

# 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

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～令和3年度

研究代表者 : 原 政之(埼玉県環境科学国際センター) (現所属 気象庁数値予報課)

サブリーダー : 寺尾 有希夫(国立環境研究所)

亀卦川幸浩(明星大学)

研究分担者 : 石戸谷 重之, 兼保 直樹, 高根 雄也, 中島 虹(産業技術総合研究所)

井原 智彦, Du Jiaoman(東京大学)

研究協力者 : 菅原 広史(防衛大学校), 山口 和貴(東京電力HD)

平野 勇二郎(国立環境研究所), 大竹 秀明(産業技術総合研究所)

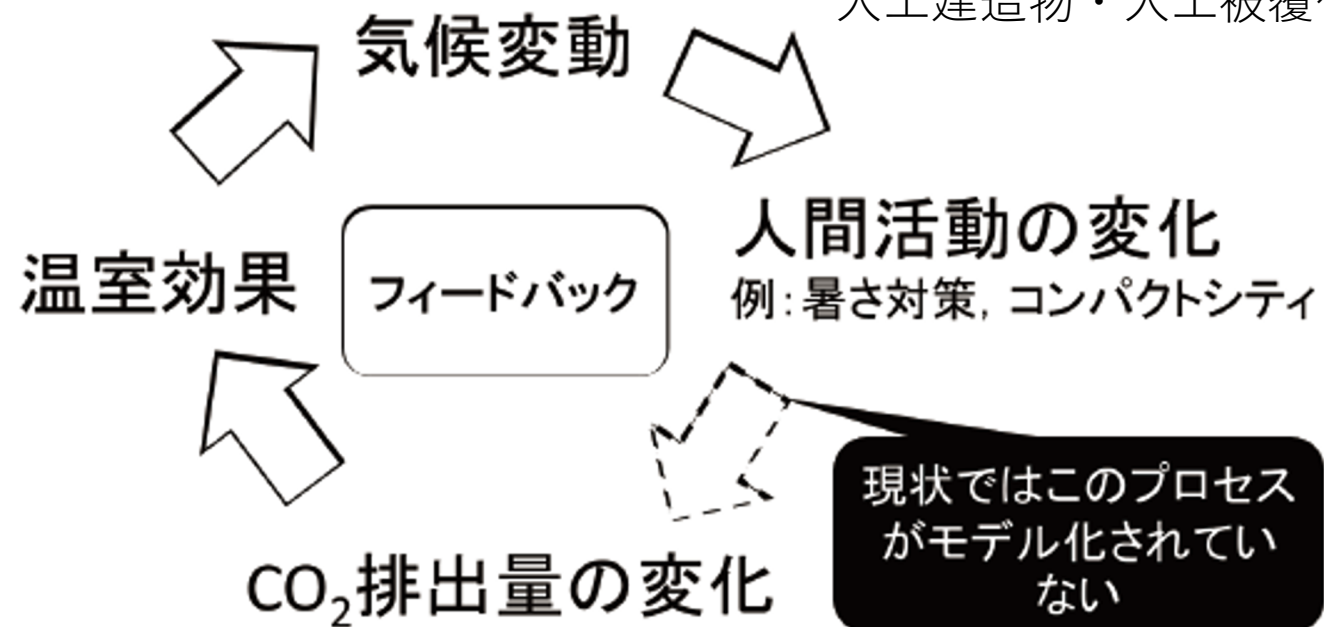
武藤 洋介, 本城 慶多(埼玉県環境科学国際センター)

# 1. はじめに

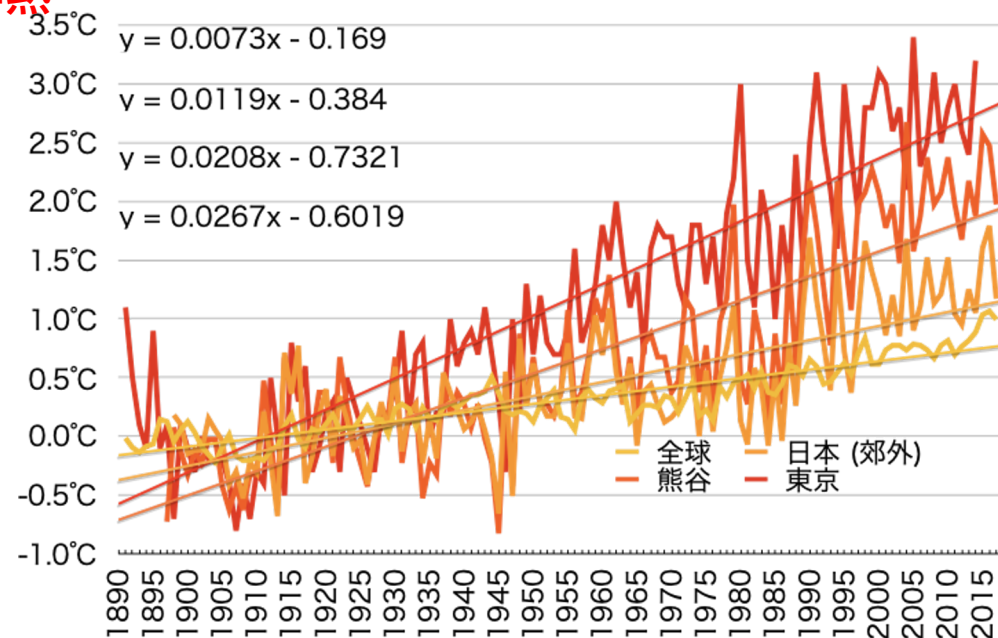
- 暑熱環境悪化はすでに顕在化
  - 猛暑年（2010年）では、全国で1,700名を超える熱中症による死者。埼玉県内でも120人以上。
  - 埼玉県は、内陸であり猛暑となりやすい（熊谷で41.1°C、2018年7月23日）
  - 少子高齢化などと並び、主要な行政課題の1つ

都市の将来の気温上昇(3-7°C) = 地球温暖化(2-5°C) + 都市ヒートアイランド(1-2°C)

都市ヒートアイランドの主原因は、人工建造物・人工被覆化と人工排熱



1901-1930年からの地上気温の偏差 (気象庁)



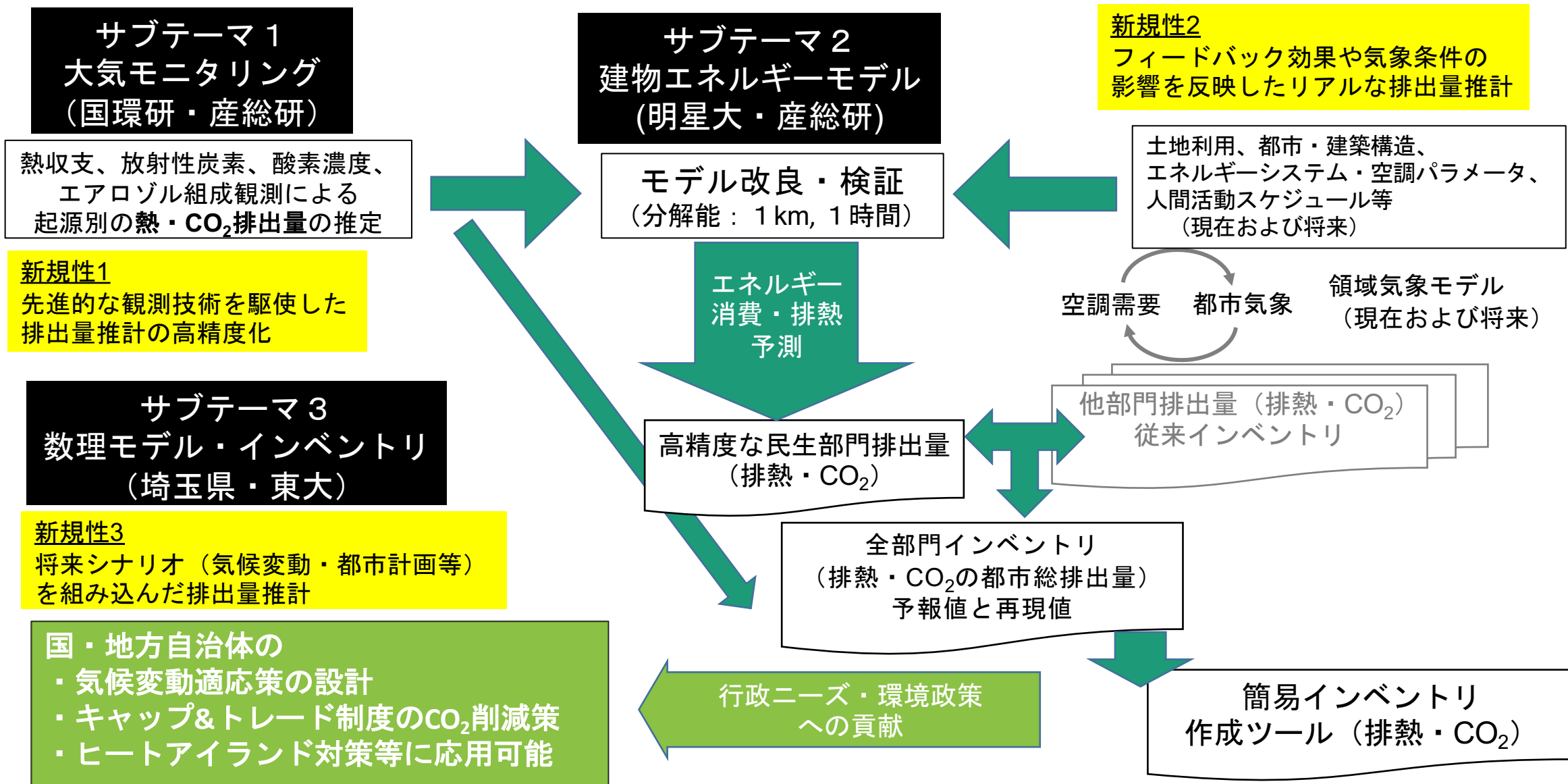
## 2. 研究開発目的

- 実測ベースの熱・CO<sub>2</sub>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・CO<sub>2</sub>排出量の推計手法を開発することが最終目的
- 実測では、排出源毎の熱・CO<sub>2</sub>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して得ること
- 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・適用し検証すること
- 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・CO<sub>2</sub>排出量を推計できる手法の構築

# 3. 研究目標

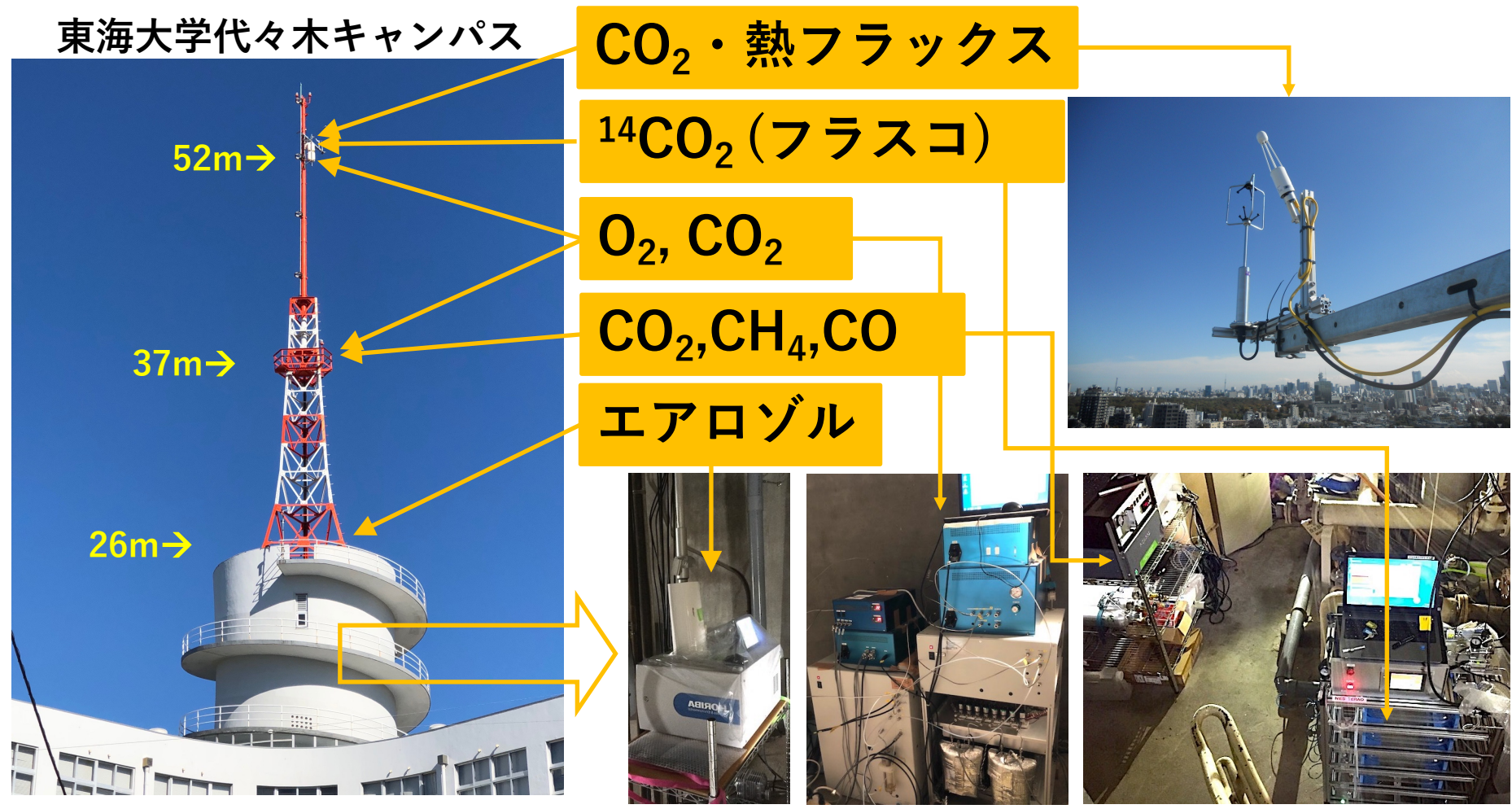
- (全体目標) 大気モニタリングデータや電力実消費量データで検証した建物エネルギーモデルを用いて、民生部門の熱・CO<sub>2</sub>排出量インベントリの高精度化を行い、国や地方自治体が利用可能なにおける環境政策の計画策定等に資することができる炭素排出量・人工排熱量を推定するための手法を確立すること
- 大気モニタリング・分析による起源別熱・CO<sub>2</sub>排出量の定量化手法の開発 (サブ1)
- 大気モニタリング・分析結果による都市気象・建物エネルギーモデルの改良と検証 (サブ2、サブ1)
- 都市気象・建物エネルギーモデルの計算結果に基づいた熱・CO<sub>2</sub> 排出量の原単位等のインベントリ推計の基礎データ作成 (サブ2)
- 都市気象・建物エネルギーモデルの計算結果に基づいた数理統計モデルの構築 (サブ2、サブ3)
- 数理統計モデルを活用した熱・CO<sub>2</sub>排出量簡易推計ツールの開発・活用 (サブ3)

# 4. 研究開発内容 (研究フロー)



# サブ1 研究開発内容

- CO<sub>2</sub>輸送量と熱排出量を観測
  - <sup>14</sup>Cで、CO<sub>2</sub>を化石燃料由来と生物由来に分離 (Cの年代測定。化石か現代か)
  - O<sub>2</sub>濃度で、CO<sub>2</sub>を都市ガス燃焼とガソリン燃焼に分離 (O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>交換比(OR)の違い)
  - エアロゾル組成で、石炭燃焼イベントの検出 (PM<sub>2.5</sub>中の金属元素組成の違い)
- 実測に基づく起源別CO<sub>2</sub>・熱排出量推定 →サブ2、サブ3の検証データ



# サブ2 研究開発内容

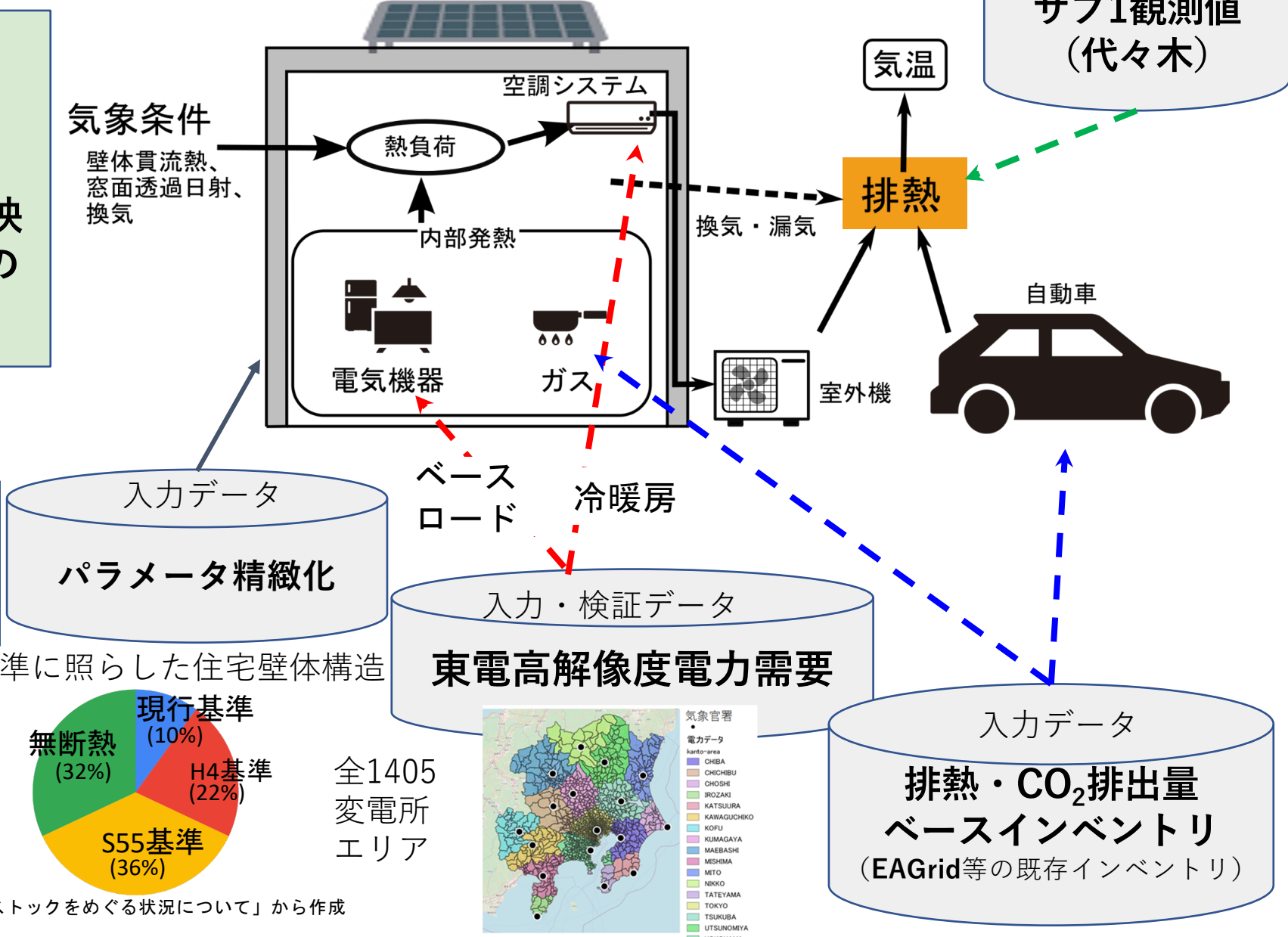
# モデル (CM-BEM) の改良・検証・適用

モデル出力：排熱、建物熱収支、冷暖房消費エネ、PV発電量

**①モデルの改良・検証**  
従来は表現不能であった  
建物熱収支・日々の気象変化・  
排熱フィードバックの影響が反映  
された建物の熱・CO<sub>2</sub>排出予測の  
高精度化 (現況気候)

**②モデルの適用**  
対策と将来気候変動による  
熱・CO<sub>2</sub>排出量への影響を算出

学習データ  
↓  
**サブ3に提供**



### サブ3 研究開発内容

- ・ 熱・CO<sub>2</sub>排出量インベントリ作成のための、人口や土地利用、建物用途等のデータベースの整備
  - ・ 複数の従来手法による熱・CO<sub>2</sub>排出量インベントリの推計、精度の確認
  - ・ 課題全体統括
- ・ 政策担当者のニーズ把握

上空気象、土地利用・植生、街区形状  
建物の用途・構造、人口・スケジュール  
空調機器・性能  
土壌温度・水分など

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

街区の高時間分解能  
➢ エネルギー消費量  
➢ 排熱量  
➢ CO<sub>2</sub>排出量  
(電力・都市ガス・ガソリン等の起源別)  
+ 気象要素 (気温等)

2019年 データ整備、  
旧来手法インベントリ作成・検証

2020年 数理モデル (多変量,  
ベイズ、深層学習など) 改良

2021年 簡易インベントリ推計ツールの作成

サブテーマ1：モニタリングによる起源別のCO<sub>2</sub>・熱排出量

政策担当者のニーズ

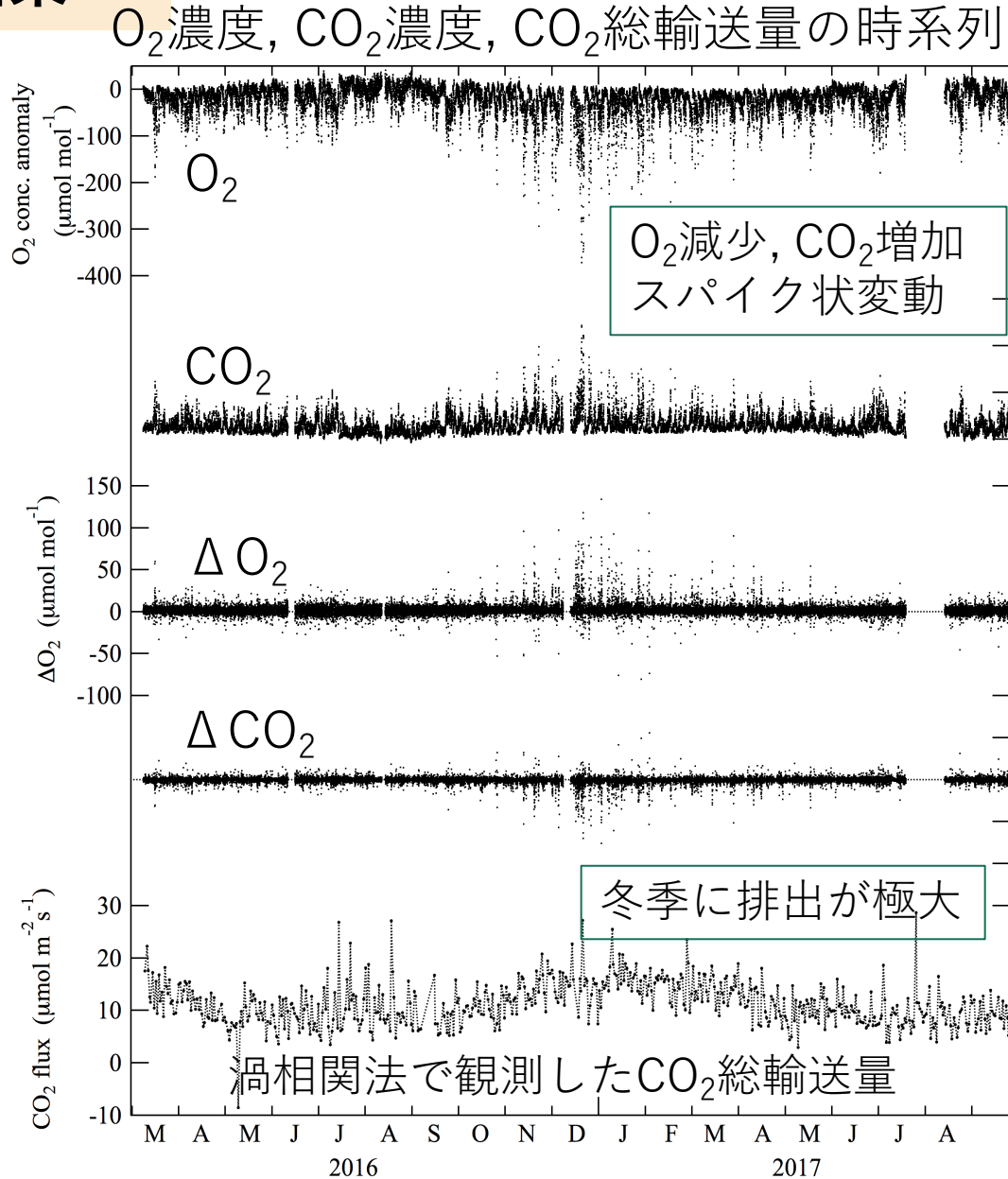


# サブ1 結果

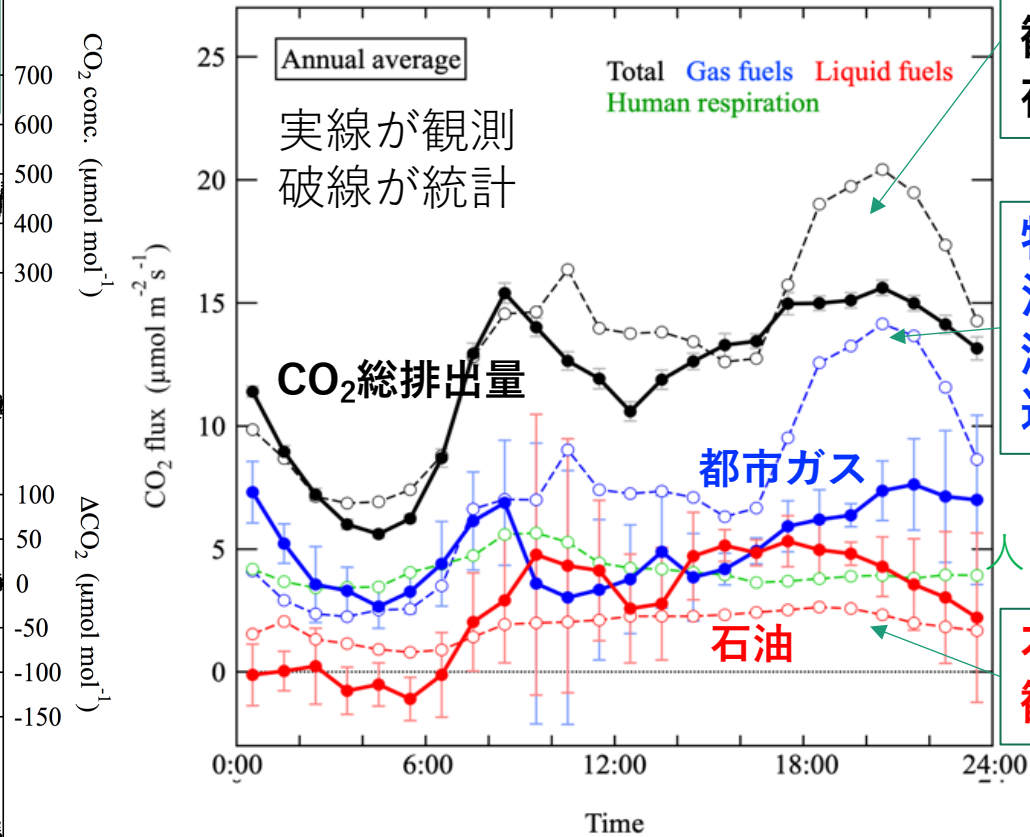
## O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>比(OR)を用いたCO<sub>2</sub>排出量変動の起源別推定

(Ishidoya et al., ACP, 2020)

報道発表(2020年5月15日)



### CO<sub>2</sub>排出量日変動の起源別推定



インベントリは  
観測結果に比べ  
夜間が過大評価

特に夜間のガス  
消費統計が、観  
測結果に比べて  
過大評価

人間呼吸

石油消費統計は  
観測結果と近い

大気観測による排出インベントリの検証に成功!

# サブ1 結果

# 緊急事態宣言下の代々木街区のCO<sub>2</sub>排出量減少

(Sugawara et al., GRL, 2021)

報道発表(2021年7月30日)

## 大気観測データの解析

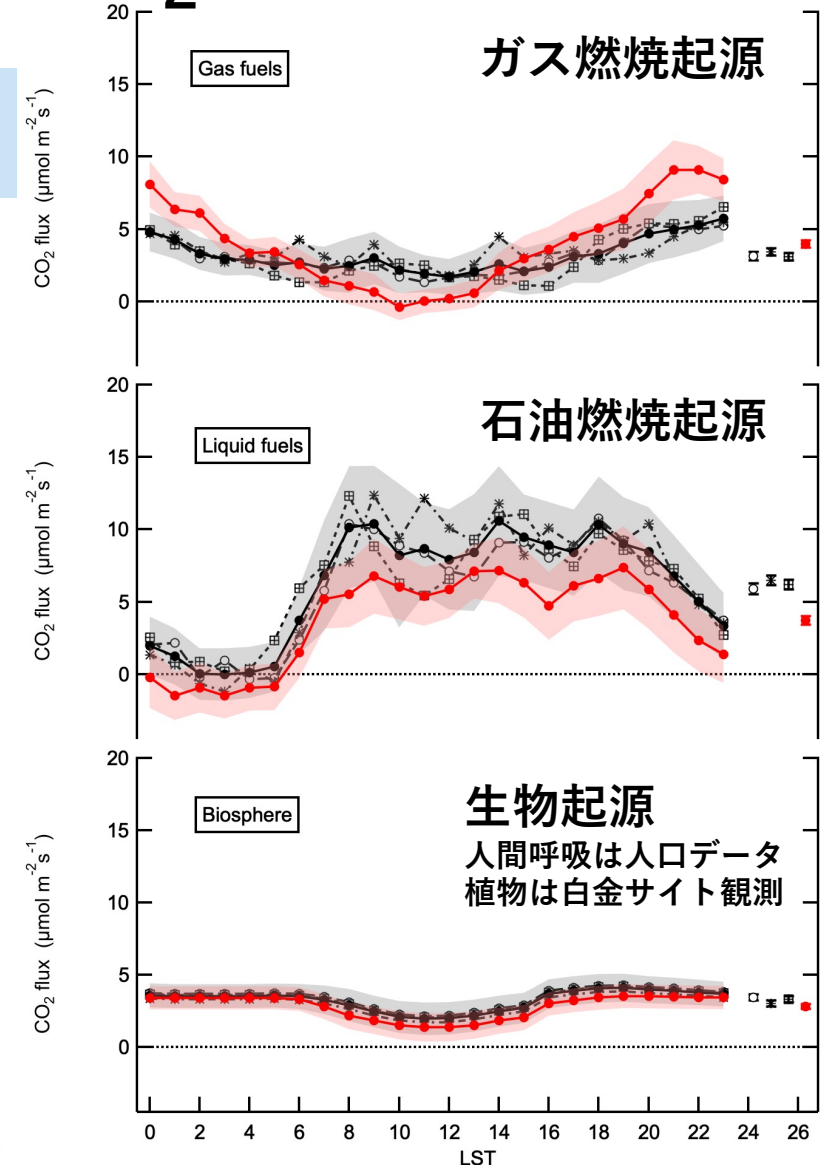
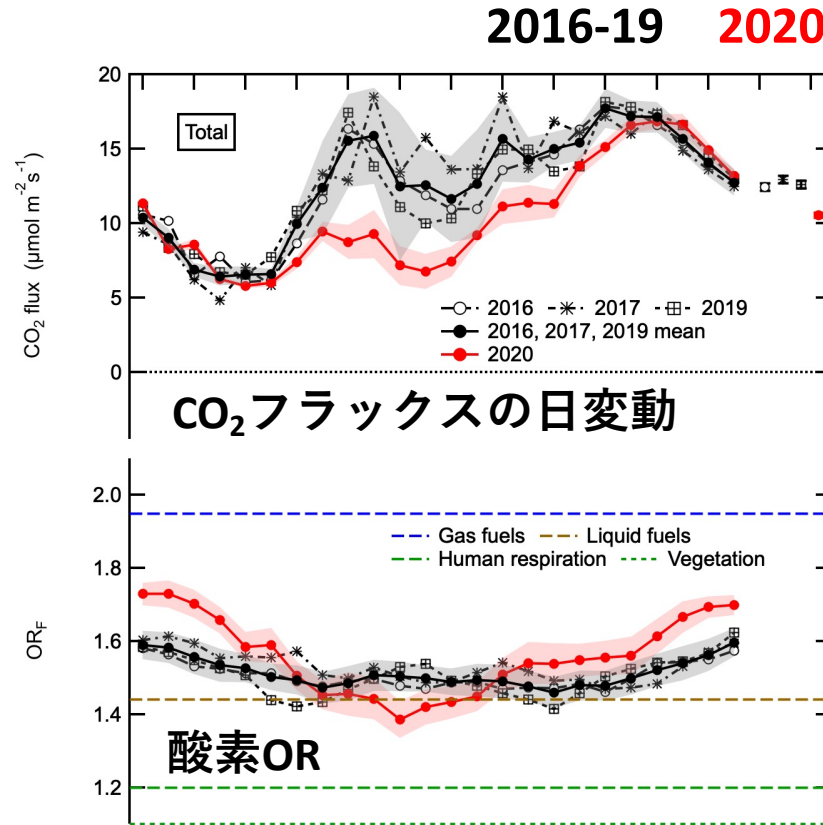
CO<sub>2</sub>フラックス観測データをO<sub>2</sub>観測で起源別推定。

CO観測で結果をサポート。

- 2020年4-5月の緊急事態宣言下の代々木街区のCO<sub>2</sub>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。

- その主要因は石油燃焼起源CO<sub>2</sub>が大きく減少した ( $2.5 \pm 0.4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) ことによる。←交通量減少

- 夜間のガス燃焼起源CO<sub>2</sub>の増加も検出。→サブ2のCM-BEMも捉えている！



大気観測で人為CO<sub>2</sub>排出の急激な変化を検出することに成功！

サブ1  
結果

# 人工排熱量推定

都市ガス起源  
の排熱

ガソリン起源  
の排熱

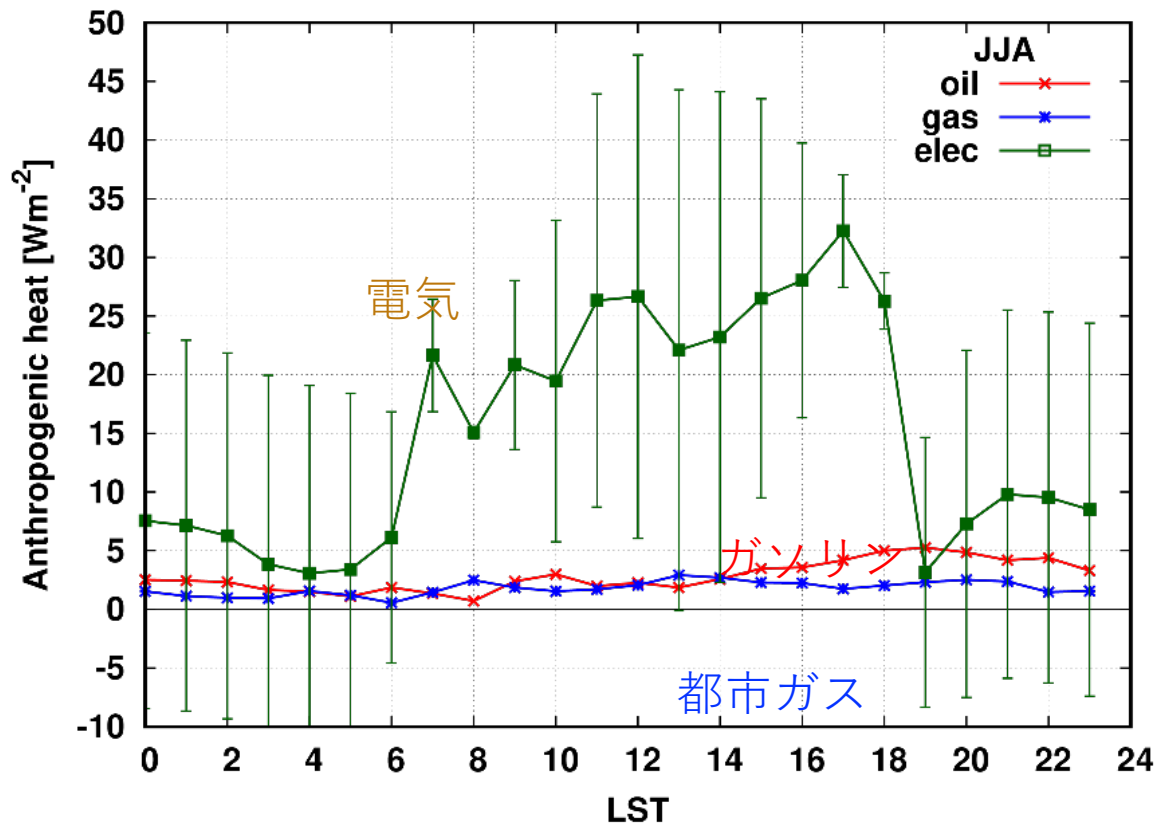
$$H_{obs} = H_{nat\_building} + H_{anp\_gas} + H_{anp\_elec} + H_{anp\_car}$$

観測された  
顕熱輸送量

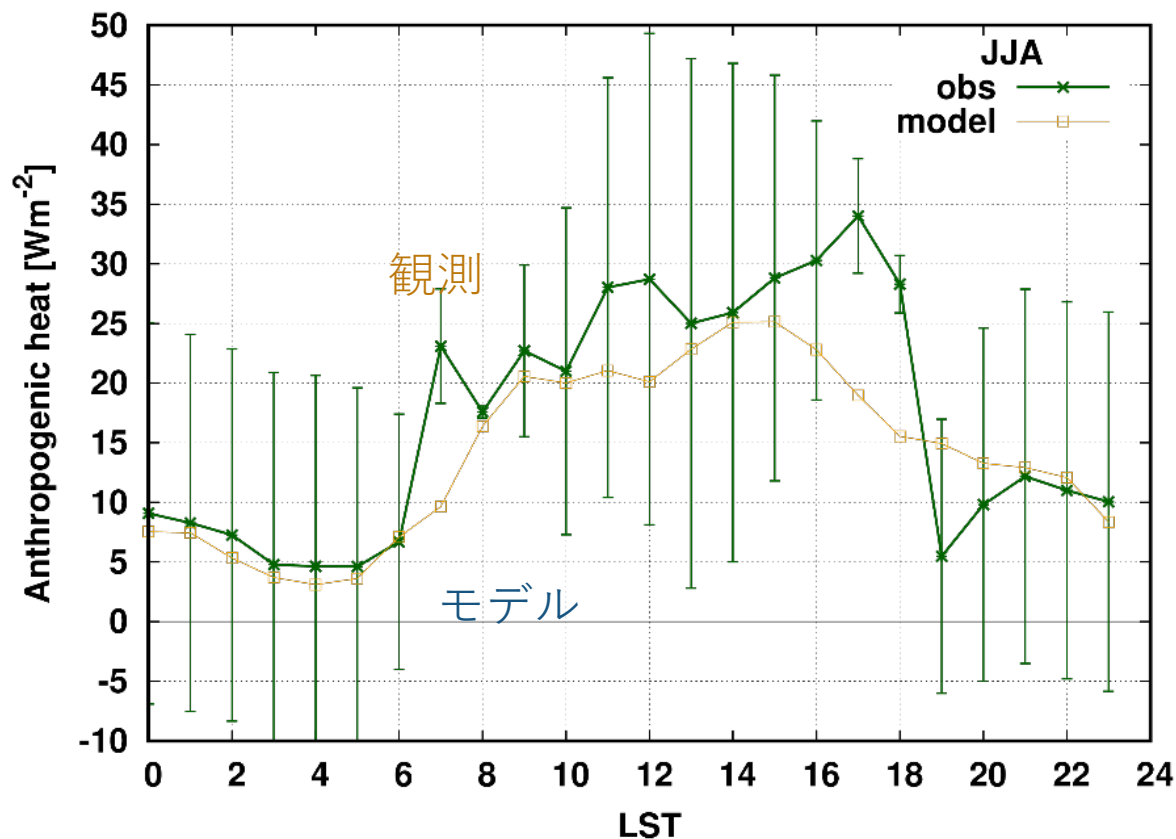
建物表面と道路から  
の自然起源顕熱

電気起源  
の排熱

観測された夏季の人工排熱量の日変動



観測された電気起源の人工排熱をサブ2の  
計算結果と比較 → 良く一致している!



大気観測データで数値モデルの電気起源人工排熱を検証することに成功!

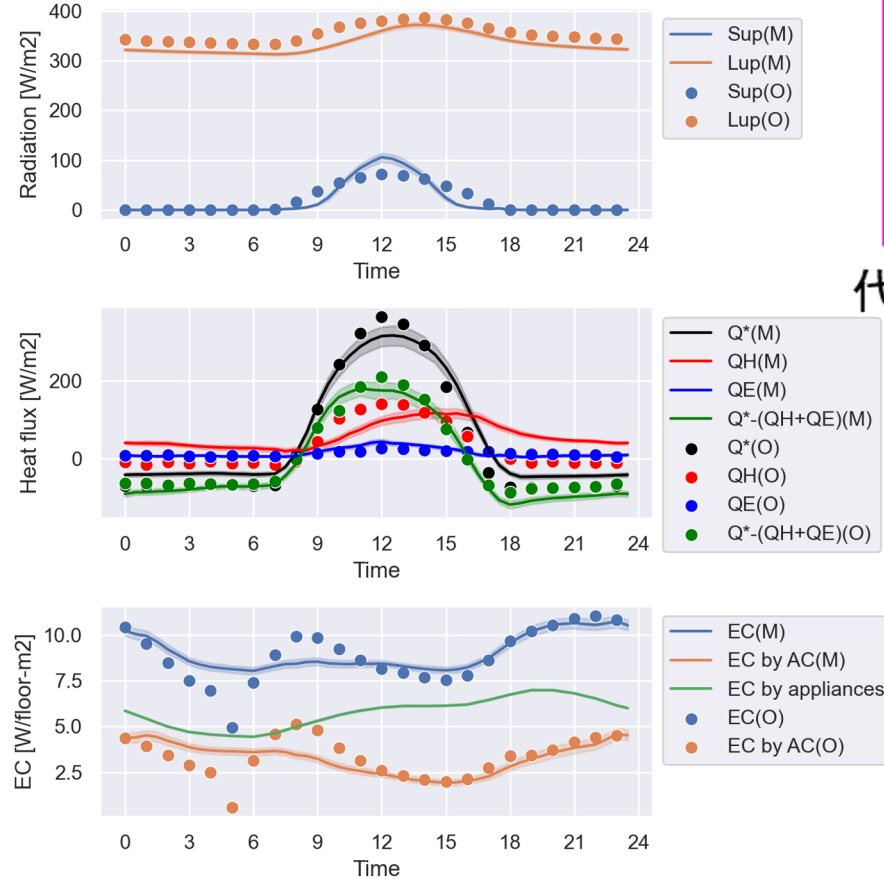
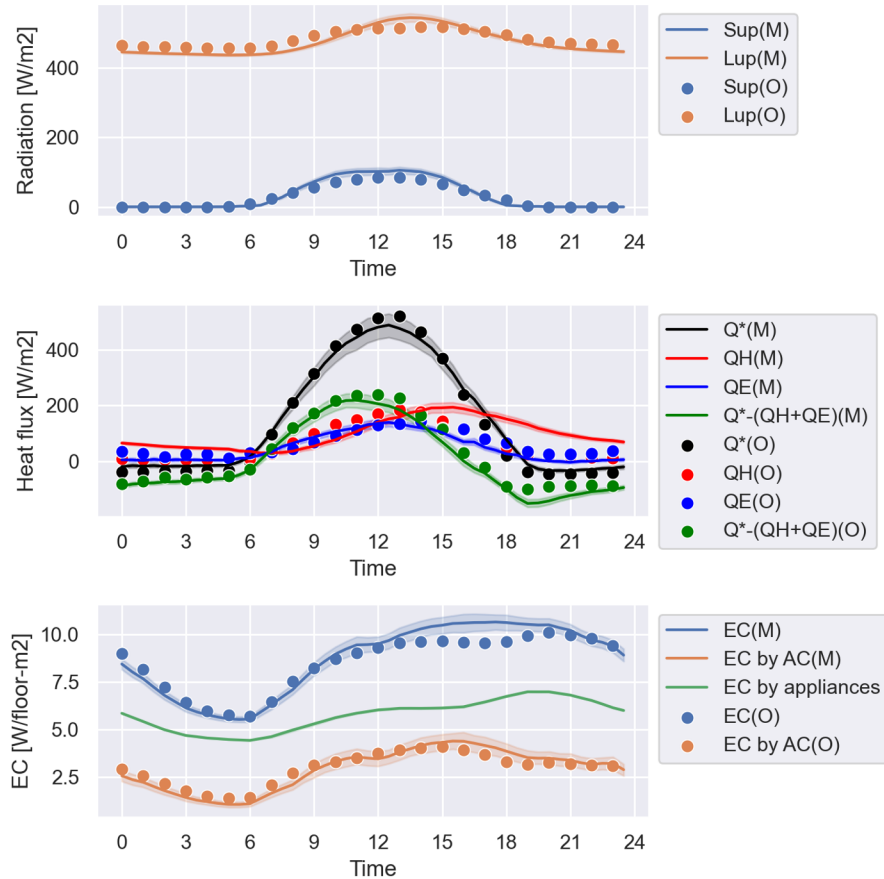
サブ2 研究開発内容:都市気象・建物エネルギーモデル(CM-BEM)の  
計画/ 改良・検証・適用→熱・CO<sub>2</sub>排出量の学習データ生成  
目標

- BEMと入力パラメータの改良 → 熱・CO<sub>2</sub>排出量の予測精度改善
  - ・BEMへのCO<sub>2</sub>排出量予測機能の追加
  - ・主要パラメータ(壁体構造・内部発熱・空調の機器構成とスケジュール)の改訂
- CM-BEMの夏季・冬季の検証 **観測ベースの起源別排熱による検証は世界初の試み!**
  - ・代々木での検証(地表付近熱収支、電力需要、**建物排熱**)←サブテーマ1観測
  - ・首都圏での広域検証(地上気温、**高解像度電力需要**)←TEPCO提供資料
  - ・夏季大阪での排熱フィードバック効果(**都市気候の古典的課題へのアプローチ**)
- CM-BEMの適用
  - ・対策(緑化、空調排熱ゼロ、建物省エネ、太陽光発電)による熱・CO<sub>2</sub>排出への影響
  - ・気候変動(現在気候+1°C)による熱・CO<sub>2</sub>排出への影響

# サブ2 結果

## 【CM-BEM検証：サブ1 観測サイト（代々木）での検証】

CM-BEM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再現可能である事を確認！



観測



熱フラックスの  
夏季ソースエリア

代々木サイト



代々木地区での放射収支（上）、熱収支（中）、電力需要（下）の日変化の再現性  
 （左：2018年7-8月、右：2017年1-2月、実線：モデルによる計算値、丸印：実測値）

# サブ2 結果

## 【CM-BEM検証：首都圏での広域検証】

改良後のCM-BEMは、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！

詳細な電力需要を再現!!

事務所

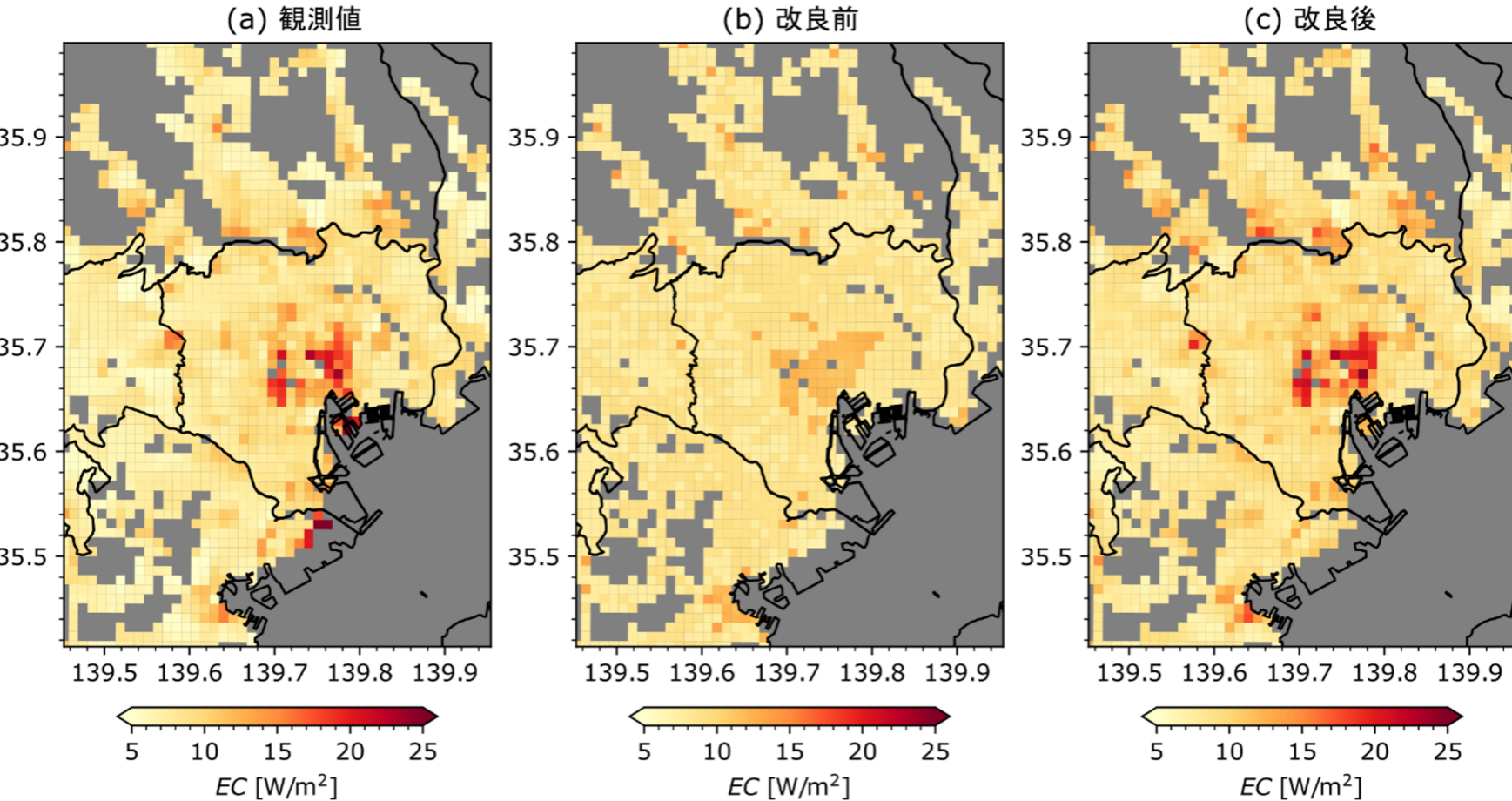
住宅

前	31.2 ± 18.0%	15.4 ± 9.1%
↓		
後	16.3 ± 9.7%	11.2 ± 4.5%

誤差低減 再現精度向上!!

大阪を対象に排熱  
フィードバック効果も解析

↓  
夏季気温の昇温を1割～  
2割程度、自己強化する悪  
循環を解明！



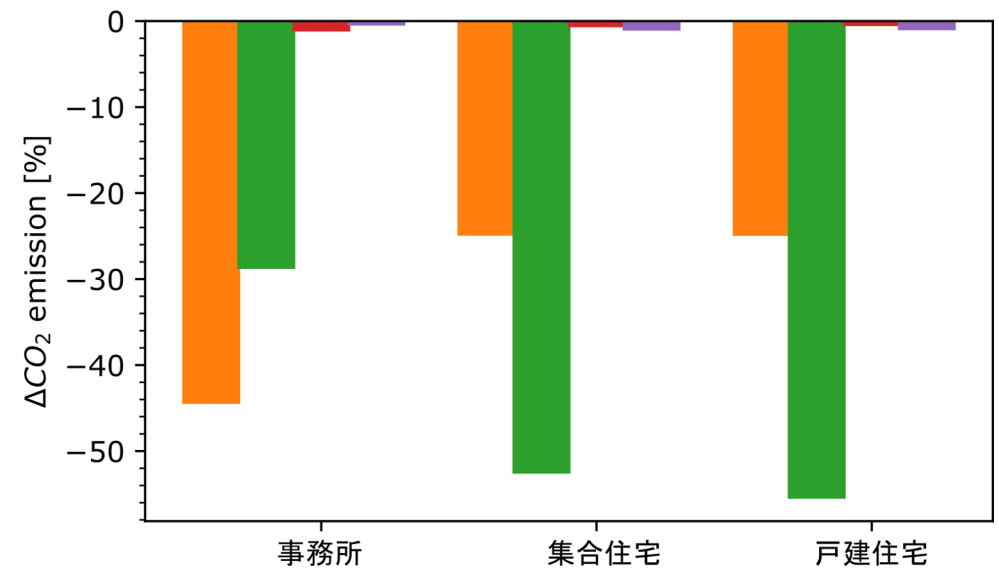
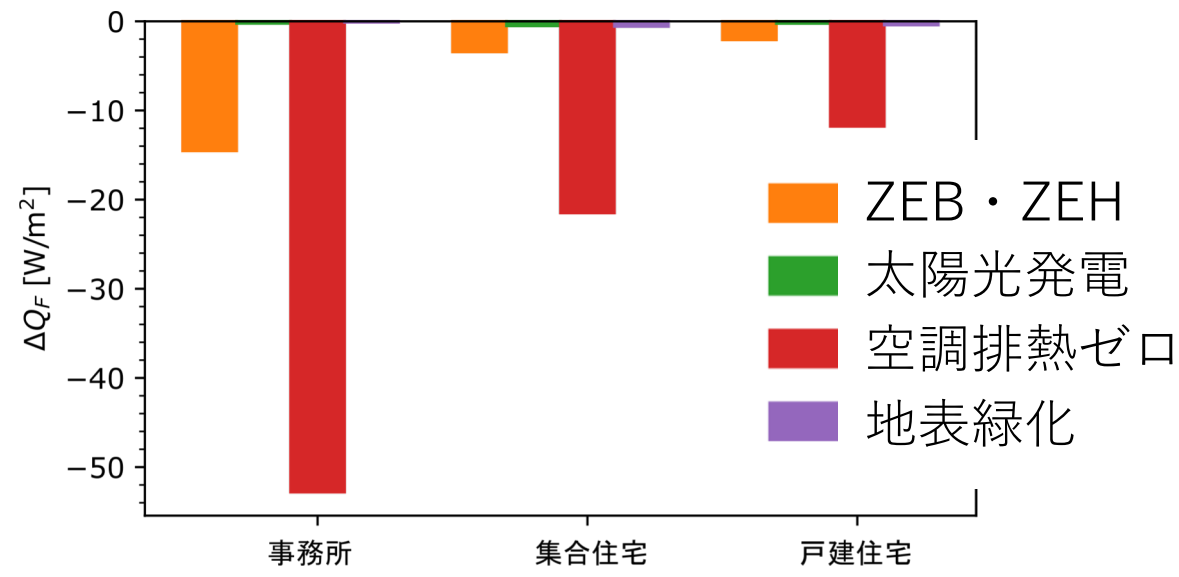
夏季の電力需要量分布

# サブ2 結果

## 【CM-BEM適用：対策と気候変動の影響を含む熱・CO<sub>2</sub>排出量の学習データ生成】

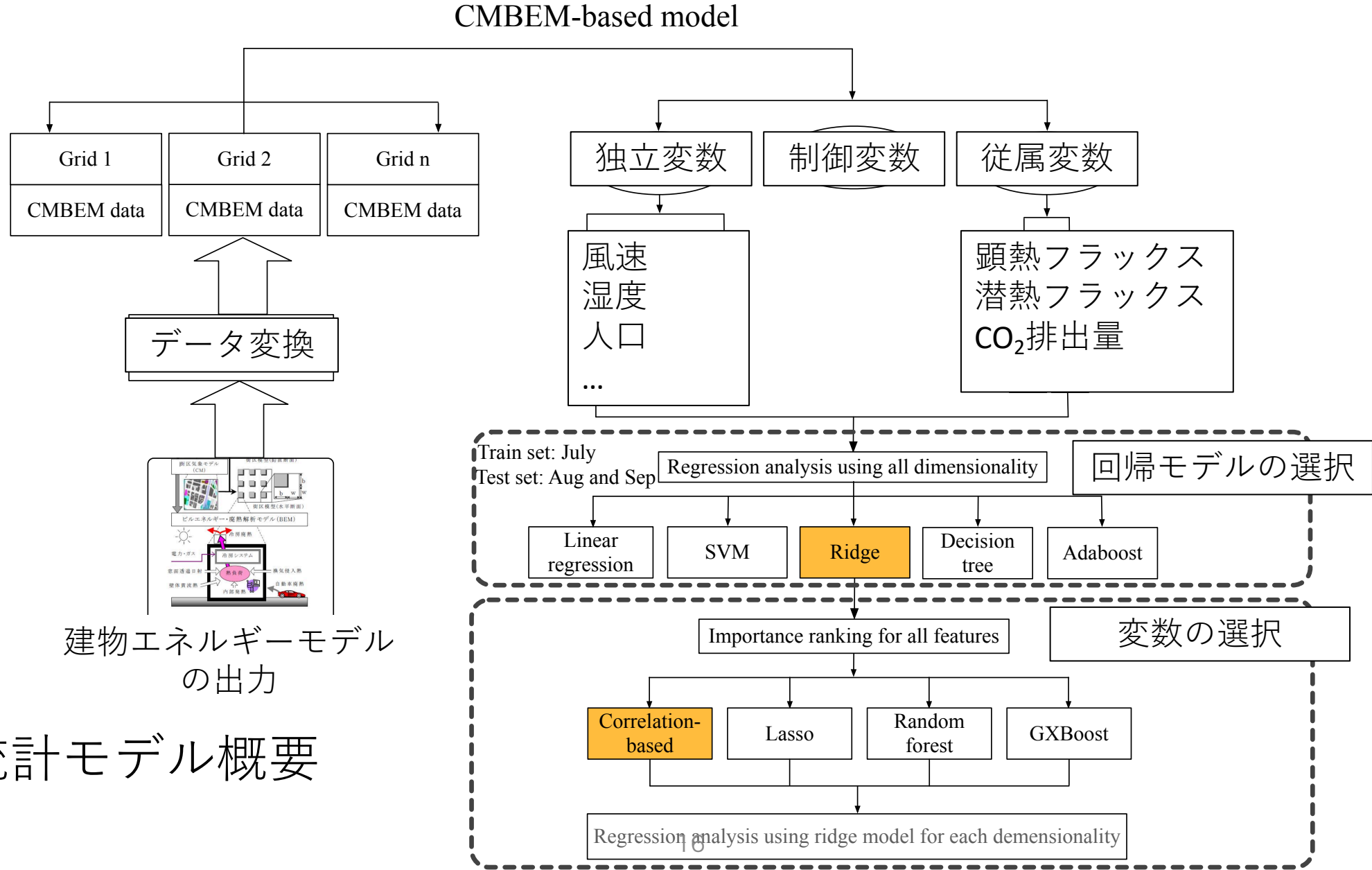
地表緑化、空調排熱ゼロ化、建物ZEB・ZEH化、太陽光発電普及を東京圏に当てはめた4つの対策ケース、および代々木地区で産業革命以降+2°C相当の気候変動を想定した将来予測ケースにおいて、CM-BEMは合理的な熱・CO<sub>2</sub>排出の予測結果（学習データ）を出力！

**建物省エネ + 太陽光発電で  
Nearly ZEH・ZEB達成(75%削減)**



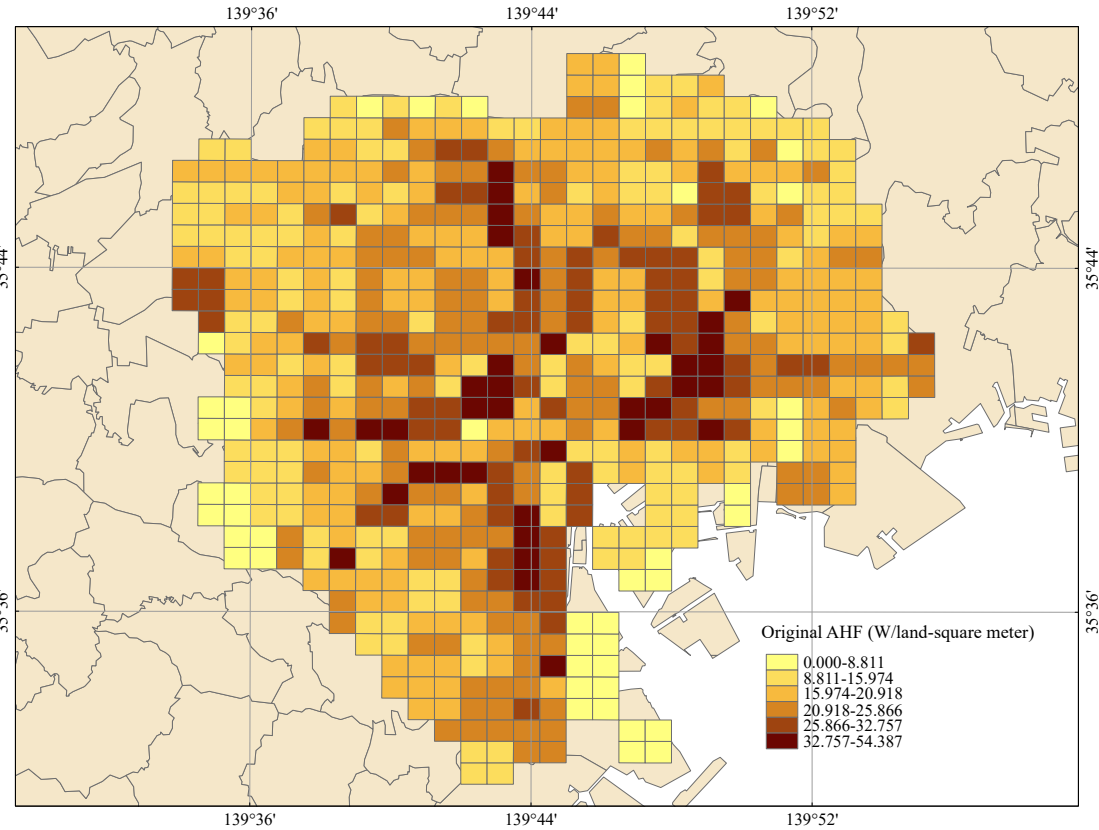
**対策による人工排熱（左図）・CO<sub>2</sub>排出量（右図）への影響を定量化!!**

# インベントリ推計のための数理モデルの開発

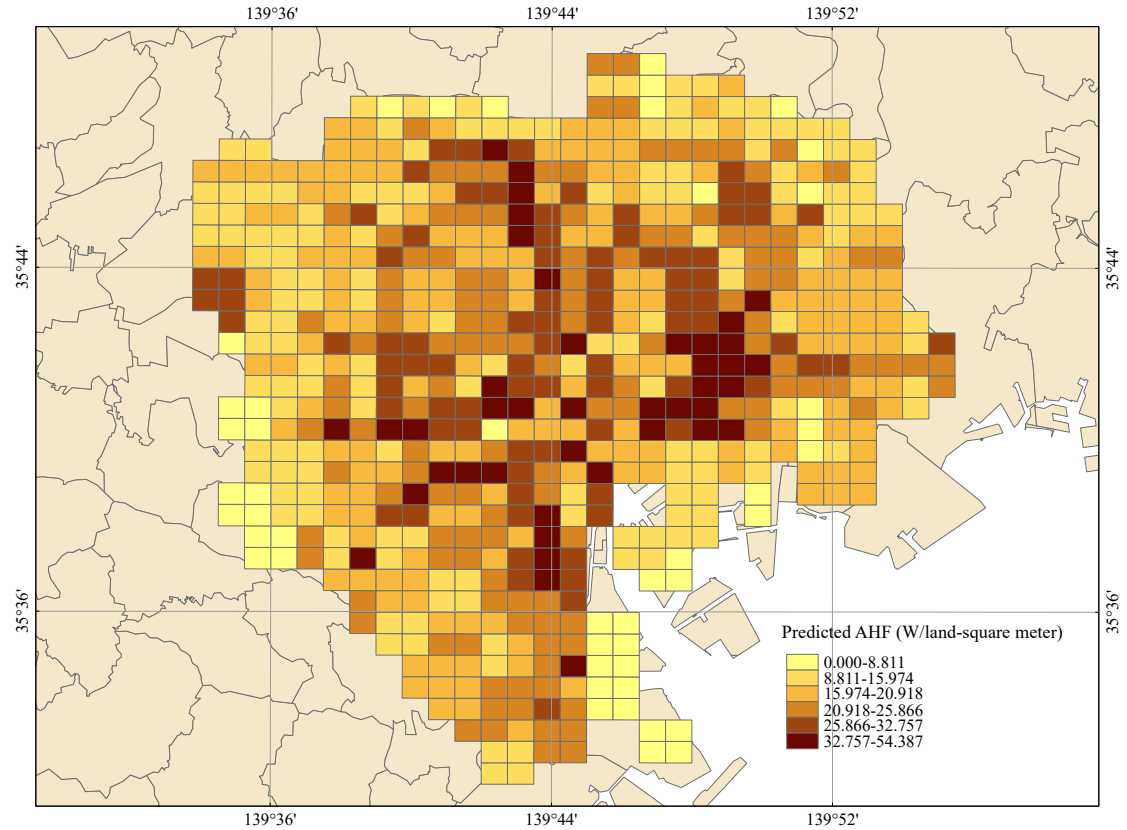




# 数理統計モデルの開発



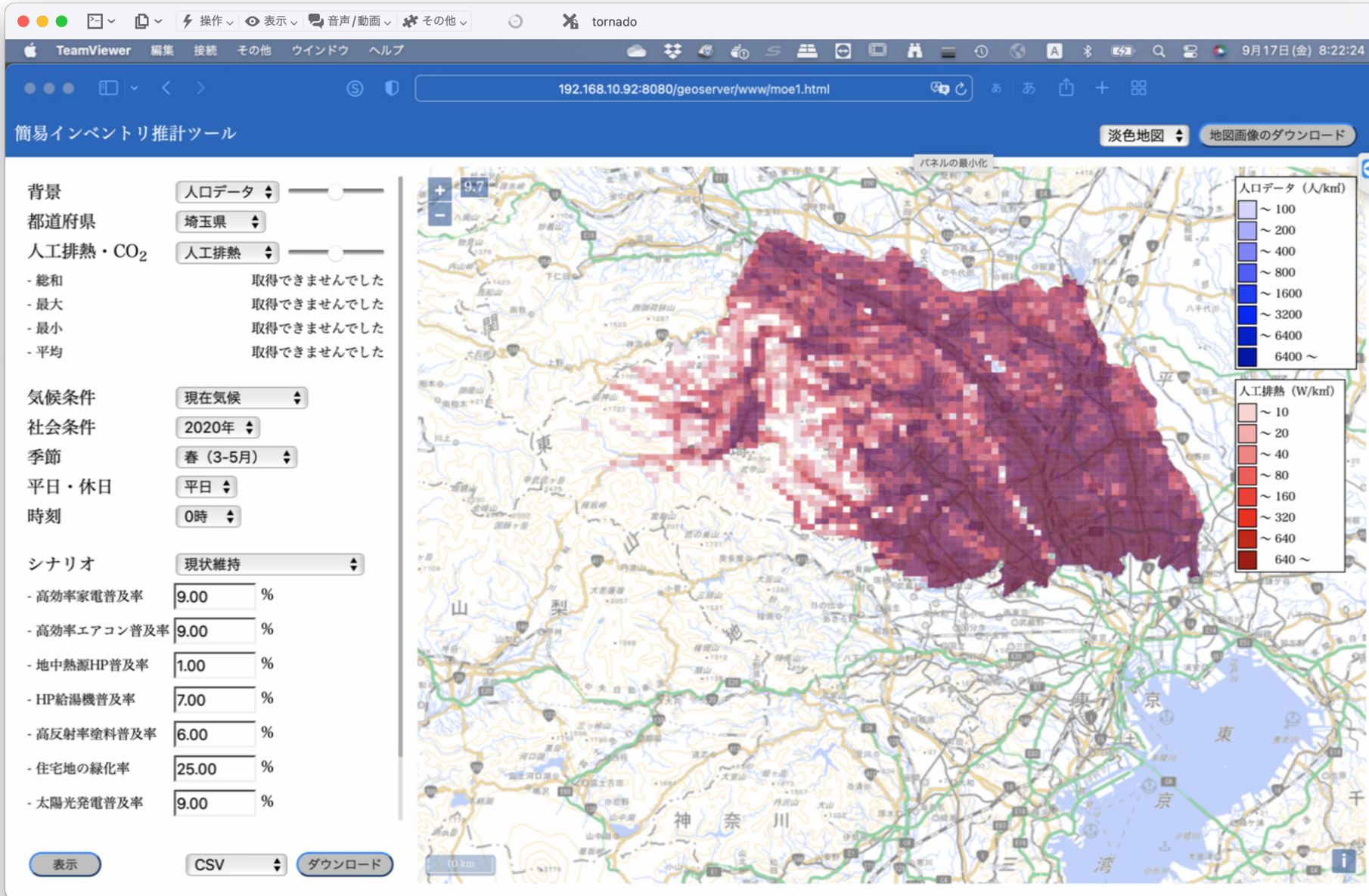
CM-BEMによる8月日平均人工排熱



数理モデルによる8月日平均人工排熱

# サブ3 結果

# 簡易推計ツール GUI



開発した数理モデルをそのままGUIとして実装すると計算時間がかかるため、数理モデルを線形モデル化して実装。

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，住宅高断熱化率を反映化。

埼玉県の推計に要する時間はデータ転送を含めて数秒程度。(1kmメッシュ)

研究期間内に、**政策担当者にヒアリングを実施。開発後改良を実施**

現在、県のLANからのみ閲覧可

# 5-2. 環境政策等への貢献

- 簡易推計ツールの展開
  - 埼玉県DXビジョン・ロードマップ（県の上位計画の1つであるDX推進計画（令和3～5年度）に対応するロードマップ）への簡易推計ツール利活用についての記載令和4年1月5日（水）に記者発表
    - 今年度は環境部内での利活用を進めているが、R4に県庁内、R5に県内市町村向けにツールの普及・利活用を行うことを明記
    - 県DX推進計画は、県全般に関わる5か年計画、行財政改革大綱・行動計画、企業局経営5か年計画、埼玉県まち・ひと・しごと創生総合戦略と並ぶ5つの主要計画のうちの一つ
    - cf. <https://www.pref.saitama.lg.jp/a0314/syuyou-keikaku.html>
  - 埼玉県環境科学国際センターシーズ集第3版への簡易推計ツールの記載
    - 令和4年1月21日（金）に公開、記者発表
- 人工排熱・CO<sub>2</sub>排出量インベントリおよび解析結果の利活用
  - 埼玉県環境部エネルギー環境課 運輸分野への応用
  - 埼玉県環境部温暖化対策課 実行計画（区域施策編）改定に際しての利用
  - 県関係部署への簡易推計ツールの講習会を令和4年度開催予定

# 6. 研究成果の発表状況

- 論文
  - 査読付き論文 10本
  - 総説など 4本
- 学会発表
  - 22件
- 「国民との科学・技術対話」の実施
  - 公開シンポジウム、サイエンスカフェなど 16件（延べ約2,000人）
- 報道発表等
  - 9件
- 受賞等
  - 1件
- 新型コロナウイルス感染症対策に伴う**外出自粛のCO<sub>2</sub>・熱排出への影響の評価をいち早く実施し論文発表**
  - 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、Takane et al., 2022（サブ2）
  - 非常事態宣言下の代々木街区のCO<sub>2</sub>排出量減少、Sugawara et al., GRL, 2021（サブ1、2）
- 観測データ（CO<sub>2</sub>フラックス、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CO）5件をDOI付きで**オープンデータ**として公開（サブ1）