

2-2105
JPMEERF20212005
国および自治体の民生部門
カーボンマネジメントシステムの開発
研究代表者 下田 吉之

研究代表機関 国立大学法人大阪大学

研究実施期間：2021年度～2023年度

重点課題（主）：⑦気候変動の緩和策に係る研究・技術開発

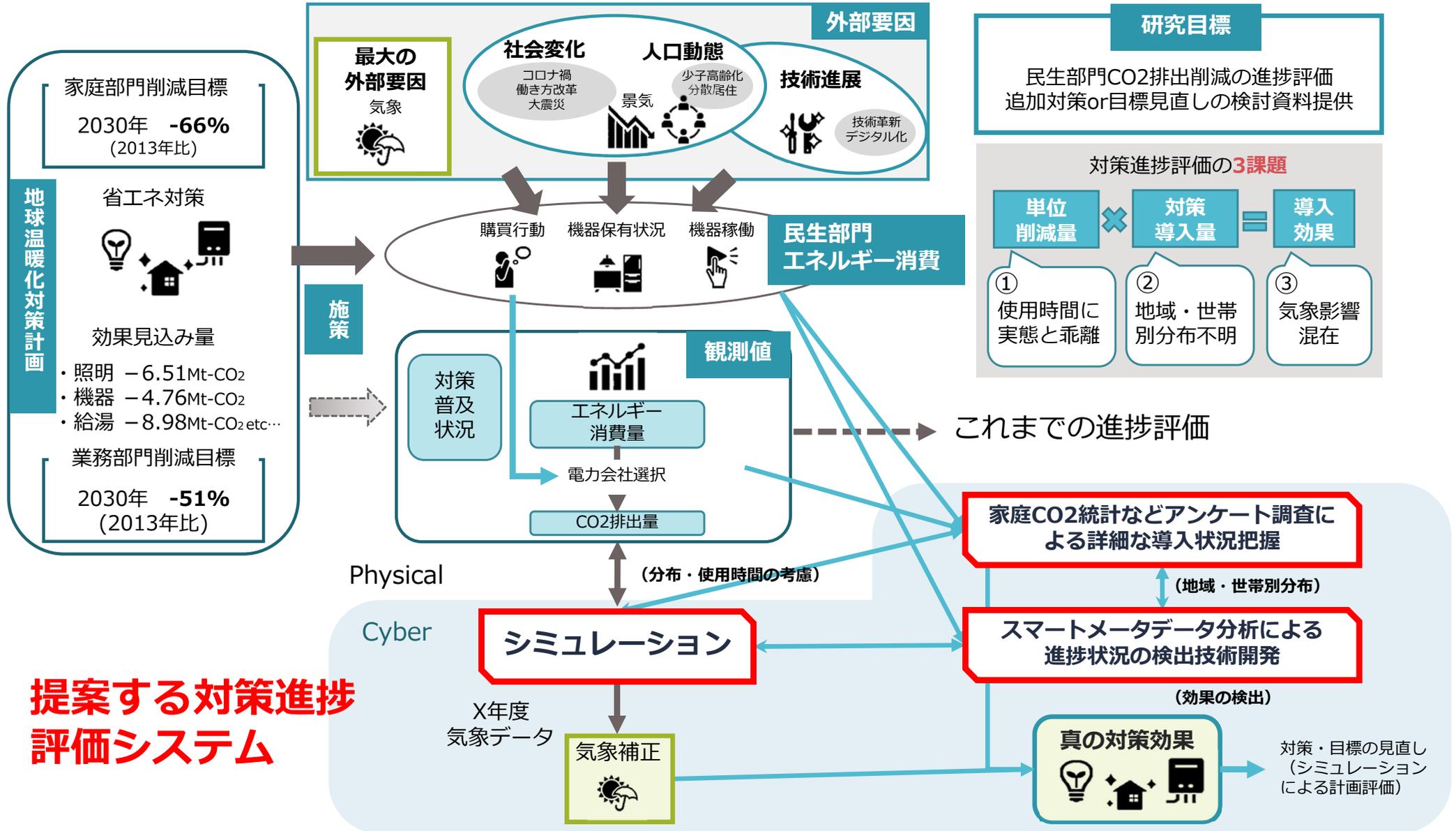
重点課題（副）：⑨地球温暖化現象の解明・予測・対策評価

はじめに（研究の背景）

- 地球温暖化対策計画：民生部門の目安として2030年までに（2013年度比）家庭部門で66%、業務その他部門で51%の削減と高い目標。
- 進捗状況は地球温暖化対策推進本部や各省庁の審議会（中央環境審議会等）において排出量推移と各対策の進捗状況の両面から点検されているが、詳細な要因分析は行えていない。そのため、現状の進捗状況が2030年目標に向かって順調に進行しているのかが明確でない。
 - 暖冬や冷夏など毎年の**気象の影響**でエネルギー消費量が大きく変化し、毎年の排出量変化が計画の効果と一致しない
 - **地域や世帯特性等によって高効率機器の導入効果に幅**があること等により全国規模の技術普及率のみでは計画した削減量が評価できない。
- 地方自治体では地方公共団体実行計画（区域施策編）を立案しているが、削減目標達成に向けた進行管理は更に難しい。
- 研究グループは、民生部門の最終エネルギー需要のボトムアップシミュレーションモデルを開発してきた。

研究の全体像

国および自治体における民生部門温室効果ガス排出削減対策の進捗状況を正確に把握するため、以下**赤枠の3つのツール**を用いたカーボンマネジメントシステムを開発。



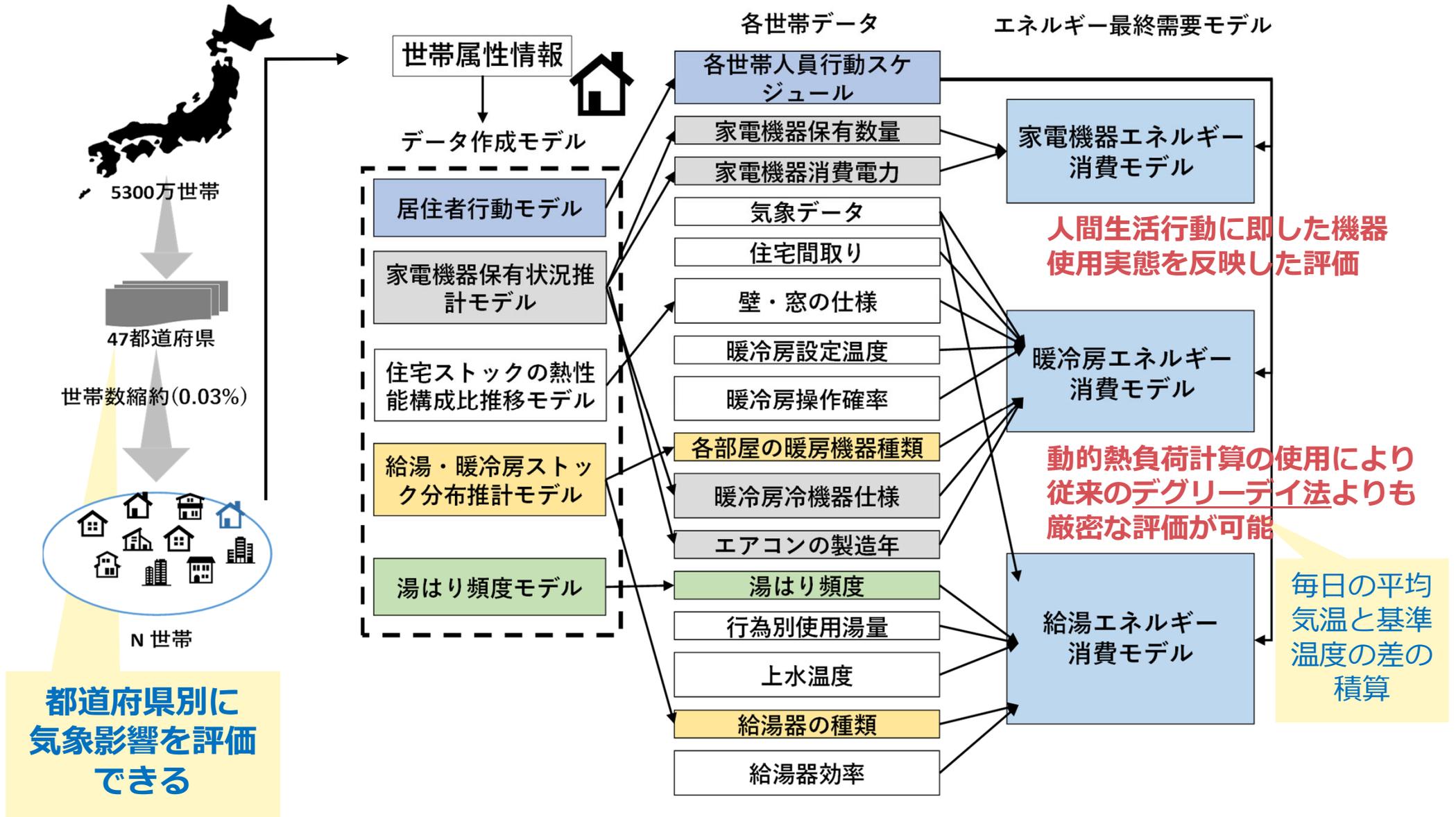
**提案する対策進捗
評価システム**

研究目標

- 本研究で開発したマネジメントシステムを用いて、研究最終年(2023年度)に明らかになっている**最新年(およそ2021年度)のわが国の民生部門CO₂排出量が地球温暖化対策計画の2030年目標達成に向けて順調であるかどうかを現在よりも高い信頼度で明らかにするとともに、**達成困難であれば必要な追加対策を具体的に示してその効果を、計画を上回りそうであれば予想される削減達成量を定量的に示す。
- **国および地方自治体による民生部門カーボンマネジメントの望ましいあり方**について具体的に提言するとともに、今後より精度の高いカーボンマネジメントのために**必要なデータ収集のあり方**(アンケートの内容やスマートメータデータの必要数など)を示す。

TREESモデル（家庭部門エネルギー最終需要モデル）の概要

Total Residential End-use Energy Simulation



スマメ分析 | 逆問題解析によるパラメータ較正の概要

スマートメータデータによる逆問題解析
で、TREESの入力パラメータ (生活行為・機器操作) を較正

→ 標準偏差の情報を活用した「**分布間の距離指標**」によって高次元の最適化を実現する

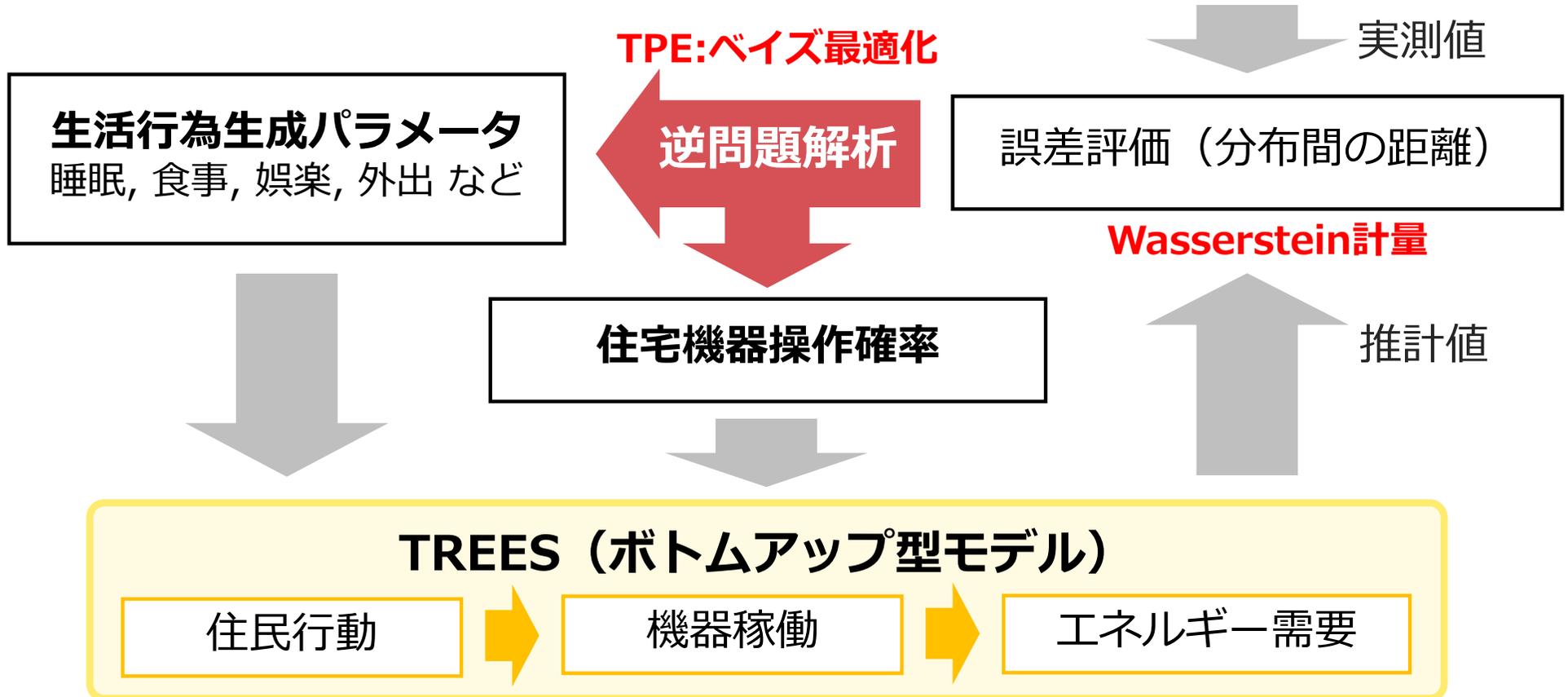
スマートメーター

世帯人数・建て方別の **平均, 標準偏差**

地域：関西電力管内

期間：2017/4/1~2018/3/31

2021/7/1~2023/3/31



スマメ分析 | 住民行動/空調機器操作パラメータ最適化

年間を通しロードカーブが
実態とよく一致

【中間期：住民行動】

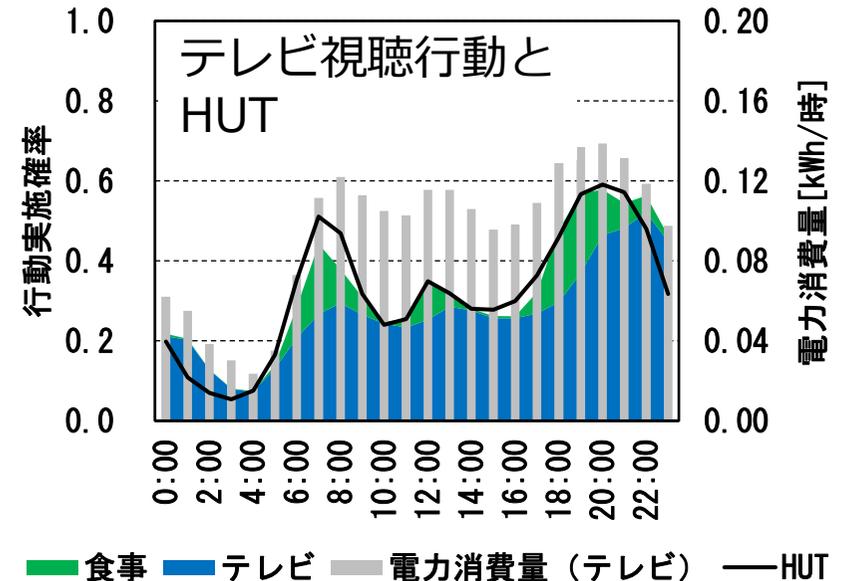
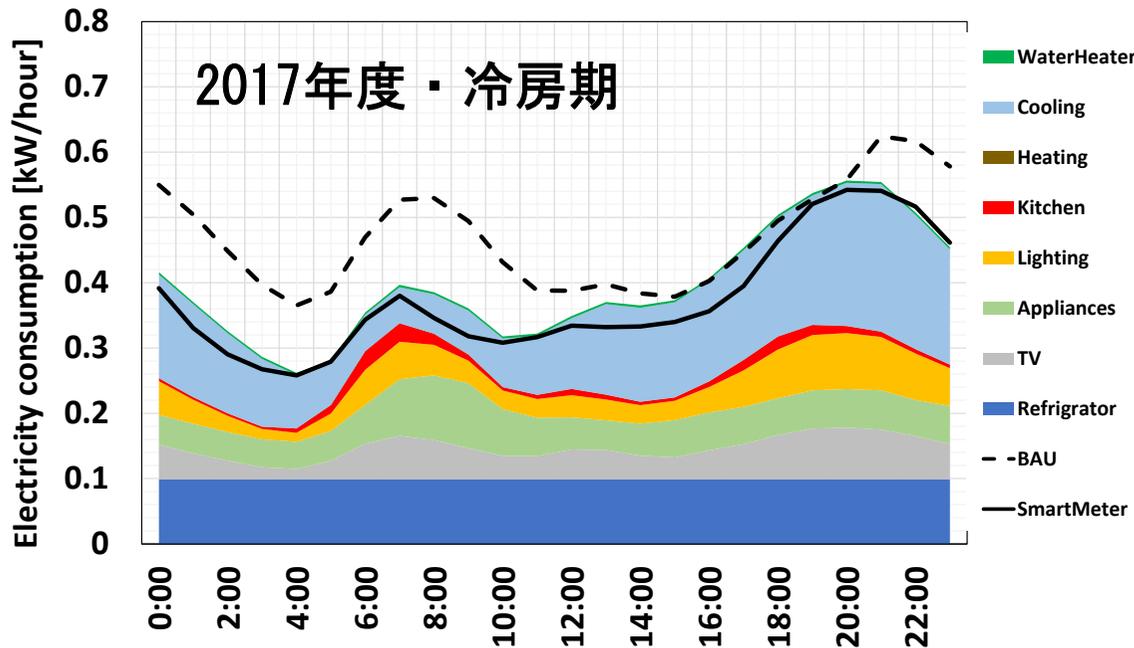
- 睡眠時間の大幅な減少
- テレビ視聴の増加
→各種調査との良好な一致

【冷暖房期：空調機器操作】

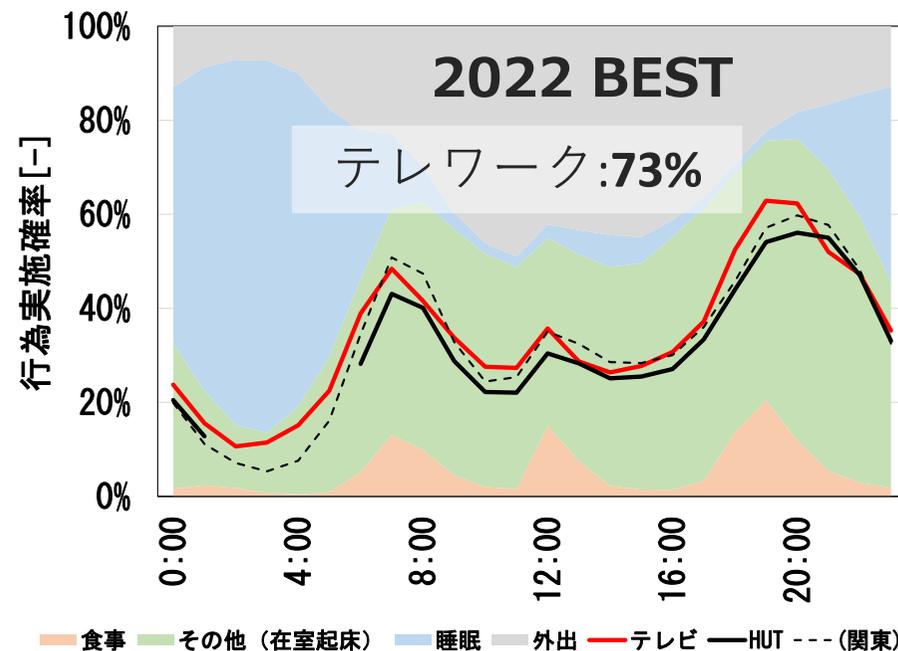
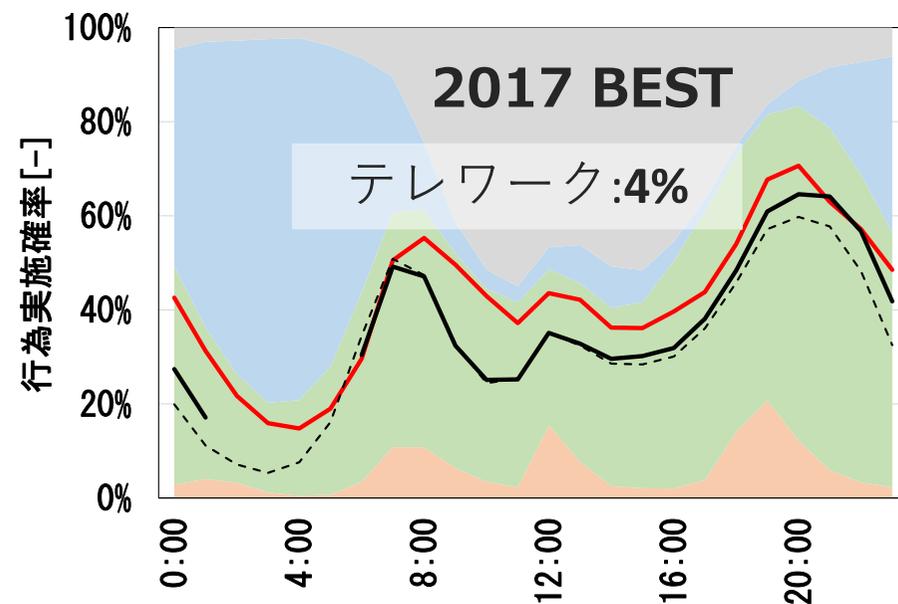
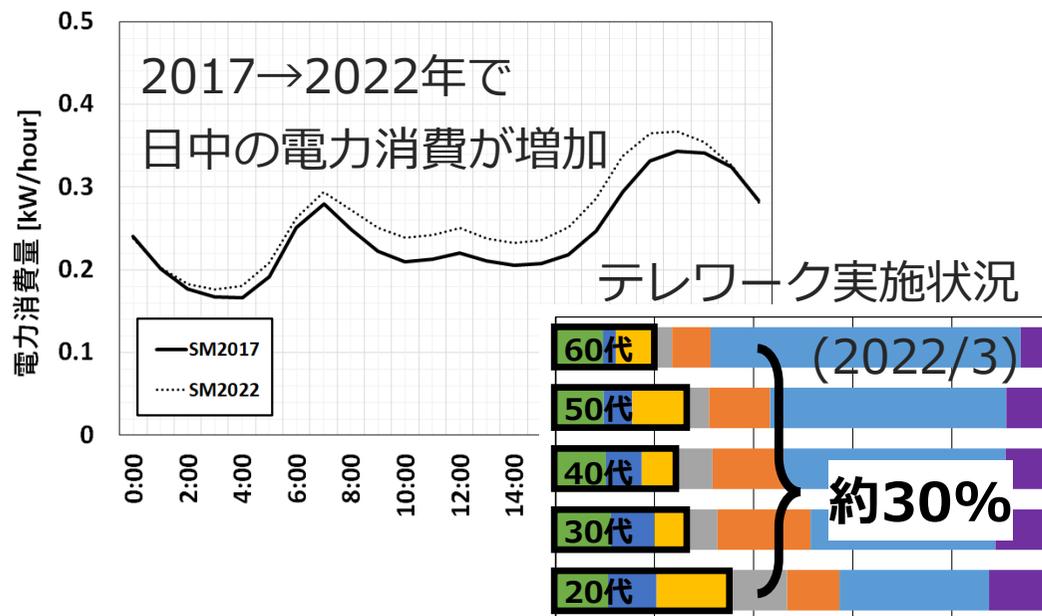
- 校正後の住民行動をベースに校正

【最適化の条件】

- 対象世帯：関電管内の2人世帯集合
- 対象期間：平日・非雨天日
- 対象パラメータ
 - 中間期：行動（睡眠，通勤，外出）
 - 冷暖房期：室温に対する空調の on/off 操作確率



スマメ分析 | コロナ禍の行動変容分析



➤ スマートメータデータの経年変化を
逆問題最適化の枠組みによって分析

➤ コロナ禍の行動変容の実態と比較

➤ 日中の外出行為減少という妥当な傾向
は見られたものの、過大推計

→ テレワーク時の稼働機器想定を
見直すことで精度向上が見込まれる

家庭部門 | 対策進捗評価方法とTREESモデルの課題

エネルギー需要削減対策の進捗評価方法

気象影響： $Q_{w,t} = E(t, 2013) - E(t, t)$

対策効果： $Q_{m,t} = E(2013, 2013) - E(t, 2013)$

$E(x, y)$ ：x年度の対策進捗とy年度の気象条件を入力とした年間エネルギー消費量

精度面での課題解決

① 寒冷地の暖房推計精度向上

【課題】2017年度の気象影響が統計と乖離
2017年度：北海道で平年より気温が低い
⇒気温低下影響を過小推計している可能性

【解決方法】北海道の約3割の世帯で採用されているセントラル暖房システムをTREESで考慮
⇒寒冷地における暖房需要の推計精度の向上を図る

② 世帯数補正

【課題】2015年国勢調査に基づいて作成した世帯情報を全年度の進捗評価で使用

【解決方法】国勢調査結果や国立社会保障・人口問題研究所の推計結果などをもとに
経年的な人口・世帯数変化、世帯員の年齢や職業、年収、住宅情報等を推計

TREES 進捗評価の設定条件

対策名	設定内容
高効率照明の導入	地球温暖化対策計画における毎年の高効率照明の累積導入台数からLED照明比率を算出⇒比率に応じた部屋別の照明消費電力
高効率給湯器の導入	地球温暖化対策計画におけるヒートポンプ給湯機、潜熱回収型給湯器、燃料電池の毎年の累積導入台数
トップランナー制度	テレビと冷蔵庫の消費電力を家庭CO2統計の機器製造時期割合と毎年の省エネ性能カタログの機器消費電力に基づいて決定
新築住宅の省エネ基準適合の推進	熱性能ストックモデルにより算出された都道府県別住宅熱性能推移を基に外皮性能の向上のみを考慮

家庭部門 | 対策進捗と気象影響

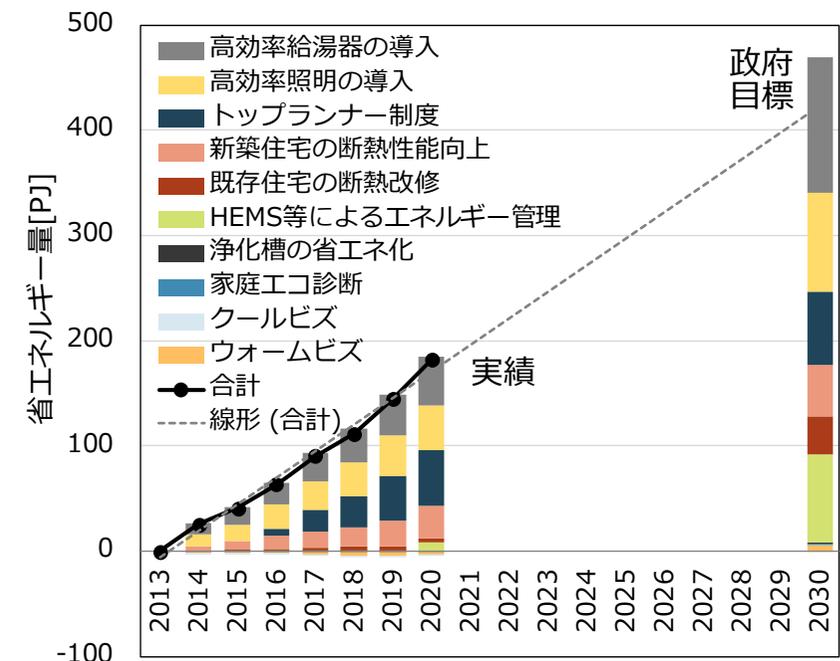
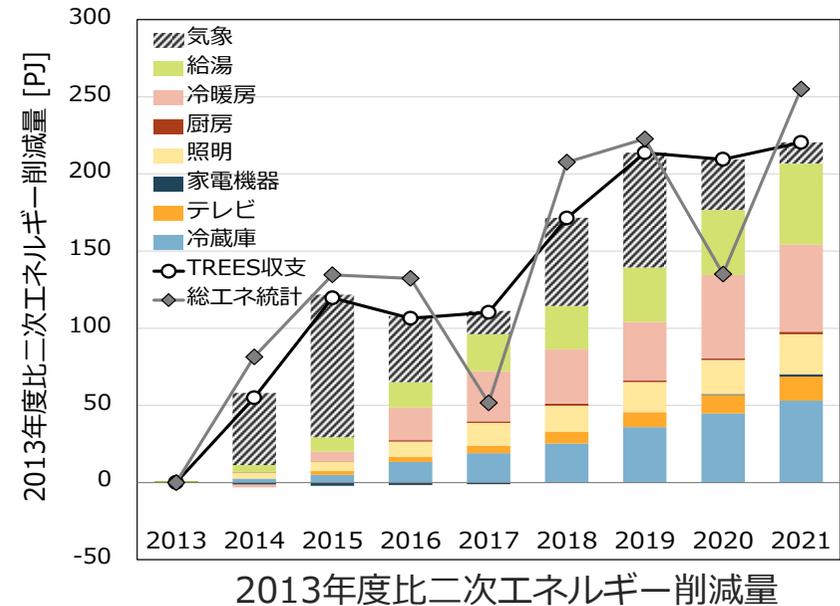
TREESを用いて、毎年の**対策効果と気象影響**を推計した。気象影響は、2017年度を除き工
 ネ庁や環境省の要因分析と概ね整合する。

2013年度比の二次エネルギー削減量

- 2020年度で44PJの乖離
 ⇒新型コロナの影響による滞在時間の増加
- 住宅の高性能化と高効率エアコンの導入効
 果が最大、次いで高効率給湯器と冷蔵庫の
 性能向上が削減に大きく寄与

これまでの対策実績と2030年度政府目標

- 本推計で考慮した4対策（給湯器・照明・
 トップランナー・新築の断熱）が対策実績
 全体の95%以上を占める
- これまでの傾向が続けば、2030年度の政府
 目標を10%下回る
 ⇒計画のさらなる強化・推進が必要



これまでの対策実績と2030年度政府目標（右端）

家庭部門 | 政府削減対策実施ケースの評価と限界削減費用

地球温暖化対策計画の対策が完全に実施された場合を想定し、2050年度までの二次エネルギー消費量を推計

- ⇒ 2030年削減目標は僅かに未達成
- ⇒ 2050年ゼロエネルギー達成困難

限界削減費用の評価

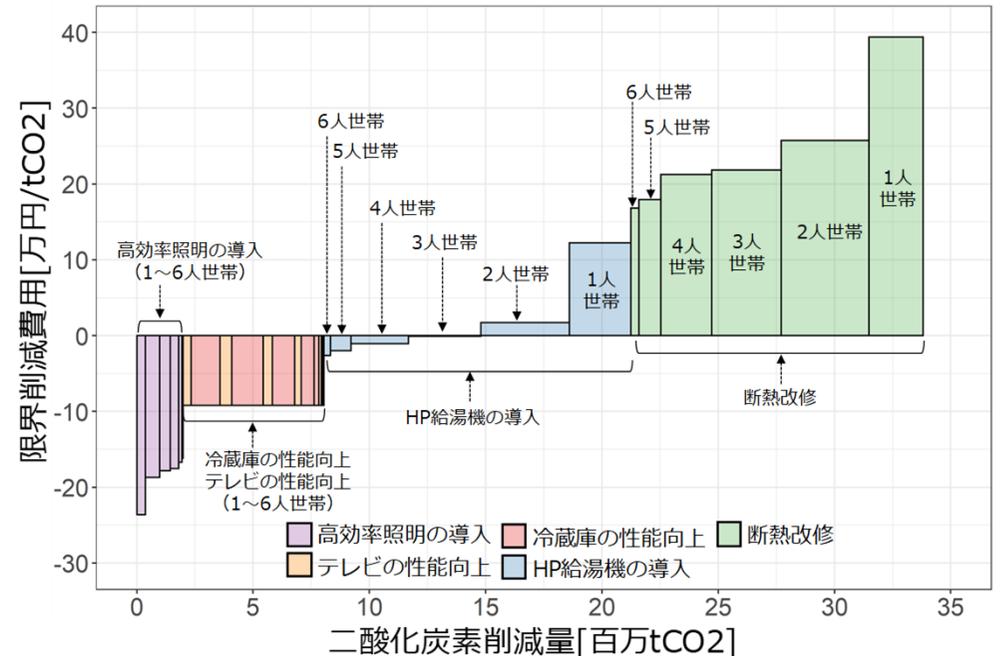
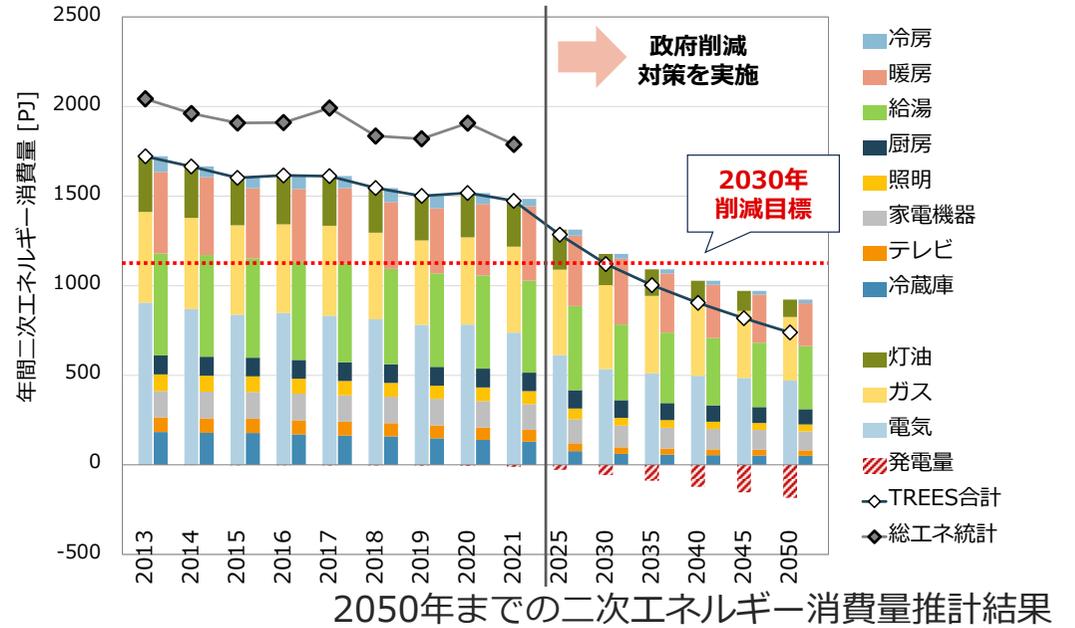
➤ TREESでは世帯特性や地域といった類型毎に対策効果を推計可能

照明、機器の性能向上については限界削減費用が負

⇒ 情報提供による普及促進が有効

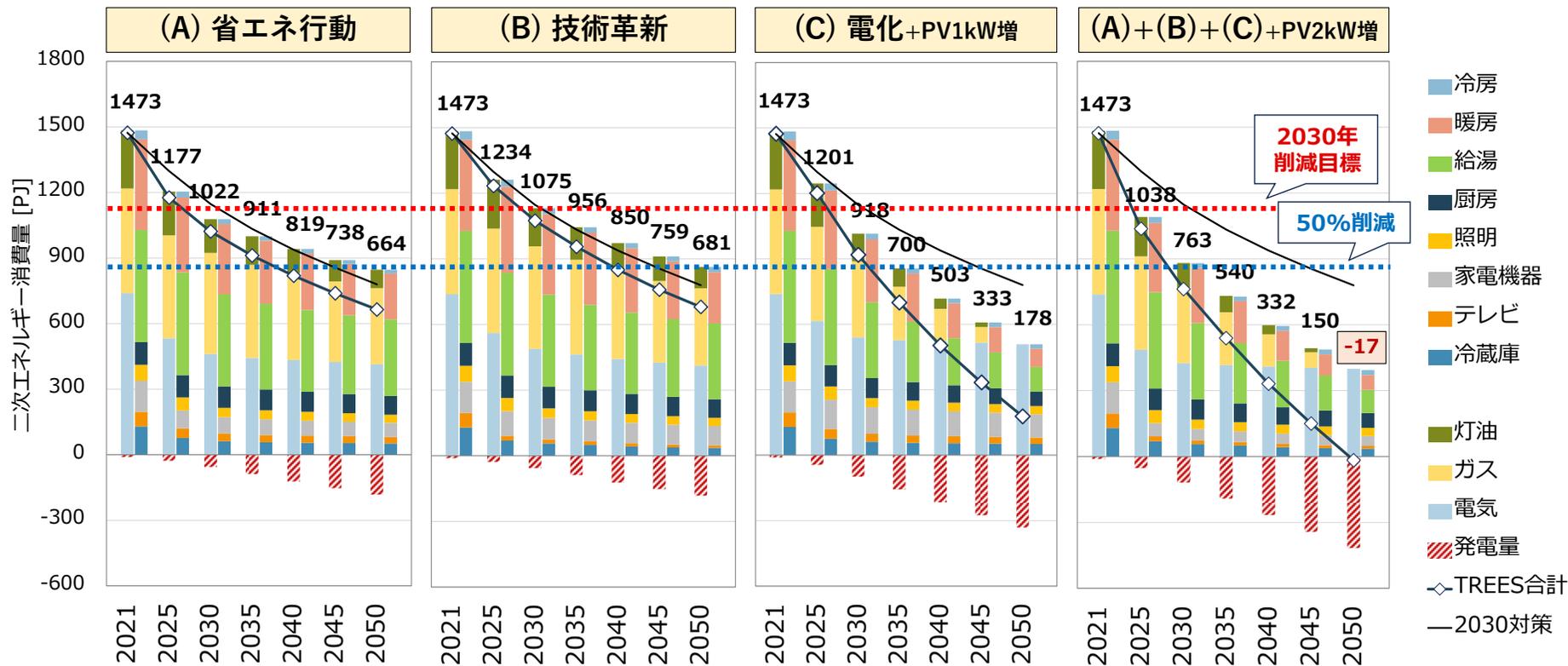
給湯、住宅断熱の各対策効果は世帯類型別に大きく変化

⇒ 全世帯一律ではなく、**地域や世帯人数に限定した対策促進が有効**



世帯類型別限界削減費用とCO2排出削減量の関係

家庭部門 | さらなる追加対策の提案とその効果の予測



2050年までのシナリオ別の二次エネルギー消費量推計結果

現状の対策では2030年削減目標・2050年ゼロエネルギー化達成は困難

⇒ 達成に向けた追加的対策を提案し、その削減効果を4シナリオで評価

**追加
対策**

(A)省エネ行動 (B)技術革新 : 2050年目標の達成は極めて困難

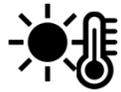
(D)混合シナリオ : 電化により2050年目標達成

給湯器・暖房機器の電化促進とPV導入がCO2削減に効果的

業務部門 | 開発したエネルギー最終需要モデル

類型化と代表モデル構築

気候区類型



施設用途・業態・規模類型

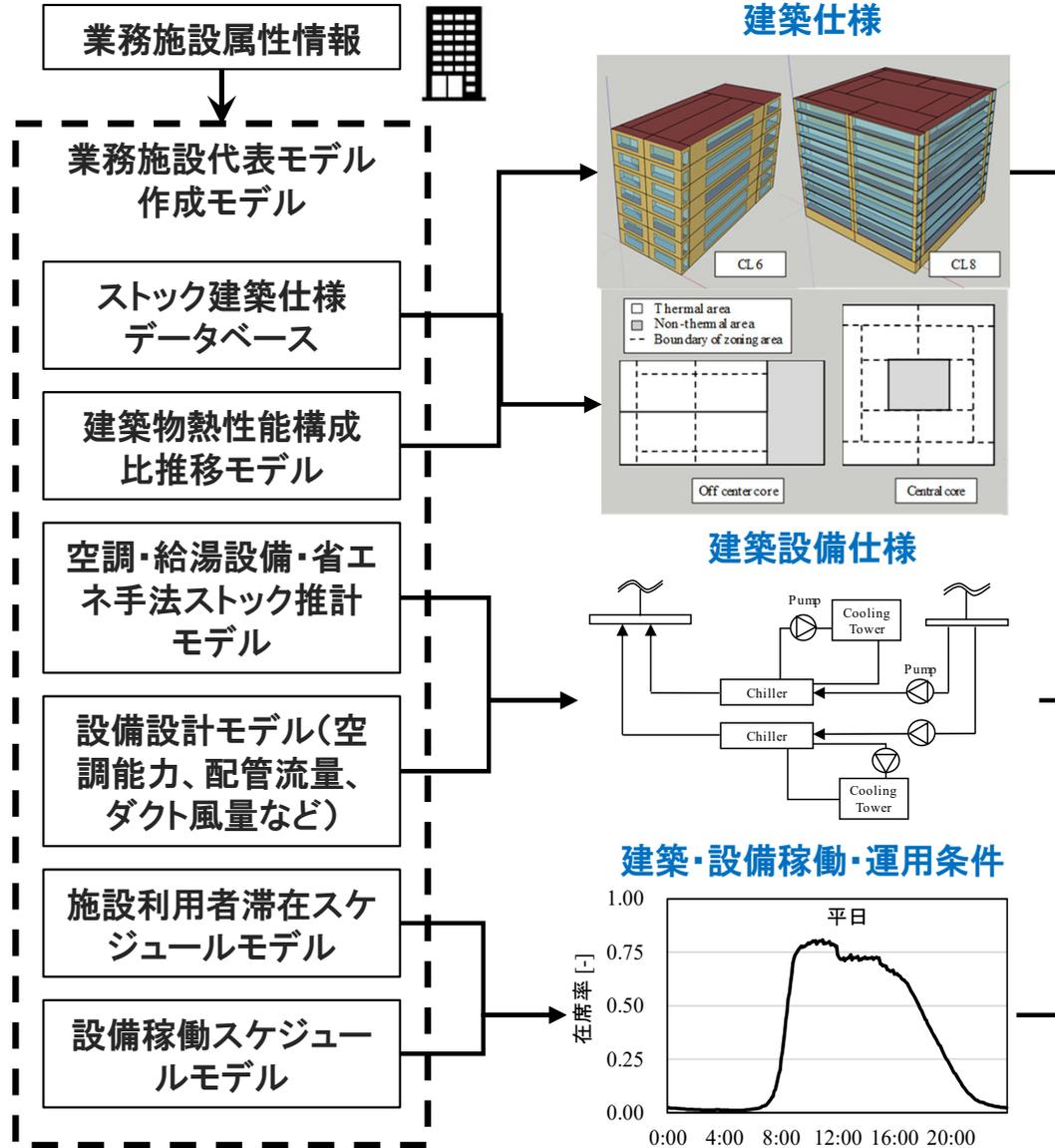


設備構成・省エネ手法採用



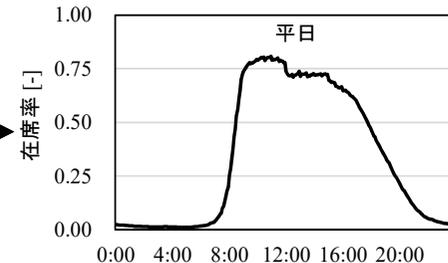
エネルギー需要積み上げ

$$\sum_{m=1}^M EUI_m \times TFA_m$$



EnergyPlus(米国DOE開発のエネルギー需要推計モデル)を使用

- 照明・コンセント機器エネルギー消費
- 冷暖房熱源、補器エネルギー消費
- 給湯エネルギー消費
- その他エネルギー消費



Yamaguchi Y et al. Building stock energy modeling considering building system composition and long-term change for climate change mitigation of commercial building stocks. Appl Energy 2022;306:117907.

業務部門 | スtock更新モデル

Stock更新モデルの計算フロー

建築着工統計に基づく新築床面積、ワイブル分布減失推計モデルに基づく着工後の減失面積の経年データを施設用途別に生成



新築・減失床面積に基づいて計算対象年の竣工年代別Stock構成を定量化。改修についても想定。



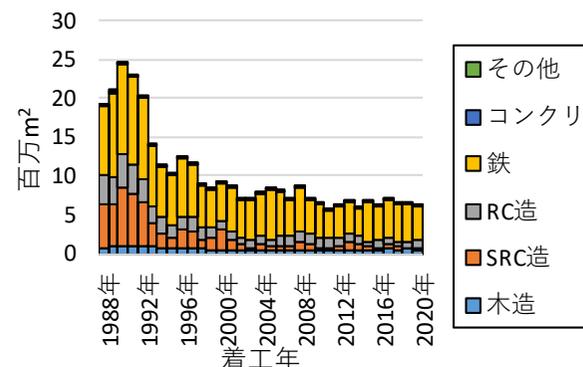
採用技術について複数の水準を定め、新築・改修施設における水準別採用率を想定。空調・給湯システムについては竣工設備データに基づき回帰モデルを開発。



採用技術の水準別Stock構成を定量化（右図は照明の例）

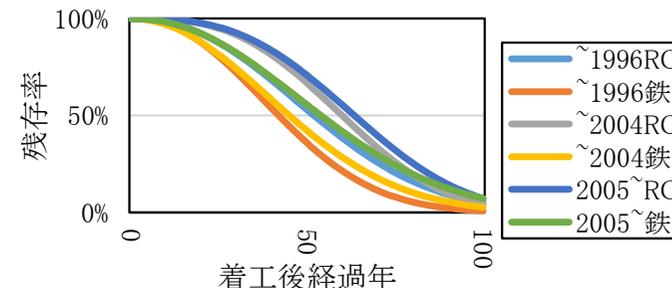
着工床面積

建築着工統計に基づいて整備

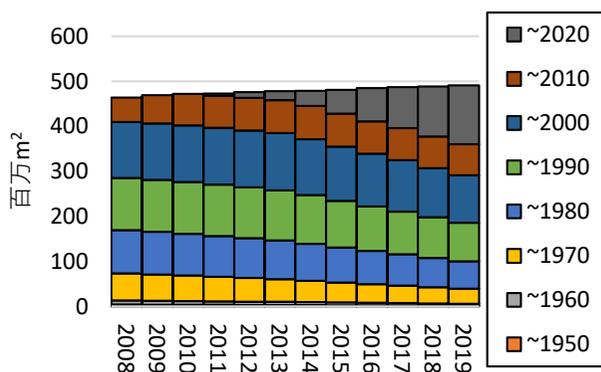


減失推計モデル

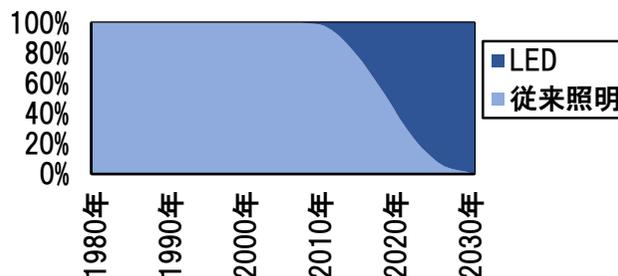
着工後の減失面積を推計



竣工年代別Stock構成の定量化



事務所における照明技術の採用率



業務部門進捗評価の設定条件

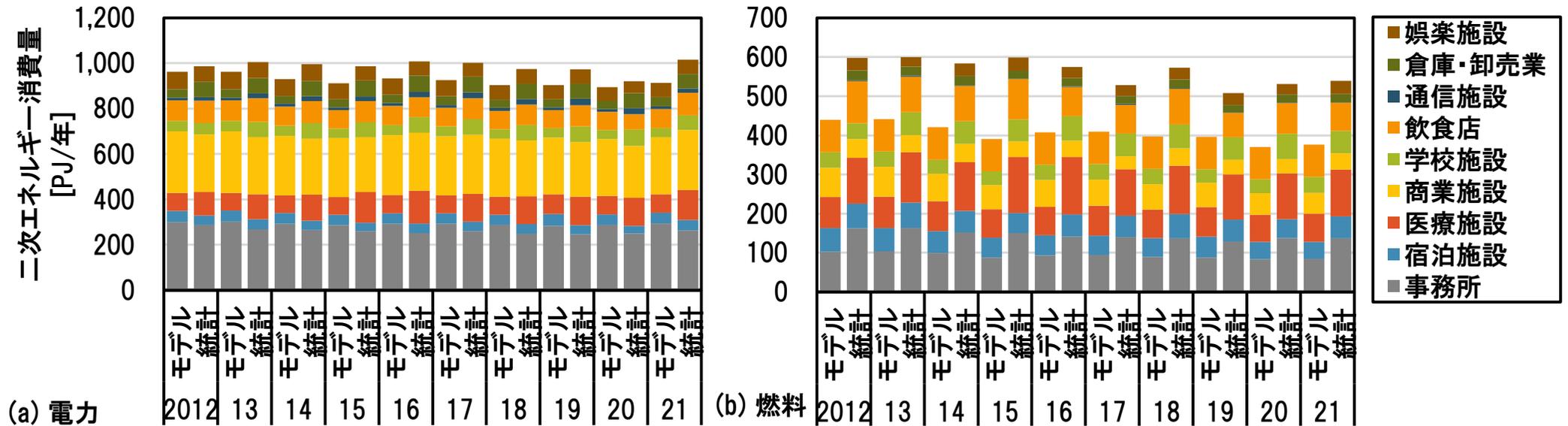
対策名	設定内容
高効率照明の導入	照明工業会自主統計に基づいて採用率を決定。15年に1回更新により2030年までにほぼすべての照明が高効率照明に代替される。
トップランナー制度	2030年までにコンセント機器消費電力が段階的に40%減少することを想定。
新築建築物の省エネ基準適合の推進	外壁断熱、窓種類について4水準を考慮。国交省データに基づき年度ごとの採用率を決定。空調設備、省エネ手法は2010年代の採用傾向の延長。これにより基準に適合することを確認。
高効率給湯器の導入	空調設備と同様に、2010年代の採用傾向が延長することを想定。

業務部門 | 比較対象：総合エネルギー統計の産業分類整理

- 産業分類に基づいて業務部門に含める業種を選定。施設用途と対応付け。
- 「その他部門」を業務部門と切り分け、業務部門を対象とする分析を可能にした。

モデルの施設用途	対応する産業分類(アルファベット:大分類, 数字:中分類)
事務所	E 製造業の管理部門, G 情報通信業(38~41), J 金融業, 保険業(62~67), K 不動産業, 物品賃貸業(68~70), L 学術研究・専門・技術サービス業(71), O 教育支援業(82), Q 複合サービス事業(86, 87), R 他サービス業(91,93), S 公務(他に分類されるものを除く)(97, 98)
宿泊施設	M 宿泊業, 飲食サービス業(75宿泊業)
商業施設	I 卸・小売業 小売業(卸売業除くもの56~61)
学校	O 教育, 学習支援業(81 学校教育)
医療施設	P 医療,福祉業(83 医療業, 84 保健衛生, 85 社会保険・社会福祉・介護業)
飲食施設	M 宿泊業, 飲食サービス業(76 飲食店, 77 持帰・配達飲食サービス業)
通信施設	G 情報通信業(37)
未考慮施設	H 運輸業・郵便業(47), I 卸売業・小売業 (50~55 卸売業), L 学術研究・専門・技術サービス業(72~74), N 生活関連サービス業・娯楽業(78~80), P 医療・福祉(84, 85), R 他サービス業(92)
業務以外 (その他部門)	F 電気ガス熱供給水道業(33~36), H 運輸業・郵便業(42~46, 48, 49), R 他サービス業(88~90), T 分類不能・内訳推計誤差

業務部門 | モデルの精度検証：総合エネルギー統計との比較



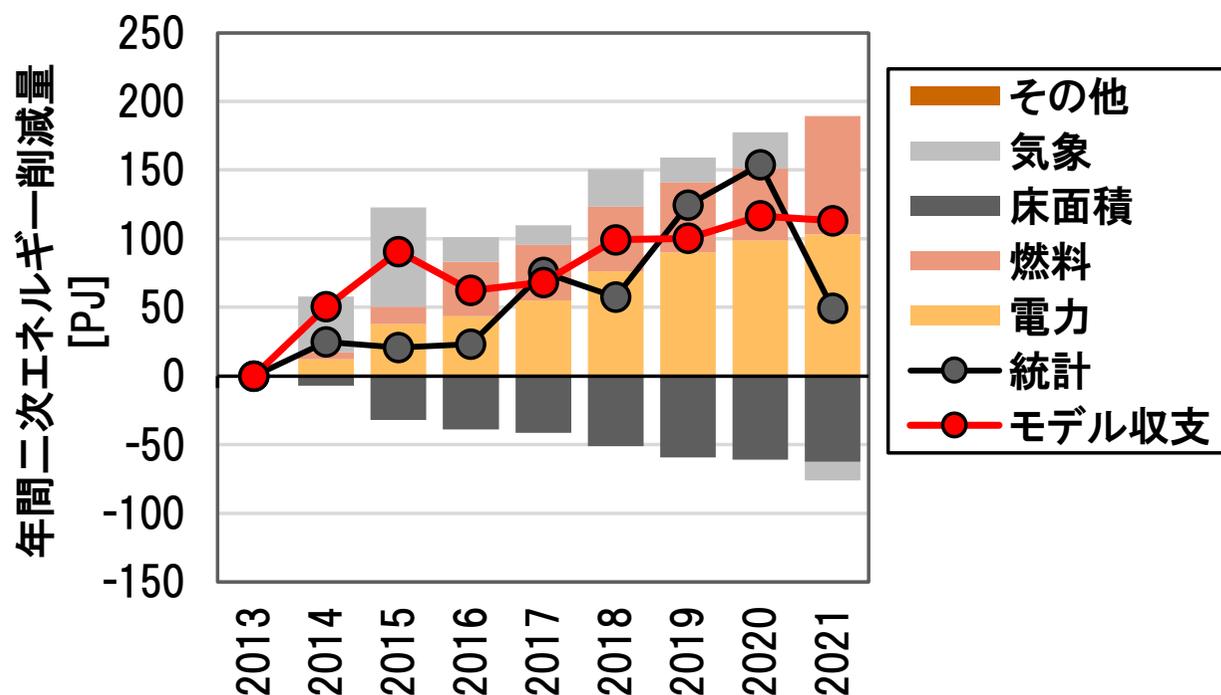
部門のカバー状況

- 延床面積で93%、最終エネルギー消費で92%に相当する業態を対象。燃料を過小推計。
- 地球温暖化対策計画で示されている対策に対応する需要はモデルで表現されている

誤差要因

- 総合エネルギー統計は産業分類別集計。モデルでは施設用途別に集計。
- 建築設備以外のエネルギーが含まれている
- 全産業は事務所を持つが、各業種に振り分けられている。 → 事務所は電力が過大推計。
- 学校における大学・研究施設、倉庫業における冷凍倉庫など、考慮できていない施設が存在する。
- コージェネレーション、融雪・消毒・洗浄など、複数の熱用途が未考慮。 → 燃料が過少推計。

業務部門 | 2013年度からの経年変化の推計結果

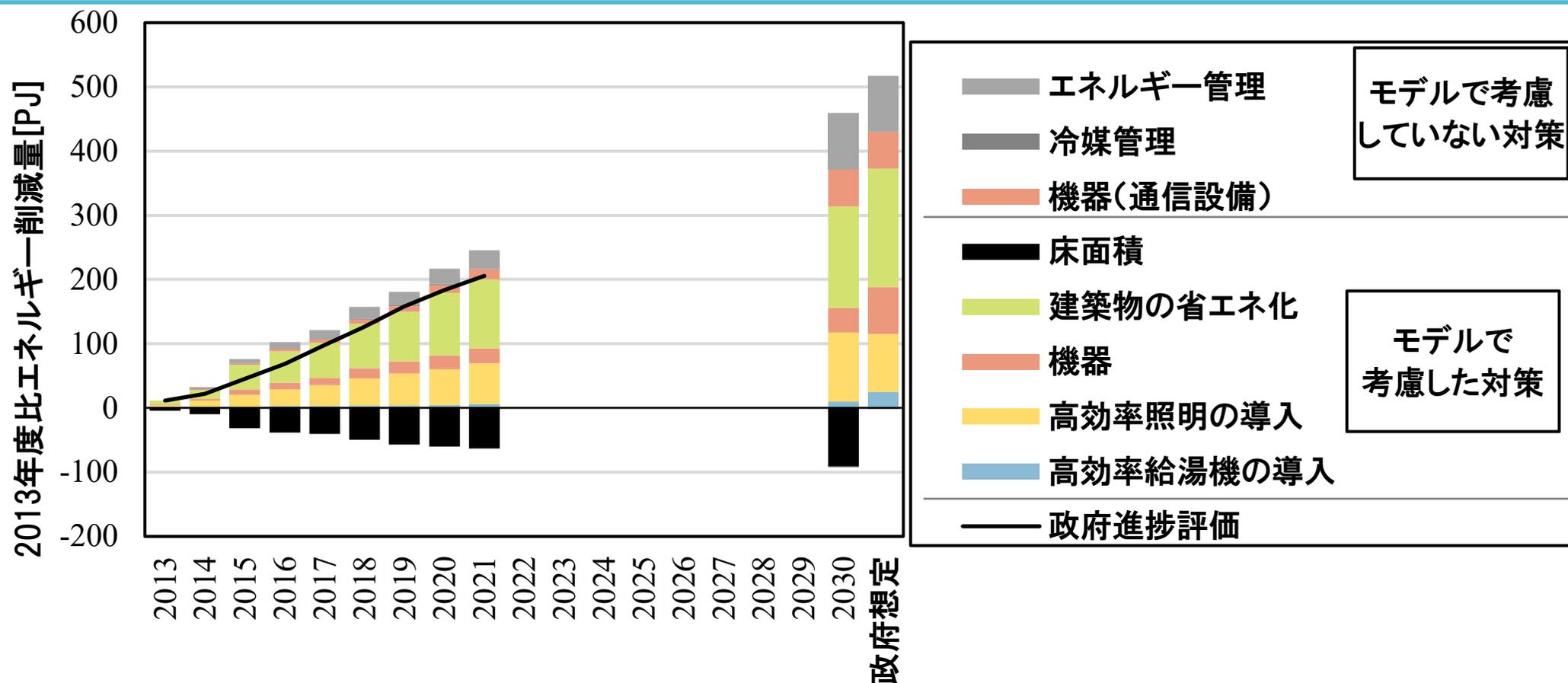


要因分解結果

	電力 [PJ/year]	燃料 [PJ/year]
統計 (2013-2021)	-4.0 ± 11.0	2.2 ± 11.1
統計 (2013-2019)	9.5 ± 5.7	16.4 ± 8.7
モデル (2013-2021)	12.4 ± 0.8	10.8 ± 1.7

- 合計1800PJ/年のうちの5%オーダーの変化であり、様々な要因が含まれている。
 - 考慮できていない需要の変化もあることから(特に燃料分)、完全に一致させることは困難。2020年度、2021年度は主にコロナ禍での活動変化に起因。
 - 右表にトップダウンモデルによる要因分解結果を示す。エネルギー効率改善による削減増の平均値は有意な差異はない。
- 開発モデルは経年変化をある程度正確に再現することに成功

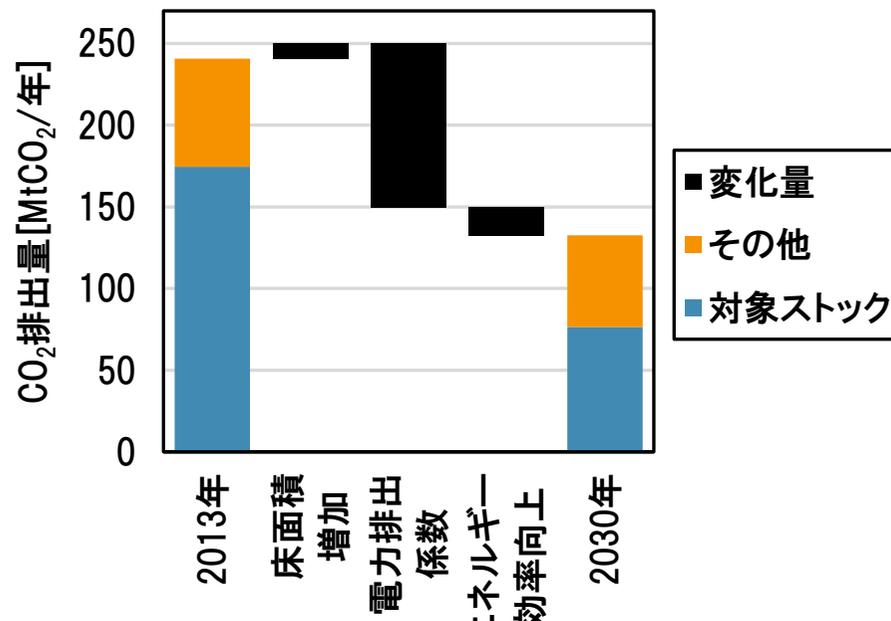
業務部門 | 地球温暖化対策計画進捗評価



- 未考慮の対策を含めると、モデルの推計(積み上げグラフ)は政府進捗評価(黒線)と同等
→ 政府推計はある程度妥当。
- 削減は順調に進捗しているが、床面積増加により相殺されている。
- 2030年目標の達成は困難と予想される(150 PJ不足)。
モデルは2010年代の技術採用の延長を想定。 → 目標達成には技術変化が必要。

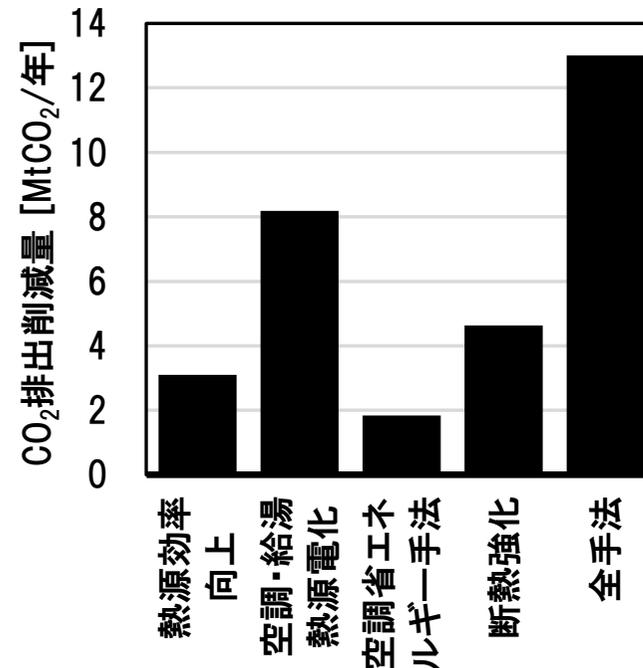
2030年削減可能性推計

- その他部門の需要は固定とした場合を想定
- 2030年推計値は133 MtCO₂/年(2013年度比56%)であり、17 MtCO₂/年不足。
- モデルで考慮できなかったエネルギー管理等の対策を加えると、6 MtCO₂/年の不足。



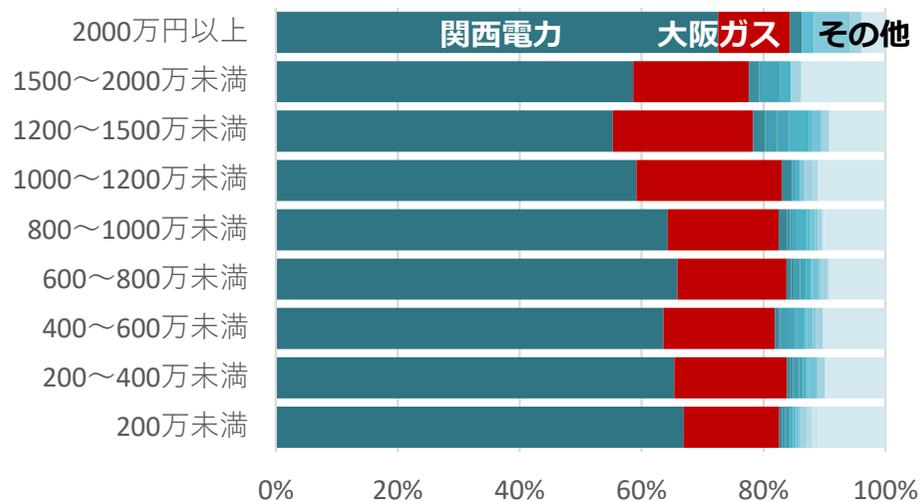
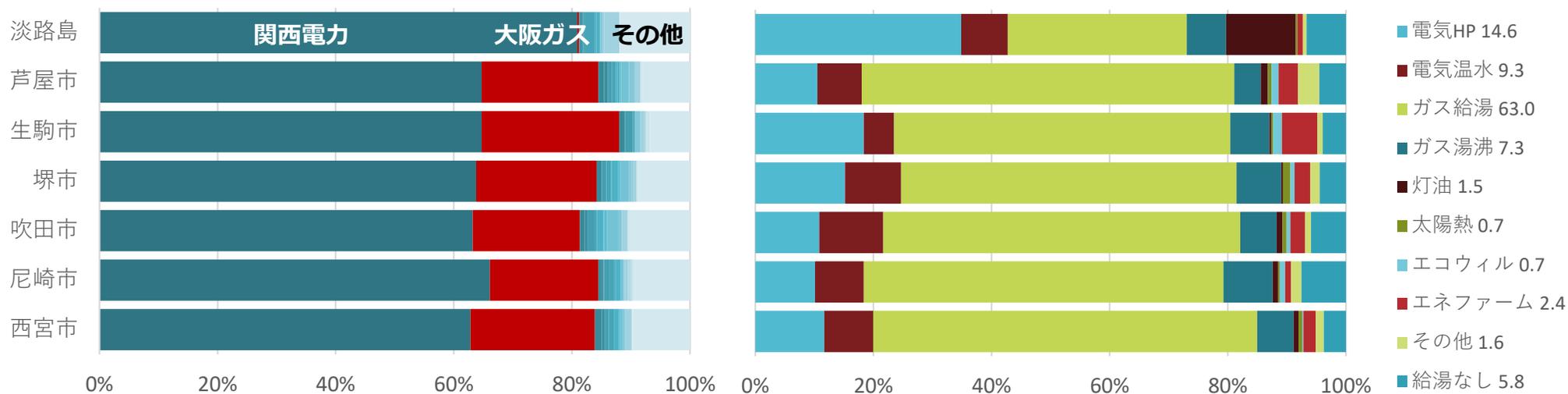
追加対策の評価

- 空調・給湯分野の省エネ手法普及、熱源電化によるポテンシャルは13 MtCO₂/年相当。
- 特に、電化施策が有効



CO₂排出の実態把握 | アンケート調査

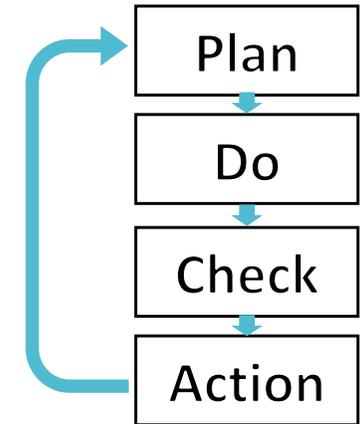
基礎自治体におけるCO₂排出の実態把握のため、家庭の保有設備と新電力を含めた契約電力会社に関する**大規模webアンケート調査を実施**



- 新電力への切り替え状況や給湯設備の保有実態は基礎自治体ごとに異なる
- Web調査では300サンプル/10万人程度のデータ取得が可能
- 家庭CO₂統計の粒度 (1万世帯/全国) では分析することが難しい

研究の達成状況（1. 目標を大きく上回る成果をあげた）

- カーボンマネジメントシステムとして求められる精度、各種温暖化対策が反映できる機能を十分に備えることができた。
- マネジメントのPDCAサイクルにおいて
 - Plan（温暖化対策計画2030年削減量の達成可能性検証）
 - Check（対策効果の定量化と2030年削減対策達成見通しの提示）
 - Action（追加対策の提案とその効果の予測）



の各ステップでこのモデルが使用可能であることが実証済み

- スマートメータデータを用いた逆問題解析によって家庭におけるエネルギー使用行動（睡眠、テレビ視聴、冷房使用）等を明らかにし、コロナ禍の行動変容の実態などライフスタイル変化を検知する可能性が見いだせた。

（地域のエネルギー・カーボンマネジメントへの応用）

- 基礎自治体単位では精度の高い統計が存在しないため、スマートメータやアンケートデータは、自治体の特性を再現する入力条件として有力
- 開発したデジタルツインモデルは近年利用可能となった自治体単位の受電データやスマートメータデータと相まって、自治体の温室効果ガス排出削減の有効なツール

大阪府に対する貢献

■ 大阪府環境審議会答申

「建築物の環境配慮のあり方について」（令和3年6月8日）

“規制の効果”や“達成すべき目標”に関するエビデンスを明らかにし、府民・事業者へ説明できることを見極めた上で、

- 非住宅：延べ面積が一定規模以上(2000㎡以上を予定)を対象に、外皮性能を建築基準関係規定化（義務化）する。
- 住宅：平均75㎡以上の住戸を持つ100戸以上の住棟について外皮性能および一次エネルギー消費量の適合義務化

■ 上記の効果について本研究のモデル等で評価

- 非住宅：事務所の断熱義務化で16%の省エネルギー効果はあるが、基準達成率が高いことを考慮すると規制の効果は小さい。また、小規模商業施設は基準達成不可能なものがある。
- 住宅：大阪府家庭部門のCO2排出量の0.04%、既築を全棟改修しても0.97%にとどまる。

■ 評価結果を担当者と議論（R3年10月21日, R4年7月7日）

- 住宅・非住宅とも規制の効果が府の想定よりも小さい。断熱水準を上げた場合などの結果が知りたい。
- 規制と府全体への効果の関係が評価できることは有意義
- 費用対効果などいろいろな評価に使用できるとありがたい。

国の施策への貢献

■ 中央環境審議会地球環境部会地球温暖化対策計画 フォローアップ専門委員会（下田が委員長）

■ 地球温暖化対策計画の進捗状況の評価

■ 令和4年4月26日に開催された第3回委員会、令和5年8月17日に開催された第6回委員会においてにおいて、本研究成果である家庭部門モデルの試算結果を提示。

中央環境審議会地球環境部会地球温暖化対策計画フォローアップ専門委員会 (第6回)

議事次第

1. 日時

令和5年8月17日(木) 10時00分～12時00分

2. 場所

WEBによる開催

3. 議事

- (1) 2021年度(令和3年度)の温室効果ガス排出量(確報値)に関する分析について
- (2) 本専門委員会の今後の進め方について
- (3) 委員からの情報提供
- (4) その他

<資料一覧>

資料1: 中央環境審議会地球環境部会地球温暖化対策計画フォローアップ専門委員会 委員名簿

資料2: 2021年度(令和3年度)の温室効果ガス排出量(確報値)に関する分析について

資料3: 本専門委員会の今後の進め方(案)

資料4: 下田委員長説明資料

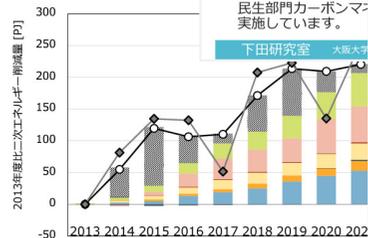
参考資料1: 2021年度(令和3年度)の温室効果ガス排出量(確報値)に関する分析について(資料集)

資料4

シミュレーションによる家庭部門の
エネルギー需要・CO₂排出削減の要因分析
(その2)

2023年8月17日
下田 吉之(大阪大学)

推計結果 | 2013年 |



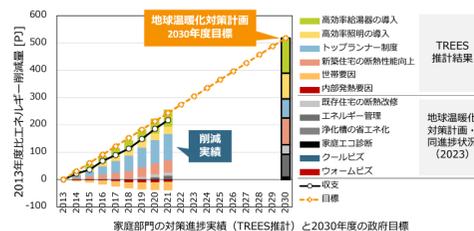
- ✓ 増減の傾向は統計値と近い
- ✓ 毎年の増減は気象の影響を強く受けている
- ✓ 2017年度は特定地域で乖離が大きく、統計誤差の可能性も
- ✓ 2020,2021年度は統計値と大きく乖離 ← 新型コロナウイルスによる

下田研究室 大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻

この研究は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費「国および自治体の
民生部門カーボンマ
実施しています。

下田研究室 大阪大学

推計結果 | 2030年目標に向けた進捗評価



- ✓ 2013年度から2030年度目標を直線で繋いだ
- ✓ TREESで考慮した6項目の効果が9割以上
- ✓ 2030年度目標達成に向けた進捗状況は順調で
はない可能性があるが、年々達成率は向上

下田研究室 大阪大学大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻

■ EDITS: Energy Demand changes Induced by Technological and Social innovations



- オーストリアのIIASA(国際応用システム分析研究所)が中心となり世界21機関のエネルギー需要に関する研究者が参加しているプロジェクト (<https://iiasa.ac.at/projects/energy-demand-changes-induced-by-technological-and-social-innovations-edits>)
 - 超低エネルギー需要社会やエネルギー需要のモデル化に関する共同研究、関連する情報交換を実施。
- ## ■ 上海交通大学
- 大阪大学のグローバルナレッジパートナーとして、中国上海交通大学Institute of Refrigeration and CryogenicsのYanjun DAI教授、Tao MA准教授との共同研究を実施し、業務建築のエネルギーモデルに関する研究を推進している。最近では、建材一体型太陽光発電の発電ポテンシャルについて、都市形態が屋根面、壁面に設置した太陽光発電の発電ポテンシャルに及ぼす影響を考慮可能なモデルを開発し、東京都を対象とするケーススタディを実施した。

研究成果の発表状況

1. 藤原みさき, 中西利樹, 下田吉之, 家庭部門における省エネルギー対策の進捗評価と追加策, エネルギー・資源学会論文誌 2023年 44 巻 6 号 p. 274-283, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjser/44/6/44_274/pdf/-char/ja

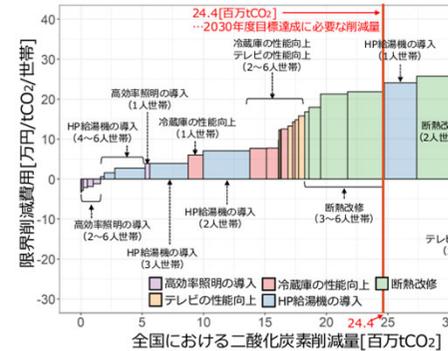


図 15 限界削減費用と二酸化炭素削減量の関係

(A)新規購入費用

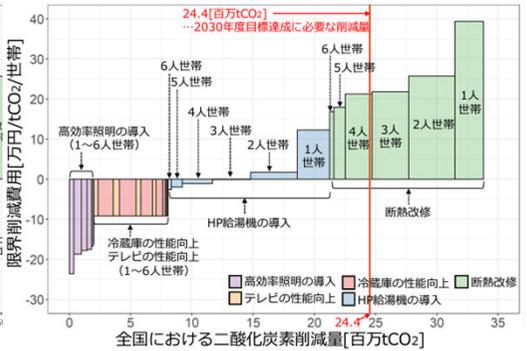
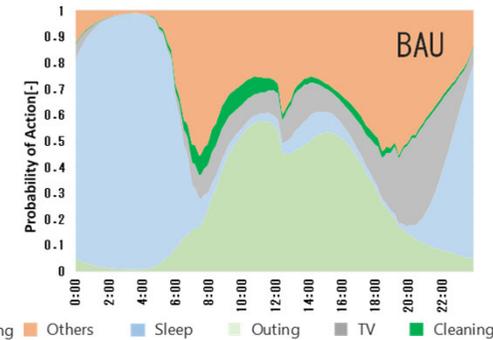
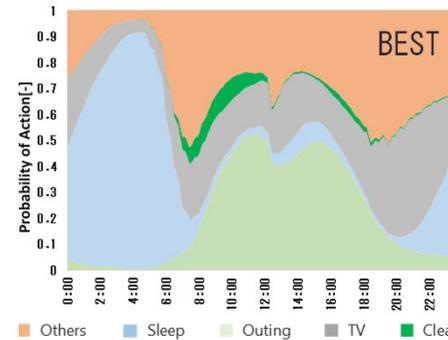


図 16 限界削減費用と二酸化炭素削減量の関係

(B)省エネ追加費用

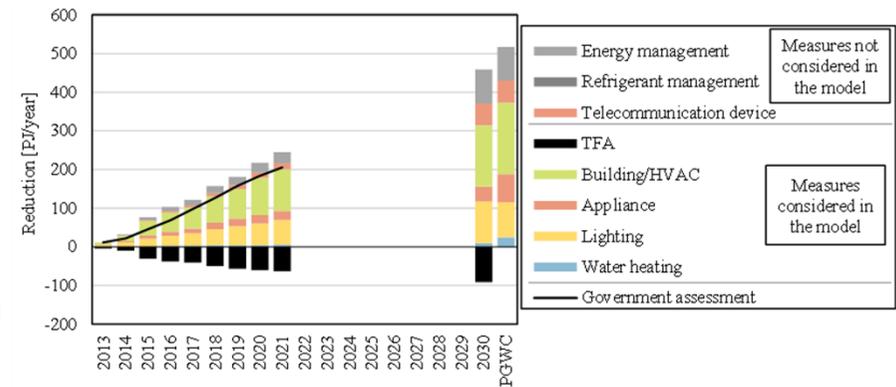
2. H. Uchida, K. Kishimoto, K. Nishizawa, S. Yoshiyuki, Y. Yamaguchi, K. Togawa: Aggregated Smart Meter Data Driven Occupant Behavior Analysis Based on Inverse Problem Optimization, Energy and Buildings (submitted), Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4605997>



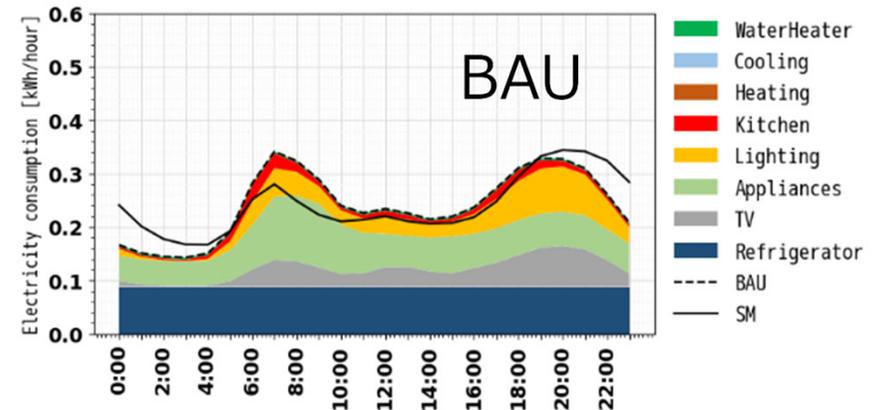
3. Y. Shimoda, M. Fujiwara, T. Nakanishi, Y. Yamaguchi, H. Uchida: Energy and carbon management system for a city and a nation, eceee 2022 Summer Study Proceedings, 2022, 4-182-22, [https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee Summer Studies/2022/4-monitoring-and-evaluation-for-a-wise-just-and-inclusive-transition/residential-energy-and-carbon-management-system-for-a-city-and-a-nation/2022/4-182-22_Shimoda.pdf/](https://www.eceee.org/library/conference_proceedings/eceee_Summer_Studies/2022/4-monitoring-and-evaluation-for-a-wise-just-and-inclusive-transition/residential-energy-and-carbon-management-system-for-a-city-and-a-nation/2022/4-182-22_Shimoda.pdf/)

研究成果の発表状況

4. Yohei Yamaguchi, Takumi Nishijima, Zhang Xukagn, Rihoko Shinohara, Yu Hahashi, Hideaki Uchida, Yoshiyuki Shimoda: Building stock energy modeling to assess annual progress in commercial building stock energy efficiency and carbon emission reductions, Applied Energy (submitted)



5. K. Nishizawa, K. Kishimoto, H. Uchida, S. Yoshiyuki, Y. Yamaguchi, K. Togawa: Analyzing and modeling occupant behavior by inverse problems with smart meter data, Building Simulation Conference Proceedings Vol.18 (ISSN: 2522-2708), 2023, 1407



6. Takumi Nishijima, Zhang Xukang, Yohei Yamaguchi, Atsushi Otsuka, Yoshiyuki Shimoda: Development of the building stock energy model for commercial building stock considering heterogeneity and yearly change in building stock, The 18th International IBPSA Conference and Exhibition Building Simulation 2023, September 4-6, 2023, Shanghai, China.

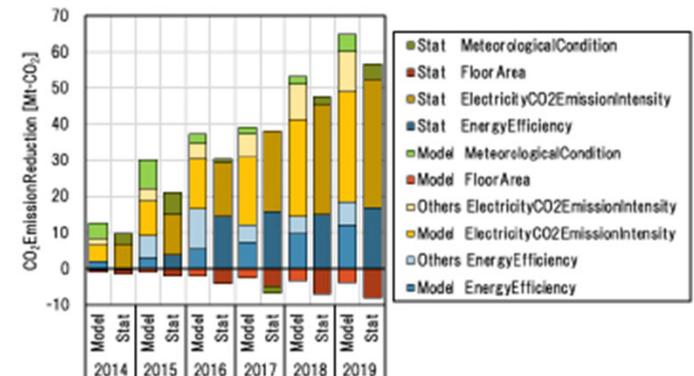


Figure 11: Composition of CO₂ emissions reduction.