell E = \ell \rho \beta C_H U (Q_{\text{sat}}(T_s) - Q_a) \quad (1-13)$$

cρは空気の熱容量、C_Hはバルク輸送係数、Uは風速、T_aは気温、ρは空気密度、βは蒸発効率、Q_{sat}(T_s)は温度T_sにおける飽和比湿、Q_aは空気の比湿である。また地中伝導熱Gには周期パラメタリゼーションを用いて

$$G = \sum A_i (\omega c_g \rho_g \lambda_g)^{1/2} \cos(i\omega t - \varphi + \pi/4) \quad (1-14)$$

と表現する。A_iは表面温度を周期式で表現した時の振幅、ωはその角振動数、φは位相角である。またc_g、ρ_g、λ_gはそれぞれ表面（建物であれば建材、道路であればアスファルト等）の比熱、密度、熱伝導率である。iは虚数単位。式(1-12)～(1-14)を(1-11)に代入すると熱収支式は表面温度を未知数とする解析式となる。したがって、入力気象条件（S、L、T_a、T_a、U、Q_a）およびパラメータ（α、C_H、β、c_g、ρ_g、λ_g）を用いてこの解析式より表面温度を求めれば、式(1-12)より顕熱Hnat_buildingを求めることができる。パラメータについては、既往研究^{4),5)}によるこのサイトでの値を用いた。これらのパラメータが適切であるかどうかは、赤外線カメラにより観測された表面温度と計算値を比較することで検証を行い、その妥当性を確認した。なお、観測対象エリア（フットプリント）における植生は、面積率にして10%以下であるため顕熱輸送の計算（式1-12）においては無視している。

次にHanp_carとHanp_gasは観測されたCO₂輸送量に、CO₂・熱変換係数（A_{gas}、A_{gasoline}）を掛けて算出した。

$$\text{Hanp_gas} = \text{Fco}_2\text{_gas} A_{\text{gas}} (1 - S B) \quad (1-15)$$

$$\text{Hanp_car} = \text{Fco}_2\text{_gasoline} A_{\text{gasoline}} \quad (1-16)$$

ここで、Fco₂_gasとFco₂_gasolineは、O₂濃度で按分した都市ガス起源CO₂排出量とガソリン起源CO₂排出量である。Sは都市ガス消費における給湯の割合、Bは給湯排熱のうち大気へ排出される熱の割合（温排

水として下水処理される分を除いた割合) である。

ここまでで、都市ガスおよびガソリン起源の人工排熱 (Hanp_carとHanp_gas) は求められており、残るは電気起源の人工排熱Hanp_elecである。先に述べた方法でHnat_buildingを求めて、式 (1-9)、(1-10)および渦相関法で観測された顕熱Hobsを用いると、Hanp_elecを残差として求めることができる。なお、このHanp_elecには、室内の照明器具やOA機器等において発生した純粋な電気起源の排熱に加えて、窓や壁を通して屋外から室内に入った熱が換気や空調により屋外大気へと排出される分も含まれている。

4. 結果及び考察

4.1 CO₂と熱の総輸送量

図1.2(a)に、輸送量観測に対する平均的なフットプリントを示す。なお、一般的に輸送量に対するフットプリントは濃度に対するそれよりもはるかに狭いエリアとなる。季節により主風向が変化するためフットプリントも夏と冬で位置が異なるが、輸送量に対する寄与はほとんどがサイト近傍の住宅地で占められている。このフットプリントから輸送量に占める植生地の割合を求めると、夏と冬でそれぞれ9%、2%であった。図1.2(b)と(c)にCO₂輸送量の季節・日変化を、(d)に顕熱輸送量の変化を示した。CO₂においては朝9時頃と夕方20時頃にピークをもつ日変化が季節を問わず見られる。これは交通量と家庭でのガス消費量の日変化を反映しているものと考えられる。一方、顕熱は正午頃をピークとした日変化を示しており、太陽放射起源の顕熱が大きいことが分かる。なお、サブテーマ2の建物エネルギーモデル開発では建物表面での太陽放射起源の熱輸送も計算されているため、図1.2(d)の顕熱計測値も後述の人工排熱量と合わせてモデル検証で使用されている。

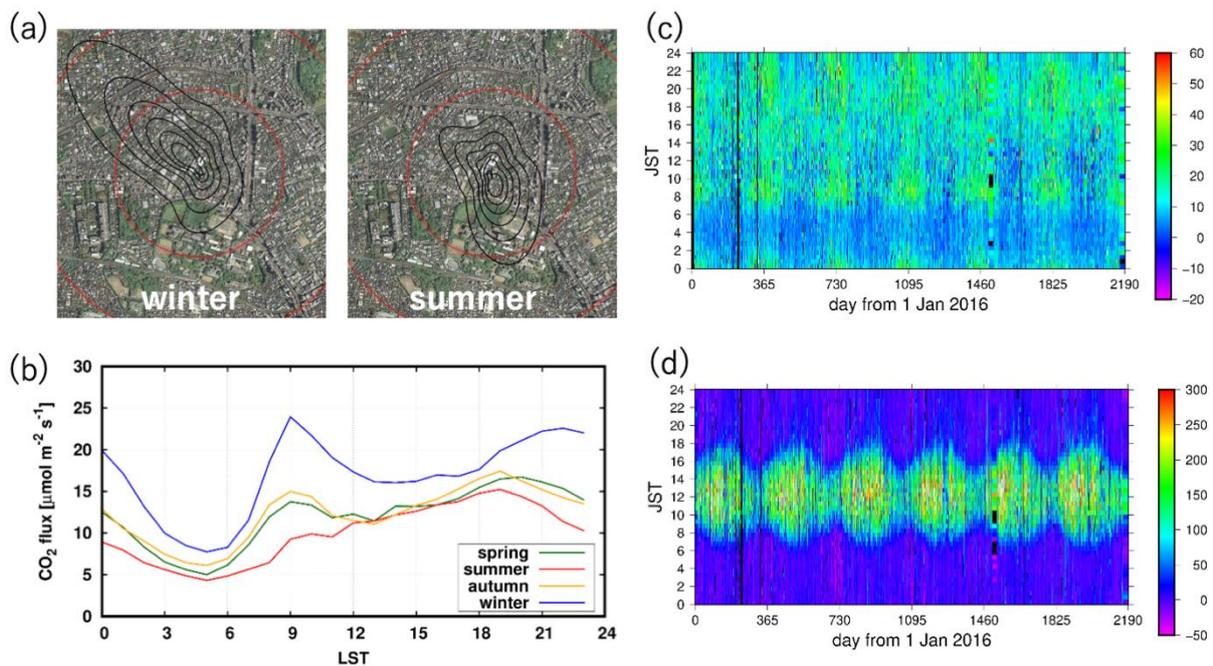


図1.2 (a)輸送量の平均フットプリント。黒線は輸送量に対する寄与が60、50、40、30、20、10%のエリア (外側から内側へ)、赤線は観測サイトから半径500、1000mのエリアを表す。(b)10年 (2012~2021年) 平均した季節ごとのCO₂輸送量(μmol m⁻² s⁻¹)の日変化。(c) CO₂輸送量(μmol m⁻² s⁻¹)の日変化。2016年から6年分示した。(d)顕熱輸送量(W m⁻² s⁻¹)の日変化。(c)と同様に示した。

4.2 大気中O₂およびCO₂濃度

図1.3(a)に、代々木サイトの高度52mで観測された大気中O₂およびCO₂濃度、2高度間の濃度差ΔO₂およびΔCO₂ (「52m - 37m」の値を示す)、およびCO₂総排出量を示す。観測結果には、O₂濃度が減少、CO₂濃

度が増加する数時間から数日の短周期のスパイク状の変動が多数見られる。 ΔO_2 と ΔCO_2 にも逆位相の変動が見られ、特に冬季に高 ΔO_2 、低 ΔCO_2 の顕著な変動が見られる。また CO_2 総排出量には、冬季に都市から大気への排出が極大になる季節変動が見られる。観測期間を通じた平均的な OR_F は1.63と、都市ガス消費と石油消費の OR の中間的な値を示した。これらの結果は、代々木街区の化石燃料消費に伴う O_2 消費・ CO_2 放出と、その影響が、冬季には大気の安定化のため大気下層でより明瞭に観測されることを示唆している。

得られた観測結果から、 ΔO_2 、 ΔCO_2 、および CO_2 総排出量の平均的な日内変動を季節毎に算出し、式(1-3)、(1-4)および(1-5)を適用することで、都市ガス消費量 F_G および石油消費量 F_L の日内変動を推定した。本解析では、人口統計データによる人間呼吸量を F_R として用いた。図1.3(b)に、 CO_2 総排出量、都市ガス消費量、石油消費量、および人間呼吸量の年平均の日内変動を示す。図には比較のため、家庭・飲食店のガス消費や交通量の統計データに基づく都市ガス消費量と石油消費量も併せて示した。統計データに基づく CO_2 総排出量は、特に夜間に、観測結果に比べて過大評価となっている。都市ガス消費量については、大気観測に基づいた推定、統計データともに朝と夜の2つの極大を示す日内変動が見られるが、夜間の統計データは観測に基づく推定値に比べて大幅に過大評価となっている。一方、石油消費量の統計データと観測に基づく推定値の乖離は都市ガスの場合に比して小さい。従って、統計データによる CO_2 総排出量の過大評価は、代々木街区の家庭・飲食店のガス消費統計が実態より過大評価になっていることを示唆している。なお、この起源別 CO_2 排出量の実測データはサブテーマ2および3において、建物エネルギーモデルおよび数理統計モデルを改良するために使用された。

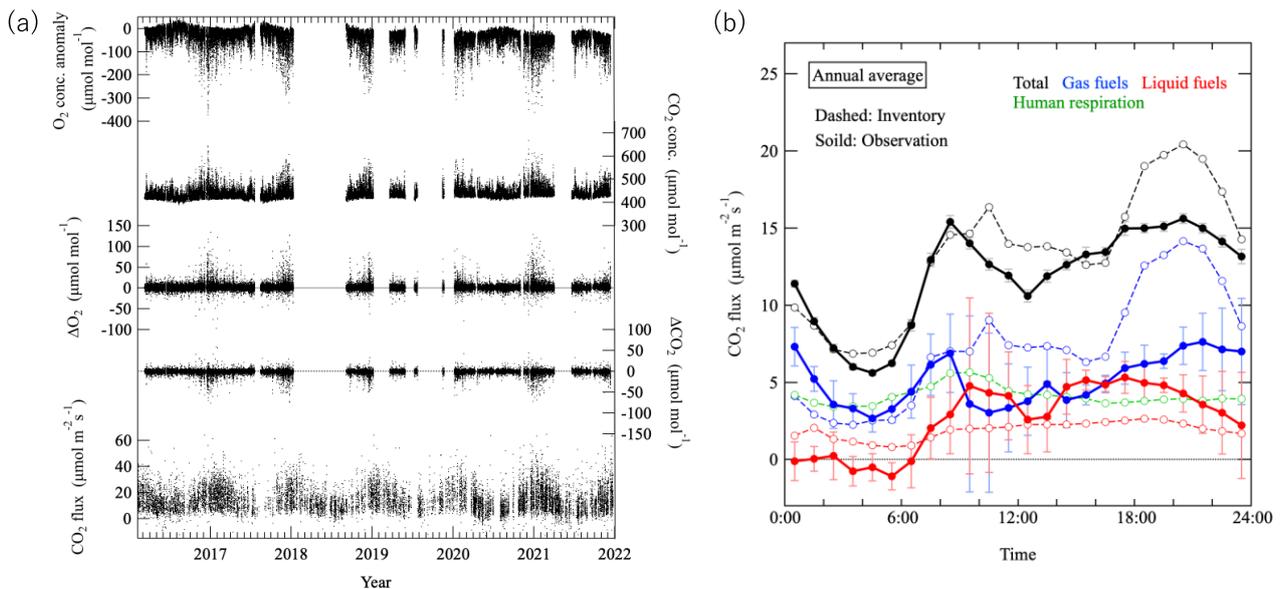


図1.3 (a) (上から順に)代々木サイトの高度52mで観測された大気中 O_2 および CO_2 濃度、2高度間の濃度差 ΔO_2 および ΔCO_2 (52m-37m)、および渦相関法で観測した CO_2 総排出量。(b)大気観測から得られた CO_2 総排出量(黒実線)、都市ガス消費量(青実線)、石油消費量(赤実線)および人口統計データから得られた人間呼吸量(緑破線)。2016年3月-2017年9月の観測結果から求めた年平均の日内変動である。比較のため、統計データに基づくガス消費(青破線)と石油消費量(赤破線)も併せて示した。(Ishidoya et al., 2020)⁶⁾

4.3 大気中 $^{14}CO_2$

図1.4(a)に、フラスコサンプリングで観測された CO_2 濃度と $\Delta^{14}C$ を用いて式(3-8)から求めた化石燃料起源 CO_2 濃度(CO_2^{ff})を示す。ここでは3~4日毎に午後2時頃(2016年12月から2017年3月は午後10時頃)に定常的に採取した結果を示した。観測された CO_2^{ff} は10 ppmから84 ppmで、明瞭な季節変化は観測されなかった。一方、バックグラウンドからの CO_2 濃度増分(dCO_2)に対する CO_2^{ff} の割合は52%から

100%超で、夏に高く冬に低くなる傾向が観測された。夏期に100%を大きく超えることがあるが、これは陸域生態系によりCO₂が吸収された結果、観測されたCO₂濃度が低くなる（dCO₂が非常に小さくなる）ことに起因する。図1.4(b)に、これまでに得られた日中14時に採取された大気試料の¹⁴C分析結果を用いて算出したCO₂^{ff}/dCO₂の季節変動を示す。冬から春にかけてffCO₂/dCO₂が増加し、6~7月頃にほぼ100%と極大をとり、その後、秋から冬にかけて減少した。その結果、CO₂^{ff}の割合は10月に60-65%だったが、徐々に増加し、1-2月に80%近くに達することがわかった。冬季の3ヶ月（12月~1月）平均値は73%だった。

これまでの $\Delta^{14}\text{C}$ 観測から、冬季のCO₂濃度変動の73%が化石燃料起源、27%が生物起源であることがわかった。人口統計データから推察された人間呼吸量は観測されたCO₂フラックスの22%であることを考慮すると、27%の生物起源のうち、5%が陸域生態系起源CO₂である可能性が示唆された。しかし、フラックス観測と濃度観測ではフットプリントが大きく異なるため、特に陸域生態系起源CO₂の与える影響が異なる可能性がある。また、 $\Delta^{14}\text{C}$ を用いたCO₂^{ff}の季節変動と酸素濃度を用いた推定には差異があることがわかった。今後、国立環境研究所が実施している東京スカイツリーの $\Delta^{14}\text{C}$ 観測結果や一酸化炭素データを併用した解析を行う必要があると考えられた。

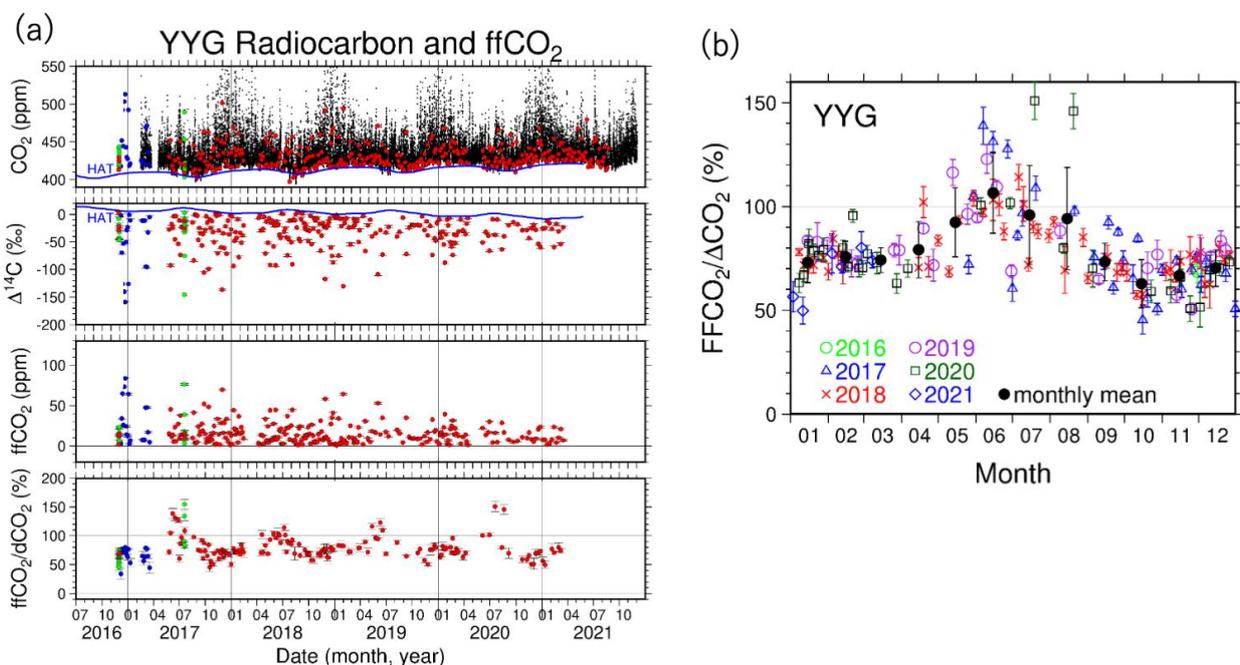


図1.4 (a) (上から順に) フラスコサンプリングで観測されたCO₂濃度（赤丸は午後2時、青丸は午後10時のサンプリング）および現場で観測されたCO₂濃度の1時間平均値（黒線）と波照間ステーションの観測結果から推定したバックグラウンドCO₂濃度（青線）、 $\Delta^{14}\text{C}$ 値、 $\Delta^{14}\text{C}$ 値から推定した化石燃料起源CO₂濃度（CO₂^{ff}）、バックグラウンドからのCO₂濃度増分（dCO₂）に対する化石燃料起源CO₂濃度の割合（ただしdCO₂が10ppm以下のデータは誤差が大きいため除いた）。(b) CO₂^{ff}/dCO₂の季節変動。黒丸は2016-2021年の月平均値を示す。

4.4 エアロゾル組成

代々木サイトにおける石炭燃焼起源のCO₂の寄与を判別するために、関東平野でPM_{2.5}高濃度が出現した秋季および初冬季のイベントを対象に、PM_{2.5}の元素組成の特徴とORを比較検討した。2017年12月に頻繁に現れたPM_{2.5}高濃度イベントでのORはいずれも石油燃焼と天然ガス燃焼の中間的な値をとり、北東風が卓越する冬季には炭燃焼の寄与は認められなかった。これに対して、図1.5(a)に示した2017年10月初旬に続いたPM_{2.5}高濃度イベントでは、順次出現したPM_{2.5}の濃度ピークに応じてORが変わった。最大濃度出現時（Period-5）と続く高濃度出現時（Period-6）に着目すると、Period-5はPM_{2.5}中のPb/Ni比が高

く石炭燃焼の影響が示唆されたのに対し、Period-6はPb/Ni比が低く石油燃焼が主であることが示唆された(図1.5(b))。この時のOR(図1.5(c))は、Period-5で1.33と低く、石炭燃焼の寄与が卓越していたことを示しており、PM_{2.5}組成からの示唆と整合的だった。これは、両手法の相補的使用が可能であること、および季節によっては代々木サイトに石炭燃焼起源のCO₂が到来する可能性もあることを示している。このように、元素組成と整合的な形で湾岸域からの石炭燃焼の影響が示唆されたイベントは、今後のORを用いた燃焼発生源の解析では例外ケースとして解析から外すことが可能となった。

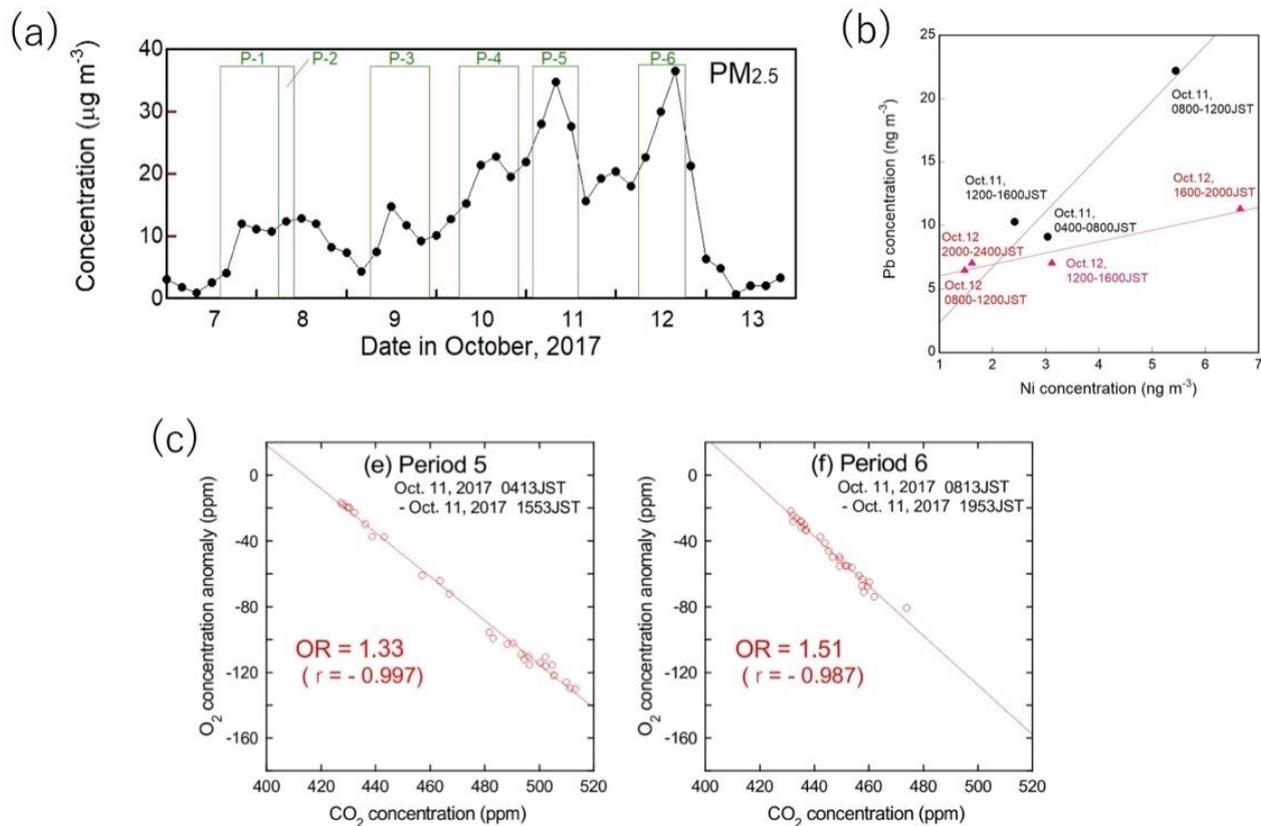


図1.5 (a) 2017年10月7日から13日に観測されたPM_{2.5}の4時間平均値の時系列。緑が解析したPeriod-1から6のイベント。(b) PM_{2.5}中のPbとNiの散布図(黒丸がPeriod-5、赤三角がPeriod-6)。(c) Period-5と6におけるCO₂濃度とO₂濃度の散布図。(Kaneyasu et al., 2020)⁷⁾

4.5 人工排熱量

夏季6-8月についての推定結果を図1.6に示す。交通起源(oil)および都市ガス起源(gas)の人工排熱は5 Wm⁻²以下で日変化も小さいが、夕方に若干増加しているのは、交通量の増加および家庭での調理・入浴に起因すると思われる。一方で電気については朝に急激に大きくなり夕方にかけて緩やかに増加したのち低下する変化がみてとれる。推定誤差は、交通と都市ガス起源については起源別二酸化炭素フラックスの時別平均における標準誤差からそれぞれ0.3 Wm⁻²、0.2 Wm⁻²と見積もられる。電気起源における誤差については、赤外線カメラを用いた地表面熱収支モデルの精度を行い、図中に誤差棒として示した。

推定した結果の妥当性について検討するため、日平均値を既存のインベントリと比較する。観測値では交通起源2.8 Wm⁻²、都市ガス起源1.8 Wm⁻²、電気起源15.2 Wm⁻²でこれらの合計が19.8 Wm⁻²である。これに対して国土交通省・環境省(2003)⁸⁾のインベントリでは交通起源が3.0 Wm⁻²、都市ガス起源と電気起源の合計が12.2 Wm⁻²である。ただしこのインベントリは季節ごとの値ではなく年平均値である。また、Moriwaki et al. (2008)⁹⁾によるインベントリでは、季節ごとではあるが全ての起源からの合計値のみが示されており、それによると夏季において17.8 Wm⁻²である。インベントリごとに季

節変化や内訳が明示されておらず断片的な比較ではあるが、少なくとも日平均値については既存インベントリの妥当性を検証することができた。さらに本研究では既存インベントリでは得られていなかった季節ごとの人工排熱量の日変化を得ることができた。

以上の人工排熱推定結果は、サブテーマ2および3に提供され、それぞれ建物エネルギーモデルおよび数理統計モデルの改良に使用された。具体的には、実測された都市ガスおよび交通起源の人工排熱が、サブテーマ2における建物エネルギーモデルの改良に使用され、既存インベントリよりも現実に即したモデルパラメータの同定が行われている。さらに、全起源からの総排出量がサブテーマ3の数理統計モデル開発において、モデル精度評価の基準として使用されている。このように本課題においては、実測により得られた人工排熱量によって、モデルが現実に即したものとなっている妥当性を担保できている。

ここで、建物エネルギーモデルによる人工排熱の計算結果の検証について述べる。建物エネルギーモデルで出力される大気への排熱は、建物から屋外へ排出される総排熱量であるため、観測値における都市ガスおよび電気起源の排熱量を合算して比較した（図1.7）。ただし、先に述べたように建物エネルギーモデルの開発においては都市ガス起源の排熱量が実測値をもとに推定されており、厳密にはここでの検証対象は電気起源の排熱量となる。図1.7において、モデル計算結果の日変化のパターンは実測値とよく一致している。絶対値についても両者の差は観測の誤差範囲（誤差棒）内に収まっている時間帯がほとんどであり、MBEは -2.9 Wm^{-2} 、RMSEは 6.1 Wm^{-2} であった。

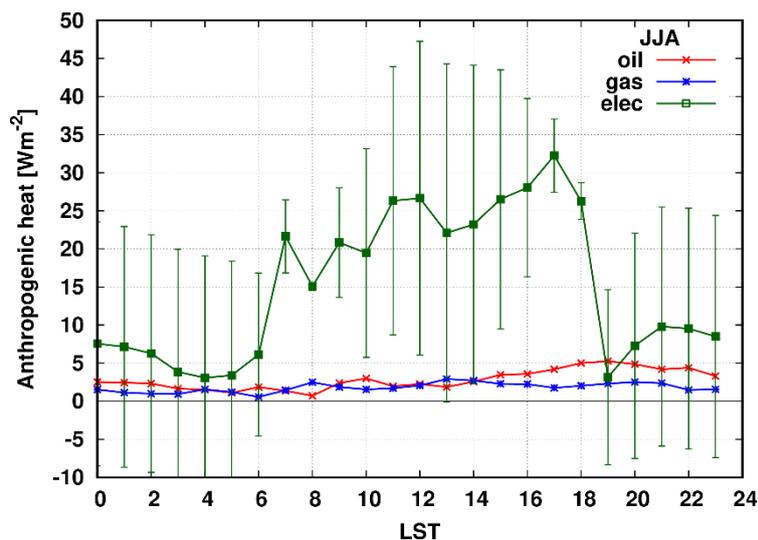


図1.6 夏季（6-8月の時別平均値）の人工排熱量の推定結果。oilは交通起源、gasは都市ガス起源、elecは電気起源。oilとgasの誤差は図示していないが、それぞれ 0.3 Wm^{-2} 、 0.2 Wm^{-2} である。

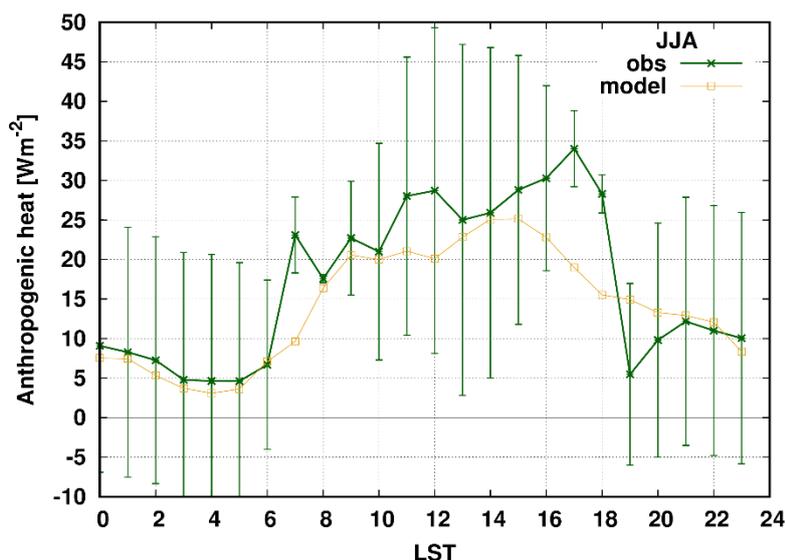


図1.7 夏季（6-8月の特別平均値）における建物からの人工排熱について、実測値（obs）とサブテーマ2の建物エネルギーモデルによる推定結果（model）を比較したものの。

4.6 COVID-19の蔓延による社会活動制限に伴うCO₂排出量の変化

本研究期間中に、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）が蔓延し、2020年4月7日から5月25日にかけて第一回緊急事態宣言が発令された。そこで、緊急事態宣言下のCO₂排出量の変化を、代々木サイトで観測されたCO₂フラックスとO₂濃度を用いて起源別に定量化した¹⁰⁾。

図1.8に2020年4～5月に代々木サイトで観測された起源別のCO₂排出量を示す。2020年4～5月の緊急事態宣言下の代々木街区のCO₂排出量は、例年より20%±3% ($2.1 \pm 0.3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 減少したことが明らかとなった。そして、その主要因は石油燃焼起源CO₂が $2.5 \pm 0.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 減少したことであり、交通量の減少が原因であると考えられた。また、ガス燃焼起源CO₂の微増も観測された。一方、CO₂とCO濃度の相関関係からは、2020年4～5月は例年と比べ、平日夜間は交通起源と推測されるCO₂とCOが減少したこと、週末は交通と建物起源の両方が減少したこと、週末夜間は建物起源CO₂が同等もしくは増加したことが示唆された。これらCO濃度観測から得られた結果は、CO₂フラックスとO₂濃度観測から得られた結果と整合的であった。

図1.9に人間活動に関するデータの日変動を示す。日本道路交通情報センターのYYGサイト周辺の交差点の交通量データから、2020年4～5月は交通量が減少しており、特に土日に大きな減少が確認された（図1.9(c)）。携帯電話キャリアが提供するモバイル空間統計データの解析から、2020年4～5月の代々木街区は、2019年と比べて、総人口密度が減少したが居住者人口は増加した（特に日中）ことがわかった（図1.9(a, b)）。これをもとに、サブテーマ2の建物エネルギーモデルで都市ガス起源のCO₂排出量を推定したところ、2020年は夕方から夜間にかけて増加しており、増加量は観測されたCO₂フラックスと整合的であった（図1.9(d)）。すなわち、サブテーマ2の建物エネルギーモデルは非常事態宣言という人間の生活行動様式の変化を的確に捉えることができていることが、実測データにより担保できた。

このように、我々の地上大気観測は、COVID-19の蔓延に伴う人為CO₂排出の急激な変化を検出することに成功した。解析に用いた観測データは、以下のように国立環境研究所地球環境研究センター地球環境データベースに登録し、DOI付きで一般公開した^{11), 12), 13), 14), 15)}。

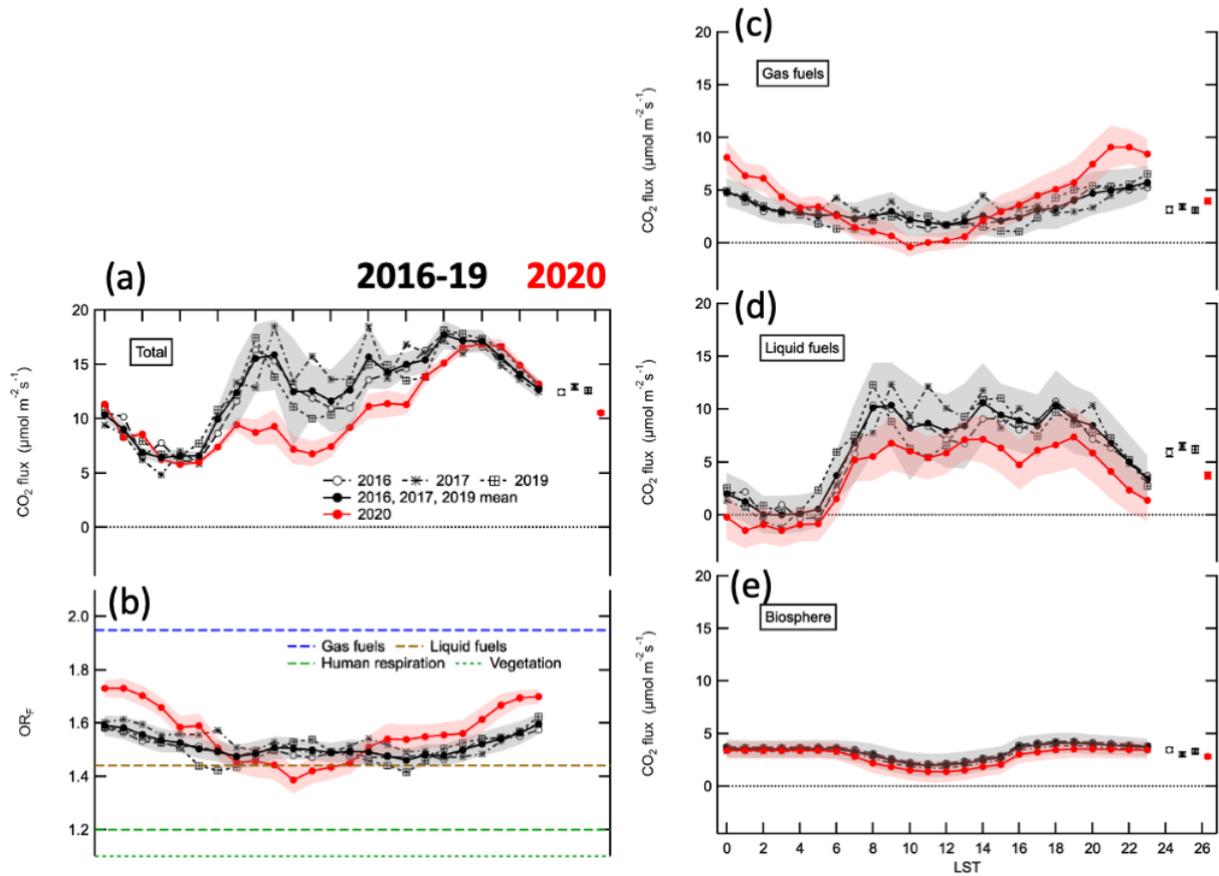


図1.8 代々木サイトで観測された (a) 総CO₂フラックス、(b) OR、(c) ガス燃焼起源CO₂フラックス、(d) 石油燃焼起源CO₂フラックス、(e) 生物起源CO₂フラックスの日変動。黒が2016～2019年4～5月、赤が2020年4～5月を示す。(Sugawara et al. (2021)¹⁰ Fig.3を改変)

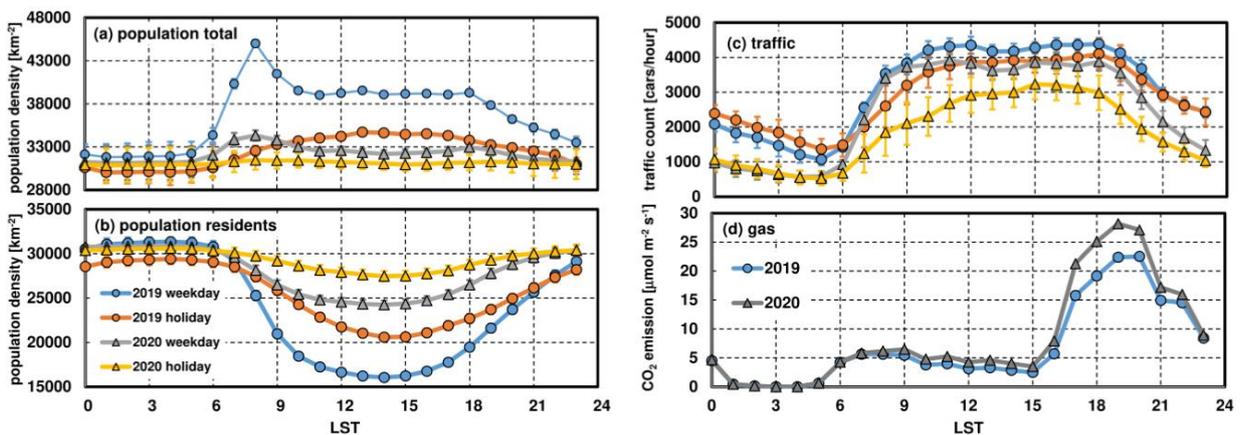


図1.9 代々木サイト周辺の (a) 総人口密度、(b) 居住者人口密度、(c) 交差点の交通量、(d) 建物エネルギーモデルで推定した家庭の都市ガス起源のCO₂排出量の日変動。(Sugawara et al. (2021)¹⁰ Fig.2を改変)

5. 研究目標の達成状況

代々木サイトにおいて、CO₂と熱輸送量、¹⁴CO₂、O₂とCO₂濃度、そしてエアロゾル組成の同時観測を実施し、観測データから排出起源毎のCO₂排出量の定量化を行った。大気モニタリングに基づく起源別熱排出量推定は、中間報告書から大きく改善することができ、サブテーマ2の建物エネルギーモデル検証に利用することができる電気起源の人工排熱を実測データから導出することに成功した。また、サブテーマ3の数理統計モデルの出力との比較検証にも使用された。成果の発信の点では、酸素濃度を用いたCO₂排出量の起源別推定⁶⁾ならびにエアロゾル組成観測結果⁷⁾について、それぞれ国際誌で誌上発表を行った。さらに、COVID-19の蔓延に伴う社会活動制限がCO₂排出量に与える影響について観測データからいち早く定量化し、国際誌で誌上発表を行うことで、地上大気モニタリングが人為CO₂排出の変化を検出することができることを示した¹⁰⁾。研究目標には設定していなかったが、観測データ (CO₂フラックス、O₂、CO₂、CO) 5件をDOI付きで一般公開することができた^{11), 12), 13), 14), 15)}。以上から、当初目標を上回る成果を挙げることもできたと考える。

6. 引用文献

- 1) S. ISHIDOYA et al. (2017), SOLA, Vol. 13, 230-234, doi:10.2151/sola.2017-042.
- 2) R.F. Keeling (1988), Ph.D. Thesis, Harvard University, Cambridge.
- 3) I. LEVIN et al. (2003), Geophys. Res. Lett., 30 (23), 2194, doi:10.1029/2003GL018477.
- 4) H. SUGAWARA and T. TAKAMURA (2014) Surface Albedo in Cities: Case Study in Sapporo and Tokyo, Japan. *Boundary-Layer Meteorology*, 153: 539-553.
- 5) 平野竜貴, 菅原広史, 荒木沙耶. 2016. 市街地における力学的粗度の測定. 風工学シンポジウム論文集, 24: 85-90.
- 6) S. ISHIDOYA, H. SUGAWARA, Y. TERA0, N. KANEYASU, N. AOKI, K. TSUBOI and H. KONDO: *Atmos. Chem. Phys.*, 20 (9), 5293-5308, doi:10.5194/acp-20-5293-2020 (2020) (IF: 6.133), O₂:CO₂ exchange ratio for net turbulent flux observed in an urban area of Tokyo, Japan, and its application to an evaluation of anthropogenic CO₂ emissions.
- 7) N. KANEYASU, S. ISHIDOYA, Y. TERA0, Y. MIZUNO and H. SUGAWARA: *ACS Earth and Space Chem.*, 4 (2), 297-304, doi: 10.1021/acsearthspacechem.9b00314 (2020) (IF: 3.475), Estimation of PM2.5 emission sources in Tokyo Metropolitan area by simultaneous measurements of particle elements and oxidative ratio in air.
- 8) 国土交通省・環境省(2003), 平成15年度 都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書
- 9) R. MORIWAKI, M. KANDA, H. SENOO, A. HAGISHIMA, T. KINOCHI (2008) Anthropogenic water vapor emissions in Tokyo, *Water Resources Research*, 44: W11424.
- 10) H. SUGAWARA, S. ISHIDOYA, Y. TERA0, Y. TAKANE, Y. KIKEGAWA and K. NAKAJIMA: *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL092600. doi:10.1029/2021GL092600 (2021) (IF: 4.720), Anthropogenic CO₂ emissions changes in an urban area of Tokyo, Japan, due to the COVID-19 pandemic: A case study during the state of emergency in April-May 2020.
- 11) H. SUGAWARA, Y. TERA0, and S. ISHIDOYA (2021) Atmospheric CO₂ flux data observed at Yoyogi, Tokyo, version 1.0. NIES. <https://doi.org/10.17595/20210510.005>
- 12) S. ISHIDOYA, Y. TERA0, and H. SUGAWARA (2021a) Atmospheric CO₂ mole fraction data observed at Yoyogi, Tokyo by AIST, version 1.0. NIES. <https://doi.org/10.17595/20210510.003>
- 13) S. ISHIDOYA, Y. TERA0, and H. SUGAWARA (2021b) Atmospheric O₂ mole fraction data observed at Yoyogi, Tokyo, version 1.0. NIES. <https://doi.org/10.17595/20210510.004>

- 14) Y. TERA0, H. SUGAWARA, S. ISHIDOYA, M. SASAKAWA, and T. MACHIDA (2021a) Atmospheric CO₂ mole fraction data observed at Yoyogi, Tokyo by NIES, version 1.0. NIES.
<https://doi.org/10.17595/20210510.001>
- 15) Y. TERA0, H. SUGAWARA, S. ISHIDOYA, M. SASAKAWA, and T. MACHIDA (2021b) Atmospheric CO mole fraction data observed at Yoyogi, Tokyo, version 1.0. NIES.
<https://doi.org/10.17595/20210510.002>

II-2 都市気象・建物エネルギーモデルの改良と検証

明星大学 理工学部 亀卦川 幸浩

国立研究開発法人産業技術総合研究所 環境創生研究部門 環境動態評価研究グループ

高根 雄也・中島 虹

<研究協力者> 東京電力ホールディングス株式会社 経営技術戦略研究所 山口 和貴

国立研究開発法人産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 大竹 秀明

【要旨】

本サブテーマ2では、課題全体目標である機械学習にもとづく熱・CO₂排出インベントリの簡易推計ツールの構築に向け、都市圏スケールの熱・CO₂排出量の高精度データを独自開発した都市気象・建物エネルギーモデル（以降、モデル）により生成し、当該ツールを開発するサブテーマ3へ学習データとして提供する事を目的とした。その為、サブテーマ1の大気観測データ等を用いてモデルの改良と検証を行い、そのモデルを国内都市域に適用する数値実験を通じ、現況再現性が検証され、かつ各種の温暖化対策や気候変動の影響までもが加味された高精度な熱・CO₂排出量学習データの作成を試みた。以て、民生部門の熱・CO₂排出量インベントリの高精度化に寄与する事を目標とした。

以上の目標に向け、まずモデルとその入力パラメータを改良して得られたシミュレーション結果について、サブテーマ1による代々木地区での起源別の熱・CO₂排出モニタリング量等との比較により検証を行った。その結果、モデルは代々木地区での観測にもとづく地表面近傍の熱収支と電力需要量、更には建物冷房排熱量を概ね再現可能である事が確認された。加えて、モデルが代々木地区のみならず様々な街区条件へも適用可能である事を確認すべく、東京首都圏も対象に検証した結果、モデルは地上気温と電力需要の広域分布の再現性において、冬季に一部課題を残したものの、夏季には良好な精度を示した。またモデルを夏季の大阪に適用し、排熱フィードバック効果の視点からも解析を重ねた結果、地上気温の昇温に対し1割～2割程度の自己強化をもたらす効果が解明された。更に、サブテーマ3の推計ツールが、将来の気候変動下や各種の温暖化対策の想定下でも適用可能となるよう、気候変動や対策が熱・CO₂排出量に及ぼす影響の学習データを生成すべく、モデルを対策効果や気候変動影響の予測計算にも適用した。その結果、ヒートアイランド対策としての地表緑化と空調排熱ゼロ化、省エネ策としての建物のZEB・ZEH化、CO₂削減策としての太陽光発電普及を東京首都圏に当てはめた4つの対策ケース、および代々木地区にて産業革命以降+2℃相当の気候変動を想定した将来予測ケースにおいて、モデルは合理的な熱・CO₂排出の予測結果を出力可能である事が示された。

以上により、従来は表現不能であった建物熱収支や日々の気象変化と将来の気候変動、および排熱フィードバックの一連の効果と各種対策導入の影響までもが加味された高精度な熱・CO₂排出量データをモデルより生成し、学習データとして提供できた。この成果をもって、研究目標を達成すると共に、都市気候学分野の古典的課題である排熱フィードバック効果の定量化をも成し得た点で、当初目標を上回る成果を挙げる事ができた。

1. 研究開発目的

課題全体目標としてサブテーマ3が開発を志向する熱・CO₂排出量インベントリの簡易・高精度推計ツールは、機械学習数理モデルをベースとしている。その実現に向けては、気象・気候条件への依存性等を有するが故に従来手法では高精度化が困難な民生部門の熱・CO₂排出量について、教師あり学習データが基礎データとして必要不可欠となる。この為、当該基礎データを、排熱フィードバックを含む気象条件と建物空調エネルギー需要の動的関係を模擬可能な世界初の独自物理モデルである都市気象・建物エネルギーモデルにより生成する事を主な目的として、本サブテーマを設定した。当該基礎データについて、サブテーマ1の代々木サイト観測データや広域電力消費量データとの比較により現況再現性を検証し、更に省エネ等の対策効果や気候変動影響について都市気象・建物エネルギーモデルによる予測も反

映された民生部門の高精度な熱・CO₂排出量学習データとしての提供を目指した。

2. 研究目標

サブテーマ1で取得される熱・CO₂排出量等のモニタリングデータを用い、都市気象・建物エネルギーモデルの改良と検証を行う。検証後のモデルを東京や大阪等の国内主要都市域に適用し、省エネ等の対策導入の影響を加味した数値実験を行う。その結果を解析する事で、熱・CO₂排出量の原単位等のインベントリ推計の基礎データを作成し、サブテーマ3に提供する。以上により民生部門を対象とした熱・CO₂排出量インベントリの高精度化に寄与する。

3. 研究開発内容

上述目標の達成に向け、本サブテーマでは、建物起源の熱・CO₂排出量の予測精度を改善すべく都市気象・建物エネルギーモデルとその入力パラメータを改良した。改良後のモデルとパラメータを用いた熱・CO₂排出量のシミュレーション結果について、サブテーマ1が代々木地区で実施した先進的観測にもとづく起源別の熱・CO₂排出のモニタリング量との比較により、その妥当性を検証した。加えて、当該モデルが代々木地区のみならず様々な街区条件下での熱・CO₂排出量に関して高精度な学習データを生成可能であることを検証すべく、首都圏での電力需要再現性の視点からモデルの広域検証を実施した。更に、サブテーマ3の機械学習推計ツールが、将来の気候変動下や各種の温暖化対策の導入想定下での熱・CO₂排出量の予測にも適用可能となるよう、それら気候変動や対策が熱・CO₂排出量に及ぼす影響の学習データを生成すべく、都市気象・建物エネルギーモデルを建物省エネ等の対策効果や気候変動影響の予測計算にも適用した。以上により従来表現不能であった建物熱収支や排熱フィードバックの影響がリアルに加味された高精度な熱・CO₂排出量学習データを都市気象・建物エネルギーモデルより生成・検証し、サブテーマ3へ提供した。以上の流れで本サブテーマの研究計画の全要素を網羅した研究開発の内容とその成果（結果・考察）について、詳細を以下の項目毎に本章と次章に記す。

- ・都市気象・建物エネルギーモデルの改良
- ・都市気象・建物エネルギーモデルの検証（代々木地区での検証、首都圏での広域検証）
- ・都市気象・建物エネルギーモデルの適用（対策効果と気候変動影響を加味したインベントリ推計基礎データの作成）

3.1 都市気象・建物エネルギーモデルの改良

都市気象・建物エネルギーモデルは、建築群による気象への影響を表現する都市キャノピーモデル（以降CM）に、建物空調エネルギー消費と排熱を計算する建物エネルギーモデル（以降BEM）を結合した数値モデルであり、都市域での「気温上昇→冷房需要増→排熱増→更なる升温」のフィードバック効果を模擬できる世界初のモデルとして本課題の研究分担者等により開発された。CMは、都市キャノピー大気層に及ぼす建築群の熱的・力学的効果を運動量・熱・水蒸気の鉛直拡散方程式を中心とする基礎方程式系により表現する。街区形状については、水平方向には同じ正方形の底面を有する建物の格子状配列、鉛直方向には建物高度分布に基づく鉛直分布密度を有する建築群を想定する。その建物配列が放射・熱収支や乱流過程に与える影響を考慮し、建物周りの気象計算を担うモデルがCMである。一方、CMの気象計算値を境界条件とした建物熱収支の非定常計算を通じ、空調エネルギー消費や排熱量等を予測するのがBEMである。予測され建物から外気への排熱（顕熱・潜熱）はCM側の大気気温・湿度の計算過程へフィードバックされる。BEMは、単室近似モデルであるが、壁体伝導熱や窓面透過日射、内部機器発熱等の建物熱収支の全要素を考慮している。以上のCMとBEMの結合モデルであるCM-BEMは、研究用に世界で最もよく用いられている米国の公開気象数値モデルWRFに都市域の陸面モデルとして結合済みである（WRF-CM-BEM）。

都市気象・建物エネルギーモデルの入力パラメータには、モデル初期開発時点（15年前）の設定値も

一部含まれる。そのため、モデルで排熱量を予測する際の根幹をなす建築物の躯体構造などを現況も踏まえ、適宜、入力パラメータを更新した。更新した入力パラメータの詳細を以下に記述する。

まず、事務所建物、集合住宅、戸建住宅の壁体構造を以下のように設定した。住宅の省エネルギー基準は1980年（昭和55年）に制定されて以来、その基準は強化されてきた。そのため、住宅はその建築時期によって断熱性能が異なる。国土交通省¹⁾は約500万戸の住宅を対象とした断熱性能の比率を調査した。この比率を基準にして戸建住宅と集合住宅の壁体構造を設定した（表2.1）。なお、事務所建物は既往研究²⁾と同様とした。また、建物の冷房負荷に対する影響が大きい住宅の壁面上の窓面積割合については、代々木観測エリアの建物の公開写真の画像解析より窓面積率のエリア平均値（14%）を設定した。

表2.1 壁体の物性値

建物用途	層長合計 [m]	層数	断熱層	熱伝導率 [W/mK]	容積比熱 [MJ/m ³ K]	断熱層挿入範囲	
事務所	屋上	16	通常層	0.52	1.47	-	-
			断熱層	0.014	0.093	14	15
	側壁	16	通常層	0.71	1.7	-	-
			断熱層	0.019	0.068	14	14
戸建住宅	屋上	5	通常層	0.1344	0.74	-	-
			断熱層	0.042	0.02	4	4
	側壁	5	通常層	0.5608	1.11	-	-
			断熱層	0.042	0.02	4	4
集合住宅	屋上	16	通常層	0.4787	1.814	-	-
			断熱層	0.037	0.035	5	5
	側壁	16	通常層	3.5195	1.941	-	-
			断熱層	0.037	0.035	15	15

次に、建物熱収支に与える影響が大きい電力由来内部機器発熱と非電力由来内部機器発熱を次のように推計した。はじめに電力由来内部機器発熱について、東京電力管内の配電用変電所別（全1405エリア）の実電力消費量を東京電力より取得した。エリア内の気温・湿度計測値により説明させる重回帰モデルを構築後、気温・湿度に依存しない定数項を電力由来内部機器発熱とみなす方法で推計した。推計された各変電所別の電力由来内部機器発熱をESRIジャパンによるArcGIS Geo Suite 詳細地図2021（以降、ESRI詳細地図）から延床面積当たりに換算し、その後、モデルの格子内に含まれる変電所の延床面積で加重平均することで、格子別・時刻別・曜日別（平日・土曜・日祝日）の内部機器発熱を推計した。図2.1に推計された平日15時における電力由来内部機器発熱の分布を示す。特に事務所や商業施設が多く存在する都心（千代田、中央、新宿、港）でその周辺よりも高いことが確認できた。次に、非電力由来内部機器発熱については、大気汚染物質排出量の高解像度公開データである「東アジア大気汚染物質排出量グリッドデータベース」（http://www.cger.nies.go.jp/db/eagrid/eagrid_index_j.html）（以降、EAGrid）の小規模燃焼値を2017年次補正し、ESRI詳細地図から求めた3次メッシュ別の延床面積を用いて延床面積当たりに換算する方法にて推計した。

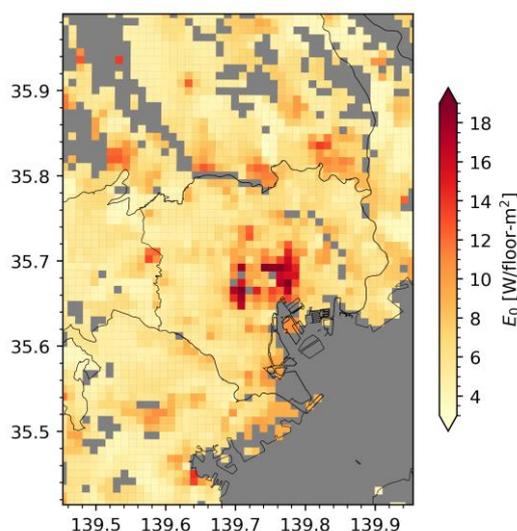


図2.1 平日15時における電力由来内部機器発熱分布

次に、事務所建物における空調エネルギー源の構成割合を以下のように設定した。空調エネルギー源には電力とガスが利用される。その構成割合は、規模が小さい建物では電力が大きく、規模が大きい建物ではガスが大きい³⁾。このことを考慮し、格子内に含まれる建物規模に応じた熱源構成割合を事務所の格子別に設定した。また、空調の稼働率は外気温に応じて変動する⁴⁾。そこで、外気温が高い（低い）ほど冷房（暖房）の空調スペースの割合が高くなることを考慮するようにスケジュールパラメータを改良した。

その他の入力パラメータのうち、ガス直燃吸収式冷温水発生機の補機比率を0.244⁵⁾に見直した。自動車排熱については、EAGridの自動車CO₂排出量より自動車燃料消費に伴う排熱量を逆算する方法にて推計を行った。

3.2 都市気象・建物エネルギーモデルの検証

都市気象・建物エネルギーモデルは、建物での非冷暖房用途のエネルギー消費と自動車燃料消費に由来する排熱・CO₂排出量を入力条件とし、気象条件に動的に依存する建物の冷暖房エネルギー消費による排熱・CO₂排出量を予測対象とするモデルである。このため、前者の入力条件について、首都圏の高解像電力需要データや既存のインベントリデータよりその実態値を推計し、その所与の入力条件のもとで、建物冷暖房由来の排熱・CO₂排出量を予測し検証する手法をとった。ここで、冷暖房排熱については、サブテーマ1での各種実測にもとづく代々木地区での推計排熱量との比較（(2)で後述）、冷暖房CO₂排出については、その起源となる冷暖房エネルギー消費量のうち実測値が入手可能であった電力消費量ベースにて、それぞれの検証を行うことにした（消費電力量が合っていれば排出係数を加味した後のCO₂排出量も合致するという考え方に基づく）。以上の事を踏まえ、気象モデルとしての性能は都市表面熱収支や気温に着目し検証を行う一方で、建物エネルギーモデルとしての精度は電力実需要量の再現性に着目し、モデル全体の検証を進める事にした。

(1) 代々木地区での検証：観測された熱収支と電力需要の再現性

サブテーマ1では、代々木地区での観測にて、熱・放射フラックス等のタワー計測気象要素に対する風上市街地の影響範囲（ソースエリア）をフットプリントとして推計している。このタワー実測資料との比較による検証の為、CM-BEMの計算対象エリアには上述フットプリントを選択し、当該エリア内での街区形状や土地被覆等の入力パラメータについて、現地の実態に合わせその同定を行った。但し、実測資料のうち、タワー観測に依らない電力消費量は、観測サイトを含む地区へ電力供給を行う変電所での実

績値である為、電力消費量の再現性検証の際には、CM-BEMの計算エリアを当該変電所の電力供給エリアに変更した。具体的には、以下のように夏季・冬季のフットプリントおよび変電所エリアにおけるパラメータを算出した。まず、東京都都市整備局平成28年度建物現況データを用いて街区形状（平均建物幅、建物間の間隔と建物高度分布、延床面積等）を算出した。次に、オープンストリートマップ（OSM）の土地利用データ（<http://www.openstreetmap.org/>）を用いて水面率と緑被率を算出した。なお、フットプリントについてはOSMに加えて国土地理院の空中写真も用いて緑地を判読した。以上の街区形状・土地被覆に加えて、空調シミュレーションの為に建物に関する入力パラメータや自動車排熱等の入力データについても設定を行った。建物の冷房負荷に対する影響が大きい壁面上の窓面積割合については、計算対象エリア内の建物の公開写真の画像解析より窓面積率のエリア平均値を推計した。同じく影響の大きい電力需要ベースロードについても、変電所エリアの実電力消費量をエリア内の気温・湿度計測値により説明させる重回帰モデルを構築後、気温・湿度に依存しない重回帰式の定数項をベースロードと見なす方法で推計した。また、自動車排熱については、大気汚染物質排出量の高解像度公開データである「東アジア大気汚染物質排出量グリッドデータベース」（http://www.cger.nies.go.jp/db/eagrid/eagrid_index_j.html）の自動車CO₂排出量より自動車燃料消費に伴う排熱量を逆算する方法にて推計を行った。

以上の計算対象エリアと入力パラメータの設定のもと、前節（1）の改良を経たCM-BEMの検証の為に数値実験を行った。検証の対象期間は、サブテーマ1による観測値の欠測が少ない2018年7・8月（夏季）と2017年1・2月（冬季）とした。両季節ともサブテーマ1で観測された気温・比湿・風速uv成分、下向き短波放射（Sdown）・下向き長波放射（Ldown）・大気密度を、CM-BEMの大気上端高度（サブテーマ1の観測高度に相当）に1時間毎に境界条件として与えるフォーシング計算を実施した。検証項目は、代々木地区の観測サイトにおける放射収支要素としての上向き短波放射（Sup）と上向き長波放射（Lup）、地表面付近の熱収支に係る正味放射量（Q*）、顕熱フラックス（QH）、潜熱フラックス（QE）、及びそれらの差分（Q*-(QH+QE)）、そして電力消費量（EC）である。計算対象エリアは、前述の通り、EC以外の項目の検証では代々木地区の季節ごとのフットプリントエリア（詳細はサブテーマ1参照）とした。夏季は主に南寄りの風が卓越するため、代々木観測サイトの南側が当該エリアの中心である。一方で冬季は北寄りの風が卓越するため北側が中心となっている。ECの検証では、変電所エリアを設定した。

(2) 代々木地区での検証：観測とモデルによる建物排熱推計の整合性

サブテーマ1ではII-1の3章に既述した通り、代々木地区での渦相関法にもとづく顕熱輸送量（実測値）に地表面熱収支モデルを組み合わせる方法で、建物冷暖房由来の排熱量の分離推計を行っている。ここでは、この一部観測にもとづく建物排熱の推計値を都市気象・建物エネルギーモデルによる計算排熱量と比較する方法で、モデルによる建物排熱表現の妥当性を検証した。検証は、2013年から2021年の夏季（6・7・8月）の無降水日における時刻別平均排熱量を対象とした。また、都市気象・建物エネルギーモデルへの入力条件として、建物非冷暖房用途のエネルギー消費量のうちの都市ガス消費量と自動車のガソリン消費由来の排熱量についてII-1に既述したサブテーマ1での実測値を採用する事で、代々木地区の実態を極力反映しつつ、モデルより出力される建物冷房排熱量について上述の観測ベース排熱量との比較検証を試みた。なお、都市気象・建物エネルギーモデルのシミュレーションでは、前節(1)と同様、夏季のフラックスフットプリントエリアの街区形状を想定するオフライン計算手法を用い、対象街区域を集合住宅街と見なした場合と業務街区と見なした場合の計算結果の加重平均としての建物排熱量を算出し検証に用いた。

(3) 広域検証：夏季・冬季の首都圏における気温・電力需要の再現性

3.2(2)の検証で用いた観測に基づく建物排熱の推計値を都市域全体で取得することは難しい。ここで、都市気象・建物エネルギーモデルでは、建物内で発生する空調熱負荷（電力消費量等）が室外機を介して排出された際の熱量を建物排熱として計算する。これまで、モデルの建物排熱の再現性は、電力需要などの建物で消費されるエネルギーをモデルと観測値で比較することにより検証されてきた⁶⁾。本研究

でも、モデルにより計算される首都圏における気温と電力需要量を観測値と比較する方法で、3.1で改良したモデルの妥当性を検証した。検証期間は、1年の中で空調需要が高い夏季(2018年7月1日～2018年8月31日)と冬季(2016年12月28日～2017年2月19日)とした。検証には気象庁のアメダス5地点における時刻別気温観測値の他、3.1でも示した東京電力より提供された時刻別電力需要量データを使用した。電力需要量データは、モデルの格子に含まれる各変電所の電力需要量を床面積で加重平均し時刻別・格子別の電力需要量を算出することで、モデルにより計算される電力需要量と比較した。

ここで、モデルでは格子内の建物用途を事務所、集合住宅、戸建住宅のいずれか一つであると仮定している。首都圏全体での再現性を検証する前に、建物用途が単一に近い格子を抽出し、その格子におけるモデルの電力需要量の妥当性を検証した。その後、首都圏全域における電力需要量の再現性を検証した。

以上の気温と電力需要、それぞれの検証に加え、本研究の新規性の核心を成す「排熱フィードバック効果への着目」に関連し、同効果が気温と電力需要の関係性に及ぼす影響の視点からも検証を試みた。具体的には、夏季都市域での休日に対する平日のエネルギー消費と排熱の増加に伴う気温上昇が冷房需要増をもたらす事で追加的に何%の冷房電力消費増を平日に誘発し得るかを表すフィードバック感度に着目した。本サブテーマ研究担当者が2013年度に大阪市域で実施した地上気温と電力需要の多地点通年観測の既往研究データより上述フィードバック感度を推計し、観測ベースの当該感度について、モデル(WRF-CM-BEM)により算出された気温・電力需要にもとづくフィードバック感度との比較検証を行った²⁾。これにより、排熱フィードバック効果の再現性の視点からモデル(WRF-CM-BEM)の検証を追加的に試みた。

3.3 都市気象・建物エネルギーモデルの適用)

(1) 対策効果を加味したインベントリ推計基礎データの作成

省エネ等のヒートアイランド対策の導入シナリオを検討・作成し、シナリオをもとに数値計算を実施した。各シナリオの計算結果と、3.2で検証したモデルの計算結果(基準ケース)を比較することで、シナリオ導入による民生部門の人工排熱・CO₂排出への対策効果について、排熱フィードバック効果を考慮した定量化を試みた。

シナリオには、①ZEB・ZEHによる建物省エネ、②都市の地表緑化、③非大気熱源空調の採用による空調排熱ゼロ化、④太陽光発電普及の4シナリオを設定した。具体的な設定について以下に示す。

① ZEB・ZEHによる建物省エネ(以降、建物省エネ)

2021年に閣議決定されたエネルギー基本計画に基づき、モデル内の全建物について住宅はZEH、事務所はZEB基準の省エネ性能が確保されることを想定した。そのために、外皮設定、内部機器発熱、電動空調のCOPを、住宅と事務所それぞれについて以下のように設定した。まず、外皮設定について、住宅では戸建住宅と集合住宅の東京23区における平均の建築面積と階数を東京都の土地利用現況を基に算出し、UA値が0.60以下となるように、壁と屋根の熱物性関連のパラメータを同定した。事務所については、使用基準(ポイント法)の考え方で性能基準(PAL/CEC指標)をクリアするように壁と屋根の熱物性関連のパラメータを同定した。また、空調需要推定に重要な窓について、基準ケースでは住宅と事務所それぞれで窓は単層ガラスを想定していたが、本シナリオでは複層ガラスを想定した。次に、内部機器発熱について、ZEB・ZEHの定量的な定義として再生可能エネルギーを除いた基準一次エネルギー消費量からZEHでは20%以上、ZEBでは50%以上減らすこととされている。そこで、住宅と事務所におけるそれぞれの内部機器発熱を基準ケースから20%、50%削減した。最後に住宅と事務所における電動空調のCOPをそれぞれ基準ケースの1.25倍⁷⁾と2倍⁸⁾に設定した。

② 都市の地表緑化(以降、緑化)

現在の地表において、道路、建物、水域以外の地表面を緑化することを想定した。そのために、

以下のように緑化後の緑地面積を算出した。まず、各格子内の道路面積を東京都は土地利用現況、東京都以外は数値地図5000を用いて算出した。次に、建物建築面積をESRI詳細地図を用いて算出した。次に、水域面積をオープンストリートマップ (<https://www.openstreetmap.org/>) を用いて算出した。最後に、算出された道路面積、建物建築面積、水域面積の和と格子面積の差を緑化後の緑地面積と定義して、モデルのパラメータに反映した。

③ 非大気熱源空調の採用による空調排熱ゼロ化（以降、空調排熱ゼロ）

基準ケースでは冷暖房の熱源を大気とし、冷房時には大気に空調排熱を放熱し、ヒートポンプによる暖房時には大気から採熱している。ここで、冷暖房時の熱源を大気以外にすることを想定した。想定される熱源は土壌、地下水、河川、海、下水と多様であり得るので、ヒートポンプ冷暖房の熱源を大気以外とする非大気熱源ヒートポンプ空調ケースとして一般化する事にした。具体的には、冷房排熱を大気系外へ排出し、暖房時の採熱を大気以外から行う計算を行った。このような非大気熱源空調は、温度差未利用エネルギーの利用により一般的に高効率化が期待できるが、その度合いは熱源の種類や温度条件、システム規模等に依存する為、一般化は困難である。他のシナリオの評価の精緻度とのバランスを考え、空調システムとしての性能は基準ケースにおける空気熱源と同じとし、ヒートポンプ熱源の非大気化による都市気候影響とその波及効果としての人工排熱・CO₂排出量への影響を簡易的に評価した。

④ 太陽光発電普及（以降、太陽光発電）

環境省による「平成24年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書」の太陽光発電の導入ポテンシャルの推計方法を参考に、事務所と集合住宅では延床面積の5%、戸建住宅では建築面積の17%となる屋上面積に太陽光パネルが水平設置されると想定した。また、発電効率として（独）新エネルギー・産業技術総合開発機構による「太陽光発電ロードマップ（PV2030+）」で示された2020～2030年の実用モジュールの発電効率である20%を採用した。

CO₂排出量は、モデルで予測される電力とガスの消費量に対して、電力は東京電力（0.00045t-CO₂/kWh）、ガスは東京電力（0.0136t-C/GJ）の排出係数を利用することで算出した。なお、太陽光発電ケースでは、モデルで予測される電力需要量と太陽光発電量の差を電力の消費量として計算することで、太陽光発電によるCO₂削減効果を考慮した

(2) 気候変動影響を加味したインベントリ推計基礎データの作成

気候変動影響を加味したインベントリ推計基礎データ作成のため、擬似温暖化手法⁹⁾を用いて現在気候+1.0℃の気候条件下での地上気温・電力需要・人工排熱を計算した。なお、産業革命から現在まで既に+1.0℃気温上昇が見積もられているため（IPCC AR6¹⁰⁾）、本計算の設定（現在気候+1.0℃）は、産業革命以降+2.0℃のシナリオと概ね解釈できる。対象エリアは、4.2節でモデルによる計算精度が十分検証された代々木街区である。

擬似温暖化実験では、4.2節の検証で使用する気象のフォーシング（代々木で測定された観測値）のうち、1時間毎の気温を単純に1.0℃上昇させる。また、+1.0℃の将来では相対湿度は現在と一定と仮定し¹¹⁾、気温が上昇した分の比湿上昇も考慮し、比湿の値を変更している。その他の変数（風や放射）は現在気候と同様である。この変更済みのデータをモデルのフォーシングを用いることで現在気候+1.0℃における地上気温・電力需要・人工排熱を計算した。

4. 結果及び考察

4.1 都市気象・建物エネルギーモデルの改良

3.1で記述したモデルの改良による電力需要量（EC）と地上気温に対する影響について夏季（2018年7-8月）の東京都市圏を対象に解析を行った。解析期間中のEC分布を観測値、改良内容を考慮しない場合

(改良前)と考慮した場合(改良後)について図2.2に示す。EC分布の特徴として、都心(千代田区、新宿区、港区)のECはその周辺と比較して高い。また、都心でも千代田区は港区よりも明らかに高く、ECの地域間のばらつきは大きい。改良前では都心とその周辺のEC差はみられるが、その差は観測値と比較して小さく、都心におけるECの地域間のばらつきは不明瞭である。改良前に対して改良後はECの空間分布をよく再現できるようになった。格子毎の平均誤差(MBE)を改良前と改良後で比較しても、改良後は改良前に比べて尖度が大きく、街区レベル(約 1km^2)のECを改良前よりも良好に再現できるようになった(図2.3)。また、改良後と改良前の日中(9-18時)の気温を比較した(図省略)。都心の事務所における改良後の気温は改良前よりも最大 0.21°C 高かった。この気温差は予測されるECに起因する人工排熱量の差によるものである。この事務所における気温への影響は、平日と休日の気温差($0.2^\circ\text{C}^{12)}$)や新型コロナウイルス感染拡大に伴う外出自粛による気温への影響(0.1°C^{13})と同程度であった。その一方で、住宅の気温差は 0.05°C 未満であり、無視できる程度であった。以上のように、モデルの改良によって、ECを改良前に比べて精度よく、詳細に再現することができるようになった。

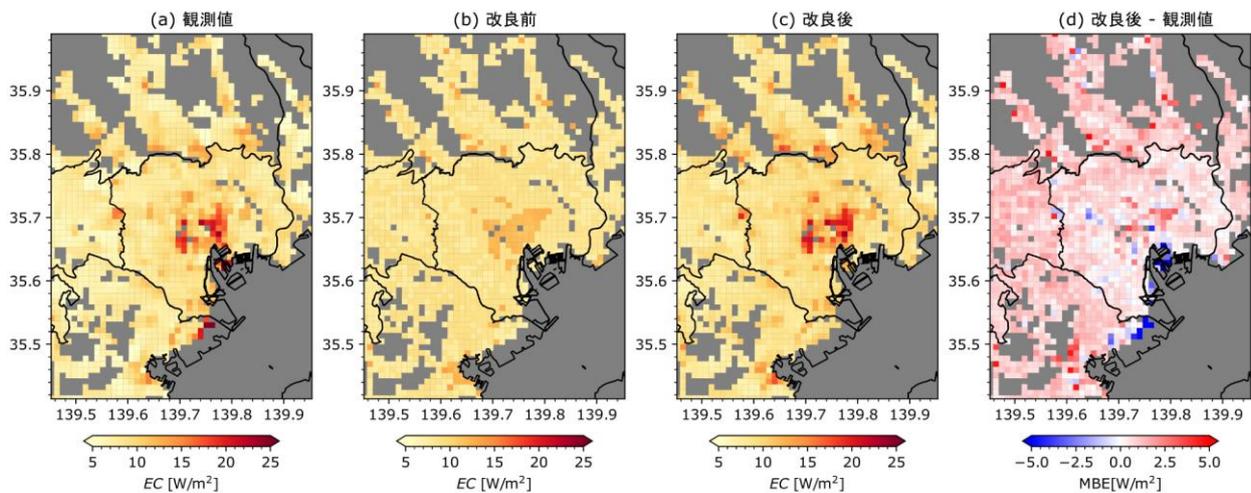


図2.2 2018年7-8月の平均電力需要(EC)の(a)実測、(b)改良前、(c)改良後、および(d)改良後と実測値の差の分布

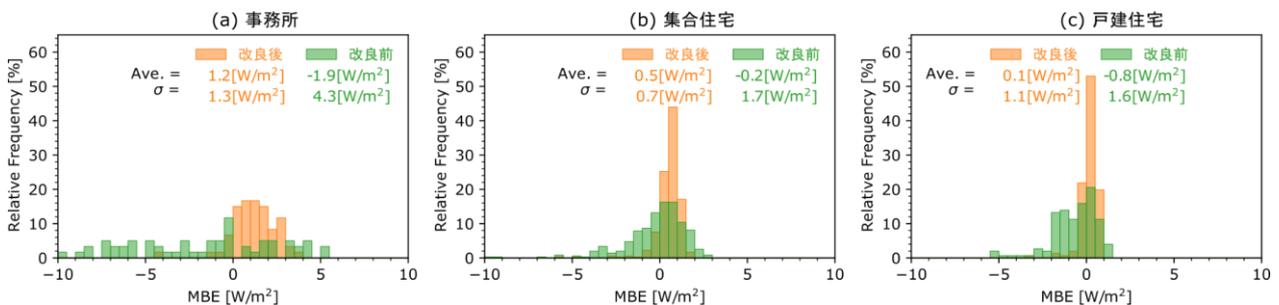


図2.3 2018年7-8月の(オレンジ)改良後、(緑)改良前の23区内における格子の建物用途別の平均誤差(MBE)のヒストグラム。

4.2 都市気象・建物エネルギーモデルの検証

(1) 代々木地区での検証：観測された熱収支と電力需要の再現性

4.1の改良部分についての検証を経たCM-BEMを用い、夏季(2018年7、8月)と冬季(2017年1、2月)を対象に、代々木エリアで測定された熱フラックスと電力需要の再現計算を実施した。図2.4は、夏季および冬季における放射および熱収支、電力需要の再現結果である。CM-BEMは観測された放射収支(Sup、Lup、 Q^*)および地表面付近熱収支(QH、QE等)を比較的良く再現できている(図2.4(上)と(中))。ただ

し現状では、夏季と冬季ともにQHを過大評価（夏季： $MBE=34.8\text{Wm}^{-2}$ 、冬季： $MBE=27.1\text{Wm}^{-2}$ ）する傾向にある。QEはQHと比較すると観測を再現できている（夏季： $MBE=-13.4\text{Wm}^{-2}$ 、冬季： $MBE=-2.0\text{Wm}^{-2}$ ）。なおこれらの精度は、世界で最も使用されている単層都市キャノピーモデル¹⁴⁾の精度に比べて大差ないことを確認している（図省略）。

図2.4（下）は、CM-BEMで計算した夏季および冬季における代々木エリアの観測サイトを含む変電所エリアの電力需要である。モデルは実際の電力需要を基本的によく再現できている（夏季： $MBE=0.2\text{W floor-m}^{-2}$ 、冬季 0.2 ： $MBE=0.2\text{W floor-m}^{-2}$ ）。特に夏季は、モデルによる計算値が観測値と1対1の線に比較的ばらつきが少なく対応しており、かつ計算値と観測値の出現頻度分布はよく似ている（図省略）。MAE、RMSEともにそれぞれ 0.6W floor-m^{-2} 、 0.7W floor-m^{-2} と小さくなっている。

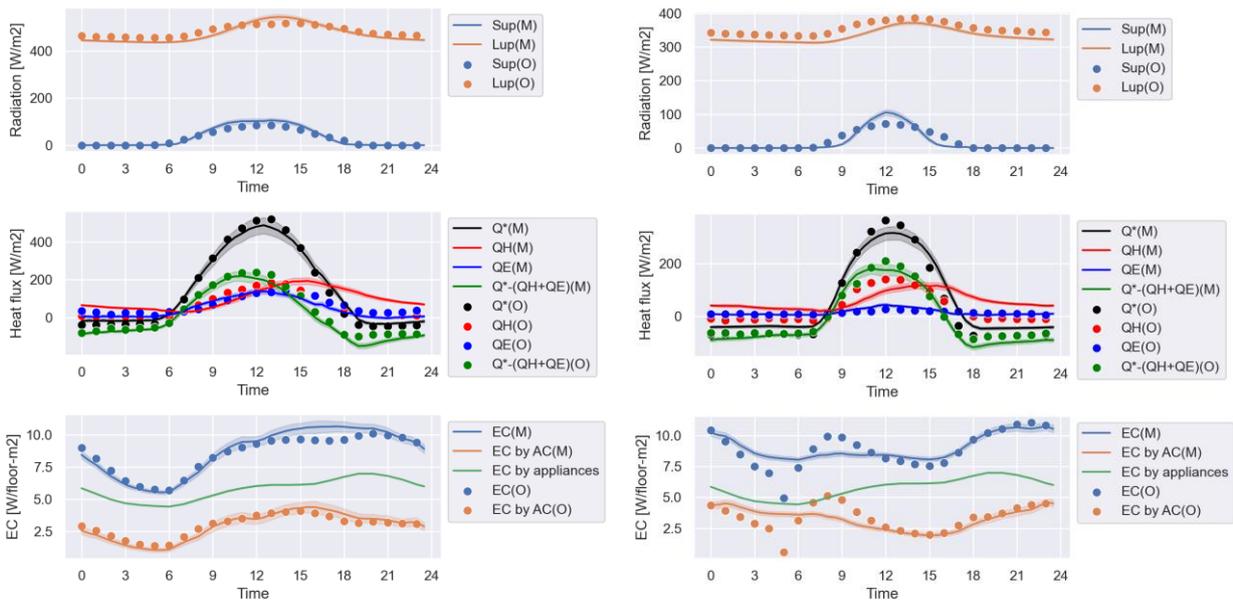


図2.4 地上高度50m付近における放射収支（上）、熱収支（中）、電力需要（下）の日内変化。左：2018年7-8月、右：2017年1-2月。M：モデルによる計算値（実線）、O：実測値（点）

(2) 代々木地区での検証：観測とモデルによる建物排熱推計の整合性

3.2 (2)で述べた手法による検証の結果、II-1の4章に既述の通り、都市気象・建物エネルギーモデルにより算出された代々木地区の夏季建物冷房排熱量は、同地区での観測にもとづく当該排熱量推計値と、その日変化のパターンにおいて良好な一致を示し、絶対値でみた両者の排熱差も後者推計値の誤差範囲内に概ね納まるものであった（図1.7）。これにより、都市気象・建物エネルギーモデルによる建物排熱量の再現性が検証された。

(3) 広域検証：夏季・冬季の首都圏における気温・電力需要の再現性

はじめに、モデルの夏季の首都圏における気温・電力需要の再現性を確認した。図2.5はアメダス5地点における地上気温の観測値とモデルの再現結果である。モデルは気温の日変化をよく再現できている。RMSE (root mean square error) は $1.67\text{--}2.22\text{°C}$ であった。この再現精度は既往研究^{2), 6), 15)}と比較して大差なかった。次に、格子内の建物用途が事務所、集合住宅、戸建住宅いずれか単一とみなすことのできる典型的な建物用途格子におけるモデルのECの再現精度を検証した。図2.6はそれぞれ典型的な格子における平日のEC時間変化である。モデルによるECの時間変化は実測とよく一致する。平日のnMAE (normalized mean absolute error) を指標としたECの再現精度は事務所 4.96% 、集合住宅 8.88% 、戸建住宅 8.95% であり、行動様式が平日とは異なる休日においても同程度の再現精度であることが確

認できた。これらの再現精度は既往研究^{2), 6), 15)}と比較して高いことが示された。図2.7は平日15時のECと気温の建物用途別の関係である。モデルの気温感応度(回帰直線の傾き)は観測値とよく一致した。気温感応度の時間変化も良好な一致を示した。このことはモデルが気候変動によるECに対する影響を合理的に推計することが可能であることを示唆する結果である。また、建物用途が混在する格子を含めた建物用途別のECのnMAE(平均値±標準偏差)は事務所で $16.3 \pm 9.7\%$ 、集合住宅で $11.2 \pm 4.5\%$ 、戸建住宅で $10.1 \pm 5.5\%$ であった。モデルは特定の地点におけるECだけでなく広域のECを街区レベル(1km^2)で再現可能であることが示された。

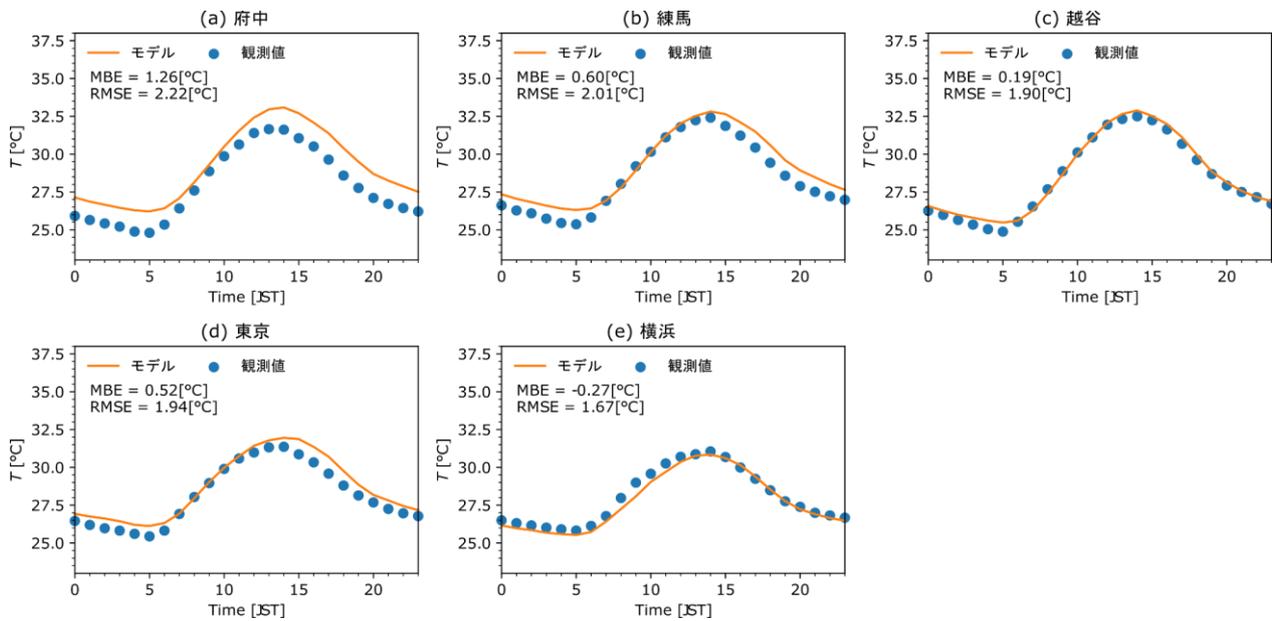


図2.5 アメダス観測地点 ((a) 府中、(b) 練馬、(c) 越谷、(d) 東京、(e) 横浜) における夏季の平均地上気温の(青)観測値と(オレンジ)モデルの比較。

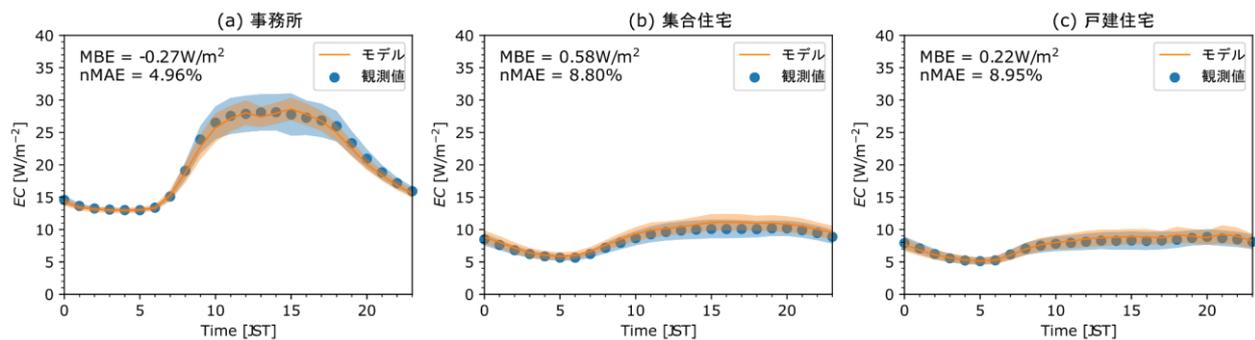


図2.6 典型的な建物街区 ((a) 事務所、(b) 集合住宅、(c) 戸建住宅) における夏季平日の電力需要日変化の(青)観測値と(オレンジ)モデルの比較。丸と実線は平均値、陰影は標準偏差をそれぞれ示す。

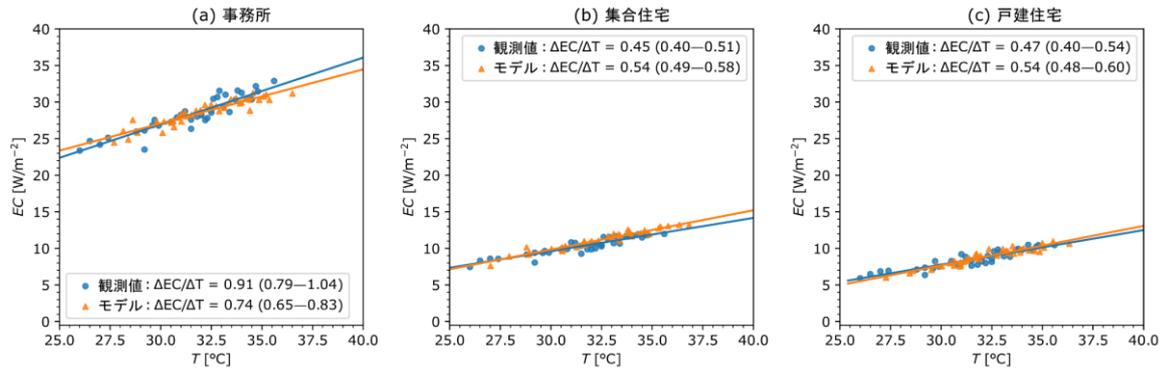


図2.7 典型的な建物街区 ((a) 事務所、(b) 集合住宅、(c) 戸建住宅) における夏季の平日15時の電力需要と地上気温の関係。(青) 観測値, (オレンジ) モデル。実線は回帰直線であり、 $\Delta EC / \Delta T$ は回帰直線の傾き、括弧内の値は回帰直線の傾きの95%信頼区間を示す。

夏季と同様に、モデルの冬季の首都圏における気温・電力需要の再現性を確認した。図2.8は地上気温の観測値とモデルの再現結果である。モデルは気温の日変化を概ね再現できていた。しかし、RMSEは2.23–2.81 $^{\circ}C$ であり、夏季の再現精度と比較して大きかった。特に、日中の気温を過小評価する傾向にあった。図2.9はそれぞれ典型的な格子における平日のEC時間変化である。モデルは集合住宅、戸建住宅それぞれにおけるECの時間変化を良好に再現した。一方で、モデルは事務所街で日中(11~18時)のECを大きく過小評価した。平日のnMAEを指標としたECの再現精度は事務所街で11.16%、集合住宅で6.51%、戸建住宅で10.62%であった。ECの再現精度は休日においても同程度であることが確認できた。夏季と同様、これらの再現精度は既往研究^{2), 6), 15)}と比較して高いことが示された。図2.10は平日15時のECと気温の建物用途別の関係である。モデルは集合住宅と戸建住宅の気温感応度は観測値と良好な一致を示した。一方で、事務所では気温が5 $^{\circ}C$ 以上の場合ではECは変化していない。つまり、観測値では、気温が15 $^{\circ}C$ 以下になると気温の低下とともに暖房需要が増加することでECが増加する。しかし、モデルでは暖房が稼働しないためにECを過小評価していたことが判明した。建物用途が混在する格子を含めた建物用途別のECのnMAE(平均値 \pm 標準偏差)は事務所街で15.1 \pm 7.3%、集合住宅で8.9 \pm 3.2%、戸建住宅で11.8 \pm 5.8%であった。モデルのEC分布は観測値と良好に一致した(図2.11)。このように、モデルの冬季計算については日中気温の過小評価と事務所における日中電力需要の過小評価を改善することが今後の課題として挙げられた。

以上により、都市気象・建物エネルギーモデルの首都圏における夏季、冬季の気温・電力需要の再現性が検証された。これらの計算結果をサブテーマ3の学習データとして提供した。

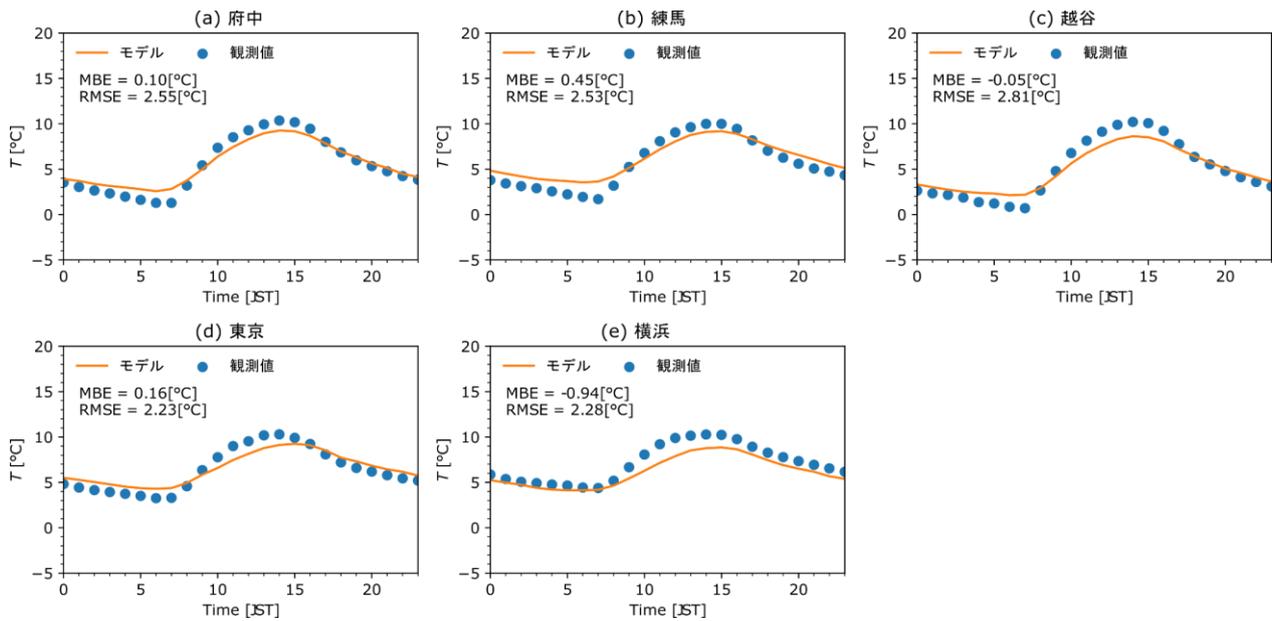


図2.8 アメダス観測地点 ((a) 府中、(b) 練馬、(c) 越谷、(d) 東京、(e) 横浜) における冬季の平均地上気温の (青) 観測値と (オレンジ) モデルの比較。

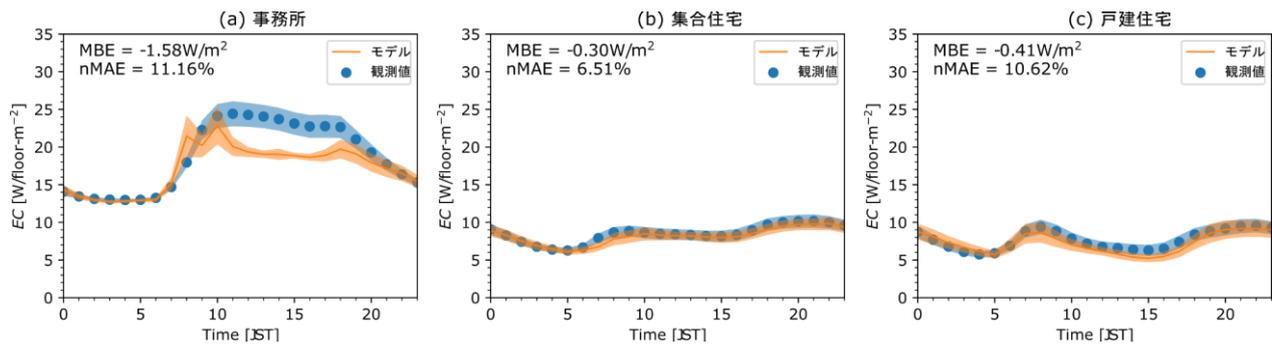


図2.9 典型的な建物街区 ((a) 事務所、(b) 集合住宅、(c) 戸建住宅) における冬季平日の電力需要日変化の (青) 観測値と (オレンジ) モデルの比較。丸と実線は平均値、陰影は標準偏差をそれぞれ示す。

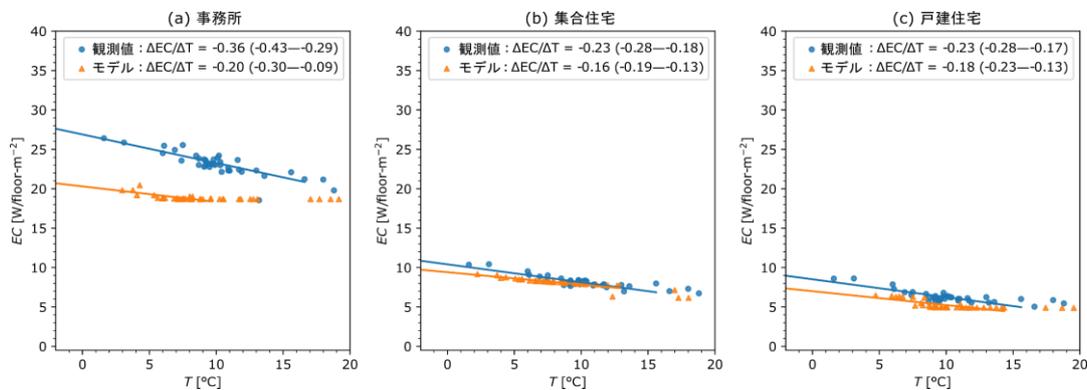


図2.10 典型的な建物街区 ((a) 事務所、(b) 集合住宅、(c) 戸建住宅) における冬季平日15時の電力需要 (EC) と地上気温 (T) の関係。(青) 観測値, (オレンジ) モデル。実線は回帰直線であり、 $\Delta EC/\Delta T$ は回帰直線の傾き、括弧内の数字は回帰直線の傾きの95%信頼区間を示す。

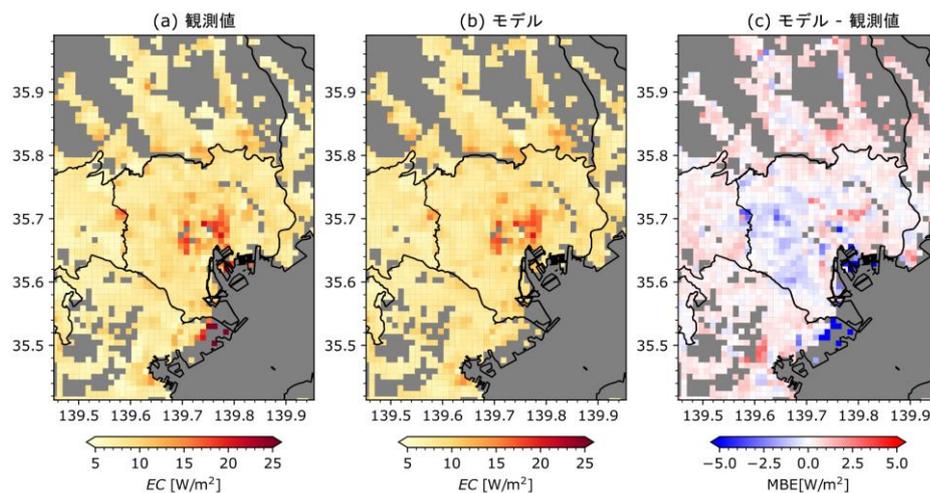


図2.11 2017年1-2月の平均電力需要 (EC) の (a)観測, (b)モデル, および(d) モデルと観測値の差の分布

以上の首都圏での検証に加え、3.2(3)で述べた夏季大阪市域でのフィードバック感度の視点からの検証も行った結果、気温と電力需要の実測資料にもとづく当該感度は日最大で約10%に達し、概ね同水準のフィードバック感度がWRF-CM-BEMにより再現可能である事が確認された²⁾。この結果は、約1割に達する排熱フィードバックによる夏季大阪での冷房電力消費の押し上げ効果の実態とモデルによるその再現性を示した。更に、検証後のWRF-CM-BEMにより地上気温に対する排熱フィードバック効果も解析した結果、夏季大阪の地上気温の昇温に対し1割～2割程度の自己強化をもたらし得る効果が推計された²⁾。これにより都市気候学分野の古典的課題の一つとされてきたポジティブフィードバック機構による気温上昇効果の定量化に関わる重要な知見が得られた。

4.3 都市気象・建物エネルギーモデルの適用

(1) 対策効果を加味したインベントリ推計基礎データの作成

基準ケースと建物省エネケース、それぞれにおける夏季と冬季のCO₂排出量の時間変化を図2.12に示す。夏季と冬季、いずれの建物用途でも建物省エネによりCO₂排出量が減少した。基準ケースからの変化率は夏季では事務所、集合住宅、戸建住宅でそれぞれ44.34%、24.79%、24.81%の減少であり、冬季では事務所、集合住宅、戸建住宅でそれぞれ30.95%、29.01%、29.30%の減少であった(表2.2, 表2.3)。各対策シナリオによる夏季と冬季の気温、人工排熱、CO₂排出量への影響を表2.2、表2.3にそれぞれ示す。空調排熱ゼロによる気温への影響は、夏季は約0.07-0.16℃の低下、冬季は0.16-0.19℃の上昇を示した。この気温変化量は既往研究¹⁵⁾とも整合する。緑化による気温への影響は夏季冬季いずれも0.1-0.2℃低下であった。建物省エネ、太陽光発電による気温への影響は0.1℃未満であり、無視できる程度であった。太陽光発電によるCO₂排出変化率は夏季では事務所、集合住宅、戸建住宅でそれぞれ28.65%、52.46%、55.38%の減少であり、冬季では事務所、集合住宅、戸建住宅でそれぞれ21.27%、18.76%、19.85%の減少であった。冬季は夏季と比較してCO₂削減率が小さい。これは冬季は夏季と比較して太陽高度が低く、太陽光発電量が小さくなるためと考えられる。建物省エネと太陽光発電を合わせた夏季のCO₂排出変化率は事務所、集合住宅、戸建住宅でそれぞれ72.99%、77.25%、80.19%の削減であった。つまり、建物省エネと太陽光発電を組み合わせることでNearly ZEH・ZEB(省エネルギーと再生可能エネルギーによりエネルギー消費量を75%以上削減)基準を達成することが示唆された。冬季のCO₂削減率は夏季と比較して小さく、事務所、集合住宅、戸建住宅でそれぞれ52.22%、47.77%、49.15%であった。以上により、省エネ等対策効果による民生部門の人工排熱・CO₂への対策効果が定量化された。これらの計算結果を、対策効果を加味したインベントリ推計基礎データとしてサブテーマ3に提供した。

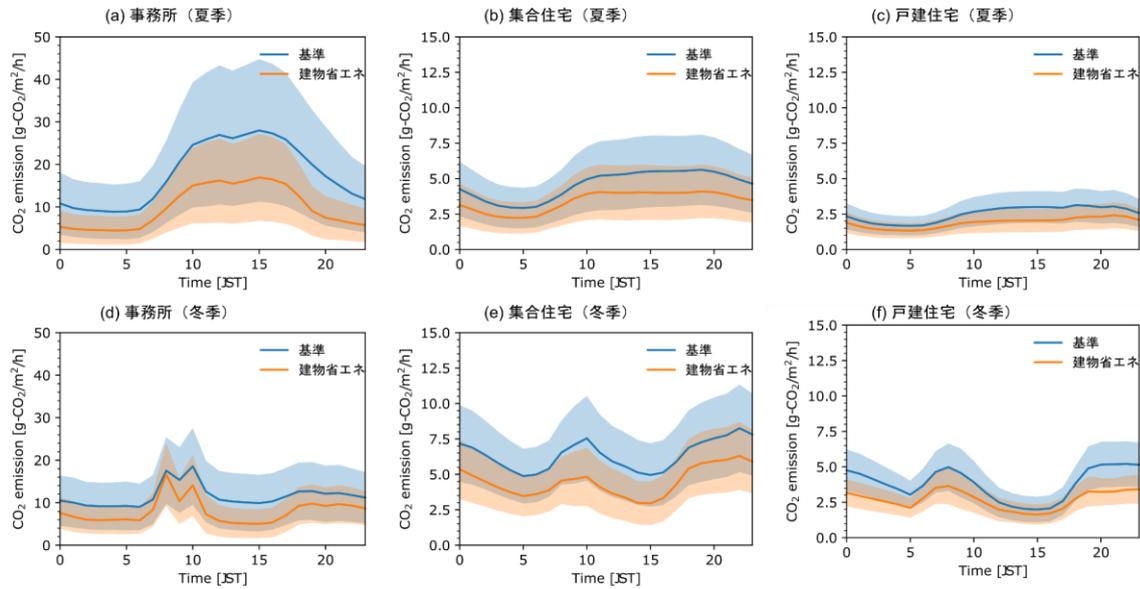


図2.12 (a-c) 夏季と(d-f) 冬季それぞれにおける基準ケース（青）と建物省エネケース（オレンジ）でのCO₂排出量の建物用途別時間変化．実線と陰影はそれぞれ平均値と標準偏差を示す．

表2.2 各対策ケースによる夏季の気温・人工排熱量・CO₂排出量への影響．括弧内は標準偏差．

対策ケース	建物用途	気温変化量(°C)	人工排熱量変化量(W/m ²)	CO ₂ 排出変化率(%)
建物省エネ	事務所	-0.06 (0.02)	-14.53 (6.77)	-44.34 (3.85)
	集合住宅	-0.07 (0.02)	-3.43 (1.33)	-24.79 (1.30)
	戸建住宅	-0.04 (0.01)	-2.08 (0.69)	-24.81 (1.16)
緑化	事務所	-0.11 (0.04)	-0.11 (0.26)	-0.36 (0.34)
	集合住宅	-0.17 (0.04)	-0.58 (0.21)	-0.94 (0.36)
	戸建住宅	-0.20 (0.04)	-0.42 (0.17)	-0.90 (0.31)
空調排熱ゼロ	事務所	-0.16 (0.06)	-52.80 (18.90)	-1.05 (0.45)
	集合住宅	-0.10 (0.03)	-21.49 (6.08)	-0.55 (0.18)
	戸建住宅	-0.07 (0.02)	-11.78 (3.31)	-0.42 (0.16)
太陽光発電	事務所	-0.01 (0.00)	-0.23 (0.16)	-28.65 (8.00)
	集合住宅	-0.05 (0.02)	-0.51 (0.21)	-52.46 (9.42)
	戸建住宅	-0.03 (0.01)	-0.24 (0.10)	-55.38 (6.83)

表2.3 各対策ケースによる冬季の気温・人工排熱量・CO₂排出量への影響。括弧内は標準偏差。

対策ケース	建物用途	気温変化量(°C)	人工排熱量変化量(W/m ²)	CO ₂ 排出変化率(%)
建物省エネ	事務所	-0.01 (0.03)	-0.96 (1.24)	-30.95 (5.54)
	集合住宅	-0.02 (0.06)	5.28 (1.53)	-29.01 (2.23)
	戸建住宅	0.11 (0.07)	2.53 (0.77)	-29.30 (1.43)
緑化	事務所	-0.12 (0.01)	-0.01 (0.14)	0.42 (0.27)
	集合住宅	-0.15 (0.02)	-0.10 (0.03)	0.72 (0.19)
	戸建住宅	-0.18 (0.03)	-0.04 (0.02)	1.00 (0.19)
空調排熱ゼロ	事務所	0.16 (0.04)	8.71 (4.66)	-0.83 (0.43)
	集合住宅	0.17 (0.03)	8.94 (2.83)	-0.86 (0.23)
	戸建住宅	0.19 (0.04)	5.47 (1.44)	-1.07 (0.29)
太陽光発電	事務所	-0.03 (0.01)	-0.03 (0.12)	-21.27 (7.37)
	集合住宅	-0.01 (0.01)	-0.06 (0.03)	-18.76 (3.21)
	戸建住宅	-0.02 (0.01)	-0.09 (0.03)	-19.85 (1.97)

*建物省エネケースは2016年12月28日0時～2017年1月4日23時、それ以外のケースは2016年12月28日0時～2017年2月19日23時をそれぞれ基準ケースとの比較期間とした。

(2) 気候変動影響を加味したインベントリ推計基礎データの作成

現在気候+1.0°Cにおける地上気温・電力需要・人工排熱を、現在気候とともに図2.13に示す。夏季と冬季のそれぞれの季節における地上気温・電力需要・人工排熱の頻度分布を見ると、夏季は1.0°Cの気温上昇（図2.13左上）に伴い電力需要（図2.13左中）、人工排熱（図2.13左下）ともに上昇している。電力需要に関して、擬似温暖化実験における日平均値は9.1 W/floor-m²であり、現在実験の値：8.7 W/floor-m²に比べて0.4 W/floor-m²大きい（図2.13左中）。この値は気温上昇1°C当たりの電力需要上昇量であり、夏季の気温感応度（ $\Delta EC/\Delta T$ ）に相当する。この $\Delta EC/\Delta T=0.4$ W/(floor-m²・°C)は、図2.7で示された住宅における $\Delta EC/\Delta T$ の値と整合的である。

冬季は1.0°Cの気温上昇（図2.13右上）に伴い電力需要（図2.13右中）が小さくなっている。擬似温暖化実験における日平均値は8.7 W/floor-m²であり、現在実験の値：9.0 W/floor-m²に比べて0.3 W/floor-m²小さい（図2.13右中）。冬季の気温感応度（ $\Delta EC/\Delta T$ ）は-0.3 W/(floor-m²・°C)であり、この値は図2.10で示された住宅における $\Delta EC/\Delta T$ の値と矛盾しない。

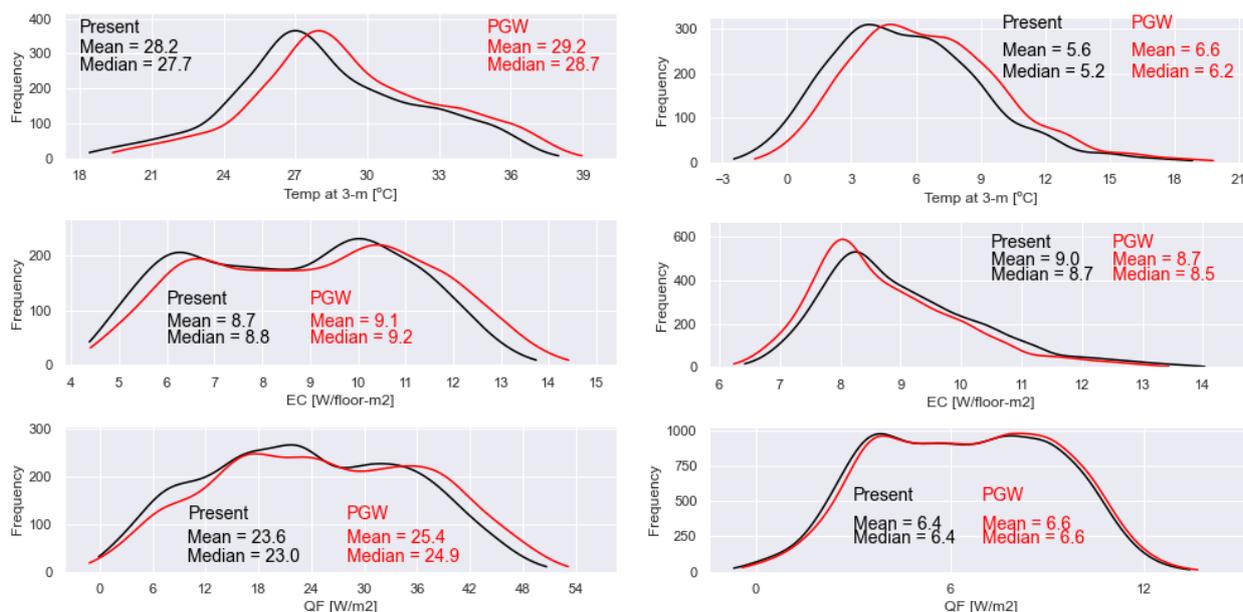


図2.13 気候変動（擬似温暖化）に伴う地上3-m気温（上）、電力需要（中）、人工排熱（下）の頻度分布の変化。左：2018年7-8月、右：2017年1-2月。Present：現在の気候条件下、PGW：擬似温暖化手法による将来気候条件下における結果。

5. 研究目標の達成状況

目標とした「サブテーマ1で取得された熱・CO₂排出量等のモニタリングデータを用いた都市気象・建物エネルギーモデルの改良と検証」については、改良後のモデルによる東京圏の広域電力需要とその気温依存性の再現精度等において既往研究を上回る性能を実現し、計画通り達成することができた。また、「検証後のモデルを国内主要都市域に適用し省エネ等の対策導入の影響を加味した数値実験結果の解析にもとづき熱・CO₂排出量の原単位等のインベントリ推計の基礎データを作成しサブテーマ3に提供する」目標についても、サブテーマ3の機械学習数理モデルに対する各種の温暖化対策の効果や気候変動の影響が合理的に反映された高精度な熱・CO₂排出量学習データの提供を通じ、達成できたものと評価している。以上の研究成果については、6編の査読付き論文（内、5編は国際誌掲載論文）として発表しており、成果普及のため国民との科学・技術対話も行っている。更に、都市気候学分野の古典的課題である排熱フィードバック効果の定量化をも成し得た点で、プラスアルファの成果を挙げる事ができた。これらの取り組みを通じ、「民生部門を対象とした熱・CO₂排出量インベントリの高精度化に寄与する」との最終目標についても、目標を上回る成果をあげることが出来たものと自己評価している。

6. 引用文献

- 国土交通省：我が国の住宅ストックをめぐる状況について
(<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001323208.pdf>) 最終閲覧日 2022年2月28日
- Y. KIKEGAWA, K. NAKAJIMA, Y. TAKANE, Y. OHASHI, T. IHARA: Applied Energy, 307, 118227 (2022), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118227>, A quantification of classic but unquantified positive feedback effects in the urban-building-energy-climate system.
- Y. Yamaguchi, Y. Miyachi, Y. Shimoda: Energy and Buildings, 152, 458-471 (2017) DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.07.007, Stock modelling of HVAC systems in Japanese commercial building sector using logistic regression.
- 今川 光、リジャル H. B.、宿谷昌則：日本建築学会論文集, 84, 855-864 (2019) DOI:

10. 3130/aije. 84. 855, 関東の住宅における窓開閉・冷暖房使用の相対的行動モデルの提案.
- 5) 渡辺健一郎: 日本建築学会論文集, 599, 103-110 (2006), DOI: https://doi.org/10.3130/aije.71.103_1, 実測調査による熱源システムのエネルギー利用効率に関する研究システムCOPを指標とした熱源システムの効率評価.
- 6) Y. Kikegawa, A. Tanaka, Y. Ohashi, T. Ihara, Y. Shigeta: Theoretical and Applied Climatology, 117(1), 175-193 (2014) DOI:<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00704-013-0996-8>, Observed and simulated sensitivities of summertime urban surface air temperatures to anthropogenic heat in downtown areas of two Japanese Major Cities, Tokyo and Osaka.
- 7) 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター (2018) 低炭素社会の実現に向けた技術および経済・社会の定量的シナリオに基づくイノベーション政策立案のための提案書民生家庭部門におけるCO2 排出量の中長期予測モデル構築に向けた検討
- 8) 経済産業省 (2014) エネルギー関係技術開発ロードマップ (案)
- 9) Kimura, F. & Kitoh, A. Downscaling by pseudo global warming method. The Final Report of the ICCAP, Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto, Japan (ICCAP, 2007).
- 10) IPCC, “AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis,” 2021.
- 11) Wright, J. S., Sobel, A. & Galewsky, J. Diagnosis of zonal mean relative humidity changes in a warmer climate. J. Clim. 23, 4556-4569 (2010).
- 12) F. Fujibe: Journal of the Meteorological Society of Japan, 65, 923-929 (1987) DOI: https://doi.org/10.2151/jmsj1965.65.6_923, Weekday-weekend Differences of Urban Climates, Part 1: Temporal Variation of Air Temperature and Other Meteorological Parameters in the Central Part of Tokyo.
- 13) K. NAKAJIMA, Y. TAKANE, Y. KIKEGAWA, Y. FURUTA, and H. TAKAMATSU: Urban Climate, 35,100728 (2021), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100728>, Human behaviour change and its impact on urban climate: Restrictions with the G20 Osaka Summit and COVID-19 outbreak.
- 14) Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. & Kimura, F. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models. Bound. Layer. Meteorol. 101, 329-358 (2001).
- 15) Y. Takane, Y. Kikegawa, M. Hara, T. Ihara, Y. Ohashi, S. A. Adachi, H. Kondo, K. Yamaguchi, N. Kaneyasu: International Journal of Climatology, 37(1), 1035-1052 (2017), DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5056>, A climatological validation of urban air temperature and electricity demand simulated by a regional climate model coupled with an urban canopy model and a building energy model in an Asian megacity.

II-3 数理モデルの開発・インベントリ及び簡易推計ツールの作成

埼玉県環境科学国際センター

温暖化対策担当

原 政之

東京大学

大学院新領域創成科学研究科環境社会システム学分野

井原 智彦、Du Jiaoman

〔要旨〕

本研究課題全体の目的は、土地利用・建物用途や人口等の容易に入手可能な情報を組合せ、統一的な手法で国や地方自治体が都市スケールの熱・CO₂排出量を推計できる手法を構築することであり、その結果を行政に利活用することである。まずはじめに、保刈ほか(2015)を始めとする複数の従来のCO₂インベントリもしくは人工排熱インベントリの計算手法に準じて、熱・CO₂排出量を推計し、従来手法での精度を確認した。この結果を踏まえて、サブテーマ2の計算結果（地域や気象条件等を変えた場合のインベントリの変化）を解析することで、熱・CO₂排出量を推計するための数理統計モデルを開発した。更に、開発した数理統計モデルの結果に基づいて、熱・CO₂排出量簡易インベントリ作成ツールを開発した。簡易インベントリ作成ツールは、都道府県ごとの熱・CO₂排出量の統計値だけではなく、熱・CO₂排出量の水平分布なども表現でき、季節など時間ごとの排出の違いなどを推計可能であり、容易に操作可能なグラフィカル・ユーザ・インターフェースを持ったツールである。簡易インベントリ作成ツールでは、入力パラメータの数を最大限減らすことによって、専門の研究者でない制作担当者でも容易に扱えるものである。また、行政担当者を対象としたニーズ聞き調査およびツールに関するヒアリングを行い、簡易インベントリ作成ツールの設計に反映させた。また、簡易インベントリ作成ツールを行政施策の立案の際に利活用した。

1. 研究開発目的

本研究課題全体の目的は、土地利用・建物用途や人口等の容易に入手可能な情報を組合せ、統一的な手法で国や地方自治体が都市スケールの熱・CO₂排出量を推計できる手法を構築することであり、その結果を行政に利活用することである。

この目的を達成するために、本サブテーマでは、過去に開発された熱・CO₂排熱量インベントリ作成手法を踏まえて新たな熱・CO₂排熱量インベントリを推計するための数理統計モデルを構築すること、また、政策担当者が自ら施策の効果までも推計することが可能となる熱・CO₂排熱量インベントリ作成のための容易に利用できるツール（簡易インベントリ作成ツール）を開発し、政策担当者の意見を取り入れて改良し、最終的に政策立案に利活用されることが目的である。

2. 研究目標

研究対象領域(首都圏)において、高精度かつ不確実性も考慮した熱・CO₂排出量インベントリを作成する。作成した熱・CO₂排出量インベントリ、サブテーマ2でのモデリングの結果に基づき、入手が容易な統計データのみから熱・CO₂排出量インベントリが作成できる数理統計モデルを開発する。作成した数理統計モデルを利用し、簡易に省エネ等の対策導入の影響を考慮したインベントリを推計可能なツール（簡易インベントリ作成ツール）を作成する。政策担当者を対象としたニーズ調査を行い、その結果を簡易推計ツールの設計に反映させる。研究全体を統括する。

3. 研究開発内容

サブテーマ3では、サブテーマ1、2で得られた新たなパラメータや原単位を用いて、新しい熱・CO₂排出量インベントリを作成すること、また、インベントリ推計の際に作成した数理統計モデルを用い

て、政策等の効果を簡易的に推計することが出来るツールを作ることが最終的な目的である。

はじめに、民生部門のCO₂および熱排出量に影響を与えるパラメータとして、研究対象地域（首都圏）における人口や土地利用、建物用途等のデータベースを整備する。また、整備したデータベースに加えて、東アジア大気汚染物質排出量グリッドデータベース（以下、EAGrid2010-Japan）（福井ほか（2014））等も活用し、複数の従来のCO₂インベントリもしくは人工排熱インベントリの計算手法に準じて、熱・CO₂排出量を推計し、従来手法での精度を確認する。①保刈ほか（2015）に準ずる手法、②都道府県別エネルギー消費統計からのトップダウン的手法の2つの従来手法で人工排熱インベントリを推計した。また、これらを比較・検証をすることにより、新たな推計手法を検討している。また、得られた知見を生かすための簡易推計ツールの設計を進めた。

まず、従来手法による人工排熱量推計について記す。2つの手法での推計を行うにあたり、以下の点を共通事項とした。

- ・対象地域: 東京都市圏（東京都（島しょ部を除く）、神奈川県、埼玉県、千葉県）
- ・空間分解能: 標準地域 3 次メッシュ
- ・対象年次および時間解像度: 2017 年における月別時刻別の値

手法①では、保刈ほか（2015）に準じて大気汚染物質のインベントリであるEAGrid2010-Japanに含まれる炭素排出係数を用いてCO₂排出量を人工排熱量へ換算することでインベントリを推計した。概要を図3.3.1に示す。CO₂排出量を排熱量に換算する際に使用するCO₂排出係数は、資源エネルギー庁公表の炭素排出係数一覧表（2020年1月改訂値）の数値を採用することとした。ここから、原子量および分子量を考慮（炭素原子量：12、二酸化炭素分子量：44なので、44/12）し、3.67倍をすることで燃料別の二酸化炭素の排出係数を算定した。排熱量算定の際には、消費燃料種およびそれら構成比を部門（排出源）別に決める必要がある。ただし、EAGrid2010-Japanには消費燃料種の情報がいないため、以下の統計資料から消費燃料を推定し、発熱量に応じた構成比を算定した（マップ調査のデータには、ばい煙発生施設ごとに使用燃料の情報があるが、燃料消費量の単位が不明であったため、採用しないこととした）。なお、建設・産業・農業機械については、建設機械や産業機械、農業機械由来の排出量であることから、使用燃料は軽油又はガソリンに限られると考え、燃料消費がそれぞれ10割であると想定した2種類の排熱量を算定することとしたため、本構成比の算定においては統計資料を使用しない。また、小規模固定燃焼施設のみ都道府県別のデータが入手可能だったため、それを採用した。

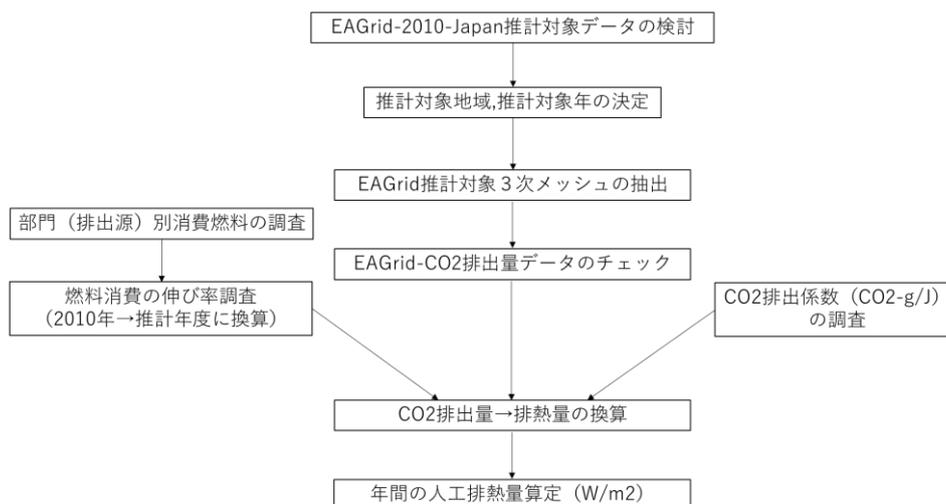


図3.1 手法①の人工排熱量推定手順概要。

なお、EAGrid2010-JapanのCO₂排出量データは2010年基準の数値である。そのため、その後の経済活動の変化等（消費燃料の変化）を考慮し、2017年版の人工排熱量を算定することとした。消費燃料構成比の算定には、排出源別に表3.1のデータを使用して算定した。データ年次は、排熱量算定年に合わせ2017年のも

のを採用した。また、2010年のCO₂排出量から2017年の排熱量を算定するため、7年間の経済活動の変化を燃料消費量の変化で推定した。部門(発生源)別に2010年と2017年の総発熱量を算定し、7年間の変化率を算定した。

表3.1 年度補正に使用した統計資料。

部門(排出源)	使用統計資料
マップ調査	総合エネルギー統計
小規模固定燃焼施設	都道府県別エネルギー消費統計
自動車	自動車燃料消費量調査

火力発電所からの排熱は、大気と海洋に放出される。今回の研究目的を考慮すると、大気放出分のみを抽出する必要があるため、国土交通省・環境省(2004)の既存資料を使用し、品川・大井火力発電所からの排気熱放出割合を算定した。当初、月別に排出割合を考慮する予定だったが、数値に大きな変動は見られなかったため、年平均値(31.8%)を採用することとした。東京電力火力発電所を含むメッシュについては、東京電力ホームページ

(<https://www.tepco.co.jp/corporateinfo/illustrated/electricity-supply/thermal-j.html>)にある所在地を用いた。

手法②では、都道府県別エネルギー消費統計からのトップダウン的な手法で、産業部門、家庭部門、運輸部門の3つの部門ごとについてそれぞれ推計した。産業部門、家庭部門については、都道府県別エネルギー消費統計から都道府県ごとに排出源種別ごとのエネルギー消費量を得る。運輸部門については、自動車燃料消費統計を用いた。これらを基に、空間方向には排出原ごとのメッシュ統計データを用いて按分した。平成27年国勢調査に関する地域メッシュ統計から、運輸部門については国土数値情報道路密度・道路延長メッシュを用いた。また、産業部門、家庭部門の時間方向の按分には、萱場ほか(2010)の値を用いた。運輸部門については、全国道路・街路交通情勢調査一般交通量調査(交通センサス)集計表(通行台数)から時刻別日内変動を算出し、このデータから按分した。運輸部門について、交通量の日内変動を用いて按分するための係数を図3.2に示す。ここでは、例として埼玉県全体での値を示す。都県ごとにこの係数を計算し、時間方向の按分に用いた。

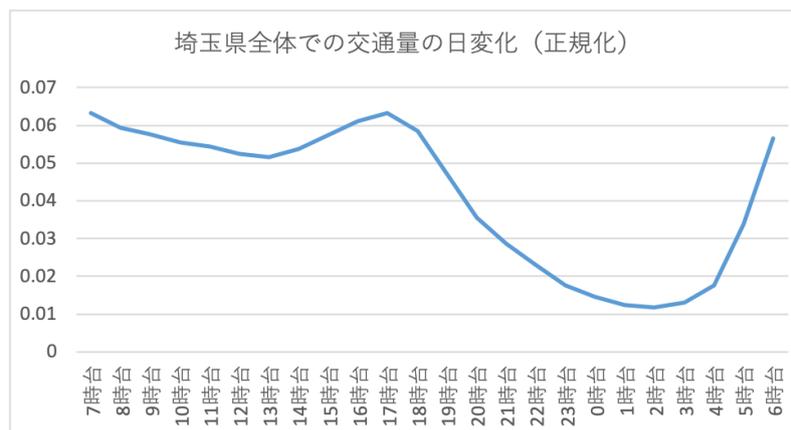


図3.2 手法②運輸部門における時間配分係数。

既存の熱・CO₂排出量推計手法やその結果を踏まえて、サブテーマ2で行われた新たな建物エネルギーモデルを用いたシミュレーション結果を用いて、熱・CO₂排出量推計のための数理統計モデルを構築した。図3.3に数理統計モデルの作成手順について記す。

まず、建物エネルギーモデルへの入力データおよび出力データを、構築する数理統計モデルにおいて学習可能な形式に変換する。建物エネルギーモデルの出力を学習期間と予測期間に分割し、学習期間のデータでもっとも誤差が少なかった手法を数理統計モデルとして選択する。ここでは、線形回帰、

SVM、Ridge、決定木、Adaboostの各手法を用いた。数理統計モデルの選択が終わった後、建物エネルギーモデルの入出力データのうちどの変数を用いるべきかについて、Correlation-based、Lasso、Random Forest、GXBoostの各手法で評価した。数理統計モデルにおいては、施策の効果も反映させることができるよう、建物エネルギーモデルにおいて複数の施策の効果を取り入れたシミュレーション結果も用いた。

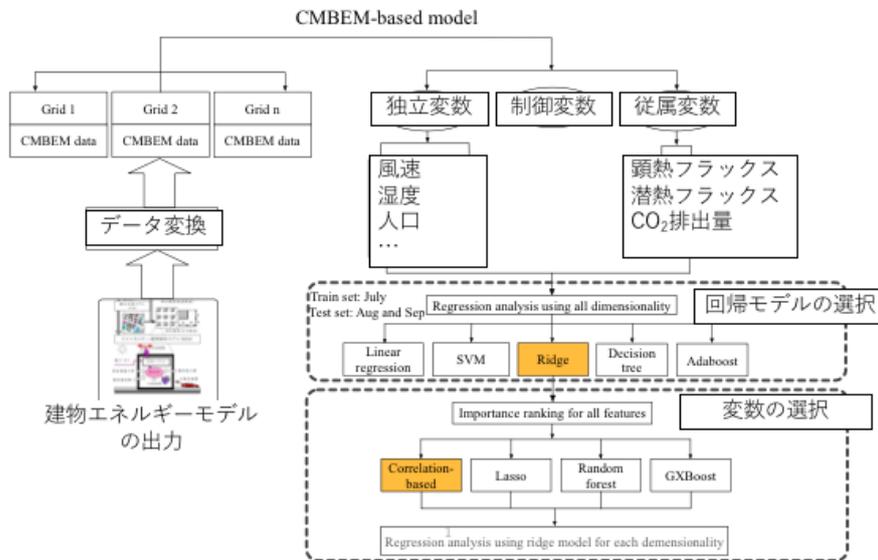


図3.3 数理統計モデル作成手順。

開発した数理統計モデルを元にして簡易インベントリ作成ツールの開発を進めた。簡易インベントリ作成ツールについては、地方自治体の地球温暖化対策の政策担当者（技術職）または地方自治体の研究所職員が利用することを想定していたが、政策担当者へのヒアリングによると政策担当者（行政職）からも直接使用したいとの声があったため、政策担当者（行政職）も使用できるよう設計した。また、数理統計モデルにおいて施策の効果も推計できるよう開発をしたため、現在削減が進まず課題となっている、家庭・業務部門のCO₂削減量（壁・屋根断熱性能、給湯器・空調性能、街区の緑被率など）の推計が可能となり、さらに自治体施策に貢献CO₂削減だけではなく、人工排熱削減によるHIを弱める効果も評価できるよう設計した。

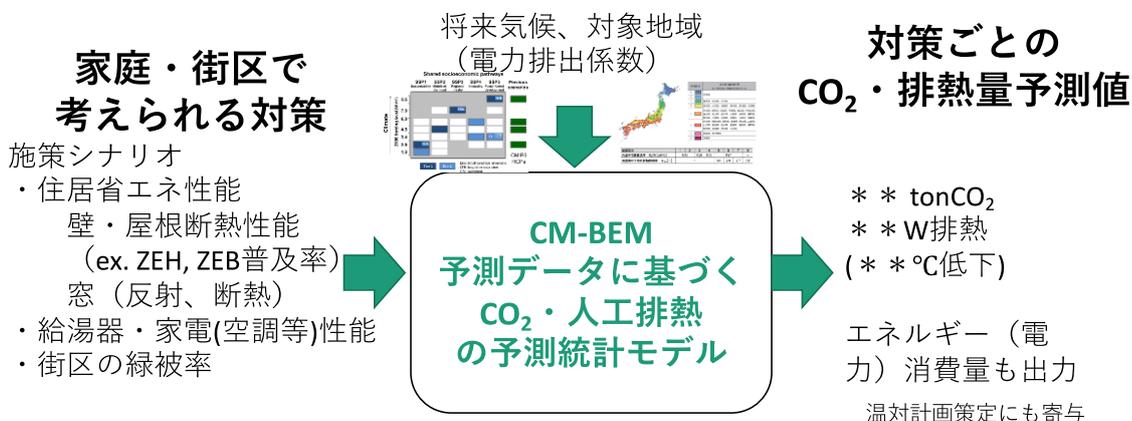


図3.4 簡易インベントリ作成ツール概要

簡易インベントリ作成ツールの仕様については、表3.2に示すとおりである。

表3.2 簡易インベントリ作成ツールの仕様。

対象地域	全国または都道府県ごと
空間解像度	標準地域メッシュ第3次地域区画（3次メッシュ）に準じる
時間解像度	1時間ごと，季節ごと，平日・週休日別
気候シナリオ	現在気候から+2℃上昇まで，0.5℃刻みで選択可能
電力排出係数	直接指定可能
排出量削減対策	現時点では，高効率家電普及率，地中熱ヒートポンプ普及率，住宅地の緑被率，太陽光発電普及率，住宅高断熱化率などを指定可能
出力値	3次メッシュでの人工排熱・二酸化炭素排出量推計値，および，それらの対象地域全体での集計値
出力形式	画像ファイル，および，shapefile形式やGeoJSON形式などでのデータのダウンロードが可能
開発環境	Jetty - Geoserver - PostGIS - PostgreSQLでの実装 (オープンソースのサーバアプリケーションのみを利用)

4. 結果及び考察

手法①で推計した結果について、部門ごとに示す。図3.5に例として、8月14時における排出種別排熱量を示す。図3.5 (a)、(b)では、オフロード車（建設機械、産業機械、農業機械）の排熱を示している。都市部において高い値となっているが、他の種別と比較すると、(a)(b)合計しても全体の2割弱である。(c)については、自動車からの排熱であり、高速自動車国道、主要幹線道路に沿って高い値が見られる。自動車からの排熱は、朝および夕方にピークが見られるが、その時間帯では、大きいところで100W/m²超となる。(d)小規模発生源では、(a)、(b)と近い分布であり、都市域で高い値となっている。日中で150 W/m²超となっている。

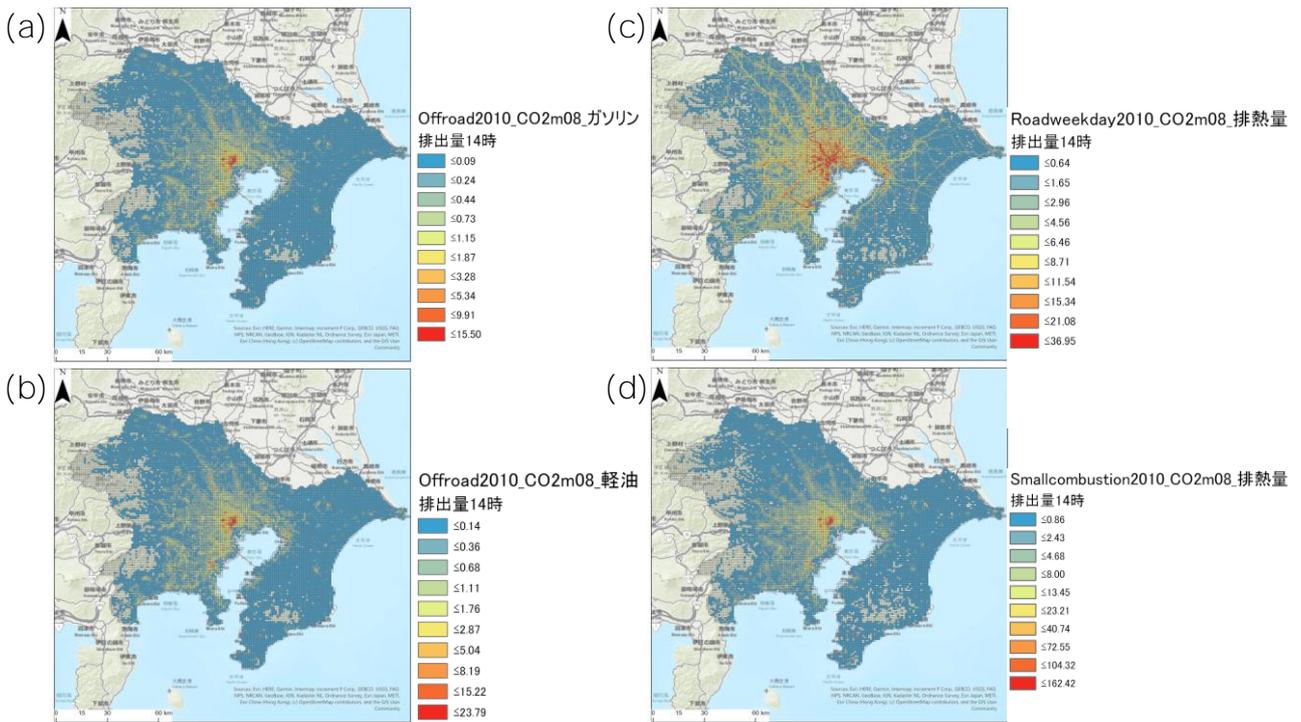


図3.5 推計した人工排熱量の例。8月14時での(a)オフロード車（ガソリン）、(b)オフロード車（軽油）、(c)自動車、(d)小規模固定発生源の8月14時の排熱量である。単位はW/m²。

簡易推計ツールにおいて、数十年程度先の近未来における将来推計が必要になることが考えられる。このことを踏まえて、過去数十年の推計を行い解析し、将来推計に生かすための解析も進めている。図3.6は手法②で行った1990年以降の人工排熱量推計である。都道府県別エネルギー消費統計やエネルギー消費統計を用いることにより、1990年まで遡った推計が可能となる。これらの推計および説明変数となるエネルギー消費量の指標となる社会経済データから統計モデルを構築し、簡易推計ツールに反映させることを目指している。また、研究成果として記載したHirano et al. (2020)のように、日本全国の各地に対応したCO₂排出量の統計モデルも検討している。

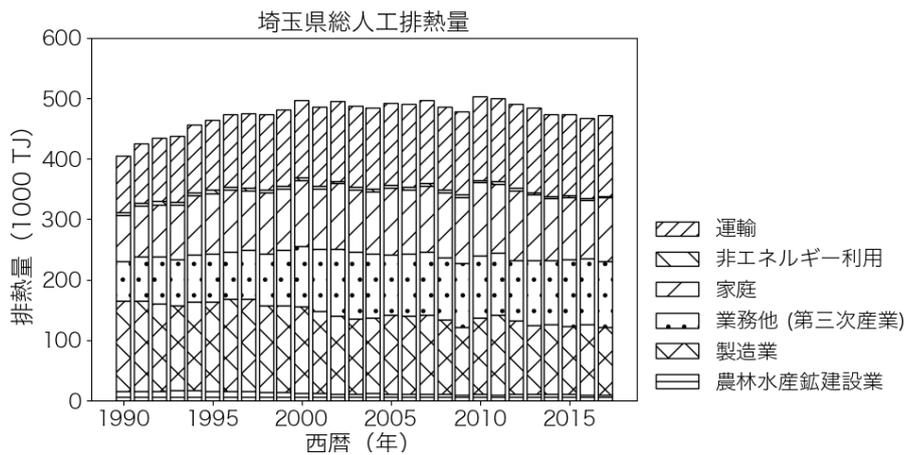


図3.6 年積算人工排熱量の経年変化（埼玉県内）

表3.3 それぞれの手法の特徴

	手法①	手法②
総排出量	EAGrid2010-Japan推計時に、全国のCO ₂ 排出総量を国の温室効果ガス排出インベントリと比較・検証され、整合的である。	都道府県別エネルギー消費統計および自動車燃料消費統計を使用しており、都道府県内での総量は担保されてい

空間分布	大気汚染物質排出量総合調査などの地点データを含むデータから積み上げているため、詳細な分布を表現可能。	る。 按分に用いているデータが直接排出源の位置を表現しているデータではないため、精度に限界がある。
年次変化	年次補正のために、総合エネルギー統計を用いている。1990年以降のデータについて入手可能であり、長期間の変化傾向を把握可能。	都道府県別エネルギー消費統計を用いて推計を行っている。1990年以降のデータについて入手可能であり、長期間の変化傾向を把握可能。

それぞれの手法の特徴について、表4.3.1にまとめた。手法①では、大気汚染物質排出量総合調査などのデータから積み上げているため、詳細な分布を表現できるが、局所的に非現実的な高い値が見られる箇所があった。燃料を大量に使用している事業所において、事業所敷地内で燃料を使用していない場合（運輸として燃料を消費など）には、実際の排出の場所と異なる場所に排熱が割り当てられてしまう。この問題については、地方自治体の地球温暖化対策計画制度によるCO₂排出量大規模事業所の事業所ごとの資料を当たることにより、事業者がどの部門で燃料を消費しているのか、把握することができ、回避することができると考えられる。また、令和元年度に推計した2つの手法では、サブテーマ1、2の知見から得られる新しい原単位等を反映することが困難であるため、数理統計モデルを用いたインベントリ推計手法を開発した。

前項で解説した手順に従い、数理統計モデルを開発した。開発した数理統計モデルは、回帰モデルとしてRidgeを用い、変数選択の際には、Correlation-basedを用いた。開発した数理統計モデルによって計算された人工排熱量の例を図3.7に示す。開発した数理統計モデルによって計算された人工排熱量は、CM-BEMで計算された人工排熱量の空間分布を適切に表現している。

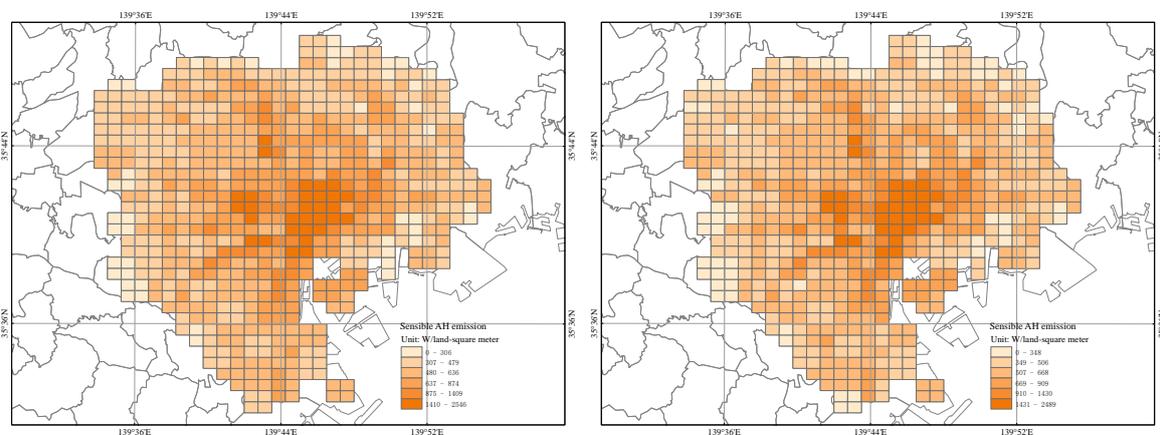


図3.7 8月月平均人工排熱の予測例。（左）CM-BEMによる予測結果、（右）開発した数理統計モデルによる予測結果。

開発した数理統計モデルを用いたインベントリ推計手法を用いて、政策担当者が容易に利活用することができる熱・CO₂排出量簡易推計ツールの開発を行った。このツールは、地方自治体の地球温暖化対策の政策担当者（技術職を想定）または地方自治体の研究所職員が利用することを想定したツールである。ツールの概要について、表3.2に示す。現在CO₂排出量削減が進んでおらず課題となっている、家庭・業務部門のCO₂削減量の推計が可能となり、自治体施策に貢献することを目指している。このツールを使うことにより、CO₂削減だけではなく、都市ヒートアイランドのうち人工排熱による昇温を弱める効果も評価することができる。CO₂は電源構成の変化で減ることが予測されるが、排熱は減らない点も評価可能とする。開発した数理統計モデルを簡略化した線形モデルを用いて、削減量から施策の組合

せをバックキャストした削減シナリオを提示することができるツールを作成した。また、操作がグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）で直感的に操作も可能で、スライダで数字（各種対策ごと）が変更可能で、空間分布も表示されるツールとする。ヒアリングにより得られた意見は、以下の通りである。

- 施策の効果の事前推計、事後検証が求められるが、現在ではこのような推計を簡易に行うことができるツールはなく、複数の施策メニューの効果を推計できる簡易インベントリ作成ツールは有用
- 既に行なっている施策を評価したいとのニーズあり（対応済み）
- 住宅省エネ性能等（断熱性能、省エネ機器導入）、地中熱ヒートポンプ、太陽光パネル
- 市町村単位での集計ができるとありがたい（後日可能とするため改良を行った）
- 他の統計データが重ねて表示されるとありがたい（対応済み）
- 個々の事業所・家屋が解像できてしまうと、個人情報保護などの観点から公開が必要な場合での利用は難しいので、現在のようにメッシュごとに集計されているのはありがたい（対応済み）

実際の政策担当者の意見を取り入れて改良を行った。開発が終了した簡易インベントリ作成ツールの実行例を図3.8に示す。

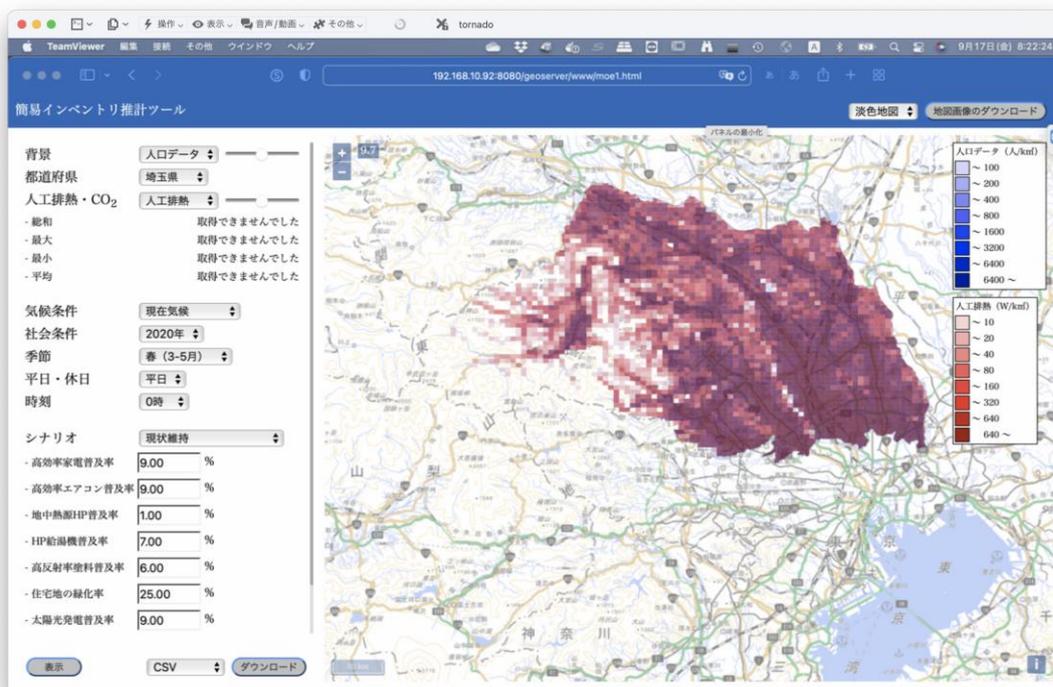


図3.8 簡易インベントリ作成ツール実行画面例

開発した簡易インベントリ作成ツールについては、埼玉県庁の環境部長・副部長に対して簡易インベントリ作成ツールに関して説明を行った。また埼玉県庁内の担当部署（温暖化対策課、エネルギー環境課）において、簡易インベントリ作成ツールに関して紹介し行政施策への展開についてヒアリングを行った。これらの結果、令和3年に策定された県全体の上位計画である埼玉県DXビジョンロードマップ (<https://www.pref.saitama.lg.jp/a0104/ai/dxvisionroadmap.html>) への簡易インベントリ作成ツールの県内での今後の展開についての計画が記された（ビジョンロードマップp.104に記載）。埼玉県DXビジョン・ロードマップについては、令和3年12月埼玉県議会地方創生・行財政改革特別委員会にて、令和4年1月5日に記者発表されている。また、埼玉県環境科学国際セ

ンターが令和3年度に発行した研究シーズを取り纏めた冊子である埼玉県環境科学国際センターシーズ集第3版に簡易インベントリ作成ツールの紹介を掲載した。このシーズ集については、令和4年1月21日に公開、記者発表が行われた。上記の埼玉県DXビジョンロードマップにおいて、今後簡易インベントリ作成ツール利活用について記載しており、R4に県庁内、R5に県内市町村向けに説明会などツールの普及を行うことを予定している。また、埼玉県庁内の担当部署（温暖化対策課、エネルギー環境課）において、簡易インベントリ作成ツールの利活用結果やツールの拡張を検討している。具体的には、埼玉県環境部エネルギー環境課においては運輸分野の熱・CO₂排出量の推計を可能にする拡張の検討、埼玉県環境部温暖化対策課においては、温暖化対策実行計画（区域施策編）改定に際しての簡易インベントリ作成ツールの利活用を検討している。

5. 研究目標の達成状況

当初目標に掲げていた、研究対象領域における、熱・CO₂排出量インベントリを作成した。また、作成した熱・CO₂排出量インベントリ、サブテーマ2でのモデリングの結果に基づき、入手が容易な統計データのみから熱・CO₂排出量インベントリが作成できる数理統計モデルを開発した。作成した数理統計モデルを利用し、簡易インベントリ作成ツールを作成し、政策担当者を対象としたニーズ調査を行い、その結果を簡易インベントリ作成ツールの設計に反映させた。また、簡易インベントリ作成ツールを地方自治体の計画・施策立案に利活用した。以上により、当初想定通りの目標を達成した。

6. 引用文献

- 1) 福井ほか（2014）大気汚染物質排出インベントリ-EAGrid2000-Japanの年次更新、大気環境学会誌、第49巻、第2号、pp. 117-125
- 2) 国土交通省、環境省（2004）平成15年度都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書
- 3) 萱場ほか（2010）重回帰分析による人工排熱量の推定、測候時報、Vol. 77、pp. 4-6

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) N. KANEYASU, S. ISHIDOYA, Y. TERA0, Y. MIZUNO and H. SUGAWARA: ACS Earth and Space Chem., 4 (2), 297-304, doi: 10.1021/acsearthspacechem.9b00314 (2020) (IF: 3.475), Estimation of PM2.5 emission sources in Tokyo Metropolitan area by simultaneous measurements of particle elements and oxidative ratio in air.
- 2) S. ISHIDOYA, H. SUGAWARA, Y. TERA0, N. KANEYASU, N. AOKI, K. TSUBOI and H. KONDO: Atmos. Chem. Phys., 20 (9), 5293-5308, doi:10.5194/acp-20-5293-2020 (2020) (IF: 6.133), O₂:CO₂ exchange ratio for net turbulent flux observed in an urban area of Tokyo, Japan, and its application to an evaluation of anthropogenic CO₂ emissions.
- 3) H. SUGAWARA, S. ISHIDOYA, Y. TERA0, Y. TAKANE, Y. KIKEGAWA and K. NAKAJIMA: Geophysical Research Letters, 48, e2021GL092600. doi:10.1029/2021GL092600 (2021) (IF: 4.720), Anthropogenic CO₂ emissions changes in an urban area of Tokyo, Japan, due to the COVID-19 pandemic: A case study during the state of emergency in April-May 2020.
- 4) 寺尾有希夫, 石戸谷重之: 大気化学研究, 45(045A01) (2021), 大都市における温室効果ガスと関連物質の大気観測.

【サブテーマ2】

- 1) Y. TAKANE, Y. OHASHI, C. S. B. GRIMMOND, M. HARA, and Y. KIKEGAWA: Environmental Research Communications, 2, 015004 (2020), (IF:2.104), DOI: [10.1088/2515-7620/ab6933](https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab6933), Asian megacity heat stress under future climate scenarios: Impact of air-conditioning feedback.
- 2) 高根雄也、伊藤享洋: 天気, 68, 149-163 (2021), DOI: 10.24761/tenki.68.3_149, なぜ浜松で歴代最高気温41.1°Cが観測されたか? -実況と過去の高温事例との比較による考察-
- 3) K. NAKAJIMA, Y. TAKANE, Y. KIKEGAWA, Y. FURUTA, and H. TAKAMATSU: Urban Climate, 35, 100728 (2021), (IF:5.731), DOI: [10.1016/j.uclim.2020.100728](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100728), Human behavior change and its impact on urban climate: Restrictions with the G20 Osaka Summit and COVID-19 outbreak.
- 4) H. SUGAWARA, S. ISHIDOYA, Y. TERA0, Y. TAKANE, Y. KIKEGAWA, and K. NAKAJIMA: Geophysical Research Letters, 48, e2021GL092600 (2021), (IF:4.720), DOI: [10.1029/2021GL092600](https://doi.org/10.1029/2021GL092600), Anthropogenic CO₂ emissions changes in an urban area of Tokyo, Japan due to the COVID-19 pandemic: A case study during the state of emergency in April-May 2020.
- 5) Y. KIKEGAWA, K. NAKAJIMA, Y. TAKANE, Y. OHASHI, T. IHARA: Applied Energy, 307, 118227 (2022), (IF:9.746), DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.118227](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118227), A quantification of classic but unquantified positive feedback effects in the urban-building-energy-climate system.
- 6) K. NAKAJIMA, Y. TAKANE, S. FUKUBA, K. YAMAGUCHI, and Y. KIKEGAWA: Energy and Buildings, 256, 111729 (2022), (IF:5.879), DOI: [10.1016/j.enbuild.2021.111729](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111729), Urban electricity-temperature relationships in the Tokyo Metropolitan Area.

【サブテーマ3】

- 1) Y. HIRANO, T. IHARA, M. HARA and K. HONJO: Sustainability, 12(11), 4678 (2020) (IF: 2.592), DOI: 10.3390/su12114678, Estimation of direct and indirect household CO₂ emissions in 49 Japanese cities with consideration of regional conditions

<査読付論文に準ずる成果発表>

【サブテーマ1】

該当無し。

【サブテーマ2】

該当無し。

【サブテーマ3】

該当無し。

<その他誌上発表（査読なし）>

【サブテーマ1】

- 1) 寺尾有希夫、地球環境研究センターニュース2020年4月号, 31(1), 202004_352001 (2020) AGU Fall Meeting 2019参加報告2「都市からのCO2排出」編

【サブテーマ2】

- 1) 亀卦川幸浩：太陽エネルギー、47, 6, 58-62 (2021) 「都市の気候と空調エネルギー需要に対する排熱フィードバック効果の定量化」
- 2) 中島虹、高根雄也、亀卦川幸浩、山口和貴：太陽エネルギー、47, 6, 63-68 (2021) 「夏季電力需要の再現性に着目した領域気候・都市気候・建物エネルギー連成数値モデルの検証」

【サブテーマ3】

- 1) 原政之：太陽エネルギー、47, 6, 54-57 (2021) 「建物エネルギーモデルとモニタリングによる炭素排出量・人工排熱量の高精度な推計手法の開発」

(2) 口頭発表（学会等）

【サブテーマ1】

- 1) N. KANEYASU, S. ISHIDOYA, H. KONDO, Y. MIZUNO and Y. TERA0, The 11th Asian Aerosol Conference 2019 (2019) Estimation of PM2.5 emission source in Tokyo Metropolitan area by simultaneous measurements of particle elements and oxidative ratio in air, City University of Hong Kong, Hong Kong, China
- 2) 兼保直樹、石戸谷重之、水野祐介、第60回大気環境学会年会（2019）粒子元素組成と大気主成分 oxidative ratio の同時観測による PM2.5 高濃度イベントの解析（2）－春季イベントへの適用－、東京農工大学、東京
- 3) 石戸谷重之、菅原広史、寺尾有希夫、高根雄也、兼保直樹、日本気象学会 2019 年度秋季大会（2019）代々木街区での都市ガス消費と自動車起源の人工排熱量の分離推定に向けた二酸化炭素フラックスおよび酸素/二酸化炭素交換比の同時観測、福岡国際会議場、福岡
- 4) Y. TERA0, H. SUGAWARA, S. ISHIDOYA and N. KANEYASU, AGU Fall Meeting (2019) Simultaneous atmospheric observation of CO₂ flux, ¹⁴CO₂, O₂ and CO₂ concentrations and aerosol components in Tokyo for partitioning of CO₂ flux into emission sources, San Francisco, USA.
- 5) Y. TERA0, Y. TOHJIMA, S. ISHIDOYA, M. OUCHI, Y. OSONOI, H. MUKAI, T. MACHIDA, H.

- SUGAWARA, N. KANEYASU and Y. NIWA: European Geoscience Union General Assembly 2020 (2020), Atmospheric observations of CO₂, ¹⁴CO₂ and O₂ concentrations to capture fossil fuel CO₂ emissions from the Greater Tokyo Area, online.
- 6) 石戸谷重之, 菅原広史, 寺尾有希夫, 高根雄也, 亀卦川幸浩, 中島虹, 兼保直樹, 青木伸行、日本気象学会 2021 年度秋季大会 (2021) 大気観測に基づく代々木街区 CO₂ 排出量の起源別推定- 緊急事態宣言に伴う排出量変動の検出 -, オンライン

【サブテーマ 2】

- 1) Y. TAKANE, Y. OHASHI, C. S. B. GRIMMOND, M. HARA, and Y. KIKEGAWA: American Meteorological Society 100th annual meeting (AMS100), Boston, USA, 2020 “Asian megacity heat stress under future climate scenarios: Impact of air-conditioning feedback.”
- 2) Y. TAKANE, K. NAKAJIMA, Y. KIKEGAWA, H. SUGAWARA, S. ISHIDOYA, Y. TERAOKA, K. YAMAGUCHI, N. KANEYASU, and M. HARA: European Geoscience Union General Assembly 2020, Vienna, Austria (オンライン開催に変更), 2020 “Off-line urban building energy model reproducibility against ‘observed’ anthropogenic heat and electricity consumption.”
- 3) 中島虹、高根雄也、亀卦川幸浩、古田泰子、高松大樹：日本気象学会2020年度秋季大会(2020) 「G20大阪サミットおよび新型コロナウイルスによるヒートアイランド緩和効果」
- 4) 中島虹、高根雄也、福場信哉、山口和貴、亀卦川幸浩：日本ヒートアイランド学会第16回全国大会 (2021) 「東京都心における電力需要気温感応度の時空間特性」
- 5) 中島虹、高根雄也、亀卦川幸浩、福場信哉、山口和貴：日本ヒートアイランド学会第16回全国大会 (2021) 「夏季電力需要に着目した領域気候・都市気候・建物エネルギー連成数値モデルの検証」
- 6) 高根雄也、中島虹、亀卦川幸浩、古田泰子、高松大樹：日本ヒートアイランド学会第16回全国大会 (2021) 「新型コロナ外出自粛で都市気候はどう変わったか？」
- 7) 亀卦川幸浩：日本太陽エネルギー学会太陽光発電部会第31回セミナー(2021) 「都市の気候と空調エネルギー需要に対する排熱フィードバック効果の定量化」
- 8) 中島虹、高根雄也、亀卦川幸浩、山口和貴：日本太陽エネルギー学会太陽光発電部会第31回セミナー (2021) 「夏季電力需要の再現性に着目した領域気候・都市気候・建物エネルギー連成数値モデルの検証」
- 9) 中島虹・高根雄也・亀卦川幸浩、山口和貴：日本気象学会2021年度秋季大会 (2021) 「電力需要の気温感応度に着目した領域気候・都市気候・建物エネルギー連成数値モデルの検証」
- 10) 高根雄也、中島虹、亀卦川幸浩：日本気象学会2021年度秋季大会 (2021) 「新型コロナ外出自粛で都市気候はどう変わったか？」

【サブテーマ 3】

- 1) 原政之、気象庁地球環境業務研修講演 (2019) 埼玉県の気候変動適応の取組-都市ヒートアイランドおよび気候変動への適応-, 気象庁、東京
- 2) M. HARA, The Workshop on Air Quality and Climate Research Across Scales (2019) Recent Progress on Climate Change Adaptation in Japanese Local Governments -Urban Climate and Global Warming -, Central Research Institute of Electric Power Industry, Tokyo
- 3) 原 政之、本城慶多、井原智彦、第 60 回大気環境学会全国大会 (2019) 地域スケールでの炭素排出量・人工排熱量空間分布の推計手法の開発、東京農工大学、東京
- 4) 原 政之、第 14 回日本ヒートアイランド学会全国大会 (2019) 地域スケールでの人工排熱量空間分布の経年変化、千葉
- 5) 平野勇二郎、原政之、井原智彦、第 16 回環境情報科学ポスターセッション (2019) 家庭におけ

る用途別エネルギー消費量へ及ぼす外気温条件の影響、日本大学会館、東京

- 6) 原政之、気象庁東京管区気象台第 68 回気候情報連絡会会議講演 (2019) 埼玉県の気候変動適応の取組-都市ヒートアイランドおよび気候変動への適応-、気象庁、東京

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ 1】

- 1) 国立環境研究所公開シンポジウム2019 (主催：国立環境研究所、2019年6月14日、北九州市立男女共同参画センタームーブ、来場者210名) にて成果紹介 (都市から排出されるCO₂と熱の起源を大気モニタリングでとらえる)
- 2) 国立環境研究所公開シンポジウム2019 (主催：国立環境研究所、2019年6月21日、港区メルパルクホール、来場者640名) にて成果紹介 (都市から排出されるCO₂と熱の起源を大気モニタリングでとらえる)
- 3) 2021年度産総研エネルギー・環境シンポジウムシリーズ「SDGs時代における環境影響評価技術の展望」 (主催：産業技術総合研究所、2021年12月14日、オンライン、聴講者約130名にて成果紹介 (都市から排出されるCO₂の起源を大気モニタリングでとらえる))

【サブテーマ 2】

- 1) 亀卦川幸浩、令和2年度昭島環境未来会議、基調講演「都市と気候変動」 (主催：東京都昭島市、2020年11月15日、昭島市役所、出席者30名) にて講演
- 2) 亀卦川幸浩、令和3年度昭島環境未来会議、基調講演「カーボンニュートラル」 (主催：東京都昭島市、2022年1月30日、オンライン開催、出席者約30名) にて講演

【サブテーマ 3】

- 1) 原政之、公益社団法人日本産業退職者協会見学会、埼玉県環境科学国際センター、加須市 (2019) 埼玉県環境科学国際センター出前講座「地球温暖化 (影響と対策)」
- 2) 原政之、上尾市環境推進協議会平成 31 年度 第 1 回環境学習会、上尾公民館、上尾市 (2019) 埼玉県環境科学国際センター出前講座「地球温暖化 (影響と対策)」
- 3) 原政之、公民館高齢者学級、加須市立三俣公民館、加須市 (2019) 県政出前講座、「地球温暖化 (影響と対策)」
- 4) 原政之、尾間木地区自治会連合会防犯防災研修会、プラザイースト、さいたま市 (2019) 県政出前講座「地球温暖化 (都市の気候の変化)」
- 5) 原政之、朝霞市役所職員研修、朝霞市コミュニティセンター、朝霞市 (2019) 埼玉県環境科学国際センター出前講座「地球温暖化 (影響と対策)」
- 6) 原政之、志木市環境講座、志木市いろは遊学館、志木市 (2020) 県政出前講座「地球温暖化 (影響と対策)」
- 7) 原政之、埼玉県環境計量協議会新春講演、ラフレさいたま、さいたま市 (2020) 県政出前講座「地球温暖化 (都市の気候の変化)」
- 8) 原政之、埼玉県環境科学国際センター講演会、埼玉会館、さいたま市 (2020) 私たちが変えてきた気候 ～地球温暖化だけではない気候変動～、(来場者380名)
- 9) 原政之、県政出前講座、公益社団法人日本産業退職者協会見学会、2020年10月15日、朝日工業株式会社埼玉事業所、zoom開催
- 10) 原政之、埼玉大学講義「埼玉学のすすめ Part 7」「留学生と学びなおす環境問題対策プロジェクト～Part 1」、Mitigation and adaptation strategies for climate change - Practice in Saitama Prefecture 気候変動への緩和・適応策 埼玉県での実例、11月28日
- 11) 原、長谷川、+1.5℃の埼玉県 - 都市部での気候変動影響・対策を考える、気候変動適応サイ

エンスカフェ，埼玉県気候変動適応センター主催，2021年12月18日（オンライン）30名

（４）マスコミ等への公表・報道等＞

【サブテーマ１】

- 1) プレスリリース（2020年5月15日、産業技術総合研究所、国立環境研究所）「都市域のCO₂排出を大気観測から起源別に推定ーゼロエミッション技術社会実装時のCO₂削減効果検証に向けてー」
- 2) 上記に係る報道発表（5件）：
 - 日刊工業新聞（2020年5月18日、朝刊18面）
 - 電気新聞（2020年05月20日、朝刊2面）
 - 日刊油業報知新聞（2020年06月08日、朝刊2面）
 - 住研タイムス（2020年7月号 2面）
 - 日刊ケミカルニュース（WEB）
- 3) プレスリリース（2021年7月30日、産業技術総合研究所、国立環境研究所、明星大学）「緊急事態宣言発令に伴うCO₂排出量の変化を東京住宅街において検出ー大気観測に基づくエネルギー消費構造変化の評価ー」
- 4) 上記に係る報道発表（4件）：
 - JPubb（WEB）（2021年7月30日）
 - 電気新聞（2021年08月3日）
 - 化学工業日報（2021年08月30日、朝刊3面）
 - 読売新聞（2021年8月12日、夕刊9面）

【サブテーマ２】

- 1) プレスリリース（経済産業記者会、経済産業省ペンクラブ、中小企業庁ペンクラブ、資源記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会、筑波研究学園都市記者会、立川市政記者クラブに資料配布）、「新型コロナ外出自粛でヒートアイランド緩和と省エネ効果ーテレワークの普及は都市の気候変動適応策になり得るか？ー」、2020年11月6日
- 2) 朝日新聞（2020年11月16日、夕刊6面、「コロナ冷えた都心 4～5月0.5度低下経済縮小で排熱減る」）
- 3) 環境ビジネスオンライン（2020年11月10日、「新型コロナで外出自粛、省エネ・ヒートアイランド緩和効果があった？ 産総研」）
- 4) 電気新聞（2020年11月12日、朝刊2面、「「外出自粛」は省エネに 産総研など大阪で確認 温度上昇の緩和も」）

【サブテーマ３】

- 1) 原政之、埼玉県環境科学国際センターニュースレター第53号（Vol.53）2021年10月発行、ココが知りたい埼玉の環境（45）－都市における地球温暖化対策はどのように進める必要がありますか？

（５）本研究費の研究成果による受賞

【サブテーマ１】

該当無し。

【サブテーマ２】

- 1) 日本ヒートアイランド学会第16回全国大会奨励賞（2021）、中島虹・高根雄也・福場信哉・山口和貴・亀卦川幸浩：「東京都心における電力需要気温感応度の時空間特性」

【サブテーマ3】

該当無し。

IV. 英文Abstract

Development of High Accuracy Estimation Method for Carbon and Anthropogenic Heat Emissions with a Building Energy Model and Monitoring Data

Principal Investigator: Masayuki Hara

Institution: Center for Environmental Science in Saitama, Kazo City, Saitama, JAPAN

Tel: +81-480-73-8331 / Fax: +81-480-2031

E-mail: hara.masayuki@gmail.com

Cooperated by: National Institute for Environmental Studies, Meisei University, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, the University of Tokyo

[Abstract]

Key Words: Anthropogenic Heat, Carbon Emission, Building Energy Model, Thermal Environment Mitigation, Zero-carbon City Planning

Currently, 55% of the world's population is concentrated in cities, and 70% of greenhouse gas emissions come from cities. The IPCC's Fifth Assessment Report concludes that heat waves will become more frequent in the world's major cities during this century due to not only a 2-5°C increase in temperature caused by global warming, but also a 1-2°C increase in temperature caused by the urban heat island effect. This is why urban climate change countermeasures are important. Therefore, urban climate change countermeasures are becoming more and more important, and there is a need to promote adaptation and mitigation measures against climate change, including the worsening of the heat environment.

In designing the above measures in cities, accurate estimation of anthropogenic heat and carbon emissions (hereafter referred to as heat and CO₂ emissions) as both UHI and GW factors is necessary.

In this study, we developed a new method for estimating heat and CO₂ emissions in urban areas that differs from conventional methods in that it includes quantification of accuracy and uncertainty through comparison and verification with measured heat and CO₂ emissions. In the actual measurement, we developed an original observation and analysis method that can estimate heat and CO₂ emissions for each emission source based on radiocarbon isotope ratios and oxygen concentration measurements. Using the heat and CO₂ emissions obtained by this method, we verified the prediction accuracy of the heat and CO₂ emissions obtained by improving and applying our original numerical model of urban meteorology and building energy balance. Combining the verified model calculations with readily available information on land use, building use, and population, we developed a unified method for national and local governments to estimate heat and CO₂ emissions on an urban scale. We also developed a simplified inventory tool that enables simple assessment of the impact of measures, and utilized it for policy planning by a local government.